

音響定在波中の浮遊液滴に働く物体保持力に関する研究*

阿部 豊^{*1}, 青木 一義^{*2}Study on Holding Force to a Droplet Levitated
by the Acoustic Standing WaveYutaka ABE^{*3} and Kazuyoshi AOKI^{*3} Institute of Engineering Mechanics and System, University of Tsukuba,
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8573 Japan

It is expected to manufacture new materials under the micro-gravity environment in space. Under the micro-gravity environment, holding technology of molten metal is important to manufacture new materials. There are previous studies about droplet levitation by the acoustic wave for the holding technology. However it is still unknown experimentally and analytically how the acoustic wave act on the levitated droplet. In the present study, the technology to handle the material in space by the ultrasonic wave is developed and the simulation technique to evaluate the acoustic wave field and the movement of the droplet in the acoustic field. Therefore the followings are the purposes of present study. At first, the characteristics of droplets holding by the ultrasonic standing wave under normal gravity environment and micro-gravity environment is investigated. Secondary, numerical simulation is conducted to clarify the characteristics of ultrasonic standing wave. Finally, the force committed to a droplet is investigated by reproducing a movement of the droplet.

Key Words: Flow Control, Ultrasonic Wave, Levitation, Containerless Processing

1. 緒論

現在および近い将来、スペースシャトルや宇宙ステーションによって微小重力環境の利用が可能となるのに伴って、微小重力環境を利用した新材料の製造が行われようとしている。微小重力環境においては、流体内の温度差や異種材料間の密度差に起因する浮力が働かないため、対流が起らず、沈殿による分離も発生しない。このような特性を利用して、地上の通常重力環境下では得られない大型単結晶や均質な合金が製造できると考えられている¹⁾。しかしながらスペースシャトルや宇宙ステーションの内部では $10^{-4} \sim 10^{-6}g$ 程度の残留加速度が定常的に存在しているため、物質を限られた空間内に留めておくには何らかの保持力が必要となってくる。本研究では微小重力環境下における液滴挙動の制御手段として超音波の利用を考え、その基礎技術を確認することを目的とする。

液滴の保持については過去に研究が行われている^{2)~4)}が、音場中の浮遊液滴を安定に保持するために必要な保

持力についての詳細な検討は行われていない。そこで、数値シミュレーションを行うとともに、通常重力環境ならびに微小重力環境で行った実験結果との比較検討することによって、音響定在波中の液滴に働く力の詳細を明らかにすることを目的とした。

2. おもな記号

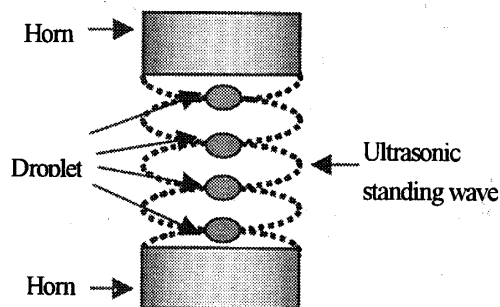
 U : x 方向の速度成分 V : y 方向の速度成分 F : 計算セル内の液体の体積割合 P : 圧力 g_x : x 方向の加速度成分 g_y : y 方向の加速度成分

Fig.1 Concept of droplet levitation by standing wave

* 原稿受付 2004年3月24日。

^{*1} 正員, 筑波大学機能工学系(☎ 305-8573 つくば市天王台1-1-1)。^{*2} 学生員, 筑波大学大学院理工学研究科。

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

- c : 音速
 k : 波数
 ΔP : 圧力変動の振幅
 m_d : 液滴の質量
 u_d : 液滴の並進速度
 V_d : 液滴の体積
 u_r : 液滴と周辺流体との相対速度
 u_g : 液滴の周辺流体の速度
 Re : レイノルズ数
 R_d : 液滴の半径
 ギリシャ文字
 ρ : 密度
 ν : 動粘性係数
 ω : 角振動数
 μ_g : 液滴の周囲流体の粘性係数
 μ_d : 液滴の粘性係数
 κ : 液滴と周囲流体の粘性係数比

