

静電浮遊法:これまでの成果と今後

宇宙航空研究開発機構 石川 毅彦, Paul-François Paradis, 正木 匡彦

The electrostatic levitation method: accomplishments and challenges for the future

Takehiko Ishikawa, Paul-François Paradis, Tadahiko Masaki
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505
E-Mail: Ishikawa.takehiko@jaxa.jp

Abstract: This paper briefly summarizes the development of ground-based electrostatic levitators (ESL) conducted by JAXA in the past 5 years. Future plans for improvement of the electrostatic levitation techniques and associated researches as well as the necessity of microgravity environment for experiments with ESL are also addressed.

1. はじめに

静電浮遊炉は、国際宇宙ステーションに搭載される第2世代の共通実験装置として技術検討が進められてきたが、宇宙ステーション計画の遅延や財政状況を反映して、搭載化の作業が進んでいない。一方、地上における浮遊技術は1990年代後半から急速な進歩を遂げ、微小重力環境でしか実現できないと考えられてきた実験のうち地上で実現可能となったものも少なくない。ここでは地上における静電浮遊炉に関連する技術のこれまでの発展についてまとめるとともに、今後の課題及び微小重力環境の必要性について展望する。

2. 静電浮遊の歴史

静電浮遊方式は試料が安定位置からずれが生じても復元力が働かない方式であるため、「絶えず試料の位置を検出し、それに応じて電場を調整する」フィードバック制御を行う必要がある。重力による落下加速度の大きさを考慮すると最低数百Hzの制御周期をもつ高速制御が必要となる。そのため、静電浮遊方式の概念は1980年にClancy¹⁾により発表されていたにもかかわらず、その開発は高周期の制御を実現するためのコンピュータや高速高電圧アンプの開発を待たねばならなかった。

1980年代後半から、JPLにおいて地上用静電浮遊炉の開発が精力的に行われた。JPLのRhimらは、数種類の電極構成について地上実験及び航空機を利用した微小重力実験を実施し、技術検証を実施した^{2,3)}。但し、この時点では常温での液滴浮遊にとどまり、高温材料の浮遊溶融には加熱によって減少する電荷の補給方法の確立が必要であった。

その後JPLでは1990年代に光電効果による電荷の補給について基礎的な研究を行い、高真空の静電浮遊炉において金属試料の浮遊溶融に成功した⁴⁾。そして浮遊液滴が真球状であるという静電浮遊炉のメリットを生かして、密度(熱膨張率)⁵⁾、定

圧比熱/全半球輻射率⁶⁾、表面張力、粘性係数⁷⁾及び電気伝導率⁸⁾の測定技術を確立した。

宇宙航空研究開発機構(JAXA)では前身の宇宙開発事業団(NASDA)時代の1990年頃から宇宙ステーション用共通実験装置の一つとして静電浮遊炉の技術開発を進めてきた。電極構成等はJPLのものと同様であるが、ガラスやセラミクス試料を対象た加圧雰囲気下での浮遊溶融に注力した。1998年に小型ロケット(TR-IA7号機)を用いた微小重力実験を行い、セラミクス試料(BiFeO_3)の浮遊溶融実験を行った⁹⁾。試料は6分間の実験中電極に接触することなく浮遊状態を維持したが、溶融時に試料の電荷が大きく減少して位置が大きく変動するなど課題を残した。これを受けて2000年から地上研究を開始して地上用静電浮遊炉の開発を通じて浮遊技術の向上及び浮遊炉を利用した研究を実施してきている。

3. これまでの地上研究の成果と課題

3.1 試料位置安定性の向上

静電浮遊法は、帯電させた試料と電極間に働くクーロン力によって試料位置の制御を行うものであり、地上ではこの力と重力とを釣り合わせることで浮遊を達成する。Fig.1のとおり、試料の影をディテクターに投影して試料位置を検出し、コンピュータでのPID計算により電極間の電圧を調整することによりこれを達成している。

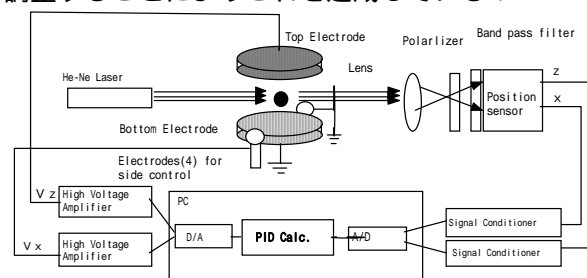


Fig.1 Schematic drawing of sample position control system.

