

微小重力環境下における超音波駆動法
による溶液中の気泡挙動の観察

Observation of bubble motion in liquid
by ultrasonic wave driving method
under microgravity condition

長岡 俊治 ¹⁾	宇佐美 論 ¹⁾	大坪 孔治 ²⁾	石倉 精三 ³⁾
Shunji Nagaoka	Ron Usami	Koji Otsubo	Seizo Ishikura
柴田 憲司 ⁴⁾	清家 康彦 ⁴⁾	三重野 光博 ⁴⁾	
Kenji Shibata	Yasuhiko Seike	Mitsuhiro Mieno	

(1)宇宙開発事業団

National Space Development Agency of Japan

(2)航空宇宙技術研究所

National Aerospace Laboratory

(3)(財)宇宙環境利用推進センター

Japan Space Utilization Promotion Center

(4)住友重機械工業(株)

Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

ABSTRACT

National Space Development Agency of Japan(NASDA) is carrying out the technology development to remove bubbles from the mixture, where bubbles are mixed with liquids or generated in liquids of the life science experiments under the microgravity condition.

We have selected the membrane separation technique for removing bubbles from liquids and ultrasonic wave driving method with one of novel energy sources for moving bubbles in liquids.

In this paper, we will report the results of the bubble moving experiments (using aircraft) by the ultrasonic wave driving method.

Outlines of results are as follows;

- 1) We have confirmed that bubbles in liquids can move steadily in the direction of ultrasonic wave propagation with lower power.
- 2) The relationships between the ultrasonic wave intensity, the bubbles moving velocity, and the liquid viscosity have been obtained.

1. 緒言

宇宙開発事業団では、微小重力環境下においてライフサイエンス系の実験をするに当り、取り扱う溶液中に混入あるいは発生した気泡を除去する技術の開発を、共通実験技術開発の一環として取組んでいる。

地上においては、粘性液体中の気泡や、界面活性物質の存在下のような特殊な場合を除き、気泡除去は特に難しい技術ではなく、一般的には、加熱、真空、超音波、遠心力及び疎水性膜等を利用した技術あるいはこれらを複合化した技術で行われている。しかしながら、微小重力下では、気泡は溶液中に分散した状態で存在するため、地上技術をそのまま利用することはできない。つまり、溶液中に分散した気泡を特定の位置まで移動させる技術（気泡移動技術）と系外へ気泡を取り出す技術（気泡除去技術）を複合化した技術開発を必要とする。さらにライフサイエンス系では、動植物細胞を始めとして、微細藻類、水棲動物等、多くの生体試料を取り扱うため、物理的刺激的強い方法は避けねばならない。例えば、遠心力のような擬似重力を使用すると、動植物細胞の成長・分化になんらかの影響を与え、微小重力実験の意図を失することになる。

気泡除去技術としては、生体試料への影響を考慮すると膜による分離が有望であると考えられ、これまで膜分離技術について検討した結果、有望であることが確認された。そこで、ここでは気泡移動技術として超音波利用技術を取り上げた。その一つである超音波脱気法は、超音波によるキャビテーション現象を利用し、溶存気体を気泡化することが目的であり、気泡移動技術としては使えない。さらにキャビテーションを起こすためには高出力の超音波を必要とし、場合によっては細胞破壊等の原因にもなりうる。したがって、超音波を用いる場合、このような高出力の超音波を用いるのではなく、動植物細胞等に影響を与えない程度の低出力で、かつ気泡を一定方向に移動できる技術である必要がある。

以上のことを踏まえて、地上実験で超音波による液体の移動の検討を実施し、更に、平成3年6月に航空機による微小重力環境下で、液体の移動に伴う気泡の挙動の観察を行うと共に超音波の気泡移動技術としての有用性を検証した。本稿では、航空機実験で得られた気泡の移動速度と超音波出力、液体の粘度の関係について報告する。

2. 超音波による気泡移動の概念^{1), 2)}

超音波による気泡移動の原理として、①超音波により液体流動が生じ、これにより気泡が移動する、②超音波が気泡に直接作用する、ことが考えられる。

ここでは、まず超音波による液体の流れについて考える。

液体の流れは、放射圧の場所による変化（放射圧勾配）によるものと考えられる。つまり、伝播方向に平行な液体の柱を考えると液体が音を吸収する結果、この液体柱の両端におけるエネルギー密度に差異を生じ

