

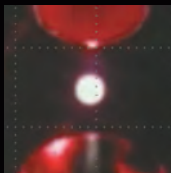
# 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定



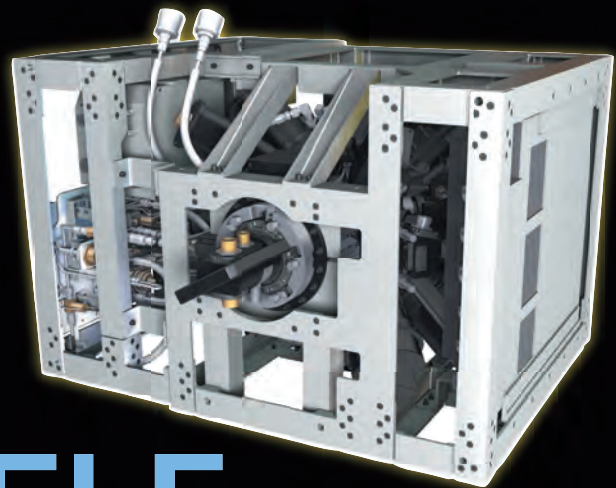
## 静電浮遊炉(ELF)の特性

従来の方法では得ることが難しかった  
高温熔融物の熱物性特性(密度、表面  
張力、粘度)を測定することができます。

- ➡浮遊炉は試料自体を浮かせるので  
容器の影響を受けずにレーザーで  
試料を溶かすことができます
- ➡静電浮遊法はクーロン力(プラスと  
マイナスの間に引力が働き、プラス  
同士またはマイナス同士では斥力  
が働く)を利用して、試料の位置を  
制御します。



「きぼう」に設置されている  
静電浮遊炉装置紹介

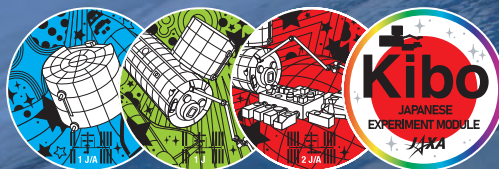


# ELF

Electrostatic Levitation Furnace

## 静電浮遊炉で取り扱うことのできる試料

試料種	金属(元素)	合金	酸化物、半導体など
例	W, Mo, Ta, Nb など	アルミ合金 チタン合金 鉄系合金 など	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{Er}_2\text{O}_3$ , $\text{Ho}_2\text{O}_3$ など
1Gでの浮遊熔融	○	△	×
微小重力浮遊熔融	○	○	○
備考		電荷量が少ないため、 地上で浮遊させるのが困難です。	





