

日本実験棟「きぼう」
植物実験

宇宙を感じる

植物のしくみ

植物実験の動画を見てみよう!

QRコードを読み込むと微小重力環境で
成長するシロイヌナズナの動画が見られます。
※WindowsMediaPlayerの再生環境が必要です。



宇宙を感じる植物のしくみ



CONTENTS

P4 宇宙へのあゆみ

P6 基礎知識 1 宇宙実験で用いる装置

P7 基礎知識 2 宇宙実験で用いる植物

P8

解説 1 「生活環」

JAXAが開発した「命を育む小さな箱」を使い、シロイヌナズナを栽培して生活環を観察。宇宙でも植物がきちんと育つことを証明しました。また、世界で初めて重力あり(1G)と重力なし(ゼロG)で生活環を比較することに成功しました。

P10

解説 2 「細胞壁と抗重力反応」

世界で初めて、宇宙で細胞壁の構造を調べ、重力に耐えて強い細胞壁をつくる「抗重力反応」を研究。微小管に異常がある植物も宇宙なら正常に育つことを証明したほか、細胞壁が緩むタイミングとそのメカニズムの解明にも成功しました。

植物の ライフサイクル

P14 実験の成果

P16 インタビュー

◎「宇宙実験が果たす役割」

東北大学大学院 高橋秀幸 教授

P12

解説 3 「重力応答と植物ホルモン」

根を曲がらせる「影の物質」を宇宙で探る実験において、世界で初めて微小重力下で水分の多い方に伸びる特性(水分屈性)を観察。重力に隠されて地球では見ることのできなかった、植物の生命現象を明らかにしました。



「きぼう」植物実験の代表研究者の一人で、一般社団法人日本宇宙生物科学会理事長を務める東北大学 高橋教授に、宇宙で植物実験をする意義、宇宙実験にまつわるエピソード、JAXAの役割や宇宙生命科学の将来展望などを語っていただきました。

P18 展望 人類の未来を豊かにする植物実験

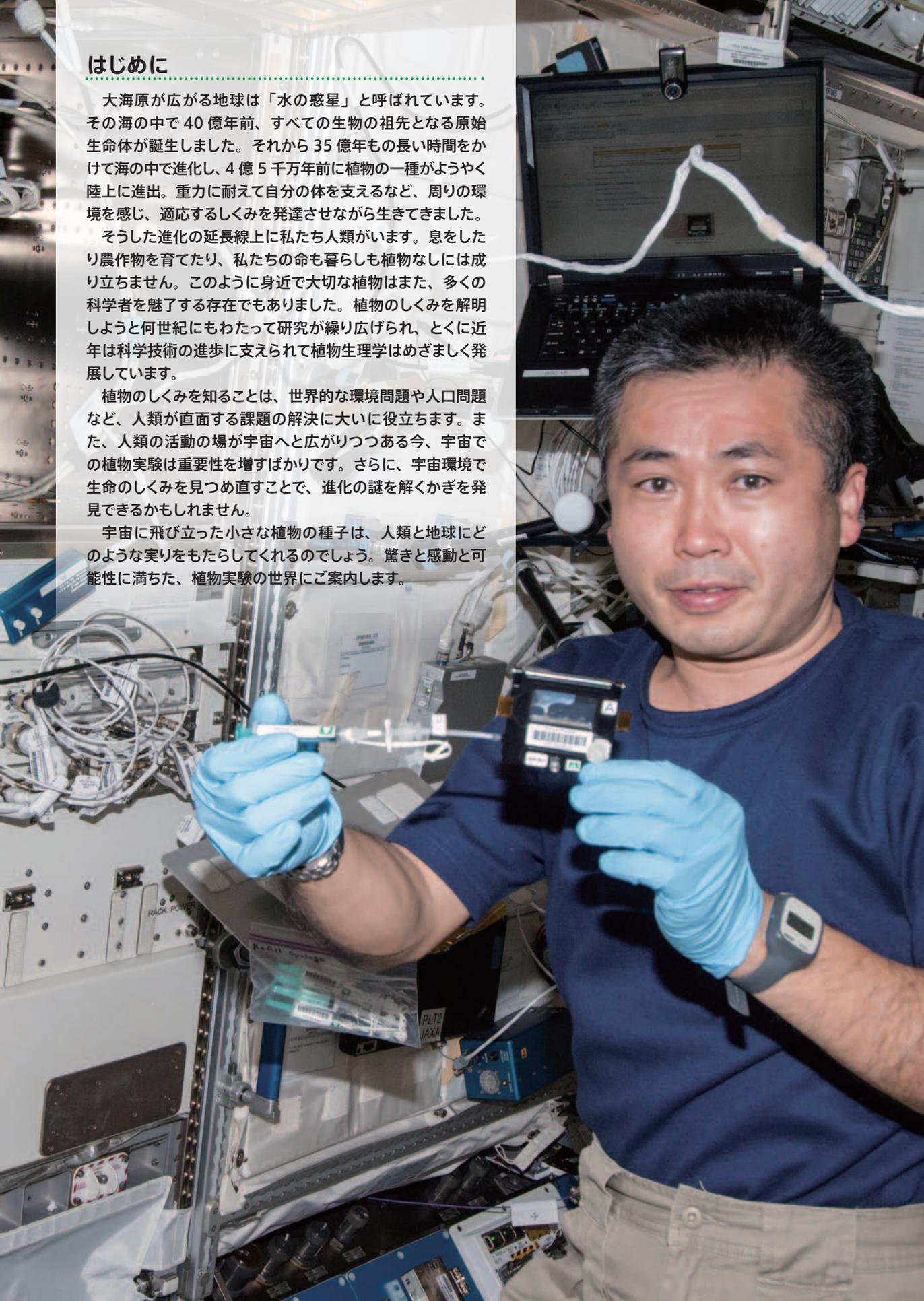
はじめに

大海原が広がる地球は「水の惑星」と呼ばれています。その海の中で40億年前、すべての生物の祖先となる原始生命体が誕生しました。それから35億年もの長い時間をかけて海の中で進化し、4億5千万年前に植物の一種がようやく陸上に進出。重力に耐えて自分の体を支えるなど、周りの環境を感じ、適応するしぐみを発達させながら生きてきました。

そうした進化の延長線上に私たち人類がいます。息をしたり農作物を育てたり、私たちの命も暮らしも植物なしには成り立ちません。このように身近で大切な植物はまた、多くの科学者を魅了する存在でもありました。植物のしぐみを解明しようとは何世紀にもわたって研究が繰り返され、とくに近年は科学技術の進歩に支えられて植物生理学はめざましく発展しています。

植物のしぐみを知ることは、世界的な環境問題や人口問題など、人類が直面する課題の解決に大いに役立ちます。また、人類の活動の場が宇宙へと広がりつつある今、宇宙での植物実験は重要性を増すばかりです。さらに、宇宙環境で生命のしぐみを見つめ直すことで、進化の謎を解くかぎを見えるかもしれません。

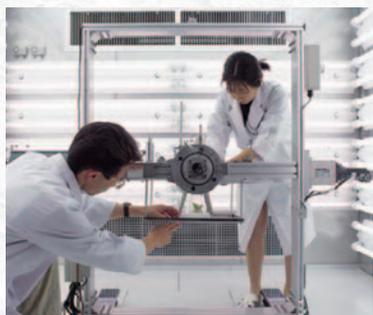
宇宙に飛び立った小さな植物の種子は、人類と地球にどのような実りをもたらしてくれるのでしょうか。驚きと感動と可能性に満ちた、植物実験の世界にご案内します。





