

超音波パルスを用いた液体中の分散相の検出法

石垣 政裕* 小林 三郎* 徳田 昌則*

Pulsed-ultrasonic Detection of Dispersed Phases in Liquid. By Masahiro ISHIGAKI, Saburo KOBAYASHI and Masanori TOKUDA.

Multi-phase mixtures occur in almost all stages of metallurgical processes and it is imperative to have exact information of the behavior of these multi-phase systems for the fine-control of these processes.

This report presents the results of analysis of the attenuation of ultrasonic pulse in gas bubbles, solid particles and gas bubbles-solid particles dispersed liquid. To analyze the gas-liquid-solid multi-phase systems quantitatively, a vertical counter-current type flow was employed. It was established, that the attenuation behavior of the transmitted pulse correlated with the observed flow pattern, and, that the attenuations due to the gas bubbles and the solid particles were additive. Using these results, the three-phase flow was accounted for.

Also, the practical applicability of the ultrasonic pulse technique, to analyze the structure and motion of gas-liquid two phase systems in a gas injection process, was demonstrated.

(Received November 2nd, 1987)

Keywords: *ultrasonic application, attenuation factor, counter-current, dispersed phase, gas injection, gas hold up, ultrasonic spectroscopy.*

1. 緒 言

金属の製錬過程では、例えば、吹き込まれた気体ジェットや気泡、析出した液相あるいは固相の介在物など、熔融金属あるいはスラグ中に異相が複雑に混在し¹⁾、また、反応によってそれが変化していく過程がみられる。

適切な操業条件の検討、新プロセスの開発のためには、これら分散相の反応過程における挙動を検出する手段の開発が必要とされている。

従来、熔融金属など高温状態にある液体中の異相の分散挙動を解析する手段としては、常温下にある液体モデルを用いたシミュレート実験が数多く行われている。一方、高温状態での異相の挙動の計測としては強力X線を用いた形態的な観察や、電気探針法などによる実験室規模での測定が行われているにすぎず、対象とする系が気-固-液系のように複雑な様相を呈している場合には、現在のところ、有効な検出手段がないといえる。

このような観点から、本研究では熔融金属のような高温融体中に分散する、気体および固体およびそれらの混合相などの異相の検出に超音波パルス法を適用することを目的とし、その可能性について実験的な検討を行った。

超音波の計測への応用については1960年代にさかんに行われたが、やがてレーザーなどの開発・発展により、用いられることは少なくなっていた。しかし、不透明な流体や熱放射をともなう高温流体では光学的計測が不可能である。近年、信号処理系の著しい発展とともに、再び超音波応用技術の新しい展開がなされている。超音波を用いて、不透明な物体中の異相を検出する方法

選鉱製錬研究所報告 第1034号 日本鉄鋼協会第110回、第112回講演大会(昭和60年10月、61年10月)にて発表
*東北大学選鉱製錬研究所

1) 荻野和巳：学振19委 10703, (1986, 2.5).

としては、透過法、反射法、干渉法、ドップラー法があるが、本報告では、超音波パルス透過法あるいは反射法を用いて、気一固一液混合相の分散状態を測定するとともに、その応用例として、液体中に吹き込まれる気体ジェットおよび気泡の分散を解析した。

2. 超音波パルス法による多相系検出

超音波パルス法を適用し、液体中に懸濁した気泡^{2)~5)}あるいは固体粒子の検出に^{6)~8)}についてはこれまでにいくつかの研究が行われている。

これに対し、気一固一液の三相系については金属製錬のみならず、広い分野にわたって応用上きわめて重要であるにもかかわらず、混相流の解析を始め、その研究は緒についたばかりである^{9),10)}。混相内での超音波の挙動についても研究例は極めて少ない¹¹⁾。

そこで、本節では、気一固一液混合相内での超音波の減衰挙動について検討した。

2.1 実験装置

実験には広い実験条件下で均一な分散相が得られるように、気一固一液向流型反応装置を用いた。

このような向流型反応装置は原理的に高い反応効率を達成し得る上に気体の塔内滞留時間の増加、気液間物質移動の促進などの効果も期待でき、化学プロセスを始めとして広い応用が考えられる。

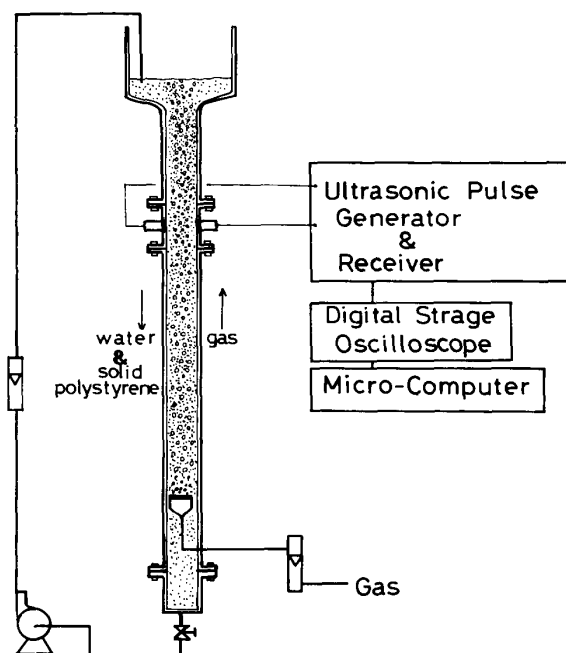


Fig.1 Schematic diagram of the apparatus for counter current flow.

Fig.1 に用いた装置の概略を示す。塔には内径 38 mm、長さ 1.8 m の透明アクリルパイプを用い、上部に液タンクを取り付けた。実験は、窒素—ポリスチレン—水系で行った。液は主に蒸留水を用い、塔下部から導入された窒素ガスは直径 22 mm、気孔径 44 μm の厚さ 2 mm のステンレス焼結板で塔内に分散される。ガス流量範囲は 0~100 cm^3/s であった。固体粒子としては、密度 1.056 g/cm^3 、粒子径 0.15~0.3, 0.3~0.5, および 0.5~1.0 mm のポリスチレン粒子を用い、これを水中に懸濁し、ロータリーポンプで水とともに塔内を上から下へ循環させた。

塔上部に直径 10 mm、周波数が各々 1, 5, 7 MHz の水晶振動子を一对、平行に取り付け、超音波パルスの送受信 (MATEC 社製 model 7700,

- 2) Alforque, R. A.; Sawada, Y.; Nishihara, H.: J. Nucl. Sci. Technol., 14 (1977), 82.
- 3) 本多 敏, 山崎弘郎: 計測自動制御学会論文集, 15 (1979), 106.
- 4) Makhin, V. A.; Mel'nikov, V. I.; Shatrov, V. A.: Fluid Mechanics-Soviet Res., 11 (1982), 31.
- 5) Stravs, A. A.; Stockar, U.: Chem. Eng. Sci., 40 (1985), 1169.
- 6) 加賀彰夫, 土屋 明, 西村 実: 電子通信学会技術研究報告, (1982) US82-30.
- 7) Maaser, H.; Rhinesmith, R.; Hemmes, P.: J. Mol. Liq., 27 (1984), 145.
- 8) Stravs, A. A.; Stockar, U.: J. Acoust. Soc. Am., 77 (1985), 1419.
- 9) 坂口忠司: 機械の研究, 35 (1983), 1113.
- 10) 都田昌之, 原田英二, 栗山雅文, 猿田真司, 今野宏卓: 化学工学論文集, 8 (1982), 380.
- 11) Ma, Y.; Varadan, V. K.; Varadan, V. V.: Offshore Technol Conference 4506 (1983).

