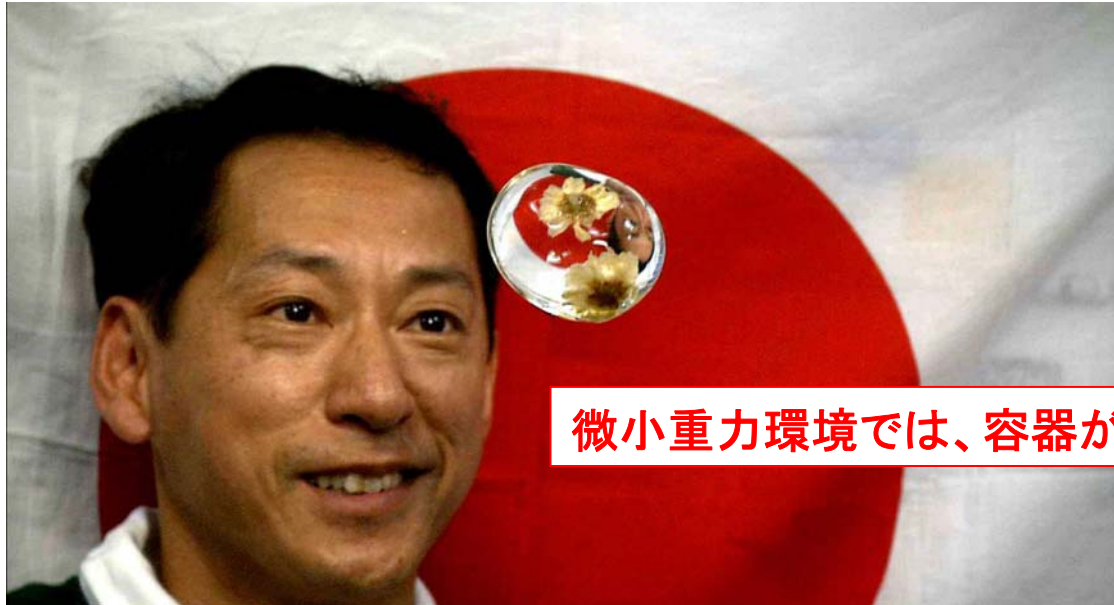


静電浮遊法を利用した高温融体の 熱物性計測

宇宙航空研究開発機構
宇宙環境利用科学研究系
石川 毅彦

宇宙での浮遊実験

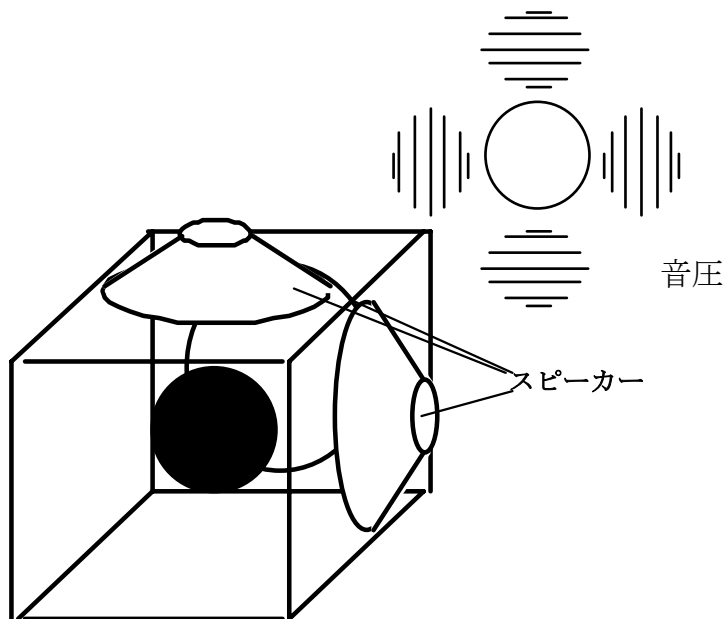


微小重力環境では、容器がなくても液体を保持できる

残留重力、振動(g ジッター)⇒液滴は動く

金属等を溶融したりその挙動を観察するためには、液滴位置の固定が必要

⇒浮遊炉の開発



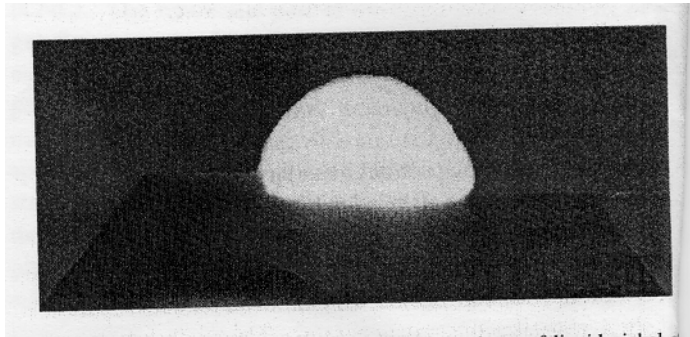
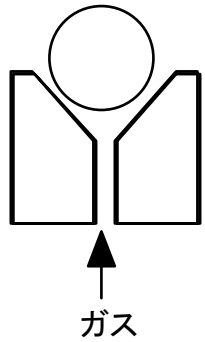
音波浮遊法 (Acoustic)

・音圧の節に試料を制御

○
簡便

×
高温での安定性悪
高真空対応不可

主な浮遊法(2)



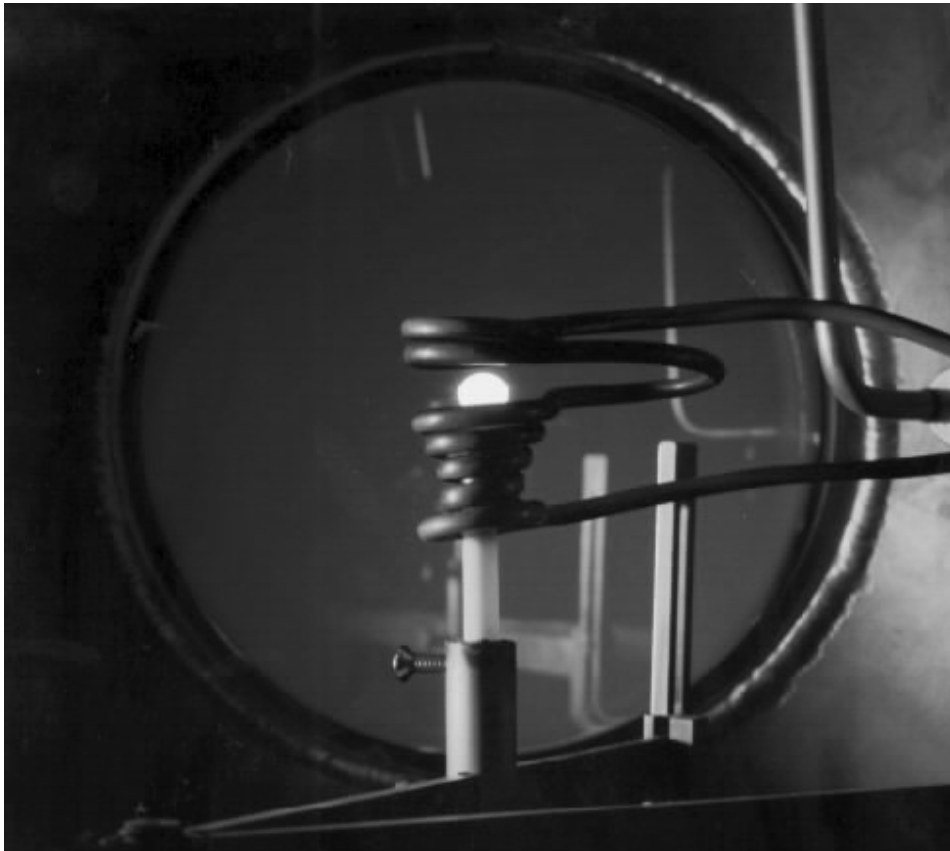
ガスジェット法 (Aerodynamic)



非常に簡便



高真空対応不可
観察視野狭
試料内温度勾配



電磁浮遊法(Electromagnetic)

- ・宇宙実験／地上実験で最も実績のある装置
- ・コイルと試料に働くローレンツ力を利用

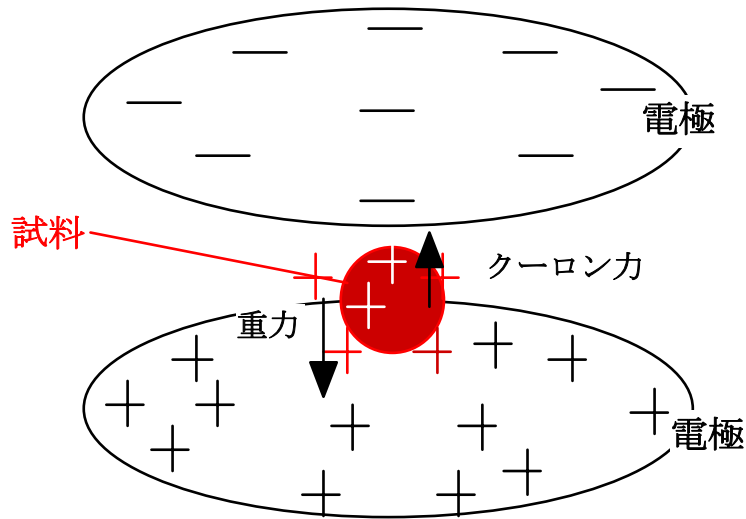


比較的大きな試料を浮遊可能
高真空対応



加熱／浮遊カップリング
誘導加熱による試料内流れ
(磁場印加による改善)
非導電体対応不可

主な浮遊法(4)



静電浮遊法 (Electrostatic)