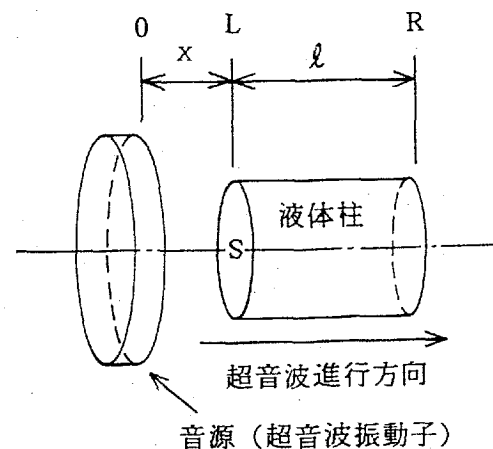


図1 超音波による液体流れのモデル
Fig.1 Liquid flow model on sound field by ultrasonic wave

る。放射圧はエネルギー密度に等しいから、これが液体柱を伝播方向に押す力となる。

これらのことを一般的な式で表すと以下の様に表すことができる。図1に示すような音源（超音波振動子）からの距離 x にある長さ l で断面積 S の液体柱の両端におけるエネルギー密度について考える。液体柱の左端（L点）におけるエネルギー密度（ E_L ）は、音源の音圧を p_0 とすると、（1）式で与えられる。

$$E_L = \frac{p_0^{-2\alpha x}}{\rho c^2} \quad (1)$$

同様にして、液体柱の右端（R点）におけるエネルギー密度は、

$$E_R = \frac{p_0^{-2\alpha(x+l)}}{\rho c^2} \quad (2)$$

したがって、液体柱を押す力 F は次式で表すことができる。

$$F = (E_L - E_R) \cdot S = \frac{(p_0^{-2\alpha x} - p_0^{-2\alpha(x+l)}) \cdot S}{\rho c^2} \quad (3)$$

- ここに、
- p_0 : 音源の音圧 (N/m^2)
 - E_L : L点におけるエネルギー密度 (J/m^3)
 - E_R : R点におけるエネルギー密度 (J/m^3)
 - F : 長さ l の液体柱を押す力 (N)
 - x : 音源からの液体柱左端までの距離 (m)
 - S : 液体柱の断面積
 - α : 液体による音の吸収係数 (m^{-1})
 - ρ : 液体の密度 (kg/m^3)
 - c : 液体中の音速 (m/s)

超音波による液体移動の概念としては、（3）式で説明されるが、今回のように小さな容器で、しかも超音波の進行方向に障壁があるような場合においては、この障壁によって超音波が反射され部分的に定在波が生じたり、干渉が生じたりするため補正が必要となる。微小重力下において、このような超音波によって液体が移動している場に気泡が存在すると、気泡は液体からの力を受け、液体の移動方向に動くことになる。

次に、超音波の気泡への直接的な作用について考える。液体が超音波の影響を受けると同様気泡も超音波の影響を受ける。このことを単一気泡について考えると、単一気泡の受ける放射圧（ F_b ）は、気泡径が小さい場合、超音波の進行方向に直角な気泡の断面積を S_b 、エネルギー密度を E_b とすると次式で与えられる。

$$F_b = S_b \cdot E_b \quad (4)$$

実際には、気泡による音の吸収、気液界面での反射等が加わるので、補正が必要であ

るが、概念的には(4)式で説明される。

以上のことから、基本的には、気泡は液体と超音波からの2つの力を受け移動すると考えられる。また、気泡を移動させる推進力として、いずれの力が主体的になるかについては、定量的な検討は複雑になるが、定性的には以下のように説明される。

音源から一定距離にある液体の断面における超音波の放射圧は一定であるから、同一断面にある気泡に作用する放射圧も液体に作用する放射圧に等しい。ところが、固有音響インピーダンスが異なる2つの媒質の境界面(ここでは気液界面)では超音波のパワーの多くは反射されるため、気泡を進行方向に押す力は減少すると考えられる。