宇宙へのあゆみ

茎は上へ、根は下へ。当たり前な植物の育ち方が、重力に影響されているとわかってから 200 年あまり。その詳しいしくみの解明は、長い歳月を経て宇宙実験に託されました。極めて貴重な宇宙実験の機会を活かすため、どれほど入念な準備がなされているのかをご紹介します。



地上で宇宙の微小重力に似た状態を模擬するクリノスタット装置。

1998 年、スペースシャトル・ディスカバリー (STS-95) は、高度約 555km を約 8 日間飛行。スペースシャトルは 2011 年に退役。



18 世紀から 21 世紀に持ち越された謎

植物の芽や茎は地面から上に、根は下に向かって伸びます。植物を横倒しにしても逆さにしても、やはり芽や茎は上に、根は下に向かって伸びていきます。「これには重力が関わっている」という仮説が議論され始めたのは、18 世紀半ばのことです。

それ以来たくさんの科学者が植物と重力の関係を研究し、ようやく 19 世紀終盤になって、ダーウィン親子が重力を感じるしくみが根の先にあることを紹介しています。しかし依然として「どのように重力を感じているのか」、詳しいメカニズムはわからないままです。さまざまな仮説が出されても、地上の重力にじゃまされて検証することができません。

ようやく 20 世紀終盤になって、宇宙で植物実験ができる時代がやってきました。18 世紀から 21 世紀まで持ち越された大きな謎が、いよいよ解き明かされようとしています。



地上実験をコツコツ積み重ねて

さて、スペースシャトル時代が到来しても、宇宙への切符はあまりにも貴重で、なかなか手が届くものではありません。そこで科学者たちは、地上でさまざまな工夫をこらしてきました。たとえば落下塔による自由落下や、航空機による放物線飛行などの方法で、数秒から数十秒というごく短時間の微小重力環境をつくりだし、地上実験を繰り返しています。

また、人工的にステージを回転させ、試料にかかる重力の方向を変化させるクリノスタットという装置を使い、微小重力に似た環境で植物の反応を調べています。この装置は、短時間ではなく何日間も回し続けて実験することができます。

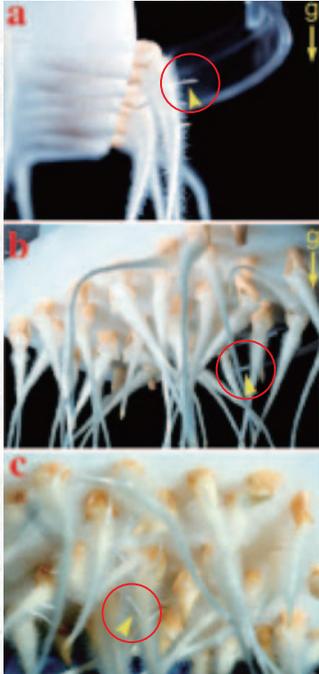
さらに、重力をなくすのではなく、遠心力によって地上の何倍もの重力をかける遠心機という装置もあります。これにより、植物が過重力でどのように反応するかを調べたり、無重力での反応を想像したりします。

こうしたさまざまな地上実験は、いざ宇宙へ飛び立つとき本当に価値ある実験をするための準備として、また、宇宙で実験装置が間違いなく動くことを事前に確かめるうえでも非常に重要です。





植物実験を行う向井千秋宇宙飛行士。STS-95は、日本、アメリカ、カナダ、欧州が共同で生命科学や微小重力科学の実験を実施。数々の貴重な成果が、後の「きぼう」での実験に活かされた。



地上(a,b)では重力に従うキュウリの側根が、宇宙(c)では水分の多い方に伸びることを発見。

スペースシャトルで宇宙実験の第一歩

スペースシャトルが初めて宇宙へ飛び立ったのは、1981年のことでした。日本は1987年にアメリカの国際宇宙ステーション計画への参加を決定。1992年に「きぼう」日本実験棟の利用テーマを公募しました。選ばれたテーマの実験準備や装置の開発を進める一方で、一部のテーマについて「きぼう」完成前にスペースシャトル実験をしています。

1998年に向井千秋宇宙飛行士が搭乗したスペースシャトル・ディスカバリーでは、7日間にわたり日本の4つの植物実験を実施しました(STS-95)。シロイヌナズナ、イネ、トウモロコシ、エンドウ、キュウリを使った実験により、微小重力では植物のかたち、成長する方向、細胞壁などが変化することを発見。ここで得られた成果は、2008年以降の国際宇宙ステーションでの実験に大いに役立てられました。

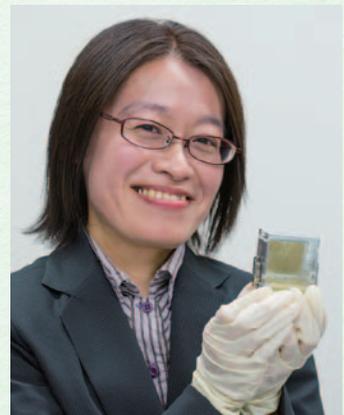
そしていよいよ、国際宇宙ステーションにおける長期間の無重力実験が本格的にスタート。しかし、宇宙の実験室を便利に使うことがゴールではありません。今後、人類は宇宙へと活動の場を広げていきます。国際宇宙ステーションは、月や火星へと人類が飛躍するためのステップでもあるのです。

Space Column

飛び立つ前の準備が成功のタネ

JAXA 有人宇宙技術部門 きぼう利用センター
主任開発員 矢野幸子

私は、スペースシャトル実験(STS-95)や国際宇宙ステーションでの実験において、実験装置の開発、航空機を使った実験機器の動作検証、サンプルを使った予備実験、宇宙飛行士の手順書作成や訓練など、幾重にもなる準備作業に携わってきました。スペースシャトルで行う2週間の実験を2年間かけて準備しました。これほど入念に準備するのは、少ないチャンスを活かし、絶対に実験を成功させ、1回の実験で可能な限り多くの成果を得るためです。当たり前のように装置が動き、実験が進むその裏には、大勢の努力が注がれています。そうした熱意に支えられているからこそ、日本は海外の10分の1ほどの少ない限られた実験のチャンスを活かし、世界トップクラスの研究成果をあげているのです。



手には、宇宙で植物を育てるために開発された植物実験ユニット内の植物生育容器(P6参照)。

基礎知識 1 宇宙実験で用いる装置

宇宙実験の舞台裏では、たくさんの専門家や技術者が力を結集しています。実験装置の開発もそのひとつ。ここでは、宇宙で使われる主な実験装置や機器をご紹介します。

植物実験を成功させるため、小さく、軽く、省エネで、効率よく、安全に実験ができる装置や、各実験テーマに合った機器を数多く開発しています。これらの装置や機器は、植物実験におけるもうひとつの大きな成果といえるでしょう。



クリーンベンチ (CB)

カビやホコリを防ぎ、無菌環境での実験もできるきれいな作業空間。温度調節、ガス検知、監視カメラなどの機能を備えています。



細胞培養装置 (CBEF)

温度・湿度・二酸化炭素濃度が一定に保たれた2つの培養室からなります。ここに、目的に応じて植物実験ユニットをセットします。



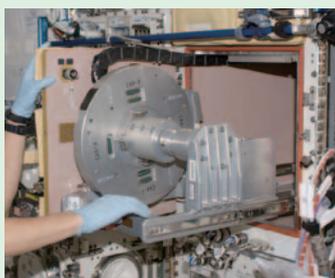
冷凍・冷蔵庫 (MELFI)

