

超音波の音響定在波中の浮遊物体挙動に関する研究

青木 一義

システム情報工学研究科

筑波大学

2011年 3月

目次

第1章 緒言

1-1	背景	1
1-2	物体浮遊方法の概要	4
1-3	音波浮遊の概要	5
1-4	音波浮遊に関する従来の理論	6
1-4-1	音響定在波	6
1-4-2	音響放射圧	7
1-4-3	音響流	13
1-4-4	液滴の浮遊限界音圧	17
1-4-5	理論式による音場浮遊液滴周りの物質輸送の定式化	23
1-5	目的	27

第2章 液滴浮遊システム

2-1	通常重力環境下における液滴浮遊システムの構築	28
2-2	微小重力環境下における液滴浮遊システムの構築	30
2-2-1	微小重力実験概要	30
2-2-2	実験装置の構成	30
2-2-3	実験装置の強度計算	30
2-3	本章のまとめ	39

第3章 実験結果

3-1	通常重力環境下における常温水滴保持実験	40
3-1-1	実験概要	40
3-1-2	浮遊水滴径測定結果	40
3-1-3	浮遊水滴の扁平率	40
3-2	ラウリン酸浮遊実験	40
3-3	速度分布計測	44
3-3-1	速度分布計測方法	44
3-3-2	浮遊物体が無い場合の計測結果	45
3-3-3	浮遊物体周りの速度場	48
3-4	微小重力環境下における水滴浮遊実験結果	50
3-5	本章のまとめ	52

第4章 数値解析

4-1 音場解析手法	53
4-1-1 解析概要	53
4-1-2 基礎式	53
4-1-3 数値解析手法	53
4-2 液滴挙動解析	60
4-2-1 解析概要	60
4-2-2 基礎式	60
4-2-3 数値解析手法	61
4-3 本章のまとめ	62

第5章 数値解析結果

5-1 圧力場解析	63
5-1-1 解析概要	63
5-1-2 解析体系	63
5-1-3 テスト部開放の場合の解析結果	65
5-1-4 ガラス管内における解析結果	65
5-2 速度分布解析	67
5-2-1 解析概要	67
5-2-2 解析体系	67
5-2-3 浮遊物体が無い場合の数値解析結果	67
5-2-4 数値解析から得られた浮遊物体周りの流動場	68
5-3 2次元液滴挙動解析結果	72
5-4 本章のまとめ	81

第6章 液滴浮遊の応用技術

6-1 概要	82
6-2 非接触物性測定の原理	82
6-3 表面張力測定実験	82
6-3-1 実験概要	82
6-3-2 水滴の表面張力測定結果	82
6-4 粘性係数測定結果	85
6-4-1 実験概要	85
6-4-2 水滴の粘性係数測定結果	85
6-5 本章のまとめ	86

第7章 結言	87
--------	----

謝辞

参考文献

著者文献リスト

付録

付録 A 音場解析プログラム

付録 B 液滴挙動解析プログラム

付録 C 微小重力実験テストデータパッケージ

第 1 章 緒言

1-1 背景

通常、材料製造のために図 1-1 の様に熔融液体を容器に入れて凝固させる場合、熔融液体は容器壁面からの核生成により外側から凝固していき、内部に不均質な結晶構造を生じてしまう事がある。ここでスペースシャトルや宇宙ステーションの微小重力環境を利用して空中に図 1-2 の様に無容器・非接触で浮遊させた場合、浮遊液滴は容器からの核生成が無く液体の温度が凝固点以下となっても凝固せずに液体のまま存在する過冷却現象が発生する事がある。この過冷却状態の液体は一旦凝固が始まるとその凝固が極めて急速に進行する事が知られている。これにより沈降や浮遊あるいは対流などが発生するよりも速く凝固が発生することによって、均質で高品位の結晶が製造できることが期待されている^[1]。

さらに、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の影響が非常に小さいため、対流が起こらず、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。図 1-3 に示すのは通常重力環境下と微小重力環境下で製造された Al-Cu 合金の断面写真である。通常重力環境下で製造された図 1-3(a)と比較して、微小重力環境下で製造された図 1-3(b)の凝固組織が著しく大きくなっていることがわかる。図 1.4 に示したのは地上で製造した種結晶を用いて微小重力環境下で結晶成長させた GaSb の種結晶近くでの成長結晶表面写真であり、図 1-5 はその断面エッチング写真である。この微小重力環境下での結晶成長において、試料はアンプル管内に接することなく浮遊していたことが、自由表面であったことを示す結晶特有の模様が図 1-5 に見られる事からわかる。また、図 1-5 において、地上で製造した(b)の領域には不純物縞が見られるが、微小重力環境下で成長させた(a)の領域には不純物縞は見られない。

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 $10^{-6} \sim 10^{-3}g$ 程度の微小な重力が存在しており、このレベルの重力であっても、流体中に流れを引き起こすことが明らかにされている。このような微小な重力擾乱は、総称して残留重力と呼ばれており、特に時間に依存する成分を強調する時には、 g -ジッターと言われる。残留重力成分について強度の順に並べると、推進機の点火($10^{-2}g$)、搭乗員の活動($10^{-5} \sim 10^{-2}g$)、流体の制動($10^{-8} \sim 10^{-5}g$)、構造体振動($10^{-4} \sim 10^{-6}g$)、太陽輻射圧($10^{-8} \sim 10^{-5}g$)などが知られており、これらの変動により、重力ベクトルの方向も様々に変化する。これらのことより、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。現在、そのための手法として電磁力や音波の放射圧などがあるが、いずれもまだ実用的に用いられるまでには至っていない。そこで、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、これまでに超音波発生システムの開発を行ってきた。しかしながら、これまでは超音波による液滴の保持のメカニズムについては詳細に解明されていない。

新材料の製造においては、液体状態の材料を扱うことが多く、それらの過程を数値シミュレーションに基づいて最適に制御する手法が行われている。このようなシミュレーションを精度良く実施するためには基礎データとしての物性値が必要となる。従来の方法では材料が坩堝などと接触する

ことによる不純物の混入、反応などにより、高温液体状態の材料の物性を測定することは困難であった。液体状態の物体を空中に浮遊させた状態で、非接触で物性を計測することができれば、このような高温液体状態や過冷却状態の材料の物性測定も可能となる。

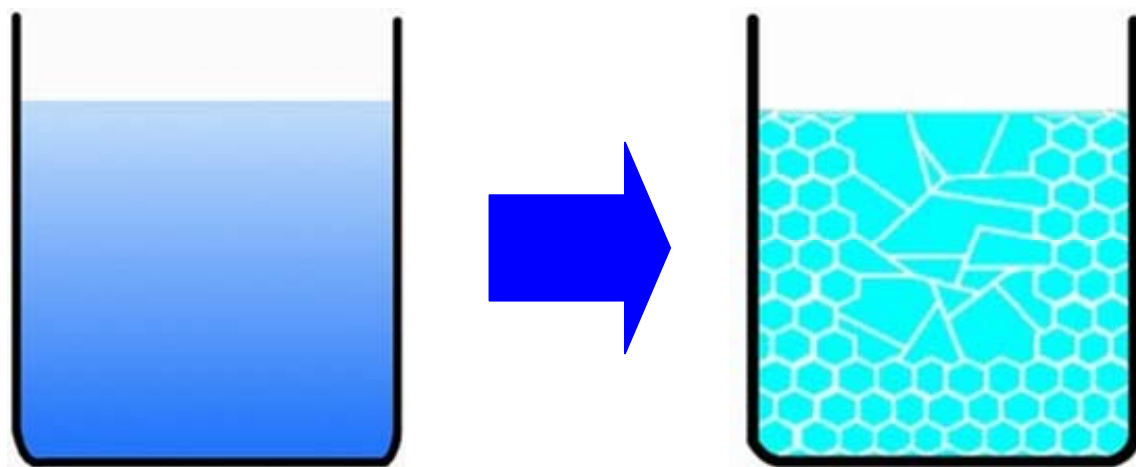


Fig. 1-1 容器凝固

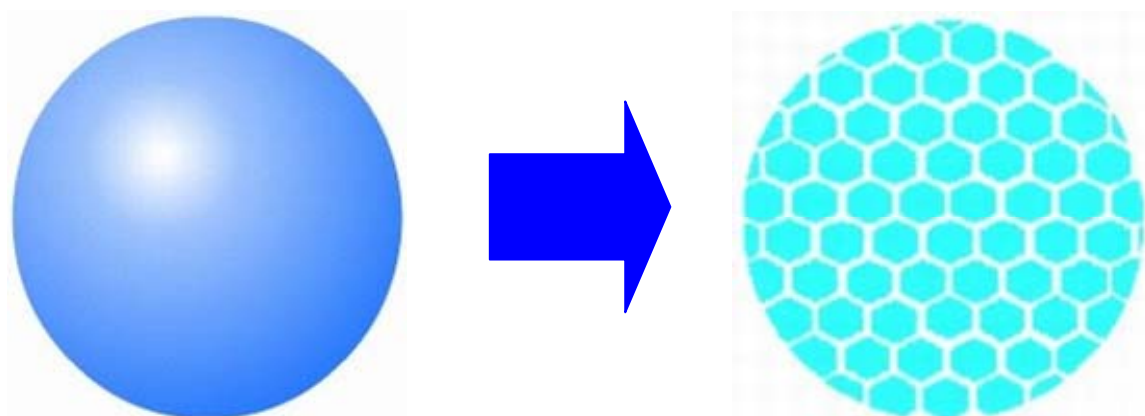
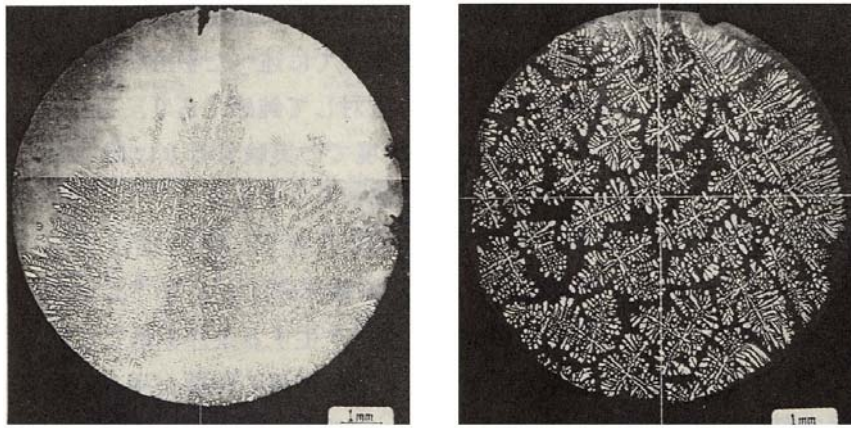


Fig. 1-2 無容器凝固

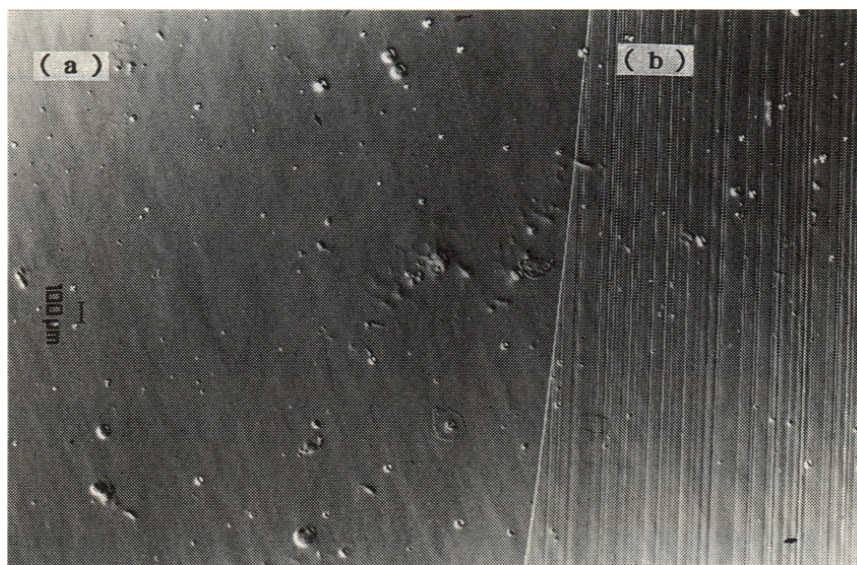


(a) 地上での結晶成長 (b) 微小重力環境下での結晶成長

Fig. 1-3 Al-Cu 合金の断面写真



Fig. 1-4 GaSb の種結晶近くでの成長結晶表面写真



(a) 微小重力環境下での結晶成長 (b) 地上での結晶成長

Fig. 1-5 GaSb の種結晶近くでの断面エッチング写真

1-2 物体浮遊方法の概要

地上重力環境下において試料の浮遊を達成するためには試料に働く重力をキャンセルさせる力を発生させるとともに、試料の位置を正確に制御する必要がある。これまでに様々な浮遊方法が考案され、実現されている。以下にこれらの方式の特徴を簡単にまとめる。

(1) 音場浮遊法

音場浮遊法は本研究で使用している浮遊法であり、音圧により試料の位置を制御する方法である。ホーン間に音響定在波による安定点を作り、この安定点に試料を保持するものである。この方法では試料は安定点からずれると、音圧により復元力が働くため、定在波が維持できれば試料は安定に保持できる。浮遊可能な試料の質量は数 g であり、大粒径の液滴の浮遊が可能である。短所としては、浮遊液滴の形状が音圧によって若干扁平に変形する。また浮遊物体周囲に流動が発生するため、浮遊物体に外乱が働くなどが挙げられる。

(2) ガスジェット法

ガスジェット法はノズルの先端から噴出された高速の流体が試料の周りを流れるとき、試料の前方もしくは後方に生じる圧力差によって浮力を得て位置制御を行う方法である。浮遊可能な試料の質量は数 g 程度であり、あらゆる種類の試料をガス雰囲気下で浮遊することが可能である。浮遊液滴はガス圧によって若干変形し、ノズルによって試料の半分程度が隠れるため、広い観察視野を確保することが出来ない。高温においても安定した位置制御が可能であるため、酸化物等の材料生成の研究が行われている。

(3) 磁場浮遊法

磁場浮遊法は試料分子個々が持つ磁性を利用して、装置が発生する磁場と反発させることにより浮遊させる方法である。浮遊可能な試料の質量は数百 g と大きい、試料種は試料の帯磁率に依存し、金属などの磁性率が低い試料は浮遊させにくい。雰囲気はガス/真空に対応する。装置自体は強磁場発生機構が必要で運転には膨大な電気を必要とする。

(4) 電磁浮遊法

電磁浮遊法は、高周波磁場により試料に誘導電流を発生させ、ローレンツ力により試料の位置制御を行う方法である。試料に誘導電流を発生させる必要があるため浮遊させることが出来るのは導電性の試料のみである。しかし、磁場により大きな力を発生できるので、数 g の比較的大きな試料を浮遊させることができる。雰囲気としては高真空及び雰囲気に対応可能である。他の浮遊法に比べると複雑ではあるが、磁場による安定点を維持することで高温試料の浮遊が容易なことから熔融金属の浮遊の際には汎用的に用いられている。

(5) 静電浮遊法

静電浮遊法は試料を帯電させ、クーロン力により位置制御を行う方法である。雰囲気

は高真空/加圧雰囲気に対応可能である。この方法では音波・ガス浮遊とは異なり液滴形状はほぼ真球に保持できる。試料の浮遊のしやすさは試料の帯電のしやすさに依存が、クーロン力は非常に小さな力であるため、浮遊可能な試料の質量は数百 mg 程度である。

その他、上記の(1)-(5)の浮遊方法を組み合わせたハイブリット浮遊装置も提案・製造されている。これにより、(1)-(5)の浮遊方法の長所を活かし、短所を補うことが出来る。

1-3 音場浮遊の概要

本項では、1-2 節で述べた浮遊法の中から、本研究で使用している音響浮遊法についてより詳細に述べる。音場浮遊法はテスト部間に音響定在波によって発生する音響放射圧力により試験流体を空間に非接触で保持・制御する方法である。図 1-6 は音場浮遊による液滴保持の原理を示す。超音波は超音波振動子に接続されたホーンより振幅が増幅、伝送される。実験では、下側ホーンより超音波を発生させ、上側ホーンからの反射波とで上下ホーン間に音響定在波を形成させる。この定在波中に液滴を注入させると、液滴は音響定在波と自重との釣り合いにより、定在波中の音圧の節付近の位置に保持されることとなる。この方法では試料は安定点からずれると、音圧により復元力が働くため、定在波が維持できれば試料は安定に保持できる。

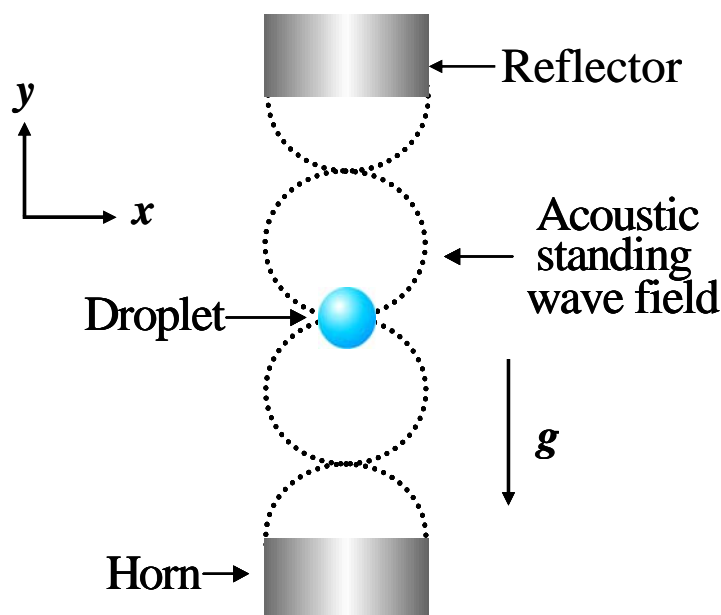


Fig. 1-6 音場浮遊の概念図

音響浮遊方法は振動子と反射板のみで比較的容易に製作するでき、その浮遊方法の特性上、浮遊させる流体の種類に依存せず大粒径の液滴の浮遊が可能という長所をもつ(静電浮遊法ではクーロン力によって試料を浮遊させるため帯電物質である必要があり、磁力浮遊ではローレンツ力を用いるため磁性流体である必要がある)。

短所としては、試料に働く外乱は原理的に不可避であり、また加熱や冷却による媒質の温度の変化によって音速が変化し、保持位置の移動や不安定化を招くことや、浮遊液滴の形状が音圧によって若干扁平に形状変形してしまうことである。この短所の対処方法として、図 1-7 に示すような反射板の代わりに同じ振動子を用いて、対称的に、しかも多方向から音圧を付加することによって試料を保持することが試みられている^[2]。今までに最大で 20 個の振動子を使った音響浮遊装置が報告されている。

Oran らは超音波の音響定在波中を用いて、物体を空間中に浮遊、保持する装置を製作し、その特性について研究を行った。この装置を用いた地上の通常重力環境下において、木製の球と水やグリセリンなどの液体の浮遊に成功している。^[3]この時、保持に成功した最大の液滴径は水では 5mm であり、音響定在波の節の位置に保持されることが示されている。

Trinh はこの超音波による浮遊の応用技術を検討し、最高で 700℃の雰囲気中に物体を浮遊させる装置を製作することにより、超音波の強度が強くなるのに伴って液滴の形状が扁平になる事、液滴表面の振動にいくつかの振動モードが存在する事をそれぞれ確認し、また O-terpheny の無容器熔融に成功している。^[4]また、同様の装置を用いて、音響定在波中にホーンの中心を軸とした軸対象の渦状の流れ場が存在することを示した。^[5]

Ohasaka らは超音波の音響定在波を用いて保持した液滴の非接触物性測定を行い、表面張力、粘性係数等の物性値の算出を試みたが、表面張力に関しては高精度を出すまでには至らなかった。^{[6][7]}

また、Yarin らは音響定在波によって浮遊する液滴について理論的に調べ、液滴の形状を算出する手法を確立した。そして、液滴が音響定在波の節の位置からわずかにずれた位置に保持されることを理論的に算出し、実験結果と比較を行った。^[8]

Rhim らは、正に帯電させた物体と負の電圧を印加した電極間に働くクーロン力を用いる静電的な物体浮遊装置を製作し、熔融シリコン等の浮遊に成功しており、浮遊シリコン液滴の過冷却状態も放射温度計による温度計測より、確認している。^[9]また、保持した液滴の振動データと温度計測により、液滴の密度、比熱、凝固潜熱、表面張力、粘性計数の算出を行った。^{[10][11][12]}また Paradis らは、この静電的な手法と併せてガスジェットを用いて熔融材料の浮遊を行い、非接触物性測定を行った。^{[13][14]}

音響浮遊は豊富な宇宙実験の実績がある浮遊法の 1 つである^[1]。その中でも、音響浮遊装置の宇宙実験で有名なのは、1985 年のスペースシャトルを用いた実験である。このとき装置は Intersonics 社の 1 軸音波浮遊装置(SALL)が用いられた。SAAL は 15~20kHz の音波を使い、800~1500℃で、ガラス隔液やアルミナ球の位置制御に使用された。同社は 3 軸位相制御を組み込んだ最高温度 1750℃の均熱炉(ALF)や 2000℃以上の加熱が可能な高温型音波浮遊装置を(HAL)の製作を手掛けるなど微小重力用の音響浮遊炉に関して多くの実績がある。その他にもスペースシャトルを用いた 1 軸や 3 軸の音響浮遊装置の実験がアメリカで行われた。日本では「ふわっと'92」第 1 次材料実験(FMPT)に音響浮遊装置を用いた実験がある。この浮遊装置は NASDA、IHI 社によって製作され、双楕円型イメージ炉と振動

子-反射板形式の 1 軸型の浮遊炉である。この装置を用いて FMPT においてガラス試料の浮遊溶融実験が行われた。またその他にも、音響浮遊装置内の液滴の挙動や音波干渉を観測した実験なども行われている。

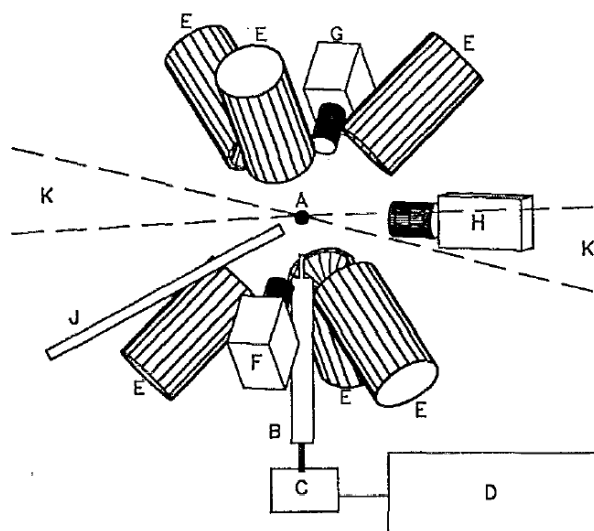


Fig1-7 多軸の振動子と反射板を備えた液滴浮遊システム

1-4 音響浮遊に関する従来の理論

1-4-1 音響定在波

広い平面の壁などに平面波が垂直入射すると、入射波と反射波が重なり合って進行しない音波ができる。これを音響定在波または単に定在波(定常波)という。

ここで、半径方向ベクトルを \mathbf{r} 、時間を t 、進行波と反射波の各々の波数を \mathbf{k} 、角周波数を ω 、として振幅 A が同様の波形の場合には、定在波は式(1-1)のように表すことができる。

$$\begin{aligned} y_1(\mathbf{r}, t) &= A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) \\ y_2(\mathbf{r}, t) &= A \cos(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t) \\ y(\mathbf{r}, t) &= y_1(\mathbf{r}, t) + y_2(\mathbf{r}, t) = -2A \cos(\omega t) \cos(-\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}). \end{aligned} \quad (1-1)$$

図 1-2 に示すように、音響定在波はホーンと反射板の間隔中のその固定した位置において節と腹を持つこととなる。それら節と腹の間隔は波長 λ によって決定される。ここで、ホーン間距離を L_r とすると、波長は式(1-2)のように書き下すことができる。

$$\lambda = \frac{2L_r}{n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1-2)$$

定在波は周波数 f にて振動し、周波数 f と波長 λ の関係は、媒質中の音速を c_0 とすれば、式(1-3)のようになる。

$$\lambda \cdot f = c_0 \quad (1-3)$$

音速は伝播する対象となる媒質、もしくは物体の物性値に依存して決定される。気体中を伝播する場合、音速は式(1-4)のように表される。

$$c_0 = \sqrt{\frac{P \cdot k}{\rho}} = \sqrt{k \cdot R \cdot T} \quad (1-4)$$

ここで、 ρ は気体の密度を、 R は一般気体定数を、 k は断熱係数(空気中では 1.402)を示している。 P 、 T はそれぞれ気体中の圧力と温度を表す。

1-4-2 音響放射圧

弾性体や流体中の各部分に働く力には、その部分の体積に比例する力と、隣り合う媒質間の境界面を通して面積に比例して働く力があり、前者を体積力、後者を面積力という。音の力による体積力は、後述の音響流を駆動する力となり、面積力は流体内の面に働く圧力であり、音響放射圧はこの圧力に基づくものである。

均質な媒質内で、仮想面 A、B を通して音波が入射していると考える。音圧 P は仮想面に対して垂直に作用し、しかもその音波はその面の存在によって乱れることもないため、面の両側から作用する力は同じ大きさで釣り合っている。たとえ、圧力が仮想面 A、B の位置で異なっても、面の両端で釣り合う限り、面全体には何ら力は作用しない。一方、例えば異なる音響インピーダンスの境界で音波の反射が起こると、音圧が面を境に異なる大きさになることから、その差に相当する力が面に作用することになる。ここで、以下では進行波の音響放射圧について、その理論の概略を従来の線形性を仮定する理論と比較しながら簡単に述べることにより数学的に記述することとする。

ここでは、議論を簡単にするために空気を完全流体と見なすことにする。完全流体中の音響に関する方程式は次式のようになる。

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \rho \mathbf{F} - \text{grad}p \quad (1-6)$$

$$\text{div}(\rho \mathbf{v}) = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-7)$$

ただし、 ρ は密度、 \mathbf{v} は粒子速度、 p は圧力、 \mathbf{F} は流体の単位質量あたりに働く外力で、一般

には時間と位置の関数である。式(1-7)は流体力学における Euler の運動方程式として知られているものであり、同式中の D/Dt は Lagrange の微分と呼ばれ流体中の一微粒子に着目したときの時間変数を表している。これは数学的には d/dt と同義であるが、 $\partial/\partial t$ との混合を避けるためにこの表記法がよく用いられている。式(1-7)は流体の連続の関数である。

ここで、外力が無視できるほど十分小さいと仮定し $\mathbf{F}=0$ とおき、さらに、

$$\frac{D\mathbf{v}}{Dt} = \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} \quad (1-8)$$

を用いて式(1-8)を変形すると、

$$\rho \left[\frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} \right] = -\text{grad}p \quad (1-9)$$

を得る。また式(1-9)は、

$$\mathbf{v} \cdot \text{grad}\rho + \rho \text{div}\mathbf{v} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (1-10)$$

と変形される。

ここで粒子速度を十分に小さい($|\mathbf{v}| \ll 1$)と仮定すると式(1-9)、式(1-10)より、

$$\rho \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} = -\text{grad}p \quad (1-11)$$

$$\rho \text{div}\mathbf{v} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad (1-12)$$

が得られる。つまり、静的な密度と圧力を ρ_0 と p_0 、動的な密度と圧力の変化をそれぞれ ρ' 、 p' と表すと $\rho = \rho_0 + \rho'$ 、 $p = p_0 + p'$ 、ただし、 $\rho_0 = \text{const}$ 、 $p_0 = \text{const}$ 、 $\rho' \ll \rho_0$ 、 $p' \ll p_0$ とする。式(1-11)、式(1-12)より、

$$\rho_0 \frac{\partial\mathbf{v}}{\partial t} = -\text{grad}p' \quad (1-13)$$

$$\rho_0 \text{div}\mathbf{v} = -\frac{\partial\rho'}{\partial t} \quad (1-14)$$

となる。ここで \mathbf{v} を渦なし、すなわち $\text{rot}\mathbf{v}=0$ と仮定すると、速度ポテンシャル ϕ が、

$$\mathbf{v} = -\text{grad}\phi \quad (1-15)$$

と定義され、また、

$$p' = c^2 \rho' \quad (1-16-a)$$

$$p' = \rho_0 \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1-16-b)$$

$$\rho' = \frac{\rho_0}{c^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1-16-c)$$

が成り立つことから、

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad (1-17)$$

となる音響に関する d'Alembert の波動方程式が導かれる。ただし $c = \sqrt{\gamma p_0 / \rho_0}$ は音速 (γ は比熱比) である。

式(1-17)は媒質 ϕ に対する線形性を前提としおり、同式を導いた仮定に完全に従う限りにおいては、周期的に変化する音圧の時間平均は 0 であり、音響放射圧を説明することはできない。そこで粒子速度が小さいと仮定し、対流項を無視する以前の式(1-4)に $\rho = \rho_0 + \rho'$ 、 $p = p_0 + p'$ を代入すると、

$$(\rho_0 + \rho') \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right] = -\text{grad} p' \quad (1-18)$$

ここで式(1-12)はベクトル演算の公式より、

$$(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = \frac{1}{2} \text{grad} v^2 - \mathbf{v} \cdot \text{rot} \mathbf{v} \quad (1-19)$$

これにより、

$$(\rho_0 + \rho') \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \text{grad} v^2 - \mathbf{v} \cdot \text{rot} \mathbf{v} \right] = -\text{grad} p' \quad (1-20)$$

となり、上記の場合と同様に $\text{rot}\mathbf{v}=0$ とすると、

$$(\rho_0 + \rho') \left[\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{2} \text{grad} \mathbf{v}^2 - \text{rot} \mathbf{v} \right] = -\text{grad} p' \quad (1-21)$$

$(\rho'/2)\text{grad} \mathbf{v}^2$ は $\rho' \ll \rho_0$ 、 $|\mathbf{v}| \ll 1$ より十分小さいとして無視すれば、

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho' \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \frac{\rho_0}{2} \text{grad} \mathbf{v}^2 = -\text{grad} p' \quad (1-22)$$

となる。ここで式(1-22)の左辺第二項は、式(1-13)、式(1-16-a)より、

$$\rho' \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{1}{\rho_0 c^2} p' \text{grad} p' = -\frac{1}{2\rho_0 c^2} \text{grad} p'^2 \quad (1-23)$$

となるから、式(1-22)は、

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} - \frac{1}{2\rho_0 c^2} \text{grad} p'^2 + \frac{\rho_0}{2} \text{grad} \mathbf{v}^2 = -\text{grad} p' \quad (1-24)$$

となる。ここで式(1-24)の両辺の時間平均をとると、 $\rho_0 \partial \mathbf{v} / \partial t$ は消えて、

$$\overline{\text{grad} p'}^t = \frac{1}{2\rho_0 c^2} \overline{\text{grad} p'^2}^t - \frac{\rho_0}{2} \overline{\text{grad} \mathbf{v}^2}^t \quad (1-25)$$

ただし $\overline{\quad}^t$ はその量の時間平均をとることを表している。 $\overline{\quad}^t$ と grad の記号は順序を入れ替えても良いことから、

$$\overline{p'}^t = \frac{1}{2\rho_0 c^2} \overline{p'^2}^t - \frac{\rho_0}{2} \overline{\mathbf{v}^2}^t \quad (1-26)$$

を得る。ここで音圧の実効値 $P = \sqrt{\overline{p'^2}^t}$ と粒子速度の実効値 $U = \sqrt{\overline{\mathbf{v}^2}^t}$ を用いると、

$$\overline{p'}^t = \frac{P^2}{2\rho_0 c^2} - \frac{\rho_0 U^2}{2} \quad (1-27)$$

となる。式(1-27)の右辺第一項を狭義の放射圧、第二項を **Bernoulli** の負圧と呼ぶことがある。ここで、時間に関する音場の変化を正弦的なものと仮定し、速度ポテンシャルの実効値

$\Phi = \sqrt{\overline{\phi'^2}}$ を用いると式(1-27)は、

$$\overline{p'}^t = \frac{\omega^2 \Phi^2}{2\rho_0 c^2} - \frac{\rho_0}{2} \overline{|\text{grad}\phi|^2}^t \quad (1-28)$$

と変形できる。ここで ω は角周波数である。式(1-28)が意味するところは、波長に比べて十分小さな物体が音場中にあるとき、その物体に速度ポテンシャルの大きな方から小さな方へ、またその傾斜が穏やかな方から急な方へ力が働く傾向があるということである。

音響放射圧は物体の単位面積当たりの **Momentum flux** と呼ばれる物理量の時間平均に等しいベクトル量になる。完全流体の場合、次のように表される。

$$\mathbf{P}_r = \overline{p'}^t \mathbf{n} + \overline{\rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})}^t \quad (1-29)$$

ここで \mathbf{n} は物体表面の法線ベクトルである。式(1-30)の右辺第一項は前述した音圧の時間平均値による力、第二項は流体と物体との境界面の運動によって生じる力である。従って物体が剛体であると仮定すると $(\mathbf{n} \cdot \mathbf{v})=0$ より、

$$\mathbf{P}_r = \overline{p'}^t \mathbf{n} \quad (1-30)$$

となる。しかしながら進行波音場において第二項の効果は無視できないところがある。それは平行進行波の場合、 $P=\rho_0 c U$ を式(1-27)に代入することによって $\overline{p'}^t=0$ となるため、

$$\mathbf{P}_r = \overline{\rho \mathbf{v}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{n})}^t \quad (1-31)$$

となるからである。

一般に物体に作用する力は、

$$F = \iint_s \mathbf{P}_r \cdot \mathbf{n} ds \quad (1-32)$$

で表される。本項で定義された放射圧のことを、特に **Langevin** の放射圧と呼び、他の **Rayleigh** の放射圧から区別することがある。

次に本研究における実験環境中での液滴に生じる音圧を求めることとする。半波長毎の倍数の距離に設定してあるホーンと反射板の間隔中にホーンより音場を生じさせることで、テスト部内に音響定在波を発生させることができる。このような状況下での浮遊物体に生じる音響放射力は、**Yarin** らによって定式化されている。浮遊させた物体の表面での音圧変動 P' を考える。ここで進行音波、散逸音波をそれぞれ P_i 、 P_s とすると式(1-33)のようになる。

$$P' = P_i + P_s \quad (1-33)$$

ここで、散逸音波は式(1-34)のように記述できる。

$$P_s = A e^{-i\omega t} P_s(\mathbf{r}) \quad (1-34)$$

散逸音波 P_s は **Helmholz** 方程式の形をとることとなり、式(1-35)のようになる。

$$\Delta P_s + \left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 P_s = 0 \quad (1-35)$$

一方、進行音波 P_i についても、境界条件を考慮することで式(1-36)のように書き下すことができる。

$$\begin{aligned} \text{B.C. 1 } x = 0, \quad P_i &= A e^{i\omega t} \\ \text{B.C. 2 } x = L_r, \quad \frac{\partial P_i}{\partial t} &= 0 \\ \frac{\partial^2 P_i}{\partial t^2} &= c_0^2 \frac{\partial^2 P_i}{\partial x^2} \end{aligned} \quad (1-36)$$

ここで、 x は音波の進行方向の座標を、 i は虚数単位を示している。ホーン中心軸上の節の位置は、幾何学の計算によって、式(1-37)のように表すことができる。

$$x = L_r - \frac{c_0}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + m\pi \right), \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1-37)$$

また、式(1-36)を解くと、進行音波 P_i は式(1-38)のように記述できる。

$$P_i = Ae^{i\omega t} \left[\tan \left(\frac{\omega L}{c_0} \right) \sin \frac{\omega x}{c_0} + \cos \frac{\omega x}{c_0} \right] \quad (1-38)$$

式(1-38)はホーナー反射板の距離が有限であることを考えると、式(1-39)のように近似することができる。

$$P_i = Ae^{i\omega t} \cos \frac{\omega x}{c_0} \quad (1-39)$$

1-4-3 音響流

音波はその進む方向に流体粒子が往復運動しており、角周波数を ω 、速度振幅を u_0 とする正弦振動を仮定すると振動速度は、

$$u = u_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \right] \quad (1-40)$$

で表される。式(1-40)は平面進行波を記述する。この式の時間平均をとると、

$$\bar{u} = u_0 \overline{\sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{c_0} \right) \right]} = 0 \quad (1-41)$$

であるから、粒子速度に直流成分はなく、流れは生じないことがわかる。波形が正弦ではなく、歪んでいても平均値まわりを粒子が往復振動しているならば式(1-41)で示されるよ

うに直流分がないのがふつうである。このような考え方は微小振幅の音波について言える事であり、音波の振幅が大きくなり有限振幅の領域になると、2時の微小量まで含めて時間平均する必要がある、ここに粒子速度の直流分が現れる。より詳細に説明をするならば、式(1-40)を x という固定した位置で通り過ぎる粒子を見たとき、オイラー座標系での記述である。音波は縦波であるから微小変位ではあるものの、ある基準位置 x_0 としてそのまわりで振動し、 x の固定位置に到達した粒子の速度が(1-40)で与えられることになる。このときの粒子変位は近似的に式(1-40)を時間で積分することで、

$$x = x_0 - \frac{u_0}{\omega} \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] \quad (1-42)$$

と与えられる。動いている粒子に付随して速度や加速度で見るのがラグランジュ座標系の記述であり、質点力学の考え方である。つまり粒子が x_0 のまわりでピストン運動のように正弦振動していると、式(1-42)を時間について積分すると、

$$\frac{dx}{dt} = u_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] \quad (1-43)$$

が粒子速度になる。式(1-40)と式(1-43)は同じ正弦波である。しかし、基準位置が異なっている。そこで、 u を x_0 のまわりでテイラー展開して2次の項までとり、式(1-42)を用いると、

$$\begin{aligned} u &= u_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] - (x - x_0) u_0 \omega c_0 \cos \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] \\ &= u_0 \sin \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] - \frac{u_0^2}{c_0} \cos^2 \left[\omega \left(t - \frac{x_0}{c_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (1-44)$$

となり、右辺に直流成分が現れる。これはオイラー座標系で見た粒子速度がたとえ正弦振動であっても、ラグランジュ座標系で見ると、波形歪みが生じることがわかる。

上記のように、線形音波には時間に関する直流成分は含まれない。このため、線形音波はエネルギーを輸送するが質量（物質あるいは媒質）は輸送しない。しかしながら、音波の振幅（圧力変動の振幅や速度変動の振幅）が増大すると、それまで観測できなかった非線形効果が小さいながらも観測できるようになる。その非線形効果のひとつとして $\sin 2\omega t = (1 - \cos 2\omega t)/2$ のようにして2次高調波とともに現れる直流成分が音波による質量輸送に

対応しており、これを音響流という。通常、音響流の速度は、個々の流体粒子の速度の音波の周期にわたる時間平均として定義される。

以下では、音響流について空間尺度の違いによって整理した3種類の音響流について触れる。**Eckart** の音響流は、音の波長に比べてずっと大きな空間スケールで起こる流れであり、**Schlichting** の音響流は境界層内の流れであり、**Rayleigh** の音響流は音の波長程度の空間スケールの流れとなっている。

(1)**Eckart**の音響流

Eckart はビーム状の進行音波に沿って、音の伝播方向に向かう定常な流れが発生することを示した。このような音波によって駆動される大局的な流れを**Eckart**の音響流と呼ぶ。その発生機構は、レイノルズ応力の作用であることが知られている。即ち、媒質の密度 ρ 、音波の粒子速度を u とすると ρu は単位体積当たりの運動量になる。この運動量を持つ粒子が単位時間に速度 u で動くため、それらの積は単位面積当たりに働く力になる。実際には単なる力ではなく、積を取るときにテンソルの取り扱いを行い、これはレイノルズ応力になる。この波長の空間スケールで発生する流れは、音波は縦波のみが存在することから回転の成分は無視し、以下のような式(1-45)に帰着する。

$$\begin{aligned}
 u &= u_0 + u' \\
 \nabla \cdot u_0 &= 0 \\
 \frac{\partial u_0}{\partial t} + u_0 \cdot \nabla u_0 &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 u_0 + F \\
 F &= -\frac{1}{\rho_0} \nabla \bar{L} + \frac{b}{\rho_0^3 c_0^4} p \nabla \left(\frac{\partial p}{\partial t} \right)
 \end{aligned} \tag{1-45}$$

ここで L は運動エネルギー密度 $e_k = \rho u^2/2$ と位置エネルギー密度 $e_p = P^2/(2 \rho c_0^2)$ の差のラグランジュ密度で、

$$L = e_k - e_p \tag{1-46}$$

で記述される。式(1-45)は非圧縮性流体に対するN-S方程式である。ここで注目されることは、 F のうち L の項は音響流の発生に何ら関与しないことである。つまり F を記述する式の中の右辺第2項から、単位質量当たりの力 F は、音波の波動エネルギーが散逸する過程で媒質に供給され、それが媒質を動かす駆動力になっている。エネルギー損失があれば必ずこれ

に抗する力が媒質に作用し、これがEckartの音響流の駆動力になるのである。

(2)Schlichtingの音響流

例えば、円柱棒をその軸の垂直方向に正弦振動して振動させ、粘性流体内に波を誘起させると、その円柱棒の近傍に渦を伴って定常の微小流れ(マイクロストリーミング)が観測されることが知られている。この現象はSchlichtingの音響流と言われ、多くの研究がなされてきた^[15]。円柱棒と流体との間で形成される厚さ δ の境界層内で音波の横波成分は急激に減衰するため、音波エネルギーはその狭い空間で減衰して駆動力が発生する。縦波は、たとえ発生しても円柱棒の寸法程度では距離減衰が小さく、駆動力への寄与は無視できる。このように、Schlichtingの音響流の駆動力は、Eckartの音響流の駆動力の発生機構とは本質的に異なる。

Schlichtingの音響流の支配方程式は、局所流れの効果が小さく、定常流であるとして、式(1-47)のように記述できる。

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{u}_0 &= 0 \\ \nu \nabla^2 \cdot \nabla \times \mathbf{u}_0 &= -\nabla \times \mathbf{F} \\ \nabla \times \mathbf{F} &= -\nabla \times \left(\overline{\mathbf{u}' \nabla \cdot \mathbf{u}'} + \overline{(\mathbf{u}' \cdot \nabla) \mathbf{u}'} \right) \\ &\cong -\nabla \left(\overline{\mathbf{u}' \times \nabla \times \mathbf{u}'} \right)\end{aligned}\tag{1-47}$$

円柱棒を振動させるのではなく、音場内に円柱棒を挿入しても同様の流れが発生する。また、円柱棒の代わりに剛球や気泡の周りにも流れが観測される。特に、気泡が入射音波で共振するようとき、振動速度が大きくて境界層の効果が現れ、気泡の外側のみならず内側でも微小流れが発生するとの報告がある^[16]。

(3)Rayleighの音響流

境界層内の流れはその層外にまで広がる。音響管内に定在波をたてると、それに並行して、節と腹で循環するスケールの大きい定常流れが観測され、これをRayleighの音響流と呼んでいる。境界層外では横波が存在せず、定在波内での縦波の減衰が無視できるので駆動力はなく、境界層外での流れは、

$$\nu \nabla^2 \nabla \times \mathbf{u}_0 = 0\tag{1-48}$$

を満たす。Rayleighの音響流は、式(1-47)、(1-48)を境界層の内外で適切な境界条件をもって解けばよいことになる。この流れの代表例としてクント(Kundt)管内で発生する循環流があげられる^[17]。つまり、Rayleighの音響流は振動境界層内部のSchlichtingの音響流に引

きずられて誘起されるといえる。

1-4-4 液滴の浮遊限界音圧

(1)Kingの理論式による液滴浮遊下限音圧の計算

1-4-2 項で物体に働く音響放射圧力について記述したが、浮遊させる物体が球のときは音の回折や散乱などの影響を考慮する必要がある。本研究では音響放射圧力によって液滴を浮遊させており、その浮遊形状は球形状に近いと、球に働く音響放射圧力 P を求める必要がある。過去に King によって剛体球に働く放射圧力に関する研究が行われている。本研究では剛体球ではなく流体を浮遊させるが、浮遊させる流体が十分小さいとき、剛体球にかかる放射圧力で近似することが可能である。King は剛体球に掛かる音響放射圧力を先ほどと同様に、以下のオイラーの方程式と連続の式と速度ポテンシャルを用いた波動方程式を基礎式として用いて導出している。

$$\begin{aligned}\rho \frac{Du}{Dt} &= -\frac{\partial p}{\partial x}, \quad \rho \frac{Dv}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial y}, \quad \rho \frac{Dw}{Dt} = -\frac{\partial p}{\partial z} \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) &= 0 \\ \nabla^2 \phi &= \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}\end{aligned}\tag{1-49}$$

上式を用いて、音波が小さいと仮定し摂動を用いて圧力を密度の関数として表す。圧力が密度の関数であるとし圧縮性流体中の圧力変化を 2 次の微小量まで正確に記述すると、

$$\delta p = \frac{1}{2} \frac{\rho_0}{c^2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} \rho_0 q^2 + \rho_0 \dot{\phi}\tag{1-50}$$