Fig.2 に開発当初と現在の電極構成を示す。上電極を小さくすることにより、上下電極間の電気力線が電極中央に向く構成として、水平方向の一制御力を向上させた¹⁰⁾。また、加熱用レーザーを水平3方向(それぞれ 120° の位相差を持つ)及び上電極中心から照射する構成として、加熱レーザーによる光子圧が位置安定性に与える影響を最小にする工夫をした¹¹⁾。これらの改良により、試料の位置安定性は、最高で ±20μm 程度まで向上している。

試料を安定して浮遊させるためには、試料の電荷量を一定に保つ必要がある。これについては、浮遊前に試料を予備加熱し、試料からの熱電子の放出を促進してから浮遊を開始する方法を考案した¹²⁾。こうした工夫により、多くの高融点金属の安定浮遊を達成し、3,500 に及ぶ超高温状態での金属元素の液体熱物性の計測に成功している。

試料の安定浮遊に関する現在の課題は以下のとおりである。

(1)蒸発が激しい試料への対応

蒸発が激しい試料については水平方向の位置変動が大きい傾向にあり、浮遊溶融が達成できない試料も存在する。

(2)低融点試料への対応

低い材料には予備加熱の適用が困難であるため、従来用いられていた紫外線照射による光電効果を利用した電荷補給法しかないが、より効果的な電荷補給法が望まれている。

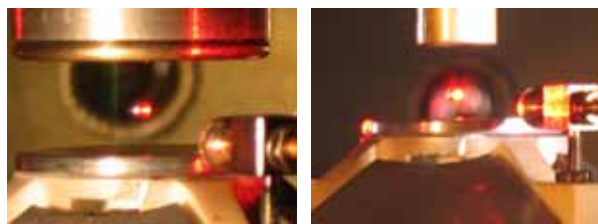


Fig.2 Actual electrodes arrangement in the JAXA electrostatic levitator; past(left) and present (right).

3.2 酸化物への対応

静電浮遊法は、帯電するあらゆる種類の試料を浮遊させられることが大きなメリットであるが、実際には酸化物試料は金属に比べて帯電量が少なく、浮遊させるには大きな電場が必要となる。また、試料温度の上昇に伴って帯電量が大きく減少する 경우가多々ある。更に、試料から酸素が抜けるのを防止するにはガス環境下での運転を行う必要があるが、ガス環境下は高真空に比較して電極間の放電が起こりやすい。これらの理由から、酸化物

試料の地上での浮遊溶融は困難であった。我々は、金属試料同様に試料を予備加熱してから浮遊させる方法を採用してこれまでに BiFeO₃¹³⁾, BaTiO₃¹³⁾, YAG¹⁴⁾等数種類の酸化物の地上における浮遊溶融に成功した。予備加熱時に酸化物試料は電極に付着しやすいため、Fig.3 のとおり静電浮遊法にガス浮遊法を組み合わせた方式を採用してこれらの試料の浮遊溶融を達成している¹⁵⁾。

しかし、高真空環境での金属元素の浮遊と比較して、成功確率が低い上に浮遊可能な試料種が限定されており、酸化物の地上での浮遊溶融は「難しい」と言うのが実情である。試料への電荷供給法の改善等、地上で出来ることは残されているが、微小重力環境の利用が適当と考えられる。

