九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

# 垂直管内気泡流中を伝播する圧力波の特性

宮里，義昭
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

半田，太郎
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

岡，浩史
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

小林，正徳
九州大学大学院総合理工学研究科エネルギー変換工学専攻

他

https://doi.org/10.15017/17429

出版情報：九州大学大学院総合理工学報告. 19 (1), pp.35-41, 1997-06-01. 九州大学大学院総合理工学研究科
バージョン：
権利関係：

九州大学大学院総合理工学研究科報告
第19巻 第1号 35－41頁 平成9年6月

Engineering Sciences Reports, Kyushu University
(KYUSHU DAIGAKU SOGORIKOGAKU KENKYUKA HOKOKU)
Vol. 19, No. 1 pp. 35－41 JUNE 1997

# 垂直管内気泡流中を伝播する圧力波の特性
## (圧力波計測装置の試作とその基礎実験)

宮里義昭*・半田太郎*・岡　浩史**
小林正徳**・青木俊之*・松尾一泰*

(平成9年2月28日　受理)

# Characteristics of Pressure Wave Propagation through Bubbly Flow in a Vertical Pipe
## (Performance of Experimental Instrument and Fundamental Experiments)

Yoshiaki MIYAZATO, Taro HANDA, Hiroshi OKA,
Masanori KOBAYASHI, Toshiyuki AOKI and Kazuyasu MATSUO

To study the characteristics of the pressure wave propagation through bubbly flow in a pipe, a vertical shock tube has been manufactured and fundamental experiments have been performed. A comparison of the present experimental data with the theoretical model reported in the past with respect to the pressure reflection and transmission coefficients for a normal shock wave refracting at an air/bubbled liquid interface is carried out. Also, a simple relation for the prediction of the propagation velocity of pressure wave in bubbly flow taken into account the elasticy of the confining walls is presented. It is concluded from a comparison of present experimental results with the prediction presented that the prediction is in very good agreement with the experimental data and in case of the void fraction lower than about 0.1%, the propagation velocity becomes significantly lower than that of theoretical prediction without considering the effect of the pipe elasticy reported in the past.

## 1. まえがき

気泡流中を伝播する圧力波の伝播速度[1)2)]や距離減衰[3)]等の特性を調べることは，水中音響[4)]や水撃現象[5)6)]の観点から重要である．また，圧力波の伝播速度は，水冷却原子炉や化学プラント等の配管系の破断事故の際の臨界流現象[7)]やフラッシュ蒸発を伴う圧縮液の臨界流量[8)]と密接に関わっているため，従来よりかなり多くの研究が行われている．

一般に，気泡流中の圧力波の伝播速度は，水中のときと比べて極端に低い[1)2)]ことがよく知られている．一方，水中を伝わる圧力波の伝播速度[9)]は，例えば0℃，一気圧のとき約1500m/s であり，気泡流中の音速よりかなり大きいが，弾性管内の水中を伝わる圧力波の伝播速度は，かなり小さいことがいくつか報告[3)6)10)]されている．従って，管内の気泡流中を伝わる圧力波の伝播特性は，管の弾性の影響を受けることが十分予測される．

本研究では，管内気泡流中の圧力波の特性を調べるため，実験装置を試作し基礎実験を行った．本論文では，気液界面での気体入射衝撃波の反射と透過を調べるとともに，管の弾性を考慮した管内気泡流中の圧力波の伝播速度についての解析を行ない，実験結果と比較検討した．