• 試料を帯電させクーロン力を利用して試料を浮遊



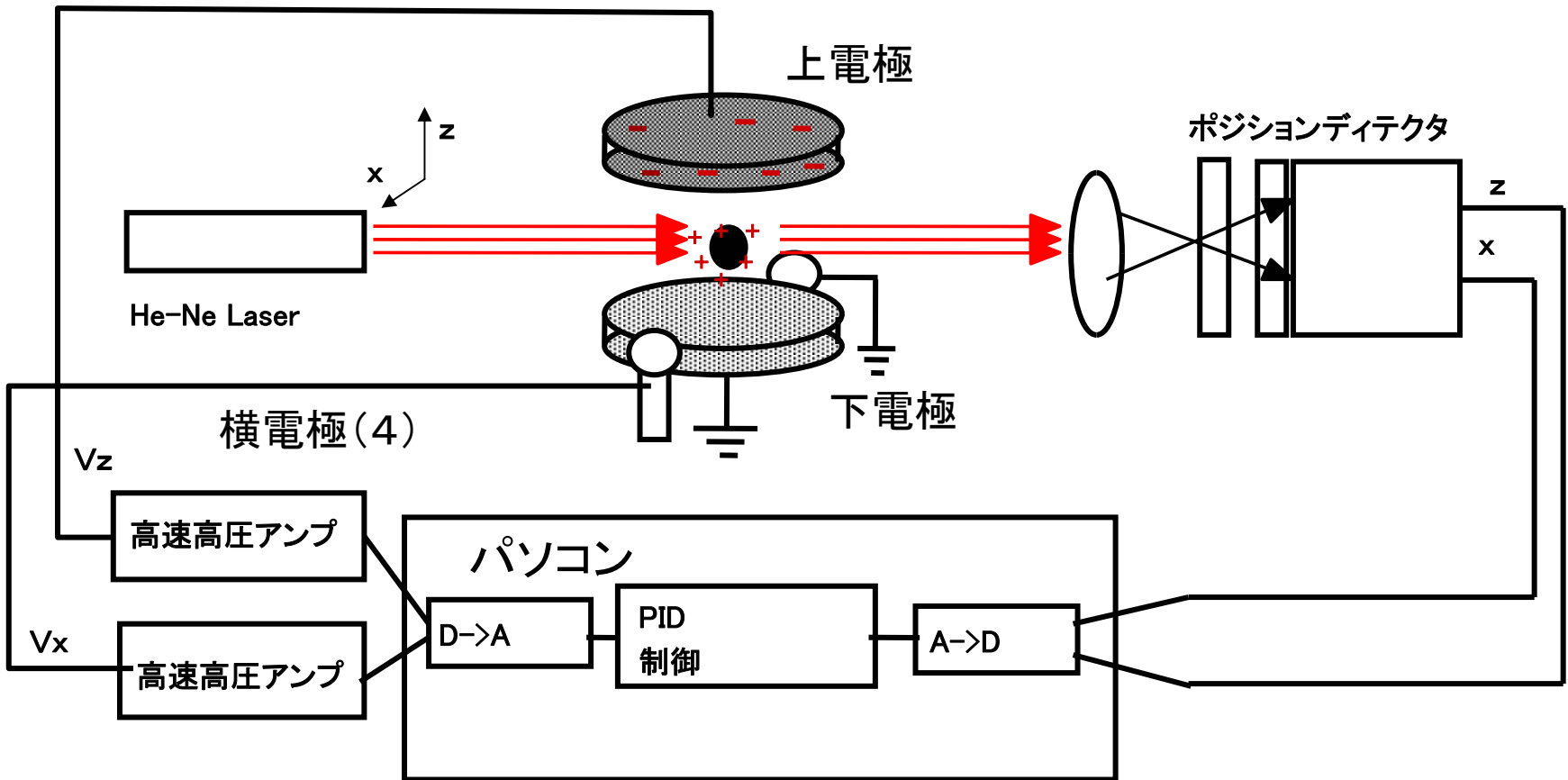
○ 擾乱が比較的少ない
高真空対応可
帯電すれば試料を選ばない



× 装置複雑
試料小

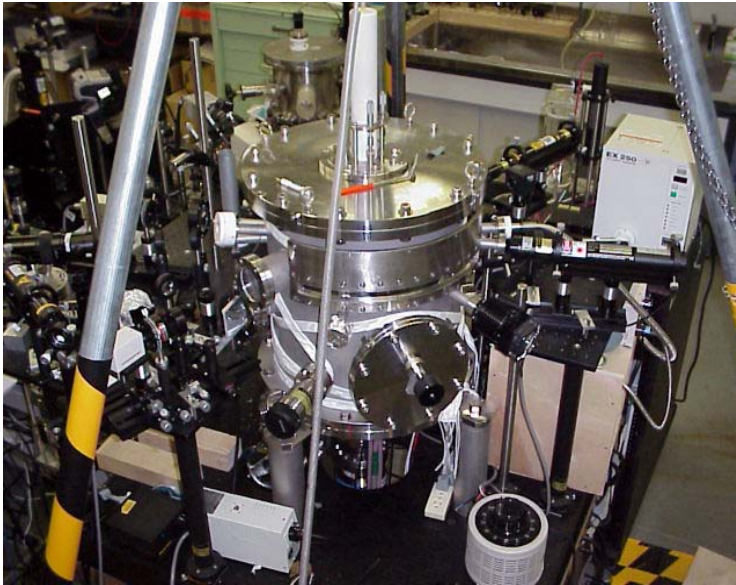
位置制御: 高速のフィードバック制御が必要 (∵ 安定点を作れない)
試料の電荷の維持が難しい
→ 技術課題多 → 開発に遅れ

静電浮遊法

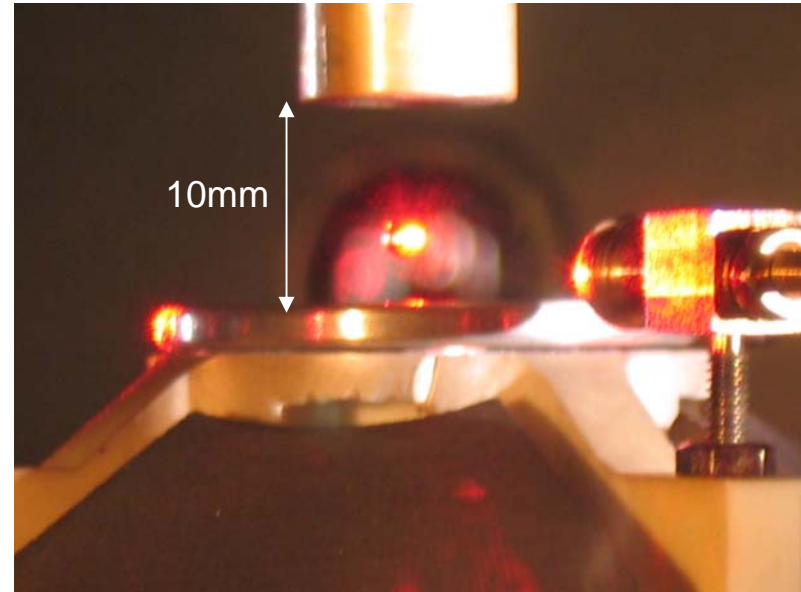


1990年代にNASA/JPLのRhimらにより技術が確立

Rhim et al., *Rev. Sci. Instrum.*, 64 (1993),2961.



直径40cm、高さ40cmの真空容器
到達真空度: 10^{-5} Pa (ターボ分子
ポンプ+サブリメーションポンプ)



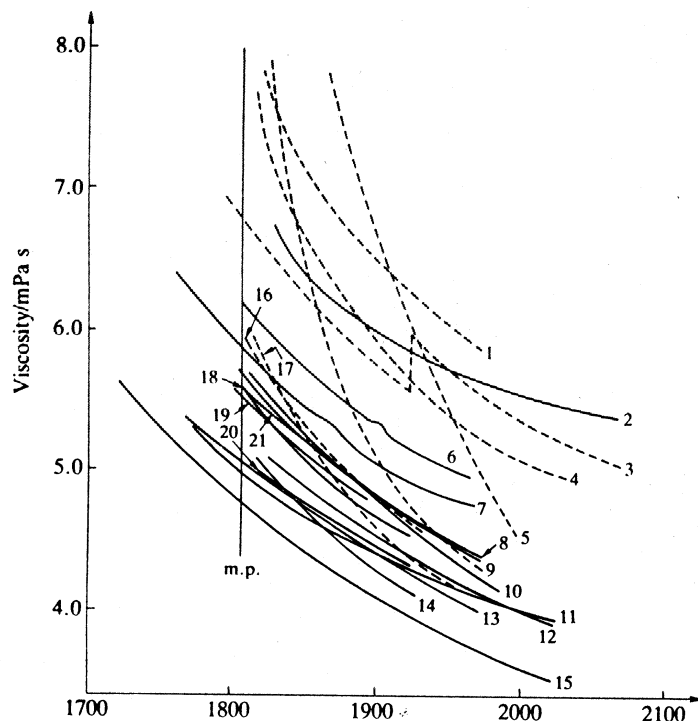
最大-30kVまで電圧印加可能
直径2mm(10~100mg)の試料
を浮遊

- 従来の熱物性測定法は、**いずれも容器が必要**

⇒ 高温に対応した容器がない ⇒ 測定例極めて少

⇒ 容器からの不純物の混入 ⇒ 測定データの

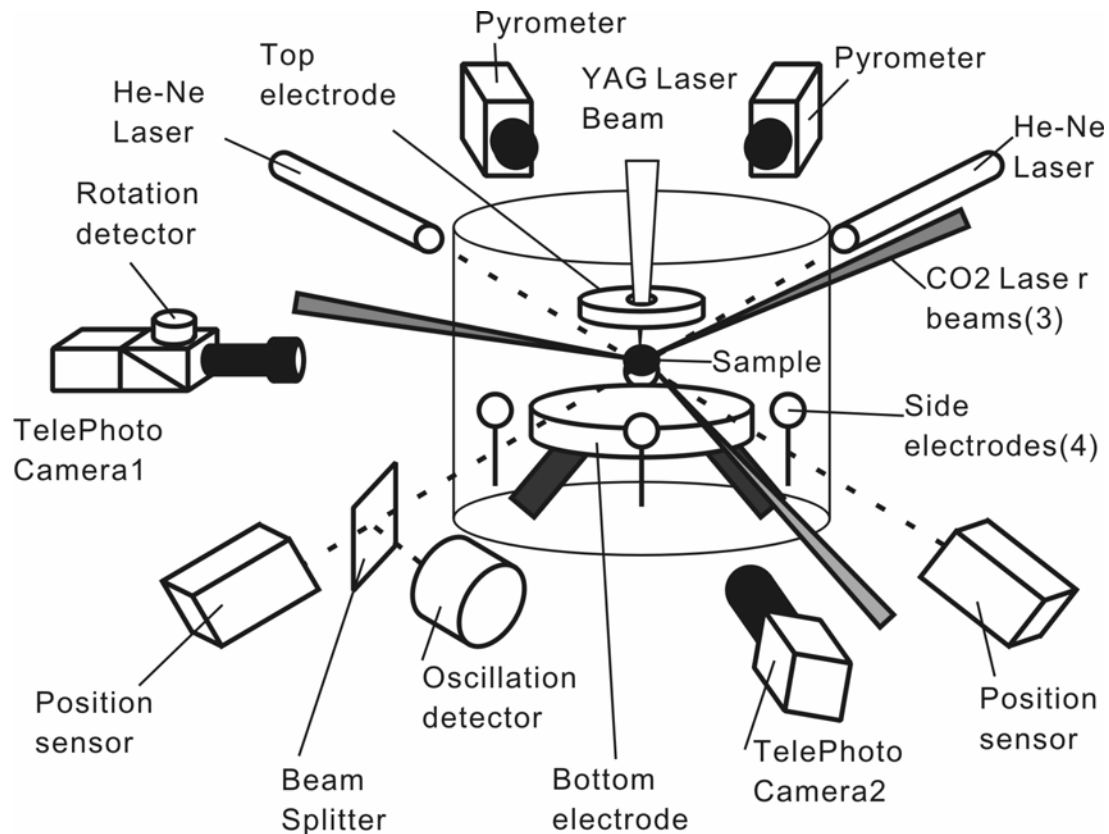
ばらつき大



鉄の粘性係数測定値のばらつき

2,000°C以上の熱物性値は希有
(特に粘性係数)

⇒ **無容器法(浮遊)による物性測定**

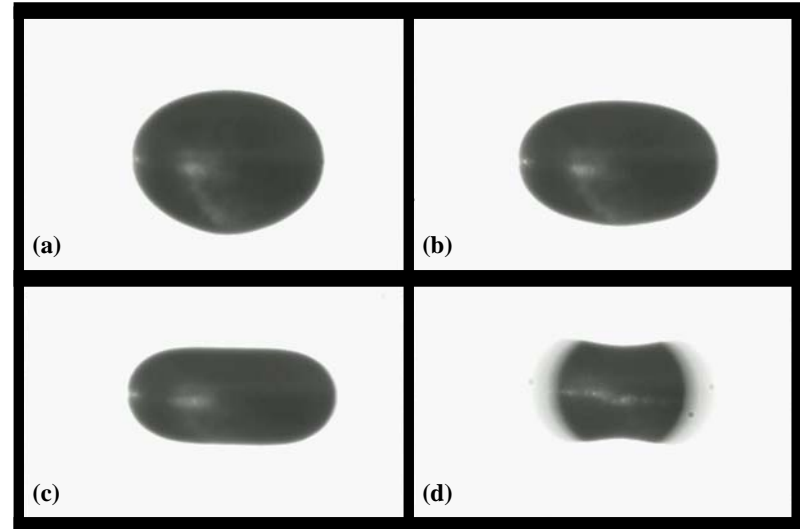
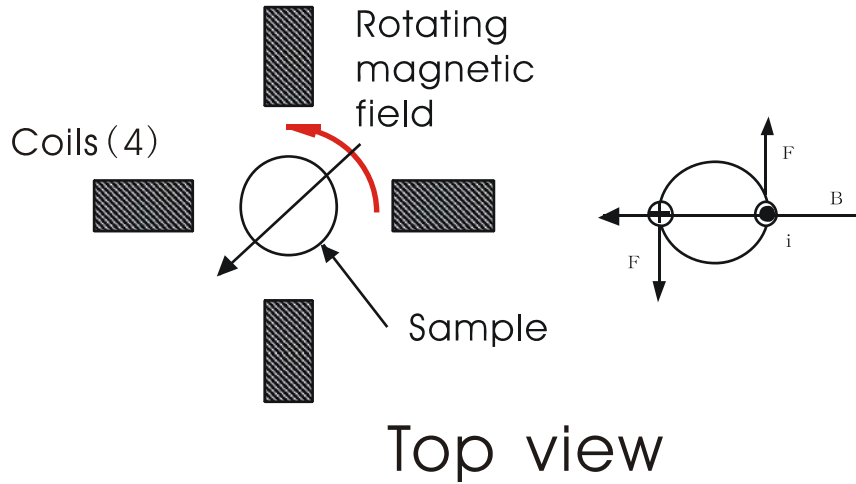