# 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定



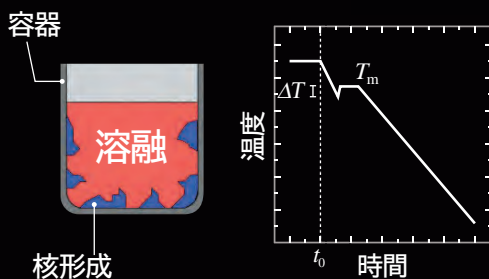
## 静電浮遊炉の利点

静電浮遊炉(ELF)は容器なしで材料を取り扱うことができます

- ▶液体を浮遊させるので、容器の影響を受けません
- ▶高融点の試料の熱物性値を取得できます
- ▶容器からの核発生がないため、大過冷却を実現できます

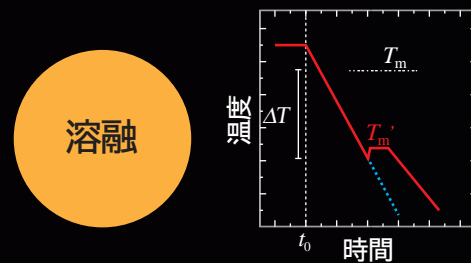
### 地上

容器が必要

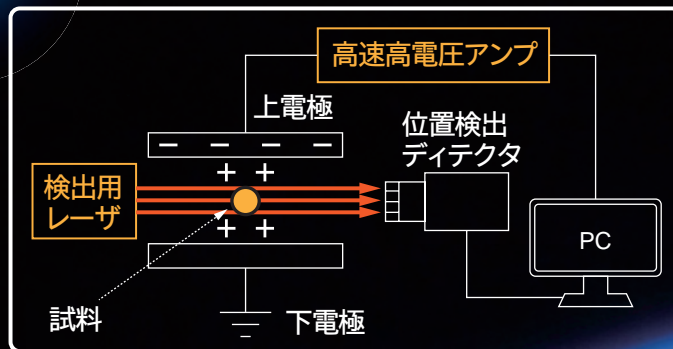


### 微小重力環境

容器を必要としない



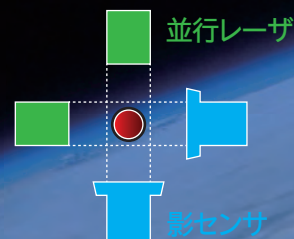
## 位置制御の原理



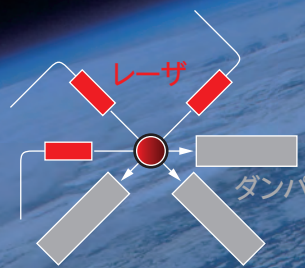
○ELFは試料の位置を高精度で検出し、電極へのフィードバックにより位置を制御します。

○試料が正しい位置に制御されると、加熱レーザで試料を加熱します。

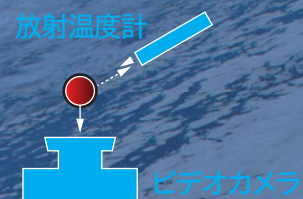
○試料の温度は放射温度計で測定されます。



位置計測系  
(レーザとセンサが対)



加熱系  
(レーザとダンパが対)



観察・計測系  
(ビデオカメラ・放射温度計など)

## 微小重力の必要性

	地上	微小重力
試料種	帯電量の少ない酸化物は浮遊困難	酸化物の浮遊溶融が可能
試料サイズ	・軽量で小さいもの(φ2mm, 数十mg) ・蒸発の影響(組成のずれ)が顕著のため、合金系の測定困難	・不活性ガス使用可(低電場で浮遊可能) →蒸発を抑制 =合金系の高精度測定が可能
雰囲気	・不活性ガス不可(高電場による放電) ・高真空(蒸発の影響大)	
電場の影響	高電場(10kV/cm程度)が粘性係数測定に影響大	より高精度の粘性係数測定が可能(低電場1kV/cm以下)

# 地上と宇宙の静電浮遊炉

	試料種	試料サイズ	雰囲気	取得データ	加熱レーザ
地上	金属、合金	φ 2mm (数十mg)	真空 (到達真空度 約10-5Pa)	表面張力 粘性 密度	・炭酸ガスレーザ200W ・Nd:YAGレーザ500W
宇宙	酸化物が主 半導体、絶縁体、 合金、金属も可	標準 φ 2mm	Ar、N <sub>2</sub> 、空気 (max2気圧まで)	表面張力 粘性 密度	・980nm半導体レーザ ・最大40W×4方向

# 物質計測手法

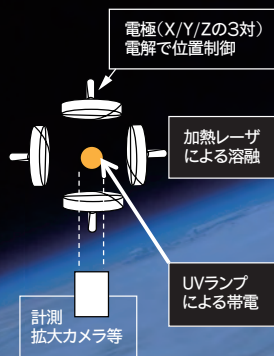
融点 試料種	低温 (~500℃)	高温 (500~2000℃)	超高温 (>2000℃)
導電性材料 (金属, 合金)		電磁浮遊炉(ESA)	靜電浮遊炉(JAXA)



ローレンツ力で浮遊。  
金属・合金を対象



あらゆる試料、  
温度範囲の  
取扱いが可能

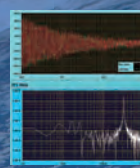


$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau} \quad \gamma = \frac{\omega_2^2 \rho r_0^3}{8}$$

$\rho$ : 密度	$r_0$ : 試料の半径
$\gamma$ : 表面張力	$\eta$ : 粘性係数
$\omega_p$ : 共振周波数	$\tau$ : 減衰係数

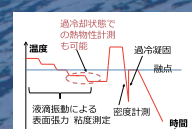


浮遊溶融試料は真球形状  
急冷中の画像を取得  
→画像解析から体積を求め  
密度を計算  
(質量は急冷試料を回収し秤量)



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により融液の表面張力を求める



溶融～凝固まで30分程度で  
広い温度範囲の熱物性値が測定可

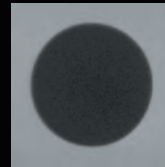


# 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定



## 密度の計測

1. 試料をレーザーで加熱して溶かします。
2. 試料はレーザー停止することで冷却されます。
3. 各温度での試料の画像を取得します。体積は画像解析により測定されます。
4. 試料はELFから取り出され、地上に回収されます。
5. 質量は地上で測定されます。
6. 密度は右の式から求められます。