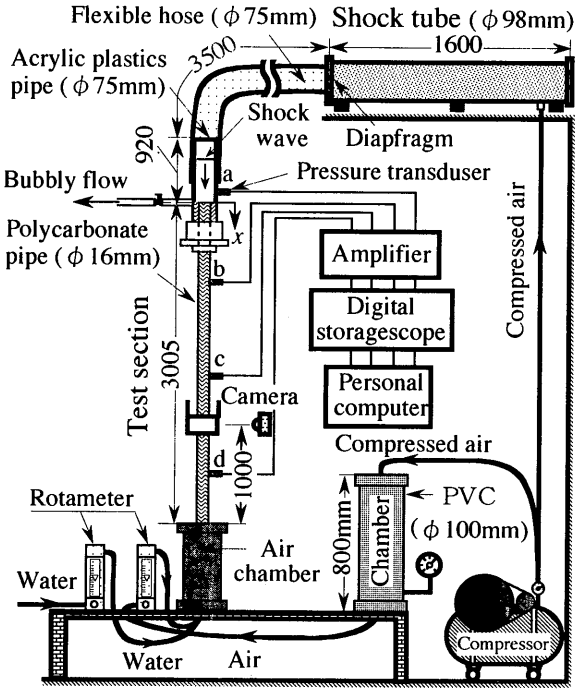



**Fig. 1**　Schematic sketch of experimental set up

*エネルギー変換工学専攻
**エネルギー変換工学専攻修士課程

## 2. 実験装置と方法

### 2.1 実験装置の概要

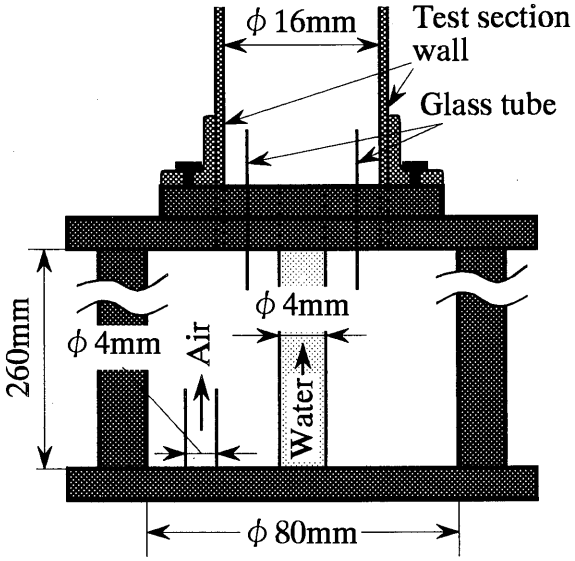
実験装置の概要を **Fig. 1** に示す．**Fig. 1** の上部に示す衝撃波管（内径98mm，長さ1600mmのステンレス製）の左端に示す隔膜を，圧縮機（㈱日立製作所製，0.2OP-5S型）からの高圧空気によって破膜させる方法によって発生した入射衝撃波は，内径75mm，長さ3500mmのフレキシブルホース，内径75mm，長さ920mmのアクリル管を通過し，気液界面に衝突する．気液界面に衝突した入射衝撃波は，測定部内を鉛直下向きに伝播する圧力波と，鉛直上向きに伝播する圧力波（反射衝撃波）に分かれる．

測定部には，外径18mm，内径16mm，長さ3005mmの透明ポリカーボネートパイプを使用した．**Fig. 1** の下に示すように，バルブ付き浮遊式流量計（㈱日本特殊計器製作所製，SCJ2-S305-11型）を通った水は空気室を通り，空気室の上面中心（測定部の底面中心）に開けた直径4mmの孔を通って測定部に流れる．さらに圧縮機を使って内径100mm，長さ800mmのよどみ室に蓄えられた圧縮空気は，バルブ付き浮遊式流量計（㈱日本特殊計器製作所製，SC2-S305-11型，入口圧力3.0kg/cm²G）を通って空気室に入り，空気室内に設けた外径0.5mm，内径0.13mmのガラス管を通して測定部に入る．ボイド率は，測定部底面から1000mm上方に位置するレンズ効果を除去するためのアクリル製の水槽[11]を通して，気泡分布を写真撮影することで求めた．

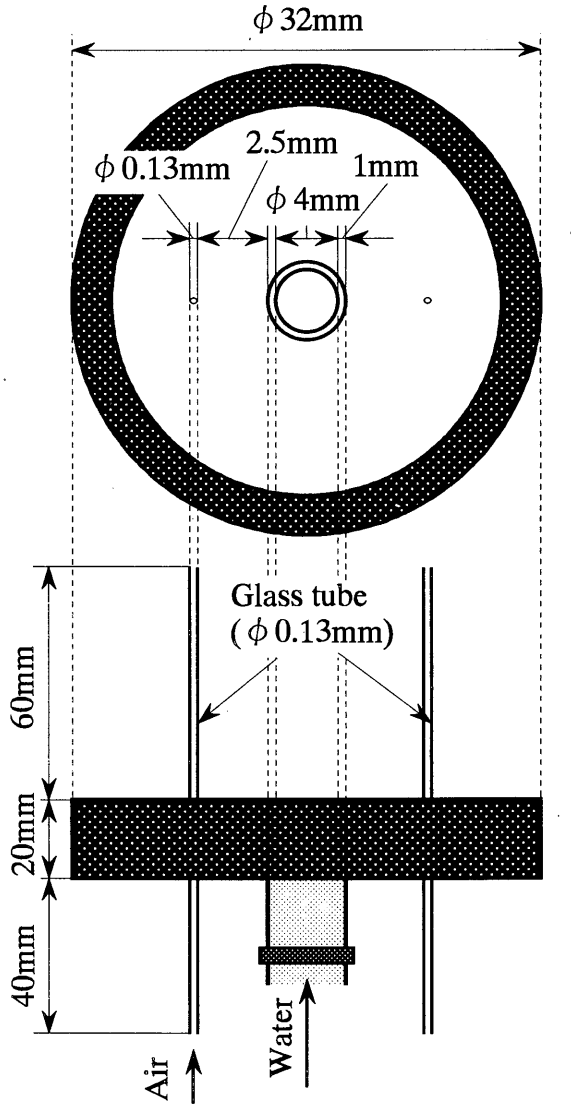
気液界面を原点($x=0$)とし，その位置から鉛直下向きを$x$の正座標とすると，圧力測定位置は，$x=$-150mm(測定点 a)，580mm(測定点 b)，1580mm(測定点 c)，2580mm(測定点 d)の四箇所であり，半導体圧力センサー（キュライト社製，XTM-190-100D型）により行なった．圧力センサーからの信号は直流増幅器を通した後，ディジタルストレージスコープ（岩崎通信㈱社製，DS9121型）に送られ，パーソナルコンピューターで解析される．

