

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

Satoshi Matsumoto
Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505
E-Mail: matsumoto.satoshi@jaxa.jp

Katsuhiko Nishinari and Yusaku Enoki
University of Tokyo,
E-Mail: 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

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 establish the levitation technology of molten metal in space under the micro-gravity environment. However, 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

宇宙の微小重力環境では、非接触無容器状態で高温物質を浮遊保持できるため、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高精度物性測定^{(1),(2)}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。しかしながら、液滴が大型になった場合、Fig.1に例示するように、浮遊液滴の界面には非線形な大変形を伴う非定常でダイナミックな変動や振動挙動が発生する可能性がある。また、浮遊液滴が回転した場合、回転に伴って液滴界面に非線形でダイナミックな変形が発生する可能性もある。更には、浮遊液滴界面の非線形でダイナミックな大変形が液滴内部の流動に影響を与える可能性も考えられる。

浮遊状態を利用した無容器過冷却凝固の実現や高精度物性測定のためには、これらの非線形でダイナミックな挙動を科学的に把握し、技術的に制御可能とすることが必要不可欠である。

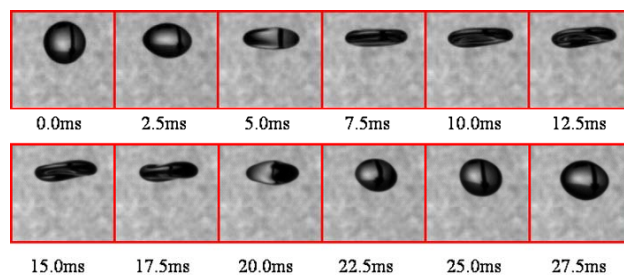


Fig.1 Surface deformation of a levitated droplet

これまで、液滴の変形に関する数多くの研究がなされてきているが⁽³⁾⁻⁽⁸⁾、実際に浮遊状態となっている液滴の変形や振動や回転さらには内部流動の状態を実験的に把握しつつ理論的な検討や数値解析を行って総合的な評価検討を行った研究はこれまででなされてきていなかった。

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行っている(担当：阿部・日向)。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非定常の数値解析を行っている(担当：渡辺)。

本ワーキンググループでは、これらの実験ならびに理論解析と数値解析からの結果を総合することによって、大型浮遊液滴の非線形ダイナミクスに関する流体力学的な知見を明らかにし、液滴浮遊技術を用いた高精度物性測定や宇宙環境を利用した新材料創生のために必要となる科学的知見を明らかにすることとしている。

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.1 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、その液滴を浮遊させる。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]) を用いた。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、その影をポテンショ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する。

浮遊させた液滴界面に振動を励起させるため、関数発信器により正弦波の電圧信号を下電極に印加する。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。

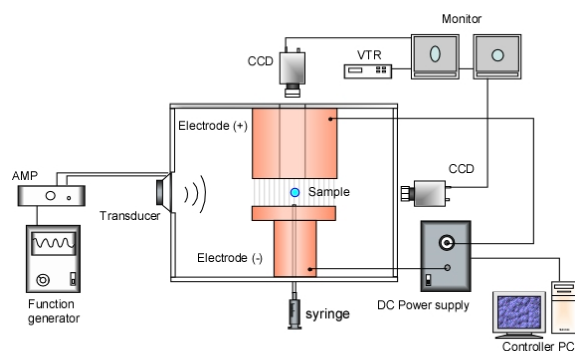


Fig.2: Electrostatic levitation apparatus

2.2 超音波浮遊実験

Fig.3 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。実験では、あらかじめ直径約 1mm のプローブマイクロフォン(Bruel&Kjar 4182)を用いて音圧分布を計測し、定在波が形成されているのを確認する。音圧分布は、トラバース装置を用いて、ホーン中心軸上から水平方向に 2mm ずつ、鉛直方向に 1mm ずつのメッシュに区切って計測する。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。

Fig.6 に内部流動観測の概念図を示す。直径 $4\mu\text{m}$ 、比重 1.02 のナイロン粒子をトレーサーとして混入した液滴の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、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も行っている。放物形の軌道を飛行することにより航空機が放物形の頂点付近に位置するときに機内に微小重力が発生する。その際の約 20 秒間の微小重力環境を利用し、水液滴の保持実験を行い、その結果を地上実験の結果と比較する。実験では音響定在波を形成した後、微小重力の間水液滴をシリンジで注入し、保持された液

滴の挙動を CCD カメラで撮影し、その液滴径は CCD カメラの画像のより算出することとした。また浮遊液滴の内部流動は通常重力実験と同様に液滴の赤道付近にシートレーザーをあて、その水平断面を上方より観測することとした。

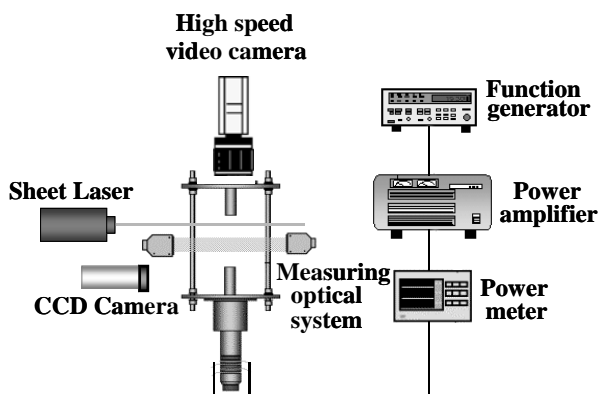


Fig.3: Ultrasonic levitation apparatus

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ックス方程式である。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.4 に示すような線形理論による解析結果が得られている⁽³⁾。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、その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 \ m	0	1	2	3	4
2					
3					
4					

