

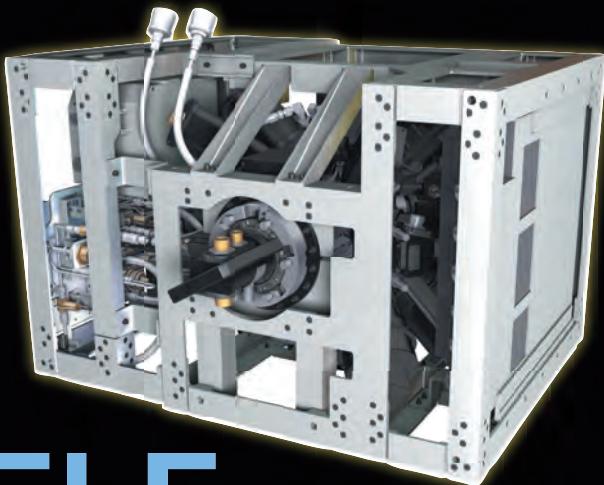
静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定

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溶融物の熱物性特性(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	アルミニウム チタン合金 鉄系合金 など	Al ₂ O ₃ , Er ₂ O ₃ , Ho ₂ O ₃ など
1Gでの浮遊溶融	○	△	×
微小重力浮遊溶融	○	○	○
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

- ▶ 液体を浮遊させてるので、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

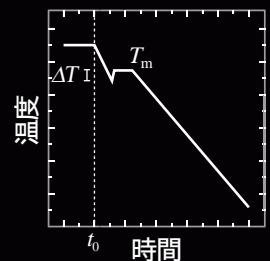
地上

容器が必要

容器

溶融

核形成

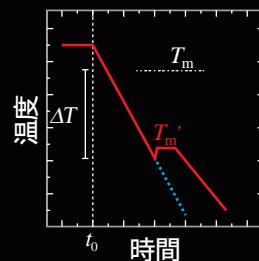


微小重力環境

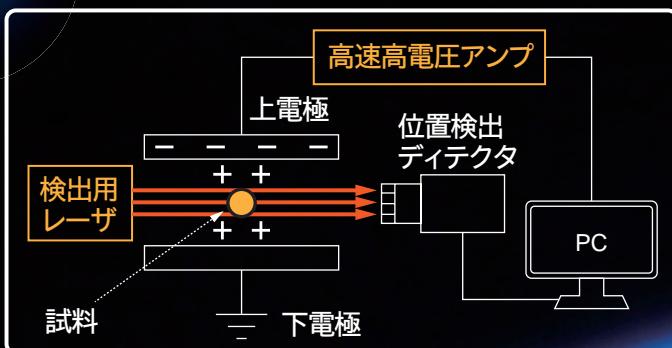
容器を必要としない



溶融



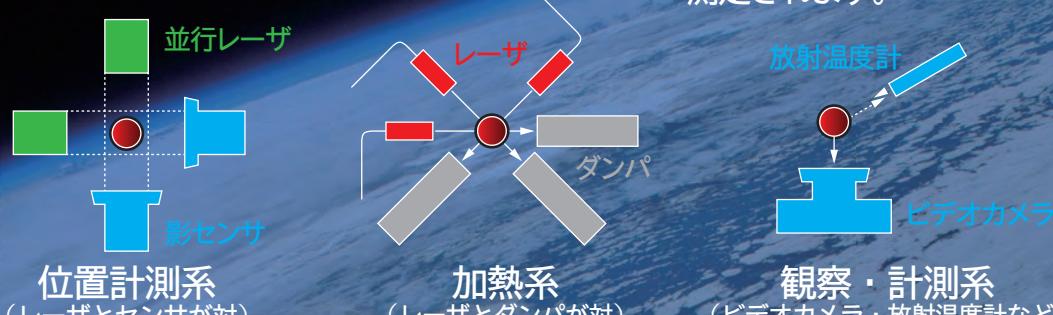
位置制御の原理



○ 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。



静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定

微小重力の必要性

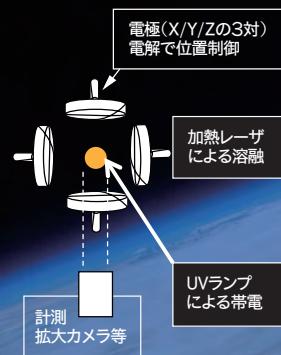
	地上	微小重力
試料種	帶電量の少ない酸化物は浮遊困難	酸化物の浮遊溶融が可能
試料サイズ	・軽量で小さいもの(Φ2mm, 数十mg) ・蒸発の影響(組成のずれ)が顕著のため、合金系の測定困難	・不活性ガス使用可 (低電場で浮遊可能) →蒸発を抑制 =合金系の高精度測定が可能
雰囲気	・不活性ガス不可(高電場による放電) ・高真空(蒸発の影響大)	
電場の影響	高電場(10kV/cm程度)が 粘性係数測定に影響大	より高精度の粘性係数測定が可能 (低電場1kV/cm以下)