### 2.2 気泡発生装置

気泡発生装置の概要を**Fig. 2** に示す．**Fig. 2(a)** に示すように，測定部の下の空気室は，内径80mm，高さ260mmである．空気室の底面から空気室の上面（測定部底面）の間を内径4mmのチューブで接続しており，水は，そのチューブを通して測定部内に送られる．また，空気室の下から内径4mmのチューブを通して空気室内に圧縮空気が送られる．**Fig. 2 (b)** に示すように，空気室内の圧縮空気は，外形0.5mm，内径0.13mm，長さ120mmのガラス管内を通って測定部内に流入する．予備実験の段階で水の体積流量 $\dot{Q}_l$ を約180cc/min の一定値にすると，ほぼ定常な気泡流が得られたため，




(a) Geometry of air chamber




(b) Details of bubble generator

**Fig. 2**　Structure of air chamber

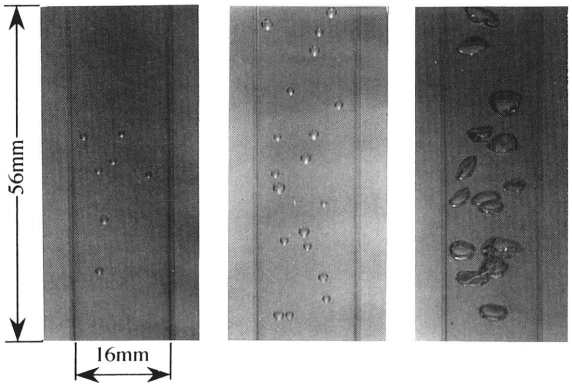
本実験では，水の体積流量を180cc/min の一定値とし，空気流量を調節することによって測定部内のボイド率を変化させた．測定部内の気泡分布は，ガラス管の本数を変化させることによって調節した．ただし，3章の実験結果は，ガラス管の本数が1本のときの結果である．

### 2.3 実 験 条 件

衝撃波管の隔膜は厚さ約0.5mmのコート紙を使用しており，膜の枚数を変えることで気泡流中に入射する衝撃波の強さを変化させた．**Fig. 1** の点 a で示すように，測定部の上部のアクリル管に半導体圧力センサーが設けられており，そのセンサーによる圧力波形から衝撃波管を伝播してきた入射衝撃波のマッハ数 $M_s$ を求め，実験のパラメータとした．本実験の $M_s$ の範囲は，約1.06～1.16である．この $M_s$ に対する入射衝撃波前方の圧力 $p_0$（ほぼ大気圧）と後方の圧力 $p_1$ の圧力差 $p_1$-$p_0$ は，約14.6 kPa～40.8kPa の範囲である．

ボイド率の測定は，**Fig. 1** に示すように，測定部底面から約1000mmの位置で写真撮影を数回行い，その平均値をとることによって求めた[12]．代表的な気泡分布を **Fig. 3** に示す．また参考のため，空気の体積流量に対する $\alpha$ の変化を○印で **Fig. 4** に示す．ただし，一つのボイド分布に対して数枚写真撮影しているため，○印の実験値は，誤差範囲も示している．

**Fig. 3** (**a**) は，ボイド率 $\alpha$=0.02%の場合であり，測定部内にほぼ同じ大きさの球形の気泡がまばらに分布している．$\alpha$=0.2%の場合には，**Fig. 3** (**b**) に示すように，気泡の数が **Fig. 3** (**a**) の場合より多いことがわかる．また気泡の大きさは **Fig. 3** (**a**) の場合よりわずかに大きい．$\alpha$=6.0%になると，**Fig. 3**(**c**) に見られるように気泡が変形し，ときには気泡同士が合体する場合も見られた．このような気泡の分布は，$\alpha$ が約2.0%以上で観察された．一般に，圧力波の伝播特性はボイド率が同じ場合でも二相流の流動様式によって大きく異なる[13]ため，以下の考察は $\alpha$ が約2.0%以下の場合について行う．




(a) $\alpha$ = 0.02[%]　(b) $\alpha$ = 0.2[%]　(c) $\alpha$ = 6.0[%]