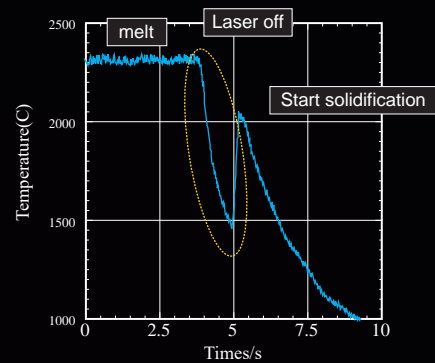
熔融酸化アルミニウム

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$\rho$  : 密度

$m$  : 質量

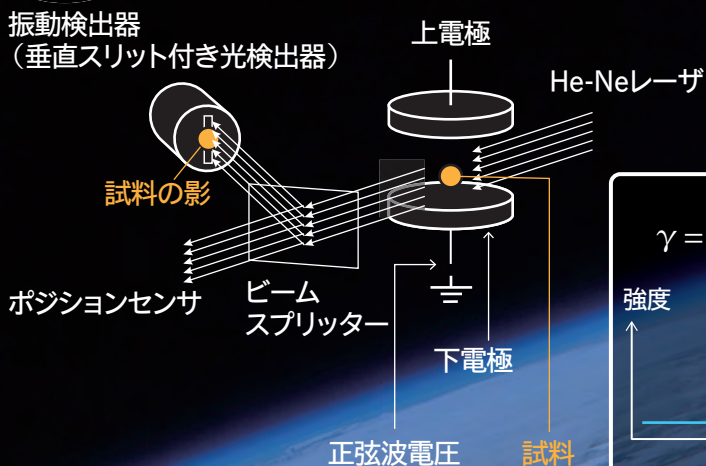
$V$  : 体積



熔融酸化アルミニウムの温度プロファイル

## 表面張力と粘度の計測

液滴の振動から表面張力と粘度を測定できます



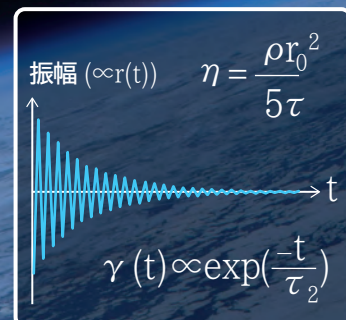
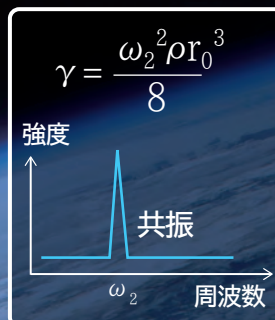
$\omega_2$  : 共振周波数

$\tau$  : 減衰時間

$r_0$  : 試料の半径

$\eta$  : 粘度

$\gamma$  : 表面張力



Rhim et al., Rev. Sci. Instrum. 70 (1999), 2796



# 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定

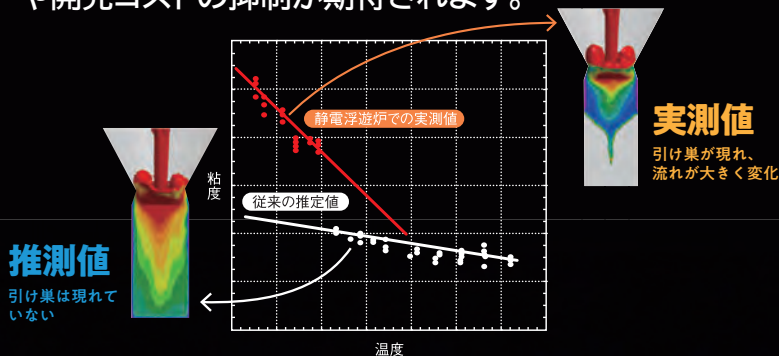


## 地上での研究実績～拡がる将来の可能性

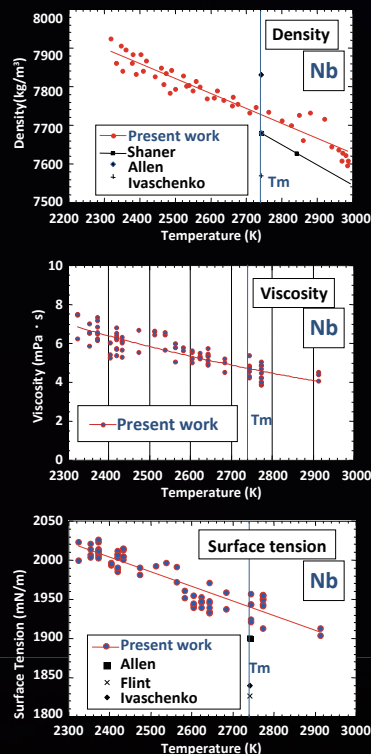
### 高温熱物性を精緻に取得 ～数値シミュレーションの精度を向上

20年にわたる地上研究により獲得した2000℃以上の高融点金属元素の熱物性データは、AISTの『分散型熱物性データベース』やNIMS『高温熱物性データベース』にて公開しています。

