



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

国際宇宙ステーション  
「きぼう」日本実験棟で  
実験進行中!



# 高融点材料の隠されている性質を解明します

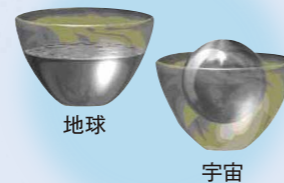
宇宙飛行士が空中に丸い水の玉を浮かべている映像を見たことがありますか？

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、ガラスなどの高い融点をもつ物質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、これまでに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

一方、地上で材料をつくるには、まず材料の物質をるつぽと呼ばれる容器に入れ、るつぽ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るつぽの材料が反応し、るつぽ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、核発生が抑制された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クーロン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(るつぽ)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。

- 融点が高くなる**るつぽ**と**反応**してしまう材料がある。
- **るつぽの影響**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、クーロン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出来ます。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。

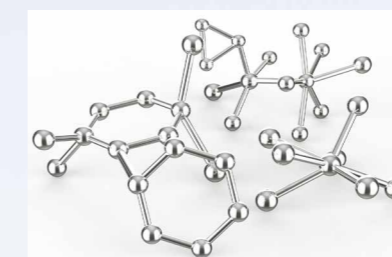
## 4 求められる高精度データ

### ● 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、**鑄造・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ました。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。



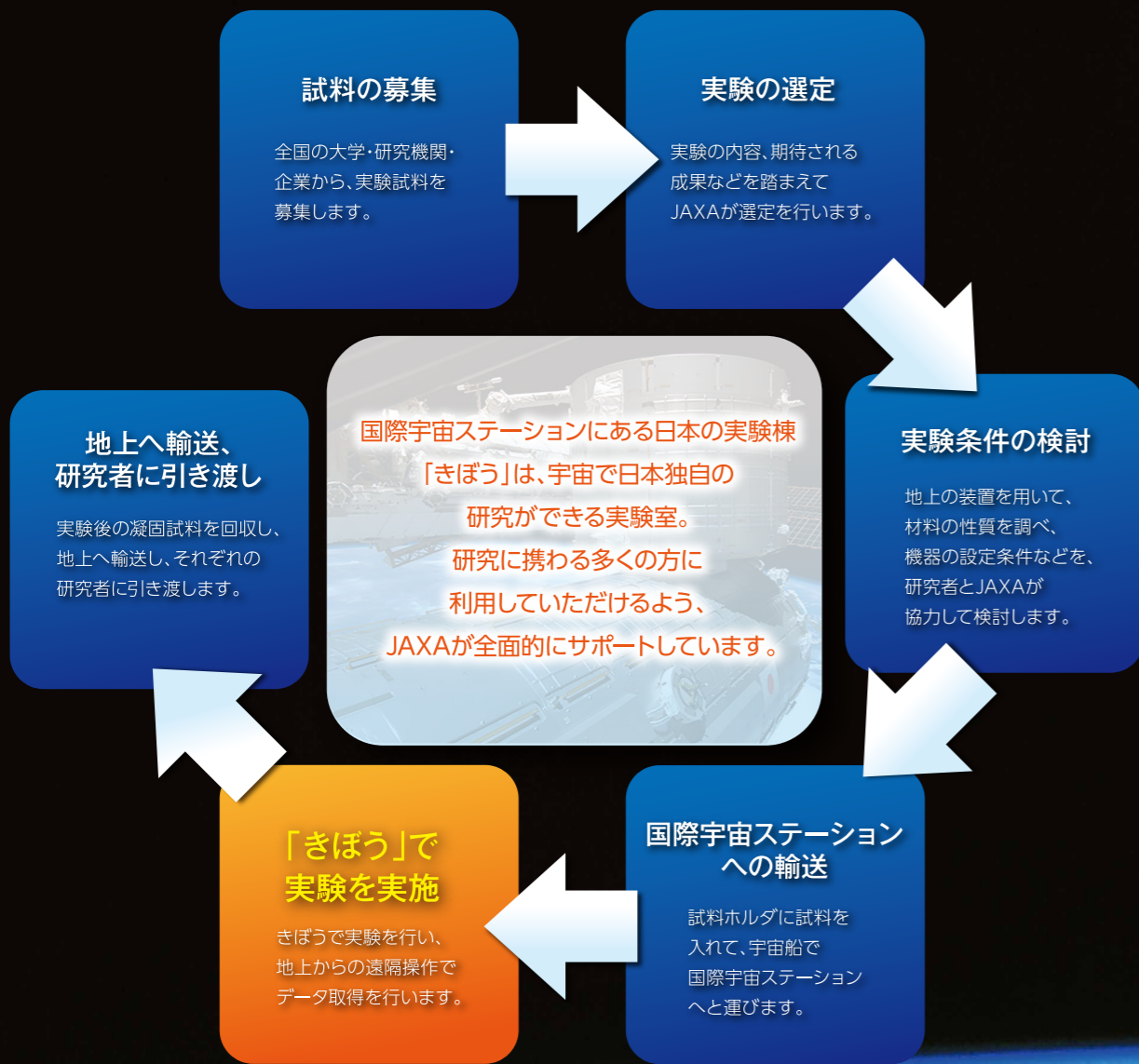
### ● 素材メーカーの場合——新材料の定量的評価



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。



# プロジェクトの流れ



# 実験装置の紹介

## 静電浮遊炉

STEP 1 15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、クーロン力により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 熔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。