ここで、 ϕ は速度ポテンシャルであり、 $(u, v, w) = -\text{grad}\phi$ であり、 $q = u^2 + v^2 + w^2$ である。また、右辺の第 1 項は位置エネルギー密度を、第 2 項は運動エネルギー密度を示している。この 2 項を合わせてラグランジュ密度と言う。また、速度ポテンシャルの時間微分は、平衡位置周りを並進振動する剛体に対して剛体球とともに小さな速度で動く座標系で観測すれば以下の様を書くことが出来る。

$$\dot{\phi} = \frac{D\phi}{Dt} + u\dot{\xi} + v\dot{\eta} + w\dot{\zeta}\tag{1-51}$$

また、球に働く 2 次精度の音響放射圧力の時間平均 $\bar{P} = \overline{\delta p^t}$ は、

$$\bar{P} = \bar{P}_\phi + \bar{P}_q + \bar{P}_\zeta \quad (1-52)$$

となる。ここで、 \bar{P}_ϕ と \bar{P}_q はそれぞれ式(1-51)の第 1 項と第 2 項の時間平均に相当する。また、 \bar{P}_ζ は式(1-51)の第 3 項の時間平均を示したものである。

また、音響定在波中の速度ポテンシャルは、

$$\phi = A \cos \kappa(z+h) \quad (1-53)$$

と表すことが出来る。ここで、 κ は波数、 h は音響定在波の節および腹の z 軸座標である。定在波の節と腹の位置はそれぞれ、

$$Node : h = 0, \pm \frac{\pi}{\kappa}, \frac{2\pi}{\kappa}, \dots, \pm \frac{s\pi}{\kappa}, \quad (1-54)$$

$$Loop : h = \pm \frac{1}{2} \frac{\pi}{\kappa}, \frac{3}{2} \frac{\pi}{\kappa}, \dots, \pm (s + \frac{1}{2}) \frac{\pi}{\kappa} \quad (1-55)$$

である。音響定在波に浮遊している物体が小球 ($\alpha = \kappa r \ll 1$) と仮定すると位置エネルギーが寄与する放射圧力 P_ϕ は、

$$P_\phi = -\frac{\pi r^2 \rho_0}{c^2} \int_0^\pi \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (1-56)$$

となり、その時間平均は、

$$\bar{P}_\phi = \pi \rho_0 |A|^2 \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} \sin \kappa h \quad (1-57)$$

となる。同様に運動エネルギーが寄与する放射圧力は、

$$P_q = \pi r^2 \rho_0 \int_0^\pi q^2 \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (1-58)$$

となり、その時間平均は、

$$\bar{P}_q = \frac{2}{3} \pi \rho_0 |A|^2 \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} \sin \kappa h \quad (1-59)$$

さらに、剛体球と共に小さな速度で動く座標系で観察することによって発生する見かけの放射圧力は、

$$P_\zeta = -2\pi\rho_0 r^2 \dot{\zeta} \int_0^\pi \left(\zeta \cos^2 \theta + \frac{\sin \theta}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right) \sin \theta \cos \theta d\theta \quad (1-60)$$

となり、その時間平均は、

$$\bar{P}_\zeta = -\frac{2}{3} \pi \frac{\rho_0^2}{\rho_1} |A|^2 \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} \sin \kappa h \quad (1-61)$$

となる。ここで、 \bar{P}_ϕ と \bar{P}_q と \bar{P}_ζ の α は微小量より、 α^4 以上の高次の項は省略した。よって、小球のとき($\alpha = \kappa a \ll 1$)の音響放射圧力 \bar{P} は、

$$\begin{aligned} \bar{P} &= |A|^2 \pi \rho_0 \sin \kappa h \left[\frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} + \frac{2}{3} \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} - \frac{2}{3} \frac{\rho_0}{\rho_1} \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} \right] \\ &= |A|^2 \pi \rho_0 \frac{\alpha^3}{2 + \rho_0 / \rho_1} \left\{ 1 + \frac{2}{3} (1 - \rho_0 / \rho_1) \right\} \sin \kappa h \end{aligned} \quad (1-62)$$

となり、最終的に定在波中に浮遊する球物体にかかる放射圧力は、

$$\frac{\bar{P}}{\pi a^2} = 2r\kappa \cdot F(\rho_0 / \rho_1) \cdot \bar{E} \cdot \sin 2\kappa h \quad (1-63)$$

となる。ここで、

$$F(\rho_0 / \rho_1) = \frac{1 + \frac{2}{3} (1 - \rho_0 / \rho_1)}{2 + \rho_0 / \rho_1}, \quad \bar{E} = \frac{1}{2} \rho_0 \kappa^2 |A|^2 \quad (1-64)$$

であり、それぞれ、相対密度関数、全エネルギー密度である。ここで、 $\rho_0 / \rho_1 \ll 1$ であるか

ら、式(1-63)は式(1-64)を用いて、以下のように近似できる。

$$F = \frac{5}{6} \pi \rho k A^2 a^3 \sin(2kh) \quad (1-65)$$

ここで、式(1-66)に示す線形音場の関係式と今液滴を節に浮遊させたとし、 $\sin(2kh)=1$ を用いると、

$$A = \frac{P}{\rho_0 c_0} \quad (1-66)$$

式(1-65)は式(1-67)のように式変形できる。

$$F = \frac{5}{6} \pi \rho k \left(\frac{P}{\rho_0 c_0} \right)^2 a^3 \quad (1-67)$$

式(1-67)は近似した場合の King の式になる。式(1-67)で表される力 F が浮遊させた液滴に生じることを意味している。次に、実際に液滴を浮遊させた場合、液滴は重力による体積力と式(1-67)によって表される力との均衡によって浮遊することを考えると、液滴が限りなく球形に近づくような場合、その最小の力は、

$$F_{\min} = \frac{5}{6} \pi \rho k \left(\frac{P_{\min}}{\rho_0 c_0} \right)^2 a^3 = \frac{4}{3} \pi \rho_1 r^3 g \quad (1-68)$$

となる。ここで、 g は重力加速度を示す。式(1-66)を P_{\min} について求めると、式(1-69)のように導出される。

$$P_{\min} = \sqrt{\frac{1.6 \rho_1 \rho_0 g c^2}{k}} \quad (1-69)$$

これが求める浮遊液滴の下限音圧となる。理論的には、式(1-69)には液滴径 r が含まれていないことから、液滴径に依らずこの音圧を下回る音圧では液滴は浮遊しないことがわかる。

(2)Danilov らの理論式による液滴浮遊上限音圧の計算

次に、Danilov らの理論を用いて液滴浮遊の上限音圧を求めることとする。音場によって浮遊させた液滴はその音圧が増大するにあたって、変形を伴い、球形から楕円球に、そしてやがては液滴がその形を維持することが困難になり、微粒化することとなる。

Danilov らの理論によれば、液滴が強音場中で微粒化するまでには3つの段階があるとしている。まず1つ目の段階として、液滴は浮遊時には球形として浮遊する。そこから音場を強くすることで液滴は扁平形状になる。この段階において、液滴の両極と両端に生じる Bernouli の負圧の影響によって、液滴の両端が波立ち、界面が不安定になる。この不安定性が更に増すことで、やがて Kelvin-Helmholz 不安定性によって液滴はその形状を保持することが困難になる。これら液滴が不安定になる挙動を定式化するにあたり、まずは液滴周りの速度分布を近似的に求める。ここで、液滴周りには、音場によって生じた一様流、もしくは振動流が存在していることを仮定する。この流れによって生じる Bernouli の負圧の影響と液滴の表面張力による力のバランスによって液滴の形状が決定される。

理論を簡略化するために、ここでは液滴周りの流れは、液滴近傍において、非圧縮かつポテンシャル流れであることとする。かつ、液滴は扁平形状とし、その大きさは音波の波長より十分に短いと仮定する。ここで、H. Lamb の「流体力学」^[18]に従えば、扁平液滴の赤道での気体の流速分布は、

$$V_{eq} = \left(1 + \frac{1 - \zeta \operatorname{arccot} \zeta}{\zeta [\operatorname{arccot} \zeta - \zeta (1 + \zeta^2)^{-1}]} \right) u \quad (1-70)$$

$$\zeta = (a/b) [1 - (a/b)^2]^{1/2} \quad (1-71)$$

と表せる。液滴の極と赤道面に生じるベルヌーイの負圧を考慮すると、

$$\begin{aligned} P_B &= \frac{1}{2} \rho_0 V_{eq}^2 \\ &= -\frac{1}{2} \left(1 + \frac{1 - \zeta \operatorname{arccot} \zeta}{\zeta [\operatorname{arccot} \zeta - \zeta (1 + \zeta^2)^{-1}]} \right)^2 u^2 \end{aligned} \quad (1-72)$$

となる。ここで、 P_B はベルヌーイの負圧を示す。

また、液滴の表面張力によって生じる圧力は、液滴自身の持つ曲率に比例することとなり、式(1-73)のように導出できる。

$$P_\sigma = \frac{\sigma}{r_0} \left(\frac{\zeta}{(1 + \zeta^2)^{1/2}} \right)^{1/3} \left(1 + \frac{1 + \zeta^2}{\zeta^2} - 2 \frac{\zeta}{(1 + \zeta^2)^{1/2}} \right) \quad (1-73)$$

ここで、 r_0 は液滴の体積等価直径を、 σ は表面張力係数を示す。

音場が強くなるにつれて、液滴の厚さが薄くなると、

$$\begin{aligned}\zeta &\rightarrow 0, \\ P_B &= -\frac{\rho_0}{\pi^2 \zeta^2} u^2, \\ P_\sigma &= \frac{\sigma}{r_0 \zeta^{-5/3}}\end{aligned}\tag{1-74}$$

となる。また、 We 数は式(1-75)によって表され、

$$We = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 r_0 u_{rms}^2}{\sigma}\tag{1-75}$$

$\zeta \cong 1/8$ において臨界 We 数となるとすると、

$$We_{cr} = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 r_0 u_{rms}^2}{\sigma} \cong 1.7\tag{1-76}$$

ここで求めた臨界 We 数は正確な記述ではないものの、Danilov らの研究によれば、実験によって求めた臨界 We 数とほぼ同等の値をとることが確認されている。

式(1-76)から流速を求めると、

$$u_{rms} = \sqrt{\frac{3.4\sigma}{\rho_0 r_0}}\tag{1-77}$$

となり、線形音場の関係式を用いて、流速を音圧に変換すると、

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{3.4\sigma\rho_0 c^2}{r_0}}\tag{1-78}$$

と記述でき、これが、求める液滴浮遊の上限音圧を示す。理論的には、式(1-78)には分子に浮遊物体の表面張力係数 σ が含まれていることから、浮遊上限音圧は浮遊させる物体の表面張力係数 σ に依存することがわかる。一方、分母に初期液滴径 r_0 が含まれることから、液滴

径が大きくなることで、液滴を浮遊させる範囲が狭まることも分かる。前項の内容と総合して考えると、式(1-69)と式(1-78)によって液滴が浮遊する音圧の領域が理論的に決定されることがわかる。

1-4-5 理論式による音場浮遊液滴周りの物質輸送の定式化

Yarin ら^[19]は場浮遊させた液滴周りに音波の作用による 2 次流れが生じることを踏まえ、液滴周りの物質輸送のモデル化を行った。

図 1-8 に示すように、音場浮遊液滴周りの流れ場は、境界層近傍の音響流とその外側の双子渦の流れ場到大別できる。図 1-8 に示すような境界層近傍の流れ場はストークス層を形成する。ここでストークス層の厚さ δ は、 $\delta=(2\nu_0/\omega)^{1/2}$ で表される。 ν_0 は周囲流体の動粘性係数を示す。Yarin らはこれらの流れ場に注目し、音波の波長に対して十分に小さい液滴が浮遊した際の物質輸送の定式化を行った。具体的には、Yarin らは、ストークス層内での拡散方程式を解くことで、式(1-79)のように Sh 数を表現した。

$$\overline{Sh} = 2K \frac{B}{\sqrt{\omega D}} \frac{\cos^2 \theta}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta}} \quad (1-79)$$

ここで、 θ は角度を、 B は粒子速度を示している。図 1-8 に示す液滴直下の淀み点にて $\theta=0$ をとり、液滴上部の淀み点にて $\theta=\pi$ と設定している。よって、式(1-79)は鉛直方向軸対称となる。定数 K は式(1-80)のように導かれ、液滴の物性値、形状、音波の性質にのみ依存する。

$$K = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\overline{\langle u_\infty \rangle \mathbf{r}}}{\sqrt{\int \langle u_\infty \rangle \mathbf{r}^2 d\mathbf{x}}} \sqrt{\frac{\omega r / c_0}{A / (\rho_0 c_0^2)}} \quad (1-80)$$

$\langle \rangle$ は空間平均を表す。 $\overline{u_\infty}$ は液滴表面全体のストークス層外縁での流速の時間平均を示している。Yarin らは $\overline{u_\infty}$ を式(1-81)のように定式化した。

$$\overline{u_\infty} = \frac{45}{32} \frac{B^2}{\omega r} \sin 2\theta \quad (1-81)$$

式(1-81)を用いて流速を計算すると、 $u_\infty \cong 1$ [m/s] となる。そのため、この境界層外縁での流動は更なる対流を誘起する。そのため、 Sh 数は単なる拡散のみを考慮したものより大きくなることが考えられる。時間・空間平均 Sh 数は、

$$\overline{\langle Sh \rangle} = K \frac{B}{\sqrt{\omega D}} \quad (1-82)$$

となる。特に小液滴を浮遊させた場合には、式(1-83)のように近似できる。

$$\overline{\langle Sh \rangle} = 1.89 \frac{B}{\sqrt{\omega D}} \quad (1-83)$$

実用上の理由で、式(1-83)を rms 値を用いた表記に変形すると、

$$\begin{aligned} B_{rms} &= \sqrt{2}B \\ K_{rms} &= \frac{K}{\sqrt{2}} \\ \overline{\langle Sh \rangle} &= 1.336 \frac{B_{rms}}{\sqrt{\omega D}} \end{aligned} \quad (1-84)$$

となる。

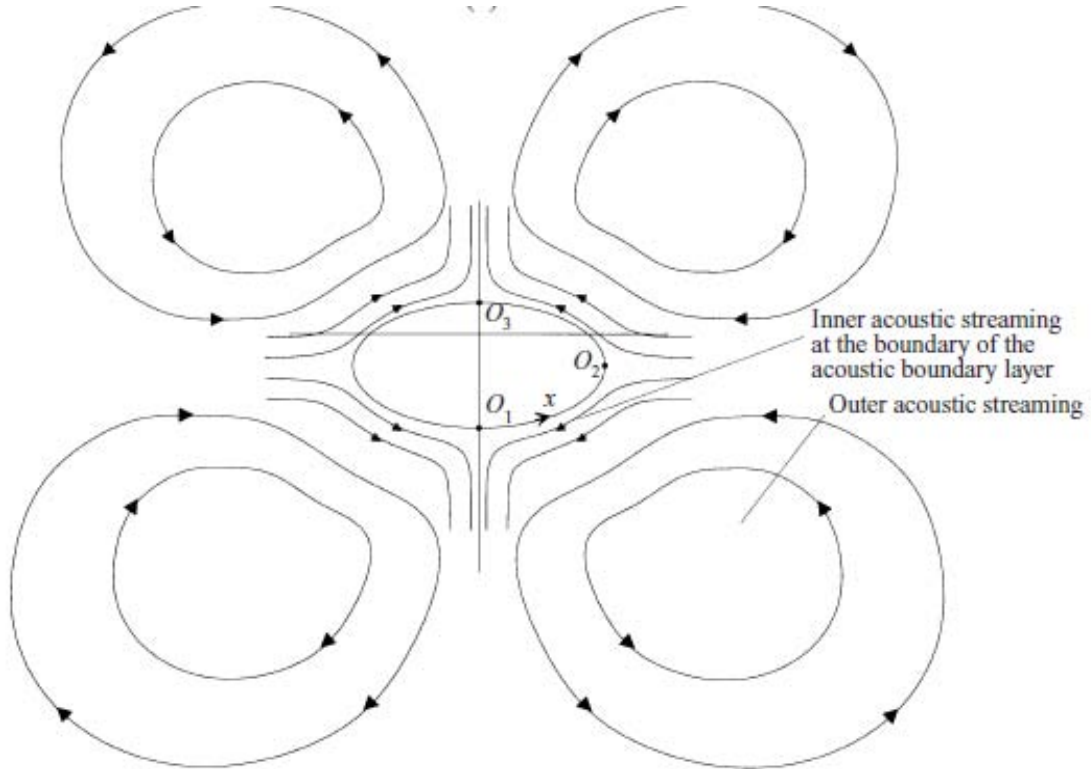


Fig.1-8 液滴周りの音響流による流れ場

1-5 目的

本研究では、微小重力環境下における物体制御技術として超音波の利用を考え、その基礎技術を確立するとともに、その特性を把握することを目的とする。その最終的な目的のための本論文の構成を図 1-9 に図示し、以下に章ごとの目的を示す。

第 2 章 液滴浮遊システム

通常重力環境下において、液滴を安定に浮遊可能なシステムを構築することと、実験用航空機を用いた微小重力実験のための液滴浮遊システムを構築することを目指した。

第 3 章 実験結果

構築した液滴浮遊システムを用いて、通常重力環境下および微小重力環境下で液滴浮遊実験を行うことにより、超音波の強度と浮遊可能な液滴径および液滴の扁平率の関係を調べ、液滴浮遊特性を把握することとした。また、実験により計測したデータをもとに保持可能な液滴径の上限について検討することとした。

第 4 章 数値解析

ナビエストークス方程式を直接的に扱う数値解析を用いた超音波の音響定在波による高周波の圧力、速度の変動場を評価手法と、音響定在波中の浮遊液滴の挙動を評価可能な数値解析手法を構築することを目指した。

第 5 章 数値解析結果

4 章で構築した解析手法を用いて音響定在波の多次元的な圧力場、速度場を解析するとともに、それらの場の特性を把握することとした。また、構築した浮遊液滴の挙動を評価可能な数値解析手法を用いて、音響定在波中の浮遊液滴挙動の特性を調べ、浮遊液滴に働く保持力について検討することとした。

第 6 章 液滴浮遊の応用技術

超音波の音響定在波による物体保持技術の応用として、浮遊水滴に対する非接触での表面張力測定と粘性係数測定を行うことによって、本技術によって空間中に保持した液滴の非接触物性測定の実現可能性を検討することとした。また、計測結果を通じて、液滴の変形の要因について検討することとした。

緒言(1章)

従来の知見の確認

地上実験・航空機を用いた微小重力実験(2章・3章)

浮遊システムの確立

流体浮遊特性の把握

ナビエーストークス方程式の直接解析・液滴挙動解析(4章・5章)
(高周波)圧力変動場の解析

(低周波)平均速度・圧力場の評価

音響定在波による液滴保持力の解明

液滴浮遊技術の応用(6章)

粘性係数・表面張力測定

結言(7章)

得られた知見のまとめ

Fig1-9 本論文の構成

第2章 液滴浮遊システム

2-1 通常重力環境下における液滴浮遊システムの構築

図 2-1 に本研究で構築した実験システムを示す。コンピュータから正弦波信号を発振し、D/A 変換機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。また、液滴の挙動はデジタルビデオカメラとハイスピードビデオカメラを用いて観測した。

図 2-2 にコンピュータから上下アンプに入力する正弦波信号の振幅を 0.5V としたときの正弦波の振動数と超音波振動子への入力電力との関係を示した。横軸に周波数、縦軸に入力電力をとっている。図 2-2 より上下それぞれのホーンがピークをとる周波数の値に差が生じていることがわかる。このことは、二つのホーンに液滴を浮遊するのに十分大きな電力を同時に供給するためには、上下二つのホーンに供給する入力信号の周波数をそれぞれのホーンに対して異なる値に設定することが必要であることを示すものである。そこで、本実験装置では 2 台の D/A 変換機を用いて、上下のホーンそれぞれに適した周波数の正弦波を入力できるシステムとすることにより、1 台のみの D/A 変換機の使用では困難である上下のホーンに同程度の電力を同時に入力することを可能としている。また、本超音波発信システムの共振の度合を表す Q 値は、図 2-2 に示すようにそれぞれ 417.9、407.4 であった。また、本システムを用いて浮遊させた水滴の画像を図 2-3 に示す。この画像から、本システムを用いて複数の水滴をホーン中心軸上に安定して保持可能であることがわかる。

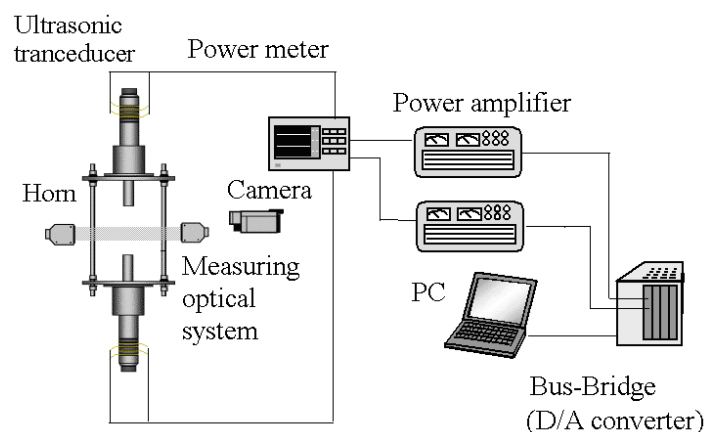


Fig.2-1 実験システム

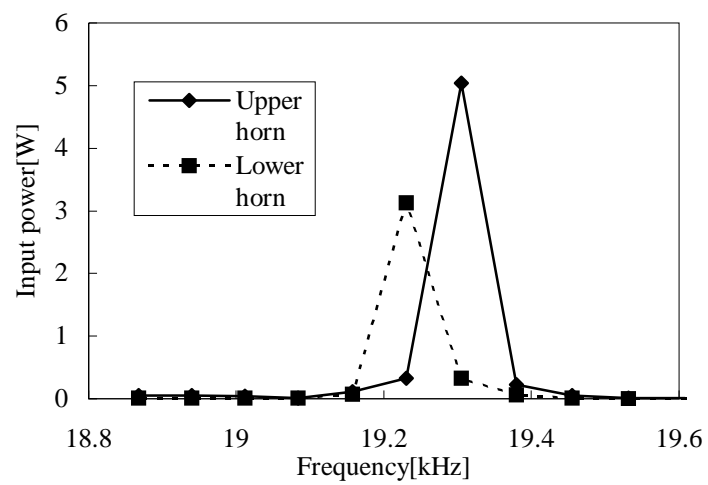
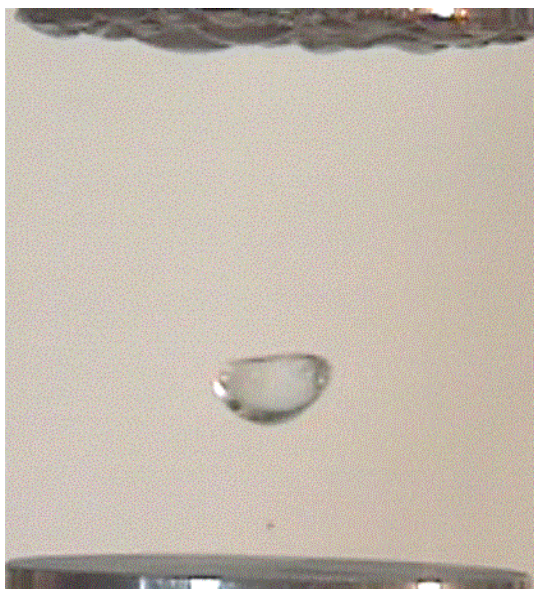
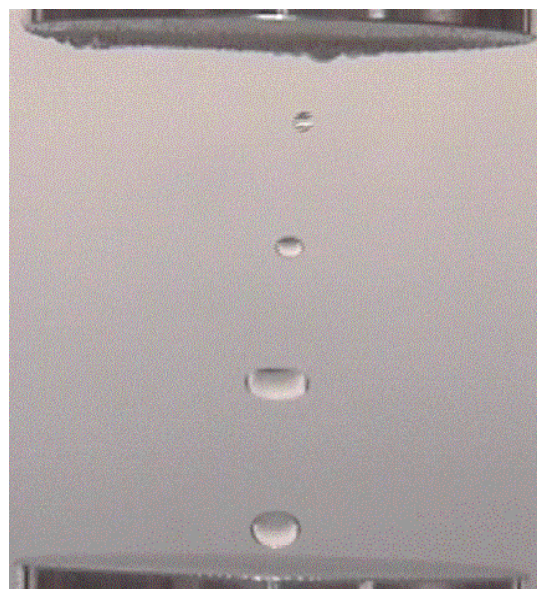


Fig.2-2 超音波発振システムの周波数特性



(a) 最大水滴



(b) 複数の水滴浮遊

Fig.2-3 浮遊水滴画像

2-2 微小重力環境下における水滴浮遊システムの構築

2-2-1 微小重力実験概要

微小重力実験は図 2-4 に示すカナダ航空宇宙局が所有する航空機 FALCON20 を使用して行う。図 2-5 に示すような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。この重力の変化の一例を図 2-6 に示す。このデータは航空機に搭載された加速度計によって計測された鉛直方向の加速度であり、通常重力の約 2 倍の重力が生じた後、微小重力が約 20 秒程度生じ、再び 2 倍の重力が生じていることが示されている。この微小重力環境を利用し、第四章で述べた液滴浮遊の実験を実際の使用環境である微小重力環境下で行うことにより、液滴挙動の地上実験との違いを調べることにした。

2-2-2 実験装置の構成

微小重力実験に用いるシステムの基本的な構成は 2-1 で述べた地上実験用システムと同様であるが、実験用航空機内に設置するため、カナダ航空宇宙局から提示された大きさ、重量、強度を満たすよう製作したフレームに機器を搭載した。そのフレームに機器を搭載した画像を図 2-7 に示す。

2-2-3 実験装置の強度計算

航空機を用いた微小重力実験にあつては搭載した実験装置が安全に設置、浮遊できることが要求され、実験前にそのための安全審査が行われ、その審査に合格しなければ、実験を実施することができない。そこで、実験機器を収めて航空機に設置するためのフレームの設計、強度解析を行った。実験装置を航空機に搭載するにあたって、航空機の進行方向を x 軸としたとき、 $\{x,y,z\}$ 方向への重力レベルがそれぞれ $\{9,3,6\} g$ に耐えられなければならない。図 2-8(a) と図 2-8(b) に示すように、フレームはアンブ搭載用とテスト部搭載用の 2 台に分かれており、それぞれについて強度解析を行った。

プレートの強度解析は簡単のため、図 2-9 のようにプレートを複数の集中過重がかかっているはりと仮定し、鉛直方向の加速度 $6 g$ の条件下での強度計算を行った。まずプレートのモーメントの分布を求め、そこから得られた最大モーメント M_{max} と断面二次モーメント I を用いて最大せん断応力 σ_{max} が

$$\sigma_{max} = \frac{dM_{max}}{2I}$$

と表され、断面 2 次モーメント I は、プレートの厚さ d とプレートの幅 b より

$$I = \frac{bd^3}{12}$$

であるから、

$$\sigma_{max} = \frac{6M_{max}}{bd^2}$$

となる。また、材料の許容せん断応力を σ 、安全率 f を

$$f = \frac{\sigma}{\sigma_{\max}}$$

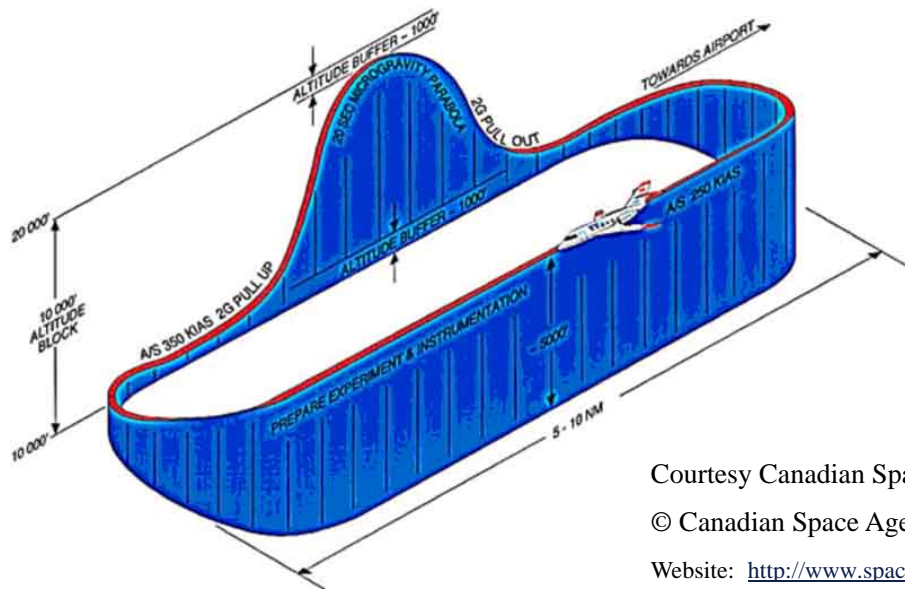
として計算を行った。その結果を表 2-1 に示す。その結果、カナダ航空宇宙局の要求仕様を満たしていることを確認した。

ボルトの強度解析は、各方向にかかる重力レベルの中で最大となる航空機の進行方向である x 方向 $9g$ を基準にして行った。 $9g$ の条件下での各プレートに搭載する機器の合計の過重を図 2-10 のように算出し、その合計の過重をプレートとフレームに固定するボルトの本数で割り、さらにボルトの断面積で割ることにより、ボルトにかかるせん断応力を算出した。その結果得られたせん断応力を許容せん断応力と比較し、プレートの強度解析と同様に安全率を算出した結果を表 2-2 に示す。その結果、カナダ航空宇宙局の要求仕様を満たしていることを確認した。

本実験システムを用いて微小重力環境下において浮遊に成功した水滴を図 2-11、図 2-12、図 2-13 に示す。この微小重力実験におけるホーン間距離は 49mm である。図 2-11 は今回の微小重力実験で、浮遊に成功した液滴の中で最大の径を持つ液滴を浮遊している画像である。図 2-3(a) に示す地上実験での最大液滴と比較すると、より扁平の度合いが小さく球に近い形状となっているが、真球とはなっていない。図 2-12 は扁平の度合いが大きい液滴の画像である。これらの画像から微小重力環境下においても浮遊した液滴が扁平になることがわかる。また、図 2-13 はホーン間に 5 個の水滴を同時に浮遊している画像であり、この時の浮遊位置は下側ホーン先端より、 7mm 、 16mm 、 25mm 、 34mm 、 44mm である。これらの浮遊水滴の画像より、本システムを用いて微小重力環境下において浮遊液滴を安定して浮遊可能であることを確認した。



Fig.2-4 実験用航空機 FALCON20



Courtesy Canadian Space Agency
 © Canadian Space Agency 2002
 Website: <http://www.space.gc.ca>

Fig.2-5 パラボリックフライト概要

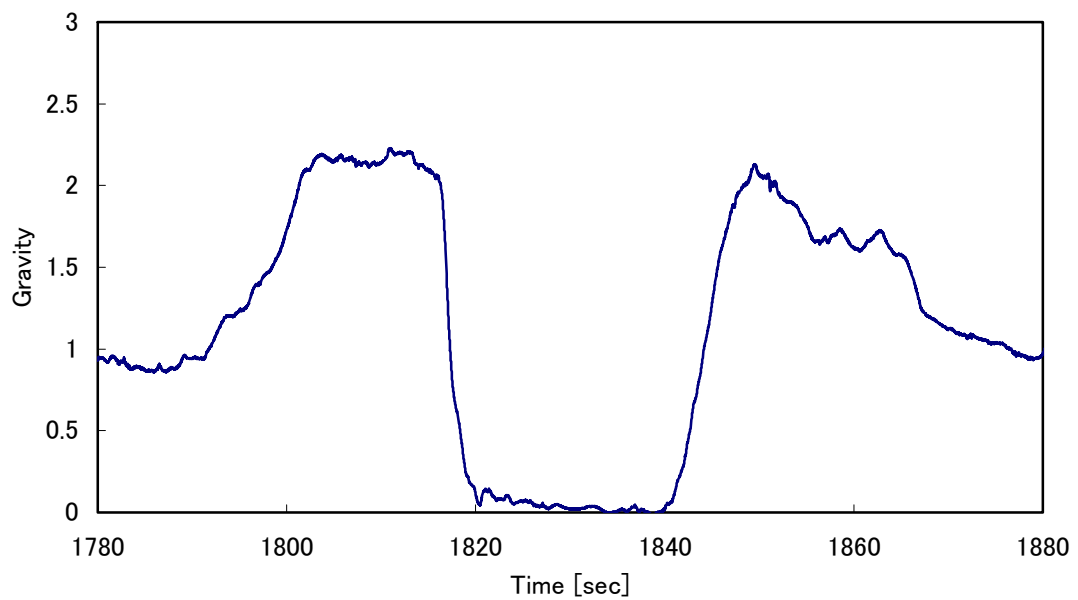


Fig.2-6 鉛直方向の重力の時間変化

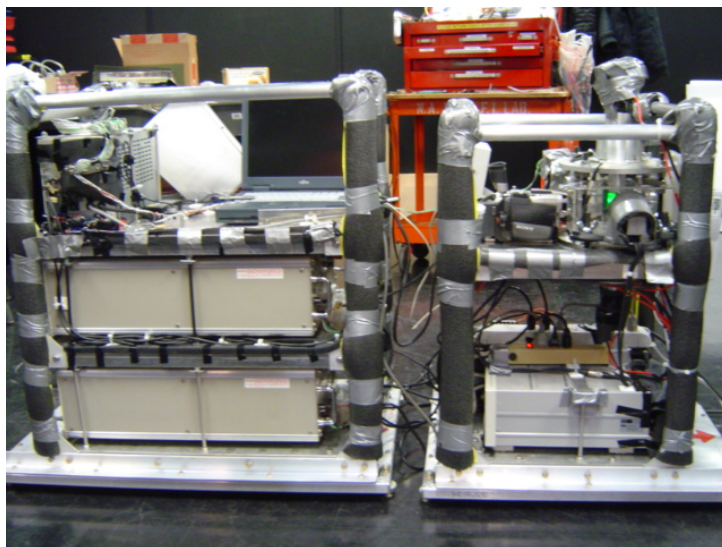


Fig.2-7 微小重量実験用実験装置

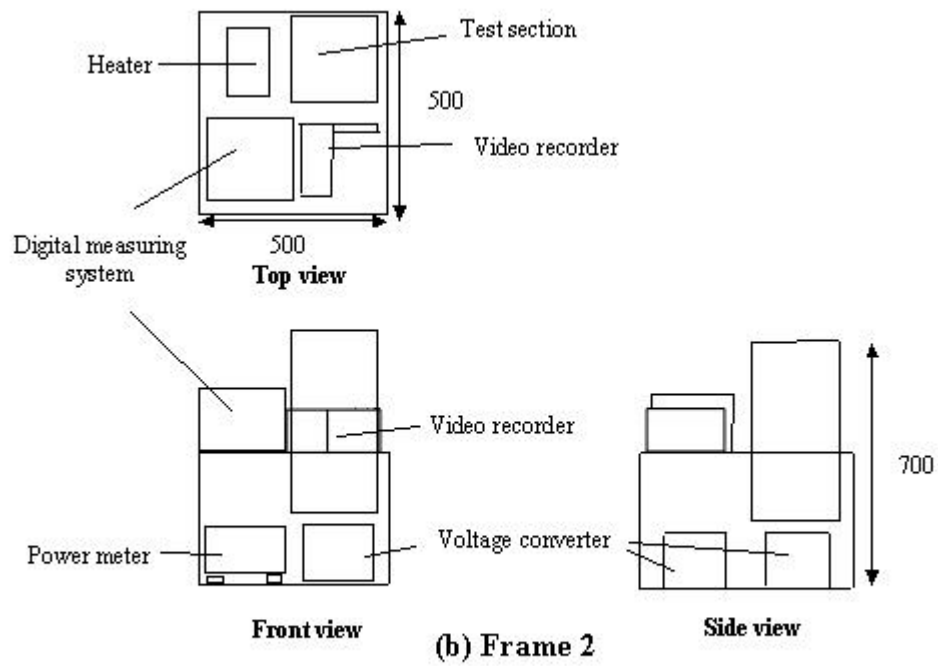
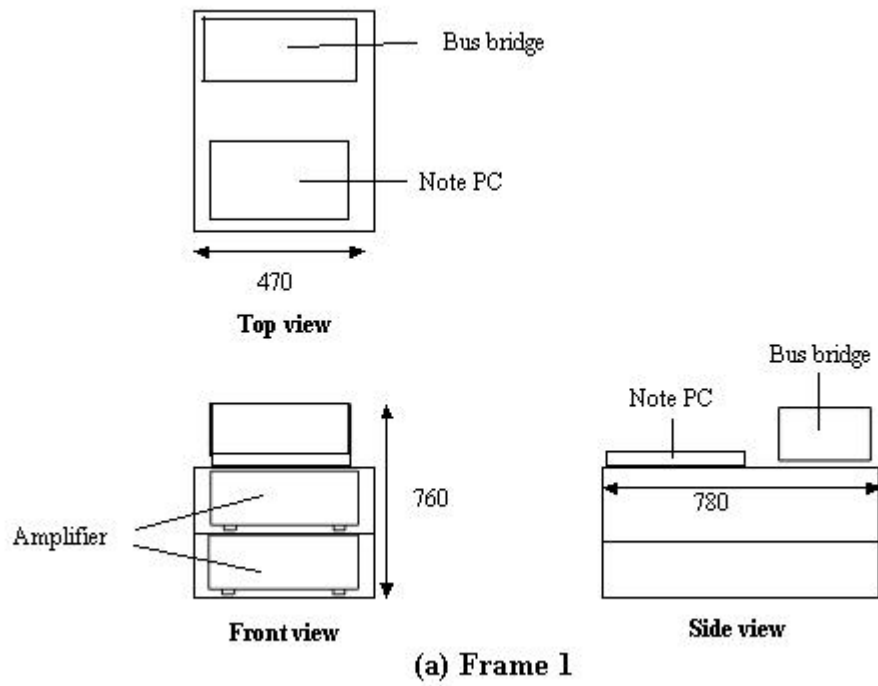


Fig.2-8 微小重力実験用機器配置図

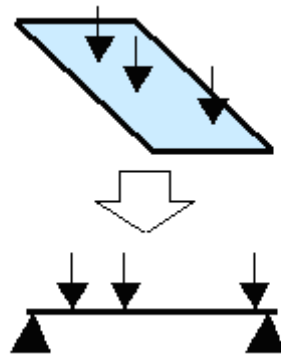
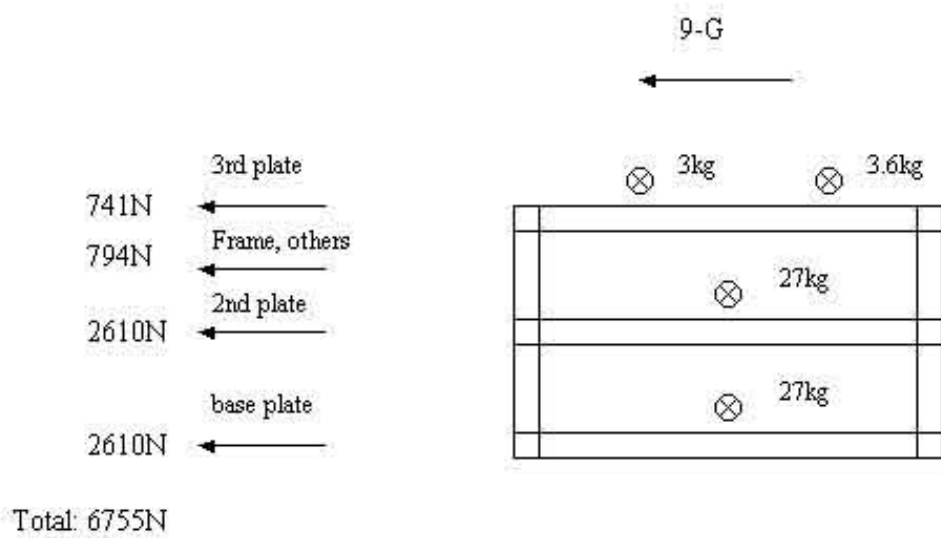
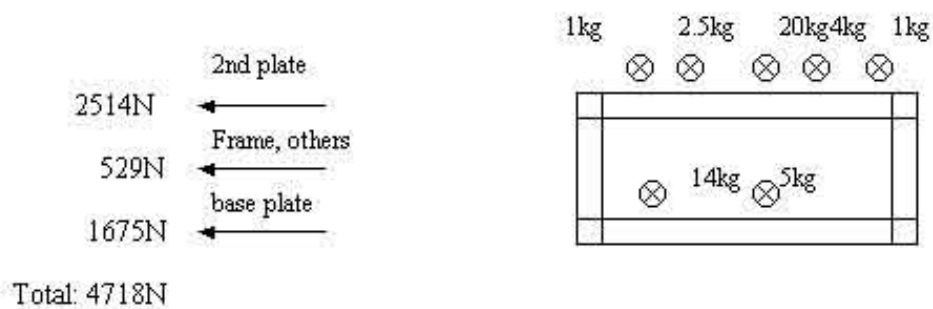


Fig.2-9 プレート強度解析概念図



(a) Frame 1



(b) Frame 2

Fig.2-10 航空機進行方向せん断力

Table 2-1 プレート強度解析結果

	Item	Mmax[N・m]	σ [MPa]	σ max[MPa]	f
Frame1	base	269	63.59	107	1.68
	2nd	269	63.59	107	1.68
	3rd	38	20.21	107	5.29
Frame2	base	145	33.56	107	3.19
	2nd	71	36.98	107	2.89

Table 2-2 ボルト強度解析結果

	Items	Bolt	n	Stress area[m ²]	Shear force at 9-G[N]	Shear stress at 9-G[MPa]	Allowable shear stress[MPa]	Safety factor
Flame1	Base plate	M8	4	37.58	2610	17.36295902	82	4.72
	2nd plate	M8	4	37.58	2610	17.36295902	82	4.72
	3rd plate	M8	4	37.58	741	4.929483768	82	16.63
	Amplifier	M8	4	37.58	2381	15.83954231	82	5.18
	Amplifier	M8	4	37.58	2381	15.83954231	82	5.18
	Personal computer	M8	4	37.58	265	1.762905801	82	46.51
	Bus bridge	M8	4	37.58	353	2.348323576	82	34.92
Flame2	Base plate	M8	4	37.58	1675	11.14289516	82	7.36
	2nd plate	M8	4	37.58	2514	16.72432145	82	4.90
	Test section	M8	4	37.58	1764	11.73496541	82	6.99
	Converter	M8	4	37.58	1235	8.21580628	82	9.98
	Converter	M8	4	37.58	1235	8.21580628	82	9.98
	Heater	M8	4	37.58	88	0.585417775	82	140.07
	Measuring system	M9	4	37.58	370	2.461415647	82	33.31