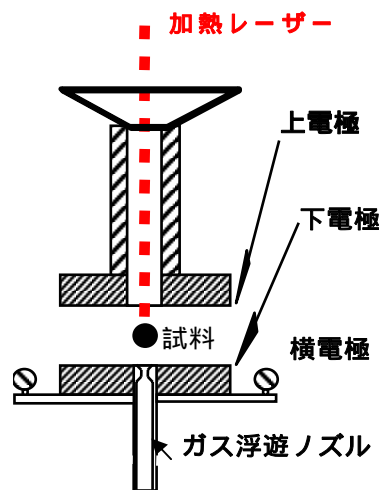


Fig.3 Detailed schematics of pressurized electrostatic levitator for oxide materials

3.3 熱物性測定技術

JPL において確立された密度(熱膨張率)、定圧比熱/全半球輻射率、表面張力及び粘性係数の測定技術を踏襲して、これの熱物性値の測定を JAXA でも可能としている。特に JAXA では測定データが極めて少ない高融点金属融体にターゲットを定めて、これらの熱物性値の計測を進めてきた。Fig.4 は金属元素についてこれまでの JAXA における測定実績をまとめたものである。最高の融点を持つ金属元素タングステン(タングステン)を初めとして遷移金属大半のデータを測定している¹⁸⁾。特に粘性係数については、2000 以上の融点を持つ元素については他にほとんど測定例がない。

浮遊法による熱物性測定の課題として温度計測が挙げられる。放射温度計を用いた非接触温度測定においては、試料の放射率が必要となる。現在

は試料の融点や共晶線温度などを既知として、試料を急冷した際の復熱現象後に現れるプラトーをこれらの温度に一致するように放射率を合わせている。ここには「液体の放射率は温度に関わらず一定」という前提があるが、この前提はシリコン等一部の元素を除いて確認されていない。改善点としては放射率を独立に計測するエリプソメータの設置等が考えられる。

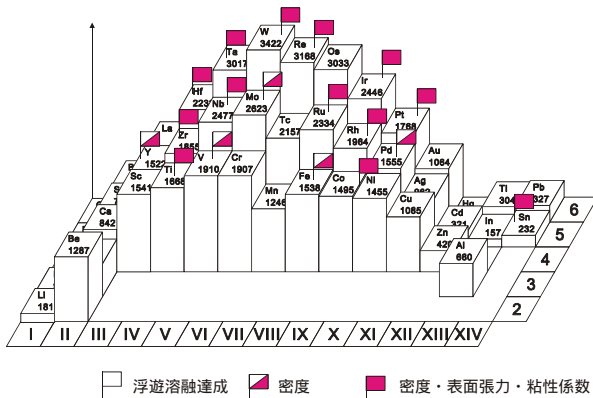


Fig.4 Status of thermophysical property measurements of refractory metals by JAXA.

3.4 その他

浮遊炉は、究極の高温用試料保持装置（ピンセット/ホルダー）である。地上での安定浮遊が確立してきたため、様々な観察装置と組み合わせる多様な研究を進めることが可能となってきた。放射光との組み合わせによる液体構造測定実験はそのパイオニアである^{19,20)}。その他に、高速度カメラを組み合わせて過冷却からの凝固過程の観察実験などを既に実施している。

4. 今後の課題及び微小重力環境の必要性

本章では、地上研究を通じて明らかとなった微小重力環境の必要性について述べる。前述の通り、帯電の維持が困難な酸化物の浮遊溶融に関しては、微小重力の利用が圧倒的に有利であるが、地上で浮遊が容易な金属・合金系においても、微小重力利用は以下のメリットがあると考えられる。

4.1 雰囲気制御

静電浮遊炉においては、地上では直径 2mm、質量にして数十 mg の試料しか浮遊溶融できない。このため、試料の蒸発が問題となる。特に合金系においては、試料の組成がずれることは致命的であり、蒸発を抑制できる環境での実験が望ましい。蒸発抑制の手段として、制御されたガス環境下での浮遊が考えられる。しかし、試料の酸化や窒化