マイナス95℃、+2℃に設定することができ、実験後も地上に戻すまで冷蔵、冷凍で試料を保管できます。



蛍光顕微鏡

JAXAが新しく開発した高性能な顕微鏡で、微小管(P10～11参照)の詳しい観察が可能。地上からの遠隔操作や、地上へのリアルタイム送信ができます。



ターンテーブル

2つある培養室の一方に、ターンテーブルを設置。テーブルを回転させて地球と同じ重力環境をつくりだし、軌道上での対照実験を可能にしました。



化学固定装置 (CFA)

実験後の状態のままを保ち、貴重な試料を地球に持ち帰るために、化学処理をする器具。汎用性と安全性に優れています。



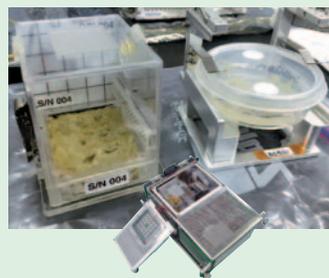
計測実験ユニット (MEU)

PEUの簡易版で、試料を固定するラックと温度センサーだけを備えたシンプルな箱です。



カメラ付計測実験ユニット (VMEU)

MEUにCCDカメラと照明が加わり、地上に画像を送ることができます。



植物実験ユニット (PEU)

給水、照明、温度と湿度の管理、成長の観察などがすべて自動的に行われる、命を育む小さな箱。植物の一生を地上から観察することができます(P8～9参照)。

基礎知識2 宇宙実験で用いる植物

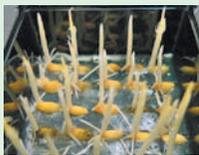
地上にはたくさんの種類の植物がありますが、その中からどのような植物が宇宙実験に選ばれたのでしょうか。ここでは、スペースシャトルと「きぼう」日本実験棟で使われている植物をご紹介します。

植物の分類法に、子葉の数で分ける方法があります。子葉が1枚の単子葉植物にはイネ、トウモロコシなど、子葉が2枚の双子葉植物にはシロイヌナズナ、キュウリ、アサガオなどがあります。単子葉と双子葉では細胞壁の構造が異なるため、宇宙実験では両方が使われています。



シロイヌナズナ

べんべん草の仲間、植物実験によく使われる代表的なモデル植物。宇宙での実験に適している理由は、背丈が小さく限られたスペースで栽培できること、発芽から次の種子をつくるまでの一生が約60日間と短いこと、全ゲノムが解読されていることなどです。



イネ

食糧として重要なイネが、重力に耐えて体を支えるしくみを調べます。イネも芽生えが小さく、全ゲノムが解読されており、宇宙実験に適しています。



キュウリ

ウリ科の植物は、芽を出すとき茎と根の境目に「ベグ」という突起をつくります。このベグと重力の関係や、根と水の関係調べます。

アサガオ

ツルが支柱に巻き付いてよじ登るアサガオ。宇宙では、茎がぐるぐる回りながら伸びる運動を調べます。

エンドウ

遺伝学や植物の生長生理学で欠かせない実験植物。宇宙では、植物ホルモンの動きと重力の関係を調べます。

トウモロコシ

スペースシャトル実験で、重力に対して自分の体を支えるしくみなどを調べました。

アズキ

「種子を用いたアジアの教育実験」で、東アジア原産で東南アジアにも普及しているアズキが使われました。

Space Column

宇宙と地上をつなぐ『種子を用いたアジアの教育実験 (SSAF)』

日本は、アジアで唯一の国際宇宙ステーション計画への参加国です。「SSAF」ミッションは日本がアジア諸国から宇宙へのゲートウェイとなり、アジア地域全体で、「きぼう」日本実験棟を活用していくためのプログラムです。1回目は2010年、「きぼう」から地上に戻ったアジア諸国原産のさまざまな種子を、アジア地域の児童・生徒に育ててもらいました。

2回目の2013年には、アズキの種子を「きぼう」と地上で同時に育て、子供たちが宇宙から送られる画像を見て、育ち方を比べました。





宇宙へ運んだ種子

植物が種子から発芽し、成長して花を咲かせ、また種子をつくる。このライフサイクルを「生活環」といいます。地上の植物は重力のある環境に適応して生きていますが、重力のない宇宙でも、はたして成長できるのでしょうか？「きぼう」日本実験棟を舞台に、植物の生活環と重力の関係に迫ります。

解説 1 生活環



宇宙実験に備え、シロイヌナズナのサンプル採取手順を訓練する野口聡一宇宙飛行士。



植物の一生と重力のかかわりを探る

海から陸に上がった植物は、何億年ものあいだ重力のもとで進化してきました。重力の情報を利用して、根を下に伸ばして水と栄養を吸収し、茎を上へ伸ばして葉で光合成をしています。また、自分の重みで倒れないよう茎の細胞壁を丈夫にしたのも重力対策です。

しかし、植物の生活環を見たとき、重力がいつ、どこで、どのような役割を果たしているのか、その全体像はまだ明らかになっていません。短期間の実験しかできないスペースシャトルと違い、国際宇宙ステーションで長期間の実験が可能になったいま、世界各国がその解明に挑んでいます。

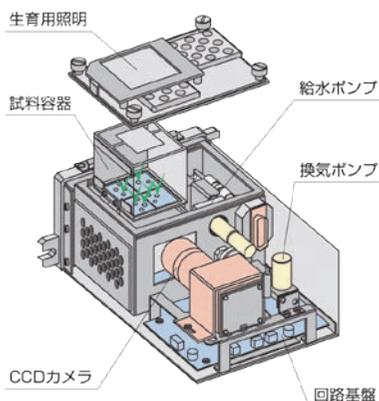
日本では2009年、植物の生活環において、重力によって遺伝子の働きや植物の形がどう変わるかを調べる実験『Space Seed』を実施しました。使われた植物はシロイヌナズナ。背丈が小さく、種子から種子になるまで約60日間と短いうえ、全ゲノムが解読されているため遺伝子レベルでの解析ができるなど、宇宙実験にぴったりの植物です。



「宇宙のミニ植物工場」を開発

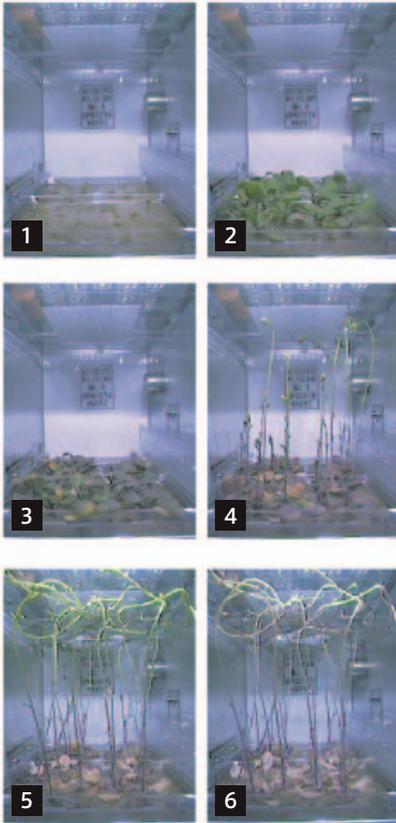
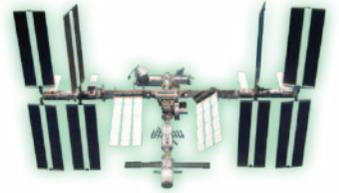
植木鉢に種子をまいて、じょうろで水をやり、太陽の光を浴びさせる。地上では当たり前の育て方ですが、宇宙で同じことをしたら土の粒子や水玉が飛び散って大問題です。しかし、水、光、温度、ガス、栄養などの条件が揃わなければ、シロイヌナズナを育てることはできません。

