

JDX-2021306A

2018 年度

「きぼう」利用テーマ・船内科学研究に係る科学成果評価 報告書

宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター 1. 概要

本資料は、2018年度(2019年1月から3月)に実施した、「きぼう」船内を利用した科 学研究テーマの科学成果評価の結果および評価への入力となった対象テーマの成果 報告書等を取り纏めたものである。

2. 評価対象

評価対象となったテーマを表1に示す。

これらのテーマは、2013年度~2017年度の間に軌道上実験を実施した9件の科学研究テーマである。

3. 評価の目的、評価指標

「きぼう」で行われた研究成果の達成状況とその意義、分野学術や社会への貢献、波 及効果に対する評価を通じて、各々の研究成果のアピールポイントを効果的に情報発 信すること、また、きぼう利用に関する改善点、利用の方向性等へ提言を得て、今後の 利用計画設定に資することを目的として評価が行われた。この目的に照らし、表2に示 す各評価項目に基づき、書類審査、面接審査(成果報告会)が実施され、評価結果 は、最終的に、以下の4段階の総合評価指標および提言として取り纏められた。

S:目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた(エクストラサクセス相当).

- A:目標を充分に達成した(フルサクセス相当).
- B:目標を一部達成した(ミニマムサクセス相当).
- C:成果として不足・不十分であり、目標を達成していない.

※2017 年度までの基準(以下)と異なる。

- S:目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた.
- A:目標を充分に達成した(エクストラサクセス相当以上).
- B:目標を達成した(フルサクセス相当).
- C:目標達成に不足・不十分な点があり、引き続き解析・検討を要す.
- 4. 評価体制

評価は、生命医科学分野あるいは物質・物理科学分野のきぼう利用テーマ選考評価 委員会(以下、「選考評価委員会」)により実施された。また、分野専門家3名のピアレ ビューアをテーマ毎に設定し、書類審査を併せて行い、選考評価委員会は、これを参 考として審査を行った。

ここで、選考評価委員会は、きぼう利用において、応募されたテーマ等の選考、設定された利用テーマ等の評価を行うために設置された JAXA 有人宇宙技術部門長の諮問 委員会であり、物質・物理科学分野及び生命医科学分野の2分野が設定されている。 今回、評価に当った選考評価委員会の構成員リストを表3に示す。

5. 評価プロセス

研究成果報告の提出から成果評価の公表までの評価プロセスを図4に示す。

6. 科学成果評価に係る文書

本資料に含めるテーマ毎の研究成果報告書、科学成果評価結果等を、表5に示す。 なお、選考評価委員会での成果評価時点から JAXA・HP 公開(現在)までの間に、研 究代表者より研究成果報告書内の論文リストの更新依頼があった場合は、研究成果 報告書の改訂を行っている。

テーマ名	研究代表者 (評価時)	実験時期(※)	成果評価 (委員会)	分 野
植物における回旋転頭運動の重 カ応答依存性の検証(Plant Rotation)	東北大学 教授 高橋秀幸	2015 年 2 月 ~8 月	2019 年 1 月 11 日	生命医
線虫を用いた宇宙環境によるエピ ジェネティクス (Epigenetics)	東北大学 教授 東谷篤志	2015 年 1 月 ~2 月	2019 年 2 月 21 日	科 学
線虫 C エレガンスを用いた微小重 カによる筋繊維変化の解析 (Nematode Muscles)	東北大学 教授 東谷篤志	2015 年 4 月	2019 年 2 月 21 日	
ISS 搭載凍結生殖細胞から発生し たマウスを用いた宇宙放射線の 生物影響研究(Embryo Rad)	放射線医学総合研 究所 部長 柿沼志津子	2015 年 4 月 ~2016 年 5 月	2019 年 2 月 22 日	
マウスを用いた宇宙環境応答の 網羅的評価(Mouse Epigenetics)	筑波大学 教授 高橋 智	2016 年 7 月 ~8 月	2019 年 2 月 22 日	
宇宙環境における線虫の老化研 究(Space Aging)	早稲田大学 客員主任研究員 本田陽子	2015 年 4 月 ~5 月	2019 年 3 月 8 日	
高プラントル数流体のマランゴニ 振動流遷移における液柱界面の 動的変形効果の実験的評価 (Dynamic Surf)	ケースウェスタンリ ザーブ大学 教授 鴨谷康弘	2013 年 10 月 ~2016 年 11 月	2019 年 2 月 26 日	物質物理
その場観察による溶液中のソーレ 効果の解明(Soret Facet)	早稲田大学 教授 鈴木進補	2014 年 7 月 ~2015 年 11 月	同上	科 学
ランダム分散液滴群の燃え広がり と群燃焼発現メカニズムの解明 (Group Combustion)	山口大学 教授 三上真人	2017 年 2 月 ~7 月	同上	

表1 評価対象テーマ

※ 医学実験の地上でのベースデータコレクションは含む。その他実験の地上対照実験は含まない。

表2 評価項目

	1.15	
	(1)	研究目標の意義および達成度
		• 研究目標の意義は高いか(ミッション選定/準備段階移行以降に修正された
		場合). また、時間経過により減じていないか.
Tal		• 研究目標は達成されたか. サクセスクライテリアに照らした達成度のレベル.
科学	(2)	実施体制
一		• 研究チームおよび JAXA の体制は適切であったか.
• 技	(3)	科学的、技術的成果
術		 得られた成果は、国際的なレベルに照らして、高いか。
的		• 設定された目標を越える成果があったか.
〕 〕 】	(4)	活用、波及効果
~		 関連科学分野・技術領域への波及効果があったか、また、期待されるか。
		 科学的、技術的に活用が見込めるか、成果活用の意義・重要性は高いか。
	(5)	きぼう利用の必然性
		 きぼうで行う必然性があったか。
総	(6)	総合評価
合提		 成果インパクト、応用・波及効果などのポテンシャル、他、アピールポイント。
評管		 今後の宇宙実験に向けての課題、改善すべき点。
1曲		 当該科学分野・領域におけるきぼう利用の発展性、継続の意義。

表3 きぼう利用テーマ選考評価委員会 構成員

(評価時。2017 年度の構成員から変更あり。)

物質·物理科学分野

委員長	長井 寿 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 名誉研究員
委員	石川 正道 国立研究開発法人 理化学研究所 イノベーション事業本部企業
	共創部 部長
	江刺 正喜 東北大学 マイクロシステム融合研究開発センター 教授
	福山 博之 東北大学 多元物質科学研究所 副所長/教授

生命医科学分野

委員長	山口 朗 東京歯科大学口腔科学研究センター 客員教授
委員	牛田 多加志 東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻 教授
	武田 伸一 国立研究開発法人 国立精神・神経医療研究センター 理事
	田村 宏治 東北大学大学院生命科学研究科 教授
	中村 耕三 医療法人社団 大坪会 東和病院 院長
	中村 幸夫 国立研究開発法人 理化学研究所バイオリソース研究センター細
	胞材料開発室 室長
	本間 研一 北海道大学大学院医学研究科 時間医学講座 名誉教授
	諸橋 憲一郎 九州大学大学院医学研究院分子生命系部門
	性差生物学講座 主幹教授



実験終了後、概ね2年後に、研究代表者より提出

テーマごとに 3 名程度の専門家が、専門的見 地から審査する。

ピアレビューの結果をもとに、選考評価委員会の各委員が各テーマを審査する。

研究者による成果報告、事前に実施済みの書 類審査結果(ピアレビュー結果、委員評価結 果)をもとに、委員会としての科学評価結果をま とめる。

図4 科学成果評価プロセス

テーマ名	研究成果 報告書	評価結果	研究成果 概要書(日)	研究成果 概要書(英)
植物における回旋転頭運動の重力 応答依存性の検証(Plant Rotation)	別紙 1-1	別紙 1−2	別紙 1-3	別紙 1-4
線虫を用いた宇宙環境によるエピジ ェネティクス (Epigenetics)	別紙 2−1	別紙 2−2	_	_
線虫 C エレガンスを用いた微小重力 による筋繊維変化の解析(Nematode Muscles)	_	_ (※2)	_	_
ISS 搭載凍結生殖細胞から発生した マウスを用いた宇宙放射線の生物影 響研究(Embryo Rad)	(※1)	別紙 4−2	_	_
マウスを用いた宇宙環境応答の網羅 的評価(Mouse Epigenetics)	別紙 5-1	別紙 5−2	別紙 5−3	別紙 5−4
宇宙環境における線虫の老化研究 (Space Aging)	(※1)	別紙 6−2 (※3)	(※1)	(※1)
高プラントル数流体のマランゴニ振動 流遷移における液柱界面の動的変 形効果の実験的評価(Dynamic Surf)	別紙 7−1	別紙 7−2	_	_
その場観察による溶液中のソーレ効 果の解明(Soret Facet)	別紙 8-1	別紙 8−2	_	_
ランダム分散液滴群の燃え広がりと 群燃焼発現メカニズムの解明(Group Combustion)	別紙 9−1	別紙 9−2	別紙 9-3	別紙 9-4

表5 添付文書の構成

※1 論文公表後に公開

※2 <委員会のコメント>

本研究(Nematode Muscles)は、技術的問題で不調に終わったが、筋萎縮を含め、線虫を モデル生物とした研究は重要であり、ヒトを含む脊椎動物での研究に繋げて欲しい。 そのためにも、今回の不調の原因と今後の対応について整理しておく必要がある。また、 N=1は、実験計画として避けるべきであり、少なくとも、複数とすること。

尚、本ミッションは、科学成果が出ていないので、委員会としては、評価対象としない。 ※3 論文公表後に評価コメントを公開。現在、評定のみ公開。

以上

別紙1-1

 ISS・きぼう利用ミッション

 「植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証 (Plant Rotation)」

 研究成果報告書

 代表研究者:
 高橋 秀幸(東北大学大学院生命科学研究科)

 平成 30 年 8 月



1. 緒言

回旋転頭運動は、植物体が効率的に好適環境を見出す戦略として重要な役割を果たすと考えられてい る (Fig. 1)。例えば、蔓性植物では、蔓が「よじ登り」によって植物体の生存を可能にするために、比 較的大きな回旋転頭運動によって支柱に巻きつく。この回旋転頭運動は、「ねじれ」によるものではな く (Cafe et al. 1998)、各器官で偏差成長する部位が連続的に移動することによって生じ、その周期性や 様式は植物種や器官によって異なる。例えば、シロイヌナズナの花茎は約90分で1回転することが知 られており、またカラスムギの幼葉鞘は約110-130分、インゲンのシュートは約120分、ヒマワリの幼 苗は約153分、アサガオの花茎は約160-300分で1回転することが報告されている (Someya et al. 2005、 Israelsson and Johnsson 1967, Hou and Li 1997, Berg and Peacock 1992, Hatakeda et al. 2003)。また、根の回 旋転頭運動においては、トウモロコシの場合約80-120分、ヨーロッパナラの場合約3時間、リンゴの 場合約 6.8 時間、イタリアンライグラスの場合約 7.6 時間、エンドウの場合 7.7 時間で1回転するとい う報告があるが、これは実験・生育条件によっても異なる (Barlow et al. 1994)。



Circumnutation = Circular movement of elongating organs such as stem and root It has been debated whether circumnutation involves gravitropic response or not.

Fig. 1. Plant circumnutation.

回旋転頭運動の生じるしくみはわかっていないが、二つの説が提唱されていた。一つは、その過程を 制御する internal oscillator (内的振動子)を想定したモデルであり (Brown et al. 1990, Barlow et al. 1994, Antonsen et al. 1995)、もう一つは、伸長器官が重力屈性で鉛直方向以上に曲がって(オーバーシュート)、 その反対方向に戻るように屈曲することを繰り返し、振り子のような運動をすることが原動力となって いると考えるモデルである (Israelson and Johnsson 1967, Johnsson and Heathcote 1973, Johnsson 1979)。ま た、Johnsson (1997) は、内因性の振動子が植物器官の振動を引き起こし、この内的因子を重力応答など の外的要因がフィードバック制御することで回旋転頭運動を誘導するという、two-oscillator モデルを提 唱した。内的振動子がどのようなものかはわかっていないが、回旋している器官ではカルシウムやカリ ウムイオン、植物ホルモンのオーキシン、そして膨圧変化等の偏りの生じる可能性が考えられている (Badot et al. 1990, Johnsson 1997, Iida et al. 2017)。内因性の律動的なイオンの流出入と回旋転頭運動との 間に相関関係があることも報告されている (Millet et al. 1984, 1988, Shabala and Newman 1997)。さらに、 カルシウムポンプによって Ca²⁺濃度を周期的に調節するしくみである Ca²⁺ oscillations は、さまざまな 植物細胞システムの一部を担っており、回旋転頭運動の周期の長さとも関連すると言われている(Blatt et al. 2007)。しかし、現在のところ、これらの要因の偏りが、回旋転頭運動を制御しているのか、もし くはそれが、器官が屈曲した結果として生じているのかは、はっきりしていない。回旋転頭運動に関与 する成長物質として、オーキシン、エチレン、ジャスモン酸などが報告されている (Johnsson 1997, Iida et al. 2017)。このうち回旋転頭運動に関与する可能性の最も大きいと考えられているのが、オーキシン である。オーキシンは、植物の成長や発生の様々な局面に関わる重要な植物ホルモンである。根やシュ ートが光や重力に対して示す屈性反応にも、オーキシンが深く関与する。このような現象を制御するた めに、オーキシンは主に茎頂や若い葉で生合成され、植物体の様々な場所へ輸送される。エンドウの茎 頂を切除することによってシュートの回旋転頭運動が停止し、また、その際、茎頂の切断面に IAA を投 与することで回旋転頭運動が回復することが報告されている (Tepper and Young 1996)。シロイヌナズナ では、茎頂を切除後、約12時間程度は回旋転頭運動が継続するが、その後停止する (Niinuma et al. 2005)。 このとき、エンドウと同様に、シロイヌナズナ花茎の切断面に IAA を投与すると回旋転頭運動が継続 する。回旋している茎頂部にオーキシンの極性輸送阻害剤である 1-naphthylphthalamic acid (NPA) もし

くは2,3,5-triiodobenzoic acid (TIBA)を処理すると、濃度依存的に回旋速度が低下もしくは停止することからも、シュートの回旋転頭運動には、茎頂からのオーキシン供給が必要であると考えられる。

回旋転頭運動と重力応答の関係

回旋転頭運動における重力応答の関与については、Darwin 親子 (1881)がはじめて詳細に観察してい るが、その後、いろいろな実験結果に基づく論争が続いた。例えば、ヒマワリの幼苗の回旋転頭運動は クリノスタットで回転させて植物体が受ける重力方向を攪乱すると抑制されるが、スペースシャトル内 に持ち込まれたヒマワリの回旋転頭運動は、小さくなるものの、微小重力下でも観察された (Brown and Chapman 1984, Brown et al. 1990)。このことから、重力そのものが回旋転頭運動を引き起こす内因性オシ レーターに関係するとは考えられず、むしろ、内因性のオシレーターによって生じた運動を促進するよ うに働くと考えられた (Israelson and Johnsson 1967, Johnsson and Heathcote 1973, Johnsson 1979)。この重 力作用は、前述したように重力屈性で器官が垂直方向以上に過剰に屈曲するオーバーシュートに起因す るとの考え方もある (Israelsson and Johnsson 1967)。植物体をクリノスタットで回転させると、重力屈性 とともに回旋転頭運動も消失する (Chapman et al. 1980, Johnsson 1997, Tomita et al. unpublished data)。ま た、Zachriassenら (1987) は、ヒマワリの芽生えに 3G を負荷すると、1G 下のものに較べて、胚軸の回 旋転頭運動が促進されることを報告している。しかし、Brown と Chapman (1984)の宇宙実験では、地 球上で育てた植物体を供試しており、その地上重力という前歴が宇宙空間での回旋転頭運動に影響を与 えた可能性も残る。事実、Antonsen と Johnsson (1998)は、回旋転頭運動のためのオシレーターの確立に は生育初期における重力影響が必要であること示している。Johnsson ら (2009) は、シロイヌナズナの 花茎の回旋転頭運動を解析し、微小重力下の植物体に 0.8G の重力を負荷することによって回旋転頭運 動が大幅に増幅されることを報告している。また、微小重力下でも小さいながらも回旋転頭運動を示す ことを報告しているが、その小さな運動の解析は技術的に難しいとも記述している。

重力屈性突然変異体の回旋転頭運動

一方、われわれは、重力屈性を欠損したアサガオの突然変異体(シダレアサアガオ)の回旋転頭運動 を解析し、回旋転頭運動と重力応答の関係を明らかにしようとしてきた。アサガオは代表的な蔓性植物 で、支柱に巻きついてよじ登る。われわれは、シダレアサガオが、重力を感知するのに必要な重力感受 細胞を正常に分化させることができず、それが原因で重力屈性と回旋転頭運動を示さず、支柱に巻きつ けずに枝垂れることを明らかにした (Fig. 2; Kitazawa et al. 2005, 2008)。この重力感受細胞の分化には SCARECROW (SCR) 遺伝子を必要とすることが知られていた (Di Laurenzio et al. 1996, Fukaki et al. 1998)。 そこで、シダレアサガオと正常なアサガオの PnSCR 遺伝子の塩基配列を比較した結果、シダレアサガ オの PnSCR タンパク質には、正常なものと比較して、特定の保存された領域にアミノ酸が1個挿入さ れていることがわかった (Fig. 2)。このシダレアサガオと正常なアサガオそれぞれの PnSCR 遺伝子を、 モデル生物として知られるシロイヌナズナの同様な突然変異体 (シロイヌナズナでもこの遺伝子に異常 が生じると、重力感受細胞が正常に分化せず、重力屈性と回旋転頭運動が起こらなくなる)に導入した ところ、正常なアサガオの PnSCR 遺伝子を導入したときだけ、シロイヌナズナ突然変異体の重力感受 細胞の分化、重力屈性、回旋転頭運動を回復させることができた (Kitazawa et al. 2005)。このことは、 PnSCR 遺伝子がアサガオの重力感受細胞の分化に必要で、その遺伝子変異によってシダレアサガオが 重力屈性と回旋転頭運動を正常に発現できずに枝垂れることを示している。これらの結果は、重力感受 細胞がアサガオのよじ登り、その原動力となる回旋転頭運動に必須であることを示している。加えて、 われわれは、シロイヌナズナの重力屈性突然変異体 (pgm-1, axr2-1, sgr-1-1 / scr-3, sgr7-1 / shr-2) が回旋 転頭運動に異常を示すことも明らかにした (Hatakeda et al. 2001, Kitazawa et al. 2005)。 Tanimoto ら (2008) も、シロイヌナズナの重力屈性突然変異体 shoot gravitropism 5 で同様なことを報告している。

その後、重力屈性突然変異体であるイネ *lazy1* (Fig. 3; Abe *et al.* 1996) の幼葉鞘は回旋転頭運動を欠損 していることが報告された (Yoshihara and Iino 2006, 2007)。Yoshihara と Iino (2006) は、*lazy1* の幼葉鞘 は回旋転頭運動を完全に消失しているが、重力屈性を示す能力を十分に維持しているとして、必ずしも 重力屈性を回旋転頭運動の原因と考えることはできないとしている。彼らは興味深いことに、回旋転頭 運動が特定の内在性の機構によって制御されていて、その調節に重力感受が関与している可能性がある とも述べている。しかし、われわれがこのイネ幼葉鞘における回旋転頭運動と重力屈性の関係を詳細に 解析した結果、以下のことが明らかになった。



Fig. 2. Shoots of *weeping 1* morning glory lack gravitropic response and circumnutation. A mutation in *SCR* gene is responsible for the defect in the differentiation of gravisensing cells, gravitropism and circumnutation (Modified from Kitazawa *et al.*, PNAS 2005)



Fig. 3. Direction of tiller growth in wild-type and *lazy1* rice plants.



Fig. 4. Gravitropic responses and elongation growth in wild-type and *lazy1* rice coleoptiles at different stages of growth. (A-C) Seedlings were gravistimulated by reorienting them in a cuvette to the horizontal axis at different stages of growth and incubated in the dark for 24 h. (D-F) Gravitropic curvature of seedling shoots was measured using ImageJ. Data show the mean \pm SE (*n*=22–23). (G) Coleoptile length was measured using ImageJ from photographs taken every hour for 3 days in the dark. Each data point represents the mean \pm SD (*n*=6). Stages of seedling growth (Stage I to III) were classified according to Abe et al. (1994a).

すなわち、われわれは、重力屈性突然変異体である *lazy1*のイネ幼葉鞘の重力屈性能を評価するため に、種子を暗所 28°C で催芽し、44 時間齢 (Stage I)、68 時間齢 (Stage II)、92 時間齢 (Stage III)の 3 つ の発育ステージに分け、それぞれのステージに達したイネ芽生えを、暗黒下で横倒しにし、その 24 時 間後の屈曲角度を測定した (Fig. 4)。その結果、野生型の幼葉鞘は、いずれのステージにおいても完全 な重力屈性を示した (Fig. 4)。一方、*lazy1*の重力屈性は Stage I で既に不完全になっており、ステージが 進むにつれてさらに低下し、Stage III では完全に失われることが明らかになった (Fig. 4)。次に、Stage I から Stage III までの 72 時間、暗黒下で垂直置きにしたときの幼葉鞘の回旋転頭運動と伸長量を解析し た (Fig. 5)。その結果、野生型では、Stage I の後期、Stage II の全過程、Stage III の前期で明瞭な回旋転 頭運動がみられたが、*lazy1*では Stage I で不規則ではあるがわずかな運動を示し、その後、回旋運動を 失う傾向が認められた (Fig. 5)。また、このときの幼葉鞘の伸長量を測定した結果、野生型と突然変異 体の間に差はなく、Stage III の後期ではほとんど伸長がほとんど停止した。これらの結果は *lazy1*のア リル突然変異体である '秋田寝太郎'でも同様であった (Fig. 5)。したがって、Stage I の 前期で突然変異体の回旋転頭運動がみられない原因は、重力応答の低下による可能性が考えられた。一 方、Stage III の後期で回旋転頭運動を示さないのは、そのための十分な伸長を伴っていないためである と考えられた。

本 Plant Rotation 宇宙実験の準備過程で、重力屈性を欠損したエンドウ突然変異体 ageotropum の根も 回旋転頭運動を示さないことがわかった (Kim et al. 2016)。



Fig. 5. Circumnutational movement and elongation growth of coleoptiles in wild-type, Lazy-Kamenoo (*lazy1*) and Akitanetaro rice plants. *Akitanetaro* is an allelic mutant of *lazy1* (unpublished data).

このように、双子葉植物と単子葉植物、および地上部器官と地下部器官のいずれでも、重力応答が 回旋転頭運動に重要な役割を果たすものと考えられる。そこで本宇宙実験は、微小重力環境を利用し て「植物の回旋転頭運動の重力応答依存性」に関する仮説を検証することを目的として行われた。

2. 研究計画

2.1 研究目的および方法

生命維持の基盤となる植物は、重力をシグナルとして利用し、陸地環境において生存に必要な形

態、姿勢、伸長方向の制御を可能にした。この植物の重力応答の研究は、植物の生物進化、生物生 産、環境応答の仕組みを解明するという、生物学的視点からだけでなく、人類の宇宙活動のための生 命維持システムの構築、そして食料、エネルギー、環境など地球的課題を解決する糸口を見出すため にも、極めて重要である。こうした重力応答または重力形態形成でよく知られているのが重力屈性で あるが、植物の他の成長現象も重力応答によって制御されることが報告されている。例えば、茎や根 などの器官が首(先端部)を振り、回旋しながら伸長する「回旋転頭運動 (circumnutation)」も、重力 の影響を受けると考えられてきた。回旋転頭運動は、ほとんどの植物の伸長器官にみられ、植物の生 存戦略の一環として重要な形質であると考えられたことから、Charles Darwin とその息子の Francis Darwin の研究 (1881) 以来、多くの研究者がそのメカニズムならびに重力応答との関係を明らかにし ようとしてきた。しかし、回旋転頭運動の原動力やメカニズムについては諸説あり、重力応答の必要 性についても未だ論争が続いている (Kiss 2006, 2009)。そのような状況下で、本研究代表者らは近 年、アサガオ、シロイヌナズナ、イネの重力屈性突然変異体が重力屈性のみならず、回旋転頭運動を も欠損することを見出した。これは、回旋転頭運動が重力応答に依存することを示すものとして注目 されている。そこで本提案の宇宙実験では、微小重力環境を利用して「植物の回旋転頭運動の重力応 答依存性」に関する仮説を検証するとともに、宇宙空間における植物育成法の開発に資する知見を得 ることを目的とした。

作業仮説:

植物の回旋転頭運動は重力応答を必要とすると考えられ、重力応答不在の微小重力下では、回旋転頭運動が著しく阻害されるか、その回旋様式が変化する。

実験方法

植物種子を軌道上微小重力下で発芽・生育させ、それら芽生えの微小重力下および 1G (遠心機による人工重力)下での成長・運動を動画として撮影・記録する。それらの画像をダウンリンクし、比較解析することによって、重力が回旋転頭運動に及ぼす影響に関する上記仮説を検証する。これまでの宇宙実験で問題とされた前歴としての重力環境の回旋転頭運動に対する影響を明らかにするために、1G から µG に、µG から 1G に植物体を移す実験区も設定する。また、アサガオおよびイネの重力応答突然変異体の微小重力下での運動を比較解析するために、それぞれの野生型に加えて、アサガオの weeping1 とイネの lazyl を用いる。

本実験では、植物育成装置として、これまでに ISS 宇宙実験でも使用実績のある Plant Experiment Unit (PEU; 95x240x170 mm)を用いる(Yano et al. 2013)。PEU にセットする植物育成容器は 60x 60x50 mm と小型であるが、画像取得のためのカメラと LED 照明システムを装備し、撮影は地上から操作で きる。容器内の培地は厚さ 10 mm のロックウールとし、アサガオの場合は野生型と突然変異体の種子 を 3 個ずつ、イネの場合は野生型と突然変異体の種子を 6 個ずつ、1 容器中に播種する (Fig. 6)。アサ ガオ種子は、発芽促進のために、発芽孔周辺に均一な傷を付ける。容器あたり 20 mL の蒸留水で種子 吸水し、軌道上実験では、PEU にセットした後に Cell Biology Experiment Facility (CBEF) に取り付け る。CBEF 内でアサガオの場合は 25℃、イネの場合は 28℃ で培養する。発芽後の植物体の成長をモニ ターするために、軌道上実験では LED 照射によるフラッシュライト(白色光; 8.5 µmol m⁻² s⁻¹)撮影 を行うが、地上対照実験では、LED フラッシュライト撮影に加えて、暗所で赤外線カメラを用いた撮 影を行う。

軌道上実験は、4 つの実験区 (Run 1, Run 2, Run 3, Run 4)に区分して実施する (Fig. 7)。宇宙 1G 区は CBEF 内で遠心機に固定した PEU を回転させることによって、宇宙 μG 区は PEU を静置することによ って設定する。Run1 と Run2 はアサガオを用い、Run3 と Run4 は、イネを用い、Run1 と Run3 では給 水後にµG下で培養し、生育(撮影)後半に1Gに切り替え、Run2とRun4では逆に、給水後に1G下 で培養し、生育(撮影)後半にµGに切り替える。後半でのG環境の変更は、前半の条件での十分な 撮影の後に試みる。PEU内の植物体の間欠撮影は、15分ごとに10秒間の撮影を行うことにする。得 られる画像イメージは、地上にダウンリンクされ、JAXAのイメージキャプチャーソフト(UiAppお よびipuApp ソフトウエア-)を用いて静止画像として取り出す。それらの各時間の静止画像から ImageJ 画像解析ソフトを用いて、アサガオ胚軸およびイネ幼葉鞘の先端の動きを時間(x)軸上にプロッ トするとともに、伸長量を計測する。







Fig. 7. Plant Rotation experiments consisted of four runs under 1G and microgravity conditions in space.

Inc 41/42, Inc 43/44							
JEM:	_						
	Morning	Rice	1 <i>g</i> Ro	tation	Operation	Remarks	
	glory Run1,2	Run3,4	Run1,3	Run2,4			
	days	days					
SpX-5	0	0	Off	On	Watering in PEU and installing PEU into	20 ml / chamber x	
					CBEF by crew	2	
					Start of incubation	2 PEU	
						Install to 1g	
Launch: SpX-5	1-3	2-4	Off	On	D/L of PEU-camera images		
Mass Up 1.43 kg	3-5	4-7	On	Off	D/L of PEU-camera images		
L							

2.2 体制

研究代表者:

高橋秀幸 (東北大学大学院生命科学研究科)

共同研究者:

小林啓恵(東北大学)、藤井伸治(東北大学)、宮沢豊(山形大学)、

矢野幸子(宇宙航空研究開発機構)、嶋津徹(一般財団法人日本宇宙フォーラム)、山崎千秋(一般財 団法人日本宇宙フォーラム)、伏島康男(一般財団法人日本宇宙フォーラム)、鎌田源司((株)エイ・ イー・エス)、笠原春夫(有人宇宙システム(株)) 研究協力者: Kim Hye-jeong、冨田優太、宮林彩智子(東北大学) 支援: 'きぼう'運用チーム ISS クルー(油井亀美也、Terry W. Virts)

2.3 スケジュール

本実験は、2012年2月に「きぼう」船内実験室第2期利用に向けた追加候補テーマとして採択され、 その宇宙実験の実現に向けて各種検討を重ね、2013年1-3月にJEM実験要求書としてベースライン化 されると同時に、フライト実験準備移行審査を経て、実験計画書を完成させた。この過程で、使用する アサガオとイネの芽生え育成容器 (Plant Rotation chamber)、芽生えの育成環境、解析のための画像取得 方法、記録する芽生えの発育ステージ等を中心に検討し、実験計画書を作成した。とくに、この実験の ための新規の実験機器の開発をはじめ、赤外線カメラの搭載・使用も不可という条件で、これまで運用 実績のある植物実験ユニット (PEU) および LED 可視光を用いたフラッシュライト間欠撮影で芽生え の成長と運動を記録する必要があった。しかし、地上実験の結果から、イネ芽生えの幼葉鞘の伸長およ び回旋転頭運動が抑制されながらも、イネおよびアサガオの芽生えの回旋転頭運動を解析することが可 能であったため、宇宙実験でも微小重力の影響を解析することが可能であると判断した。その後、PEU 適合性試験、振動試験、クルートレーニングを実施するとともに、フライト試料の準備と引き渡しを行 い、2015年1月11日に打ち上げられた。2015年1月22日のキックオフミーティングおよびサイエン スシンポジウムを経て、軌道上実験を実施した。

実験材料は、2015 年 1 月 11 日 (JST) に打ち上げられた Space X5 によって ISS に搬入され、Run1 の 軌道上実験が 2015 年 2 月 11 日から 2 月 17 日まで、Run2 の軌道上実験が 2015 年 2 月 17 日から 2 月 24 日まで、Terry W. Virts 宇宙飛行士によって実施された。また、Run3 の軌道上実験が 2015 年 7 月 28 日 から 8 月 6 日まで、Run4 の軌道上実験が 2015 年 8 月 17 日から 8 月 26 日まで、油井亀美也宇宙飛行士 によって実施された。

また、Plant Rotation の実験概要のホームページを JAXA web サイト上に公開し、軌道上実験の開始に ついてはプレスレリースを行った。



Fig. 8. Plant Rotation spaceflight experimental procedure. Rice and morning glory seeds were sown in Rockwool in a Plant Rotation chamber on the ground. The chambers, together with water-containing plastic syringes, were launched by SpaceX-5. In the ISS KIBO module, each Plant Rotation chamber was placed in the PEU unit. Following water supply to induce seed germination, the PEUs were enclosed in the CBEF and incubated under microgravity or 1*g* conditions in space. During incubation, images of seedlings were captured every 15 min and downlinked to the ground for analysis.

3. 実験準備·運用

前項でも述べたように、候補実験テーマとして採択された後の準備は、植物育成および画像取得 に、これまで ISS 宇宙実験で使用実績のある植物実験ユニット (PEU) を使用することを前提として、 概ね順調に進められた。ただし、本宇宙実験における最大の課題は、植物(アサガオ胚軸、イネ幼葉 鞘)のわずかな運動を解析できる画像取得法にあった。そのために、アサガオおよびイネの芽生えの 生育に対する PEU 環境の影響、画像の取得法と解像度、そして運動の解析方法の検討に多くの時間を 費やした。とくに、PEU に内蔵された撮影用 LED 照射の使用にあたっては、アサガオ胚軸に対しては 低光強度のために徒長するように、イネ幼葉鞘に対しては伸長を阻害するように作用することから、 種子吸水から撮影開始・終了までの時間、重力環境の切り替えのタイミング、ならびに乾燥種子の保 存期間が発芽に及ぼす影響、アサガオ種子の発芽促進のための種子切り込みが発芽に及ぼす影響を解 析し、全体の実験計画に反映させた。また、アサガオとイネの芽生えの取得画像から胚軸とイネの回 旋転頭運動を解析・表記するための手法を検討し、より解像度の高い形でのデータ記述法を検討し た。軌道上実験の準備もほぼ計画通りにすすめられ、実際の軌道上操作は以下のように実施された (Fig. 8)。

1) アサガオ芽生えの回旋転頭運動に関する軌道上実験 (Run1、Run2)

アサガオを材料にした Run1 および Run2 の実験は、給水後 24 時間目(2月12日22時)から観察を 開始し、途中で G 条件を変更して、120 時間目(2 月 16 日 22 時)で撮影を終了する予定であった。G 条件は、Run1 で μG から 1G、Run2 で 1G から μG に変更することを計画した。しかし、Run1 では、 地上での予備実験では見られなかった発芽の遅延がおきたために、また、画像のノイズが多く、その 事象が1Gで顕著になる可能性があるとのことで、画像画質を確認する必要が生じたために、2月16 日 22 時(給水から 120 時間目)に μG から 1G に変更した。発芽の遅れは約1日と考えられ、できる だけ撮影時間を長くすることを試み、最終的に2月17日16時まで(給水から138時間)撮影した。 さらに、撮影は、動画として記録されているので、それを軌道上から地上へダウンリンクし、その動 画ファイルから解析用静止画を抽出した。その結果、合計各チャンバー (SN101 & SN102) 458 枚中、 画像保存失敗(軌道上 VRU に計測可能な静止画像が保存されなかった)は SN101 で 6 枚あったが、 バックアップ用のリアルタイム画像から1枚を補填できたことから、最終的に SN101 で 453 枚、 SN102 で 458 枚の画像を取得することができた。Run2 は、17 日 22 時頃に 1G で培養開始し、発芽は ほぼ予定通り給水 24 時間後に確認できた。Run1 と比較するために、2 月 21 日 15 時(給水 89 時間 目)に1GからµGに変更し、2月24日4時頃(給水後149時間目)まで撮影を行った。運用中の作 業は Run1 と同様で、合計各チャンバー (SN201 & SN202) 505 枚中、画像保存失敗は SN201 で 4 枚で あったが、バックアップ用のリアルタイム画像から補填できた画像はなく、最終的に SN201 で 501 枚、SN202 で 505 枚の画像を取得することができた。

2) イネ芽生えの回旋転頭運動に関する軌道上実験 (Run3、Run4)

イネを材料とした Run3 および Run4 の実験は、Run1/2 の運用・結果を参考に、事前に画像データ記 録時間と重力条件に変更を加えた。すなわち、Run3 を µG 区、Run4 を 1G 区として、それぞれ実験途 中での G 変更は行わないことにした。また、Run3 で機器 (プログラム) トラブルが発生し、撮影開始 時間が 3 時間遅くなった。Run4 では、Run3 で発芽に要した時間を考慮して、撮影開始時間を早め た。Run3 で合計各チャンバー (SN301 & SN302) 660 枚中、画像保存失敗は SN301 で 8 枚、SN302 で 2 枚あったが、SN301 は 2 枚をリアルタイム画像から補填でき、最終的に SN301 は 654 枚、SN302 は 658 枚の解析用静止画像を取得することができた。Run4 で合計各チャンバー (SN401 & SN402) 703 枚 中、画像保存失敗は SN401 で 3 枚、SN402 で 3 枚あり、SN401 は 1 枚、SN402 は 3 枚をリアルタイム 画像から補填でき、最終的に SN401 は 701 枚、SN402 は 703 枚の解析用静止画像を取得した。

9

4. 実験結果および成果

4.1 アサガオ芽生えの回旋転頭運動に及ぼす重力影響

 Table 1 Germination of morning glory seeds in Run1 and Run2. Data show a number of seeds germinated in each chamber.

Plant	Ru	in1	Run2		
	S/N101	S/N102	S/N201	S/N202	
Wild type	1	1	3	2	
weeping1	3	3	1	3	



Fig. 9. Seed germination and hypocotyl growth of morning glory (Run1). Seeds were germinated and the seedlings were grown in microgravity, and then exposed to 1G 120 h after the start of seed imbibition. Arrowhead in red indicates the point of which movement is monitored.



Fig. 10. Hypocotyl movement of wild-type morning glory under 1G and μ G conditions. Seeds were germinated and the seedlings were grown under 1G conditions, and then exposed to microgravity. Arrowhead in blue indicates the point at which 1G was changed to microgravity.

軌道上でのアサガオ種子の発芽は Table 1 および Figure 9 に示すとおりで、予想以上に、種子発芽が 不揃いであった。運動軌跡をプロットするために取得した静止画像から、実験チャンバー毎の動画を 作成し、アサガオ芽生えの軌道上での動きを再現した。また、アサガオ芽生えの頂端部の動きを画像 解析ソフトの ImageJ で計測して座標上にプロットし、そのデータをもとに軌跡をグラフ化した (Figs 9,10)。ただし、µG で生育を開始した Run1 では、発芽が遅延してしまったこともあり、計測対象にで きるものは、野生型で1個体、重力屈性突然変異体で2個体であった。また、Run2 で計測可能なアサ ガオは野生型で2個体、重力屈性突然変異体で2個体であった。これらの軌跡に、明瞭な規則的振幅 を認めることは困難であった。

4.2 イネ幼葉鞘の回旋転頭運動に及ぼす重力影響

抽出した静止画像から、イネ幼葉鞘の動画を作成するとともに、幼葉鞘先端の動きを座標上にプロ ットした。イネ野生型および重力屈性突然変異体 *lazy1*の芽生えの地上暗黒・赤外線下、地上 LED フ ラッシュライト撮影下、宇宙軌道上 1G・LED フラッシュライト撮影下、および宇宙軌道上 µG・LED フラッシュライト撮影下における成長を Fig. 11 に示す。右側の写真はそれぞれの区の吸水後 80 時間 目と 100 時間目を示し、地上・暗黒下の芽生えは Stage II に属する (Fig. 11A)。野生型および突然変異 体の発芽率は 92 - 100%で、宇宙実験区で野生型種子 24 個体中 2 個体が不発芽であった (Table 2)。地 上では、野生型の芽生えは上側に揃って伸長し、*lazy1* は鉛直線からずれるように傾いて伸長した (Fig. 11A, B)。宇宙 1G 区では、重力方向が容器の縦の面から約 11°ずれ、野生型はその重力方向にそ って上側に、*lazy1* は重力方向から傾いて伸長した (Fig. 11C)。微小重力下では、野生型および *lazy1* の いずれでも幼葉鞘はロックウール培地から出葉(芽)し、個体によって異なる方向に伸長した (Fig. 11D)。また、微小重力下では、種子根が気中に飛び出す現象がみられた (Fig. 11D)。

Plant	Ru	ın3	Run4		
	S/N301	S/N302	S/N401	S/N402	
Wild type	5	5	6	6	
lazy1	6	6	6	6	

Table 2 Germination of rice seeds in Run3 and Run4. Data show a number of seeds germinated in each chamber.



Fig. 11. Coleoptile elongation in rice seedlings grown in Plant Rotation growth chambers in the ground (control) and spaceflight experiments. (A-D) Photographs of rice seedlings 80 h (left) and 100 h (right) after water was supplied to initiate seed germination. The dark-grown seedlings in A-1 and A-2 are considered to be at Stage II and Stage III, respectively, according to the classification in Fig. 12B. The photographs were taken with a video camera under infrared irradiation (A) or a CCD camera with an LED-synchronized lighting system installed in the PEU (B) on the ground. The photographs in (C) and (D) were taken with a CCD camera with an LED-synchronized lighting system installed in the PEU under microgravity and 1 g conditions, respectively, in space. In each photograph (A to D), five to six wild-type seedlings and *lazy1* seedlings are shown on the left and right, respectively. The individuals in each panel are labeled WT (wild type) 1 to 6 and *la* (*lazy1*) 1 to 6. Arrow in panel indicates the direction of gravitational force.



Fig. 12. Coleoptile length in rice seedlings. (A) Using the photographs shown in Fig. 11, final coleoptile lengths were measured using ImageJ software. Error bars indicate SD. Different lower-case letters above the bars indicate statistical significance (Tukey HSD test, P < 0.05). There was a significant inhibition of coleoptile elongation after exposure to LED flashlight photography. (B) Time-course study of coleoptile elongation in wild-type and *lazy1* rice seedlings grown in the dark (under infrared light). Each data point represents the mean \pm SD (*n*=5). Growth stages (Stage I to III) of coleoptiles, which were previously categorized as the time after the start of seed imbibition (Abe et al. 1994a), were estimated based on the kinetics of growth curves shown in Fig. S3. Vertical dotted lines between Stage I and II and between Stage II and III indicate 18 and 36 h after coleoptile tip emergence, respectively.

イネ幼葉鞘は、暗所(赤外線撮影下)に比較して、LEDフラッシュライト撮影下では、伸長成長を 抑制し、暗所芽生えの約30%の伸長量となった(Fig. 12A)。暗所で赤外線を10秒間、10分ごとに照 射しても、幼葉鞘の最終長は15-17 mmとなったが、LEDフラッシュライト照明によって、幼葉鞘の 最終長は4-6 mmとなった。地上および宇宙 µG 区で、幼葉鞘の最終長がやや短い傾向にあったが、有 意な差ではなかった。その伸長量および成長曲線において、暗所では、野生型と*lazy1*では大きな違い がみられなかった (Fig. 12)。Figure 4の発育ステージの分類基準に基づくと、暗所で幼葉鞘先端部が確 認されて18時間目から36時間目までがおおよそのStage II に相当すると予測された (Fig. 12B)。

地上暗所における野生型・/azy1イネ幼葉鞘の回旋転頭運動

Figure 11 に示した各光・重力条件での幼葉鞘の回旋転頭運動について、以下に述べる。とくに野生型の周期性をもった回旋転頭運動の開始時期および運動持続時間は個体によってわずかに異なったが、発育ステージごとの運動の振動パターンは類似するものであった (Figs 13, 14)。暗所では、野生型の幼葉鞘はロックウールから出芽後まもなくして回旋転頭運動を開始し、およそ 12 時間後には大きな振動となり、それがおよそ 24 時間目までに継続し、その後、振動が停止した。ただし、個体によっては(#5)、大きな振動は出芽後 36 時間目 (Stage III のはじめまで)続いた。一方、*lazy1* の幼葉鞘は、暗所で、野生型のそれとは異なる振動パターンを示した。すなわち、波形は異なるものの、*lazy1* は出芽後およそ



Fig. 13. Circumnutational movement of rice coleoptiles in the dark on the ground. Wildtype and *lazy1* seeds were sown in a Plant Rotation chamber, and the resulting seedlings were grown at 28°C in the dark. Photographs of side-view images of coleoptiles were taken with a video camera every 10 min under infrared irradiation. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of five wild-type and five *lazy1* individuals are shown.



Fig. 14. Circumnutational movement of rice coleoptiles in the dark on the ground. Wildtype and *lazv1* rice seeds were sown in a Plant Rotation chamber, and the resulting seedlings were grown at 28°C in the dark. Side-view images of coleoptiles were taken with a video camera every 10 min under infrared irradiation. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of five individual wild-type (upper) and *lazy1* (lower) plants are shown.

24 時間目まで、比較的長い周期をもった不規則な運動をし、その後に顕著な振動を停止した。この発育 ステージの振動の周期は、野生型で約 128 分、*lazy1* で約 270 分、野生型の振幅の大きさは *lazy1* の約 2.5 倍であった。このように、*lazy1* 幼葉鞘の出芽直後から約 12 時間(Stage II の初期)までの間の運動は、 回旋転頭様運動として、野生型の振動パターンとは異なるものの、明確に観察できる現象であることが わかった。

地上および宇宙で LED フラッシュライト撮影された野生型イネ幼葉鞘の回旋転頭運動

先述したとおり、PEUに装着された LED 照明付きカメラを使用するにあたっては、その幼葉鞘の伸 長と回旋転頭運動への影響が想定され、とくに幼葉鞘の伸長は暗所芽生えの約 30%に抑制された (Fig. 12)。この条件下で回旋転頭運動の解析が可能かどうかを検討した。その結果、Figure 15 に示すとお り、野生型の回旋転頭運動を示す振動は、暗所芽生えに比較して著しく小さなものになったが、その 周期性は明瞭にみられた。宇宙 1G 区では、地上 1G 区と同様な結果とならず、その振動はさらに小さ なものになった (Fig. 16)。しかしながら、宇宙 μG 区では、回旋転頭様運動は消失し、明確に観察す ることができなかった (Fig. 17)。同じ 1G 区でも、地上と宇宙における運動の振動に違いが見られた 理由はわからないが、宇宙で遠心機が創出する 1G では、植物体に機械的ストレスを与えた可能性も 否定できない。



Fig. 15. Circumnutational movement of wild-type rice coleoptiles under an LEDsynchronized lighting system in a PEU on the ground. The experiments were performed using the same experimental apparatus and conditions as the spaceflight experiments, except for 1 g conditions on the ground. The side-view images of coleoptiles were taken by LEDsynchronized flashlight photography with a CCD camera every 15 min. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of 11 individuals from two chambers are shown.



Fig. 16. Circumnutational movement of wild-type rice coleoptiles under 1G conditions in space. The side-view images of coleoptiles were taken with a CCD camera every 15 min under an LED-synchronized lighting system. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software and is shown as an oscillatory movement. Coleoptile tip movements in 12 individuals from two chambers are shown.



Fig. 17. Circumnutational movement of wild-type rice coleoptiles under microgravity conditions in space. The sideview images of coleoptiles were taken with a CCD camera every 15 min under an LEDsynchronized lighting system. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of 10 individuals grown in two chambers are shown.

以上のように、作成した宇宙実験区・地上実験区の動画およびプロット図(幼葉鞘先端部の運動) から、野生型イネ幼葉鞘では、光照射の影響によって回旋転頭運動の程度は小さかったが、回旋転頭 運動の振幅が μG 区に比較して 1G で大きくなる傾向がみられ、回旋転頭運動に及ぼす重力影響を検証 することに成功した。加えて、暗所では、*lazy1*の幼葉鞘が重力屈性能をある程度保持する生育初期 (Stage I から Stage II 初期)には、不規則ながらも回旋転頭様運動を示し、重力屈性と回旋転頭運動 の消失は、連動している可能性を強く示唆した。

宇宙で LED フラッシュライト撮影された /azy1 イネ幼葉鞘の回旋転頭運動

LED フラッシュライト撮影で取得した地上対照区、宇宙 1G 区、宇宙 μ G 区における *lazy1* 幼葉鞘の 運動を、それぞれ Figure 18、19、20 に示す。地上対照区では、幼葉鞘の出芽後 24 時間目までに、暗 所芽生えでみられた回旋転頭様運動を示す傾向がみられた (Fig. 18)。しかし、宇宙 1G 区では、回旋 転頭様運動を示す個体もみられたが、それは地上対照区ほどに顕著でなく、宇宙 μ G 区との差異も明 確でなかった。これは暗所に較べて、LED 照射下で幼葉鞘の伸長が抑制されたことに起因すると考え られる。幼葉鞘の出芽直後の伸長方向が、地上対照区と宇宙 1G 区では一定方向(図では水平方向) を保ち (Figs 18, 19)、それが宇宙 μ G 区ではみられなかった (Fig. 20)。これは *lazy1* 幼葉鞘の生育初期 の重力応答を反映したものと考えられる。

このように、暗所でみられる *lazy1* の生育初期における回旋転頭様運動は、微小重力下で消失する可能性が示唆されたものの、それを結論づけるに十分な結果を得ることはできなかった。



Fig. 18. Circumnutational movement of *lazy1* rice coleoptiles on the ground. The side-view images of coleoptiles were taken with a CCD camera every 15 min under an LEDsynchronized lighting system. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of 11 *lazy1* individuals are shown.



Fig. 19. Circumnutational movement of *lazy1* rice coleoptiles under 1G conditions in space. The sideview images of coleoptiles were taken with a CCD camera every 15 min under an LEDsynchronized lighting system. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of 12 *lazy1* individuals are shown.



Fig. 20. Circumnutational movement of *lazy1* rice coleoptiles under microgravity conditions in space. The sideview images of coleoptiles were taken with a CCD camera every 15 min under an LEDsynchronized lighting system. The trajectory of each rice coleoptile tip was measured using ImageJ software. Coleoptile tip movements of 12 *lazy1* individuals are shown.

5. 結言

植物の伸長器官は、頂部を回旋させながら成長する、回旋転頭運動(circumnutation)を示し、その 結果、自らを有利な場(環境)におく能力を有する。しかし、この回旋転頭運動のメカニズムについ ては不明な点が多い。これまでの研究で、回旋転頭運動が内在的なリズムによって生ずるとする説や 重力応答に起因するとする説や、その両方によって制御されるとする説が提唱されているが、いずれ においても決定的証拠がなく、論争が続いている。本研究は、この問題を解決すべく、主に2つの実 験を目的にして行われた。その1つは、植物器官の重力応答と回旋転頭運動にどの程度の関連性があ るのかを理解することである。2つ目は、重力応答を消去したときに回旋転頭運動は生ずるか、そし て、もし生じるならば、それは回旋転頭運動と言えるかどうかを明らかにすることである。これらの 疑問に答えるために、本研究では、アサガオ胚軸とイネ幼葉鞘の回旋転頭運動を野生型および重力屈 性突然変異体で比較すると同時に、宇宙実験によって1Gおよび μGの条件で比較することを試みた。

その結果、アサガオの軌道上実験 (Run1,2) では、発芽が不揃いになり、胚軸の回旋転頭運動を解 析するタイミングを逸したような画像取得となって、得られた画像の解析においても、運動が小さ く、実験区間の差異を認めることが困難であった。画像のダウンロード・解析のためのソフトウエア に不慣れな点も加わって、運用面でも手間取ったが、これを Run3,4 のイネ芽生えの軌道上実験に上手 く反映させることができた。

イネ幼葉鞘を用いた実験 (Run3,4) では、光照射による伸長と回旋転頭運動の抑制がみられたが、

野生型の回旋転頭運動は1G区に較べて微小重力区で低下することを確認した。また、*lazy1*突然変異体の幼葉鞘も生育初期には重力屈性ならびに回旋転頭様運動を示し、重力屈性能の消失とともに回旋 転頭様運動も停止することがわかった。この*lazy1*の回旋転頭様運動も微小重力下では消失する可能性 が示された。以上の結果から、イネ幼葉鞘の回旋転頭運動が重力屈性能と密接に関連するという仮説 が証明されたと考えられる。一方、微小重力または重力屈性不在の条件で、回旋転頭運動と呼べる振 動を検出できるかどうかについては、本研究では明確にできなかった。得られたプロット図では、 *lazy1*の幼葉鞘生育後半(重力屈性欠損時)あるいは微小重力下における野生型の幼葉鞘に、周期性を 持った振動はほとんどみられなかった。これを回旋転頭運動の不在と判断するのか、検出限界と判断 するのかは難しい。いずれにしても、これらの実験結果から、内在性の回旋転頭運動は重力依存性の 回旋転頭運動に比較して、小さいものであることが推測される。ただし、その大きさではなく、内在 的要因が存在することによって、重力応答による制御が明確に発現する可能性も否定できない。これ は、今後の課題である。

LAZY1 は、イネ芽生えで機能する重力屈性制御遺伝子として同定された (Li et al. 2007, Yoshihara and lino 2007). lazy1 突然変異体の幼葉鞘と分げつ茎は一定の発育ステージで重力屈性不全となり、この原 因は重力感受細胞におけるアミロプラスト沈降と伸長領域におけるオーキシンの不均等分布の経路の 間に存在すると考えられた (Abe et al. 1994b, 1996, Godbole et al. 1999)。 Li ら (2007) は LAZY1 がシ ュートにおけるオーキシンの極性輸送を負に調節することを報告している。最近、LAZY1 および他の LAZY 遺伝子がシロイヌナズナで同定され、それらのタンパク質の機能が研究されている (Yoshihara et al. 2013, 2017, Taniguchi et al. 2017)。シロイヌナズナの AtLAZY1 は、原形質膜上の PIN-FORMED (PIN) タンパク質の局在制御によって、オーキシン輸送に機能するらしい (Yoshihara et al. 2017, Taniguchi et al. 2017)。いくつかの PIN タンパク質は、重力に応答して局在を変化させ、オーキシンの不均等な輸送・ 分布を誘導し、重力屈性に働くことが示されている (Friml et al. 2002, Kleine-Vehn et al. 2010, Rakusová et al. 2011, Yamazaki et al. 2016)。 したがって、LAZY1 は、オーキシン輸送制御を介した重力応答を制 御することによって回旋転頭運動にかかわっている可能性がある。実際に、重力感受細胞とオーキシン 輸送が回旋転頭運動にかかわることは、すでに報告したとおりである (Hatakeda et al. 2003, Kitazawa et al. 2005)。

シロイヌナズナでは、6 個の LAZYI 遺伝子が存在し、シュートや根の重力屈性に関与している (Yoshihara et al. 2017)。これら LAZYI 遺伝子は、植物体で空間的に発現部位を異にし、それらのシング ル、ダブルあるいはトリプル突然変異体は、シュートや根の形態で様々な表現型を示す (Yoshihara et al. 2017)。 LAZYI は、植物体の伸長方向や構成を制御する DEEPER ROOTING I (DROI) and TILLER ANGLE CONTROL I (TACI) を含む、Intracellular Gene Transfer (IGT) 遺伝子ファミリーに属する (Guseman et al. 2017)。 最近 Taniguchi ら (2017) は、これらの遺伝子が重力屈性に冗長的に機能することを報告して いる。したがって、これらの遺伝子の冗長的な機能が、それらの発現制御を介して、lazyI 突然変異体の 生育初期の重力応答と回旋転頭様運動、両者のその後の消失にかかわっている可能性がある。

このように、イネ幼葉鞘の突然変異体を用いた解析および宇宙実験から、回旋転頭運動の重力応答依 存性を直接的に示すことができただけでなく、回旋転頭運動の分子機構として検証されるべき可能性を 見出すこともできた。すなわち、重力応答あるいは内在的要因によるオーキシン輸送体 PIN タンパク質 の局在制御機構の解明が、重力屈性と回旋転頭運動の接点を解明する糸口になると考えられる。

[謝辞]

本研究の遂行にあたり、共同研究者に加えて、有益なアドバイスとご支援を賜りました、宇宙航空 研究開発機構 (JAXA) (とくに ISS 科学プロジェクト室、宇宙環境利用センター、宇宙科学研究所) の皆様に感謝申し上げます。また、軌道上実験の運用にあたり、JAXA、(財)日本宇宙フォーラム、 有人宇宙システム(株)、(株)エイ・イー・エスを含む ISS 科学実験支援・運用チームと米国航空宇 宙局 (NASA)、そして ISS クルーの皆様にお世話になりました。ここに深謝申し上げます。本研究の 一部は、文科省および日本学術振興会の科学研究費によって実施されました。

[参考文献]

- Abe K, Takahashi H, Suge H (1994a) Graviresponding site in shoots of normal and 'lazy' rice seedlings. Physiol Plant 92: 371-374
- Abe K, Takahashi H, Suge H (1994b) Localization of cells containing sedimented amyloplasts in the shoots of normal and lazy rice seedlings. Biol Sci Space 8: 221-225
- Abe K, Takahashi H, Suge H (1996) Lazy gene (*la*) responsible for both an agravitropism of seedlings and lazy habit of tiller growth in rice (*Oryza sativa* L.). J Plant Res 109: 381-386
- Antonsen F, Johnsson A (1998) Effects of microgravity on the growth of *Lepidium* roots. J Gravit Physiol 5:13-21
- Antonsen F, Johnsson A, Perbal G, Driss-Ecole D (1995) Oscillatory growth movements of roots in weightlessness. Physiol Plant 95: 596-603
- Badot PM, Melin D, Garrec JP (1990) Circumnutation in *Phaseolus vulgaris*. II. Potassium content in the freemoving part of the shoot. Plant Physiol Biochem 28: 123-130
- Barlow PW, Parker JS, Brain P (1994) Oscillations of axial plant organs. Adv Space Res 14: 149-158
- Berg AR, Peacock K (1992) Growth patterns in nutating and nonnutating sunflower (*Helianthus annus*) hypocotyls. *Am J Bot* 79: 77-85
- Blatt MR, Garcia-Mata C, Sokolovski S (2007) Membrane transport and Ca²⁺ oscillations in guard cells. In: Manusco S, Shabala S, eds. Rhythms in plants. Phenomenology, mechanisms, and adaptive significance. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. pp 115–133
- Brown AH, Champman DK (1984) Circumnutation observed without a significant gravitational force in spaceflight. Science 225: 230-232
- Brown AH, Champman DK, Lewis RF, Venditti AL (1990) Circumnutations of sunflower hypocotyls in satellite orbit. Plant Physiol 94: 233-238
- Caré AF, Nefed'ev L, Bonnet B, Millet B, Badot PM (1998) Cell elongation and revolving movement in *Phaseolus vulgaris* L. twining shoots. Plant Cell Physiol 39: 914-921.
- Chapman DK, Venditti AL, Brown AH (1980) Gravity functions of circumnutations by hypocotyls of *Helianthus* annuus in simulated hypogravity. Plant Physiol 65: 533-536
- Darwin C, Darwin F (1881) The power of movement in plants. John Murray, London
- Di Laurenzio L, Wysocka-Diller J, Malamy JE, Pysh L, Helariutta Y, Freshour G, Hahn MG, Feldmann KA, Benfey PN (1996) The SCARECROW gene regulates an asymmetric cell division that is essential for generating the radial organization of the Arabidopsis root. Cell 86: 423-433
- Friml J, Wisniewska J, Benkova E, Mendgen K, Palme K (2002) Lateral relocation of auxin efflux regulator PIN3 mediates tropism in *Arabidopsis*. Nature 415: 806-809
- Fukaki H, Wysocka-Diller J, Kato T, Fujisawa H, Benfey PN, Tasaka M (1998) Genetic evidence that the endodermis is essential for shoot gravitropism in *Arabidopsis thaliana*. Plant J 14: 425-430
- Godbole R, Takahashi H, Hertel R (1999) The lazy mutation in rice affects a step between statoliths and gravityinduced lateral auxin transport. Plant Biol 1: 379-381
- Guseman JM, Webb K, Srinivasan C, Dardick C (2017) *DRO1* influences root system architecture in Arabidopsis and Prunus species. Plant J 89: 1093-1105
- Hatakeda Y, Kamada M, Goto N, Fukaki H, Tasaka M, Suge H, Takahashi H (2003) Gravitropic response plays an important role in the nutational movements of the shoots of *Pharbitis nil* and *Arabidopsis thaliana*. Physiol Plant 118: 464-473
- Hou TZ, Li MD (1997) Experimental evidence of a plant meridian system V. Acupuncture effect on circumnutation movements of shoots of *Phaselus vulgaris* L. Pole Bean. Am J Chinese Med 25: 3-4
- Iida M, Takano T, Matsuura T, Mori IC, Takagi S (2017) Circumnutation and distribution of phytohormones in *Vigna angularis* epicotyls. J Plant Res131: 165-178
- Israelsson D, Johnsson A (1967) A theory for circumnutation in Helianthus annuus. Physiol Plant 20: 957-976
- Johnsson A (1979) Circumnutation. In: Haupt W, Feinleib ME (eds) Encyclopedia of Plant Physiology, Vol 7. Physiology of Movements. Springer-Verlag, Berlin, pp 627-646
- Johnsson A (1997) Circumnutation: results of recent experiments on Earth and in space. Planta 203: S147-S158
- Johnsson A, Heathcote D (1973) Experimental evidence and models on circumnutation. Z Pflanzenphysiol 70: 371-405
- Johnsson A, Solheim BGB, IversenTH (2009) Gravity amplifies and microgravity decreases circumnutations in *Arabidopsis thaliana* stems: results from a space experiment. New Phytol 182: 621-629
- Kim H-J, Kobayashi A, Fujii N, Miyazawa Y, Takahashi H (2016) Gravitropic response and circumnutation in pea (*Pisum sativum*) seedling roots. Physiol Plant 157: 108-118

- Kiss JZ (2006) Up, down, and all around: How plants sense and respond to environmental stimuli. Proc Natl Acad Sci USA 103: 829-830
- Kiss JZ (2009) Plants circling in outer space. New Phytol 182: 555-557
- Kitazawa D, Hatakeda Y, Kamada M, Fujii N, Miyazawa Y, Hoshino A, Iida S, Fukaki H, Morita MT, Tasaka M, Suge H, Takahashi H (2005) Shoot circumnutation and winding movements require gravisensing cells. Proc Natl Acad Sci USA 102: 18742-18747
- Kitazawa D, Miyazawa Y, Fujii N, Nitasaka E, Takahashi H (2008) Characterization of a novel gravitropic mutant of morning glory, *weeping 2*. Ad Space Res 42: 1050-1059
- Kleine-Vehn J, Ding Z, Jones AR, Tasaka M, Morita MT, Friml J (2010) Gravity-induced PIN transcytosis for polarization of auxin fluxes in gravity-sensing root cells. Proc Natl Acad Sci USA 107: 22344-22349
- Li P, Wang Y, Qian Q, Fu Z, Wang M, Zeng D, Li B, Wang X, Li J (2007) LAZY1 controls shoot gravitropism through regulating polar auxin transport. Cell Res 17: 402-410
- Millet B, Melin D, Badot PM (1988) Circumnutation in *Phaseolus vulgaris*. I. growth, osmotic potential and cell ultrastructure in free-moving part of the shoot. Physiol Plant 72: 133-138
- Millet B, Melin D, Bonnet B, Ibrahim CA, Mercier J (1984) Rhythmic circumnutation movement of the shoots in *Phaseolus vulgaris* L. Chronobiol Internat 1: 11-19
- Niinuma K, Someya N, Kimura M, Yamaguchi I, Hamamoto H (2005) Circadian rhythm of circumnutation in inflorescence stems of Arabidopsis. Plant Cell Physiol 46:1423-1427
- Rakusová H, Gallego-Bartolomé J, Vanstraelen M, Robert HS, David Alabadí D, Blázquez MA, Benková E, Friml J (2011) Polarization of PIN3-dependent auxin transport for hypocotyl gravitropic response in *Arabidopsis thaliana*. Plant J 67: 817-826
- Shabala SN, Newman IA (1997) Proton and calcium flux oscillation in the elongation region correlate with root nutation. Physiol Plant 100: 917-926
- Someya N, Ninumna K, Kimura M, Yamaguchi I, Hamamoto H (2006) Circumnutation of *Arabidopsis thaliana* inflorescence stems. *Biol Plant* 50: 287-290
- Taniguchi M, Furutani M, Nishimura T, Nakamura M, Fushita T, Iijima K, Baba K, Tanaka H, Toyota M, Tasaka M, Morita MT (2017) The Arabidopsis LAZY1 family plays a key role in gravity signaling within statocytes and in branch angle control of roots and shoots. Plant Cell 29: 1984-1999
- Tanimoto M, Tremblay R, Colasanti J (2008) Altered gravitropic response, amyloplast sedimentation and circumnutation in the Arabidopsis shoot gravitropism 5 mutant are associated with reduced starch levels. Plant Mol Biol 67: 57-69
- Tepper HB, Yang RL (1996) Influence of shoot tip and leaves on circumnutation in green pea seedling. J Plant Physiol 109: 502-505
- Yamazaki C, Fujii N, Miyazawa Y, Kamada M, Kasahara H, Osada I, Shimazu T, Fusejima Y, Higashibata A, Yamazaki T, Ishioka N, Takahashi H (2016) The gravity-induced re-localization of auxin efflux carrier CsPIN1 in cucumber seedlings: spaceflight experiments for immunohistochemical microscopy. npj Microgravity 2: 16030
- Yano S, Kasahara H, Masuda D, Tanigaki F, Shimazu T, Suzuki H, Karahara I, Soga K, Hoson T, Tayama I, Tsuchiya Y, Kamisaka S (2013) Improvements in and actual performance of the Plant Experiment Unit onboard Kibo, the Japanese experiment module on the international space station. Adv Space Res 51: 781-788
- Yoshihara T, Iino M (2006) Circumnutation of rice coleoptiles: its relationships with gravitropism and absence in lazy mutant. Plant Cell Environ 29: 778-792
- Yoshihara T, Iino M (2007) Identification of the gravitropism-related rice gene *LAZY1* and elucidation of LAZY1dependent and -independent gravity signaling pathways. Plant Cell Physiol 48: 678-688
- Yoshihara T, Spalding EP, Iino M (2013) AtLAZY1 is a signaling component required for gravitropism of the *Arabidopsis thaliana* inflorescence. Plant J 74: 267–279
- Yoshihara T, Spalding EP (2017) LAZY genes mediate the effects of gravity on auxin gradients and plant architecture. Plant Phyiol 175: 959-969
- Zachariassen E, Johnsson A, Brown AH, Chapman DK, Johnsson Glebe C (1987) Influence of the *g*-force on the circumnutations of sunflower hypocotyls. Physiol Plant 70: 447-452