755) を行った。パルス内の波数はできるだけ少なくし、短いパルスとした。この時の発信パルスの間隔は多重反射による残響の影響をなくすため、1.7 msec で行った。得られたパルス列を、水平 4K word, 垂直 8bit の性能を持つデジタル・ストレージ・オシロスコープでデジタル化し、S/N 比を向上させるため測定時間約 70sec で 256 回平均した。さらにその値をパーソナルコンピュータに転送し、ピークの判断、データの蓄積などを行った。

Fig. 2 には、受信されたパルス列の例を示す。第 1 のピークが、最初に到達したパルスを示しており、以下のピークは振動子間の多重反射によるものである。本実験では第 1 ピークに着目し、混合相を通過する場合のピーク高さの変化を測定した。

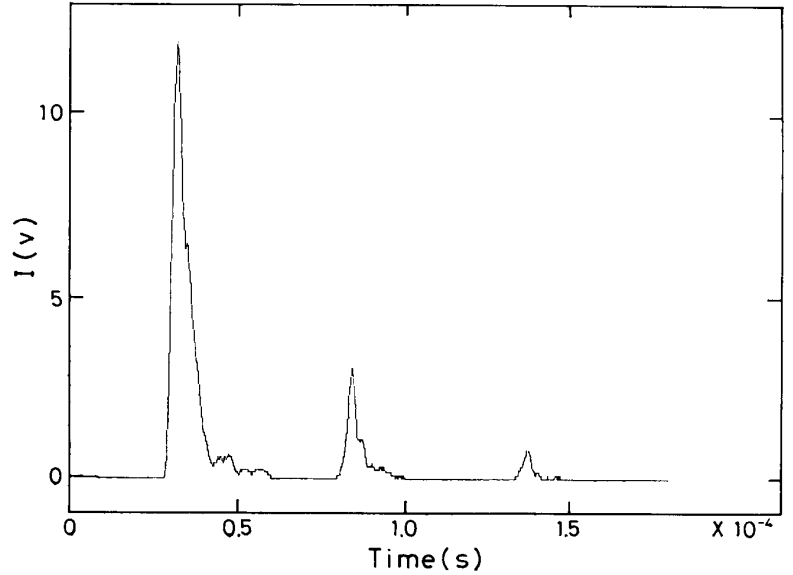


Fig. 2 Typical transmitted pulse.

2. 2. 1 気-液向流における超音波パルスの減衰

実験に先立ち、塔内ガスホールドアップとガス流量の関係を電気探針法による測定および液高さの読み取りより決定した。Fig. 3 には電気探針法によって求めた塔内ガスホールドアップ H_g とガス流量 Q_g との関係を示したが、これは液面の高さから求めた結果とも一致していた。Fig. 4 には液の流動がない場合の塔内のガス・ホールドアップと受信パルス強度の関係を示す。用いた振動子の周波数は 1 MHz である。図よりガスホールドアップの増加にともない、パルス強度は直線的に減衰することがわかる。従って、その系における音波の減衰定数を k とすれば明らかに次の関係が得られる。

$$\ln \left(\frac{I(H_g)}{I(0)} \right) = -k \cdot H_g \tag{1}$$

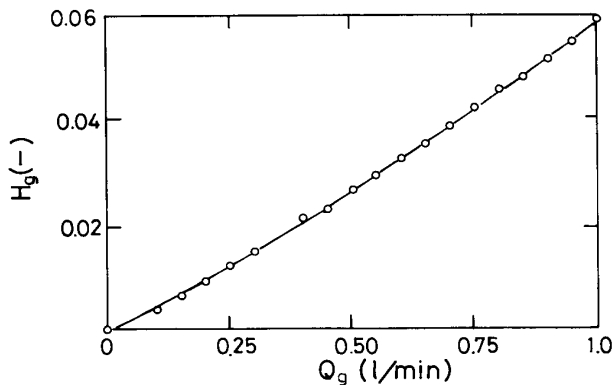


Fig. 3 Relation between gas flow rate and gas hold up obtained by electro resistivity method.

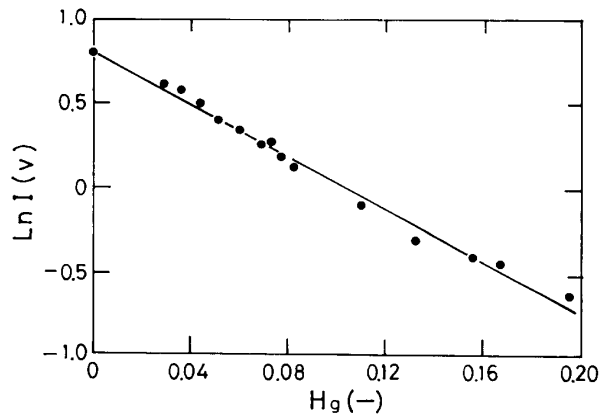


Fig. 4 Dependency of the intensity received pulses on gas hold-up in a bubble column.

ここで $I(0)$ および $I(H_g)$ はそれぞれ気泡が存在しない場合およびガスホールドアップ H_g の場合の受信パルス強度である。

次に所定流量水を循環し、液流量の増加が気液向流中の音波の減衰に与える影響を調べた。水循環中の減衰率を測定した予備実験の結果、本実験の条件下では液体の流動による音波の減衰への影響は無視できる程小さいことがわかっている。

Fig. 5 の (b) には肉眼で観察した塔内の流動形態を模式的に示す。流動形態は、ガス流量の増加とともに均一気泡領域Aから完全なスラグ流領域Dへと移行する。B, Cは遷移領域である。