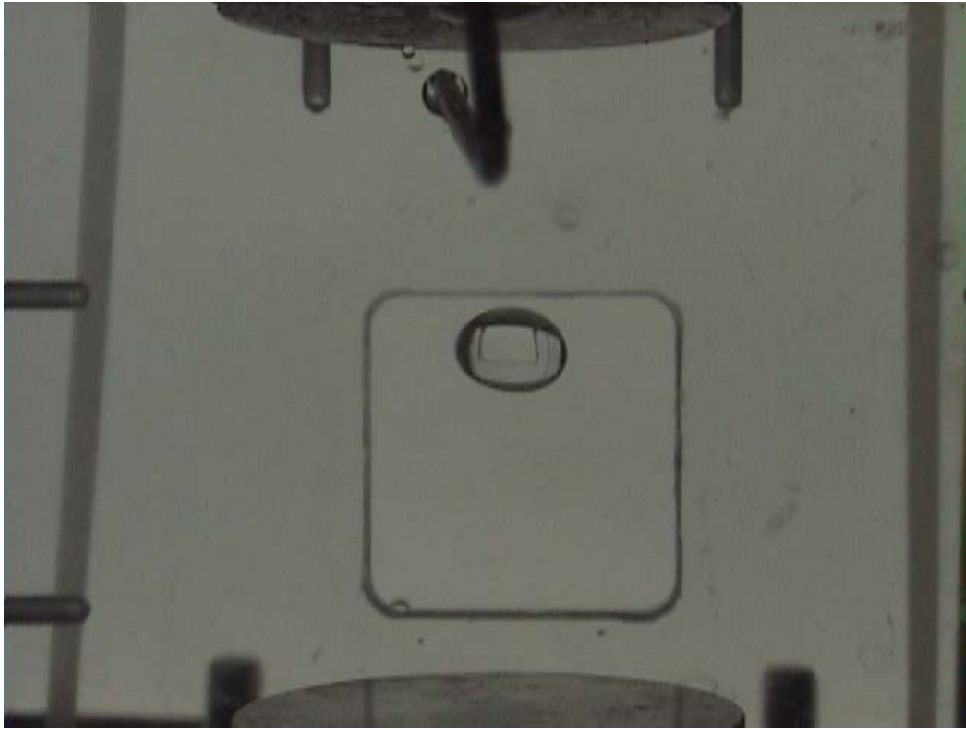


Fig.2-11 微小重力実験における最大水滴

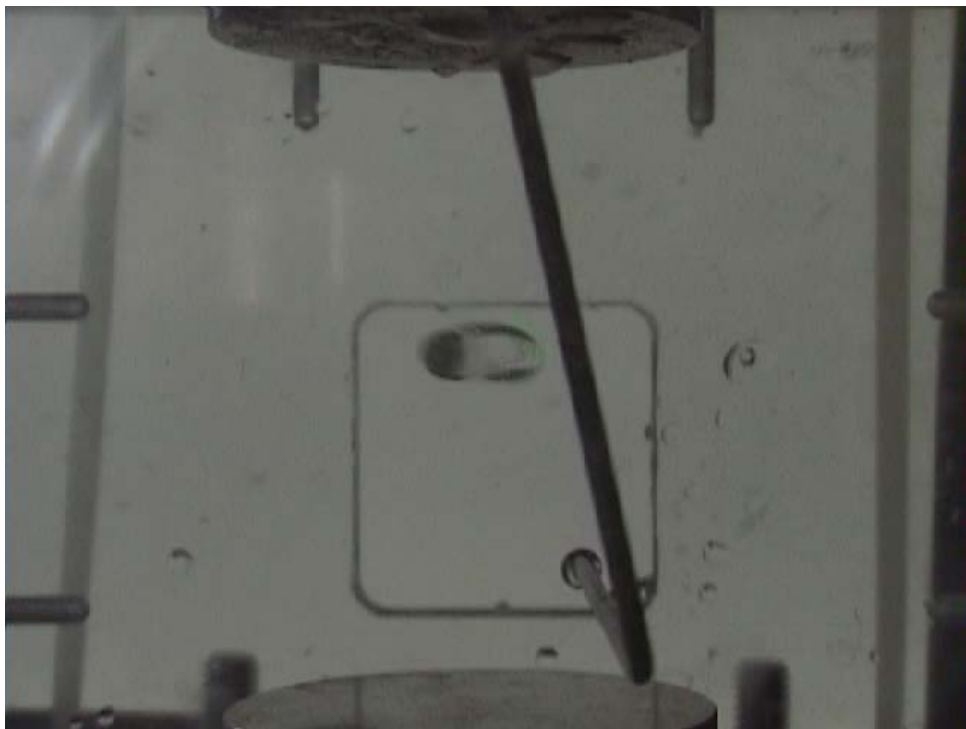


Fig.2-12 微小重力実験における扁平に変形した水滴



Fig.2-13 微小重力実験における多数の液滴の同時浮遊

2-3 本章のまとめ

超音波の音響定在波を用いて液滴を浮遊させるシステムを構築し、水滴の浮遊実験より、本研究で構築したシステムを用いて、地上の通常重力環境下において液滴を安定に浮遊できることを確認した。

また、カナダ航空宇宙局が所有する実験用航空機を用いた微小重力実験のために液滴浮遊システムを構築し、微小重力環境下での水滴浮遊実験により、本研究で構築した超音波の音響定在波による液滴浮遊システムによって、微小重力環境下において液滴を浮遊できることを確認した。

第3章 実験結果

3-1 通常重力環境下における常温水滴浮遊実験結果

3-1-1 実験概要

この実験では、2章に示した浮遊システムを用いて通常重力環境下の常温の空気中における水液滴および低粘性流体であるラウリン酸液滴の浮遊特性を調べた。

3-1-2 浮遊水滴径測定結果

図 3-1 に超音波振動子への入力電力と浮遊できた最大の液滴直径との関係を示す。入力電力が約 8W から 35W の範囲において最大約 7mm の液滴が浮遊できることがわかる。入力電力が約 35V 以上の領域においては、浮遊した液滴の振動が激しくなることによって大液滴の浮遊が困難となり、また入力電力が約 8W 以下の領域においては液滴を全く浮遊できなかった。これらのことから、液滴を浮遊するのに適した入力電力があることがわかる。

3-1-3 浮遊水滴の扁平率

超音波振動子への入力電力と液滴の扁平率との関係を図 3-2 に示す。ここでの扁平率は、液滴の水平方向の直径を鉛直方向の直径で割ったものと定義する。この実験も下側ホーンのみで駆動を行い、水滴の浮遊に成功した後、振動子への入力電力を連続的に変化させて、同一の液滴の直径の変化をビデオ映像より測定した。図 3-2 より、超音波振動子への入力電力の増加に伴って、扁平率が増加して液滴の形状がより円盤状に近づくことがわかる。この結果から、超音波の音圧が液滴の円盤状への形状変化を引き起こすことが示された。

3-2 ラウリン酸液滴浮遊実験結果

液滴の物性と液滴の温度、および液滴の凝固が超音波による浮遊に与える影響を調べるために、低融点物質であるラウリン酸を用いて浮遊実験を行った。実験装置としては、水液滴浮遊実験と同じ装置を用い、ヒーターで溶融させたラウリン酸を、シリンジを用いて音響定在波を形成させたホーン間に注入することによって行った。試料としてラウリン酸を選定したのは、融点が低く容易に溶融させられる事と密度が水に近い程度で軽いという性質からである。この条件に合う物質の候補として表 3-1 に示すような候補が挙げられた。これらの物質の中で、スクシノニトリルには毒性、メントールには強い臭いがあるので除外した。残ったラウリン酸、安息香酸無水物、オクタデカノールの中から融点・価格などから判断して本研究ではラウリン酸を試料として使用することとした。

溶融液滴としてラウリン酸を用いた実験について、図 3-3 にその実験の画像を示す。この時の溶融ラウリン酸の初期温度は 120℃、入力パワーは 40W であった。テスト部内にシリンジにてラウリン酸を注入すると、液滴がある程度の大きさになると液滴が横に引きちぎ

られて微粒化してしまい浮遊することが出来なかった。

図 3-4 にシリンジを使用してテスト部内に微量量のラウリン酸を注入し、さらに入力パワーを 20W と小さくした時の結果を示す。図 3-4 のように溶融ラウリン酸を定在波中に浮遊できること、また空中に浮遊された溶融ラウリン酸は薄い円盤状となる事を確認した。水の液滴を空中に浮遊した場合も 2 章に示すように、上下につぶれた扁平な球へと変形するが、円盤状とまでは至らなかった。これは、ラウリン酸の表面張力が水よりも小さいことが原因だと思われる。

また、溶融ラウリン酸を浮遊した後、それが外気により自然冷却されラウリン酸が固化した後も、空中に安定して浮遊できることを確認した。

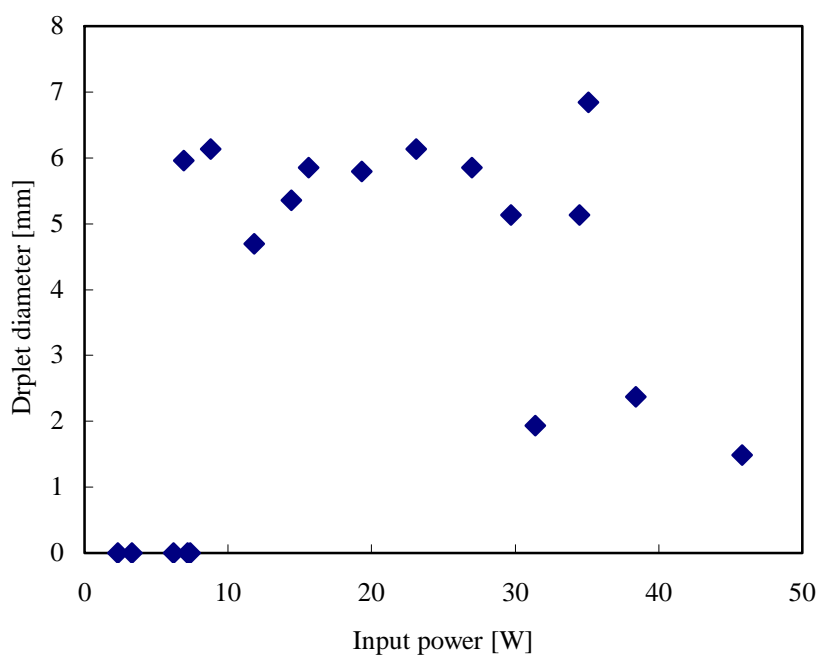


Fig.3-1 超音波振動子への入力電力と液滴径

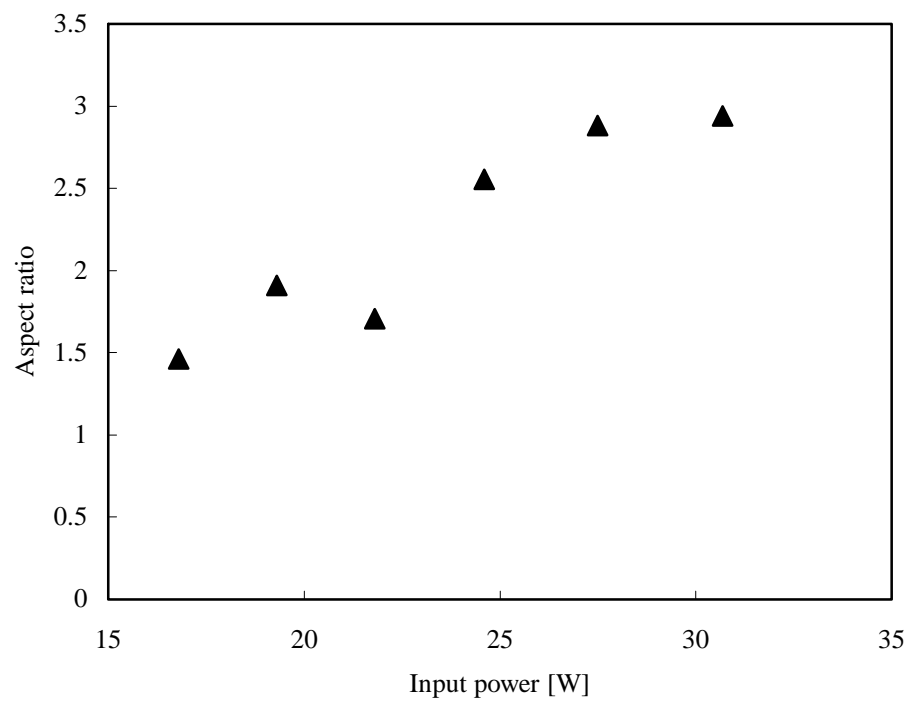


Fig.3-2 超音波振動子への入力電力と扁平率

Table 3-1 薬品データ

薬品名	融点(°C)	沸点(°C)	比重	その他
ラウリン酸	43～46	225	0.883	—
スクシノニトリル	54.5	265～267	0.985	毒性
安息香酸無水物	38～44	360	1.119	—
1-オクタノール	57～60	210	0.8124	—
L(-)-メントール	42～45	216	—	はっか臭

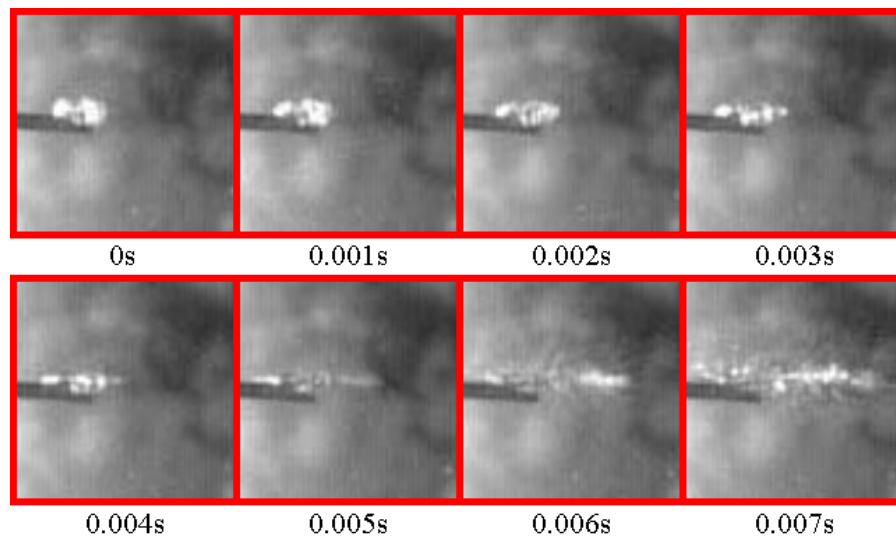


Fig. 3-3 溶融ラウリン酸の微粒化

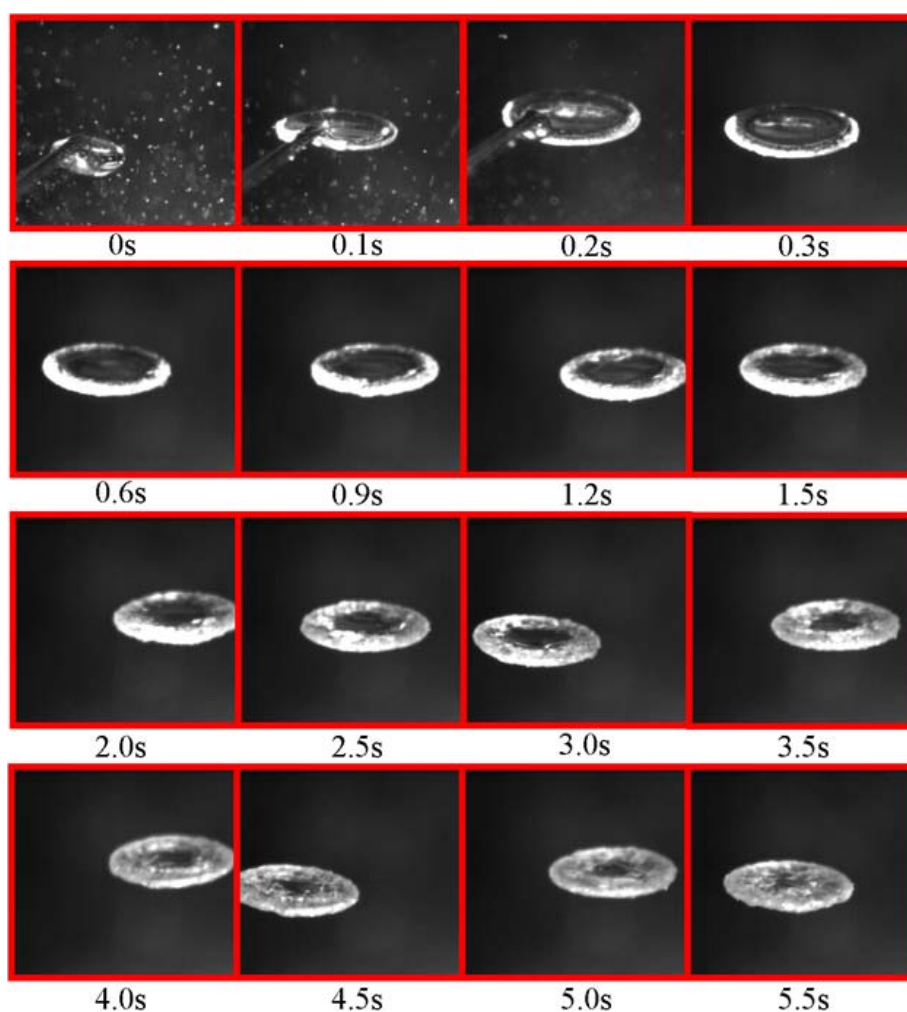


Fig. 3-4 溶融ラウリン酸の無容器凝固

3-3 速度分布計測

3-3-1 速度分布計測方法

音響定在波中の流動を計測するために、音響定在波中の流体にトレーサ粒子を混入した。トレーサ粒子としては、ネブライザにより発生させた平均粒子径が $5\mu\text{m}$ の水粒子を用いた。さらに、計測対象部外からの外乱を防ぐことと、トレーサの拡散を防ぐために、計測対象部をチャンバー (W350×H300×L360) で覆った。このチャンバーは音響定在波への影響を防ぐために音波を透過し、かつ可視化画像取得のため高透明なフィルムで構成される。そして、その流体に対してシリンドリカルレンズを用いてシート状にしたレーザを照射し、高速度ビデオカメラで撮影することにより、音響定在波中の 2 次元断面のトレーサの画像を取得した。そして、この撮影した画像から PIV (Particle Image Velocimetry) と呼ばれる手法^[20]を用いて、撮影した 2 次元断面の 2 次元速度場を評価した。この PIV に用いる画像撮

影の際に、浮遊物体が無い条件では画素数を $512 \times 1024 \text{ pixel}$ とし、浮遊物体周囲の流動を詳細に計測する際には $256 \times 256 [\text{pixel}]$ とした。また、撮影速度は 8000 fps 、シャッタースピードを $125 \mu \text{ s}$ とし、3000 枚の画像を用いて平均化処理を行った。

また、音響定在波内の圧力を定量的に計測するため、定在波を形成させた後、ホーン中心軸上の鉛直方向 1 次元圧力分布をプローブマイクロフォンを用いて計測した。計測した定在波中で主に液滴を浮遊させる下側から数えて三つ目の節の上下の腹の位置の圧力の平均値を、その実験ケースの音響定在波の強さを示す圧力とした。

3-3-2 浮遊物体が無い場合の計測結果

図3-5にテスト部内の流動を撮影した原画像とその平均速度ベクトル場を示す。図3-5(a)に示す原画像ではホーン間にネブライザによって発生させた水のみストによるトレーサ粒子が確認できる。図3-5(b)には、テスト部内に物体を浮遊させていない空気単相での平均速度ベクトル図の一例を示す。図中横軸は水平方向距離 x を、鉛直方向距離 y を用いている。ホーン中心軸($x = 0 \text{ mm}$)において下部ホーンから上部反射板に向かう上昇流が発生していることが確認できる。この上昇流は左右両側から流れ込み、 $x = -9 \text{ mm}$ 、 $y = 19 \text{ mm}$ および $y = 23 \text{ mm}$ 、 $x = -9 \text{ mm}$ において渦を形成している。

図3-6には音響定在波の強さをパラメータにし、各値での平均速度ベクトル図を示す(圧力振幅：1.4、2.0、2.2、2.5、2.8、3.2kPa)。この結果より、このテスト部内の流動は、音響定在波の強さによって変化する傾向が見える。圧力振幅が2.8kPaまでの平均速度ベクトル図では、下部ホーンから上部反射板に向かう上昇流動が観測されている。圧力振幅が1.4kPaでの流動は2.8kPaでの流動と比較して、急激に流速が遅くなっている。反対に、圧力振幅が3.2kPaでの流動では、それまで形成されている上昇流動が乱され、乱流に似た流速分布が形成されている。このように、液滴を浮遊させていない空気単相でのテスト部内の流動場は音響定在波の強さの影響を大きく受ける可能性があることがわかった。

図 3-6 の結果からもわかるように、(a)-(e)までの結果ではテスト部ホーン中心軸上($x = 0 \text{ mm}$)において $y = 19 \text{ mm}$ 以降では鉛直方向流速が支配的である。この結果からもテスト部には上昇流が存在していることが確認できる。また、流速に関しては、(a)-(e)の結果の中では、(c) に示す流れ場が鉛直方向の最大流速を示した。このように音響定在波の強さに比例して流速が上昇していない。この結果はテスト部内には流れの駆動力が音圧しか存在しないことと齟齬する。この結果の定量的なデータには PIV の計測時間の影響が考えられる。本実験結果での計測では、計測時間が 3 秒間であった。そのため、境界条件等により音響流が一時的に速くなった時に計測を行った恐れがある。このことより、今後より長い時間スケールでの計測が必要であると考えられる。

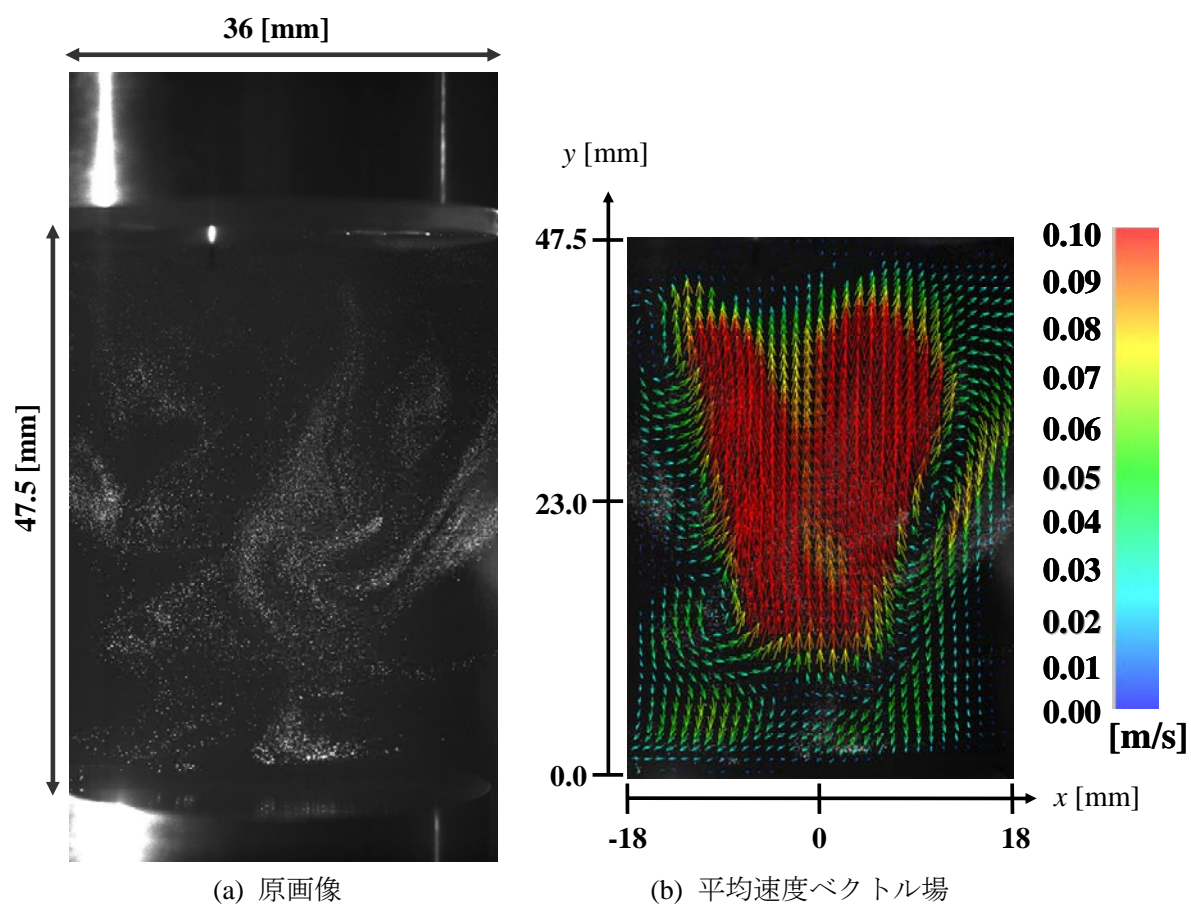


Fig.3-5 浮遊物体が無い場合の音響定在波中の速度場

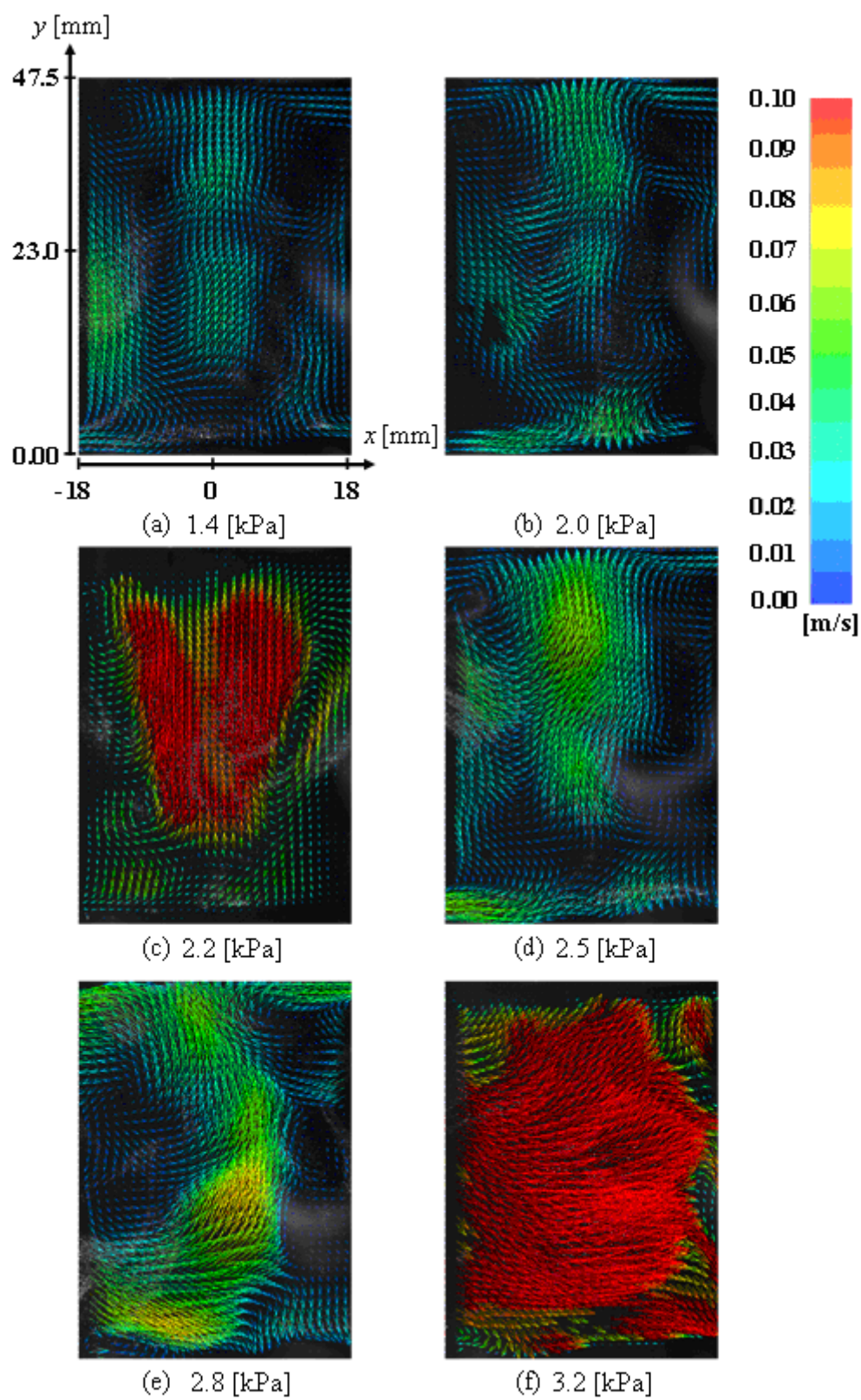


Fig.3-6 速度場に対する音響定在波の強さの影響

3-3-3 浮遊物体周りの速度場

図 3-7 には音場浮遊液滴の外部流動を表す。図 3-7(a)には、PIV 計測によって得られた液滴周囲の流動場を示し、図 3-7(b)には、Rednikov らによって理論的に得られた液滴周囲の流動場を示す。図 3-7(a)において、浮遊させた液滴の下部に 1 対の渦が形成されていることがわかる。この結果と図 3-7(b)を比較してみると、理論的に得られた速度場においても同様の液滴下部の渦が確認できる。

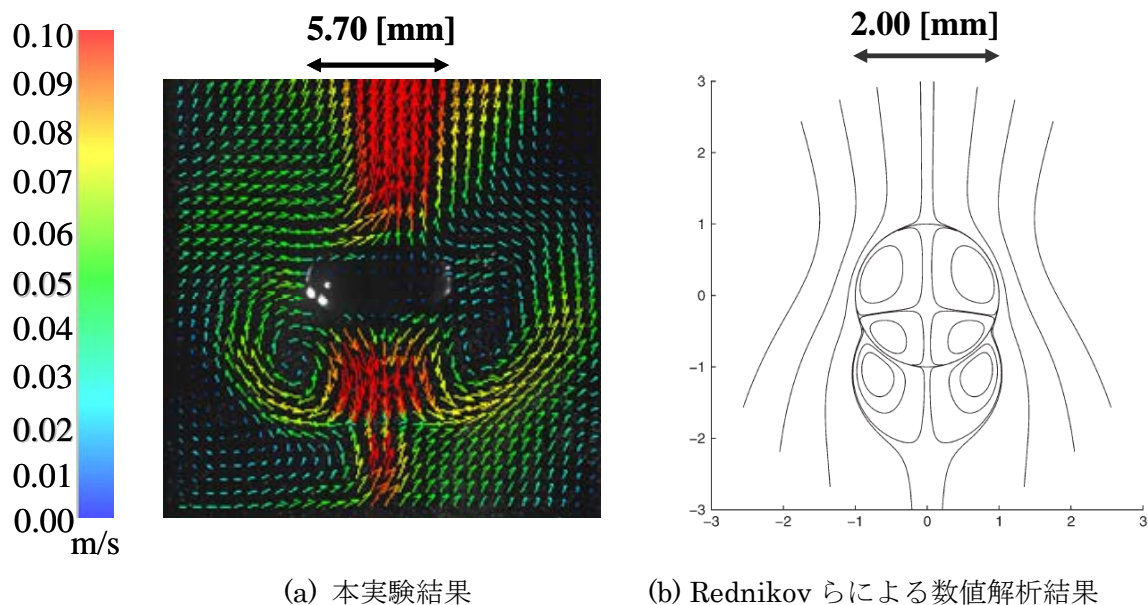


Fig.3-7 音場浮遊液滴の外部流動

(2) 浮遊物体周りの境界条件の影響

本項では、浮遊物体周りの境界条件が液滴周囲の流動に与える影響を調べるために、浮遊物体として水滴と木球を浮遊させて、それらの物体周囲の流動を計測した。

図 3-8 と図 3-9 に、浮遊させた水と固体球周囲の流動場に対して PIV により得た速度場の平均処理を施した結果の一例を示す。実験条件は、音響定在波の強さを示す圧力振幅は 2.2KPa、水液滴の鉛直方向と水平方向の平均直径は 4.4 mm、扁平率は 2.3 となっている。一方、木球は直径が 6.25 mm、扁平率は 1 である。この実験条件は水滴と木球の浮遊位置がほぼ同一となるように設定した。撮影条件は、撮影速度が 8000 fps、シャッタースピードが 125 μ s とした。処理条件は 3000 枚の画像の平均となっている。この撮影条件は本章に渡って同一の条件としている。この結果より、水滴と木球いずれの場合にも、浮遊物体周りには超音波による流動が発生していることがわかる。具体的には、液滴側面からは浮遊物体に向かう流れが生じており、浮遊物体下部・上部からはから離れるようなジェットのように噴出する流れが形成されている。また、物体周囲に渦が発生していることが特徴的である。

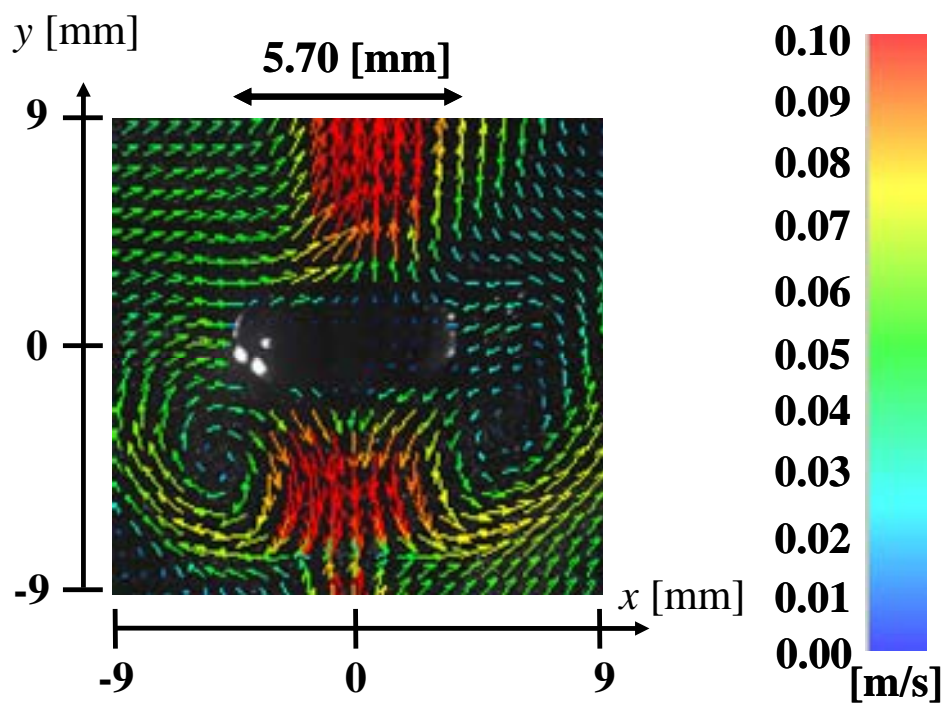


Fig.3-8 水液滴における外部流動の平均速度ベクトル場

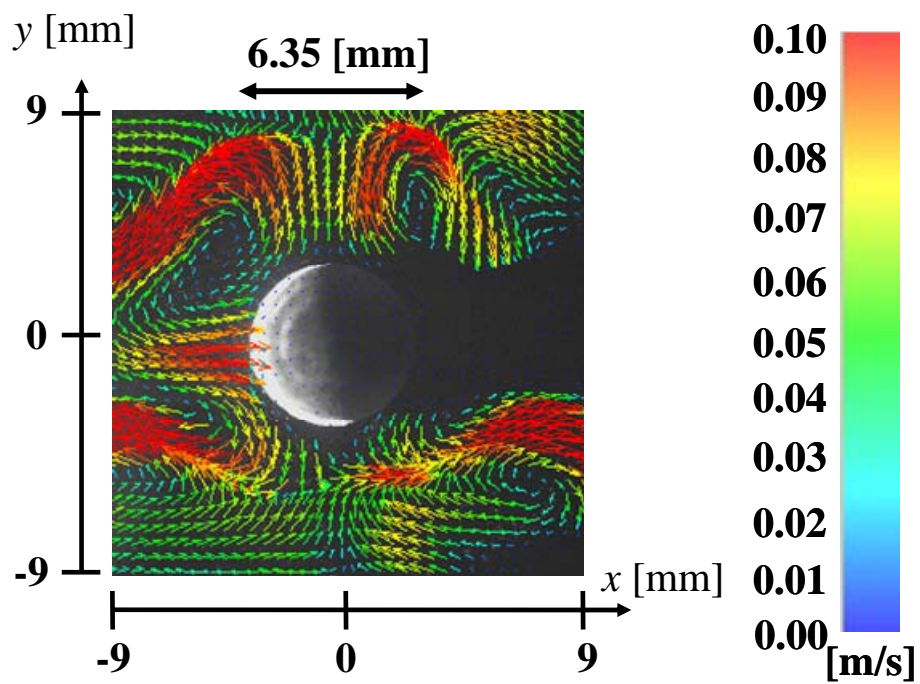


Fig3-9 木球における外部流動の平均速度ベクトル場

3-4 微小重力環境下における水滴浮遊実験結果

2 章に示した水滴浮遊システムを用いた実験の結果を示す。微小重力環境下での入力電力と浮遊に成功した液滴径との関係を図 3-10 に示す。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、液滴の浮遊に必要な入力電力が 10W 程度小さくなるものの、浮遊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。また、通常重力実験と同様、入力電力が 12W 程度より小さい値となると、浮遊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浮遊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浮遊に適した入力電力があることが示された。

入力電力と液滴の扁平率との関係を図 3-11 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 3-11 に示した航空機内で行った通常重力実験において浮遊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。3-1 に示し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。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。

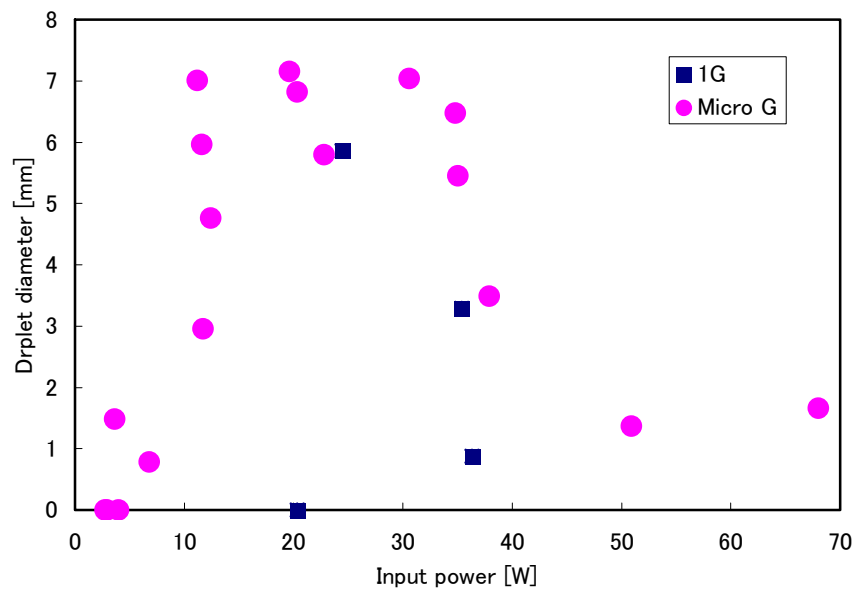


Fig.3-10 微小重力環境下での入力電力と浮遊に成功した液滴径

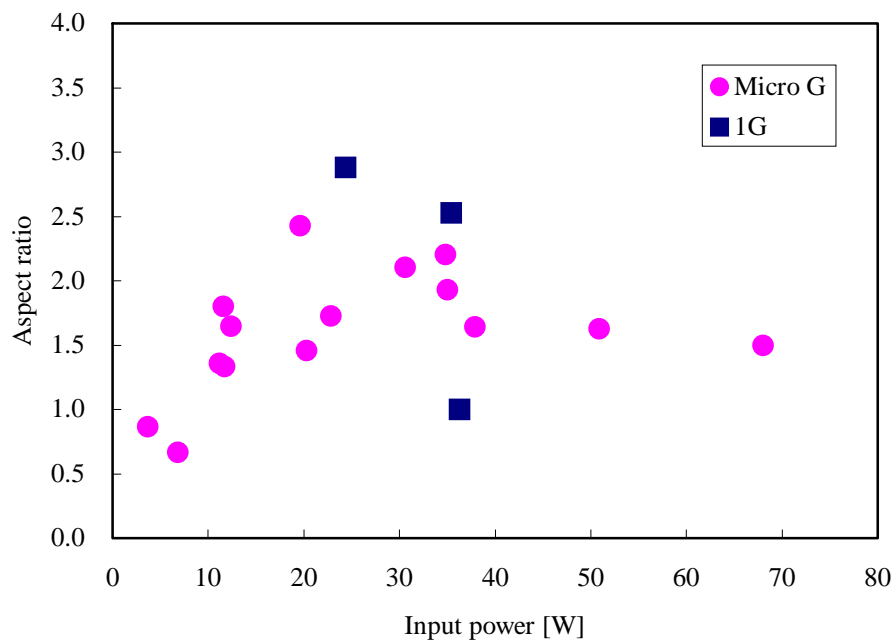


Fig.3-11 微小重力環境下での入力電力と液滴径の扁平率

3-5 本章のまとめ

超音波の音響定在波による水滴、ラウリン酸液滴の浮遊実験を行うことにより、本研究で開発した液滴浮遊システムを用いて、水滴だけではなく熔融ラウリン酸液滴も安定に浮遊できること、ラウリン酸液滴が凝固した後も安定に浮遊できることを示した。また、浮遊できる液滴の大きさと浮遊した液滴の扁平率は、ともに超音波振動子への入力電力に依存し、大液滴を浮遊するのに適した入力電力があること、入力電力の増加に従って、液滴の扁平率が増加し、円盤状の形状に変形することを確認した。

PIV による速度分布計測の結果、浮遊物体が無い状態、浮遊物体が存在するいずれにおいても、音響定在波中に定常的な流れが生じることが示された。また、浮遊物体の周囲には渦を伴う流れが生じることが示された。

また、カナダ航空宇宙局が所有する実験用航空機を用いて微小重力環境下での水滴浮遊実験を行うことにより、微小重力環境下において、浮遊できる最大の液滴径には通常重力環境下との大きな違いが見られなかったこと、液滴の扁平率は低下して液滴の形状が真球に近づくものの、真球の大液滴を浮遊するまでには至らなかったことを確認した。

第4章 数値解析

4-1 音場解析手法

4-1-1 解析概要

音響定在波中の液滴に対して働く力は直接測定することが困難である。そこで、音響定在波による圧力分布と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。

4-1-2 基礎式

計算の基礎式としては式(4-1)、(4-2)に示すナビエ・ストークス方程式、式(4-3)に示す連続の式、式(4-4)に示すエネルギー方程式、式(4-5)に示す状態方程式を用いた。定積比熱は式(4-6)に示す関係式で評価する。計算手法については圧縮性流体を扱うことができる SOLA-ICE 法^[21]を用いた。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + g_x + \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \quad (4-1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + g_y + \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U}{\partial x} + \frac{\partial \rho V}{\partial y} = 0 \quad (4-3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial I}{\partial t} + u \frac{\partial I}{\partial x} + v \frac{\partial I}{\partial y} \right) = & -\rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \\ & + \mu \left[2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$P = a^2 (\rho - \rho_0) + (\gamma - 1) \rho I \quad (4-5)$$

$$C_V = \frac{I}{T} \quad (4-6)$$

4-1-3 数値解析手法

基礎式で表される流れを離散化して表す系を図 4-1 に示す。SOLA 法では解析される領域の周囲に境界セルを層状に設定している。速度 u, v はセルエッジで定義され、圧力の変数 P は、セルの中心で定義されるスタックカードメッシュと呼ばれる解析メッシュを用いる。セルエッジを示す空間のメッシュ点を $\left(i + \frac{1}{2}, j + \frac{1}{2}\right)$ と表し、これを用いて各変数を表す。

$u_{i+\frac{1}{2},j}^n$: 時間 $n\Delta t$ におけるセル (i,j) の右側境界における X 方向の速度

$v_{i,j+\frac{1}{2}}^n$: 時間 $n\Delta t$ におけるセル (i,j) の右側境界における Y 方向の速度

$P_{i,j}^n$: 時間 $n\delta t$ におけるセル(i,j)の中央における圧力

δx_i : セル(i,j)におけるセルの X 方向の幅

δy_j : セル(i,j)におけるセルの Y 方向の幅

これらを用いて基礎式を差分化する。

まず、質量流束を求める。

$$(\rho u)_{i+\frac{1}{2},j} = (1-\alpha) \frac{\rho_{i+1,j}^n + \rho_{i,j}^n}{2} u_{i+\frac{1}{2},j} + \alpha \frac{\left[\rho_{i+1,j}^n \left(u_{i+\frac{1}{2},j} - \left| u_{i+\frac{1}{2},j} \right| \right) + \rho_{i,j}^n \left(u_{i+\frac{1}{2},j} + \left| u_{i+\frac{1}{2},j} \right| \right) \right]}{2} \dots (4-7)$$

$$(\rho v)_{i,j+\frac{1}{2}} = (1-\alpha) \frac{\rho_{i,j+1}^n + \rho_{i,j}^n}{2} u_{i,j+\frac{1}{2}} + \alpha \frac{\left[\rho_{i,j+1}^n \left(v u_{i,j+\frac{1}{2}} - \left| u_{i,j+\frac{1}{2}} \right| \right) + \rho_{i,j}^n \left(u_{i,j+\frac{1}{2}} + \left| u_{i,j+\frac{1}{2}} \right| \right) \right]}{2} \dots$$

(4-8)

ここで α ($0 \leq \alpha \leq 1$) はドナーセルパラメータと呼ばれるパラメータで、質量流束を求める際の中心差分の項とドナーセルの差分の割合を決定する。式(4-8)および式(4-9)を用いて、式(4-3)の連続の式は以下のように差分化される。

$$\frac{\rho_{ij} - \rho_{ij}^n}{\delta t} + \frac{\left[(\rho u)_{i+\frac{1}{2},j} - (\rho u)_{i-\frac{1}{2},j} \right]}{\delta x} + \frac{\left[(\rho v)_{i,j+\frac{1}{2}} - (\rho v)_{i,j-\frac{1}{2}} \right]}{\delta y} + \frac{\xi}{x_i} \frac{\left[(\rho u)_{i+\frac{1}{2},j} - (\rho u)_{i-\frac{1}{2},j} \right]}{2} = 0 \dots (4-9)$$

ここで、解析体系が直交座標系の時は $\xi=0$ とし、円筒座標系の時は $\xi=1$ とする。

次に式(4-1)の x 方向の運動量保存式の差分化を行う。

$$FUX = \left(u \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^n = (1-\alpha) u_{i+\frac{1}{2},j}^n \frac{\left(u_{i+\frac{3}{2},j}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n \right)}{2\delta x} + \alpha \left[\frac{\left(u_{i+\frac{3}{2},j}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)}{\delta x} \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - \left| u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right)}{2} + \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n \right)}{\delta x} \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - \left| u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right| \right)}{2} \right] \dots$$