[成果リスト]

原著論文

Akie Kobayashi, Hye-jeong Kim, Yuta Tomita, Yutaka Miyazawa, Nobuharu Fujii, Sachiko Yano, Chiaki Yamazaki, Motoshi Kamada, Haruo Kasahara, Sachiko Miybayashi, Toru Shimazu, Yasuo Fuseshima, Hideyuki Takahashi. Circumnutational movement in rice coleoptiles involves the gravitropic response: analysis of an agravitropic mutant and space-grown seedlings. Physiologia Plantarum (in press)

学会発表

(1) Yutaka Miyazawa, Yuuta Tomita, Hyejeong Kim, Nobuharu Fujii, Hideyuki Takahashi. "Graviresponse is Indispensable for Circumnutation in Rice Coleoptile". 34th Annual Meeting International Gravitational Physiology, Toyohashi, June 23 – 28, 2013

(2) Hye-jeong Kim, Yoshitaka Tomita, Yutaka Miyazawa, Nobuharu Fujii, Akie Kobayashi, S. Yano, Toru Shimazu, Hideyuki Takahashi. "Circumnutation and its dependence on the gravity response in rice, morning glory and pea plants: verification by spaceflight experiments". 40th COSPAR Scientific Assembly, Moscow, Russia, August 2 – 8, 2014

(3) 小林啓恵、金慧正、藤井伸治、宮沢豊、矢野幸子、山崎千秋、嶋津徹、笠原春夫、鎌田源司、高橋秀幸 「宇宙実験 Plant Rotation:植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証」日本宇宙生物科学会第28 回大会(大阪)2014年9月22日-9月23日

(4) 金慧正、小林啓恵、藤井伸治、芳賀健、酒井達也、高橋秀幸「シロイヌナズナの突然変異体における胚軸と花茎の回旋転頭運動」日本宇宙生物科学会第28回大会(大阪)2014年9月22日-9月23日

(5) Hye-jeong Kim, Yutaka Miyazawa, Akie Kobayasi, Nobuharu Fujii and Hideyuki Takahashi. "The relationships between graviresponse and circumnutation in pea (Pisum sativum) seedlings - The study with agravitropic mutant toward its verification by spaceflight experiments". 10th Asian Microgravity Symposium 2014, Seoul, Korea, October 28–31, 2014

(6)小林啓恵、高橋秀幸、藤井伸治、宮沢豊、金慧正、冨田優太、矢野幸子、山崎千秋、嶋津徹、笠原晴夫、 鎌田源司、栗山可奈「植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証: Plant Rotation」第29回宇宙環境 利用シンポジウム(相模原)2015年1月24日-1月25日

(7)小林啓恵「植物の回旋転頭運動における重力応答支配とその宇宙実験による検証」日本宇宙生物科学会第29回大会(東京)2015年9月26日-9月27日

(8)小林啓恵、金慧正、藤井伸治、宮沢豊、冨田優太、矢野幸子、山崎千秋、嶋津徹、笠原晴夫、鎌田源 司、伏島康男、高橋秀幸「植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証」第30回宇宙環境利用シン ポジウム(相模原)1月19日-1月20日

(9) 小林啓恵, 冨田優太, 金慧正, 藤井伸治, 宮沢豊, 矢野幸子, 山崎千秋, 鎌田源司, 笠原春夫, 嶋津徹, 伏 島康男, 高橋秀幸「重力屈性が関与するイネ幼葉鞘の回旋転頭運動:lazy1 突然変異体と宇宙実験による解 析」日本植物学会 第 80 回大会(沖縄) 2016 年 9 月 16 日-19 日

(10)小林啓恵、冨田優太、金慧正、藤井伸治、宮沢豊、矢野幸子、山崎千秋、鎌田源司、笠原春夫、嶋津 徹、伏島康男、高橋秀幸「イネ幼葉鞘の回旋転頭運動における重力応答とその宇宙実験による検証」 日本宇宙生物科学会第30回大会(愛知,長久手市)2016年10月13日-15日

(11) Akie Kobayashi, Hye-jeong Kim, Yuta Tomita, Yutaka Miyazawa, Nobuharu Fujii, Sachiko Yano, Chiaki
Yamazaki, Motoshi Kamada, Haruo Kasahara, Toru Shimazu, Yasuo Fusesjima, Hideyuki Takahashi. "The relationship of graviresponse to circumnutation in rice coleoptiles: analyses with a gravitropic mutant and space-grown seedlings".
11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo, October 25 – 29, 2016

報道

日刊工業新聞 2015 年 1 月 27 日 科学技術・大学欄「宇宙で生命科学実験 植物 つるまき現象解明へ」

平成 30 年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果(生命医科学)

研究課題 植物における回旋転頭の重力応答依存性の検証 (Plant Rotation)

代表研究者;高橋 秀幸(東北大学)

総合評価

B:目標を達成した(ミニマムサクセス相当)

イネ幼葉鞘について、回旋転頭運動における重力などの宇宙環境の関与を明らかにしたことは、 大変意義が高く、フルサクセスを達成したと評価できる。アサガオ胚軸の実験で見られた生育不良 を、以降の運用計画に適切にフィードバックできたことで、イネに関する実験を成功裏に進められた。 観察用の可視光パルス照明による芽生え生育の阻害を排除する実験系を工夫するなど、後継実

験を計画することも意義があると考えられる。

本成果は,植物生理学として基礎的に重要である一方、宇宙での植物生産など、将来の有人宇宙 活動に必要な技術への応用が期待される。オールジャパンのコミュニティを組織して、「宇宙植物学」 として、発展的な取組みを組織することなども検討して欲しい。

平成 31 年 1 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション

「植物における回旋転頭運動の重力応答依存性の検証 (Plant Rotation)」

研究成果報告書概要

代表研究者;高橋秀幸(東北大学大学院生命科学研究科)

平成 30 年 8 月

研究目的

生命維持の基盤となる植物は、重力をシグナルとして利用し、陸地環境において生存に必要な形態、姿勢、伸長方向の制御を可能にした。この植物の重力応答の研究は、植物の生物進化、生物生産、環境応答の仕組みを解明するという、生物学的視点からだけでなく、人類の宇宙活動のための生命維持システムの構築、そして食料、エネルギー、環境など地球的課題を解決する糸口を見出すためにも、極めて重要である。こうした重力応答または重力形態形成でよく知られているのが重力屈性であるが、植物の他の成長現象も重力応答によって制御されることが報告されている。例えば、茎や根などの器官が首(先端部)を振り、回旋しながら伸長する「回旋転頭運動(circumnutation)」も、重力の影響を受けると考えられてきた。 回旋転頭運動は、ほとんどの植物の伸長器官にみられ、植物の生存戦略の一環として重要な形質であると考えられたことから、Charles Darwin とその息子の Francis Darwin の研究(1881)以来、多くの研究者がそのメカニズムならびに重力応答との関係を明らかにしようとしてきた。しかし、回旋転頭運動の原動力やメカニズムについては諸説あり、重力応答の関与についても未だ論争が続いている。そのような状況下で、本研究代表者らは近年、アサガオ、シロイヌナズナ、イネの重力屈性突然変異体が重力屈性のみならず、回旋転頭運動をも欠損することを見出した。これは、回旋転頭運動が重力応答に依存することを示す。

そこで本宇宙実験では、微小重力環境を利用して「植物の回旋転頭運動の重力応答依存性」に関する仮説を検証することを目的とした。

仮説

植物の回旋転頭運動は重力応答を必要とすると考えられ、重力応答不在の微小重力下では、回旋転頭運動が著しく阻害されるか、その回旋様式が変化する。

実験方法

上記の仮説を証明するために、植物種子を軌道上微小重力下で発芽・生育させ、それら芽生えの微小重 カ下および1G(遠心機による人工重力)下での成長・運動を動画として撮影・記録した。それらの画像 をダウンリンクし、比較解析することによって、重力が回旋転頭運動に及ぼす影響に関する上記仮説を検 証した。これまでの宇宙実験で問題とされた前歴としての重力環境の回旋転頭運動に対する影響を明らか にするために、1GからµGに、µGから1Gに植物体を移す実験区も設定することにした。また、アサガ オおよびイネの重力応答突然変異体の微小重力下での運動を比較解析するために、それぞれの野生型に加 えて、アサガオのweeping1とイネのlazy1を用いた。

本実験では、植物育成装置として、これまでに ISS 宇宙実験でも使用実績のある Plant Experiment Unit (PEU; 95x240x170 mm) を用いた。PEU にセットする植物育成容器は 60x 60x50 mm と小型であるが、画像 取得のためのカメラと LED 照明システムを装備し、撮影は地上から操作できる。容器内の培地は厚さ 10 mm のロックウールとし、アサガオの場合は野生型と突然変異体の種子を 3 個ずつ、イネの場合は野生型と突然変異体の種子を 6 個ずつ、1 容器中に播種した。アサガオ種子は、発芽促進のために、発芽孔周辺 に均一な傷を付けた。容器あたり 20 mL の蒸留水で種子吸水し、軌道上実験では、PEU にセットした後に Cell Biology Experiment Facility (CBEF) に取り付けた。CBEF 内でアサガオの場合は 25℃、イネの場合は 28℃ で培養した。発芽後の植物体の成長をモニターするために、軌道上実験では LED 照射によるフラッシュライト (白色光; 8.5 μ mol m² s⁻¹) 撮影を行ったが、地上対照実験では、LED フラッシュライト撮影に 加えて、暗所で赤外線カメラを用いた撮影を行った。

軌道上実験は、4つの実験区 (Run 1, Run 2, Run 3, Run 4)に区分した。宇宙 1G 区は CBEF 内で遠心機に 固定した PEU を回転させることによって、宇宙 μ G 区は PEU を静置することによって設定した。Run 1 と Run 2 は、アサガオを用い、Run 1 では給水後に μ G 下で培養し、生育(撮影)後半に 1G に切り替え、 Run 2 では逆に、給水後に 1G 下で培養し、生育(撮影)後半に μ G に切り替えた。後半での G 環境の変更 は、前半の条件での十分な撮影の後に試みた。先に実施したアサガオ (Run 1, Run 2)の実験結果に基づき、 Run 3 および Run 4 のイネの実験では、途中で G 変更することを中止した (Run 3 を μ G 区、Run 4 を 1G 区 とした)。また、それぞれの Run では 2 個の容器を供試体とした。PEU 内の植物体の間欠撮影は、15 分ご とに 10 秒間の撮影を行うことにした。得られた画像イメージは、地上にダウンリンクし、JAXA のイメー ジキャプチャーソフト (UiApp および ipuApp ソフトウエアー)を用いて静止画像として取り出した。最終 的には、それらの各時間の静止画像から ImageJ 画像解析ソフトを用いて、アサガオ胚軸およびイネ幼葉鞘 の先端の動きを時間(x)軸上にプロットするとともに、伸長量を計測した。

結果・考察

アサガオの軌道上実験 (Run 1, 2) では、発芽が不揃いになり、胚軸の回旋転頭運動を解析するタイミン グを逸したような画像取得となって、得られた画像の解析においても、運動が小さく、実験区間の差異を 認めることが困難であった。画像のダウンロード・解析のためのソフトウエアに不慣れな点も加わって、 運用面でも手間取ったが、これを Run 3,4 のイネ芽生えの軌道上実験に上手く反映させることができた。

イネ幼葉鞘を用いた実験(Run 3, 4)では、光照射による伸長と回旋転頭運動の抑制がみられたが、野生型の回旋転頭運動は1G区に較べて微小重力区で低下することを確認した。また、*lazy1*突然変異体の幼葉鞘も生育初期には重力屈性ならびに回旋転頭様運動を示し、重力屈性能の消失とともに回旋転頭様運動も 停止することがわかった。この*lazy1*の回旋転頭様運動も微小重力下では消失する可能性が示された。

以上の結果から、イネ幼葉鞘の回旋転頭運動が重力屈性能と密接に関連するという仮説が証明された。 一方、微小重力または重力屈性不在の条件で、回旋転頭運動と呼べる振動を検出できるかどうかについて は、本研究では明確にできなかった。得られたプロット図では、*lazy1*の幼葉鞘生育後半(重力屈性欠損時) あるいは微小重力下における野生型の幼葉鞘に、周期性を持った振動はほとんどみられなかった。これを 回旋転頭運動の不在と判断するのか、検出限界と判断するのかは難しい。いずれにしても、これらの実験 結果から、内在性の回旋転頭運動は存在するとしても、重力依存性の回旋転頭運動に比較して、小さいも のであることが推測される。

Summary report of the ISS-Kibo utilization mission

Plant circumnutation and its dependence on the gravity response (Plant Rotation)

Principal Investigator; Hideyuki Takahashi (Graduate School of Life Sciences, Tohoku University)

January 31, 2019

Plants, as primary producers, are considered to be a basis of life support. Such plants with sessile nature utilize gravity for controlling their growth and development including the regulation of growth orientation. The study of plant gravity response is therefore important for us not only to understand biological fundamentals underlying plant evolution, production and responses to environmental cues but also to obtain a clue to solve issues related to food, energy and environment on a global scale. Of gravimorphogenesis or graviresponses in plants, gravitropism is well known and studied. However, it has been suggested that plant growth and development other than gravitropism are also regulated or influenced by graviresponse. For example, plants exhibit helical growth movements known as circumnutation in growing organs, and some studies indicate that circumnutation involves the gravitropic response. Previously, we showed that shoots of weeping morning glory (*we1* and *we2*) are impaired in not only the differentiation of endodermis (gravisensing cells) and gravitropic response, but also winding and circumnutation. In addition, we found a reduced circumnutation in the shoots of Arabidopsis and rice mutants defective in gravitropic response. These results suggest that circumnutation is tightly related with gravitropic response, but this notion is a matter of debate.

In our spaceflight experiments, Plant Rotation, we attempted to verify the hypothesis that circumnutation requires gravity response, by using microgravity environment in KIBO module of the International Space Station. We grew morning glory and rice seedlings under both μ G and 1G conditions on orbit and monitor their growth by a camera. Images downlinked were used for the measurements of plant growth and nutational movements, and the results were compared with those of the experiments with agravitropic mutants.

To verify the hypothesis that plant circumnutation requires graviresponse (if it does, circumnutational movement is not observed or modified in microgravity), seeds of rice and morning glory were germinated and their seedlings were grown under either μ G or the centrifuge-generated 1G conditions in space. In addition to the wild-type morning glory (cv. Violet) and rice (cv. Kamenoo), their gravitropic mutants, wel morning glory and *lazy1* rice plants, were grown as well. Images of seedlings were taken via interval photography and downlinked to the ground for analyses. For this study, an acrylic chamber named the Plant Rotation growth chamber ($60 \times 60 \times$ 50 mm) was designed and constructed to fit into the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) Plant Experiment Unit (PEU) (95 \times 240 \times 170 mm). Six seeds each of wild-type and *lazy1* rice or three seeds each of wild-type and wel morning glory were sown on an autoclaved Rockwool block ($10 \times 50 \times 45$ mm) and placed in the Plant Rotation growth chamber. The chamber was then installed into the PEU. In orbit, the PEUs were unstowed and installed into the Cell Biology Experiment Facility (CBEF) in the Japanese experiment module KIBO of the ISS. Onboard experiment consists of four runs. In Run 1 and Run 2 experiments with morning glory plants, seedlings were grown in microgravity following seed imbibition and under 1G conditions at a later stage of seedling growth (Run 1) or under 1G conditions following seed imbibition and in microgravity at a later stage of seedling growth (Run 2). In Run 3 and Run 4 experiments with rice plants, seedlings were grown under microgravity conditions (Run 3) or under 1G conditions (Run 3) for entire period of experiments.

For each run, two PEUs were placed under microgravity conditions, and the two remaining PEUs (for the second run) were centrifuged at 1G in the CBEF. The generated centrifugal force was directed in an angle of approximately 11° from vertical plane of Plant Rotation growth chamber. Dr. Kimiya Yui, an ISS crew, imbibed the seeds by adding 20 mL distilled water to the Rockwool block using a syringe. The plant growth chamber contains a port with a filter (functioning as an air outlet) connected to a ventilation pump by a Teflon tube designed to remove the humid air inside the PEU. When the ventilation pump is running, air inside the CBEF enters the plant growth chamber through the air inlet. The ventilation pump operates for 5 sec every 10 min. Seeds were germinated and their seedlings were grown at $25.0^{\circ}C \pm 0.1^{\circ}C$ for morning glory and at $28.0^{\circ}C \pm$ 0.1°C for rice. Images of seedlings were collected using an automated acquisition system in the PEU. In this system, the seedlings were exposed to LED light (approximately 8.5 μ mol m⁻² s⁻¹) with spectral peaks at 440 and 550 nm for approximately 10 sec every 15 min. The recorded movies were downlinked at various intervals to Tsukuba Space Center, Tsukuba, Japan. The images were captured from the movies as mpg files using UiApp software developed by JAXA. Static images at each time point were then obtained from the captured movies using JAXA ipuApp software and used to plot the positions of rice coleoptile tips with ImageJ software. The oscillations or movements of coleoptile tips were tracked by plotting the positions of the tip end on x-axis. A series of control experiments were conducted on the ground using a PEU installed into the CBEF at Tsukuba Space Center. The effects of infrared and LED irradiation were also compared during the recording of images of the elongation and circumnutation of rice seedlings.

For the ground experiments, using this Plant Rotation growth chamber, the elongation growth and circumnutational movements of rice coleoptiles were initially monitored on the ground as follows. Germination was initiated by supplying the seeds with 20 mL distilled water, and the resulting seedlings were grown at 28° C in the dark. Seedling growth and movement were recorded from the side using a Sony Handycam digital video camera on night-shot (Infrared) mode under infrared light irradiation; the wavelength was longer than 750 nm with its peak at 940 nm. Movie images of dark-grown seedlings were obtained every 10 min with this camera attached to a video-camera control timer (Model No. 5500; Soyou Laboratory, Hamamatsu, Japan) developed specifically for the Sony Handycam. These side-view images were used to track coleoptile movement by plotting the position of coleoptile-tip end on *x*- and *y*-axes using ImageJ software (NIH; http:// rsb.info.nih.gov/ij). The distances by which the coleoptile tip deviated to the left and right as seen from camera were described as negative (minus) and positive (plus) values, respectively. Circumnutational movements were thus evaluated and compared with the periods and amplitudes of coleoptile tip oscillations.

In onboard experiments with morning glory (Run 1 and 2), unusual irregular seed germination resulted in the loss of adequate filming time for hypocotyl circumnutation. Hypocotyl movements in the obtained images were too small to show their circumnutation.

Using the agravitropic rice mutant lazy1 and space-grown rice seedlings (Run 3 and 4), we found that circumnutation was reduced or lost during agravitropic growth in coleoptiles. Coleoptiles of wild-type rice exhibited circumnutation in the dark, with vigorous oscillatory movements during their growth. The gravitropic responses in lazy1 coleoptiles differed depending on the growth stage, with gravitropic responses detected during early growth and agravitropism during later growth. The nutation-like movements observed in lazy1 coleoptiles at the early stage of growth were no longer detected with the disappearance of the gravitropic response. In space, we began filming the seedlings 2 days after seed imbibition and obtained images of seedling growth every 15 min. The seed germination rate in space was 92% to 100% under both microgravity and 1G conditions. LED-synchronized flashlight photography induced an attenuation of coleoptile growth and circumnutational movement due to cumulative light exposure. Nevertheless, wild-type rice coleoptiles still showed circumnutational oscillations under 1G but not microgravity conditions. Small nutation-like movement in lazy1 coleoptile at the early stage of growth likely disappeared in microgravity. These results support the idea that the gravitropic response is involved in plant circumnutation.

ISS・きぼう利用ミッション 「線虫を用いた宇宙環境によるエピジェネティクス(Epigenetics)」 研究成果報告書

代表研究者;東谷 篤志(東北大学大学院生命科学研究科)





別紙2−1
目 次

1.	緒	클	1
2.	研	究計画	2
	2-1	研究目的および方法	2
	2-2	体制	3
	2-3	スケジュール	4
3.	実	験準備・運用	5
4.	実	験結果および成果	7
	4-1.	野生型ならびに hda-4、sir-2.1 変異体における宇宙µG 環境に伴う遺伝子発現変動.	7
	4-2	宇宙µG 環境における線虫の体長変化1	4
	4-3	宇宙µG 環境における線虫 microRNA の発現変動1	8
5.	結	言2	1

1. 緒言

地球上には多種多様な生物が存在し、その誕生以来一貫して重力のあるもとで適応 し、それぞれの遺伝情報を長い時間をかけて進化させてきた。また、生物は、刻々と変 化する環境に適応応答し、一過的なシグナル伝達を介した転写制御により、適宜適切な 遺伝子発現の調節を行っている。従って、地球上の生物をこれまでに経験のない微小重 カ(µG)環境という特殊な宇宙環境下で示す一過的な遺伝子発現の適応応答や、さらに 数世代にわたって世代交代した場合、その遺伝情報がどのように変化するのかは、生物 が重力に対する適応応答を理解する上でも、また、将来の有人宇宙探査において重要な 研究課題といえる。

国際宇宙ステーション(ISS)利用前の宇宙ライフサイエンス実験では、時間的な制 約があり例えばスペースシャトルの利用では 2 週間の宇宙実験が限界であった。従っ て、宇宙環境下での多細胞生物を複数回にわたって世代交代させ、生物進化的な影響を 観察することは極めて困難であった。この点、ISSの「きぼう」日本実験棟が建設され て、より長期間にわたっての培養や飼育が可能となり、世代交代実験をする機会も得ら れてきた。

ゲノム情報をコードする DNA の塩基配列は4つの塩基成分、アデニン(A)、チミン (T)、グアニン(G)、シトシン(C)で構成され、正確な複製機構により高度に維持さ れている。一方、放射線や紫外線、活性酸素などで DNA が傷ついた際には、塩基配列 が置き換わったり、欠失したりするなど変異(図1.1、A)が生じて、遺伝子の機能が失 われたり、逆に異常に活性化する、もしくは発現量が変化するなどの現象が生じる。ま た、近年、塩基A、T、G、Cの並び方は変わることなく、DNA を取り巻くヒストンタ ンパクや塩基自体に化学修飾が生じて、遺伝子の発現量が変化し、その修飾は娘細胞や 子孫にも遺伝するエピジェネティクスという現象(図1.1、右矢印の先)が見出されて きた。この化学修飾の制御として、DNA 塩基のメチル化が最初に発見され、その後、 ヒストンのメチル化やアセチル化(図1、B)など、これら修飾を介した染色体レベル での高次構造変化、さらに、近年、microRNA(miR)(図 1.1、C)など遺伝子をコード していない染色体領域からの転写産物による新規の発現制御機構が、エピジェネティ クスの実体として、線虫からヒトをはじめとする様々な多細胞真核生物で広くみられ ることが明らかになってきた。これらエピジェネティックな制御は、発生や分化、環境 に対する適応応答、さらには細胞のがん化、老化などとも密接に関連しており、様々な 局面での生体機能の制御において重要な新規調節機構としての働きがあることが明ら かにされている。

そこで、本研究ではモデル生物の1つである「線虫」(学名 Caenorhabditis elegans) (図 1.2)を用いて、宇宙で世代交代が繰り返されたとき、ゲノム遺伝子のエピジェネ ティックな変化が生じるのか、また、その変化は宇宙環境への適応応答機構に関わるの か否か、を明らかにすることを目的とした。線虫の雌雄同体の個体は、自家受精により 卵を産卵し、その後、約4日間で成虫にまで育ち、ライフサイクルが短い特徴を有して いる。この特徴を活かして、宇宙で4世代を交代させる実験系を確立した。



図 1.1 ゲノム DNA にみられる突然変異とエピジェネティックな修飾



図 1.2 モデル生物線虫 C. elegans 雌雄同体の成虫

2. 研究計画

2-1 研究目的および方法

今日、人類は国際宇宙ステーションにおいて 6 か月以上の長期に渡る宇宙無重力下 での滞在がなされている。さらに、月面居住や火星への有人惑星探査などが近い将来の 挑戦として挙げられている。一方、µG下では、地上とは大きく異なり、体液の頭部へ のシフトに伴う頭蓋内圧の上昇や、前庭系の攪乱、骨や筋の急速な萎縮が生じる。これ ら諸問題の解決は、より長期に渡る宇宙滞在において克服されなければならない大き な課題である。さらに、これらの課題解決は、単に宇宙での滞在のみならず、地上で急 速に進む高齢化社会に伴う一つのリスク、ロコモティブシンドロームの解決にも資す

る課題として位置付けられる。これまでに、私たちは、モデル生物線虫 C. elegans を用 いて、主に、その幼虫から成虫に生育する過程で、宇宙のµG下での影響を調べてきた。 その結果、2004 年に実施した国際線虫宇宙実験 International C. elegans 1st space experiment (ICE-1st) ならびに C. elegans RNA interference space experiment (CERISE) に おいても、線虫の筋タンパク質の遺伝子発現の抑制が宇宙µG下で生育させたサンプル において確認された^{1,2}。さらに、CERISE 実験では、ミトコンドリアや細胞骨格に関わ る遺伝子群の発現低下、一方、カロリー制限応答に関わるサーチュイン遺伝子 sir-2.1 や ヒストン脱アセチル化酵素遺伝子 hda-4 の僅かながらも有意な発現上昇も観察された ²。ICE-1st実験ではソユーズ宇宙船を用いた約 10 日間の宇宙フライト実験で完全な化学 合成培地 C. elegans maintenance medium (CeMM) がその培養に用いなければならない 各国共通の条件であり^{2.3}、CERISE 実験では L1 幼虫を打ち上げ、軌道上で通常の大腸 菌 OP-50 株を給餌し4 日間培養し軌道上で凍結固定する同調培養を行うとともに、軌 道上で遠心機による人工的な1G対照区も設け、より厳密な宇宙微小重力の影響を比較 することができたが4、クルーの操作トラブルもあり軌道上4日目の凍結固定サンプル は、野生型 N2 株のµG 区と 1G 区の各 1 バックずつのみの回収となった。同一条件で の複数バック間での培養結果を比較することができず、正確な意味での再現性の確認 は次なる宇宙実験の機会に持ち越された。

2015年、私たちは次なる宇宙実験としてこの Epigenetics プロジェクトを実施する機 会を得、次項に記した方法を開発し簡便に軌道上で4世代の継代培養を行い、その後、 凍結固定し地上に回収後、大規模な遺伝子発現解析等を通してµGが生物個体の成長に 及ぼす影響の解析を行うこととした。また、前回の CERISE 実験で観察された *sir-2.1* な らびに *hda-4* 遺伝子のµG 区における発現上昇が、再現性良く見られるものか、また、 その意義を明らかにするうえで、これら両遺伝子の欠損突然変異系統も野生型 N2 株同 様に、4世代軌道上で継代培養し、1G 区ならびに N2 株との遺伝子発現変動の比較解析 を実施した。*sir-2.1* ならびに *hda-4* 遺伝子は、いずれもヒストン脱アセチル化酵素とし ての働きを有することが知られており、これら突然変異を用いた遺伝学的な解析によ りµG がエビジェネティックなヒストン修飾を介して一部、遺伝子発現の制御に関わっ ているのか否か明らかにすることができる。また、miR の網羅的な発現変動についても 調べることで、µG に影響される miR 制御系が存在するか調べることとした。

2-2 体制

(1) 研究体制

本研究は、表 2-2.1 に示す研究体制で実施し、計画していたものに関して実施する ことが出来た。

表 2-2.1 研究体制

PI	東谷篤志	東北大学大学院 生命科学研究科	研究統括、試料準備、解析
CI	東端晃	宇宙航空研究開発機構	遺伝子発現解析、地上予備実験

(2) JAXA 支援体制

本研究で支援した JAXA の体制を表 2-2.2 に示す。計画調整、試料準備作業に至る まで問題なく実施することが出来た。

氏名	所属	役割分担
矢野幸子	宇宙航空研究開発機構	テーマ計画調整統括(~2016.5)
東端晃	宇宙航空研究開発機構	テーマ調整統括(2016.6~)
栗山可奈	一般財団法人 日本宇宙フォーラム	テーマ計画調整、道具立て計画
長田郁子	有人宇宙システム株式会社	道具立て計画、運用調整
橋爪藤子	株式会社エイ・イー・エス	道具立て計画実証、試料準備作業
大島里佳	株式会社エイ・イー・エス	試料準備作業

表 2-2.2 JAXA 支援体制

2-3 スケジュール

2010年3月に第2期利用後半テーマとして選定・採択され、2012年8月に実験移行 フェーズ(外部)審査会、同年10月にJAXA内部の審査を通過した。同年12月には、 ISS実験要求書初版が制定され、2013年7月にA改訂が行われ最終実験要求となった。 検討過程で、試料の回収方法をフィルターで線虫を集め回収する方法から、培養バック ごと凍結回収する方法に変更した。予備実験を通して線虫の培養時間および使用線虫 株の植え継ぎ液量について最適化を行い、実験要求書に反映させた(表 2-3.1)。

年			_	_	~	2	010	۱ <u></u>									,		20)11	,	,							_	,		20	012	_			_			_		,			201	3		_	_	ļ
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	0 1	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1(0 1	1	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	1 5		6	7	8	9	10	ļ
			▲ì	翼定	₹•₿	₩択	_	_	_	_		_								_		_	-	_	_	_						_			フェ	ーズ	移行	亏(外	部)	審	査		_	_	_	_		_		
内						-		_		_	_	_									_	-	-	_	_	_					_	_	_	_	_		フェ・	ーズ	移行	Ξ(P	り部))審	査	_	_	_				
容						-	_	_	_	+		_									-	-	-	-	_	_					-	_	-	_	-				実騎	問	画書	制	定	+	-4	▲Э	ミ 験	計画	町 温	
				_	-	-	_	-	_	+		-			-				_	-	-	-	-	_	-	-			_		-	_	-	-	-	-	-	-	-	-	+1				244-14		(<u>最</u>	<u>終肋</u>	<u>y)</u>	
		_	_	-	-	-	-	+-		+	_	-	-		実	決計 ひょうしょう しょうしょう		周翌	_	-	-	-	+-	+	-	-	_	_	-	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	虮	<u>進</u> .	上美	<u>.</u>	平价	<u>角</u>	_	_	-	•
-						-	-	-		+		-	-								-	-	-	-	+	-					-	-	-	-	-				-	-	-	-	-	+	-	-				
侟					-	2	014	_		_	_	-							20)15							_					20	116									-			201	7	_	_		ľ
百	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	10 1	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1(0 1	1	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3		1 5	T	6	7	8	9	10	2
/1	· ·	-		-			. '				4	▲身	1場	作	首開	始				<u>, ,</u>			<u></u>		<u>.</u>	12			0	2 7			<u>, ,</u>				<u>,</u>	. 12	<u></u>			1			<u>,</u>	<u> </u>	0	<u> </u>		
														4	δnΧ	-5‡	ГĿ	動	道上	宇宇	験厚	船																				T	-	T						
内																	帚谓	試	料の)受(ナ渡	L	-																				-	T						
谷																																														_				
				軌	道」	L実	験	隼備																												飛	行後	全解	折											
_																																																		
年						2	018												20)19																														
月	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	10 1	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	0 1	1	12																								
									報	告書	骬提	出												_																			_	_	_	_				
内										4	▲成	果	報告	会																														_	_	_				
容						-	_	_		+		_									-	-	-	_	_	_					-		-	_	-	_		_	_		_	-	_	+	_	_				
-				_	_		4. 67		_	+		_	_			_	-	_	_	_	-	-	-	_	_	_					-	-	-	-	-	-		-	-	_	-	-	_	+	_	_				
					飛	111	<u> 麦 </u>					_																																						

表 2-3.1 Epigenetics 実験 マイルストン

3. 実験準備・運用

実験材料を Dragon SpX-5/CRS-5 で ISS に打ち上げるにあたり、2014 年 11 月 18 日か らケネディースペースセンター(KSC)にて試料準備作業を開始した。射場作業中に、 ロケットの打上遅延が決定し、当初の予定である 12 月 16 日打上計画が約 1 ヶ月延期 され、2015 月 1 月 10 日に打上げられた。試料到着直後の 14 日に ISS 内でのアンモニ アリークの誤検知があり、安全が確認されるまでの間、軌道上の細胞培養装置(CBEF) が起動できなかった。このため 1 月 21 日まで実験開始が延期される結果となった。ま た、実験開始前の試料保管温度は 4℃を要求していたが、輸送用冷蔵庫(GLACIR)の 不調により、一時的に 10℃程度まで昇温した。このため、POLOR へと移動し保管を続 けた(図 3.1)。いくつか想定外の問題に直面したものの、培養終了時の培養バックの様 子をきぼう船内のカメラで確認をしたところ(図 3.2)、線虫は健全に成長していること が確認できた。4 世代の継代・保存を滞りなく実施することができた。



図 3.1 輸送、軌道上実験時の温度デー

 A:試料受け渡し(GLACIR)
 B:ISS 搬入
 C:POLAR 移動
 D:培養開始

 E:植え継ぎ1回目
 F:植え継ぎ2回目
 G:植え継ぎ3回目
 H:終了



図 3.2 4世代培養後のバック内の線虫の様子

実験試料は、打上シリンジ(線虫)、培養バック(大腸菌入り)で構成されており、 軌道上で二プロ社製の接続ポートが付いた培養バックに線虫を注入することで生育を 開始した。CBEF 内で4日程度20℃培養した後、次世代の子虫のみを濾し取るための フィルターが接続された植え継ぎ冶具を用いて、子虫懸濁液の一部を新たな培養バッ クへ植え継いだ。植え継ぎに用いなかった培養液は、培養バックごとMELFIにて-95℃ で凍結した。以降も同様にCBEF 内で4日程度20℃培養した後、植え継ぎ冶具による 継代を3回繰り返した。最終世代については、培養バック内にDMSO 溶液を注入し、 終濃度5%にて凍結保存した。実験フローを図3.3に示した。各世代の培養時間の実績 は、表3-1に示し、輸送、軌道上実験時の温度データは図3.1に示した。培養時間、培 養温度は計画通りであった。



図 3.3 Epigenetics 軌道上実験フロー

	1 G	μG
1世代目	4d + 18.5h	4d + 18.5h
2世代目	4d	4d
3世代目	4d	4d
4 世代目	4d + 1.5h	4d + 2h

表 3.1 軌道上実験培養時間

4. 実験結果および成果

4-1. 野生型ならびに hda-4、sir-2.1 変異体における宇宙µG 環境に伴う遺伝子発現変動

4-1-1. 宇宙µG 環境に応答する SIR-2.1 の制御

前回実施した CERISE 宇宙実験で、野生型 N2 が L1 幼虫から 4 日間のµG 環境で成長 した成虫と軌道上 1G 環境下との比較において、線虫のカロリー制限応答の鍵となる *sir-2.1* 遺伝子の発現が 2 倍以下ではあるが有意に発現上昇することが確認された(図 4-1-1.1)。Walker らは⁵、*sir-2.1* 遺伝子の過剰発現により *fat-7* 遺伝子の発現抑制とともに、 線虫腸内における脂質蓄積の低下を報告している。私たちは、CERISE 宇宙µG 環境の 成虫において、同様に腸内脂質の低下も確認しており、これらいずれの結果からも CERISE 宇宙フライトサンプルにおいて *sir-2.1* 遺伝子の活性化が生じていることを強 く示唆してきた² (図 4-1-1.1)。この宇宙µG 環境における *sir-2.1* の活性化が再現性良 く、さらに世代を超えて見られるものか否か、*fat-7* 遺伝子発現の変動について、本 Epigenetics 実験において再度調べたところ、N2 ならびに *hda-4* 変異体ではµG 環境での *fat-7* 遺伝子の発現低下と、*sir-2.1* 欠損変異体ではベースレベルでの発現量の上昇なら びにµG 環境による抑制が著しく低下することも確認した(図 4-1-1.2)。以上の結果か ら、CERISE ならびに Epigenetics のいずれにおいても、再現性良く、宇宙µG 環境では、 SIR-2.1 の活性化が生じ下流の *fat-7* をはじめとする遺伝子発現に影響を及ぼすカロリ ー制限応答が誘導されることが強く示唆された。



図 4-1-1.1 前回 CERISE 宇宙実験にみられたµG 環境による SIR-2.1 の活性化²



図 4-1-1.2 宇宙µG 環境による SIR-2.1 の活性化は本宇宙実験でも世代を超えて再現

4-1-2. 宇宙µG 環境に応答する HDA-4 の制御

SIR-2.1 に続き、宇宙µG 環境で hda-4 遺伝子により制御される遺伝子群が存在する か、野生型ならびに hda-4、sir-2.1 変異体の世代を超えた網羅的な遺伝子発現変動の解 析から調べた。その結果、hda-4 変異体において、野生型 N2 や sir-2.1 変異体と比較し て、1G 環境下でのベースレベルでの発現が高く、宇宙µG 環境でより大きく誘導される 機能未知の T20D4.11 遺伝子はじめ幾つかの遺伝子群を見出した(図 4-1-2.1)。また、 これら遺伝子は、第 V 染色体上の 150 kbp の領域に広く跨っていた(図 4-1-2.2)。これ らは野生型 N2 においても宇宙µG 環境でわずかではあるが発現が誘導されていること から、普段 HDA-4 のヒストン脱アセチル化酵素の働きにより、染色体レベルで遺伝子 発現が負に抑えられている領域であるとこと、さらに、宇宙µG の影響により本領域で の遺伝子発現は正の方向に誘導され、hda-4 変異体でその影響が顕著になる複数の遺伝 子を含んだ領域が存在することが明らかになった。



図 4-1-2.1 HDA-4 により負に制御される遺伝子群の宇宙µG での発現上昇



図 4-1-2.2 HDA-4 により負に制御され宇宙µG で発現上昇する第 V 染色体領域の遺伝子群

同様に、宇宙µGの影響が hda-4 変異体により顕著になる遺伝子群を抽出したところ、 第 I から第 V ならびに性染色体 X 上に渡って複数の遺伝子群がクラスターとして存在 することが確認された(表 4-1-2.1)。

Epigenetics	hda-4 (Gene Level)			1世代目			2世代目			3世代目			4世代目	
GeneSymb -	GeneName 🖵	Chromosome location	Fold Q-	Log F(-	Regul	Fold Q -	Log F(-	Regul -	Fold Q-	Log F(-	Reguli -	Fold Q -	Log F(-	Reguli -
T09E11.10	hypothetical protein	I:1234581912347265 I:13.15 +/- 0.000 cM	2.43	1.28	up	4.09	2.03	up	3.85	1.94	up	1.22	0.29	up
oac-45	O-ACyltransferase homolog	I:1235350612356337 I:13.16 +/- 0.001 cM	2.13	1.09	up	2.07	1.05	up	2.92	1.54	up	1.61	0.69	up
oac-44	O-ACyltransferase homolog	I:1235694212359341 I:13.16 +/- 0.001 cM	2.48	1.31	up	1.91	0.94	up	2.15	1.11	up	1.51	0.60	up
bgnt-1.7	B3GNT1, Beta-1,3-N-acetylGucosamiNylTransferase 1, h	I:1237420512376649 I:13.16 +/- 0.000 cM	1.38	0.47	up	10.53	3.40	up	9.76	3.29	up	9.65	3.27	up
gly-16	GLYcosylation related	I:1237933512381032 I:13.17 +/- 0.003 cM	(1.22)	(0.28)	down	4.70	2.23	up	8.41	3.07	up	6.50	2.70	up
glct-3	GLuCuronosylTransferase-like	I:1238576612388791 I:13.19 +/- 0.003 cM	1.50	0.58	up	10.69	3.42	up	8.85	3.14	up	8.45	3.08	up
T15D6.8	hypothetical protein	I:1238976012391004 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.37	0.46	up	10.72	3.42	up	9.37	3.23	up	7.55	2.92	up
T15D6.10	hypothetical protein	I:1239412012396322 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.44	0.53	up	3.37	1.75	up	4.78	2.26	up	4.31	2.11	up
T15D6.11	hypothetical protein	I:1239664412398267 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.43	0.51	up	4.23	2.08	up	3.67	1.87	up	2.78	1.48	up
E03H4.2	hypothetical protein	I:1240311012404489 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.44	0.53	up	5.13	2.36	up	4.07	2.03	up	4.95	2.31	up
E03H4.3	hypothetical protein	I:1240552512406946 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.54	0.62	up	3.62	1.86	up	2.85	1.51	up	1.92	0.94	up
E03H4.4	hypothetical protein	I:1240756412411435 I:13.19 +/- 0.000 cM	1.47	0.56	up	2.78	1.48	up	2.19	1.13	up	2.39	1.26	up
F54D10.8	hypothetical protein	II:38256613827879 II:-6.21 +/- 0.000 cM (interp	1.55	0.64	up	2.88	1.53	up	2.37	1.24	up	1.88	0.91	up
F41G3.20	hypothetical protein	II:67497936751029 II:0.07 +/- 0.000 cM (interp	1.94	0.96	up	2.14	1.10	up	2.61	1.38	up	2.19	1.13	up
C23G10.11	hypothetical protein	III:62151646215576 III:-1.41 +/- 0.000 cM (inte	1.24	0.31	up	7.07	2.82	up	4.54	2.18	up	2.56	1.36	up
Y57G11C.40	hypothetical protein	IV:1470320914704255 IV:12.38 +/- 0.000 c	1.97	0.98	up	3.65	1.87	up	3.01	1.59	up	2.46	1.30	up
Y57G11C.46	hypothetical protein	IV:1481314114816388 IV:12.52 +/- 0.000 c	1.33	0.41	up	3.62	1.85	up	3.02	1.59	up	2.28	1.19	up
M199.8	hypothetical protein	IV:1513383515133999 IV:12.84 +/- 0.000 c	2.00	1.00	up	2.65	1.40	up	4.43	2.15	up	4.69	2.23	up
fipr-1	FIP (Fungus-Induced Protein) Related	V:1236130112361839 V:4.02 +/- 0.006 cM	1.11	0.14	up	2.71	1.44	up	2.27	1.18	up	3.08	1.62	up
cpr-2	Cysteine PRotease related	V:1653300416534110 V:10.29 +/- 0.015 cM	1.18	0.24	up	17.87	4.16	up	8.54	3.09	up	7.41	2.89	up
ZK218.5	hypothetical protein	V:1710113217102017 V:12.79 +/- 0.000 cN	1.58	0.66	up	3.95	1.98	up	3.40	1.77	up	4.28	2.10	up
ZK218.7	hypothetical protein	V:1710578317106656 V:12.80 +/- 0.000 cN	1.89	0.92	up	3.62	1.86	up	3.72	1.89	up	3.99	2.00	up
ZK218.11	hypothetical protein	V:1710753017108418 V:12.80 +/- 0.000 cN	1.31	0.39	up	6.27	2.65	up	4.72	2.24	up	5.23	2.39	up
egas-3	EGF plus ASC domain ion channel	V:1852858018536348 V:17.05 +/- 0.000 cM	2.28	1.19	up	3.17	1.67	up	3.81	1.93	up	1.71	0.77	up
grd-2	GRounDhog (hedgehog-like family)	V:2060979420613929 V:25.03 +/- 0.001 cM	1.51	0.59	up	1.93	0.95	up	2.14	1.10	up	1.14	0.19	up
C31B8.4	hypothetical protein	V:28966372898434 V:-12.86 +/- 0.000 cM (2.08	1.05	up	6.15	2.62	up	5.69	2.51	up	5.16	2.37	up
C36C5.12	UPF0376 protein C36C5.12	V:31584063159165 V:-12.73 +/- 0.000 cM (1.12	0.16	up	2.88	1.53	up	2.39	1.25	up	2.34	1.22	up
T28A11.16	hypothetical protein	V:32583723259218 V:-12.43 +/- 0.000 cM (3.00	1.59	up	9.36	3.23	up	9.08	3.18	up	5.39	2.43	up
T28A11.19	hypothetical protein	V:32688093269510 V:-12.41 +/- 0.000 cM (3.62	1.85	up	15.18	3.92	up	14.92	3.90	up	11.27	3.49	up
128A11.20	hypothetical protein	V:32713953273256 V:-12.40 +/- 0.000 cM (5.73	2.52	up	6.13	2.62	up	6.99	2.80	up	3.37	1.75	up
T28A11.3	hypothetical protein	V:32753333276110 V:-12.39 +/- 0.000 cM (2.31	1.21	up	4.35	2.12	up	2.50	1.50	up	3.74	1.90	up
128A11.2	hypothetical protein	V:32803793281169 V:-12.36 +/- 0.000 cM (2.33	1.22	up	5.27	2.44	up	2.90	1.54	up	2.40	1.30	up
C17B7.9	hypothetical protein	V:35309153532113 V:-12.14 +/- 0.000 CM (3.04	2.14	up	15.16	2.44	up	0.14	2.30	up	7.02	2.21	up
C1787.10	hypothetical protein	V-3340170 3342005 V-12 13 +/- 0.000 cM (7.69	2.14	up	11.39	3.51	up up	6.12	2.61	up	6.64	2.37	up up
T20D4 12	hypothetical protein	V:3397065_3397800 V:-11 82 +/- 0.000 cM (7.80	2.94	up	4.72	2.24	up	3.89	1.96	un	4.43	2.15	up
T20D4.12	hypothetical protein	V-3398600 3399640 V-11 82 +/- 0.000 cM (3.19	1.68	up	8.66	3.11	un	7.35	2.88	un	5.83	2.54	un
T20D4.10	hypothetical protein	V:3400252_3401063 V:-11.81 +/- 0.000 cM (4.20	2.07	up	5.05	2.34	up	5.12	2.36	up	5.42	2.44	up
sm-1	Serpentine Receptor, class N	V:62849206286434 V:-0.19 +/- 0.001 cM	1.60	0.68	up	3.62	1.86	up	5.66	2.50	up	3.47	1.79	up
C03G6.5	UPF0376 protein C03G6.5	V:73652517366204 V:0.72 +/- 0.000 cM (interp	1.72	0.79	up	3.48	1.80	up	2.80	1.49	up	2.21	1.15	up
srbc-12	Serpentine Receptor, class BC (class B-like)	V:849499851332 V:-19.95 +/- 0.000 cM	1.82	0.87	up	2.22	1.15	up	2.28	1.19	up	1.79	0.84	up
C35C5.8	hypothetical protein	X:1153400411536574 X:4.35 +/- 0.000 cM (inte	1.34	0.43	up	5.58	2.48	up	2.52	1.34	up	2.46	1.30	up
zig-3	2 (Zwei) IG domain protein	X:79307387931808 X:-0.94 +/- 0.024 cM	1.80	0.85	up	8.13	3.02	up	3.55	1.83	up	5.49	2.46	up
M60.7	hypothetical protein	X:82581498261175 X:-0.24 +/- 0.000 cM (in	1.46	0.54	up	5.19	2.38	up	2.61	1.38	up	4.42	2.14	up
志定の遺伝子	は、DUE-19ドメインを有する遺伝子群													

表 4-1-2.1 HDA-4 により負に制御され宇宙μG で発現上昇する 全染色体上遺伝子クラスター

これらの多くは機能未知遺伝子であるが、なかでも第V染色体上のT20D4.11 遺伝子 はじめ複数の遺伝子は線虫に特異的な機能未知 DUF-19 ドメインを有するタンパク質 をコードしていた(表 4-1-2.1 赤字、図 4-1-2.3)。このドメインには 12 個のシステイン 残基が保存され、一次構造から細胞外分泌タンパク質と予想され、95 の Paralog がゲノ ム上に存在する。発現部位は、線虫の体壁筋細胞やメカノセンサリーニューロンで認め られる。



図 4-1-2.3 C. elegans ゲノムにみられる DUF-19 ドメインを有する遺伝子群

DUF-19 ドメインを有する機能未知遺伝子の作用を調べる目的で、T20D4.11 遺伝子を 線虫の体壁筋特異的遺伝子 *myo-3* プロモーターを用いて過剰発現させた。その結果、幼 虫 L1 期での発育停止個体や vulva が突出した奇形などの異常を観察するとともに、さ らに成育した成虫においても体長が有意に低下することが確認され、本遺伝子の過剰 発現は成長を負に制御することが確認された(図 4-1-2.4)。





さらに、これら遺伝子の発現変動とヒストン修飾のエピジェネティックな変化を調 べる目的で、ヒストン H3 の K27 のトリメチル化を T20D4.11 遺伝子のプロモーター領 域(遺伝子間領域) IG1 と IG2 において ChIP 法により調べた。その結果、野生型 N2 と 比較して hda-4 変異体では有意にトリメチル化の程度が低減していること、さらに、こ のトリメチル化は宇宙µG 環境で有意に増加することが観察され(図 4-1-2.5)、µG 環境 に応じたエピジェネティックな変化と遺伝子発現の変動をはじめて捉えることに成功 した。

ヒストンH3 K27のトリメチル化は転写を抑制する方向のエピジェネティックな変化 であり、野生型では hda-4 変異体よりこのトリメチル化のレベルが総じて高いことは、 T20D4.11の発現がより抑えられている状況と一致する。一方で、いずれも宇宙µG 環境 で本遺伝子発現が上昇するにも関わらず、このトリメチル化は逆に亢進していること は、このトリメチル化レベルの変化だけで単純に T20D4.11 遺伝子の発現量の増加を説 明することはできない。近年、T20D4.11 をはじめとする遺伝子群がヒストン脱メチル 化酵素 jmjd-3.1 ならびに jmjd-1.2 遺伝子の過剰発現によって発現誘導されること、これ ら jmjd 遺伝子の発現誘導はミトコンドリアの機能障害によって生じることが近年報告 されており⁶、これら脱メチル化酵素を含めたエピジェネティックな制御が宇宙µG 環境において生じ、遺伝子発現の上昇、さらにその発現上昇を抑制すべく新たな H3 K27のトリメチル化が亢進した可能性が考察された(図 4-1-2.6)。

一方で、この成虫にみられたトリメチル化の変化は、次世代のL1 幼虫においてはみられず、発生・成長段階で、微小重力の影響によって、その世代内での変化であり、子孫においてはリセットされることもわかった。



図 4-1-2.5 T20D4.11 の上流プロモーター領域(遺伝子間領域 IG1 と IG2) にみられるヒス トン H3 K27 トリメチル化修飾の変化。第3世代の線虫成虫のフライトサンプルを解析。宇 宙µG 環境では、野生型 N2 ならびに *hda-4* 変異体において H3 K27 のトリメチル化が亢進 し、また、野生型 N2 と比較して *hda-4* 変異体においてはこのトリメチル化レベルはいずれ も低下していた。



図 4-1-2.6 宇宙µG 環境にみられるヒストン H3 K27 トリメチル化修飾の変化と 脱メチル化酵素 JMJD による発現制御モデル

4-2 宇宙µG 環境における線虫の体長変化

4-2-1 BMP・TGF-βシグナルのμG 環境による低下

前回の CERISE 宇宙実験において軌道上の 1G と μ G との環境で育った成虫を比較し たところ、遊泳運動時の速度や振幅が低下するとともに、体壁筋に加えて、細胞骨格、 細胞外マトリックス、キュティクルコラーゲン、代謝などに関わる酵素・タンパク質、 ならびにそれらをコードする遺伝子群の発現レベルが有意に低下することを見出した ^{2,7}。さらに、線虫の体長も宇宙 μ G では有意に短くなり、その要因として、体長を正に 調節する BMP・TGF- β ファミリーの DBL-1 シグナル伝達系が μ G で抑制されることが 考察された^{2,7}。

そこで Epigenetics 実験においても、再現性が得られるか、DBL-1 の下流因子である rol-6 や sqt-1 遺伝子 (キュティクルコラーゲン)の野生型 N2 ならびに hda-4、sir-2.1 変 異体の軌道上 1G とµG サンプルの 4 世代にわたる発現変動を調べた。その結果、第 2 世代以降でいずれの系統においても、宇宙µG 環境での成育により rol-6 遺伝子の発現 が抑制されることが明らかになった(図 4-2-1.1)。



図 4-2-1.1 野生型 N2 ならびに hda-4、sir-2.1 変異体における rol-6 や sqt-1 遺伝子の4世代にわたる宇宙環境での発現変動

DBL-1 シグナルの低下に加えて、前項で述べた成長を負に制御する DUF-19 ドメイ ンを有する T20D4.11 遺伝子をはじめ発現上昇は、宇宙µG 環境で成長した線虫の体長 を有意に低下させる可能性が強く示唆された。そこで、Epigenetics フライトサンプルの 成虫の体長を計測したところ、特に2世代目以降において野生型 N2 ならびに *sir-2.1* で はある程度の、*hda-4* 変異体では大きく、宇宙µG 環境による体長の低下が観察された (図 4-2-1.2)。



図 4-2-1.2 野生型 N2 ならびに hda-4、sir-2.1、変異体における宇宙環境での体長の低下

重力環境の変化によって DBL-1 シグナルが変動したことから、地上でも液体培地の 深さ(静水圧)や粘性を変化させて、力学的負荷に応じて DBL-1 シグナルが変動する か確かめる実験を行った。その結果、静水圧ならびに粘性を増加させると DBL-1 シグ ナルが上昇することを明らかにした⁷。線虫は受精後の細胞系譜ならびに体細胞数が厳 密に決定されており、給餌量が一定であれば、からだの大きさは遺伝的な要因による支 配が中心に考えられてきたが、宇宙はじめ地上実験の成果として、重力に伴う力学的刺 激が DBL-1 を介したシグナル経路を活性化し、その結果、外骨格である表皮コラーゲ ンや体壁筋の発現量が増加し、代謝も活性化され、逆に、μG の力学的刺激が乏しい状 況では BMP・TGF-βシグナル経路の活性が低下するものと考察された。

4-2-2.Catechol-O-Methyl Transferase (COMT) 遺伝子の発現変動

線虫の DBL-1 は、主に腹部神経索をはじめとする運動神経、頭部の感覚神経など複数の神経細胞において発現している。つまり、線虫の重力刺激の応答には、これら神経細胞を介した BMP/TGF-βシグナルが存在するものといえる。そこで、力学的刺激から運動神経における DBL-1 の発現変動に至る神経伝達の過程が次なる課題としてあげられる。CERISE 実験ならびに 4 世代の Epigenetics 実験に共通して、 μ G のサンプルで再現性良くドーパミンの分解に関わる Catechol-O-Methyl Transferase (COMT) 遺伝子の発現が低下することを見出した(図 4-2-2.1)。本遺伝子発現はドーパミンを添加すると上昇したことから、宇宙 μ G で成育した線虫ではドーパミン量の低下が生じている可能性が強く示唆された(図 4-2-2.2)。そこで、3D クリノスタットを用いた疑似微小重力環境で線虫を成育させて、COMT 遺伝子の発現ならびに線虫のドーパミン量の定量を行ったところ、1G の静置条件と比較して、3D クリノスタットのサンプルでは COMT 遺伝子の発現が低下するとともに、ドーパミン量も 1/3 以下のレベルにまで低下することを見出した(図 4-2-2.2)。



図 4-2-2.1 宇宙µG 環境で成育した線虫にみられる comt-4 遺伝子の発現低下



図 4-2-2.2 3D クリノスタットを用いた培養における comt-4 遺伝子の発現低下と内生ドーパミン量の減少

ロシアのバイオサテライト BION-M1 による1ヵ月のマウス宇宙飛行では、骨や筋量 の低下に加えて、大脳基底核の黒質線条体において、COMT 遺伝子ならびにドーパミ ン生合成の律速酵素遺伝子チロシンヒドロキシラーゼやドーパミン D1 受容体の遺伝 子の有意な発現低下が報告され、µG 環境はマウスの脳内においてもドーパミン量を低下させることが強く示唆されている⁸。ドーパミンは、快や意欲、学習に加えて、運動や筋の調節を担う重要な神経伝達物質であり、線虫においても培養プラスチックシャーレの外から軽く叩くタップ刺激に対する応答と可塑性、餌の有無に伴う運動方向の転換、ターンの角度などに関わることが知られている。すなわち、宇宙µG 環境では、マウス、線虫のいずれも、その飼育や培養において床面との接触が極端に抑えられ、長期に渡るこれら接触刺激の低減が、ドーパミンの産生を低下させた可能性が強く示唆された。

宇宙滞在マウスと線虫のµG ならびに 3D クリノスタット培養で共通に予想されるド ーパミンの低下は、1G 環境では必然的に生じる床(底面)との接触が失われ、いわゆ る触覚の長期に渡る感覚遮断に起因した可能性を提唱したい。運動によるドーパミン の放出に加えて、皮膚の触覚刺激でラットの側坐核でドーパミン放出が増加するとい う報告¹⁵もあり、µG 環境では運動に加えて触覚刺激を施すことが、神経を含めた骨、 関節、筋肉の全体からなる運動器の機能低下、さらに、ドーパミンは学習や認知機能に も重要で、これらの機能低下リスクの回避にもつながるものと考察された。

4-3 宇宙µG環境における線虫 microRNA の発現変動

宇宙実験では、各株 1-4 世代目まで N=2 で試料を得ている。まず、予備確認として、 1 世代目および 4 世代目の 1 試料について各株の miRNA 発現変動をマイクロアレイチ ップにより解析した。検出された 227 miRNA についてµG 群、1G 群を比較したところ、 図 4-3.1 に示したように、野生株では世代を問わず、微小重力下で発現が 2 倍を大きく 超えてアップレギュレーションするものが複数認められ、変異株と異なる分布を示し た。この結果の再現を得るために全系統全世代の試料を解析したが再現性は得られな かった。

そこで、次に全系統全世代の試料を用いた RNAseq 法による解析を行った。図 4-3.2 に 1 世代目でμG - 1G 間で発現が変化した miRNA をフィルタリング (Delete count 0, fold change abs>1.5) し、発現のアップレギュレーションとダウンレギュレーションご とにベン図を作成した。この結果、全ての株に共通して発現の上がるものが 3 miRNA、 下がるものが 4 miRNA 見つかった。各 miRNA 名は表 4.1-1 に示した。我々は、過去の 宇宙実験 CERISE でも miRNA の解析を行っており、このとき、1 世代目、2 世代目ま での線虫試料を得ている。そこで共通的に変化する miRNA を探索したが、今回の Epigenetics 結果と一致するものは得られなかった。さらに、第4 世代まで世代ごとに同 様の解析を行った。この結果、世代を通じて共通する miRNA が変化することはなかっ た(表 4-3.1)。株別に、世代を通じて変化する miRNA の探索結果を図 4-3.3 に示した。 この結果は、miRNA の発現制御は世代を超えて生じることはほとんどなく、世代ごと にユニークであり、サンプリングのタイミングなど微妙な発育ステージの違いや、μG



以外の何らかの要因に応答して変化したものと考察された。

図 4-3.1 miRNA 解析 線虫株共通的な1世代目の発現変化 左:発現増加、右:発現減少

	UP	DOWN
1 世代目	mir-791,mir-250, mir-8199	mir-2212, lin-4, mir-797,mir-358
2 世代目	mir-239a-5p	mir-75-5p, mir-235-5p
3世代目	-	mir-37-5p, mir-38-5p
4 世代目	mir-4920-5p	mir-243-5p, mir-797-3p

表 4-3.1 線虫株共通で変化した各世代の miRNA



図 4-3.3 miRNA 解析 株別の世代間の発現変化 左上段:野生株 発現増加、右上段:野生株 発現減少 左中段: hda-4 変異株 発現増加、右中段: hda-4 変異株発現減少 左下段: sir-2.1 変異株 発現増加、右下段: sir-2.1 変異株 発現減少

5. 結言

ISS・きぼう利用ミッション線虫を用いた宇宙環境によるエピジェネティクスによ

- り、以下の成果が得られた。
- ① 線虫 C. elegans を軌道上で連続的かつ同調的に継代培養する手技を確立した。
- ② サーチュイン遺伝子(脱アセチル化酵素遺伝子) sir-2.1の宇宙µG 環境による世代 を超えた継続的な活性化をみいだした。そのことは、宇宙µG 環境ではいわゆるカ ロリー制限応答のような代謝活性の低下が生じる可能性を強く示唆した。
- ③ 宇宙µG 環境において、少なくとも1つのヒストン脱アセチル化酵素 HDA-4 が作 用し、特定の染色体領域のエピジェネティックな転写制御を担うことが遺伝学的 ならびにヒストン H3 K27 残基のトリメチル化の変動により明らかにした。なお、 このトリメチル化は、次世代のL1 幼虫においてはリセットされていた。
- ④ また、その1つの下流遺伝子 T20D4.11 は宇宙µG 環境において発現が上昇すること、さらに、この遺伝子の過剰発現は体長や成長を抑制することを新規に見出した。
- ⑤ 宇宙μG 環境における成長では、からだを作る BMP・TGF-βシグナルが低下するこ とを明らかにした。
- ⑥ エビジェネティックに制御されていた T20D4.11の発現誘導に加えて、運動神経から放出される BMP・TGF-βシグナルが低下し、宇宙μG 環境において線虫のからだの成長を抑える方向に作用することを示した。このことは、μG は、からだを支える力が消失することからいわゆる廃用性筋萎縮の分解系が亢進するとともに、成長(発達)も抑制される可能性を強く示唆した結果といえる。
- ⑦ 宇宙µG環境ならびに疑似微小重力環境3Dクリノスタットを用いた培養において、 いずれもドーパミンシグナルが低下することを明らかにした。ロシアの BION-M1 を用いた1ヵ月間の長期宇宙滞在マウスの脳においても同様にドーパミンシグナ ルの低下が報告されており、生物種を越えた共通性が確認された。宇宙µG環境で は接触刺激が著しく低下することにより、ドーパミンシグナルが低下する新たに 可能性が示唆された。
- ⑧ microRNAの網羅的な発現解析を実施したが、宇宙µG環境に応答した microRNAの発現変動は見出せず、宇宙µG環境に応答したエビジェネティックな制御は主にヒストン修飾を介したものが中心であることが示唆された。

最後に、研究開始当初に立てた達成基準(サクセスクライテリア)との対応について、以下にまとめた(表 5-1)。

表 5-1

Ⅰ5. 達成基準(サクセスクライテリア)科学的							
	2013.5.31修正案	対応成果番号	自己評価				
ミニマム	宇宙環境下で生物が世代交代を繰り返 した際に、子孫のゲノムに生じるエピ ジェネティックな制御が存在の有無が明 らかになること。	③HDA-4の役割の発見とヒストン修飾	0				
フル	宇宙環境下で生物が世代交代を繰り返 した際に、子孫のゲノムに生じるエピ ジェネティックな制御で、選択的な適応 性が存在するのが分かり、特に筋肉や カロリー制限に関しての制御機構を明ら かにする。	 ②サーチュインを介したカロ リー制限機構 ④HDA-4による制御因子 T20D4.11の新規機能の理解 	0				
エクス トラ	宇宙 µ Gがエピジェネティックな制御機 構へ与える影響について発生・成長段 階を含めた考察ができる。	④少なくとも、HDA-4による制 御因子T20D4.11のヒストン修 節は、成虫になる発生過程で 影響を受け、次世代のL1幼虫 ではリセットされることから、微 小重力下で個体が成長する過 程で変化するエピジェネティッ クな制御と考察している	 ⑤、⑥、⑦その他、エピジェネティックな制御との 関連性は不明であるが、 微小重力とドーパミン、 BMPなどとの関連性などの新知見が得られた。 				

Ⅱ.-5. 達成基準(サクセスクライテリア)運用的

	クライテリア	対応成果番号	自己評価
ミニマム	 1G区、μG区両方について、以下を実施できること。 ・軌道上で野生株の線虫を0世代から3 世代目まで継代培養でき、0から2世代目の凍結サンプルを得られること。 	Ð	0
フル	1G区、μG区両方について、以下を実施できること。 ・軌道上で野生株、2種の変異株の線虫を0世代から4世代目まで継代培養でき、 0から3世代目の凍結サンプルを得られること。	1	0
エクス トラ	フルサクセスに加え、1G区、µG区両方 について、以下を実施できること。 ・野生株、変異株の4世代目の植継ぎ最 終サンプルを取得から6カ月以内に冷 凍で回収すること。	•	0

報告書を閉じるにおいて、この場を借りて、線虫の宇宙実験の実施ならびに解析にお いて、多くの国内外の共同研究者ならびに、宇宙飛行士、研究協力者のサポートを頂き、 深くお礼申し上げます。 【参考文献】

- Higashibata A. *et al.* Decreased expression of myogenic transcription factors and myosin heavy chains in *Caenorhabditis elegans* muscles developed during spaceflight. *J Exp Biol.* 2006 Aug; 209(Pt 16):3209-18. PMID: 16888068.
- Higashibata A. *et al.* Microgravity elicits reproducible alterations in cytoskeletal and metabolic gene and protein expression in space-flown *Caenorhabditis elegans*. *NPJ Microgravity*. 2016 Jan 21; 2:15022. doi: 10.1038/npjmgrav.2015.22.
- 3. Szewczyk NJ. *et al.* Description of International *Caenorhabditis elegans* Experiment first flight (ICE-FIRST). *Adv Space Res.* 2008 Sep 15; 42(6):1072-1079. DOI: 10.1016/j.asr.2008.03.017.
- 4. Higashitani A. *et al. C. elegans* RNAi space experiment (CERISE) in Japanese Experiment Module KIBO. *Biol Sci Space*. 2009 Oct 1; **23**(4):183-187. DOI: 10.2187/bss.23.183.
- Walker AK. *et al.* Conserved role of SIRT1 orthologs in fasting-dependent inhibition of the lipid/cholesterol regulator SREBP. *Genes Dev.* 2010 Jul 1; 24(13):1403-17. doi: 10.1101/gad.1901210.
- Merkwirth C. *et al.* Two Conserved Histone Demethylases Regulate Mitochondrial Stress-Induced Longevity. *Cell.* 2016 May 19; 165(5):1209-1223. doi: 10.1016/j.cell.2016.04.012.
- 7. Harada S. *et al.* Fluid dynamics alter *Caenorhabditis elegans* body length via TGF-β/DBL-1 neuromuscular signaling. *NPJ Microgravity*. 2016 Apr 7; **2**:16006. doi: 10.1038/npjmgrav.2016.6.
- Popova NK. *et al.* Risk neurogenes for long-term spaceflight: dopamine and serotonin brain system. *Mol Neurobiol.* 2015; **51**(3):1443-51. doi: 10.1007/s12035-014-8821-7.

