

## 浮遊液滴非線形ダイナミクスワーキンググループ活動報告

筑波大 阿部 豊、日向 大輔、粟津 茂

JAXA 松本 聡

東大 西成 活裕、榎 勇作

原研 渡辺 正

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

*Yutaka Abe, Daisuke Hyuga and Shigeru Awazu*  
University of Tsukuba, Tennouda, Ibaraki, 305-8573  
E-Mail: [abe@kz.tsukuba.ac.jp](mailto: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](mailto:matsumoto.satoshi@jaxa.jp)

*Katsuhiko Nishinari and Yusaku Enoki*  
University of Tokyo,  
E-Mail: [tknishi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp](mailto:tknishi@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp)

*Tadashi Watanabe*  
Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195  
E-Mail: [watanabe@sugar.tokai.jaeri.go.jp](mailto:watanabe@sugar.tokai.jaeri.go.jp)

**Abstract:** It is expected to manufacture new materials with containerless processing under the micro-gravity environment in space. In order to achieve the containerless processing, it is necessary to levitate a large droplet. 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 and its internal 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 flow of the levitated droplet in space.

**Key words;** *Acoustic Standing Wave, Sound Pressure, 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<sup>(1)-(2)</sup>。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。

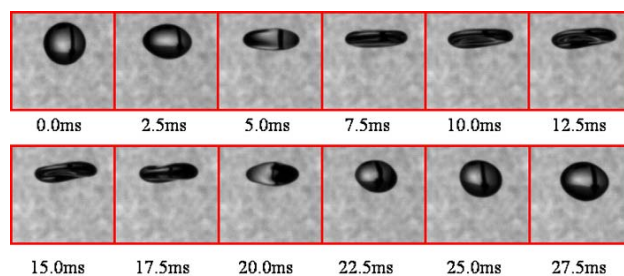


Fig.1 Surface deformation of a levitated droplet

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<sup>(3)・(8)</sup>、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。

本ワーキンググループにおいては、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・栗津)、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通常重力ならびに航空機を用いた微小重力環境を用いて行っている(担当：阿部・日向)。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・榎)、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

静電浮遊実験装置の概要図を Fig.3 に示す。装置中央にはアクリル製チャンバーを設置し、その中央部に、静電気力によって液滴を浮遊させるための上下一対の平行電極を設けている。下部電極に設けた直径 0.5mm のノズルより液滴径 1.5~2.0 [mm]の液滴を注入し、最大 7.8kV の電圧を印加することによって、液滴を浮遊させる。浮遊液滴には、常温・大気圧下で無色の透明液体であるプロピレンカーボネート (表面張力：42.5 [mN/m]) を用いている。浮遊液滴の位置制御のため、浮遊液滴に He-Ne レーザーを照射し、その影をポテンシオディテクターに投影し、液滴の垂直方向位置データを電圧信号として PC に取り込む。この位置データを基に PID 制御の演算を行って得られるフィードバック信号によって上電極の電圧を変化させることで浮遊液滴の位置を制御している。浮遊させた液滴界面に振動を励起させるために、関数発信器により正弦波の電圧信号を下電極に印加している。液滴の振動挙動は高速度ビデオカメラ (Photoron 社製 FASTCAM-ultimaSE) を用いて観察し、界面振動時の液滴径変形量の測定には、デジタル寸法計(キーエンス社製 LS-7500)を用いた。

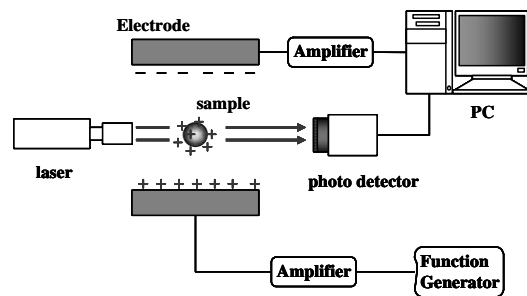


Fig.3: Electrostatic levitation apparatus

### 2.2 超音波浮遊実験

Fig.4 に超音波浮遊実験装置の概要図を示す。関数発信器から発振した正弦信号をアンプを介して増幅した後、超音波振動子へ入力する。発生した超音波は、超音波振動子に接続されたホーンにより振幅を増幅し空間中に伝送される。下側ホーンから発生させた超音波は、上側ホーンからの反射波と重畳によって、上下ホーン間に音響定在波を形成する。この定在波中に注入された液滴は、音響放射圧により定在波中の特定の位置に保持される。液滴径ならびに液滴の内部流動は、高速ビデオカメラを用いた画像処理より行うこととした。浮遊液滴の内部流動を観測するために、液滴に直径 4 $\mu$ m、比重 1.02 のナイロン粒子をトレーサーとして混入し、赤道付近にシートレーザーを当て、その水平断面を上方からハイスピードカメラ (Photoron 社製 FASTCAM-MAX) を用いて観測した。