**Fig. 3**　Distribution of bubbles in the test section

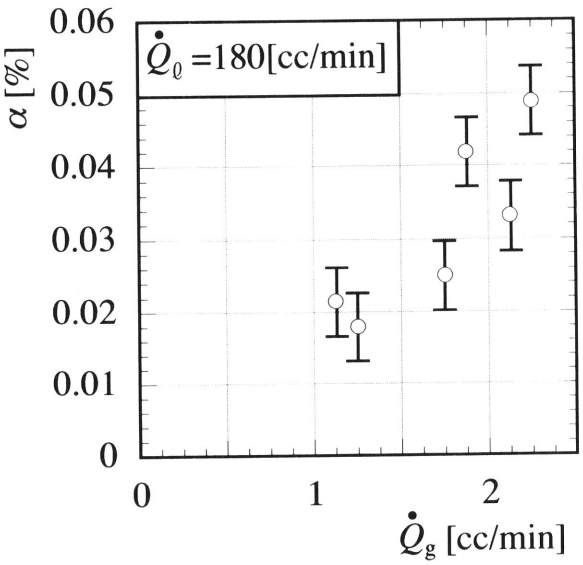



**Fig. 4**　Relationship between bubble volume flow rate and void fraction

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 入射波及び気泡流中の圧力波

ボイド率 $\alpha$=0.02%，入射衝撃波マッハ数 $M_s$=1.06の場合の測定点 a-d で測定した圧力波の時間履歴の一例を **Fig. 5** に示す．点 a で測定した圧力は，

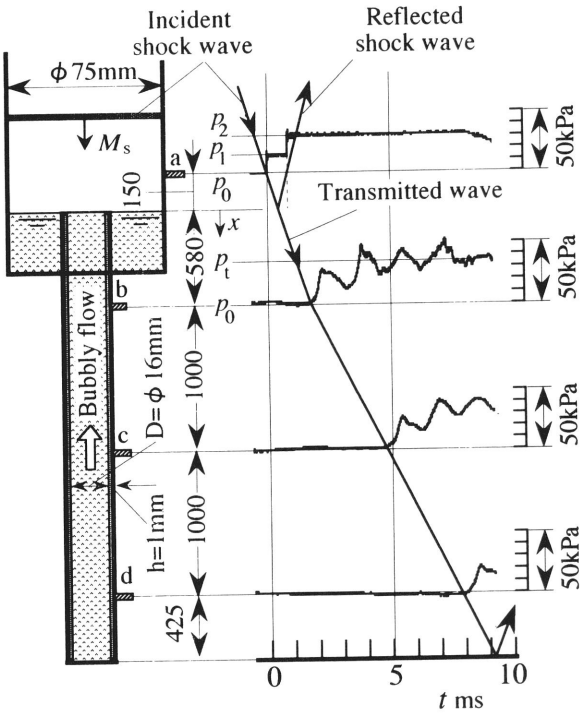
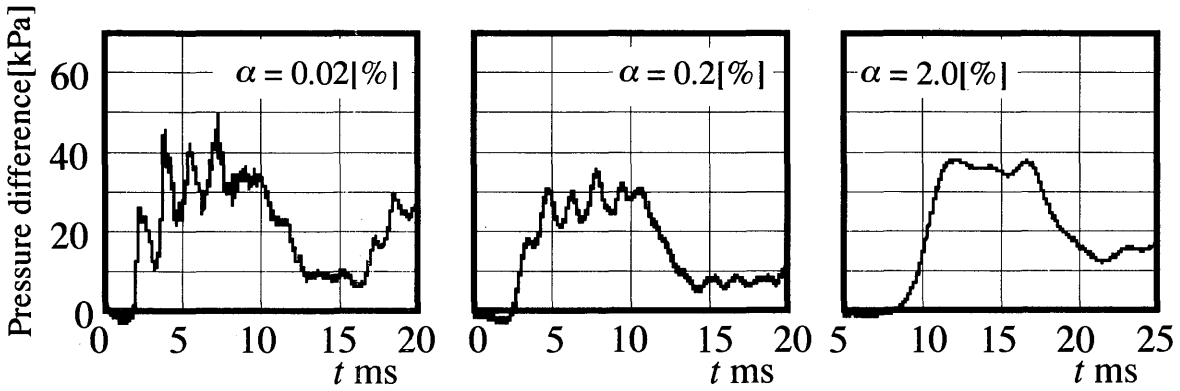
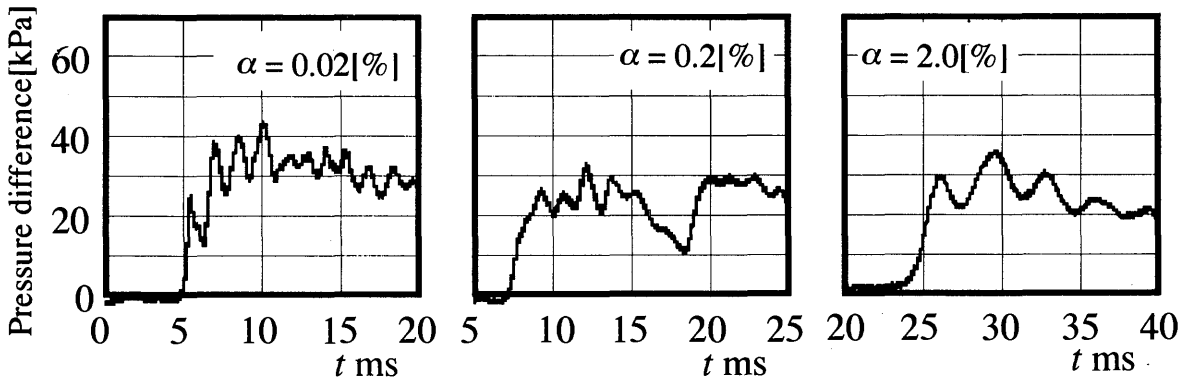


