

令和元年度卒業論文
気液混相流中の超音波伝播速度による
ボイド率計測法の開発

福岡工業大学 工学部 知能機械工学科

16E1049 松川夏樹

16E2023 佐藤翔

指導教員 河村良行

目次

第1章	緒言	1
第2章	本実験で使用した装置	2
	2.1 圧電スピーカー	2
	2.2 積層型ピエゾ	2
	2.3 超音波センサー	3
	2.4 加圧溶解型マイクロバブル発生装置	3
	2.5 関数電圧発生装置	4
	2.6 半導体励起固体レーザー	4
	2.7 オシロスコープ	5
	2.8 ロックインアンプ	5
	2.9 光検出器	6
第3章	ボイド率と音速の理論計算	7
第4章	圧電スピーカーを用いた音速測定	9
	4.1 実験装置及び方法	9
	4.2 実験結果及び考察	10
第5章	積層型ピエゾを用いた音速測定	11
	5.1 水中での音速測定	11
	5.1.1 実験装置及び方法	11
	5.1.2 実験結果及び考察	12
	5.2 音速測定における0点補正	13
	5.3 気液混相流中の音速測定	14
	5.3.1 実験装置及び方法	14
	5.3.2 体積率を用いたボイド率測定	15
	5.3.3 実験結果及び考察	16
第6章	超音波センサーを用いた音速測定	18
	6.1 実験装置及び方法	18
	6.2 実験結果及び考察	18
第7章	ナノバブルの存在探求	20
	7.1 実験装置及び方法	20
	7.2 実験結果及び考察	21

第8章 結言	22
参考文献	23
謝辞	24
付録	25
付録1 気液混相流中の気泡の体積弾性率	26
付録2 断熱変化の証明	28
付録3 静電容量の測定	30
付録4 特許申請資料	36

第1章. 緒言

本実験における研究背景は、ボイド率が高くなると水中での音速が遅くなるという現象を利用して、衝撃波を観測することである。

一般的に音速を超えるとマッハ速度や超音速と呼ばれる。マッハ速度に達したジェット機や戦闘機の周りには衝撃波が発生する。衝撃波が発生するのは飛行速度が音速を超えたときに対して、空気の流れが遅いために横や後ろに流しきれずに前面に溜まる。その溜まった空気がさらに高速で空気に衝突するために発生する。この現象を気液混相流中の音速が低下することを用いてマッハ速度に達さない場合でも衝撃波を観測することが出来るのではと考えた。

しかし、実験を進めていくうちに気液混相流中では超音波は気泡によって減衰し、伝播距離が数 cm にしか満たないことが発覚した。そのため衝撃波の観測は難しいと判断し断念したが、実際に気液混相流中で音速が遅くなっているのが分かった。

そのため、今年度は気液混相流中の超音波伝播速度によるボイド率計測法の開発を目標とした。

第2章. 本実験で使用した装置

2.1 圧電スピーカー

アルミニウムの音速測定に利用した。金属板に圧電素子を張り付けた構造となっている。電気信号を振動に変えることで音を発する。また、振動を電気信号に変えることができるため、計測器に接続することで振動を電氣的に計測することができる。

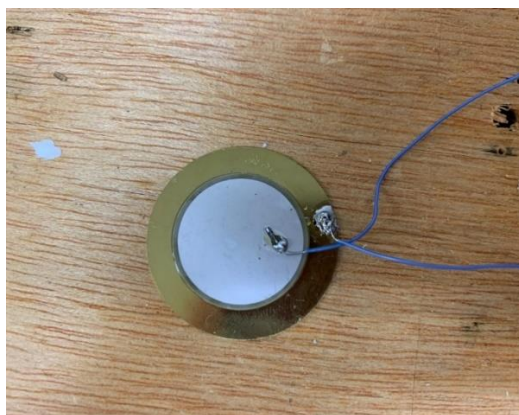


図 2.1 圧電スピーカー

2.2 積層型ピエゾ

液中の音速を測定するのに使用した。共振周波数は 138 [kHz] であり、静電容量は 0.75 [μF] である。積層型ピエゾは圧電素子が何層も重なってできているため、信号が大きくなるというメリットがある。しかし、圧電素子の充電に時間がかかり反応速度が遅れるというデメリットがある。