以上のことから、超音波による気泡の移動の概念は、超音波により液体流動が起こされ、これにより気泡が移動することによる効果が主体的であると考えられる。

3. 実験装置

図2に実験装置の系統図を、図3に実験装置の外観を示す。

気泡の挙動を観察するための水槽は、アクリル製の角型水槽(内容積:約600cc、サイズ:60mm×60mm×170mm)で、水槽右端に超音波振動子を設置している。したがって、超音波の進行方向及び液体の流れ方向は左方向となる。水槽から排出された液体は循環ラインを通して、振動子側部に戻されるようになっている。また、超音波発振器の発振周波数は1MHzで、その出力レベルはMAX60Wまで可変できる。更に、気泡は圧縮空気ボンベ(内容積:150cc、充填圧力:9kgf/cm²G)を用い、圧力調整弁で所定の圧力に調整した後、気泡注入弁を介して水槽中央部に挿入した気泡注入ノズルを用いて発生させる。なお、気泡注入操作を自動化するために、シーケンス制御装置を用いた。

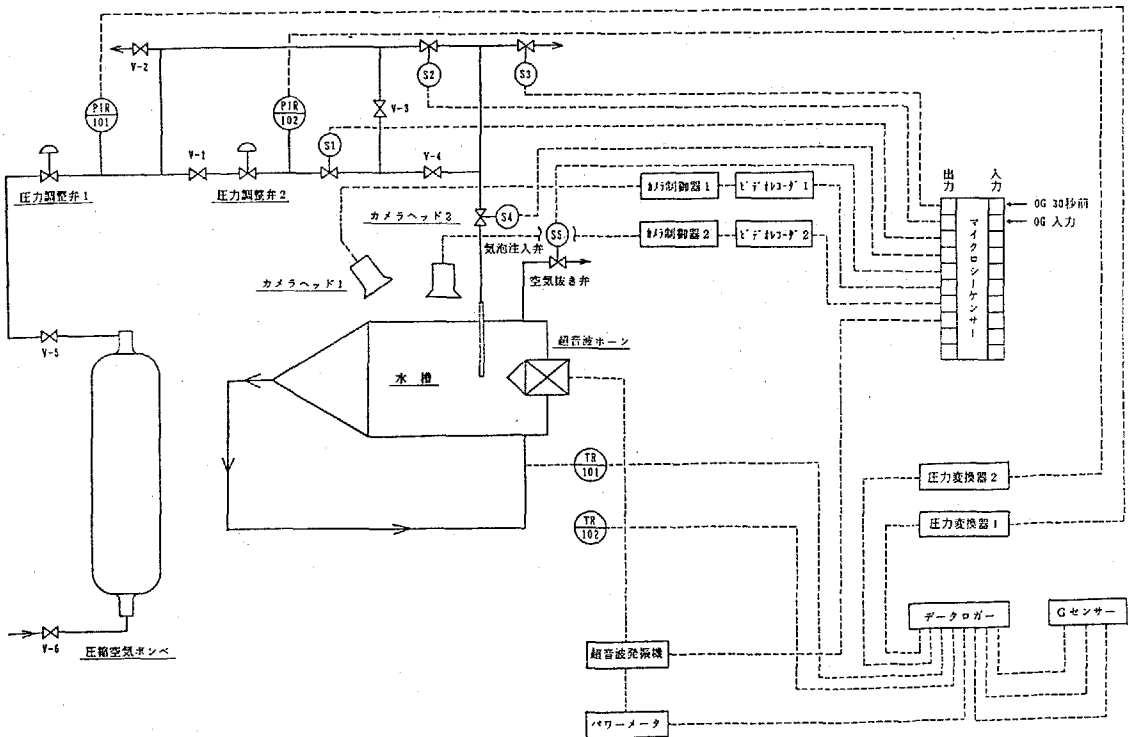


図2 航空機実験装置系統図

Fig.2 Schematic diagram of experimental apparatus by aircraft

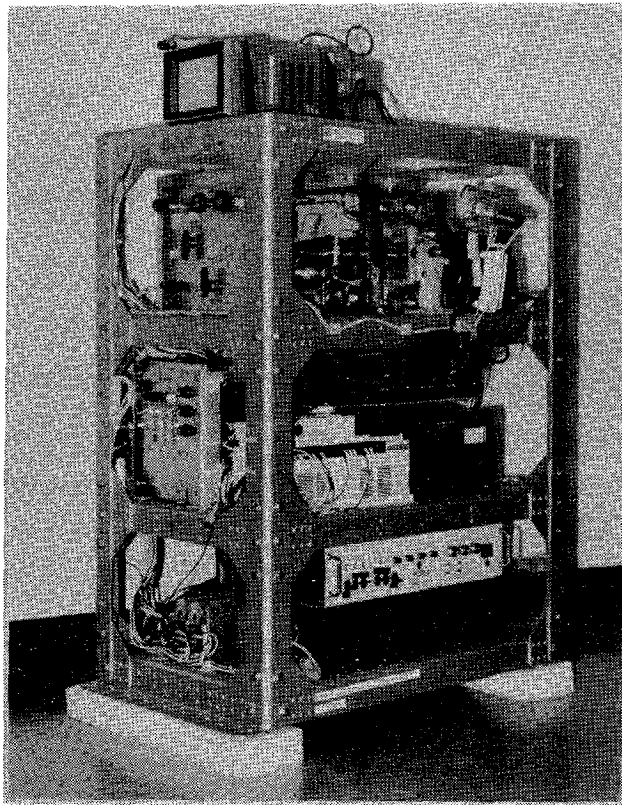


図3 航空機実験装置外観図

Fig.3 Photograph of experimental apparatus by aircraft