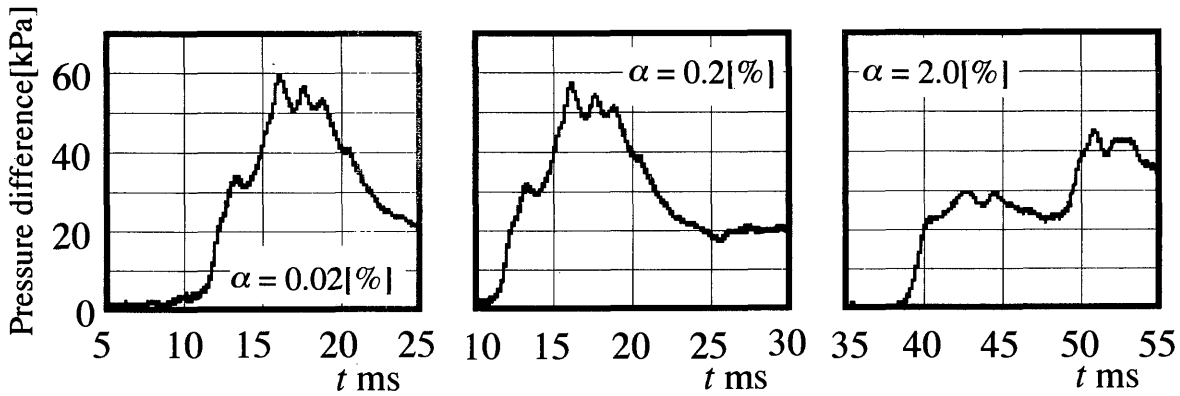

**Fig. 5**　Typical pressure records ($M_s$=1.06, $\alpha$=0.02%)




(a) Pressure record typical at point b




(b) Pressure record typical at point c

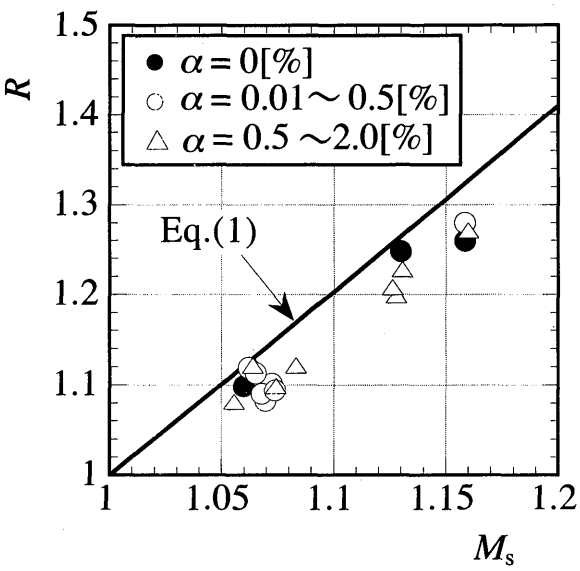



(c) Pressure record typical at point d

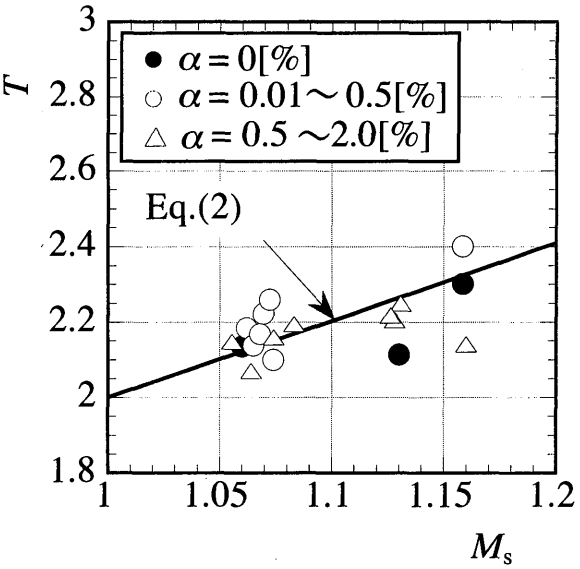
**Fig. 6**　Typical profiles of the pressure wave recorded at points a, b and c, indicated in figure 1 ($M_s$=1.06)

入射衝撃波の通過により大気圧 $p_0$ から $p_1$ の値までステップ状に上昇し，気液界面 ($x$=0) で反射した反射衝撃波により再び $p_1$ から $p_2$ の値までステップ状に上昇する．点 b の圧力は，気液界面 ($x$=0) を透過した圧力波が点 b を通過することによりほぼ大気圧 $p_0$ の値から急激に上昇した後，約600Hz の振動数で周期的に変動[14]し，図に示す定常値 $p_t$ となる．測定点 a～d の圧力波形の最初の圧力上昇の位置を結んだ波動線図からわかるように，測定部内を伝播する圧力波の伝播速度は，入射衝撃波の伝播速度に比べて遅くなるのがわかる．

