

浮遊液滴非線形ダイナミクス研究チーム活動報告

筑波大 阿部 豊、金子暁子、長谷川浩司、前川知之、河上雅則、池田啓

JAXA 松本 聡

東大 西成 活裕、江口隆大

JAEA 渡辺 正

Report of The Research Working Group on Nonlinear Dynamics of Levitated Droplet

Yutaka Abe, Akiko Kaneko, Koji Hasegawa, Tomoyuki Maekawa, Masanori Kawakami and Hiromu Ikeda
University of Tsukuba, Tennouda, Ibaraki, 305-8573

E-Mail: abe@kz.tsukuba.ac.jp

Satoshi Matsumoto

Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505

E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Katsuhiko Nishinari and Koudai Eguchi

University of Tokyo,

E-Mail: tknishi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

Tadashi Watanabe

Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

E-Mail: watanabe@sugar.tokai.jaeri.go.jp

Abstract: It is expected to manufacture new materials with containerless processing under the micro-gravity environment in space. If the levitated droplet is large, the surface of the levitated droplet nonlinearly and dynamically deforms and vibrates in space. In the present working group, nonlinear dynamics of the levitated droplet, surface deformation, its internal flow and the external flow, are experimentally and analytically investigated. The levitation experiments with the ultrasonic levitation apparatus and electrostatic levitation apparatus are conducted under the normal gravity condition and micro-gravity condition with aircraft. Based on the experimental results, theoretical and numerical analyses are conducted to clarify the nonlinear dynamics of the surface deformation, vibration and oscillation, as well as the internal and external flow of the levitated droplet in space. In the present study, new technology to measure the viscosity in high viscosity region is proposed.

Key words; *Acoustic Standing Wave, Electrostatic Levitation, Internal Flow, Microgravity*

1. 緒言

非接触無容器状態で高温熔融物を浮遊保持することができれば、均質核生成を伴う過冷却凝固を用いた高品質材料の製造や超高温材料の物性測定など、新しい様々な研究開発が実現するものと期待されている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。宇宙の微小重力環境は物体を浮遊状態とするために最も適した環境であり、微小重力環境を利用した研究開発のなかでも、高温熔融液滴の浮遊に関する研究は、最もその特徴が生かされる工学応用の研究対象となっている。

しかしながら、Fig.1 に示すように、浮遊液滴が大型になった場合、回転や振動さらには界面変形やそれに伴う内部流れなどの要因によって、非線形でダイナミックな現象が誘起される可能性が想定される。浮遊状態にある大粒径液滴を取り扱う

ためには、①どのような非線形でダイナミックな現象が発生するかについての実験的知見を集積し、②その現象を記述するための非線形理論ならびに③非線形で非定常な変動界面を有する現象を予測評価するための多次元で非定常の数値解析手段を構築することが必要不可欠となっている。

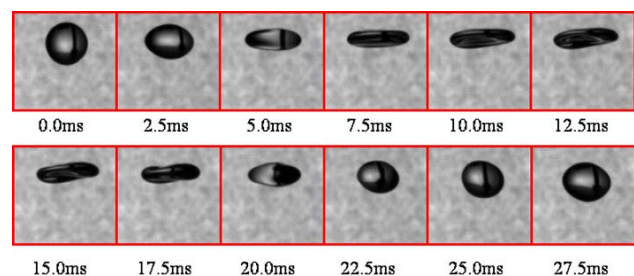


Fig.1 Surface deformation of a levitated droplet

しかしながら、これまで、国内外において各種の浮遊手段を用いた実験が地上ならびに微小重力環境を利用して行われてきているが^{(3)・(8)}、特に、空中に浮遊させた大粒径の浮遊液滴の回転や振動さらには界面変形やそれに伴う内部流れなどの非線形でダイナミックな現象についての科学的知見については、極めて限られた情報しか得られていないのが現状である。

現在、地上重力環境下において静電力を用いた無容器浮遊によって、従来の方法では測定が困難であった融点が 3000[K]を超えるような超高温熔融金属の熱物性測定が可能となっている^{(1)・(3)}。粘性係数については、浮遊試料に軸対称の微小振幅振動を印加し、その振動の減衰時間から、Rayleigh⁽⁴⁾ や Lamb⁽⁵⁾ により導出された関係式を用いて算出される。この液滴振動法と呼ばれる方法の適用範囲は、振動による変形の励起が容易な $10^{-1}[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ 以下の低粘性流体に限定されており、減衰時間そのものの測定が困難な高粘性流体ではこの方法は適用出来ない。一方、Ohsakaらは音波により浮遊させた高粘性流体液滴に回転を印加することで大変形を誘起させ、回転を停止させてからの形状緩和時間を用いて粘性係数の算出を行っている⁽⁶⁾。この方法は、約 $20[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ 以上の高粘性流体の浮遊液滴に対しては適用可能であるが、それ以下の粘性流体に対しては液滴形状緩和時間が短くなるため、正確な値の算出が困難である。