試料ホルダ、試料カートリッジ、試料直径2mm

圧力・真空度センサ、位置認識センサ×2、酸素センサ、放射温度計、レーザータンバ×4、高電圧コネクタ×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

## 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 <sup>-6</sup> Pa)	・炭酸ガスレーザー200W ・Nd:YAGレーザー500W	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 (φ5mmまで対応可)	・Ar, N <sub>2</sub> , 空気など (最大2気圧まで) ・真空	・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 ※ 現在、調整中です。お問い合わせください。

## 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、半導体製造企業の研究者

## 浮かせて融かす！静電浮遊炉のポイント

●溶融～凝固まで30分以内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)

温度、時間、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

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  
r<sub>0</sub>:試料の半径  
γ:表面張力  
η:粘性係数  
ω<sub>2</sub>:共振角速度  
τ:減衰係数



## 利用制度

### 基盤研究利用コース(科学研究向け(無償))

募集	年2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8か月程度	

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/180206\\_elf.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/180206_elf.html)

### 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	申込から実験まで半年程度	

[http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/180206\\_elf\\_private.html](http://iss.jaxa.jp/kiboexp/news/180206_elf_private.html)

## 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、「きぼう」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。

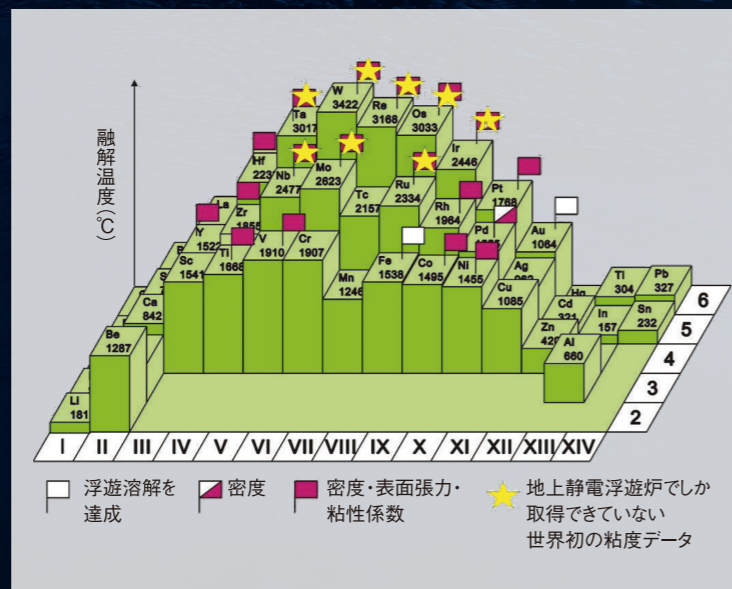
### 静電浮遊炉を使って測定した 金属元素融体の高温熱物性取得データ

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℃を超える金属の粘性係数データを、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に登録されています。

国内では物質・材料研究機構(NIMS)が中心となり、ビックデータを利用した情報統合型材料開発手法(マテリアルズ・インフォマティクス)の確立を目指しており、JAXAも静電浮遊炉利用による参画を計画中です。



## Q ISSにある他国の浮遊炉(電磁浮遊炉)との違いは何ですか?

A JAXAが保有する静電浮遊炉は、電磁浮遊炉では不可能な、高融点を持つ絶縁体を超高温(3000℃)で浮遊熔融させ物性を測定できる世界で唯一の装置です。

## Q どのような成果が期待されますか?

A 鑄造・溶接・溶射・結晶成長など液体状態を用いる製造プロセスをモデル化した数値シミュレーションの精度・信頼性の向上に役立つと期待されています。それにより、パラメータの絞り込みや検証に必要となる実験数の削減、シミュレーションデータの信頼性向上、高度化、精密化、新素材開発のスピード向上、開発コストの抑制に繋がります。

## Q 試料のサイズや、打ち上げられる個数を教えてください。

A 試料のサイズは1つあたり直径1.5~2.1mmで、試料ホルダに15個の試料を搭載し、打ち上げることが出来ます。

## 受託事例

### ●重工業の場合——タービンブレードの鑄造・溶接欠陥の再現



高温融体の熱物性があれば、熔融時の流れ状態を再現することができ、鑄造・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。





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

静電浮遊炉の詳細情報(仕様紹介)  
<http://iss.jaxa.jp/kiboexp/equipment/pm/elf/>  
静電浮遊炉を使いたい方へ  
<http://iss.jaxa.jp/user/opp/elf.html>  
試料の募集に関するお問い合わせはこちらへ  
Z-ELFAO@ml.jaxa.jp

宇宙科学研究所 石川研究室  
<http://ishikawa.isas.jaxa.jp/>  
きぼうを使ってみませんか?  
<http://iss.jaxa.jp/user/>