次に点 b から d に伝播する圧力波のボイド率による影響を比較した結果を **Fig. 6** に示す．ただし，いずれの図も衝撃波マッハ数 $M_s$ は1.06の一定値であり，いずれの図も時間軸の原点は，入射衝撃波が測定点 a を通過した瞬間を示す．**Fig. 6** (**a**) は，測定点 b で測定した圧力波であり，ボイド率が増加するにつれて，最初の圧力上昇の後の波形の振動が緩和されていく．同様なことは，測定点 (c)，(d) の波についてもいえる．また，例えば，$\alpha$=0.02%のときの測定点 b と d




(a) Reflection coefficients




(b) Transmission coefficients

**Fig. 7**　Reflection and transmission coefficients

の圧力波形を比較してわかるように，点 d における圧力の最大値は，点 b の場合に比べてかなり大きくなっているのが観察される．これは，**Fig. 5** の波動線図からわかるように，測定部底面での圧力波の反射を考えれば明らかである．

### 3.2　気液界面での入射波の反射と透過

測定点 a を通過した入射衝撃波が，気液界面と干渉したときの圧力波の反射係数と透過係数[15]を調べる．本研究では，ボイド率 $\alpha$ が0.02%から2.0%と低いため入射衝撃波が水面と干渉するときの問題を調べた研究結果[15][16]を参考とする．その報告によると，入射衝撃波の圧力振幅（$p_1$-$p_0$）に対する反射衝撃波の圧力振幅（$p_2$-$p_1$）の比及び（$p_1$-$p_0$）に対する透過波の圧力波の振幅（$p_t$-$p_0$）の比はそれぞれ次式で表わせる．

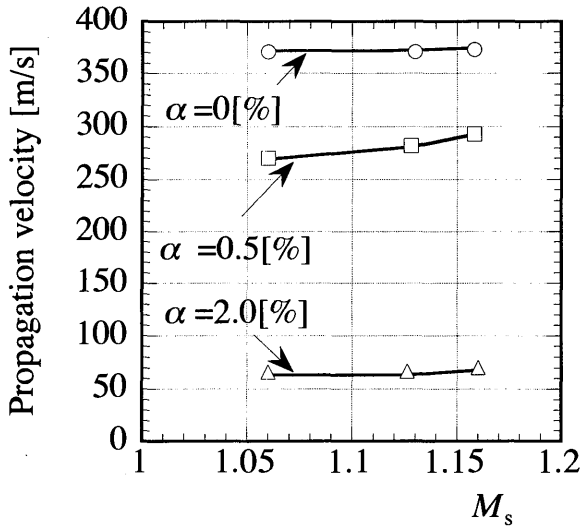



**Fig. 8**　Relationship between incident shock Mach number and propagation velocity

$$R \equiv (p_2 - p_1)/(p_1 - p_0) = 2\gamma/[(\gamma-1)+(\gamma+1)p_0/p_1] \tag{1}$$

$$T \equiv (p_1 - p_0)/(p_1 - p_0) = 1 + R \tag{2}$$

ここで，$\gamma$ は気体の比熱比，$R$ は反射係数，$T$ は透過係数を示す．なお衝撃波のインピーダンス[17]は，気体と比べて極めて大きいため，式(1)は，伝播する垂直衝撃波が固体面に垂直に衝突すると仮定して求めた式[18]と一致する．

式(1)(2)と本実験結果の比較を**Fig. 7** (**a**) (**b**) に示す．横軸は測定点 a の $p_0$ と $p_1$ の値を使って計算した入射衝撃波マッハ数 $M_s$ を示し，縦軸は $R$ と $T$ を示す．●印は $\alpha$=0%（水中）の場合，○印は $\alpha$=0.01～0.5%の範囲の実験値を示し，△印は $\alpha$=0.5～2.0%の範囲の実験値を示す．実験値は計算値と定量的によく一致し，$M_s$ が増加するにつれて，$R$ および $T$ も増加する．またボイド率の変化が $R$ あるいは $T$ に及ぼす影響はほとんどない．

### 3.3　気泡流中の圧力波の伝播速度

$\alpha$ がほぼ一定のときの圧力波の伝播速度に及ぼす $M_s$ の影響を調べるため，測定点bとdの圧力の立ち上がり時間の差に対する b と d の間の距離（2000mm）として求めた圧力波の伝播速度を **Fig. 8** に示す．○印は $\alpha$=0%，□印は $\alpha$=0.5%，△印は $\alpha$=2.0%のときの結果を示す．グラフから伝播速度は，$M_s$ によらずほぼ一定値となる．また同じ $M_s$ に対し，伝播速度は $\alpha$ が大きいほど小さい．これをさらに詳細に調べるため，測定点 bc 間の圧力波形から求めた伝播速度を○印で示し，測定点 cd 間で求めた伝播速度を△印で示した結果を $\alpha$ に対して **Fig. 9** に示す．各実