(4-10)

$$FUY = \left(v \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i+\frac{1}{2},j}^n = (1-\alpha) v_{i+\frac{1}{2},j}^n \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right)}{2\delta y} \\ + \alpha \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)}{\delta y} \frac{\left(v_{i+\frac{1}{2},j}^n - v_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)}{2} + \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n \right)}{\delta y} \frac{\left(v_{i+\frac{1}{2},j}^n - v_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)}{2} \right] \cdot$$

• • (4-11)

ここで、

$$v_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n + v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{4} \cdot \cdot \cdot (4-12)$$

これらの関係を用いて式(4-1)を差分化すると、

$$\frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^n - u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\delta x} + FUX + FUY = g_x - \frac{1}{(\rho_{i+1,j}^n + \rho_{i,j}^n)/2} \frac{(\bar{p}_{i+1,j} - \bar{p}_{i,j})}{\delta x} \\ + \frac{\mu}{(\rho_{i+1,j}^n + \rho_{i,j}^n)/2} \left[\frac{4}{3} \frac{u_{i+\frac{3}{2},j}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\delta x^2} \right. \\ + \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}^n - 2u_{i+\frac{1}{2},j}^n + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^n}{\delta y^2} \cdot \cdot \cdot (4-13) \\ + \frac{1}{3} \frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n - v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n - v_{i,j+\frac{1}{2}}^n + v_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\delta x \delta y} \\ \left. + \frac{4}{3} \frac{\xi}{x_{i+\frac{1}{2}}} \left\{ \frac{u_{i+\frac{3}{2},j}^n - u_{i-\frac{1}{2},j}^n}{2\delta x} - \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^n}{x_{i+\frac{1}{2}}} \right\} \right]$$

となる。ここで、 \bar{P} は次のタイムステップでの圧力である。式(4-2)の y 方向の運動量保存式についても同様に差分化を行う。

そして、式(4-4)のエネルギー保存式の差分化を以下のように行う。

$$\begin{aligned}
& \frac{I_{ij} - I_{ij}^n}{\delta t} + (1 - \alpha) \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i-\frac{1}{2},j} \right)}{2} \frac{(I_{i+1,j}^n - I_{i-1,j}^n)}{2\delta x} + \alpha \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i-\frac{1}{2},j} - \left| u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i-\frac{1}{2},j} \right| \right)}{4} \frac{(I_{i+1,j}^n - I_{i,j}^n)}{\delta x} \right. \\
& \quad \left. + \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i-\frac{1}{2},j} - \left| u_{i+\frac{1}{2},j} + u_{i-\frac{1}{2},j} \right| \right)}{4} \frac{(I_{i,j}^n - I_{i-1,j}^n)}{\delta x} \right] + (1 - \alpha) \frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}} \right)}{2} \frac{(I_{i,j+1}^n - I_{i,j-1}^n)}{2\delta y} \\
& \quad + \alpha \left[\frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}} - \left| v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}} \right| \right)}{4} \frac{(I_{i,j+1}^n - I_{i,j}^n)}{\delta y} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}} - \left| v_{i,j+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}} \right| \right)}{4} \frac{(I_{i,j}^n - I_{i,j-1}^n)}{\delta y} \right] \\
& = - \frac{\bar{P}_{ij}}{\rho_{ij}^n} \left[\frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j} \right)}{\delta x} + \frac{\left(v_{i,j+\frac{1}{2}} - v_{i,j-\frac{1}{2}} \right)}{\delta y} + \frac{\xi}{x_i} \frac{\left(u_{i+\frac{1}{2},j} - u_{i-\frac{1}{2},j} \right)}{2} \right] \quad \dots (4-14) \\
& \quad + \frac{\kappa}{c_v \rho_{ij}^n} \left[\frac{(I_{i+1,j}^n - 2I_{i,j}^n + I_{i-1,j}^n)}{\delta x^2} + \frac{(I_{i,j+1}^n - 2I_{i,j}^n + I_{i,j-1}^n)}{\delta y^2} + \frac{\xi}{x_i} \frac{(I_{i+1,j}^n - I_{i-1,j}^n)}{2\delta x} \right]
\end{aligned}$$

\bar{P} を用いるのは、次式のクーランの安定条件を無視するためである。

$$\max \left\{ \frac{c \delta t}{\delta x}, \frac{c \delta t}{\delta y} \right\} > 1 \quad \dots (4-15)$$

輸送方程式と同時に、以下の関係式を解こうとしている。

$$P_{ij} - F(\rho_{ij}, I_{ij}) = 0 \quad \dots (4-16)$$

ここで、 F は状態方程式である。密度とエネルギーは圧力によって引き起こされる圧縮や膨張に依存することから、式(4-16)は、多数の結合された非線形方程式の解を同時に含んでいる。効率のために式(4-16)は直接解かず、その近似式を解くことにするが、近似式を解く場合でも十分精度がよく、クーラン条件に関して無条件安定となる。この近似式として式(4-17)を用い、ニュートン・ラブソン法を用いて解く。

$$W \equiv \bar{P}_{ij} - F(\bar{\rho}_{ij}, \bar{I}_{ij}) = 0 \quad \dots (4-17)$$

$\bar{\rho}_{ij}$ と \bar{I}_{ij} は、次のタイムステップでの密度と内部エネルギーの評価値で、一時的に定義される。

ν を反復回数とし、各セルにおいて、反復時に次のような圧力の修正 $\delta\bar{P}_{ij}^\nu$ を計算する。

$$W_{ij}^{\nu+1} = W_{ij}^\nu + \left(\frac{\partial W}{\partial P} \right)_{ij} \delta\bar{P}_{ij}^\nu = 0 \quad \dots (4-18)$$

$$P_{ij}^{\nu+1} = \bar{P}_{ij}^\nu + \delta\bar{P}_{ij}^\nu \quad \dots (4-19)$$

このニュートン・ラプソンのアルゴリズムは、二つの段階から成る。第一段階で、反復を始める前に $\frac{\partial W}{\partial P}$ の値を決め、その値を一つのタイムステップの中の全ての反復に用いる。第二段階で、収束の基準が達成されるまで、反復を繰り返す。第一段階の計算は以下の通りである。

$$\frac{\partial W}{\partial P} = 1 - \frac{\partial F}{\partial P} \quad \dots (4-20)$$

導関数 $\frac{\partial F}{\partial P}$ は任意の摂動 $\Delta P_{ij} = 10^{-4} P_{ij}^n$ により、摂動させて得る。この摂動は、セルの四つの

壁面での速度を変化させる。

$$\Delta u_{i+\frac{1}{2},j} = \pm \frac{2\Delta P_{ij} \delta t}{\delta x (\rho_{i+1,j}^n + \rho_{ij}^n)} \quad \dots (4-21)$$

$$\Delta v_{i+\frac{1}{2},j} = \pm \frac{2\Delta P_{ij} \delta t}{\delta x (\rho_{i,j+1}^n + \rho_{ij}^n)} \quad \dots (4-22)$$

この変化が速度勾配も変化させる。

$$\Delta D_{ij} = \frac{\Delta u_{i+\frac{1}{2},j} - \Delta u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x} + \frac{\Delta v_{i,j+\frac{1}{2}} - \Delta v_{i,j-\frac{1}{2}}}{\delta y} + \frac{\xi}{x_i} \frac{\Delta u_{i+\frac{1}{2},j} - \Delta u_{i-\frac{1}{2},j}}{\delta x} \quad \dots (4-23)$$

以上の変化が、セル ij での密度と内部エネルギーの変化を引き起こす。

$$\tilde{\rho} = \frac{\rho_{ij}^n}{1 + \delta t \Delta D_{ij}} \quad \dots (4-24)$$

$$\tilde{I} = I_{ij}^n - \delta t \frac{P_{ij}^n \Delta D_{ij}}{\rho_{ij}^n} \quad \dots (4-25)$$

式(4-24)および式(4-25)は本質的にはラグランジュ表示の差分式である。式(4-25)では圧縮性の働きのみが、気体を熱すると仮定している。これらの関係を用いると、式(4-20)は近似的に、

$$\left(\frac{\partial W}{\partial P} \right)_{ij} = 1 - \frac{F(\tilde{\rho}, \tilde{I}) - F(\rho_{ij}^n, I_{ij}^n)}{\Delta P_{ij}} \quad \dots (4-26)$$

今、次のように定義する。

$$\beta_{ij} = \frac{\omega}{\left(\frac{\partial W}{\partial \bar{P}}\right)_{ij}} = \frac{\omega \Delta P_{ij}}{\Delta P_{ij} - [F(\tilde{\rho}, \tilde{I}) - F(\rho_{ij}^n, I_{ij}^n)]} \quad \dots (4-27)$$

ω は緩和係数である。この β_{ij} を計算して、第一段階は終わる。

以下に第二段階の計算を示す。 \bar{P} ではなく、 P^n を用いて、次の時間ステップでの反復の

出発値 $\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^0, v_{i,j+\frac{1}{2}}^0\right)$ を与え、第一段階と同じ近似を用いて式(4-17)を反復処理する。

$$D_{ij}^0 = \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^v - u_{i-\frac{1}{2},j}^v}{\delta x} + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^v - v_{i,j-\frac{1}{2}}^v}{\delta y} + \frac{\xi}{x_i} \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^v - u_{i-\frac{1}{2},j}^v}{2} \quad \dots (4-28)$$

$$\bar{\rho}^v = \frac{\rho_{ij}^n}{1 + \delta D_{ij}^v} \quad \dots (4-29)$$

$$\bar{I}^v = I_{ij}^n - \delta \frac{\bar{P}^v D_{ij}^v}{\rho_{ij}^n} \quad \dots (4-30)$$

式(4-17)および式(4-18)から、

$$\delta P_{ij}^v = -\beta_{ij} [\bar{P}^v - F(\bar{\rho}^v, \bar{I}^v)] \quad \dots (4-31)$$

次に式(4-19)によって圧力が更新され、次の式から速度が更新できる。

$$u_{i+\frac{1}{2},j}^{v+1} = u_{i+\frac{1}{2},j}^v \pm \frac{2\delta \bar{P}^v}{\delta x (\rho_{i\pm 1,j}^n + \rho_{i,j}^n)} \quad \dots (4-32)$$

$$v_{i,j+\frac{1}{2}}^{v+1} = v_{i,j+\frac{1}{2}}^v \pm \frac{2\delta \bar{P}^v}{\delta x (\rho_{i,j\pm 1}^n + \rho_{i,j}^n)} \quad \dots (4-33)$$

以上の計算が全てのセルに対して繰り返された後、 $v+1$ 回目の反復が始まる。反復は全てのセルに対して、

$$|\delta \bar{P}^v| < \varepsilon \bar{P}_{ij}^v, \quad \varepsilon > 0 \quad \dots (4-34)$$

となるまで繰り返される。収束した後、 $\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{v+1}, v_{i,j+\frac{1}{2}}^{v+1}\right)$ は $\left(u_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1}, v_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1}\right)$ とする。

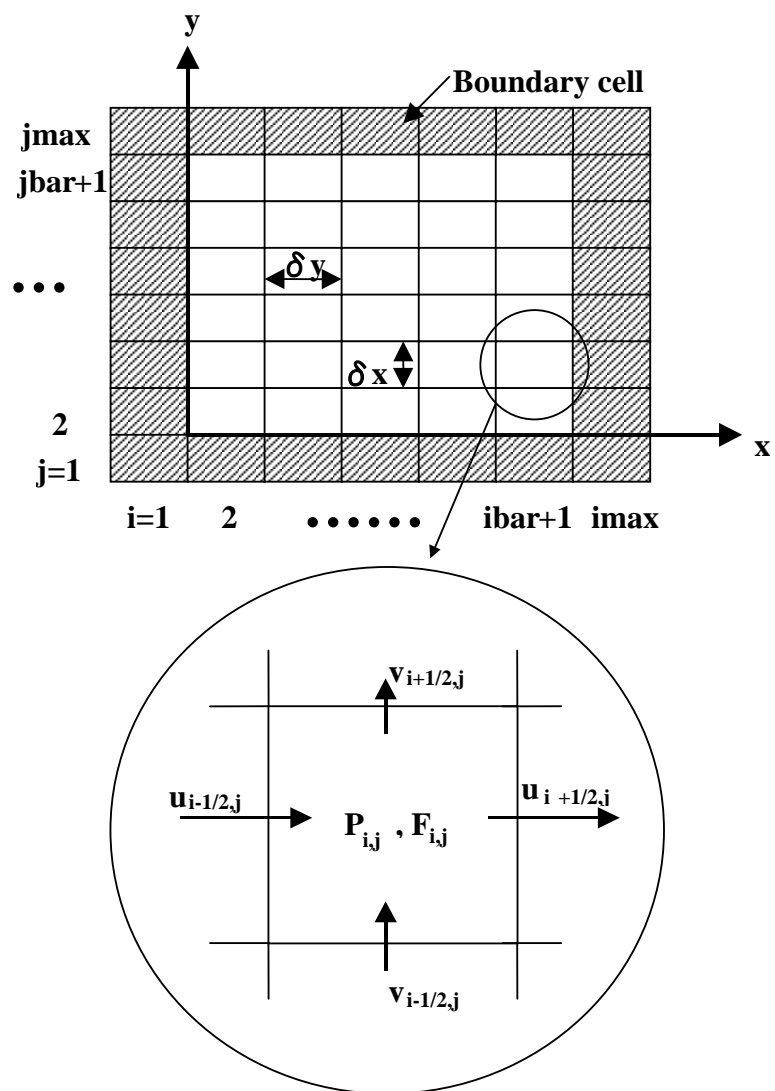


Fig.4-1 SOLA-ICE 法におけるセルの構造

4-2 2次元液滴挙動解析

4-2-1 解析概要

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かった。そこで、音響定在波中における液滴の2次元的な挙動を数値解析によって評価することとした。

本研究では、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音場解析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。

4-2-2 基礎式

音響場における水平方向での液滴の運動は、

$$m_d \frac{du_d}{dt} = -V \frac{dP_g}{dx} - \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_r}{dt} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho_g u_r^2 C_d \quad (4-35)$$

で表される。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、並進速度の水平方向成分、体積、 u_r は液滴と周辺流体との相対速度の水平方向成分、 C_d は摩擦係数である。

並進速度は、

$$\frac{dx}{dt} = u_d \quad (4-36)$$

相対速度は、

$$u_r = u_d - u_g \quad (4-37)$$

で定義され、周辺流体の速度 u_d には、音場解析の結果を代入する。

$\mu_g \mu_l$ を空気と水の粘性係数とし、レイノルズ数は以下の式によって与えることとすると、

$$\text{Re} = \frac{2\rho_g u_r R}{\mu_g} \quad (4-38)$$

摩擦係数は、レイノルズ数によって表され、 $\text{Re} < 60$ の時、 κ を水と空気の粘性係数比とすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{\mu_l}{\mu_g} = 48.9 \\ C_d &= 3.05 \left\{ \frac{783\kappa^2 + 2142\kappa + 1082}{(60 + 29\kappa)(4 + 3\kappa)} \right\} \text{Re}^{-0.74} \\ &= 8.9 \text{Re}^{-0.74} \end{aligned} \quad (4-39)$$

式(4-39)で与えられた摩擦係数は、Hamielec 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。^[22]また、 $Re \geq 60$ の時、

$$C_d = 0.44$$

液滴は剛体球と仮定し、

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (4-40)$$

とする。また鉛直方向の運動は以下の式によって表される。

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = -V \frac{dP_g}{dy} - \frac{1}{2} \rho_g V \frac{dv_r}{dt} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho_g v_r^2 C_d - \rho_l V g \quad (4-41)$$

ここで、 v_d は液滴の並進速度の鉛直方向成分、 v_r は気液の相対速度の鉛直方向成分、 g は重力加速度である。右辺第4項の重力項以外は水平方向と同様である。

4-2-3 数値解析手法

式(4-35)より、液滴の並進方向の速度を得るために、以下のように水平方向の運動の式を整理する。まず、右辺第一項の圧力の空間変化による力について整理する。右辺第一項を中心差分により空間に関して差分化すると、

$$V \frac{dP_g}{dx} = V \frac{P_{gi+1} - P_{gi-1}}{2\Delta x} \quad (4-42)$$

と表すことができる。

次に、第二項の液滴の運動によって生じる仮想質量効果による抗力は、後退差分により時間に関して差分化すると、

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_r}{dt} &= \frac{1}{2} \rho_g V \frac{d}{dt} (u_d - u_g) \\ &= \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_d}{dt} - \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_g}{dt} \\ &= \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_d}{dt} - \frac{1}{2} \rho_g V \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4-43)$$

となる。

となり、式(4-42)、(4-43)を式(4-35)に代入し整理すると、

$$\begin{aligned} m_d \frac{du_d}{dt} &= -V \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{1}{2} \rho_g V \frac{du_d}{dt} + \frac{1}{2} \rho_g V \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta t} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho_g u_r^2 C_d \\ \left(m_d + \frac{1}{2} \rho_g V \right) \frac{du_d}{dt} &= -V \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x} + \frac{1}{2} \rho_g V \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta t} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho_g (u_d - u_g) |u_d - u_g| C_d \\ \frac{du_d}{dt} &= \left(-V \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x} + \frac{1}{2} \rho_g V \frac{u_j - u_{j-1}}{\Delta t} - \pi R^2 \frac{1}{2} \rho_g (u_d - u_g) |u_d - u_g| C_d \right) / \left(m_d + \frac{1}{2} \rho_g V \right) \end{aligned} \quad (4-44)$$

となる。また液滴の質量 m_d は、

$$m_d = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_l \quad (4-45)$$

である。これを式(4-44)に代入して整理し、ルンゲ・クッタ法により数値計算を行う。

また、鉛直方向についても水平方向と同様に差分化して整理し、ルンゲ・クッタ法により数値計算を行う。

$$\begin{aligned} \left(m_d + \frac{1}{2}\rho_g V\right) \frac{dv_d}{dt} &= -V \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{1}{2}\rho_g V \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} - \pi R^2 \frac{1}{2}\rho_g (u_v - v_g) |v_d - v_g| C_d - \rho_l V g \\ \frac{dv_d}{dt} &= \left(-V \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2\Delta x} - \frac{1}{2}\rho_g V \frac{v_j - v_{j-1}}{\Delta t} - \pi R^2 \frac{1}{2}\rho_g (v_d - v_g) |v_d - v_g| C_d - \rho_l V g \right) \left/ \left(m_d + \frac{1}{2}\rho_g V \right) \right. \quad (4-46) \end{aligned}$$

4-3 本章のまとめ

ナビエ・ストークス方程式を直接扱う圧縮性流体を解析可能な数値解析手法を用いて、超音波の音響定在波による高周波の圧力、速度の変動場を評価可能な数値解析手法を構築した。

音響定在波中の圧力場、速度場の変動の周期より2桁程度変動の周期が遅い液滴の併進運動を評価するための解析手法を構築した。

第5章 数値解析結果

5-1 圧力場解析

5-1-1 解析概要

4章に示した数値解析手法を用いて超音波の音響定在波による高周波の圧力、速度の変動場を解析する。

5-1-2 解析体系

ホーンと反射体に挟まれ、外部に開放されたテスト部右半分を対称性を考慮して図 5-1 に示す直交座標系の計算領域で模擬した。解析メッシュの大きさは水平方向を 2mm、鉛直方向を 0.5mm とした。

境界条件としては、計算領域右端を開放されたテスト部を模擬する流出入条件、計算領域左端を対称境界を表すすべりあり壁、反射体表面をすべりなし壁をそれぞれ設定した。また、ホーンの先端に接触する流体に、式(5-1)で示す超音波に対応した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。

$$V = \frac{k\Delta P}{\omega\rho_g} \cos(\omega t) \quad (5-1)$$

ここで、 k 、 ΔP 、 ω 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 5-2 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。

この解析体系において、4章に示した基礎式および数値解析手法を用いて音場中の流動場を解くこととした。

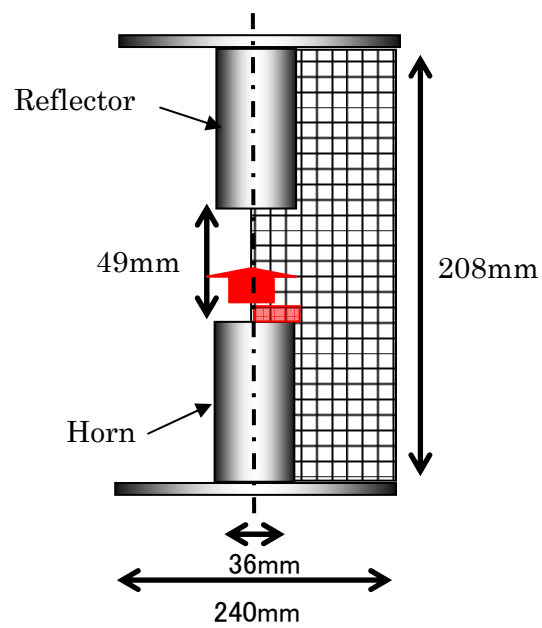


Fig.5-1 テスト部開放の場合の解析モデル

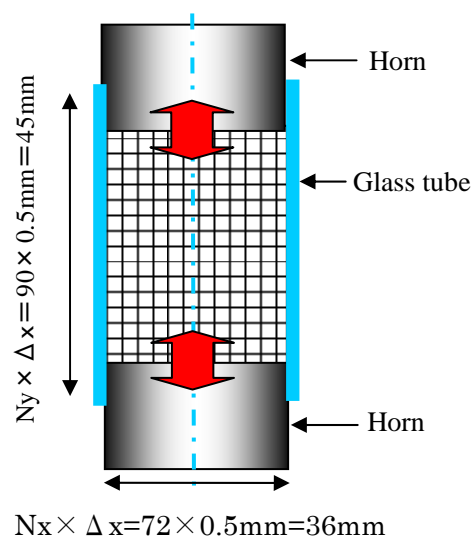


Fig.5-2 ガラス管がある場合の解析モデル

5-1-3 テスト部開放の場合の解析結果

図 5-3 に、計算領域右端を流出入条件とした解析によって得られた圧力変動の最大値の空間分布を示す。この図は解析から得られた結果のうち、ホーンと反射対の間の空間を拡大して示している。図 5-3 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。

図 5-4 に図 5-3 の解析と同じ条件の実験においてプローブフォンを用いて実測された圧力変動の分布を示す。この図 5-3 と図 5-4 の比較により、音圧分布の傾向は、解析と実験でよく一致しているものと言える。また、圧縮性を直接的に扱う SOLA-ICE 法を用いることにより、試験で計測される数 kPa オーダーの音圧を再現することができている。

5-1-4 ガラス管内における解析結果

図 5-5 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変動の最大値の空間分布を示す。図 5-5 から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。

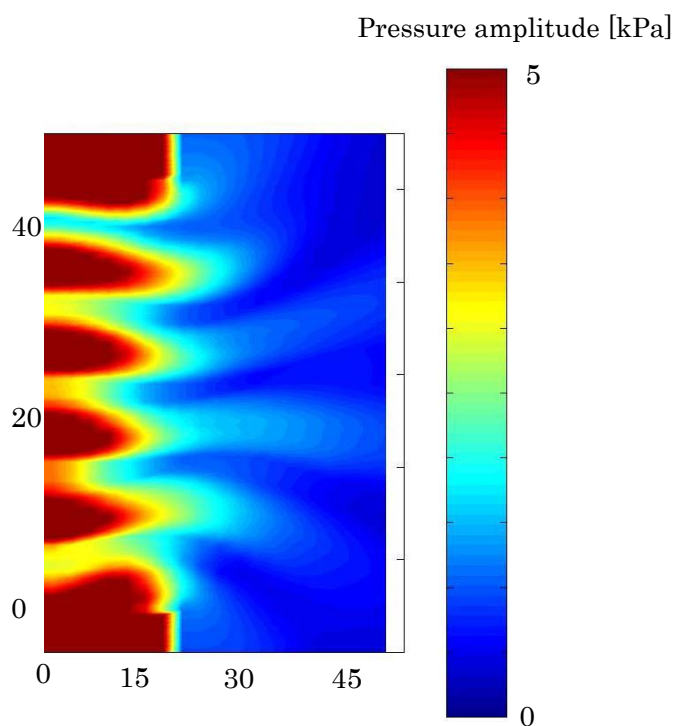


Fig.5-3 解析から得られたテスト部開放の場合の圧力振幅の分布

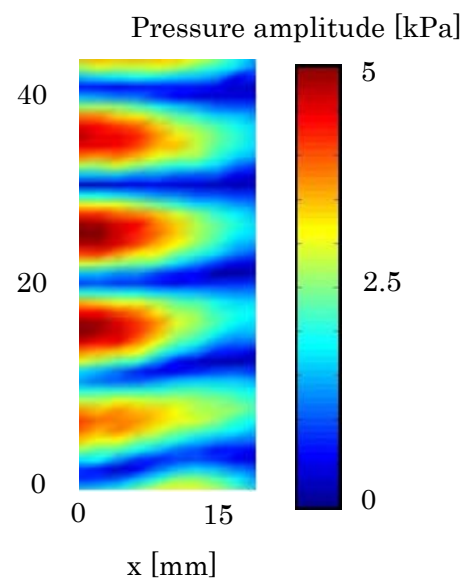


Fig.5-4 実験から得られたテスト部開放の場合の圧力振幅の分布

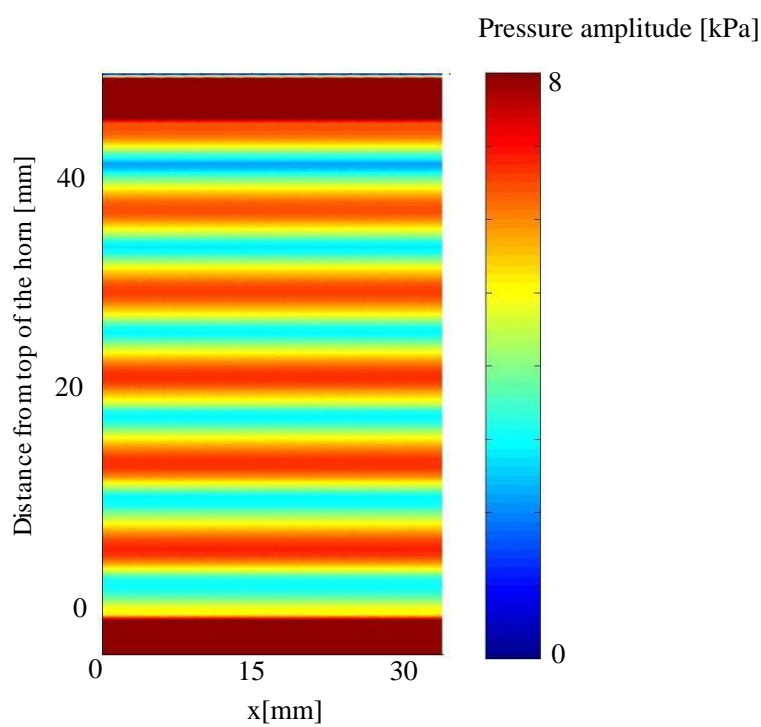


Fig.5-5 テスト部をガラス管で覆った場合の圧力変動の分布

5-2 速度分布解析

5-2-1 解析概要

5-1 と同様に 4 章に示した圧縮性を取り扱うことが可能な数値解析手法を用いて、浮遊物体がある場合とない場合との音響定在波内の空気の流動を非定常解析で評価した。

5-2-2 解析体系

ホーンと反射体に挟まれ、外部に開放されたテスト部右半分を対称性を考慮して図 5-6 に示す直交座標系の計算領域で模擬した。本解析では浮遊物体周りの流動を詳細に計算する必要があるため、ホーンと反射体に挟まれた領域については、鉛直方向のメッシュ幅を 0.1mm。水平方向のメッシュ幅を 0.4mm とし、外部の領域については、メッシュの連続性を保ちながら、鉛直方向のメッシュ幅を 2mm、水平方向のメッシュ幅を 4mm とした。

境界条件としては、計算領域右端を開放されたテスト部を模擬する流出入条件、計算領域左端を対称境界を表すすべりあり壁、反射体表面をすべりなし壁をそれぞれ設定した。また、ホーンの先端に接触する流体に、式(5-1)で示す超音波に対応した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。

浮遊物体については、試験、計測で浮遊した位置に固体の障害物を設置することで模擬し、浮遊物体表面はすべりなし壁とした。

5-2-3 浮遊物体が無い場合の数値解析結果

3 章に示した実験と条件を合わせた数値解析によって得られた浮遊物体が無い場合の音響定在波中の速度ベクトルを Fig.5-7 に、速度場の鉛直方向成分を図 5-8 にそれぞれ示す。これらの図は、ホーンと反射体にはさまれた領域を拡大して示している。これらの速度場は、 1×10^{-3} 秒間解析を行い、定在波を十分発達させた後、 1×10^{-3} 秒後の解析結果を初期条件として、さらに 2×10^{-4} 秒間解析した結果の時間平均をとったものである。これらの図によると、上側反射体表面から下側ホーン先端から約 15mm の位置までの領域で下向きの定常的な流れが生じていることがわかる。また音響定在波が強くなるに従い、下向きの流速が大きくなる傾向となっていることがわかる。

上側反射体表面から下側ホーン先端から約 15mm の位置までの領域で定常的な流れが生じることは 3 章の実験結果と同じであるが、実験では上向きの流れであったのに対し、数値解析では下向きの流れが生じた。また、流速に関しては、実験で得られた最大の流速が約 0.1m/s であったのに対し、数値解析では約 1m/s であり、実験と数値解析で約 10 倍の差があった。音響定在波の強さと流速の関係については、実験では、音響定在波が強くなると、流れ場が乱れ、鉛直方向の定常的な流れが生じにくくなる傾向が見られたが、数値解析では、音響定在波が強くなるに従い、鉛直方向の定常的な流れの流速が大きくなる傾向となった。第 1 章で示したように、音響定在波中に生じる定常的な流れは音波の非線形性によるものであり、この非線形性の影響は小さいとされている。このため、実験では外乱

が、解析では境界条件の影響や数値誤差が定常的な流れの方向や流速に影響を与えている可能性がある。また、本研究で用いている超音波の周波数は約 20kHz であり、周期は約 5×10^{-5} 秒となる一方、定常的な流れは 0.1~1.0m/s のオーダーである。この時間スケールの大きな違いも実験と数値解析の結果の差の一因と考えられる。

5-2-4 数値解析から得られた浮遊物体周りの流動場

3 章に示した音響定在波中に木球を浮遊させた速度場測定実験に条件に合わせた数値解析から得られた木球周りの速度ベクトルを図 5-9 に示す。この図より木球下側から下向きの定常的な流れが生じ、その流れが渦を形成している様子がわかる。しかしながら、実験で確認された木球上側から生じる上向きの定常的な流れと、その流れによって形成される渦は、本解析においては生じなかった。

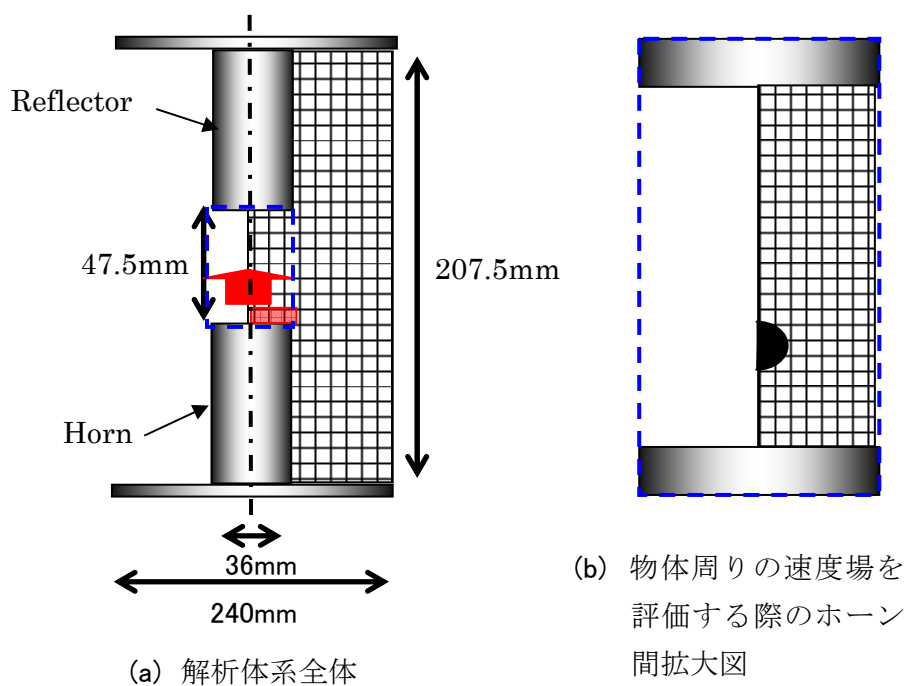


Fig.5-6 解析体系

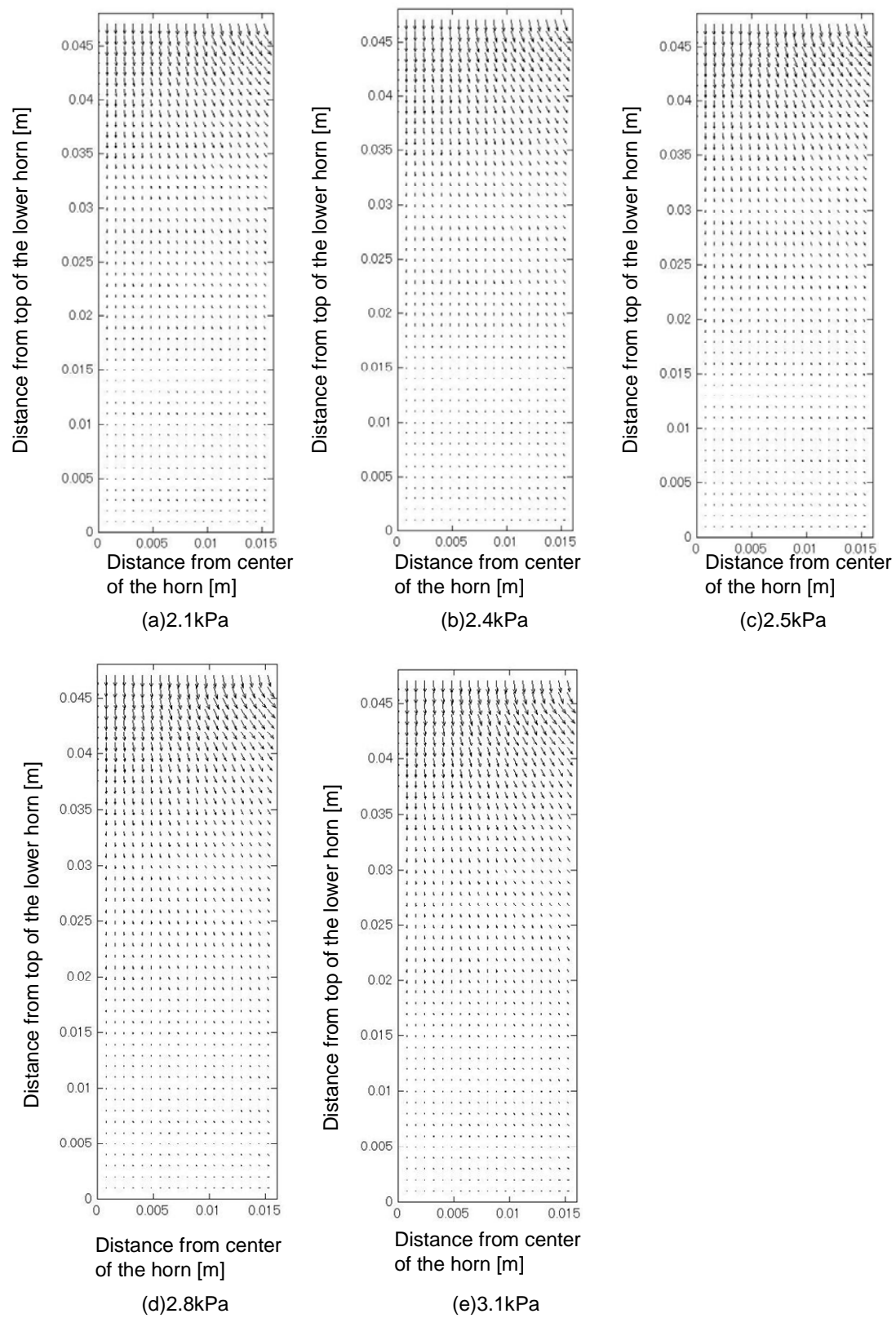


Fig.5-7 数値解析により得られた音響定在波中の速度場

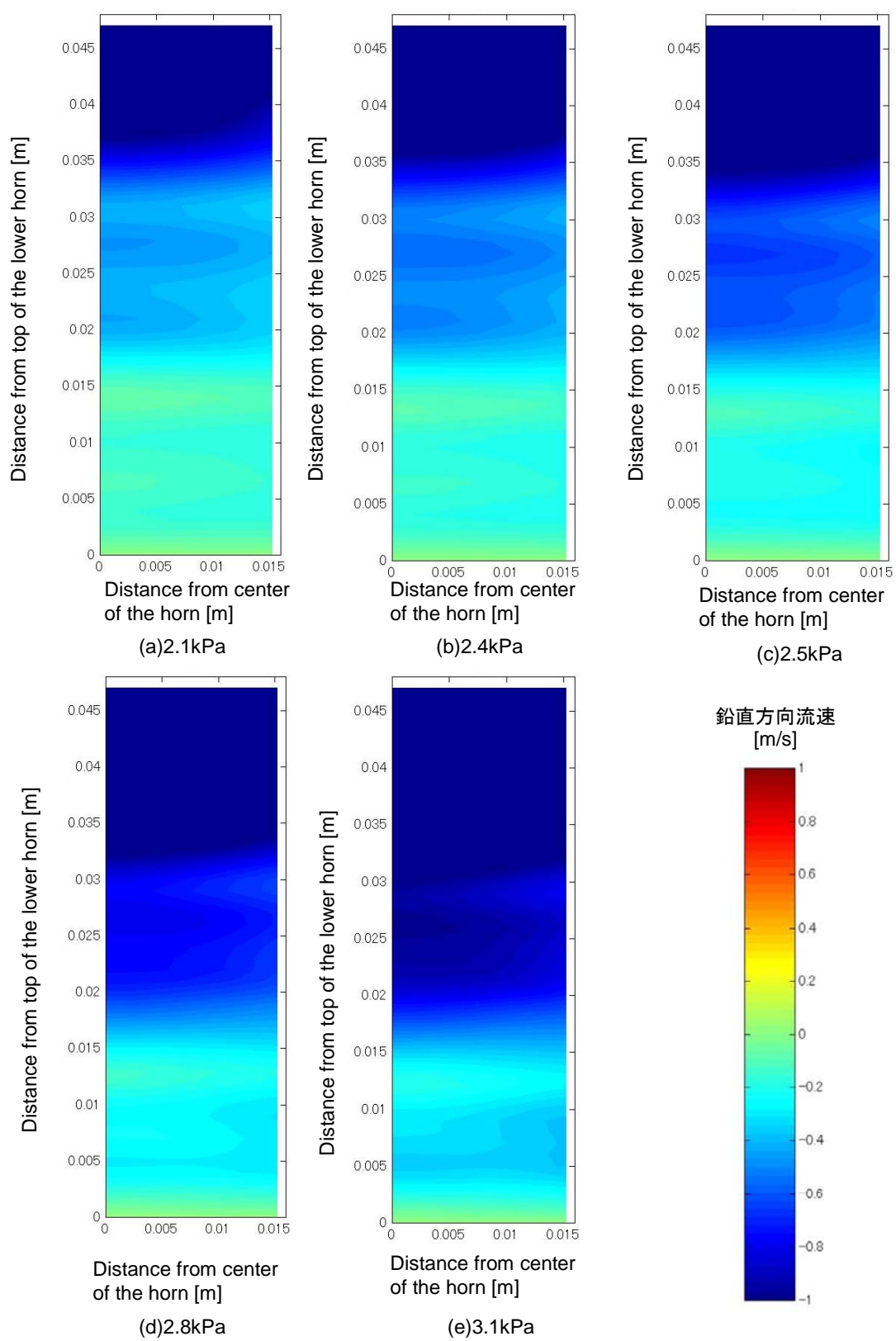


Fig.5-8 数値解析により得られた音響定在波中の速度場の鉛直方向成分

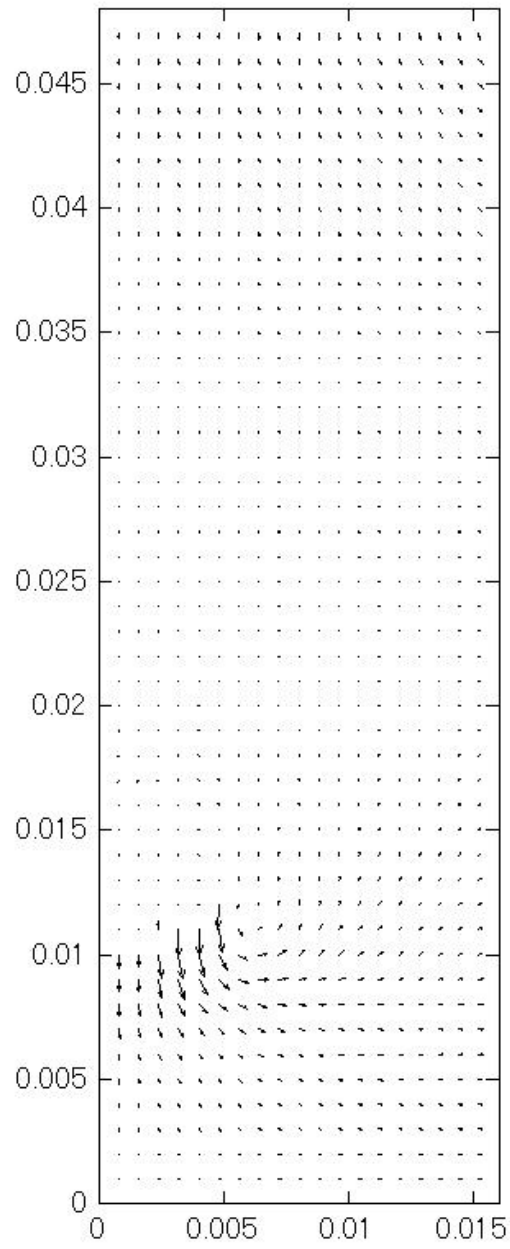


Fig.5-9 数値解析により得られた浮遊木球周りの速度場

5-3 2次元液滴挙動解析結果

2次元液滴挙動解析に用いる圧力、速度を算出するための音場解析には、図 5-10 に示すテスト部の全領域を模擬した解析体系を用いた。これは、テスト部半分のみを模擬する場合のテスト部中心の対象境界の影響を削除するためである。メッシュ幅などの条件は音場解析と同様である。

音場解析において、音響定在波が十分発達する解析開始から $4.5 \times 10^{-4} \text{sec}$ から音響定在波のおよそ 1 周期にあたる $5.0 \times 10^{-5} \text{sec}$ の時間長さの圧力、速度のデータを繰り返し用いることで、60 秒の液滴挙動の解析を行った。液滴の物性は常温の水で、直径 1mm、水平方向の初期位置はホーン中心から 10mm 離れた位置、鉛直方向の初期位置は音響定在波の節付近である下側ホーン先端から 14.5mm の位置とした。

テスト部の周囲を開放した条件における液滴の鉛直方向の挙動を図 5-11 に、水平方向の挙動を図 5-12 にそれぞれ示す。鉛直方向については約 1.5 秒でほぼ静止した状態となり、水平方向については約 15 秒で、初期位置をテスト部中心から 10mm ずらしたことに起因する振動がほぼ収束している。これらの結果から、音響定在波中の液滴には鉛直方向について強い保持力が働き、水平方向に関しても保持力が働くことがわかる。これは、上下一対のホーンと反射体のみで、安定に液滴を保持可能な実験結果と一致するものである。

図 5-13 に図 5-12 の結果を時間方向に拡大して液滴の水平方向の往復運動の詳細を示す。この図における縦軸はホーン中心からの距離とした。また図 5-14 に試験結果を撮影したビデオ動画から算出した液滴の水平方向の運動を示す。これらの解析と試験の条件は、液滴の大きさや音場の状況など異なる点もあるが、解析における往復運動の周期が約 0.1sec で、試験における往復運動の周期が約 0.25sec である。往復運動の周期に関して、解析と実験は同じオーダーであると言え、定量的にも試験結果をよく再現しているものと言える。

次にテスト部をガラス管で覆った場合の液滴の鉛直方向の挙動を図 5-15 に、水平方向の挙動を図 5-16 にそれぞれ示す。ガラス管で覆った場合の音場の解析の液滴の条件はテスト部が開放されている場合と全く同じである。図 5-15 より、鉛直方向に関しては、テスト部が開放されている場合と同様に極めて短い時間で静止することがわかるが、水平方向に関しては、本解析の解析時間 60sec では往復運動が収束するには至っていない。これは、テスト部をガラス管で覆った場合は、水平方向の保持力が低下することを示している。