そこで、宇宙用の「ハイテク植木鉢」を開発しました。成長に必要なLED照明、苗床の水分を測る赤外線センサー、給水をコントロールするポンプ、温度・湿度センサー、湿度をコントロールする換気ポンプ、成長の様子を観察するためのCCDカメラなど、たくさんの機器を搭載。これらがコンピューターで制御され、電源を入れればどこでも動きます。しかも、これだけ多くの機能が、約13cm×21cm×8cmというきわめて小さな箱に収められ、植物が育つ容器は5cm立方と手のひらに乗るサイズ（P5 Space Column 欄参照）。この植物実験ユニット（PEU）は、日本が世界に誇る「宇宙のミニ植物工場」です。



植物実験ユニット(PEU)は、生育のようすを地上から観察できる「宇宙の植物工場」。

から、花が咲き実はなる？



植物実験ユニットを使い、地上実験でシロイヌナズナの成長の様子を確認(0日～42日)。



「重力あり」と「重力なし」の対照実験(比較実験)

植物実験ユニットでは、土の代わりにロックウール(水耕栽培などで使われるスポンジ状のもの)を使っています。ここに接着剤で種子を固定。忙しい宇宙飛行士の作業をなるべく減らすため、あらかじめ地上で種子をまいておきます。

それが宇宙に着いたら、細胞培養装置(CBEF)に植物実験ユニットを複数並べてセットします。最大のポイントは、細胞培養装置には内部につながった2つの部屋があり、片方の部屋はテーブルを回して重力を発生させる点です。重力のない宇宙で、「重力」のある環境を作ることで、同じ環境で植物の重力影響を精緻に比較することができます。

「種子が実るまで」比較実験をするのは世界初。これにより、科学的に真に価値のある成果を得ることが可能となりました。

シロイヌナズナの成長の様子はCCDカメラで撮影され、葉や茎が伸び、花が咲き、莢(さや)ができるようすを、地上からリアルタイムで観察しました。

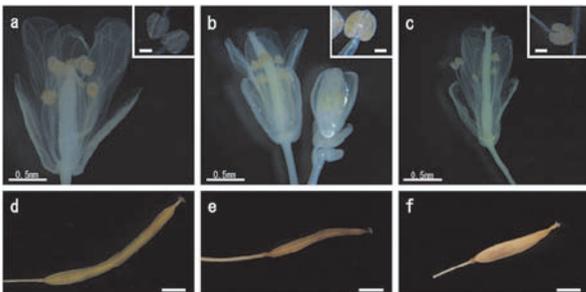


宇宙育ちの植物と種子を収穫し、徹底検証

「きぼう」日本実験棟での実験は60日間にわたって続けられました。その結果、生育環境さえ整えば、宇宙でも植物を栽培できるという手応えをつかむことができました。

振り返れば、ロシアの宇宙ステーション・ミールのころから宇宙実験が繰り返られてきましたが、植物実験はガス交換の問題などでうまくいかず、「宇宙では植物が育たないし花も咲かない」とされていた時代がありました。その後も実験が重ねられ、風を流してガス交換をしないと光合成能力が落ちることを日本の研究チームが発見。環境を整えば実がなると考えられるようになり、今回の実験で日本がそれを証明してみせたこととなります。

また、宇宙で成長したシロイヌナズナや種子を収穫し、地球に持ち帰ることもできました。この貴重なサンプルを使い、植物の形を詳しく観察したり、細胞壁の強さや細胞壁にかかわる遺伝子を解析したり、宇宙生まれの種子と地上生まれの種子の違いを確認するなど、あらゆる角度から徹底的な検証が進められていきます。この研究から将来、宇宙での植物生産に役立つ基礎データが得られるでしょう。



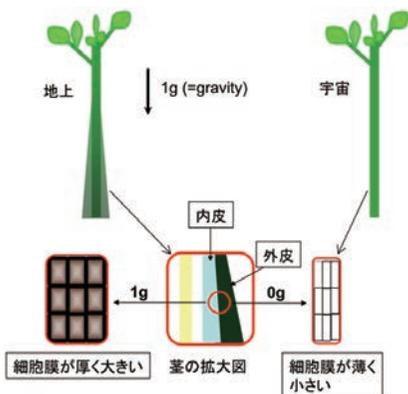
シロイヌナズナの花と実。地上(左)、宇宙の人工重力下(中)、宇宙の微小重力下(右)で育てたものを比較。



重力に耐える丈夫な

植物は動物と違って自由に動き回ることができません。陸上で生き抜き、仲間を増やすためには、周りの環境に合わせて自分の体を変える必要があります。とくに、重力に打ち勝って成長することは、進化のうえでも大きな意味を持ちます。ここでは、細胞壁や抗重力反応など、植物が丈夫な体をつくるしくみに迫ります。

解説2 細胞壁と抗重力反応



宇宙実験で、植物の細胞を大きく、細胞壁を強く厚くするしくみを明らかにする。



細胞壁の内側で何が起きているか

植物は陸上で自分の体を支えるため、そして重力に逆らってまっすぐ伸びるために細胞壁を発達させました。細胞壁は、動物でいえば骨格にあたりますが、そう硬いものではありません。形や動きを柔軟に変えますし、細胞壁自身が周りの情報をキャッチし、環境の変化に対応する能力まで備えています。このように細胞壁の世界は奥が深く、遺伝子レベルでなにが起きているかなど、まだたくさんの謎が残されています。

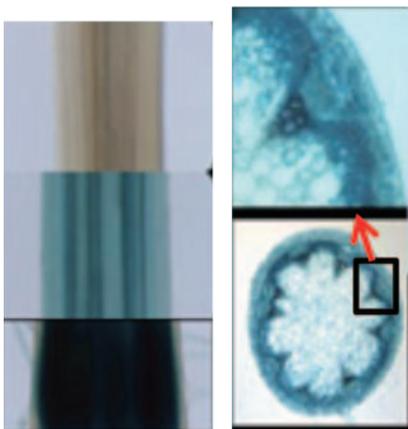
そうしたなか、日本の研究チームはさまざまな角度から細胞壁にアプローチしています。重力に耐えるために発達した細胞壁は、重力のない宇宙ではどのように変化するのでしょうか？ まず、シロイヌナズナを使ったスペースシャトル実験(STS-95)で、宇宙では細胞壁が地上より薄く弱くなることが確かめられました。「きぼう」日本実験棟ではその研究をさらに発展させ、細胞壁の内側のしくみまで遺伝子レベルで解き明かそうと、世界にも例のない独自の取り組みをしています。



細胞壁を強くする秘密を探る

植物の体は、細胞壁だけで支えられているわけではありません。細胞壁の内側には細胞膜があり、さらにその内側に微小管という極めて細い管が並んでいます。いわば、細胞壁というドームを、細胞膜や微小管が内張りするように支えていると考えられます。そこでシロイヌナズナを宇宙で育て、細胞壁、細胞膜、微小管のどこでどういう遺伝子が働いているのか、重力がなくなるとそれぞれの役割はどう変わるのかを探りました(『Resist Wall』)。この実験で、微小管をつくるタンパク質の役割が明らかになっています。

また、細胞壁をつくる遺伝子の働きに迫った宇宙実験もあります。細胞壁の鉄筋にあたるのがセルロース、コンクリートにあたるのがキシログルカンで、どちらも重力に反応して遺伝子の働きが変わることを、すでに地上の研究で突き止めていました。宇宙実験では、細胞壁を強くしたり弱くしたりする遺伝子の働きをどうすれば調節できるか、またその働きが重力によってどう支配されているのか、シロイヌナズナを使って調べました(『Cell Wall』)。



シロイヌナズナの茎を縦切り(左側)、また輪切り(右側下、右側上は一部拡大)にして細胞壁の強度に関わる遺伝子の働いている量を可視化するために青色に染めた写真。茎の下部ほど、また輪切りの外側ほど強く働いていることがわかる。

