

「きぼう」利用サービス紹介

②高融点材料の物性測定と新材料創成



宇宙で浮かせてキレイにつくる
高融点材料の
熱物性データ測定と
新たな材料の探索

国際宇宙ステーションでの材料実験

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

本パンフレットに対するご質問や「きぼう」に関するお問い合わせはこちらへ
きぼう利用プロモーション室 Z-KIBO-PROMOTION@ml.jaxa.jp

【宇宙用装置】静電浮遊炉の詳細情報(仕様紹介)
<https://humans-in-space.jaxa.jp/biz-lab/experiment/pm/elf/>

【提供サービス紹介】静電浮遊炉(ELF)
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/provide/elf/>

「きぼう」静電浮遊炉を利用する宇宙実験
https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/subject/tag_03.html

【地上用装置】宇宙科学研究所 石川研究室
http://ishikawa.isas.jaxa.jp/01_es1.html

「きぼう」利用のご案内
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/>



国際宇宙ステーション
「きぼう」日本実験棟で
実験進行中!



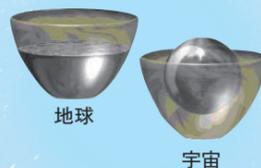
国際宇宙ステーションで 実験してみませんか？

宇宙飛行士が空中に丸い水の玉を浮かべている映像を見たことがありますか？
国際宇宙ステーション (ISS) の「きぼう」日本実験棟には、
微小重力環境を利用して、酸化物をはじめとする高融点材料を浮かせた状態で融かしたり、
また固めたりすることができる材料実験装置があります。

1 宇宙では「容器なし」で浮遊できる

地上では液体を保持するために容器が必要ですが、微小重力環境では
容易に液体を浮かせることが可能なので、容器を用いる必要がありません。
そのため容器からの汚染のない無容器状態で物質の性質を測定したり、
化学反応現象を解明したり、これまででない機能を持つ材料を開発する
ことができます。

このように容器を使わずに物質を取り扱う手法を「無容器プロセッシング」といいます。



2 地上では隠れてしまう本来の物性

地上で材料をつくるには、まず材料の物質を容器に入れ、容器ごと加熱して融かし、冷やして固めます。
しかし、2000℃を超えるような高温で物質を融かしていると、融体となった材料と容器の材料が反応し、
容器から融けた物質が不純物として混ざってしまいます。そのため、融かした物質の性質は、地上では正確に
分からなかったり、そもそも地上で取り扱うことが困難なこともあります。

3 新発想！材料を空中に浮かせて融かす、「無容器プロセッシング」

無容器プロセッシングでは、物質を浮かせたまま位置を固定し、溶融した状態の性質を詳細に調べることが
可能です。また、容器と接触しないので高温まで加熱しても不純物の混入を防げるほか、核形成が抑制され、
過冷却状態をつくることができます。

JAXAでは長年、静電浮遊法と呼ばれる静電場による静電気力を使って位置制御を行う
無容器プロセッシング技術の研究を行い、静電浮遊炉を開発しました。

● JAXAが開発した「静電浮遊炉」を使えば・・・

融点が3000℃になるような材料も融かして、熱物性値
(密度、表面張力、粘性係数)を取得したり、**容器を使うことなく**
高純度を保ったまま融液の維持・凝固ができます。
また、容器からの核発生がなく、**大過冷却を実現**できます。



● こんなお困りがある方々、ぜひご相談下さい。

- 融点が高く**容器と反応してしまう**材料がある。
- **容器の影響**を減らして、信頼性の高い熱物性値を取得したい。
- 熱物性値を使ったシミュレーションの**精度**を上げたい、など。
- **過冷却状態**での物質の状態を追及したい、**過冷却凝固**を利用して新しい物質を作りたい。

● 帯電しやすい材料(金属、合金など)なら、地上でのデータ取得も！

静電浮遊炉はその名の通り、静電気を使って材料を帯電させます。この状態で電圧をかけると、
静電気力という力が発生し、電極と反発することで浮かせることができます。
帯電しやすい材料なら、地上でも浮かせられる可能性があるというわけです。

● 宇宙で目指すこと

宇宙では、帯電しにくい酸化物や半導体など地上では取得困難な材料の物性取得を目指します。
さらに、熱対流を抑制した理想的な環境で試料を過冷却凝固(融点より低い温度で急速に固体化)して
地上に持ち帰り、試料を詳細に分析します。

4 求められる高精度データ

● 重工業の場合——製造プロセスのモデル精度向上

航空機や発電システムに用いられるタービンブレードなどの
耐熱材料や船、橋梁などの構造材料において、**鍛造・溶接**と
いった工程の最適条件は過去の実績を基に決められてきた。
しかし、近年は材料の高度化に伴い、より高精度な数値
解析による援用が求められています。