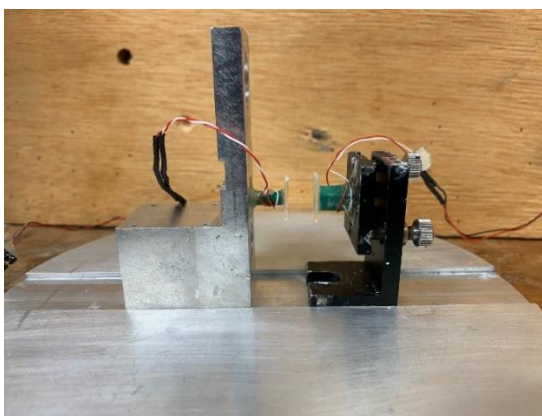


図 2.2 積層型ピエゾ素子

2.3 超音波センサー

液中の音速を測定するのに使用した。今回使用した超音波センサーは、防滴型のため水中での使用が可能である。共振周波数は 40 [kHz] である。送信側は緑のシールが貼ってあり、受信側は橙色のシールが貼っている。金属ケースの中に圧電素子が入っている。一般的に空気中の音速測定に使われているため、液中での音速測定も可能であると考え使用した。



図 2.3 超音波センサー

2.4 加圧溶解型マイクロバブル発生装置

江頭研究室からお借りしたマイクロバブル発生装置。型式は OM-MDG-045 である。運転圧力は 0.25~0.75 [MPa] である。気液混相流中の音速を測定するときに、マイクロバブルを発生させて使用した。気泡の径は約 50 [μm] である。



図 2.4 マイクロバブル発生装置

2.5 関数電圧発電装置

音速測定時にピエゾ素子に起電力を与えるのに使用した。任意の周波数と波形を持つ交流電圧信号を生成、出力することが出来る。



図 2.5 関数電圧発生器

2.6 半導体励起固体レーザー

微粒子の散乱光を計測するのに使用した。波長 532[nm]である。ダイヤルを回すことで細かい明るさの調整も可能である。また、トリガーとしての利用が可能なので関数電圧発生器から信号を送れば条件に見合ったパルスでの実験が可能である。

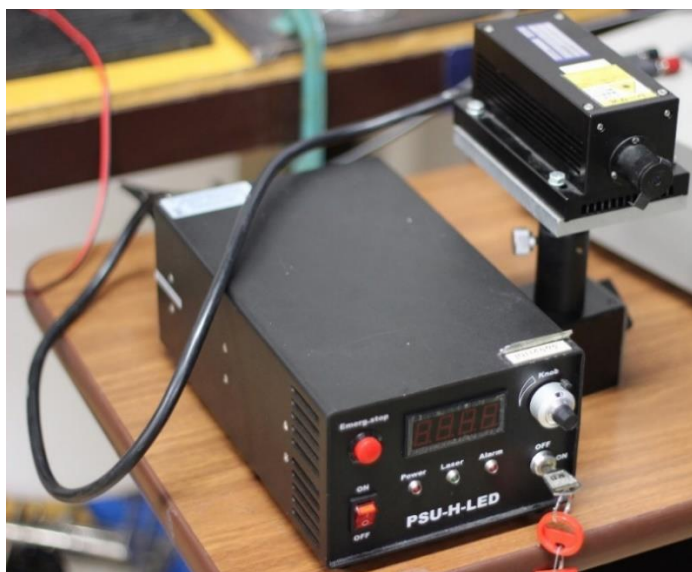


図 2.6 半導体レーザー

2.7 オシロスコープ

音速測定時に関数電圧発生装置から発生させたステップ関数と、受信側で受け取った音波を電圧としてモニターするのに使用した。時間の経過と共に電気信号が変化していくのを観測できる計測機器である。測定画面の縦軸は電圧、横軸は時間として入力信号の波形を出力できる。