4. 実験方法

水槽右端より超音波（1MHz）を所定の出力で照射し、次に気泡注入弁の開閉時間を変化させることによって、超音波ホーン先端部に単一気泡を一定時間毎に発生させる。この時の液体移動に伴う気泡の挙動を観察（ビデオ撮影）する。ビデオ画像より気泡の移動速度を求め、気泡移動技術としての有用性を評価する。

実験条件を表1に示す。

表1 実験条件

Table 1 Experimental condition

①	液体	蒸留水（1cP） ジエチレングリコール水溶液（10、20cP） トリエチレングリコール水溶液（30cP）
②	気泡	空気 注入圧力：0.2 kgf/cm ² G
③	気泡注入ノズル	孔径：0.1mm、先端針状
④	気泡注入弁開閉時間	10ms開／1s閉
⑤	超音波発振器	発振周波数：1MHz、出力レベル：0.2～60W

次に実験手順を図4に示す。
実験開始前に超音波を所定の出力に設定し、シーケンスプログラムを動作状態にしておく。

実験は航空機からの μg 信号を受けて、自動的にスタートする。 μg 信号検出後、超音波発振を開始し、その1 sec後に気泡注入を開始する。 μg 信号を検出してから、20 sec後に気泡注入を停止するが、この間、1秒毎に10 msecだけ、気泡注入弁を開くことにより、気泡を水槽内に注入する。気泡注入停止後、シーケンスプログラム停止までの間に、図2の系統図に示した各弁を開閉し、系内に溜まった空気抜等、操作を自動的に行う。