【成果リスト】

(学術論文)

 Higashibata A, Hashizume T, Nemoto K, Higashitani N, Etheridge T, Mori C, Harada S, Sugimoto T, Szewczyk NJ, Baba SA, Mogami Y, Fukui K and Higashitani A. Microgravity elicits reproducible alterations in cytoskeletal and metabolic gene and protein expression in space-flown *Caenorhabditis elegans*. *NPJ Microgravity* 2016;2: 15022, doi: 10.1038/npjmgrav.2015.22.
 (注:上記論文に使用したデータは、全て前回 CERISE 宇宙実験の成果データをもとに 発表したが、本 Epigenetics でも同様な宇宙µG 環境での遺伝子発現変動や体長の低下の 再現を確認することができたので、本論文を発表することができ、深く関連する成果と いえる。)

(以下 論文執筆中)

Higashitani A, et al., Reducing dopamine system under microgravity conditions in C. elegans.

Higashitani A, et al., Epigenetic alteration in response to space microgravity in C. elegans.

(出版物)

- 門間 健太、東谷 篤志 線虫筋細胞の無重力応答と熱中症モデル研究(特集 宇宙医学 研究の最先端) 腎と骨代謝 2017, Vo. 30, 211-216
- 東谷 篤志 微小重力に対する線虫の応答(特集 宇宙の極限環境から生命体の可塑性 をさぐる)生体の科学 2018, Vol. 69, 102-105
- 3. 東谷 篤志 宇宙フライト線虫にみられた運動器への影響(特集 地上生命の秘密を探 る宇宙医学)月刊 細胞 2018 印刷中

(学会等発表)

- 1. Momma K, Homma T, Isaka R, Sudevan S, Higashitani A. A heatstroke model in *C. elegans*. The 21th International *C. elegans* Meeting. June 21-25, UCLA, LA, USA.
- Sudevan S, Takiura M, Kubota Y, Higashitani N, Higashitani A. Mitochondrial dysfunction mediated ECM degradation in *C. elegans*. The 21th International *C. elegans* Meeting. June 21-25, UCLA, LA, USA.
- 3. Higashitani A. Muscle molecular physiology in spaceflown *C. elegans*. 14th Japan-Korea Joint Seminar on Space Environment Utilization Research. 2017, August 24-25, Daejeon, Korea.
- Higashitani A. Molecular physiology in C. elegans body-wall muscles. INDO-JAPAN Conference: Epigenetics, Human Microbiomes and Disease. 2018, February 7-9, Kolkata, India. (招待講演)

(報道等)

- 1. 東谷篤志 河北新報 2016年1月23日 「宇宙育ちの線虫は虚弱体質 東北大院、国際宇宙ステーション実験で確認」
- 東谷篤志 東端晃 Yahoo ニュース 2016 年 1 月 23 日 「東北大と JAXA、体長 1mm の小さな生き物「線虫」の筋肉も宇宙で育てるとやせ細 ることを発見」http://headlines.yahoo.co.jp/hl?a=20160123-00010000-sorae_jp-sctch
- 東谷篤志 東端晃 日刊工業新聞 2016年1月28日
 「微小重力下で筋力低下 東北大など「線虫」で実証 運動能力、地上の6割」
- 東谷篤志 東端晃 大学ジャーナルオンライン 2016年2月1日
 「JAXA 東北大学が宇宙実験 体長1ミリの線虫の筋肉やせ細る」
 http://univ-journal.jp/4612/
- 東谷篤志 東端晃 日経産業新聞 2016年2月8日
 「線虫も宇宙で筋肉細く、東北大など、「きぼう」で実験」
- 東谷篤志 Newton 2016 年 4 月 7 日号 FOCUS pp12
 「無重力では細胞一つ一つが"やせ細る"」

平成 30 年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果(生命医科学)

研究課題

宇宙環境での線虫の経世代における環境適応の研究(Epigenetics)

代表研究者;東谷 篤志(東北大学)

総合評価

A:目標を充分に達成した(フルサクセス相当以上)

宇宙での線虫の4世代継代に成功し、その経緯を解析、宇宙空間で世代交代した生物が、エピジ ェネティックな作用を介して、形質が引き継がれることを示した点は高く評価できる。また、微小重力と ドーパミンの関連性が示唆されたことは意義が高い。関連遺伝子の発現推移が記載され、今後のよ り詳細な解析により、その制御機構の解明が期待される。また、同じく線虫をモデル生物とした次期ミ ッションの成果も期待される。

平成 31 年 3 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学分野)

平成 30 年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果(生命医科学)

研究課題

ISS 搭載凍結生殖細胞から発生したマウスを用いた宇宙放射線の生物影響研究(EmbryoRad)

代表研究者;柿沼 志津子(放射線医学総合研究所)

総合評価

B:目標を達成した(ミニマムサクセス相当)

マウス凍結胚を ISS 搭載後、ISS 搭載凍結胚からマウスを始めて作出し、地上で継世代以降のマ ウスを作出し、ゲノム解析まで行った事は評価できる。ISS 保管胚の生存率の低さと ISS 保管胚から 作出したマウスに認められる DNA 変異は意義のある発見である。今後、宇宙放射線の特異性の再 現性などを含めた解析が重要である。

一方、生存胚率の減少は、高温の冷凍保存による可能性もあり、宇宙放射線影響との結論には至っていない。原因をさらに検討し、今後の宇宙実験に反映させることが必要である。全 DNA ゲノム解析、がん遺伝子解析など、詳細な解析を継続し、早期の成果纏め、論文公表を期待する。

平成 31 年 2 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション 「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価(Mouse Epigenetics)」 研究成果報告書 代表研究者:高橋 智(筑波大学)

平成 31 年 2 月

1. 諸言

1.1 研究概要

地球環境の生物は 1g の環境中で生物進化を遂げてきており、ヒトを含めた高等ほ乳類にお いても 1g 環境に適応して生体システムが構築されている。微小重力環境下では、宇宙酔い、循 環器動態変化による血液局在の変化(ムーンフェイスなど)、骨量の著しい減少が観察されるこ とが知られており、微小重力環境に対応するために、様々な遺伝子発現変化が誘導されている ことが予想されるが、これまでほ乳類での実験が難しかったため、その詳細は解析されていない。 ー方マウスでは、母体における栄養状態が仔の体重に影響を及ぼすし、それが世代を超えて伝 達されること(参考文献 1:Waterland RA et al., *Mol Cell Biol.* 2003)、メスラットの仔に対する対 応が仔の遺伝子発現に変化をもたらすこと(参考文献 2:Weaver IC et al., *Nat Neurosci.* 2004)、オスラットの栄養状態が子孫の遺伝子発現に変化をもたらすこと(参考文献 3:Ng SF et al., *Nature.* 2010,参考文献 4:Carone BR et al., *Cell.* 2010)が報告されており、親の環境 変化が、エピゲノムの変化を通して、次世代へ伝達されることが報告されている。微小重力、宇 宙線等の宇宙環境ストレスによる影響が、次世代の遺伝子発現に変化をもたらす可能性が考え られる。

本研究テーマにおいては、宇宙実験と地上実験(過重力環境)の成果を総合し、重力環境変 化における遺伝子発現/修飾に関して、生命が 1g 地球環境上で進化・適応してきたメカニズム を遺伝子発現およびエピゲノムの観点から明らかにする。

1.2 背景·意義

これまでの宇宙実験は細胞レベルでの研究が主であり、個別の組織の培養細胞に対する微 小重力の影響に関しては知識が蓄積されつつあるが、高次生体機能に関わる宇宙環境応答メ カニズムの解明に向けた研究は困難であった。本研究でモデル生物としてマウスを用いることに より、細胞レベルで成果が蓄積されつつある骨代謝、筋萎縮メカニズムを含め、様々な宇宙環境 応答メカニズムのほ乳類としての適応性を検証することができ、これまで得られた知見を統合す ることができる。また、地上では既に様々な疾患モデルのトランスジェニックマウス等が実験個体 として存在し、インパクトの高い多くの研究成果はマウス等を対象としたものである。そのため、 宇宙でマウスを用いた実験を実現することにより、これまで宇宙実験に関与がなかった多くの第 一線の研究者の参画や成果の多様化など、軌道上の実験環境として飛躍的に発展することが 期待できる。このような理由により、本実験は科学技術の発展に寄与すると考えられる。

人類の活躍を宇宙に拡大する科学的基盤を確立することは、地上における生活の向上に寄 与するためにも、重要な課題であると考えられる。そのために、ヒトが長期に宇宙に進出するた めに必要な様々な科学的基盤を構築しなければならない。本実験は、ヒトと同じほ乳類であるマ ウスを用いるため、得られる科学的知見をヒトへ外挿しやすい。また、本実験により、ほ乳類へ の宇宙環境の長期的な影響のみならず、そこからの回復過程の評価や病態モデルを用いた各 種薬物の効果の確認、代謝・免疫系を含む生体システム全体としての影響評価などが実施され、 より発展的な研究に向けた基盤が構築されることも期待される。 2. 研究計画

2.1 研究目標

生物のもつ遺伝情報が次世代に受け継がれることはメンデルの法則として良く知られている (DNA 配列に依存する遺伝様式)。しかし、後天的に獲得した形質がどのように世代を超えて継 承されているかの分子機序は明らかでなかった。最近、「DNA 配列に依存しないかたちの遺伝 様式」としてエピゲノムが注目されており、エピジェネティクス研究に対して大型助成が積極的に 行われている。また、エピゲノムは様々な外来刺激・環境の変化により変動し、その変動が世代 を超えて継承され得る。重力環境変化による当代のマウス個体の各組織の遺伝子発現変化を DNA マイクロアレイにより(網羅的に)解析し、遺伝子発現変化およびエピゲノム変化を明らかに するだけでなく、それらが次世代に受け継がれるかを解析し、哺乳動物が 1g 地球環境上で進 化・適応してきた道程の全貌にエピゲノムの観点から迫る。

さらに重点臓器として、宇宙飛行士の長期宇宙滞在で顕著に変化が見られる骨・筋・平衡器 官に着目し、微小重力飼育によるマウス個体の骨減少・筋萎縮・平衡感覚異常にかかわる遺伝 子情報(疾患関連遺伝子情報)について、組織における遺伝子発現変化解析に加え、重点的に エピゲノム変化解析を行うことにより、従来よりも変化遺伝子を精度高く検出し、標的を絞り込む こととした。

【サイエンス面】

軌道上から回収したマウス(当代)において、「宇宙環境(微小重力、宇宙放射線)では、地 球環境とは違うストレスがかかるため、生体内で特異的な遺伝子発現またはエピゲノム的な変 化により、環境適応反応が誘導される」という仮説を検証し、さらに宇宙飼育マウスから得られ た精子を用いて次世代マウスを作製し、その遺伝子発現変化がエピゲノム的変化として、次世 代に引き継がれたかどうかを判断する。

【社会へのアウトプット面】

骨・筋・前庭器官などの場合、微小重力での影響と、地上の高齢者等に見られる疾患との 類似性から、同定した遺伝子群が疾患に関与する可能性が非常に高いため、これらの遺伝子 情報(遺伝子発現データベース)を製薬企業に提供する。

サクセス	クライテリア*1	クライテリア*1	補足
	(サイエンス)	(社会へのアウトプット)	【判断時期など】
ミニマム サクセス	軌道上から回収したマウ ス(当代)において、「宇宙 環境(微小重力、宇宙放 射線)では、地球環境とは 違うストレスがかかるた め、筋肉等の組織に子発 の組織に子発現 では、 により、環境適応反応 が実証できること。	宇宙飛行士の長期宇宙滞 在で観察される抗重力筋 の萎縮・加重骨量の減少・ 前庭機能不全・循環器動 態変化による血液局在の 影響のうちいずれかが軌 道上飼育マウスにおいて 観察でき、ヒトへの影響と 比較できること。	試料回収後1年以内 【設定根拠】 (サイエンス) エピゲノム研究は最近重 点化され、地上で幅広く行われているが、宇宙飼育 マウスでの環境適応反応 解析を行うことは世界で初めて。 (社会へのアウトプット面) マウス・ヒト間の比較は変化の傾向の有無で判断する。 (ヒトへの影響は既知のデータを使う)

サクセス	クライテリア*1 (サイエンス)	クライテリア*1 (社会へのアウトプット)	補足 【判断時期など】
フル サクセス	上記に加えて、当代から 得られた精子を用いて次 世代マウスを作製でき、そ の遺伝子発現変化を DNA マイクロアレイにより (網羅的に)解析すること で、当代から次世代に宇 宙環境の影響が引き継が れるかどうかを遺伝子発 現の観点で判断できるこ と。	上記に加えて、筋萎縮や 骨量減少・前庭機能不全 のいずれかの病態に関 し、微小重力/人工重力マ ウス群の比較により、従来 より精度の高いパスウェイ 解析*3 を実施でき、病態 を引き起こす遺伝子群を 絞り込んで同定できるこ と。 さらに得られた病態遺伝 楽企業等に提示できるこ と。	試料回収後2年以内 (「サイエンス」のクライテリ ア判断には次世代を作出 する必要があるため) 【設定根拠】 (サイエンス) 宇宙環境適応反応が次世 代に受け継がれるかどう かを世界で初めて解析し 判断する。 (社会へのアウトプット面) 重要臓器を引き起こする にするにすること は、創薬の標的分子絞り 込みのプロセス加速につ ながる。
エクストラ サクセス	「当代で誘導された遺伝 子発現変化がエピゲノム 的変化として記憶され、次 世代にまで引き継がれる」 という新たな事象が発見 できること。 宇宙実験と地上実験(過 重力環境)の成果を総合 し、重力環境変化におけ る遺伝子発現/修飾の新 たな法則性が見出され、 生命が 1G 地球環境上 で進化・適応してきたメカ ニズムをエピゲノムの観 点から明らかにできるこ と。	上記に加えて、筋萎縮・骨 量減少・前庭機能不全な どの病態を引き起こす遺 伝子群として、これまで 『未知』だった全く新しい遺 伝子群を、いずれかの病 態で 1 つ以上発見・同定 し、得られた病態遺伝子 情報データベースを製薬 企業等に提示できること。	試料回収後2年以内 (「サイエンス」のクライテリ ア判断には次世代を作出 する必要があるため) 【設定根拠】 (サイエンス) 宇宙環境適応反応が次世 代に受け継がれることを 世界で初めて明らかにす る。 (社会へのアウトプット面) 重要臓器である骨・筋系 等の病態を引き起こす新 規遺伝子群が明らかにな れば、新薬の開発につな がる。

*1 両方のクライテリアを満たす場合にサクセスとする。

*2 エピゲノム変化とは、遺伝子配列の変化ではなく、DNA メチル化/ヒストン修飾などの遺伝子修飾のことである。

*3 遺伝子産物(タンパク質)は、単独で機能せず数個以上のグループで機能している。その上 位のグループが下位のグループへ情報を受け渡すことで、入力(受容)から出力(疾患など) に至る。これをパスウェイという。

- 2.2 体制
- 2.2.1 研究チーム体制

平成 24 年度「きぼう」利用 生命科学分野 重点課題募集区分 候補テーマとして選定され、 候補フェーズにおいて、宇宙航空研究開発機構(JAXA)事業として、重点戦略目標を達成する ための研究を実施するため、JAXA に研究総括をおき、その指導のもとに、研究チーム体制、フ ライト実験要求の詳細化および地上予備実験計画を検討した。



研究総括(PD)	・特定の分野の複数の研究プロジェクトを指導する ・宇宙実験の成果創出を確実にするため、JAXA 及び研 究チームを指導し計画の進捗を確認する。
代表研究者(PI)	・研究目標を達成するために編成される複数のサブ研究 チーム(個人研究者含む)のリーダ。研究総括の指導の もと、研究チームを指揮し、研究全体に責任を持つ。
共同研究者(CI)	代表研究者チームの解析担当メンバーもしくはサブ研究 チームのリーダ。代表研究者により指示された分担領域 の研究責任を持つ
研究プロジェクトマネージャ	・研究総括の指導のもと、研究プロジェクト実施の実行上 の責任を持つ。
領域アドバイザ	・個々の研究領域における専門的な助言を与える。
プロジェクト推進担当	・JAXA 内における予算調整、「きぼう」利用リソース調整、および宇宙実験計画立案、実験装置等の開発など、 必要なエンジニアリング活動を行う。
プロジェクトサイエンティスト(PS)	・研究チーム・プロジェクト推進担当と連携し、研究プロジェクトを科学的な面で推進する。

本研究における研究チーム体制を以下に示す(フライト実験実施時)。各臓器・器官ごとに第 ー線の研究者が参画し、網羅的な研究体制を構築した。また、国際協力による国際宇宙ステー ション(ISS)全体としてのマウス利用研究成果の拡大を目指した。

代表研究者チーム 高橋 智 PI (筑波大):研究総括、骨格筋系、代謝系(肝臓) 工藤 崇 CI (筑波大):研究チームとりまとめ 八神健一 CI (筑波大):飼育装置マウス適合性確認 村谷匡史 CI (筑波大):微量組織サンプル解析				(肝臓)	【連携・国際共同 AMED-CREST ゲノム)石井俊 (理研)による精 有人宇宙活動((視覚系影響評	研究】 (疾患エピ 輔研究班 操解析 における課題 価)に係る
					NASAとの共同	解析*
吉田進昭CI (東大医科研) 免疫系	伊川正人CI (大阪大学) 生殖系	栗崎晃CI (産総研) 内分泌系	深水昭吉CI (筑波大) 循環器系	志賀隆CI (筑波大) 神経系	浅原弘嗣CI (東京医歯大) 骨系	森田啓之CI (岐阜大) 前庭系

*国際宇宙ステーションに係る新たな日米協力枠組み「日米オープン・プラットフォーム・パート ナーシップ・プログラム(JP-US OP3)」の下での国際連携で一部サンプルの共同解析を実施。

解析チーム	氏名	所属 ^(注)	役割分担	
骨格筋系・ 代謝系	高橋 智 筑波大学		代表研究者 研究の統括	
	工藤 崇	筑波大学	研究の総括補佐、各グループ間のと りまとめ 骨格筋系・代謝系での遺伝子発現解 析およびエピゲノム解析	
	八神 健一	筑波大学	新規開発飼育装置のマウス飼育適合 性確認	
微量組織サ ンプル解析 系	村谷 匡史	筑波大学	微量組織サンプル解析 血漿中の細胞外 RNA・DNA 解析	
免疫系	吉田 進昭 東京大学		血液・免疫系における遺伝子発現変	
	秋山 泰身	東京大学	化の解析	
生殖系	伊川 正人 大阪大学			
	磯谷 綾子	奈良先端科学技術大学 院大学	生殖細胞の評価、次世代作製	
内分泌系	栗崎 晃	產業技術総合研究所	内分泌細胞における遺伝子発現変化 解析	
在一里五	深水 昭吉	筑波大学	循環器系における遺伝子発現変化解 析	
旭垛砧木	石田 純治	筑波大学		
神経系	志賀 隆	筑波大学	神経系における遺伝子発現変化解析	
骨系	浅原 弘嗣	東京医科歯科大学	骨・アキレス腱における遺伝子発現変	
	篠原 正浩	東京医科歯科大学	化解析	
前庭系	森田 啓之	岐阜大学	前庭系における遺伝子発現変化解析	

(PI: 代表研究者(Primary Investigator)、CI: 共同研究者(Co-Investigator))

(注)所属はフライト実験実施時

連携·国際共同研究

	氏名	所属(注)	連携·国際共同研究内容	
	石井 俊輔	理化学研究所	AMED-CREST(疾患エピゲノム)石 井俊輔研究班による精巣解析	
AIVIED理捞	吉田 圭介	理化学研究所		
国際連携	Michael D. Delp	Florida State University	有人宇宙活動における課題(視覚系 影響評価)に係る NASA との共同解 析	

(注)所属はフライト実験実施時

2. 2. 2 JAXA 支援体制

本研究における研究チームと JAXA の役割分担を以下に示す。研究チームは、下記分担にしたがい、JAXA 有人宇宙環境利用ミッション本部 宇宙環境利用センター(現:有人宇宙技術部門 きぼう利用センター)と協力しながら、それぞれの作業を実施した。新規開発マウス飼育装置での本研究の科学的目的を達成するため、生物適合性試験結果を装置開発・検討にフィードバックするなど、研究チームと JAXA が一丸となって、着実に遂行することができた。

No.	作業項目	研究者チーム	JAXA
1	実験要求、運用要求、実験条件の検討、 策定	0	支援
2	実施計画の策定	—	0
3	地上予備実験	0	支援
4	生物適合性試験(実施·適合性確認)	支援	0
5	生物適合性試験(実験計画上の関連事 項解析)	0	支援
6	運用準備(ODF 作成)、輸送	支援	0
7	射場準備・打上げ	支援	0
8	回収場準備	支援	0
9	軌道上飼育	支援	0
10	解剖実施	0	支援
11	飛行後解析	0	支援
12	地上対照実験	支援	0
13	成果発表	O(サイエンス面)	O(きぼう利用面)

2.2.3 倫理審査

実験計画については、筑波大学(No.16-048)、JAXA(審 016-014B)、アメリカ航空宇宙局 (NASA)(Protocol Number:NAS-15-004-Y1)および米国西海岸の動物実験施設(Explora BioLabs)(Study Number:EB15-010A)などのそれぞれの機関の動物実験委員会の承認を得 て実験を実施した。また、JAXA 宇宙飛行士が参加する研究開発業務等に関する審査会 (ARRB 7-4-1)および NASA Institutional Review Board (Pro1704)の承認を得て実施した。

2.3 スケジュール

本研究テーマ採択から飛行後解析までのスケジュールを以下に示す。スケジュールは、輸送 機打上遅延により、計画段階(実験準備フェーズ移行審査時点)と比較すると、約半年程度の遅 れが生じたが、研究実施上の問題はなかった。



3. 実験準備·運用

3.1 実験要求の検討・策定

本研究テーマは、平成24年11月に、「平成24年度「きぼう」利用生命科学分野重点課題 募集区分候補テーマ」として選定された。実験テーマ選定後、候補フェーズにおいて、研究チー ム体制、フライト実験要求の詳細化および地上予備実験計画を検討した。平成25年10月、重 点研究のプロジェクトとして開始可能な計画設定となっているか審査(研究プロジェクト移行審査) を行い、研究プロジェクトへの着手が承認された。平成27年2月、実験準備フェーズへの移行に あたり、実験要求、サクセスクライテリアが設定され、装置開発や試験、運用準備などの作業に 着手した。

本研究テーマの準備にあたっては、研究プロジェクト化以降、新規の小動物実験装置の開発 状況を踏まえ、地上予備実験の一環として適合性確認試験に参加し、宇宙実験実現に向けた実 験条件・運用条件等の検討やテーマ選定時の課題に対する対応等を JAXA と協力して行った。 実験要求を表 1~表 5 に示す。

表1 実験個体

試料名称	ストレイン	週齡	性別	飼育数/ ケージ	微小重力 群(MG)	人工 1 <i>g</i> 群(AG)	地上対照 群(GC)
C5 マウス Sto #00	C57BL6/J	打上時 8 週齡以降 回収時 16 週齡以内	雄性	1	6 匹	6 匹	6 匹
	Stock #000664 1					合計:18匹	

【マウス入手先】

微小重力群(µg mice; MG): Jackson Laboratories (USA)

人工 1g 群(artificial 1g mice; AG): Jackson Laboratories (USA)

地上対照群(ground control mice; GC): Charles River Laboratories (Japan)

器具類名称	数量*	使用条件・要求仕様等
給水シリンジ (軌道上飼育装置用)	48	7±1Day ごとに補水する(56ml/1 式)
餌(軌道上飼育装置用)	48	7±1Dayごとに交換する
給水シリンジ (打上/回収支援装置用)	6	回収時に給水する(300ml/1 式)
餌(打上/回収支援装置用)	24	回収時に装着する
水ゲル	24	何らかの理由でマウスへの給水が上手く行かない際に、Cage内に取り付ける

* 数量はフライト実験分のみ。

表 3 実験装置

共通実験装置名称	設定温度	設定湿度	ガス環境	要求事項等
MELFI	-95°C	-	キャビンエアー	安楽死後マウスの保存
細胞培養装置 (CBEF)	+22°C	+50%	キャビンエアー	小動物飼育供試体を設置 動物飼育温度は 24±2℃ 程度

表 4 固有機器·器具類

器具類名称	数量*	使用条件·要求仕様等
打上/回収支援装置	2	1 式:打上用、1 式:回収用 適切な環境でマウスを個別飼育できること。 ・飼育温度(24±2℃)、ガス環境を維持するために エアフロー(0.2m/sec 以下)を発生できること ・騒音レベル 60db 以下であること ・12 時間ごとの昼夜サイクルができること ・飼育エリアと排泄物回収エリアを分けること
器具類名称	数量*	使用条件・要求仕様等
------------------------	-----	---
軌道上飼育装置 飼育ケージ	12	6式:右、6式:左 適切な環境でマウスを個別飼育できること。 ・飼育温度(24±2℃)、ガス環境を維持するために エアフロー(0.2m/sec以下)を発生できること ・12時間ごとの昼夜サイクルができること。 ・適切に給餌・給水を実施できること ・飼育エリアと排泄物回収エリアを分けること ・ビデオモニタにより地上から適宜マウス個体の健 康状態の確認が可能なこと
グローブボックス	8	2 式:マウスの移し替え時 4 式:メンテナンス時 2 式(想定):安楽死処置時
移し替え治具	1	マウスの移し替え時に使用
排泄物回収用掃除機	1	7±1Dayごとに排泄物を吸引回収し、廃棄できること。
臭気フィルタ(軌道上飼育装 置用)	48	7±1Day ごとに交換する
臭気フィルタ(打上/回収支 援装置用)	6	3式:打上用、3式:回収用
CO2 吸着剤	2	1式:打上用、1式:回収用
除湿剤	2	1 式:打上用、1 式:回収用
放射線ディテクター	1	Bio-PADLES
軌道上処置装置	1	安楽死処置用
試料収納袋	5	4 枚:地上回収用、1 枚:軌道上廃棄用 安楽死後のマウスを収納する

* 数量はフライト実験分のみ。

表5 帰還マウスの解析計画

項目	組織/生理学的解析	遺伝子解析	エピゲノム解析	備考
骨格筋系	病理組織標本による 筋萎縮解析、速筋、 遅筋の組織学的な 解析	マーカー遺伝子の 発現定量、網羅的 な遺伝子発現解 析	遺伝子発現に変 化が見られた場 合、ヒストン H3 マークの解析、 DNA のメチル化 解析	これまで報告 されているデ ータと比較検 討して、実験 の妥当性を検 証する
代謝(肝臓)	脂質量の解析、糖質 量の解析、 メタボローム解析	代謝関係遺伝子 発現解析	_	_
微量組織サ ンプル解析 系	_	血中細胞外核酸 のRNAシークエン シング	DNA のメチル化 解析、ヒストン修 飾解析	他の解析系の エピゲノム解 析も担当
免疫系	胸腺、脾臓の重量の 測定、免疫組織の組 織学的な解析、血漿 中の免疫グロブリン 量、サイトカイン量の 測定	リンパ節での網羅 的遺伝子発現解 析、脾臓、胸腺で の免疫疾患関連 遺伝子発現解析	_	_

項目	組織/生理学的解析	遺伝子解析	エピゲノム解析	備考
生殖系	生殖器官の重量、解 剖学的所見、免疫組 織学的解析、凍結精 子の機能解析 次世代作製:妊娠・ 出産率の検討、胎 児・胎盤の解析、生 まれたマウスの継世 代的影響解析	網羅的•経時的遺 伝子発現解析	ゲノムワイドな DNA メチル化、 ヒストン修飾状 態を調べ、エピ ゲノムレベルで の変化を解析	体外受精によ り次世代を作 製し、他れた遺 で見られた遺 伝子発現変 化、エピゲノム 的変化を解析 する
内分泌系	血漿ホルモンの定 量、HE 染色による 組織学的解析、組織 重量変化	ホルモン産生系遺 伝子発現解析	_	_
循環器系	腎臓、心臓の構造検 証	腎臓、心臓におけ る遺伝子発現解 析、網羅的遺伝子 発現解析	遺伝子発現に変 化が見られた場 合、ヒストン H3 マークの解析、 DNA のメチル化 解析	_
神経系	脳の活性部位の解 析(免疫組織化学)、 神経・精神活動	Immediately early genes、神 経 栄 養 因 子 (BDNF)、神経伝 達物質受容体の 受容体の遺伝子 発現解析、網羅的 遺伝子発現解析	_	_
骨系	μCT による骨量、骨 構 造 の 解 析 、 TRAP · Toluidine blue 染色、血中骨 代謝マーカー測定	骨組織サンプルお よび骨髄細胞培 養系を用いた遺伝 子発現解析	骨組織サンプル および骨髄細胞 培養系を用いた エピゲノム解析	これまで報告 されているデ ータと比較検 討して、実験 の妥当性を検 証する
前庭系	前庭神経核でのグ ルタミン酸受容体発 現解析(タンパク解 析)	_	前庭神経核およ び耳石器線毛上 皮細胞のエピゲ ノム変化解析	ロータロッド試 験 (行動解析)

3.2 実験試料·実験装置の適合性確認

本研究テーマは、JAXA が新規開発した小動物飼育装置(Mouse Habitat Unit; MHU)を利用 して実施された。MHU は、マウスを地上から国際宇宙ステーション(ISS)に輸送し、軌道上で飼 育し、地上に帰還させるまでの飼育関係の装置で、その構成は、軌道上飼育ケージ(Habitat Cage Unit; HCU)、打上/回収支援装置(Transportation Cage Unit; TCU)、宇宙飛行士がマウ スを移し替えたり、ケージのメンテナンスをしたりするためのグローブボックス等からなる。

3.2.1 軌道上飼育ケージ(HCU)の概要

HCU(図1(a)、参考文献5:白川正輝ら LABIO21.2018より転記)は、軌道上の細胞培養装置(CBEF)に設置する飼育ケージであり、微小重力区と人工重力区(遠心機)のどちらにも設置可能な同一の構造とし、重力環境だけが異なるよう考慮した。また、微小重力環境で適切に飼育するため、以下の工夫をした。

①能動的な換気

マウスが排出する二酸化炭素が局所的 に滞留しないよう、各ケージに換気用フ ァンを2つ装備し、1系統が故障しても継 続して換気可能とした。

②排泄物等への配慮

排泄物がケージ内に残留したり、体に付 着したりしないよう、空気の流れにより、 糞は床面下部の排泄物回収器に蓄積し、 尿は壁面や床面に貼付した吸水シート に付着・吸収されるよう設計した。なお、 給水シートの上には、マウスが齧らない よう、穴をあけたポリカーボネイトを貼付 した。

③カメラの汚れ除去(ワイパー装着)

各ケージにはケージ内部をモニタできる ようカメラが装着されているが、尿などの 汚れでモニタできなくならないよう、カメラ 面の汚れを除去するワイパ(ウォッシャ 液排出機能付き)を装備した。本ワイパ は、地上からのコマンドで必要な際に遠 隔で動作可能とした。

④固形餌

クルーの作業時間や遠心機の回転を停止させる頻度を少なくするため、軌道上 飼育ケージの餌は地上において 1 週間 程度で消費する量をブロック状に固めた 固形餌とした(図 1(b)、参考文献 5:白 川正輝ら LABIO21.2018 より転記)。

3.2.2 打上/回収支援装置(TCU)の概要 地上からの打上時、地上への帰還時に、マ ウスはTCUに搭載され、輸送される。TCUも、 HCU 同様、能動的な換気や、排泄物等への 配慮がなされている。また、TCU のケージは、 限られた搭載容積内に納めるとともに、打上、 帰還時の宇宙機の姿勢変更に対応するため 円筒形とした(図 2(a)、参考文献 5:白川正 輝ら LABIO21. 2018 より転記)。空気の流 れと居住性を確保するため、ケージに適合さ せ餌も筒形状とした。



図1 軌道上飼育ケージ(HCU)

(a) ケージ外観



図 2 打上/回収支援装置(TCU)

3.2.3 飼育適合性結果

MHU の開発にあたり、設計確認用の要素試作モデルや試験用モデルを製作し、動物飼育用 ケージとしての特性や妥当性を確認した。実際にマウスを用いて、研究者と共同で、各種環境試 験や適合性試験(摂餌性試験、軌道上水適合性試験、飼育装置適合性試験、ノズル適合性試 験、筒形状確認試験、打上/回収支援装置適合試験、組み合せ試験など)を実施した。有識者に よるアドバイザリ委員会を設置し、試験方針や結果について専門的な観点で評価・助言を受ける とともに、JAXA動物実験委員会に適宜報告し、承認を得て装置へ反映した。装置搭載直後のマ ウスの体重減少に関しては、打上前の射場におけるマウスの馴化方法を検討し、個別飼育、ノ ズル形状、餌形状の3フェーズの馴化を実施することで、体重減少を防止した。

プロトタイプ軌道上飼育装置を用いた長期飼育試験では、研究者チームにより、多種の組織 が解析され、解析対象に支障がないことを事前に確認した。

また、HCU を設置する CBEF の遠心機(回転時の半径約 15 cm)が、マウスの飼育に利用可 能か評価するため、同サイズの地上用遠心機と 10 倍の半径(1.5 m)の遠心機を用いて、同じ 1.4g環境*での比較を行い、マウスに対する 15 cm 遠心機利用の妥当性を確認した。短腕遠心 機では、飼育ケージ内の重力勾配ができるが、中枢での Fos 発現、摂食量、体重変化などの生 体応答は、長腕遠心機と変わらなかった(成果・学術論文 1: Morita et al., *PLoS One.* 2015)。

*半径 15cm 遠心機は 77 rpm、半径 15m 遠心機は 24 rpm でケージ内(床面)において 1gの遠心方向への 加速度が付与される。ケージ部は遠心力により傾くゴンドラ構造で、地上 1g との合成力としてケージ内床面 方向に 1.4g の過重力となる。

さらに、打上・回収時の過重力の影響を検討した。打上・回収時の最大過重力を想定した2分間の10g負荷により、plasma corticosterone は増加したが、90分後には前値に回復した。活動量と摂食量は僅かに減少した。また、血漿ASTとCKは変化せず、筋肉や肝臓のダメージはないものと思われる(成果・学術論文4:Morita et al., J Physiol Sci. 2017)。これらの結果は、打上・回収時の過重力負荷の影響は一過性であることを示唆するものである。

3.3 運用準備

JAXA にとって初めての小動物ミッションであり、新規開発装置に加え、マウスの健康観察に 関する実運用体制を新たに構築した。

3.3.1 装置および実験全般

軌道上で宇宙飛行士が実験操作を行うために作成された手順書をもとに、宇宙飛行士訓練 が行われた。軌道上実験中に地上で実験操作をモニタし、異常時等に JAXA 運用チームと連携 し、科学的な判断を行うため、装置チーム、研究者チーム、獣医師チームも JAXA 運用チームと ともにシミュレーション訓練を受けた。

3.3.2 健康観察体制

ミッション期間中、実験動物医学専門医を含む 5 名の獣医師を委嘱し、軌道上からダウンリン クされた各ケージのモニタ映像(少なくとも1ケージにつき 10 分程度。ケージの状態変化時や要 求に応じて延長)やセンサ値を基に、毎日全マウスの健康状態の確認を行うこととした。摂餌・摂 水ができていないなど軌道上で迅速な対処が必要となる場合に備え、翌日の宇宙飛行士の作 業スケジュールに反映可能な時刻(日本時間午前 9 時頃)までに確認を終えることとした。軌道 上の宇宙飛行士は分刻みで作業を行っているが、飼育上必要な措置については 24 時間以内か つ優先的に実施することを ISS 運用ルールの一つとして規定した。

モニタ映像(計 120 分以上)は毎日 6 GB に及ぶが、獣医師チームが 9 時までに確認できるよう、データのセキュリティを確保した上でタイムリに配信できる体制とシステムを整備した。事前に 情報伝達や判断のシミュレーションを実施し、本番に向けて課題を洗い出した。移し替えなどの 重要なイベント時には、獣医師がリアルタイムで画像をモニタできる筑波宇宙センターでの運用 管制に立ち会うこととした。これらにより、NASA や軌道上宇宙飛行士に依存せず、動物の状態 確認や必要な判断を JAXA が主体的に実施できる体制を確立した。 3.4 フライト実験実施(射場作業・軌道上実験モニタ・回収場作業など)

本実験の実験個体であるマウスは、NASA ケネディスペースセンター(KSC;米国フロリダ州) から、宇宙機(米国 SpaceX 社ドラゴン宇宙船)で国際宇宙ステーション(ISS)に輸送され、到着 とするとすぐに実験が開始された。軌道上実験中は、筑波宇宙センターにてモニタが行われた。 図3にフライト実験の実施概要、図4に軌道上マウスおよび装置操作フローを示す。



図4 軌道上マウスおよび装置操作フロー

マウスの馴化等、打上準備作業は、研究チームと JAXA、KSC スタッフにより、KSC にて、 2016 年 6 月 25 日(現地時間、以下同)より行い、打上げの約 24 時間前にマウス(8 週齡)を TCUに搭載し、宇宙機側に引き渡した。マウスを搭載した宇宙機は、7 月 18 日に打ち上がった。 宇宙機が ISS に係留し、TCU がきぼう船内に運び込まれた後、マウスはグローブボックス内で 宇宙飛行士により軌道上飼育ケージに移し替えられ、軌道上飼育ケージが CBEF に取り付けら れて、軌道上飼育が開始された(7 月 21 日)(図 4(1))。

35日間の飼育期間を通して、微小重力、人工1gの両環境で飼育を継続することができた。微 小重力環境では数日でカメラ面が汚れたが、ワイパ機能により全飼育期間を通じて各マウスを 鮮明にモニタでき、8時間の連続行動観察も実施することができた。HCUは、宇宙飛行士により 定期的に餌カートリッジ交換、給水バルーンへの水補給(図 4(2))、臭気フィルタ交換、排泄物 回収等のメンテナンス(図 4(3))作業が行われた。

マウス帰還時は、ISS から宇宙機を切り離す前日(ドアを閉める約6時間前)に宇宙飛行士が マウスを HCU から TCU に移し換え、宇宙機内に設置した(図4(4))。宇宙機は8月26日に米 国カリフォルニア沖に着水し、船による回収、着岸後、8月28日に TCUを NASA から受領した。 米国西海岸の動物実験施設(Explora BioLabs:米国カリフォルニア州)で開梱した時点で、全匹 が健康な状態で帰還したことを確認した。

同日、Explora BioLabs において、研究チームにより、帰還したマウス(13 週齢)全匹のヘル スチェックおよび行動テストの実施後、解剖フロー(図 5)にしたがって解剖が行われた。冷凍お よび冷蔵保存した試料は、8月30日に現地で輸送業者に引き渡された後、9月2日に筑波宇宙 センターに到着し、同日、研究者チームへ引き渡された。

また、地上対照実験は、JAXA 筑波宇宙センターにて、地上用飼育装置を用いて、フライト実験の飼育条件、スケジュールに準じて実施した(8月31日~11月4日)。

なお、フライト実験に先立ち、マウスの打上準備作業、生存回収後の動物実験施設への輸送 および解剖作業のリハーサルを、それぞれの施設において実施し、輸送手続き、施設・設備、作 業環境、消耗品等の調達、作業手順、作業実施体制などを確認し、その結果をフライト実験に反 映させた。

票件 Station 1 (家愛CI)	Station 2 (集田GI)	時間・直集 Station 3 (中央)	Station 4 (#MCI)	●数据 Station 5 (高額Pl、決測Cl)
Extint 1 (第文ロ) E (第文ロテーム) F (第文ロテーム) I 1.3 より深部来けたり 2 た時時日 (本分析法法:1-27) 3 ジェーン・ 4 前回スライスた法 1 51:22 り小説大けなり 2 次年の日 (本分析法法:1-27) 3 ジェーン・ 3 ジェーン・ 4 前回スライスた法 9 次月ンスキス 1 51:22 り小説大けない 1 51:22 リ小説大けない 2 次第へ会社 1 第二人の子 2 次月ンスキス 3 次月ンスキス 3 第二人の子 1 第二人の子 1 第二人の子 1 第二人の子 1 第三人の子 1 第二人の子 1 第二人の子 1 第二人のの子 1 第二人ののののり出し 1 第二人のののり出し 1 第二人ののののり出し 1 第二人ののののり出し 1 第二人ののののり出し 1 第二人ののののりし 1 「日本ののののり出し 1 第二人のののののりし 1 「日本のののののりし 1 「日本のののののりし 1 「	9 Exelice 2 (@ #0)) • (@ #01/>- Δ) • 1 • 1 • 2	ВИС ВО ВИС ВО 1 ВА 2 АХДЕТУР-А) 3 ВА. ВЕЛАДШ 2 АХДЕТУР-А) 3 ВА. ВЕЛАДШ 4 БА. СЕВТУР-А) 3 ВА. ВЕЛАДШ 4 БА. СЕВТУР-А) 5 ВА. ВЕЛАДШ 4 БА. СЕВТУР-А) 5 ВА. ВЕЛАДШ 6 БА. СЕВТУР-А) 7 ВА. ВЕЛАДШ 8 ВА. ВЕЛАДИА 9 ВА. ВЕЛАДИА 10 ВА. ВЕЛАДИА 11 ВА. ВЕЛАДИА 12 ВА. ВЕЛАДИА 13 ВЕЛАДИА 14 В	Виссія 4 (ФИСІ) I (ФИСІ7-А) I	J (2017 - Δ) I. (2017 - Δ) J (2017 - Δ)
(1F-0) 背部皮膚、前 肢(肩甲骨含む)	(28-9) 頭部	(38-16) 時 (35mm dish) (38-3) 気管 (35mm dish) (35mm dish)	(4H-6)時態 (35mm dish)	康政者(ab)(hBONE-R) 唐朝(RNAIstor)
前肢 (Station 7)	画眼 (Station 8)	(30-D) + 1 = 1 = 1 = 1 (50-1) (50-1) =		
(1F-11) 尾部、足底	頭部残り、半眼球	十二指兩一面稱 (50ml tube-/ 排地) (Station 7)		
		※休想に合わせて固定処理試料を冷蔵庫、冷温	東岸へ保管	

図5 解剖フロー

4. 実験結果および成果

MHU を用い、微小重力群(MG)および人工 1g 群(AG)、それぞれマウス 6 匹ずつ、35 日間の個別飼育を行い、地上対照群(GC)とあわせて比較評価した(成果・学術論文 6:Shiba D et.al., Sci. Rep. 2017)。

装置に不具合が見られたマウスを除いて、AG マウスの体重が増加したのに対し、MG マウス の体重は増加、または搭載前と同程度であった。ISSには電子天秤がないため、体重、餌および 飲水の消費量を測定することはできず、また、回収して残量を測定することにも限界があり、実 際の消費量を分析することはできなかった。また、GC マウスは、AGより平均体重がわずかに増 加しており、この相違は、打上・帰還時の振動・衝撃や、帰還時の微小重力環境への暴露などが 影響している可能性も考えられる。

また、37 日間のフライト中の総被ばく線量は、受動・積算型宇宙放射線被ばく線量計 (Passive Dosimeter for Life Science Experiment in Space; PADLES)を用いて測定され、吸 収線量は 0.23±0.02mGy/day、線量当量は、0.43±0.03mSv/day であった。

各解析チームの結果を以下に示す。

4.1 骨格筋系

廃用性筋萎縮とは、寝たきりなど筋肉を使用しないことによって生じる筋萎縮であり、骨格筋と しての機能は著しく障害される。近年、高齢化社会を迎えている我が国では廃用性筋萎縮は解 決すべき大きな社会問題の 1 つであるにもかかわらず、有効な予防法、治療法は未だ確立され ていない。宇宙滞在において生じる筋萎縮の速度や程度は、地上におけるモデル動物実験と比 べ短時間で大きく変化することが知られている。我々は、宇宙滞在の2種類の実験群(AG およ び MG)と地上対照実験(GC)より得られた抗重力筋であるヒラメ筋に焦点を絞り、トランスクリプ トーム解析から新規骨格筋萎縮分子の同定をおこなった。

各実験群マウスの 5 種類の後肢骨格筋を採取、重量測定の結果、ヒラメ筋、足底筋、腓腹筋 において GC および AG と比較して MG で有意な低下が見られ、筋萎縮が確認できた(図 6A)。 各実験群のヒラメ筋より RNA を採取し、RNA-seq 解析により次世代シークエンサーを用いた網 羅的遺伝子発現解析を行い、各実験群の遺伝子発現変化の比較をおこなった。3 群で比較し発 現変動遺伝子のヒートマップを描画、遺伝子とサンプルをクラスタリングした結果、AG と GC は 類似した遺伝子発現パターンを示すこと、その 2 群と MG の間で大きな違いがあることがわかっ た(図 6B)。つまり、宇宙環境でのヒラメ筋への影響は重力に大きく起因することが証明された。

発現変動遺伝子として、他の2群に比べて MG で有意に増加している 679 遺伝子、減少して いる 696 遺伝子が抽出された。さらに、候補遺伝子を絞るため、MG で増加している遺伝子とデ ータベース検索により筋肉特異的な発現遺伝子と比較し、その中で筋萎縮に関連性が示されて いない 10 個の筋萎縮候補遺伝子を抽出した。抽出できた候補遺伝子と筋萎縮との関連性を調 べるために、各遺伝子を発現する組換えアデノウイルスを用い筋管に分化させた C2C12 細胞株 に過剰発現した結果、10 遺伝子中 4 遺伝子を過剰発現させた各細胞において筋管幅の有意な 減少がみられた(図 6C)。さらに同様の組換えアデノウイルスを用いてマウス新生児骨格筋にこ れらの遺伝子を導入し生体内でも筋萎縮を引き起こすことを見出した。現在、遺伝子改変マウス を作製し、表現型解析を実施している。

エピゲノム解析については、ヒラメ筋における活性化ヒストンマークの H3K4me3 および H3K27ac の ChIP-seq 解析を実施し、MG で活性化ヒストンマークが増加する筋萎縮候補遺伝 子の抽出に成功しており、現在筋萎縮への関連性を評価している。

4.2 代謝系(肝臓)

肝臓の重量については、GCと比較して AG および MG で有意な増加があったが、AG-MG 間 に差はなかった(図 6A)。また、組織学的解析においても AG-MG 間に差は見られなかった(図 示せず)。



図 6

A: 各実験群における体重で標準化した組織重量

B: ヒラメ筋の RNA-seq 解析による遺伝子発現のヒートマップ

C: 筋萎縮候補遺伝子を過剰発現させた C2C12 細胞の筋管幅の変化(#1~10 は 10 種類の筋 萎縮候補遺伝子, M; Mock, G; GFP 過剰発現、F; FoxO3a 過剰発現(陽性コントロール))

4.3 骨系

MG、AG、GC3群マウスの骨量および骨微細構造について、左後肢大腿骨遠位部を用いて マイクロ CT による解析を行い、海綿骨領域における骨量は、AG や GC と比較して MG で顕著 に低下していることを報告した(成果・学術論文 6:Shiba D et.al., Sci. Rep. 2017)。詳細な解析 により、この骨量低下は海綿骨の数の減少および海綿骨の大きさの低下に起因することを明ら かにした(2016 年 12 月 5 日 JAXA プレスリリース、「35 日間の長期飼育で骨や筋肉の量が顕 著に減少~きぼうにおける長期飼育マウスの地上分析速報~」、図 7 左)。また、皮質骨の解析 からは、MG では顕著に皮質骨幅が低下して皮質骨が薄くなっていることが判明した(図 7 右)。 さらに骨組織に存在する骨吸収を担う破骨細胞や骨形成を担う骨芽細胞に対する影響について 左後肢脛骨を用いた組織学的な解析を行ったところ、骨組織中の破骨細胞数の増加や骨芽細 胞数の低下、それに伴う血中骨吸収マーカーTRAP(tartrate-resistant acid phosphatase)の上 昇や骨形成マーカーである P1NP(1 型プロコラーゲン-N-プロペプチド)や OCN(osteocalcin)の 低下を明らかにするなど、MG における骨量低下について多角的かつ詳細な解析を実施した。

右後肢大腿骨および脛骨は骨髄細胞と骨組織に分離して、それぞれ解析を行った。骨髄細胞 を除去した骨組織は酵素処理による骨膜・筋・腱除去を行っているため、骨表面に存在する破骨 細胞や骨芽細胞、骨基質に埋もれた骨細胞のみとなっている。この骨組織を用いた網羅的遺伝 子発現解析(RNA-seq 解析)を行った結果からも、MG で破骨細胞関連遺伝子(*Tnfrsf11a*, *Acp5*, *Ctsk*, *Atp6v0d2*)などは発現が有意に上昇していることが判明した。しかしその一方で、 多くの骨芽細胞関連遺伝子(*Runx2*, *Sp7*, *Col1a1*など)の発現に顕著な違いは認められなかっ た。この結果は、マウス地球帰還から解剖までのタイムラグによる影響と考えられ、地上帰還後 に骨形成が再開されて活発になりつつあることが示唆された。この骨組織の RNA-seq 解析から 微小重力下における骨量低下の原因となりうる遺伝子を抽出、*in vitro*における遺伝子機能解析 を行ったところ、*in vitro*における骨芽細胞分化を制御する新たな遺伝子を見出した。現在、この 遺伝子改変マウスを作製し、その骨組織の表現型解析を行っている。

一方、MG および AG マウスの骨組織から採取した骨髄細胞を用いて in vitro 破骨細胞分化 培養系による破骨細胞分化実験を行ったところ、MG マウス由来の骨髄細胞の破骨細胞分化は 顕著に亢進することが判明した。この結果は、in vivo における破骨細胞数増加が骨髄細胞中に 存在する破骨細胞前駆細胞(単球/マクロファージ系細胞)自身の易分化能上昇に起因するこ とを示唆している。MG および AG マウス由来の骨髄細胞から分化させた破骨細胞における RNA-seq 解析を実施したが、破骨細胞関連マーカー遺伝子の発現に顕著な変動はないことか ら、未知なる機構による破骨細胞分化亢進が起こっているものと推察された。現在、RNA-seq 解 析より in vitro 破骨細胞分化促進を担う遺伝子の抽出を行っている。





4.4 前庭系

我々の身体機能は地上の1gという重力環境に適応するよう進化しており、重力(直線加速度) 感知器官である耳石前庭器からの情報に基づいて、種々の身体機能が調節されている。しかし、 耳石前庭系は可塑性が強いことが知られており、異なる重力環境に曝されるとその機能が変化 すると考えられる。実際、帰還後マウスの行動実験の結果、MGで righting reflex 遅延傾向が見 られた(成果・学術論文 6: Shiba D et.al., Sci. Rep. 2017)。この実験結果は、帰還後の宇宙飛 行士にみられる耳石前庭系を介する姿勢制御の障害が MG でも起きていることを示唆するもの である。この現象の神経学的基盤を調べるため、耳石感覚細胞から 1 次ニューロンである前庭 神経核までのゲノム・エピゲノム解析を行った。

主に垂直方向の加速度感知器官である球形嚢と水平方向の加速度感知器官である卵形嚢の感覚細胞の RNA 発現プロファイルを図 8 に示す。GC では球形嚢と卵形嚢の遺伝子発現レベルに差があるが、MG および AG ではその差は失われ、球形嚢と卵形嚢の機能差は継続的な重カシグナルによって維持されていることを示唆するものである。

1 次ニューロンである前庭神経核では、AG と MG では大きな差が見られ、PCA プロットでも AG、GC のクラスターとMG のクラスターがはっきり分かれた。これらのトップヒットの遺伝子群を 見ると, *Klotho*、副腎皮質ホルモントランスポーター、血管作動性腸管ポリペプチド(VIP: vasoactive intestinal peptide)などの加齢とともに発現が変化し、変異が顕著な老化フェノタイ プを示す遺伝子が大きく動いており、微小重力環境のこれまでに報告されていない影響が見ら れた(図 9)。



図8 耳石感覚細胞の RNA 発現プロファイル



図 9 前庭神経核の RNA 発現プロファイルと 主成分分析

スライス標本の前庭神経核に は、抑制性および促進性の神経 関連遺伝子である Vgat (小胞性 GABA トランスポーター)、Vglut2 (小胞性グルタミン酸トランスポー ター)が存在しており(図 10)、 MG では Gabra1 (GABAA1 受 容体)と Gria1(AMPA1 受容体) の発現が有意に減少しており、前 庭神経核での興奮伝達に何らか の変化が起こっている可能性が 示唆された。



以上の実験結果は、微小重力 環境による前庭系可塑的変化は、 図

図 10 前庭神経核での神経関連遺伝子発現

少なくとも感覚細胞から1次ニューロンの段階で生じていることを示唆するものである。

宇宙実験の spin off 実験:前庭神経核で発現が変化するグルタミン酸受容体、GABA 受容体 の役割を調べるため、Vglut2-cre マウスおよび Vgat-cre マウスを用い、これら受容体の刺激実 験を行った。片側光刺激に対しては、グルタミン酸受容体では同側に、GABA 受容体では反対 側に体が傾いた。また、クロザピン N-オキシドによる両側化学刺激に対しては、グルタミン酸受 容体では顕著な深部体温低下と活動量増加、GABA 受容体では深部体温軽度低下と顕著な活 動量減少が見られた。また、Vglu2-caspase により前庭神経核のグルタミン酸受容体を破壊した マウスでは、過重力負荷時の深部体温低下が抑制された。深部体温低下は、マウスにおける重 力酔いの指標と考えられており、重力酔いの中枢機序に前庭神経核のグルタミンニューロン活 性増加が関与していることが示唆された。

4.5 循環器系

心臓は、血液を介して全身へと酸素や栄養分、ホルモンなどの生理活性物質を送り出すポン プとして働くとともに、心臓や各組織で作用するホルモンや代謝物を産生するなど、恒常性に必 須である。しかし、心臓の機能が宇宙環境でどの様に変化するのかについての分子的な実体は 不明である。

そこで、宇宙マウス心臓での RNA の遺伝情報を体系的に理 解するため、地上から宇宙への 環境移動に伴う心臓の遺伝情報 の変化について、転写産物の総 体情報(RNA-seq)と mRNA の 翻訳鋳型情報(Ribo-seq)を解析 した(図 11)。宇宙マウスと次世 代マウスの心臓の遺伝情報の発 現を比較した結果、ケトン体代謝 系の遺伝子が大きく変動している ことが明らかになった。



図 11 宇宙マウス心臓の微小重力環境での 変動遺伝子のプロファイリング

【方法】(図 12)

・宇宙マウスと次世代マウスの凍結心臓組 織よりRNAを抽出

・転写産物の総体情報の解析として、トラン スクリプトーム(RNA-seq)解析を実施 ・mRNA の翻訳鋳型情報を取得するため、 トランスレイトーム(Ribo-seq)解析を実施

【結果】

宇宙マウスの心臓 RNA を用いた RNA-seq解析の結果、GCとMGでは遺伝 子の発現状況が生物学的に大きく異なるこ とが判明した。また、変動遺伝子群のプロ ファイリングを行い、GCに比べて MG で上 昇した遺伝子が 51 個、減少した 95 個の遺



図 12 宇宙マウスの心臓 RNA の 遺伝情報の解析

伝子を同定した。次に、宇宙マウス心臓の翻訳段階での遺伝子発現状態について、Ribo-seq解 析で検討したところ、GCに比べて、MGでは上昇した遺伝子が6個、減少遺伝子4個が発現量 の変動を示した。

そこで、RNA-seq と Ribo-seq の解析結果を統合的に評価することで、ケトン体の産生を担う 酵素の遺伝子発現が微小重力環境の心臓で大きく変動することが明らかになった。さらに、宇宙 マウスから得た次世代マウスの心臓の遺伝情報発現を解析した結果、上記のケトン体代謝の遺 伝子が大きく変動していることが判明した。

本研究では、宇宙マウス心臓の転写-翻訳段階での遺伝子の発現動態を網羅的に把握した。 その結果、地上とは異なる宇宙空間に置かれた心臓では、遺伝子の転写、翻訳の各段階で制 御を変化させることが示唆された。また、宇宙環境応答による遺伝情報発現の変化は、次世代 の心臓の遺伝情報にも影響を及ぼす可能性が示唆された。

4.6 生殖系

宇宙空間滞在による精子形成・受精能・次世代に対する影響を、組織学的見地・遺伝子発現 レベルなどを中心とした解析を行った。また帰還マウスから調整した精子を凍結保存するととも に、その受精能力や次世代産生能力について、体外受精・胚移植等により解析した。具体的に は以下の結果が得られており、1ヶ月程度の宇宙環境(MGおよびAG)でも、造精能力や精子受 精・発生能力には殆ど異常が認められないことが明らかとなった。さらに凍結精子を用いて次世 代の生産にも成功しており、十分に目的は達成されたと考える。

4.6.1 精子形成能力の解析

精子形成能力については、組織・細胞学的な観点に加えて分子生物学的なアプローチから 検討を加えた結果、地上コントロール(GC)と宇宙マウス(MG および AG)の間で顕著な差 は認められなかった。

(ア) 組織解剖学的解析

生殖腺や副生殖腺について、重量、解剖学的所見、組織像の観察により精子形成能 カを解析したところ、例数が少ないながらも、MG および AG の副生殖腺の一部にお いて若干の重量低下が認められた。しかし組織像からは、GC と有意な差は認められ なかった。

(イ) 分子生物学的解析

生殖腺や副生殖腺について、RNA-seq により遺伝子発現を網羅的・経時的に解析したが、精巣では、GCとMG および AG の間で有意な差は認められなかった。副生殖腺についても顕著な差は認められなかった。

4.6.2 受精·発生能力の解析

宇宙環境が生殖能力に及ぼす影響は、経世代的な影響として捉える必要がある。生還個体を用いた交配試験が望ましいが、解剖の必要があったため、精巣上体精子を凍結保存して、実験に利用した。精子数・形態・ 運動性に加え、体外受精率にも顕著な変化はなく、胚移植により生仔を予定通りに得ることができた(図 13)。

(ウ)受精能力試験

精巣上体から回収した精子を凍結保存した後、 融解して形態、運動性、体外受精試験を行った 結果、GC と同等の形態・運動能力を示し、体外 受精効率にも有意差は認められなかった。

(エ)発生能力試験

体外受精胚は試験管内および移植母体内でも 健康に育ち、生仔を得ることに成功した。生後の 成長にも異常は認められず、自然交配による妊 孕性も確認された。



図 13 宇宙マウスを親とした 次世代(仔マウス)誕生 2016 年 10 月 13 日に、JAXA ウェブページにて公開 (http://iss.jaxa.jp/kiboexp/ne ws/20161013_mouse.html)

- 4.7 免疫系
- 4.7.1 宇宙滞在と微重力が胸腺に与える影響

マウス胸腺は宇宙滞在により萎縮すると報告されている(参考文献 6:Gridley DS et al., PLoS One. 2013)。さらに地上実験として 2G 負荷実験および尾部懸垂実験を行ない、胸腺の 萎縮を確認している(成果・学術論文 2:Tateishi R et al., PLoS One. 2015, 成果・学術論文 7: Horie K et al., Biochem Biophys Res Commun. 2018)。しかしながら、宇宙滞在による多様な 環境変動の中で、どの変動が原因で萎縮を引き起こすのか特定されていない。MG、AG、GC に おける胸腺重量を比較したところ、MG では胸腺が萎縮し、AG により有意に回復した。すなわち 無重力の環境は胸腺萎縮を引き起こす。また、AG により完全に回復しないことから、重力以外 の宇宙環境も胸腺に影響すると考えられる。

様々な環境ストレスが、皮質に局在する未熟な胸腺細胞を選択的に減少させ、皮質領域を縮 小させることが知られている(参考文献 7: Gruver AL et al., *J Leukoc Biol.* 2008)。各マウスの 胸腺組織切片を作成し、ヘマトキシリン・エオシン染色により皮質領域および髄質領域の変化を 検討したが、予想と異なり顕著な違いは見られなかった。すなわち、宇宙滞在による胸腺の萎縮 は、皮質に局在する未熟胸腺細胞の選択的な減少ではなく、胸腺細胞が非選択的に減少する のが原因である可能性が高い。

ついで地上実験の結果から(成果・学術論文 2: Tateishi R et al., PLoS One. 2015, 成果・学

術論文7: Horie K et al., Biochem Biophys Res Commun. 2018)、胸腺での 存在比率が低い胸腺上皮細胞が影響を受 けると予想し、検討を行なった。凍結胸腺 組織切片を作成し、胸腺上皮細胞のマーカ 一で蛍光染色を行なった。その結果、MG の胸腺では、通常は髄質領域に局在する ケラチン-5 陽性の上皮細胞が、髄質のみ ならず皮質にも観察された。この結果は、 宇宙滞在での微重力環境は胸腺髄質の上 皮細胞に影響を及ぼすことを示唆する。

さらに胸腺組織で発現する遺伝子群を RNA-seq により解析した。その結果、AG やGCに比べて、MGにおいて多数の遺伝



図14. 胸腺で発現する遺伝子のVolcano-plot. 微小重力群 (MG) と人工1g 群 (AG) を比較した。 赤線はP = 0.05、青線は2倍変動の境界線。

子発現が増加した(図 14)。これらの遺伝子のほとんどは、様々な組織で特異的に発現する遺 伝子であった。胸腺の髄質上皮細胞は、多様な組織特異的遺伝子を異所的に発現する(参考文 献 8: Abramson J et al., Annu Rev Immunol. 2017)。RNA-seq 解析の結果は、宇宙滞在中の 無重力環境や他のストレスが、胸腺髄質上皮細胞の遺伝子発現に影響を与えることを示唆して いる。

4.7.2 宇宙滞在と微重力が脾臓、リンパ節および血中イムノグロビンに与える影響

脾臓の重量は微重力環境で減少傾向が見られるが、統計学的に有意ではなかった。また脾臓組織切片をヘマトキシリン・エオシン染色して検討したが、顕著な違いが見られなかった。

MG、AG、GCの脾臓で発現する遺伝子をRNA-seqにより比較した。変動遺伝子のGO解析 から、GCに比べて、MGおよびAGで減少した遺伝子群に、赤血球で発現する遺伝子が多く含 まれることが判明した。また減少した遺伝子の転写開始点付近のゲノムDNA配列を解析したと ころ、赤血球分化に重要なGATA1およびTAL1の結合配列が有意に濃縮されていた。