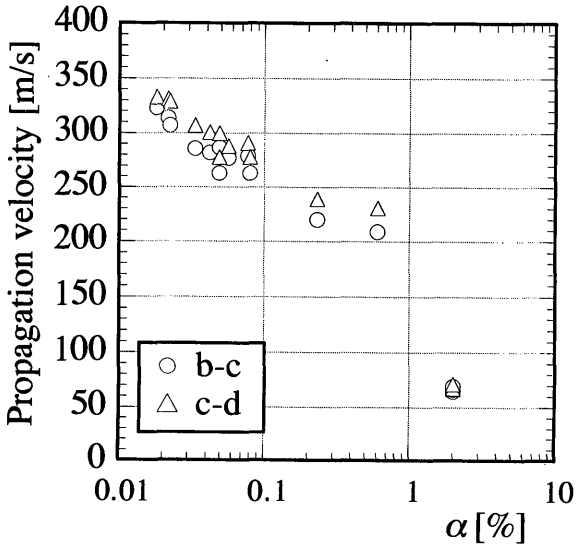



**Fig. 9**　Relationship between void fraction and propagation velocity

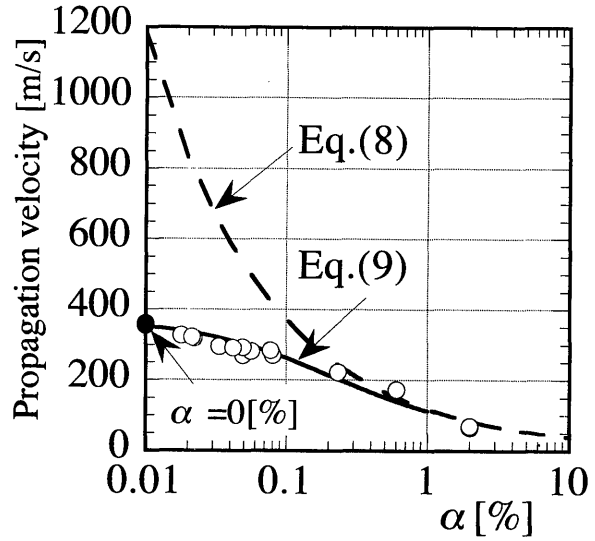



**Fig. 10**　Comparison of calculation and experiment

験値の $M_s$ は，1.06～1.16の範囲にあり，一定でないが，**Fig. 8** の結果からわかるように，この範囲の $M_s$ に対して，伝播速度は $M_s$ にほとんど依存しないため，**Fig. 9** の実験値は，$M_s$ について場合分けをしていない．**Fig. 9** からわかるように bc 間の伝播速度は，cd 間の伝播速度より若干小さい．これは，気泡が上昇するにつれて，気泡形が大きくなるため，測定部上面に近づくほどボイド率が大きくなることを考えれば明らかである．次に，bd 間で測定した圧力波の伝播速度を従来の理論式と比較した結果を **Fig. 10** に示す．○印は本実験値であり，**Fig. 9** と同様に，$M_s$ が1.06～1.16の範囲のものである．破線は後述する従来の理論(8)による計算値である．従来の理論式は，$\alpha$＝約0.1％以上では，実験値と極めてよく一致するが，$\alpha$＝約0.1％以下では，実験値よりかなり大きい．また●印で示す $\alpha$=0％の実験値からわかるように，水中の音速が，一般的な値よりかなり小さい．これは，3.4節で述べるように，管の弾性が伝播速度に大きな影響を与えることによる．

### 3.4　管の弾性を考慮した圧力波の伝播速度

管の弾性を考慮した管内気泡流中の圧力波の伝播速度に関する式を導くため，以下の仮定をおく．管は薄肉円筒とし，管内を圧力波が伝播するときの管の変位は微小で，管の軸方向の変位は管の半径方向の変位と比較して無視できるとする．また管断面 A にわたって圧力 $p$，密度 $\rho$，速度 $u$ は一様で，気泡と液体のスリップ比は1の均質気泡流を仮定する．連続の式は

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u A)}{\partial x}=0 \tag{3}$$

ただし，$x$ は距離，$t$ は時間である．$\rho$ は $\alpha$ が小さいときには次式で表わされる．

$$\rho=\alpha\rho_g+(1-\alpha)\rho_l=(1-\alpha)\rho_l \tag{4}$$

ただし，$\rho_g$ と $\rho_l$ はそれぞれ，気体及び液体の密度である．管内の圧力を $p$ とすると，運動方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} \tag{5}$$

円筒の厚さを h，内径 D，ヤング率を $E$ とすると，管内の圧力 $p$ と断面積 A の関係は[19]

$$dA=\frac{\pi D^3}{4hE}dp \tag{6}$$

式(3)～(6)において，平均値からの変動量を考え，二次の微少量を消去して圧力に関する式を導くと

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}-\frac{\dfrac{\partial p}{\partial \rho}}{1+\rho D\dfrac{\partial p}{\partial \rho}/(hE)}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \tag{7}$$