以上で、1回の実験操作が完了する。

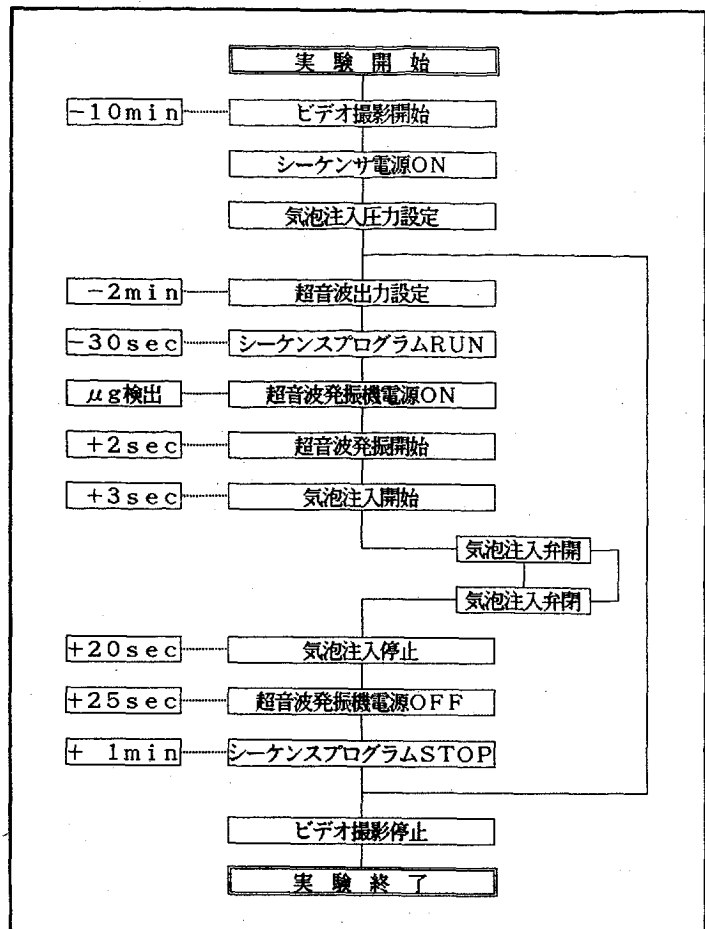


図4 航空機実験実施手順

Fig.4 Operating procedure
for experiment by aircraft

5. 実験結果及び考察

5.1 実験結果

ビデオ画像を観察した結果、気泡がX、Y、Z軸方向のgの変動に敏感に応答するため、気泡が一定方向に移動しないこと、また、気泡同士が接近してくると、特に粘性液体中では合体し移動速度が変化すること等から、ランダムサンプリングでは超音波出力と気泡移動速度の相関を求められない。したがって、以下に示すデータサンプリングの基準を設け、データを整理することとした。

- (1) 気泡注入ノズルから10~20 mmの間を移動している気泡。
- (2) 航空機X軸方向に平行に動いている気泡。
- (3) 他の気泡ができるだけ周囲にないこと。

上記基準に従い、気泡移動速度を測定した結果を表2に示す。なお、表中の液体温度は、航空機実験時における平均温度である。また、液体の粘度、密度については、液体温度の平均値における値を示している。液体の粘度はキャノンフェンスケ粘度計、液体の密度は比重瓶を用いて測定した。

図5に、30 cPの液体中における気泡の合体现象の例を示す。図中に示した番号は時間経過を示しており、1から4へ時間が経過している。図から推察されるように、後

方の気泡が先行する気泡に追いつき、合体していることが窺える。この現象は定性的に以下のように説明される。

超音波の進行方向に直列に存在する2個の気泡を考えると、先行する気泡は、後方にある気泡より超音波の影響を受けにくくなるため、先行する気泡の移動速度が低下する。このため、あたかも後方の気泡が加速的に追いついてくるように見えるものと思われる。

気泡同士が接近してからの衝突合体は、振動場にある2個の気泡間に働く引力(Bjerknesの力)によるものと考えられる。

また、詳細な検討は、今後の課題として残るが、超音波によって気泡を合体させ

ることができることは、ライフ系に関わらず、材料系等、他の用途にも利用できるのではないかと考えらる。

表2 気泡移動実験結果一覧

Table 2 Results of bubble moving test

粘度 cP	液体の物性		超音波 出力 W	気泡径 mm	気泡移動速度 (x軸方向) mm/s
	密度 g/cm ³	温度 ℃			
1.0	1.0	24	1.0	1.8	12.1
			3.6	1.8	24.4
			9.0	1.2	45.6
		27	1.0	1.3	13.1
			3.9	1.0	25.0
			8.5	1.1	48.9
10.3	1.09	28	16.5	1.0	60.3
			1.0	2.0	4.5
			3.6	1.9	11.4
			3.9	1.4	11.9
			8.6	1.8	22.0
			13.8	1.2	25.1
23.7	1.10	26	27.1	1.3	32.9
			3.9	1.9	6.0
			9.2	1.7	8.5
			16.5	1.5	11.4
			25.6	1.7	14.4
			35.0	1.7	18.7
31.9	1.11	28	8.6	1.6	4.7
			15.0	1.6	6.9
			24.8	1.6	12.4

供試液体: 1.0 cP 蒸留水
 10.3 cP ジエチレングリコール水溶液
 23.7 cP ジエチレングリコール水溶液
 31.9 cP トリエチレングリコール水溶液