地上では
計測できない
試料も
宇宙なら
可能になる

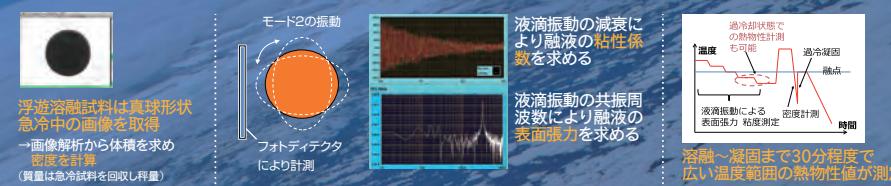
地上と宇宙の静電浮遊炉

	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	Φ2mm (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 Φ2mm	Ar、N ₂ 、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



$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau} \quad \gamma = \frac{\omega_2^2 \rho r_0^3}{8} \quad \begin{array}{l} \rho: \text{密度} \\ \gamma: \text{表面張力} \\ \omega_2: \text{共振周波数} \\ \tau: \text{減衰係数} \end{array} \quad \begin{array}{l} r_0: \text{試料の半径} \\ \eta: \text{粘性係数} \end{array}$$



静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定

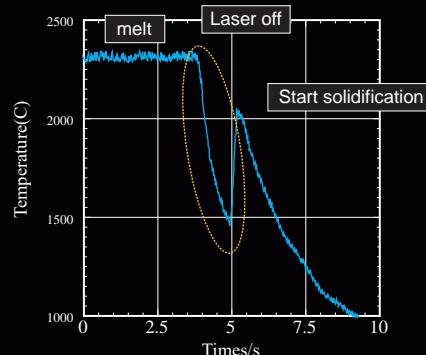
密度の計測

1. 試料をレーザで加熱して溶かします。
2. 試料はレーザ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。



溶融酸化アルミニウム

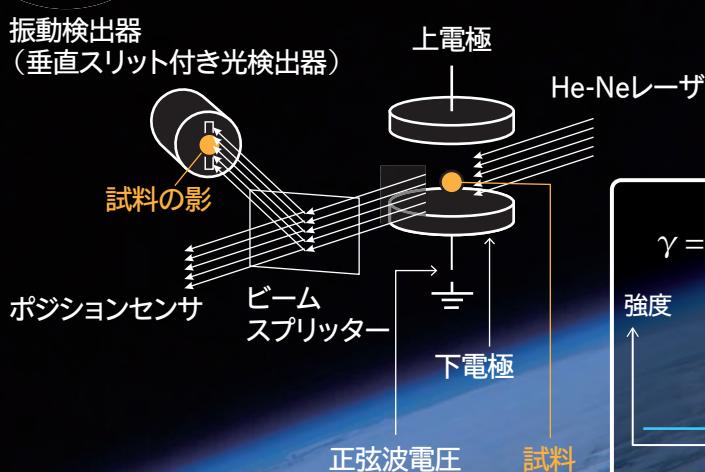
$$p = \frac{m}{V}$$

 ρ : 密度 m : 質量 V : 体積

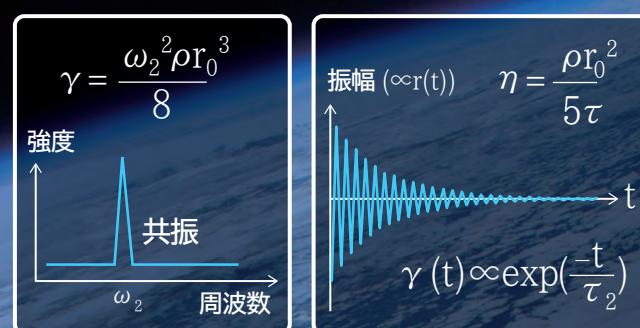
溶融酸化アルミニウムの温度プロファイル

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



$$\begin{aligned} \omega_2 &: \text{共振周波数} \\ \tau &: \text{減衰時間} \\ r_0 &: \text{試料の半径} \\ \eta &: \text{粘度} \\ \gamma &: \text{表面張力} \end{aligned}$$