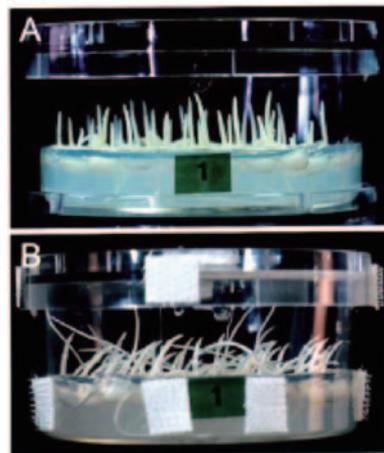
体をつくるしくみとは？



イネの細胞壁は宇宙でどう変わる？

日本人の主食であるイネの細胞壁が、宇宙でどう変化するかを調べた実験もあります（『Ferulate』）。双子葉植物のシロイヌナズナと単子葉植物のイネでは、細胞壁の構造が異なります。鉄筋にあたるのはセルロースで同じですが、コンクリートにあたるのがイネの場合はアラビノキシランやフェルラ酸です。宇宙でイネの種子を発芽させ、6日後に凍結。地上に回収し、フェルラ酸に関わる酵素や遺伝子の働きを探りました。

単子葉植物はトウモロコシやコムギなど食糧として重要な植物が多く含まれるため、こうした細胞壁の宇宙実験は、地上での品種改良や宇宙での植物栽培に役立てられそうです。



地上で育てたコシヒカリ (A) と、宇宙（スペースシャトル STS-95）で育てたコシヒカリ (B)。



抗重力反応のカギを握る微小管

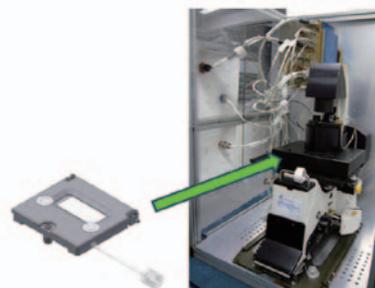
さて、植物が重力に打ち勝って成長しようとするとき、たとえばどれくらい茎を太く短くすれば大丈夫なのかを、いつ、どこで、どのように判断して行動するのでしょうか？ こうした「重力に耐える体をつくる反応」を、日本の研究チームが「抗重力反応」と名付け、その性質やしくみを詳しく調べています。

私たちが話をするときは、まず目や耳で情報を得て、頭で考え、口から言葉を発します。それと同じようなことが、植物でも行われているのではないかと考えられています。まず重力を感じ、それを他の部分に伝える信号を送り、信号を受け取って体を変化させる。このように、重力を感じてから反応するまでの一連のしくみを宇宙実験で明らかにすることを目指しています。

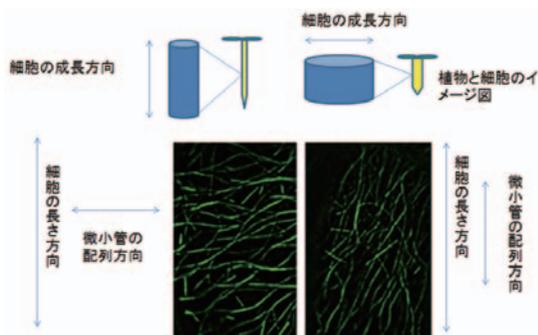
地上での研究によると、どうやらメカノレセプターというタンパク質が重力を感じ、微小管の向きを変え、それによって細胞壁の鉄筋（セルロース）を合成する方向が変わり、細胞が横向きに大きくなるようです。それを確かめるため、宇宙でシロイヌナズナを育て、抗重力反応のカギとなる微小管の数や向きを地上からリアルタイムで観察しました（『Resist Tubule』）。

さらに、細胞膜に沿って並ぶ表層微小管に注目し、JAXA が新しく開発した高性能の蛍光顕微鏡で、より詳しく観察する実験へと進んでいます（『Aniso Tubule』）。

これらの実験により、植物が重力を感じ、伝え、反応するしくみが、ついに解き明かされようとしています。



「きぼう」日本実験棟の蛍光顕微鏡に試料をセットし、自動撮影した写真を地上に送る。



シロイヌナズナの微小管、左は地上の重力、右は過重力（300G）。

植物が重力を「感

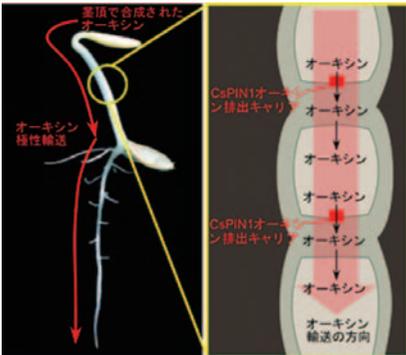


地上では、植物の根は重力の方向に、芽は重力の反対方向に伸びていく

解説3 重力応答と植物ホルモン



根の水分屈性とオーキシンの働きを調べる宇宙実験の作業のようす。



オーキシシンは、細胞膜の限られた場所にあるPINタンパク質によって輸送される。

植物は、地球の重力を上手に利用して体づくりをしたり、伸びる方向を決めたりしています。しかし、植物が重力を「感じる」しくみについては、まだよくわかっていません。ここでは、水分屈性やペグ形成、回旋運動などダーウィン以来の謎を最先端科学で解き明かす取り組みから、植物と動物をつなぐ最新研究までご紹介します。



重力に隠されていた水分屈性が明らかに

スペースシャトル実験(STS-95)で、ある興味深い現象が観察されました。キュウリの側根が、ばんざいをするように飛び出してきたのです(P5写真a-c参照)。どうやら重力のない宇宙では、根が水分の多い方に伸びていったようです。これを受けて、「きぼう」日本実験棟で水分と根の関係を調べました。

水分の多い方へ根が曲がるしくみを「水分屈性」といいます。そもそも根の先端には、重力や水分などの刺激を感じる細胞があります。ただし地上では、重力に反応して根を曲げる「重力屈性」が強く現れるため、水分屈性は隠れて見えません。宇宙実験だからこそ、重力に邪魔されず水分屈性だけを観察できます。

まず、本当にキュウリの根が水分の多い側に曲がるのかを観察。さらに、植物ホルモンのオーキシシンが、重力屈性と同じように水分屈性にも作用しているのか確かめ、オーキシシンの働きを支配する遺伝子も詳しく調べました(『Hydro Tropi』)。こうして根が曲がるしくみを突きとめれば、根が伸びる方向を水分でコントロールするなど、栽培技術に役立てることもできそうです。



オーキシシンが植物のかたちを変える

スペースシャトル実験(STS-95)では、もうひとつ意外な発見がありました。それは、ペグの数です。ペグというのは、ウリ科の植物が芽を出すとき、根と芽の境目にできる突起のこと。地上では必ず下側に1つだけつられ、種皮の下側を抑えつけるので、胚軸の伸長により、子葉が種皮から簡単に抜け出せる役割をします。しかし、面白いことに宇宙では両側に2つつくられました。本来ペグを2つつくる能力があるのに、地上では1つに絞られる。それは、どういうメカニズムによるのでしょうか?