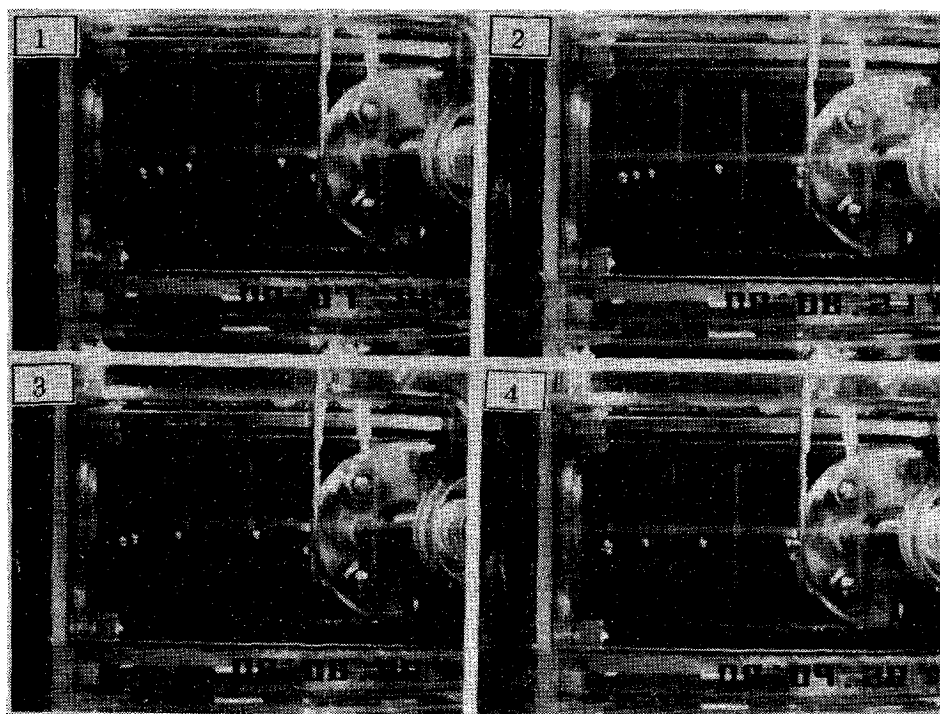


図5 気泡の移動状況及び合体現象の例

Fig.5 Situation of bubble motion and unifying phenomena of bubbles

5. 2 解析結果

気泡移動の概念は、第2項で述べた通りであるが、気泡移動速度は容器形状に大きく影響されるため、容器特性に関わるパラメータを考慮する必要があり、解析が複雑になる。このことについては今後の課題とし、ここでは、実験精度及び実験パラメータと気泡移動速度との相関関係を求め、本実験の評価を実施することとした。

そこで、気泡移動速度について(5)式の回帰式を想定し、重回帰分析を実施した。

$$u = K \cdot P^a \cdot \nu^b \cdot D^c \quad (5)$$

u : 気泡の移動速度 (mm/s)

P : 超音波出力 (W)

ν : 液体の粘度 (cSt)

D : 気泡の直径 (mm)

K : 定数

各定数を計算した結果を(6)式に示す。この時の重相関係数は0.902で、かなり相関が高いといえる。また、この式から気泡の移動速度は、気泡径にほとんど依存しないことが分かる。但し、解析には直径が1~2mmで、かつ単一で移動している気泡のみを用いているので、直径が大きく異なる気泡、気泡群の移動速度及び気泡が合体する場には当てはまらないと考えられる。

$$u = 14.07 \cdot P^{0.545} \cdot \nu^{-0.535} \cdot D^{0.0004} \quad (6)$$

(6)式を用いた計算結果と実験値の比較を図6-1~4に示す。また、液体の粘度と気泡移動速度の関係を図7に示す。重相関係数で示したように、実験値と計算値は良く一致しており、実験の精度及び解析の妥当性が窺える。但し、重力の効果についてはパラメータに入れていないので、今回実施した $10^{-2}g$ における結果である。

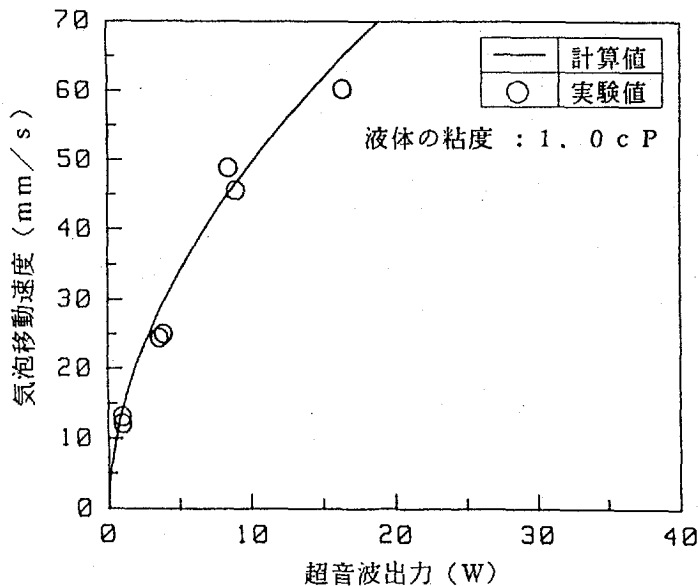


図6-1 超音波出力と気泡移動速度の関係(1)
Fig.6-1 Relationship between intensity of ultrasonic wave and bubble moving velocity(1)