3. 実験

3.1 超音波による物体保持の概念 図1に液滴保持の原理を示す。まず、向かい合った上下ホーンから放出された超音波、もしくはどちらか一方のホーンより放出された超音波ともう一方のホーン先端における反射波によって、音響定在波を形成させる。この音響定在波により空間中に圧力分布が生じ、その圧力分布による力によって、空間中に注入された液滴は、音響定在波中に保持できることが期待される⁶⁾。

3.2 実験装置 図2に本研究で用いた実験装置を示す。コンピュータから正弦波信号を発振し、D/A変換器を用いて電圧変動へ変換し、アンプを介して増幅した後、電力計を介して上下それぞれの超音波振動子へと入力する。これにより超音波振動子を駆動し、振動子に接続されたホーンを介してテスト部の空間内に超音波を放射することによって音響定在波を形成する。ホーン先端の直径は36mm、発振周波数19.2kHzの超音波振動子を用いている。この上下の両ホーン間に形成される音響定在波中に水の液滴をシリンジによって注入することとした。保持された液滴の挙動はデジタルビデオカメラを用いて観測することとした。

4. 実験結果

液滴浮遊実験は図2の実験装置を用いて通常重力環境下ならびに微小重力環境下において行った。微小重

力実験は、カナダ航空宇宙局が所有する航空機FALCON20を使用した。微小重力は航空機が放物形の軌道を飛行することにより、航空機が放物系の頂点付近に位置する時に、機内に微小重力状態が発生する。この微小重力環境において、液滴保持実験を行うとともに、通常飛行中の航空機内の通常重力環境において実験を行い、両結果を比較することによって、液滴挙動に及ぼす重力の影響を調べることにした。

図3に通常重力環境下で保持し続けられている液滴の画像を示す。また、図4に微小重力環境下において保持し続けることができた水滴を示す。これらの実験におけるホーン間距離は、図3の通常重力実験においては39mm、図4の微小重力実験においては49mmである。図4は今回の微小重力実験で、保持できた液滴の中で最大の径を持つ液滴を保持している画像である。図3に示す地上実験での最大液滴と比較して、より扁平の度合いが小さく球に近い形状となっていることがわかる。

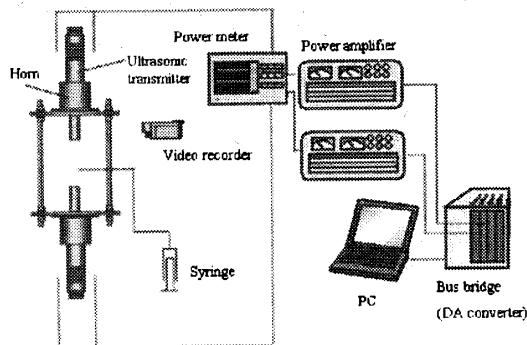


Fig.2 Experimental setup

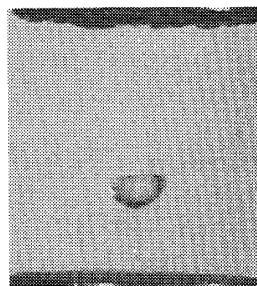


Fig.3 Pictures of levitating droplet in normal gravity

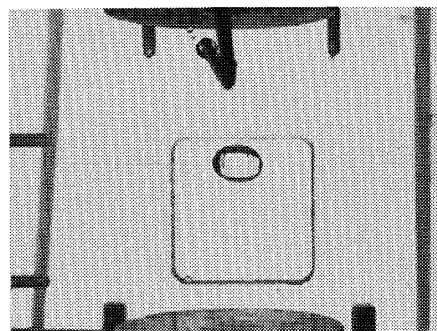


Fig.4 Pictures of levitating droplet in micro-gravity

図5に微小重力環境下で保持し続けることができた液滴径と入力電力との関係を示す。この図には比較のため、航空機内に装置を設置した状態で行った通常重力実験の結果を併せて示してある。この結果から、微小重力環境下においては、液滴の保持に必要な入力電力が10W程度小さくなるものの、保持に成功した液滴の径は、これまで行った地上実験の結果との明確な差は見られなかった。入力電力が12W程度より小さい値となると、保持可能な液滴径が急激に小さくなり、入力電力が35W程度より大きい領域においても保持可能な液滴径が小さくなる傾向が示された。この結果より、微小重力環境においても液滴保持に適した入力電力が存在することが示された。この結果は以前行われた地上実験の結果⁶⁾と同様の傾向である。