リンパ節の遺伝子発現も同様に RNA-seq で比較した。現在のところ、GO 解析や転写開始領域の配列解析からは、宇宙滞在の影響は明確になっていない。

血漿中のコルチコステロンとイムノグロブリン量を ELISA 法で解析した。コルチコステロンは MG マウスで上昇したが、AG により上昇が抑制された。コルチコステロンは、急激に変動するこ とから、宇宙滞在中に AG を経験することで、宇宙からの帰還で生じるストレスを軽減した可能性 がある。

また血漿中の IgG2b と IgG3は MG で上昇したが、IgG2b は AG により抑制され、IgG3 は抑制されなかった。IgA は MG と AG マウスで減少した。IgG1 および IgM には有意な変動はなかった。無重力を含めた宇宙環境が、各々のイムノグロブリン量に与える影響の原因については、 今後、さらに検討する必要がある。 4.8 内分泌系

内分泌組織に関しては、特に重力に応答して変動がみられた脂肪組織の解析を行った。 MGの脂肪組織では、AGと比べて精巣上体脂肪(図 15A)と鼠径部皮下脂肪組織で湿重量 の顕著な増加が観察された。パラフィン包埋組織切片で詳細に観察したところ、精巣上体脂肪や 鼠径部皮下脂肪組織で油滴サイズの増大が観察され、MGでは脂肪代謝の抑制が示唆され た。

次に、脂肪組織の遺伝子発現解析を定量的 RT-PCR で解析したところ、鼠径部皮下脂肪組 織において、MG で Fabp4などの白色脂肪マーカーの発現上昇が確認された。褐色脂肪組織に おいては Ucp1 の発現上昇が確認された。さらに、血中サイトカインについても蛍光マイクロビー ズアレイを用いて解析したところ、TIMP-1、MMP9、TSLP、SAP 等が MG で上昇することが確認 された。現在、特に組織標本と遺伝子発現の面で変化が見られた鼠径部皮下脂肪組織や褐色 脂肪の MG で変化する遺伝子発現について RNA-seq を行い、その詳細を解析中である。

このように、宇宙微小重力環境下で飼育されたマウス脂肪組織では、白色脂肪の蓄積がみられ、脂肪代謝の抑制が示唆されたが、これらの現象が微小重力に応答した結果であるか検証するため、遠心機を用いて過重力環境下で飼育したマウスについても解析を行った。

同じC57B6J系統のマウスを過重力環境下(2G)で2週間飼育したところ、宇宙微小重力環境 下で飼育したマウスとは逆に、白色脂肪組織の湿重量が減少する傾向が観察された。特に腸間 膜脂肪と精巣周囲脂肪で顕著な減少がみられた。一方、褐色脂肪ではこのような湿重量の減少 は観察されなかった。パラフィン包埋組織切片で脂肪組織を詳細に観察したところ、特に腸間膜 脂肪組織で油滴サイズの顕著な低下が観察され、過重力飼育環境下では脂肪代謝経路が活性 化されていることが示唆された(図 15B)。

また、脂肪組織サンプルの定量的 RT-PCR 解析では、褐色脂肪特異的に発現しミトコンドリア の熱産生に必要な Ucp1 が過重力条件下の精巣上体脂肪で発現誘導されていることが明らかと なった。一方、脂肪細胞で分泌されるアディポネクチンやレプチンの発現は、精巣上体脂肪や腸 間膜脂肪組織で低下しており、過重力条件下では、白色脂肪組織のミトコンドリアで酸化的リン 酸化を脱共役させて異所的にエネルギー産生が誘導され、脂肪酸の分解が起こりやすくなって いることが示唆された。また、油滴サイズの顕著な低下と白色脂肪マーカーの低下が確認された 腸間膜脂肪組織の過重力応答遺伝子に関して、さらに RNA-seq を行ったところ、核内受容体シ グナル経路やリポタンパク質形成に関連する遺伝子が特に変動していることが示唆された。



以上、宇宙微小重力環境下におけ る白色及び褐色脂肪組織の変化を詳 細に解析し、さらに過重力実験による 検証を行うことにより、近年様々なホ ルモンを分泌しエネルギー代謝を制御 する内分泌器官でもある脂肪組織の 動態を明らかにすることができた。

図 15 過重力及び宇宙微小重力飼育 環境下で長期飼育したマウス脂肪組 織(A)宇宙微小重力飼育環境下マ ウスの精巣上体脂肪組織(EWAT)の ヘマトキシリン・エオシン染色像。(B) 過重力飼育環境下マウスの腸間膜脂 肪組織(MWAT)のヘマトキシリン・エ オシン染色像。サイズバーは 100 µm 4.9 神経系

4.9.1 脳における遺伝子の発現解析

MG、AG、および GC の脳部位を剖出し、腹側海馬、小脳虫部、線条体について RNA-seq 解 析(各 n=3)により、遺伝子発現の変動について網羅的解析を行なった。合わせて腹側脊髄と脊 髄神経節についても RNA-seq 解析(MG、AG、 各 n=3)を行った。その結果、以下のように MG と AG 間で有意差(p<0.05)が見られた。また、これらの結果について、予備実験として行った地 上実験(2g 14 日の過重力負荷)(成果・学術論文 5:Ishikawa C et al., *PLoS One.* 2017)と比 較した。

1) 腹側海馬

AG と比較して MG で 29 遺伝子が発現低下、25 遺伝子で発現が増加した。発現が低下した 遺伝子には神経可塑性に関与する Arc (activity regulated cytoskeletal-associated protein)な どが含まれていた。なお、過重力環境(地上実験)において腹側海馬で発現量が変化した脳由 来神経栄養因子(BDNF)とセロトニン 1A 受容体(5-HT1AR)は、今回の MG、AG 間で遺伝子発 現に有意差は見られなかった。

2)小脳

275 遺伝子で発現が変化し、発現が低下したものが大部分であった。発現が低下した遺伝子にはセロトニン受容体(5-HT1AR、2CR など)が含まれた。一方、地上実験で 5-HT1AR の発現 量の解析を行ったが、過重力環境で変化は見られなかった。

3)線条体

106 遺伝子で発現低下、79 遺伝子で発現が増加した。発現が低下した遺伝子には Arc が含まれていた。

4) 腹側脊髄と脊髄神経節

複数の運動ニューロン関連遺伝子と固有感覚性ニューロン関連遺伝子の発現が、AGと比較 して MG で、それぞれ腹側脊髄と脊髄神経節において減少した。

1)~3)より重力環境は精神神経機能に関する遺伝子の発現に影響を及ぼし、その作用は脳 部位に依存することが示された。宇宙実験と地上実験で結果に違いが見られたが、これは重力 環境の条件(微小重力と過重力)とその期間(35日間と14日間)に依存する可能性が考えられ る。また、過重力負荷終了から3日後に遺伝子発現の回復を調べた地上実験の結果を考慮す ると、地球帰還から脳のサンプリングまでの3日間に発現の変化が回復する遺伝子の存在が考 えられ、今回示されたよりもより多くの遺伝子が微小重力環境で影響を受け、可塑性によって発 現が回復する可能性も考えられる。さらに4)より、運動ニューロンと固有感覚性ニューロンで遺 伝子の発現が変化したが、これは微小重力下での骨格筋の萎縮との関連が考えられる。

4.9.2 次世代マウスの行動解析

次世代への影響として、MG、AG、GC オス(F0)の精子を用いた体外受精によって作製され た次世代マウス(成体オス、F1)を用いて、以下の各種行動について解析した(各群 n=~16): 運動能力、温痛覚感受性、不安、うつ様行動、空間記憶学習、ストレス応答(拘束ストレス後の 血中コルチコステロン濃度)。その結果、いずれの解析においても MG, AG, GC の F1マウス間 で有意差は認められず、重力による顕著な影響は見られなかった。したがって、今回の約1ヶ月 の宇宙での微小重力環境は、次世代マウスのストレス関連行動(不安、うつ、ストレス応答)や記 憶学習能力などの行動に影響を及ぼさないことが示された。しかしながら、今後、火星探査など 長期の宇宙環境での滞在を考慮すると、より長期の宇宙環境について、今回解析しなかった社 会性などの行動を含めた行動解析が必要と思われる。

- 4.10 微量組織サンプル解析系
- 4.10.1 血漿中の細胞外 RNA 解析

AG(N=6)、MG(N=6)、GC(N=5) 血漿検体より RNA を精製し、small-RNA-seq および RNA-seq 解析を行った(図 16)。AG-MG-GC 間で変化する miRNA が検出され、発現パターン から由来組織が推定できるものとしては、肺と神経系に特異的な遺伝子があったことから、深部 組織の変化を反映している可能性が示唆された。

miRNA 以外のカウントとしては、筋、免疫系、肝臓に発現する遺伝子がもともと血漿中には多いが、フライト実験で変化した遺伝子には組織特異性は見られず、Cell redox homeostasis、 Ubiquitin、ER、Protein folding などのストレス応答遺伝子群が多いことがパスウェイ解析から示唆された。これらの遺伝子群の変化から、代謝系のシステミックな変化が予測された。



図 16 血漿中 RNA 解析

RNA-seq で得られたリードを全ゲノムの遺伝子にマッピングして定量解析を行った。代謝系およ びユビキチン経路に関する遺伝子群に由来する RNA が変化したことが、パスウェイ解析で示さ れた。

4.10.2 エピゲノム解析(ヒラメ筋、前庭神経核、耳石器等)

ヒラメ筋について、ヒストン H3 のトリメチル Lys4、アセチル化 Lys27 およびトリメチル化 Lys27 修飾を標的とした ChIP-seq 解析を行った。RNA-seq 解析で変化の見られた遺伝子付近以外に も、エピゲノムレベルでの変化が検出できたことから、RNA の発現に直接現れないエピジェネテ ィックな変化を捉えることができた(図 17)。

前庭神経核、および耳石器では、計画当初はバルク組織での解析を予定していたが、地上予 備実験において球形嚢と卵形嚢の重力環境変化に対する応答に差があることを示唆する結果 が得られたため、レーザーマイクロダイセクションを用いた解析を行った。RNA-seq 解析により、 重力環境を直接受容する耳石器において、遺伝子発現レベルでの変化が起きること、また、球 形嚢と卵形嚢の機能差の維持には恒常的な重力が必要なことを示す結果を得た。



図 17 耳石器官の RNA-seq 解析

骨迷路の薄切組織標本より組織部分を切り出し、解析を行った。バルク組織(球形嚢+卵形嚢) 解析において変化した遺伝子群の組織特異性を、球形嚢・卵形嚢をそれぞれ単離した解析でさらに確認することにより、卵形嚢と球形嚢の遺伝子発現レベルでの機能差がフライト条件では失われることが示された。 4.11 生殖·次世代解析系【AMED 連携】

昨今の報告から、父親の環境ストレスが次世代個体の形質に影響を与え得ることが示唆されている。我々はこれまでの解析から、ストレス応答性転写因子 ATF7 が生殖細胞のエピジェネティック修飾状態を制御することによって、このような遺伝現象が引き起こされていることを独自に見出している。そこで、宇宙環境の微小重力飼育が雄性生殖細胞の ATF7 結合・エピジェネティック状態及び次世代組織の発現プロファイルに与える影響について解析を行った。

GC、MG および AG から精巣生殖細胞を回収し、ChIP-seq 法によって ATF7 の染色体上の 結合状態について解析した。その結果、GC では 6,102 ヶ所の ATF7 結合領域が同定され、約 70.0%がプロモーター領域に局在していた。MG においても同様の解析を行い、比較した結果、 GC 精巣におけるプロモーター上の ATF7 結合領域の 59.7%が MG において減少していた(図 18A)。このような傾向は AG においても観察されたため、精巣細胞における ATF7 の染色体結 合量の減少は、宇宙空間飼育での重力環境ではなく、打上げ・帰還の影響が主たる原因だと推 察された。また、代表的なエピジェネティック修飾である H3K4me3・H3K27me3 についても解析 したところ、ATF7 は H3K4me3 を有するユークロマチン領域に局在している一方で、これら修飾 レベルは GC と MG の両群において大きな変化は認められなかった(図 18A)。この結果は、両 群の精巣細胞の転写プロファイルに大きな変化が認められない、という生殖系解析(伊川 CI)の 観察を支持している。

次に、GC、MG の各マウス由来の精子から作出した次世代マウスについて解析を行った。3 週齢の雄マウスから肝臓を回収し、RNA-seq 法によって転写プロファイルを解析したところ、GC と比較して 21 遺伝子が MG の次世代で発現が有意に上昇しており、5 遺伝子が減少していた (図 18B)。興味深いことに、発現上昇した遺伝子には MCM 複合体サブユニットなどの DNA 合 成に関わる遺伝子群が有意に含まれていた。また、精巣細胞において ATF7 が結合する標的遺 伝子と比較したところ、MG の次世代で発現上昇する遺伝子は ATF7 標的遺伝子と有意に重複 していた(図 18C)。これらの結果から、打ち上げ時の精神ストレスなどによって活性化した ATF7 が精巣細胞のエピジュネティック修飾状態を変化させることによって、精子を介して、次世代個体 の発現状態に影響を及ぼしている可能性が示唆された。



図 18 微小重力飼育が精巣細胞の ATF7 結合状態及び次世代の遺伝子発現に与える影響

4.12 感覚器(視覚系)【国際連携】

宇宙滞在において、宇宙飛行士の身体には微小重力による変化(異常)が引き起こされるが、 ISSにおけるミッション期間や帰還後にみられる視覚障害はその一つであり、ISSでの長期滞在 や将来の有人宇宙探査に向け解決すべき重大な課題である。この原因を明らかにし、対策法を 確立するために ISS において多くの研究が進められているが、眼球組織に対する重力の影響評 価や分子レベルでのより詳細な解析データ蓄積のため、小動物(マウス)を用いた研究が有効と 考えられている。特に、マウスへの重力の厳密な影響評価は、軌道所上で MG と AG の比較検 証を行うことを目的とした本ミッションで初めて可能となった。

これまでスペースシャトルを用いた宇宙実験から、網膜細胞におけるアポトーシスが地上対照 群に比べて微小重力群において増加していることを見出しており、これにより網膜機能の変化や 障害が引き起こされる可能性が示唆されたが、網膜の損傷や変性は加齢や酸化ストレスなど 様々な要因によっておこることが報告されており、そのメカニズムは不明であった。そこで、フライ ト後のマウス眼球組織を用いて、タンパク質発現プロファイルの変化や酸化ストレスによって起き るアポトーシスを調べることにより、宇宙滞在により視覚障害を起こすメカニズムを明らかにする ことを目的とした。

眼球組織の定量的評価により、MGの網膜血管内皮細胞のアポトーシスが、他の群に比べて 有意に誘導されていることが明らかとなった(図 19)。MGにおけるアポトーシスは、GCに比べて 64%も増加していることわかった。プロテオミクス解析により、細胞死、細胞修復、炎症、代謝スト レスに関与する多くの重要な経路が GCに比べて MG で有意に変化していることがわかった。こ れに加え、これらのタンパク質発現は、AGと比較して MG で顕著に変化していることを明らかに した(成果・学術論文 8: Mao XW et al., Int J Mol Sci. 2018)。

これらの結果は、宇宙飛行が網膜血管内皮細胞のアポトーシスを誘導し、網膜において、細胞 骨格、炎症反応、代謝機能に関与するタンパク質発現を変化させること、さらにこれらの網膜組 織障害が、人工重力負荷により軽減されることを証明した。これまでの宇宙実験においてもマウ スの眼球組織障害は報告されていたが、地上飼育群との比較であり微小重力以外の外的要因 (低線量放射線や打上げ/帰還時の過重力負荷など)の影響を排除できなかった。本実験により、 軌道上で人工的に1g環境を作り出し、長期飼育することができて初めて、視覚系に影響を与え る眼球組織障害が微小重力によるものであることを明らかにした。





図 19 網膜内皮組織におけるアポトーシス 細胞の増加(成果・学術論文 8: Mao XW et al., *Int J Mol Sci*. 2018 より改変)

(A)網膜内皮組織の TUNEL 染色像 緑:TUNEL 陽性細胞(アポトーシス細胞)、赤:レクチン陽 性細胞(内皮細胞)、青:DAPI(核) 矢印:TUNEL 陽性内皮細胞
 (B)TUNEL 染色による網膜内皮のアポトーシス細胞の定量

4.13 まとめ

以上の成果から、サクセスクライテリアに対する達成度は以下のように自己評価した。 循環器系および AMED 連携プロジェクトから、宇宙実験の影響が、次世代のマウスの遺伝子 発現に影響を及ぼすことを心臓および肝臓で明らかにし、「当代で誘導された遺伝子発現変化 がエピゲノム的変化として記憶され、次世代にまで引き継がれる」という新たな事象が発見でき たことは、(サイエンス)において「エクストラサクセス」を一部達成できたと考えられる。

また、前庭系の解析から、重力酔いにグルタミン酸作動性ニューロンが関連しており、人為的 な刺激により重力酔いを抑制できることを示したことは、筋萎縮・骨量減少・前庭機能不全などの 病態を引き起こす遺伝子群として、これまで未知だった新しい遺伝子群をいずれかの病態で1つ 以上発見・同定し、得られた病態遺伝子情報データベースを製薬企業等に提示が可能となった ことから、(社会へのアウトプット)において「エクストラサクセス」を一部達成できたと考えられる。

サクセス	クライテリア (サイエンス)	クライテリア (社会へのアウトプット)
ミニマム サクセス	軌道上から回収したマウス(当代)におい て、「宇宙環境(微小重力、宇宙放射線) では、地球環境とは違うストレスがかかる ため、筋肉等の組織における特異的な遺 伝子発現またはエピゲノム的な変化によ り、環境適応反応が誘導される」という仮 説が実証できること。	宇宙飛行士の長期宇宙滞在で観察される抗重力筋の萎縮・加重骨量の減 少・前庭機能不全・循環器動態変化に よる血液局在の影響のうちいずれかが 軌道上飼育マウスにおいて観察でき、 ヒトへの影響と比較できること。
	O∶達成	○∶達成
フル サクセス	上記に加えて、当代から得られた精子を 用いて次世代マウスを作製でき、その遺 伝子発現変化を DNA マイクロアレイによ り(網羅的に)解析することで、当代から 次世代に宇宙環境の影響が引き継がれ るかどうかを遺伝子発現の観点で判断で きること。	上記に加えて、筋萎縮や骨量減少・前 庭機能不全のいずれかの病態に関し、 微小重力/人工重力マウス群の比較に より、従来より精度の高いパスウェイ解 析を実施でき、病態を引き起こす遺伝 子群を絞り込んで同定できること。 さらに得られた病態遺伝子情報データ ベースを製薬企業等に提示できるこ と。
	O:達成	O:達成
エクストラ サクセス	「当代で誘導された遺伝子発現変化がエ ピゲノム的変化として記憶され、次世代に まで引き継がれる」という新たな事象が発 見できること。 宇宙実験と地上実験(過重力環境)の成 果を総合し、重力環境変化における遺伝 子発現/修飾の新たな法則性が見出さ れ、生命が 1G 地球環境上で進化・適 応してきたメカニズムをエピゲノムの観点 から明らかにできること。	上記に加えて、筋萎縮・骨量減少・前 庭機能不全などの病態を引き起こす遺 伝子群として、これまで『未知』だった 全く新しい遺伝子群を、いずれかの病 態で1つ以上発見・同定し、得られた病 態遺伝子情報データベースを製薬企 業等に提示できること。
	△∶一部達成	△:一部達成

5. 結言

ISS・きぼう利用ミッション「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価(Mouse Epigenetics)」 により、以下の成果が得られた。

5.1 骨格筋系

- (1) MGにおいて、抗重力筋に有意な萎縮が起きること、またこの萎縮が人工重力負荷により 抑制されることを明らかにした。
- (2) 筋萎縮に関わる新たな候補遺伝子を4つ同定した。

5.2 代謝系(肝臓)

GC と比較して AG および MG で有意な重量の増加があったが、AG-MG 間に差はなく、組織学的解析でも明らかな違いはみられなかった。

5.3 骨系

- (1) MGにおける骨量減少を確認できたことに加え、AGにより骨量減少を抑制できることを示した。
- (2) 組織的解析から、MG における骨量減少は破骨細胞による骨吸収の促進と骨形成の低下 に起因することが判明した。
- (3) MGにおける骨吸収促進と骨形成低下は、血中骨代謝マーカーの解析からも裏付けられた。
- (4) 骨組織における網羅的遺伝子発現解析から、破骨細胞関連遺伝子の発現亢進が判明した。
- (5) 骨形成に関連する遺伝子については顕著な発現変化が認められず、骨形成を伴う地球帰 還後の骨量回復が始まっていることが示唆された。
- (6) 宇宙フライトマウスの骨髄細胞の培養に成功し、微小重力群のマウス由来の細胞では破 骨細胞分化が亢進することを明らかにした。

5.4 前庭系

- (1) 重力変化に対する前庭系の可塑的変化は、少なくとも末梢受容器から1次ニューロンの間 で起こることを見出した。
- (2) 重力酔いの中枢機序に前庭神経核グルタミン酸作動性ニューロン活動増加が関与してい ることが分かった。
- (3) 生体応答の点から見て、短腕遠心機でも長腕遠心機と同様の重力負荷が可能であること を証明した。
- (4) 打上・回収時の過重力に対する生体応答は、一過性であることを明らかにした。

5.5 循環器系

転写産物の総体情報(RNA-seq)とmRNAの翻訳鋳型情報(Ribo-seq)を解析することで、宇宙 マウスと次世代マウスの心臓の遺伝情報の発現を比較し、ケトン体代謝系の遺伝子が大きく変 動していることが明らかになった。

5.6 生殖系

宇宙環境で約1ヶ月を過ごしたマウスでは、精子形成や機能に異常は認められず、宇宙フライト マウス由来の精子を使用した体外受精により健康な子孫(次世代マウス)が得られた。

5.7 免疫系

- (1) 宇宙環境では、重力変動と他の環境変動の相加的影響により、胸腺が萎縮し、自己免疫 寛容の誘導に重要な髄質上皮細胞の遺伝子発現が上昇することを見出した。
- (2) 宇宙環境は脾臓やリンパ節の構築にはほとんど影響しないが、脾臓で赤血球関連遺伝子の発現を減少させることを明らかにした。

5.8 内分泌系

- (1) 宇宙環境では、精巣上体脂肪と鼠径部皮下脂肪で、湿重量と油滴サイズの増大が観察された。
- (2) 宇宙環境では、遺伝子発現解析でも白色脂肪マーカーの発現上昇が確認され、脂肪代謝 の抑制が示唆された。

5.9 神経系

- (1)宇宙環境では、重力変動と他の環境変動の影響により、部位(腹側海馬、線条体、小脳、 脊髄、脊髄神経節)特異的に神経可塑性等に関する遺伝子の発現が変化した。
- (2) 次世代マウスの行動への影響は認められなかった。

5.10 微量組織サンプル解析系

- (1) 血漿中の細胞外 RNA 解析において、RNA 量の変化が見られた遺伝子にはストレス応答 経路に関するものが多く見いだされ、宇宙環境応答に関する細胞内経路が推定できた。
- (2) ヒラメ筋における RNA-seq と ChIP-seq の統合解析により、抗重力筋の RNA 発現レベル での宇宙環境応答に加え、クロマチンレベルでのエピジェネティックな変化を捉えることがで きた。
- (3) 耳石器官の解析により、前庭系の宇宙環境応答が、球形嚢と卵形嚢の感覚上皮の遺伝子 発現の変化として検出できた。また、球形嚢と卵形嚢の機能差の維持には地上の重力環境 が必要なことを示唆する結果が得られた。
- 5. 11 生殖·次世代解析系【AMED 連携】
- (1) 打上げ・帰還の影響は、精巣細胞の染色体上における ATF7 結合を減衰することを見出した。
- (2) 次世代マウスの肝臓では、一部の遺伝子の発現レベルが有意に変動し、これらには精巣 での ATF7 結合遺伝子が有意に含まれることがわかった。
- 5.12 感覚器(視覚系)【国際連携】
- (1) 宇宙飛行が網膜血管内皮細胞のアポトーシスを誘導し、網膜における、細胞骨格、炎症反応、代謝関連タンパク質の発現を変化させることを明らかにした。
- (2) 宇宙飛行による網膜組織障害が、人工重力負荷により軽減されることを証明し、宇宙飛行 による眼球組織障害が微小重力に起因することを初めて明らかにした。

上述のように、軌道上から回収したフライトマウス(当代)において、各組織における特異的な 遺伝子発現またはエピゲノム的な変化を見出した。さらにフライトマウスから得られた精子を用い て次世代マウスを作製し、次世代マウスの遺伝子発現変化を DNA マイクロアレイ等により網羅 的に解析することができた。心臓や肝臓では当代から次世代に宇宙環境の影響が引き継がれ ることを遺伝子発現の観点で評価できた。また、微小重力環境における筋萎縮や前庭機能の可 塑性に関係する遺伝子を新たに見出し、得られた遺伝子情報データベースを製薬企業等に提示 することが可能となった。さらに、骨格筋萎縮、骨量減少、視覚障害などの宇宙飛行による影響 を人工重力負荷により抑制することができる、という新たな知見を得ることができた。 [参考文献]

- 1. Waterland RA, Jirtle RL.Transposable elements: targets for early nutritional effects on epigenetic gene regulation. *Mol Cell Biol*, 2003 Aug;23(15):5293-300.
- Weaver IC, Cervoni N, Champagne FA, D'Alessio AC, Sharma S, Seckl JR, Dymov S, Szyf M, Meaney MJ. Epigenetic programming by maternal behavior. *Nat Neurosci*, 2004 Aug;7(8):847-54, DOI: 10.1038/nn1276.
- Ng SF, Lin RC, Laybutt DR, Barres R, Owens JA, Morris MJ. Chronic high-fat diet in fathers programs β-cell dysfunction in female rat offspring. *Nature*, 2010 Oct 21;467(7318):963-6, doi: 10.1038/nature09491.
- Carone BR, Fauquier L, Habib N, Shea JM, Hart CE, Li R, Bock C, Li C, Gu H, Zamore PD, Meissner A, Weng Z, Hofmann HA, Friedman N, Rando OJ. Paternally induced transgenerational environmental reprogramming of metabolic gene expression in mammals. *Cell*, 2010 Dec 23;143(7):1084-96, doi: 10.1016/j.cell.2010.12.008.
- 5. 白川 正輝、湯本 茜、芝 大、小林 拓恵、水野 浩靖、小久保 年章、高橋 智 "国際宇宙ステーション・日本実験棟「きぼう」での動物利用研究の現状" LABIO21 No. 72 p9-12 日本実験動物協会 2018 年 4 月

<u>(免疫系)</u>

- Gridley DS, Mao XW, Stodieck LS, Ferguson VL, Bateman TA, Moldovan M, Cunningham CE, Jones TA, Slater JM, Pecaut MJ. Changes in mouse thymus and spleen after return from the STS-135 mission in space. *PLoS One,* 2013 Sep 19;8(9):e75097, doi:10.1371/annotation/e66bdc4e-2409-4582-b163-7bc182db275e.
- Gruver AL, Sempowski GD. Cytokines, leptin, and stress-induced thymic atrophy. J Leukoc Biol, 2008 Oct;84(4):915-23, DOI: 10.1677/JOE-09-0179.
- 8. Abramson J, Anderson G. Thymic Epithelial Cells. *Annu Rev Immunol,* 2017 Apr 26;35:85-118, doi: 10.1146/annurev-immunol-051116-052320.

<u>(生殖系)</u>

 Wakayama S, Kamada Y, Yamanaka K, Kohda T, Suzuki H, Shimazu T, Tada MN, Osada I, Nagamatsu A, Kamimura S, Nagatomo H, Mizutani E, Ishino F, Yano S, Wakayama T. Healthy offspring from freeze-dried mouse spermatozoa held on the International Space Station for 9 months. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2017 Jun 6;114(23):5988-5993, doi: 10.1073/pnas.1701425114.

[成果リスト]

<u>学術論文:</u>

1. (前庭系 地上予備実験)

Morita H, Obata K, Abe C, Shiba D, Shirakawa M, Kudo T, Takahashi S. Feasibility of a short-arm centrifuge for mouse hypergravity experiments. *PLoS One,* 2015 10(7): e0133981, doi: 10.1371/journal.pone.0133981 (IF: 3.057)

 (免疫系 地上予備実験) Tateishi R, Akiyama N, Miyauchi M, Yoshinaga R, Sasanuma H, Kudo T, Shimbo M, Shinohara M, Obata K, Inoue J, Shirakawa M, Shiba D, Asahara H, Yoshida N, Takahashi S, Morita H, Akiyama T. Hypergravity provokes a temporary reduction in CD4+CD8+ thymocyte number and a persistent decrease in medullary thymic epithelial cell frequency in mice. *PLoS One,* 2015 Oct 29;10(10):e0141650, doi: 10.1371/journal.pone.0141650 (IF: 3.057)

(骨格筋系、免疫系、生殖系、循環器系、内分泌系、神経系、骨系、前庭系 地上予備実 <u>験)</u>

Shimbo M, Kudo T, Hamada M, Jeon H, Imamura Y, Asano K, Okada R, Tsunakawa Y, Mizuno S, Yagami K-i, Ishikawa C, Li H, Shiga T, Ishida J, Hamada J, Murata K, Ishimaru T, Hashimoto M, Fukamizu A, Yamane M, Ikawa M, Morita H, Shinohara M, Asahara H, Akiyama T, Akiyama N, Sasanuma H, Yoshida Nobuaki, Zhou R, Wang Y-Y, Ito T, Kokubu Y, Noguchi TK, Ishimine H, Kurisaki A, Shiba D, Mizuno H, Shirakawa M, Ito N, Takeda S, Takahashi S. Ground-based assessment of JAXA mouse habitat cage unit by mouse phenotypic studies. *Exp Anim,* 2016 May 20; 65(2):175-87, doi: 10.1538/expanim.15-0077 (IF: 1.374)

- (前庭系 地上予備実験)
 Morita H, Yamaguchi A, Shiba D, Shirakawa M, Takahashi S. Impact of a simulated gravity load for atmospheric reentry—10 g for 2 minutes—on conscious mouse. J Physiol Sci, 2017 67: 531-537, doi: 10.1007/s12576-017-0526-z (IF: 2.757)
- <u>(神経系 地上予備実験)</u> Ishikawa C, Li H, Ogura R, Yoshimura Y, Kudo T, Shirakawa M, Shiba D, Takahashi S, Morita H, and Shiga T. Effects of gravity changes on gene expression of BDNF and serotonin receptors in the mouse brain. *PLoS One,* 2017 12(6):e0177833, doi: 10.1371/journal.pone.0177833 (IF: 3.057)
- 6. (骨格筋系、骨系、前庭系 フライト実験)

Shiba D, Mizuno H, Yumoto A, Shimomura M, Kobayashi H, Morita H, Shimbo M, Hamada M, Kudo T, Shinohara M, Asahara H, Shirakawa M, Takahashi S. Development of new experimental platform 'MARS'-Multiple Artificial-gravity Research System-to elucidate the impacts of micro/partial gravity on mice. *Sci Rep*, 2017 Sep 7; 7(1): 10837, doi: 10.1038/s41598-017-10998-4 (IF: 4.122)

7. (免疫系 地上予備実験)

Horie K, Kudo T, Yoshinaga R, Akiyama N, Sasanuma H, Kobayashi TJ, Shimbo M, Jeon H, Miyao T, Miyauchi M, Shirakawa M, Shiba D, Yoshida N, Muratani M, Takahashi S, Akiyama T. Long-term hindlimb unloading causes a preferential reduction of medullary thymic epithelial cells expressing autoimmune regulator (Aire). *Biochem Biophys Res Commun*, 2018 Jun 27;501(3):745-750, doi: 10.1016/j.bbrc.2018.05.060. (IF: 2.559)

8. (感覚器(視覚系) 【国際連携】 フライト実験)

Mao XW, Byrum S, Nishiyama NC, Pecaut MJ, Sridharan V, Boerma M, Tackett AJ, Shiba D, Shirakawa M, Takahashi S, Delp MD. Impact of spaceflight and artificial gravity on the mouse retina: Biochemical and proteomic analysis. *Int J Mol Sci*, 2018 19(9): 2546, doi: 10.3390/ijms19092546 (IF: 3.687)

投稿予定

1. <u>(前庭系 スピンオフ実験)</u>

Abe C, Yamaoka Y, Yokota S, Yamanaka A, Morita H. The role of the Vglut2 and Vgat neurons located in the vestibular nuclear complex on thermoregulation in mice. *Science*, 2018 年 12 月 28 日投稿

 (生殖系 フライト実験) Matsumura et al., Healthy offspring from space male mice housed in International Space Station(TBD) 2019年1月投稿予定

- (骨格筋系 フライト実験) Okada R et al., Identification of the gene-related to muscle atrophy caused by unloading during space flight(TBD) 2019 年 2 月投稿予定
- (免疫系 フライト実験) Horie K et al., Effect of space flight and microgravity on the thymus(TBD) 2019 年 2 月投稿予定
- (内分泌系 地上予備実験) Ishimine H et al., Effect of hypergravity on the adipose tissues(TBD) 2019 年 2 月投稿予定
- (生殖・次世代解析系【AMED 連携】 フライト実験) Yoshida K et al., Paternal rearing in low-gravity space induces expression change in offspring(TBD) 2019 年 3 月投稿予定
- 7. (免疫系 フライト実験) Horie K et al., Effect of space flight and microgravity on the secondary lymphoid organs(TBD) 2019 年 3 月投稿予定
- (循環器系 フライト実験) Kim JD et al., Reprogrammed ketogenic gene expression in the heart of next generation from mice experienced in Space(TBD) 2019 年 3 月投稿予定
- (内分泌系 フライト実験) Ishimine H et al., Effect of space flight and microgravity on the adipose tissues(TBD) 2019 年 3 月投稿予定
- 10. <u>(微量組織サンプル解析系 フライト実験)</u> TBD 2019 年 3 月投稿予定
- 11. <u>(総説 フライト実験)</u> Shiba D et al., Perspective for future rodent research activities in the space(TBD) 2019 年 3 月投稿予定

<u>著書·総説:</u>

<u>(骨格筋、代謝系)</u>

- 工藤 崇、高橋 智 "マウス宇宙実験" 実験医学別冊 マウス表現型解析スタンダード コ ラム 羊土社 2016 年 11 月
- 2. 工藤 崇、岡田理沙、篠原正浩、浅原弘嗣、芝 大、白川正輝、高橋 智 "マウスを用いた宇 宙環境応答の網羅的解析" LABIO21 No.72, p13-16 日本実験動物協会 2018年4月
- 工藤 崇、岡田理沙、芝 大、水野浩靖、白川正輝、高橋 智 "マウスを用いた宇宙環境応 答の網羅的解析に向けて"細胞、Vol.50, No.10, p12-15 北隆館 2018 年 10 月 (骨系)
- 4. 篠原正浩"宇宙における骨量低下と破骨細胞" 腎と骨代謝 特集「宇宙医学研究の最前線」、Vol.30, No.3, p195-202 日本メディカルセンター 2017 年 7 月

- 6. 篠原正浩 "宇宙滞在による骨組織への影響" 生体の科学 特集「宇宙の極限環境から生 命体の可塑性をさぐる」 Vol.69, No.2, p133-137 医学書院 2018 年 4 月
- <u>(免疫系)</u>
- 秋山泰身、堀江健太、関 崇生、秋山伸子"宇宙環境ストレスがリンパ組織胸腺に与える 影響"細胞、Vol.50, No.10, p20-23 北隆館 2018 年 10 月
- 秋山泰身、良永理子、秋山伸子"重力依存的な胸腺組織微小環境の機能制御"骨と腎 代謝、Vol.30, No.3, p169-175 臨床医学出版 2017 年 7 月
- 秋山泰身、堀江健太、良永理子、秋山伸子 "免疫機能に対する宇宙滞在の影響" 生体の 科学、Vol.69, No.2, p147-151 医学書院 2018 年 4 月

<u>学会発表:</u>

(骨格筋、代謝系)

- 岡田理沙、新保未来、工藤 崇、濱田理人、水野聖哉、八神健一、志賀隆、石田純治、深水 昭吉、伊川正人、森田啓之、篠原正浩、浅原弘嗣、秋山泰身、吉田進昭、栗崎 晃、芝 大、 水野浩靖、白川正輝、伊藤尚基、武田伸一、高橋 智 "マウスを用いた微小重力環境応答 の網羅的解析-マウス軌道上飼育装置の開発と評価" 第 89 回日本生化学会大会(仙台) 2016 年 9 月 25-27 日 ポスター
- 坪内鴻奈、岡田理沙、鈴木 陸、布施谷清香、林 卓杜、中村勇輝、久野朗広、村谷匡史、 工藤 崇、高橋 智 "微小重力環境下でのエピジェネティクスによる骨格筋制御因子の探索" 第41回日本分子生物学会年会(横浜) 2018年11月28-30日 ポスター
- (骨系)
- 3. 篠原正浩、鈴木 碧、工藤 崇、新保未来、芝 大、白川正輝、高橋 智、浅原弘嗣 "長 期宇宙滞在マウスの骨組織解析" 第4回日本リウマチ学会ベーシックリサーチカンフ ァレンス(東京) 2017年10月13日 ポスター
- 4. 篠原正浩、工藤 崇、新保未来、芝 大、白川正輝、高橋 智、浅原弘嗣 "長期宇宙滞 在マウスの骨組織解析" 第35回日本骨代謝学会(福岡) 2017年7月27日 ロ頭
- 5. 篠原正浩、工藤 崇、新保未来、芝 大、白川正輝、高橋 智、浅原弘嗣 "長期宇宙滞 在マウスの骨組織解析"第3回日本骨免疫学会(沖縄) 2017年6月27日 ポスター (免疫系)
- 堀江健太、関 崇生、秋山伸子、加藤 保、大野博司、高橋 智、秋山泰身 "Impacts of space flight and its ground models on the thymus" 第47回日本免疫学会学術集会(福 岡) 2018年12月10-12日 ポスター

<u>招待講演・シンポジウム:</u>

(骨格筋、代謝系)

- 高橋 智 「国際宇宙ステーション(ISS)・「きぼう」日本実験棟におけるマウス実験」熊本大学 生命資源研究・支援センターシンポジウム 2017 年 3 月 24 日
- 2. Satoru Takahashi. Mouse Experiment in ISS/Kibo. 14th Japan-Korea Joint Seminar on Space Environment Utilization Research (Daejeon, Korea) 2017年8月24日-25日
- 3. Miki Shimbo, Takashi Kudo, Dai Shiba, Masaki Shirakawa, and Satoru Takahashi 「マ ウスの宇宙環境応答を網羅的に評価するための装置開発」(札幌)第 93 回日本生理学 会大会 2016 年 3 月 22-24 日
- 高橋 智 Mouse Epigenetics 「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的解析」 国際宇宙 ステーション・「きぼう」利用シンポジウム(東京) 2018 年 1 月 24-25 日

- 5. Risa Okada, Hirona Tsubouchi, Miki Shimbo, Michito Hamada, Masafumi Muratani, Dai Shiba, Masaki Shirakawa, Takashi Kudo and Satoru Takahashi "微小重力環境に おける新規骨格筋萎縮関連遺伝子の探索"第95回日本生理学会大会(高松)2018年 3月28-30日
- 6. 高橋 智「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的解析」日本腸内細菌学会(東京) シ ンポジウム「宇宙と微生物」2018 年 5 月 31 日-6 月 1 日
- Satoru Takahashi, Risa Okada, Takashi Kudo, Akane Yumoto, Hiroyasu Mizuno, Dai Shiba and Masaki Shirakawa "Transcriptome analysis of gravitational effects on muscles of mice – Baseline data of gene profiling under micro-g and onboard artificial 1-g conditions for upcoming NASA-JAXA rodent collaboration" 2018 ISS R&D Conference (SF, USA) 2018 年7月29日-8月1日
- 8. 高橋 智「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的解析」 宇宙生物科学会第 32 回大会シ ンポジウム(仙台) 2018 年 9 月 21-22 日
- 9. 高橋 智「国際宇宙ステーションにおけるマウス実験」IET セミナー(東京) 2018 年 10 月5日

<u>(骨系)</u>

- 10. 篠原正浩、浅原弘嗣「Systems Bone Biology の展開」 九州大学数理生物学セミナー (出雲) 2017 年 3 月
- 11. 篠原正浩「寝たきりを防ぐ統合的骨代謝研究—骨破壊性疾患の治療と予防に向けて」 慶應義塾大学先端生命科学研究所セミナー(鶴岡)2017 年 8 月
- 12. 篠原正浩「力学的荷重による骨代謝制御」 第2回理論免疫ワークショップ(富山) 2018年2月
- 13. 篠原正浩「寝たきりを防ぐ統合的骨代謝研究—骨破壊性疾患の治療と予防に向けて」 昭和大学歯学部セミナー(東京)2018 年 2 月
- 14. 篠原正浩「Osteoporosis in spaceflight and osteoclasts」 第 95 回日本生理学会大会 (高松) 2018 年 3 月 28-30 日

(免疫系)

15. 秋山泰身「重力変化による胸腺機能の擾乱」日本宇宙生物科学会第 30 回大会シンポジウム(長久手) 2016 年 10 月 13-15 日

(微量組織サンプル解析系)

16. 村谷匡史、安部 カ、藤田晋一郎、山岡優佑、工藤 崇、高橋 智、森田啓之「宇宙フライトマウス前庭系のエピゲノム解析から見た重力環境応答の可塑性」宇宙生物科学会第 32回大会シンポジウム(仙台) 2018年9月 21-22日

<u>受賞:</u>

(骨格筋、代謝系)

高橋 智 "2018 ISS Award for Compelling Results" ISS R&D Conference (SF, USA) 2018 年 2018 年 7 月 29 日-8 月 1 日

<u>取材・報道等パブリシティ:</u>

(骨格筋、代謝系)

- 日本経済新聞 宇宙ステーションフル稼働 動植物を使い成長への影響を調べる 2015 年 10月18日 朝刊
- 2. 朝日新聞 ISS 活用の時代 2016 年 6 月 19 日朝刊

- 3. 読売新聞 七夕に夢見た宇宙へ 2016 年 6 月 30 日夕刊
- 4. NHK ニュース7 大西さん宇宙へ "老化"解明に迫る 日本初の実験で 2016 年7月6日
- 5. 毎日新聞 宇宙で挑む、未来への「きぼう」 2017 年 9 月 22 日
- 6. 科学新聞 ISS「きぼう」人工重力環境でマウスを長期飼育、影響評価 2017 年 9 月 22 日
- 7. 愛媛新聞 朝刊、人工重力で目の健康維持、2018年11月7日
- 8. 熊本日日新聞 朝刊、人工重力で網膜損傷改善、2018年11月9日
- 9. 北海道新聞 夕刊、人工重力で目の健康維持、2018年11月14日
- 10. 静岡新聞 朝刊、人工重力で目の健康維持、2018年11月19日
- 11. 高知新聞 朝刊、人工重力で目の健康維持、掲載日時不明
- 12. 中国新聞 朝刊、人工重力 目や骨の健康維持、2018年12月2日

研究課題

マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価(Mouse Epigenetics)

代表研究者;高橋 智(筑波大学)

総合評価

S:目標を高度に達成し、特筆すべき成果を上げた(エクストラサクセス相当)

個体レベルでの宇宙環境応答に対し、マウスを用いて、多くの組織・臓器について、分子・細胞・組 織レベルで詳細な解析・網羅的な評価を行い、遺伝子発現変化およびエピゲノム変化を明らかにし た。重力環境変化による遺伝子発現変化・修飾が次世代に引き継がれることが示されるなど、インパ クトのある成果を挙げた。宇宙での妊娠、出産、成長に関する基盤を与える、将来の有人宇宙探査技 術として重要な成果であると共に、基礎的な医科学領域への波及効果も期待される。

併せて、残った臓器の一層の活用、また、継世代マウスの作成など、意義高い提案も行われており、是非、実現に向けて継続して欲しい。

また、多くの研究者による対象臓器毎の解析の分担や優れた学術誌への計画的な論文報告が行われたことは、適切な研究マネージメントによるものでもあった。一方、世界で初めて、宇宙空間で可変の人工重力負荷が可能なマウス飼育装置を開発し、有効性を実証したことも、高く評価される。

平成 31 年 2 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション 「マウスを用いた宇宙環境応答の網羅的評価(Mouse Epigenetics)」 研究成果概要書 代表研究者:高橋 智(筑波大学) 平成31年2月



地球環境の生物は、1g の環境中で生物進化を遂げてきており、ヒトを含めた高等ほ乳類においても、1g 環 境に適応して生体システムが構築されている。微小重力環境下では、宇宙酔い、循環器動態変化による血液局 在の変化、筋肉量、骨量の著しい減少が観察されることが知られており、微小重力環境に対応するために、 様々な遺伝子発現変化が誘導されていることが予想されるが、これまでほ乳類での実験が難しかったため、そ の詳細は解析されていない。

また、生物の有する遺伝情報が次世代に受け継がれることは、「DNA 配列に依存する遺伝様式」として良く 知られているが、近年、後天的に獲得した形質が世代を超えて継承される機序の一端を担う「DNA 配列に依存 しない遺伝様式」として、エピゲノムが注目され、積極的に研究が行われている。エピゲノムは、様々な外来刺 激、環境の変化により変動し、その変動が世代を超えて継承され得る。そこで本ミッションでは、重力環境変化 による当代のマウス個体の各組織の遺伝子発現変化およびエピゲノム変化を網羅的に解析し、宇宙滞在によ る生体への影響の解明することに加え、宇宙環境に曝露された精子を用いて体外受精により次世代を作製し、 宇宙環境飼育の影響が次世代に受け継がれるかを解析し、ほ乳動物が地球環境(1g)上で進化・適応してきた 過程の全貌にエピゲノムの観点から迫ることを目的とした。

本プロジェクトの2 大テーマのうちの1つである、宇宙環境に曝露された精子を用いた体外受精による次世 代を作製と解析には、生存回収による新鮮試料の採取が必要であった。しかしながら、宇宙におけるマウス実 験は、飼育環境の維持、生存回収、適切な対照実験など、通常の地上実験と比較して解決しなければならない 課題が多数あり、これらを克服するための装置開発が必要であった。そこで JAXA は、宇宙で人工重力をつく るための新しい実験プラットフォームの開発として、軌道上の細胞培養装置(CBEF: Cell Biology Experiment Facility)の微小重力区画、および人工重力区画(遠心装置)に設置するための小動物飼育装置(MHU: Mouse Habitat Unit)を開発した。MHU は、JAXA が設計確認用の要素試作モデルや試験用モデルを製作し、研究者 と共同で多数の生物適合性試験を実施し、動物飼育用ケージとしての特性や妥当性を確認した。この MHU を 用い、微小重力群(MG)および人工 1g 群(AG)をそれぞれマウス 6 匹ずつ(計 12 匹)、35 日間、軌道上で個 別飼育し、全てのマウスを生きたまま地球に戻すことに成功した。さらに、この MHU を CBEF に設置すること により重力を制御することが可能となり、宇宙環境で地球と同じ 1g 重力下で飼育した AG を設定することが可 能になった。さらに、地上対照群(GC)として、JAXA 筑波宇宙センターにおいて、同じ飼育装置を用いてフライ ト実験の飼育条件、スケジュールに準じて飼育を実施し、あわせて比較評価した。

飼育装置に不具合が見られたマウスを除いて、AGマウスの体重が増加したのに対し、MGマウスの体重は 増加、または搭載前と同程度であった。MG、AG、GCの各臓器について、遺伝子発現、エピジェネティクス解 析、組織学的解析、次世代作製を行い、以下の結果を得た。

- 骨格筋系では、AG および GC に比べて MG において抗重力筋の有意な萎縮を確認し、今回の飼育装置により筋重量の減少は重力による影響が大きいことが証明され、重力負荷によりこの筋委縮が防ぐことができることを見出した。有意な萎縮が確認されたヒラメ筋を用いて遺伝子発現解析を行い、筋萎縮に関連すると考えられるいくつかの候補遺伝子を同定した。
- 骨系では、MG における骨量減少を確認できたことに加え、AG により骨量減少を抑制できることを示した。組織学的解析から、MG における骨量減少は破骨細胞による骨吸収の促進と、骨形成の低下に起因することが判明した。それをサポートする結果として、骨組織における網羅的遺伝子発現解析から、破骨細胞関連遺伝子の発現亢進を確認した。さらに、宇宙フライトマウスの骨髄細胞の培養に成功し、MG マウス由来の細胞では、破骨細胞分化が亢進することを明らかにした。この結果は、細胞レベルで MG の影響が記憶されていることを明らかにしたものとして重要である。

- 前庭系では、重力変化に対する前庭系の可塑的変化は、少なくとも末梢受容器から1次ニューロンの間で起こることを明らかにした。さらに、重力酔いの中枢機序に前庭神経核のグルタミン酸作動性ニューロンの活動増加が関与していることを同定した。重力酔いの分子機構の一端を解明したものとして、非常に重要な成果である。
- 循環器系では、転写産物の総体情報(RNA-seq)とmRNAの翻訳鋳型情報(Ribo-seq)を解析することで、MG、AG、GCマウスの心臓の遺伝情報の発現を比較し、ケトン体代謝系の遺伝子が大きく変動していることが明らかになった。この変化は、次世代マウスでは逆に抑制されており、次世代の遺伝子発現に影響があることを世界で初めて明らかにした。
- 生殖系では、宇宙環境で約1ヶ月を過ごしたマウスでは、精子形成や機能に異常は認められず、体外受 精により健康な子孫が得られることを明らかにした。
- 免疫系では、宇宙環境の重力変動と他の環境変動の相加的影響により、胸腺が萎縮し、自己免疫寛容の誘導に重要な髄質上皮細胞の遺伝子発現が上昇することを明らかにした。また、宇宙環境は、脾臓やリンパ節の構築にはほとんど影響しないが、脾臓で赤血球関連遺伝子の発現を減少させることを同定した。
- 内分泌系では、MGにおいて精巣上体脂肪と鼠径部皮下脂肪組織の湿重量と油滴サイズの増大が観察され、遺伝子発現解析でも白色脂肪マーカーの発現上昇が確認され、脂肪代謝が抑制されていることが確認された。
- 神経系では、宇宙環境の重力変動と他の環境変動の影響により、部位(腹側海馬、線条体、小脳、脊髄、 脊髄神経節)特異的に神経可塑性等に関する遺伝子の発現が変化していることが確認された。また、宇 宙環境で飼育したマウスから得た精子の体外受精によって得られたマウスの行動に顕著な変化は見ら れず、宇宙環境の次世代マウスの行動への影響は認められなかった。
- 微量組織サンプル解析系では、宇宙環境により耳石器において遺伝子発現変化が起き、球形嚢と卵形 嚢の遺伝子発現レベルでの機能差がフライト条件(AGよよび MG)では失われることが示された。
- 生殖系では、AMED 連携による解析から、宇宙実験のストレスが次世代に遺伝子し、次世代の遺伝子発 現に影響することを明らかにした。
- 感覚器(視覚)系では、NASA との共同実験により、AG では MG と比較して、網膜の障害が軽度であった。この結果は、人工重力負荷により、男性宇宙飛行士で問題となっている眼障害を予防できるものとして、世界的に評価されている。

上述のように、軌道上から回収したフライトマウス(当代)において、各組織における特異的な遺伝子発現また はエピゲノム的な変化を見出した。さらにフライトマウスから得られた精子を用いて次世代マウスを作製し、次 世代マウスの遺伝子発現変化を DNA マイクロアレイ等により網羅的に解析することができた。心臓や肝臓で は当代から次世代に宇宙環境の影響が引き継がれることを遺伝子発現の観点で評価できた。また微小重力環 境における筋萎縮や前庭機能の可塑性に関係する遺伝子を新たに見出し、得られた遺伝子情報データベース を製薬企業等に提示が可能となった。



図. プロジェクト概要

Summary report of the ISS-Kibo utilization mission, "Transcriptome analysis and germ cell development analysis of mice in the space" (Mouse Epigenetics) Principal Investigator, Satoru Takahashi (University of Tsukuba) February 2019



Adapting to a changing environment is a key to any organism's survival. Gravity is one of the most important factors shared by most organisms on Earth through evolution. Therefore, when organisms go to space, physiological changes occur in adapting to microgravity. Previous space studies using mice as a mammalian model have suggested that microgravity in space causes tremendous changes in biological reactions such as gene expression. And recent studies on genetics have identified the significance of epigenomic input in gene expression. Epigenomics is closely related to gene expression, although independent of the genomic sequence itself. Importantly, epigenetic variations are highly susceptible to environmental stimuli, including gravitational changes. The precise variations on changes in gene expression and its epigenetic factors during adaptation to microgravitational environments are largely unknown, however, given the limited resources for conducting space flight experiments using mice models. And studies on epigenetics have revealed the potential of epigenetic changes being transmitted across generations. However, whether epigenetic changes caused by the space environment are inheritable also remains unknown.

In an effort to answer these questions, this project focused on elucidating the impacts of microgravity (MG) and artificial gravity (AG), equivalent to Earth (1 g), on mice in the ISS. For this purpose, a newly developed mouse habitat cage unit (HCU) that can be installed in the Cell Biology Experiment Facility (CBEF) was used. The CBEF is equipped with sections providing microgravity and artificial gravity of 1 g, enabling a comparison of the biological consequences of microgravity and artificial 1 g on mice housed in space. To compare the gravitational differences generated by CBEF in space, ground-based 1 g (GC) was also applied to clarify the impacts of microgravity and the space environment. Another striking innovation of the HCU is the introduction of individually housed male mice within the space environment for reproduction studies. Thus, the HCU may hold the key for mankind to prosper through outer space in the future.

Twelve C57BL/6J male mice were launched to the ISS and housed onboard under MG or AG. After 35 days of habitation, all mice were returned to Earth and processed. Significant decreases were evident in femur bone density and the soleus/gastrocnemius muscle weights of MG mice. In contrast, AG mice maintained the same bone density and muscle weight as mice in the ground control experiment. These results replicated the housing conditions in the flight experiment. These data indicate that the changes were due to gravity in particular. Tissues of these mice were examined to comprehensively analyse the long-term effects of the space environment, especially the alteration of gene expression patterns and epigenetic changes. In addition, offspring were generated using sperm derived from these mice to identify the impact on subsequent generations.

- Analysis of the skeletal muscle system confirmed significant atrophy of anti-gravitational muscle in MG. These measurements confirmed that the experimental apparatus of the current experiment can reproduce the results of past space experiments. Gene expression analysis was performed using the soleus muscle. The results confirmed significant atrophy, and several candidate genes related to muscle atrophy were identified.
- Skeletal system analysis not only showed a decrease in bone mass in MG, but also the possibility that AG can suppress bone loss. Histological analysis revealed that bone mass reduction in MG was due to the promotion of bone resorption by osteoclasts and the reduction of bone formation. This was confirmed by enhanced expression of osteoclast-related genes in bone tissue. Moreover, bone marrow cells of the spaceflight mice were successfully cultured and clarified that osteoclast differentiation is enhanced in cells derived from the MG mice. This result is important as it reveals that

the influence of MG is memorized at the cellular level.

- In the vestibular system, plasticity changes were revealed according to gravitational changes. These
 changes were observed at least between the peripheral receptors and the primary neurons. In addition,
 the involvement of glutamatergic neuron activity in the vestibular nucleus was identified as the central
 mechanism of gravity sickness. These findings are very important in clarifying part of the molecular
 mechanism of gravity sickness in astronauts.
- Analysis of the cardiovascular system compares the expression of genetic information about the hearts of MG, AG, and GC mice by analyzing the total transcript (RNA-seq) and translation template information of mRNA (Ribo-seq). The gene of the ketone body metabolism system was revealed to fluctuate greatly. This change is conversely suppressed in the next generation, and revealed for the first time ever that gene expression affected by spaceflight is transmitted to the next generation.
- In the reproductive system, mice that spent about a month in the space environment did not show any abnormality in spermatogenesis and its function. In vitro fertilization using the sperm of these mice showed that healthy offspring can be obtained as well.
- Immune system studies revealed that the additive effect of gravity fluctuation and other environmental changes cause changes in factors important to induce self-tolerance. These include atrophy of the thymus and increased gene expression of medullary epithelial cells. In addition, the space environment has little influence on the construction of the spleen and lymph nodes. However, the expression of genes related to red blood cells is decreased in the spleen.
- In the endocrine system, MG mice showed an increase in wet weight and the oil droplet size of epididymal fat and the subcutaneous adipose tissue in the inguinal region. Suppression of fat metabolism was also confirmed by the increased expression of white fat markers in gene expression analysis.
- In the nervous system, the expression of genes related to neural plasticity was altered in a site-specific manner (ventral hippocampus, striatum, cerebellum, spinal cord, spinal cord ganglion). In addition, there were no noticeable changes in the behavior of mice obtained by in vitro fertilization of sperm obtained from mice bred in the space environment, thereby confirming that the space environment does not influence the behavior of the next generation mice.
- Analysis of the reproductive system was also conducted in cooperation with AMED. It revealed that the stress of the space experiment affects the next generation and influences gene expression in the next generation.
- In the sensory system analysis conducted in collaboration with NASA, retinopathy was mild in AG compared with MG. This result is evaluated globally as an artificial gravitational load that can prevent common eye problems among male astronauts.

As mentioned above, this project discovered new results in that "changes in gene expression induced by the present generation are memorized as epigenetic changes and are transmitted to the next generation." The results also present the first evidence that the addition of gravity in space can prevent the decrease in bone density and muscle mass induced during spaceflight.