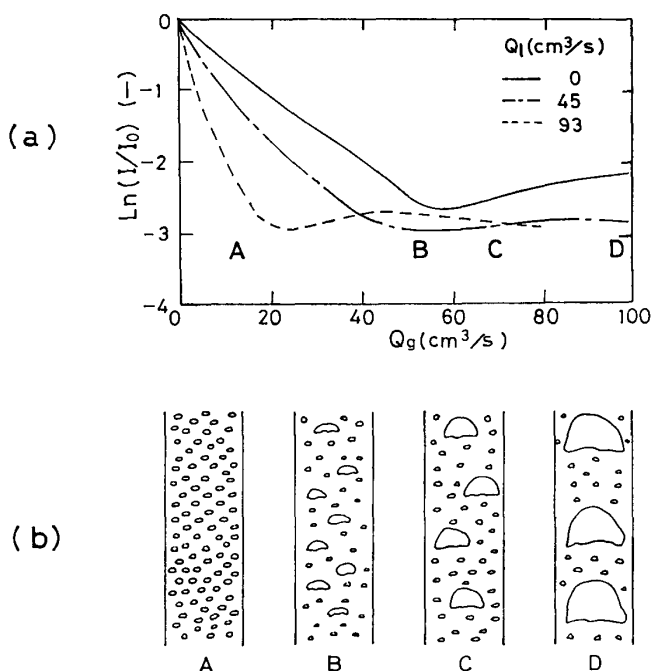


Fig. 5 Attenuation of the ultrasonic pulse in a counter current flow (a) and the observed flow pattern (b).

このような向流型反応装置において、高い反応効率を期待する場合にはできるだけ Fig. 5 の A のように、均一な気泡が細かく分散する必要がある。その意味では均一な気泡流がスラグ領域へと遷移する条件を測定することは操業上重要であり、特に、内部観察の困難な熔融金属など、高温融体中での気体の分散挙動の検出には本測定法が有効であると思われる。

2. 2. 2 固体粒子懸濁液体中の音波の減衰

次に、粒径をそろえたポリスチレンビーズを懸濁した水中での音波の減衰率を周波数を変えて測定した。その結果を Fig. 6 に示す。本実験条件のように懸濁粒子の体積分率 H_p (一) が比較的低い範囲では、いずれの場合も、体積分率と減衰率の間に直線に近い関係が得られている。1 MHz の場合は、粒径 d_p が 0.5~1.0 mm の場合が最も減衰量が多く、それ以下では減衰はするが、値は極めて小さい。

一方、5 MHz, 7 MHz では 0.15~0.3 mm の場合が最も減衰が大きくなり、それ以上の粒子径では減衰が逐次小さくなる傾向にある。この場合、水中の音速を 1466 m/s (15°C) とすると 1 MHz, 5 MHz および 7 MHz の周波数では、波長がそれぞれ、1.5, 0.3, 0.2 mm となる。このことを考慮すると、粒径に近い波長を有する音波を用いた場合に減衰が著しくなることがわかる。

このような実験より次の二つのことが示唆される。第一に、波長に関して減衰率の極値が得ら

Fig. 5 (a) には、対応する超音波の減衰曲線を示す。(a) と (b) の比較から、均一の気泡領域 A では、ガスの流量 Q_g の増加に対して、音波の透過率 $\ln(I/I_0)$ は直線的に減少することがわかる。(a) 図で液流量をさらに増加すると、減衰が止まり、逆に音波が透過しやすくなる。これらは (b) 図の B, C の形態と一致している。この領域では、気泡に遮られずに音波が通過する経路が、気泡の合体によって拡大するために、比較的音波が透過しやすくなるものと思われる。やがてスラグ流が発達する (b) 図 D の形態になると、ガス相の通過頻度の増加により再び音波は減衰することになる。

また下向きの液流量の増加にともない均一気泡流での減衰曲線勾配が次第に大きくなった。Fig. 3 からわかるとうり、これはガスホールドアップが増加していることを表しており、流動型式もより低いガス流量で遷移領域に移ることがわかる。

れる可能性があり、広い範囲の波長を用いた測定を行えばその周波数特性より粒径を測定できる可能性がある。第二には、音波の減衰の挙動を数学モデルを用いて、定量的に解析する場合は、波長と粒径との相対的な関係が重要である。このうち、波長以下の粒径測定に関しては、海水中の堆積物内を対象とした研究がいくつか行われている⁶⁾。この場合は、固体粒子が周囲の液体と共に振動を行い、共振現象が存在するが、Urlickら¹²⁾は、懸濁液中の音波の伝搬定数 k_s と懸濁媒体中の伝搬定数 k_l との間に次のような式を与えている。

$$\frac{k_s}{k_l} = \frac{[1 + (K_p/K_l - 1) H_p]}{[1 + (u - iv) H_p]}^{1/2} \quad (2)$$

ここで、

H_p : 粒子のホールドアップ, K_p, K_l : 粒子および懸媒体の圧縮率, u, v : 粒子の密度, 懸濁媒体の密度, 粘性波の振幅が $1/e$ になる厚さおよび粒子径の関数, $i: (-1)^{1/2}$ また Roxlenko¹³⁾ は二つの周波数を用いて、吸収係数からエマルジョンの平均粒径を測定する方法を開発している。これらは粒径が小さく濃度範囲が高い方に限られており、本実験のような固体粒子の濃度範囲および粒径の場合はそのまま適用できないと考えられる。

一方、固体粒子の粒径が増大すると、固-液界面での反射・透過などを解析する多体間の問題となるが、これについてのモデルはきわめて複雑なものとなるため、現在ほとんど取り扱われていない。

2. 2. 3 気泡および固体粒子を懸濁した液体中での音波の減衰

ポリスチレンを懸濁した液体中に気泡を分散し、気-固-液の混相向流中での音波の挙動を調べた。Fig. 7 には、粒子の濃度とガス流量が減衰率に及ぼす影響を示す。この場合、用いた振動子の周波数は 7 MHz, 粒子径は、0.5~1.0 mm, 液体の流量は 95 cm³/s である。一定の体積分率の粒子を含む懸濁液中でも、ガスの流量が比較的小さい領域では、ガス流量増加に対して減衰率が直線的に増大し、固体粒子のホールドアップを変えてもその勾配はほぼ等しいことがわかる。