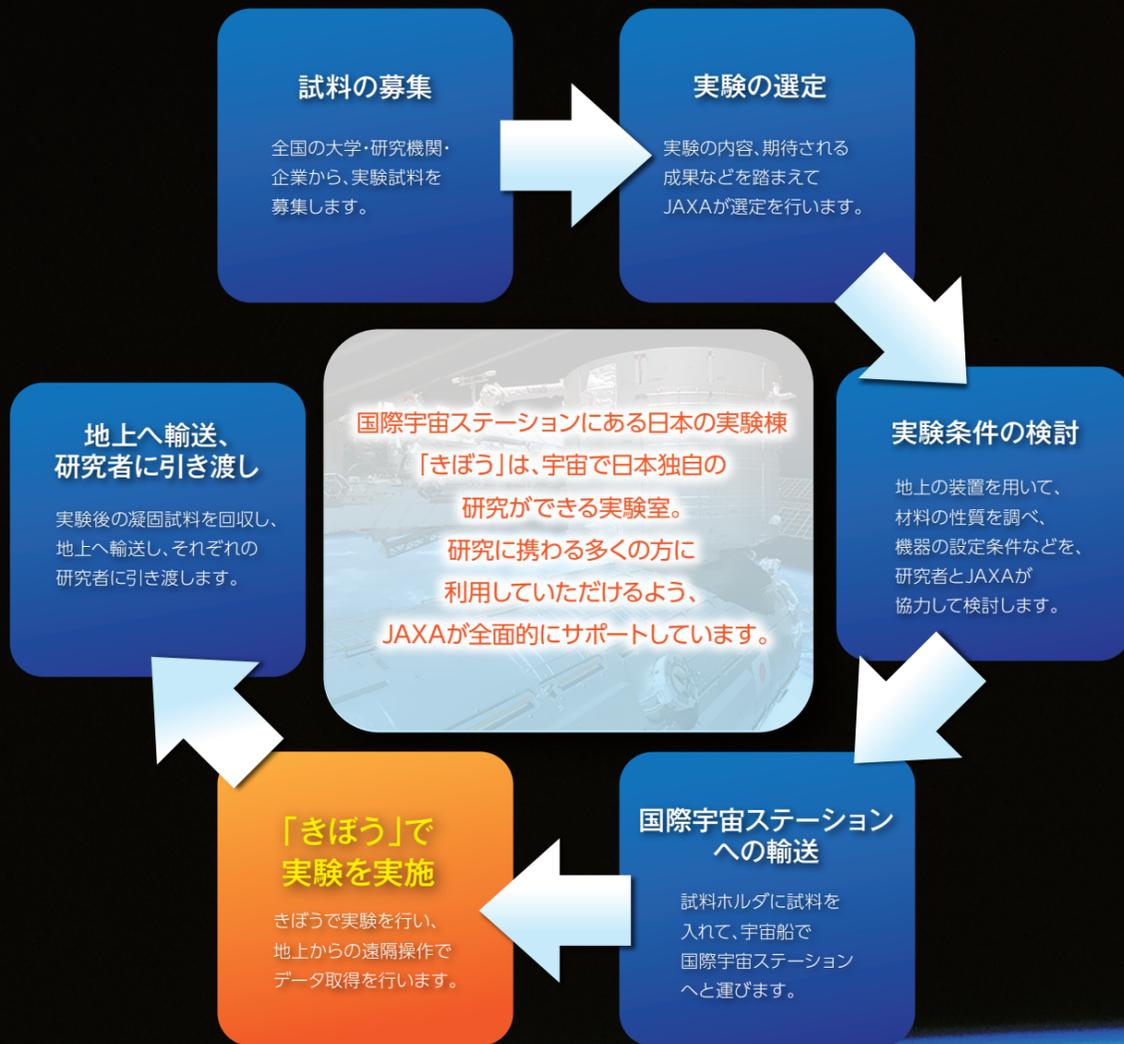


● 素材メーカーの場合——新材料の定量的評価



金属素材産業においては、ユーザーニーズの高度化と多様
化、そして海外勢の能力増強が著しい状況です。成長分
野において潜在需要の高い金属素材を見極め、性能面・
価格面で徹底的にこだわった技術開発を行うことが求
められています。そのためには偶然に頼らない定量的新
材料の探索や創製プロセスの解明が望まれています。