ここで，$\partial p/\partial\rho$ は次式で表わせると仮定する[20]．

$$a=\sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}}=\frac{\sqrt{\gamma p_0/\rho_{g0}}}{\sqrt{\alpha^2+\alpha(1-\alpha)\rho_{l0}/\rho_{g0}}} \tag{8}$$

上式は，管の弾性を考慮していない圧力波の伝播速度に関する従来の理論式である．

管の弾性を考慮した管内を伝わる圧力波の伝播速度 $c$ は式(7)と(8)より

$$c=\frac{a}{\sqrt{1+\rho_0 Da^2/(hE)}} \tag{9}$$

$\gamma = 1.4$, $p_0 = 101.3$kPa, $\rho_{g0} = 1.2$kg/m$^3$, $\rho_{l0} = 1000$kg/m$^3$, D=16mm, h=1mm, E=0.21×10$^{10}$Pa[21]として計算した結果を実線で**Fig. 10** に示す．本計算値は実験値と極めてよく一致する．また $\alpha$ が約0.1%以下の場合，圧力波の伝播速度は管の弾性を考慮しないときの理論式よりかなり小さい．

## 4. 結　　論

垂直管内気泡流中を伝播する圧力波の特性を調べるために実験装置を試作し，基礎実験を行なった．また気泡流中を伝わる圧力波の伝播速度に及ぼすボイド率の影響を，管の弾性を考慮して解析的に示し，実験結果と比較検討した結果以下の結論を得た．

（1） 入射衝撃波が気泡流の気液界面で反射および透過する場合，入射衝撃波後方の圧力 $p_1$ と前方の圧力 $p_0$ の差 $(p_1-p_0)$ に対する反射衝撃波後方の圧力 $p_2$ と前方の圧力 $p_1$ の差 $(p_2-p_1)$ の比 $(p_2-p_1)/(p_1-p_0)$ および $(p_1-p_0)$ に対する透過波の後方の圧力 $p_t$ と前方の圧力 $p_0$ の差 $(p_t-p_0)$ の比 $(p_t-p_0)/(p_1-p_0)$ は，入射衝撃波が水面で反射あるいは透過するときの従来の理論式(1)および(2)とそれぞれよく一致する．

（2） 本実験の入射衝撃波マッハ数 $M_s$ の範囲 $(M_s<1.16)$ では，圧力波の伝播速度はボイド率 $\alpha$ のみに依存し，$M_s$ にほとんど依存しない．

（3） 気泡流中を伝播する圧力波の伝播速度に関する本計算値は，実験値と定量的に極めてよく一致する．

（4） $\alpha$ が約0.1%以下の場合，気泡流中を伝わる圧力波の伝播速度は，管の弾性を考慮すると，考慮しない従来の理論結果よりかなり低い．

## 参 考 文 献


1) Hsieh, D.Y. and Plesset, M.S., Physics of Fluids, **4**-8 (1961), 970.
2) Nguyen, D.L.et al., . Int. J. Multiphase Flow, **7**-3 (1981), 311.
3) Fujiwara, T. and Hasegawa, T., Proc. of the 13th Int. Symp. on Shock Tubes and Waves, (1981), 724.
4) ユーリック著(土屋明訳), 水中音響の原理, (1975), 239, 共立出版.
5) van Wijngaarden, L., Ann. Rev. Fluid Mech.4 (1972), 369.
6) Mori.Y., et al., Int. J. Multiphase Flow **2**-2 (1975), 139.
7) Henry, R.E., Chem. Eng. Prog. Symp. Ser., **66**-102 (1970), 1.
8) 松尾・ほか3名, 九州大学大学院総合理工学研究科報告, 18-1(1996), 11.
9) Wilson, W.D., J. Acous. Soc. Am., **31**-8 (1959), 1067.
10) Kawada, H. et al., Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci., **16**-33(1973), 195.
11) 青木・ほか2名, 機論, **31**-224(1965), 588.
12) 亀田正治, 松本洋一郎, 機論, B, **61**-584, (1995), 1238.
13) 日本機械学会編, 気液二相流技術ハンドブック, (1989), コロナ社.
14) Noordzij. L. and van Wijngaarden, L., J. Fluid Mech. **66**, part 1, (1974), 115.
15) Henderson, L.F., J. Fluid Mech., **198** (1989), 365.
16) Henderson, L.F., et al., Fluid Dynamics Research. **5** (1990), 337.
17) Henderson, L.F., J. Fluid Mech., , part 4 (1970), 719.
18) ランダウ・リフシッツ著 (竹内均訳), 流体力学2, (1971), 414, 東京図書㈱.
19) 日本流体力学会編集, 流体における波動, (1989), 225, 朝倉書店.
20) 赤川浩爾, 気液二相流, (1974), 229, コロナ社.
21) 日本機械学会編, 機械工学便覧(材料学・工業材料), 113, 丸善㈱.