一方、ガス流量 Q_g を一定にすれば、粒子の体積分率の増加とともに減衰率が直線的に増加するといえる。

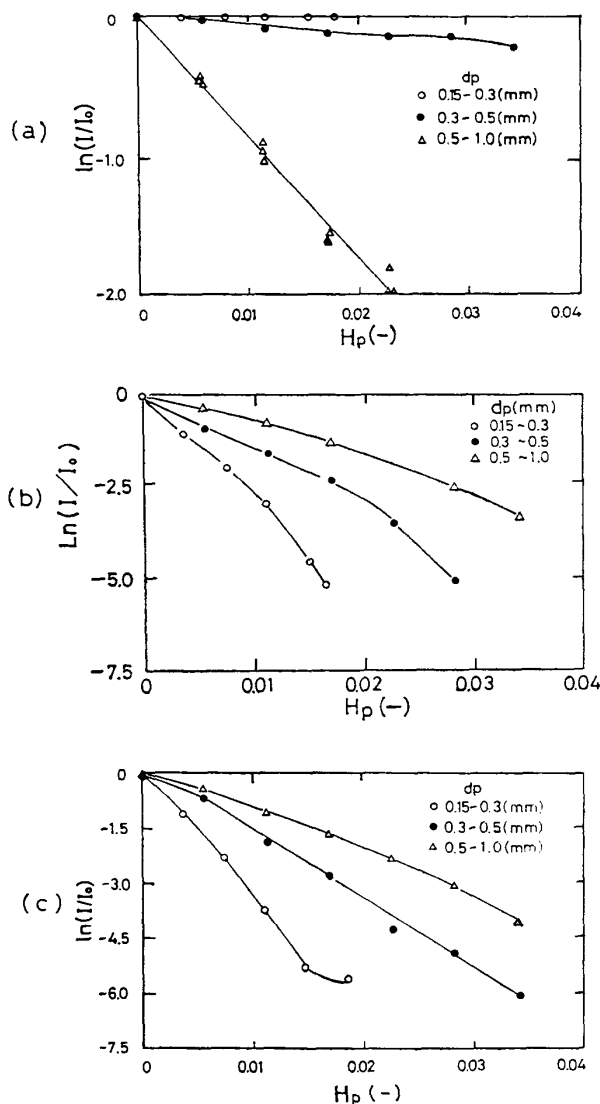


Fig. 6 Effect of the size and hold up of solid particle on the attenuation with the carrier frequency of (a) 1 MHz, (b) 5 MHz and (c) 7 MHz.

12) Urlick, R. J.; Ament, W. S.: J. Acoust. Soc. Am., 21 (1949), 115.

13) Roxlenko, A. A.: Измер. Техн. No. 6, (1986), 60.

このことより、固体粒子と気泡による減衰に
加成性が成立することが明らかになる。そこ
で、 k_g, k_p をそれぞれ、ガスおよび固体粒子
の減衰定数とすれば、懸濁液中のガス及び固
体粒子の関与する減衰は、それぞれ

$$k^*_g = k_g \cdot H_g \quad (3)$$

$$k^*_p = k_p \cdot H_p \quad (4)$$

$$k^* = k^*_g + k^*_p \quad (5)$$

となり、透過率は(6)式で表わされる。

$$\ln(I/I_0) = k^* \quad (6)$$

いくつかの実験より、最小自乗法を用いてこ
の k_g, k_p を決めた。

Fig. 8 は、本実験で得られた k_g, k_p より、
液流量 Q_l が $95 \text{ cm}^3/\text{s}$ 、固体粒子のホールドア
ップ H_p が 0.023 の場合の減衰率を計算し、実
測値と比較した図である。気泡が均一分散して
いる領域では、明らかに実験値をよく表現して
いることがわかる。

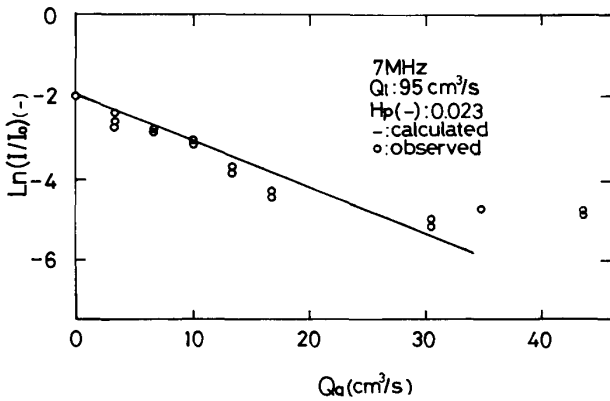


Fig. 8 Comparison between calculated and observed values.

次に、混相流の流動形態に及ぼす固体粒子の
影響を Fig. 9 に示す。気液二相流の場合と同
様、均一分散気泡領域、流領域、そして気泡流
からスラグ流領域の遷移領域が区別できる。ま
た、図より、液流量が $70 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合におい
て、遷移が始まる点での k^*_g を求めると、それ
ぞれほぼ (a) 2.5, (b) 3.0, (c) 4.0 となる。こ
れは粒子のホールドアップ H_p が増大すると、

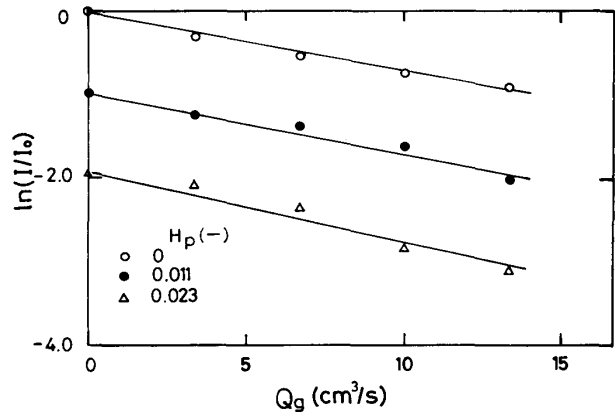


Fig. 7 Effect of the solid beads hold-up and gas flow rate on the attenuation at $95 \text{ cm}^3/\text{s}$ liquid flow rate with 7 MHz carrier frequency.

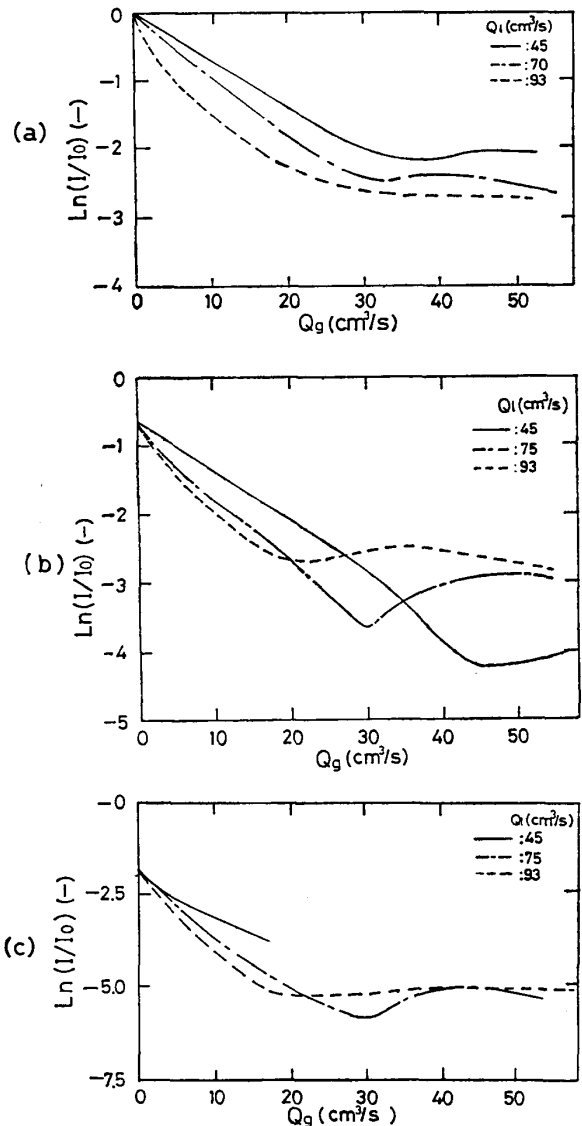


Fig. 9 Attenuation of the ultrasonic pulse in a three phase flow system at solid beads hold-up (a) 0, (b) 0.011 and (c) 0.023.