【観察／制御機器】

位置検出用He-Ne: 2方向
加熱レーザー: 4方向
観察カメラ : 3台
放射温度計 : 2台

液滴振動計測
回転制御／計測

試料の回転



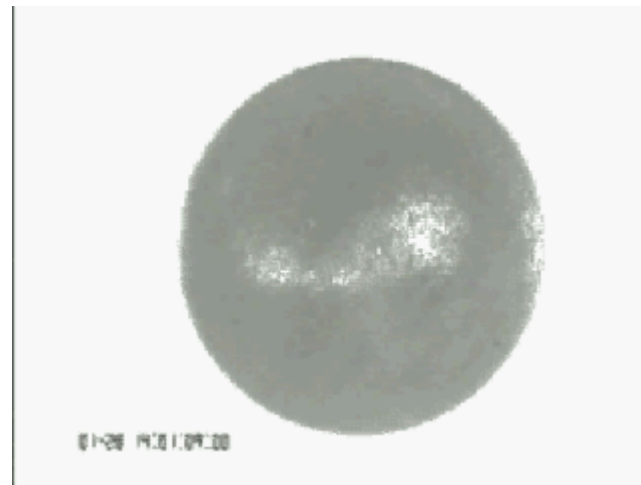
- 回転磁場により、試料に誘導電流を励起。ローレンツ力によるトルクが発生(ブラシレスモーターの原理)

予備加熱





Nb試料の打上げ



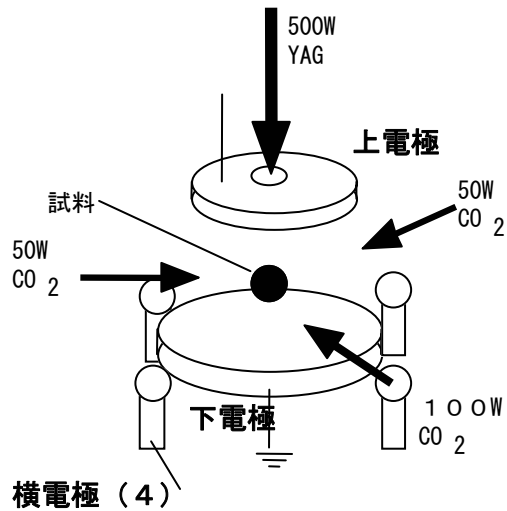
Ni-Cu 溶融



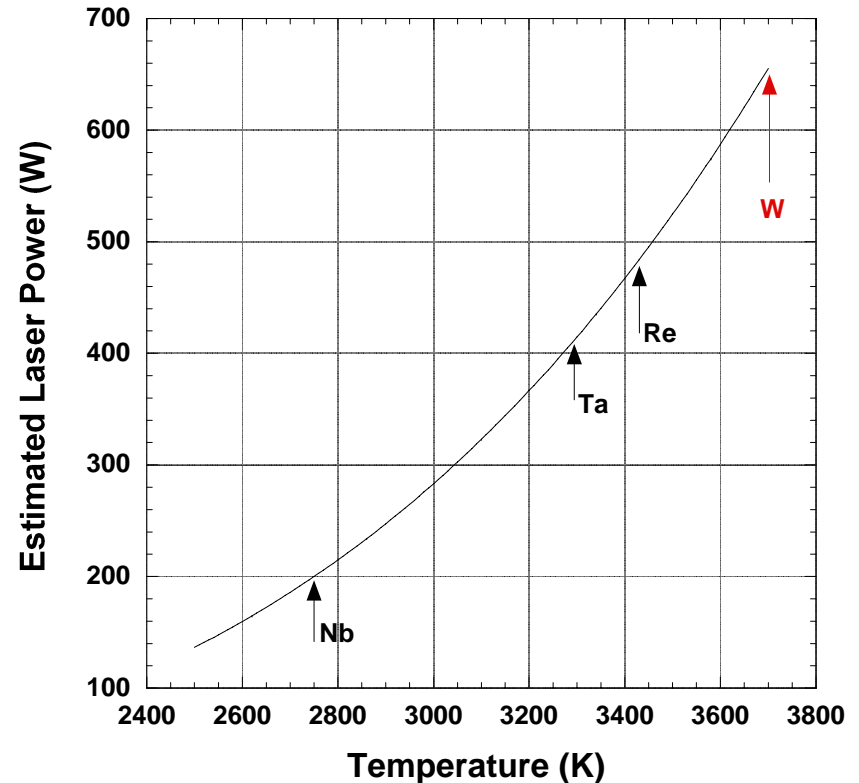
加熱レーザーのパワー増加⇨横方向の振動の増大
(反射されるレーザーが主原因)

3方向からの均一加熱で相殺⇨水平方向の位置制御性の向上
(振幅 $100\ \mu\text{m}$ 以下)

3,000°Cを超える

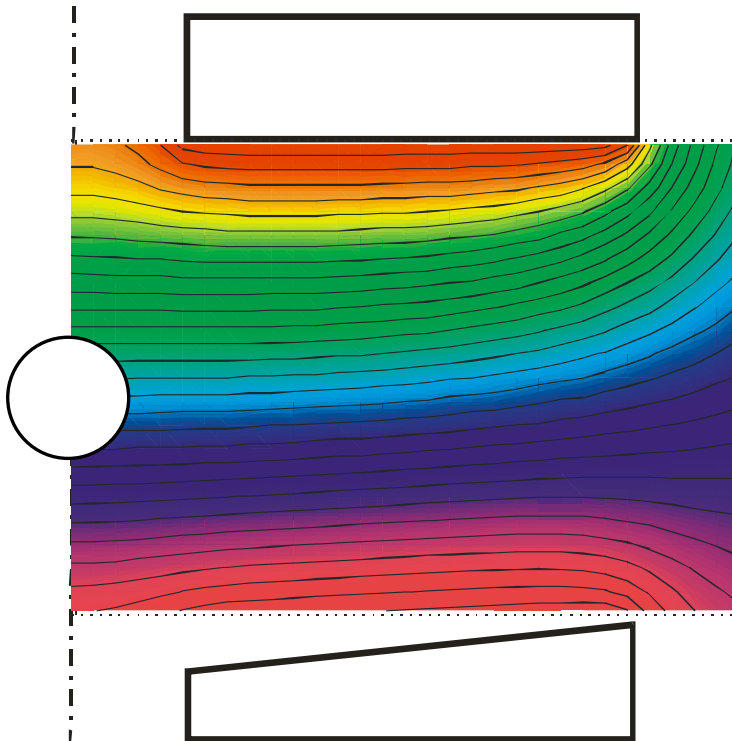


Ta, Re, W, (Os)



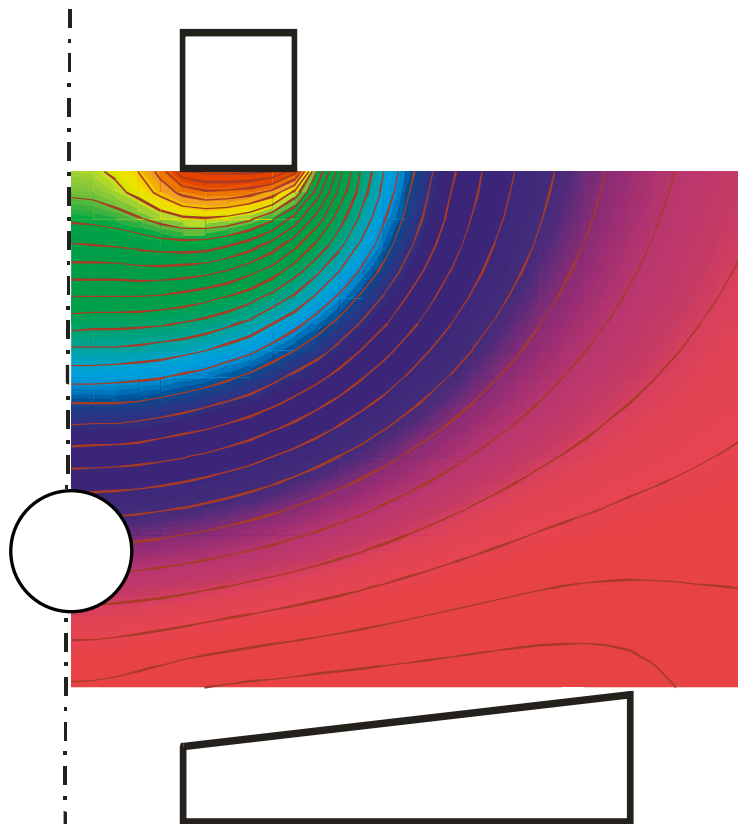
加熱能力の向上: 500W YAGレーザーの追加
試料位置安定性向上:(上電極の小径化)