図 2.7 オシロスコープ

2.8 ロックインアンプ

散乱光の強さを計測するのに使用した。参照となる信号を内部で同期させることにより、ノイズに埋もれた微小な繰り返し信号を検出することが出来る。



図 2.8 ロックインアンプ

2.9 光検出器

気泡の散乱光を測定するのに使用した。光を電気信号として変換する装置である。左は光電子増倍管であり散乱光の検出, 右はシリコンフォトダイオードであり同期信号の検出に使用した。光電子増倍管は抵抗値を変化させることによって観測感度を変更することが出来る。今回は十分に散乱光が強かったため感度は低めで実験を行った。



図 2.9 光検出器

第3章. ボイド率と音速の理論値計算

私たちはまず、音速とボイド率の関係の理論計算を行った。混相流中の音速 c [m/s] は、ボイド率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$)、体積弾性率 E [Pa]、密度 ρ [kg/m³] を用いて、

$$c = \left[\frac{E}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

と表すことが出来る。

次に、水の体積弾性率 E_1 [Pa]、空気の体積弾性率 E_2 [Pa]、水の密度 ρ_1 [kg/m³]、空気の密度を ρ_2 [kg/m³] を用いて、

$$E = \frac{E_1 E_2}{E_2(1-\alpha) + E_1\alpha} \quad (2)$$

$$\rho = \rho_1(1-\alpha) + \rho_2\alpha \quad (3)$$

と表すことが出来る。

(1) に (2)、(3) を代入すると、

$$c = \left[\frac{E_1 E_2}{\{E_2(1-\alpha) + E_1\alpha\} \{\rho_1(1-\alpha) + \rho_2\alpha\}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

となり、(4) を用いて混相流中の音速を計算することが出来る。

また、 α について式をまとめるとボイド率 α は、

$\alpha =$

$$\frac{-E_1 + 2E_2\rho_1 - \rho_2 \pm [(E_1\rho_1 - 2E_2\rho_1 + E_2\rho_2)^2 - 4(-E_1\rho_1 + E_1\rho_2 + E_2\rho_1 - E_2\rho_2)]^{\frac{1}{2}}}{2(-E_1\rho_1 + E_1\rho_2 + E_2\rho_1 - E_2\rho_2)}$$

(5)