Fig.4: 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計測結果を、Fig.5 に示す。振動振幅の増大に従って、固有振動数が低下する結果となっている。振動液滴の振幅に対する共振周波数の変化は、Tsamopoulos&Brown⁽⁴⁾によって導出されており、非粘性・非圧縮性流体の2次の振動モードの場合は、次式で与えられる⁽⁵⁾。

$$\delta f / f_0 = -\frac{1}{2} C \varepsilon^2 \quad (1)$$

ここで、 ε は無次元振幅 (a/R)、 a は振幅、 R は液滴半径、 f_0 は共振周波数、 δf は無印加時の共振周波数からのシフト量、 C は定数であり 1.17037 とされている。Fig.5 には、(1)式と Azuma&Yoshioka⁽⁶⁾の式による結果も示している。実験値と理論式はほぼ一致する結果となった。この結果は、固有振動数の計測結果から表面張力測定を行う上では、振動振幅の増大による周波数シフトを考慮に入れる必要があることを示唆するものである。

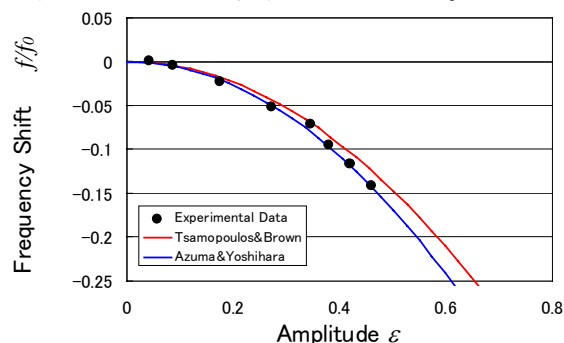


Fig.5 Frequency shift and amplitude

4.2 回転による変形

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.6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。図中には、西成による理論解析結果、Busse⁽⁷⁾の式ならびに渡辺による数値解析結果をあわせて示している。

新たに求められた西成の式は低めの評価となっているものの、いずれの結果も、定性的には、振幅の場合とは逆に、回転の増加によって固有振動数が増加する結果を示している。この結果は、固有振動数の計測結果から表面張力測定を行う上では、振動振幅の増大だけでなく回転による周波数シフトも考慮に入れる必要があることを示唆するものである。

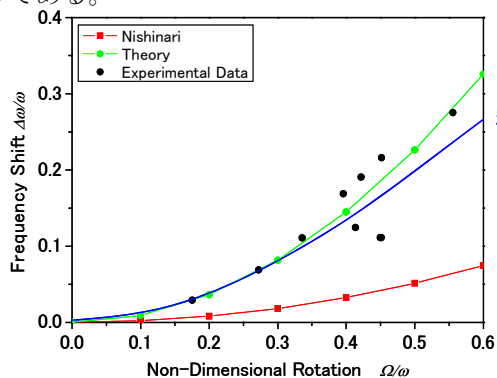
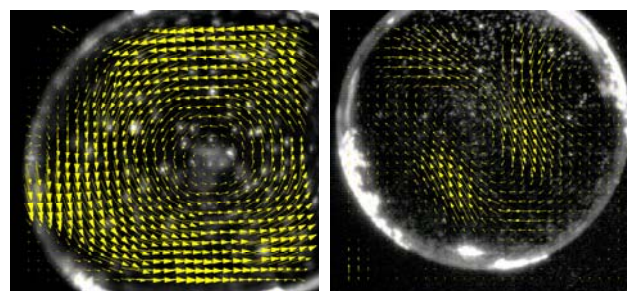


Fig.6 Frequency shift and rotation

4.3 界面変形と内部流動

超音波浮遊システムを用いて、地上の実験室で浮遊液滴の水平断面内部流動を上から観測した結果を Fig.7 に示す。Fig.7(a)は、液滴は幅 10.0mm 高さ 3.6mm と扁平な円盤形状に近い浮遊液滴の内部流動であり、Fig.7(b)は幅 4.0mm 高さ 2.9mm と球形に近い浮遊液滴の水平断面内の流動観測結果である。Fig.7 には、内部流動を PIV 解析して得られた 2 次元速度ベクトルも記載している。この結果から、Fig.7(a)のような扁平形状の場合には平板回転に近く、Fig.7(b)のように球形に近い液滴内部においては渦を持った複雑な流れがあることが分り、条件によっては、浮遊液滴内部に渦を持つ複雑な内部流動が生じる可能性が示唆された。

超音波浮遊システムを用いて、航空機による微小重力実験を行っている。微小重力実験では、通常重力実験では浮遊させることが出来なかった 10mm 程度的大型液滴の浮遊が可能であり、また、より小さな入力電力でより球形に近い水液滴を浮遊出来る事を確認した。



(a) D=10mm, W=3.6mm (b) D=4.0mm, W=2.9mm

Fig.7 Velocity vector in levitated droplet

5. 結言

- 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中である。
- 微分幾何学的枠組みを用いた浮遊液滴の界面変形に対する全く新しい非線形理論を構築しつつある。
- 浮遊液滴の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。
- 変形量の増大や回転が、液滴振動の固有振動数に影響を与えることを確認した。
- 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通常重力環境と微小重力環境の両方において確認した。
- 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).