調べた結果、ペグの形成にも水分屈性とと同じくオーキシシンが関わっていることがわかりました。そこで「きぼう」日本実験棟で、オーキシシンの動きを詳しく調べ、またオーキシシンを運ぶPINタンパク質が重力の影響を受けてどう変化し、どのように働かを探っています(『CsPINs』)。

さらに今後、放射性同位体を使ってオーキシシンの動向を調べる実験

「じる」しくみとは？

(『Auxin Transport』)を予定しており、オーキシンの動きと重力の関係や、それを司る遺伝子のしくみをより詳しく明らかにします。



首振り運動と重力の謎に挑む

子どものころ、アサガオのツルが支柱に巻き付いてよじ登るようすを観察した人も多いのでは？ 植物の茎や根が、先端部を振ってくるくる回りながら伸びる「首振り運動（回旋運動）」は、アサガオ以外の植物にも共通して見られる現象です。19世紀にチャールズ・ダーウィン親子によって発見されてから、多くの研究者が回旋運動に重力が関与しているかを研究してきましたが、まだ議論に決着がついていません。他国の研究チームが宇宙実験をしたこともあります。科学的に十分な証拠を集めることができませんでした。

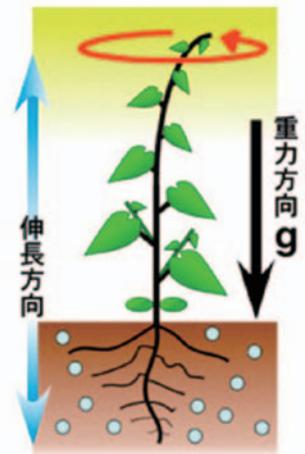
そこで日本の研究チームが、アサガオとイネを使い、重力に反応できない突然変異体も同時に宇宙で発芽させて、回旋運動を観察。回旋運動に本当に重力が必要なのか、ダーウィン以来の謎に決着をつけようとする非常に重要で興味深い研究であり、植物と重力への理解が、また一歩大きく前進することになります（『Plant Rotation』）。



植物と動物に共通する重力センサー

ヒトは重力を感じて生きており、どちらが上か下かすぐ分かりますし、重力の方向が変わるとすぐに察知できます。では植物はどうかというと、同じようにすばやく重力に反応しているのです。いったい植物は、どうやって重力を感じるのでしょうか？ 植物が重力を感知するしくみは、いまだ不明の点が多く残されています。

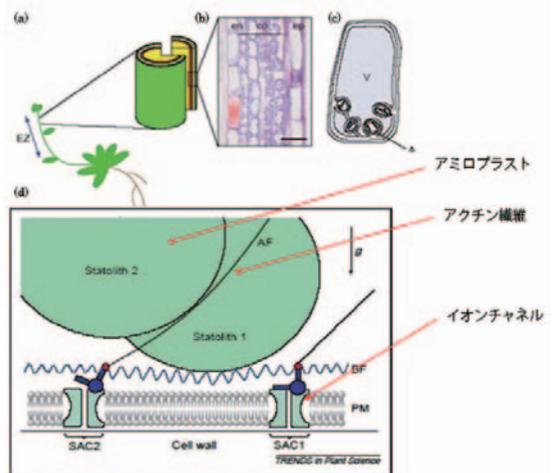
そこで、「きぼう」実験棟でシロイヌナズナを育て、重力を感じるセンサーを分子レベルで明らかにします（『Plant Gravity Sensing』）。この宇宙実験の最大の特徴は、植物と動物に共通する重力センサーを調べている点です。たとえば、ヒトが耳の中の小さな耳石が沈むことで上と下を判断するように、植物もアミロプラストというデンプンの粒子が沈むことで重力を受感します。このように、植物と動物が同じしくみを使っている部分があるため、動物細胞の実験につながる植物実験ができるのです。これは、重力受感の瞬間をとらえ、反応のしくみを明らかにしようという全く新しい取り組みであり、世界的にも類を見ない、未来的かつ発展的な研究が日本から発信されます。



茎の先端を振り、回りながら伸びる首振り運動（出典：東北大学）。



野生型アサガオ (A) と、重力を感じないシダレアサガオ (B) の重力応答（出典：北澤ら、2005 PNAS）。



植物が重力を感じて応答する（重力受容）しくみの仮説。（出典：(a)、(b)、(c) 森田ら、2004 Current Opinion in Plant Biology、(d) Perbalら、2003 TRENDS in Plant Science を改変）

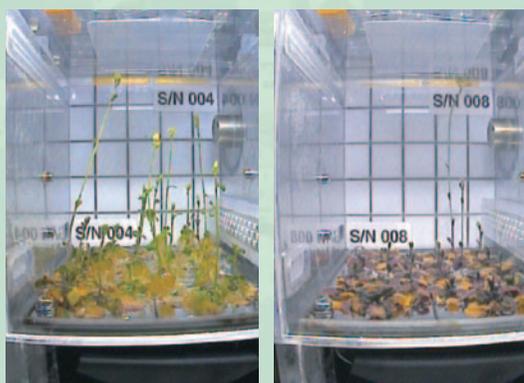


実験の成果

日本発の研究成果を世界に発信

国際宇宙ステーションを利用した植物実験から、世界を驚かせるような優れた研究成果がたくさん送られてきています。ここでは、すでに解析を終えた成果をご紹介します。現在も解析が進む研究テーマや、実験中の研究テーマがあるため、今後も続々と新たな成果が加わっていきます。

成果1 種子から種子へ、宇宙でも植物はきちんと育つ！



「きぼう」日本実験棟内の微小重力下(左)と人工重力下(右)で育てたシロイヌナズナ。どちらも栽培28日目。

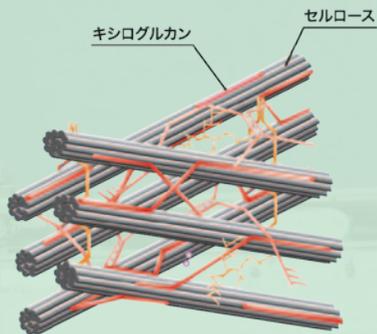
重力のない宇宙で植物は実を結ぶのでしょうか？植物の生活環に重力がどう影響するのか、シロイヌナズナを使って実験しました。

乾燥した状態で宇宙へ運んだ種子が、水をやり始めて3日後に発芽。順調に葉が開き、茎が伸びて花が咲き、そして実をつけました。また、宇宙で受粉が起こることも確認しました。

同じ培養細胞装置内の人工重力下で育てたものに比べると、微小重力では茎の成長が早く、葉の老化が遅いことが初めて明らかになりました。重力のような機械的ストレスは、植物の成熟に関わるエチレンの合成を促します。そのため、微小重力ではエチレンの発生が少なく、葉の老化が抑えられたと考えられます。

装置についても、温度・湿度制御に関する貴重なデータを取得しました。宇宙で植物が育つ環境を適切に制御できたことは、技術面における重要な成果です。『Space Seed』P8-9 参照

成果2 細胞壁をつくる時、重力に影響される遺伝子が判明！



シロイヌナズナの細胞壁の構造。鉄骨の役割をするセルロースをキシログルカンが束ねる。

宇宙で細胞壁の強さはどう変わのでしょうか？

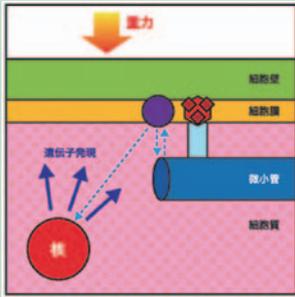
細胞壁のつくりかたを調節している遺伝子の働きを調べました。

宇宙の微小重力下と人工重力下でシロイヌナズナを32日間栽培し、どのような遺伝子が働いているのか解析しました。これまで、細胞壁に関わる16の遺伝子が注目されていましたが、そのうち、微小重力では1つの遺伝子の働きが減少し、4つの遺伝子の働きが高まることがわかりました。

『Cell Wall + Space Seed』P8-11 参照



成果3 重力に耐える、微小管の重要な役割が明らかに!