の防止の要請も同時にあるため、使用できるガス種は He や Ar になる。一方こうしたガス環境では電極間の放電が起こりやすい。JAXA の地上用静電浮遊炉を利用した簡易実験では、空気 1 気圧では 8.5kV/cm 程度、空気 2 気圧では 20kV/cm 程度の電場まで電極間放電が起こらないのに対して、Ar では 8 気圧かけても 6kV/cm 程度の電場で放電が始まった。地上では、6kV/cm の電場では高々数 mg のアルミ箔しか（重力に打ち勝って）浮遊させることができないため、浮遊溶融実験は困難である。

一方、微小重力環境では、6KV/cm の電場で十分に試料の位置制御が可能であると考えられ、Ar 雰囲気下での Metal 実験が可能になると考えられる。また、制御された雰囲気での実験が可能であることから、国際公募テーマとして採択されている「シリコン融液の表面張力の酸素分圧依存性」実験²¹⁾等も静電浮遊炉で実施可能となる。

4.2 熱物性測定における重力影響

静電浮遊法における表面張力及び粘性係数測定は、液滴振動法によって行われている。この方法は 2 次の振動を励起し、その固有角速度 ω_2 及び振動の減衰時間 τ_2 を計測し、以下の基本式から表面張力 γ 、粘性係数 η を算出する方法である。

$$\omega_2^2 = \frac{8\gamma}{\rho r_0^3} \quad (1)$$

$$\frac{1}{\tau_2} = \frac{5\eta}{\rho r_0^2} \quad (2)$$

ここで r_0 は試料の半径、 ρ は密度である。(1)式は、表面電荷の影響及び重力による試料の変形を考慮した補正項²²⁾を加えて次式で計算される⁷⁾。

$$\omega^2 = (8\gamma/r^3\rho) \left[1 - (Q^2/64\pi^2 r^3 \gamma \epsilon_0) \right] \left[1 - F(\gamma, q, e) \right]$$

$$F(\gamma, q, e) = \frac{[243.31\gamma^2 - 63.14q^2\gamma + 1.54q^4]e^2}{[176\gamma^3 - 120q^2\gamma^2 + 27\gamma q^4 - 2q^6]}$$

$$q^2 = Q^2/(16\pi^2 r^3 \epsilon_0)$$

$$e^2 = E^2 r \epsilon_0 \quad (3)$$

ここで、 Q は試料の表面電荷、 E は浮遊のために印可された電場、 ϵ_0 は真空の誘電率である。

表面張力に関して、(1)式の妥当性、特に重力による試料の変形の補正項((1)式の F)の評価について微小重力環境を利用した実験が必要であると考えている。

一方、粘性係数の算出式(2)は、外場が全く

ないとの前提による理論式であり、重力の影響を考慮したモデルがない。特に地上での静電浮遊においては、大きな位置制御力が必要となるがその影響がどの程度あるかは明らかになっていない。現在、試料して大きさの異なるジルコニウム試料を用いて液滴振動法による粘性係数測定実験を行っている。最終的な結果はまだ出ていないが、液滴振動の共振周波数が、静電浮遊炉位置制御系の制御帯域内であると液滴振動の減衰が促進されて減衰時間 τ_2 が小さく計測されるという傾向が見られており、浮遊制御力の影響が明らかになりつつある。微小重力環境下では、位置制御力を地上に比較して 1/100 程度に小さくできるため、理想的な環境で粘性係数が測定可能となる。

5 . 宇宙での微小重力に向けて

国際宇宙ステーション用静電浮遊炉は現在 1 Double Rack (婚礼家具の箆笥一個分程度) を利用する装置として検討が進められている。しかし、この大きさのペイロードの開発には、多額の費用がかかる上、打ち上げコストも大きくなる。一方、浮遊させる試料の大きさは、加熱に利用できるパワーを考えると直径 1cm 程度が妥当であろう。従って、試料の大きさから考えると装置の小型化を進める余地は十分あると考えられる。装置の小型化が進めば、他の微小重力実験機会 (小型ロケット・回収衛星等) や他の宇宙ステーション用実験装置との混載も可能となる。上述した研究上の技術的課題に加えて、装置の小型化への取り組みも重要である。