別紙6−2

ISSきぼう利用ミッション科学成果評価 「宇宙環境における線虫の老化研究(SpaceAging)」 (代表研究者:早稲田大学本田陽子)

A:目標を充分に達成した(フルサクセス相当)

平成31 年3 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(生命医科学)

ISS・きぼう利用ミッション 「高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における 液柱界面の動的変形効果の実験的評価(Dynamics Surf)」 研究成果報告書 代表研究者;鴨谷康弘(Case Western Reserve University)

2019年1月

1. 緒言

マランゴニ対流は表面張力勾配に駆動される流れであり、液滴・気泡・液膜などに生じる マイクロ流れ、ヒートパイプ内部における冷媒の流れ、微細気泡のハンドリング、混合溶媒 の凝縮、沸騰における気泡底面の液体挙動、混合液の混合促進や分離など、我々の身の回り や工業界で幅広く観察され、利用されている流れである。上述の流れは、表面張力勾配が気 液界面に沿う温度差で与えられる系であり、thermocapillary convection とも呼ばれる。一 般に、温度差は密度差を伴うため、温度差駆動のマランゴニ対流は通常重力下では密度差対 流の影響を受ける(場合によっては、覆い隠されてしまう)。このことは、特に、マランゴ ニ対流に起因する流れの不安定性を調べる上で致命的となる恐れがある。そこで、密度差対 流の存在しない微小重力環境において、温度差駆動のマランゴニ対流の不安定性と関連す る特性を調べようということが、本研究テーマの原点である。Fig. 1-1 は、温度差駆動の液 柱マランゴニ対流の不安定性に関する過去の宇宙実験(小型ロケット実験(S.R.)、スペー スシャトル実験(S.S.))と本実験(ISS 実験)を年代順に示したものである。流体科学が 解決すべき基本的な課題として、多大の努力が傾注されていることが分かる。流れの場とし て、対称性を有し、境界条件を明確に定めることができ、実験的に調べやすく、工学的な有 用性が高い、という条件を兼ね備えた「液柱(liquid bridge)」を選択した。これは、「きぼ う」利用の一連のマランゴニ対流研究において共通的に採用している実験系である。先行し て実施した研究として「マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷移過程(Marangoni Exp/MEIS)」(代表研究者:河村洋(諏訪東京理科大学)/西野耕一(横浜国立大学))があ り、この研究での主な成果は以下である[1]。

- 1) 定常流から振動流へと遷移する条件(臨界値)と振動モードを明らかにした。
- 2) 長時間微小重力環境を必要とする大型液柱を用いて、高マランゴニ数条件で発生す ると考えられるカオス化過程を観察した。
- 3) 微小重力環境で形成された大径液柱において粒子集合構造(PAS) が発生すること を示した。

マランゴニ対流の駆動力、つまり上下ディスク間温度差が大きくなると、流れが二次元定 常流から三次元振動流へと遷移することが明らかとなっている。しかし、振動流遷移メカニ ズムは完全には理解されていない。従来、多くの研究者は流体の線形安定性に起因するもの としてこの遷移現象を捉え、遷移の臨界条件が臨界マランゴニ数だけで決定できるとされ てきた。しかしながら近年の宇宙実験のデータからは、臨界マランゴニ数だけでは振動流遷 移条件を決定できないことを強く示唆している。同様の結果が液柱以外の形状のマランゴ ニ対流でも得られている。高プラントル数流体のマランゴニ対流に関する多くの研究結果 が報告されているものの、振動流遷移メカニズムが解明されているとはいえない。

代表研究者 (PI) は、動的自由表面変形がその新たなパラメータであり、S-パラメータ と呼ばれる自由界面変形の要素を導入した。S-パラメータは数少ない既存のデータの臨界 条件をよく記述しているが、動的界面変形が実際に重要な役割を果たしていることを、地上 実験で直接的に証明することは非常に難しい。そのため、国際宇宙ステーション(ISS) におけるマランゴニ対流実験を計画し、その宇宙実験により振動流メカニズムにおける動 的表面変形の役割を明らかにすることし、仮説モデル検証型の実験を行った。本報告書は、 2013年10月から2016年11月までに実施された計3シリーズの宇宙実験(通称 Dynamic Surf)の科学成果を報告するものである。



Fig.1-1 温度差駆動の液柱マランゴニ対流に関する微小重力実験の歴史 [1]

2. 研究計画

2. 1 研究目標

本実験の特徴は、マランゴニ振動流遷移メカニズムにおいて重要なパラメータであると 考えられる液柱自由界面の動的変形 (DSD; Dynamic Surface Deformation)の役割を研 究することにある。つまり、高プラントル数流体においては、DSDの役割を考慮に入れた 非線形過程の結果として振動流に遷移するとした仮説に基づき、軌道上実験により本モデ ルによる振動流遷移メカニズムを検証する。

また、自由表面からの熱輸送が振動流遷移に強い影響を与えることが見いだされており、

液柱からの熱損失は流れを顕著に不安定化させる。熱損失が増すと臨界温度差が大きくな り、その結果としてS-パラメータが増大する。熱損失の影響を考慮することは、振動流遷 移メカニズムに対する重要な知見を与えるだけでなく、熱損失の状態が全く異なる地上実 験と宇宙実験結果との比較のために非常に重要である。S-パラメータと熱損失の影響は共 に現在進めている研究課題であるが、振動流遷移おける両者の関係を知ることは、遷移メカ ニズムを解明するための重要な知見となる。そのため、振動メカニズムにおける動的表面変 形の役割を理解することが大切である。

軌道上実験では、異なる二つのサイズのシリコーンオイル液柱(直径 10 および 30mm) を用い、微小重力環境下で以下の物理量を計測する。

(1) 振動流遷移点である臨界温度差の正確な測定

(2) DSD の振幅の正確な測定

(3) DSD、流れ場、表面温度分布の同時計測

また、自由表面からの熱輸送の影響を調べるために、液柱周囲との熱授受を変化させた ときの臨界温度差を取得した。熱授受の状態は、熱伝導率の異なる周囲ガス(アルゴンお よびネオン)の変更と液柱の平均温度を変更することにより変えることとした。

科学的サクセスクライテリアは Table 1-1 の通りである。

サクセスレベル	クライテリア					
Minimum	・仮説モデルにより導出された動的界面変形(DSD)特性の検証					
Full	・DSD と振動流遷移の相関の把握					
	・振動流遷移に対する仮説モデルの検証					
Extra	・顕微画像変位計(MIDM)を用いた g-jitter による液柱振動の振					
	幅、周波数、振動モードの定量的評価					

Table 1-1 Dynamic Surf の科学的サクセスクライテリア

2.2 体制

(1)研究チーム体制

研究代表者	鴨谷康弘(Case Western Reserve University)			
	西野耕一 (横浜国立大学)、上野一郎 (東京理科大学)、			
共同研究者	矢野大志 (横浜国立大学)、今石宣之 (九州大学)、			
	小宮敦樹 (東北大学)			
ミッションサイエ				
ンティスト	松平 ^{¹(JAAA)}			

- (2) JAXA の役割
 - ・研究チームと協同して宇宙実験を設計、推進するユーザインテグレーション
 - ・実験供試体の開発、並びに打上げ
 - ・ISS 実験運用

Dymanic Surf 実験は、液柱マランゴニ対流に関する「きぼう」での実験としては MEIS 実験(Marangoni Experiment in Space)に次いで実施完了した実験ミッションであり、 MEIS 実験で確立した実験運用体制や方法を引き継ぐ形で実験が行われた。実験運用では、 PI ないし CI が1名と、学生2名が実験運用に参加し、PI/CI が方針を決定しながら、学生 がリアルタイムでダウンリンクされてくるビデオ画像や温度データ等を監視し、その結果 をフィードバックしながら具体的な実験条件を最適化する作業を、実験時間を通して実施 した。

また、新たな試行として、訓練された実験運用管制要因が実験装置への指令のコマンド送 信を実施する方式を進化させ、ユーザーインテグレータがコマンド送信を行うユーザコマ ンディング方式を試行し、コマンド送信に掛かる時間を約半分に短縮する結果を得た。この ことは限られた実験時間の有効活用に結びつき、実験の成果創出の面で非常に有効な運用 方法であることを見出した。なお、ユーザコマンディングによる実験運用は、後続の物質物 理系の実験で本格運用された。

2.3 スケジュール

2.3.1 ISS 実験までの準備

- ・2002年1月:第1回微小重力科学国際公募制度において候補テーマとして選定
- ・2005年4月:プロジェクト移行審査実験計画書(ベースライン版)の制定
- ・2005年7月:実験供試体開発を開始
- ・2008 年 6 月:液柱直径 30mm 用実験供試体開発を完了
- ・2009 年 9 月:液柱直径 30mm 用実験供試体開発を HTV1 号機で打上
- ・2011年1月:液柱直径 10mm 用実験供試体開発を完了
- ・2012 年 7 月:液柱直径 10mm 用実験供試体開発を HTV3 号機で打上
- ・2002 年~2013 年: Dynamic Surf 調整会(計27回開催)

2.3.2 「きぼう」宇宙実験の実施

Dynamic Surf (DS と略す)は、3 つのシリーズとして実験運用を実施した。液柱は、 国際宇宙ステーションの低周波振動に非常に敏感に応答し、ISS の日中の時間帯は宇宙飛行 士のアクティビティにより、振動環境が良好に保てないため、宇宙飛行士の就寝時間帯(日 本時間 06:30~15:00)に実験運用を実施した。

- ・2013年10月から2014年2月:DS-1の実施(計30回の実験)
- ・2014年12月~2015年4月:DS-2の実施(計30回の実験)

・2015年11月~2016年11月:DS-3の実施(計30回の実験)

3. 実験準備·運用

3. 1 実験装置および実験供試体[2]

Dynamic Surf 実験では、「きぼう」内の流体ラック(RYUTAI Rack)にマウントされた 流体物理実験装置(Fluid Physics Experiment Facility, FPEF)および画像処理取得装置

(Image Processing Unit, IPU)を使用した(Fig. 3-1)。流体物理実験装置には、実験の目的に合わせた機能を有する実験用インサート(実験供試体と呼んでいる)を組み込む設計になっており、液柱径 10mm 用と 30mm 用の2 種類の実験供試体を製作した。マランゴニ実験用の供試体は、およそ長さ 560mm、幅 250 mm、高さ 360 mm の大きさを有し、質量は約 38 kg である。

宇宙実験では、シリコーンオイルの液柱を形成し、そこに発生するマランゴニ対流を観測 した。液柱径は 30 mm ないし 10 mm であり、液柱高さは、0~62.5 mm (30 mm 径)、0 ~30 mm (10 mm 径)の範囲で自在に変えることができ、マランゴニ対流現象の制御パラメ ータの1つであるアスペクト比を変えた実験を可能とする。また、液柱形成とは独立したポ ンプを持ち、液柱の形状(直円柱、鼓型、樽型)を変え、体積比の影響を観測できる。



Fig. 3-1 流体物理実験装置および実験供試体

観察系の概略図を Fig. 3-2, 3-3 に示す。直径 30 mm の液柱の流れの観察は、液柱上面から透明な加熱ディスク越しに、互いに角度・位置を変えた 3 台の CCD カメラで画像を取得する。液柱には、流動パターンの観察のために、微小粒子(トレーサ粒子)をあらかじめ 混ぜている。このことにより、得られた画像を粒子追跡法により 3 次元的な流れ場を構築し、 液柱内部の流れの構造やその時間的変化を知ることが出来る。また、液柱側面からの観察に より、液柱の形状や側面から見た流れの様子を捉える。直径 10 mm の液柱の場合は、臨界 温度差の計測および表面動的変形の計測を重視し、加熱ディスクはアルミニウム製として いる。表面温度分布の観測は、赤外線サーモグラフィ(IR カメラ)を使用している。表面 の動的変形の計測には顕微画像変位計を用い、自由表面近傍を拡大撮影し、バックライト法 により液柱自由表面位置の時間変化を捉える[2]。それぞれの、視野は 635×475 µm² (直径 30 mm) あるいは 242×321 µm² (直径 10 mm)である。



Fig. 3-2 液柱とその観察系(直径 30mm 実験用)



Fig. 3-3 液柱とその観察系(直径 10mm 実験用)

各実験シリーズの液柱径や実験試料を Table 3-1 示す。

シリーズ名	液柱径	流体粘性	トレーサ粒子径	周囲雰囲気ガス種	
	[mm]	$[mm^2/s]$	[µm]		
DS-1	30	5	180	アルゴン	
DS-2	10	5	30	ネオン*、アルゴン*	
DS-3	30	10	180	アルゴン	

Table 3-1 液柱径および実験試料

*実験 11 回まではネオンガス、12 回から 30 回まではアルゴンガス

3.2 実験運用

(1)装置・供試体セットアップ

FPEF および実験供試体は Fig. 3-1、3-2 に示すように様々な観測機能を持っており、ISS における装置/供試体の中でも有数の複雑さが特徴である。実験を開始するには、宇宙飛行 士による実験供試体を組み立て、FPEF に組み付けるセットアップ作業を行った。その複雑 さゆえに、初回の装置・供試体セットアップは、延べ作業時間として約 10 時間、3 日間に 分けての作業であった。その後のセットアップ作業は、前回の実験で使用した供試体の取り 外しや、新たな試料カセットへの交換、内部の清掃も必要となるため、約 14 時間の作業を 実施した。

(2) 実験運用

装置/供試体のセットアップが終了すると、装置/供試体の機能チェックを行い、その後速 やかに実験へと移行した。液柱は非常に良好に形成され、かつ温度差を印加してマランゴニ 対流を発生させその観測に成功した。液柱内には、気泡が混入したが、その後の数回の実験 中に気泡を上手く除去する手法を見出すことにも成功した。

実験運用では、UIのポジションが研究者の要求を取りまとめ、実験運用管制要員に要求 を伝えながら実験を進行した。装置/供試体の操作は、筑波宇宙センターからの遠隔操作コ マンドにより実施した。液柱マランゴニ実験は、ISS を利用した実験の中で最も難しい実験 の一つであろう。それは、円柱状の液体を上下端のディスクのみで支えて保持しているため、 液柱形成・収納時に微妙な調整を行う必要がある。また、リアルタイムで観察される事象に 合わせて液柱の形状を整えたり、温度プロファイルを変更したりなど、装置を制御するコマ ンドを頻繁に送信することが良いデータを取得する上で必須である。そのため、1日の実験 で平均 150 コマンドを送信した。FPEF だけでも 118 コマンドを有しており、それぞれの コマンドを一つ一つ確認しながら、UI からの指示を判断してコマンドを矢継ぎ早に送信す る運用は非常に高度なものが要求されたが、運用管制担当者らは負荷の高い運用を適切に 遂行した。

4. 実験結果および成果

4. 1 臨界温度差および Hydrothermal Wave の伝播

液柱マランゴニ対流は、ディスク間温度差(ΔT)の増加とともに流動構造が変化し、特定の条件において固有の周波数およびモード構造を持つ振動流へと遷移する。Dynamic Surf では、さまざまな液柱形状、作動流体、ディスク温度に対して振動流遷移の臨界ディスク間温度差(ΔT_{c})、振動周波数(f_{c})、周方向モード数(m)を計測した。Fig. 4-1 は液柱アスペクト比(ディスク直径に対する液柱高さ:AR = H/D)に対して臨界マランゴニ数

(Mac)と無次元振動周波数(Fc)をプロットしたグラフである。ここで、Mac、Fcはそれ ぞれ ΔTc 、fcに対する無次元数であり、以下のように定義される。

$$Ma_{\rm c} = \frac{\left|\sigma_T\right| \Delta T_{\rm c} \left(D/2\right)}{\rho \overline{\nu} \alpha} \tag{4.1}$$

$$F_{\rm c} = \frac{\left(D/2\right)^2}{\alpha \sqrt{Ma_{\rm c}}} f_{\rm c} \tag{4.2}$$

ここで、 σ_T 、 ρ 、v、 α はそれぞれ表面張力温度係数、密度、動粘性係数、温度拡散率である。 Fig. 4-1 は低温側のディスク温度が 20°C の結果のみが示されている。 $AR \leq 0.50$ では ARの増加とともに Ma_c と F_c が大きく減少し、その後、 0.50 < AR < 1.50 の範囲で両者の変化 が少なくなり、おおむね一定の値に落ち着いている。 $AR \geq 1.50$ ではプラントル数 (Pr) に よって不安定性曲線の傾向が大きく異なり、Pr = 112 では Ma_c と F_c があまり変化しない のに対して、Pr = 67 では Ma_c と F_c が急激に減少することを確認した。このような不安定 性曲線の分岐は、Prの影響に加えて、液柱自由表面における熱移動の影響も強く受けてい ることが本研究で明らかにされた。 Pr = 112 では ΔT_c が相対的に大きいため、液柱表面か ら周囲気体へ移動する熱量も増加する。一方、Pr = 67では ΔT_c が相対的に小さいため、液 柱温度と周囲温度の差が少なくなり、結果として液柱表面から周囲気体へと移動する熱量 が減少し、不安定性が大きく変化した。



Fig. 4-1 臨界マランゴニ数 Ma。と無次元振動周波数 F。(Yano et al. 2018※配置を一部変更)

Fig. 4-1 には過去のロケット実験 [3, 4] と国際宇宙ステーション実験 [5] のデータも含 まれているが、本研究で得られた結果は、これらの先行研究の結果とよく一致している。過 去の微小重力実験 [5] においても、高 AR 条件における Mac と Fc の急激な変化は観察さ れており、Yano et al. [6] はこのような不安定性曲線の分岐が起きると Hydrothermal Wave (以下、HTW)の伝播方向が逆転することを報告している。しかし、Yano et al.の報告で は HTW の伝播方向の逆転は流動構造の変化から間接的に示されたものであった。それに 対して、本宇宙実験では HTW の伝播方向の逆転を直接的に観察することに成功した。Fig, 4-2 は液柱表面の温度変動を IR カメラで可視化した結果であり、上図では HTW が低温側 から高温側(表面張力流と逆向き)に、下図では HTW が高温側から低温側(表面張力流と 同じ向き)に伝播している様子を確認することができる。また、このときの液柱内の流動場 を可視化した結果が Fig. 4-3 である。高 AR 液柱内のマランゴニ対流が振動流へと遷移す ると、渦状の構造が軸方向に伝播するが、この渦構造と HTW の伝播が互いに連動している ことも確認された。HTW の伝播方向は、高プラントル数流体の液柱マランゴニ対流研究に おける重要な課題の一つであったが、本研究で観察された HTW は、無限長液柱に対して行 われた線形安定解析[7,8]から予測された HTW と酷似した特性を示すことが確認された。



Fig. 4-2 IR カメラで観察した HTW の伝播 (Yano et al. 2017)



Fig. 4-3 3-D PTV による流動構造の可視化計測結果(Yano et al. 2017)

4.2 液柱自由表面における熱移動の影響

(1)線形安定性解析

Dynamic Surf では、Kamotani らの研究グループにより得られた一連の実験結果により示 された振動流遷移に対する自由表面を介した熱伝達の影響[9,10]を研究主要対象の一つと して設定している。微小重力実験では特に、冷却ディスク温度を有意に変化した条件下で遷 移点の探索および振動流遷移後の対流場の同定を行ってきた[11]。MEIS および Dynamic Surf では従来にない高 Pr 数流体を対象とした研究を行い、特に MEIS で得られた振動流遷移に 関して Pr > 60 となる試験流体を対象として線形安定性解析を行っている[12]。ただし、自 由界面を介した熱伝達の影響に関してここまでの高 Pr 数流体を対象とした研究は実施され ていない。そこで、Dynamic Surf および MEIS で得られた研究成果をよりよく理解するた め、高 Pr 数流体を試験流体とした長液柱を対象として線形安定性解析を実施した。従来の 研究により、Pr=16 の試験流体を対象とした解析が実施されている[13]ことから、ここでは 微小重力実験でも用いられた5 cSt シリコーンオイル (Pr~28)を模擬して線形安定性解析 を行う。支配方程式や解法については Motegi et al. の論文 [14] に詳しい。

高 Pr 数流体を対象とする線形安定性解析コードの開発にあたり、その妥当性を先行研究 [13]の結果と比較、さらに解像度依存性を確認することで検証した。Fig. 4-4 にアスペクト 比 $\Gamma = 1.8$ の直円柱を対象とし、周囲気体温度 T_{amb} を冷却ディスク温度と同一($T_{amb} = T_c$)とした場合の本解析結果を Xun et al. [13]による予測とともに示す。これにより本コー ドが Pr = 16の試験流体に対して良好に動作していることを示した。さらに、本研究で対象 とする (Pr, Γ) = (28,2.0)の液柱に対し、通常の解析で実施したグリッド数 (N_r, N_z) = (67,120)で得られた振動流遷移点およびより高解像度な条件(N_r, N_z) = (133,240)で得られ た振動流遷移点が本研究で対象とする Bi 領域において平均で約 2.5 %の差違が存在した。 このことから解像度についても充分な精度を担保していると考えている。



Fig. 4-4 本研究で開発した線形安定性解析コード検証結果: Pr = 16, Γ = 1.8 の直円柱を対象 とする。図中には Xun et al. [13]による予測とともに示す。

検証結果を前提として、無重力環境下における Pr = 28 液柱での m = 1 振動流遷移点と Bi の関係および振動流遷移後の表面温度変動分分布を Fig. 4-5 に示す。ここでは 3 種類のアス ペクト比を対象としている。 Γ = 1.0 および 1.5 の液柱においては、対象としている Bi 領域 において単一の固有関数を有する対流場が最も危険な対流場として発現する。一方、 Γ = 2.0 の長液柱では、m = 1に対し、2 つの異なる固有関数を有する対流場が発現することを明ら かにした。このような 2 つの固有関数は Pr = 16 の場合には見られておらず[13]、高 Pr 数流 体における特徴であると考えられる。ここで、特に Bi に対して右肩下がりの傾向を示す固 有関数を HTW(a)、 Pr = 28 において新たに発現した右肩上がりの傾向を示す固有関数を HTW(a)と定義する。従来,高温壁から低温壁に斜行する温度波は HTW(a)と定義されてい たが、本解析により表面温度変動分(Fig. 4-5(下)) および r - z 平面内で見られる基本 対流場では有意な差を 2 つの固有関数の間に認めることが出来ないため、(a')と定義した。本結果は、従来の研究で行われている表面温度分布の計測(e.g.,[15]) からは 2 つの異なる 固有関数を有する対流場の区別をつけることはきわめて困難であり、内部対流場構造の可 視化が不可避であることを示唆している。



Fig. 4-5 無重力環境下における Pr = 28 液柱での m = 1 振動流遷移点と Bi の関係(上) および 振動流遷移後の表面温度変動分分布(下). アスペクト比 1.0, 1.5, 2.0 の液柱について図示して いる.

長液柱内対流場について重力の影響を検証するため、Fig. 4-5 に示した条件の液柱に対 し、通常重力を付加した系での中立直線を求めたものをFig. 4-6 に示す。ここで重力加速 度を考慮するにあたり、地上研究で実施している半径 0.75 mmの液柱を想定して動的ボン ド数 Bd を導出している。なお、図中には Fig. 4-5 (上) に示した無重力環境下での中立曲 線も示している。Bi がある程度大きい領域、すなわち、Bi ≥ 0.7ではこの程度の小規模液 柱ではほぼ同一の中立曲線分布を呈する。熱伝達の影響が顕著に見られるのは低 Bi 領域で ある。Bi が 0 に近づくにつれ、m=1の対流場はわずかながらも安定に向かう、すなわ ち、臨界レイノルズ数が大きくなる。さらに Bi を小さくするとあらたな固有関数を有する 対流場が発現する。この固有関数は、振動流遷移後に液柱表面に発現する温度波が液柱軸 方向にほぼ平行な形状を有したまま周方向に伝播する。本研究ではこの固有関数を有する 対流場を HTW(b)と定義する。PAS に関する地上実験において、微小重力実験で発現した PAS と異なる対流場での PAS が確認されたが、表面温度変動の挙動から、その対流場と類 似したものであると考えられる。一方で、本解析によってこの対流場は Bi~0 の状態で発 現したものであることから、地上実験での条件との整合性、振動流遷移後の対流場におけ る熱損失の影響については今後さらなる研究が必要となる。



Fig. 4-6 Pr = 28, Γ = 2.0 液柱での m = 1 振動流遷移点と Bi の関係に対する重力の影響.

(2) 実験

過去の地上実験 [9,16] や数値解析 [17]、理論解析 [18] において、液柱自由表面にお ける熱移動がマランゴニ対流に大きな影響を及ぼすことが報告されている。Dynamic Surf では、この影響を解明することを目的の一つとしている。MEIS 等の実験では、冷却ディス ク温度は周囲気体温度に近い 20 ℃一定として、加熱ディスク温度を変えることで臨界温 度差を調べていた。Dynamic Surf では、冷却ディスク温度もパラメータとし、ディスク温 度や周囲気体の種類を変化させた実験を行った。

Fig. 4-7 は液柱径 30mm での、臨界温度差 ΔT_c および臨界点における加熱ディスク温度 (T_{Her})の冷却ディスク温度(T_c)に対する依存性である。臨界温度差は、冷却ディスク温 度が高くなると共に下降し、Tc が 23℃より高い条件では一定の臨界温度差を示している。 実験においては、周囲気体の温度は 23℃付近であったことから、液柱表面での熱移動との 関係が大きいものと考え、平均ビオ数($Bi = Q/2\pi L\kappa \Delta T$)で整理したものを Fig.4-8 に示す。 Q は自由表面からの全熱輸送量、 κ は液体の熱伝導率である。図から明らかなように現象 は 2 つのブランチに分けることが出来る。Branch 1 は、臨界点がビオ数に非常に敏感に変 わる領域である。その一方、 Branch 2 での臨界点は一定となっている。地上実験では、実 験の制約からビオ数を大きくする条件設定が困難であるため、Branch 2 は宇宙実験を行っ て初めて得られた結果である。



$$-k_{\rm L} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi}\right)_{\rm L} = -k_{\rm G} \left(\frac{\partial T}{\partial \xi}\right)_{\rm G} + \varepsilon_{\rm L} \sigma_{\rm SB} \left(T_{\rm LB}^4 - T_{\rm W}^4\right)$$
(4.3)

と表すことができる。ここで、上式の左辺は液体側の熱流束、右辺は気体側の熱流束であり、 第一項は対流熱伝達による成分、第二項はふく射伝熱による成分である。上式からもわかる ように周囲気体の熱伝導率が変化したことによる効果は、上式の右辺第二項にのみ作用す る。微小重力環境では自然対流が発生しないため、対流熱伝達の影響が相対的に小さくなる。 この傾向は、表面流速が遅く、かつ、表面積の大きい高 *AR* 液柱で顕著となるため、Fig. 4-9の *AR* = 1.00 では周囲気体がアルゴンとネオンの場合でも結果に顕著な違いが現れなかっ たと考えられる。

通常の重力環境では、液柱周囲の気体内に強い自然対流が発生し、それによる対流熱伝達 が液柱自由表面における熱移動を支配するため、過去の研究ではふく射伝熱の影響が無視 されることが多かった。しかし、微小重力環境ではふく射伝熱がマランゴニ対流に強く影響 することが、本研究によって明らかにされた。Fig. 4-10 は、液柱内の流動場(ただし定常 流)を示したものであり、左から、(a) ふく射伝熱を無視した数値解析結果、(b) ふく射伝 熱を考慮した数値解析結果、(c) トレーサ粒子を用いた可視化計測結果である。また、Fig. 4-11 には(a) 液柱内部の流速、(b) 液柱表面付近の流速、(c) 液柱表面温度、(d) 液柱表 面温度勾配を比較した結果を示す。これらの結果において、ふく射伝熱を無視した数値解析 結果は、流速や流動構造に実験結果と明らかな違いが認められるが、ふく射伝熱を考慮する ことによって数値解析結果と実験結果がよく一致する。供試体の壁面温度が液柱温度より も低い場合、ふく射伝熱によって液柱は冷却される。この効果は高温側のディスク付近にお いて特に顕著となり、この付近の流速が大きくなり、全体的な流動パターンにも影響を及ぼ す。本研究では、ディスク直径が 30 mm の場合には、液柱自由表面の熱移動量に占めるふ く射伝熱の割合が約 84%にもなることがわかった。マランゴニ対流の不安定性に対して、 基本の流動構造を把握することは非常に重要であり、本宇宙実験で得られた結果は、今後の マランゴニ対流研究に対しても重要な意味を持っている。



Fig. 4-9 臨界温度差 ΔT_c と振動周波数の f_c の低温ディスク温度依存性(Yano et al. 2018)



Fig. 4-10 ふく射伝熱が流動構造に与える影響(Shitomi et al. 2018)



4.3 動的表面変形の計測

Dynamic Surf の重要な目的の一つは、液柱自由表面の動的変形(以下、DSD)がマラン ゴニ対流に及ぼす影響を明らかにすることである。過去に Kanashima et al. [19]、Ferrera et al. [20]、Montanero et al. [21] などによって、地上実験では DSD の計測が行なわれ てきたが、微小重力環境における DSD の計測は本研究が初の試みである。Fig. 4-12 は DSD の計測方法を示した図である。LED 光源で液柱を背面から照らし、自由表面付近を顕微鏡 対物レンズ付きの CCD カメラで撮影すると画像上には液柱が影として現れる。撮影された 画像から、水平方向の輝度分布を算出し、これに対して三次関数の近似曲線を求める。この 近似曲線の変曲点が液柱自由表面の位置として求まる [22]。



Fig. 4-12 (上)液柱自由表面の拡大画像と(下)水平方向の輝度分布(Yano et al. 2018)

Fig. 4-13 は(上) AR = 0.50 と(下) AR = 1.00 に対する(a) 液柱自由表面の動的変動 (DSD)、(b) 低温側ディスク付近の温度変動、(c) g-ジッターの計測結果である。また、 (d-f) にはそれぞれの波形に対する周波数スペクトルが示されている。ここで、実験条件 はD=10 mm、Pr=67であり、 ΔT は振動流遷移の臨界条件よりもわずかに大きい。 AR = 0.50の結果において、0.25 Hz で DSD と温度変動の周波数スペクトルがピークを示 しており、この振動成分がマランゴニ対流の不安定性に起因するものであることがわかる。 AR = 1.00の結果においても同様の傾向が見られ、DSD と温度変動の両方の周波数スペク トルが 0.18 Hz でピークを示しており、これはマランゴニ対流の不安定性に起因するもの である。また、 *AR* = 0.50 では 6.73 Hz、 *AR* = 1.00 では 3.31 Hz と 6.84 Hz でも DSD の 周波数スペクトルのピークを確認することができる。これは、g-ジッターの影響を受けて液 柱が共振しているためであることが、本研究において確認された。Sanz and Diez [23]の 報告によれば、AR = 0.50 で振動モードが (m_{LB.} N_{LB}) = (1, 1) の場合の共振周波数は 7.44 Hz、 AR=1.00で振動モードが(m_{LB}, N_{LB})=(1,1)と(0,2)の場合の共振周波数が 3.49 Hz と 9.24 Hz と予測することができ、これらの共振周波数は DSD の周波数スペクトルで確認さ れたピークの周波数とよく一致する。ここで、*m*LBは周方向の液柱振動モード数、*N*LBは軸 方向の液柱振動モード数である。マランゴニ対流の振動周波数と液柱の共振周波数には有 意な差があるため、適切なフィルター処理を施すことで、これらの振動成分を分離すること が可能である。Fig. 4-14 は、DSD 振幅の軸方向分布を示した結果である。マランゴニ対流 の不安定性に起因した DSD について、AR=0.50 と 1.00 では大きく異なる分布をしてい る。AR=0.50では液柱中央付近で振幅の節が確認できるのに対して、AR=1.00ではこの

ような節は見られない。これは、 $AR = 0.50 \ge 1.00$ でマランゴニ対流の軸方向の構造が異なる可能性を示唆している。また、共振に起因した DSD の軸方向分布の計測結果から、g-ジッターの影響により液柱が $(m_{\text{LB}}, N_{\text{LB}}) = (1, 1)$ または(0, 2)のモードで振動している様子を確認することができる。



Fig. 4-13 液柱自由表面の動的変動、低温側ディスクの温度変動、g-ジッターの時間変化、および、それぞれの周波数解析結果:(上) AR = 0.50、(下) AR = 1.00 (Yano et al. 2018)



Fig. 4-14 液柱自由表面の動的変形の軸方向分布: (a) *AR* = 0.50、(b) *AR* = 1.00、(c) 液 柱の振動モード (Yano et al. 2018)

4. 4 動的表面変形のスケーリング

DSD 測定の目的は DSD 振幅(以下、 δ_s)のスケーリング則を調べることによって、振動流遷移が Ma 数支配であるか、Sパラメータ支配であるかを明らかにすることにある。Sパラメータは δ_s とホットコーナサイズ(以下、 Δ)の比として次式で定義される(Masud et al.[24])。

$$S \equiv \left(\frac{\delta_{\rm s}}{\Delta}\right)^2 \tag{4.4}$$

Ma 数支配の場合、 \delta。は次のスケーリング則に従うことが予想されている。

$$\delta_{\rm s} \propto \left(\frac{\rho \bar{\nu} \alpha}{\sigma}\right) M a_{\rm Lc}^{-6/7} \left[X^{6/7} \left(X - 1 \right)^{1/2} \right] \tag{4.5}$$

ここで、 $X = \Delta T / \Delta T_c$ で定義され、臨界マランゴニ数 Ma_c は次式で定義される。

$$Ma_{\rm Lc} = \frac{\sigma_{\rm T} \Delta T_{\rm c} L}{\rho \bar{\nu} \alpha} \tag{4.6}$$

ここで、 $Ma_{Lc} = Ma_c/2AR$ である。Ma数支配であれば $Ma_{Lc} = -$ 定となるため、式(4.5)は、 Xが等しければ (例えば、X=1.1で比較すれば)、 δ_s は液柱長さLには依存せず、 $\rho \bar{\nu} \alpha / \sigma$ のみに依存することを意味する。

一方、*S*パラメータ支配の場合、*δ*。は次のスケーリング則に従うことが予想されている。

$$\delta_{\rm s} \propto \left(\frac{\rho \overline{\nu} \alpha L}{\sigma P r}\right)^{1/2} M a_{\rm Lc}^{3/28} \left[X^{3/28} \left(X-1\right)^{1/2}\right] \tag{4.7}$$

上式は、Xが等しければ (例えば、X=1.1 で比較すれば)、 δ_s は Ma_{Le} には殆ど依存せず (指数が 3/28 と小さいため)、 $\rho \overline{\nu} \alpha L/(\sigma Pr)$ に依存することを意味する。特に、Ma数支配の場合と異なり、 $L^{1/2}$ に依存する点が重要である。

上述した δ_s のスケーリング則の予想を検証するため、D=10mm と 30mm (但し、AR=0.5) における δ_s を測定し、 δ_s の D依存性を調べた。ここで、宇宙実験における Δ は表面流速の 極大位置を数値解析より求め、その位置における δ_s を評価した。また、X=1.1 での δ_s を比 較するため、 $0 \le X \le 2.0$ での測定値に $(X-1)^{1/2}$ の関数をあてはめて X=1.1 での値を求めた。小 径液柱のデータとして、D=3mm、4mm、5mm に対する地上実験の結果を含めた。地上実 験における Δ は、 δ_s が加熱ディスク側で極大値を取る位置として定め、その位置における δ_s を求めた。Table 4-1 は比較に用いた実験データをまとめたものである。Fig. 4-15 と Fig. 4-16 は、それぞれ次の無次元量を Dに対してプロットしたものである。

Fig. 4-15 :
$$\delta_{\rm s} \left(\frac{\rho \overline{v} \alpha}{\sigma} \right)^{-1}$$

Fig. 4-16 :
$$\delta_{\rm s} \left(\frac{\rho \overline{\nu} \alpha L}{\sigma P r} \right)^{-1/2}$$

これらの結果より、無次元 DSD 振幅の Dに対する依存性は、Ma 数支配を仮定した Fig. 4-15 と Sパラメータ支配を仮定した Fig. 4-16 のどちらにも見られるが、後者の方が依存 性が強いことが分かった。このことは、振動流遷移が Ma 数あるいは Sパラメータの単独 では規定できないことを意味する。この結果は AR =0.5 の液柱(即ち、地上実験が可能な 比較的短い液柱)に対するものであり、宇宙実験の特徴である長液柱(高 AR 液柱)につい ては、4.2節で述べたような軸方向振動モードの逆転が生じるなど、AR に対する顕著な 依存性が明らかにされている。そのような AR 依存性は、4.2節に述べたような液柱自由 表面からの熱移動とも関連しており、これまで主として着目されてきた Ma 数や Sパラメ ータ以外の熱移動を代表する無次元パラメータの役割が明らかにされつつある。

	D [mm]	<i>L</i> [mm]	AR [-]	ΔT _c [°C]	gas	Pr [-]	ρ [kg/m³]	v _m [m²/s]	α [m²/s]	σ [N/m]	$\delta_{s} [\mu m]$ at X = 1.1
μg(DS1-6)	30	15	0. 5	6. 5	Ar	67	915	5. 15E-06	7.46E-08	1.98E-02	0. 0550
μg(DS2-30)	10	5	0.5	19. 31	Ar	67	915	4. 59E-06	7.46E-08	1. 93E-02	0. 0464
μg(DS2-2)	10	5	0.5	17.35	Ne	67	915	4.68E-06	7.46E-08	1.94E-02	0.0781
μg(DS3-4)	30	15	0. 5	13. 79	Ar	112	935	9. 58E-06	8. 94E-08	1.99E-02	0. 0648
1g(D=5mm)	5	2.5	0. 50	29. 8	Ai r	67	915	4. 28E-06	7.46E-08	1. 90E-02	0. 0732
1g(D=4mm)	4	2	0. 50	36. 7	Ai r	67	915	4. 10E-06	7.46E-08	1.87E-02	0. 0774
1g(D=4mm)	4	2	0. 50	39. 8	Ai r	67	915	4. 03E-06	7.46E-08	1.86E-02	0. 159
1g(D=4mm)	4	2	0. 50	15. 25	Ai r	28	873	1.91E-06	7.00E-08	1.81E-02	0. 054

Table 4-1 δ。のスケーリング則の検討に用いた宇宙実験と地上実験の結果



Fig. 4-15 Ma 数支配を検証するための無次元 DSD 振幅のプロット



Fig. 4-16 Sパラメータ支配を検証するための無次元 DSD 振幅のプロット

4.5 目標を超えて得られた成果

(1) Particle accumulation structure (PAS)の実現

ハーフゾーン液柱を対象とした温度差マランゴニ対流に関する研究において,高Pr数流体における振動流遷移点の探求とは別に,対流の可視化目的で液体内に付与した微小粒子の特異な挙動,いわゆる動的粒子集合現象も研究対象の一つとして挙げられている。これは,Schwabe et al. [25]によって発見され,実験的[(Ueno et al. [26]; Tanaka et al. [27]; Schwabe et al. [28])・計算的(Melnikov et al. [29, 30]; Muldoon & Kuhlmann [31, 32]; Romanò & Kuhlmann [33])に研究が行われてきた。地上実験と同等のPrおよびディスク径を用いた MAXUS 実験でも PAS が再現されている [27]。このような粒子集合現象はいわゆる回転振動流で実現することが知られているが,Dynamic Surf にさきがけて KIBO で最初に実施された実験(Marangoni Experiments in Space, MEIS)では、地上で実施されてこなかった高Pr 数流体かつ大規模液柱を用いた場合にはいわゆる脈動振動流が支配的になることが明らか(Sato et al.

[34]; Matsugase et al. [35]) になっており, PAS の実現は難しいとされてきた。一方, 液柱体 積比を1よりも小さくすると高 Pr 数流体大規模液柱でも粒子が過渡的に集合する現象が確 認されていた。

Dynamic Surf ではこれらの背景を踏まえ、いまだ KIBO にて実現していなかった PAS の 発現条件の探索を行った。また、微小重力実験の利点の一つである長液柱での粒子集合条件 の探索を併せて行った。その結果、周方向モード数 m = 1 の PAS を初めて実現することに 成功した。以下、その成果の一部と、検証のため実施した地上実験で得られた結果を紹介す る。

Dynamic Surf で実現した PAS の一例を Fig. 4-17 および Fig. 4-18 に示す。この結果は 2015 年 12 月 10 日 (GMT) に実施した DS3-9 で取得している。実験条件はアスペクト比 Γ (= H/R) = 1.0, 体積比 V/V_0 = 0.95, T_c = 40°C, ΔT = 8.2K, Ma = 1.3 × 10⁴(ϵ ~ 0.18) である。

Fig. 4-17 ではオリジナル画像(1)から O リングなどの背景画像を削除し(2),当該条件での 回転振動流基本周波数に基づいて回転座標系に変換したもの(3)を示している。ただし,本 実験装置で用いている上方観察カメラは粒子追跡速度計測を実施するためにカメラ光軸が 液柱中心軸とずれているため,厳密な回転座標系での画像となっていないことに注意が必 要である。そのため,本報告ではあえて擬回転座標系と記述する。擬回転座標系に変換した のち,粒子が液柱中心近傍で周方向に1回転したのち自由表面近傍に到達,その後再び液柱 中心部に戻ってくる m=1の構造を明確に捉えることが出来た。また,図中(4)には側方から 観察した PAS の様子を示している。ここでも背景画像を削除した状態で示している。図中 央部に粒子数密度が高い領域が観察されており、液柱中心部で低温側から高温側に向けて 構造が姿勢を変えている。Fig. 4-18 では Fig. 4-17 に示した同一の実験データに関し,振動 流の基本周期分の粒子および表面温度変動分の時系列データを示している。このデータに より,m=1の PAS 発現時での構造と hydrothermal wave 不安定によって生起した振動流場 での表面温度変動との時空間の対応付けを可能とした。



Fig. 4-17 DS3-9(2015年12月10日(GMT)に取得した PAS:(1) 上方カメラの1つから撮影したオリジナル画像,(2) 同背景処理画像,(3) 回転振動流の基本周波数に基づく擬回転座標系画像(約10周期分を積分・平均化),(4)背景処理済側方観察画像,振動流および PAS の回転方向は反時計回り。



Fig. 4-18 DS3-9(2015年12月10日(GMT)に取得した PAS の時系列変化:(上)側方カメ ラ画像,(中)上方カメラの1つにより取得した画像,(下)表面温度変動分。側方および上方か らの取得画像については,図1で示した背景処理後,白黒反転して粒子の分布を見やすくしてい る。振動流および PAS の回転方向は反時計回り。

Fig. 4-19 では、PAS 形成にいたる直前の液柱内粒子挙動の連続写真を示す。 $V/V_0 = 0.94$, $Ma = 1.28 \times 10^4$ の状態で実現している。Fig. 4-17 で示した充分発達した PAS と同じような 軌道上に不均一に粒子が集合している。Schwabe et al. [20]が 'clouds'と称している高密度領 域に類似している。この状態はMaを所定の緩和時間を充分とった上で実現しており、不均 一な粒子密度が比較的長時間形成されている。PAS の形成メカニズムについては依然明ら かになっていない点が多く、このような過渡的な粒子集合過程を詳細に解析することによ りメカニズムに関する有意な知見を蓄積することが可能になると考えている。



Fig. 4-19 PAS 形成(図1)前の粒子不均一分布状態の時系列画像(DS3-9(2015年12月10日(GMT)に取得): (上) 上方カメラによる取得画像, (下) 側方カメラによる取得画像。 いずれも図1と同様の背景処理過程を行っている。各フレーム間隔:8.6s。振動流の回転方向は 反時計回り。

Dynamic Surf により,高 Pr 数流体・長液柱内での PAS の存在を明らかにすることが出来 たことから,重力環境下における m = 1 の PAS 探索を併せて実施した。地上で同様の長液 柱実験を実施する場合,静水圧の影響のため微小重力環境下にくらベ小さい液柱しか形成 することが出来ない。今回は,周方向波数 m=1を呈する振動流を実現するため,アスペク ト比 Γ = 2.0の液柱を形成することとした。これは,地上および微小重力実験において液柱 内に発現する振動流の周方向波数とアスペクト比の関係が異なる(Preisser et al. [36], Kawamura et al. [37]; Nishino et al. [12]) ことに依る。

Fig. 4-20 に地上実験で用いた実験装置を示す。前述の通り,静水圧の影響を除しつつ長液 柱を実現するため,半径 *R* = 0.75*mm*の液柱を準備した。上部ロッドに透明なサファイアを 用い,上方からの観察を可能にしている。下部ロッドはアルミニウム製で軸中心に細孔を貫 通しシリンジポンプを用いて実験中の液体供給を可能にしている。液柱上方および側方に 高速度カメラ(図中:high-speed camera)を設置し,液柱内に付与したトレーサ粒子の可視 化および液柱形状の観察を同時に行う。液柱周囲に同心円状のアクリル製円筒を外部シー ルドとして設置し,液柱周りの周囲気体の熱流体挙動を周方向に対して軸対称な状態を実現している。なお,外部シールドの一部にゲルマニウム製窓で置換しており,放射温度計(同:IR camera)による表面近傍温度の計測を行った。なお,試験流体として2cStシリコーンオイルを用いた。これは Dynamic Surf で用いた試験流体よりも低粘性のものとなるが,振動流遷移条件を比較的小さい温度差で実現するため(Ueno et al. [26])である。



Fig. 4-20 長液柱を対象とした地上実験用装置の概略図

地上で得られた PAS (m = 1)の時系列データを Fig. 4-21 に示す。実験条件は、アスペク ト比 $\Gamma(= H/R) = 2.0$,体積比 $V/V_0 = 0.83$, $T_c = 20^\circ C$, $\Delta T = 20K$, $Ma = 1.7 \times 10^4$ である。 当該対流場の振動流基本周波数に基づき 1 周期分の変化を図示している。側方および上方 から取得した画像をそれぞれ(上)および(中)に、また表面温度変動分を(下)に示す。 なお、上方から取得した画像は、Fig. 4-17 と同様に背景処理をした後、白黒反転を行ってい る。また、表面温度変動分は約 10 周期分の平均データから抽出している。地上で得られた PAS (m = 1)は、微小重力で実験で得られたものと基本的には同じ構造を呈しているが、液 柱中央部にて上昇する際の半径が大きい、すなわち、粒子が入り込めない領域が大きい状態 が実現している。表面温度変動の挙動に注目すると、液柱の軸とほぼ平行な形状を呈した高 温領域および低温領域が一定の角速度で移動している。

微小重力および地上実験との振動流の時空間挙動を比較するため、回転座標系で描画した PAS と、表面温度変動分の周方向分布をともに Fig. 4-22 に示す。表面位相分布は、一定の角周波数で一定の方向に温度波が移動することから周方向位置情報に変換している (Sato et al., [34])。この比較により、微小重力実験で実現した振動流と地上実験で実現した振動流において、同じ m = 1 の回転振動流ながら空間的構造が異なっていることが示唆される。これまで、波数の大きい PAS についてはこのような発見はなされておらず、長液柱での振動流の特徴であると考えられる。最近、PAS と液柱内対流場のトポロジーとの関連性につ

いて議論があがっている(Kuhlmann & Muldoon [38]; Muldoon & Kuhlmann [39])。Kolmogorov-Arnold-Moser (KAM) 環状構造と呼ばれるトポロジーが、粒子が集合して形成される PAS と きわめてよい相関を有していることが地上実験で得られた PAS (*m* = 3)との比較を通じて 明らかになっている(Kuhlmann et al. [40])。周方向波数の小さい振動流対流場に関しては、 しかしながら、まだそのトポロジカル対流場に関する議論がなされておらず、今回微小重力 実験および地上実験で得られた結果が、モデル解析の指標となることが期待される。



Fig. 4-21 地上実験による PAS の時系列変化:(上)側方カメラ画像、(中)上方カメラ画像,
(下)表面温度変動分。側方および上方からの取得画像については、Fig. 4-14 で示した背景処
理後、白黒反転して粒子の分布を見やすくしている。表面温度変動分は約 10 周期分の平均デー
タから抽出している。振動流および PAS の回転方向は反時計回り。



Fig. 4-22 微小重力(上)および地上(下)実験で得られた PAS の回転座標系変換画像(左) と表面温度変動分の周方向分布(右)。微小重力実験および地上実験のパラメータはそれぞれ Fig. 4-17、Fig. 4-18 および Fig. 4-21 で示したものと同じである。振動流および PAS の回転方向は いずれも反時計回り。

4. 6 科学的サクセスクライテリアの達成状況

サクセス レベル	クライテリア	達成度	判定の根拠
ミニマム	・仮説モデルにより導出された動的	\bigcirc	4.4 節
	界面変形(DSD) 特性の検証	0	
フル	・DSD と振動流遷移の相関の把握		4.1、4.2、4.4節
	・振動流遷移に対する仮説モデルの	\bigcirc	
	検証		
エクストラ	・顕微画像変位計(MIDM)を用いた		4.3 節
	g-jitter による液柱振動の振幅、	0	
	周波数、振動モードの定量的評価		

Table 4-2 Dynamic Surf の科学的サクセスクライテリアの達成状況

5. 結言

以上述べてきた研究結果について成果をまとめる。

(1) 宇宙実験でしか取得できない広範囲のアスペクト比における振動流遷移点を取得す ることができた。特に、長液柱における臨界点を取得する際に観測された Hydrothermal Wave の伝播方向の逆転は、直接的な観察に初めて成功した。これに より、線形安定性解析で予測されていた Hydorthermal Wave の伝播方向に関する 長年の疑問に対して、本研究により実験的な検証を果たすことができた。

- (2)線形安定性解析および実験において、液柱自由表面における熱移動の影響を調べた。 どちらもビオ数が小さい領域で振動流遷移の臨界点に顕著な影響が見られた。地上 では実験データの得にくいビオ数の大きな領域では、臨界マランゴニ数がほぼ一定 になることが明らかになった。宇宙実験での大きな液柱ではふく射伝熱により表面 からの熱輸送の割合が大きく、マランゴニ対流の不安定性に対して、基本の流動構造 を把握することは非常に重要であり、本宇宙実験で得られた結果は、今後のマランゴ ニ対流研究に対しても重要な意味を持つものと考えている。
- (3) DSD 振幅のサイズ依存性は、*Ma* 数支配を仮定した仮説と *S*パラメータ支配を仮定 した仮説のどちらにも見られるが、後者の方が強い依存性を示すことが分かった。こ のことから、振動流遷移が *Ma* 数あるいは *S*パラメータの単独では規定できないこ とが明確になった。振動流遷移メカニズムを議論する際に、これまで主として着目さ れてきた *Ma* 数や *S*パラメータ以外の熱移動を代表する無次元パラメータの役割が 明らかにされつつある。
- (4) DSD 計測においては、国際宇宙ステーションの振動による g-jitter が誘起する液柱 振動も同時に計測された。DSD を解析する中で副次的に液柱の振動モードを特定す ることができた。
- (5) 目標を超えて得られた成果として、Dynamic Surf 実験により初めて高 Pr 数流体・長 液柱内での PAS の存在を明らかにすることが出来た。ことから、地上での追試を行 い、微小重力実験で実現した振動流と地上実験で実現した振動流において、同じ回転 振動流ながら空間的構造が異なることが示唆された。これまで,波数の大きい PAS に ついてはこのような発見はなされておらず,長液柱での振動流の特徴であると考え られる。最近, PAS と液柱内対流場のトポロジーとの関連性について議論が盛んにな っている。本研究による微小重力実験および地上実験で得られた結果が、モデル解析 の指標となることが期待される。

参考文献

- [1] 西野耕一, ISS・きぼう利用ミッション「マランゴニ対流におけるカオス・乱流とその遷 移過程(Marangoni Exp)」研究成果報告書, 宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-17-007 (2017)
- [2] Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kamotani, Y. and Imaishi, N., Overview of "Dynamic Surf" Project in Kibo–Dynamic Behavior of Large-Scale Thermocapillary Liquid Bridges in Microgravity, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, 35, 350102 (2018)
- [3] Schwabe, D., "Hydrothermal waves in a liquid bridge with aspect ratio near the Rayleigh limit under microgravity," *Phys. Fluids* **17**(11), 112104 (2005).

- [4] Schwabe, D., "Hydrodynamic instabilities under microgravity in a differentially heated long liquid bridge with aspect ratio near the Rayleigh-limit: Experimental results," Adv. Space Res. 36(1), 36-42 (2005).
- [5] Nishino, K., Yano, T., Kawamura, H., Matsumoto, S., Ueno, I. and Ermakov, M.K., "Instability of thermocapillary convection in long liquid bridges of high Prandtl number fluids in microgravity," *J. Cryst. Growth*, **420**, 57-63 (2015).
- [6] Yano, T., Nishino, K., Kawamura, H., Ueno, I. and Matsumoto, S., "Instability and associated roll structure of Marangoni convection in high Prandtl number liquid bridge with large aspect ratio," *Phys. Fluids* **27**(2) 024108 (2015).
- [7] Xu, J-J. and Davis, S.H., "Convective thermocapillary instabilities in liquid bridges," *Phys. Fluids* **27**(5), 1102-1107 (1984).
- [8] Ryzhkov, I.I., "Thermocapillary instabilities in liquid bridges revisited," *Phys. Fluids* **23**(8), 082103 (2011).
- [9] Kamotani, Y., Wang, L., Hatta, S., Wang, A. and Yoda, S., "Free surface heat loss effect on oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges of high Prandtl number fluids", *Int. J. Heat Mass Trans.* 46, 3211-3220, 2003.
- [10] Wang, A., Kamotani, Y. and Yoda, S., "Oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges of high Prandtl number fluid with free surface heat gain", *Int. J. Heat Mass Trans.*, **50**, 4195-4205 (2007).
- [11] Yano, T., Nishino, K., Ueno, I., Matsumoto, S. and S, Yasuhiro, "Sensitivity of hydrothermal wave instability of Marangoni convection to the interfacial heat transfer in long liquid bridges of high Prandtl number fluids", *Phys. Fluids* 29, 044105 (2017).
- [12] Nishino, K., Yano, T., Kawamura, H., Matsumoto, S., Ueno, I. and Ermakov, M., "Instability of thermocapillary convection in long liquid bridges of high Prandtl number fluids in microgravity", *J. Crystal Growth* **420**, 57-63 (2015).
- [13] Xun, B., Hu, W.-R. and Imaishi, N., Effect of interfacial heat exchange on thermocapillary flow in a cylindrical liquid bridge in microgravity, *Int. J. Heat Mass Trans.* **54**, 1698-1705 (2011).
- [14] Motegi, K., Fujimura, K. and Ueno, I., "Floquet analysis of spatially periodic thermocapillary convection in a low-Prandtl-number liquid bridge", *Phys. Fluids* **29**, 074104 (2017).
- [15] Toyama, A., Gotoda, M., Kaneko, T. and Ueno, I., "Existence conditions and formation process of second type of spiral loop particle accumulation structure (SL-2 PAS) in half-zone liquid bridge", *Microgravity Sci. Technol.* 29, 263-274 (2017).
- [16] Shevtsova, V.M., Mialdun, A. and Mojahed, M., "A study of heat transfer in liquid bridges near onset of instability," J. Non-Equilib. Thermodyn. 30(3), 261-281 (2005).
- [17] Melnikov, D.E. and Shevtsova, V.M., "The effect of ambient temperature on the stability of thermocapillary flow in liquid column," *Int. J. Heat Mass Transf.* **74**, 185-195 (2014).
- [18] Xun, B., Li, K., Hu W.-R. and Imaishi, N., "Effect of interfacial heat exchange on thermocapillary flow in a cylindrical liquid bridge in microgravity," *Int. J. Heat Mass Transf.* 54(9-10) 1698-1705 (2011).
- [19] Kanashima, Y., Nishino, K. and Yoda, S., "Effect of g-jitter on the thermocapillary convection experiment in ISS," *Microgravity Sci. Technol.* 16(1-4), 285-289 (2005).
- [20] Ferrera, C., Montanero, J.M., Mialdun, A., Shevtsova, V.M. and Cabezas, M.G., "A new experimental technique for measuring the dynamic free surface deformation in liquid bridges due to thermal convection," *Meas. Sci. Technol.* 19(1), 015410 (2008).
- [21] Montanero, J.M., Ferrera, C. and Shevtsova, V.M., "Experimental study of the free surface deformation due to thermal convection in liquid bridges," *Exp. Fluids* 45(6), 1087-1101 (2008).
- [22] Nishino, K., Kao, H. and Torii, K., "Stereo imaging for simultaneous measurement of size and velocity of particles in dispersed two-phase flow," *Meas. Sci. Technol.* 11(6), 633-645 (2000).

- [23] Sanz, A. and Diez, J.L., "Non-axisymmetric oscillations of liquid bridges," J. Fluid Mech. 205, 503-521 (1989).
- [24] Masud, J., Kamotani Y. and Ostrach, S., "Oscillatory thermocapillary flow in cylindrical columns of high Prandtl number fluids," *J. Thermophysics and Heat Transfer* **11**, 105-111 (1997).
- [25] Schwabe, D. Hintz, P. and Frank, S., "New features of thermocapillary convection in floating zones revealed by tracer particle accumulation structure (PAS)", *Microgravity Sci. Technol.* 9, 163-168 (1996).
- [26] Ueno, I., Tanaka, S. and Kawamura, H., "Oscillatory and chaotic thermocapillary convection in a half-zone liquid bridge", *Phys. Fluids* **15**, 408–416 (2003).
- [27] Tanaka, S., Kawamura, H., Ueno, I. and Schwabe, D. "Flow structure and dynamic particle accumulation in thermocapillary convection in a liquid bridge", *Phys. Fluids* **18**, 067103 (2006).
- [28] Schwabe, D., Mizev, A. I., Udhayasankar, M. and Tanaka, S., Formation of dynamic particle accumulation structures in oscillatory thermocapillary flow in liquid bridges. *Phys. Fluids* 19, 072102 (2007).
- [29] Melnikov, D. E., Pushkin, D. O. and Shevtsova, V. M., Accumulation of partices in timedependent thermocapillary flow in a liquid bridge: modeling and experiments, *Euro. Phys. J. Special Topics* 192, 29-32 (2011).
- [30] Melnikov, D. E., Pushkin, D. O. and Shevtsova, V. M., "Synchronization of finite-size particles by a traveling wave in a cylindrical flow", *Phys. Fluids* **25**, 092108 (2013).
- [31] Muldoon, F. H. and Kuhlmann, H. C., "Coherent particulate structures by boundary inter- action of small particles in confined periodic flows", *Physica D: Nonlinear Phenomena* 253, 40–65, 2013.
- [32] Muldoon, F. H. and Kuhlmann, H. C., "Different particle-accumulation structures arising from particle-boundary interactions in a liquid bridge", *Int. J. Multiphase Flow* **59**, 145–159, 2014.
- [33] Romanò, F. and Kuhlmann, H. C., "Finite-size Lagrangian coherent structures in thermocapillary liquid bridges", *Phys. Rev. Fluids* **3**, 094302 (2018).
- [34] Sato, F., Ueno, I., Kawamura, H., Nishino, K., Matsumoto, S., Ohnishi, M. and Sakurai, M., Hydrothermal wave instability in a high-aspect-ratio liquid bridge of Pr > 200 -On-orbit experiments in the Japanese Experiment Module 'Kibo' aboard the International Space Station-, *Microgravity Sci. Technol.* 25, 43-58 (2013).
- [35] Matsugase, T., Ueno, I., Nishino, K., Ohnishi, M., Sakurai, M., Matsumoto, S. and Kawamura, H., Transition to chaotic thermocapillary convection in a half zone liquid bridge, *Int. J. Heat Mass Trans.* 89, 903-912 (2015).
- [36] Preisser, F., Schwabe, D. and Scharmann, A., Steady and oscillatory thermocapillary convection in liquid columns with free cylindrical surface, *J. Fluid Mech.* 126, 545-567 (1983).
- [37] Kawamura, H., Nishino, K., Matsumoto, S. and Ueno, I., "Report on microgravity experiments of Marangoni convection aboard International Space Station", *Trans. ASME J. Heat Trans.* 134, 031005 (2012).
- [38] Kuhlmann, H. C. and Muldoon, F. H., Particle-accumulation structures in periodic free-surface flows: Inertia versus surface collisions, *Phys. Rev.* E **85**, 046310 (2012).
- [39] Muldoon, F. H. and Kuhlmann, H. C., "Coherent particulate structures by boundary inter- action of small particles in confined periodic flows". *Physica D: Nonlinear Phenomena* 253, 40–65, (2013).
- [40] Kuhlmann, H. C., Mukin, R. V., Sano, T. and Ueno, I., "Structure and dynamics of particleaccumulation in thermocapillary liquid bridges", *Fluid Dynamics Research* 46, 041421 (2014).

(以上)

「高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の動的表面変形の実験的評価 (Dynamic Surf)」

成果リスト(2019年1月7日時点)

【学術論文】

※各論文末尾の[IF:*]は雑誌のインパクトファクターを示す

- Shitomi, N., Yano, T. and Nishino, K., Effect of radiative heat transfer on thermocapillary convection in long liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 133, pp. 405-415 (2018) [IF: 3.458]
- Yano, T., Hirotani, M. and Nishino, K., Effect of interfacial heat transfer on basic flow and instability in a high-Prandtl-number liquid bridge, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 125, pp. 1121-1130 (2018) [IF: 3.458]
- Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kamotani, Y. and Imaishi, N., Report on microgravity experiments of dynamic surface deformation effects on Marangoni instability in high-Prandtl-number liquid bridges, *Microgravity Sci. Technol.*, Vol. 30, No. 5, pp. 599-610 (2018) [IF: 1.188]
- Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kamotani, Y. and Imaishi, N., Overview of "Dynamic Surf" project in Kibo-Dynamic behavior of large-scale thermocapillary liquid bridges in microgravity, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.*, Vol. 35, No. 1, 350102 (2018)
- 5. Kosuke Motegi, Kaoru Fujimura and Ichiro Ueno, Floquet analysis of spatially periodic thermocapillary convection in a low-Prandtl-number liquid bridge, Phys. Fluids 29, 074104, (2017) [IF: 2.017]
- 6. Yano, T., Nishino, K., Ueno, I., Matsumoto, S. and Kamotani, Y., Sensitivity of hydrothermal wave instability of Marangoni convection to the interfacial heat transfer in long liquid bridges of high Prandtl number fluids, *Phys. Fluids*, Vol. 29, No. 4, 044105 (2017) [IF: 2.017]
- Aro Toyama, Masakazu Gotoda, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Existence conditions and formation process of second type of spiral loop particle accumulation structure (SL-2 PAS) in half-zone liquid bridge, Microgravity Sci. Technol. 29 (4), 263-274 (2017) [IF: 1.357]

【関連論文】

- Takumi Watanabe, Tomohiko Takakusagi, Ichiro Ueno, Hiroshi Kawamura, Koichi Nishino, Satoshi Matsumoto, Mitsuru Ohnishi and Makoto Sakurai, Terrestrial and microgravity experiments on onset of thermocapillary-driven convection in hanging droplet, Int. J. Heat Mass Trans. 123, 945-956, (2018) [IF: 3.891]
- 2. Tomohiko Takakusagi and Ichiro Ueno, Flow patterns induced by thermocapillary effect and resultant structures of suspended particles in a hanging droplet, Langmuir, 33(46), 13197-13206 (2017) [IF: 3.789]
- Francesco Romanò, Hendrik C. Kuhlmann, Misa Ishimura and Ichiro Ueno, Limit cycles for the motion of finite-size particles in axisymmetric thermocapillary flows in liquid bridges, Phys. Fluids 29, 093303, (2017) [IF: 2.017]
- Kosuke Motegi, Masaki Kudo and Ichiro Ueno, Linear stability of buoyant thermocapillary convection for a high-Prandtl number fluid in a laterally heated liquid bridge, Phys. Fluids 29, 044106 (2017) [IF: 2.017]
- Yano, T., Maruyama, K., Matsunaga, T. and Nishino, K., Effect of ambient gas flow on the instability of Marangoni convection in liquid bridges of various volume ratios, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 99, pp.182-191 (2016) [IF: 3.891]

6. Yano, T. and Nishino, K., Effect of liquid bridge shape on the oscillatory thermal Marangoni convection, *European Physical Journal Special Topics*, Vol. 224, No. 2, pp. 289-298 (2015) [IF: 1.698]

【学会発表】

- Kengo Yamaguchi, Takeru Oba, Takuma Hori and Ichiro Ueno, Behavior of a spherical particle of low Stokes number in half-zone liquid bridge induced by thermocapillary effect, 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29) (Honolulu, HI, USA, Oct. 30 - Nov. 2, 2018), ISTP29-116 (oral)
- 2. Toru Ogasawara, Kosuke Motegi, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Secondary instability in thermocapillary flow in half-zone liquid bridge of high Prandtl number fluid under zero gravity, 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会 (29-31 Oct. 2018, 岐阜)(oral)
- 3. Satoshi Matsumoto, Taishi Yano, Ichiro Ueno, Koichi Nishino, Ysuhiro Kamotani, Shinichi Yoda, Hiroshi Kawamura, Results and Future Perspectives of Experiment on Marangoni Convection in Liquid Bridge onboard KIBO, 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会 (29-31 Oct. 2018, 岐阜)(oral)
- 4. 松本聡,河村洋,西野耕一,液柱内マランゴニ対流における粒子集合構造のダイナミクスー地 上における観察と国際宇宙ステーション実験棟「きぼう」における微小重力実験ー,日本機械 学会 熱工学コンファレンス 2018 (2018 年 10 月 20~21 日,富山大学 五福キャンパス)
- 5. Toru Ogasawara, Kosuke Motegi, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Secondary instability in thermocapillary flow in half-zone liquid bridge of high Prandtl number fluid under zero gravity, 12th European Fluid Mechanics Conference (EFMC12) (9th 13th Sept. 2018, Vienna, Austria)(oral)
- Yuya Fukuda, Toru Ogasawara, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Effect of ambient-gas forced flow on oscillatory thermocapillary convections in a half-zone liquid bridge of high aspect ratio, 42nd COSPAR (Committee on Space Research) Scientific Assembly (14th - 22nd July 2018, Pasadena, CA)(poster)
- 5. 馬渕勇希,山口諒,矢野大志,西野耕一,振動流状態における液柱マランゴニ対流の内部流動 構造,日本マイクログラビティ応用学会第30回学術講演会(JASMAC-30),2018年10月29~31 日,じゅうろくプラザ(岐阜県岐阜市)
- 8. 馬渕勇希,山口諒,矢野大志,西野耕一,PIV を用いた振動流状態における液柱マランゴニ対流の内部流動計測,第46回可視化情報シンポジウム,2018年9月14~16日,明治大学・駿河台キャンパス(東京都千代田区)
- 9. Yano, T., Hirotani, M. and Nishino, K., Thermocapillary convection in high-Prandtl-number liquid bridges with free surface cooling/heating by ambient gas flow, 9th Conference of the International Marangoni Association (IMA9), (Aug. 31-Sep. 5, 2018, Guilin, China)
- Shitomi, N., Yano, T. and Nishino K., Radiative heat transfer from the surface of thermocapillary liquid bridges of high-Prandtl-number fluids in microgravity, 9th Conference of the International Marangoni Association (IMA9), (Aug. 31-Sep. 5, 2018, Guilin, China)
- Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A. and Kamotani, Y., Dynamic free surface deformation of high-Prandtl-number liquid bridges with Marangoni convection in microgravity, 42nd COSPAR Scientific Assembly (COSPAR 2018), (Jul. 14-22, 2018, Pasadena, California, U.S.A.)
- 12. 蔀信寛, 矢野大志, 西野耕一, 微小重力環境においてふく射伝熱が高プラントル数液柱マラン ゴニ対流の流動場に与える影響, 第55回日本伝熱シンポジウム, 2018年5月29~31日, 札幌コ ンベンションセンター(北海道札幌市)
- Takeru Oba, Ichiro Ueno, Toshihiro Kaneko, Experimental study on spatio-temporal behavior of a single particle forming a particle accumulation structure (PAS) in half-zone liquid bridge, Bulletin of the American Physical Society (APS) 62, 70th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics (19th - 21st Nov. 2017, Denver, CO), pp.384-385.(poster)

- 14. Toru Ogasawara, Kosuke Motegi, Toshihiro Kaneko, Ichiro Ueno, Secondary instability analysis of thermocapillary flow in half-zone liquid bridge for high Prandtl number fluid, Joint conf. 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) and 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly (ELGRA-25) (2nd-6th Oct. 2017, Juan-les-Pins, France)(poster)
- Ichiro Ueno, Toshikazu Eguchi, Kosuke Motegi & Toshihiro Kaneko, Effect of heat transfer through free surface on oscillatory flow patterns induced by thermocapillary effect in high-aspect-ratio half-zone liquid bridge under zero gravity, Joint conf. 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) and 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly (ELGRA-25) (2nd-6th Oct. 2017, Juan-les-Pins, France)(oral)
- 16. 茂木 孝介,藤村 薫,上野一郎,液柱内温度差マランゴニ対流の Floquet 解析,日本流体力学 会年会 2017 (2017 年 8 月 30 日~9 月 1 日,東京) (oral)
- 17. 矢野大志, 西野耕一, 松本聡, 上野一郎, 小宮敦樹, 鴨谷康弘, 高プラントル数液柱マランゴニ 対流の動的表面変形効果に関する「きぼう」利用実験, 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会(JASMAC-29), 2017 年 10 月 25~27 日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス (千葉県習志野市)
- 18. 山口諒, 矢野大志, 西野耕一, 高プラントル数液柱マランゴニ対流における動的表面変形の特性, 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会(JASMAC-29), 2017 年 10 月 25~27日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県習志野市)
- 19. 蔀信寛, 矢野大志, 西野耕一, 数値解析による液柱マランゴニ対流のふく射伝熱の評価, 日本 マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会(JASMAC-29), 2017 年 10 月 25~27 日, 日本 大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県習志野市)
- 20. Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kamotani, Y. and Imaishi, N., Report on microgravity experiments of dynamic surface deformation effects on Marangoni instability in high Prandtl number liquid bridges, The Joint Conference of the 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) & 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly (ELGRA-25), (Oct. 2-6, 2017, Juan-les-Pins, France)
- 21. Makoto Yamaguchi, Taishi Yano, and Koichi Nishino, Characteristics of dynamic surface deformation in oscillatory Marangoni convection in liquid bridges of high Prandtl number fluids, The Joint Conference of the 7th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS-7) & 25th European Low Gravity Research Association Biennial Symposium and General Assembly (ELGRA-25), (Oct. 2-6, 2017, Juan-les-Pins, France)
- 22. 廣谷真, 矢野大志, 西野耕一 液柱周囲の熱環境がマランゴニ対流の不安定性と振動モードに 与える影響, 第54回日本伝熱シンポジウム, 2017年5月24~26日, 大宮ソニックシティ(埼玉 県さいたま市)
- Nishino, K. and Yano, T., Space experiments and application of PIV techniques for the study of instability of thermocapillary convection, The 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry (ISPIV 2017) (Jun. 18-22, 2017, Busan, Korea) (Keynote)
- 24. Yano, T., Katakura, T. and Nishino, K., Tomographic PIV measurement of thermocapillary convection in liquid bridges formed in space experiment, The 12th International Symposium on Particle Image Velocimetry (ISPIV 2017) (Jun. 18-22, 2017, Busan, Korea)
- Yano, T., Nishino, K., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kamotani, Y. and Imaishi, N., Overview of space experiment on dynamic surface deformation effects in transition to oscillatory Marangoni flow in liquid bridge of high Prandtl number fluids, Joint Conference: 31st International Symposium on Space Technology and Science (ISTS-31), 26th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD-26) & 8th Nano-Satellite Symposium (NSAT-8) (Jun. 3-9, 2017, Ehime, Japan)
- 26. Seki, R., Yano, T., Nishino, K., Kamotani, Y., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kawaji, M. and Imaishi, N., Characteristics of dynamic surface deformation of oscillatory Marangoni convection in liquid

bridge, 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016) (October 25-29, 2016, Hokkaido, Japan)

- 27. Hirotani, M., Yano, T. and Nishino, K., Effect of cooling disk temperature and interfacial heat transfer on the instability of Marangoni convection in liquid bridge, 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016) (October 25-29, 2016, Hokkaido, Japan)
- 28. Seki, R, Isonishi, Y., Yano, T., Nishino, K., Kamotani, Y., Matsumoto, S., Ueno, I., Komiya, A., Kawaji, M. and Imaishi, N., Scaling of dynamic surface deformation (DSD) of oscillatory Marangoni convection in high Pr liquid bridge, The Joint Conference of 6th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS6) and 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Application (ITTW2015) (Sep. 14-18, 2015, Kyoto, Japan)
- 29. Hirotani, M., Yano, T. and Nishino, K., Effect of cooling disk temperature on the instability of Marangoni convection in liquid bridge, The Joint Conference of 6th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS6) and 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Application (ITTW2015) (Sep. 14-18, 2015, Kyoto, Japan)

【関連学会発表】

- 1. 山崎紘一郎, 矢野大志, 西野耕一, "懸下液滴内温度差マランゴニ対流に対する外部電場の影響の解析," 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会(JASMAC-30), 2018 年 10 月 29~31 日, じゅうろくプラザ(岐阜県岐阜市)
- 2. 山崎紘一郎, 矢野大志, 西野耕一, "電圧印加による懸下液滴内温度差マランゴニ対流の抑制," 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会(JASMAC-29), 2017 年 10 月 25~27 日, 日本大学生産工学部津田沼キャンパス(千葉県習志野市)
- 3. Yamaguchi, M., Yano, T., Nishino, K., PIV measurement of electrocapillary flow at the interface of two immiscible liquid layers, 11th Asian Microgravity Symposium (AMS2016) (Oct. 25-29, 2016, Hokkaido, Japan)
- 4. Nishino, K., Yano, T., Whole flow field measurement for the study of instability mechanisms of thermocapillary convection in microgravity experiments, 17th International Symposium on Flow visualization (ISFV17), (Jun. 19-22, 2016, Gatlinburg, Tennessee, U.S.A.) (Keynote)
- 5. 片倉大久真, 矢野大志, 西野耕一, トモグラフィック PIV を用いた液柱マランゴニ対流の振動 流構造の測定, 第44回可視化情報シンポジウム, 2016年7月19~20日, 工学院大学新宿キャン パス
- 6. Yano, T., Nishino, K., Kamotani, Y., Ueno, I., Matsumoto, S., Effect of interfacial heating/cooling on the hydrothermal wave of thermocapillary liquid bridges of high Prandtl number fluids, 8th Conference of the International Marangoni Association (IMA8) (Jun. 12-16, 2016, Bad Honnef, Germany)
- 7. 矢野大志, 西野耕一, 鴨谷康弘, 上野一郎, 松本聡, 気液界面の熱移動が高プラントル数液柱マ ランゴニ対流の Hydrothermal Wave 不安定性に与える影響, 第53回伝熱シンポジウム, 2016年 5月 24~26日, グランキューブ大阪(大阪府立国際会議場), CD-ROM E224
- Yano, T., Nishino, K., Ueno, I., Matsumoto, S., Effect of heat transfer between liquid-gas interface on the instability and oscillation mode of Marangoni convection in liquid bridge in space experiment, The Joint Conference of 6th International Symposium on Physical Sciences in Space (ISPS6) and 10th International Conference on Two-Phase Systems for Space and Ground Application (ITTW2015) (Sep. 14-18, 2015, Kyoto, Japan)
- 9. Yano, T. and Nishino, Effect of liquid bridge shape on the oscillatory thermal Marangoni convection, 7th Conference of the International Marangoni Association (IMA7) (Jun. 23-26, 2014, Vienna, Austria)
- 10. 矢野大志, 西野耕一, 上野一郎, 松本聡, 高プラントル数長液柱において表面張力流と逆向き に伝播する渦構造, 日本マイクログラビティ応用学会第 28 回学術講演会 (JASMAC-28), 2014 年 11 月 26~28 日, イーグレひめじ

- (11. 矢野大志, 西野耕一, 上野一郎, 松本聡, 河村洋, 高 AR・高 Pr 数流体液柱内マランゴニ対流の 新たな振動モード, 日本マイクログラビティ応用学会 第 27 回学術講演会 (JASMAC-27), 2013 年 11 月 27~29 日, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス.
- Yano, T., Nishino, K., Ueno, I., Matsumoto, S., Kawamura, H., Influence of liquid bridge shape on the oscillatory Marangoni convection under micro and normal gravity, Joint meeting of The 29th American Society for Gravitational and Space Research (ASGSR29) and 5th International Symposium for Physical Sciences in Space (ISPS5) (Nov. 3-8, 2013, Orlando, FL, USA).