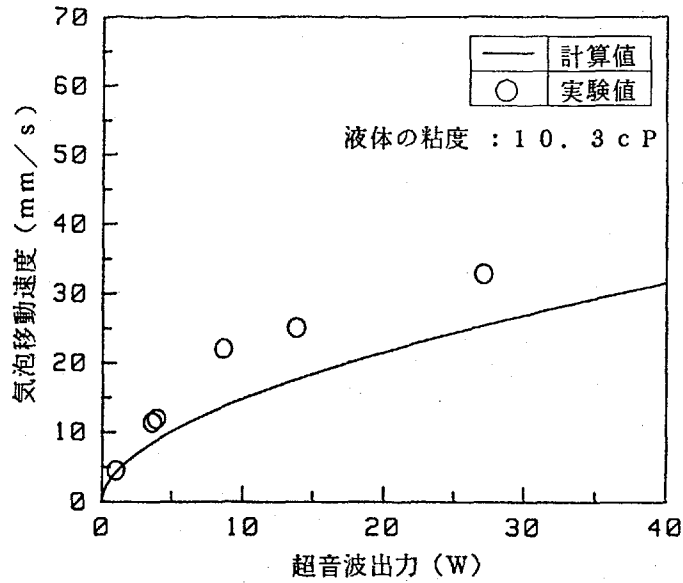


図6-2 超音波出力と気泡移動速度の関係(2)
 Fig.6-2 Relationship between intensity of ultrasonic wave and bubble moving velocity(2)

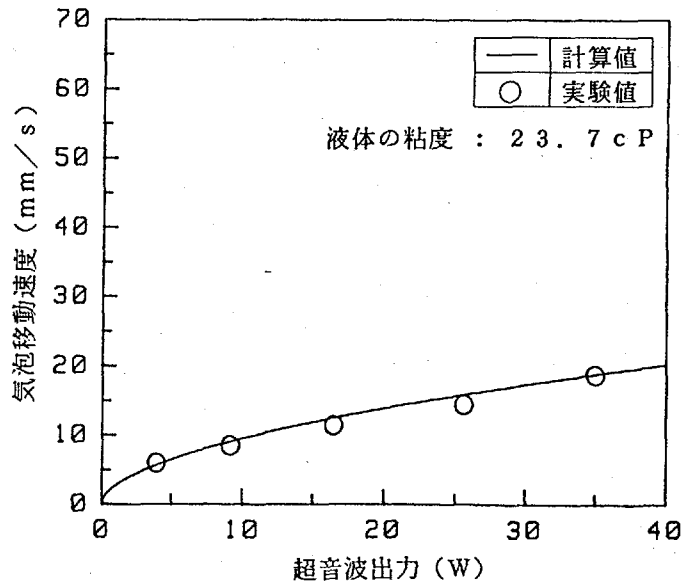


図6-3 超音波出力と気泡移動速度の関係(3)
 Fig.6-3 Relationship between intensity of ultrasonic wave and bubble moving velocity(3)

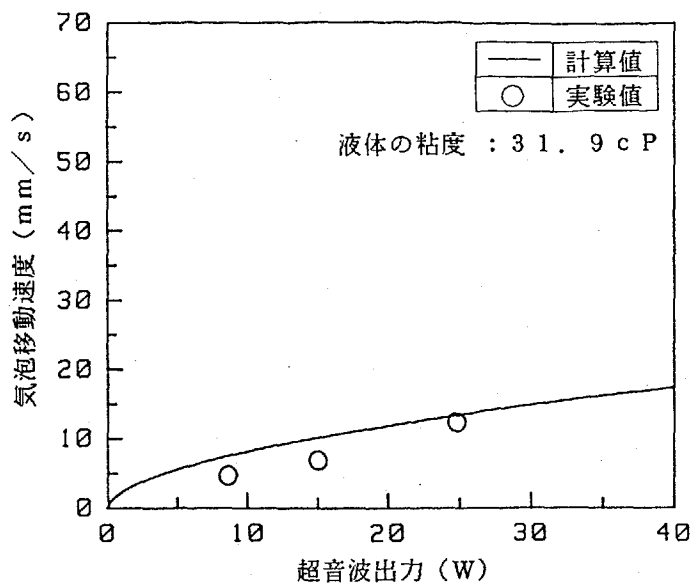


図6-4 超音波出力と気泡移動速度の関係(4)