参考文献

- 1) P. F. Clancy, E. G. Lierke, R. Grossbach, and W. M. Heide, *Acta Astronautica* **7** (1980), 877.
- 2) W. K. Rhim, M. Collender, M. T. Hyson, W. T. Simms, and D. D. Elleman, *Rev. Sci. Instrum.* **56** (1985), 307.
- 3) W. K. Rhim, S. K. Chung, M. T. Hyson, E. H. Trinh, and D. D. Elleman, *IEEE Trans. on Industry Appl.* **IA-23** (1987), 975.
- 4) W. K. Rhim, S. K. Chung, D. Barber, K. F. Man, G. Gutt, and A. J. Rulison, *Rev. Sci. Instrum.* **64** (1993), 2961.
- 5) S. K. Chung, D. B. Thiessen, and W. K. Rhim, *Rev. Sci. Instrum.* **67** (1996), 3175.
- 6) A. J. Rulison and W. K. Rhim, *Rev. Sci. Instrum.* **65** (1994), 695.
- 7) W. K. Rhim, K. Ohsaka, and P.-F. Paradis, *Rev. Sci. Instrum.* **70** (1999), 2796.
- 8) W. K. Rhim and T. Ishikawa, *Rev. Sci. Instrum.* **69** (1998), 3628.
- 9) J. Yu, N. Koshikawa, Y. Arai, and S. Yoda, H. Saito, *J. Cryst. Growth*, **231** (2001) 568.
- 10) T. Ishikawa, P. -F. Paradis, R. Fujii, and S. Yoda, *Netsubusei*, **19** (2005), 61.
- 11) P. -F. Paradis, T. Ishikawa, and S. Yoda, *Space Technol.* **22** (2002), 81.
- 12) T. Ishikawa, P. -F. Paradis, S. Yoda, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, (2001), 2490.
- 13) P. -F. Paradis, J. Yu, T. Ishikawa, T. Aoyama, and S. Yoda, *Appl. Phys. A*, **79** (2004), 1965.
- 14) P. -F. Paradis, J. Yu, T. Ishikawa, T. Aoyama, S. Yoda, and J.K.R. Weber, *J. Cryst. Growth*, **249** (2003), 523.
- 15) P. -F. Paradis, T. Ishikawa, and S. Yoda, *Rev. Sci. Instrum.*, **72** (2001), 2811.
- 16) P. -F. Paradis, T. Ishikawa, R. Fujii, and S. Yoda, *Appl. Phys. Lett* **86**(2005), 41901.
- 17) P. -F. Paradis, T. Ishikawa, and S. Yoda, *J. Appl. Phys*, **97** (2005), 106101.
- 18) T. Ishikawa, P. -F. Paradis, T. Itami, and S. Yoda, *Measurement Science and Technology*, **16** (2005), 443-451.
- 19) T. Masaki, T. Ishikawa, and S. Yoda, "Liquid Structure Analysis of High Temperature Molten Metals with the use of Electrostatic Levitator" (in Japanese), *in press, J. Jpn. Microgr. Appl.*
- 20) K. Kelton, G. W. Lee, A. K. Gangopadhyay, R. W. Hyers, T. J. Rathz, J. R. Rogers, M. B. Robinson, and D. S. Robinson, *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003), 195504.
- 21) T. Hibiya, S. Hokama, Y. Koike, M. Rinno, H. Kawamura, H. Fukuyama, K. Higuchi, and M. Watanabe, *Scripta Materialia* **54** (2006), 695.
- 22) J. Q. Feng and K. V. Beard, *Proc. R. Soc. London A* **430** (1990), 133.