次に入力電力と液滴の扁平率との関係を図6に示す。図中に示した通常重力実験との明確な差は見られなかったが、これは図6に示した航空機内で行った通常重力実験において保持に成功した液滴の直径が小さかったことが原因と考えられる。この結果を以前行われた通常重力実験の結果と比較すると、扁平率が最大でも2.5程度と小さい値となっていることがわかる。これは微小重力になったことによって、液滴の自重によって変形する効果が無くなったためと考えられる。

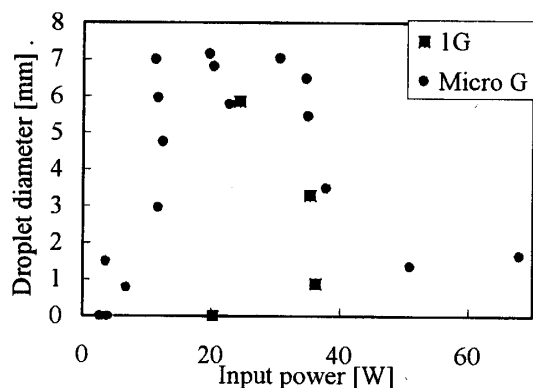


Fig.5 Input power and droplet diameter

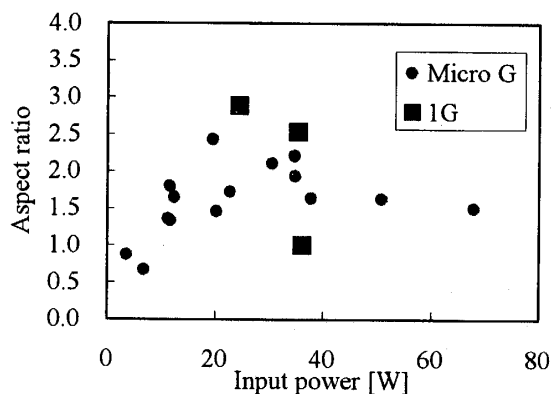


Fig.6 Input power and aspect ratio

5. 数値シミュレーション

5.1 音場解析シミュレーション概要 音響定在波中の液滴に対して働く力を直接測定することは困難である。そこで、音響定在波による圧力分布、速度分布を数値シミュレーションを行うことによって算出することとした。上下のホーンに挟まれたテスト部を図7に示す直交座標系を用いた計算領域で模擬し、計算の基礎式としては式(1),(2)に示すナビエ・ストークス方程式と、式(3)に示す断熱局所熱平衡を仮定した連続の式を用いている。⁹⁾

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + g_x + \nu \left[\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \left(\frac{1}{x} \frac{\partial U}{\partial x} - \frac{U}{x^2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + g_y + \nu \left[\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial V}{\partial x} \right] \quad (2)$$

$$\frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{U}{x} = 0 \quad (3)$$

計算アルゴリズムについては SOLA 法⁹⁾を用い、境界条件としては、計算領域左右両端を流出入条件、ホーン先端に接する流体に、式(4),(5)で示す超音波に対応した19.2kHzの周波数で変動する速度をそれぞれ与えて、ホーン先端から放出される超音波を模擬することとした。

$$V = \frac{k \Delta P}{\omega \rho} \cos(\omega t) \quad (4)$$

$$V = -\frac{k \Delta P}{\omega \rho} \cos(\omega t) \quad (5)$$

ここで $k, \Delta P, \omega$ は圧力振動の波数、振幅、角速度である。

また、テスト部周りの境界条件の影響を調べるために、図8に示すガラス管に覆われたテスト部を模擬した計算領域を用いたシミュレーションも行った。この時の計算領域左右両端の境界条件はすべりなし壁とした。