以上述べた既存の非接触粘性係数測定法により計測可能な範囲に関してまとめたものを Fig.2 に示す。特に金属酸化物や過冷却状態の材料などを含む 10^{-1} から $10^2[\text{Pa}\cdot\text{s}]$ までの広範囲の粘性領域に適用する粘性係数測定方法が未だ確立されていないことが分かる。

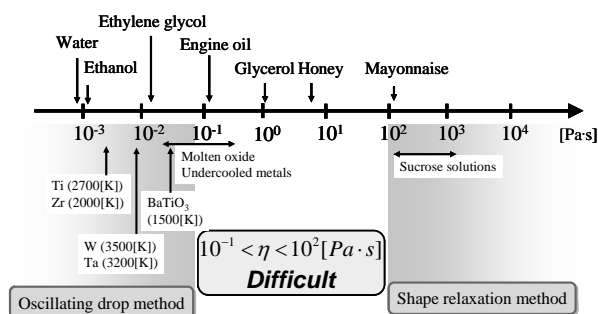


Fig.2 Non-contact measurement techniques for viscosity with electrostatic levitation apparatus

本ワーキングチームにおいては、浮遊状態にある大粒径液滴を取り扱うために、どのような非線形でダイナミックな現象が発生するかについての

実験的知見、その現象を記述する非線形理論、さらには非線形で非定常な変動界面を有する現象を予測評価するための多次非定常の数値解析手段などを構築することとしている。更に、得られた知見に基づいて、これまで精度的に不十分とされている浮遊法を用いた超高温浮遊液滴の粘性測定法について、新たな手法の提案を行うこととする。

そのために、まず静電浮遊システムを用いて空間に浮遊させた浮遊液滴の界面変形や振動や回転の挙動を実験的に調べるとともに(担当：松本・前川)、強力超音波を用いた音波浮遊システムを用いて空間中に浮遊させた大型浮遊液滴の界面変形と内部流動の可視観測を行う(担当：阿部・長谷川・河上・池田)。これらの実験と同時に、浮遊液滴の非線形を含む界面変形を取り扱うための理論構築を行うとともに(担当：西成・江口)、浮遊液滴界面の非線形でダイナミックな挙動や内部での流動を再現するための多次元で非定常の数値解析手法を用いた解析を行っている(担当：渡辺)。

2. 実験

2.1 静電浮遊実験

静電浮遊法により浮遊させた液滴に回転を印加させることによって液滴の変形を誘起させ、その際の回転数と液滴形状の関係について評価した結果を Fig.3 に示す。低回転数のときには球形であった液滴は、回転数を増加にしたがって、扁平となり、更に回転数を増加させることによって棒状から鉄アレイ形状となり、最終的に分裂に至る挙動が観測された。この時の分裂時における回転中心部の直径や長さが流体の粘性に依存することが明らかとなり、その原理に基づいて、Fig.2 に示す従来計測が出来なかった範囲での粘性係数が測定できる新しい方法を提案することができた。

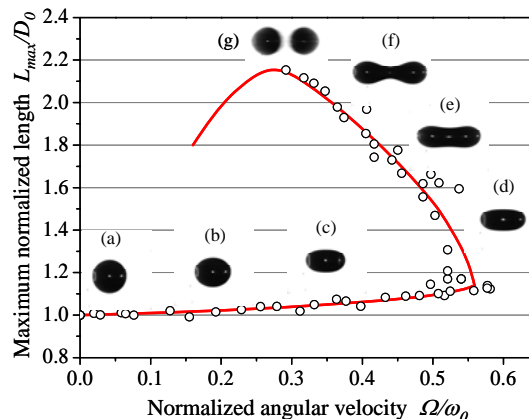


Fig.3 Relationship between rotation velocity and horizontal length of levitated droplet