超音波を用いた液滴浮遊実験では、地上での通常重力実験とともに、宇宙フォーラムの公募地上研究の支援を受けてダイヤモンドエアサービス社の所有する実験用航空機 Gulfstream-II を使用した微小重力実験を併せて行っている。本実験装置では、大型液滴を極めて安定に保持できるため、実施した全ての航空機実験において浮遊を成功させることができた。

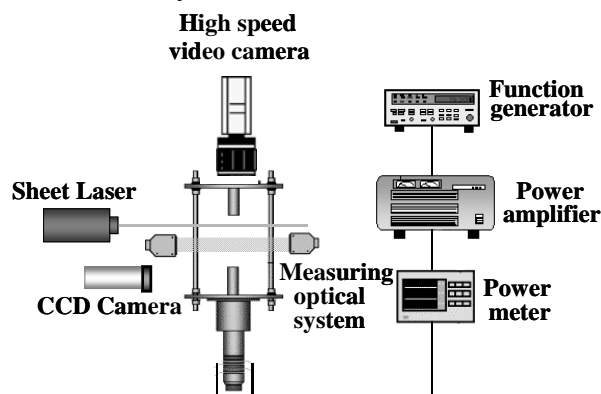


Fig.4: Ultrasonic levitation apparatus

### 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。従来の摂動法では、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はできず、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、浮遊液滴の非線形ダイナミクスを記述するために、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構築することを始めている。その際、非線形であるにもかかわらず厳密解が計算できるソリトン理論を援用することにより、界面の非線形ダイナミクスを解析する新たな枠組みの構築を目指している。

#### 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。差分スキームにはスタガードメッシュを用い、対流項は二次の風上差分、他の項は中心差分によって評価した。時間方向には二次の Adams-Bashforth 法を用い、圧力と流速は SMAC 法により求めている。

### 4. 実験結果と解析結果

#### 4.1 変形挙動

浮遊液滴の界面の振動に対しては、Fig.5 に示すような線形理論による解析結果が得られる<sup>(3)</sup>。各振動モードにおける固有振動数は表面張力などの物性値と一意に関係付けられており、振動モードならびに振動の固有振動数を実験的に計測することができれば、線形理論が適用できる範囲において、計測値より表面張力などの物性値を評価することができる。

$n \backslash m$	0	1	2	3	4
2					
3					
4					

Fig.5: Theoretical oscillation mode

静電浮遊システムにおいて、浮遊液滴に振動を印加して得た固有振動数の変化についての計測結果を振動振幅に対して示したものが、Fig.6 である。振動振幅の増大に従って、固有振動数が低下している。この振動液滴の振幅に対する共振周波数の変化は、Tsamopoulos&Brown<sup>(4)</sup>による非粘性・非圧縮性流体の液滴に対する非線形項を含む 2 次モードの軸対称振動の方程式から摂動法を用いることで導出された関係式と一致しており、非線形性の強い現象であることが分かる。

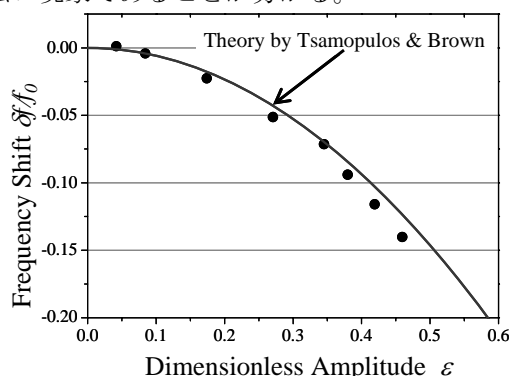


Fig.6 Frequency shift and amplitude

#### 4.2 回転による変形

Fig.7 は、液滴に回転を印加した場合の液滴形状の変化を、高速度カメラで液滴を横から撮影したものである。回転数の増加にしたがって、液滴が扁平になり、最終的に軸対称形状が保持されなくなる様子が確認された。Fig.7(f)-(k) は非軸対称形状の画像であり、棒形状からアレイ形状に変化していく様子が観察された。Fig.7(l) は、分裂直後の画像である。

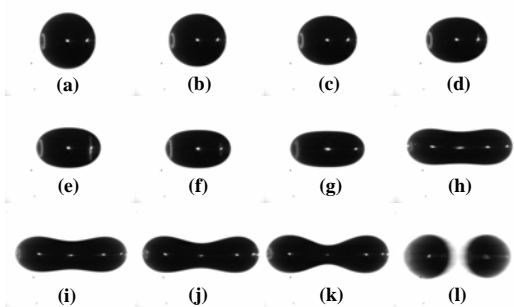


Fig.7 Observation of deformation of rotating droplet

浮遊液滴を回転させた場合、界面の振動ならびに固有振動数は、回転数に依存して変化することが考えられる。Fig.8 は、静電浮遊システムによって計測された浮遊液滴の固有周波数と回転数との関係を示している。横軸は回転数を回転無印加時の固有振動数で割って無次元化した無次元回転数、