【解説記事】

- 1. 今石宣之, 第 1 章 マランゴニ対流の基礎, Int. J. Microgravity Sci. No. 31 Supplement 2014 (S5–S12)
- 2. 松本 聡, 藤村 薫, 今石 宣之, 鴨谷 康弘, 上野 一郎, 西野 耕一, 第 2 章 これまでのマラン ゴニ液柱対流研究, Int. J. Microgravity Sci. No. 31 Supplement 2014 (S13–S35)
- 3. 桜井 誠人・上野 一郎・ 河村 洋・ 依田 眞一, 第 3 章 MEIS 実験までの取り組み, Int. J. Microgravity Sci. No. 31 Supplement 2014 (S36-S50)
- 4. 松本 聡, 西野 耕一, 上野 一郎, 矢野 大志, 河村 洋, 第 4 章 MEIS, Int. J. Microgravity Sci. No. 31 Supplement 2014 (S51-S79)

【受賞】

- 1. 山崎紘一郎, 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会(JASMAC-30)学生ロ頭発 表最優秀賞
- 2. 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会毛利賞, Toru Ogasawara, Kosuke Motegi, Toshihiro Kaneko and Ichiro Ueno, Secondary instability in thermocapillary flow in half-zone liquid bridge of high Prandtl number fluid under zero gravity, 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学 術講演会 (29-31 Oct. 2018, 岐阜)(poster)
- 3. 松本聡, 河村洋, 西野耕一, 日本機会学会熱工学シンポジウム最優秀動画賞 (2018)
- 4. 矢野大志, Zeldobich Medal (COSPAR 2018)

(以上)
平成 30 年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果(物質・物理科学)

研究課題

高プラントル数流体のマランゴニ振動流遷移における液柱界面の 動的変形効果の実験的評価 (Dynamic Surf)

代表研究者;鴨谷 康弘(ケースウェスタンリザーブ大学)

総合評価

A:目標を充分に達成した(フルサクセス相当以上)

マランゴニ対流の振動流遷移が、Ma 数や S パラメータの単独では規定できないことを実験的に明 らかにし、設定した目標どおりの成果を得たと評価できる。PAS(Particle Aggregation Structure; 粒子 集合構造)の発現については、面白い現象というだけでなく、液柱内対流場との関連や、さらには振動 流遷移のメカニズムとの関連まで考察を深化し、モデル構築など、その過程の詳細な考察が必要で ある。今後、さらにマランゴニ対流に関わる宇宙実験を継続していくためには、どうして地上では困難 なのか、また、成果の応用面での重要性などを、丁寧に説明する必要がある。

平成 31 年 2 月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(物質・物理科学分野)

別紙8-1

ISS・きぼう利用ミッション

「その場観察による溶液中のソーレ効果の解明 (Soret-Facet)」

研究成果報告書

代表研究者; 鈴木進補 (早稲田大学)

平成 31 年 1 月 11 日

目次

- 1. 緒言
- 1.1 目的
- 1.2 ソーレ効果
- 1.3 新規性·独創性·革新性
- 1.4 仮説およびその検証方法
- 1.5 意義•波及効果
- 1.6 宇宙実験の必要性
- 2. 研究計画
- 2.1 サクセスクライテリア
- 2.2 研究体制
- 2.3 スケジュール
- 3. 実験準備・運用
- 4. 体制進捗·達成状況
- 4.1 熱分析による試料濃度の決定
- 4.2 ソーレ係数解析結果
- 4.3 解析における課題点と対処
- 4.4 ソーレ係数の温度依存性
- 4.5 オンサーガーの相反定理の検証
- 4.6 拡散係数解析の検討
- 4.7 地上実験への適用
- 5. 結言
- 6. 投稿論文

1. 緒言

1.1 目的

本研究では、きぼう船内の微小重力環境下でザロール/t ブタノール溶液に温度勾配を与え、干渉 計を用いたその場観察により溶質濃度分布を測定する。これにより Soret(ソーレ)効果による金属・ 半導体等の融体も含む液体中の溶質成分の物質輸送のメカニズムを理解し、未知の溶液・融液系 についてソーレ効果を予測するための指針を得ることを目的とする。また、得られた知見を応用し、 熱拡散による物質輸送が結晶成長に与える影響を明らかにする。具体的には、以下の研究を行う。 括弧内に、対応する成果を記した節番号を示す。

- 定常状態でソーレ係数を測定し(4.2 4.4 節),温度勾配と濃度勾配の関係から輸送熱を求める。実験値とこれまで知られているオンサーガーの相反定理から理論的に求められる輸送熱と 比較し,理論式を検証する(4.5 節)。
- 2) ソーレ係数と他の熱力学量(ギブス自由エネルギ等)との関係を明らかにする(4.4 節).
- 3) 温度勾配を急速に与えた後の濃度分布の時間変化を測定することにより、ソーレ係数を含めた 非定常拡散方程式の理論式による濃度分布と比較し、理論式を検証する(4.4 節).
- 4) 溶液を過冷却し, 過冷却液体でのソーレ係数測定を行う(4.4 節).
- 5) 濃度勾配,温度勾配がある状態から,急速に温度勾配をOに変化させ,その後の濃度変化の測 定により拡散係数測定を行う(4.6 節).
- 6) 結晶成長過程における熱拡散による固液界面での物質輸送が,結晶成長速度に与える影響を 明らかにする(4.6 節).

また,地上において上部が低密度,下部が高密度となるように試料を配置して対流抑制を試み,ソ ーレ係数測定を行う(4.7節).地上実験結果を微小重力実験結果と比較することにより,対流抑制効 果を検証する.

以上により,安定液体及び過冷却液体のソーレ係数を求め,ソーレ効果による輸送現象に関する 基礎的な知見を得る.

1.2 ソーレ効果

混合溶液や気体に温度勾配を与えると、低温側で分子量あるいは原子量の大きい溶質の濃度が 高くなるように物質輸送が生じる(図1). これは、ソーレ効果(熱拡散効果)と呼ばれている[1]. 対流 がない場合、流束 J は拡散による流束 Ju と熱拡散による流束 Ju の総和となる.

$$J = J_D + J_{TD} = -D\frac{\partial C}{\partial x} - D_T C\frac{\partial T}{\partial x} = -D\frac{\partial C}{\partial x} - S_T D C\frac{\partial T}{\partial x}$$
(1)

ここで,D,DT, ST 及び C はそれぞれ,拡散係数,熱拡散係数,ソーレ係数及び溶液中の溶質濃度の 平均値である.温度勾配を一定に保つと,JD と JTD がつりあい,濃度分布が定常状態となる.このと き J=0 であるため,以下の式が成り立つ.

$$-D\frac{\partial C}{\partial x} - D_T C \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$
⁽²⁾

熱拡散は,温度勾配を利用した材料製造プロセス(結晶成長・凝固等)における材料の濃度分布に 影響を与え,石油精製プロセスなどの開発に利用することができる.またソーレ効果は,温度勾配下 で生じる生体の変化(DNA 伸展,腫瘍等),海洋・惑星内の溶質分布に対しても影響を与えると考え られる[2].

ソーレ効果は,約150年前に発見されたものの[1],液体中のソーレ効果についてはまだ未解明な 点が多い.実験によりソーレ係数の測定値は得られているが,ソーレ係数が物質のどのような性質に より決定されるのかということは未だ明らかになっていない.つまり,未知の物質に対してソーレ係数 を求めるためには実測を行わないといけないというのが現状である.しかしながら一方で,ソーレ効 果は他の輸送現象より影響が小さく,対流などの擾乱により高精度の実測値を求めるのが困難という問題がある.これがソーレ効果の理解を妨げる原因となっていた.

従来,ソーレ係数測定にはソーレセルが広く用いられてきた.この方法では,二枚の平板間に薄い 隙間を設け,ここに液体を充てんし,上側を高温として平板間に温度勾配を与えることにより自然対 流を抑制する.濃度分析は,温度勾配により濃度勾配が生じ,平衡となった後注射針により各位置 の液体を吸引して行う.しかしながら,液体吸引の際の対流が濃度分布を擾乱する可能性がある[3]. これに対して,吸引時の擾乱をなくす方法としてレーザー光の屈折を用いたその場計測が開発され ている.上記ソーレセルの長手方向にレーザー光を通過させると濃度勾配による屈折率の変化によ ってレーザー光の軌跡が屈折する.この屈折による中心線からの変位を測定することにより,濃度変 化を求める.しかしながら,一波長のレーザーのみを用いるために濃度勾配と温度勾配による屈折 率の変化を分離することができず,正確な濃度勾配の測定が困難である.一方で,自然対流を積極 的に利用したソーレ効果の測定法も Thermal Gravitational Cell (TGC)として開発されている[3].

また,対流抑制を目的として微小重力実験として SCM[4], SCCO[5]及び SODI-IVIDIL [6]を用い たソーレ係数測定がそれぞれ EURECA, Foton 及び ISS において行われている. SCM[4]において は,自然対流抑制条件で20種の二元系有機溶液におけるソーレ係数測定を行い,S_Tが0.7×10⁻³~ 1×10⁻³ K⁻¹ の範囲にあることを明らかにした.また,微小重力実験では,自然対流の抑制により地上 実験よりも成分の分離が大きくなった.しかしながら,SCM における実験では,試料の回収が実験の 9 カ月後であることや,濃度測定がデンシトメトリーを用いた間接的な測定による測定誤差が指摘さ れている[2]. SCCO[5]では,多元成分系溶液における熱拡散測定を目的とし,SODI-IVIDIL[6]にお いては,多成分系の熱拡散測定に対するg ジッターの影響を明らかにすることが目的とされている. しかしながら,SCCO 及び SODI-IVIDIL のいずれにおいても,多成分溶液の濃度及び温度の変化を 1波長の干渉計により測定しているため,測定精度に限界がある.

いずれの微小重力実験においても、測定値に及ぼす対流の影響の検証にとどまり、ソーレ係数に 関する理論的な考察はない.これに対して、Duhr et al.[7]は地上で部分加熱した厚さ 10µm の水膜 におけるポリスチレン微粒子の熱泳動実験を行い、ソーレ係数の測定結果から、ギブス自由エネル ギーG、ボルツマン定数 kBを用いて以下のような温度依存性の式導いた。

$$S_T = \frac{1}{k_B T} \frac{\partial G}{\partial T}$$
(3)

本研究では、微小重力のような対流抑制下で、濃度勾配と温度勾配を独立して高精度測定を行いソ ーレ係数と他の熱力学量との関係を明らかにする.

また,前述したような材料プロセス,石油精製プロセス,天体・海洋・生体での物質輸送現象においては,温度勾配が時々刻々と変化する。しかしながら,従来の実験は定常状態に到達後の濃度分布を解析して考察しており,非定常状態についての知見は未だ得られていない。従来の研究で対象とした溶液はいずれも融点以上の安定液体である。これに対して,材料プロセスのような実際の輸送現象では過冷却液体における熱拡散現象についても考慮する必要があり,過冷却液体についての知見も求められている。

このような背景から,代表研究者と共同研究者は,従来のソーレ係数測定の問題を解決する手段 として,1)微小重力環境による対流抑制と,2)二波長の干渉計を用いることによる濃度と温度を分離 して測定可能なその場観察を組み合わせた測定を考えた.実験方法を検討する過程で,現在きぼう 船内に既存の SCOF 実験装置及び装置に設置されているザロール/t ブタノール溶液を用いて実施 することが可能であることが明らかになった.既存の試料を用いることで,装置の新規開発, ISS へ の輸送及び地上への回収が不要となるため,低コストで実現性の高い実験により,本研究の目的が 達成されると判断した.



図1 ソーレ効果の概要図

1.3 新規性·独創性·革新性

本実験の測定技術面での特徴は、二波長を用いた干渉計によるその場観察と微小重力による対 流抑制を組み合わせた高精度のソーレ係数及び拡散係数の測定である。このような測定例はこれま でなく、新規のものといえる。科学的側面としては以下の点があげられる。

- このような高精度の測定データを基に D_T, S_T, D などの熱物性値を検証し, 輸送現象のメカニ ズムを詳細に検討する.
- その場観察を用いることにより、非定常状態の温度・濃度分布も測定可能であるため、熱拡散に 起因する項を含む非定常輸送方程式を検証する。
- 溶液を融点以上の平衡状態の液体のみならず過冷却液体も対象として、輸送現象のメカニズムを詳細に検討する。
- そられた知見を,直接同じ組成の試料を用いた結晶成長実験(FACET)の結果解析に適用し, 結晶成長速度に及ぼす熱拡散の影響を明らかにする。

1.4 仮説およびその検証方法

■「仮説1」定常状態における輸送熱と温度勾配・濃度勾配の関係(オンサーガーの相反定理)

溶媒を基準座標に選ぶと,系内には熱流束 Jq と溶質の流束 J₂ が存在し,温度 T,化学ポテンシャル μ を用いて以下の式であらわされる[8].

$$\begin{pmatrix} J_q \\ J_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \overline{l_{11}} & \overline{l_{12}} \\ \overline{l_{21}} & \overline{l_{22}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \ln T \\ \Delta \mu_{2,T} \end{pmatrix}$$
(4)

ここで、 l_{ij} は拡散に関係した係数であり、近似として勾配は差で置き換え、係数は平均値を表した、理想的な非電解質系に対しては $\Delta \mu_{2,T} = RT\Delta \ln c_2 = RT\Delta c_2 / c_2$ が成り立つため、温度が一定のときはフィックの第一法則が成り立つ。

$$D = \frac{l_{22}RT}{c_2} \tag{5}$$

希薄な溶液においては, $\overline{l_{21}}$ が c_2 に近似的に比例すると仮定すると, 熱拡散係数は以下のようにな

る.

$$D_T = \frac{\overline{l_{21}}}{c_2 T} \tag{6}$$

式(4)~(6)より,以下のように式(1)に対応した式が得られる.

$$J_2 = -D_T c_2 \Delta T - D \Delta c_2 \tag{7}$$

ここで, 定常状態においては J2=0 なので,

$$s_T = \frac{D_T}{D} = -\left\lfloor \frac{\Delta c_2}{c_2 \Delta T} \right\rfloor_{j_2 = 0}$$
(8)

となる.また,温度差が存在しない系で成分 / の輸送と連結して輸送される熱(輸送熱)は

$$Q^* = \left(\frac{J_q}{J_2}\right)_{\Delta T=0} = \frac{l_{12}}{l_{22}} \tag{9}$$

と表される. 平均係数にオンサーガーの相反定理 $\overline{l_{12}} = \overline{l_{21}}$ を用いればソーレ係数と輸送熱の係は以下のようになる.

$$S_T = \frac{Q^*}{RT^2} \tag{10}$$

従って, 輸送熱は温度と濃度を用いて

$$Q^* = R \frac{d \ln(\Delta c_2 / c_2)}{d(1/T)} \tag{11}$$

と表される.

式(4)から(11)に至るまで, △µ_{2,7} や $\overline{l_{21}}$ についての仮定を用いた. これらの仮定の妥当性, 統計力 学により導出されたオンサーガーの相反定理の妥当性を検証する.

■「仮説1」の検証方法

同一試料で温度勾配を変化させて、定常状態の濃度勾配を干渉縞により求め、式(8)を用いて ST を算出する.輸送熱が濃度 c_2 に依存しないのであれば、図 2 のような直線関係が得られるはずであ る. このとき、直線の傾きが Q*/R となる. このような関係が成立すれば、上記の $\Delta \mu_{2,T}$ や $\overline{l_{21}}$ につい ての仮定やオンサーガーの相反定理の妥当性を示すことができる. また、図1で直線関係が成立し ない場合でも、どのような補正を施すかを検討することにより、これらのパラメータについての知見が 深まると考えられる.

また, 輸送熱 Q*が希薄溶液中で C₂に依存しない値であることが分かると, ギブス自由エネルギな どの熱力学量との関係を検討できる. 熱泳動の実験結果から, 輸送熱 Q*と温度 T から一義的に決 まる S_T が式 (3)のように記述されているが[7], 本実験においても, 式(3)の妥当性を検証する.



1/T² 図 2 (1/T²)とS₇の関係

■[仮説2]非定常拡散方程式の熱拡散への拡張可能性

一次元非定常拡散方程式は、フィックの第二法則により以下のように表される.

 $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$

(12)

これに対して,本実験のように温度勾配を与え,熱拡散による物質輸送が生じる場合,一次元の非 定常物質輸送方程式は以下のようになる.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + DS_T \frac{\partial}{\partial x} \left(C \frac{\partial T}{\partial x} \right) = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + DS_T \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + DS_T C \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$
(13)

ここで,濃度変化に対して温度変化は急速で,温度勾配は速やかに定常状態になるとすると $\partial T/\partial x = \tau (const), \partial^2 T/\partial x^2 = 0$ であるから

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \tau D S_T \frac{\partial C}{\partial x}$$
(14)

と記述することができる。このような熱拡散を含む物質輸送の非定常変化が定式化できれば、時々 刻々と変化する温度場における濃度分布変化の予測も可能となる。

■[仮説2]の検証方法

温度勾配がない状態から急速に温度勾配を与え,濃度分布の変化をその場で干渉編により測定 する.この結果と式(13)を差分化した以下の式(14)により算出した濃度分布の比較を行い,式(13)の 妥当性を検証する.

$$C_{i,t+\Delta t} = C_{i,t} + D \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \Big(C_{i+1,t} - 2C_{i,t} + C_{i-1,t} \Big) + \tau D S_T \frac{\Delta t}{\Delta x} \Big(C_{i+1,t} - C_{i,t} \Big)$$
(15)

ここで, / は差分モデルにおける節点番号を表す.

■[仮説3]溶液中の熱拡散現象の過冷却液体への適用可能性

過冷却液体中においても,物質輸送が融点より高温の溶液中と同様のメカニズムで物質輸送が行われるとすると,過冷却液体領域まで濃度分布が直線になり,ソーレ係数も図2に示した直線上にプロットされるはずである.

■[仮説3]の検証方法

試料1を一度全溶解し、低温側を融点以下まで冷却する。今回使用する試料を一度全溶解した後、 融点以下まで冷却してもすぐには凝固しないことを FACET 実験にて確認している。このような、部分 的に過冷却液体となった溶液に対して仮説1の検証で行ったような実験を行い、得られた (1/T²)と S⊤の関係を図 2 上にプロットし, 過冷却液体が存在しない場合との同じ直線上にプロットが存在する ことを確認する.

■[仮説4]溶液・過冷却液体中の拡散係数

FACET 実験において,結晶成長速度と固液界面での濃度勾配の関係から,固液界面付近におけ る液相部での拡散係数は D=1.3x10⁻⁹ m²/s と見積もられている.本実験では,溶液・過冷却液体中 の拡散係数を濃度変化から求め,拡散係数の温度依存性を求める.過冷却液体における拡散メカニ ズムが融点以上の平衡液体と同様であると仮定すると,融点以下でも同様の温度依存性を示すは ずである.

■[仮説4]の検証方法

実験1:溶液中(平衡液体)拡散係数測定

温度勾配を与え,濃度分布を定常状態にする.このとき,低温側温度が融点以上となるように設定し,試料は全溶解とする.その後,高温側を急速に低温側と同じ温度まで冷却し,均一温度条件にする.その後の濃度変化を干渉縞により測定し,拡散係数を算出する.均一温度条件を複数設定し, 拡散係数の温度依存性を明らかにする.

実験2:過冷却液体中の拡散係数測定

実験1と同様の実験を行うが、この際、低温側の温度は融点以下とし、均一温度条件では過冷却 液体とする.

1.5 意義·波及効果

(1)科学・技術への貢献

本研究は,特に温度勾配場で溶液内において起こる輸送現象を定式化しようとするものである.こ れにより,拡散をはじめとする液体内の輸送現象を解明する一助となる.また,天体・海洋・生体にお ける物質輸送を定式化する上でも重要なデータをもたらす.

(2)地上社会への貢献

結晶成長,凝固などの温度勾配下での物質輸送に対して、これまで、熱拡散による影響が僅かな ものとして考慮せずにモデルが構築されてきたが、新たな知見を与える可能性がある。石油精製プロセスのように、液体に積極的に温度勾配を与え高純度化する上でも重要なデータを提供する。従って、産業におけるこれらの製造プロセス制御の高精度化にも一助となる。

1.6 宇宙実験の必要性

本研究の特徴の一つが微小重力環境での自然対流抑制による高精度測定にある。また本実験で は、濃度分布が定常状態になるまでに数時間かかり、複数の条件で実験を行うためには9日程度の 実験期間が必要である。また、以前の FACET などの実験の結果、宇宙環境では、干渉計周囲にお ける雰囲気の対流が抑制され、地上と比較して干渉縞が明瞭に観察されることが明らかとなっている。

これらの理由により、本実験は国際宇宙ステーションきぼうにおいて宇宙実験として実施する必要 がある.



図4 ギブスエネルギーG とソーレ係数 Srとの関係

2. 研究計画

2.1 サクセスクライテリア

運用上におけるサクセスクライテリアを表1に,サイエンスの観点におけるサクセスクライテリアを 表2に示す.概ね達成することができた.詳細を各章で述べる.

サクセス	クライテリア	備考
Minimum	全溶融状態において,定常状態を目標とし	各最低4条件実施済み
Success	た温度設定等を行い,所定の時間供試体の	
	温度データおよび干渉縞画像を取得できる	
	こと. (各セルで最低 4 条件実施)	

表1 運用上のサクセスクライテリア

Full Success	以下の全てを達成すること. (各セルで16条	セル1とセル2で16条件
	件実施)	<u>実施済み</u>
	・平衡液体,過冷却状態を目標とした温度設	
	定等を行い,所定の時間供試体の温度デー	
	タおよび干渉縞画像を取得できること.	
	・非定常,等温状態目標とした温度設定等を	
	行い,所定の時間供試体の温度データおよ	
	び干渉縞画像を取得できること.	
Extra Success	N/A	追加6RUNの承認に伴い軌
		<u>道上データの追加取得済</u>

表2 サイエンスの観点におけるサクセスクライテリア

サクセス	クライテリア
Minimum	・JEM の軌道上環境(理想的 µG 環境)下において,試料全溶・定常状態で
Success	の Soret 係数を観測でき,オンサーガーの相反定理(理論式)の検証ができ
	ರ್ವಿ.
Full Success	以下の全てを達成し、Soret 係数の地上予測手法、及び適応限界を獲得す
	ること.
	・平衡液体, 過冷却液体において Soret 係数 Srを算出できること.
	・非定常, 等温状態において拡散係数 D を算出できること.
	・熱力学理論式,定常(および非定常)拡散方程式と議論し,理論検証できる
	こと.
	・地上における同一実験結果との比較により、地上の運用限界を示せるこ
	と.
Extra Success	以下のいずれかを達成すること.
	・過冷却状態での Soret 係数測定において,これまでに発見されていない
	新しい現象と思われる結果を得ること.
	・熱拡散による固液界面での物質輸送が,結晶成長に与える影響を解明で
	きること.

2.2 研究体制

以下の研究体制で研究を実施した.

研究代表者

鈴木進補(早稲田大学)

共同研究者

稻富裕光 (JAXA), 正木匡彦(芝浦工業大学)

渡邊匡人(学習院大学),上野一郎(東京理科大学)

山根岳志(富山大学)

<u>学生</u>(早稲田大学)

戸丸桃子, 折笠勇, 長田拓真, 富永晃司, 橋本栄尭, 白根文平, 森雄飛

<u>アドバイザー</u>

伊丹俊夫(北海道大学)

実験コーディネーター

足立聡(JAXA), 島岡太郎(JSF)

3. 実験準備·運用

(1)実験装置

本研究では、溶液結晶化観察装置(SCOF,図5)を使用し、現在SCOF装置の取り付けられてい る FACET 用カートリッジ(図 6)を使用した. また, FACET 用カートリッジ内の二つの FACET セル (以下, セル1, セル2)を使用した.



(a) SCOF概略図

図5 溶液結晶化観察装置(SCOF)



図 6 FACET セル

(2)実験試料

SCOF 用試料セル 2 個(現在 SCOF 内に設置されている)
 試料 1 ザロール/t-ブタノール (5 mass%, 公称)
 試料 2 ザロール/t-ブタノール (3 mass%, 公称)

以下にザロール, t-ブタノールの物性値を示す. <u>ザロール(C₁₃H₁₀O₃)</u> 融点:41.6°C, 沸点:173°C <u>t-ブタノール(C₄H₁₀O)</u> 融点:25.4°C, 沸点:83°C

4. 体制進捗·達成状況

4.1 熱分析による試料濃度の決定

図 7 にセル1熱分析実験(M.P.)におけるセルの明視野像を示す.本方法により,セル1および2 のブタノール濃度はそれぞれ1.58 mol%および2.58mol%と推定された.



Cell1	1.15mol%
Cell2	2.58mol%

図7 平衡状態図を用いた試料濃度の測定

4.2 ソーレ係数解析結果

各 Run の条件, Sr解析結果, 備考を表 3~6 にまとめた. 各条件の記号は, 以下の実験を示す. L/T:温度差を 10°C で一定とし, 中心温度を変化させた実験 L:中心温度を 45°C に固定し, 高温端, 低温端温度を変化させた実験 L/D:上記 L/T の実験後, 温度を均一化し, 拡散させた実験 M.P.:融点測定により, ザロール濃度を測定する実験 S/L:低温端を固体として保持したまま, 高温端のみを液体にした実験 Sr の解析結果は, 波長ごとに異なる値を示している. これは, 後述するように, 1波長独立解析を用 いたことによる.

条件	RUN	T _{hot}	T _{cold}	縞番地	S _T (532)	S _T (780)	備考	
		°C	°C		K ⁻¹	K ⁻¹		
L/T	#1-13	60	50	0	0.0144	-0.0549	Hop /	
	#1-14	50	40	0	-0.0078	-0.0060	-	
	#1-15	40	30	0	-0.0145	0.0248	Hop / 均質	化問題
	#1-16	35	25	0	0.0443	0.0305	Нор	
	#1-13r	50	40	0	-0.0155	-0.0153	Нор	
	#1-14r	50	40	0	-0.0061	-0.0027	-	
	#1-15rr	40	30	0	-0.0138	-0.0292	-	
	#1-16rr	35	25	0	-0.0031	-0.0181	Hop / MMA	不具合
L	#1-05	60	30	未取得	0.1214	0.0261	Нор	
	#1-06	55	35	未取得	-0.0090	-0.0367	Нор	
	#1-07	50	40	未取得	-0.0341	-0.0068	Нор	
	#1-08	48	42	0	0.0012	-0.0311	Hop / 位相到	变化不足
	#1-05r	60	30	0	-0.0018	-0.0198	Нор	
	#1-06r	55	35	0	0.0040	-0.0040	Нор	
	#1-08r	48	42	0	-0.0152	-0.0027	位相変化不	5足

表3 Cell1 の各 RUN におけるソーレ係数の解析結果(L/T, L)

表4 Cell1 の各 RUN におけるソーレ係数の解析結果(L/D, M.P., S/L)

条件	RUN	T _{hot}	T _{cold}	縞番地	S _T (532)	S _T (780)	備考	
		°C	°C		K ⁻¹	K ⁻¹		
L/D	#1-09	60	30	未取得	-0.0133	0.0175	Нор	
	#1-10	55	35	未取得	-0.0050	0.0588	Hop / IPU7	下具合
	#1-11	50	40	未取得	-0.0016	0.0356	Нор	
	#1-12	48	42	未取得	-0.0136	-0.0395	Hop / 位相	变化不足
	#1-10r	55	35	未取得	0.0019	0.0027	Нор	
	#1-09rrr	60	30	-	-0.0146	-0.2565	Нор	
	#1-10rr	55	35	-	0.0013	-0.0145	Нор	
	#1-11rr	65	55	-	-0.0302	-0.2867	Нор	
	#1-12rr	55	45	-	0.0380	0.0180	Hop(縞番±	也直前)
M.P.	#1-01	-	-	未取得	-	-	縦縞	
S/L	#1-02	52.5+6	27	未取得	-	-	縦縞 / 分解	能問題
	#1-03	52.5+10	27	未取得	-	-	縦縞/ 分解	能問題
	#1-02r	52.5+6	27	未取得	-10.6968	-0.7348		
	#1-03r	52.5+10	27	未取得	0.1960	0.1366		
	#1-04	52.5+20	27	未取得	0.0370	0.0125		

表 5 Cell2 の各 RUN におけるソーレ係数の解析結果(L/T, L)

条件	RUN	T _{hot}	T _{cold}	縞番地	S _T (532)	S _T (780)	備考	
		°C	°C		K ⁻¹	K ⁻¹		
L/T	#2-02	65	55	0	-0.0074	-0.0057	-	
	#2-13	60	50	0	-0.0200	-0.0026	-	
	#2-04	55	45	0	-0.0092	-0.0245	Hop(縞番均	也直前)
	#2-14	50	40	0	-0.0167	-0.0181	-	
	#2-15	40	30	0	-0.0155	-0.0057	Hop(縞番坩	也直前)
	#2-16	35	25	0	-0.0031	-0.0041	Нор	
L	#2-05	60	30	0	0.0035	-0.0038	-	
	#2-06	55	35	0	-0.0016	-0.0086	Hop(縞番均	也直前)
	#2-07	50	40	0	0.0016	-0.0050	-	
	#2-08	48	42	0	-0.0379	-0.0273	位相変化不	下足

表 6 Cell2 の各 RUN におけるソーレ係数の解析結果(L/D, M.P., S/L)

条件	RUN	T _{hot}	T _{cold}	縞番地	S _T (532)	S _T (780)	備考	
		°C	°C		K ⁻¹	K ⁻¹		
L/D	#2-09	60	30	0	0.0024	0.0012	Нор	
	#2-10	55	35	0	-0.0001	-0.0057	-	
	#2-11	50	40	0	-0.0001	0.0005	-	
	#2-12	48	42	0	-0.0106	-0.0039	位相変化不	∇足
S/L	C/O	52.3+6	21.8	未取得	-	-	-	
	#2-01	52.3+10	21.8	未取得	0.1851	0.1033	-	
	#2-03	52.3+20	21.8	未取得	0.3101	0.0093	-	

4.3 解析における課題点と対処

実験遂行,解析において,多くの課題が生じ,それに対する対処を検討し,解決した.主に,「位相 取得」と「屈折率誤差への対処」を行った.

(1)位相取得

<u>■ホッピング</u>

温度分布が定常状態となり,濃度変化が微小である時間においても突発的に干渉縞が大きく移動 する現象が見られた.波長 780nm で干渉縞が大きく移動する一方,532nm ではそのような減少が 見られないことから,濃度変化によるものではないことがわかる.また,通常「モードホッピング」とし て知られるレーザー発振機での波長変動に伴う干渉縞の移動とは異なる現象と考えられる.モード ホッピングから計算される干渉縞の移動量より大きな変化が見られており,原因は特定できていない. 現時点では,レーザー光源の熱により周辺機器がわずかに熱膨張し,測定機器のひずみにより試料 と光源の距離が変化した可能性があると考えている.以下ではこの現象を「ホッピング」と呼称する.

図 8 に示すように位相の時間変化を図示した後,不連続の位相変化を見出し,もうひとつの位相 で不連続な位相変化が無いことを確認した上で,ホッピング前後の位相変化と連続するように手動 で補正を行うことにより解決した.

編移動の変化が大きい温度非定常時や,以下で述べる「編番地」取得のための視野移動時にお

15

いてホッピングが発生した場合は、ホッピングの発生を判別することができないが、発生確率は低い ものとして解析を行った.



図8 位相取得におけるホッピング現象の発現

■縞番地

セルの全長 16mm に対して,視野の長さは約 2mm と限定されているため,この範囲での濃度の 高低差は極わずかである.さらに,熱電対があるセル中心付近は特に濃度変化自体がわずかであり, 解像度が低い.一方で,熱電対付近を視野に設定することは,干渉縞から求めた温度変化を熱電対 の測定結果と比較できる利点がある.ここで,以下のような「縞番地」を用いて,観測視野を広げつつ, 熱電対と干渉縞の測定結果比較を行う方法を考案した.本方法を考案したのは,ミッション途中であ り,初期の Run では適用していない.

温度勾配付与直前の均質化保持時間に CCD カメラの稼動範囲内最大限に視野を段階的に移動 し,各視野位置で干渉縞を観察し,縞の位置(以下「縞番地」)を取得した.その後,温度勾配付与後 定常状態になった時間においても上述と同一視野位置において干渉縞を観察し,縞番地を取得した. 温度勾配付与直前から,温度勾配付与して定常状態になるまでの間に各視野位置での縞番地変化 と,その隣接する視野での縞番地変化から,位相変化を算出した.

誤差伝播則により, 編番地を用いない狭い視野での解析では誤差率 150%であるのに対し, 編番 地を用いて視野を広げると 40%に大きく改善できた(図 9).



図9 編番地取得による精度の向上

■輝度法

軌道実験開始以前の地上実験段階から、干渉縞位相変化解析に「細線化」法を用いてきた.この 方法は、干渉縞の暗線を細線として認識し、温度勾配を与えた長手方向の一直線上で、各細線の移 動量から位相変化量を測定する方法である。本方法では、視野内で長手方向の一直線を引く場所に より位相変化量がばらつく問題があった。一直線を引く本数を増やすことにより精度は向上するが、 それに比例して解析時間と作業量が増加することが制約となっていた。

本研究では,図 10 に示すように干渉縞の明暗を輝度として定量化し,ある観測点のピクセル上に て位相変化に変換する方法を考案した。本方法により,視野内の情報を一度に処理し,解析点数を 大幅に向上させることを可能にした。ただし,輝度法の確立が,多くの Run の結果を細線化により解 析した後となったため,今回の報告では,細線化法に統一して求めた結果を掲載する。



図10 輝度法の解析アルゴリズムと課題

■屈折率

図 11 に測定した二波長の位相変化 $\Delta\phi$ 532nm $\geq\Delta\phi$ 780nm に、各波長における屈折率の濃度お よび温度係数のマトリクスを乗じることにより温度変化、濃度変化を求める方法を示した。原理は単 純であるが、実際は $\beta - \alpha$ のように大きな誤差率をもつ微小な値同士の引き算が分母にあることが誤 差の大きな要因となる。これら α , β や位相変化の比、S_T測定値が屈折率・位相の誤差に過敏反応し、 場合によっては測定値の符号が逆転してしまう問題があった。これは、二波長干渉計による測定が 抱える本質的な難しさであるといえる。本研究では、1)屈折率の温度係数測定、2)一波長解析によ り、課題を解決した。



図 11 ソーレ係数と微係数比および位相比との関係

本研究では,混合溶液中のザロール量を変化させた数種の試料を高密閉 Cell 内に用意し,試料 を加熱し,温度変化による干渉縞の移動から各波長の温度係数の値を測定した.



図 12	異なる手法を用い	いた屈折率の温	量度係数の測定
凶 12	異なる手法を用い	いた屈折率の温	量度係数の測力

表7 温度係数の改善

	532 nm	780 nm
<i>n</i> _T 10 ⁻⁴ K ⁻¹	-5.0 🏓 -4.43±0.03	-4.9 🏓 -4.25±0.03
n _c 10 ⁻³ mol% ⁻¹	-1.2	-0.8

先行して SCOF を用いて実施された FACET ミッションでは,屈折率計により測定した値を用いて いたが,本方法により精度が改善されたと考えられる.



図13 異なる手法を用いた屈折率の濃度係数の測定

表8濃度係数の改善

	5	532 nm	780 nm		
<i>n</i> _T 10 ⁻⁴ K ⁻¹	-5.0	-4.43±0.03	-4.9	-4.25±0.03	
n _c 10 ⁻³ mol% ⁻¹	-1.2	-1.3±0.3	-0.8	-1.2±0.2	

■1波長解析

1波長独立解析による S_T 算出を試みた. 位相変化は, 温度変化と濃度変化が重畳されて生じる. ここで, 温度変化の影響と濃度変化の影響の影響を分離するため, 以下のような方法を用いた. 物 質輸送に対して, 熱輸送が速いため, 温度勾配を付与した直後の位相変化はほぼ温度変化によるも のと考えられる. さらに, 温度が定常化した後の位相変化は濃度変化によるものとみなすことができ る. したがって, 全位相変化 $\Delta\phi(T,C)$ から平衡に達するまでの位相変化 $\Delta\phi(T)$ を引くことにより, 濃 度変化による位相変化 $\Delta\phi(C)$ を求めた.



図14 温度変化部と濃度変化部の分離



図 15 温度変化部での濃度変化量推定

本方法により,波長 532nm. 780nm それぞれ独立に解析し,低温端からの距離と位相変化の関係を求めた結果,図 16 のような関係が得られた.





図 16 に示す位相変化から温度変化,濃度変化と低温端からの距離との関係を算出した結果を図 17 に示す.ここで,観測視野の端(図中○で示した)で,二つの波長による測定値が一致するように温 度,濃度の微係数を改善した(表 9).

なっ 温及,服及以休致少以音								
		532 nm		780 nm				
<i>n</i> _T 10 ⁻⁴ K ⁻¹	-5.0	-4.43±0.03	-4.46	-4.9	-4.25±0.03	-4.28		
n _c 10 ⁻³ mol% ⁻¹	-1.2	-1.3±0.3	-1.5	-0.8	-1.2±0.2	-1.2		

表9 温度,濃度微係数の改善



図 17 低温端からの距離と温度変化量, 濃度変化量の関係

4.4 S₇の温度依存性

図 18, 19 は、それぞれ Cell1 および Cell2 における、中心温度 $T K \ge V - \nu$ 係数 S₇ との関係を示す. いずれの S₇も 10⁻³~10⁻²K⁻¹ オーダーに収まり、S₇の符号は、おおむね負の傾向となった.



図 18 ST の温度依存性(Cell1)



図 19 ST の温度依存性(Cell2)

従来の研究より, 非会合性溶液では, 図 20 に示すように密度の低い物質が高温側に濃縮するこ とが知られている(非会合性モデル[9]). 本実験で使用した試料では, これはブタノールが高温側に 濃縮することに対応する. このとき, 定義よりソーレ係数は負の値となる. 図 18 および図 19 より, ソ ーレ係数は概ね負の傾向にあり, 非会合性モデルと一致することがわかった. したがってザロール/t-ブタノールに対して, 熱力学的な物性値である粘性流動の活性化エネルギーからソーレ係数の推定 が行えることが示唆された. また, 粘性流動の活性化エネルギーはアンドレードの式により, 粘度の 温度依存性から算出することが可能な物性値である. したがって, 混合溶液の粘度測定から, ソーレ 係数が推定できることが示唆された. 定量的な検討には, 今後ザロール/t-ブタノールにおける粘性流 動の活性化エネルギーの精確な値が必要となる.



図 20 粘性流動の活性化エネルギーとソーレ係数との関係

Cell1 では明確な傾向が見られないが、Cell2 ではおよそ 40°C を境に、ソーレ係数の温度依存性 は、異なる傾向を示した。 40°C 以下では、温度上昇に伴い S_Tの絶対値が大きくなった一方で、 40°C 以上では、 温度上昇に伴い S_Tの絶対値が小さくなった。 40°C は、およそザロールの融点である。した がって、ザロールの融点を境に、溶液の挙動が変化したものと考えられる。そこで、ザロール/ブタノール の平衡状態図に着目すると、 40°C 付近は固液共存状態にあることがわかる。しかしながら、 実験終了 時に加熱を停止し、 セル中央付近の熱電対で図 21(a)、 21(b)のような試料の冷却曲線を取得したと ころ、 いくつかの Run において、 20°C 程度で発熱ピークが見られた。 これは、 加熱保持中は結晶を 含まない液相であり、 中心温度が 20°C 程度になったときに端部から結晶化したことを示すものであ る. したがって、 融点以下の温度では、 セル内試料全体において液相であったと考えられる。 この過 冷却現象が、 ソーレ係数の挙動に、 影響を与えたのではないかと考えられる。

また,図 22,23 に,それぞれ Cell1 および Cell2 における高温端と低温端の温度差と測定された ST の関係を示す.特に, Cell2 において,温度差の上昇に伴い,ソーレ係数が 0 に収束する傾向が 得られた.

各ソーレ係数の誤差 $\delta(S_T)$ は初期濃度 C_0 ,濃度勾配 ΔC ,温度勾配 ΔT ,濃度勾配の誤差 $\delta(\Delta C)$,温度勾配の誤差 $\delta(\Delta T)$ を代入し誤差伝播則を用いて以下の式から算出した.

$$\delta(S_T) = -\frac{1}{C_0(1-C_0)} \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta C}{\Delta T^2}\delta(\Delta T)\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta T}\delta(\Delta C)\right)^2}$$
(16)

温度勾配, 濃度勾配の誤差は, 前述の図 17 に示すような勾配の線形近似を行った際に算出される 標準誤差を採用しており, そのオーダーはほぼ全ての結果で一致した. 温度勾配の誤差オーダーは 10⁻¹程度, 濃度勾配の誤差オーダーは 10⁻³~10⁻²程度となった. この結果, ソーレ係数 Sr のオーダ ーがおおよそ 10⁻³~10⁻²K⁻¹ であることから, ソーレ係数の誤差に対する両勾配の標準誤差影響は大 きい. 今後, 輝度法による位相解析を行っていくことで, ソーレ係数 Sr の更なる誤差率の低減と高精 度化が見込まれる.





4.5 オンサーガーの相反定理の検証(1.1 目的1)に対応)

オンサーガーの相反定理から、

$$S_T = \frac{Q^*}{RT^2}$$

(17)

と表せる. 式(10)より, 輸送熱 Q'を一定と仮定すると, ソーレ係数 S₇は 1/7²に対して線形となる. こ こで, 図 18, 19 で示した S_Tの温度依存性のうち, ザロールの融点以上の結果を, 横軸を 1/7²として それぞれ図 24, 25 に示す. 図 24, 25 より, ソーレ係数 S₇は 1/7²に対して線形で得られた. これよ り, 45°C - 60°Cという温度範囲において輸送熱 Q'を一定と仮定すると, オンサーガーの相反定理の 成立を示唆する結果が得られた. しかしながら Cell1(図 24)において得られた S₇の符号は正負で統 ーされていなかった. これは理論的に説明することはできず今後の詳細な解析が課題である.



図 25 オンサーガーの相反定理の検証(Cell2)

4.6 拡散係数解析の検討

ソーレ効果により定常的な濃度勾配が形成された混合溶液に対し,急速に温度勾配を 0 に変化さ せると分子拡散が生じる.このときの濃度変化測定(図 26)から,ザロール/t-ブタノール系の拡散係 数測定を行った.まず,#2-09 において上述の輝度法と1波長独立解析により,任意の点における, 任意の時間の濃度 Cを取得した.次に,以下の差分式に適合する最適な拡散係数 Dを算出した.

$$C_{i,t+\Delta t} = C_{i,t} + \frac{D\Delta t}{\Delta x^2} (C_{i+1,t} - 2C_{i,t} + C_{i-1,t})$$
(18)

△x:メッシュ寸法, △t:タイムステップ, Ci,t:時刻た点 /における tert-ブチルアルコール濃度.

取得した拡散係数は概ね, $D = 1.1 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ であった. 一方で, ザロール/tert-ブチルアルコールの固液界面における物質流束から算出された拡散係数は $D = 1.3 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ であると報告れている[10]. 両者にわずかな差があるものの, 概ね同等と考えられる. したがって, 濃度勾配

が形成された混合溶液に対し,急速に温度勾配を 0 に変化させることで,概ね妥当な拡散係数の取 得が可能であることが示唆された.また,純粋な分子拡散から取得した拡散係数と,ソーレ効果を含 む固液界面の物質流速から取得した拡散係数が等しいことから,結晶成長過程におけるソーレ効果 による固液界面での物質輸送が,結晶成長速度に与える影響は無視できるほど小さいことが示唆さ れた.

同様の方法により、以下の差分式からソーレ係数を含めた非定常拡散方程式の理論式を検討する ことが可能であると考えられる。

 $C_{i,t+\Delta t} = C_{i,t} + D \frac{\Delta t}{1 + 2} \left(C_{i+1,t} - 2C_{i,t} + C_{i-1,t} \right) + \tau D S_T \frac{\Delta t}{1 + 2} \left(C_{i+1,t} - C_{i,t} \right)$

$$\Delta x$$

 Δx
 $\Delta m(T, C)$
濃度による干渉縞移動

(19)



4.7 地上実験への適用

今後は, 軌道上実験のデータをベンチマークとし, 地上で対流の影響を最小限にしながら S⊤を測 定する技術を確立していく.

地上実験で、セル内の温度分布と試料に添加したトレーサー粒子の観察から、試料セル横方向の 温度差が対流の駆動力となることを明らかにした。スケーリング評価により、溶液中の物質輸送が拡 散支配となるためには、少なくともキャビティの横幅は 2.8mm 以下である必要があることを明らかに した。



図 27 ガラスセルのキャビティ幅と試料レイノルズ数との関係

移流拡散方程式(無次元化)を用いたスケーリング評価式[11]は、以下のとおりである.

$$\frac{\partial C^{*}}{\partial t^{*}} + Re(V^{*} \cdot \nabla^{*})C^{*} = 1 \\ Sc \\ \nabla^{*2}C^{*} + \frac{1}{Sc} \frac{\beta_{c}}{\beta_{T}} S_{T}C_{0}(1-C_{0})\nabla^{*2}T^{*} \\ \hat{T} \\ \hat{$$

 S_{C} :シュミット数, β_{T} :熱膨張係数, β_{C} :質量膨張係数, *:無次元化

4.8 サクセスクライテリアの達成度

以上の結果を基に,本ミッションの運用上のサクセスクライテリアおよびサイエンスの観点における サクセスクライテリアの達成度を,それぞれ表 10 および表 11 に記載する.

サクセス	クライテリア	達成度	備考
Minimum	全溶融状態において、定常状態を目標とした	0	<u>各最低4条件実施済</u>
Success	温度設定等を行い,所定の時間供試体の温		<u></u>
	度データおよび干渉縞画像を取得できるこ		
	と. (各セルで最低 4 条件実施)		
Full	以下の全てを達成すること。(各セルで 16 条	0	セル1とセル2で16
Success	件実施)		条件実施済み
	・平衡液体,過冷却状態を目標とした温度設		
	定等を行い,所定の時間供試体の温度デー		
	タおよび干渉縞画像を取得できること.		
	・非定常、等温状態目標とした温度設定等を		
	行い,所定の時間供試体の温度データおよ		
	び干渉縞画像を取得できること。		
Extra	N/A	TBD	<u>追加 6RUN の承認に</u>
Success			<u>伴い軌道上データの</u>
			<u>追加取得済</u>

表10 運用上のサクセスクライテリアの達成度

○:達成, △:一部達成, ×:未達成

サクセス	クライテリア	達成度	備考
Minimum	JEM の軌道上環境(理想的 µG 環境)下にお	0	セル1とセル2の試料
Success	いて, 試料全溶・定常状態での Soret 係数を		<u>全溶の前条件でSoret</u>
	観測でき,オンサーガーの相反定理(理論		<u>係数を取得し,オンサ</u>
	式)の検証ができること. (<u>セル 1 とセル 2 の</u>		<u>ーガーの定理を検証</u>

表 11 サイエンスの観点におけるサクセスクライテリアの達成度

	試料全溶の前条件で Soret 係数を取得した)		<u>Lt</u> :
Full	以下の全てを達成し, Soret 係数の地上予測		
Success	手法,及び適応限界を獲得すること.		
	・平衡液体, 過冷却液体において Soret 係数	0	<u>・セル1とセル2の平</u>
	57を昇出でさる_と.		<u> </u>
			<u>t</u>
	・非定常,等温状態において拡散係数Dを算	0	<u>・RUN</u> #2-09 <u>の非定</u>
	出できること。(RUN#2-09の非定常, 等温状		<u>常, 等温状態において</u>
	態において拡散係数 D を算出した)		<u> 拡散係数 D を算出し</u>
			<u>t-</u>
		•	
	・熱力字理論式,定常(および非定常)拡散方	0	
	程式と議論し,理論検証できること. 		
			性モデルによる検証
		-	<u>により, 熱力学理論式</u>
	・地上における同一実験結果との比較によ	0	<u>を検証した</u>
	り,地上の運用限界を示せること。(スケーリ		<u>・スケーリング評価に</u>
	ング評価により,地上実験における溶液セル		<u>より,地上実験におけ</u>
	の寸法限界を示した)		<u>る溶液セルの寸法限</u>
			界を示した
Extra	以下のいずれかを達成すること.		
Success	・過冷却状態での Soret 係数測定において,	0	<u>•</u> RUN#2-15,#2-16 の
	これまでに発見されていない新しい現象と思		過冷却状態で, Soret
	われる結果を得ること.		係数の温度依存性に
			異なる傾向を認めた。
	・熱拡散による固液界面での物質輸送が,結	0	<u>・拡散係数の比較か</u>
	晶成長に与える影響を解明できること.		<u>ら, ソーレ効果の結晶</u>
			<u>成長に対する影響は</u>
			<u>小さいことが示唆され</u>
			<u>t-</u>

◎:高度に達成, ○:達成, △:一部達成, ×:未達成

5. 結言

ISS・きぼうミッション「Soret-Facet」により、以下の成果が得られた.

1) 「きぼう」船内の微小重力環境下において,技術的課題(ホッピングの補正,位相の誤差低 減,屈折率の微係数の補正)を解決しザロール/ブタノール混合溶液のソーレ係数を求めるこ とができた.

- 2) ソーレ効果の熱力学的な検討を行い、オンサーガーの相反定理の妥当性および非会合性モ デルの適用可能性を示唆する結果を得た.
- 3) 固相線以下の温度において、冷却曲線から、過冷却液体であることを示し、安定液体の温度 依存性とは異なる傾向を見出した。
- 4) 本方法による拡散係数測定法を確立した。得られた拡散係数が、結晶成長実験から求めた 拡散係数と同等であることから、ソーレ効果が結晶成長に与える影響は小さいと考えられる。
- 5) 地上でのソーレ係数測定における,スケール効果を利用した対流抑制の実現性,地上実験の限界を明らかにした.

<u>今後の展開</u>

▶ 地上実験

上記スケーリング評価により、地上で対流を抑制するためのセル寸法を明らかにした。当初、 地上実験で用いていたセルはこの基準を満たさず、対流の影響を大きく受けるものであり、その 影響を今回の微小重力実験との比較で明らかにした。今後、対流を抑制したセルを開発し、微 小重力実験結果をベンチマークとして、対流の影響がないと判断できる測定データ数を増やす。

▶ 熱力学的考察

上記のサクセスクライテリアで,高度に達成と判断できなかった理由として,まだ詳細な熱力 学的考察が定量的にできていないことが挙げられる.この主な原因は,二波長干渉計特有の解 析困難さによる誤差と,使用した試料の熱物性値の不足である.

今後,新たに確立した屈折率の微係数の補正や画像解析方法を用いて解析の精度,確度を 向上させるとともに,地上実験数を増やして,検討を行う.

また,拡散係数測定方法を確立したが,さらにプログラムを改善することにより,解析対象と する画像上のピクセル数を大幅に増加させることができる.また,地上実験により,異なる条件 での実験も可能となる.詳細な拡散係数を求めることにより,粘性流動の活性化エネルギーを, 拡散係数の温度依存性から推定することも可能となる.

過冷却領域で生じる現象の解明

今回の実験で,過冷却領域において安定液体とは異なる温度依存性が見られたが,詳細な 原因は未解明である.これは,上記の詳細な熱力学的考察を可能にすることにより検討可能で ある.具体的には,上記拡散係数の温度依存性が過冷却領域において特異な傾向を示すか検 討する.拡散係数が,安定液体と同一の傾向であれば,熱拡散係数 D_T に特異な傾向があるこ とを示すことができる.

参考文献

- [1] C.Soret, Archives des Sciences Physiques et Naturelles 2(1879)46-61.
- [2] J.K.Platten et al., J.Phys.Chem. B 111(2007)11524-11530.
- [3] S.Srinivansan et al., Int. J. Thermal Sci. 50(2011)1125-1137.
- [4] S.Van Vaerenbergh et al., J.Phys.Chem. B 102(1998)4426-4431.

- [5] S.Van Vaerenbergh *et al.*, Microgravity sci. technol. 18(2006)150-154.
- [6] V.Shevtsova et al., Comptes Renus Mecanique, 339(2011),310-317.
- [7] S.Duhr et al., Phys. Rev. Lett. 96(2006)168301-1-4.
- [8] K.S.Forland et al.(伊藤靖彦訳), Irreversible Thermodynamics, オーム社
- [9] M. Eslamian, et al., Phys. Rev., 80 (2009) 061201.
- [10] Y. Inatomi, FACET project experimental results report, (2011).
- [11] Y. Inatomi, et al., Mater. Trans. (2000) 1026.

6. 投稿論文

【掲載済み】

- Y. Mori, Y. Hashimoto, S. Suzuki, Y. Inatomi, Investigation of the Application of a Two-Wavelength Mach-Zehnder Interferometer to Measure Soret Coefficients, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, 12 (2014) 37.(ガラスの熱膨張考慮によるSoret係数の精度向上)
- T. Osada, Y. Hashimoto, M. Tomaru, S. Suzuki, Y. Inatomi, Y. Ito, T. Shimaoka, *Improvement of Interference Fringe Analysis for Soret Coefficient Measuremet in Soret- Facet Mission*, Int. J. Microgravity Sci. Appl., 33 (2016) 330407.(観測視野の大きさと干 渉縞解析精度との関係)
- M. Tomaru, T. Osada, I. Orikasa, S. Suzuki, Y. Inatomi, Analysis Method Using Two-Wavelength Mach-Zehnder Interferometer for the Measurement of Soret Coefficients in Soret-Facet Mission on ISS, I., Microgravity Sci. Technol., (2018). DOI: 10.1007/s12217-018-9664-z(一波長独立解析の提案) (IF=1.357(2017/2018))

【改訂中】

 Takuma Osada, Isamu Orikasa, Momoko Tomaru, Bumpei Shirane, Shinsuke Suzuki, Yuko Inatomi, Ichiro Ueno, *Investigation of Suppressing Convection for Soret Coefficients Measurement*, International Journal of Heat and Mass Transfer, (投稿時の ID, Ref: HMT_2018_4513), Reject であったが,好意的教示があり,これに従った修正後, 同誌に再度審査可能との見込みで改訂を行っている.

【投稿予定】

 Isamu Orikasa, Takuma Osada, Momoko Tomaru, Shinsuke Suzuki, Yuko Inatomi, Improvement of the phase analysis by converting luminance into phase for Soret coefficient measurements in a microgravity environment (輝度法に関する論文), International journal of Microgravity Science and Application. (原稿完成. 共著者間での 確認作業中)

別紙8−2

「その場観察による溶液中のソーレ効果の解明(Soret Facet)」 平成30年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果

代表研究者:鈴木 進補(早稲田大学)

総合評価

A:目標を充分に達成した(フルサクセス相当以上)

液体の熱拡散を微小重力環境下で測定し、得られた結果から、ソーレ係数の測定、オン サーガーの相反定理の検証、拡散係数の評価、過冷却液体での熱拡散など非平衡熱力学に 関する成果を得るという計画の下、物質材料分野の宇宙実験に於ける、典型的な仮説実証 型の研究成果が得られたことが評価される。一波長独立解析によってソーレ係数が測定でき ることを示した点、また、輝度法を用いて十分な統計量を得る手法を新規導入し、測定誤差の 低減につなげた点は、重要な進展であった。

今回得られたデータのより詳細な解析、濃度勾配の測定精度を上げたより精度の高いデー タの蓄積を目指す計画の継続が期待される.非平衡熱力学分野にデータを蓄積するという観 点から,解析技術の開発、発展に多大な貢献をした.溶液結晶化観察装置(SCOF)の利用に 関して、結晶成長観察だけでなく,溶液科学への適用を示したという点も評価できる.

平成31年2月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(物質・物理科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション

「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明(Group Combustion)」

研究成果報告書

代表研究者;三上真人(山口大学)

2019年1月

2019年12月 A 改訂(成果リストへの項目追加)

1. 緒言

航空エンジンのように液体燃料を安定的に連続燃焼させるためには、火炎基部において連続供 給される燃料噴霧中の燃え広がりとその後の全体の群燃焼(Group Combustion)の発現が必要で ある(図1).また、航空エンジンの高空失火後にエンジン再始動を行う際の再着火時には、燃料噴 霧の群燃焼状態への確実な移行が必要となる.定常状態への回復において、燃焼室内圧力は高空 失火後の負圧から定常燃焼時の高圧力までの広い範囲で変化する.しかしながら、低圧から高圧ま での幅広い圧力における噴霧の燃え広がりや群燃焼発生特性は完全には明らかにされておらず、 その燃焼制御において試行錯誤的なものが多く存在しているのが現状である.噴霧中の燃え広がり を試行錯誤によらずに制御し、高効率燃焼を実現するためには、噴霧を構成する液滴間の燃え広が り機構の正確な把握とそれを噴霧全体の群燃焼に展開することが可能なモデルおよびシミュレーシ ョン技術が必要である.

燃料液滴群の燃焼に関しては Chiu の液滴群燃焼理論[1]が有名だが, 定常理論に基づいたもの であるため, 群燃焼がどのように発現するかといった過渡的過程を記述することはできない. 本研究 代表者の Mikami ら[2]は, 対向流場での予混合噴霧の燃焼における火炎前縁部の詳細観察を行い, 未燃液滴への燃え広がりという過渡的過程を経て噴霧全体が燃焼する群燃焼が発現し, 火炎定在 化を生じさせることを示した. よって, 液滴間燃え広がりによる群燃焼の発現機構を知ることが重要 である.

本研究代表者の Mikami らは,独自に開発した液滴列生成技術[3]を用い,微小重力場において 液滴間燃え広がり実験(図 2 [4])を 2000 年以降活発に行ってきており,周囲気体温度の影響,低 圧挙動,局所干渉効果など世界でも最も多くの知見を蓄積してきている(例えば, Mikami ら[4, 5]). さらに,液滴間燃え広がり機構を液滴群の局所つながりルールとし,複雑系としてのランダム分散液





Unburned droplet





図 3 ランダム分散液滴群の燃え広がりのパーコレーション計算例(水色:液滴,朱色:火炎)

滴群の燃え広がりへと展開する新たなパーコレーションモデルを提案し,群燃焼発現機構を調べて いる(図3[6]).パーコレーションモデルとしては Umemura・Takamori [7]の研究があるが, Mikami らのモデルは微小重力実験の結果を用いて群燃焼発現限界の記述に特化したモデルである.本研 究手法は,複雑系において現象を支配する最小次元の構成要素内のミクロな熱的情報伝達ルール を微小重力科学により極限理解し,この情報伝達ルールをもとにしたパーコレーション理論により複 雑系のマクロな挙動を理解するというアプローチとも言える.

微小重力場を利用した液滴燃焼研究は 1950 年代に Kumagai Isoda [8]によりはじめられ、多くの 知見が得られてきた.液滴燃焼研究は航空エンジンなどに見られる噴霧燃焼の基礎研究として行わ れているが,噴霧燃焼の機構解明に必ずしも適用されておらず,両研究の間には依然として大きな ギャップが存在している.近年, ISS の米国実験棟で液滴燃焼実験の FLEX, FLEX-2 が行われ,熱 炎の消炎後に発生した冷炎により液滴蒸発が維持されることを世界で初めて示した(例えば, Nayagam ら[9]).このように宇宙燃焼実験により興味深い知見が得られているが,それらも,単一 液滴または二液滴を対象としたものである.微小重力場での液滴燃焼から,液滴間燃え広がりを通 して、ランダム分散液滴群の燃え広がりへつなげ,最終的に噴霧燃焼へと繋げる研究を行っている のは本研究グループのみである.本軌道上実験は「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発 現メカニズムの解明(Group Combustion)」と題している.

図 4 に燃料噴霧における燃え広がりの概念図を示す.噴霧中の液滴のランダム分散性により液 滴間隔は均一ではないため,液滴スケールの燃え広がりは,局所の液滴干渉の影響を受けて変化 することが考えられる.また,実際の液滴は空間を移動可能であるため,自由液滴の影響も考えら れる.さらに,群火炎から別の液滴クラスターへの燃え広がりでは,クラスタースケールに依存した 輻射熱損失の影響も受けて変化することが考えられる.そこで,本軌道上実験では,これまでの燃 え広がりのパーコレーションモデルには考慮されていないこれらの3つの影響について,良質な長時 間微小重力場において詳細に調べることを目的とした.長時間微小重力場を利用することで,大規 模なランダム分散液滴群,液滴群要素,移動可能液滴列,液滴クラスター列など,地上の短時間微 小重力場では実現できなかった目的に応じた液滴配置を高精度に実現し,それらの燃焼の長時間 詳細観察を実現できた.