と、表すことが出来る。

(4) の式に 10 万分の 1 刻みのボイド率を代入した結果が図 3.1 であり、図 3.2 は 0~2% の部分を拡大したものである。

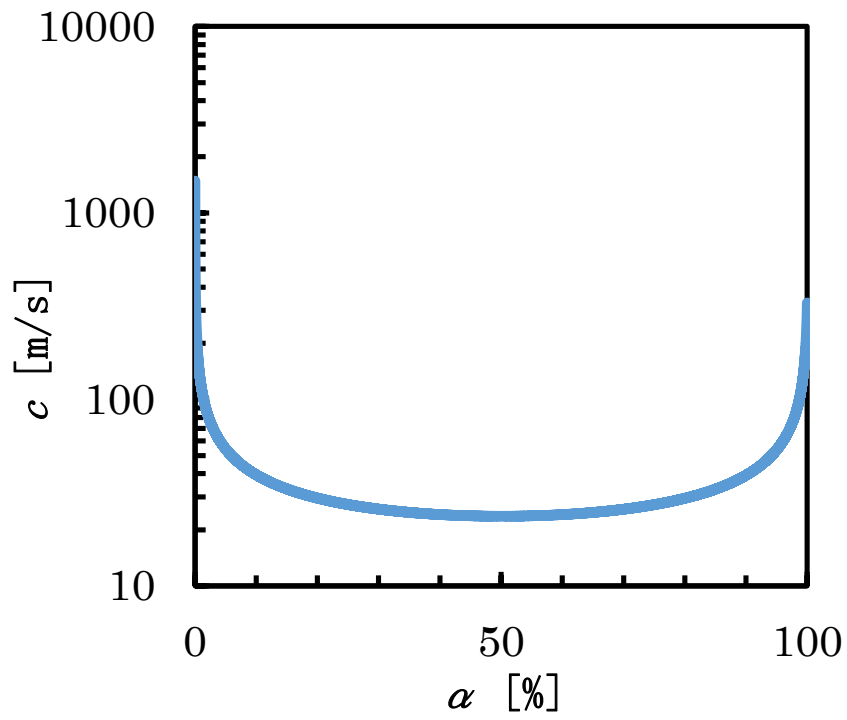


図 3.1 ボイド率と気液混相流の音速の関係 (0~100%)

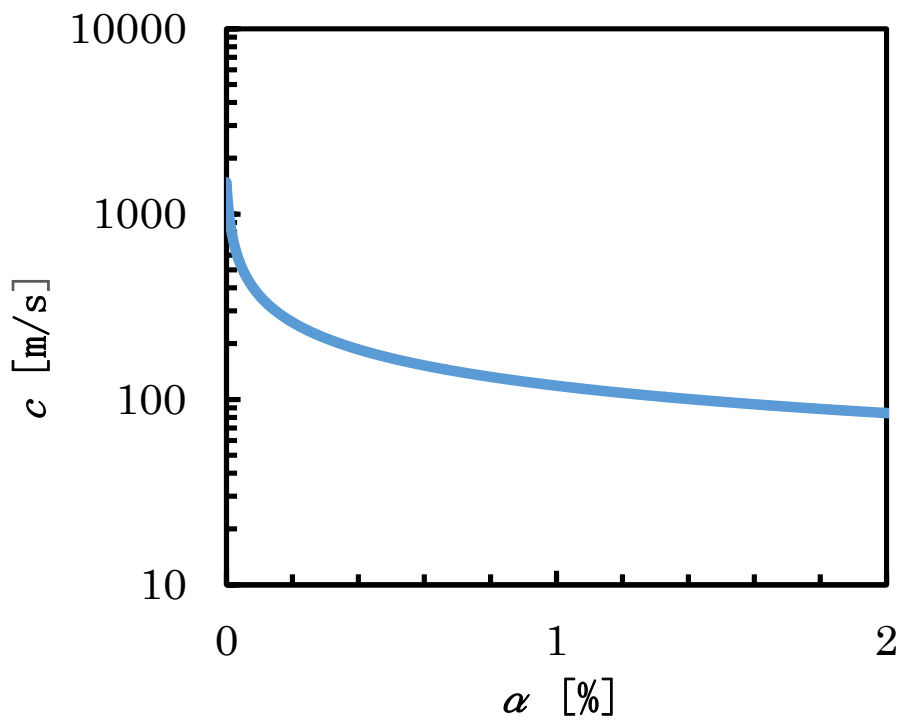


図 3.2 ボイド率と気液混相流の音速の関係 (0~2%)

第4章 圧電スピーカーを用いた音速測定

4.1 実験装置及び方法

ボイド率を算出するためには、音速を実験より求める必要がある。まずは圧電スピーカーを用いて音速測定を行った。

圧電スピーカーの性能を確認するために、アルミニウムの丸棒による予備実験を行った。図 4.1 に実験図を示す。1メートルのアルミニウムの丸棒の両端に圧電スピーカーを貼り付け、片側をスピーカー、もう片側を受信として実験を行った。関数電圧発生装置から信号を送り、オシロスコープに波形を読み取った。この時、関数電圧発生装置のスweep機能を用いて、周波数を上げていき、共振点を観測した。