水平方向位置制御力の向上



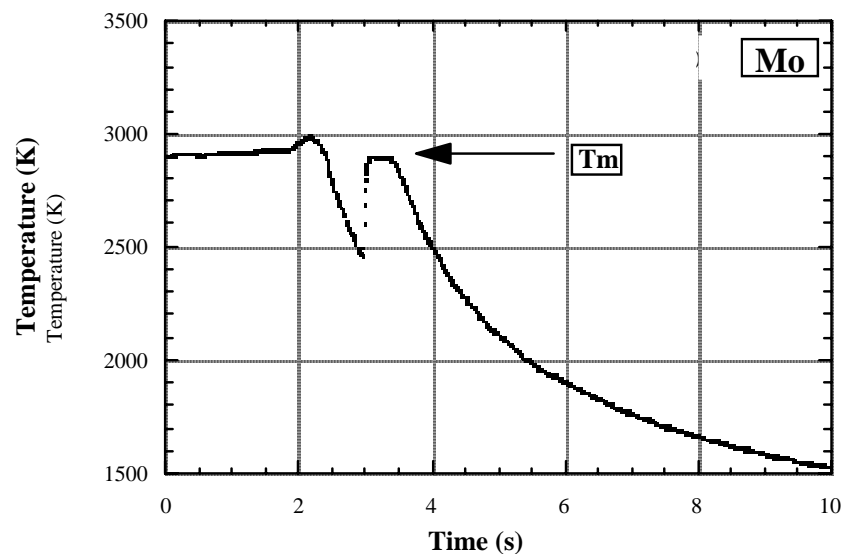
上電極25mm ϕ

水平方向位置安定性向上

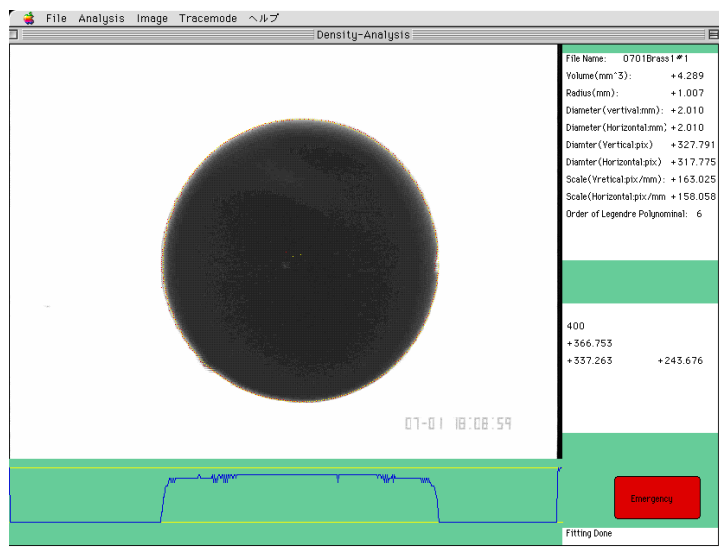


上電極直径10mm

密度

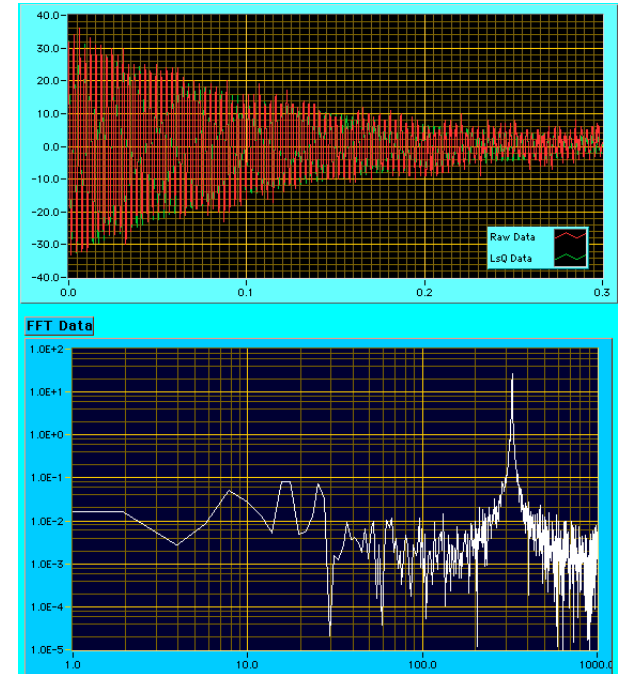
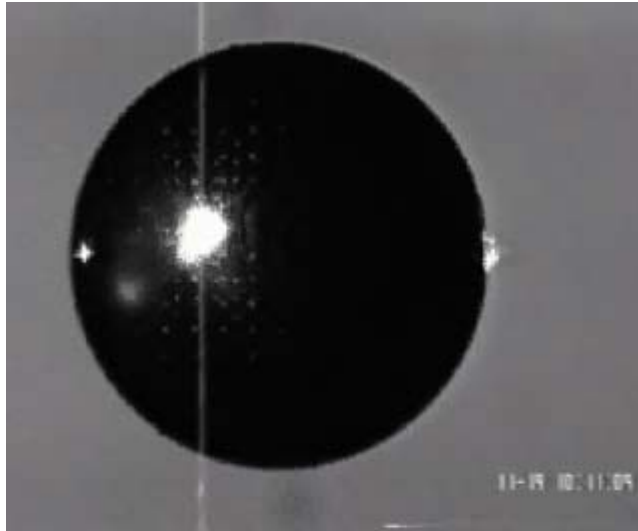


浮遊熔融試料は真球形状
急冷中の画像を取得
⇨画像解析から体積を求め
密度を計算
(質量は急冷試料を回収し秤量)