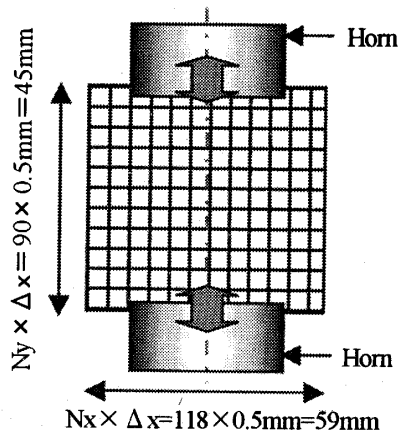


Fig.7 Calculation model without glass tube

5. 2 音場解析シミュレーション結果 図 9 に、計算領域左右両端を流出入条件としたシミュレーションによって得られた圧力振幅の空間分布を示す。図 9 から圧力変動の空間的な分布が鉛直方向だけではなく、水平方向にも生じていることがわかる。この二次元的な圧力分布によって、テスト部内に注入された物体に対して鉛直方向だけではなく、水平方向にも保持力が働く可能性が示唆された。

図 10 に、計算領域左右両端をすべりなし壁としたシミュレーションによって得られた圧力振幅の空間分布を示す。図 10 から左右両端を閉じた空間とした場合、水平方向に圧力変動の勾配がほとんど生じていない。鉛直方向一次元の分布となっていることがわかる。

また、図 9 と液滴保持実験より得られた保持に成功した液滴の直径とその時の保持位置との関係を示した図 11 との比較より、液滴が保持されるのは、圧力振幅の大きい定在波の腹から圧力振幅が小さい定在波の節へ向かう特定の位置となることが示唆された。

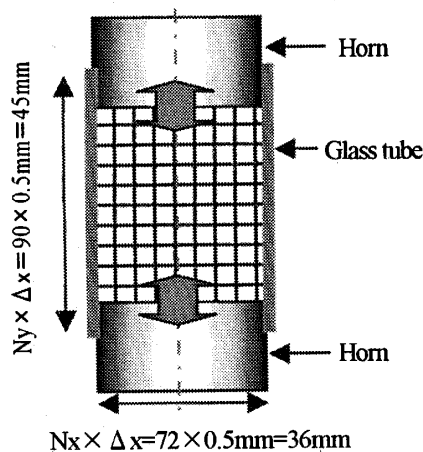


Fig. 8 Calculation model with glass tube

5. 3 液滴挙動シミュレーション概要 先に述べたように、音響定在波中の物体に働く力の詳細は解明されていない。とりわけ、音響定在波中に保持された物体がホーン中心軸上に集まる原因となる水平方向の保持力が生じる原因については、解明されていない点が多い。そこで、その水平方向の並進運動を数値解析によって予測することによって、音響定在波中の液滴に対して働く力を詳細に調べることにした。

解析にあたっては、液滴に作用する力として、圧力の空間変化による力、液滴の運動によって生じる仮想質量効果による抗力、摩擦による抗力を、仮定した並進運動の方程式を 5.2 で算出した圧力分布、速度分布を用いてルンゲ・クッタ法より解き、音響定在波中の水平方向に関する物体の挙動を模擬した数値解析を行うこととした。

以上より、音響場における水平方向での液滴の並進運動は、次式で表される。

$$m_d \frac{du_d}{dt} = -V_d \frac{dP}{dx} - \frac{1}{2} \rho V_d \frac{du_r}{dt} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho u_r^2 C_d \quad (6)$$