均一気泡領域が、より高いガスホールドアップまで安定であることを表わしている。これは、固体粒子の存在により、気泡の運動が妨げられ、気泡どうしが合体しにくくなったものと考えられる。

このように超音波パルス透過法を用いることにより、気-液-固混相流の流動形態が変化する操作条件を測定することができることが明らかになった。

2. 2. 4 Monte Carlo 法による気泡領域における減衰率の計算

実際の混合相を測定する場合には、予め各々の混合相について音波の減衰特性を得ることが困難な場合が多く、既知の物性定数より混合相内での音波の減衰が計算できる数学モデルの開発が必要である。ここでは多相系への拡張の可能性を考慮し、Changら¹⁴⁾が適用した Monte Carlo 法を用いて気泡の均一分散領域を超音波が通過するときの減衰率を計算した。

Fig. 10 に計算のフローチャートを示す。気泡領域を挟んで平行に設置した半径 R_u の振動子の送信子上に、ある点 U_i をランダムに設定し、ここから受信子に向けて超音波ビームが発射される。このビームがランダムに設定された気泡群 C_i のどれかに衝突すればそこでそのビームは消滅し、つぎのビームの発生に移る。もし衝突がなければビームは受信子まで到達し、到達数 I が加算される。このとき、発生した全ビーム数を M とすれば、気泡の体積分率は $1 - (I/M)$ で表される。

このモデルでは気液界面でビームが消滅するとしている。実際、気体と液体とでは音響インピーダンスが大きく異なるため、音波が気泡内部に潜り込むことはないといえる。また、気泡表面での反射を繰り返して受信子に到達することも無視できると考えた。

Fig. 11 に計算結果の例を示した。この計算での発生ビーム数は2000、外側のループの繰り返し回数は1000である。気泡径については、予め写真撮影法から得られた実験式を用いた。図中の実線は計算値を最小自乗法で整理した結果である。

Fig. 12 には減衰率の実測値と計算値との比較を示した。図中の実線は入力する気泡径 (Fig. 10 中の R_b) を写真撮影

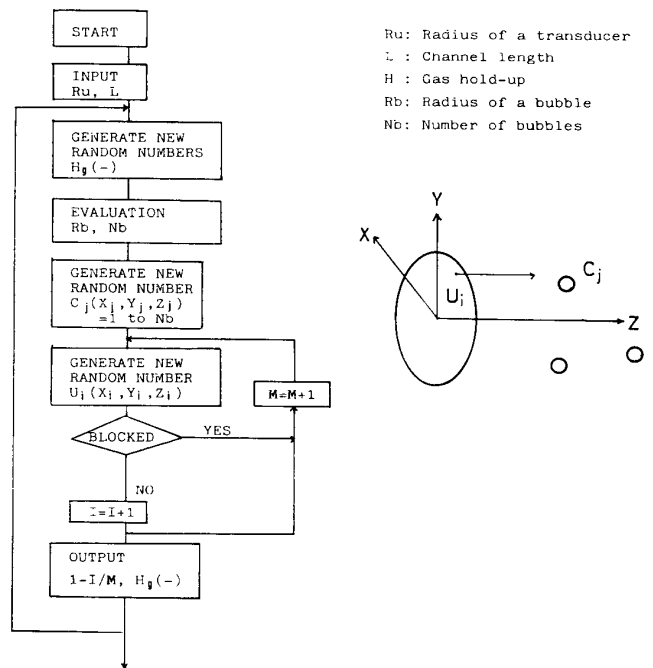


Fig. 10 Flow chart of Monte Carlo method.

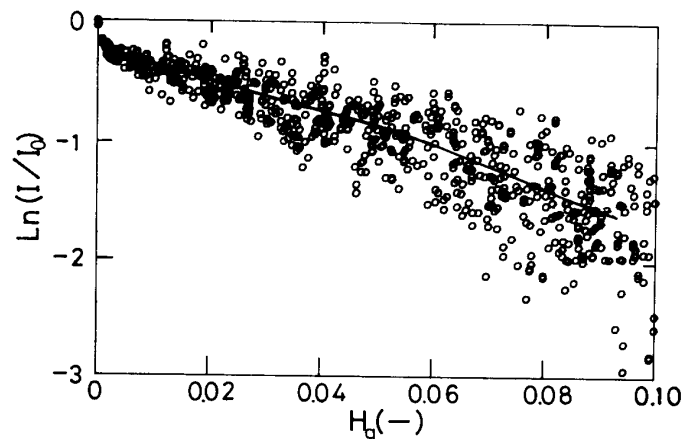


Fig. 11 Calculation of the attenuation with Monte Carlo method and its least square curve.

14) Chang, J. S.; Ichikawa, Y.; Irons, G. A.; Morala, E. C.; Wan, P. T.: IUTAM Symposium, Nancy, France, (1983), 319.

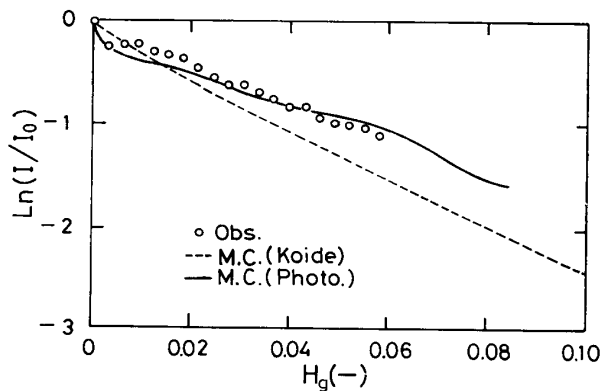


Fig. 12 Dependency of the intensity of received pulses on gas hold-up in the bubble column and its calculated curve with Monte Carlo method.