縦軸は変形した液滴の水平方向半径を初期液滴半径で割って無次元化した液滴長さである。液滴が回転により軸対称形状を破綻することが示されており、軸対称形状を保持できる無次元回転数の臨界値が0.58程度であることが確認された。図中には、R.A.BrownとL.E.Scriven<sup>(3)</sup>の理論解析結果も示している。

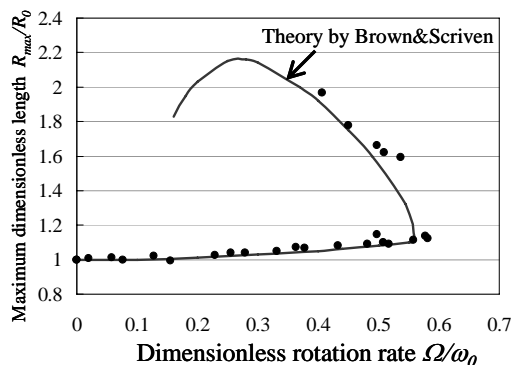


Fig.8 Dimensionless Rotation rate and length

#### 4.3 界面変形と内部流動

実験用航空機を使用した微小重力環境下での超音波浮遊実験結果の一例を Fig.9 に示す。地上実験に比較して、より小さい音圧によってより大型で真球に近い液滴が浮遊できることが分かった。

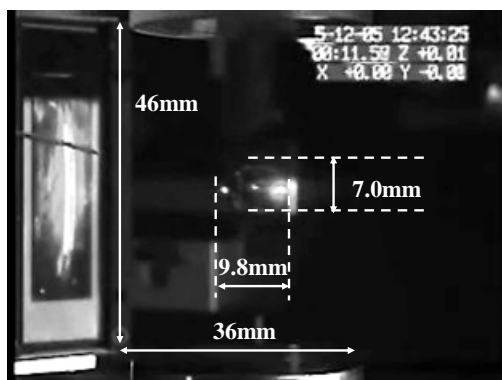
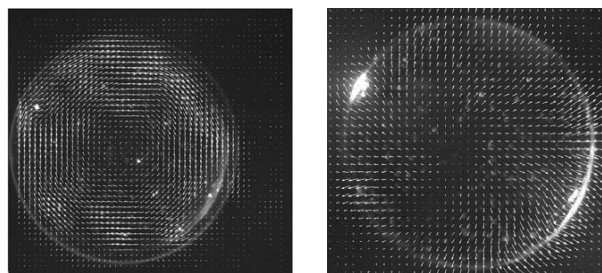


Fig.9 Droplet levitation under microgravity

Fig.10 には、微小重力環境下で浮遊させた大型浮遊液滴の内部流動を PIV 解析して得られた 2 次元速度ベクトルを示している。この結果から、Fig.7(a)は、液滴界面に変形が観測されなかった場合であり、Fig.7(b)は液滴界面に 2 次の変形モードが観測された場合である。界面に 2 次の変形モードがあった場合、液滴内部から界面に向かう流れとともに、非対称で複雑な流動が観測された。



(a)2.6kPa, 8.4mm×5.2mm, (b)3.4kPa, 6.1mm×3.1mm

Fig.10 Velocity vector in levitated droplet

#### 5. 結言

- ・ 静電ならびに超音波を用いた液滴浮遊実験ならびに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を構築するとともに、多次元非定常挙動を解析するための数値解析コードを作成し解析を行っている。
- ・ 静電浮遊実験によって、変形量や回転速度の増大によって、液滴振動の固有振動数が非線形に変化することを確認した。
- ・ 微小重力環境下での音場浮遊実験によって、大型浮遊液滴の内部に複雑な渦を有する内部流れの発生する場合のあることを確認した。
- ・ 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通して、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) W. K. Rhim, K. Ohasaka, and P. F. Paradis, Rev. Sci. Instrum., 70,2796 (1999)
- 2) T. Ishikawa, P. F. Paradis, S. Yoda, Appl. Phys. Lett., 85,5866 (2004)
- 3) H. Lamb, Hydrodynamics, Cambridge University Press, (1932).
- 4) J. A. Tsamopoulos, R. A. Brown, J. Fluid Mech., 127,519 (1983)
- 5) T. G. Wang, A. V. Anilkumar, C. P. Lee, J. Fluid Mech., 308,1 (1996)
- 6) H. Azuma and S. Yoshihara, J. Fluid Mech. 393, pp.309-332 (1999).
- 7) F. H. Busse, J. Fluid Mech. 142, pp.1-8 (1984).
- 8) C. P. Lee, M. J. Lyell and T. G. Wang, Phys. Fluids 28(11), pp.3187-3188 (1985).
- 9) Brown, R.A., Scriven, L.E., Proc.R.Soc.London, A371, 331-357 (1980).