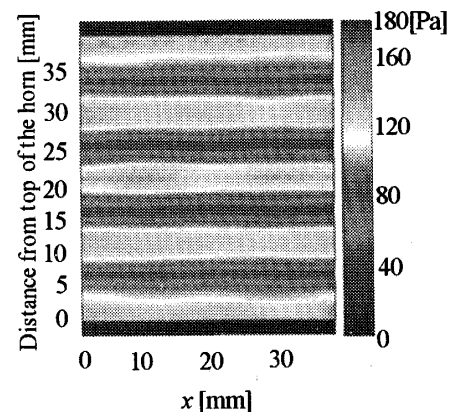


Fig. 10 Pressure amplitude distribution with glass

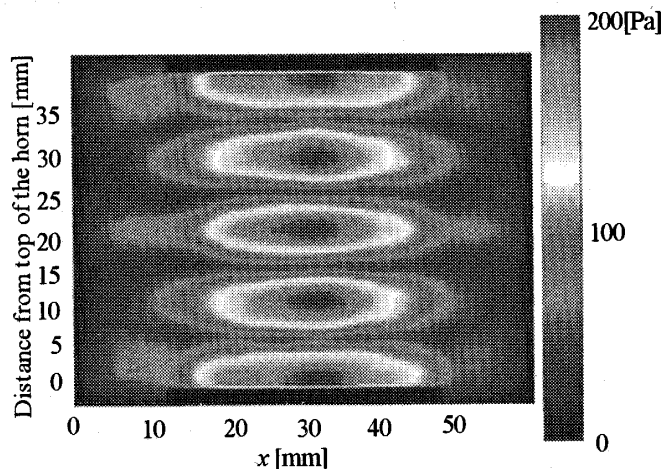


Fig. 9 Pressure amplitude distribution without glass tube

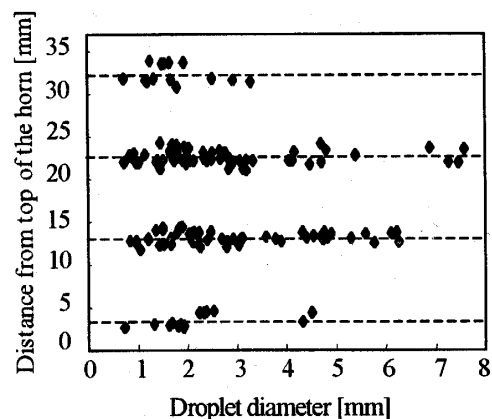


Fig. 11 Droplet diameter and holding position

ここで右辺第一項は圧力の空間変化による力,第二項は液滴の運動によって生じる仮想質量効果による抗力,第三項は液滴に働く摩擦力をそれぞれ示し, m_d , u_d , V_d はそれぞれ液滴全体の質量, 並進速度, 体積, u_r は液滴と周辺流体との相対速度, C_d は摩擦係数である。

また並進速度は,

$$\frac{dx}{dt} = u_d \quad (7)$$

相対速度は,

$$u_r = u_d - u_g \quad (8)$$

で定義し, 周辺流体の速度 u_d には 5.2 の結果を用いることとした。

μ_g と μ_l を空気と水の粘性係数とし, レイノルズ数は次の式によって与えることとする。

$$Re = \frac{2\rho u_r R_d}{\mu_g} \quad (9)$$

摩擦係数 C_d は, 以下の式で与えられる。

$$C_d = 3.05 \left\{ \frac{783\kappa^2 + 2142\kappa + 1082}{(60 + 29\kappa)(4 + 3\kappa)} \right\} Re^{-0.74} \quad (10)$$