微小管に重力情報が伝わり、遺伝子が働いて細胞を強くする。

細胞壁の内側で、細胞膜と微小管はどのような役割を担っているのでしょうか? シロイヌナズナを使い、抗重力反応のしくみを調べました。

微小管がねじれている突然変異体は、重力に抵抗する能力が低いため地上では大きく育ちませんが、宇宙では芽ばえ段階までは正常な細胞壁をつくり、正常に育つことを確認しました。

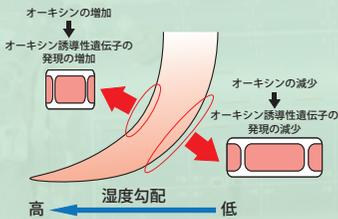
また、微小重力では変異体の方の茎が早く現われ、その後の成長速度や成長量も大きいことがわかりました。このように茎の成長が進むのは、重力に抵抗することが減り細胞壁が伸びやすくなったことが原因だと判明しました。

これらの結果から、重力に抵抗して、植物が成長するとき、微小管が細胞壁と協調して重要な役割を果たしていることが初めて明らかになりました。

『Resist Wall + Space Seed』 P8-11 参照



成果4 地上で隠されていた水分屈性のしくみを解明!



根の両側でオーキシンの量が異なり、伸び方に違いが出て根が曲がる。

根を曲がらせるとき、どのような物質が働くのでしょうか? 重力の影響を受けない宇宙でキュウリの根を観察し、植物ホルモンのオーキシンの動きを調べました。

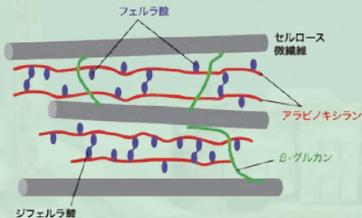
その結果、根が水分の多い方に曲がる水分屈性のようすを、微小重力と人工重力で比較することに成功しました。地上では重力の影に隠れてしまう現象が、宇宙でははっきりと現れ、詳しく観察することができました。

また、地上に回収されたサンプルを使い、オーキシんに誘導される遺伝子の動きを解析しました。植物の成長をコントロールするオーキシンの動きは、植物研究の歴史で長年の課題とされてきました。この宇宙実験により、オーキシンの働く場所が明らかになりつつあります。

『Hydro Tropi』 P12-13 参照



成果5 細胞壁が「緩む」タイミングとしくみを解明!



イネの細胞壁で、セルロースをつなぐ力を強めるフェルラ酸やジフェルラ酸に着目。

中でフェルラ酸の結合に関わる酵素の活性が低下していました。

これにより、微小重力でフェルラ酸の結合が減り、細胞壁内で橋渡しする役割が抑えられ、細胞壁を「緩んだ状態」にして強度を低下させたと考えられます。この実験から、イネにおける細胞壁がつくられるメカニズムを知る重要な手がかりが得られました。これらは、今後、イネの成長メカニズム理解の一助となります。

『Ferulate』 P10-11 参照



インタビュー◎

宇宙実験が果たす役割

スペースシャトルや国際宇宙ステーションで何度も宇宙実験をしている高橋教授に、なぜ植物と重力の関係を追うのか、宇宙実験にまつわる感動のエピソード、実験成果をどう活かしていくか、宇宙生命科学の将来展望や JAXA の役割まで、幅広く語っていただきました。

Q. なぜ、植物と重力の関係が重要なのですか？

生物の進化の歴史のなかで、植物は生き延びる戦略として重力を利用してきました。植物の重力応答はチャールズ・ダーウィン以前の時代から注目され、茎は上へ、根は下へという重力屈性の研究は、茎が光に向かって曲がる光屈性の研究とともに、植物ホルモンの概念を生むことに貢献しました。そして、それがいま大きな研究領域となっています。

植物が重力を感じる細胞はわかっていますが、どうやって重力を感受し、その情報をどう処理しているのかは十分に解明されていません。現在も世界中の研究者がしのぎを削って研究しているところです。

植物の重力屈性や重力形態形成の研究で、日本は世界の最先端を走っています。宇宙実験が可能になったいま、長年の謎であった重力感受のしくみを解き明かす、一筋の光が見えてきました。

Q. 宇宙とかかわりを持つきっかけは？

私は東北大学の大学院で、キュウリの花の性表現とエチレンの関係を研究していました。指導教授との雑談がきっかけで、「キュウリの花を毎日触れば、エチレンが多くつくられて花が全部雌になるのではないか」と試してみたら、本当に雌になった（笑）。面白いので論文を書いて発表したところ、アメリカからポストドクのお誘いをいただきました。1982年に渡米して接触形態形成の研究を行ったのですがそれが NASA スペースバイオロジープログラムのプロジェクトだったわけです。そこで重力応答の研究もスタートしました。

ポストドク時代の1984年に「アメリカ重力宇宙生物学会」が発足し、帰国後の1987年に今度は「日本宇宙生物学会」が発足。これからの宇宙科学の発展に期待して、研究者が集まってきた時期でした。

そして、1992年に JAXA（旧 NASDA）で宇宙実験の公募があり、そこで採択されてスペースシャトルや国際宇宙ステーションでの宇宙実験が実現しました。

Q. 宇宙実験で忘れられないエピソードは？

宇宙実験に関わったことのない人は、気軽に宇宙実験に応募すると思います。私もそうでした（笑）。しかし採択されると、宇宙では制約が多く課題がたくさん出てくる。それでも実験を実現させるために、宇宙飛行士をはじめ関係者の皆さんが一生懸命頑張ってくれたのです。

スペースシャトル実験（STS-95）のときは、何百個も発芽させたキュウリ芽生えをどう小分けして地球に持ち帰るかが大問題となりました。あまりにも作業が細かいため一旦は拒絶されたのですが、向井宇宙飛行士をはじめとする宇宙研究チームが必死になってアイデアを出し、自ら試行錯誤してくれて、私たちも再検討し、なんとか解決することができました。そのときの向井宇宙飛行士の必死の対応から、「私たちは、このたった1回のフライトのために十年以上も訓練してきた。だから実験をどうしても成功させるのだ」という熱意が伝わって来て、本当に感動しました。

スペースシャトル内の温度調節についても、JAXA が頑張って NASA に要求を通してくれて、その粘り強い交渉にも研究者として刺激を受けました。そうした大勢の皆さんのサポートと熱意で、宇宙実験は支えられています。

Q. 無事に宇宙実験が成功し、大きな発見をされていますね？

向井宇宙飛行士が持ち帰ったキュウリの試料は、地上では1つしかできないペグ（中味）が2つでき、さ

東北大学大学院生命科学研究所 教授 高橋 秀幸

一般社団法人日本宇宙生物科学会理事長。国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟での植物実験において、『Hydro Tropi』『CsPINs』『Plant Rotation』全3テーマの代表研究者を務める。農学博士。



らに根が万歳していました。地上では見えない現象が、宇宙で現れた。私たちは地上で水分屈性の研究をしていたので、その根を見てすぐに「水分屈性が現れている」と思ったわけです。そしてこの結果をもとに、「きぼう」日本実験棟で水分屈性を検証することになり、驚くほどクリアな結果を得ることができました。

ただ私は基本的に、宇宙実験は何かサプライズを期待してするものではないと考えています。あくまでも基盤となるのは地上での研究であり、そこで得た仮説を検証するために宇宙環境を使う。そこが非常に重要です。

また、宇宙実験で出た結果を書きただけでは論文になりません。むしろ地上実験の方が大事です。現象のメカニズムを地上で解析してはじめて、科学的なインパクトが生まれるのです。