Chung et al., *Rev. Sci. Instrum.* 67 (1996), 3517-

表面張力、粘性係数



モード2の液滴振動の共振角速度 ω_2 、減衰係数 τ より

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

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

ρ :密度 r_0 :試料の半径

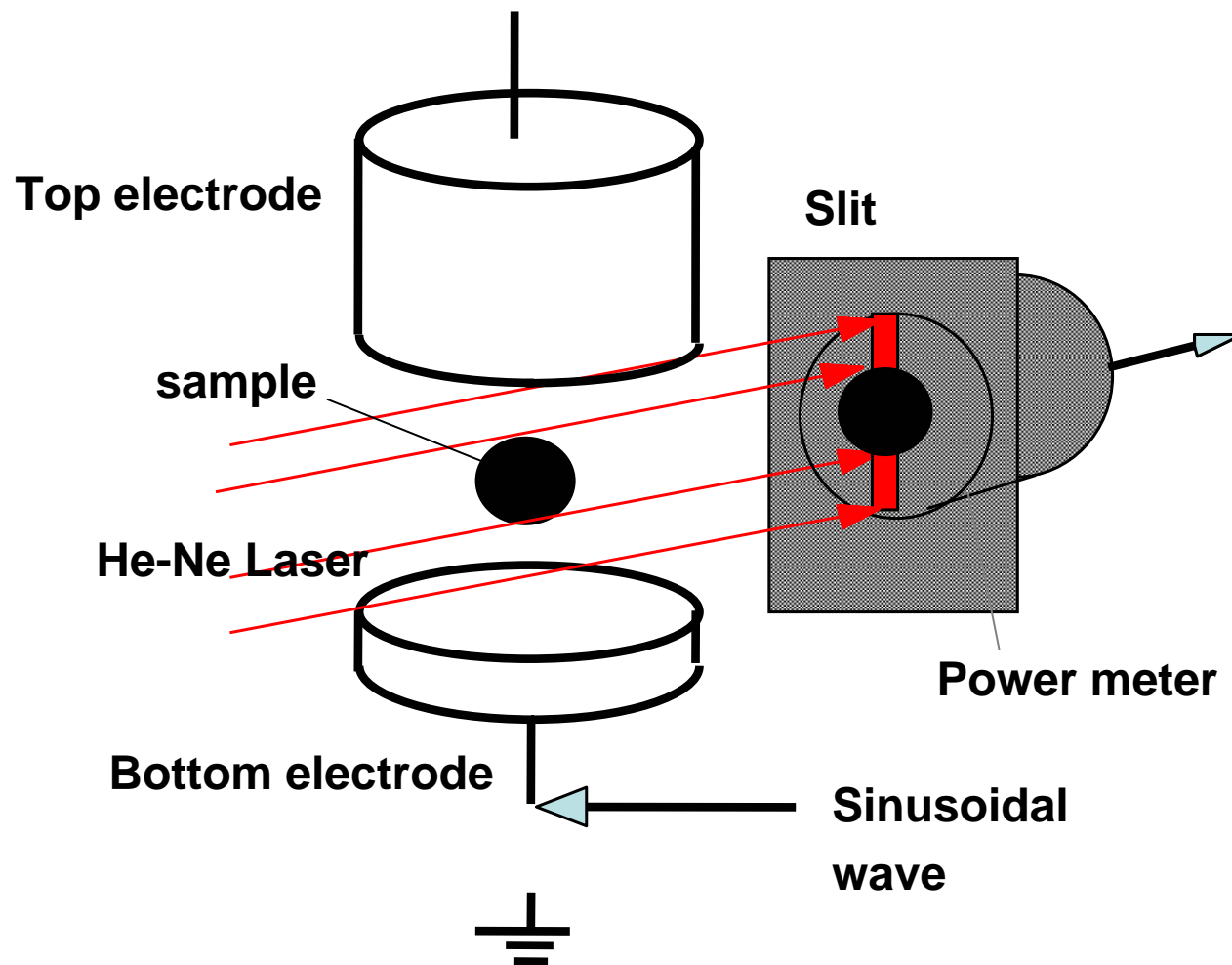
γ :表面張力 η :粘性係数

表面電荷の補正

重力による液滴形状変形の補正

振幅の大きさによる周波数シフトの補正

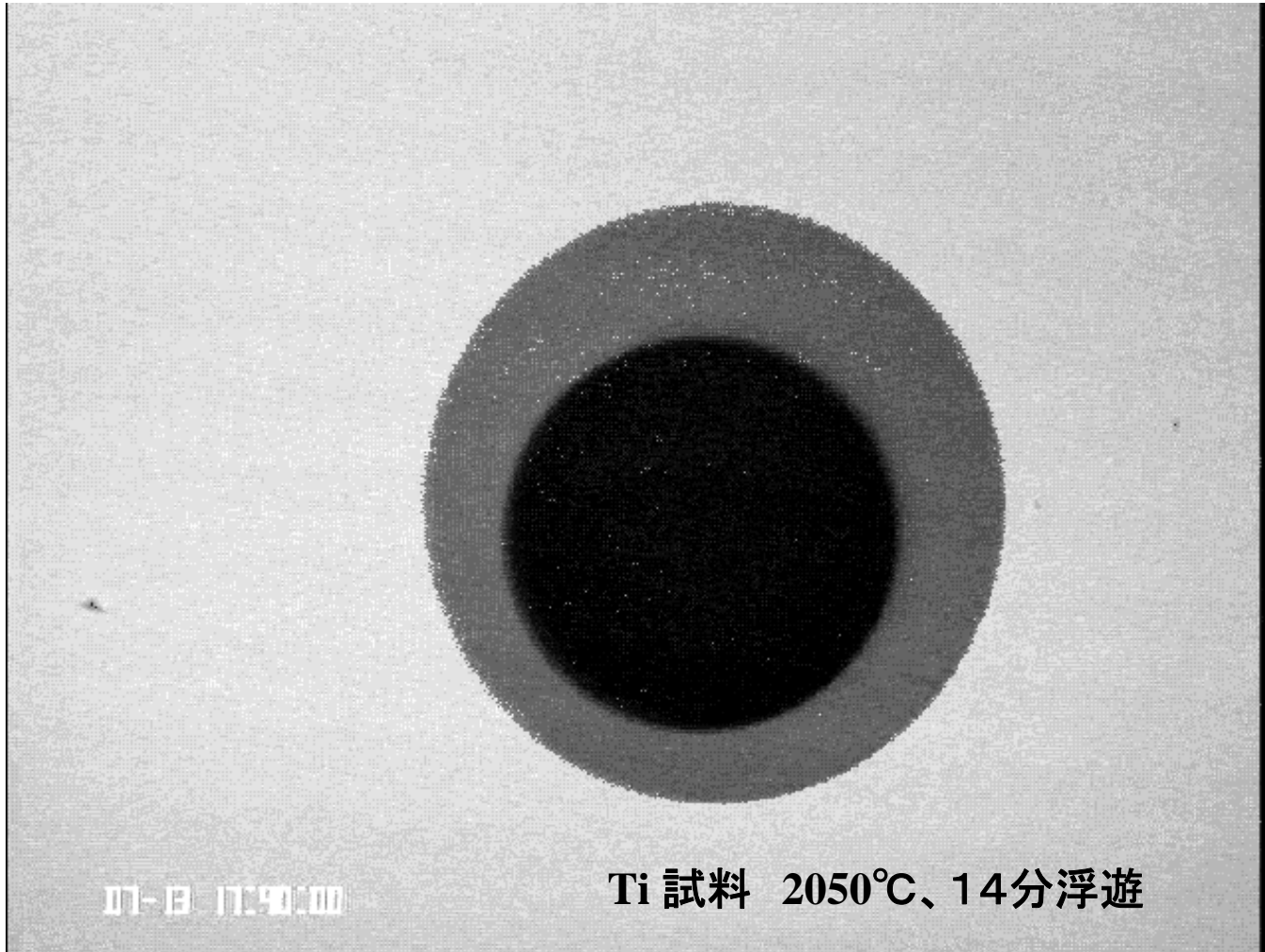
液滴振動の励起／測定



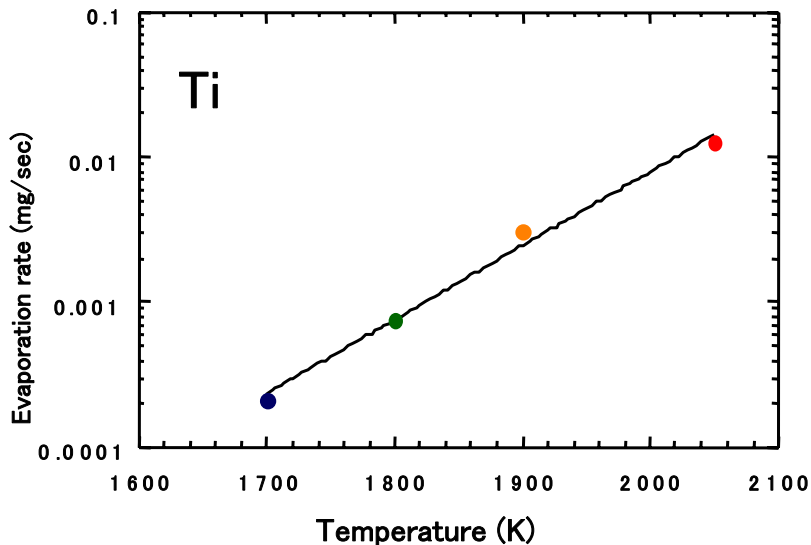
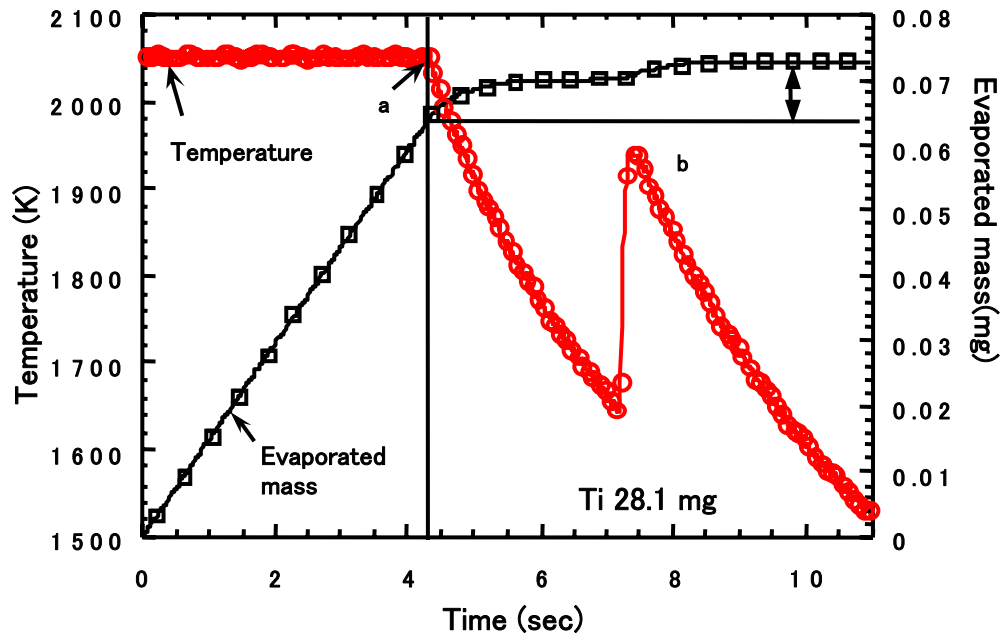
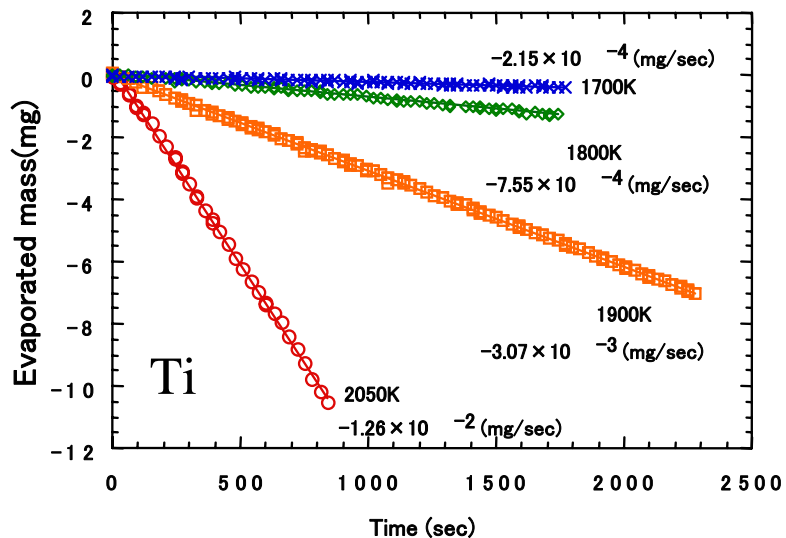
Uncertainty:

$\gamma \pm 3\%$

$\eta \pm 10-15\%$



試料の蒸発の影響



密度測定: 急冷(数秒)中の蒸発量小

□ 蒸発の影響なし

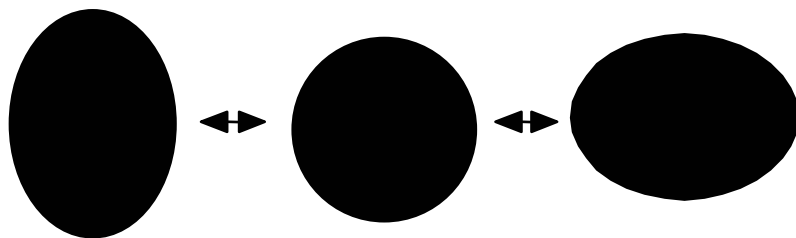
表面張力、粘性係数: 影響あり

□ 画像から時々刻々の試料径を算出する手順とした。

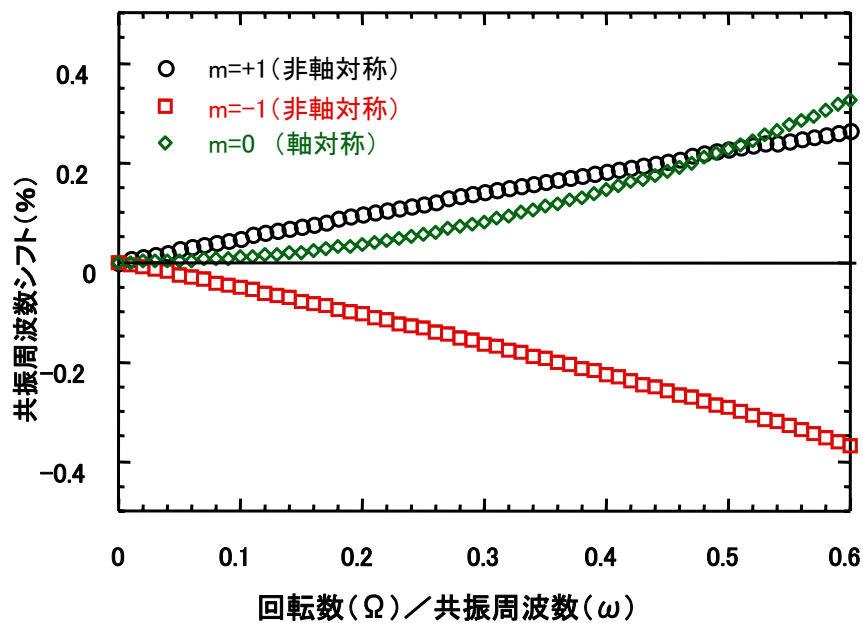
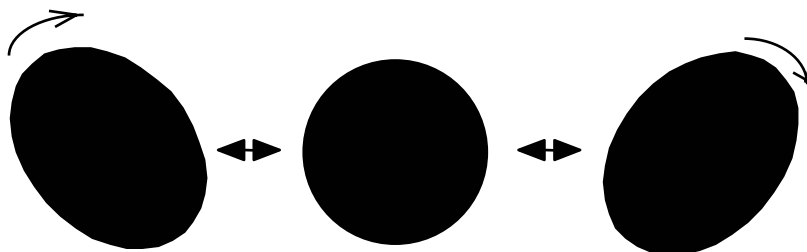
非鉛直軸対称振動の排除



$n=2, m=0$ (軸対称振動)



$n=2, m=\pm 1$ (非軸対称振動)



回転成分を持つ非鉛直軸対称振動が同時に励起 $\Rightarrow \gamma, \eta$ 測定に影響

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{19}{21} \left(\frac{\Omega}{\omega} \right)^2 \dots\dots(m=0)$$

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \sqrt{1 + m \frac{\Omega}{\omega}} - 1 \dots\dots(m = \pm 1)$$