$$= 8.9 Re^{-0.74}$$

$$C_d = 0.44 \quad (11)$$

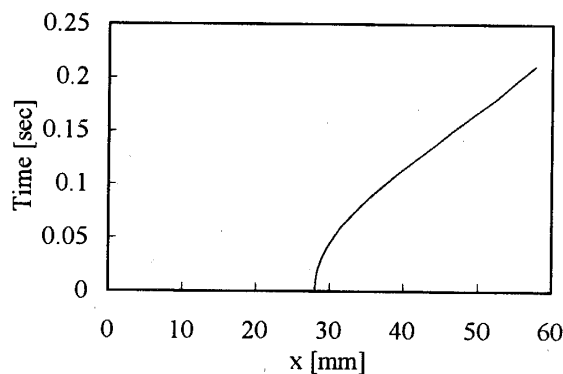


Fig. 12 Droplet movement at loop without glass tube

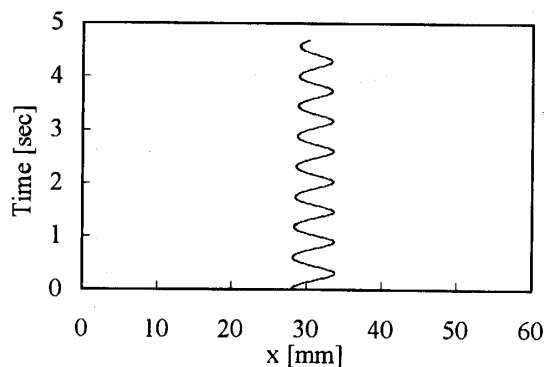


Fig. 13 Droplet movement at node without glass tube

ここで, κ は水と空気の粘性係数比とし, 以下の式によって与えられる。

$$\kappa = \frac{\mu_l}{\mu_g} = 48.9 \quad (12)$$

式(10)で与えられた摩擦係数は, Hamilec が Galerkin 法を含む荷重残差法による解析によって得たものである⁽¹⁰⁾。

5. 4 液滴挙動シミュレーション結果 定在波の腹の位置における水平方向一次元の液滴挙動を図 12 に示す。水滴を模擬した剛体球の直径は 1mm で, ホーン中心付近を初期位置としてある。この図から時間の経過に伴って, 水滴が右方向に移動し, 計算領域から飛び出すような挙動が見られた。次に定在波の節の位置における水平方向一次元の液滴挙動を図 13 に示す。同様に初期条件を設定したところ, 往復運動をしながらホーン中心軸付近に収束するような挙動が見られた。これらの挙動の原因を考えるために, 定在波の腹の部分と節の部分の水平方向一次元圧力分布の時間変化を図 14 と図 15 にそれぞれ示す。図 14 に示す腹の部分の

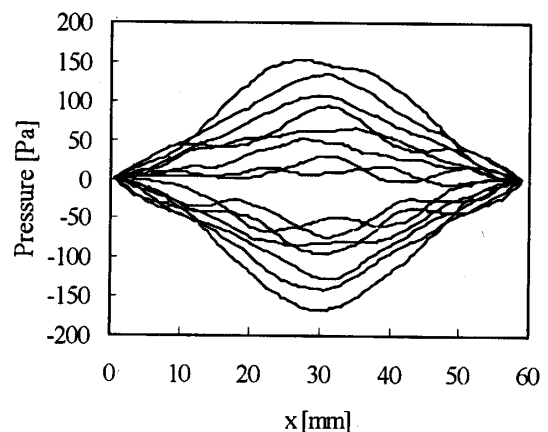


Fig. 14 Pressure distribution at loop without glass tube

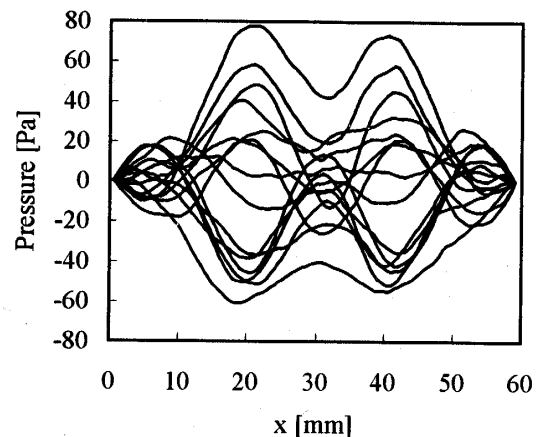


Fig. 15 Pressure distribution at node without glass tube

中心軸上における圧力変動が周囲と比べて大きくなっているのに対し、図 15 に示す節の部分の中心軸上における圧力変動が周囲の部分と比べて小さく、窪んだような形状となっている。5.2 で述べたように、音響定在波中の液滴は、圧力変動の小さい個所に保持されることが示されているので、この圧力変動の分布によって、水平方向の保持力が生じるものと考えられる。

次にテスト部をガラス管で覆った場合の定在波の腹の位置における水平方向一次元の液滴挙動を図 16 に示す。テスト部が開放されている場合と同じく、水滴を模擬した剛体球の直径は 1mm で、ホーン中心付近を初期位置としてある。水滴が左方向に移動し、ガラス管に衝突する挙動が見られた。この時の定在波の節の位置の水平方向一次元圧力分布の時間変化を図 17 に示す。この図から水平方向に関して圧力変動の分布が生じておらず、常に圧力の勾配が無い状態となっていることがわかる。このため、圧力の空間変化による力が働かなくなり、液滴の保持ができなかったものと考えられる。