2.2 超音波浮遊実験

超音波により浮遊装置では、物性に関わらず大型の液滴を浮遊させ、その内部流動を観測することができる。本研究では、観測された画像に対し、多次元 PIV 解析を施すことによって液滴内部の流動状況を評価し、粘性の異なる液滴の内部流動状況を把握することとした。

大型浮遊液滴の界面大変形に伴う液滴内部ならびに周囲流体の非線形でダイナミックな流動場を計測するために図 4 に示す様な 3 次元 P I V システムを構築し、図 5 に示すような結果を得ている。この結果を詳細に解析することにより、図 5 の中央図ならびに右図のような流れ場を計測している。この結果より、図 5 の左図に模式的に示すように、浮遊液滴界面を境とする液滴内側と外側の流速方向が逆方向になっていることが分かった。これは、振動流に対する Schlichting の理論に示される Stokes 層内での循環によってもたらされたものと推定される。浮遊液滴内外の流動挙動は、このような液滴表面での微細構造に起因する可能性があり、これを実験的に把握することが必要不可欠である。Stokes 層の厚さが 16μ 程度と極めて薄いものと評価されることから、浮遊液滴界面を通した内外部流動の相関について更に実験的に明らかにすることが必要である。

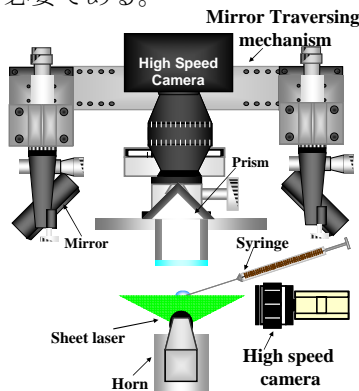


Fig.4 Three dimensional measurement system with ultrasonic levitation apparatus

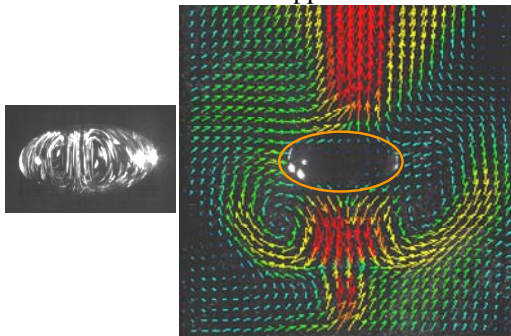


Fig.5 Visual observation results

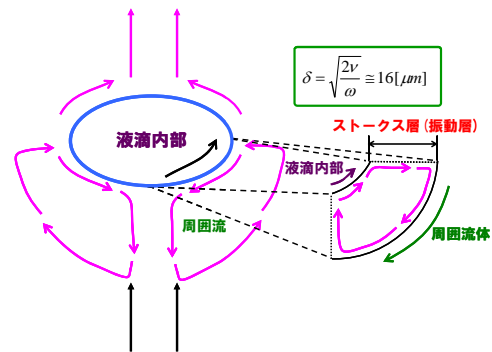


Fig.6 Schematic diagram of Stokes layer

3. 解析

3.1 理論解析

浮遊液滴に誘起される非線形でダイナミックな挙動を記述する理論的な解析手段は、未だ構築されていない。従来の摂動法の低次の近似ではこのような大変形を伴う非線形挙動を記述することができず、高次の近似ではその解を求めることが極めて困難になるためである。本研究では、一般的な曲面の大変形運動を厳密に記述することのできる微分幾何学的枠組みを、Fig.7 に示すように構築した。構築した方法による解析結果と実験結果の比較を Fig.8 に示す。

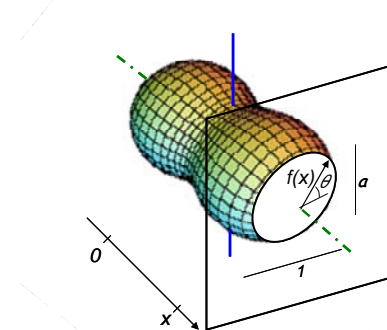


Fig.7 Theoretical model for non-linear oscillation

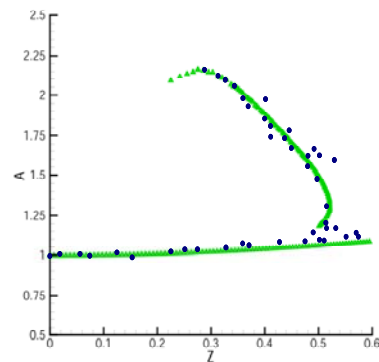


Fig.8 Oscillation frequency and amplitude

3.2 数値解析

浮遊液滴の多次元的な非定常運動を数値解析するために、レベルセット法による数値解析プログラムを作成した。基礎方程式は、連続の式および非圧縮ナビエーストークス方程式である。界面位置ならびに曲率を評価するためのレベルセット関数を定義し、レベルセット関数の輸送方程式を解くことで求めている。このシミュレーションコードを用いて、浮遊液滴の内部ならびに外部の流動を解析した結果を、渦度場として Fig.9 に示す。Fig.5 に示す PIV 計測結果と定性的に一致する結果となっており、浮遊液滴の非線形でダイナミックな挙動が再現できる可能性が示された。