Q. 宇宙実験の成果は、どのように地上の私たちに役立てられますか？

人類は環境問題や食糧問題に直面していますが、例えば高温でも育つ米、砂漠でも育つ植物などをつくるため宇宙実験の成果を役立てることが考えられます。

私がいつも思うのは、地球にはとても優れた生命維持システムが構築されており、それを根幹で支えているのは植物だということです。もし、将来的に地球外の惑星に人類が住むとしても、生命を維持するうえで植物の担う役割は非常に大きい。ですから宇宙科学でも植物を重視する必要があります。その取り組みはまた、地球の生命維持システムを理解し、それを健全に保つうえで、私たちに大きなヒントを与えてくれるでしょう。

Q. 今後の宇宙実験の課題は？

「きぼう」日本実験棟でトップサイエンスができる状況を整えることが必要です。宇宙環境は極めて特殊で、いまはまだ「きぼう」で日本実験としてはマウスを飼育していません。JAXAはマウスなどの小動物を飼育して実験が行えるよう装置を開発中ですが、実験ツールをいかに進歩させるかが、大きな課題だと考えています。

植物実験については、ぜひ大型の栽培装置をつくらせてほしいですね。宇宙空間で植物を育てて有人活動に使用した場合は、どうしても成長した植物で実験をする必要があります。また、リアルタイムで観察すべき生体現象も多いため、軌道上で解析できる高性能な装置も必要です。もちろん現在の装置でできることもたくさんありますが、常に次のステップを考えなければなりません。

Q. JAXAとの研究連携で感じたことは？

スペースシャトル実験（STS-95）は、ケネディ宇宙センターで準備して打ち上げ、ヒューストンで実験を見守りました。いまではアメリカに行かなくても、つくばで宇宙実験の運用ができます。準備期間のサポートや実験運用についても、非常に素晴らしい体制が整ってきました。ここまで築き上げたJAXAの態勢を大事にして、今後さらに発展させてほしいと願っています。私たち研究者も、JAXAのサポートに応えるような研究をしなければなりません。ニーズをきちんと捉えてマイルストーンを設定し、一步一步目指すところへ共に進んでいければと思っています。



筑波宇宙センターの管制室で宇宙実験を見守る高橋教授。

展望 人類の未来を豊かにする植物実験

宇宙の実験室で、植物生理学が飛躍的に発展

国際宇宙ステーションは、宇宙飛行士が長期間にわたって生活しながら、さまざまな実験や研究、観測などをする「宇宙の実験室」です。2008年に「きぼう」日本実験棟が稼動しました。人類の宇宙実験の歩みははじまったばかりです。

しかし、この短期間で植物生理学は目覚ましく進歩しています。なぜなら、植物の重力反応を調べるとき、宇宙の微小重力環境が理想的な実験室を用意してくれたからです。昔から人々の興味をひきつけてきた植物の謎や、長年たくさんの方を悩ませてきた植物の重力との関係や成長のメカニズムが、宇宙実験で一気に解き明かされようとしています。

植物実験が私たちの未来にどのように結びつくか

いま、日本の植物実験は、全部で11テーマあります。その研究成果は、人類の未来に何をもちたらし、私たちの生活にどのように役立てられるのでしょうか？ その答えは、大きく3つに分けられます。

1) 生命科学領域に学術的な貢献をします。

宇宙での植物実験は、植物と重力の関係を明らかにするだけではありません。植物が海から陸に上がった進化の過程に迫り、生物とは何か、どうやって進化し、将来どう変わっていくのかという大きな課題を解き明かすことにつながるでしょう。もしかすると、これまでの教科書を書き換えるような発見があるかもしれません。こうした基礎科学の成果は、私たちの生活にすぐ結びつくものではありませんが、植物を利用するうえで人類の知恵が増すことは確かです。いつの日か、必ず私たちの役に立つはずですよ。

2) 地上での食糧生産技術に結びつく可能性があります。

宇宙実験の成果を地上に応用して、たとえば、風に倒れにくいイネや、倒れてもすぐに起き上がる細胞壁の丈夫なイネをつくることも夢ではありません。ほかにも、狭い面積でたくさん収穫できる品種の開発や、水分で根の伸びる方向をコントロールし、乾燥地や植物工場での効率的な生産技術を開発するなど、多くの可能性を秘めています。

3) 未来の宇宙活動に役立てられます。

将来、人類が長期間宇宙で生活できるようにするうえで、宇宙で食糧を生産したり、人間が快適に暮らすための生活環境に植物は役立つでしょう。そのとき、宇宙でも地球と同じように植物が育つかどうかの実験が、大いに貢献するでしょう。

このように、「きぼう」日本実験棟を利用した植物実験の波及効果が期待されます。そうした宇宙実験ができる国は世界に15か国しかなく、その1つが日本なのです。ぜひ宇宙での植物実験に注目し、ひとりでも多くの方に好奇心の芽を大きく育ててほしいと願っています。



植物実験の研究テーマ (2015年現在、国際宇宙ステーションおよび「きぼう」日本実験棟で実施)

植物の抗重力反応における微小管-原形質膜-

細胞壁連絡の役割 (Resist Wall)大阪市立大学 保尊 隆享 完了

微小重力環境下におけるシロイヌナズナの支持組織形成に関わる

遺伝子群の逆遺伝学的解析 (Cell Wall) 東北大学 西谷 和彦 完了

微小重力環境における高等植物の生活環 (Space Seed)

富山大学 神阪盛一郎 完了

微小重力下における根の水分屈性と

オーキシン制御遺伝子の発現 (Hydro Tropi) 東北大学 高橋 秀幸 完了

重力によるイネ芽生え細胞壁のフェルラ酸形成の制御機構 (Ferulate)

大阪市立大学 若林 和幸 完了

植物の重力依存的成長制御を担う

オーキシン排出キャリア動態の解析 (CsPINs) 東北大学 高橋 秀幸 実施中

植物の抗重力反応機構

-シグナル変換・伝達から応答まで (Resist Tubule)大阪市立大学 保尊 隆享 実施中

重力による茎の形態変化における表層微小管と

微小管結合タンパク質の役割 (Aniso Tubule)大阪市立大学 曾我 康一 実施中

植物細胞の重力受容の形成とその分子機構の研究 (Plant Gravity Sensing)

名古屋大学 辰巳 仁史 実施中

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)

東北大学 高橋 秀幸 実施中

宇宙環境を利用した植物の重力応答反応機構および

姿勢制御機構の解析 (Auxin Transport)大阪府立大学 上田 純一 準備中

参考資料

■ 報告書

実験成果報告書『微小重力環境における高等植物の生活環 (Space Seed)』(代表研究者: 神阪盛一郎)

事後評価まとめ『同上』

宇宙航空研究開発機構特別資料『ISS 科学プロジェクト室 植物生理研究プロジェクト EMCS 装置利用宇宙実験テーマ「Cell Wall、Resist Wall」研究開発報告』

一般財団法人宇宙システム開発利用推進機構報告書『平成 19 年度 宇宙環境利用の展望』(第 2 章)

■ 刊行物

『「きぼう」利用成果レポート 2013 宇宙で得られた成果』(宇宙航空研究開発機構)

■ ホームページ

JAXA 宇宙環境の利用

http://www.jaxa.jp/projects/iss_human/

「きぼう」での実験 生命科学分野 利用テーマ一覧

<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/field/scientific/#life>

STS-95 向井宇宙飛行士再び宇宙へ

<http://iss.jaxa.jp/shuttle/flight/sts95/>

JAXA デジタルアーカイブス

<http://jda.jaxa.jp/>

コラム「宇宙開発の現場から サチコの実験日記」

<http://iss.jaxa.jp/column/sachiko/index.html>

Space Seeds for Asian Future 2013

http://iss.jaxa.jp/en/kuoa/kibo_abc/ssaf_event.html



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
〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター



JAXA