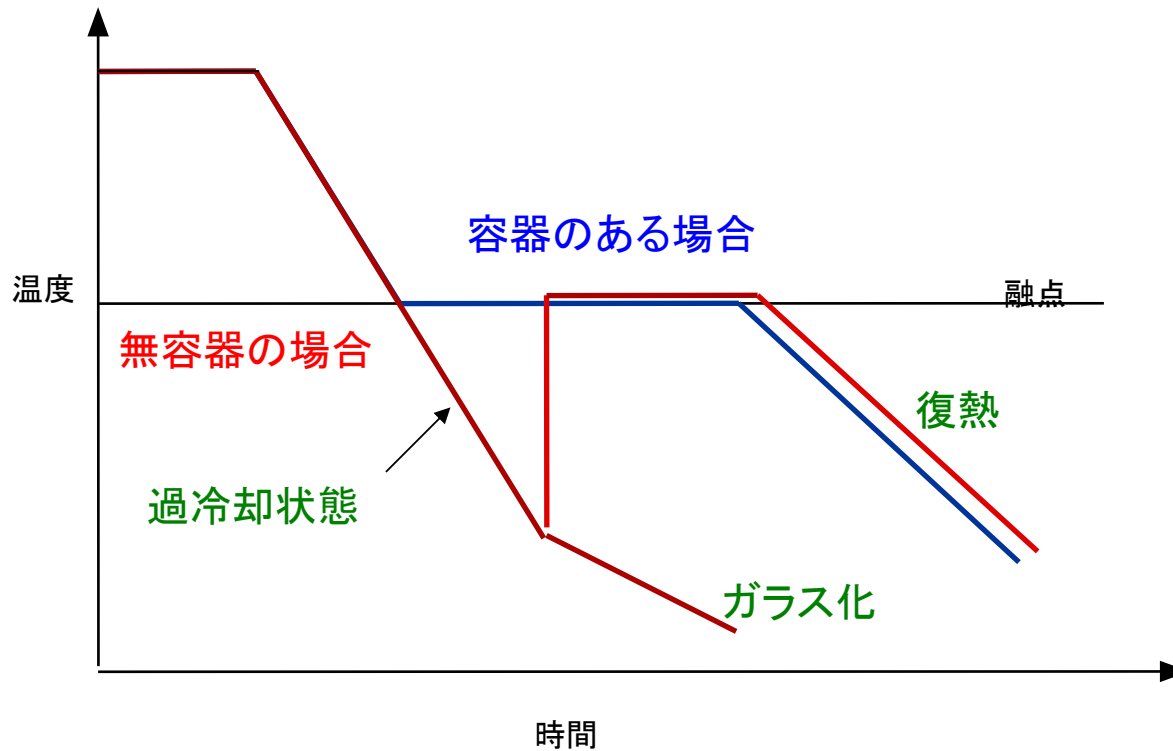
試料の回転により、各振動モードの共振周波数は変化する

回転制御機構により試料に回転を付加、軸対称モードの振動を選択して励起

浮遊実験のメリット

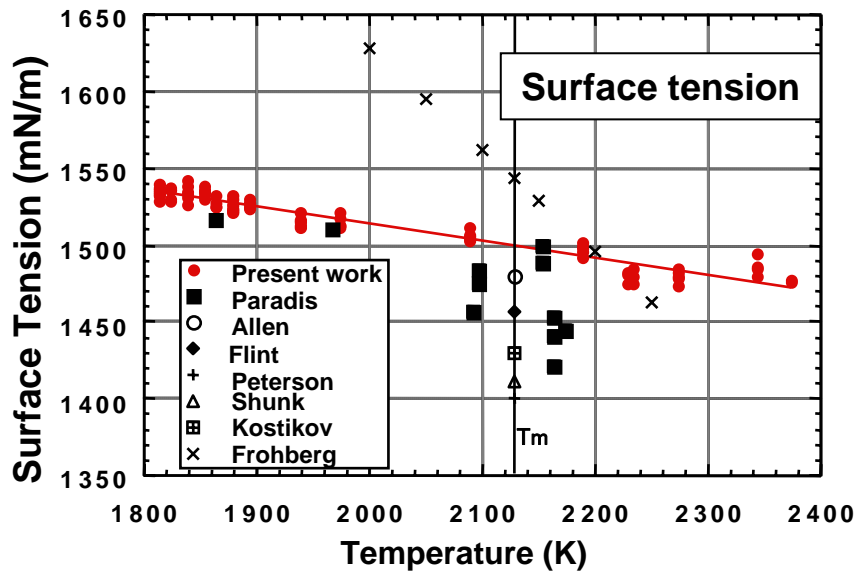
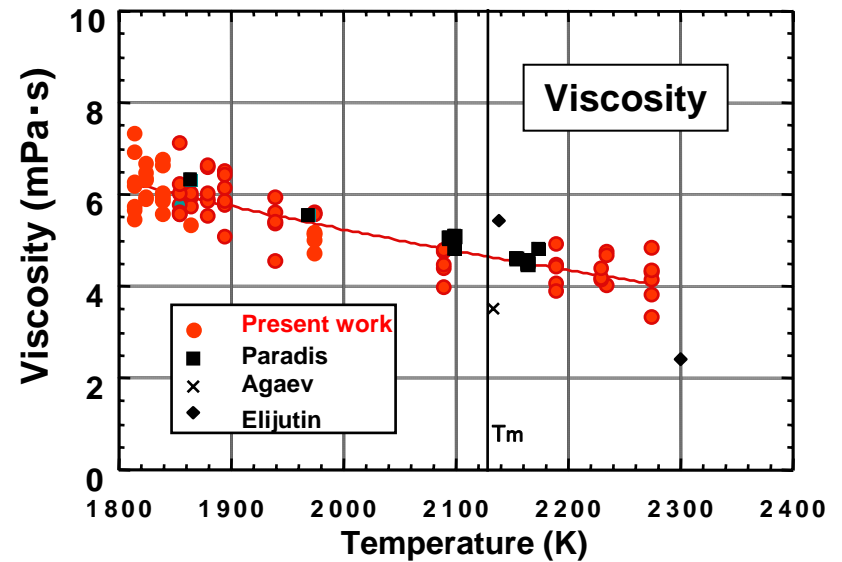
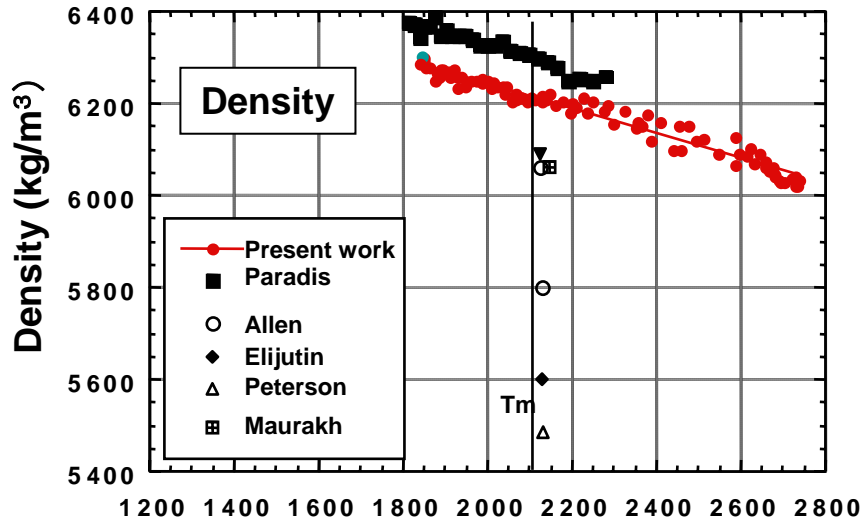


- ・容器からの不純物の混入の抑制
- ・容器からの核発生の抑制



長時間、深い過冷却状態が実現 ⇒ 過冷却状態の測定可能

測定結果: Zirconium



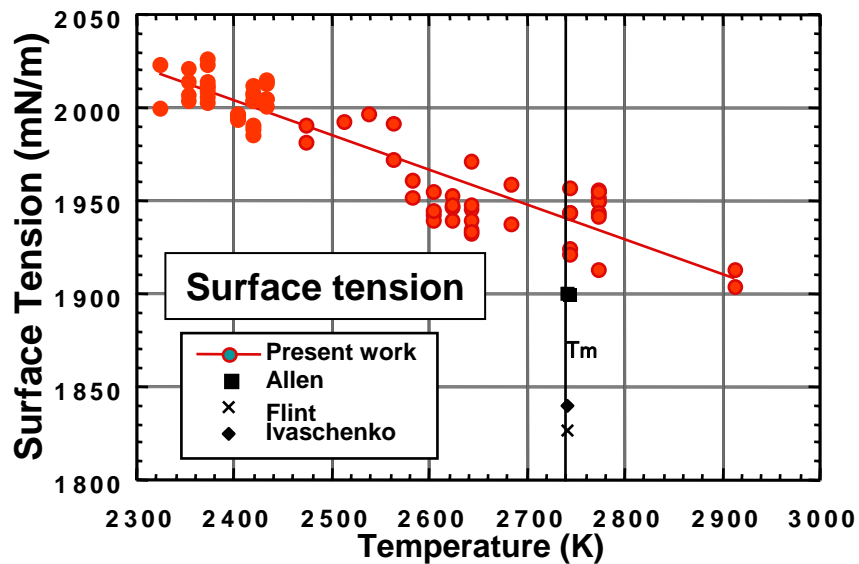
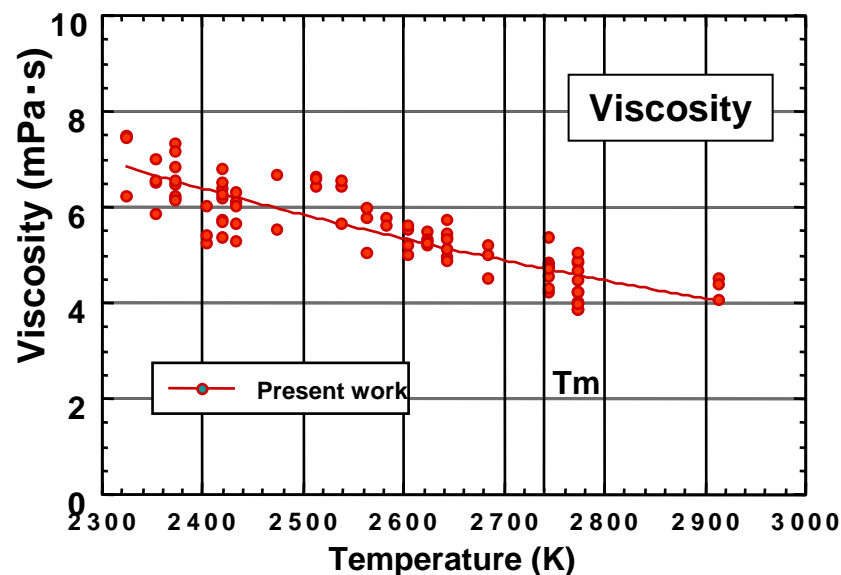
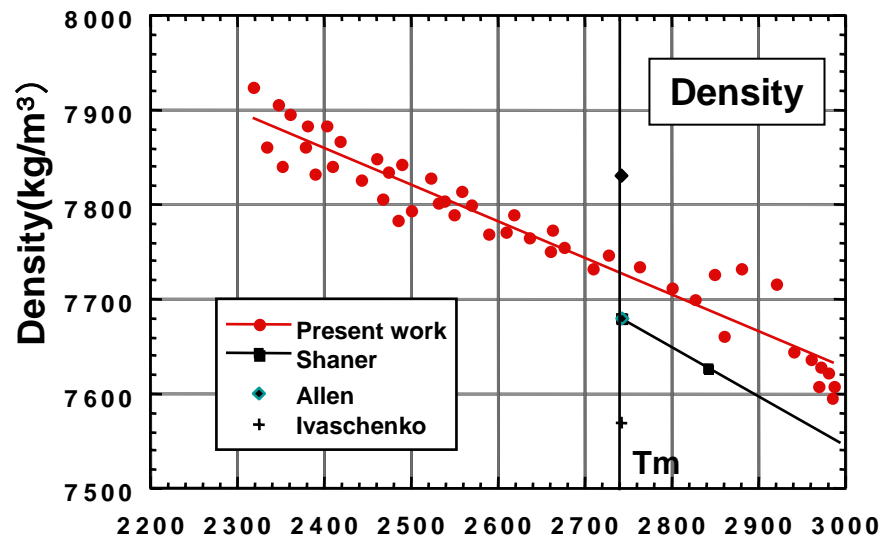
$$\rho = 6120 - 0.27(T - T_m)$$

$$\gamma = 1500 - 0.11(T - T_m)$$

$$\eta = 0.76 \exp(31.8 \text{kJ}/RT)$$

Paradis et al., *Int. J. Thermophysics*, 23 (2002), 825-

測定結果: Niobium



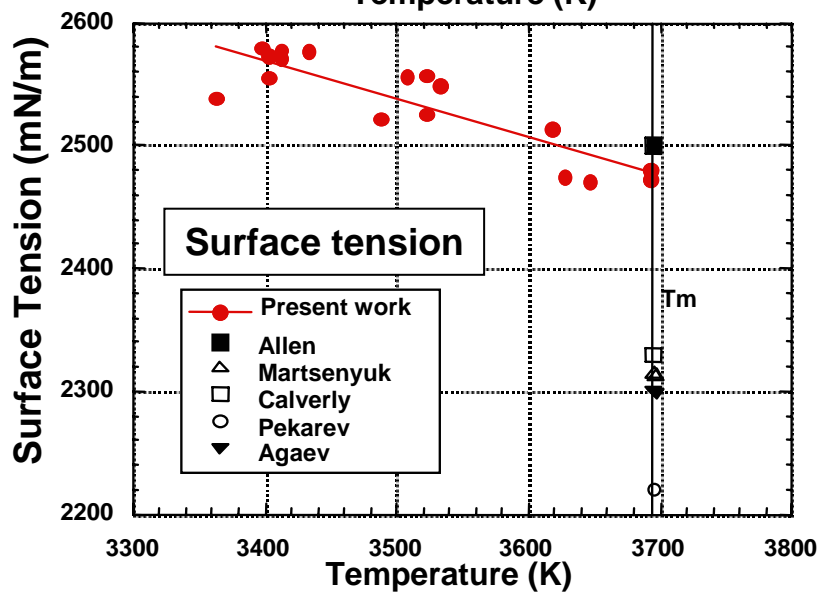
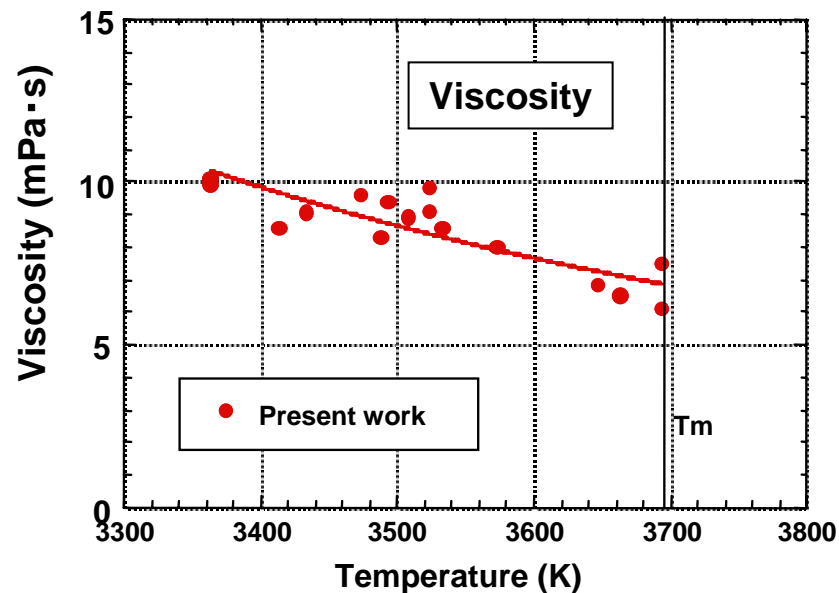
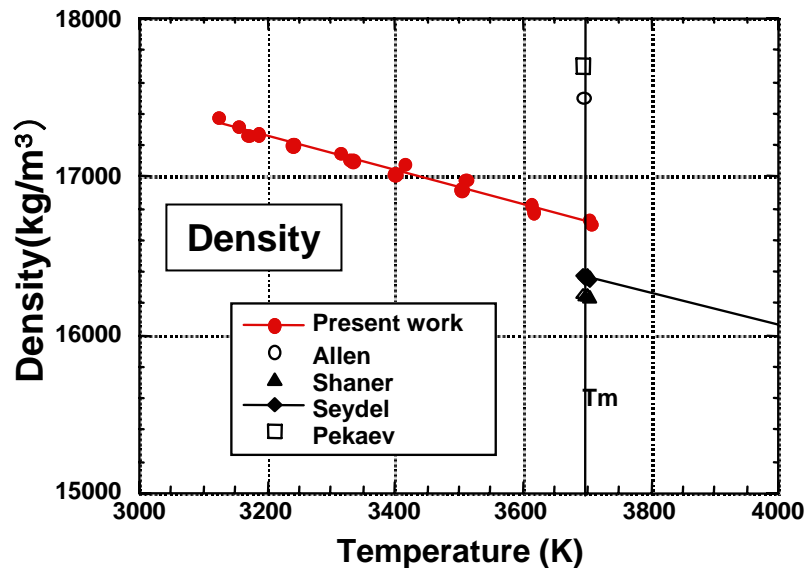
$$\rho = 7730 - 0.39(T - T_m)$$