また、これまで推測に頼らざるを得なかった高温融体の熱物性データを実測できることにより、鑄造、溶接、溶射など液体状態を用いるシミュレーションの精度・信頼性を向上させます。パラメータ絞りこみに必要な実験数の削減や製造プロセスの改善に貢献し、開発スピード向上や開発コストの抑制が期待されます。



実測値を鑄造シミュレーションに入力したことにより正確な流れの解析結果が求められました。ブレード形状を解析してみたところ、流れに起因する欠陥(湯まわり不良)が突き止められ鑄造前の対策検討に貢献しました。



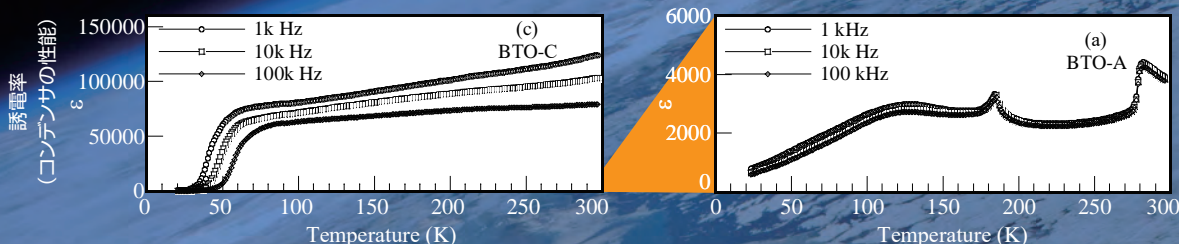
### 過冷凝固産物 ～新機能材料の発見／創製プロセスの解明

溶融したチタン酸バリウム( $\text{BaTiO}_3$ )を急冷凝固させたところ従来の30倍の誘電率と優れた温度安定性を示しました。これを使った超小型コンデンサへの応用が進められています。

通常の凝固では得られない準安定相や微細組織が実現できれば、革新的な工業成果の萌芽となります。また、発見された新機能材料の創製プロセスを解明できれば、地上での製造、実用化することも可能です。



巨大誘電率を持つチタン酸バリウム



静電浮遊炉で作製した $\text{BaTiO}_3$ コンデンサ

一般に使われている $\text{BaTiO}_3$ コンデンサ



# 静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定



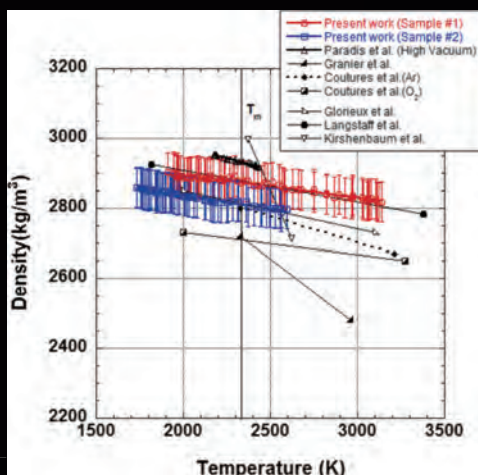
## 熱物性値の計測例

高融点酸化物(酸化アルミニウム)の密度を計測しました

Tamaru, H., Koyama, C., Saruwatari, H. et al.  
Status of the Electrostatic Levitation Furnace (ELF) in the  
ISS-KIBO. *Microgravity Sci. Technol.* 30, 643–651 (2018).  
<https://doi.org/10.1007/s12217-018-9631-8>



論文



密度の温度依存性



6つの電極間で浮遊する溶融酸化アルミニウム(中央)  
(2017年7月取得)

	低温(<2000 degC)	高温(>2000 degC)
導体(金属、合金)	ELF の測定範囲	
絶縁体(酸化物)		

## 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。

静電浮遊炉で得られた各種材料の熱物性値(密度、表面張力、粘性)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』にて公開しています



分散型熱物性データベース  
(AIST)



高温熱物性データベース  
(NIMS)