Fig.6-4 Relationship between intensity of ultrasonic wave and bubble moving velocity(4)

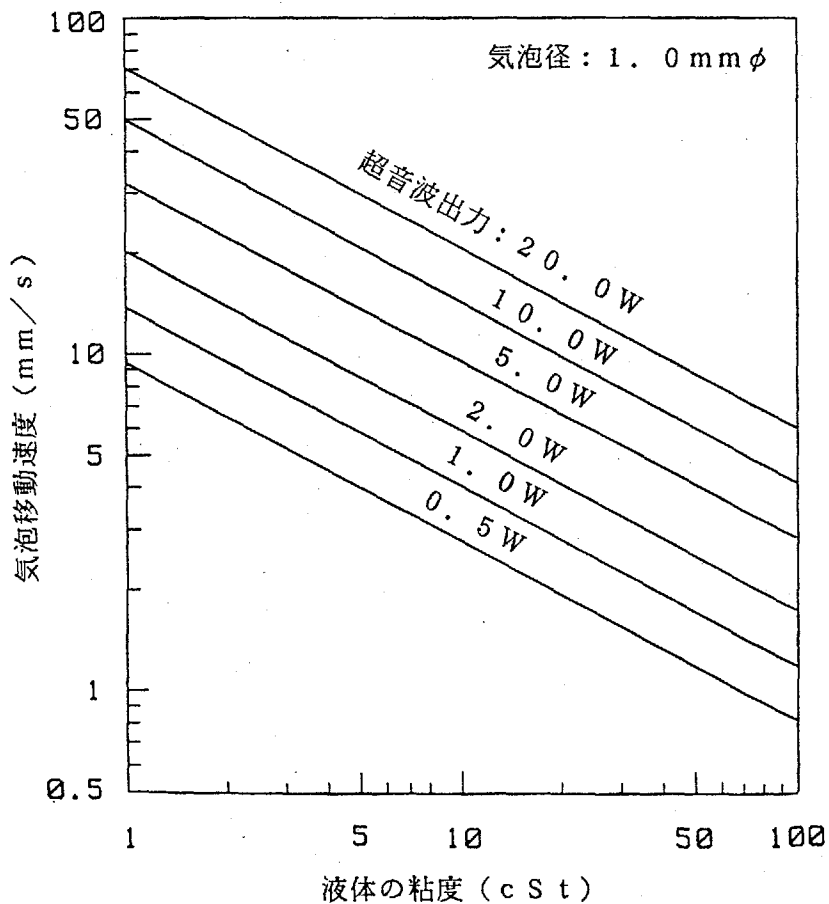


図7 液体の粘度と気泡移動速度の関係

Fig.7 Relationship between viscosity of liquid and bubble moving velocity

6. 結 言

超音波による気泡移動技術の検証を目的として、航空機実験を実施した結果、以下の成果を得た。

- (1) 微小重力下で一定径の気泡を一定間隔で発生させる実験技術については、期待する成果が得られた。また、種々の条件下で超音波による気泡の挙動に関し、観察データを取得できた。
- (2) 超音波の低出力下での気泡の移動については、 g 変動の影響を受け、定量化できるほどのデータは得られなかったが、0.5 W以下の低出力下でも気泡の移動を確認でき、一応の成果は得られたと判断される。
- (3) 気泡の移動速度と超音波出力、液体の粘度、気泡径の相関関係を求めることができた。この結果、気泡の移動速度は気泡径に依存しないことが明らかになった。
- (4) 超音波によって、気泡を合体できることが分かり、ライフ系の溶液に限らず、気泡の合一を必要とする材料系の融液等、他の分野にも適用できると考えられる。

<謝 辞>

航空機実験を実施するに当り、三菱重工業(株)殿、ダイヤモンドエアサービス(株)殿の関係各位には多大なる御協力を頂いた。ここに厚く感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 五十嵐他；音響と振動，1968，共立出版
- (2) 実吉他；超音波技術便覧，1961，日刊工業新聞社