$$\gamma = 1940 - 0.20(T - T_m)$$

$$\eta = 0.55 \exp(48.9 \text{ kJ}/RT)$$

Paradis et al., *Int. J. Thermophysics*, 23 (2002), 825-

測定結果：Tungsten

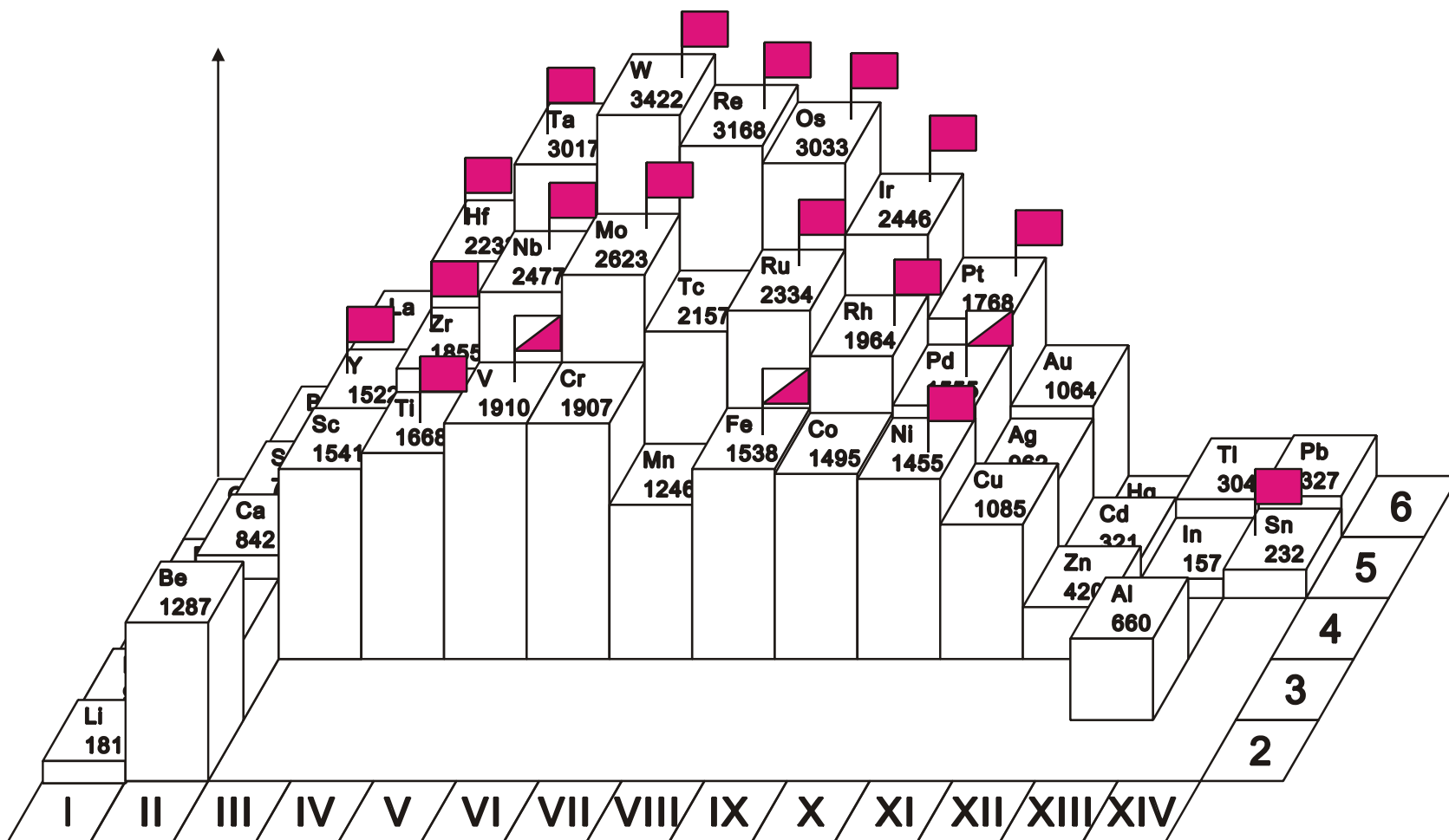


$$\rho = 16830 - 1.08(T - T_m)$$

$$\gamma = 2480 - 0.31(T - T_m)$$

$$\eta = 0.11 \exp(128 \text{ kJ} / RT)$$

測定実績

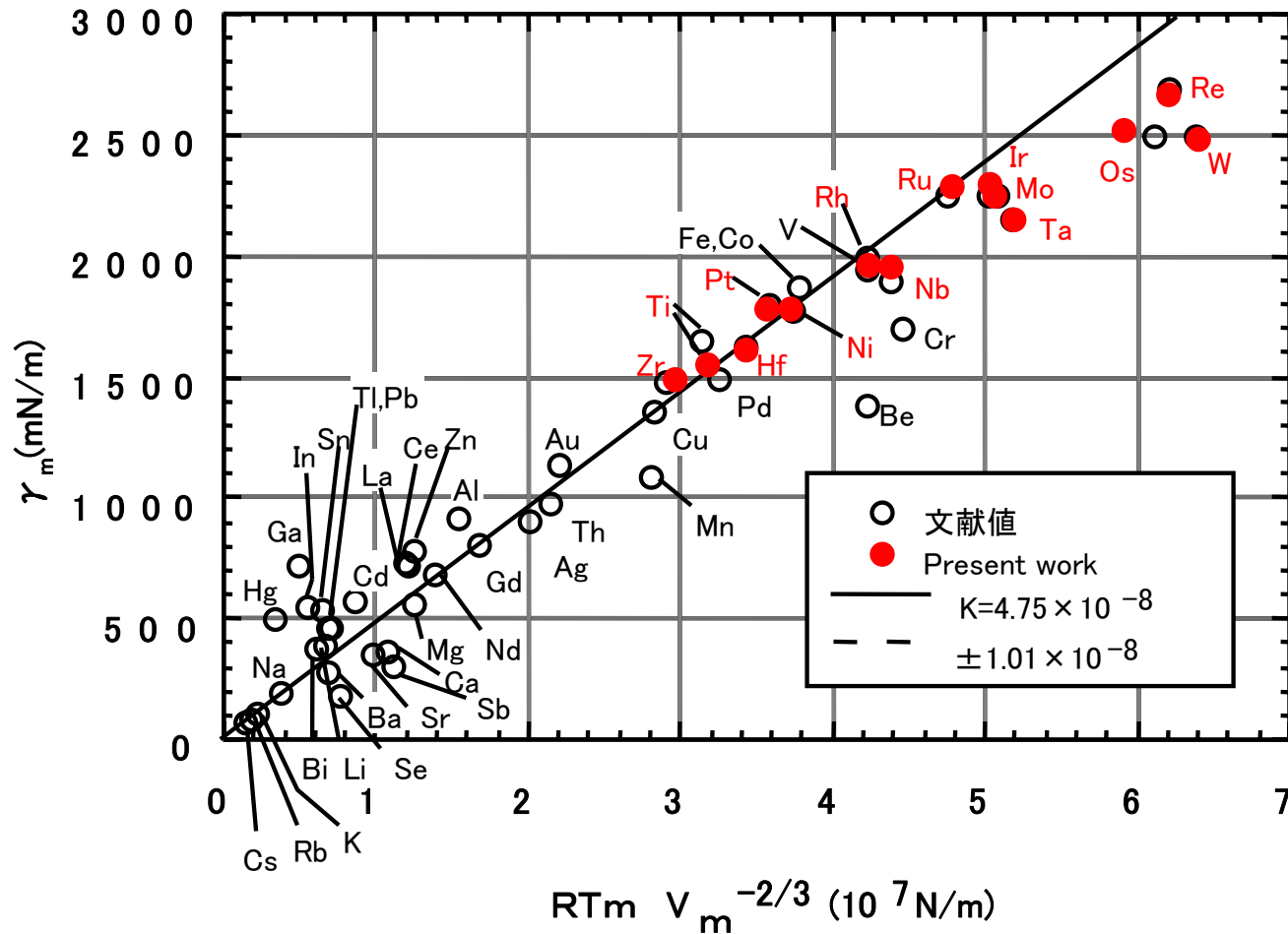


Density



Density, surface tension and viscosity

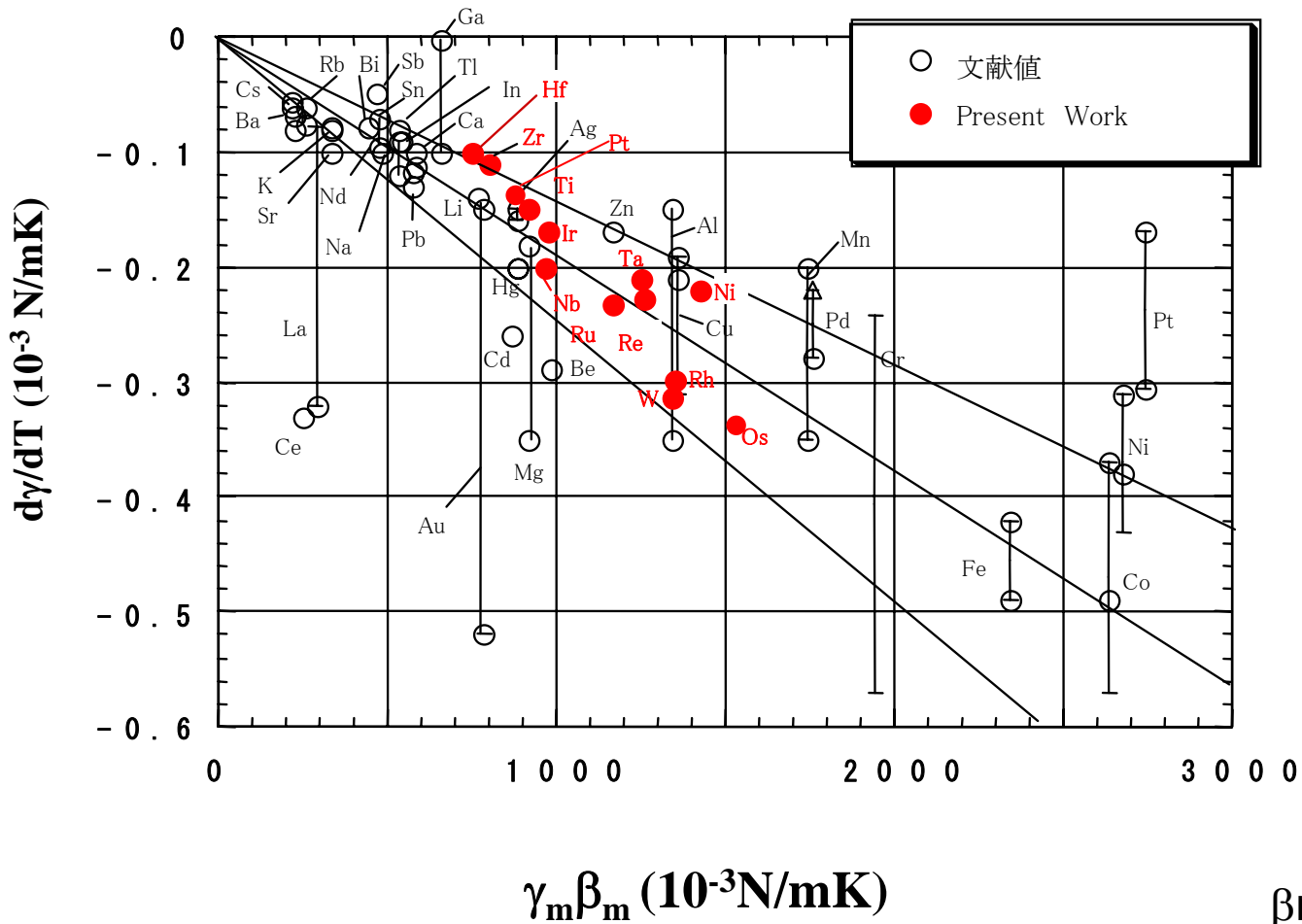
高融点金属の物性値推定式の検証：表面張力



Allen、飯田らの式によく一致

$$\gamma_m = 4.75 \times 10^{-8} \frac{RT_m}{V_m^{2/3}}$$

高融点金属の物性値推定式の検証：表面張力温度係数

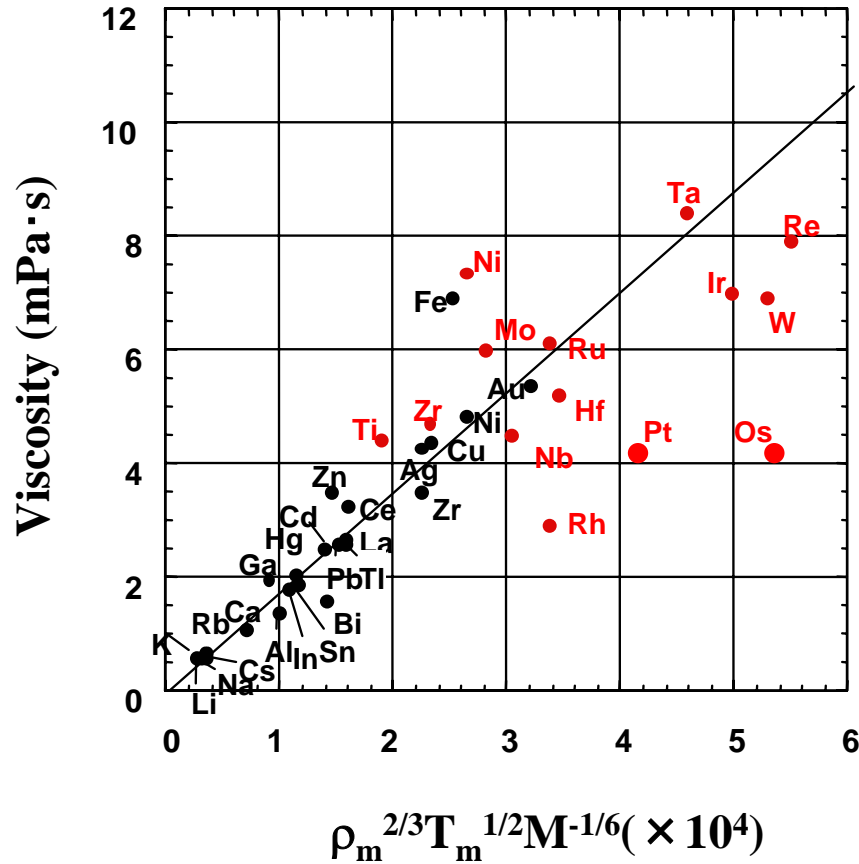


$$\frac{d\gamma}{dT} = K\gamma_m\beta_m$$

$$K \approx -0.2$$

β_m : 熱膨張率

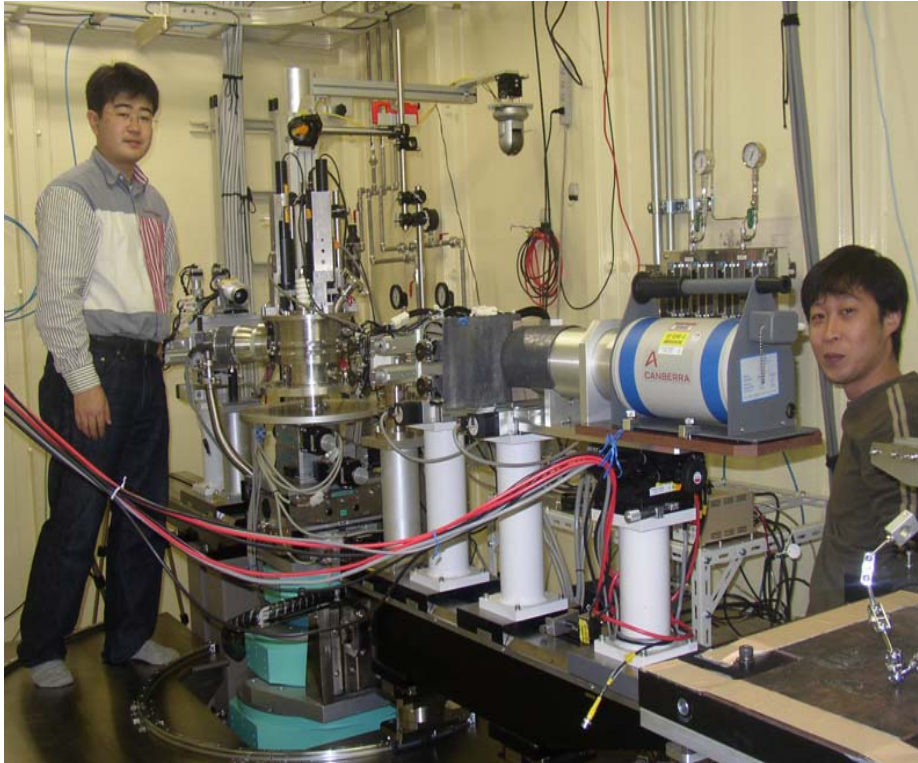
高融点金属の物性値推定式：粘性係数



Andradeの式