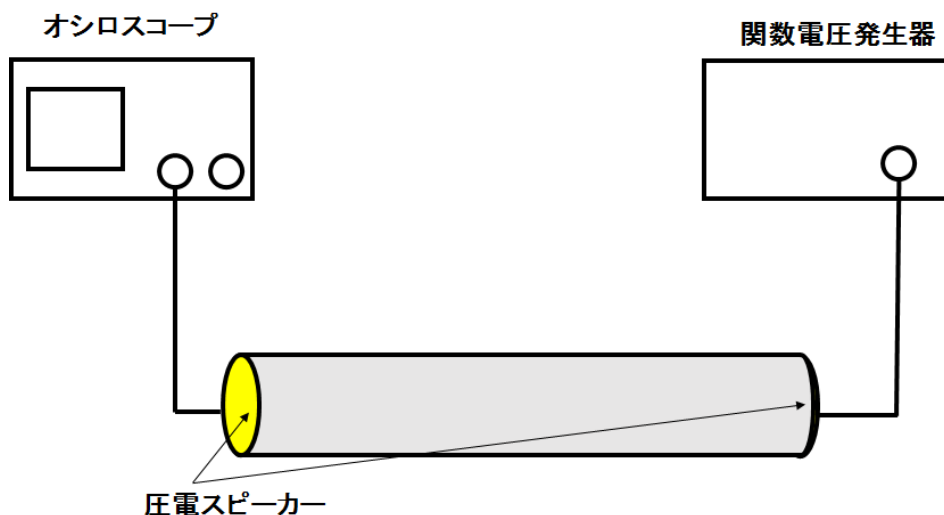


図 4.1 圧電スピーカーを用いた音速測定装置

4.2 実験結果及び考察

図 4.2 実験結果である。共振している点は 2563Hz であることがわかった。両端が腹だと仮定したため、周波数 f_n [Hz], 音速 V [m/s], アルミニウムの長 L [m] とすると、

$$f_n = \frac{nV}{2L} \quad (6)$$

が成り立つ。

(6) に実験結果を代入すると、5126 [m/s] となり一般的にアルミニウム中の音速は 5100 [m/s] であり、ほぼ誤差なく一致した。この実験から圧電スピーカーを用いて音速測定できることがわかった。

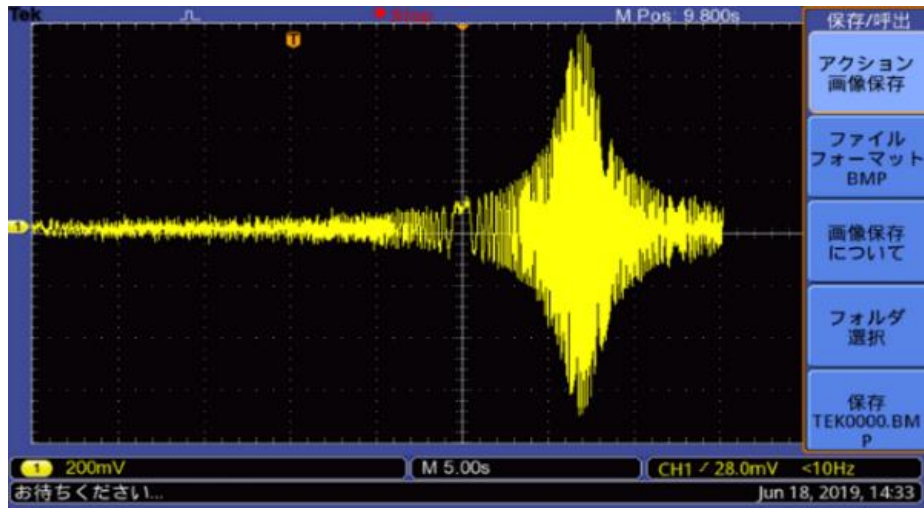


図 4.2 圧電スピーカーを用いたアルミニウムの音速測定の結果

第5章 積層型ピエゾを用いた音速測定

5.1 水中での音速測定

5.1.1 実験装置及び方法

積層型ピエゾは多数の圧電素子を有しているため、信号が大きくなり、はっきりとした信号が取れると考えたため、音速測定を行うことにした。しかし、空気の音速は積層型ピエゾでは測定することができなかつたため、水中に実験装置を沈めて実験を行った。