宇宙実験の流れ



実験装置の紹介

静電浮遊炉

STEP 1 20個の試料が入ったホルダを装填したカートリッジをセットする。

STEP 2 直径2mm程度の試料を帯電させ、静電気力により3対の電極間で位置制御する。

STEP 3 加熱用レーザーを照射し、試料を無容器で溶かす。

STEP 4 溶融状態の試料の密度、表面張力、粘度を計測する。

STEP 5 レーザによる加熱を止め、過冷却状態から凝固する様子を計測する。

静電浮遊炉の実験は地上から遠隔操作で進められ、高精度な測定を実施し、取得したデータは自動的に地上に伝えられます。

- 位置認識センサ×2
- 放射温度計
- 酸素センサ
- レーザーダンパ×4
- 高圧コネクタ×6
- 加熱レーザー×4
- 全体観察カメラ
- 位置認識光源×2
- 拡大観察カメラ
- 圧力・真空度センサ

試料直径2mm

試料ホルダ

試料カートリッジ

主要諸元

種類	試料種	試料サイズ	雰囲気	加熱	測定温度
地上用	単体金属、合金	φ2mm (数十mg)	真空 (到達真空度約10 ⁻⁴ Pa)	CO ₂ レーザー100W x3	299 ~3500℃
宇宙用	酸化物が主な対象。半導体、絶縁体、合金、単体金属も対応可	標準φ2mm	Ar, N ₂ , 空気など (最大2気圧まで)	980nm半導体レーザー 最大40W×4方向	299 ~3000℃

種類	プロセス中の物性値の取得			物質変化		
	表面張力	密度	粘性	浮遊	熔融	過冷却
地上用	○	○	○	○	○	○
宇宙用	◎	◎	◎	◎	◎	◎

◎:可能 ○:金属系は可能 ×:不可能

浮かせて融かす！静電浮遊炉のポイント

溶融～凝固まで 広い温度範囲の熱物性値が測定可能

浮遊溶融試料は真球形状 急冷中の画像を取得

→画像解析から体積を求め密度を計算 (質量は試料を地上に回収し秤量)

過冷却状態での熱物性計測も可能

過冷却凝固

融点

液滴振動による表面張力、粘度測定

密度計測

時間

モード2の振動

フォトディテクタにより計測

液滴振動の減衰により融液の粘性係数を求める

液滴振動の共振周波数より融液の表面張力を求める

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau}$$

$$\gamma = \frac{\omega_2^2 \rho r_0^3}{8}$$

ρ:密度
r₀:試料の半径
γ:表面張力
η:粘性係数
ω₂:共振角速度
τ:減衰係数

基礎研究から応用利用まで

高融点材料の熱物性計測や容器からの核発生がない状態での過冷却により、材料製造プロセスの最適化や新機能材料創出につながる事が期待されます。

基礎

- 高融点材料を扱う、以下の研究従事者 熱物性、構造解析、界面、結晶成長、無容器処理技術 etc.

応用

- 鋳造・溶接・溶射等の熔融金属・酸化物を取り扱う企業の数値計算研究者
- 金属・セラミックス等の材料メーカー、半導体製造企業の研究者

対象者

利用制度

提供サービス紹介: 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定
<https://humans-in-space.jaxa.jp/kibouser/provide/elf/>



基盤研究利用コース(科学研究向け(無償))

募集	年1回	科学的意義等の審査あり
対象	日本の大学・公的研究機関に所属する方対象	
期間	申込から実験まで1.5年程度	

民間利用促進コース(有償)

募集	通年	適格性審査あり(科学的意義は問わない)
対象	日本の機関、法人等に所属する方対象	
期間	申込から実験まで1年程度	

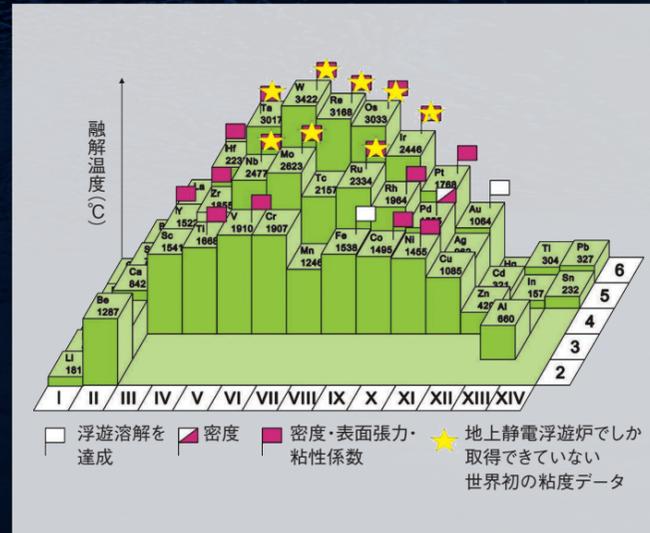
マテリアルズ・インフォマティクス協力

静電浮遊炉の地上実験では、「ぎぼう」日本実験棟での実験に向けて熱物性計測技術を向上させ、金属元素融体の高温熱物性データを取得するなど、多くの実績を上げてきました。