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

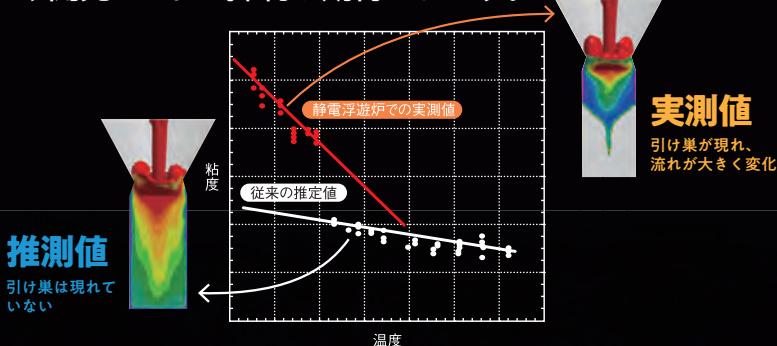
静電浮遊炉(ELF)を使用した高精度熱物性測定

地上での研究実績～拡がる将来の可能性

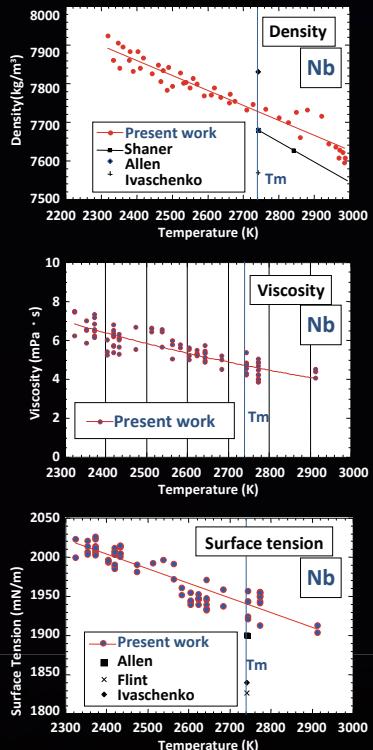
高温熱物性を精緻に取得 ～数値シミュレーションの精度を向上

20年にわたる地上研究により獲得した2000°C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、鋳造、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。



実測値を鋳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。プ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)が突き止められ鋳造前の対策検討に貢献しました。



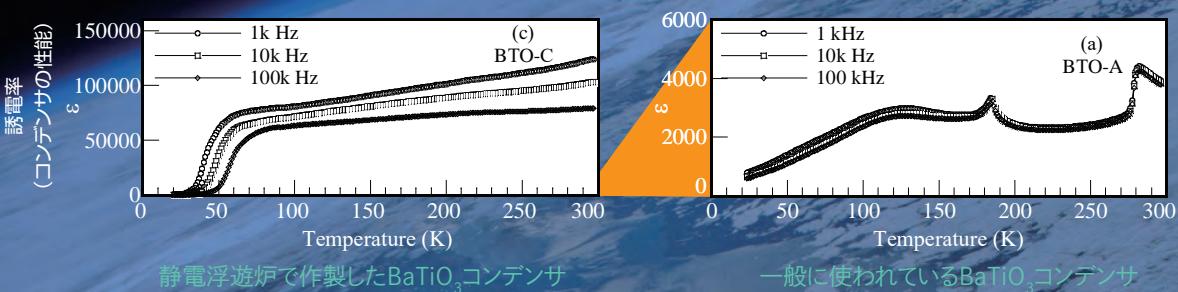
過冷凝固産物～新機能材料の発見/創製プロセスの解明

溶融したチタン酸バリウム(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(ELF)を使用した高精度熱物性測定

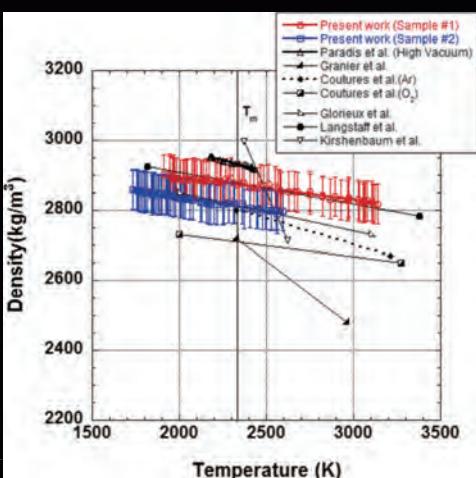
熱物性値の計測例

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)