大きいため、気泡径を正しく評価する必要がある。実際には気泡径が推定できない場合が多く、気泡径を独立に測定する必要がある。山本ら¹⁶⁾は 500 KHz までの低い周波数の音波を用いて気泡の固有振動数から気泡直径相当径を求め、単一ノズルから発生する気泡相当径を決めているが、この方法が気泡群にも適用できることが明らかにされてきている¹⁷⁾。

3. 液体中の気体ジェットおよび分散気泡の検出

吹き込み精錬においては、融体中に吹き込まれた気体ジェットや気泡の分散挙動を測定することは重要である。しかし、それに関する研究は、水モデルによるシミュレーションの実験が主体であり、実験的困難性から水銀などの液体金属を用いたものは少ない^{18)~20)}。

この様な観点から、ここでは、超音波パルス透過法および反射法により液体中の気体ジェットおよび気泡の分散挙動を観察した。

3. 1 気体吹き込みのための実験装置

測定には透過法と反射法のそれぞれ別の装置を用いた。Fig. 13 には透過法に用いた装置の概略を示す。実験は水一窒素系および水銀一窒素系で行った。200×200×400 mm のアクリル槽底部中央に設置した孔径 1 mm の単一オリフィスから窒素を液体中に吹き込む。気泡分散領域を挟んで一对の PZT 振動子を平行に置き、これを移動してオリフィスの軸方向および半径方向の受信パルスの強度分布を測定した。測定系は 2.1 と同じである。

一方、反射法には Fig. 14 に示す装置と、医療用の超音波診断装置 (Aloka SSD-203) を用いた。アクリルの蓋のついた 150×150×600 mm のステンレス槽の側壁から診断装置のプローブを挿入した。用いた周波数は 3.5 MHz、装置のゲインは最大 70 dB である。この装置を用いて各種の実験条件下で液体中に吹き込まれた気体ジェットおよび気泡の様子を VTR に記録した。

3. 2 実験結果および考察

3. 2. 1 パルス透過法を用いた測定

Fig. 15 (a), (b) には、水一窒素系を用いた場合の半径方向 r の超音波パルス強度 I の分布に

より求めた場合、破線は小出ら¹⁵⁾によって求められた以下のような実験式より求めた気泡径を R_b に用いた場合である。

$$d_v(g\rho_l/\delta\sigma_1)^{1/3} = 1.65(Fr/We^{0.5})^{0.160} \quad (7)$$

ここで d_v : 気泡径, δ : 分散板の気孔径, ρ , σ : 水の密度, 表面張力, Fr : フルード数, We : ウェーバー数, g : 重力加速度である。

図から明らかのように、気泡径に写真撮影より求めた実測値を適用した場合の減衰率の計算結果は実測値とよく一致する。しかしこの方法では気泡径が計算結果に及ぼす影響が

15) 小出耕造, 平原照晏, 久保田宏: J. Chem. Eng. Japan, 1 (1968), 51.

16) 山本芳太郎, 中川克巳: 化工論, 5 (1979), 374.

17) 中川克巳: 化工論, 13 (1987), 399.

18) 森 一美, 佐野正道, 小沢泰久, 牧野浩: 鉄と鋼, 69 (1983), S 238.

19) 小沢泰久, 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), 2655.

20) Nilmani, M.; Robertson, D. G. C.: Inst. of Mining and Met. Trans. C, 89 (1980), 42.

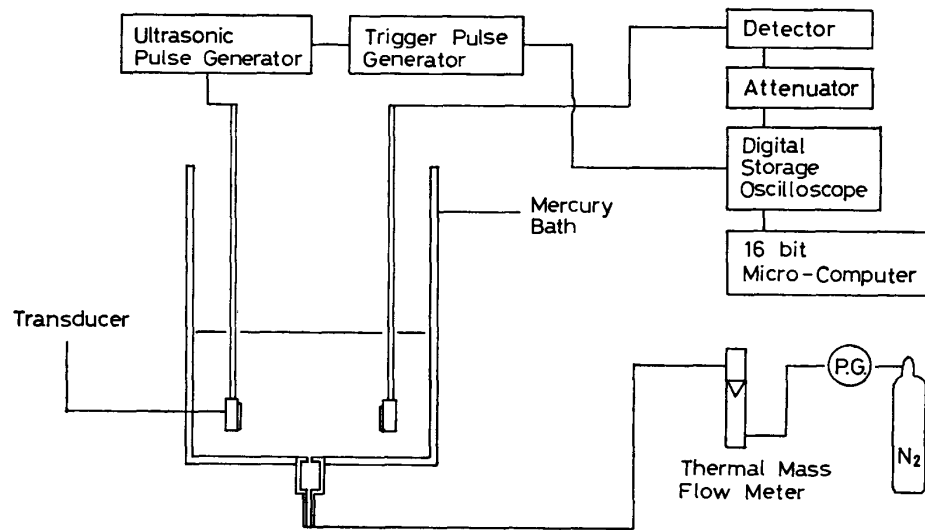


Fig. 13 Schematic diagram of the apparatus with a pair of transducers.

及ぼすガス流量の影響を示す。振動子の中心のオリフィスからの高さは (a) 10 mm, (b) 20 mm である。

図より以下のことが明らかになった。即ち、ガス流量が $150 \text{ cm}^3/\text{s}$ までは流量の増加とともに音波の減衰する領域が半径方向に広がっている。 $250 \text{ cm}^3/\text{s}$ を越えると減衰の領域は再び縮小し減衰率も小さくなる。特にオリフィス直上ではこの傾向が著しい。これは、ガス流量 $250 \text{ cm}^3/\text{s}$

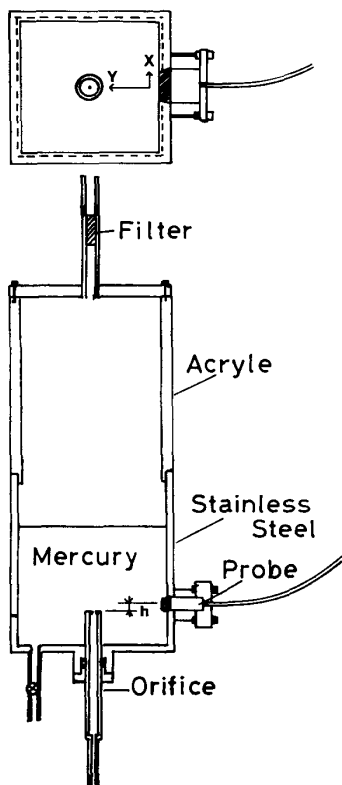


Fig. 14 Schematic diagram of the apparatus with linear scanning probes.