2. 研究計画

2.1 研究目標

1. で示した液滴間燃え広がりに及ぼす影響のうち,実験1では局所液滴干渉の影響,実験2で は自由液滴の影響,実験3では輻射熱損失の影響について調べた.

実験1では、図 5 左に示す液滴 I, C, B, A, L から成る液滴群要素を用い、干渉する2液滴また は3液滴まわりの火炎から次液滴への燃え広がりについて、燃え広がり限界分布を中心に調べた. また、ランダム分散液滴群の燃え広がり実験も行い、局所干渉効果を調べた.表1のサクセスクラ イテリアに示すとおり、液滴群要素実験では干渉効果の基本特性の把握をミニマムサクセスとし、 詳細特性の把握をフルサクセスとした.ランダム分散液滴群実験では、群燃焼が発現する限界で ある臨界点条件付近に注目し、基本特性をミニマムサクセス、詳細特性をフルサクセスとした.

実験2では、図 6 に示されるように直線ファイバー上に配置された移動可能液滴間の燃え広がり について調べた.着火装置から移動可能液滴までの間には固定液滴を配置した.表1のサクセス クライテリアに示すとおり、液滴の移動を考慮した群燃焼予測モデルの基本検証データとして等間 隔液滴列を用いた液滴間燃え広がり特性の把握を行うことをミニマムサクセスとし、不等間隔液滴 列を用いて詳細検証データを取得することをフルサクセスとした.

実験3では,図7に示されるように複数液滴クラスター(表1では液滴群)の間隔を徐徐に広く配置した液滴クラスター列の燃え広がりについて調べた.表1のサクセスクライテリアに示すとおり, 異なる群火炎サイズに対してクラスター間の燃え広がりの基本特性の把握を行うことをミニマムサ クセスとし,詳細特性の把握を行うことをフルサクセスとした.



図 5 実験1の液滴群要素(左)とランダム分散液滴群(右)





図7 実験3の液滴クラスター列(上:2液滴クラスター,下:5液滴クラスター)

サク	実験1	実験2	実験3
セスレ	(液滴干渉の影響)	(液滴移動の影響)	(輻射の影響)
ヘル			
ミニマ	<u>液滴群要素実験</u>	等間隔移動可能液滴列を	群火炎から液滴
ムサ	・2液滴干渉が燃え広がり限界距離	用いた2液滴間燃え広がり	群への燃え広が
クセス	分布に及ぼす影響の基本特性の解	機構解明、燃え広がり限	りについて、群火
	明	界距離の取得、および液	炎のサイズが燃
	・燃え広がり限界距離分布に及ぼす	滴の移動を考慮した群燃	え広がり限界距
	3液滴目の影響有無の確認	焼予測モデルの基本検証	離と燃え広がり
	ランダム分散液滴群実験		速度に及ぼす基
	臨界占有率前後の燃焼挙動の違い		本的な影響の解
	の確認		明
フル	液滴群要素実験	・等間隔および不等間隔	群火炎から液滴
サク	・2液滴干渉が燃え広がり限界距離	移動可能液滴列を用いた	群への燃え広が
ヤス	分布と燃え広がり速度に及ぼす影響	2液滴間燃え広がり機構	りについて、群火
	の詳細特性の解明	解明、燃え広がり限界距	炎のサイズが燃
	・燃え広がり限界距離分布に及ぼす	離の取得、および液滴の	え広がり限界距
	3 流海日の影響の其木特性の解明	移動を考慮した群燃焼予	離と燃え広がり
	この方にの影響の本本特にの解め	測モデルの詳細検証	速度に及ぼす影
	<u>ノノアム刀取収満研奏款</u> 	1. 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	※反に及る デポ 郷の詳細解明
	・ 協 芥 ム 有 卒 則 俊 の 燃 焼 辛 動 の 遅 い	一 移動可能及高列に0500の	音切叶加胜的
	の円現性確認		
	・臨界点での燃焼挙動の詳細特性の	現象に、スケールファクタ	
	解明	(代衣う法を液周単位と考	
		える)か及はす影響に関す	
		る基礎的データの取得	
エクス	<u>液滴群要素実験</u>	スケールファクタを考慮に	群火炎から液滴
トラサ	3液滴干渉が燃え広がり限界距離分	入れた移動可能液滴列の	群への燃え広が
クセス	布と燃え広がり速度に及ぼす影響の	群燃焼予測モデルを詳細	りについて、燃え
	詳細特性の解明	に検証するためのデータ	広がり限界距離
	ランダム分散液滴群実験	取得	と燃え広がり速
	液滴干渉時の燃え広がり限界距離		度に及ぼす群火
	分布を考慮したパーコレーションモデ		炎幅の影響確認
	ルにより得られた臨界占有率での燃		
	焼 学 動の 詳細 特性 解 明		

表 1 サクセスクライテリア
2.2 体制

研究チーム体制, JAXA支援体制および体制評価を以下に示す.

・研究チーム体制

代表研究者:

三上真人 山口大学:研究取りまとめ・実験1の立案・実施・解析

共同研究者:

野村浩司 日本大学:実験2の立案・実施・解析

森上修 九州大学: TFP法(SiC発光輝度計測に基づく温度計測法)検討

梅村章 名古屋大学: 燃え広がり機構検討

瀬尾健彦 山口大学:実験1の実施・解析

菅沼祐介 日本大学:実験2の実施・解析

菊池政雄 JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター:数値計算検討

Daniel L. Dietrich NASA Glenn Research Center: 実験3の立案・実施・解析

研究協力者

山口大学大学院生,学部生,日本大学大学院生,学部生

・JAXA支援体制

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター, 宇宙科学 研究所 ISS科学プロジェクト室(当時):実験計画・供試体開発調整, 軌道上実験運用 株式会社IHI検査計測:供試体(液滴群燃焼実験装置(GCEM))開発 一般財団法人 日本宇宙フォーラム:個別調整会支援,実験計画作成支援 有人宇宙システム(㈱:軌道上実験運用管制,実験運用計画支援 株式会社エイ・イー・エス: GCEM開発支援

・体制評価:最高年8回の個別調整会に研究チームおよび JAXA 支援チームが一同に会し、研究計画,装置設計・開発,軌道上実験運用などに関するアクションアイテムへの対応が協議され、 適切に処置され、各フェーズにおいて体制が充分に機能し役割を果たした.実験3の主体である NASA との協議も JAXA の支援により円滑に進んだ.特に、初期機能検証時の不具合への 原因特定およびその後の対応は JAXA により的確になされた.さらに、軌道上実験運用に参画 した研究協力者の学生達への指導、ホームページ作成やプレスリリース発信などの広報、飛行 後解析、成果の取りまとめ、論文の共同執筆など、JAXA から十分な支援をいただいた.

2.3 スケジュール

計画選定から飛行後解析までのスケジュールを以下に示す.

2008年2月22日 実験候補選定 「きぼう」船内実験室第二期利用に向けた候補テーマに採択 2010年10月18日 システム定義審査会(SDR)

(2011年2月 多目的実験ラック(MSPR)および燃焼実験チャンバ(CCE)が「きぼう」に設置)

2011年8月11日 プロジェクト移行審査会

2011年11月28日 「きぼう」利用実験正式テーマに決定

- 2012年1月17日 基本設計審査会(PDR)
- 2012年5月10日 フェーズ0/I 安全審査会(PSRP)
- 2013年1月31日 フェーズII 安全審査会(PSRP)

2013年3月18日 詳細設計審査会(CDR)

2014年6月10日 フェーズIII 安全審査会(PSRP)

- 2014年7月10日 認定試験後審查会(PQR)/出荷前審查(PSR)実施
- (2014年10月29日 シグナス CRS Orb-3軌道投入失敗)
- (2015年5月16日 プログレス59P軌道投入失敗)
- 2015年6月28日 スペースX CRS-7 (SpX-7)にて一部の実験機器(ハイスピードカメラ, デジタル ビデオカメラ)を打ち上げるも打ち上げ失敗
- 2015年8月19日 こうのとり5号機にて供試体(液滴群燃焼実験装置(GCEM))本体,ガスボトル 他打ち上げ
- 2016年4月1日 JAXA-山口大学 共同研究契約開始
- 2016年7月18日 スペースX CRS-9 (SpX-9)にて残りの実験機器(ハイスピードカメラ, デジタル ビデオカメラ)打ち上げ
- 2016年9月27日~28日 供試体(GCEM)の燃焼実験チャンバ(CCE)内へのセットアップ, CCEおよ びガスボトルの多目的実験ラック(MSPR)へのセットアップ
- 2016年9月29日~2017年2月16日 軌道上GCEM初期機能検証
- 2017年2月1日 リーク許容運用開始
- 2017年2月17日~7月6日 軌道上燃焼実験運用
- 2017年8月17日 個別調整会にて軌道上実験運用結果,実験結果(速報)および解析状況報告
- 2017年9月28日 共同研究一次報告書提出
- 2018年8月31日 共同研究最終報告書提出
- 2019年3月31日 共同研究契約終了
- 3. 実験準備·運用
- 3.1 実験装置および実験供試体

実験供試体の液滴群燃焼実験装置(GCEM: Group Combustion Experiment Module)について, 概念設計,要素試作試験,EM 製作・地上試験,EM 航空機実験,を通して開発を行った.

図 8 に GCEM 本体図, 図 9 に GCEM の燃焼容器および燃焼容器内機器の図, 表 2 に GCEM の 主要仕様を示す. 燃焼容器内で複数の正デカン液滴を所定のパターンに配置し, 燃え広がりを生じ させ, 現象は容器のガラス窓を通して, 容器外からカメラ撮影を行った.



図 8 GCEM 本体



図 9 燃焼容器および燃焼容器内機器

表 2 GCEM 主要仕様

燃料	液体正デカン(C10H22)、持ち込み量 9.5ml×2 式		
液滴径	0.7、0.8、1.0、1.2、1.4、2.0[mm]		
液滴数	5個~152個		
φ14μm SiC ファイバー	格子状、30×30本、4mm 間隔、格子面 116×116[mm]		
φ78μm SiC ファイバー	直線、1本		
実験時酸素濃度	17~21 [%]		
実験時圧力	0.1[MPa]		
燃焼容器内寸法	282(幅)×235(奥行)×205(高さ)[mm]		
デジタルカメラ撮影	撮影範囲 120×130[mm]		
	静止画解像度 5616×3744[pixel]		
	静止画分解能 35μm/1pixel		
	動画解像度 1920×1080[pixel]		
	フレームレート 30[fps]		
§速度カメラ撮影 撮影範囲 20×8[mm]			
	動画解像度 1280×508[pixel]		
	フレームレート 1006[fps]		
実験回数	実験1:97回、実験2:30回、実験3:22回		

実験1および実験3では、直径 14µm の SiC ファイバーを正方格子状に 30×30 本配置したファイ バー交点の所定位置に液滴を一つずつ生成することで、実験1の液滴群要素、ランダム分散液滴群、 実験3の液滴クラスター列を生成した、実験2においては直径 79µm の SiC ファイバーー本を配置 し、固定液滴はファイバー上のビーズ位置に、移動可能液滴はファイバー上にレーザー照射により 生成した荒れスポット位置に生成した、シリンジ内の正デカンを燃料供給ガラス管ニードルへと供給 し、ニードル先端位置を3軸移動ステージにより移動させることで、所定の位置に液滴を生成した. 移動ステージには LED バックライトが設置されている. 初期液滴直径を計測する際はバックライトを 用い, デジタルビデオカメラで静止画撮影を行った. ランダム分散液滴群は液滴群生成中の予蒸発 による液滴直径減少を考慮することで, 着火時に等直径液滴群が形成されるようにした. 直径減少 を予測するために必要な蒸発速度は初期機能検証フェーズにおいて求めた. この詳細については 4.1.2(a)項において後述する.

液滴の着火は熱線着火装置により行った.着火用熱線は,実験1用にはバックアップを含めて格 子ファイバーの2辺のそれぞれの中央に設置し,実験2用には直線ファイバー端に設置し,実験3用 には格子ファイバー端付近に設置した.燃焼後にファイバーに付着したススおよび未燃液滴は窒素 ガスを噴射し除去を行った.

実験1および実験3では燃え広がり挙動をデジタルビデオカメラで動画撮影を行った.実験3では 燃え広がり中の火炎と液滴の撮影を行うために,液滴クラスター列背後にバックライトを配置し,点 滅させた.実験2では燃え広がり挙動をデジタルビデオカメラ撮影を行い,移動可能液滴の挙動をハ イスピードカメラを用いて撮影を行った.

実験1ではファイバー発光輝度を元に温度計測を行うTFP (Thin Filament Pyrometry)法を用いた. TFP 法は事前に地上試験により熱電対を用いた温度校正を行っている.

実験1および実験2では燃焼時の周囲気体にはボンベから供給される空気を用いた. 燃焼後の排 気時には燃焼容器内を真空引きし, 空気を供給し, 初期状態で 0.1MPa とした. 実験3では窒素ガス を用いて酸素濃度を変更可能とした. GCEM は MSPR のワークボリューム(WV)のコールドプレート 上に設置された CCE 内に設置されており, 燃焼容器内機器の発熱量および燃焼による発熱量はコ ールドプレートへと排熱され, 初期状態で 20℃であった.

3.2 実験運用

軌道上実験運用は大別して,供試体設置,初期機能検証,燃焼実験,クローズアウト,のフェーズで行った.

3.2.1 供試体設置

供試体設置は大西卓也宇宙飛行士により行われた.液滴群燃焼実験装置(GCEM)を燃焼実験チャンバ(CCE)内へセットアップし、CCE を多目的実験ラック(MSPR)ワークボリューム(WV)へセットアップし、ガスボトルを MSPR 小規模実験エリア(SEA)にセットアップした.

3.2.2 初期機能検証

初期機能検証は、リークチェック、トラバース機構・カメラフォーカス・ファイバー健全性確認、液滴 蒸発基礎データ取得、実験1(液滴群要素実験)・実験2・実験3の模擬液滴生成確認、実験1ランダ ム分散液滴群の生成・蒸発確認および干渉係数決定、各実験の着火シーケンス確認、から成ってお り、当初は14日間で行う予定であった。

リークチェック時に圧力のテレメトリーからリークが確認され、リークレートが定量化された. リーク 箇所絞り込みの結果、CCE内のGCEM空気供給系配管からリークしていることが明らかになった. 空気リークに伴うCCE内酸素濃度および圧力上昇の観点からの安全性確認、空気リソース消費量 の確認、空気供給系へのCCE内窒素混入に伴うGCEM内酸素濃度低下による燃焼実験への影響 確認、を行った結果、空気供給系手動バルブをクルーが追加開閉する条件付のリーク許容運用によ り、ボトル追加打ち上げを行うことなく、安全に、かつGCEM内酸素濃度に対し無視できる程度の影 響のもと燃焼実験が可能であるとの結論に至った. これにより、JAXA内およびNASAとの調整も踏 まえ、2017年2月1日よりリーク許容運用を開始し、初期機能検証の残りの項目を予定どおり実施 した.

3.2.3 燃焼実験

通常の燃焼実験運用は,通信確認,燃料供給ガラスニードル初期化,実験用液滴生成,燃焼実 験実施,スス除去,真空排気,空気供給,ビデオデータダウンリンク,から成る.クルーの作業は当 初予定では排気系手動バルブの開閉のみであったが,リーク許容運用への変更に伴い,空気供給 系手動バルブの開閉も追加された.これ以外の作業は地上からコマンドを送ることで行った.

クルー活動による G ジッターが燃焼挙動に影響することを避けるため, 燃焼実験はクルー就寝時間に実施した. 複数の燃焼実験を空気置換することなく連続して実施する際には, 直前の燃焼実験後に燃焼容器内の酸素濃度場, 温度場, 未燃液滴蒸発に伴う濃度場が平衡となるまでの時間として1時間の間隔を空けてから次の燃焼実験を開始した.

初期機能検証最終項目として、実験1ランダム分散液滴群の着火シーケンス確認を臨界点付近の液滴群を対象に行ったが、この着火後の燃え広がりが正常に行われたため、この実験のデータを 正式な燃焼実験データとし、通常の燃焼実験運用の開始とした.この実験後、実験2の移動可能液 滴用ファイバーへのスス付着状況が確認され、スス付着が無視できる程度であったことから、実験2 を行う前に、実験1ランダム分散液滴群実験のミニマムサクセス条件の実験を実施した.

その後の当初の予定の実験実施順は、実験1、3による実験2用ファイバーへのススの付着を避けるために実験2のミニマムサクセス条件およびフルサクセス条件をまず実施するというものだったが、リーク許容運用への変更に伴い、ミニマムサクセス条件の実験2、実験1、実験3、フルサクセス条件の実験2、実験1、実験3、フルサクセス条件の実験2、実験1、実験3、の順番での実施へと変更した. なお、実験1の液滴群要素実験においては基本的に予め定めた条件分岐に従い、次の液滴パターンを選定した.実験を進めるうえで、予期せぬ新しい現象が観察されたため、エクストラサクセス条件を最低限達成可能な条件に減じたうえで、新しい現象に対する仮説を検証するための追加実験を実施した.実験2では、ミニマムサクセス条件の途中で実験結果に基づいてミニマムサクセス条件、フルサクセス/エクストラサクセス条件の見直しを行った.実験3では予定された条件を実施した.

液滴保持用ファイバーに付着したススは窒素ガスジェットにより除去する予定であったが,ススの 多くはファイバー上に残り,生成後の液滴保持位置が所定の位置からずれる場合が多くあった.こ の影響を低減するため,実験1液滴群要素実験では,ススの付着の少ない領域に液滴群要素を生 成し,着火位置から液滴群要素まで 1mm 液滴を 12mm 間隔で配置する変更を行った.実験2にお いては,格子ファイバー側に生成した液滴列に形成された火炎により,実験2用ファイバー上のスス を燃焼除去することも試みた,

また,着火装置の熱線の不具合に応じていくつか対応を行った.実験3用の着火用熱線が実験に 伴い徐徐に変形し,第一液滴が熱線に付着するまでとなった.その後は,着火を実験1用の熱線1と し,熱線1から実験3領域までは 0.8mm 液滴を 8mm 間隔で配置する変更を行った.熱線1も変形し たが,着火用液滴の直径を 0.8mm とすることで,熱線1に付着せず着火が可能となった.実験1用 の熱線1と熱線2はススの付着状況に応じてどちらかを使用していたが,熱線2が破断して以降は熱 線1のみを用いた運用とした.

3.2.4 クローズアウト

クローズアウトにおいては、クルーがガスボンベを MSPR の SEA からの取り外しを行い、GCEM を含む CCE を MSPR から取り外しを行った.

4. 実験結果および成果

4.1 実験1

ランダムに分散した液滴群において液滴間隔は一様ではないため, 燃え広がりは液滴間隔の小 さいところで液滴干渉の影響を受けて変化することが考えられる. そこで, 実験1では, ランダム分 散液滴群の群燃焼発現限界(パーコレーション理論の臨界点に相当)付近における燃え広がりを記 述する最小限の構成要素としての液滴群要素を用いた実験, そして, ランダム分散液滴群を用いた 実験とを行った.

4.1.1 液滴群要素実験

液滴群要素は図 5 左に示されるように、点火用液滴 I から干渉用液滴 C, B, A へと燃え広がった 後の燃え広がり限界調査用液滴 L への燃え広がりの可否について、液滴 L の位置を変化させて調 べた. ミニマムサクセス条件では、液滴 B と A のみが近接した2液滴干渉時について、液滴 L の基 本配置条件対して燃え広がり限界を調べ、フルサクセス条件では液滴 L の配置を増やし燃え広がり 限界を詳細に調べた. 3液滴干渉時の燃え広がり限界ではミニマムサクセス条件およびフルサクセ ス条件において液滴 L の基本配置条件に対して調査を行い、エクストラサクセス条件において詳細 に調査を行った.

図 10 に2液滴干渉時と3液滴干渉時の液滴 L への代表的な燃え広がり挙動を示す. このような 実験を液滴 L の位置を変化させて繰り返し,液滴 L への燃え広がり可否をプロットした燃え広がり限 界距離分布マップを代表的な2液滴干渉配置と3液滴干渉配置の場合について図 11 に示す.空間 座標は初期液滴直径 doを用いて正規化している. 燃え広がり限界はO(燃え広がり可)と×(燃え広 がり不可)の間に存在している. 図中には,参考値として,液滴 A 単独の燃え広がり限界(FS1, (S/do)limit=14),液滴 B・A の質量中心に合体した単一液滴 M が存在した場合の仮想燃え広がり限 界(FS2, 2^{1/3}(S/do)limit),液滴 C・B・A の質量中心に合体した単一液滴 M が存在した場合の仮想 燃え広がり限界(FS3, 3^{1/3}(S/do)limit)も示している. これより,2液滴干渉時の燃え広がり限界は液 滴 A 単独の場合の燃え広がり限界(FS1)より大きく,FS2 と同じか若干小さい程度ということがわか る. これに対し,3液滴干渉時の燃え広がり限界は,FS2 より大きくFS3 より小さいことがわかる.





図 11 干渉液滴まわりの燃え広がり限界距離分布 (左:2液滴 B・A 干渉時,右:3液滴 C・B・A 干渉時)



図 12 液滴群要素燃え広がり時の干渉液滴まわりの 1200K 領域の時間変化 (左:2液滴 B・A 干渉時, 右:3液滴 C・B・A 干渉時)

図 12 に液滴群要素燃え広がり時の干渉液滴まわりの 1200K 領域の時間変化を示す. ここでは, 液滴 L への燃え広がりは生じない場合を示している. 1200K は GCEM のデジタルビデオカメラの SiC ファイバー発光画像から温度を算出可能な最低温度であり,火炎周囲の高温領域を示す温度 の参照値とした.正規化時間として時間 t を初期液滴直径の2乗値 d₀²で除した t/d₀²を用いている. 2液滴干渉時,3液滴干渉時ともに高温領域は円形(球状)に広がっており,その中心は干渉液滴の 質量中心付近と言え,図 11 の FS2 および FS3 を用いた議論と整合している.

Mikamiら[10]は径違い液滴間の燃え広がり限界は燃え広がり起点液滴Aの燃焼寿命で決まることを示した.この考え方を干渉液滴からの燃え広がりに拡張し,干渉液滴の質量中心の仮想液滴 M から液滴L への燃え広がり限界距離を液滴Aの燃焼寿命に対してプロットした図を図13に示す.ここでは,3液滴干渉時に加え2液滴干渉時の液滴Cの位置が異なる二つの場合も含む.この図より,破線で示される干渉液滴の質量中心の仮想液滴 M からの燃え広がり限界距離は燃え広がり起点となる液滴A の燃焼時間が増大することで拡大することが明らかとなった.

以上のとおり,本軌道上実験により2液滴干渉時および3液滴干渉時の燃え広がりの詳細特性が 明らかとなったうえ,両者を統一した液滴干渉時の燃え広がり限界に関する考え方をまとめることが できた.これにより,液滴群要素実験の知見をランダム分散液滴群の燃え広がりにおける局所干渉 効果として適用することが可能となり,エクストラサクセス条件まで高度に達成できたと言える.



図 13 干渉液滴燃焼時間と干渉液滴質量中心からの燃え広がり限界距離の関係 (2液滴干渉,3液滴干渉ともに含む)

4.1.2 ランダム分散液滴群実験

(a) 初期検証: 大規模液滴群の生成·再現性

本軌道上実験で用いたランダム分散デカン液滴群の例を図 14 に示す.液滴群の液滴は一つ一 つ液滴生成装置により所定のファイバー交点に生成されるため,この図の 97 液滴の場合,最初の 液滴生成開始から最後の液滴の生成終了まで約 20 分を要した.このように一つ一つ液滴を生成す ることで液滴群を生成し,着火時の液滴径が同一となるようにするためには,生成順の早い液滴の 予蒸発による直径減少を考慮した液滴群生成が必要となる.このような長時間微小重力場での大規 模液滴群生成は世界で初めてであるため,燃焼実験に先立ち,軌道上での初期機能検証フェーズ において GCEM による液滴蒸発速度計測およびそれを考慮した液滴群生成の確認,特に液滴直径 の一様性の確認と再現性の確認を行った.



図 14 30×30本 SiC ファイバー格子上のランダム分散液滴群例(97液滴)

図 15 に蒸発の基礎データとして、293K 雰囲気における単一液滴および干渉二液滴の蒸発中の バックライト写真および液滴直径二乗値 d² の時間変化を示す.このような単純な系でありながら、こ れまで 3000s もの長時間の液滴蒸発を観察したのも世界で初めてである. d²-t カーブの近似直線 の 傾 き か ら 求 め た 蒸 発 速 度 定 数 は 複 数 回 の 再 現 性 確 認 の 後, 単 一 液 滴 の 場 合 K_s=0.000260mm²/s となった.干渉二液滴の蒸発速度定数は無次元液滴間隔 S/d_g=3.6 に対し K=0.000245mm²/s となり、干渉係数は γ =K/K_s=0.93 となった.

次に,単一液滴の蒸発速度定数 Ksを用いて予蒸発推算を行い,着火タイミングにおいて等直径 となるように生成時の液滴直径をコントロールしてランダム分散液滴群生成を行った.次に 97 個液 滴のランダム分散液滴群の生成を行い,液滴群生成終了時の液滴直径の目標値からのずれ,およ び,群全体の干渉係数を求めた.i 番目の生成時の液滴直径 dgi は,液滴生成後の着火待ち時間 (to-tgi)中の液滴直径減少を以下の式で考慮して与えた.

$$d_{gi}^2 = d_0^2 + K(t_0 - t_{gi})$$

なお、着火時液滴直径はすべての液滴に対し d₀=1mm とした. 蒸発速度定数 K にはすべての液滴 に対し単一液滴の K_sを用いた. 図 16 に各液滴の初期液滴直径(着火時液滴直径)の目標値から のずれ α_i を蒸発時間 t₀-t_{gi}に対して示す. 液滴群の蒸発速度定数が単一液滴の蒸発速度定数 K_s と異なっていたために α_i が生じたと考えると、 α_i は群全体の干渉係数 γ を用いて以下の式で表される.

$$\alpha_i = (1 - \gamma) K_S(t_0 - t_{ai}) / (2d_0^2)$$

よって,図 16 のグラフの最小二乗一次近似により原点を通る直線の傾きを求めることで群全体の干 渉係数γを求めるとγ=0.65,蒸発速度定数は K=γKs=0.00017mm²/s となった.

干渉係数を求めるうえでの図 16 の不確かさも考慮し, 干渉係数をγ=0.7 とし, 図 14 に示される同 じ 97 液滴配置の液滴群の生成および燃え広がり実験をそれぞれ2回行った. 図 17 に 2 回の実験 の初期液滴直径 d₀を液滴番号に対して示す. 初期直径が大きくずれた液滴も存在するが, 全体とし て初期液滴直径はある範囲内に収まっている. 1回目の条件では, 平均値が d₀=1.03mm, 相対標準 偏差が 2.4%であり, 2回目は平均値が d₀=1.05mm, 相対標準偏差が 4.5%であり, 初期液滴径につ いて良い再現性が得られたと言える. 平均値が 1mm より大きくなったのは干渉係数をγ=0.7 と図 16 で求めた値より少し大きく設定したことも原因の一つと考えられる.

図 18 に, 97 液滴配置の液滴群に対する2回の燃え広がりを比較して示す.着火からの経過時間 t を初期液滴直径の平均値の二乗 d₀² で除した正規化時間を用いている.t/d₀²=0 において最初に 単一液滴回りに小さい球状火炎が現れ,液滴群を火炎が燃え広がり,最終的に大規模な群火炎が 現れている.1回目の条件では,t/d₀²=4.25s/mm² において格子上辺の液滴へ火炎が到達している. 2回目の条件では t/d₀²=4.13s/mm2 において格子上辺の液滴へと火炎が到達している.同位相の 燃焼が現れる時間の差は 3%以下であり,燃え広がりにおいても良い再現性が見られた.

最後に、本液滴群生成手法における予蒸発が燃え広がりに与える影響について考察を行っておく. 本軌道上実験では燃料として正デカンを用い、GCEM内の液滴群近くの温度は293Kで一定に維持 されていた.293Kにおける正デカン液滴表面の気相側当量比は $\phi^{+}=0.09$ である.液滴生成後の予 蒸発量は着火待ち時間に依存するが、空間内の最大当量比は ϕ^{+} であり、その値は可燃範囲の下限 当量比(0.5 程度)より十分小さい.よって、そのような非常に希薄な混合気中では予混合火炎伝播 は生じない.また、そのような非常に希薄な混合気中で拡散火炎が形成された場合には、周囲気体 中の燃料蒸気の一部が拡散によって反応帯に運ばれ反応に寄与する. $\phi^{+}=0.09$ は燃料質量分率で はY_F=0.0006であり、準定常燃焼における液滴表面の気相における燃料質量分率のY_F⁺=0.85と比 べると極めて小さい値であるため、本実験における予蒸発が液滴燃焼に与える影響は極めて小さい と言える.Nomuraら[11]は微小重力場の燃料蒸気/空気混合気中において液滴列の燃え広がり 実験を行い、そのような小さい気相当量比は燃え広がりにほとんど影響を与えないと報告している.



図 15 293K 雰囲気における単一液滴・干渉ニ液滴 の蒸発(上:単一液滴・干渉二液滴の蒸発中のバッ クライト写真,下:液滴直径二乗値 d²の時間変化)



図 16 ランダム分散液滴群生成1回目における液滴 径の目標値からのずれと液滴着火待ち時間の関係



図 17 ランダム分散液滴群の初期液滴直径再現性 の確認



(b) Second experiment

図 18 ランダム分散液滴群の燃え広がり挙動 の再現性の確認

(b) ランダム分散液滴群の燃え広がり特性

前項で示したとおり,GCEM において予蒸発を考慮した液滴生成手法により大規模ランダム分散 液滴群の生成が着火時液滴直径を目標の 5%以内のずれのもとで再現性高く行えることが検証で きた.そこで,ランダム分散液滴群実験のミニマムサクセス条件およびフルサクセス条件として液滴 干渉を考慮しないパーコレーションモデルから得られる臨界占有率(群燃焼発現限界)付近における 燃え広がりの詳細特性の把握を行い,エクストラサクセス条件として液滴干渉を考慮したパーコレー ションモデルから得られる臨界占有率(群燃焼発現限界)付近における燃え広がりの詳細特性の把 握を試みた.最終的には実際の群燃焼発現限界付近の燃え広がり挙動の詳細把握が重要であるた め,予定していたフルサクセス条件の替わりに実際の群燃焼発生限界の探索のための条件を設定 した.群燃焼発生限界を把握したうえで,エクストラサクセス条件を設定し,群燃焼発生限界付近の 燃え広がりの詳細把握を行うことに成功したため,目標は高度に達成された.さらに,新規現象も観 察され,その現象に対する仮説検証を行うための要素実験も追加条件として実施することができた.

ます,初期液滴直径 d₀=1mm に対して,液滴数 M を 152 個から 67 個まで変化させた.次に,液 滴数 M を 67 個とし,同じ液滴配置パターンに対して,初期液滴直径を d₀=0.9~1.2mm と変化させ た.初期液滴直径の相対標準偏差は多くの場合 3%以下であり,最大で 4.5%であった.液滴群の平 均液滴間隔(S/d₀)m は Mikami ら[6]の方法に倣い,

$$(S/d_0)_m = (NL/d_0)/M^{1/2}$$

として求めた. ここで, N は格子点数(=30), L は格子点間隔(=4mm)である.

図 19 に 1 秒毎の燃え広がり写真の比較明合成画像を異なる無次元平均液滴間隔(S/d₀)m に対して示す.液滴群の燃焼は格子下辺の中心付近の一つの液滴の着火から開始されている.図 19(a)では,燃え広がりに伴い液滴まわりに形成される火炎は群火炎と結合することで,大きい一つの群火炎が拡大し,格子の各辺へと到達している.火炎は全体的に放射状に近い燃え広がりが見られる





(a) 干涉非考慮予想時群燃焼発現限界付近条件(平均液滴間隔(S/d₀)_m=11.9)

(b) 大規模着火発生条件((S/d₀)_m=14.5)



(c) 群燃焼未発生条件((S/d₀)_m=16.2)
 図 19 異なる平均液滴間隔(S/d₀)_mのランダム分散液滴群の配置と
 1秒毎の燃え広がり挙動の比較明合成画像

が,群火炎には凹凸が生じており,左下の領域において下向きの燃え広がりも生じている.図 19(b) の(S/d₀)m=14.5 では,燃え広がり経路がさらに複雑化するとともに,群火炎の黄色輝炎領域が連続 せず,小さいスケールで分散していて,青炎領域も増大している.火炎は格子左上領域には到達し ていないが,すべての格子の辺には到達しているため,Mikamiら[6]のパーコレーションモデルの群 燃焼発現の定義によれば群燃焼が発現したと言える.図 19(c)の(S/d₀)m=16.2 の場合では火炎は 格子左辺および上辺には到達しておらず部分燃焼となっていることから,群燃焼発現限界外の条件 と言える.図 19(a)の条件は干渉を考慮しないパーコレーションモデルから得られる群燃焼発現限界 条件であるが,実際の群燃焼発現限界はさらに大きい平均液滴間隔に存在していることがわかる.

図 20 に二つの燃焼特性時間の平均液滴間隔への依存性を示す.t_{fCL} は第一液滴の着火から格 子上辺上の液滴へ火炎が最初に到達するまでの時間であり,t_{bCL} は第一液滴着火から液滴群の燃 焼が終了するまでの時間である.ともに,平均初期液滴直径の二乗値 do² および無次元格子サイズ NL/do で正規化している.図 20 より,格子上辺までの火炎到達時間は平均液滴間隔の増加に伴い 増大している.火炎が格子上辺に到達可能な最大の平均液滴間隔が存在しており,その条件付近 が群燃焼発現限界と言える.液滴群燃焼時間も同様に平均液滴間隔の増加に伴い増大し,最大値 をとった後,急激に減少している.燃焼時間が最大値を示す平均液滴間隔は火炎が格子上辺に到 達可能な最大の平均液滴間隔と対応しており,群燃焼発現限界付近で液滴群の燃焼時間は最大値 を示すと言える.これは群燃焼発現限界に近づくほどより複雑な経路を辿って燃え広がるためであ る.パーコレーション理論[12]によれば,パーコレーションの臨界点において特性時間が発散すると 予想される.群燃焼発現限界付近での群燃焼時間の傾向はこの臨界点付近での特性時間の傾向と 同じであると考えられる.なお,群燃焼発現限界付近では未燃液滴数密度も最大値を示した.

2次元格子上にランダム分散した液滴群の群燃焼発現限界の平均液滴間隔(S/d₀)mは,液滴干 渉を考慮しないパーコレーション計算では11.4[6],2液滴干渉による燃え広がり限界距離増加を考 慮した予備計算では13.5であるが[13],本実験によれば,群燃焼発現限界は15.2と16.1の間とさ らに大きい.これは,次項(c)で示される燃え広がり限界外の液滴の予熱による予蒸発効果が群燃 焼発現限界に影響したものと考えらえる.



図 20 ランダム分散液滴群の燃え広がりにおける燃焼特性時間の平均液滴間隔への依存性

次に,群燃焼発現限界付近の(S/d₀)_m=15.2 の条件における局所燃え広がりについて考察を行う. 図 21 に TFP 法による 1200K の高温領域外縁分布の時間変化を示す.この温度分布の変化から局 所の液滴間燃え広がり経路を把握し,局所液滴間燃え広がり速度[14]を求めた.図 22 にランダム 分散液滴群の局所燃え広がり速度を直線液滴列の燃え広がり速度と比較して示す.図中の番号は



 x/d_0

図 21 群燃焼発現限界近傍(S/d₀)_m=15.2 でのランダム分散液滴群燃え広がりにおける 高温領域外縁(1200K 位置)分布の時間変化



図 22 群燃焼発現限界近傍(S/d₀)_m=15.2 でのランダム分散液滴群の局所燃え広がり速度の直線 液滴列との比較(番号は燃え広がり先液滴の番号, S/d₀=14 が等間隔液滴列燃え広がり限界)

燃え広がり先液滴の番号である. 等間隔液滴列の燃え広がり限界は(S/d₀)_{limit}=14(4.1.1 節 FS1 に 同じ)であることを考慮すると, 群燃焼発現限界付近という比較的平均液滴間隔の大きい条件にお いても, 液滴群の局所燃え広がりにおいては等間隔液滴列の燃え広がり限界距離(S/d₀)_{limit}=14 (FS1)より大きい液滴間隔においても燃え広がりが生じている場合があることがわかる. 図 21 によ れば, 液滴 10 から 15 への燃え広がりは右方向への燃え広がり経路形成上重要な燃え広がりであ るが, これらは, 4.1.1 項の液滴群要素実験の結果から得られた燃え広がり起点液滴を含む2液滴 干渉効果による燃え広がり限界拡大によるものと理解される. また, 液滴 43 から 42 への燃え広が りはその後の液滴 51 以降の液滴への燃え広がりに繋がる重要な燃え広がりであるが, これは液滴 41, 44, 43 の3液滴干渉効果による燃え広がり限界拡大(4.1.1 項の液滴群要素実験を参照)による ものと理解される.液滴26への燃え広がり,液滴33への燃え広がりも群燃焼発現上必要な燃え広がり経路であるが,これらは4.1.1項の液滴群要素実験から得られた干渉効果だけでは説明ができず,液滴干渉以外の周囲の火炎からの予熱により燃え広がり限界の拡大に至ったと考えられる.

(c) 新規観察現象

本軌道上実験では,航空機実験やパーコレーションモデルの結果からは予想されていなかった新 規な現象が二つ観察された.一つは液滴クラスターの大規模着火現象,もう一つは既燃領域におけ る低速火炎伝播による再燃焼現象である.

図 23 に(S/d₀)_m=14.5 での燃え広がりにおける液滴クラスターの大規模着火現象を示す.この現 象は図 21 の(S/d₀)_m=15.2 においても観察された.このような群燃焼発現限界付近の燃え広がりで は、図 21 に示されるように燃え広がり経路は複雑に曲がっている.よって、大規模着火を生じた液 滴クラスターは初期には局所燃え広がり限界外となって燃え広がらないながらも、他の火炎から加 熱され可燃性混合気を形成しており、その可燃性混合気が、t=4.87s に中央付近の火炎により着火 したことで大規模着火が発生したと考えられる.

図 24 に(S/d₀)_m=12.1 での燃え広がり時の既燃領域における低速火炎伝播による再燃焼現象を 示す.この現象は (S/d₀)_m=13.3 においても観察された.液滴群の中心部は t=5.50s にはすでに群 火炎外縁が通過し既燃領域となっている.しかし, t=6.20s には熱炎が視認されなくなり消炎し, t=6.87s~7.27s にかけてその領域において低速火炎伝播が観察される.既に燃焼が生じた領域に おいて火炎伝播が生じているだけでなく,この火炎伝播速度は通常の予混合火炎伝播速度(例えば 図 23 の 4.87~4.90 の大規模着火の火炎伝播)と比べると格段に小さい.この現象は群火炎の熱炎 が輻射熱損失の増大に伴い消炎した後,燃焼生成物により希釈され酸素濃度が低下した状態で未 燃燃料を含む混合気が回りこんで来た火炎により着火されたことにより生じたものと考えられる.

これらの新規に観察された現象に対する仮説を検証するための要素実験を追加実験として実施 した.その結果は、4.5節「目標を超えて得られた成果」において後述する.



図 23 ランダム分散液滴群の (S/d₀)m=14.5 での液滴クラスターの大規模着火現象(4.87~4.90s)



図 24 ランダム分散液滴群の (S/d₀)_m=12.1 での既燃領域における低速火炎伝播現象 (6.87~7.27s 青線部分が伝播火炎先端位置)

4.2 実験2

移動可能液滴の燃え広がり現象および、燃え広がり限界は、燃え広がり火炎が誘発する火炎先 端近傍液滴の不均一な蒸発・燃焼により変化すると考えられる.そこで、実験2では、直線ファイバ 一上に列方向に移動可能な液滴を配置することで、液滴列を燃え広がる火炎と液滴運動の干渉を 調べた.

ミニマムサクセス条件として、等間隔移動可能液滴列を用いた2液滴間燃え広がり機構解明、燃 え広がり限界距離の取得を行った.当初予定では、初期液滴直径 d₀=1mm,無次元初期液滴間隔 S/d₀を2~10 まで変化させるものであった.図 25 にデジタルビデオカメラによる直接画像とハイス ピードカメラによる燃え広がり中の液滴移動の様子を示す.ハイスピードカメラ画像の左端2個の液 滴は固定液滴、3 個目から移動可能液滴である.第1移動可能液滴は第2移動可能液滴へと近づき 合体し、さらに次の液滴へと合体している.縦に白く見える線は実験2用の直線ファイバーから離れ た位置に存在する実験1、3用の格子ファイバーの一部が実験2の火炎により加熱され発光してい るものであり、その領域まで火炎が到達していることが間接的にわかる.この時の液滴位置と火炎 先端位置の時間変化を図 26 に示す.火炎が移動可能液滴に接触し、移動可能液滴が移動して 次々に合体するが、燃え広がりは起こらなかった.そのため、初期液滴直径を d₀=1.4mm,0.8mm と 変化させ(フルサクセス条件の一部)、また、固定液滴の個数を4個から2個に減らし、固定液滴の 燃焼による擾乱を変えるなど試行錯誤を試みた.ただし、図 26 で観察された燃え広がりは後述する 燃え広がりパターン1に分類されるものである.



図 25 デジタルビデオカメラの直接画像(左), ハイスピードカメラのバックライト画像(右)



図 26 ミニマムサクセス条件における液滴位置および火炎先端位置例

以上の結果より、固定液滴燃焼からの点火擾乱を押えるために、固定液滴一第1移動可能液滴 間距離を S/do=2 とし、その後の移動可能液滴の無次元初期間隔を 2,4,6 とするミニマムサクセス 修正条件で実験を実施した.代表的な結果を図 27 に示す.第1移動可能液滴と第2移動可能液滴 は合体するが合体液滴に燃え広がっている(パターン2).そして、合体液滴まわりに形成された火 炎の近接に伴い第 3 移動可能液滴が移動し第 4 移動可能液滴と合体するが、図 26 の場合と同様 に燃え広がりは生じなかった(パターン1).パターン1では、移動可能液滴が合体することで、液滴 温度の上昇が妨げられたため、燃え広がりが生じなくなったものと考えられる.このように、移動可 能液滴の燃え広がりパターンは2液滴間だけでなく、3液滴目の関係も重要であることが明らかとな った.



図 27 ミニマムサクセス修正条件における液滴位置,火炎先端位置,燃え広がりパターン

ミニマムサクセス修正条件での実験の結果を考慮し、フルサクセス条件では、不等間隔の多くの 液滴配列パターンを準備し、初期液滴直径 do=1mm のもと定常的に燃え広がるパターンを探しなが ら、燃焼実験を実施した.この間、移動可能液滴が所定の初期位置に止まらないことや、第1移動 可能液滴用のファイバー位置にススが付着したことにより、ススにトラップされた第1移動可能液滴 を固定液滴とみなすなど対策を取りながら進めた.実験の結果、移動可能液滴に複数個燃え広がる 条件は見られたが、定常的な燃え広がりに遷移するパターンは見られなかった.ただし、ミニマムサ クセス修正条件では見られなかった新たな燃え広がりパターンが観察された.代表的な結果を図 28 に示す.第1移動可能液滴の燃焼により第2移動可能液滴は遠ざかりながらも着火し、その後減速 している(パターン3).第2移動可能液滴の燃焼により、第3液滴は遠ざかり燃え広がりは生じてい



図 28 修正ミフルサクセス条件における液滴位置,火炎先端位置,燃え広がりパターン



図 30 移動可能3液滴燃え広がりパターンマップ(縦軸:液滴 BC 間距離,横軸:液滴 AB 間距離)

ない(パターン4).

以上の結果から、移動可能液滴の燃え広がりは、図 29 に示される3つの液滴 A, B, C の関係により、以下の4つの燃え広がりパターンに分類されることが明らかになった。

Pattern 1: 液滴 B が液滴 C と合体することにより, 合体液滴 BC に燃え広がりが起こらない

Pattern 2: 液滴 B が液滴 C と合体した後に液滴 A から合体液滴 BC に燃え広がりが起こる

Pattern 3: 液滴 A から液滴 B に火炎が燃え広がり,液滴 B は減速する

Pattern 4: 液滴 B が火炎から遠ざかり, 燃え広がりが起こらない

図 30 に燃え広がりパターンマップを液滴 BC 間距離(縦軸),液滴 AB 間距離(横軸)に対して示す. 1G リファレンス実験として行った2個の移動可能液滴の火炎燃え広がり実験において異なる燃え広 がりパターンが観察されていたが,軌道上実験の知見をもとに,より詳細なパターン分類が可能とな った.2個の移動可能液滴間の燃え広がりはその間隔に強く影響を受けるが,3個以上の移動可能 液滴列の燃え広がりの場合,液滴 B と C の間隔が液滴 A から B への燃え広がりに強く影響を及ぼ すことが明らかとなった.

異なる初期液滴直径に対する実験を,フルサクセス条件に加えてエクストラサクセス条件では列 に垂直方向からの着火により実施したが,ここでは紙面の都合上割愛する.

Group Combustion では燃料として低揮発性のデカンを用いた移動可能液滴列燃え広がりの詳細実験を微小重力場において世界で初めて行った.これに対し,2015 年に米国 Combustion Integrated Rack において日米共同研究の FLEX-2J として,高揮発性のヘプタンを燃料とした移動

可能液滴列燃え広がり実験が行われている[15]. 燃え広がり速度が速いヘプタンを用いた FLEX-2J 実験の結果では, 燃え広がり中に液滴の移動は見られず, 燃え広がり完了後に液滴の移動, 移 動による合体が観察された. 燃え広がり速度の遅いデカンを用いた本実験結果と合わせて考えると, 液滴の運動は燃え広がり速度に強く依存しており, 液滴の点火前に起こる移動は, 燃え広がり速度 が遅いデカン液滴列で顕著であることがわかった. 燃え広がりが完了した後の群燃焼火炎中におけ る液滴挙動は, ほぼ同じであった.

今後は、火炎燃え広がりと液滴運動を数値モデル化し、実験結果をシミュレートできるようにする 予定である。

4.3 実験3

複数液滴から構成される液滴クラスターから液滴クラスターへの燃え広がりにおいては、一般に 火炎サイズの三乗に比例する火炎領域からの輻射熱損失の影響を強く受けるものと考えられる、そ こで、実験3では、初期液滴直径、周囲気体酸素濃度、クラスター内液滴数を変化させることで輻射 熱損失を変化させた場合の、燃え広がりの変化について初めて調査を行った。

本実験では、初期液滴直径 d₀を 0.7mm~2.0mm, 酸素濃度を 17%~21%, クラスター内液滴数 を 2 個および 5 個と変化させた. ミニマムサクセス条件では主要な実験条件により基本特性を把握 し、フルサクセス条件ではミニマムサクセス条件の間の条件とし詳細に特性把握を行った. 2液滴ク ラスターの場合, クラスター間隔 Lx は一つの列で 12, 16, 20, 24, 28mm と徐徐に増加させ、5液滴 クラスターの場合は 24, 32, 40mm と徐徐に増加させることで, 燃え広がり限界を把握可能とした (図 7 参照). エクストラサクセス条件においては, 2液滴クラスターの最初の間隔として Lx=8mm と することで, クラスター干渉による群燃焼の影響を調べた. ミニマムサクセス条件からエクストラサク セス条件まで予定どおり実施をすることができ, 当初の目的を十分に達成できたうえに, さらに, 事 前に予想していなかった興味深い現象が観察された. その現象は Group Combustion 実験の主眼 である燃え広がり限界の定義に対する新たな視点を提起するものである. よって, ここでは当初の 目的である液滴クラスター間燃え広がりの代表的な挙動と液滴径を変化させることで火炎スケール を変化させた場合の影響を示しつつ, そこで観察された新たな現象について説明することとする.

図 31 に初期液滴直径 d₀=1mm の2液滴クラスター間の燃え広がり火炎と液滴の写真を示す.第 0 クラスターから第1クラスターへ燃え広がり、そして、クラスター間隔 Lx=16mm の第 2 クラスターま では黄色の火炎が燃え広がっているが、Lx=20mm の第 3 クラスターまわりには黄色火炎は観察さ れないことから、クラスター間の燃え広がり限界は 16mm より大きく20mm より小さいことがわかる. ただし、第 3 クラスターには燃え広がっていないが、液滴直径は減少していることがわかる.これは、 後で詳しく説明するとおり新たな現象であり、熱炎は第 3 クラスターに燃え広がらなかったが、冷炎 が発生し液滴が蒸発したためである.つまり、これまでの燃え広がり限界の定義は高温酸化反応に よる熱炎の燃え広がり限界であり、低温酸化反応による冷炎まで含めた燃え広がり限界に拡張して 考える必要性を示唆している.

図 32 に初期液滴直径 d₀=2mm の2液滴クラスター間の燃え広がり火炎と液滴の写真を示す. 第 0 クラスターから第 4 クラスターまでは黄色火炎を伴う熱炎が燃え広がっているが, 第 5 クラスター には熱炎は燃え広がっていない. ただし, 第 5 クラスターの液滴は熱炎を伴わない状態で液滴径が 減少していることから, 熱炎の燃え広がり限界外ではあるが, 冷炎は発生していることを示唆してい る.

熱炎の燃え広がり限界に注目すると、図 32 より d₀=2mm の場合の熱炎燃え広がり限界クラスタ 一間距離は 24mm と 28mm の間にある. 初期液滴直径 d₀ で正規化した熱炎燃え広がり限界距離 Lx_{limit}/d₀ は d₀=2mm の場合には 12<Lx_{limit}/d₀<14 だが、図 31 の d₀=1mm の場合には 16<Lx_{limit}/d₀<20 であり、クラスターの液滴直径が大きいほど燃え広がり限界無次元クラスター間距



図 31 2液滴クラスター列の燃え広がり(1mm 液滴). 直接画像(上)およびバックライト画像(下)



図 32 2液滴クラスター列の燃え広がり(2mm 液滴). 直接画像(上)およびバックライト画像(下)

離は小さいことがわかる.これは液滴のスケールが大きいほど火炎直径が大きく,輻射熱損失が相対的に大きくなったためと考えられる.

図 33 に図 32 の条件における燃え広がり中のクラスター内液滴の直径二乗値の時間変化を示す. 微小重力場で定常的に燃焼する液滴の直径の二乗値が時間とともに直線的に減少する,いわゆる 「d² 則」に従った液滴蒸発が燃焼中に生じることは,1950 年代の Kumagai Isoda [8]の研究以来よ く知られている現象である.近年,ISSの米国実験棟において液滴燃焼実験のFLEX,FLEX-2が行われ,熱炎の消炎後に遷移して発生した冷炎によっても d² 則が維持されることを世界で初めて示した(例えば,Nayagam ら[9]).図 33 では,図の上に示される各クラスターの熱炎発生期間が終了した後にも、クラスター内液滴の直径の二乗値が直線的に減少していることを示しており,燃え広がりにおいても熱炎→冷炎の遷移が生じ,冷炎によっても液滴蒸発が維持され得ることを示している.さらに,先述のとおり第5クラスターまわりには熱炎が発生しない状態で液滴直径の2 乗値が同様の傾きで減少しており,冷炎の発生による液滴蒸発がなされている.このように,燃え広がりにおいて,熱炎→冷炎遷移が発生すること,熱炎燃え広がり限界外においても冷炎が発生し,液滴蒸発が生じる可能性が初めて示された.



図 33 図 32 条件における液滴直径二乗値の時間変化

図 34 に周囲気体酸素濃度を 17%に低下させた場合の2液滴クラスター間の燃え広がり時の液 滴の直径二乗値の時間変化を示す.酸素濃度が低いほど火炎直径は大きくなり,輻射熱損失効果 も増大すると考えられる.ここでは、16mm 離れた第1クラスターへの熱炎燃え広がりも生じておらず, 熱炎燃え広がり限界はさらに小さくなっている.第1クラスターの2液滴のうち,第0クラスターに近い 側の液滴(C1-D0 と表記)の蒸発,遠い側の液滴(C1-D1)の蒸発はともに冷炎によるものと考えら れるが、液滴 C1-D0 の蒸発開始が第0クラスターの熱炎発生期間内であるのに対して、液滴 C1-D1 は第0クラスターの熱炎が冷炎に遷移して以降 6 秒程度後に冷炎による蒸発が生じている.これ は冷炎が第0クラスターから液滴 C1-D0,そして液滴 C1-D1 へと伝播したかのように見える初めて の現象である.冷炎伝播が定常的に可能であるかは今後さらに軌道上の長時間微小重力場におい ての検証が必要である.

以上のとおり,実験3では当初想定した成果に加えて,燃え広がりにおける冷炎の役割という新た な視点を考える必要性をもたらした.実験1の液滴群要素実験や実験2の結果もこのような視点から 捉え直す価値があると考えられる.実験1のランダム分散液滴群実験ではこの視点から捉えること で,新規に観察された現象に対する仮説を立て,その検証のための要素実験を実施している.その 詳細については 4.5 節で述べる.



図 34 熱炎消炎後の冷炎伝播の可能性

4.4 科学的サクセスクライテリアの達成状況

科学的サクセスクライテリアの達成状況および達成度を表3に示す.詳細については4.1節~4.3 節において述べているので,参照されたし.

なお, 軌道上実験の結果は国内会議, 国際会議等において順次発表を行っており, 審査付国際 ジャーナルにも掲載されている. 特に, 液滴群要素実験の燃え広がり結果はインパクトファクター 5.336 の Proc. Combust. Inst. Vol. 37 (2019)に, ランダム分散液滴群の燃え広がり結果はインパ クトファクター1.357 の Microgravity Science and Technology Vol. 30 (2018)に掲載されている.

サクセスクライテリアには含まれていないが、本実験の成功は、最大 152 個のランダム分散液滴 群から移動可能液滴列までの自由度の高い液滴生成・空間配置技術によるところが大きい. 初期直 径をコントロールした大規模液滴群生成の軌道上実験結果は、審査付国際ジャーナルの International Journal of Microgravity Science and Application, Vol. 35 (2018)に掲載されてお り、液滴群生成実験装置(GCEM)は 2017 年度の日本燃焼学会技術賞を受賞している.

サクセ	中陸 4	中陸。	中陸の
スレベ	実験〕	実験2	実験3
ル	(液滴十渉の影響)	(液滴移動の影響)	(輻射の影響)
ミニマ	0	0	0
ムサ	液滴群要素実験	等間隔移動可能液滴	液滴クラスター間燃
クセス	・2液滴干渉による燃え広がり限界拡	列を用いた燃え広が	え広がりについて、
	大の主要方向特性確認	りデータ取得 2液滴	液滴直径,液滴数,
	・燃え広がり限界距離分布への3液滴	間燃え広がりにその	酸素濃度を各2条件
	目の影響有りを把握	先の3液滴目の影響	変化させ、群火炎サ
	ランダム分散液滴群実験	があることを把握	イズを変化させた場
	・群燃焼発現限界前後の燃焼挙動の違		合の燃え広がり特性
	いを確認		把握
フル	Ø	0	Ø
サクセ	<u>液滴群要素実験</u>	・等間隔および不等	液滴クラスター間燃
ス	・2液滴干渉による燃え広がり限界拡	間隔移動可能液滴列	え広がりについて、
	大の詳細握と機構解明. 燃え広がり速	を用いた燃え広がり	液滴直径, 液滴数,
	度も計測.	データ取得 3液滴	酸素濃度をさらに変
	・3液滴干渉による燃え広がり限界拡	の関係により燃え広	化させ,群火炎サイ
	大の主要方向特性確認	がりパターンを4つに	ズを変化させた場合
	<u>ランダム分散液滴群実験</u>	分類.	の燃え広がり特性把
	・群燃焼発現限界前後の燃え広がり挙	・異なる液滴直径の	握
	動の違いの再現性確認	等間隔液滴列に対し	・熱炎の燃え広がり
	・群燃焼発現限界前後の燃え広がりの	て燃え広がり特性を	に加えて冷炎の燃え
	マクロ特性(燃焼特性時間, 未燃液滴	把握	広がりも考慮した燃
	数,等)の詳細把握		え広がり定義の拡張
エクス	0	Δ	0
トラサ	<u>液滴群要素実験</u>	異なる液滴直径の液	クラスター間干渉を
クセス	3液滴干渉による燃え広がり限界拡大	滴列に対し, 垂直方	強くした群燃焼から
	の詳細把握と機構の統一的理解.燃え	向から着火し、群燃	液滴クラスターへの
	広がり速度も計測.	焼発現後の液滴挙動	燃え広がり特性の把
	<u>ランダム分散液滴群実験</u>	について観察	握
	 液滴干渉効果を考慮したパーコレー 		
	ションモデルとの比較. 局所燃え広がり		
	特性解析による群燃焼発現限界拡大		
	の原因分析.		
	・二つの新規現象の観察.		

表 3 サクセスクライテリアの達成状況および達成度評価

4.5 目標を超えて得られた成果

本軌道上実験では、これまでの短時間微小重力場での実験や既存モデルでは予想をしていなかった新規な現象がいくつか観察された.従来の燃え広がりの考え方を発展させた実験1~3により、 本来の目標は十分達成できたが、新しく観察された複数の現象は燃え広がり限界の本質を考えるう えで新たな視点を与えてくれるものと言えるため、目標を超えた非常に重要な成果を得ることができたと考えている.

本軌道上実験において以下の新規な現象が観察された.

- 液滴クラスター間燃え広がりにおける熱炎の燃え広がり限界外の液滴クラスターにおける冷炎 発生現象(4.3 節)
- 2) 液滴クラスターの熱炎から冷炎への遷移後の冷炎伝播と見られる現象(4.3 節)
- 3) ランダム分散液滴群の群燃焼発生限界付近条件における液滴クラスターの大規模着火現象 (4.1.2(c)項)
- 4) ランダム分散液滴群の群燃焼発生限界付近条件における既燃領域における低速火炎伝播に よる再燃焼現象(4.1.2(c)項)

1)の現象はこれまで可視光カメラで観察可能な熱炎に注目した燃え広がり限界外の条件でも、部 分燃焼を行う冷炎の発生という燃え広がり形態が可能な場合があることを示しており、燃え広がり限 界の定義を冷炎を考慮して拡張する必要性があることを示唆しているという点で大きな価値がある。

2)の現象は液滴間において熱炎を伴わない冷炎のみによる燃え広がりの可能性を示唆している. 冷炎伝播の現象が示唆されるものの確実に観察されたわけではないため,今後の検証が必要である.

3)の現象に関しては、まず、4.1.2(b)項で述べたとおり、ランダム分散液滴群の群燃焼発現限界 の平均液滴間隔が液滴干渉を考慮したパーコレーションモデルから予想される群燃焼発現限界の 平均液滴間隔より大きいことが明らかとなった。そして、4.1.2(c)項で述べたとおり、この群燃焼発現 限界付近では燃え広がり中に液滴クラスターの大規模着火が観察された。この条件における局所燃 え広がりについて液滴群要素実験の結果と比較解析した結果、液滴干渉効果では説明できない局 所燃え広がり限界の拡大が生じていた。これは群燃焼発現限界付近においてより複雑化する燃え 広がり経路の影響による予熱効果によるものとの仮説を持っており、大規模着火現象も予熱効果に よるものと考えることができる。これに実験3による1)の知見を考慮して考えると、大規模着火を生じ た液滴クラスターは他の群火炎から加熱されるだけでなく、冷炎を伴う蒸発が生じていた可能性も考 えられる。この点は今後さらなる検証が必要と考える。

4)の現象に関しては、4.1.2(c)項で述べたとおり、群火炎の熱炎が輻射熱損失の増大に伴い消炎 した後、燃焼生成物により希釈され酸素濃度が低下した状態で未燃燃料を含む混合気が回りこんで 来た火炎により着火されたことにより生じたものと考えられる.これに実験3の知見を考慮して考え ると、熱炎の輻射消炎後の領域において冷炎が発生しており、部分燃焼が継続している可能性も考 えられる.この点も今後さらなる検証が必要と考える.

3)の現象の予熱効果の仮説,4)の現象の輻射消炎後の燃焼ガス希釈混合気の再燃焼の仮説を 検証するために,図 35 に示される要素実験を追加で実施した.実験3において輻射消炎後に冷炎 発生に移行した 2mm 液滴2個の燃焼により熱炎消炎後に液滴蒸発が継続している既燃領域を模擬 した.次に,その群火炎により予熱される液滴クラスターを 1mm 液滴5個により模擬した.この5液 滴クラスターの燃焼が2液滴クラスターの既燃領域の混合気の再着火の役割も担うよう,2液滴クラ スターの熱炎が消炎した後に5液滴クラスターが着火されるように時間差を考慮した.568 フレーム から 569 フレームにおいて,5液滴クラスターまわりで青炎が1コマ(1/30s)で予混合火炎伝播して おり,大規模着火に似た現象が再現された. そして,560 フレームにおいて輻射消炎した2液滴クラ スターの領域において,570 フレームから 576 フレームにかけて6コマ(1/5s)で輝度の低い青炎が 伝播していることが確認される. この火炎伝播は図 24 で見られた低速火炎伝播よりは速いものの通常の火炎伝播速度の 1/6 程度であることから,既燃領域における低速火炎伝播に似た現象を再現できたと考えられる. これらの現象における冷炎の存在とその役割については,今後さらに詳細な調査が望まれる.



図 35 大規模着火と低速火炎伝播現象の仮説検証のための追加要素実験における連続写真 (数字は 1/30s 毎のフレーム番号, 括弧付数字は対応したバックライト画像)

4.6 成果の意義

本研究は、液滴間燃え広がり機構の解明をもとにランダム分散液滴群の群燃焼発現を記述する パーコレーションモデルの開発を行うものである.軌道上実験により、これまでパーコレーションモデ ルで考慮されていなかった液滴間燃え広がりへの様々な影響が明らかになった.これにより、新た な混相燃焼物理の構築に繋がるものと考えられる.本研究成果により、短時間微小重力場での実 験を通して 1950 年代以来蓄積されてきた少数液滴燃焼に関する知見を噴霧燃焼の機構解明に繋 げることが可能となるため、燃焼学的意義が極めて大きい.本研究の手法は、複雑系において現象 を支配する最小次元の構成要素内のミクロな熱的情報伝達ルールについてまず微小重力科学によ り極限理解し、この情報伝達ルールをもとにしたパーコレーション理論により複雑系のマクロな挙動 を理解するという先進的な複雑系研究のアプローチと言える.この手法は燃焼分野に限らず広範な 複雑系へと適用が可能な手法と考えられ、複雑系科学研究としても新しい展開が期待される.

良質な長時間微小重力場でしか得られない貴重な液滴・液滴群の蒸発データ,液滴列・群の燃え 広がりデータを世界の燃焼研究者コミュニティに提供することで,液滴を考慮した燃焼シミュレーショ ンコードのサブモデルの高精度検証が進められることが期待される. 微小重力燃焼実験のデータを 用いてサブモデル検証を行った例として, Haruki ら[15]は本研究代表者である Mikami ら[4]の液滴 列燃え広がり結果を用いて,輻射モデルの検証を行っている.軌道上実験成果の活用のために,日 本燃焼学会が進めている産学連携プロジェクトである燃焼解析プラットフォーム開発事業との連携も 開始している.本軌道上実験により新規観察された現象は,熱炎に加えて冷炎も考慮した燃え広が り限界の定義の拡張の必要性を示唆しており,この点でも燃焼学上の意義が大きい.また,輻射熱 損失による熱炎から冷炎を伴う部分燃焼への遷移,また,熱炎への再遷移による再燃焼は実機の 燃焼効率を考えるうえでも新たな重要な視点を与えるものと考える.冷炎の発生はディーゼルエンジ ンの着火時だけでなく,マツダ㈱の高圧縮比ガソリンエンジンの燃焼においても重要な役割を果たし ていることが知られており,実機の燃焼において重要である.航空エンジンではさらに燃焼器の規模 が大きいため,これらの効果はほとんど考慮されていない.したがって,質の高い微小重力実験によ り高精度検証された冷炎や輻射熱損失の効果を組み入れた計算コードは産業界にとって非常に有 用な開発ツールとなるものと期待される.

5. 結言

ISS・きぼう利用ミッション「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明 (Group Combustion)」により、以下の成果が得られた.