実験装置を図 5.1 に示す。積層型ピエゾを送信部と受信部として、関数電圧発生器から信号を送り、オシロスコープに波形を読み取った。また、ピエゾの先に $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ に切ったプレパラートを貼り、アンテナとして利用した。今回の実験はステップ関数を用いた飛行時間法で音速測定を行った。

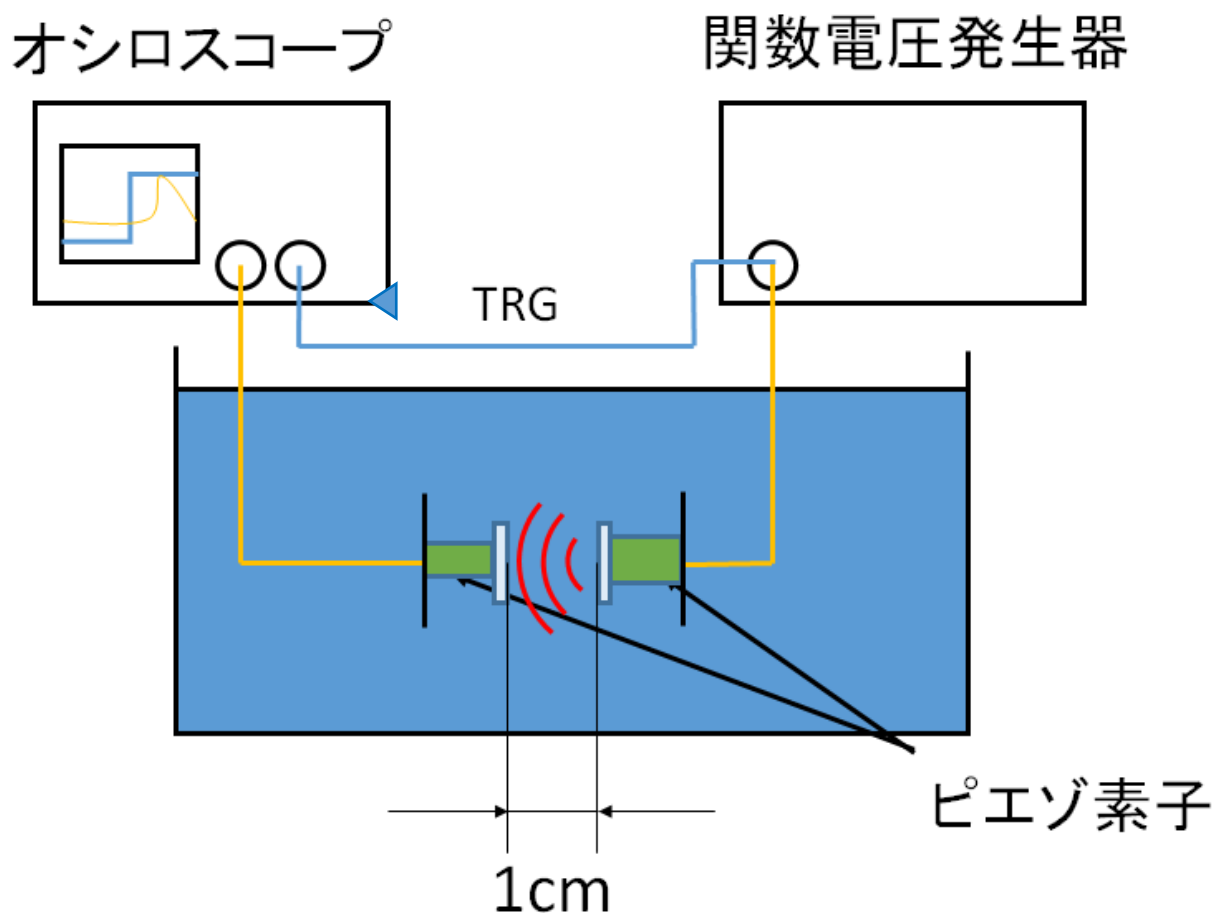


図 5.1 積層型ピエゾを用いた水中の音速測定装置

5.1.2 実験結果及び考察

図 5.2 は実験結果である。電圧の立ち上がり始めから音波の立ち上がり始めを Δt [s] とすると、 7.6×10^{-6} [s] となる。ピエゾ間の距離は 1 [cm] であるため、音速は約 1.31×10^3 [m/s] となり、水中での音速より遅い結果となった。