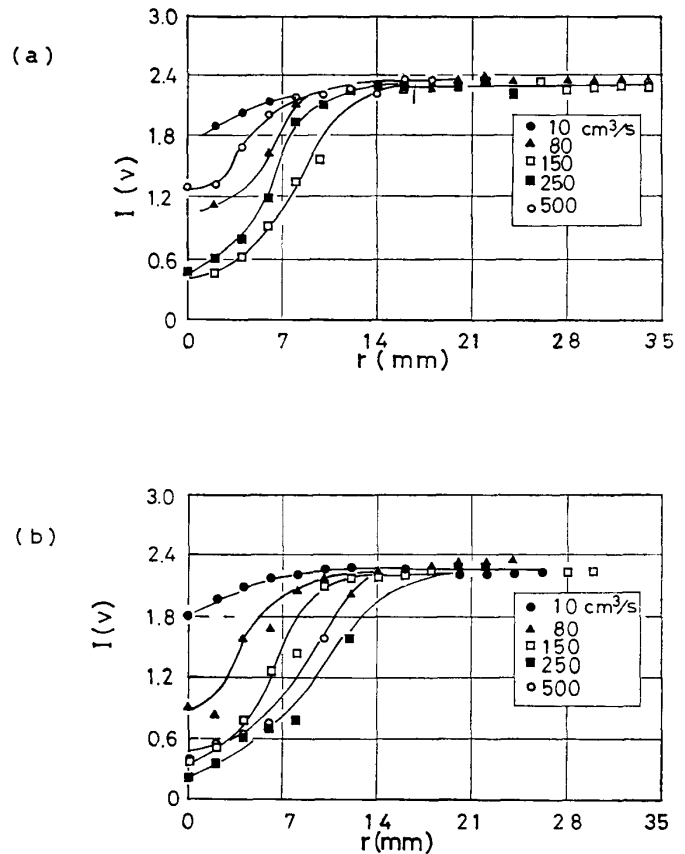


Fig. 15 Distributions of the intensity of received pulses at 10 mm (a) and 20 mm (b) axial distance, in water.

以上では吹き込まれたガスがオリフィス先端で細いジェットを形成しており、パルスの通過する面積が増大することによるものである。そして、 $150 \text{ cm}^3/\text{s}$ 以下では気泡領域、 $150\text{--}250 \text{ cm}^3/\text{s}$ では気泡からジェットへの遷移領域とみなすことができる。

一方、水銀中にガスを吹き込んだ場合のパルス強度を Fig. 16 に示す。この場合の振動子中心の高さは 10 mm である。ただし、図中、ガス流量が小さい 3 および $10 \text{ cm}^3/\text{s}$ の場合はそれ以上のガス流量の場合より出力パルスを下げて測定している。Fig. 16 を Fig. 15(a) と比較すると、

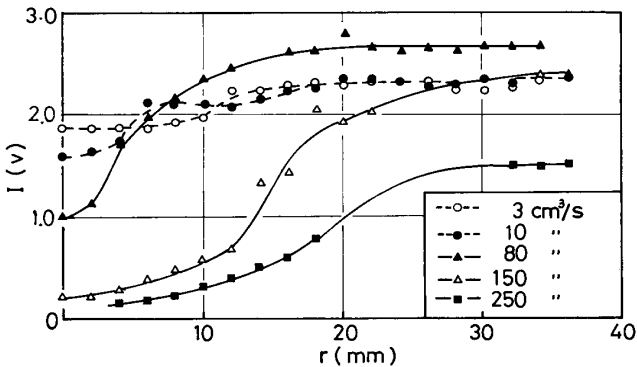


Fig. 16 Dependency of the intensity of received pulses on gas flow rate at 10 mm axial distance in mercury.

水銀の場合は水とは異なった分布をとる事がわかる。水銀の場合はガス流量が $150 \text{ cm}^3/\text{s}$ を越えるとパルス強度の大きく低下する領域が急激に半径方向に拡大している。これは吹き込まれたガスがオリフィス直上で急激に膨張していることを示している。また、周辺部でもガス相が検出された。

3. 2. 2 反射法を用いた観察結果

水中に気泡が存在する場合、プローブ上の一点から発射された超音波ビームが球形の気-液界面で全反射すると仮定して、その反射像を幾何学的に計算することができる。

Fig. 17 にその結果を示すが、この場合、発射されるビームが球の中心から少しずれていると、球との衝突地点で法線に対象に反射されることになり、反射ビームがプローブ上に到達するのは発射地点より外側の位置になる。この分だけ音波は遅れて到達し、あたかも球の表面が遠く、そして外に広がっているように見え、またビームの強度も小さくなる。したがって、球の反射像は Fig. 17 に示したような中心部分が明るい円弧状になる。

実際に、鋼球（直径 3 mm ）を水中に吊しその反射像をしらべると Photo. 1 の様になる。この場合は、鋼球内部に音波が透過するため、表面での反射像の他に内部で多重反射による像が繰り返されている。Photo. 2 に水中に吹き込んだ気体ジェットの反射像を示す。この像は気-液界面の位置を示していることになり、これからガス相の広がりや推定できる。水の場合、後述する水銀の場合と異なり、明確な界面がみられず、雲状のぼやけた像が見える。これは界面での気-液両相の激しい混合で形成される複雑な界面や、生成される微少な気泡で音波が反射されるため、それらが重なって雲状の反射像になるものと思われる。また、中央に比較的明るい部分が見

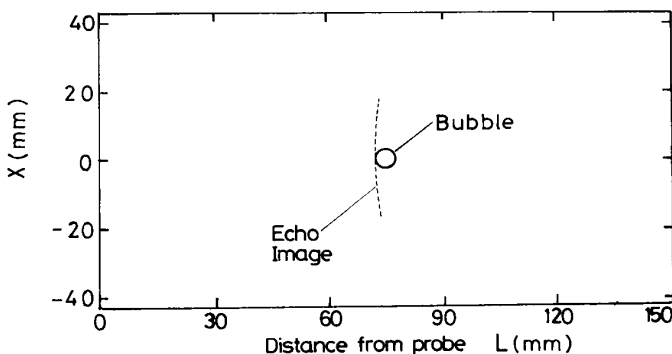


Fig. 17 Echo image of a spherical gas bubble calculated geometrically (5 mm dia.).

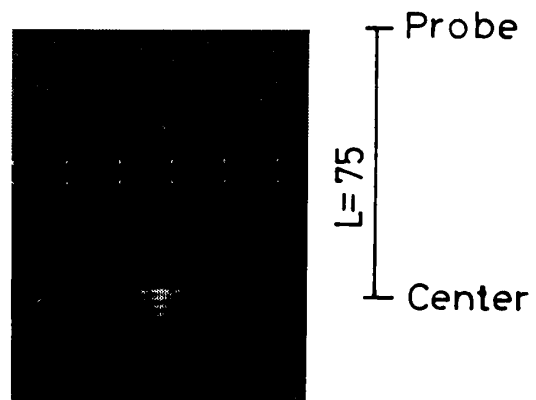


Photo. 1 Echo images of a 3 mm dia. steel ball in water.