この水平方向の保持力について検討するために、液滴が保持された位置における水平方向の圧力分布の時間変化を示す。図 5-16 がテスト部を開放した条件で、図 5-17 がテスト部をガラス管に覆った条件であり、ともに $5 \times 10^{-6} \text{sec}$ の間隔で音響定在波の約 1 周期に相当する $50 \times 10^{-6} \text{sec}$ のデータを示している。これらの図より、テスト部が開放された条件においては、中心部分に圧力振幅が小さい部分が生じるのに対し、テスト部をガラス管で覆った条件では、常に水平方向の圧力はおおむね一定であり、圧力勾配がほとんど存在していないことがわかる。この水平方向の圧力分布の差によって、液滴の水平方向の保持力に差が生じたと考えられる。

この水平方向の保持力の差が顕著に現れるのが、圧力振幅が小さい場合である。本研究では超音波の音場を仮想圧縮性と呼ばれる方法で扱うことを試みている。この仮想圧縮性を導入した解析手法 SOLA-VOF 法^[23]を用いた場合、数値解析的な制約で圧力振幅が SOLA-ICE 法を用いた場合よりも小さい値になる。圧力振幅が小さい条件における水平方向の圧力分布の時間変化を図 5-18 に、液滴の水平方向の運動を図 5-19 にそれぞれ示す。図 5-19 よりこの条件においては、水平方向に保持することができず、液滴がガラス管に衝突する結果となっていることがわかる。

鉛直方向保持力について検討するために超音波の強度を小さい値に設定した条件において、水滴の挙動を解析した。具体的には、図 5-11、12 に示したテスト部が開放された条件のホーンの先端に接触する流体に超音波の周期に対応して変動する速度を 1/100 に設定した。この条件における鉛直方向の圧力分布の時間変化を図 5-21 に、水滴の挙動を図 5-22 に示す。この図 5-22 では、水滴は下方方向に落下する結果となっており、この結果から超音波の強度が弱い条件においては、重力に対して鉛直方向の保持力が小さくなり、浮遊ができなくなることがわかる。

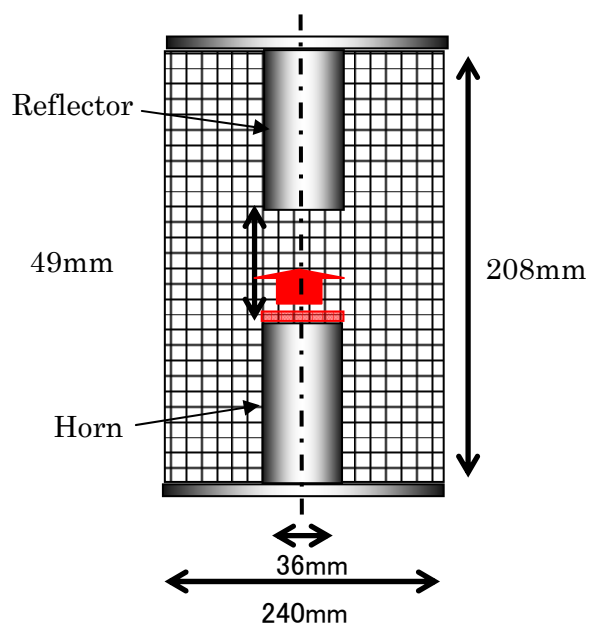


図 5-10 液滴挙動解析のための音場解析体系

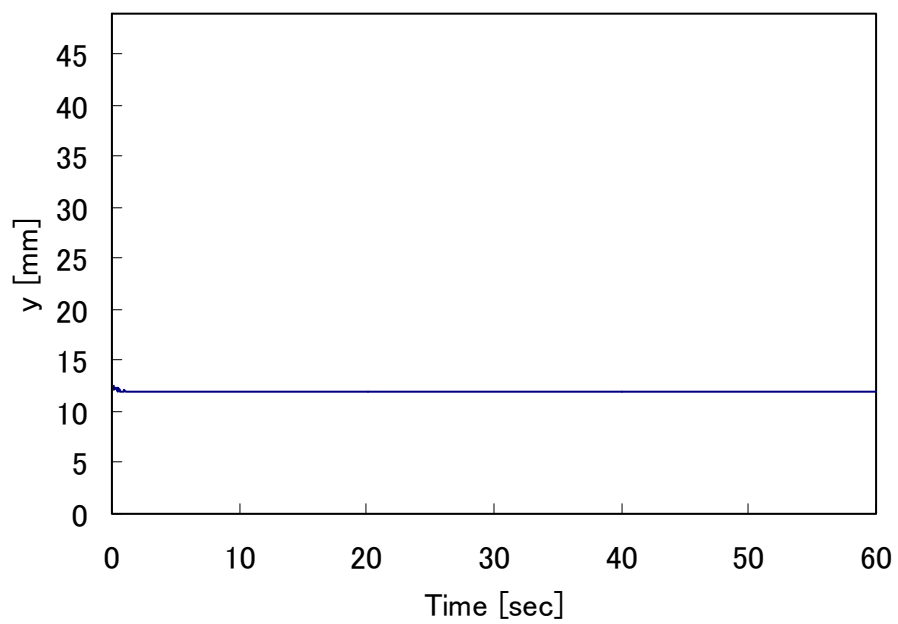


図 5-11 テスト部が開放された条件における音響定在波中の液滴の鉛直方向の運動

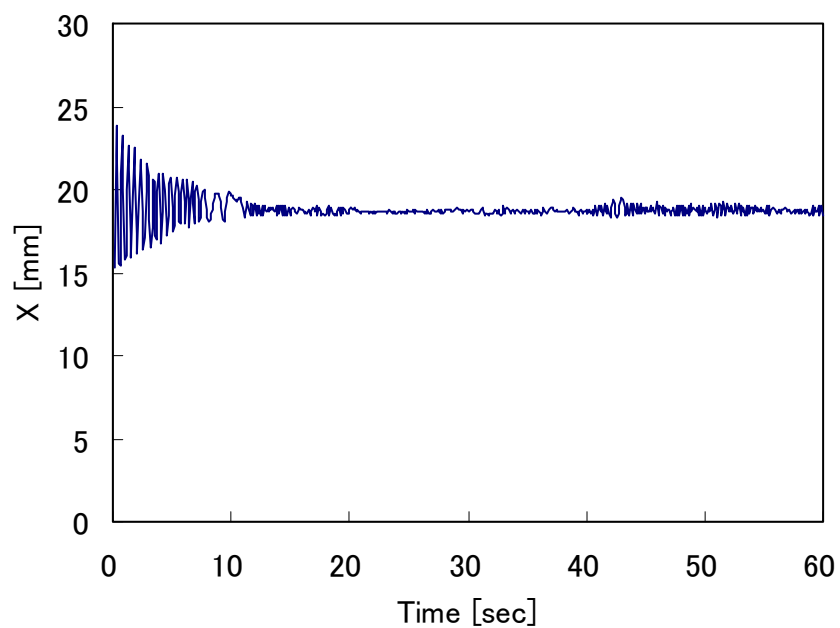


図 5-12 テスト部が開放された条件における音響定在波中の液滴の水平方向の運動

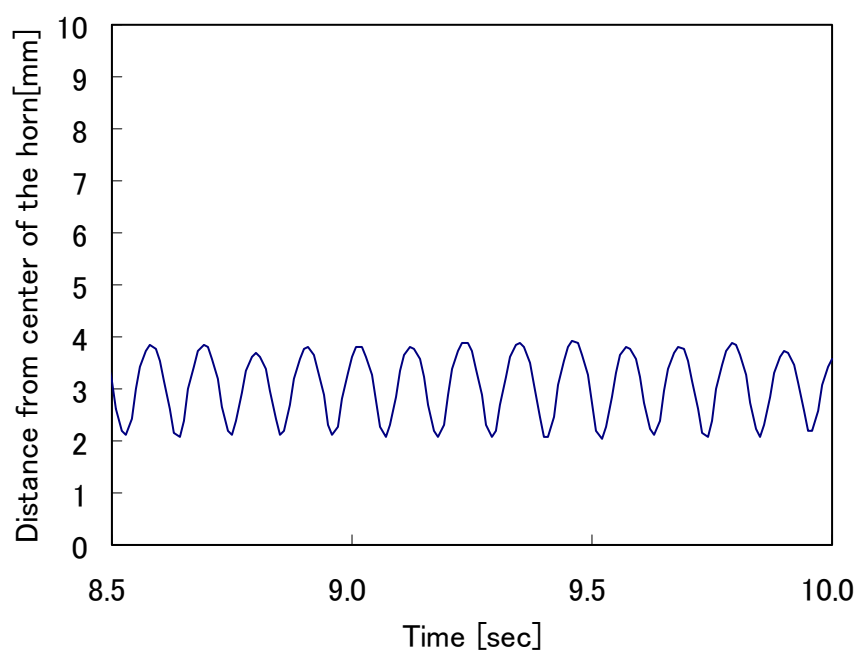


図 5-13 液滴の水平方向の並進運動の詳細

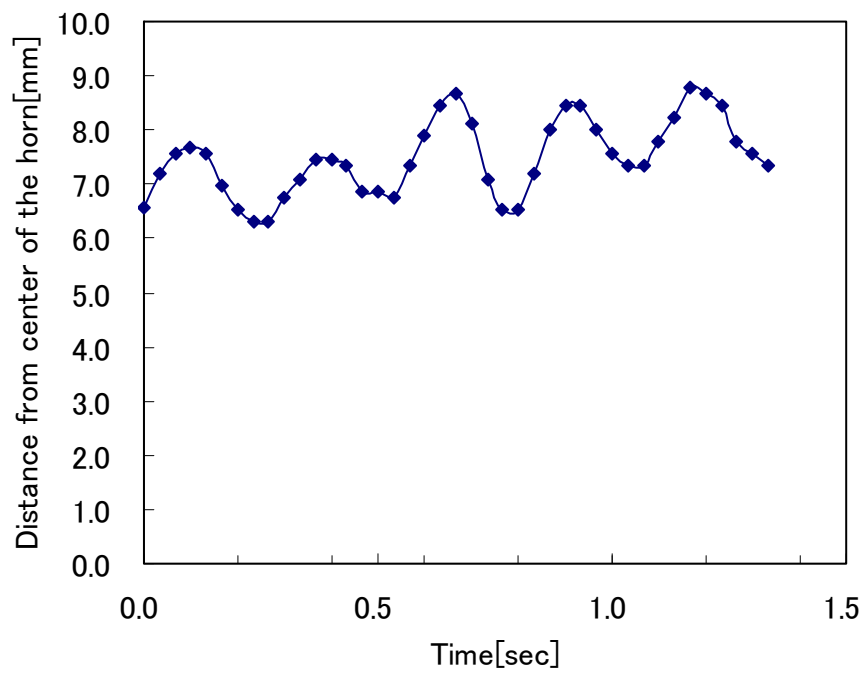


図 5-14 実験から得られた液滴の並進運動

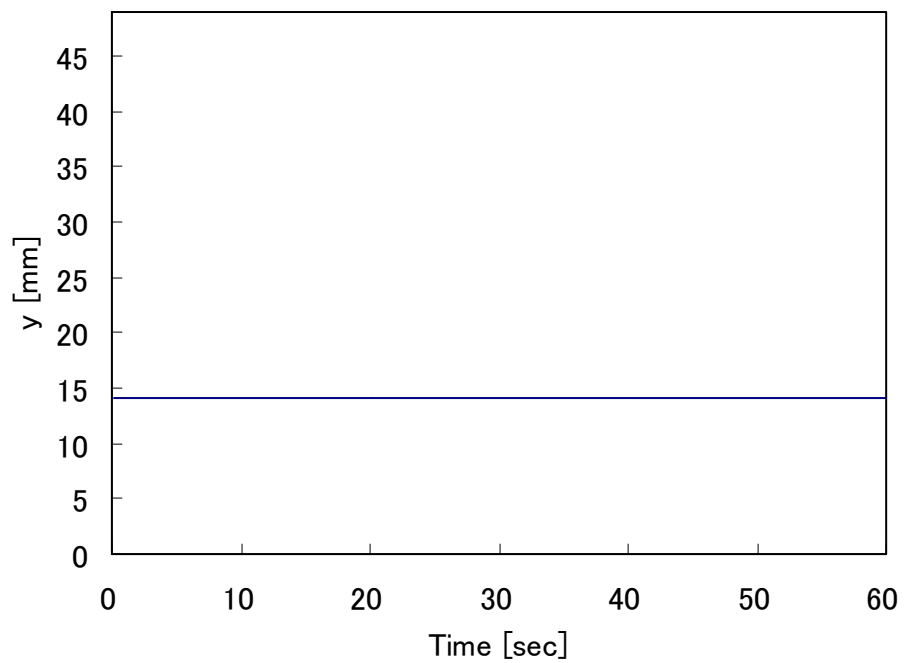


図 5-15 テスト部がガラス管に覆われた条件における音響定在波中の液滴の鉛直方向の運動

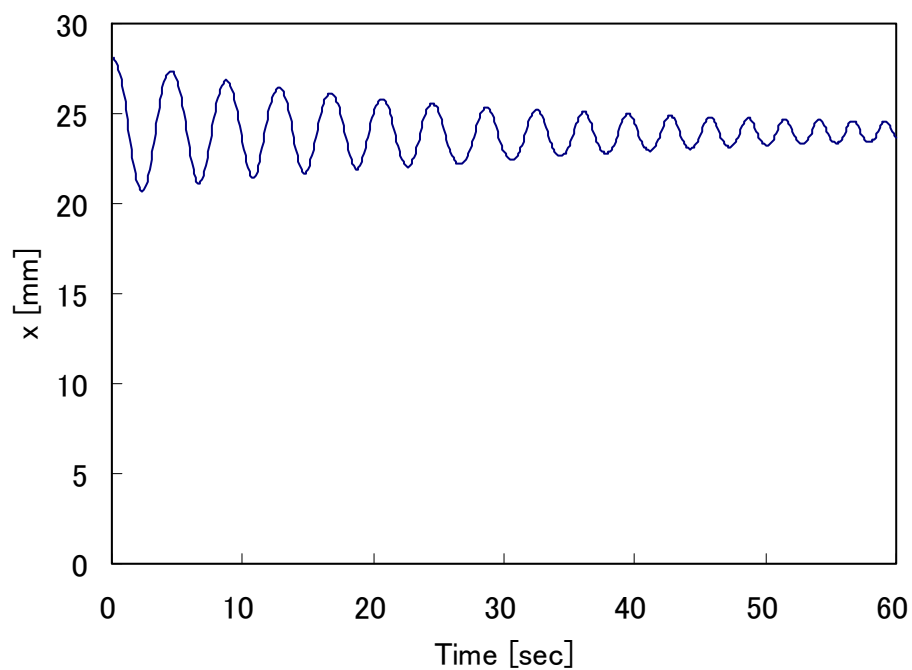


図 5-16 テスト部がガラス管に覆われた条件における音響定在波中の液滴の水平方向の運動

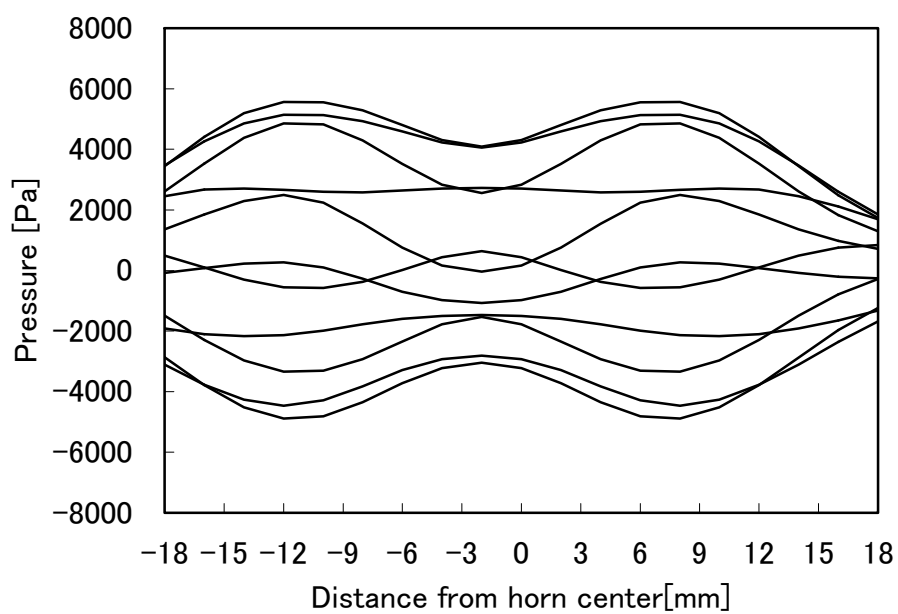


図 5-17 テスト部が開放された条件における水平方向圧力分布の時間変化

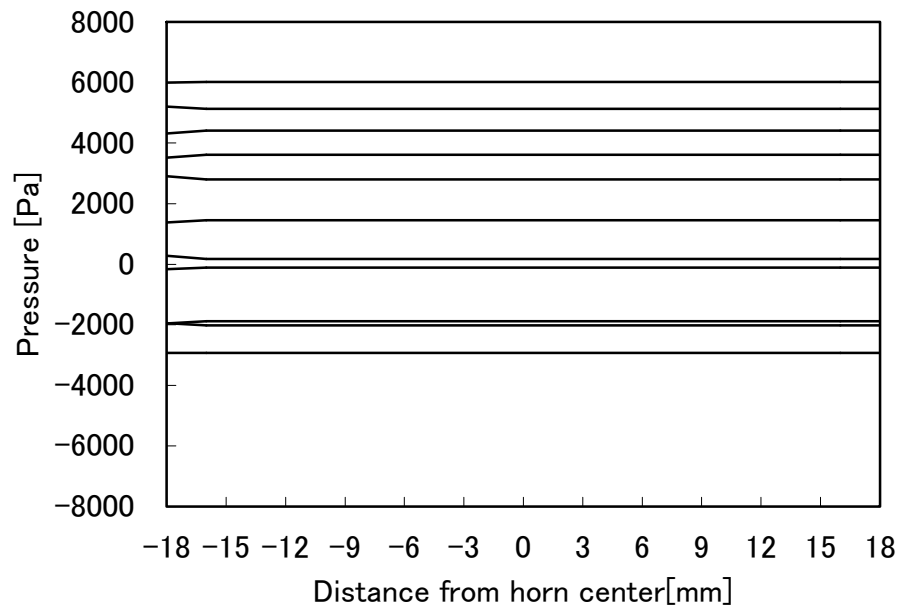


図 5-18 テスト部がガラス管に覆われた条件における水平方向圧力分布の時間変化

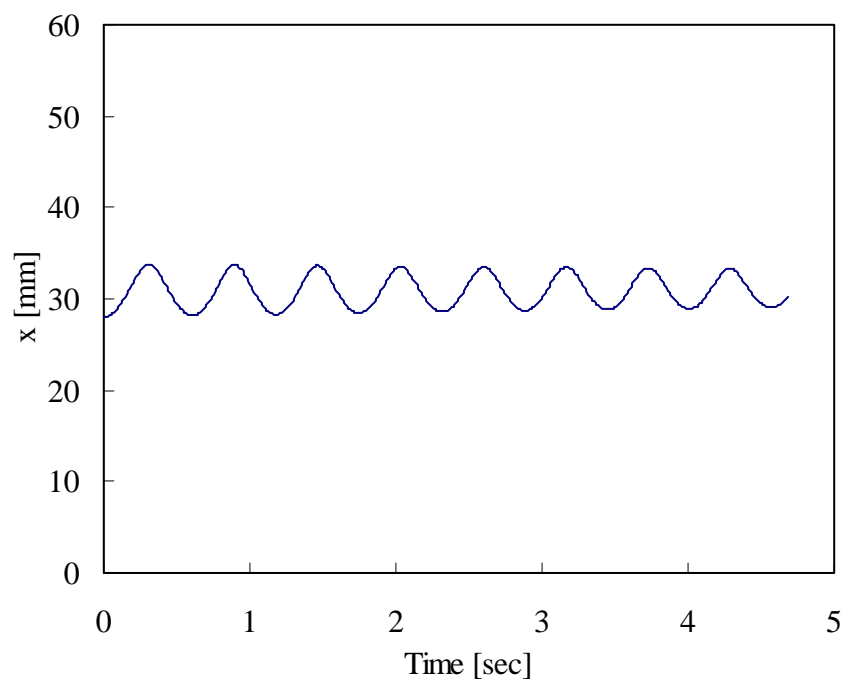


図 5-19 テスト部がガラス管に覆われた条件における圧力振幅が小さい音響定在波中の液滴の水平方向の運動

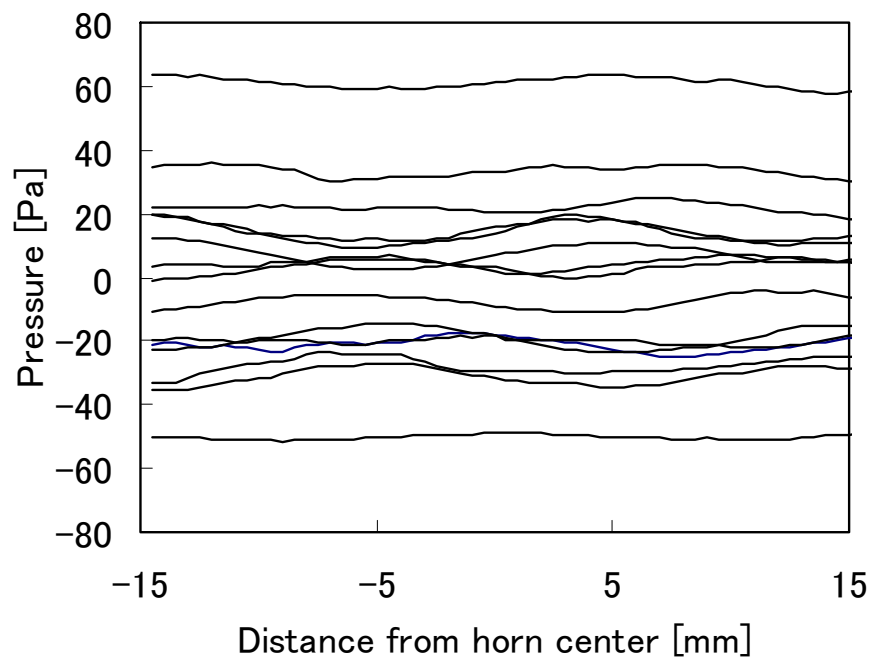


図 5-20 テスト部がガラス管に覆われた条件における圧力振幅が小さい音響定在波中の水平方向圧力分布の時間変化

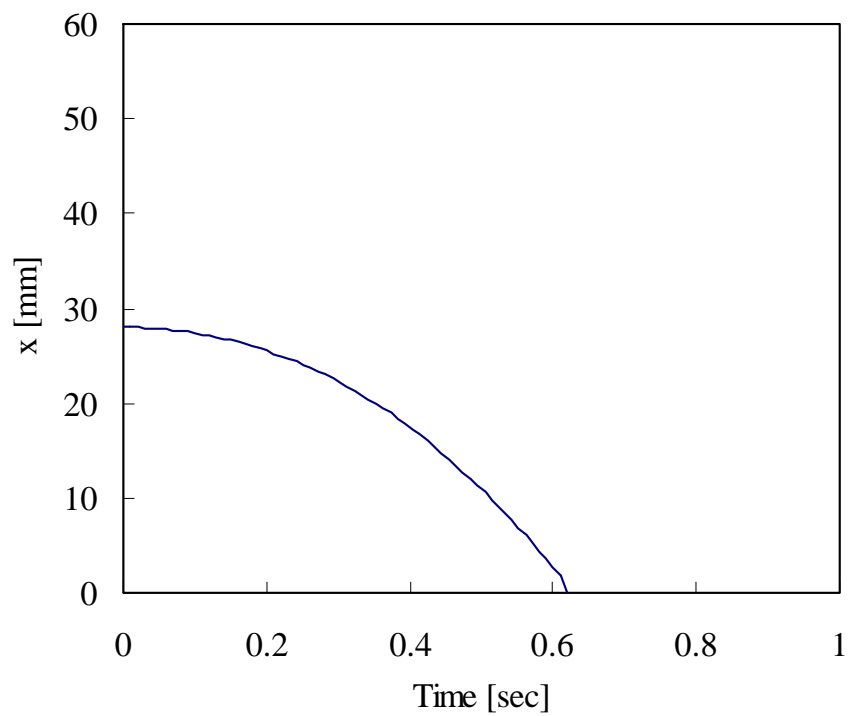


図 5-21 テスト部がガラス管に覆われた条件における圧力振幅が小さい音響定在波中の液滴の水平方向の運動

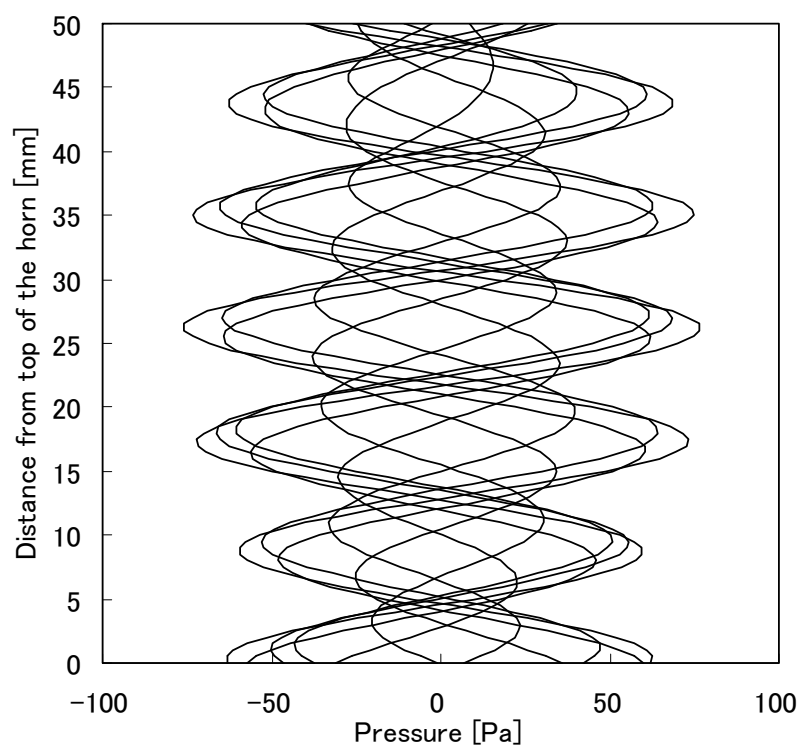


図 5-21 テスト部が開放された条件における圧力振幅が小さい音響定在波の鉛直方向圧力分布の時間変化

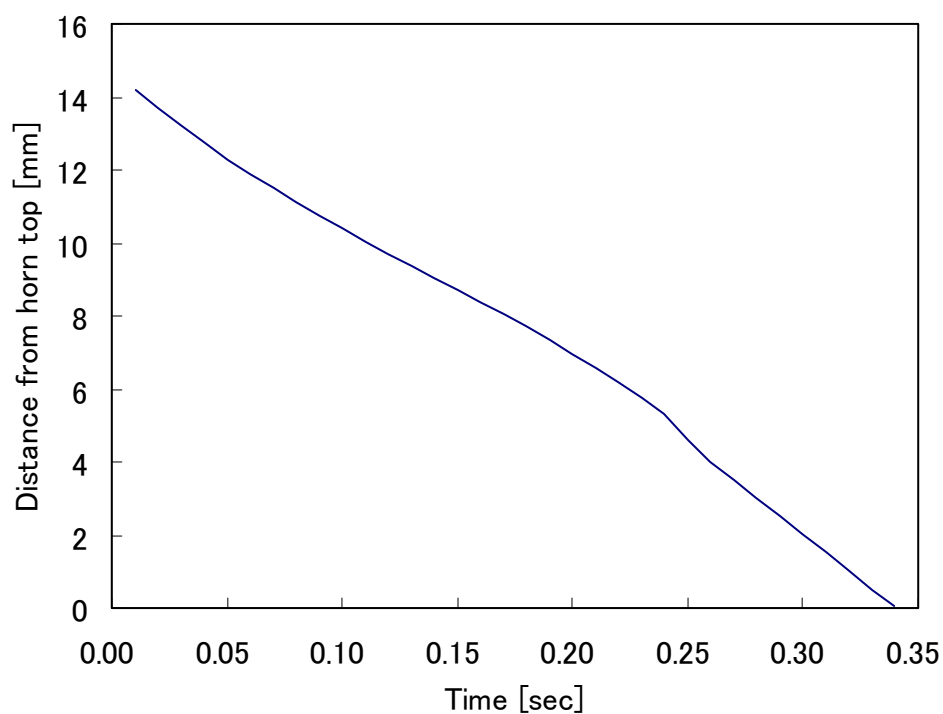


図 5-21 テスト部が開放された条件における圧力振幅が小さい音響定在波中の液滴の鉛直方向の運動

5-4 本章のまとめ

圧縮性流体を解析可能な数値解析手法を用いることで、高周波で変動する超音波の音響定在波を解析可能であることが実験により測定された音圧分布との比較により示された。また、この数値解析により、テスト部周りが開放されている場合は、テスト部内に 2 次元的な圧力分布が生じるが、テスト部周りをガラス管で覆われた条件とした場合には、水平方向の勾配が生じず、1 次元的な分布となる事が示された。

また、音響定在波中の速度場についても、実験において計測した傾向を定性的に再現できることを確認した。

数値解析から得られた圧力分布、速度分布を用いて、音響定在波中の液滴の 2 次元挙動の数値解析の結果、実験結果と一致する傾向が得られたことから、高周波の音響定在波中の液滴の挙動を解析可能であることを確認した。またこの液滴挙動の解析により、テスト部周りの境界条件が、水平方向の圧力勾配を変化させ、水平方向の液滴浮遊に強い影響を与えることがわかった。鉛直方向に関しては、音響定在波の強度が弱くなり鉛直方向の保持力が重力と比較して小さくなると、液滴の浮遊ができなくなることがわかった。

第6章 液滴浮遊の応用技術

6-1 概要

本章では超音波の音響定在波を用いた浮遊技術の応用技術として、浮遊させた液滴の非接触物性測定について実現可能性を実験的に評価した。

6-2 非接触物性測定の実理

空間中に保持された液滴は、表面張力や粘性に依存する固有の振動モードによって変形や振動を行う。表面張力や粘性などの物性測定は、 n 次の振動モードに対して、以下の式によって算出できることが示されている。^[24]

$$\sigma = \frac{1}{n(n-1)(n+2)} \omega_n^2 \rho r_0^3 \quad (6-1)$$

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{(n-1)(2n+1)\tau_n} \quad (6-2)$$

ここで、 σ は液滴の表面張力、 ω_n は n 次の振動モードの共振角速度、 r_0 は振動前の半径、 ρ は密度、 η は粘性係数、 τ_n は n 次の振動モードの減衰係数である。従って、空間中に浮遊する液滴の振動を測定することによって、液滴の表面張力と粘性係数を評価することができる。具体的には、空中に保持された液滴の直径の時間変化を計測し、その振動のデータを周波数解析することによって液滴の表面張力と粘性係数を算出することとした。

6-3 表面張力測定実験

6-3-1 実験概要

図 6-1 に示した液滴の変形の一例から、液滴は超音波による振動モードによって鉛直方向、水平方向に変化することがわかる。この変形を図 6-2 に示すデジタル寸法計を用いて直径の時間変化として詳細な計測を行うこととした。また、本実験においては、下側ホーンのみで電力を供給し、下側ホーンから出力される超音波と、上側ホーンにおける反射波で定在波を形成させた。測定対象としては水とラウリン酸を用いた。4-2 節の実験結果より、空中に保持された溶融ラウリン酸は、薄い円盤状で保持される事が確認されている。

6-3-2 水滴の表面張力測定結果

図 6-4 は本システムを用いて、ホーン間に安定に保持されている水滴の水平方向の直径の時間変化を測定した結果である。図 6-3 は液滴の直径の時間変化を振動データとしてフーリエ解析した結果である。この時の下側ホーン入力電力は 43.6W であるとする。図 6-4 によると、液滴の移動によるものと考えられる 10Hz 付近のピークを除いたピークの中で、最も低周波側にあるピークが、最小のモードであり支配的であると考えられる 2 次のモードのピークである。このピークにおける周波数 208.7Hz を液滴の 2 次の共振周波数として共振角速度 ω_2 を算出し、式(6-1)により、 r_0 に

液滴の平均半径 2.37mm を用いて表面張力を算出すると、 $\sigma=2840\text{mN/m}$ となった。この値は 20℃での水の表面張力 72.75mN/m と比べると約 40 倍となった。

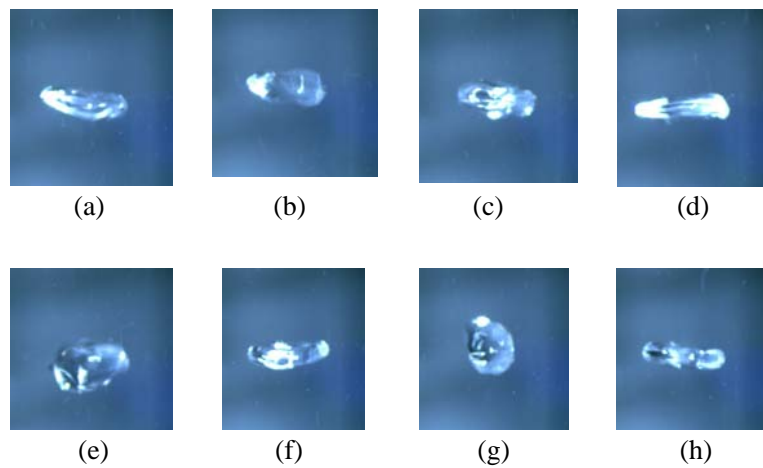


Fig. 6-1 液滴の変形

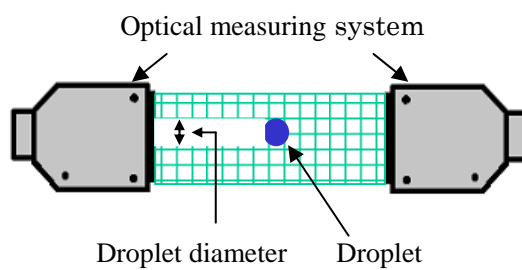


Fig.6-2 デジタル寸法計による液滴径の比接触計測

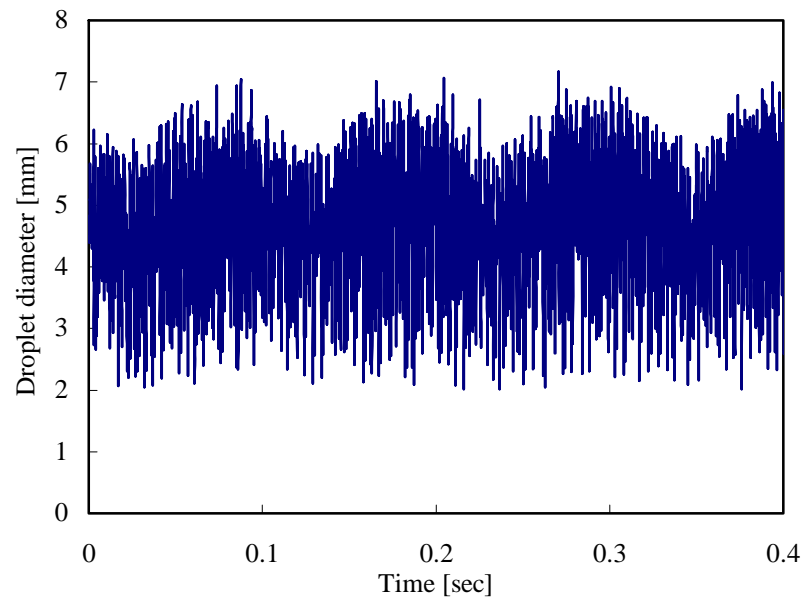


Fig. 6-3 水滴の直径計測結果

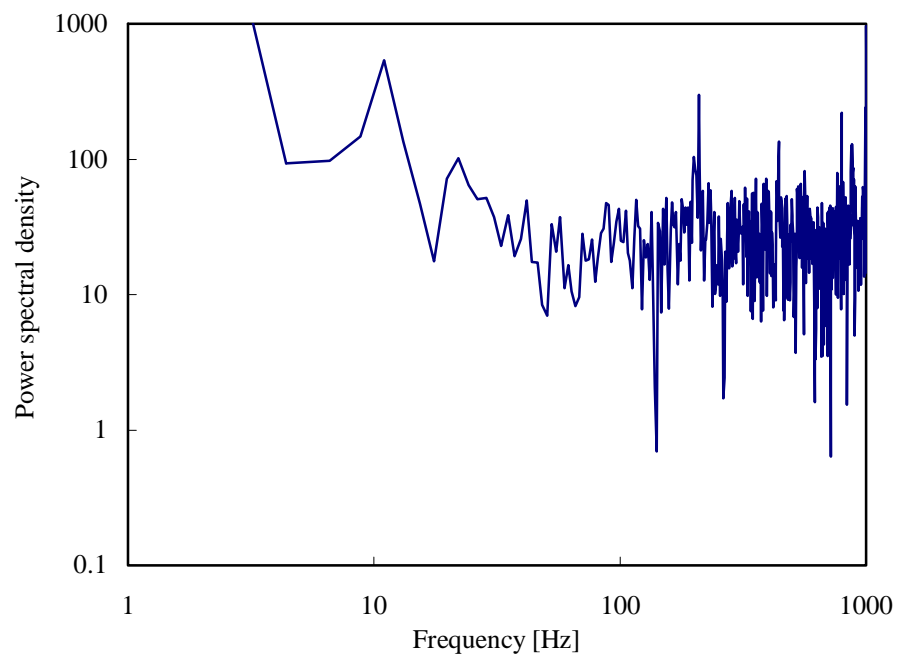


Fig. 6-4 水滴表面振動のフーリエ解析結

6-4 粘性係数測定実験

6-4-1 実験概要

液滴の粘性測定の原理は、音響定在波に意図的に加えた外乱に伴って生じる液滴表面の振動を計測し、その振動のデータから支配的であると考えられる 2 次の振動モードの減衰定数 τ_2 を求め、式(6-2)から粘性係数を算出することにある。この実験においては下側ホーンからの超音波と、上側ホーン先端での反射波によって定在波を形成させた。ホーン間に液滴を保持した後、超音波振動子に入力する信号の電圧を変化させることによって、液滴に減衰振動を生じさせる。

6-4-2 水滴の粘性係数測定結果

図 6-5 は水平方向の液滴直径の時間変化の測定結果である。横軸に時間、縦軸に振動中の液滴直径 d とその平均値 d_0 との差を示した。図 6-5 に示した測定値の上限値を包絡する曲線より減衰定数を算出した。具体的には、2 次の振動モードによる周期 T_2 、ある時間における振幅 x と m 周期後の振幅 x_m を用いて 2 次の減衰定数 τ_2 を式(6-3)より算出することとした。

$$\tau_2 = T_2 / \left(\frac{1}{m} \ln \frac{x_m}{x} \right) \quad (6-3)$$

その結果、図 6-6 に示した実験においては r_0 は液滴の水平方向の平均半径から 1.86mm、 $\tau_2 = 0.904\text{s}$ と評価された。それらの値より、式(6-2)を用いて粘性係数を算出すると、 $\eta = 0.763\text{mPa} \cdot \text{s}$ となった。この値は 20°C における水の粘性係数 1.00mPa・s に近い値であると言える。

表面張力測定結果と既知の値との差が大きかったことと、粘性係数測定結果と既知の値との差が小さかったことから、超音波の音響定在波中の浮遊水滴の変形に支配的な影響を与えているのは、水滴の粘性であることが推定された。

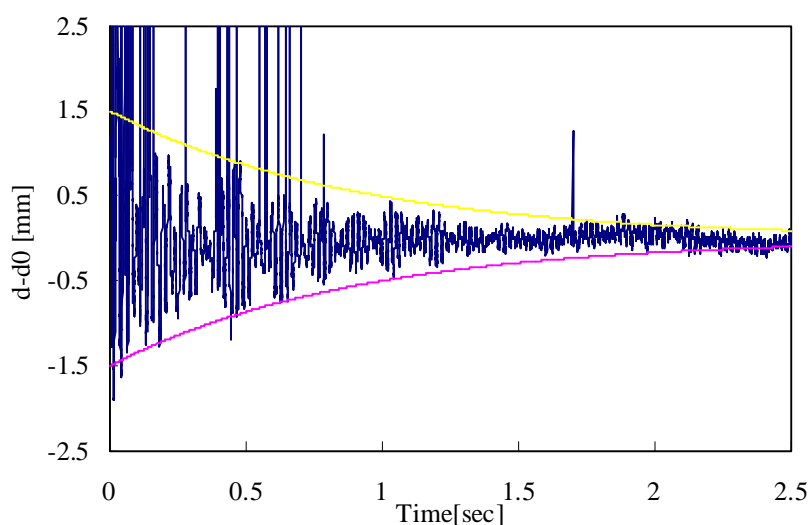


Fig. 6-5 減衰振動時の水滴直径計測結果

6-5 本章のまとめ

超音波の音響定在波中に浮遊させた水滴の変形の周波数から表面張力を算出したところ、既知の値の40倍程度の値となった。超音波の音響定在波中に浮遊させた水滴の変形の減衰定数から粘性係数を算出したところ、既知の値に近い値となった。

これらの結果から、超音波の音響定在波中の浮遊水滴の変形に支配的な影響を与えているのは、水滴の粘性であることが推定された。

第7章 結言

本研究では、超音波の音響定在波による液滴浮遊について、実験的、解析的に調べることによって、以下の知見を得た。得られた知見を章ごとに示す。

第2章 液滴浮遊システム

超音波の音響定在波を用いて通常重力環境下および微小重力環境下において液滴を安定に浮遊可能なシステムを構築した。

第3章 実験結果

超音波の音響定在波による水滴、ラウリン酸液滴の浮遊実験を行うことにより、本研究で開発した液滴浮遊システムを用いて、水滴だけではなく熔融ラウリン酸液滴も安定に浮遊できること、ラウリン酸液滴が凝固した後も安定に浮遊できることを示した。また、浮遊できる液滴の大きさと浮遊した液滴の扁平率は、ともに超音波振動子への入力電力に依存し、大液滴を浮遊するのに適した入力電力があることと、入力電力の増加に従って、液滴の扁平率が増加し、円盤状の形状に変形することを確認した。

PIV による速度分布計測の結果、浮遊物体が無い状態、浮遊物体が存在するいずれにおいても、音響定在波中に定常的な流れが生じることが示された。また、浮遊物体の周囲には渦を伴う流れが生じることが示された。

また、カナダ航空宇宙局が所有する実験用航空機を用いて微小重力環境下での水滴浮遊実験を行うことにより、微小重力環境下において、浮遊できる最大の液滴径には通常重力環境下との大きな違いが見られなかったこと、液滴の扁平率は低下して液滴の形状が真球に近づくものの、真球の大液滴を浮遊するまでには至らなかったことを確認した。

第4章 数値解析

ナビエーストークス方程式を直接的に扱う圧縮性流体を解析可能な数値解析手法を用いて、超音波の音響定在波による高周波の圧力、速度の変動場を評価可能な数値解析手法を構築した。

音響定在波中の圧力場、速度場の変動の周期より2桁程度変動の周期が遅い液滴の併進運動を評価するための数値解析手法を構築した。

第5章 数値解析結果

第4章で構築した数値解析手法を用いることで、高周波で変動する超音波の音響定在波を解析可能であることが実験との比較により示された。また、この数値解析により、テスト部周りが開放されている場合は、テスト部内に2次元的な圧力分布が生じるが、テスト部周りをガラス管で覆われた条件とした場合には、水平方向の勾配が生じず、1次元的な分布となる事が示された。また、音響定在波中の速度場についても、実験において計測した傾向を定性的に再現できることを確認した。

第4章で構築した数値解析手法を用いた音響定在波中の液滴の2次元挙動の数値解析の結果、実験結果と一致する傾向が得られたことから、高周波の音響定在波中の液滴の挙動を解析可能であることを確認した。またこの液滴挙動の解析により、テスト部周りの境界条件が、水平方向の圧力勾配を変化させ、水平方向の液滴浮遊に強い影響を与えることがわかった。鉛直方向に関しては、音響定在波の強度が弱くなると、液滴の浮遊ができなくなることがわかった。

第6章 液滴浮遊の応用技術

超音波の音響定在波中に浮遊させた水滴の変形の周波数から表面張力を算出したところ、既知の値の40倍程度の値となった。超音波の音響定在波中に浮遊させた水滴の変形の減衰定数から粘性係数を算出したところ、既知の値に近い値となった。

これらの結果から、超音波の音響定在波中の浮遊水滴の変形に支配的な影響を与えているのは、水滴の粘性であることが推定された。

以上の知見から、微小重力環境下における超音波の音響定在波による物体浮遊の基礎技術を確立し、その特性を把握した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始懇切なご指導をしてくださるとともに、本論文の主査として懇切な審査と的確なアドバイスを頂きました筑波大学の阿部豊教授に心から感謝の意を表します。

本論文の副査として懇切な審査を頂きました河合達雄教授、松内一雄教授、正司秀信教授、金子暁子に感謝の意を表します。

また本研究に関する事だけでなく、研究者としての方向性をも示して下さいました筑波大学成合秀樹名誉教授に感謝の意を表します。

微小重力実験を行うにあたり、計画の立案の段階から多大な御協力と御指導を頂きましたトロント大学の川路正裕教授に感謝の意を表します。また、この微小重力実験を行うために訪れたオタワにて、実験装置の調整、フライトの管理など、多岐にわたる御協力を頂きました **Mr. Michael J. A. Pryor** に感謝の意を表します。フライト中の注意事項を始め、様々なアドバイスを英語が不得意である私に対して、わかりやすく御指導して頂いた **Mr. Mark Alexander** に感謝の意を表します。オタワでのコミュニケーションをサポートして下さいました **Mrs. Sanja Simic** に感謝の意を表します。お忙しい中、オタワ滞在中の面倒をみて下さったカールトン大学の **Junjie Gu** 助教授に感謝の意を表します。微小重力実験の度重なる延期に伴う日程変更にも関わらず、終始丁寧に対応して頂いた日本郵船航空の荒張さん、吉川さんに感謝の意を表します。

本研究に関して、非常に重要なアドバイスを数多く頂いた愛三工業株式会社の中谷文人さんに感謝の意を表します。また、ホーンの製作方法を始めとして、貴重な技術を御指導下さいました日産自動車の中野剛さんに感謝の意を表します。

本研究において、実験、理論の基礎を的確に御指導して頂きました日産自動車の江ノ口晃さんに感謝の意を表します。

本研究において、その驚異的な器用さと集中力で微小重力実験を始めとして不可能だとされていた実験を何度も成功させてくれた本研究室の山田章吾君に感謝の意を表します。浮遊液滴システムの改良を重ね、より安定な液滴浮遊を可能にしてくれた日向大輔君に感謝の意を表します。緻密な計測システムの設計、製作により、詳細な計測を可能にしてくれた山本祐司君に感謝の意を表します。大量の文献を収集、分析し、複雑な過去の知見をまとめ上げてくれた長谷川浩司君に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 石川正道、日比谷孟俊 “マイクログラビティ”、培風館 (1994)
- [2] J. K. Richard Weber, et al., *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 65, No. 2, (1994)
- [3] W. A. Oran, L. H. Berge, and H. W. Parker, “Parametric study of an acoustic levitation system”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.51, No.5, pp. 626-631, (1980)
- [4] E. H. Trinh, “Compact acoustic levitation device for studies in fluid dynamics and material science in the laboratory and microgravity”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.56, No.11, pp. 2059-2065, (1985)
- [5] E. H. Trinh and J. L. Robey, “Experimental study of streaming flows associated with ultrasonic levitators”, *Phys. fluids*, Vol. 6, No. 11, pp. 3567-3579, (1994)
- [6] K. Ohsaka, A. Rednikov, S. S. Sadhal, and E. H. Trinh, “Noncontact technique for determining viscosity from the shape relaxation of ultrasonically elongated drops”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.73, No.5, pp. 2091-2096, (2002)
- [7] K. Ohsaka, A. Rednikov, and S. S. Sadhal, “Noncontact technique for determining viscosity from the shape relaxation of ultrasonically levitated and initially elongated drops”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.74, No.2, pp. 1107-1112, (2003)
- [8] A. L. Yarin, M. Pfaffenlehner, and C. Tropea, “On the acoustic levitation of droplets”, *J. Fluid Mech.*, vol. 356, pp. 65-91, (1998)
- [9] W-K Rhim, S. K. Chung, Daniel Barder, Kin F. Man, Gary Gutt, Aaron Rulison, and R. E. Spjut “An electrostatic levitator for high-temperature containerless materials processing in 1-g”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.64, No.10, pp. 2961-2970, (1993)
- [10] W-K Rhim, S. K. Chung, A. J. Rulison and R. E. Spjut, “Measurement of Thermophysical Properties of Molten Silicon by a High Temperature Electrostatic Levitator”, *International Journal of Thermophysics*. Vol.18, No.2, pp. 459-469, (1997)
- [11] W-K Rhim, Takehiko Ishikawa, “Noncontact electrical resistivity measurement technique for molten metals”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.69, No.10, pp. 3628-3633, (1998)
- [12] W-K Rhim, K. Ohsaka, and P-F Paradis, “Noncontact technique for measuring surface tension and viscosity of molten materials using high temperature electrostatic levitation”, *Rev. Sci. Instrum.* Vol.70, No.6, pp. 2796-2801, (1999)
- [13] P-F. Paradis, T. Ishikawa, and S. Yoda, “Hybrid electrostatic-aerodynamic levitation furnace for the high-temperature processing of oxide materials on the ground”, *Rev. Sci. Instrum.*, Vol.72, No.6, pp. 2811-2815, (2001)
- [14] P-F. Paradis, T. Ishikawa, and S. Yoda, “Non-contact measurements of thermophysical properties at high temperature”, *Journal of material science*, 36, pp.