$$\eta_m = 1.7 \times 10^{-4} \frac{(MT_m)^{1/2}}{V_m^{2/3}}$$

今後の展開



放射光施設と組み合わせて、高温熔融液体や過冷却液体の構造を測定

様々な観測計とのコラボレーションが可能

- 取得可能な熱物性の拡大

 - 定圧比熱

 - 電気伝導率

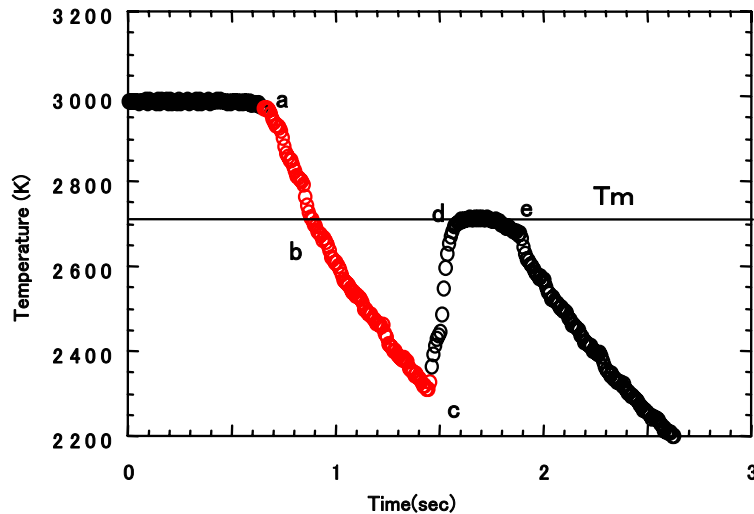
 - あわよくば熱伝導率

- 精度の向上

 - 粘性係数

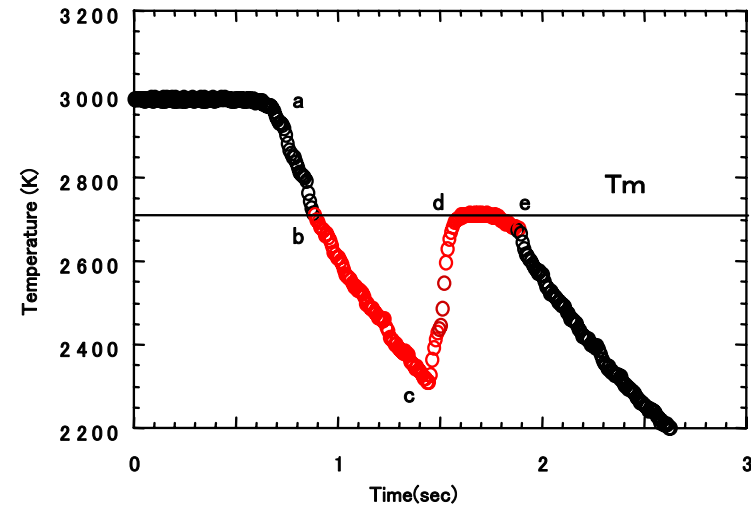
 - 温度計測

輻射のみの熱放出



$$mC_p \frac{dT}{dt} = -\varepsilon_T \sigma_{SB} AT^4$$

m: 質量 C_p : 定圧比熱
 ε_T : 全半球輻射率
 σ_{SB} : ステファンボルツマン定数
 A: 試料の表面積
 T: 試料温度

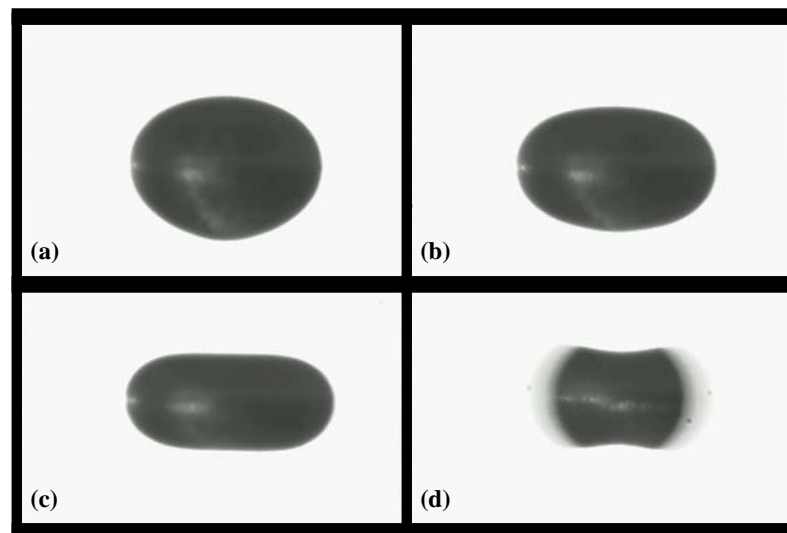
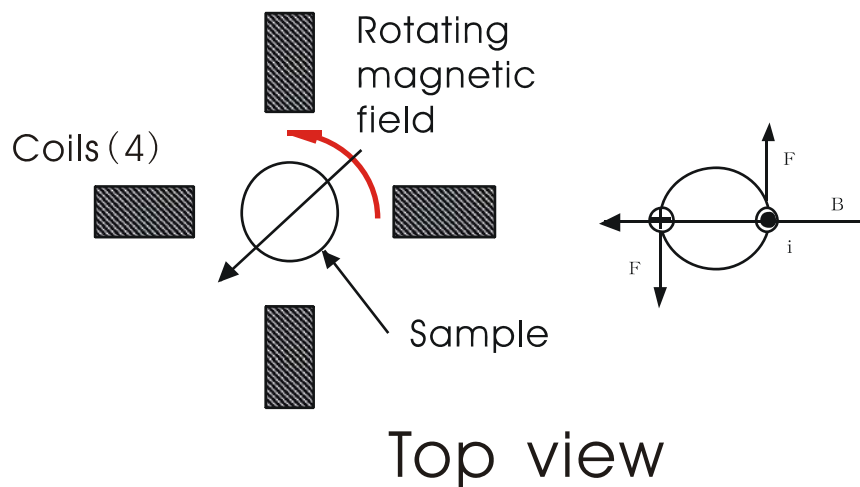


$$\Delta H_s^l = \int_b^e \varepsilon_T \sigma_{SB} AT^4 dt$$

ΔH_s^l : 凝固潜熱

ε_T の測定が不可欠

試料の回転/電気伝導率測定



- 回転磁場により、試料に誘導電流を励起。ローレンツ力によるトルクが発生(ブラシレスモーターの原理)
- 一定の回転磁場下では、試料に発生するトルクは試料の電気伝導率に比例する。→**これを使う**

ご静聴ありがとうございました。

固体熱物性クラブの皆様のご研究等に少しでも役に立てば幸いです。