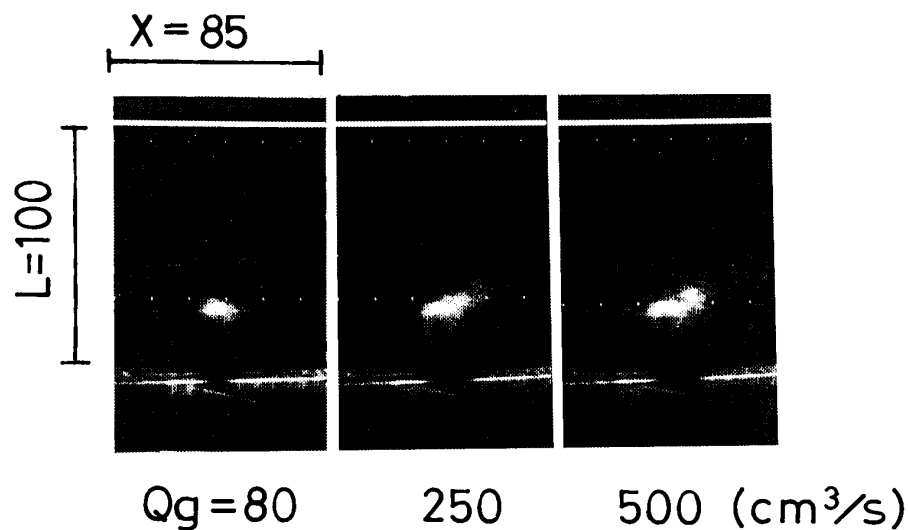


Photo. 2 Echo images of gas jets in water (1 mm dia. orifice).

えるが，ここはガス相のみが存在する領域である．更に，像は対象でなく，ガス流量の増加と共に気-液混合相の領域が拡大しており，ときどき中心付近から小気泡の様なものが吹き出されるのが観察された．これは操業上ノズルの侵食などの原因となる，いわゆる底叩き現象に対応しているものと思われる．

Photo. 3 には水銀中における気体ジェットからの反射像をオリフィスからの高さを変えて示す．写真には数個の弧状の像が重なって見えるが，これはシャッターが開いている間に CRT 上の20フレームが写っているのであり，VTR を静止して観察すると，各フレームごとには一つの弧状の像が見える．この場合は Fig. 17 で示したような明確な気-液界面が存在していると推定できる．

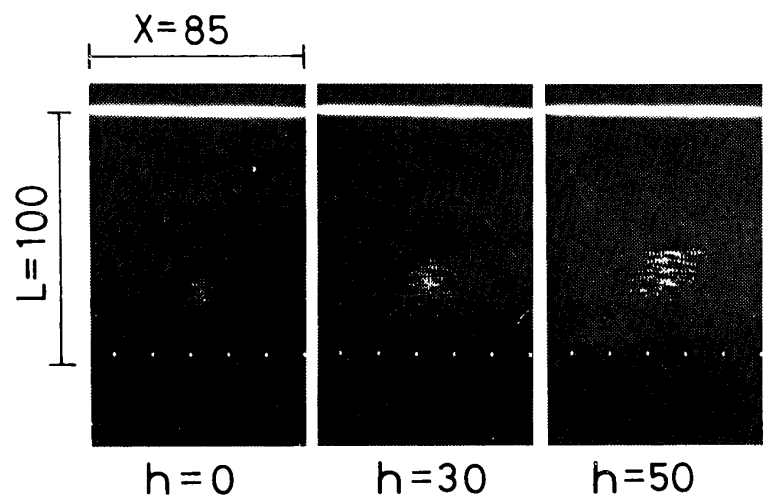


Photo. 3 Echo images of jets in mercury (1mm dia. orifice).

つぎに，VTR 上で気-液混合相のオリフィス半径方向への広がりを観察した．Fig. 18 にその結果を示す．図中 (a) は水-窒素系，(b) および (c) は水銀-窒素系である．また，(a) には発泡スチロールチップ，(b) にはアクリルハニカムを液面上に浮かべて浴の振動を抑えるようにしてあり，(c) のみが自由表面である．この場合には，水銀浴全体が振動し，回転することが観察された．(b) と比較すると，(c) の場合は気-液混合相は半径方向に広がったように観察されるが，これは浴の回転のために気泡の存在領域が拡大した見掛け上の現象であると結論された．又，このときの回転周波数は約 2.2 Hz であることも分かった．これは，水銀浴表面近くで著しい．もし，この液体の運動がなければ (a) および (b) のように水および水銀の両方ともガス相の広がり角がほぼ 20° になる．これは Themelis ら²¹⁾ の結果とよく一致し

21) Themelis, N. J.; Trassoff, P.; Szekely, J.: Trans. Met. Soc. AIME, 245 (1969), 2425.

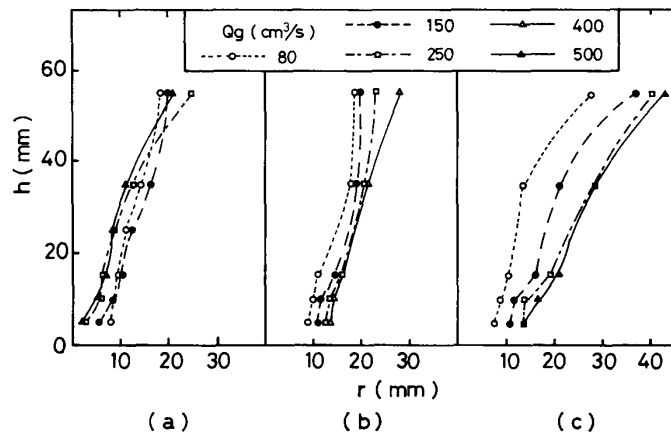


Fig.18 Distribution of the boundary between gas-liquid region in water (a) and mercury (b)-(c).

ている。水銀の場合は吹き込まれたガスがオリフィス直上で急激に膨張していることがわかる。水の場合はガス流量が $150 \sim 250 \text{ cm}^3/\text{s}$ に気泡からジェットへの遷移領域が見られ、水銀の場合はこの領域が $500 \text{ cm}^3/\text{s}$ を起えてより高いガス流量で現われることがある。これは 3. 2. 1 で述べた透過法の結果と一致する。

4. 結 論

以上のような検討より、超音波パルス法を多相系に適用することによって、混合相内の各々の分散相の体積分率が測定でき、またそれらの存在形態が推定できることが明らかになった。本報告のようなリニア・スキャニング・プローブを用いれば融体中の異相がリアルタイムでしかも三次元的観察が可能になる。この様な方法を高温融体に適用すれば、反応過程にある分散相の検出に対し極めて有効であると思われる。

最後に、本研究を進めるに当たり、日本鉄鋼協会昭和59年度石原浅田研究助成金を受け、また本研究の一部が文部省科学研究費（昭和61年度奨励(A) 61750681）によって行われたものであることを記して謝意を表す。