静電浮遊炉を使って測定した 金属元素融体の高温熱物性取得データ

これまでに、金属の中で最高融点を持つタングステン(元素記号W)など、融点が3,000℃を超える金属の表面張力・粘性データを、世界で唯一取得することができました(図の星印)。
 また数多くの物質において、幅広い温度範囲のデータを世界に先駆けて取得しています(図の旗印)。

詳細なデータは、産業技術総合研究所(AIST)の『分散型熱物性データベース』や物質材料研究機構(NIMS)の『高温熱物性データベース』に登録されています。



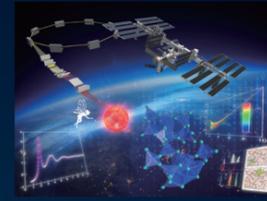
分散型熱物性データベース(AIST) <https://tpds.db.aist.go.jp/>
 高温熱物性データベース(NIMS) <https://thermophys.nims.go.jp/>

利用例(科学研究)

静電浮遊炉を利用して多種多様な実験が可能です!

材料・計算科学 超高温融体に潜む特異構造の発見

- Er₂O₃(融点=2686K)を溶融して、密度を測定
- 地上SPring-8実験と大規模理論計算・先端数学の連携から、Er₂O₃の特異な液体構造を発見



新たな材料開発や高温液体から生成される物質の成り立ちの知見を取得



©Koyama Licensed under CC BY 4.0

参考文献▶

宇宙・レーザー工学 スペースデブリ除去に向けた知見の取得

- 微小重力空間内で模擬デブリにレーザーを照射
- 照射時のデブリの運動を精密計測



宇宙空間における物体移動やレーザー推進のデータを取得



Image by Yevhen Shkolenko / PIXTA

参考文献▶

地球・ガラス科学 マグマデータの取得

- 地球の主要成分であるMgO-SiO₂の溶融状態の熱物性測定やガラス生成を実施
- 放射光実験や計算科学の連携により原子レベルでの構造を解析



地球内部構造やガラス化のメカニズムの解明に必須のデータを取得

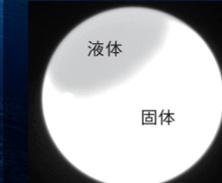


Y. Shuzeki et al. Licensed under CC BY 4.0

参考文献▶

流体工学・金属工学 振動や凝固過程の高速撮影

- 過冷却液体からの高速凝固過程を撮像
- 共振等の振動現象を撮影



高温融体から結晶成長や流体现象の知見を取得

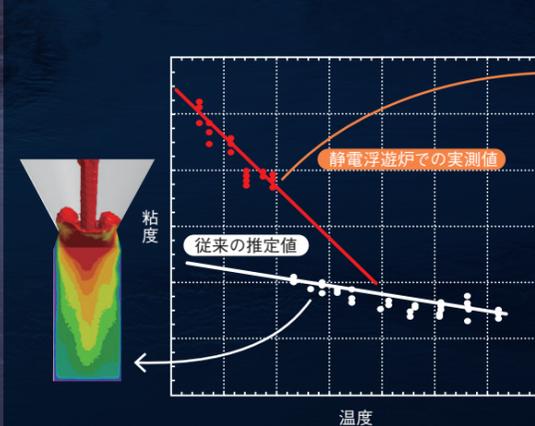


溶融ジルコニウムの高速凝固過程

搭載カメラ ccm-3525の仕様▶

受託事例

重工業の場合——タービンブレードの casting・溶接欠陥の再現



高温融体の熱物性があれば、溶融時の流れ状態を再現することができ、 casting・溶接時の溶け込み不良など製造中の高温融体の現象を模擬するシミュレーションに活用されました。これにより、歩留まりの向上策の検討や最適条件の見直しに貢献することができました。

素材メーカーの場合——新材料開発

太陽光発電や蓄電池などに用いられる半導体材料や基板材料の開発において、熱物性測定を行うことで、新材料の性能評価や製造プロセス評価や製造プロセス評価に資するデータが得られました。



Image by cheokky / PIXTA

静電浮遊炉の地上実験で実測した粘度の値と従来の推定値を用いた castingの流動シミュレーション結果の比較。実測した物性値を用いることで、シミュレーションの精度が向上する。