1-6, (2001)

- [15] H. Schlichting, "Boundary-Layer Theory Seventh Edition", McGRAW-HILL (1979)
- [16] W. L. Nyborg, "Acoustic microstreaming within a gas-filled bubble", J. Acoust. Soc. Am., Vol.96 (2), p3239 (1994)
- [17] Lord. Reyleigh, "On the circulation of air observed in Kundt's tubes and some allied acoustical problems", Philos. Trans. R. Soc. London Ser., A 175, pp1-21 (1883)
- [18] H. Lam, "Hydrodynamics", Dover, New York, pp436-437 (1945)
- [19] A. L. Yarin, et al., "Evaporation of acoustically levitated droplets", J. Fluid Mech., Vol.399, pp.159-204 (1999)
- [20] M. ラッフエル, C. E. ヴィラート, J. コンペンハウス, "PIV の基礎と応用", シュプリンガー・フェアラーク東京, (2000)
- [21] L. D. Cloutman, C. W. Hirt, and N.C. Romero, "SOLA-ICE, A Numerical Solution Algorithm for Transient Compressive Fluid Flow", LA-6236, (1976)
- [22] 化学工学協会編 "気泡・液滴・分散工学", 槇書店 (1982)
- [23] 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)
- [24] H. Lamb, "On the Oscillation of a Viscous Spheroid", Proc. of Lon. Math. Soc. Vol. 13, pp. 51-63

著者論文リスト

原著論文

1. 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(B編), 70巻, 692号, (2004-4), pp.242-247
2. 阿部豊, 青木一義, “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”, 日本機械学会論文集(B編), 71巻, 712号, (2005-12), pp.2864-2869
3. Yutaka Abe, Daisuke Hyuga, Shogo Yamada, Kazuyoshi Aoki, “Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Droplet Levitated by Ultrasonic Wave”, Annals of New York Academy of Sciences 1077:49-62(2006)
4. 阿部豊, 日向大輔, 青木一義, 栗津茂, “超音波による大粒径浮遊液滴の流動挙動に関する研究”, 日本混相流学会混相流研究の進展 2, p71-76(2007)
5. Yutaka Abe, Yuji Yamamoto, Daisuke Hyuga, Kazuyoshi Aoki, Akiko Fujiwara, “Interfacial Stability and Internal Flow of a Levitated Droplet”, Microgravity Science and Technology XIX-3/4 2007 Two-Phase System for Ground and Space Applications, p33-34 (2007)
6. Koji Hasegawa, Yutaka Abe, Akiko Fujiwara, Yuji Yamamoto, Kazuyoshi Aoki, “External Flow of an Acoustically Levitated Droplet”, Microgravity Science and Technology, Vol.20, No.3-4, pp.261-264 (2008)
7. Yuji Yamamoto, Yutaka Abe, Akiko Fujiwara, Koji Hasegawa, Kazuyoshi Aoki, “Internal Flow of an Acoustically Levitated Droplet”, Microgravity Science and Technology, Vol.20, No.3-4, pp.277-280 (2008)
8. 松田 寿, 大友 文雄, 田中 元史, 林 和夫, 野田 伸一, 水野 末良, 内田 竜朗, 青木 一義, 新関 良樹, 野田 悦夫, “非平衡プラズマによる気流制御 : パルス変調制御の効果”, 日本機械学会論文集. B編 74巻, 744号, (2008-8) pp.1667-1672
9. Yutaka Abe, Yuji Yamamoto, Daisuke Hyuga, Shigeru Awazu, Kazuyoshi Aoki, “Study on Interfacial Stability and Internal Flow of a Droplet Levitated by Ultrasonic Wave”, Annals of the New York Academy of Sciences, Vol.1161, pp.211-224 (2009)
10. Koji Hasegawa, Yutaka Abe, Akiko Kaneko, Yuji Yamamoto, Kazuyoshi Aoki, “Visualization Measurement of Streaming Flows Associated with a Single-Acoustic Levitator”, Microgravity Science and Technology, Vol.21, Supplement 1, pp.9-14(2009)

国際会議論文（査読有り）

1. Kazuyoshi AOKI, Shogo YAMADA, Masahiro KAWAJI, Yutaka ABE, "Study on Characteristic of Droplet Levitation by Ultrasonic Wave", 5th International Conference on Multiphase Flow(ICMF-2004), 256, (2004-5,6), pp1-13, (CD-ROM)
2. Kazuyoshi AOKI, Daisuke HYUGA, Yutaka ABE, " Simulation for Forces on Levitated Droplet in Ultrasonic Standing Wave", 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, FEDSM2007-37179, (2007)
3. Shogo YAMADA, Kazuyoshi AOKI, Masahiro KAWAJI, Katsuhiro NISHINARI, Yutaka ABE, "Study on Levitated droplet surface behavior by ultrasonic wave", 5th International Conference on Multiphase Flow(ICMF-2004), 427, (2004-5,6), pp1-8, (CD-ROM)
4. Yutaka Abe, Daisuke HYUGA, Shogo YAMADA, Kazuyoshi AOKI: Study on Internal Flow and Surface Deformation of Large Levitated by Ultrasonic Wave, Proceedings of the Interdisciplinary Transport Phenomena in Microgravity and Space Sciences Conference IV, pp.1-27-1-32, 2005.
5. Yutaka Abe, Yuji Yamamoto, Daisuke Hyuga, Shigeru Awazu, Kazuyoshi Aoki, "Study on Interfacial Stability and Internal Flow of a Droplet Levitated by Ultrasonic Wave", Proceedings of the Interdisciplinary Transport Phenomena in Microgravity and Space Sciences Conference V, pp.9-1~9-10, 2007
6. Yuji Yamamoto, Yutaka Abe, Akiko Fujiwara, Koji Hasegawa, Kazuyoshi Aoki, "Internal flow of acoustically levitated droplet", 3rd International Topical Team Workshop on Two-Phase Systems for Ground and Space Applications, pp.90, 2008, 9
7. Koji Hasegawa, "Visualization measurement of external flow around an acoustically levitated droplet", 27th International Symposium on Space Technology and Science, 2009-h-08s, 2009, 7
8. R. Hamazaki, Y. Kojima, H. Yanagisawa, M. Akinaga, H. Oikawa, M. Tahara, Y. Suzuki, T. Tobimatsu, K. Aoki, T. Kurita, "The Enhanced Severe Accident Mitigation Systems for a BWR", The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13), 2009, 9

付録 A 音場解析プログラム

PROGRAM SOLAICE

REAL NU, D

INTEGER CYCLE, mode

COMMON/SC1A/XC(3000), BETA(1500, 3000), U(1500, 3000),

&V(1500, 3000), UN(1500, 3000), VN(1500, 3000), P(1500, 3000),

&RO(1500, 3000), RON(1500, 3000), E(1500, 3000),

&EN(1500, 3000)

COMMON/SC2A/X(3000), Y(6000), UF(1500, 3000), VF(1500, 3000),

&SVAL(1500, 3000), CONV(2000)

COMMON/SC3A/DELX, DELY, T, VELMX, XMAX, YMAX, VELMX1

COMMON/SC1I/IBAR, JBAR, IMAX, JMAX, IM1, JM1, IM2, JM2, CYCLE, LCON

COMMON/SC3A/PI, DELT, NU, CYL, EPSI, PR, GX, GY, UI, VI, TWFIN

COMMON/SC4A/CWPRT, CWPLT, OMG, ALPHA, WL, WR, WT, WB, GAM1, ASQ

COMMON/SC5A/ROI, EAMB, EDRIVE, WTMOL, RGAS, TWPRT, TWPLT

COMMON/SC6A/Eb, ROb

REAL PRDGT, DELPMAx

REAL ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK, RAMDA

COMMON /USW/ ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK

COMMON /MESH/DELXo, DELYo, Hwid, Hhig

COMMON /OBSTACLE/ Obs(1500, 3000)

C ++++ READ INITIAL INPUT DATA

35 FORMAT(1H1)

36 FORMAT(1X, I7, 5X, I3, 5X, I3, 5X, I3, 6X, E12. 5)

45 FORMAT(70A1)

46 FORMAT(1H+, 80X, 2HT=, 1PE10. 3, 4X, 6HCYCLE=, I4)

47 FORMAT(6X, 1HI, 7X, 1HJ, 12X, 1HU, 17X, 1HV, 17X, 1HP, 16X, 2HRO, 17X, 1HE,
1 17X, 1HT)

48 FORMAT(3X, I3, 5X, I3, 5X, 1PE12. 5, 5(6X, 1PE12. 5))

49 FORMAT(4X, 6HITER= , I5, 7X, 6HTIME= , 1PE13. 6, 7X, 7HCYCLE= , I8, 7X,
1 7HIDELP= , I3, 7X, 7X, 7HJDELP= , I3, 7X, 9HDELPMAx= , E13. 6)

50 FORMAT(6X, 6HIBAR= , 1PE12. 5/6X, 6HJBAR= , E12. 5/6X, 6HDELX= , E12. 5/
16X, 6HDELY= , E12. 5/6X, 6HDELT= , E12. 5/8X, 4HNU= , E12. 5/7X, 5HCYL= ,
2E12. 5/6X, 6HEPSI= , E12. 5/8X, 4HPR= , E12. 5/8X, 4HGX= , E12. 5/8X, 4HGY= ,
3E12. 5/8X, 4HUI= , E12. 5/8X, 4HVI= , E12. 5/5X, 7HVELMX= , E12. 5/
45X, 7HTWFIN= , E12. 5/5X, 7HCWPRT= , E12. 5/5X, 7HCWPLT= , E12. 5/7X,
55HOMG= , E12. 5/5X, 7HALPHA= , E12. 5/8X, 4HWL= , E12. 5/8X, 4HWR= , E12. 5/
68X, 4HWT= , E12. 5/8X, 4HWB= , E12. 5/6X, 6HGAM1= , E12. 5/7X, 5HASQ= ,
7E12. 5/7X, 5HROI= , E12. 5/5X, 7HT AMB= , E12. 5/3X, 9HDRIVE T= , E12. 5/
84X, 8HMOL WT= , E12. 5/6X, 6HRGAS= , E12. 5)

51 FORMAT(6X, 6HDELT= , E12. 5/8X, 4HNU= , E12. 5/5X, 5HCYL= , E12. 5/
&6X, 6HEPSI= , E12. 5/5X, 7HCWPRT= , E12. 5/5X, 7HCWPLT= , E12. 5/
&7X, 5HOMG= , E12. 5/5X, 7HALPHA= , E12. 5/8X, 4HWL= , E12. 5/
&8X, 4HWR= , E12. 5/8X, 4HWT= , E12. 5/8X, 4HWB= , E12. 5/
&6X, 6HGAM1= , E12. 5/7X, 5HASQ= , E12. 5/7X, 5HROI= , E12. 5/
&5X, 7HT AMB= , E12. 5)

```

52 FORMAT (3X, I5, 3X, E10. 3, 3X, E10. 3, 3X, I4, 3X, I4, 3X, E10. 3, 3X, E10. 3)
C ++++ COMPUTE CONSTANT TERMS
      IMAX=IBAR+2
      JMAX=JBAR+2
      IM1=IMAX-1
      JM1=JMAX-1
c      RDX=1. /DELX
c      RDY=1. /DELY
c      RDXo=1. /DELXo
c      RDYo=1. /DELYo
c      RDX2=RDX*RDX
c      RDY2=RDY*RDY
c      RDXo2=RDXo*RDXo
c      RDYo2=RDYo*RDYo
      OTD=1. /3.
      FTD=4. /3.
      CSUBV=RGAS/ (WTMOL*GAM1)
      CSUBP= (GAM1+1. ) *CSUBV
      EAMB=EAMB*CSUBV
      EDRIVE=EDRIVE*CSUBV
      XKAP=NU*CSUBP*ROI/PR
      XMU=NU*ROI
      PRTDT=DELT*CWPRT

```

```

C      *** SET ULTRASONIC WAVE FIELD QUANTITIES
C
      RAMDA=ONSOK/FREQ
      HASUK= (2. 0*PI) /RAMDA
      OMEGA=2. 0*PI*FREQ
C
      WRITE (*, *), "Start: Press 1, Restart Press 2"
      READ (*, *), mode

C +++ INITIALIZE THE MESH
14 CONTINUE
      DO 15 I=1, IMAX
          IF (I*DELX. LE. Hwid) Then
              XC (I) =DELX* (FLOAT (I) -1. 5)
              ENDIF
              XC (I) =Hwid+ (FLOAT (I) -Hwid/DELX-1. 5) *DELXo
          IF (I*DELY. LE. Hhig) Then
              YC (I) =DELY* (FLOAT (I) -1. 5)
              ENDIF
              YC (I) =Hhig+ (FLOAT (I) -Hhig/DELY-1. 5) *DELYo
          IF (I*DELX. LE. Hwid) Then
              XC (I) =DELX* (FLOAT (I) -1. 5)
              ENDIF
              XC (I) =Hwid+ (FLOAT (I) -Hwid/DELX-1. 5) *DELXo
          IF (I*DELY. LE. Hhig) Then
              YC (I) =DELY* (FLOAT (I) -1. 5)
              ENDIF
              YC (I) =Hhig+ (FLOAT (I) -Hhig/DELY-1. 5) *DELYo
      15 CONTINUE

      JM2=JMAX-2
      IM2=IMAX-2

20 CONTINUE

```

TWPRT=0.

TWPLT=0.

OPEN (11, FILE=' OUTPUT1. DAT' , STATUS=' UNKNOWN')

OPEN (12, FILE=' OUTPUT2. DAT' , STATUS=' UNKNOWN')

OPEN (15, FILE=' HISTORY. DAT' , STATUS=' UNKNOWN')

OPEN (16, FILE=' NOTconverge. DAT' , STATUS=' UNKNOWN')

C ++++ SET OBSTACLE

C Obs (I, J)=1.0 TO SET OBSTACLE

c 30 CONTINUE

DO 32 J=JM1-40, JM1

DO 32 I=1, 40

Obs (I, J)=1.0

32 CONTINUE

DO 34 J=1, 40

DO 34 I=1, 40

Obs (I, J)=1.0

34 CONTINUE

DRPcent=INT (Hhig/DELYo)+INT (9.0e-3/DELY)

DRPdia=6.0e-3

DRPI=1

DRPr=INT (DRPdia*0.5/DELX)

DRPt=DRPcent+INT (DRPdia*0.5/DELX)

DRPb=DRPcent-INT (DRPdia*0.5/DELX)

WRITE (*, *) DRPr, DRPt, DRPb

DO 40 J=DRPb, DRPt

DO 40 I=DRPI, DRPr

Obs (I, J)=1.0

40 CONTINUE

C ++++ INITIALIZE DEPENDENT VARIABLES

T=0.

ITER=0

CYCLE=0

DO 56 J=1, JMAX

DO 56 I=1, IMAX

U (I, J)=UI

V (I, J)=VI

E (I, J)=.9

RO (I, J)=ROI

P (I, J)=GAM1*RO (I, J)*E (I, J)

```

      RON(I, J)=RO(I, J)
      EN(I, J)=E(I, J)
56 CONTINUE

      IF(mode.gt.1.5) CALL RESTART (2)

57 CONTINUE

      WRITE(12, 52), T, PRTDT, TWFIN, IMAX, JMAX, DELX, DELY
      WRITE(12, 51), DELT, NU, CYL, EPSI, CWPRT, CWPLT, OMG, ALHPA,
&  WR, WL, WT, WB, GAM1, ASQ, ROI, AMB
c      UN(10, 10)=.01
c      U(10, 10)=UN(10, 10)
      GOTO 75
c      GOTO 70
C +++++ START CYCLE
      59 CONTINUE
      ITER=0
      FLG=1.
      LJUMP=0
c      WRITE(*, *), T
C +++++ COMPUTE TEMPORARY U AND V
      DO 60 J=2, JM1
      DELYtem=DELY

```

```

      IF (J*DELYo.LT.Hhig.OR.(JMAX-J)*DELYo.LT.Hhig) Then
      DELYtem=DELYo
      ENDIF
      DO 60 I=2, IM1
      DELXtem=DELX
      IF (I*DELX.GT.Hwid) Then
      DELXtem=DELXo
      ENDIF

      RDX=1./DELXtem
      RDY=1./DELYtem
      RDX2=RDX*RDX
      RDY2=RDY*RDY

      FUX=.5*RDX*(UN(I, J)*(UN(I+1, J)-UN(I-1, J))
1  -ALPHA*ABS(UN(I, J))*(UN(I+1, J)-2.*UN(I, J)+UN(I-1, J)))
      FUY=RDY*.125*((VN(I, J)+VN(I+1, J)+VN(I, J-1)+VN(I+1, J-1))
1  *(UN(I, J+1)-UN(I, J-1))
2  -ALPHA*ABS(VN(I, J)+VN(I+1, J)+VN(I, J-1)+VN(I+1, J-1))
3  *(UN(I, J+1)-2.*UN(I, J)+UN(I, J-1)))
      FVX=RDX*.125*((UN(I-1, J+1)+UN(I, J+1)+UN(I-1, J)+UN(I, J))
1  *(VN(I+1, J)-VN(I-1, J))
2  -ALPHA*ABS(UN(I-1, J+1)+UN(I, J+1)+UN(I-1, J)+UN(I, J))
3  *(VN(I+1, J)-2.*VN(I, J)+VN(I-1, J)))

```

```

      FVY=.5*RDY*(VN(I,J)*(VN(I,J+1)-VN(I,J-1))
1  -ALPHA*ABS(VN(I,J))*(VN(I,J+1)-2.*VN(I,J)+VN(I,J-1)))
C +++++ DIFFUSION TERMS
      VK=2.*XMU/(RO(I,J)+RO(I+1,J))
      VISX=VK*((UN(I+1,J)-2.*UN(I,J)+UN(I-1,J))*FTD*RDX2
1  +(UN(I,J+1)-2.*UN(I,J)+UN(I,J-1))*RDY2
2  +(VN(I+1,J)-VN(I+1,J-1)-VN(I,J)+VN(I,J-1))*OTD*RDX*RDY
3  +FTD*CYL*((UN(I+1,J)-UN(I-1,J))*5*RDX-UN(I,J)/(XC(I)+.5
4  *DELXtem))/(XC(I)+.5*DELXtem))
      VK=2.*XMU/(RO(I,J)+RO(I,J+1))
      VISY=VK*((VN(I+1,J)-2.*VN(I,J)+VN(I-1,J))*RDX2
1  +(VN(I,J+1)-2.*VN(I,J)+VN(I,J-1))*RDY2*FTD
2  +(UN(I,J+1)-UN(I,J)-UN(I-1,J+1)+UN(I-1,J))*OTD*RDX*RDY
3  +CYL*((VN(I+1,J)-VN(I-1,J))*5*RDX+OTD*5*RDY*(UN(I,J+1)
4  +UN(I-1,J+1)-UN(I,J)-UN(I-1,J)))/XC(I))
      U(I,J)=UN(I,J)+DELT*(2.*(P(I,J)-P(I+1,J))*RDX/(RO(I,J)+RO(I+1,J))
1  +GX-FUX-FUY+VISX)
      V(I,J)=VN(I,J)+DELT*(2.*(P(I,J)-P(I,J+1))*RDY/(RO(I,J)+RO(I,J+1))
1  +GY-FVX-FVY+VISY)
60 CONTINUE

C +++++ SET BOUNDARY CONDITIONS
      75 CONTINUE
c      FLG=1.0

```

```

DO 140 J=2, JM1
RO(1,J)=RO(2,J)
RON(1,J)=RON(2,J)
E(1,J)=E(2,J)
EN(1,J)=EN(2,J)
RO(IMAX,J)=RO(IM1,J)
RON(IMAX,J)=RON(IM1,J)
E(IMAX,J)=E(IM1,J)
EN(IMAX,J)=EN(IM1,J)
GOTO (102,104,106,108,110),WL
102 U(1,J)=0.
V(1,J)=V(2,J)
GOTO 111
104 U(1,J)=0.
V(1,J)=-V(2,J)
GOTO 111
106 IF(ITER.GT.0) GOTO 111
U(1,J)=U(2,J)
V(1,J)=V(2,J)
GOTO 111
108 U(1,J)=U(IM1,J)
V(1,J)=V(IM1,J)
RO(1,J)=RO(IM1,J)
RON(1,J)=RON(IM1,J)
E(1,J)=E(IM1,J)

```

```

      EN(1, J)=EN(IM1, J)
      GOTO 111
110 IF(ITER. GT. 0) GOTO 111
c      U(3, J)=U(4, J)
c      V(3, J)=V(4, J)
c      U(2, J)=U(3, J)
c      V(2, J)=V(3, J)
      U(1, J)=U(2, J)
      V(1, J)=V(2, J)
c      P(1, J)=P(2, J)
c      RO(3, J)=RO(4, J)
c      RON(3, J)=RON(4, J)
c      RO(1, J)=RO(2, J)
c      RON(1, J)=RON(2, J)
c      RO(2, J)=RO(3, J)
c      RON(2, J)=RON(3, J)
c      E(3, J)=E(4, J)
c      EN(3, J)=EN(4, J)
c      E(1, J)=E(2, J)
c      EN(1, J)=EN(2, J)
c      E(2, J)=E(3, J)
c      EN(2, J)=EN(3, J)
c      E(1, J)=E(2, J)
c      EN(1, J)=EN(2, J)
c      RO(2, J)=ROb

```

```

c      RON(2, J)=ROb
c      RO(1, J)=ROb
c      RON(1, J)=ROb
c      E(1, J)=Eb
c      EN(1, J)=Eb
c      E(1, J)=Eb
c      EN(1, J)=Eb

111 GOTO (122, 124, 126, 128, 130), WR
122 U(IM1, J)=0.
      V(IMAX, J)=V(IM1, J)
      GOTO 140
124 U(IM1, J)=0.
      V(IMAX, J)=-V(IM1, J)
      GOTO 140
126 IF(ITER. GT. 0) GOTO 140
      U(IM1, J)=U(IM2, J)
      V(IMAX, J)=V(IM1, J)
      GOTO 140
128 U(IMAX, J)=U(2, J)
      V(IMAX, J)=V(2, J)
      RO(IMAX, J)=RO(2, J)
      RON(IMAX, J)=RON(2, J)
      E(IMAX, J)=E(2, J)
      EN(IMAX, J)=EN(2, J)

```

```

      GOTO 140
130 IF (ITER. GT. 0) GOTO 140
c      U(IMAX-2, J)=U(IMAX-3, J)
c      V(IMAX-2, J)=V(IMAX-3, J)
c      U(IMAX-1, J)=U(IMAX-2, J)
c      V(IMAX-1, J)=V(IMAX-2, J)
      U(IMAX, J)=U(IMAX-1, J)
      V(IMAX, J)=V(IMAX-1, J)
c      P(IMAX, J)=P(IMAX-1, J)
c      RO(IMAX-2, J)=RO(IMAX-3, J)
c      RON(IMAX-2, J)=RON(IMAX-3, J)
c      RO(IMAX, J)=RO(IMAX-1, J)
c      RON(IMAX, J)=RON(IMAX-1, J)
c      RO(IMAX-1, J)=RO(IMAX-2, J)
c      RON(IMAX-1, J)=RON(IMAX-2, J)
c      RO(IMAX, J)=RO(IMAX-1, J)
c      RON(IMAX, J)=RON(IMAX-1, J)
c      E(IMAX-2, J)=E(IMAX-3, J)
c      EN(IMAX-2, J)=EN(IMAX-3, J)
c      E(IMAX, J)=E(IMAX-1, J)
c      EN(IMAX, J)=EN(IMAX-1, J)
c      E(IMAX-1, J)=E(IMAX-2, J)
c      EN(IMAX-1, J)=EN(IMAX-2, J)
c      E(IMAX, J)=E(IMAX-1, J)
c      EN(IMAX, J)=EN(IMAX-1, J)

```

```

c      RO(IMAX-1, J)=ROb
c      RON(IMAX-1, J)=ROb
c      E(IMAX-1, J)=Eb
c      EN(IMAX-1, J)=Eb
c      RO(IMAX, J)=ROb
c      RON(IMAX, J)=ROb
c      E(IMAX, J)=Eb
c      EN(IMAX, J)=Eb
140 CONTINUE
      DO 180 I=2, IM1
      RO(I, 1)=RO(I, 2)
      RON(I, 1)=RON(I, 2)
      E(I, 1)=E(I, 2)
      EN(I, 1)=EN(I, 2)
      RO(I, JMAX)=RO(I, JM1)
      RON(I, JMAX)=RO(I, JM1)
      E(I, JMAX)=E(I, JM1)
      EN(I, JMAX)=EN(I, JM1)
      GOTO (152, 154, 156, 158, 160), WT
152 V(I, JM1)=0.
      U(I, JMAX)=U(I, JM1)
      GOTO 161
154 V(I, JM1)=0.
      U(I, JMAX)=-U(I, JM1)
      GOTO 161

```

```

156 IF (ITER. GT. 0) GOTO 161
    V(I, JM1)=V(I, JM2)
    U(I, JMAX)=U(I, JM1)
    GOTO 161
158 V(I, JMAX)=V(I, 2)
    U(I, JMAX)=U(I, 2)
    RO(I, JMAX)=RO(I, 2)
    RON(I, JMAX)=RON(I, 2)
    E(I, JMAX)=E(I, 2)
    EN(I, JMAX)=EN(I, 2)
    GOTO 161
160 IF (ITER. GT. 0) GOTO 161
c    V(I, JMAX-2)=V(I, JMAX-3)
c    U(I, JMAX-2)=U(I, JMAX-3)
c    V(I, JMAX-1)=V(I, JMAX-2)
c    U(I, JMAX-1)=U(I, JMAX-2)
    V(I, JMAX)=V(I, JMAX-1)
    U(I, JMAX)=U(I, JMAX-1)
c    P(I, JMAX)=P(I, JMAX-1)
c    RO(I, JMAX-2)=RO(I, JMAX-3)
c    RON(I, JMAX-2)=RON(I, JMAX-3)
c    RO(I, JMAX)=RO(I, JMAX-1)
c    RON(I, JMAX)=RON(I, JMAX-1)
c    RO(I, JMAX-1)=RO(I, JMAX-2)
c    RON(I, JMAX-1)=RON(I, JMAX-2)

```

```

c    RO(I, JMAX)=RO(I, JMAX-1)
c    RON(I, JMAX)=RON(I, JMAX-1)
c    E(I, JMAX-2)=E(I, JMAX-3)
c    EN(I, JMAX-2)=EN(I, JMAX-3)
c    E(I, JMAX)=E(I, JMAX-1)
c    EN(I, JMAX)=EN(I, JMAX-1)
c    E(I, JMAX-1)=E(I, JMAX-2)
c    EN(I, JMAX-1)=EN(I, JMAX-2)
c    E(I, JMAX)=E(I, JMAX-1)
c    EN(I, JMAX)=EN(I, JMAX-1)
c    RO(I, JMAX-1)=ROb
c    RON(I, JMAX-1)=ROb
c    E(I, JMAX-1)=Eb
c    EN(I, JMAX-1)=Eb
c    RO(I, JMAX)=ROb
c    RON(I, JMAX)=ROb
c    E(I, JMAX)=Eb
c    EN(I, JMAX)=Eb
161 GOTO (172, 174, 176, 178, 179), WB
172 V(I, 1)=0.
    U(I, 1)=U(I, 2)
    GOTO 180
174 V(I, 1)=0.
    U(I, 1)=-U(I, 2)
    GOTO 180

```

```

176 IF (ITER. GT. 0) GOTO 180
      V(I, 1)=V(I, 2)
      U(I, 1)=U(I, 2)
      GOTO 180
178 V(I, 1)=V(I, JM1)
      U(I, 1)=U(I, JM1)
      RO(I, 1)=RO(I, JM1)
      RON(I, 1)=RON(I, JM1)
      E(I, 1)=E(I, JM1)
      EN(I, 1)=EN(I, JM1)
      GOTO 180
179 IF (ITER. GT. 0) GOTO 180
c      V(I, 2)=V(I, 3)
c      U(I, 2)=U(I, 3)
      V(I, 1)=V(I, 2)
      U(I, 1)=U(I, 2)
c      P(I, 1)=P(I, 2)
c      RO(I, 3)=RO(I, 4)
c      RON(I, 3)=RON(I, 4)
c      RO(I, 1)=RO(I, 2)
c      RON(I, 1)=RON(I, 2)
c      RO(I, 2)=RO(I, 3)
c      RON(I, 2)=RON(I, 3)
c      RO(I, 1)=RO(I, 2)
c      RON(I, 1)=RON(I, 2)

```

```

c      E(I, 3)=E(I, 4)
c      EN(I, 3)=EN(I, 4)
c      E(I, 1)=E(I, 2)
c      EN(I, 1)=EN(I, 2)
c      E(I, 2)=E(I, 3)
c      EN(I, 2)=EN(I, 3)
c      E(I, 1)=E(I, 2)
c      EN(I, 1)=EN(I, 2)
c      RO(I, 2)=ROb
c      RON(I, 2)=ROb
c      E(I, 2)=Eb
c      EN(I, 2)=Eb
c      RO(I, 1)=ROb
c      RON(I, 1)=ROb
c      E(I, 1)=Eb
c      EN(I, 1)=Eb

```

180 CONTINUE

C +++ BOUNDARY AROUND OBSTACLES

182 CONTINUE

DO 187 I=2, IMAX

DO 187 J=2, JMAX

IF (Obs(I, J). Lt. 0.1) GOTO 187

```

IF (Obs(I+1, J). lt. 0. 1) THEN
RO(I, J)=RO(I+1, J)
RON(I, J)=RON(I+1, J)
E(I, J)=E(I+1, J)
EN(I, J)=EN(I+1, J)
GOTO 187
ENDIF
IF (Obs(I-1, J). lt. 0. 1) THEN
RO(I, J)=RO(I-1, J)
RON(I, J)=RON(I-1, J)
E(I, J)=E(I-1, J)
EN(I, J)=EN(I-1, J)
GOTO 187
ENDIF
IF (Obs(I, J+1). lt. 0. 1) THEN
RO(I, J)=RO(I, J+1)
RON(I, J)=RON(I, J+1)
E(I, J)=E(I, J+1)
EN(I, J)=EN(I, J+1)
GOTO 187
ENDIF
IF (Obs(I, J-1). lt. 0. 1) THEN
RO(I, J)=RO(I, J-1)
RON(I, J)=RON(I, J-1)
E(I, J)=E(I, J-1)

```

```

EN(I, J)=EN(I, J-1)
GOTO 187
ENDIF
P(I, J)=GAM1*ROI*EAMB
E(I, J)=0. 9
U(I, J)=0. 0
V(I, J)=0. 0
c P(I, J)=0. 0

183 CONTINUE

IF (Obs(I+1, J). GT. 0. 1) GO TO 184
V(I, J)=-V(I+1, J)
U(I, J)=0. 0
C V(I+1, J)=V(I, J)
c RO(I, J)=RO(I+1, J)
c RON(I, J)=RON(I+1, J)
c E(I, J)=E(I+1, J)
c EN(I, J)=EN(I+1, J)
184 IF (Obs(I, J+1). GT. 0. 1) GO TO 185
U(I, J)=-U(I, J+1)
V(I, J)=0. 0
c RO(I, J)=RO(I, J+1)
c RON(I, J)=RON(I+1, J+1)
c E(I, J)=E(I+1, J+1)

```

```

c      EN(I, J)=EN(I+1, J+1)

185 IF (Obs(I-1, J).GT.0.1) GO TO 186
      V(I, J)=-V(I-1, J)
      U(I, J)=0.0
c      RO(I, J)=RO(I-1, J)
c      RON(I, J)=RON(I-1, J)
c      E(I, J)=E(I-1, J)
c      EN(I, J)=EN(I-1, J)
186 IF (Obs(I, J-1).GT.0.1) GO TO 187
      U(I, J)=-U(I, J-1)
      V(I, J)=0.0
c      RO(I, J)=RO(I, J-1)
c      RON(I, J)=RON(I, J-1)
c      E(I, J)=E(I, J-1)
c      EN(I, J)=EN(I, J-1)

187 CONTINUE

C +++ SPECIAL BOUNDARY CONDITIONS
DO 190 I=2, IMAX-1

      IF(I.LT.40) THEN

```

```

C      IF(I.GT.51.AND.I.LT.69) THEN
          V(I, 40)=1.0*((HASUK*ATUP)/(OMEGA*RO(I, 20)))*COS(OMEGA*T)
c      V(I, 7)=1.0*((HASUK*ATUP)/(OMEGA*RO(I, 20)))*COS(OMEGA*T)
c      V(I, 1)=0.0
c      V(I, 50)=1.0E+01
c      RO(I, 50)=RO1
c      E(I, 50)=.9
c      U(I, 2)=0.0
          ENDIF
190 CONTINUE
      IF(CYCLE.EQ.0) GOTO 480
c      IF(LJUMP.EQ.1) GOTO 480
C ++++ HAS CONVERGENCE BEEN REACHED
C      IF(FLG.EQ.0.0.AND.ITER.GT.9.0) GOTO 400
c      WRITE(*,*), FLG
      IF(FLG.EQ.0.0) GOTO 400
c      IF(FLG.EQ.0.0) GOTO 480
      ITER=ITER+1
      ITRX=ITER
      IF(CYCLE.LT.2) GOTO 400
c      IF(CYCLE.LT.2) GOTO 480
      IF(ITER.LT.200) GOTO 255
c      T=TWFIN
      GOTO 502
C ++++ COMPUTE UPDATED CELL VELOCITIES U, V

```

255 CONTINUE

FLG=0.

DELPMAX=0.0

DO 300 J=2, JM1

DELYtem=DELY

IF (J*DELYo. LT. Hhig. OR. (JMAX-J)*DELYo. LT. Hhig) Then

DELYtem=DELYo

ENDIF

DO 300 I=2, IM1

DELXtem=DELX

IF (I*DELX. GT. Hwid) Then

DELXtem=DELXo

ENDIF

RDX=1./DELXtem

RDY=1./DELYtem

RDX2=RDX*RDX

RDY2=RDY*RDY

IF (Obs(I, J). gt. 0.1) GOTO 291

D=RDX*(U(I, J)-U(I-1, J))+RDY*(V(I, J)-V(I, J-1))+CYL*(U(I, J)

1 +U(I-1, J))/(2.*XC(I))

ROT=RON(I, J)/(1.+DELT*D)

ET=EN(I, J)-P(I, J)*DELT*D/RO(I, J)

PT=ASQ*(ROT-RO1)+GAM1*ROT*ET

DELP=-BETA(I, J)*(P(I, J)-PT)

P(I, J)=P(I, J)+DELP

C+++++

C++++Check the DELP value

C+++++

IF (abs(DELP). lt. abs(DELPMAX)) GOTO 289

DELPMAX=DELP

IDELP=I

JDELP=J

C+++++

289 CONTINUE

IF (Obs(I, J). gt. 0.5) GOTO 290

C IF (ABS(DELP). GE. (P(I, J)*EPSI). AND. ITER. GT. 5) THEN

c IF (ABS(DELP). LT. (P(I, J)*EPSI)) GOTO 290

IF (ABS(DELP). LT. EPSI) GOTO 290

IF (DELP. EQ. 0.0) GOTO 290

c IF (ABS(DELP). LT. EPSI) GOTO 290

FLG=1.

c IF (ITER. GT. 800) WRITE(*, *) , CYCLE, ITER, I, J, DELP

c & , V(I, J-1), V(I, J), ITER

290 CONTINUE

```

      U(I, J)=U(I, J)+2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I, J)+RO(I+1, J))
      U(I-1, J)=U(I-1, J)-2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I-1, J)+RO(I, J))
      V(I, J)=V(I, J)+2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I, J)+RO(I, J+1))
      V(I, J-1)=V(I, J-1)-2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I, J-1)+RO(I, J))
      IF (ITER. GT. 50. AND. FLG. GT. 0. 5. AND. DELP. NE. 0. 0) THEN
c      WRITE (*, *) I, J, DELP, U(I, J), U(I-1, J), V(I, J), V(I, J-1)
      ENDIF
291 CONTINUE
300 CONTINUE
      IF (ITER. GE. 199) WRITE (16, 36), CYCLE, ITER, IDELP, JDELP, DELPMA

```

```

301 CONTINUE
c      WRITE (6, 49), ITER, T, CYCLE, IDELP, JDELP, DELPMA
      GOTO 75
400 CONTINUE
C ++++ SCALAR TRANSPORT EQUATION
      ITER=0
c      LJUMP=1

```

```

DO 450 J=2, JM1
      DELYtem=DELYo
      IF (J*DELYo. LT. Hhig. OR. (JMAX-J)*DELYo. LT. Hhig) Then
        DELYtem=DELYo
      ENDIF
DO 450 I=2, IM1

```

```

      DELXtem=DELX
      IF (I*DELX. GT. Hwid) Then
        DELXtem=DELXo
      ENDIF

```

```

      RDX=1. /DELXtem
      RDY=1. /DELYtem
      RDX2=RDX*RDX
      RDY2=RDY*RDY

```

```

      IF (Obs(I, J). gt. 0. 1) GOTO 449
      RO(I, J)=RON(I, J)+. 5*DELT*((-U(I, J)*(RON(I, J)+RON(I+1, J))
1      -ALPHA*ABS(U(I, J))*(RON(I, J)-RON(I+1, J))
2      +U(I-1, J)*(RON(I-1, J)+RON(I, J))+ALPHA*ABS(U(I-1, J))
3      *(RON(I-1, J)-RON(I, J)))/DELXtem+(-V(I, J)*(RON(I, J)+RON(I, J+1))
4      -ALPHA*ABS(V(I, J))*(RON(I, J)-RON(I, J+1))+V(I, J-1)
5      *(RON(I, J)+RON(I, J-1))+ALPHA*ABS(V(I, J-1))
6      *(RON(I, J-1)-RON(I, J)))/DELYtem
7      -CYL*(U(I, J)*(RON(I, J)+RON(I+1, J))+U(I-1, J)*(RON(I-1, J)
8      +RON(I, J))+ALPHA*ABS(U(I, J))*(RON(I, J)-RON(I+1, J))+ALPHA
9      *ABS(U(I-1, J))*(RON(I-1, J)-RON(I, J)))/(2. *XC(I)))
449 CONTINUE
450 CONTINUE
      XKAPX=XKAP*DELT*RDY*RDY/CSUBV

```

```

XKAPY=XKAP*DELT*RDY*RDY/CSUBV
XKAPC=XKAP*DELT*CYL*RDY*. 5/CSUBV

```

```

DO 475 J=2, JM1
DELYtem=DELY
IF (J*DELYo. LT. Hhig. OR. (JMAX-J)*DELYo. LT. Hhig) Then
    DELYtem=DELYo
ENDIF

```

```

DO 475 I=2, IM1
DELXtem=DELX
IF (I*DELX. GT. Hwid) Then
    DELXtem=DELXo
ENDIF

```

```

RDX=1. /DELXtem
RDY=1. /DELYtem
RDX2=RDX*RDX
RDY2=RDY*RDY

```

```

IF (Obs(I, J).gt. 0.1) GOTO 474
E(I, J)=EN(I, J)+DELT*(-. 25*RDX*((U(I, J)+U(I-1, J))*EN(I+1, J)
1 -EN(I-1, J))-ALPHA*(ABS(U(I, J)+U(I-1, J)))*(EN(I+1, J)
2 -2. *EN(I, J)+EN(I-1, J)))-. 25*RDY*((V(I, J)+V(I, J-1))

```

```

3 *(EN(I, J+1)-EN(I, J-1))-ALPHA*(ABS(V(I, J)+V(I, J-1)))
4 *(EN(I, J+1)-2. *EN(I, J)+EN(I, J-1)))-P(I, J)/RO(I, J)
5 *(RDX*(U(I, J)-U(I-1, J))+RDY*(V(I, J)-V(I, J-1))+CYL
6 *(U(I, J)+U(I-1, J))/(2. *XC(I))))
E(I, J)=E(I, J)+(XKAPX*(EN(I+1, J)-2. *EN(I, J)+EN(I-1, J))
1 +XKAPY*(EN(I, J+1)-2. *EN(I, J)+EN(I, J-1))
2 +XKAPC*(EN(I+1, J)-EN(I-1, J))/XC(I))/RO(I, J)

```

```
474 CONTINUE
```

```
475 CONTINUE
```

```
c      GOTO 75
```

```
480 CONTINUE
```

```
C ++++ COMPUTE RELAXATION FACTORS
```

```

DO 490 I=2, IM1
DELXtem=DELX
IF (I*DELX. GT. Hwid) Then
    DELXtem=DELXo
ENDIF

```

```

DO 490 J=2, JM1
DELYtem=DELY
IF (J*DELYo. LT. Hhig. OR. (JMAX-J)*DELYo. LT. Hhig) Then
    DELYtem=DELYo
ENDIF