- (1)着火時の液滴径をコントロールした液滴群生成手法を軌道上実験での検証結果を踏まえて構築した.これにより、良質な長時間微小重力場においてランダム分散液滴群、液滴群要素、移動可能液滴列、液滴クラスター列を対象とした燃え広がり実験が可能となり、高精度なデータの取得を行えた.
- (2) 干渉燃焼する2液滴または3液滴からの燃え広がり限界距離分布は干渉液滴の質量中心を中心とした球状分布で近似でき、燃え広がり起点液滴の燃焼寿命に依存して決まることが明らかとなった。
- (3) ランダム分散液滴群の燃え広がりによる群燃焼発現限界前後の群全体の燃焼特性が明らかとなった. 群燃焼発現限界付近において燃焼特性時間および未燃液滴数密度は最大値を示す.
- (4) ランダム分散液滴群の群燃焼発現限界付近の群燃焼発生につながる重要な燃え広がりを決める要素として、液滴干渉による局所燃え広がり限界拡大効果に加えて、燃え広がり経路の 複雑化に伴う予熱による局所燃え広がり限界拡大の可能性があることが示された.
- (5) ランダム分散液滴群の群燃焼発現限界付近において,液滴クラスターの大規模着火現象および既燃領域における低速火炎伝播による再燃焼現象が新規に観察された.
- (6)低揮発性燃料を用いた場合の移動可能液滴列の燃え広がりにおいて、移動する3つの液滴の 関係により燃え広がりパターンが4つに分類されることが明らかとなった.特に、移動可能な2 液滴間の燃え広がりに対しその先の移動可能液滴の影響があることが明確となった。
- (7)液滴クラスター間の燃え広がり限界無次元距離はクラスターまわりに形成される群火炎サイズ が大きいほど小さくなることが明らかとなった.これは、群火炎サイズが大きいほど火炎領域 からの輻射熱損失が大きくなるためと考えられる.
- (8)液滴クラスター間の燃え広がりにおいて、熱炎の燃え広がり限界外のクラスターにおいて冷炎が発生する現象、また、熱炎から冷炎への遷移後の冷炎伝播と見られる現象が新規に観察された.これにより、従来の熱炎に基づく燃え広がり限界の考え方を冷炎を考慮して拡張する必要があることが示唆された.

[参考文献]

- [1] Chiu, H.H., Liu, T.M., Group combustion of liquid droplets, Combustion Science and Technology, 17, pp. 127-142, 1977.
- [2] Mikami, M., Mizuta, Y., Tsuchida, Y., Kojima, N., Flame structure and stabilization of leanpremixed sprays in a counterflow with low-volatility fuel, Proceedings of the Combustion Institute, 32, pp. 2223-2230, 2009.
- [3] Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Kikuchi, M., Wakashima, Y., Yoda, S., Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays using a new droplet-generation technique, Combust. Flame, 141, pp. 241-252, 2005.
- [4] Mikami, M., Oyagi, H., Kojima, N., Wakashima, Y., Kikuchi, M., Yoda, S., Microgravity experiments on flame spread along fuel-droplet arrays at high temperatures, Combustion and Flame, 146, pp. 391-406, 2006.
- [5] Mikami, M., Watari, H., Hirose, T., Seo, T., Saputro, H., Moriue, O., Kikuchi, M., Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity, Journal of Thermal Science and Technology, 12, JTST0028, 2017.
- [6] Mikami, M., Saputro, H., Seo, T., Oyagi, H., Flame spread and group-combustion excitation in randomly distributed droplet clouds with low-volatility fuel near the excitation limit: a percolation approach based on flame-spread characteristics in microgravity, Microgravity Science and Technology, 30 (4), pp. 419-433, 2018.
- [7] Umemura, A., Takamori, S., Percolation theory for flame propagation in non- or lessvolatile fuel spray: A conceptual analysis to group combustion excitation mechanism, Combustion and Flame, 141, pp. 336-349, 2005.
- [8] Kumagai, S., Isoda, H., Combustion of fuel droplets in a falling chamber, Proceedings of the 6th Symposium (International) on Combustion, pp. 726-731, 1957.
- [9] Nayagam, V., Dietrich, D.L., Ferkul, P.V., Hicks, M. C., and Williams, F. A., Combustion and Flame, 159, pp. 3583-3588, 2012.
- [10] Mikami, M., Motomatsu, N., Nagata, K., Yoshida, Y. Seo, T., Flame spread between two droplets of different diameter in microgravity, Combusti. Flame, 193, pp.76-82, 2018.
- [11] Nomura, H., Takahashi, H., Suganuma, Y., Kikuchi, M., Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuelvapor/air mixture, Proc. Combust. Inst., 34, pp. 1593-1600, 2013.
- [12] Stauffer, D., Aharony, A., Introduction to Percolation Theory, Revised 2nd Ed., CRC Press, 1994.
- [13] Saputro, H.,, Study of Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Using Percolation Approach Based on Flame-spread Characteristics in Microgravity,山口大学大学院理工学研究科博士論文,2015年9月
- [14] Yoshida, Y, Sano, N., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Kan, Y., Kikuchi, M., Analysis of Local Flame-Spread Characteristics of an Unevenly Arranged Droplet Cloud in Microgravity, International Journal of Microgravity Science and Application, 35 (2), p.350203, 2018.
- [15] Suganuma, Y., Nomura, H., Mikami, M., Moriue, O., Kikuchi, Dietrich, D.L., On-Orbit Experiments on Flame Spread between Movable Droplets in a Fuel Droplet Array, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015.
- [16] Haruki, Y., Pillai, A.L., Kitano, T., Kurose, R., Numerical Investigation of Flame Propagation in Fuel Droplet Arrays, Atomization and Sprays, 28 (4), pp. 357-388, 2018.

[成果リスト]

<u>原著論文</u>

- Nomura, H., Suganuma, Y., Setani, A., Takahashi, M., Mikami, M., Hara, H., Microgravity experiments on droplet motion during flame spreading along three-fuel-droplet array, Proceedings of The Combustion Institute [IF=5.336], 32, pp.2163-2169, 2009-1
- Mikami, M., Mizuta, Y., Tsuchida, Y. Kojima, N., Flame Structure and Stabilization of Leanpremixed Sprays in a Counterflow with Low-volatility Fuel, Proceedings of the Combustion Institute [IF=5.336], 32, pp.2223-2230, 2009-1
- Oyagi, H., Shigeno, H., Mikami, M., Kojima, N., Flame-spread Probability and Local Interactive Effects in Randomly Arranged Fuel-droplet Arrays in Microgravity, Combustion and Flame [IF=4.494], 56 (4), pp.763-770, 2009-4
- Seo, T., Azakami, D., Tsuchida, Y., Mikami, M.,, A Numerical Study on Flame Spread Characteristics of Two-dimensional Droplet Cloud, Proceedings of the 14th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, pp.302-306, 2010-10
- Nomura, H., Iwasaki, H., Suganuma, Y., Mikami, M., Kikuchi, M., Microgravity experiments of flame spreading along a fuel droplet array in fuel vapor-air mixture, Proceedings of the Combustion Institute [IF=5.336], 33 (2), pp.2013-2020, 2011-1
- Nomura, H., Takahashi, H., Suganuma, Y., Kikuchi, M., Droplet ignition behavior in the vicinity of the leading edge of a flame spreading along a fuel droplet array in fuelvapor/air mixture, Proceedings of the Combustion Institute [IF=5.336], 34, pp.1593-1600, 2013-1
- Suto, K., Nomura, H., Mikami, M., Kikuchi, M., Experiments on Flame Spread along a n-Decane Droplet Array with Two Droplets Movable in the Array Direction, Proceedings of ISTS2013, 2013-6
- Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Study of Flame Spread Behaviour in Large-scale 2-D Droplet Clouds Without Interactive Effect Using Percolation Approach, Proceedings of 24th International Symposium on Transport Phenomena, 2013-11
- 9. 三上真人, 佐野成太, H. Saputro, 渡利英利, 瀬尾健彦, 低圧における液滴間燃え広がりの微小 重力実験, International Journal of Microgravity Science and Application, 31 (4), pp.172-178, 2014-10
- 10. Kikuchi, M., Kan, Y., Tazaki, A., Yamamoto, S., Nokura, M., Hanafusa, N., Hisashi, Y.,, Moriue, O, Nomura, H., Mikami, M., Current Status on Preparation of Fuel Droplet Clouds Combustion Experiment "Group Combustion" Onboard the KIBO, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 12 (ists29), pp. Th_25-Th_30, 2014-10
- 11. Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Simulating flame-spread behavior in large scale of droplet clouds with considering two-droplet interaction, Proceedings of the 17th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, ILASS-Asia2014-058, 2014-11
- 12. Sano, N., Motomatsu, N., Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Flame-spread characteristics of n-decane droplet arrays at different ambient pressures in microgravity, International Journal of Microgravity Science and Application, 33 (1), pp.330108-1-330108-5, 2016-1
- Mikami, M., Watari, H., Hirose, T., Seo, T., Saputro, H., Moriue, O., Kikuchi, M., Flame spread of droplet-cloud elements with two-droplet interaction in microgravity, Journal of Thermal Science and Technology, 12, pp.1-10, 2017-9

- 14. Saputro, H., Fitriana, L., Mikami, M., Seo, T.,Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Based on Flame-spread Characteristics with Two-droplet Interaction in Microgravity, Proceedings of 23rd Small Engine Technology Conference, JSAE 20179077/SAE 2017-32-0077, 2017-11
- 15. 菅沼祐介, 橘田聖, 野村浩司, 氏家康成, 微小重力環境における燃料液滴列火炎燃え広がり速度に及ぼす雰囲気圧力の影響, 日本機械学会論文集, 183 (855), p.17-00352, 2017-11
- 16. Yoshida, Y, Sano, N., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Kan, Y., Kikuchi, M., Analysis of Local Flame-Spread Characteristics of an Unevenly Arranged Droplet Cloud in Microgravity, International Journal of Microgravity Science and Application, 35 (2), p.350203, 2018-4
- 17. Mikami, M., Nomura, H., Suganuma, Y., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., Generation of a Large-Scale n-Decane-Droplet Cloud Considering Droplet Pre-Vaporization in "Group Combustion" Experiments aboard Kibo/ISS, International Journal of Microgravity Science and Application, 35 (2), p.350202, 2018-4
- Mikami, M., Motomatsu, N., Nagata, K., Yoshida, Y, Seo, T., Flame spread between two droplets of different diameter in microgravity, Combustion and Flame [IF=4.494], 193, pp.76-82, 2018-7
- 19. Mikami, M., Saputro, H., Seo, T., Oyagi, H., Flame Spread and Group-Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds with Low-Volatility Fuel near the Excitation Limit: a Percolation Approach Based on Flame-Spread Characteristics in Microgravity, Microgravity Science and Technology [IF=1.357], 30, pp.419-433, 2018-8
- 20. Mikami, M., Yoshida, Y., Seo, T., Sakashita, T., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., Space-Based Microgravity Experiments on Flame Spread over Randomly Distributed n-Decane-Droplet Clouds: Overall Flame-Spread Characteristics, Microgravity Science and Technology [IF=1.357], 30, pp.535-542, 2018-8
- 21. Iwai, K., Yoshida, Y., Motomatsu, N., Seo, T., Mikami, M., Flame-spread characteristics of droplet-cloud element with two-droplet interaction at high pressure in microgravity, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 16 (6), pp.494-499, 2018-9
- 22. Uneyama, R., Iwai, K., Nagata, K., Yoshida, Y., Seo, T., Mikami, M., A Study of Flame Spread of n-Decane Droplet Arrays with Fuel-vapor Jet at High Pressures in Microgravity, Proceedings of The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology, EL08, 2018-12.
- Yoshida, Y, Iwai, K., Nagata, K., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Sakashita, T., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity, Proceedings of the Combustion Institute [IF=5.336], 37, 3409-3416,2019-1
- 24. Mikami, M., Yoshida, Y., Kikuchi, M., Dietrich, D.L., Anomalous Behavior in Flame Spread | A over Randomly Distributed Droplet Clouds in Microgravity aboard Kibo on the ISS, Proceedings of 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, ASPACC2019-1504, 2019-7.
- 25. Yoshida, Y., Seo, T., Mikami, M., Kikuchi, M., Temperature-Field Analysis of Flame Spread | A over Droplet-Cloud Elements with Interactive Droplets in Microgravity aboard Kibo on ISS, International Journal of Microgravity Science and Application, 36(3) 360303-1-360303-6, 2019-7.
- 26. 野村浩司, 菅沼祐介, 三上真人,菊池政雄, 「きぼう」の微小重力環境を利用した燃え広がり火 | A

炎と移動可能燃料液滴の干渉の観察, International Journal of Microgravity Science and Application, 36(3) 360304-1- 360304-6, 2019-7.

27. Matsumoto, K., Yoshida, Y., Mikami, M., Kikuchi, M., Study on large-scale ignition in flame | A spread of randomly distributed droplet cloud near group-combustion-excitation limit in microgravity, Proceedings of 29th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Paper No. 247373, 2019-9.

解説

- 三上真人,予混合噴霧の燃焼と微小重力実験,日本マイクログラビティ応用学会誌,25(1)58-68,2008年1月
- 2.,
- 3. 三上真人, 燃料液滴の燃焼, 日本燃焼学会誌, 50(153) 196-205, 2008 年 8 月
- 4. 三上真人,「きぼう」における液滴群燃焼実験「Group Combustion」,日本燃焼学会誌,56(176) 101-108,2014 年 5 月
- 5. 菊池政雄, 菅勇志, 「きぼう」での宇宙実験に向けた液滴群燃焼実験供試体の開発における航 空機実験の活用, International Journal of Microgravity Science and Application, 31(2), pp. 78-84, 2014 年 4 月
- 6. 三上 真人, 液滴燃焼から噴霧燃焼へ, 日本ガスタービン学会誌, 44(2) 88-95, 2016 年 3 月
- Mikami, M., Kikuchi, M., Kan, Y., Seo, T., Nomura, H., Suganuma, Y., Moriue, O., Dietrich, D.L., Droplet Cloud Combustion Experiment "Group Combustion" in KIBO on ISS, International Journal of Microgravity Science and Application, 33(2) 330208-1-330208-7, 2016 年 4 月
- 8. Mikami, M., Yoshida, Y., Seo, T., Moriue, O., Sakashita, T., Kikuchi, M., Kan, Y., Recent | A Accomplishment of "Group Combustion" Experiments aboard Kibo on ISS, International Journal of Microgravity Science and Application, 36(3) 360301-1-360301-9, 2019 年 7 月
- 9. Kikuchi, M, Kan, Y., Hardware Development, Preparation, and Execution of the "Group | A Combustion" Experiment - as the First Combustion Experiment in KIBO -, International Journal of Microgravity Science and Application, 36(3) 360302-1- 360302-11, 2019 年 7 月
- 10. Mikami, M., Droplet-Cloud-Combustion Experiments "Group Combustion" aboard Kibo on | A the ISS, Proceedings of the 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems - Asia, Plenary Lecture II, 2019 年 12 月

<u>学位取得</u>

- 1. 土田祐己, パーコレーション理論を用いた予混合正デカン噴霧の燃え広がりに関する研究, 山 ロ大学大学院理工学研究科修士論文, 2009 年 3 月
- 2. 藤山智彰,不等間隔燃料液滴群の燃え広がりにおける干渉効果に関する研究,山口大学大学 院理工学研究科修士論文,2009 年 3 月
- 3. 岩崎拓史, 燃料蒸気-空気予混合気中の燃料液滴列燃え広がり火炎に関する通常・微小重力 実験, 日本大学大学院生産工学研究科修士論文, 2009 年 3 月
- 瀬端宏幸,宇宙実験に向けた複数列方向移動可能液滴を含む燃料液滴列火炎燃え広がりの研究,日本大学大学院生産工学研究科修士論文,2010年3月
- 5. 松村泰裕, 燃料液滴群の燃え広がりに及ぼす液滴直径および配置の影響に関する研究, 山口 大学大学院理工学研究科修士論文, 2010 年 3 月
- 6. 高橋弘, 微小重力環境を利用した燃料液滴列火炎燃え広がりにおける液滴と火炎の熱的干渉

に関する研究,日本大学大学院生産工学研究科修士論文,2011年3月

- 7. 森田英嗣, 燃料液滴列を燃え広がる火炎に誘発された燃料液滴の運動, 日本大学大学院生産 工学研究科修士論文, 2012 年 3 月
- 8. 佐藤賢一, 空気量を制限された燃料液滴列火炎燃え広がりに関する研究, 日本大学大学院生 産工学研究科修士論文, 2012 年 3 月
- 大窪弾,微小重力環境での燃料蒸気/空気予混合気中燃料液滴列火炎燃え広がりに関する研究,日本大学大学院生産工学研究科修士論文,2013年3月
- 10. 廣瀬 勉, 微小重力場における燃料液滴群要素の燃え広がりに対する液滴干渉効果に関する研 究, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2013 年 3 月
- 11. 渡利英貴, 干渉ニ液滴を含む燃料液滴群要素の燃え広がり限界距離に関する研究, 山口大学 大学院理工学研究科修士論文, 2014 年 3 月
- 12. 須藤久美子, 複数の列方向移動可能液滴を用いた燃料液滴列の火炎燃え広がり実験, 日本大 学大学院生産工学研究科修士論文, 2014 年 3 月
- 13. 池山典孝, 燃料液滴列の火炎燃え広がりに及ぼす雰囲気圧力と当量比の影響, 日本大学大学 院生産工学研究科修士論文, 2015 年 3 月
- 14. Herman Saputro, Study of Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Using Percolation Approach Based on Flame-spread Characteristics in Microgravity, 山口大学大学院理工学研究科博士論文, 2015 年 9 月
- 15. 佐野成太,周囲気体圧力が燃料液滴群要素の燃え広がり挙動に及ぼす影響,山口大学大学院 理工学研究科修士論文,2016 年 3 月
- 16. 法華津祥太, 正ヘプタン列方向移動可能液滴列の火炎燃え広がり微小重力実験, 日本大学大 学院生産工学研究科修士論文, 2016 年 3 月
- 17. 吉田泰子, 微小重力場におけるランダム 2 次元分散液滴群の燃え広がり速度, 山口大学大学 院理工学研究科修士論文, 2016 年 9 月
- 18. 本松直也, 微小重力場における液滴直径の違いが不等直径液滴列の燃え広がり特性に与える 影響, 山口大学大学院理工学研究科修士論文, 2017 年 3 月
- 19. 橘田聖, 燃料液滴列火炎燃え広がりに及ぼす雰囲気圧力と液滴間隔の影響, 日本大学大学院 生産工学研究科修士論文, 2017 年 3 月
- 20. 岩井健太郎, 亜・超臨界圧カにおける液滴間の燃え広がり特性に関する研究, 山口大学大学院 創成科学研究科修士論文, 2018 年 3 月
- 21. 平賀翔季,列方向移動可能な液滴を含む正デカン燃料液滴列の燃え広がり微小重力実験用の 装置開発,日本大学大学院生産工学研究科修士論文,2018 年 3 月
- 22. 永田拳太郎, 微小重力場における干渉ニ液滴を含む不等直径液滴群要素の燃え広がり限界に | A 関する研究,山口大学大学院創成科学研究科修士論文, 2019 年 3 月

口頭発表(国際会議)

- Seo, T., Azakami, D., Tsuchida, Y., Mikami, M., A Numerical Study on Flame Spread Characteristics of Two-dimensional Droplet Cloud, Proceedings of the 14th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems-Asia, Jeju, Korea, 2010-10.
- Mikami, M., Seo, T., Kikuchi, M., Microgravity Experiments on Flame Spread of Twodimensional Droplet-cloud Elements with Uneven Droplet Spacing, 4th International Symposium on Physical Sciences in Space, Bonn, Germany, 2011-7.
- Hirose, T., Watari, H., Seo, T., Mikami, M., Kikuchi, M., Dependence of Flame-spread-limit Distance from Interactively Burning n-Decane Droplets on Flame-spread Direction in Microgravity, The 34th International Symposium on Combustion, Work-in-Progress

Posters, Warsaw, Poland, 2012-8.

- Suto, K., Nnomura, H., Mikami, M., Kikuchi, M., Experiments on Flame Spread along a n-Decane Droplet Array with Two Droplets Movable in the Array Direction, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, 2013-6.
- Kikuchi, M., Kan, Y., Tazaki, A., Yamamoto, S., Nokura, M., Hanafusa, N., Hisashi, Y.,, Moriue, O, Nomura, H., Mikami, M., Current Status on Preparation of Fuel Droplet Clouds Combustion Experiment "Group Combustion" onboard the KIBO, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, Nagoya, Japan, 2013-6.
- Mikami, M., Hirose, T., Watari, H., Seo, T., Moriue, O., Kikuchi, M., Experimental Study on Flame Spread of Droplet-cloud Elements with Two-droplet Interaction in Microgravity, The 25th European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Chania, Greece, 2013-9.
- Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Study of Flame Spread Behaviour in Large-scale 2-D Droplet Clouds Without Interactive Effect Using Percolation Approach. 24th International Symposium on Transport Phenomena, Sanyo-onoda, Japan, 2013-11.
- Mikami, M. Seo, T. Nomura, H. Moriue, O. Kikuchi, M. Dietrich, D.L., A Ground-based Research for Fuel Droplet Cloud Combustion Experiment "Group Combustion" on KIBO/ISS, 5th International Symposium for Physical Science in Space, 5th International Symposium for Physical Sciences in Space, Orlando, USA, 2013-11.
- Suganuma, Y., Ikeyama, N., Nomura, H., Ujiie, Microgravity Experiments on the Scale Factor of Flame Spread along a Fuel Droplet Array, 10th Asian Microgravity Symposium, Seoul, Korea, 2014-10.
- Kikuchi, M., Kan, Y., Mizushima, T., Takayanagi, M., Dietrich, D.L., Moriue, O, Nomura, H., Mikami, M., Fuel Droplets Combustion Experiment "Group Combustion" in the KIBO on board the ISS, 10th Asian Microgravity Symposium, Seoul, Korea, 2014-10.
- Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Simulating flame-spread behavior in large scale of droplet clouds with considering two-droplet interaction, 17th Annual Conference of ILASS-Asia, Shanghai, China, 2014-10.
- 12. Suganuma, Y., Ikeyama, N., Nomura, H., Ujiie, Y., Droplet Array Combustion Experiment on Effect of Initial Droplet Diameter on Flame Spread Characteristic Time, 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, Japan, 2015-7.
- Mikami, M., From Droplet Combustion toward Complicated Spray Combustion [Invited Lecture], International Workshop on Multiphase flow and phenomena, Brunel University London, UK, 2015-9.
- 14. Suganuma, Y., Nomura, H., Mikami, M., Moriue, O., Kikuchi, Dietrich, D.L., On-Orbit Experiments on Flame Spread between Movable Droplets in a Fuel Droplet Array, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015-9.
- 15. Mikami, M., Kikuchi, M., Kan, Y., Seo, T., Nomura, H., Suganuma, Y., Moriue, O., Dietrich, D.L., Droplet Clouds Combustion Experiment "Group Combustion" in the Kibo on board the ISS, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015-9.
- 16. Motomatsu, N., Sano, N., Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Flame-spread behavior between two n-decane droplets with different droplet diameters in microgravity, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015-9.
- 17. Sano, N., Motomatsu, N., Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Flame-spread characteristics

of n-decane droplet arrays at different ambient pressures in microgravity, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015-9.

- 18. Saputro, H., Seo, T., Mikami, M., Percolation Approach for Simulation of Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Based on Flame-spread Characteristics with Two-droplet Interaction in Microgravity, The 6th International Symposium on Physical Sciences in Space, Kyoto, Japan, 2015-9.
- 19. Suganuma, Y., Nomura, H., Ujiie, Y., Flame Spread Behavior of n-Decane Droplet Array with Various Initial Droplet Diameter, First Pacific Rim Thermal Engineering Conference, Hawaii, USA, 2016-3.
- 20. Mikami, M., "Group Combustion" The 1st Combustion Experiment in KIBO/ISS
 [Invited Lecture], An Interdisciplinary Workshop between Nolinear Science and The Study of Time, Ube, Japan, 2016-3.
- 21. Yoshida, Y, Sano, N., Motomatsu, N., Iwai, K., Seo, T., Mikami, M., Kan, Y., Kikuchi, M., A recognition technique of flame spread over fuel-droplet clouds in microgravity, 36th International Symposium on Combustion, Work-in-Progress Posters, Seoul, Korea, 2016-7.
- 22. Suganuma, Y., Nomura, H., Ujiie, Y., Premixed-Flame Propagation around a Droplet in Flame Spread along a Droplet Array of n-Decane, 36th Int. Symposium on Combustion, Work-in-Progress Posters, Seoul, Korea, 2016-8.
- 23. Saputro, H., Seo,T., Mikami, M., A Percolation Approach Considering Flame-spread limit Based on Microgravity Experiments of Flame Spread of Droplet Arrays at Different Ambient Temperatures and Pressures, 11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo, Japan, 2016-10.
- 24. Yoshida, Y, Sano, N., Motomatsu, N., Iwai, K., Seo, T., Mikami, M., Kan, Y., Kikuchi, M., A preliminary experiment in parabolic flight for "Group Combustion" experiment in KIBO/ISS on flame spread over fuel-droplet clouds, 11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo, Japan, 2016-10.
- 25. Suganuma, Y., Nomura, H., Ujiie, Y., Thermal Interaction between Fuel Droplets and a Flame in Flame-Spread Phenomenon along a Fuel Droplet Array, 11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo, Japan, 2016-10.
- 26. Momoi, R., Hiraga, S., Hoketsu, S., Suganuma, Y., Nomura, H., Microgravity Experiments on Interaction between Flame-Spread and Droplet Motion in a n-Heptane Droplets Array, 11th Asian Microgravity Symposium, Sapporo, Japan, 2016-10.
- 27. Iwai, K., Yoshida, Y., Motomatsu, N., Seo, T., Mikami, M., Flame-spread characteristics of droplet-cloud element with two-droplet interaction at high pressure in microgravity, 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan, 2017-6.
- 28. Mikami, M., Seo, T., Yoshida, Y., Nomura, H., Suganuma, Y., Moriue, O., Umemura, A., Sakashita, T., Kikuchi, M., Nokura, M., Suzuki, T., Dietrich, D.L., Flame-spread behavior over randomly distributed droplet clouds in "Group Combustion" experiments aboard Kibo/ISS, The 7th International Symposium on Physical Sciences in Space, Juan-les-Pins, France, 2017-10.
- 29. Yoshida, Y, Iwai, K., Nagata, K., Seo, T., Mikami, M., Sakashita, T., Kikuchi, M., Nokura, M., Suzuki, T., Flame-spread characteristics of droplet-cloud elements with droplet interaction in "Group Combustion" experiments aboard Kibo/ISS, The 7th International Symposium on Physical Sciences in Space, Juan-les-Pins, France, 2017-10.

- 30. Nagata, K., Motomatsu, N., Yoshida, Y., Iwai, K., Seo, T., Mikami, M., The influence of uneven droplet diameters on flame-spread characteristics of n-decane-droplet array in microgravity, The 7th International Symposium on Physical Sciences in Space, Juan-les-Pins, France, 2017-10.
- 31. Saputro, H., Fitriana, L., Mikami, M., Seo,T., Group Combustion Excitation in Randomly Distributed Droplet Clouds Based on Flame-spread Characteristics with Two-droplet Interaction in Microgravity, 23rd Small Engine Technology Conference, Jakarta, Indonesia, 2017-11.
- 32. Mikami, M., Seo, T., Yoshida, Y., Nomura, H., Suganuma, Y., Moriue, O., Sakashita, T., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., Dietrich, D.L., Results from "Group Combustion" experiments on flame spread over droplet clouds aboard Kibo/ISS, ISS R&D Conference 2018, San Francisco, USA, 2018-7.
- 33. Uneyama, R., Iwai, K., Nagata, K., Yoshida, Y., Seo, T., Mikami, M., A Study of Flame Spread of n-Decane Droplet Arrays with Fuel-Vapor Jet at High Pressures in Microgravity, 37th International Symposium on Combustion, Work-in-Progress Posters, Dublin, Ireland, 2018-7.
- 34. Yoshida, Y, Iwai, K., Nagata, K., Seo, T., Mikami, M., Moriue, O., Sakashita, T., Kikuchi, M., Suzuki, T., Nokura, M., Flame-spread limit from interactive burning droplets in microgravity, 37th International Symposium on Combustion, Dublin, Ireland, 2018-7.
- 35. Uneyama, R., Iwai, K., Nagata, K., Yoshida, Y., Seo, T., Mikami, M., A Study of Flame Spread of n-Decane Droplet Arrays with Fuel-vapor Jet at High Pressures in Microgravity, The 7th Joint Conference on Renewable Energy and Nanotechnology, Ube, Japan, 2018-12.
- 36. Mikami, M., Yoshida, Y., Kikuchi, M., Dietrich, D.L., Anomalous Behavior in Flame Spread A over Randomly Distributed Droplet Clouds in Microgravity aboard Kibo on the ISS, 12th Asia-Pacific Conference on Combustion, Fukuoka, Japan, 2019-7.
- Mikami, M., Seo, T., Yoshida, Y., Nomura, H., Suganuma, Y., Sakashita, T., Kikuchi, M., Kan, A., Dietrich, D.L., "Group Combustion" The First Combustion Experiment aboard Kibo/ISS -, ISS R&D Conference 2019, Atlanta, USA, 2019-7.
- 38. Mikami, M., Droplet Cloud Combustion Experiments "Group Combustion" aboard Kibo/ISS | A [Invited Lecture], China National Symposium on Combustion 2019, 2019-10
- 39. Mikami, M., Droplet-Cloud-Combustion Experiments "Group Combustion" aboard Kibo on | A the ISS [Plenary Lecture], The 20th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems - Asia, 2019-12

口頭発表(国内会議·研究会)

- 1. 三上真人,液滴燃焼の常識と非常識 [招待講演],日本燃焼学会夏季研究会,2008年9月
- 2. 瀬端宏幸,野村浩司,三上真人,菊池政雄,列方向に移動可能な燃料液滴列を用いた火炎燃 え広がり基礎実験,第46回燃焼シンポジウム,京都,2008年12月
- 3. 岩崎拓史,野村浩司,氏家康成,菊池政雄,三上 真人,液滴列の火炎燃え広がりに及ぼす列 周囲予混合気および液滴間隔の影響,第46回燃焼シンポジウム,京都,2008年12月
- 4. 土田祐己,藤山智彰,三上真人,小嶋直哉,ランダム分散液滴群の燃え広がり速度に関する研究,第46回燃焼シンポジウム,京都,2008年12月

- 藤山智彰,松村泰裕,三上真人,小嶋直哉,微小重力場における干渉を伴う液滴の予蒸発が不 等間隔正デカン液滴列の燃え広がりに与える影響,第46回燃焼シンポジウム,京都,2008年 12月
- 5. 三上真人,宇宙からエンジン開発!? [招待講演],無重量セミナーin 土岐,土岐市,2008 年 12月
- 松村泰裕,藤原佳亮,三上真人,小嶋直哉,微小重力場における二次元液滴群要素の燃え広が りと液滴周りの温度分布に関する一考察,第 53 回宇宙科学技術連合講演会,京都,2009 年 9 月
- 8. 末松孝章, 菊池政雄, 依田眞一, 森上修, 野村浩司, 梅村章, 三上真人, 「きぼう」での燃焼実験 に向けた準備状況と課題, 第53回宇宙科学技術連合講演会, 京都, 2009年9月
- 9. 高橋弘,野村浩司,三上真人,菊池政雄,予混合気中の燃料液滴列を燃え広がる火炎と液滴の 熱的干渉,第47回燃焼シンポジウム,札幌,2009年12月
- 10. 瀬端宏幸,野村浩司,三上真人,菊池政雄,複数の列方向移動可能液滴を含む燃料液滴列火 炎燃え広がり実験,第18回微粒化シンポジウム,福岡,2009年12月
- 11. 菊池政雄,山本信,末松孝章,依田眞一,菅野亙泰,三上真人,燃料液滴間火炎燃え広がり過 程の数値解析,第 42 回流体力学講演会/航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム 2010,米子,2010年6月
- 12. 高橋弘, 野村浩司, 菊池政雄, 燃料蒸気予混合気中の液滴列燃え広がりにおける火炎と液滴の 熱的干渉微小重力実験, 第48回燃焼シンポジウム, 福岡, 2010年12月
- 13. 菊池政雄, 末松孝章, 山本信, 三上真人, 二次元不等間隔液滴群要素の燃え広がりに関する数 値解析, 第 48 回燃焼シンポジウム, 福岡, 2010 年 12 月
- 14. 廣瀬勉,藤原佳亮,瀬尾健彦,三上真人,微小重力場における燃料液滴群要素の燃え広がり挙動,日本機械学会中国四国学生会第41回学生員卒業研究発表講演会,岡山,2011年3月
- 15. 三上真人,液滴群の燃え広がりと群燃焼 [話題提供],日本機械学会エンジンシステム部門持続可能な社会のためのエンジン技術研究会,2011年5月
- 16. 田崎彩,山本信,菊池政雄,高柳昌弘,久康之,森上修,野村浩司,梅村章,三上真人,「きぼう」 における液滴群燃焼実験の現在の状況と課題,第55回宇宙科学技術連合講演会,松山,2011 年11月
- 17. 山本信, 菊池政雄, 高柳昌弘, 三上真人, 野村浩司, 梅村章, 森上修, 「きぼう」を利用した液滴 群燃焼実験プロジェクトの概要, 日本マイクログラビティ応用学会第25回学術講演会, 横浜, 2011 年 11 月
- 18. 大窪弾,野村浩司,高橋弘,菊池政雄,燃料蒸気一空気予混合気中の液滴列を燃え広がる火炎 先端での液滴の点火挙動,第49回燃焼シンポジウム,横浜,2011年12月
- 19. 廣瀬勉, 瀬尾健彦, 三上真人, 菊池政雄, 微小重力場における正デカン液滴群要素の局所燃え 広がり限界距離とその方向依存性に関する研究, 第 20 回微粒化シンポジウム, 広島, 2011 年 12 月
- 20. 三上真人, 液滴群燃焼 [話題提供], 日本機械学会エンジンシステム部門日本機械学会 N.11-129 講習会 噴霧燃焼の理論と実際 - 液滴燃焼からレシプロ・ガスタービン・ロケット機関にお ける実例まで-, 東京, 2012 年 1 月
- 21. 三上真人, 液滴燃焼から複雑な噴霧燃焼へ [招待講演], 宇宙航空研究開発機構第3回燃焼セ ミナー, 東京, 2012年2月
- 22. 須藤久美子,野村浩司,三上真人,菊池政雄,列方向移動可能複数液滴を用いた燃料液滴列の 火炎燃え広がり実験,日本機械学会関東学生会第51回学生員卒業研究発表講演会,習志野, 2012 年 3 月

- 23. 大窪弾,野村浩司,高橋弘,菊池政雄,微小重力環境で燃料蒸気一空気予混合気中の液滴列を 燃え広がる火炎先端の挙動と液滴の点火挙動の観察,日本機械学会関東支部第 18 期総会講 演会,習志野,2012 年 3 月
- 24. 渡利英貴,廣瀬勉,瀬尾健彦,三上真人,微小重力場における干渉二液滴周りの燃え広がり限 界領域の調査,日本機械学会中国四国学生会第42回学生員卒業研究発表講演会東広島, 2012年3月
- 25. 廣瀬勉, 渡利英貴, 瀬尾健彦, 三上真人, 微小重力場における二液滴干渉燃焼が局所燃え広が り限界距離とその方向依存性に及ぼす影響, 日本機械学会エンジンシステム部門西日本エンジ ンシステム研究会夏季セミナー, 鳥取県大山町, 2012 年 9 月
- 26. 菅勇志, 菊池政雄, 田崎彩, 高柳昌弘, 久康之, 「きぼう」における液滴群燃焼実験装置の開発 状況, 第56回宇宙科学技術連合講演会, 別府, 2012 年 11 月
- 27. 大窪弾,野村浩司,菊池政雄,燃料蒸気-空気予混合気中の燃料液滴列を燃え広がる火炎の 微小重力実験 -火炎半径履歴と液滴直径履歴の計測-,第50回燃焼シンポジウム,名古屋, 2012 年 12 月
- 28. 須藤久美子,野村浩司,三上真人,菊池政雄,複数の列方向移動可能液滴を用いたデカン液滴 列の火炎燃え広がり地上実験,第 50 回燃焼シンポジウム,名古屋, 2012 年 12 月
- 29. 渡利英貴, 廣瀬勉, 瀬尾健彦, 三上真人, TFP 法を用いた燃料液滴群要素の燃え広がり特性の 実験的調査, 熱工学コンファレンス 2013, 弘前, 2013 年 10 月
- 30. 菅勇志, 菊池政雄, 高柳昌弘, 水島隆成, 「きぼう」における液滴群燃焼実験装置の開発状況, 日本マイクログラビティ応用学会第 27 回学術講演会, 東京, 2013 年 11 月
- 31. 野村浩司, 須藤久美子, 三上真人, 菊池政雄, D. Dietrich, FLEX-2Jにおける燃料液滴列火炎 燃え広がり実験, 日本マイクログラビティ応用学会第 27 回学術講演会, 東京, 2013 年 11 月
- 32. 瀬尾健彦, H. Saputro, 三上真人, 菊池政雄, パーコレーションモデルを用いた二次元液滴群の 燃え広がり特性に関する検討, 日本マイクログラビティ応用学会第 27 回学術講演会, 東京, 2013 年 11 月
- 33. 池山典孝,野村浩司,氏家康成,燃料液滴列を燃え広がる火炎の先端挙動と液滴の点火挙動 を観察するための小型落下塔を用いた微小重力実験,第 51 回燃焼シンポジウム,東京, 2013 年 12 月
- 34. 佐野成太,渡利英貴,瀬尾健彦,三上真人,低圧微小重力場における燃料液滴列の燃え広がり 特性の調査,日本機械学会中国四国学生会第44回学生員卒業研究発表講演会,鳥取,2014 年3月
- 35. 佐野成太,瀬尾健彦,三上真人,微小重力場低圧雰囲気における不等間隔燃料液滴列の燃え 広がり特性の実験的調査,日本マイクログラビティ応用学会第28回学術講演会,姫路,2014年 11月
- 36. 菅沼祐介, 野村浩司, 三上真人, 菊池政雄, 列方向移動可能液滴間を燃え広がる火炎が液滴の運動に及ぼす影響, 日本マイクログラビティ応用学会第28回学術講演会, 姫路, 2014 年11 月
- 37. 池山典孝, 菅沼祐介, 野村浩司, 氏家康成, 当量比が定義できる空間における燃料液滴列の火 炎燃え広がりに及ぼす雰囲気圧力の影響, 第 52 回燃焼シンポジウム, 岡山, 2014 年 12 月
- 38. 菅沼祐介, 池山典孝, 野村浩司, 氏家康成, 燃料液滴列火炎燃え広がり挙動の初期液滴直径 依存性に関する微小重力実験, 第 52 回燃焼シンポジウム, 岡山, 2014 年 12 月
- 39. 三上真人,「きぼう」での宇宙実験「Group Combustion」[話題提供],日本燃焼学会夏季研究 会,廿日市,2015 年 8 月
- 40. 吉田泰子, 佐野成太, 本松直也, 瀬尾健彦, 三上真人, 菊池政雄, 菅勇志, 微小重力場におけ る燃料液滴群の燃え広がり認識手法, 第 53 回燃焼シンポジウム, つくば, 2015 年 11 月

- 41. 三上真人, ISS「きぼう」初の宇宙燃焼実験(3分 Talk), フロムページ 夢ナビ3分 Talk, 福岡, 2016 年 10 月
- 42. 三上真人, ISS「きぼう」初の宇宙燃焼実験, フロムページ 夢ナビライブ, 福岡, 2016 年 10 月
- 43. 三上真人, 無重力の不思議 ~無重力の国際宇宙ステーション「きぼう」でモノを燃やせば~, JAXA・山口県・山口大学 宇宙セミナー, 宇部, 2016 年 11 月
- 44. 平賀翔季,野村浩司,菅沼祐介,三上真人,菊池政雄,Daniel L. Dietrich,列方向にのみ移動可能 な浮遊液滴を用いた燃料液滴列燃え広がり微小重力実験,第 54 回燃焼シンポジウム,仙台, 2016 年 11 月
- 45. 吉田泰子,本松直也,岩井健太郎,瀬尾健彦,三上真人,微小重力場における燃料液滴群要素の 燃え広がり速度増加機構,第54回燃焼シンポジウム,仙台,2016年11月
- 46. 永田拳太郎,吉田泰子,本松直也,岩井健太郎,瀬尾 健彦,三上真人,液滴直径の不均一性 が燃料液滴列の燃え広がり特性に与える影響,日本機械学会中国四国学生会 第47回学生員 卒業研究発表講演会,広島,2017年3月
- 47. 萩原和仁,橘田 聖,野村浩司,菅沼祐介,微小重力環境を用いた燃料液滴列火炎燃え広がり に及ぼす圧力の影響,日本機械学会関東学生会第 56 回学生員卒業研究発表講演会,東京, 2017年3月
- 48. 吉田泰子, 岩井健太郎, 永田拳太朗, 瀬尾健彦, 三上真人, 森上修, 坂下哲也, 菊池政雄, 野 倉正樹, 鈴木拓真, ISS「きぼう」での燃焼実験「Group Combustion」における液滴群の燃え広 がり挙動, 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回学術講演会, 習志野, 2017 年 10 月
- 49. 金豊, 野村浩司, 菅沼祐介, 氏家康成, 燃料液滴列を燃え広がる火炎の燃え広がり速度に及ぼ す雰囲気圧力の影響に関する短時間微小重力実験, 日本マイクログラビティ応用学会第 29 回 学術講演会, 習志野, 2017 年 10 月
- 50. 平賀翔季, 野村浩司, 菅沼祐介, 三上真人, 菊池政雄, Daniel Dietrich, 燃料液滴列火炎燃え 広がりにおいて液滴運動が起こる機構を解明するための実験装置開発, 日本マイクログラビティ 応用学会第 29 回学術講演会, 習志野, 2017 年 10 月
- 51. 三上真人, 瀬尾健彦, 吉田泰, 野村浩司, 菅沼祐介, 森上修, 梅村章, 坂下哲也, 菊池政雄, 野倉正樹, 鈴木拓真, D.L. Dietrich, ISS「きぼう」での液滴群燃え広がり実験「Group Combustion」, 第 55 回燃焼シンポジウム, 富山, 2017 年 11 月
- 52. 吉田泰子, 岩井健太郎, 永田拳太郎, 瀬尾健彦, 三上真人, 森上修, 坂下哲也, 菊池政雄, 野 倉正樹, 鈴木拓真, 微小重力場における液滴干渉を伴う液滴群要素の燃え広がり限界特性 – ISS「きぼう」における「Group Combustion」実験結果-, 第 55 回燃焼シンポジウム, 富山, 2017 年 11 月
- 53. 岩井健太郎, 吉田泰子, 永田拳太郎, Herman SAPUTRO, 瀬尾健彦, 三上真人, 高圧における 液滴間燃え広がり微小重力実験と液滴群燃え広がり解析, 第 55 回燃焼シンポジウム, 富山, 2017 年 11 月
- 54. 菅沼祐介,野村浩司,氏家康成,燃料液滴列を燃え広がる火炎先端での液滴の点火挙動,第 55回燃焼シンポジウム,富山,2017年11月
- 55. 三上真人, 液滴燃焼の基礎と ISS「きぼう」での宇宙燃焼実験 [話題提供], 日本エネルギー学 会・日本液体微粒化学会 微粒化セミナー, 東京, 2017 年 12 月
- 56. 宇根山凌, 吉田泰子, 岩井健太郎, 永田拳太郎, 瀬尾健彦, 三上真人, 亜・超臨界圧力におけ る正デカン液滴列の燃え広がり特性の調査, 日本機械学会中国四国学生会 第48回学生員卒 業研究発表講演会, 徳島, 2018 年3月
- 57. 永田拳太郎, 吉田泰子, 宇根山凌, 瀬尾 健彦, 三上真人, 微小重力場における干渉ニ液滴を 含む不等直径液滴列の燃え広がり特性に関する調査, 日本マイクログラビティ応用学会第 30 回 学術講演会, 岐阜, 2018 年 10 月
- 58. 吉田泰子,永田拳太郎,宇根山凌,瀬尾 健彦,三上真人,菊池政雄, ISS「きぼう」における 「Group Combustion」実験結果 一微小重力場におけるランダム分散液滴群の局所燃え広がり 限界一,日本マイクログラビティ応用学会第 30 回学術講演会,岐阜,2018 年 10 月
- 59. 吉田泰子,永田拳太郎,宇根山凌,瀬尾健彦,三上真人,菊池政雄,微小重力場におけるラン ダム分散液滴群の燃え広がり特性 - 燃え広がり経路が局所燃え広がり速度に及ぼす影響 -,第 56 回燃焼シンポジウム,堺,2018 年 11 月
- 60. 松本昂大,吉田泰子,永田拳太郎,宇根山凌,瀬尾健彦,三上真人,長時間微小重力場におけ るランダム分散液滴群の群燃焼発生限界付近における局所燃え広がり特性に関する研究,日 本機械学会中国四国学生会 第49回学生員卒業研究発表講演会,宇部,2019年3月
- 61. 三上真人, 松本昂大, 吉田泰子, 菊池政雄, Daniel L. Dietrich, ランダム分散液滴群の燃え広 | A がりにおける特異燃焼挙動と液滴クラスター列を用いた仮説検証 ~ ISS「きぼう」における 「Group Combustion」実験結果~, 日本マイクログラビティ応用学会第 31 回学術講演会, 仙台, 2019 年 10 月
- 62. 野村浩司, 菅沼祐介, 三上真人, 菊池政雄, 液滴列燃え広がり火炎と移動可能液滴の干渉に関 | A する「きぼう」微小重力実験の結果に関する考察 ~落下塔実験結果との比較~, 日本マイクロ グラビティ応用学会第 31 回学術講演会, 2019 年 10 月
- 63. 吉田 泰子, 瀬尾 健彦, 三上 真人, 菊池 政雄, 微小重力場におけるランダム分散液滴群の燃 | A え広がりにおける複雑性に関する一考察, 第 57 回燃焼シンポジウム, 2019 年 11 月
- 64. 三上真人, ISS「きぼう」での宇宙燃焼実験「Group Combustion」 [基調講演], 第 57 回燃焼シ | A ンポジウム, 2019 年 11 月

<u>獲得外部競争的資金</u>

- 科学研究費補助金 基盤 B(一般). エンジン高空再着火性能評価のための低圧混相燃焼物理の構築,研究期間:2012 年 4 月 2015 年 3 月,代表者:三上真人
- 2. 科学研究費補助金 基盤 B(一般). エンジン用複雑系混相燃焼物理の構築 ~高空再着火時低 圧燃焼から定常高圧燃焼まで~,研究期間:2015 年 4 月 - 2018 年 3 月,代表者:三上真人
- 3. 科学研究費補助金 基盤 B(一般). 微小重力科学による素過程極限理解とエンジン用複雑系混 相燃焼への展開,研究期間:2018 年 4 月 - 2021 年 3 月,代表者:三上 真人

<u>受賞</u>

- 1. 三上真人, (財) 宇部興産学術振興財団: 学術奨励賞, 反応を伴う複雑系におけるパーコレーションモデルに関する研究, 2009 年
- (2) 廣瀬勉,日本機械学会エンジンシステム部門西日本エンジンシステム研究会夏季セミナー最優 秀プレゼンテーション賞,微小重力場における二液滴干渉燃焼が局所燃え広がり限界距離とそ の方向依存性に及ぼす影響,2012年9月
- 3. 佐野成太,日本機械学会中国四国支部学生員卒論発表会優秀講演賞,低圧微小重力場にお ける燃料液滴列の燃え広がり特性の調査,2014年3月
- 永田拳太郎,日本機械学会中国四国支部学生員卒論発表会優秀講演賞,液滴直径の不均一 性が燃料液滴列の燃え広がり特性に与える影響,2017年3月
- 5. 吉田泰子,日本マイクログラビティ応用学会毛利ポスターセッション優秀賞, ISS「きぼう」での燃 焼実験「Group Combustion」における液滴群の燃え広がり挙動,2017年10月
- 久康之,佐藤靖,野倉正樹,後藤芳正,花房直,山本信,菅勇志,菊池政雄,野村浩司,三上 真人,日本燃焼学会 技術賞,国際宇宙ステーションにおける液滴群燃焼実験装置(GCEM)の 開発,2017年11月
- 7. 宇根山凌,日本機械学会中国四国支部学生員卒論発表会優秀講演賞,亜・超臨界圧力におけ

る正デカン液滴列の燃え広がり特性の調査, 2018 年 3 月

- 吉田泰子、日本マイクログラビティ応用学会学生ロ頭発表 最優秀賞、ISS「きぼう」における「Group Combustion」実験結果 一微小重力場におけるランダム分散液滴群の局所燃え広がり 限界一、2018 年 12 月
- 永田拳太郎,日本マイクログラビティ応用学会学生ロ頭発表 最優秀賞,微小重力場における 干渉二液滴を含む不等直径液滴列の燃え広がり特性に関する調査,2018 年 12 月
- 10. 三上真人, 野村浩司, 菅沼祐介, 菊池政雄, 鈴木拓真, 野倉正樹, 日本マイクログラビティ応用 | A 学会 2019 年度論文賞, Generation of a Large-Scale n-Decane-Droplet Cloud Considering Droplet Pre-Vaporization in "Group Combustion" Experiments aboard Kibo/ISS, 2019 年 10 月

<u>報道・インターネット発表</u>

- 1. 「宇宙からエンジン開発!? 微小重力状態を利用した燃料液滴群の燃焼メカニズム解明」,宇部 日報 工学部 NOW 研究アラカルト,2008 年 3 月 28 日
- 2. 「山口大准教授の実験「きぼう」で」, 読売新聞, 2008 年 3 月 31 日
- 3.「三上准教授(山大大学院)の研究 液体燃料の燃焼メカニズム 日本初の有人実験棟「きぼう」の実験に採用」, 宇部日報, 2008 年 4 月 18 日
- 4. 「宇宙基地で燃焼実験へ 山大院教授ら「きぼう」で初」,中国新聞,2016年10月9日
- 5.「大西宇宙飛行士 ISS 長期滞在活動報告(Vol.32) 液滴群燃焼実験の紹介」, YouTube 公開 動画. 2016 年 10 月 31 日公開. https://www.youtube.com/watch?v=IW8h-Y4OrgY
- 6.「ISS「きぼう」初の宇宙燃焼実験/山口大学 三上 真人 先生【夢ナビ TALK】」,2016 年 10 月
 15 日実施の夢ナビ3分 Talk YouTube 動画,2016 年 11 月 6 日公開, https://www.youtube.com/watch?v=bT98IWGVp_A
- 7.「ISS「きぼう」初の宇宙燃焼実験」, 2016 年 10 月 15 日実施夢ナビライブ動画, https://talk.yumenavi.info/archives/1943?site=d
- きぼう利用実験「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明」紹介,宇 宙航空研究開発機構.http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/application/pm02/Mikami_J.pdf
- 液滴群燃焼実験供試体,宇宙航空研究開発機構 http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/mspr/gcem/
- 10. 物質科学実験 Group Combustion, 宇宙航空研究開発機 http://iss.jaxa.jp/kiboexp/theme/second/gcem/
- 11. Elucidation of Flame Spread and Group Combustion Excitation Mechanism of Randomlydistributed Droplet Clouds (Group Combustion), NASA https://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/experiments/1077.html
- 12.「「きぼう」で初めての燃焼実験が始まりました。「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発 現メカニズムの解明」(JAXA と山口大学との共同実験)」,宇宙航空研究開発機構 プレスリリ ース,2017 年 3 月 1 日, http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/170301_gcem.html
- 13.「国際宇宙ステーション・「きぼう」日本実験棟での燃焼実験に成功~JAXA と山口大学の共同 実験 Group Combustion 実験(研究代表者:三上真人教授)~」,山口大学 プレスリリース,
 2017年3月1日, http://www.yamaguchi-u.ac.jp/weeklynews/2016/_5853.html
- 14.「宇宙基地で燃焼実験成功」,中国新聞,2017年3月2日
- 15.「火炎燃焼機構解明に一歩 ISS で燃焼実験成功 山口大 JAXA」,日刊工業新聞,2017 年 3 月 3 日
- 16.「ISS「きぼう」初の宇宙燃焼実験」,国立大学 54 工学系学部長会議 国立大学 54 工学系学部 ホームページ Pict-Labo, 2017 年 3 月 24 日

https://www.mirai-kougaku.jp/pictlabo/pages/170324.php

- 17. "International Space Station: First Combustion Experiments, Japanese Experiment Module (Kibo)", The Combustion Institute CI News Letter (国際燃焼学会ニュースレター), 2017 年 3 月 27 日, https://www.combustioninstitute.org/news/advancements-incombustion/first-combustion-experiments-successfully-started-aboard-the-japaneseexperiment-module-kibo/
- 18.「無重カ下で燃焼実験に成功 世界初、山大研究グループなど」, 宇部日報, 2017 年 3 月 29 日
- 19.「湧き上がる炎の宇宙実験」.山口大学広報誌 Academi-Q 創刊号, 2018 年 4 月 http://www.yamaguchi-u.ac.jp/info/academiq/bn/_7105.html
- 20.「国際宇宙ステーションで初の燃焼実験 ~誰も知らない極限を探りたい~」, 三上真人ラジオ ゲスト出演, FM 山口 大人ウォーク, 2018 年 5 月 25 日, YouTube 公開動画 https://www.youtube.com/watch?v=XyQNfBbhL9A
- 21. 展示:「ISS日本実験棟「きぼう」初の宇宙燃焼実験」,山口博物館 宇宙兄弟展×やまぐちと宇宙,2018 年 7 月 19 日 2018 年 9 月 2 日
- 22. "KIBO" of the Space Station Succeeded in First Combustion Experiment, IHI Engineering Review, 51 (2) 2018. https://www.ihi.co.jp/var/ezwebin_site/storage/original/application/41adf3998fdce272f 1eab7ee96c05519.pdf
- 23. 菊池政雄, 三上真人テレビ出演, BS フジ科学番組ガリレオ X「焚火を眺めてサイエンス ~火の | A 不思議・燃焼のメカニズム~」, 2019 年 8 月 11 日放送(8 月 18 日再放送) http://web-wac.co.jp/program/galileo/gx190811

別紙9−2

「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明 (Group Combustion)」 平成30年度 ISS・きぼう利用ミッション科学成果評価結果

代表研究者:三上 真人(山口大学)

総合評価

S:目標を高度に達成し,特筆すべき成果を上げた(エクストラサクセス相当)

局所液滴間干渉,液滴移動,および輻射熱損失の影響に関して,世界で初めて,二次元配 列の多数液滴群燃焼に対する実験を実施し,全ての目標を充分に達成した.また,国際宇宙ス テーション・"きぼう"における良質な長時間微小重力場において,大規模なランダム分散液滴 群,移動可能液滴列,液滴クラスター列を配置し,燃焼の様子を長時間に渡り,詳細に観察す る世界に類を見ない独創的な装置を開発,成功裏に運用した.加えて,熱炎の燃え広がり限界 外のクラスターにおける冷炎の発生,伝播と見られる現象を把握できたことは今後の発展が期 待される成果である.

今後は、得られた単純場での実験結果により、理論解析・モデル構築を実施し、燃料蒸発・拡 散や化学反応を考慮した数値シミュレーションを用いて実証することが必要である。その成果の 上に立って、エンジンなどの連続噴霧燃焼系におけるメカニズムのモデル化に指針を与えるこ とを期待する、装置としても、可視光のみならず、赤外/紫外領域も計測可能な機能を整備した 装置を開発するなど、後継ミッションに繋がる検討を行うことも意義が高いと考えられる。

平成31年2月

きぼう利用テーマ選考評価委員会(物質・物理科学分野)

ISS・きぼう利用ミッション

「ランダム分散液滴群の燃え広がりと群燃焼発現メカニズムの解明(Group Combustion)」

研究成果報告書 代表研究者;三上真人(山口大学) 2019年1月

1. 背景·目的

航空エンジンのように液体燃料を安定的に連続燃焼させる ためには、火炎基部において連続供給される燃料噴霧中の 燃え広がりとその後の全体の群燃焼(Group Combustion) の発現が必要である(図1).しかしながら、噴霧の燃え広が りや群燃焼発生特性は完全には明らかになっていない、噴霧 中の燃え広がりを試行錯誤によらずに制御し、高効率燃焼を 実現するためには、噴霧を構成する液滴間の燃え広がり機

構の正確な把握とそれを噴霧全体の群 燃焼に展開することが可能なモデルや シミュレーション技術が必要である.

本研究グループは液滴間燃え広がり 機構を液滴群の局所つながりルールと し、複雑系としてのランダム分散液滴群 の燃え広がりへと展開する新たなパーコ レーションモデルを提案し、群燃焼発現 機構を調べている.このパーコレーショ ンモデルでは、局所の液滴間燃え広が りがマクロな群燃焼発生特性を決めてい るため、燃え広がり機構の解明が重要 である.図2に燃料噴霧における燃え広 がりの概念図を示す.噴霧中の液滴の



図1 燃料噴霧の群燃焼



図2 燃料噴霧(液滴群)の燃え広がりの概念図

ランダム分散性により液滴間隔は均一ではないため,液滴スケールの燃え広がりは、局所の液滴 干渉の影響を受けて変化することが考えられる.また、実際の液滴は空間を移動可能であるため、 自由液滴の影響も考えられる.さらに、群火炎から別の液滴クラスターへの燃え広がりでは、クラス タースケールに依存した輻射熱損失の影響も受けて変化することが考えられる.そこで、本軌道上 実験では、これまでの燃え広がりのパーコレーションモデルには考慮されていないこれらの3つの影響について、良質な長時間微小重力場を利用して詳細に調べることを目的とした.

2. 実験内容·成果

燃え広がりに及ぼす局所液滴干渉の影響について, SiC ファイバー格子上に配置した干渉燃焼 する2または3液滴からの燃え広がり(図 3)と67 個から152 個の液滴から成るランダム分散群の 燃え広がり(図 4)とを対象に調べた,自由液滴の影響は,直線ファイバー上に配置した移動可能 液滴列の燃え広がり(図 5)を対象に調べた.輻射熱損失の影響は,液滴クラスター間の燃え広が り(図 6)を対象に調べた.以下に主な成果をまとめる.

(1) 着火時の液滴径をコントロールした液滴群生成手法を軌道上実験での検証結果を踏まえて構築 した.これにより,良質な長時間微小重力場においてランダム分散液滴群,液滴群要素,移動可能 液滴列,液滴クラスター列を対象とした燃え広がり実験が可能となり,高精度なデータの取得を行 えた.

- (2) 干渉燃焼する2液滴または3液滴からの燃え広がり限界距離分布は干渉液滴の質量中心を中心とした球状分布で近似でき,燃え広がり起点液滴の燃焼寿命に依存して決まることが明らかとなった.
- (3) ランダム分散液滴群の燃え広がりによる群燃焼発現限界前後の群全体の燃焼特性が明らかとなった. 群燃焼発現限界付近において燃焼特性時間および未燃液滴数密度は最大値を示す.
- (4) ランダム分散液滴群の群燃焼発現限界付近の群燃焼発生につながる重要な燃え広がりを決める 要素として、液滴干渉による局所燃え広がり限界拡大効果に加えて、燃え広がり経路の複雑化に 伴う予熱による局所燃え広がり限界拡大の可能性があることが示された。
- (5) ランダム分散液滴群の群燃焼発現限界付近において、液滴クラスターの大規模着火現象および 既燃領域における低速火炎伝播による再燃焼現象が新規に観察された.
- (6)低揮発性燃料を用いた場合の移動可能液滴列の燃え広がりにおいて、移動する3つの液滴の関係により燃え広がりパターンが4つに分類されることが明らかとなった.特に、移動可能な2液滴間の燃え広がりに対しその先の移動可能液滴の影響があることが明確となった。
- (7)液滴クラスター間の燃え広がり限界無次元距離はクラスターまわりに形成される群火炎サイズが 大きいほど小さくなることが明らかとなった.これは、群火炎サイズが大きいほど火炎領域からの 輻射熱損失が大きくなるためと考えられる.
- (8)液滴クラスター間の燃え広がりにおいて、熱炎の燃え広がり限界外のクラスターにおいて冷炎が 発生する現象、また、熱炎から冷炎への遷移後の冷炎伝播と見られる現象が新規に観察された. これにより、従来の熱炎に基づく燃え広がり限界の考え方を冷炎を考慮して拡張する必要があるこ とが示唆された.



図3 干渉3液滴からの燃え広がり



図 5 燃え広がり中の移動可能液滴



図4 ランダム分散 67 液滴群およびその燃焼



図62液滴クラスター間の燃え広がり

Summary report of the ISS-Kibo utilization mission "Elucidation of Flame Spread and Group Combustion Excitation Mechanism of Randomly Distributed Droplet Clouds (Group Combustion)" Principal Investigator; Masato Mikami (Yamaguchi University) January 2019

1. Background and Objectives

Stable combustion of liquid fuels like in aero engines requires the flame spread to the fuel spray near the flame base and groupcombustion excitation in the downstream region (Fig. 1). However, the flame-spread and group-combustion-excitation mechanisms have not yet been completely clarified. In order to control the flame spread in the spray without relying on trial-and-errors and realize high-efficiency combustion, right understandings of flame spread

mechanism and models or simulation methods which describe the groupcombustion excitation through flame spread.

Our research group has proposed a new percolation model which employs the flame spread between droplets as the local connection rule and describes the flame spread over the randomly distributed droplet cloud as a complex system and studied the group-combustion-excitation mechanism. Since the local flame spread rule determines macroscopic characteristics of groupcombustion excitation in this percolation model, it is important to elucidate the flame-



Fig. 1 Group combustion of fuel spray



Fig. 2 Flame spread of fuel spray (droplet cloud)

spread mechanism. Figure 2 depicts the flame spread in a spray. Since the droplet spacing is not uniform due to random dispersity of droplets in spray, the flame spread in the droplet scale will be affected by the local droplet interaction. The flame spread is possibly affected by free droplets since the droplets in spray are movable in space. Furthermore, the flame spread from the group flame to a droplet cluster will be affected by the radiative heat loss depending on the cluster scale. Therefore, the purpose of the present experiments aboard the Kibo/ISS is to study these three effects on the flame spread which have not yet been considered in the percolation model of flame spread in droplet clouds, using high-quality long-duration microgravity.

2. Experimental Description and Achievements

We investigated the effects of local droplet interaction on flame spread using two types of droplet systems arranged on an SiC-fiber lattice: droplet-cloud elements with two or three interactive droplets (Fig. 3) and randomly distributed droplet clouds with 67-152 droplets (Fig. 4), the effects of free droplet using movable droplets arranged a straight fiber (Fig. 5), and the effects of radiative heat loss using droplet-cluster arrays (Fig. 6). Main findings and achievements are as follows:

(1) We developed a droplet-cloud generation method which controlled the droplet diameter at ignition based on the

verification results obtained aboard the Kibo/ISS. This method enabled us to realize the flame-spread experiments in high-quality long-duration microgravity with randomly distributed droplet clouds, droplet-cloud elements, movable droplet arrays and droplet-cluster arrays and to obtain high quality data.

- (2) The flame-spread-limit distribution around interactive burning two or three droplets is nearly spherical with the center at the center of mass of interacting droplets and depends on the burning lifetime of the interacting droplets.
- (3) The overall combustion characteristics have been clarified around the group-combustion-excitation limit for the flame spread of randomly distributed droplet clouds. The characteristic time scale of combustion and the number density of unburned droplets attain maximum around the group-combustion-excitation limit.
- (4) In addition to the local interactive effect, the extension of local flame-spread limit due to the droplet pre-heating associated with the complicated flame-spread path conceivably contributes to the extension of groupcombustion-excitation limit.
- (5) We newly observed two phenomena near the group-combustion-excitation limit: a large-scale ignition of droplet cluster and re-burning by a slow flame propagation in a burned area.
- (6) The flame-spread patterns for movable droplets with a low-volatility fuel are classified into four patterns depending on the relationship among movable three droplets. The flame spread between the first and second movable droplets is affected by the next third movable droplet.
- (7) The normalized flame-spread-limit distance between the droplet clusters is smaller for a larger group flame. This is due to the increased radiative heat loss from the flame region.
- (8) We newly observed two phenomena in the flame spread between droplet clusters: a cool-flame excitation around the droplet existing outside the flame-spread limit of hot flame and a cool-flame propagation-like phenomenon. These findings suggest that it is necessary to reconsider the conventional definition of flame-spread limit based on the hot flame by considering the contribution of cool flame.



Fig. 3 Flame spread from interactive burning three droplets



Fig. 5 Movable droplets during flame spread



Fig. 4 Randomly distributed 67 droplets and their combustion



Fig. 6 Flame spread between two-droplet clusters