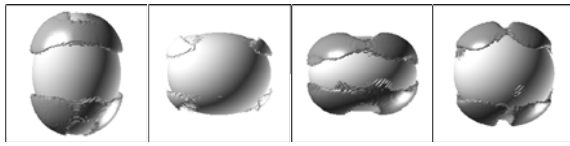


Fig.9 Numerical simulation result

5. 結言

- ・ 静電浮遊システムを用いて空間に浮遊させた浮遊液滴の非線形でダイナミックな界面変形や振動や回転の挙動に関する実験的な知見を得ることができた。
- ・ 得られた知見を用いて、これまで不可能であった 10^{-1} から 10^2 [Pa·s] までの広範囲の粘性領域に適用する粘性係数測定方法を新たに構築した。
- ・ 液滴内部の 3 次元流動を把握するための内部流動観測用実験装置を製作し、液滴の赤道面のステレオ画像の撮影結果から、浮遊液滴の赤道面近傍の 3 次元流動場の PIV 計測結果を得ることに成功した。
- ・ 浮遊液滴界面を境とする液滴内側と外側の流速方向が逆方向になっていることが分かった。これは、振動流に対する Schlichting の理論に示される Stokes 層内での循環によってもたらされたものと推定される。
- ・ これらの実験と同時に、浮遊液滴の非線形を含む界面変形を取り扱うための微分幾何学的枠組みを用いた界面変形に対する新しい非線形理論の構築を行って、浮遊液滴の回転時の変形挙動を再現することができた。
- ・ 浮遊液滴界面の非線形でダイナミックな挙動や内部での流動を再現するための多次元で非定常の数値解析手法を用いた解析を行って、浮遊液滴内外の流動場の予測が可能であるこ

とを示した。

- ・ 今後、静電浮遊システムならびに超音波浮遊システムを用いた液滴浮遊実験を実施するとともに新しい非線形理論の構築と数値解析の実施をさらに実施することによって、浮遊液滴の非線形ダイナミクスを解明し、将来の宇宙環境下での浮遊実験に資する科学的知見を得てゆくこととする。

参考文献

- 1) Rhim, W.-K., Ohsaka, K., and Paradis, P.-F., Noncontact Technique for Measuring Surface Tension and Viscosity of Molten Materials using High Temperature Electrostatic Levitation, Rev. Sci. Instrum., Vol. 70(6), 2796-2801 (1999).
- 2) Ishikawa, T., Paradis, P.F., and Yoda, S., Noncontact Surface Tension and Viscosity Measurement of Rhenium in the Liquid and Undercooled states”, Appl. Phys. Lett., Vol. 85(24), 5866-5868 (2004).
- 3) Ishikawa, T., Janding, Y., and Paradis, P.F., Noncontact surface tension and Viscosity measurement of molten oxides with a pressurized hybrid electrostatic-aerodynamic levitator, Rev. Sci. Instrum., Vol. 77, 053901 (2006).
- 4) Rayleigh, L., On the capillary phenomena of jets, Proc. R. Soc. London., A29, 71-97 (1879).
- 5) Lamb, H., Hydrodynamics, 6th edn. Dover., (1945).
- 6) Ohsaka, K., Rednikov, A., Sadhal, S.S., and Trinh, E.H., Noncontact technique for determining viscosity from the shape relaxation ultrasonically levitated and initially elongated drops, Rev. Sci. Instrum., Vol. 73(5), 2796-2801 (2002).
- 7) Onodera, H., The oscillation behavior of levitated drop, Master Thesis, Tokyo institute of Technology (2004).
- 8) Abe, Y., Awazu, S., Matsumoto, S., Watanabe, T., and Nishinari, K., Study on Nonlinear Behavior of Levitating Liquid Drop, Progress Multiphase Flow Research, Vol. 2, 63-70 (2007).