```

```

RDX=1. /DELXtem
RDY=1. /DELYtem

```

```

RDX2=RDX*RDX
RDY2=RDY*RDY

IF (Obs(I, J).gt. 0.1) GOTO 489
PT0=ASQ*(RO(I, J)-RO1)+GAM1*RO(I, J)*E(I, J)
DELP=1. E-4*PT0
C      DELP=PT0
UR= 2. *DELT*RDX*DELP/(RO(I, J)+RO(I+1, J))
UL=-2. *DELT*RDX*DELP/(RO(I-1, J)+RO(I, J))
VT= 2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I, J)+RO(I, J+1))
VB=-2. *DELT*RDY*DELP/(RO(I, J-1)+RO(I, J))
DT=DELT*(RDX*(UR-UL)+RDY*(VT-VB)+CYL*(UR+UL)/(2. *XC(I)))
ROT=RO(I, J)/(1.+DT)
ET=E(I, J)-P(I, J)/RO(I, J)*DT
PT=ASQ*(ROT-RO1)+GAM1*ROT*ET
BETA(I, J)=OMG*DELP/(DELP-(PT-PT0))
489 CONTINUE
490 CONTINUE
502 CONTINUE
C ++++ PRINT AND PLOT
      ITER=ITRX
      VOLC=DELXtem*DELYtem
      F=0.
      DO 780 I=2, IM1
      VOL=VOLC

```

```

      IF (CYL. GT. . 5) VOL=2. *PI*XC(I)*VOLC
      DO 780 J=2, JM1
      UAVE=U(I-1, J)+U(I, J)
      VAVE=V(I, J-1)+V(I, J)
780 F=F+RO(I, J)*VOL*(UAVE*UAVE+VAVE*VAVE)
      F=. 125*F
c      PRINT 49, ITER, T, CYCLE, F
c      WRITE(6, 49), ITER, T, CYCLE, F
      IF (CYCLE. LE. 0) GOTO 510
      IF (T. LT. TWPLT) GOTO 560
      TWPLT=TWPLT+CWPLT*DELT
      WRITE(6, 49), ITER, T, CYCLE, IDELP, JDELP, DELPMAX
c      WRITE(*, *), V(IMAX, 20)
      WRITE(15, 49), ITER, T, CYCLE, IDELP, JDELP, DELPMAX

510 CONTINUE

560 CONTINUE
      IF (CYCLE. LE. 0) GOTO 565
      IF (T. LT. TWPRT) GOTO 580
      TWPRT=TWPRT+CWPRT*DELT
565 CONTINUE

      GO TO (566, 567), mode
566 CONTINUE

```

```

WRITE(11, 35)
WRITE(11, 49), ITER, T, CYCLE, IDELP, JDELP, DELPMAX
WRITE(11, 47)
GOTO 568

567  CONTINUE
      WRITE(13, 35)
      WRITE(13, 49), ITER, T, CYCLE, IDELP, JDELP, DELPMAX
      WRITE(13, 47)
568  CONTINUE
      WRITE(*, *) "WRITE FILE"
      DO 575 J=1, JMAX
      DO 575 I=1, IMAX
      D=E(I, J)/CSUBV
c     PRINT 48, (I, J, U(I, J), V(I, J), P(I, J), RO(I, J), E(I, J), D)
c     WRITE(6, 48), I, J, U(I, J), V(I, J), P(I, J), RO(I, J), E(I, J), D

      GO TO (569, 570), mode
569  WRITE(11, 48), I, J, U(I, J), V(I, J), P(I, J), RO(I, J), E(I, J), D
      GOTO 575
570  WRITE(13, 48), I, J, U(I, J), V(I, J), P(I, J), RO(I, J), E(I, J), D
575  CONTINUE

      CALL RESTART (1)

```

```

C ++++ SET THE ADVANCE TIME VELOCITIES U AND V INTO THE UN AND VN
580  CONTINUE
      DO 600 J=1, JMAX
      DO 600 I=1, IMAX
      UN(I, J)=U(I, J)
      VN(I, J)=V(I, J)
      RON(I, J)=RO(I, J)
      EN(I, J)=E(I, J)
      P(I, J)=ASQ*(RO(I, J)-ROI)+GAM1*RO(I, J)*E(I, J)
600  CONTINUE
C ++++ ADVANCE TIME T=T+DELT
      T=T+DELT
      IF (T.GT.TWFIN) GOTO 650
      CYCLE=CYCLE+1
      GOTO 59
C +++ CLOSE PLOT ROUTINE
650  CONTINUE
      CLOSE(11)
      CLOSE(12)
      CLOSE(13)
      CLOSE(15)
      CLOSE(16)
      STOP
      END

```

C*****

SUBROUTINE RESTART (N)

C

C *** RESTART MODULE

C

C*****

REAL NU

INTEGER CYCLE, mode

COMMON/SC1A/XC(3000), BETA(1500, 3000), U(1500, 3000),

&V(1500, 3000), UN(1500, 3000), VN(1500, 3000), P(1500, 3000),

&RO(1500, 3000), RON(1500, 3000), E(1500, 3000),

&EN(1500, 3000)

COMMON/SC2A/X(3000), Y(6000), UF(1500, 3000), VF(1500, 3000),

&SVAL(1500, 3000), CONV(2000)

COMMON/SC3A/DELX, DELY, T, VELMX, XMAX, YMAX, VELMX1

COMMON/SC1I/IBAR, JBAR, IMAX, JMAX, IM1, JM1, IM2, JM2, CYCLE, LCON

COMMON/SC3A/PI, DELT, NU, CYL, EPSI, PR, GX, GY, UI, VI, TWFIN

COMMON/SC4A/CWPRT, CWPLT, OMG, ALPHA, WL, WR, WT, WB, GAM1, ASQ

COMMON/SC5A/ROI, EAMB, EDRIVE, WTMOL, RGAS, TWPRT, TWPLT

COMMON/SC6A/Eb, ROb

REAL PRDPT, DELPMA

REAL ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK, RAMDA

COMMON /USW/ ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK

COMMON /MESH/DELXo, DELYo, Hwid, Hhig

COMMON /OBSTACLE/ Obs(1500, 3000)

c IMAX=IBAR+2

c JMAX=JBAR+2

GO TO (10, 100), N

C*****

C RESTART (1) WRITE FILE FOR RESTART

C*****

10 CONTINUE

OPEN(14, FILE=' RESTART. DAT', STATUS=' UNKNOWN')

WRITE(14, 300), T, CYCLE

DO 50 J=1, JMAX

DO 50 I=1, IMAX

WRITE(14, 400), U(I, J), V(I, J), E(I, J), RO(I, J), P(I, J)

& , RON (I, J), EN(I, J)

c WRITE(*, *), JMAX

50 CONTINUE

```

CLOSE(14)
GOTO 200

C*****
C   RESTART (2) RESTART FROM RESTART.DAT
C*****

100 CONTINUE

      OPEN(UNIT=21, FILE='RESTART.DAT', STATUS='OLD')
      OPEN(13, FILE='REOUT.DAT', STATUS='UNKNOWN')

      READ(21, 300), T, CYCLE
      WRITE(*, *), T
DO 150 J=1, JMAX
DO 150 I=1, IMAX

      READ(21, 400), U(I, J), V(I, J), E(I, J), RO(I, J), P(I, J)
& , RON(I, J), EN(I, J)
150 CONTINUE
      CLOSE(21)

      TWPRT=T
      TWPLT=T
c   CYCLE=0

```

```

200 CONTINUE

300 FORMAT(3X, E12.5, 3X, I7)
400 FORMAT(3X, 1PE12.5, 7(6X, E12.5))

      RETURN
      END

C*****
      BLOCK DATA DEFDTA
C
C   *** SET (1) DEFAULT CONSTANTS
C           (2) INPUT DATA
C           (3) TIME AND MESH DATA
C*****
C
      REAL NU
      INTEGER CYCLE, mode
      COMMON/SC1A/XC(3000), BETA(1500, 3000), U(1500, 3000),
&V(1500, 3000), UN(1500, 3000), VN(1500, 3000), P(1500, 3000),
&RO(1500, 3000), RON(1500, 3000), E(1500, 3000),
&EN(1500, 3000)
      COMMON/SC2A/X(3000), Y(6000), UF(1500, 3000), VF(1500, 3000),
&SVAL(1500, 3000), CONV(2000)
      COMMON/SC3A/DELX, DELY, T, VELMX, XMAX, YMAX, VELMX1
      COMMON/SC1I/IBAR, JBAR, IMAX, JMAX, IM1, JM1, IM2, JM2, CYCLE, LCON

```

COMMON/SC3A/PI, DELT, NU, CYL, EPSI, PR, GX, GY, UI, VI, TWFIN
COMMON/SC4A/CWPRT, CWPLT, OMG, ALPHA, WL, WR, WT, WB, GAM1, ASQ
COMMON/SC5A/ROI, EAMB, EDRIVE, WTMOL, RGAS, TWPRT, TWPLT
COMMON/SC6A/Eb, ROb

REAL PRTDT, DELPMAX
REAL ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK, RAMDA
COMMON /USW/ ATUP, HASUK, OMEGA, YLEN, FAI, FREQ, ONSOK
COMMON /MESH/DELXo, DELYo, Hwid, Hhig
COMMON /OBSTACLE/ Obs (1500, 3000)

& WTMOL/28.964E-03/, RGAS/8.314E+00/, PI/3.1415/

C

DATA ATUP/2.64E+03/, YLEN/10.4/, FAI/0.0/

& FREQ/19.4E+03/, ONSOK/3.3168E+02/

DATA DELXo/4.01E-3/, DELYo/2.0E-3/, Hwid/16.0e-03/, Hhig/80.0e-03/

C

END

C-----

C
c DATA IBAR/60.01/, JBAR/412.01/, DELX/2.01E-03/, DELY/5.01E-04/,
DATA IBAR/65.01/, JBAR/540.01/, DELX/4.01E-4/, DELY/1.01E-04/,

c DATA IBAR/50.01/, JBAR/190.01/, DELX/5.01E-04/, DELY/5.01E-04/,
& DELT/2.0E-8/, NU/14.92E-06/, CYL/0.0/, EPSI/1.0E-01/,
c & DELT/1.0E-8/, NU/14.92E-06/, CYL/1.0/, EPSI/5.0E-06/,
& PR/0.717/, GX/0.0/, GY/0.0/, UI/0.0/, VI/0.0/, VELMX/1.5E-01/,
& Eb/0.9E+00/, ROb/1.1763E+00/,
& TWFIN/1.0E-04/, CWPRT/5.0E+01/, CWPLT/5.0E+01/, OMG/1.5/,
C & TWFIN/1.0E-03/, CWPRT/1.0E+01/, CWPLT/1.0E+01/, OMG/1.5/,
& ALPHA/0.75/, WL/1.1/, WR/3.1/, WT/2.1/, WB/2.1/, GAM1/1.47E-01/,
& ASQ/1.10E+05/, ROI/1.1763E+00/, EAMB/300.0/, EDRIVE/300.0/,

付録 B 液滴挙動解析プログラム

```

C#####
C#####
C### 2-D movement calculation program #####
C### 2005.10.1 Kazuyoshi AOKI #####
C#####
C#####
C
C      INCLUDE 'CONDITION.H'

      INTEGER n,nmax,tarY,nf,nfi,nfmax,nfmin,z0,z1,z2
&,Lhorn,Uhorn,Bethorn

      REAL*8 m,R,rog,rol,t,dt,x,x0,w,f,shift,L,a,k,V,Rex,Cdx,
&  sigu,Wex,dx,dy,Rey,Cd,Wey,delT
      REAL*8 x1,x2,x3,x4,phau1,phau2,phau3,phau4,phax1,
&  phax2,phax3,phax4
      REAL*8 y1,y2,y3,y4,phav1,phav2,phav3,phav4,phay1,
&  phay2,phay3,phay4
      REAL*8 pai,fx11,fx12,fx13,fx14,fx21,fx22,fx23,fx24,fx31,fx32,
&  fx33,fx34,fx41,fx42,fx43,fx44,tfin
      REAL*8 fy11,fy12,fy13,fy14,fy21,fy22,fy23,fy24,fy31,fy32,
&  fy33,fy34,fy41,fy42,fy43,fy44
c      REAL P(IMAX,JMAX),Ud1(IMAX,JMAX),Ud2(IMAX,JMAX),Ud3(IMAX,JMAX),
c      & Ud4(IMAX,JMAX),Pold(IMAX,JMAX)
      REAL*8 P(500,150,60),Udx1,Udx2,Udx3,Udx4
      REAL*8 Udy1,Udy2,Udy3,Udy4

```

```

REAL*8 fg
REAL*8 Pmax(500,150)

REAL*8 Udx,Urx,Ugx(500,150,60),Vgx(500,150,60),Velgx,Uoldx
REAL*8 Udy,Ury,Ugy(500,150,60),Vgy(500,150,60),Velgy,Uoldy
CHARACTER*20 FNAME

C////////////////////////////////////
C////////////////////////////////////
C/// MAIN //////////////////////////////////////
C////////////////////////////////////
C////////////////////////////////////

      OPEN (UNIT=15,FILE='OUTPUT2.DAT')

      READ(15,101),z0,delT,Tfin,IMAX,JMAX,dx,dy

      nfin=50

      WRITE(*,*)delT,nfin,IMAX,JMAX,dx,dy

c      nfmin=1

      WRITE(*,*)"Input First File No."

      READ(*,*)nfmin

C      Number of data files

      nfmax=nfmin+50

      WRITE(6,*)"Input CELL No. of top of Lower horn."

      READ(*,*)Lhorn

c      WRITE(6,*)"Input CELL No. of top of Upper horn."

```

```
c      READ(*,*),Uhorn

      Uhorn=Lhorn

      Bethorn=JMAX*Lhorn*Uhorn
```

C 空間の刻み幅の設定

```
c      dx=0.0005
c      dy=0.0005
```

c 時間のきざみ幅の設定

```
      dt=delT
```

ctfin の設定

```
      tfin=60.0E+00
      nmax= INT(tfin/dt)+1
```

```
      pai=3.1415E+00
      rog=1.184E+00
      rol=997.1E+00
      sigu=0.07274E+00
      f=19200.0E+00
      grav=-9.8E+00
      ud=0.0E+00
      a=343.7E+00
      L=2.0*(a/f)
      shift=0.0E+00
```

```
w=2.0*pai*f
k=2.0*pai*f/a
```

c 液滴半径の設定

```
      R=0.5E-03
```

c 液滴の初期位置の設定

```
c      x0=0.0178

      x0=130.1E-03
      y0=14.5E-03
```

```
      OPEN (UNIT=21,FILE='droplet.dat')
      OPEN (UNIT=22,FILE='Pre.dat')
      OPEN (UNIT=23,FILE='VXU.dat')
      OPEN (UNIT=24,FILE='VYV.dat')
      OPEN (UNIT=25,FILE='V.dat')
      OPEN (UNIT=26,FILE='force.dat')
      OPEN (UNIT=28,FILE='U.dat')
```

```
c      WRITE(21,'(a,$)') 't,x,ud,ur,Re,Cd,We,f1,f2,f3,f4,'
      WRITE(21,'(a,$)') 'R='

      WRITE(21,'(F6.4,$)')R

c      WRITE(21,'(a,&)')',dP='
c      WRITE(21,'(E10.4,$)')dP
```

	WRITE(21,'(a,\$)'),'x0='	Wey=0.0
	WRITE(21,'(F6.4,\$)')x0	x=x0
	WRITE(21,'(a,\$)'),'y0='	y=y0
	WRITE(21,'(F6.4,\$)')y0	
	WRITE(21,'(a,\$)'),'dt='	
	WRITE(21,'(E10.4,\$)')dt	c 10 CONTINUE
	WRITE(21,'(a,\$)'),'tfin='	
	WRITE(21,'(F6.4,\$)')tfin	c WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.VXU)') nfmin
	WRITE(21,'(a,\$)') ',rog='	c OPEN (UNIT=12,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')
	WRITE(21,'(F6.4,\$)')rog	
	WRITE(21,'(a,\$)'),'rol='	c DO J=1,JMAX
	WRITE(21,'(F7.3,\$)')rol	c READ(12,100) (Ug(I,J),I=1,IMAX)
	WRITE(21,'(a,\$)'),'f='	c ENDDO
	WRITE(21,'(E10.4,\$)'),f	
	WRITE(21,'(a,\$)'),'a='	c CLOSE(12)
	WRITE(21,'(F7.3)'),a	
	WRITE(21,'(a) ')t,x,udx,urx,Rex,Cdx,Wex,fx1,fx2,fx3,	nf=nfmin+1
&	y,udy,ury,Rey,Cdy,Wey,fy1,fy2,fy3,'	
c	WRITE(21,*) ',shift=',shift	C+++++
	t=0.0	
	Ud=0.0	nfi=1
c	Udx=0.0	
	Udy=0.0	DO nf=nfmin,nfmax
	Wex=0.0	WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.PRE)') nf

```

OPEN (UNIT=11,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')

DO J=1,Lhorn
  READ(11,*),DUMMY
ENDDO

c    DO J=1,Bethorn
c    READ(11,100) (P(I,J,nfi),I=IMAX-1,1,-1)
c    ENDDO

    DO J=Lhorn,Lhorn+Bethorn
    READ(11,100) (P(I,J,nfi),I=2,IMAX-2)
    ENDDO

CLOSE(11)

c    DO J=1,Bethorn
c    DO I=1,IMAX-1
c    P((IMAX-1+I),J,nfi)=P((IMAX-I),J,nfi)
c    ENDDO
c    ENDDO

WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.VXU)') nf
OPEN (UNIT=12,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')

```

```

DO J=1,Lhorn
  READ(12,*),DUMMY
ENDDO

c    DO J=Lhorn,Lhorn+Bethorn
c    READ(12,100) (Ugx(I,J,nfi),I=IMAX-1,1,-1)
c    ENDDO

    DO J=Lhorn,Lhorn+Bethorn
    READ(12,100) (Ugx(I,J,nfi),I=2,IMAX)
    ENDDO

CLOSE(12)

c    DO J=1,Bethorn
c    DO I=1,IMAX-1
c    Ugx((IMAX-1+I),J,nfi)=Ugx((IMAX-I),J,nfi)
c    ENDDO
c    ENDDO

WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.VYV)') nf
OPEN (UNIT=13,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')

DO J=1,Lhorn
  READ(13,*),DUMMY

```

```

        ENDDO

c      DO J=1,Bethorn
c        READ(13,100) (Ugy(I,J,nfi),I=IMAX-1,1,-1)
c      ENDDO

      DO J=Lhorn,Lhorn+Bethorn
        READ(13,100) (Ugy(I,J,nfi),I=2,IMAX-2)
      ENDDO

CLOSE(13)

c      DO J=1,Bethorn
c      DO I=1,IMAX-1
c        Ugy((IMAX-1+I),J,nfi)=Ugy((IMAX-I),J,nfi)
c      ENDDO
c      ENDDO

      nfi=nfi+1
      ENDDO

C+++++

      DO Ix=1,IMAX
c      WRITE(22,'(I15,$)')Ix

```

```

        WRITE(23,'(I15,$)')Ix
        WRITE(24,'(I15,$)')Ix
        WRITE(25,'(I15,$)')Ix
        WRITE(26,'(I15,$)')Ix
      ENDDO
c      WRITE(22,'(a)')' '
      WRITE(23,'(a)')' '
      WRITE(24,'(a)')' '
      WRITE(25,'(a)')' '
      WRITE(26,'(a)')' '

      DO Ix=1,IMAX
c      WRITE(22,'(E15.4,$)')(Ix*0.5)
      WRITE(23,'(E15.4,$)')(Ix*0.5)
      WRITE(24,'(E15.4,$)')(Ix*0.5)
      WRITE(25,'(E15.4,$)')(Ix*0.5)
      WRITE(26,'(E15.4,$)')(Ix*0.5)
      ENDDO
c      WRITE(22,'(a)')' '
      WRITE(23,'(a)')' '
      WRITE(24,'(a)')' '
      WRITE(25,'(a)')' '
      WRITE(26,'(a)')' '

```

```

c      DO nfi=1,(nfmax-nfmin),10

      DO nfi=1,50
        DO Iy=1,Bethorn
          DO Ix=1,IMAX*2-2
            IF(abs(P(Ix,Iy,nfi)-1.013E+05).gt.Pmax(Ix,Iy)) THEN
              Pmax(Ix,Iy)=abs(P(Ix,Iy,nfi))
            ENDIF

            ENDDO
          ENDDO
          WRITE(*,*),nfi
        ENDDO

        DO Iy=1,Bethorn
          DO Ix=1,IMAX*2-2

C
C      Velg=sqrt(Ug(Ix,tarY,nfi)**2+Vg(Ix,tarY,nfi)**2)
C
C      WRITE(22,'(E15.4,$)')Pmax(Ix,Iy)
C      WRITE(24,'(E15.4,$)')Vg(Ix,tarY,nfi)
C      WRITE(25,'(E15.4,$)')Velg
      ENDDO
C

```

```

      WRITE(22,'(a)')' '
C      WRITE(23,'(a)')' '
C      WRITE(24,'(a)')' '
C      WRITE(25,'(a)')' '
      ENDDO

      nfi=1
C-----

      Ix=INT(x/dx)
      Iy=INT(y/dy)

      Uoldx=(-Ugx(Ix,Iy,1))
      Uoldy=(-Ugy(Ix,Iy,1))

c      Uoldx=0.0
c      Uoldy=0.0

      n=1
C
C      DO n = 2,nmax
20 CONTINUE

C-----
C---- CALCULATION DATA READING -----

```

C-----

C

c IMAX=28

c JMAX=80

c WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.PRE)') nf

c OPEN (UNIT=11,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')

c WRITE(FNAME,'(I8.8,4H.VXU)') nf

c OPEN (UNIT=12,FILE=FNAME ,STATUS='OLD')

c DO J=1,JMAX

c READ(11,100) (P(I,J),I=1,IMAX)

c ENDDO

c DO J=1,JMAX

c READ(12,100) (Ug(I,J),I=1,IMAX)

c ENDDO

100 FORMAT(1024(3X,1PE12.5))

101 FORMAT(3X,I5,3X,E10.3,3X,E10.3,3X,I4,3X,I4,3X,E10.3,3X,E10.3)

102 FORMAT(I4)

C-----

C---- CALCULATION -----

C-----

C-----X direction

$V=(4.0/3.0)*\pi*R**3$

$m=V*\rho l$

C-----

C-----X direction

C-----

$U_{dx1}=U_{dx}$

$x1=x$

$I_x=INT(x1/dx)$

$U_{rx}=U_{dx1}-U_{gx}(I_x,I_y,nfi)$

$R_{ex}=1.287*100000.0*abs(U_{rx})*R$

IF(Rex.lt.60.and.Rex.ne.0.0) THEN

$C_{dx}=8.9*R_{ex}**(-0.74)$

ELSE

$C_d=0.44;$

ENDIF

$f_{x11}=V*(P(I_x+1,I_y,nfi)-P(I_x-1,I_y,nfi))/(2.0*dx)$

```

fx12=0.5*rog*V*(Urx-Uoldx)/dt
fx13=0.5*pai*R**2*Urx*abs(Urx)*Cd

```

```

phau1=(-fx11-fx12-fx13)/(m+0.5*rog*V)
phax1=Udx1

```

```

t=t+0.5*dt
Udx2=Udx1+0.5*dt*phau1
x2=x1+0.5*dt*phax1
Uoldx=Urx

```

C-----

```

Ix=INT(x2/dx)
Urx=Udx2-(Ugx(Ix,Iy,nfi)+Ugx(Ix,Iy,nfi+1))*0.5
Rex=1.287*100000.0*abs(Urx)*R

```

```

IF(Rex.lt.60.and.Rex.ne.0.0) THEN
  Cd=8.9*Rex**(-0.74)
ELSE
  Cd=0.44
ENDIF

```

```

fx21=V*((P(Ix+1,Iy,nfi)+P(Ix+1,Iy,nfi+1))*0.5
& -(P(Ix-1,Iy,nfi)+P(Ix-1,Iy,nfi+1))*0.5)/(2.0*dx)

```

```

fx22=0.5*rog*V*(Urx-Uoldx)/dt
fx23=0.5*pai*R**2*Urx*abs(Urx)*Cd

```

```

phau2=(-fx21-fx22-fx23)/(m+0.5*rog*V)
phax2=Udx2

```

```

t=t+0.5*dt
Udx3=Udx1+0.5*dt*phau2
x3=x1+0.5*dt*phax2
Uoldx=Urx

```

C-----

```

Ix=INT(x3/dx)
Urx=Udx3-Ugx(Ix,Iy,nfi+1)

```

```

Rex=1.287*100000.0*abs(Urx)*R
IF(Rex.lt.60.and.Rex.ne.0.0) THEN
  Cd=8.9*Rex**(-0.74)
ELSE
  Cd=0.44;
ENDIF

```

```

fx31=V*((P(Ix+1,Iy,nfi)+P(Ix+1,Iy,nfi+1))*0.5

```

```

&      -(P(Ix-1,Iy,nfi)+P(Ix-1,Iy,nfi+1))*0.5)/(2.0*dx)
      fx32=0.5*rog*V*(Urx-Uoldx)/dt
      fx33=0.5*pai*R**2*Urx*abs(Urx)*Cd

      phau3=(-fx31-fx32-fx33)/(m+0.5*rog*V)
      phax3=Udx3

cv
      t=t+0.5*dt
      Udx4=Udx1+dt*phau3
      x4=x1+dt*phax3
      Uoldx=Urx
C-----
      Ix=INT(x4/dx)
      Urx=Udx4-(Ugx(Ix,Iy,(nfi+1))+Ugx(Ix,Iy,(nfi+2)))*0.5
      Rex=1.287*100000.0*abs(Urx)*R
      IF(Rex.lt.60.and.Rex.ne.0.0) THEN
        Cd=8.9*Rex**(-0.74)
      ELSE
        Cd=0.44;
      ENDIF
      fx41=V*(P(Ix+1,Iy,nfi+1)-P(Ix-1,Iy,nfi+1))/(2.0*dx)
      fx42=0.5*rog*V*(Urx-Uoldx)/dt
      fx43=0.5*pai*R**2*Urx*abs(Urx)*Cd

      phau4=(-fx41-fx42-fx43)/(m+0.5*rog*V)

```

```

      phax4=Udx4

      Udx=Udx+dt*(1.0/6.0)*(phau1+2.0*phau2+2.0*phau3+phau4);
      x=x+dt*(1.0/6.0)*(phax1+2.0*phax2+2.0*phax3+phax4);

      t=t-1.5*delT

C-----
C      ウエーバー数を算出し、臨界ウエーバー数と比較を行う
C      Wex=(rog*urx**2*2.0*R)/sigu;
C      IF(Wex.gt.(18.2))
C
C      R=(sigu*18.2)/(rog*ur**2*2.0);
C      ENDIF

C-----
C-----Y direction
C-----

      Udy1=Udy
      y1=y
      Iy=INT(y1/dy)
      Ury=Udy1-Ugy(Ix,Iy,nfi)
      Rey=1.287*100000.0*abs(Ury)*R
      fg=m*grav

```

IF(Rey.lt.60.and.Rey.ne.0.0) THEN

Cd=8.9*Rey**(-0.74)

ELSE

Cd=0.44

ENDIF

fy11=V*(P(Ix,Iy+1,nfi)-P(Ix,Iy-1,nfi))/(2.0*dy)

fy12=0.5*rog*V*(Ury-Uoldy)/dt

fy13=0.5*pai*R**2*Ury*abs(Ury)*Cd

phav1=(-fy11-fy12-fy13+fg)/(m+0.5*rog*V)

phay1=Udy1

t=t+0.5*dt

Udy2=Udy1+0.5*dt*phav1

y2=y1+0.5*dt*phay1

Uoldy=Ury

C-----

Iy=INT(y2/dy)

Ury=Udy2-(Ugy(Ix,Iy,nfi)+Ugy(Ix,Iy,nfi+1))*0.5

Rey=1.287*100000.0*abs(Ury)*R

IF(Rey.lt.60.and.Rey.ne.0.0) THEN

Cd=8.9*Rey**(-0.74)

ELSE

Cdy=0.44

ENDIF

fy21=V*((P(Ix,Iy+1,nfi)+P(Ix,Iy+1,nfi+1))*0.5
& -(P(Ix,Iy-1,nfi)+P(Ix,Iy-1,nfi+1))*0.5)/(2.0*dy)

fy22=0.5*rog*V*(Ury-Uold)/dt

fy23=0.5*pai*R**2*Ury*abs(Ury)*Cd

phav2=(-fy21-fy22-fy23+fg)/(m+0.5*rog*V)

phay2=Udy2

t=t+0.5*dt

Udy3=Udy1+0.5*dt*phav2

y3=y1+0.5*dt*phay2

Uoldy=Ury

C-----

Iy=INT(y3/dy)

Ury=Udy3-Ugy(Ix,Iy,nfi+1)

Rey=1.287*100000.0*abs(Ury)*R

IF(Rey.lt.60.and.Rey.ne.0.0) THEN

Cd=8.9*Rey**(-0.74)

ELSE

Cd=0.44

ENDIF

fy31=V*((P(Ix,Iy+1,nfi)+P(Ix,Iy+1,nfi+1))*0.5

& -(P(Ix,Iy-1,nfi)+P(Ix,Iy-1,nfi+1))*0.5)/(2.0*dy)

fy32=0.5*rog*V*(Ury-Uoldy)/dt

fy33=0.5*pai*R**2*Ury*abs(Ury)*Cd

phav3=(-fy31-fy32-fy33+fg)/(m+0.5*rog*V)

phay3=Udy3

t=t+0.5*dt

Udy4=Udy1+dt*phav3

y4=y1+dt*phay3

Uoldy=Ury

C-----

Iy=INT(y4/dy)

Ury=Udy4-(Ugy(Ix,Iy,(nfi+1))+Ugy(Ix,Iy,(nfi+2)))*0.5

Rey=1.287*100000.0*abs(Ury)*R

IF(Rey.lt.60.and.Rey.ne.0.0) THEN

Cd=8.9*Rey**(-0.74)

ELSE

Cd=0.44

ENDIF

fy41=V*(P(Ix,Iy+1,nfi+1)-P(Ix,Iy-1,nfi+1))/(2.0*dy)

fy42=0.5*rog*V*(Ury-Uoldy)/dt

fy43=0.5*pai*R**2*Ury*abs(Ury)*Cd

phav4=(-fy41-fy42-fy43+fg)/(m+0.5*rog*V)

phay4=Udy4

Udy=Udy+dt*(1.0/6.0)*(phav1+2.0*phav2+2.0*phav3+phav4);

y=y+dt*(1.0/6.0)*(phay1+2.0*phay2+2.0*phay3+phay4);

C-----

C ウエーバー数を算出し、臨界ウエーバー数と比較を行う

C Wey=(rog*ury**2*2.0*R)/sigu;

```
C      IF(Wey.gt.(18.2))
C
C      R=(sigu*18.2)/(rog*ury**2*2.0);
C
C      ENDIF
```

```
C-----
```

```
C-----
```

```
C---- DATA OUTPUT -----
```

```
C-----
```

```
      CLOSE(11)
      CLOSE(12)
      CLOSE(13)
```

```
c      Uold=Ud·Ug(Ix,tarY)
      Uoldx=Udx·Ugx(Ix,Iy,nfi)
      Uoldy=Udy·Ugy(Ix,Iy,nfi)
      t=t-0.5*dt
```

```
c      nf=nf+1
c      IF(nf.gt.nfmax) THEN
c
c      nf=nmin
c      GO to 10
c
c      ENDIF
```

```
      nfi=nfi+1
```

```
c-----
c----
c-----
```

```
      IF(nfi.gt.48) THEN
      Uoldx=Udx·Ugx(Ix,Iy,1)
      Uoldy=Udy·Ugy(Ix,Iy,1)
      nfi=2
      ENDIF
```

```
c-----
c-----
c-----
```

```
      IF(mod(n,100000).eq.0) THEN
      WRITE(21,'(E10.4,$)')t-dt
      WRITE(21,'(a,$)'),' '
      WRITE(21,'(F6.5,$)')x
      WRITE(21,'(a,$)'),' '
      WRITE(21,'(E10.4,$)')Udx
      WRITE(21,'(a,$)') ' '
      WRITE(21,'(E10.4,$)')Urx
      WRITE(21,'(a,$)'),' '
      WRITE(21,'(E10.4,$)')Rex
```

```

WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Cd
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Wex
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')fx11
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')fx12
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')fx13
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(F6.5,$)')y
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Udy
WRITE(21,'(a,$)') ','
WRITE(21,'(E10.4,$)')Ury
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Rey
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Cd
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')Wey
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4,$)')fy11
WRITE(21,'(a,$)'),'

```

```

WRITE(21,'(E10.4,$)')fy12
WRITE(21,'(a,$)'),'
WRITE(21,'(E10.4)')fy13

WRITE(*,*) n,t,x,Ix,y,Iy,udx,udy
ENDIF

n=n+1

IF(n.lt.nmax) GOTO 20
CLOSE(15)
CLOSE(21)
CLOSE(22)
CLOSE(23)
CLOSE(24)
CLOSE(25)

STOP

END

```

付録 C 微小重力実験テストデータパッケージ

TEST EQUIPMENT DATA PACKAGE

for

Study on Fluid Control by Ultrasonic Wave

Scheduled for

1 - 3 December, 2003

CSA

Prepared by

Yutaka Abe, Akira Enokuchi, Kazuyoshi Aoki, Syougo Yamada
Institute of Engineering Mechanics and Systems, University of Tsukuba
1-1-1 Tennoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

Masahiro Kawaji
Department of Chemical and Applied Chemistry, University of Toronto
Toronto, Ontario, M5S1A4 Canada

TABLE OF CONTENTS

- a. Synopsis
- b. Test objectives
- c. Test description
- d. Equipment description
- e. Structural road analysis
- f. Electrical load analysis and electrical circuit diagram
- g. Pressure vessel certification
- h. In-flight test procedure
- i. Parabola requirements, number, and sequencing
- j. Test support requirements, ground and flight
- k. Data acquisition system
- l. Test operating limits or restrictions
- m. Proposed manifest for each flight
- n. Photographic requirements
- o. Hazard analysis

Figures

Appendix

a. Synopsis

Experiment will be conducted abroad on the CSA FALCON-20 to study basic phenomena of liquid droplet translation motion in an ultrasonic acoustic wave field under micro-gravity and to measure the physical properties of the liquid droplet in a containerless processing non-contacting. In addition, the undercooled state of the liquid droplet held in an ultrasonic acoustic wave field is also investigated.

This document describes the experimental objectives, overall description of the hardwares and test procedure, structure and electrical load analyses, flight requirements and the hazards analysis.

b. Test objectives

In the present research, an ultrasonic wave is adopted to develop the manufacture technology for the new materials. The ultrasonic system is constructed for it. At first, the possibility to hold and to drive the liquid droplet with the ultrasonic wave is experimentally examined. Next, the technique to measure the physical properties of liquid droplet from vibration of large liquid droplet holding in space with ultrasonic wave is investigated. Such technology is very important in material processing under micro-gravity environment. Thirdly, the physical properties of the liquid in undercooled state and the possibility to control the solidification by the ultrasonic wave are investigated by using this technique.

c. Test description

The experiment is consists of three parts, ① holding and drive experiment of droplet, ② a physical-properties measurement experiment, and ③ the undercooled experiment.

① At First, holding and drive experiment of droplet is described. The outline of the experiment is shown in Fig.1. At the beginning of the experiment, an ultrasonic standing wave field is established between two horns which are the ultrasonic wave transmitters. The frequency and phase shift of two horns are set to the same at the initial stage of the experiment. Under the micro gravity conditions, water droplet is injected by a syringe as shown in Fig.1(a). The water droplet injected into the test section will stay at some location of the ultrasonic acoustic standing wave field. If the phase of one of the ultrasonic wave transmitters is shifted after water droplet is hold in the acoustic standing field, the acoustic standing wave field will moves as shown in Fig.1(b). The water droplet is held in the acoustic wave field should be driven by the movement of the acoustic

wave field. In the present experiment, the water droplet movement behavior will be observed by a digital video system and digital measuring system.

② Secondly, physical-properties measurement of droplet is described. Vibration of the surface of the droplet held in space is measured using a droplet holding system as shown in Fig.2. From the measurement data of the droplet vibration, the resonance frequency of droplet is computed by FFT. Once the resonance frequency ω_2 is obtained, the surface tension of droplet is computed by using the following expression.

$$\sigma = \frac{1}{8} \omega_2^2 \rho r_0^3$$

Moreover, the disturbance is added to the surface of the droplet held in space by the ultrasonic wave to produce the attenuation vibration. The viscous coefficient of droplet is computed from the attenuation constant τ_2 by using the following expression.

$$\eta = \frac{\rho r_0^2}{5\tau_2}$$

③ Thirdly, undercooled experiment is described. Fatty acid (Lauric Acid) with melting point 43~46°C is heated to be melted by the heater up to about 150°C. It holds in space as water droplet by the ultrasonic standing wave. Under this containerless condition, natural cooling attains the undercooled state. And the surface tension and the viscous coefficient of droplet in the undercooled state are measured by the method abovementioned.

Moreover, it is also investigated how the ultrasonic wave influences the undercooled state. The possibility of controlling the solidification from the undercooled state by ultrasonic wave is examined as well.

The greatest feature of this experiment is to equip powerful ultrasonic wave. This floating technology using powerful ultrasonic wave is more applicable than the other methods such as electromagnetic. Moreover, since there is no contact between an object and crucible, when physical properties of floating object are measured by this method, it may be able to use as a measuring method of the physical properties of the substance which can not be measured by the old method. In addition, since the measurement of the physical properties in the undercooled state is difficult by

other techniques, it can be possible to measure the physical properties in the experiment. It is the big feature.

d. Equipment description

The system hardwares consist of a test section, personal computer, bus bridge, two amplifiers, power meter, radiation thermometer, digital measuring system, heating system, accelerometer and light. Those hardwares equip two flames. The schematic arrangement of the experimental equipment is shown in Fig.3.

The size of the frame 1 is about 470mm(W) x 680mm(D) x 780mm(H). And the total weight is about 80kg. The one amplifier is loaded on the base plate. The other amplifier is loaded on the second plate. The personal computer, accelerometer and the bus bridge are loaded on the third plate in frame 1.

The size of the frame 2 is about 500mm(W) x 500mm(D) x 700mm(H). And the total weight is about 55kg. Two voltage converter and power meter are loaded on the base plate. The test section, digital measuring system, heating system, light and video recorder are loaded on the second plate.

Figure4 shows the schematic diagram of the whole experimental apparatus. The wave signal generated by the bus bridge which connected personal computer is amplified and is introduced to the ultrasonic transmitter and the ultrasonic acoustic wave is transmitted into the air in the test section through the horns. The resonance frequency of the ultrasonic transmitters are about 19kHz. Observation system composed of digital measuring system and digital video recorder.

The test section is covered by the acrylic plates. Two horns are installed into the test section top and bottom of the test section as shown in Fig.5. All the weight of the horns are supported by four support bars fixed between two frames. The small hole is vacant to the acrylic cover, and the syringe is inserted through the hole. The droplet is poured into test section by using the syringe. The test liquid is water or molten Lauric Acid.

e. Structural road analysis

The entire apparatus is contained within two rectangular frames(780mm×480mm×760mm, 510mm×490mm×470mm). The structures of the frames are shown in Fig.6. The structures of the two rectangular frames are equal in general.

The frame 1 loads amplifiers. A base plate is fixed on the bottom of the frame 1 constructed by L angle frame. 2nd and 3rd plates are fixed at the middle and top of the vertical L angle frame. These plates are connected by M8 bolts.

Next, the frame 2 loads test section. The frame 2 is the same as the frame 1 for amplifier loading except the number of the plates is two for equipment loading.

The apparatus are fixed on the aircraft. Consideration of structural load analysis is performed for the following conditions:

Forward - 9g's

Aft - 1.5g's

Lateral – 3g's

Up – 3g's

Down – 6g's

Equipment items and weights on each plate are listed in Table1. Heavy equipments (amplifiers, accelerometer and converters) are loaded on the base and second plate. Test section and converter are fastened to the plates by M8 bolts where possible. Other components (amplifiers, power meter, heating system, personal computer and busbridge) are held in place by fixed on the plates with M8 bolts.

The structural analysis, is attached in Appendix. The main points are as the follow:

- Strength of the bolts to hold the components under 9-G requirement. (See section A in Appendix)
- strength of the tie-down bolts fastening the frame to the aircraft under the 9-G requirement. (See section B in Appendix)
- Strength of the frame under 6-G requirement. (See section C in Appendix)

Table 1 Weight of apparatus

Frame1		Frame2	
Items	W[kg]	Items	W[kg]
Base plate	2.6	Base plate	2
Amplifier	27	Converter	14
2nd floor plate	2.6	Converter	14
Amplifier	27	Power meter	5
3rd floor plate	1.8	2nd floor plate	1.3
Personal computer	3.5	Test section	20
Bus bridge	3.6	Video recorder	1
Accelerometer	0.1	Digital measuring system	3.7
L angles	16.3	Heating system	1
		L angles	11.3
Total	84.5	Total	73.3

f. Electrical load analysis and electrical circuit diagram

The electrically powered equipment loaded on the experimental apparatus are a video camera, converter, personal computer, light, digital measuring system, bus bridge, two amplifiers, heater and power meter. The components to be used in the experiment are changed for the series of the experiment. The electrical systems of holding and drive experiment are shown in Fig.7(a). Digital measuring system, bus bridge, two amplifiers and power meter will be powered by two of the air craft's 115VAC, 60Hz, 1-phase power source through two 7A breakers. The power for the experiment is divided into two circuits. These two circuits are called circuit 1 and circuit 2, respectively. Maximum current of circuit 1 is 6.75A. Maximum current of circuit 2 is 6.91A.

The electrical systems of physical-properties measurement and undercooled experiment is shown in Fig.7(b). Digital measuring system, bus bridge, amplifier, heater and power meter will be powered by two of the air craft's 115VAC, 60Hz, 1-phase power source through two 7A breakers. The power for the experiment is divided into two circuits. These two circuits are called a circuit 3 and circuit 4, respectively. Maximum current of circuit 3 will be 6.75A. Maximum current of circuit 4 will be 1.43A.

g. Pressure vessel certification

The pressure vessel is not used.

h. In-flight test procedure

START-UP

① Holding and drive experiment of droplet

1. Turn ON two breakers.
2. Turn ON bus bridge, personal computer, digital power meter, two power amplifiers, light, digital measuring system and video recorder.
3. Start RECORD on video recorder.
4. The "Drive experiment" icon on a desktop is double-clicked.
5. Input that the sampling number of CH1 (upper horn) is 259, the sampling number of CH2 (lower horn) is 260 and input voltage of both CH1 and CH2 is

0.5V.

6. Input "0", and don't change input voltage, change the number of samplings, and adjust so that input electric power serves as the maximum with the power meter.
7. Where the tip of a syringe is located between phons, push it and droplet is poured into the test section.
8. Input "1", set up the amount of phase change and the number of phase change per time.
9. If measurement is completed, input 2 and a program will be terminated.

② Physical-properties measurement (surface tension)

1. Turn ON two breakers.
2. Turn ON bus bridge, personal computer, digital power meter, power amplifier, light, digital measuring system and video recorder.
3. Start RECORD on video recorder.
4. The "S-tension" icon on a desktop is double-clicked.
5. Input that the sampling number of CH1 (upper horn) is 259, the sampling number of CH2 (lower horn) is 260 and input voltage of both CH1 and CH2 is 0.5V.
6. Input "0", and don't change input voltage, change the number of samplings, and adjust so that input electric power serves as the maximum with the power meter.
7. Where the tip of a syringe is located between horns, push it and droplet is poured into the test section.
8. Input "1", start experiment.
9. If measurement is completed, input 2 and a program will be terminated.

③ Physical-properties measurement (viscosity)

1. Turn ON two breakers.
2. Turn ON bus bridge, personal computer, digital power meter, power amplifier, light, digital measuring system and video recorder.
3. Start RECORD on video recorder.
4. The "Viscosity" icon on a desktop is double-clicked.
5. Input that the sampling number of CH1 (upper horn) is 259, the sampling number of CH2 (lower horn) is 260 and input voltage of both CH1 and CH2 is

0.5V.

6. Input "0", and don't change input voltage, change the number of samplings, and adjust so that input electric power serves as the maximum with the power meter.
7. Where the tip of a syringe is located between horns, push it and droplet is poured into the test section.
8. Input "1", start experiment.
9. If measurement is completed, input 2 and a program will be terminated.

④ undercooled experiment

1. Turn ON two breakers.
2. Turn ON bus bridge, personal computer, digital power meter, power amplifier, light, digital measuring system, heating system and video recorder.
3. Start RECORD on video recorder.
4. The "S-tension" icon on a desktop is double-clicked.
5. Input that the sampling number of CH1 (upper horn) is 259, the sampling number of CH2 (lower horn) is 260 and input voltage of both CH1 and CH2 is 0.5V.
6. Input "0", and don't change input voltage, change the number of samplings, and adjust so that input electric power serves as the maximum with the power meter.
7. Where the tip of a syringe is located between horns, push it and droplet is poured into test section.
8. Input "1", start experiment.
9. The "TEMP" icon on a desktop is double-clicked.
10. A right-hand side icon is clicked and temperature measurement is started.
11. If measurement is completed, input 2 and a program will be terminated.