6. 結言

通常重力環境下、微小重力環境下において液滴保持実験ならびに数値シミュレーションを行うことによって、次の結言を得た。

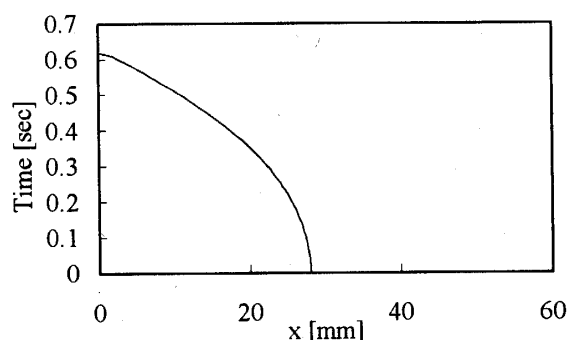


Fig. 16 Droplet movement at node with glass tube

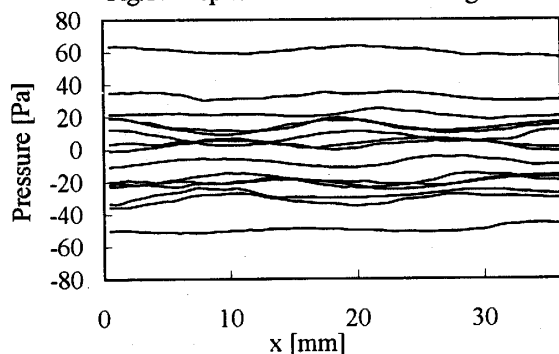


Fig. 17 Pressure distribution at loop with glass tube

- (1) 超音波の音響定在波により、通常重力環境下、微小重力環境下の両方において、液滴を安定に保持できることを確認した。
- (2) 微小重力環境下において保持可能な液滴の最大径が、通常重力環境下と大きく変化しないことが示された。
- (3) 微小重力環境下においても液滴の保持に適した入力電力があることが示された。
- (4) 液滴が扁平になるのは超音波の音圧の影響である事が示された。
- (5) 液滴がホーン中止軸上に保持されるのは、テスト部内に生じた水平方向の圧力振幅の分布によって働く保持力のためであることが示唆された。
- (6) テスト部周りの境界条件がテスト部内の2次元圧力分布に影響を与えることによって、液滴の水平方向の挙動にも影響を与えることが示唆された。

参考文献

- (1) 石川正道, 日比谷孟俊, マイクログラビティ(1994), 培風館
- (2) W. A. Oran, L. H. Berge, and H. W. Parker, Parametric study of an acoustic levitation system, Rev. Sci. Instrum. Vol.51, No.5, (1980), pp. 626-631
- (3) E. H. Trinh, Compact acoustic levitation device for studies in fluid dynamics and material science in the laboratory and micro gravity, Rev. Sci. Instrum. Vol.56, No.11, (1985), pp. 2059-2065
- (4) E. H. Trinh and J. L. Robey, Experimental study of streaming flows associated with ultrasonic levitators, Phys. fluids, Vol. 6, No. 11, (1994), pp. 3567-3579
- (5) 阿部豊, 渡辺正, 足立和成, 山本憲一, 音響定在波による液中気泡の並進運動制御システムの開発, 日本機械学会論文集, 66巻, 644号, B編, (2000) 238-284
- (6) 阿部豊, 青木一義, 超音波を用いた浮遊液滴制御に関する研究, 日本機械学会論文集, 70巻, 692号 B編, (2004)
- (7) C. W. Hirt and B. D. Nichols, Adding limited compressibility to incompressible hydrocodes, J. Comp. Phys., Vol. 34, Issue 3, (1980), pp. 390-400
- (8) 阿部豊, 山本憲一, 中谷文人, 足立和成, 音響定在波による気泡制御手法に関する研究, 日本機械学会論文集, 71巻, 705号, B編(2005)1293-1300
- (9) B. D. Nichols, C. W. Hirt, and R.S. Hotchkiss, SOLA-VOF, A Solution Algorithm for Transient Fluid Flow with Multiple Free Boundaries, LA-8355, (1980)
- (10) 化学工学協会編, “気泡・液滴・分散工学”, 槇書店 (1982)