SHUT-DOWN

Common in all experiments

1. STOP to record for video recorder and turn off.
2. Turn OFF personal computer, digital power meter, power amplifier, cold light source, digital measuring system and bus bridge.
3. Turn OFF two breakers.

i. Parabola requirements, number, and sequencing

It can be negotiation. We request the 20 parabola for each series of the experiments. We are planning 4 series of the experiment. The total number of the parabola we request is 80.

j. Test support requirements, ground and flight

The support under a test and flight is not needed.

k. Data acquisition system

Experiment data contains an input voltage value, gravity, input electric power value, phase difference, the diameter of droplet, the holding position of droplet, and the temperature of droplet. Although an input electric power value is monitored by viewing a power meter, other data are recorded to PC.

l. Test operating limits or restrictions

An execution limit and restriction are not in this experiment.

m. Proposed manifest for each flight

The experiments can be performed by a single operator, but two are preferable. For each flight, the proposed manifests are two of the following four:

Abe, Yutaka	(University of Tsukuba)
Enokuchi Akira	(University of Tsukuba)
Aoki, Kazuyoshi	(University of Tsukuba)
Yamada, Syougo	(University of Tsukuba)

n. Photographic requirements

The CSA photographers are requested to take still pictures and video of our experimental apparatus and operators during the flight for public relation purposes.

o. Hazard analysis

- When the water droplet in a test section leaks outside:

Since quantity of the water used in the experiment is very small and the

position of the leakage is limited, it can easily wipe off with a towel.

- When the molten fatty acid in a test section leaks outside:

The fatty acid used in the experiment can be wiped off with a towel like the case of water, since the damage over a human body is very few (refer to MSDS) and the quantity is also very small. Moreover, when it adheres to the floor and the surface of a wall in an airplane, it can be wiped off with a towel, and neutralizes using sodium carbonate after an experiment. Then, the solution is again wiped off with a towel.

- About a heating system:

The heating system used in this experiment consists of a heater and a temperature control device. The heater is used twisting around the syringe. Although the surface temperature of a heater rises by about a maximum of 200 °C momentarily, since the circumference of a heater is covered with thermal insulation, the surface temperature of thermal insulation does not rise to a dangerous value.

- About the possibility of an electric shock:

Since all the cases of the equipment used in this experiment are grounded, there is no possibility of an electric shock.

- About a blow with experiment equipment and a frame:

Shock absorbing material is installed in the angle of experiment equipment and a frame, and the damage to the human body at the time of contact on a human body is negligible.

- About scattering of apparatus and the fragment by breakage of a frame:

Since all frames are metal, there is no possibility of breakage. Moreover, since the test equipment is also being fixed to the frame with the bolt, there is no possibility of scattering. And, about the acrylics case of a test part, since thickness is 5mm, the possibility of breakage and scattering is negligible.

APPENDIX

Structural analysis of the experimental apparatus

The materials consist of bolts and plates and the relevant associated material are listed in Table2. For stainless steel, we assume that the maximum allowable shear stress is 40% of the ultimate shear stress which is 60% of the tensile strength. In the case of aluminum, we assume that the maximum allowable shear stress is smaller value of 40% of the proof stress or 24%(=40%×60%) of the tensile strength.

Table 2 Material properties for structure analysis

Materials	Tensile strength [MPa]	Proof stress [MPa]	Allowable shear stress [MPa]
Aluminum A5052	195	107	43
Stainless steel SUS304	520	205	82

A. Calculation of shear stress

All the weight data of equipment are listed Table1. Safety calculation for the bolts holding these equipment on the plates were conducted by using the following equation:

$$f = \frac{F_{\max} \times n}{F}$$

where F_{\max} is allowable shear stress listed Table2, n is number of bolt which resists the acceleration force, F is force by shear stress at 9-G.

All the results of the calculation are shown in Table3. It is clear from Table3 that it meets the 9-G safety requirement for acceleration.

For example the maximum force in any one direction experienced by the bolt holding the amplifier is estimated as 1166.20[N] under 9-G acceleration. The stress area of the bolt is 37.58mm². Hence these bolts safety the limiting 9-G requirement by a factor of $(82 \times 37.58) \times 2 / 1160.20 = 5.29$.

Table 3 Results of calculation of shear stress

	Items	Bolt	n	Stress area[m ²]	Shear force at 9-G[N]	Shear stress at 9-G[MPa]	Allowable shear stress[MPa]	Safety factor
Flame1	Base plate	M8	4	37.58	2610	17.363	82	4.72
	2nd plate	M8	4	37.58	2610	17.363	82	4.72
	3rd plate	M8	4	37.58	741	4.929	82	16.63
	Amplifier	M8	4	37.58	2381	15.840	82	5.18
	Amplifief	M8	4	37.58	2381	15.840	82	5.18
	Personal computer	M8	4	37.58	265	1.763	82	46.51
	Bus bridge	M8	4	37.58	353	2.348	82	34.92
Flame2	Base plate	M8	4	37.58	1675	11.143	82	7.36
	2nd plate	M8	4	37.58	2514	16.724	82	4.90
	Test section	M8	4	37.58	1764	11.735	82	6.99
	Converter	M8	4	37.58	1235	8.216	82	9.98
	Converter	M8	4	37.58	1235	8.216	82	9.98
	Heater	M8	4	37.58	88	0.585	82	140.07
	Measuring system	M9	4	37.58	370	2.461	82	33.31

B. Calculation of shear stress in the tie-down bolts

The frame is anchored to the aircraft using four bolts through steel adapters (L angle). The share stress diagram for tie-down bolts is shown in Figure8. Total shear force of frame1 under 9-G acceleration is estimated as 6755N. Total shear force of frame2 under 9-G acceleration is estimated as 4718N.

C. Strength of flame

We assumed the load on each plate in the test section as concentrated load. The locations of the concentrated load are shown in Figure9. Those loads attribute to the momentum forces to deform the plate. Figure10 shows the estimated values of the moment distribution for the frame deformation under 6-G downward condition. The proof stress of materials are listed in Table2. Safety factor f can be estimated by using the following equation.

$$f = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma}$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{Z}$$

where M_{\max} is maximum moment [N·m] from Figure10, σ_{\max} is proof stress of material

[N/m²] from Table2 and Z is cross section coefficient [m³]

The result of calculation is shown in Table4. It's clear from Table4 that it meets the safety requirement.

Table4 Calculation of frame

	Item	Mmax[N·m]	σ [MPa]	σ max[MPa]	f
Frame1	base	269	63.59	107	1.68
	2nd	269	63.59	107	1.68
	3rd	38	20.21	107	5.29
Frame2	base	145	33.56	107	3.19
	2nd	71	36.98	107	2.89

FIGURES

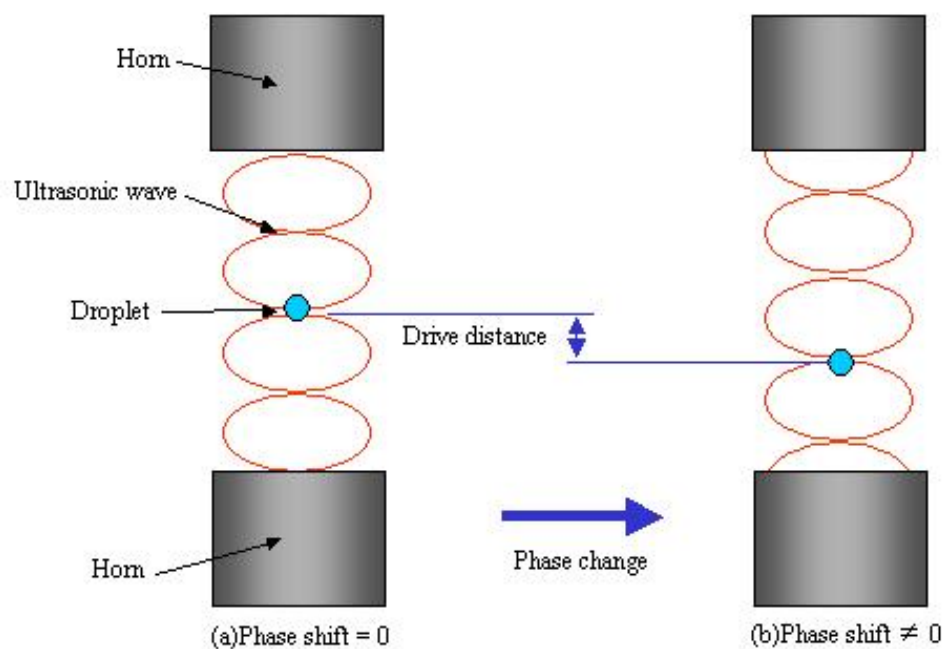


Fig.1 Schematic diagram of drive of liquid droplet experiment

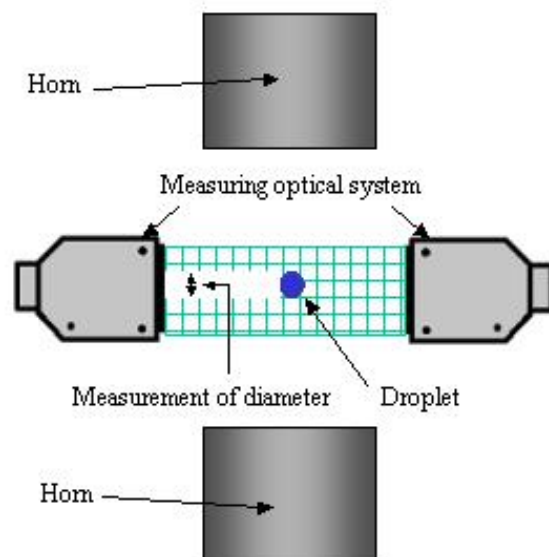


Fig.2 Schematic diagram of measuring the physical properties of liquid droplet

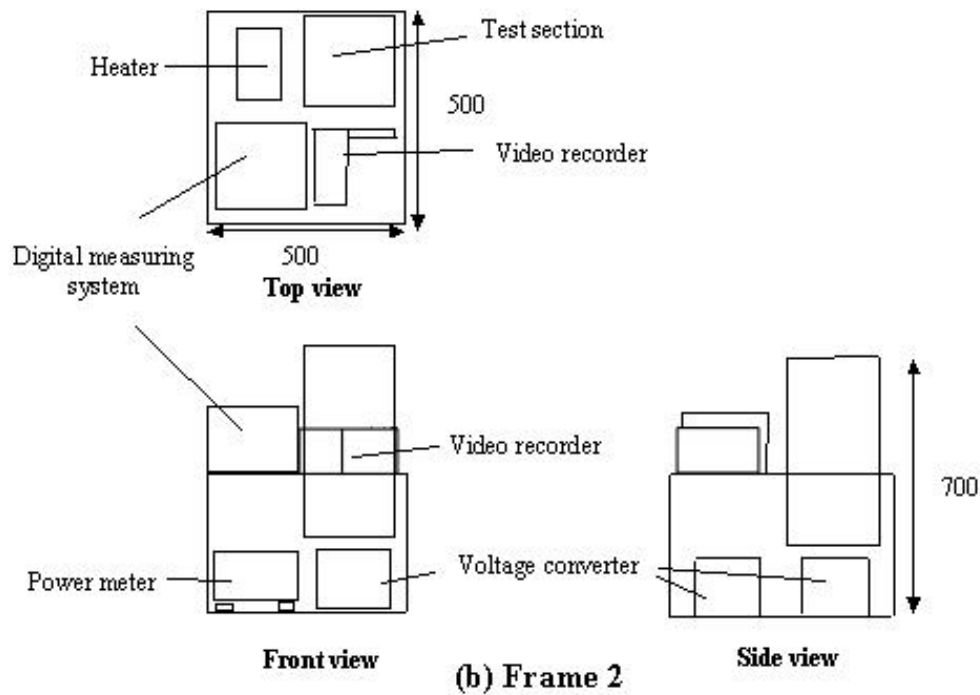
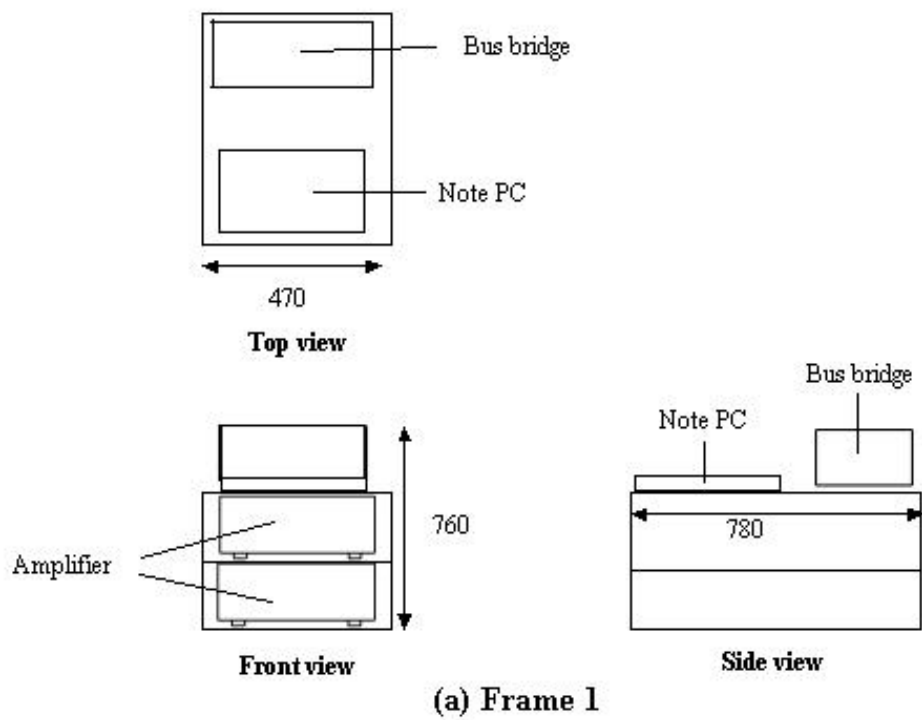


Fig.3 Arrangement of apparatus in frame

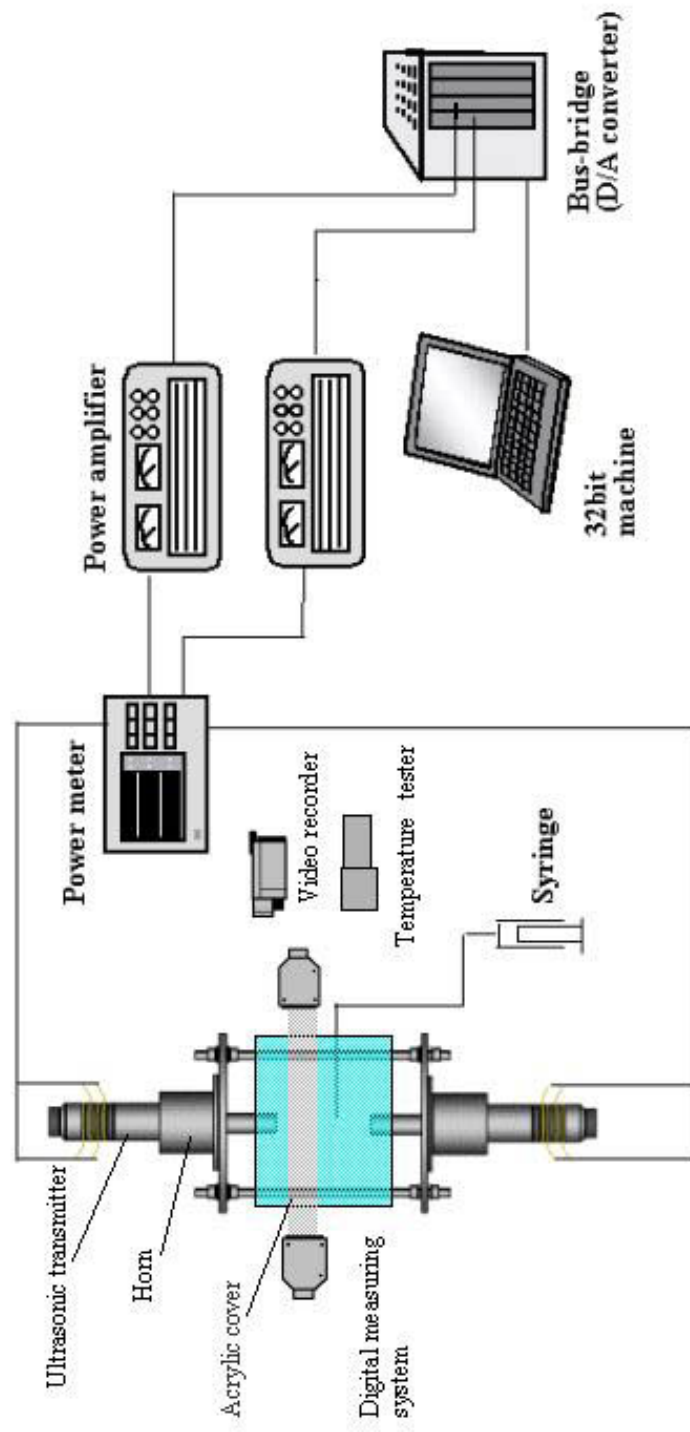


Fig.4 Schematic diagram of experimental apparatus

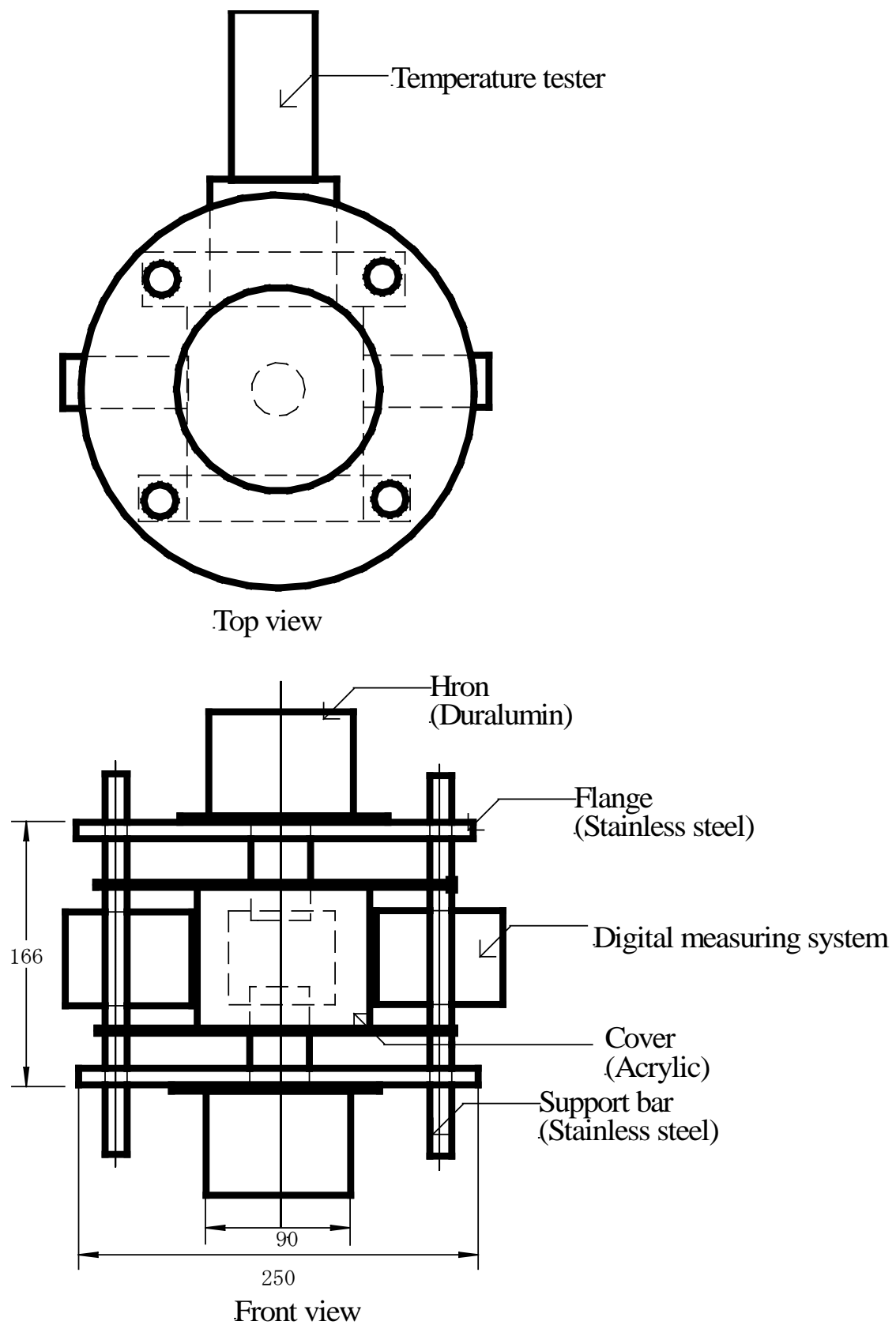
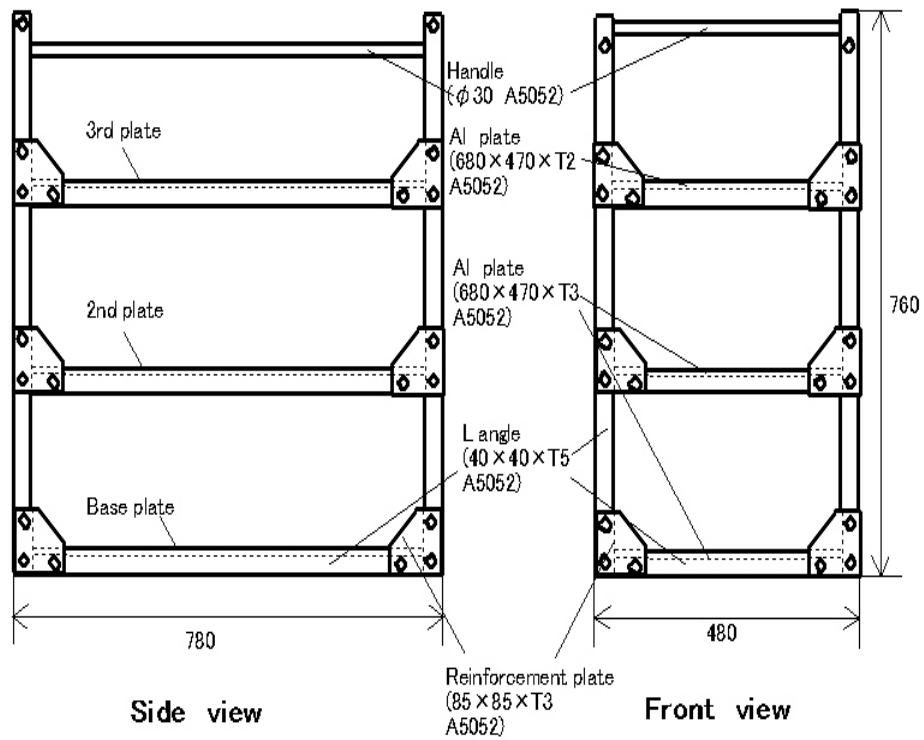
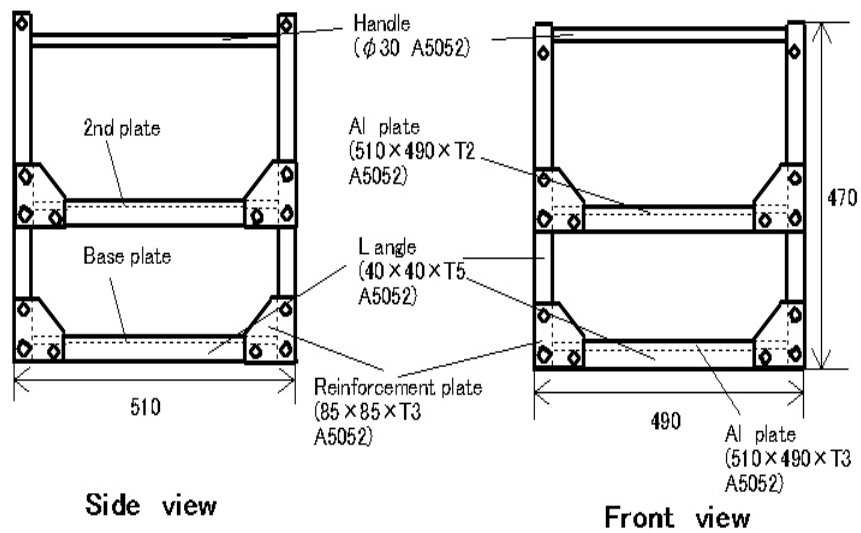


Fig.5 Schematic diagram of the test section



(a) Structure of flame1



(b) Structure of flame2

Fig 6 Structure of experimental flame

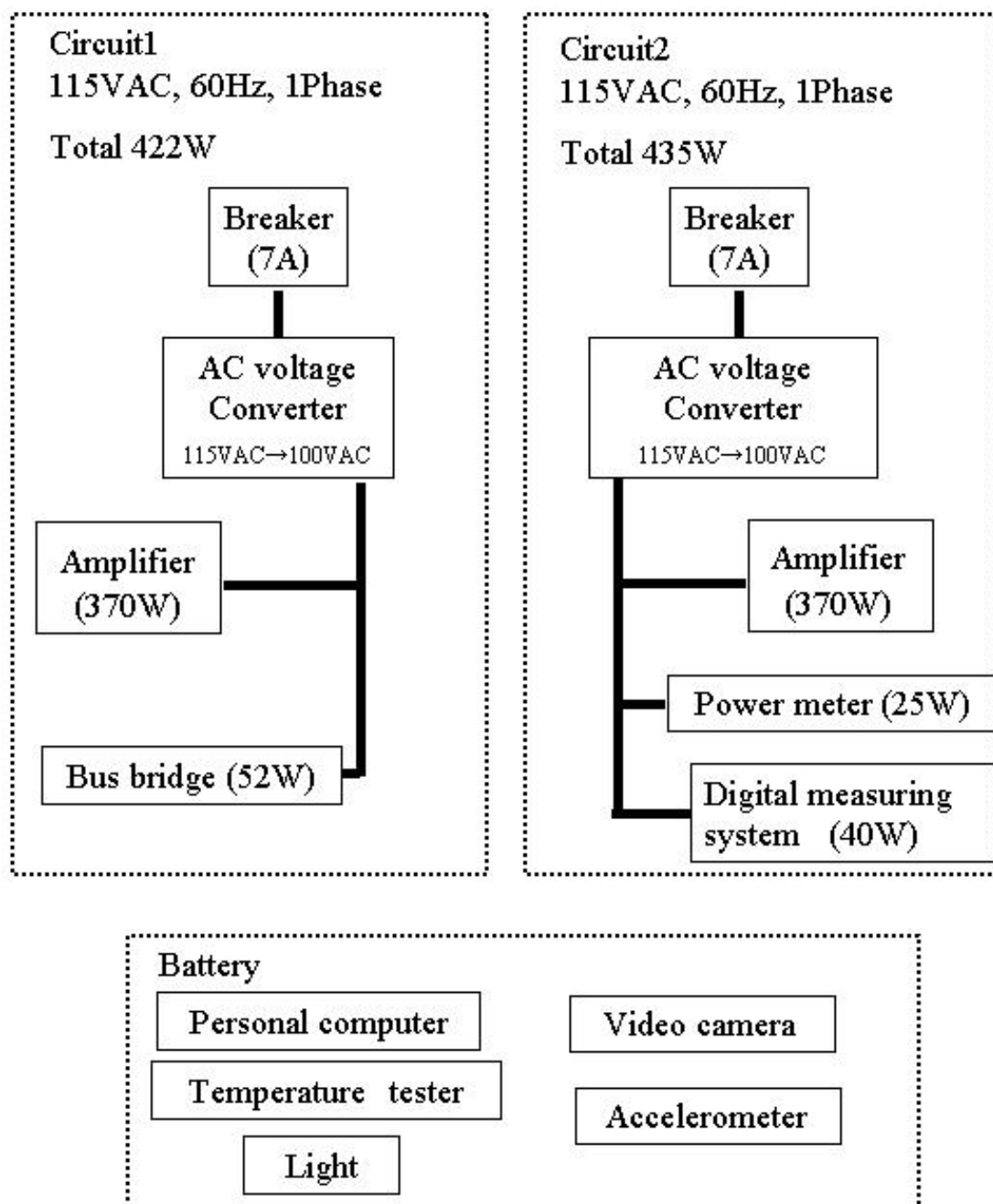


Fig.7(a) Electrical load diagram

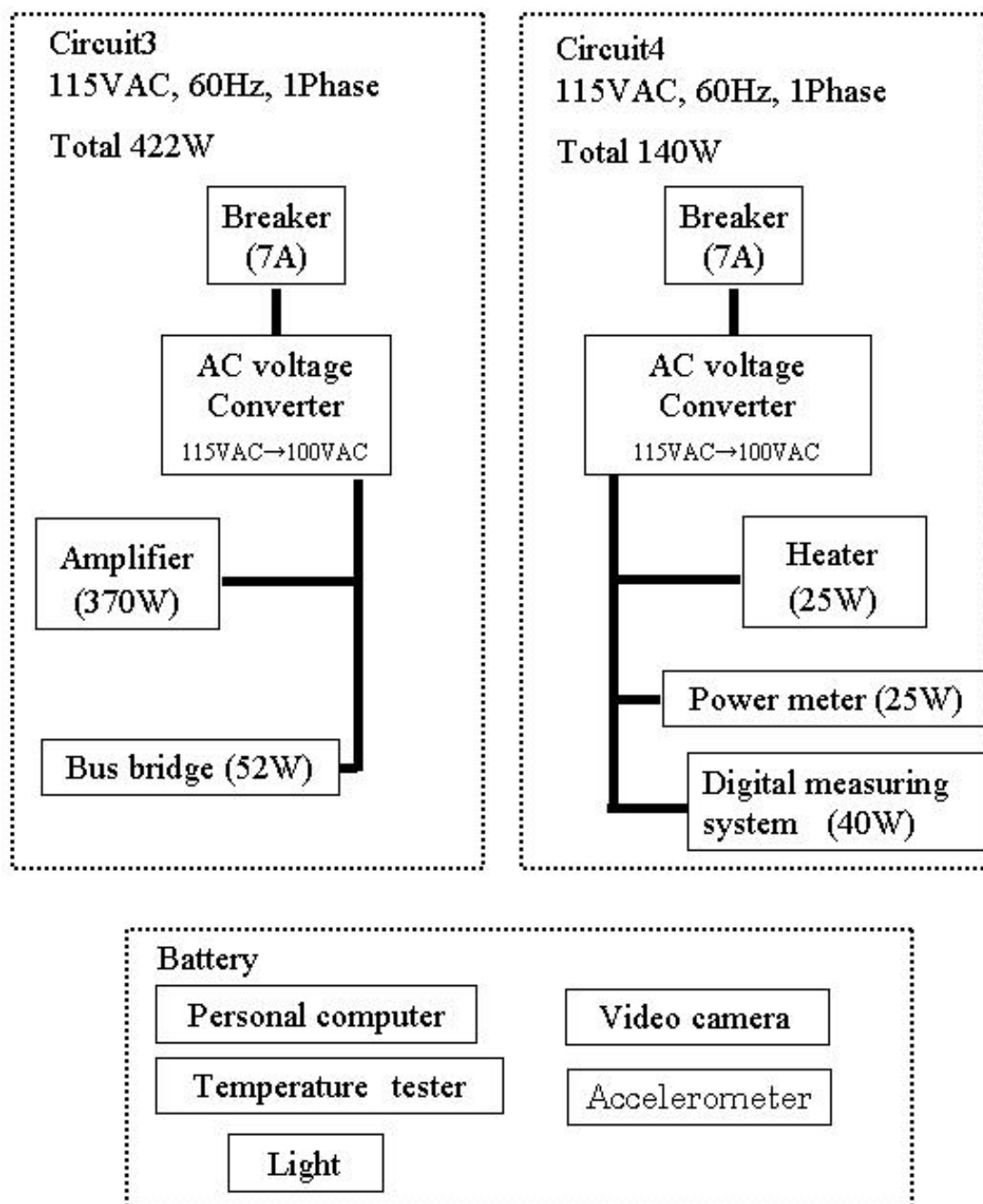
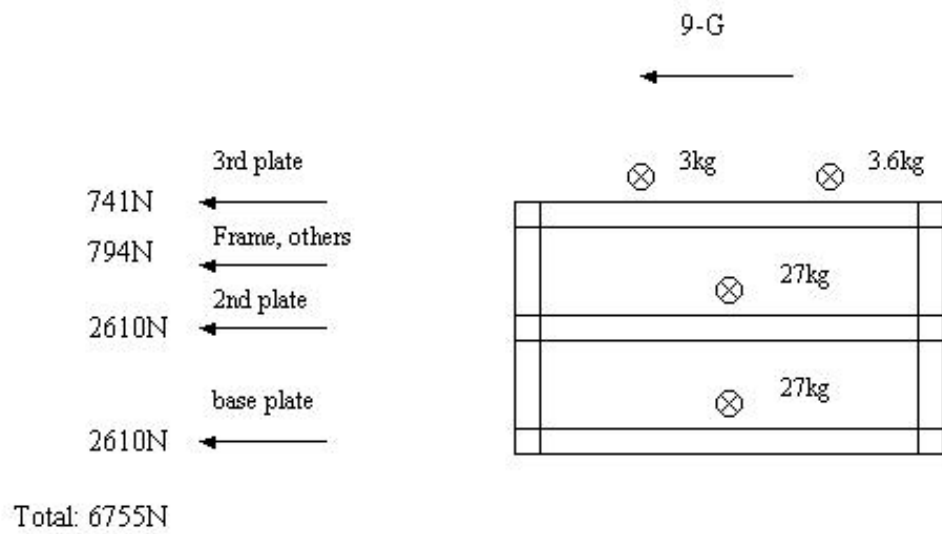
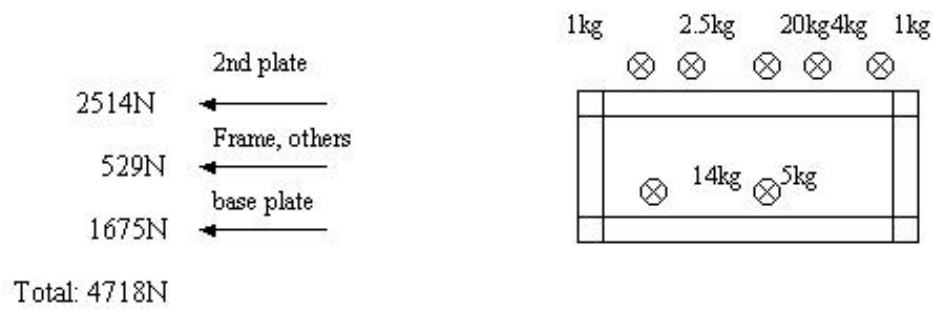


Fig.7(b)Electrical load diagram

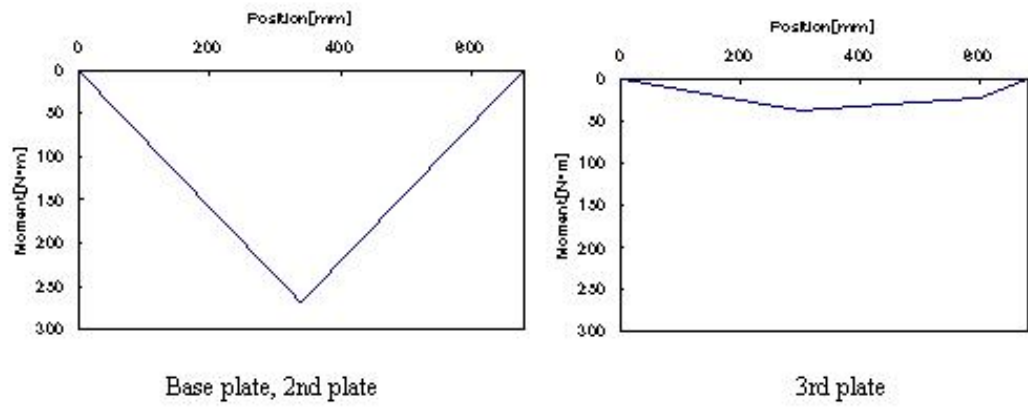


Frame 1

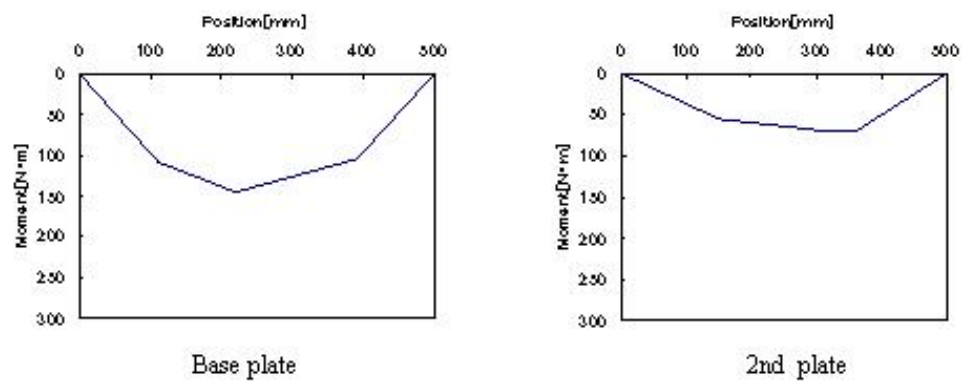


Frame 2

Figure8 Share stress diagram for tie-down bolts



Frame1



Frame2

Figure9 Moment distribution for frame deformation under 7-G downward condition

MATERIAL SAFETY DATA SHEET

MSDS No. 2001062E1

CODE:04-2328,12-0017 Issue Date:2001/03/14

IDENTITY Lauric Acid

1.CHEMICAL PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

PRODUCT NAME :Lauric Acid

MANUFACTURER :Wako Pure Chemical Industries,Ltd.

SUPPLIER(In JAPAN):Wako Pure Chemical Industries,Ltd.

ADDRESS :1-2,Doshomachi 3-chome,Chuo-ku,Osaka,540-8605,Japan

TELEPHONE NUMBER &EMERGENCY TELEPHONE NUMBER:(06)6203-3741

SUPPLIER(In U. S. A.):Wako Chemicals USA, Inc.

ADDRESS :1600 Bellwood Road,Richmond,VA 23237,U. S. A.

TELEPHONE NUMBER : (800)992-9256

EMERGENCY TELEPHONE NUMBER : (800)424-9300 (CHEMTREC)

SUPPLIER(In EUROPE):Wako Chemicals GmbH, Germany

ADDRESS :Nissanstrasse 2,D-41468 Neuss,GERMANY

TELEPHONE NUMBER &EMERGENCY TELEPHONE NUMBER : (02131)311-0

2.COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS

CHEMICAL NAME :Lauric acid

SYNONYMS :Dodecanoic acid,Laurostearic acid

FORMULA :C₁₂H₂₄O₂

MOLECULAR WEIGHT :200.32

CAS NUMBER :143-07-7

TSCA INVENTORY :Listed

EINECS No. :205-582-1

INDICATION OF DANGER :SYMBOL :, R-phrases :

3.HAZARDS IDENTIFICATION

May be harmful if inhaled and ingested.

May cause eye and skin irritation.

4.FIRST AID MEASURES

GENERAL ADVICE :Wash off immediately with soap and plenty of water. In the case of respirable dust and/or fumes,use self-contained breathing apparatus and dust impervious protective suit.Use personal protective equipment.

INHALATION :Move victim to fresh air.If breathing is difficult,give oxygen.If irritation persists,consult a physician.

SKIN CONTACT:Remove contaminated clothes and shoes,rinse skin with plenty of water or shower.Use soap to help assure removal.If irritation persists,consult a physician.

EYE CONTACT:Remove any contact lenses at once.Flush eyes well with flooding amounts of running water for at least 15 minutes.Assure adequate flushing by separating the eyelids with sterile fingers.If irritation persists,consult a physician.

INGESTION :Rinse mouth,give plenty of water to dilute the substance.Never give anything by mouth to an unconscious person.Consult a physician.

5.FIRE FIGHTING MEASURES

EXTINGUISHING MEDIA :Carbon dioxide,dry chemical powder,foam,water spray

FIRE &EXPLOSION HAZARDS :Toxic,irritating dust or smoke may be emitted.

SPECIAL PROTECTIVE EQUIPMENT FOR FIREFIGHTERS :Firemen should wear normal protective equipment(full bunker gear)and positive-pressure self-contained breathing apparatus.

6.ACCIDENTAL RELEASE MEASURES

PERSONAL PRECAUTIONS :Remove ignition sources and ventilate area. In case of insufficient ventilation,wear suitable respiratory equipment.Avoid raising dust and avoid contact with skin and eyes.

ENVIRONMENTAL PRECAUTIONS :Prevent spills from entering sewers,watercourses or low areas.

METHODS FOR CLEAN UP :Do not touch spilled material without suitable protection(See section8).After material is completely picked up,wash the spill site with soap and water and ventilate the area.Put all wastes in a plastic bag for disposal and seal it tightly.Remove, clean,or dispose of contaminated clothing.

7.HANDLING AND STORAGE

Research use only.

HANDLING :Avoid contact with eyes,skin and clothing.Avoid prolonged or repeated exposure.Handle material with suitable protection.

STORAGE :Store away from sunlight in a cool(<25 °C = 70 ° F)well-ventilated dry place.Keep container tightly closed.

INCOMPATIBLE PRODUCTS :Alkalis,oxidizers,reducing agents

8.EXPOSURE CONTROLS/PERSONAL PROTECTION

ENGINEERING MEASURES :Use exhaust ventilation to keep airborne concentrations below exposure limits.Use only with adequate ventilation.

VENTILATION :Local Exhaust ;Necessary,Mechanical(General);Recommended

CONTROL PARAMETER :

OSHA Final Limits,ACGIH TLV(s);None established

PERSONAL PROTECTION :

Respiratory protection ;NIOSH/MSHA approved respirator
Hand protection ;Chemical resistant gloves
Eye protection ;Safety glasses(goggles)
Skin protection ;Protective clothing

9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

APPEARANCE :White shot and small mass
ODOR :Slightly characteristic odor
pH :Not available
BOILING POINT :176 °C=349 ° F (at 2.0kPa)
MELTING POINT :43 ~46 °C=109 ~115 ° F
FLASH POINT :Not available
FLAMMABILITY (solid, gas):Flammable
DECOMPOSITION TEMPERATURE :Not available
EXPLOSIVE LIMITS :Not available
VAPOR PRESSURE :Not available
SPECIFIC GRAVITY :0.8642(at 60 °C=140 ° F)
SOLUBILITY IN :
WATER ;Insoluble
ETHANOL, ACETONE ;Soluble
log Po/w :Not available

10. STABILITY AND REACTIVITY

CONDITION TO AVOID :Sunlight, heat
INCOMPATIBILITY (MATERIAL TO AVOID):Alkalis, oxidizers, reducing agents
HAZARDOUS DECOMPOSITION PRODUCTS :Carbon monoxide may be formed.
HAZARDOUS POLYMERIZATION :Will not occur.

11. TOXICOLOGICAL INFORMATION

ACUTE TOXICITY DATA :LD50(oral, rat):12gm/kg(FDRLI*123, -, 1976)
IRRITATION DATA :Eye;rabbit;100mg:Mild(JACTDZ 6(3), 321, 1987)
Skin;rabbit;500mg:Mild(JACTDZ 6(3), 321, 1987)
MUTATION DATA :Cytogenetic analysis;S. cerevisiae;10mg/L
(NATUAS 294, 263, 1981)
REPRODUCTIVE EFFECTS DATA :Not available
TUMORIGENIC DATA :TDLo(skin, mouse):108gm/kg/15W-I(APMIAL 46, 51, 1959)
ADDITIONAL INFORMATION :NTP ;Not listed, IARC ;Not listed
OSHA;Not listed, ACGIH;Not listed

12. ECOLOGICAL INFORMATION

BIODEGRADABILITY :Not available
BIOACCUMULATION POTENTIAL :Not available
AQUATIC TOXICITY :Not available

OTHER INFORMATION :WGK;1

13.DISPOSAL CONSIDERATION

Burn in small portion in a chemical incinerator equipped with an afterburner and scrubber in accordance with all applicable regulations. Any disposal practice must be in compliance with country, local, state, and federal laws and regulations (contact country, local or state environmental agency for specific rules).

14.TRANSPORT INFORMATION

IATA :Not Restricted

DOT(Department of Transportation):Not a Hazardous Material for DOT shipping.

15.REGULATORY INFORMATION

US REGULATIONS :

EPA:CERCLA RQ, EPCRA TPQ=Not listed

OSHA:TQ=Not listed

EU REGULATIONS :

SYMBOL :

R-phrases :

S-phrases :

EC index No. :Not listed

16.OTHER INFORMATION

No specific notes

The above information is believed to be correct to be the best of our knowledge and information but does not purport to be all inclusive and shall be used only as a guide. This product is intended to be used by expert persons having chemical knowledge and skill, at their own discretion and risk and Wako shall not be held liable for any damage resulting from handling or from contact with the above material.

MSDS No.2001062E1 [4/4]