その原因として、アンテナとして使用したガラス板の通過時間、計測機器の遅れがあると考え 0 点補正を行った。

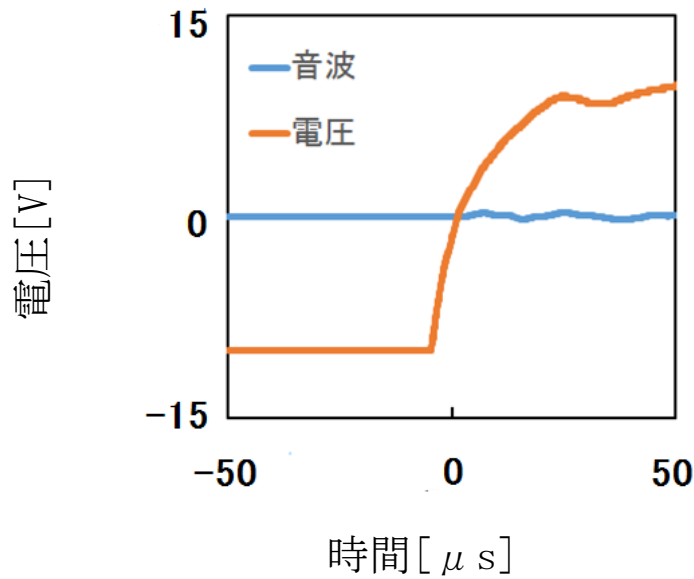


図 5.2 積層型ピエゾを用いた水中の音速測定結果

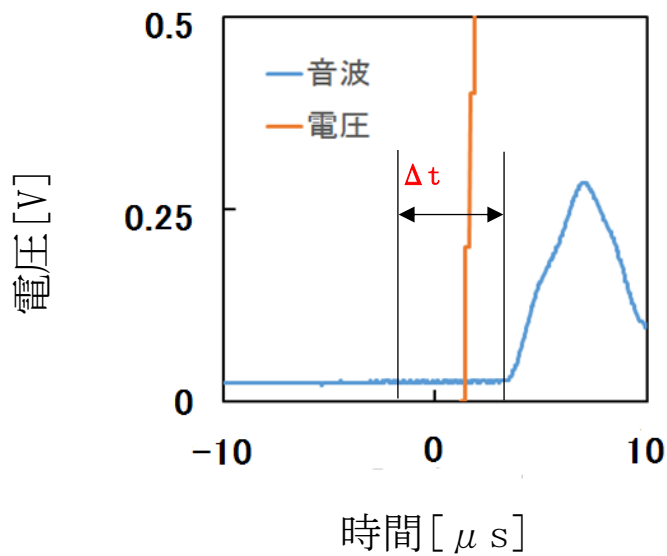


図 5.3 図 5.2 の拡大図

5.2 音速測定における 0 点補正

厚さ約 3[mm]の亚克力板を 5 枚用いて、枚数ごとに音速の測定を行う。そして、縦軸を距離、横軸を時間としグラフを作り 5 点の近似線から傾きを出してそれを音速とした。実験方法は、水中での音速測定と同時に行った。図 5.4 は校正グラフである。結果、音速が約 1.53×10^3 [m/s] となりほぼ水中の音速と一致した

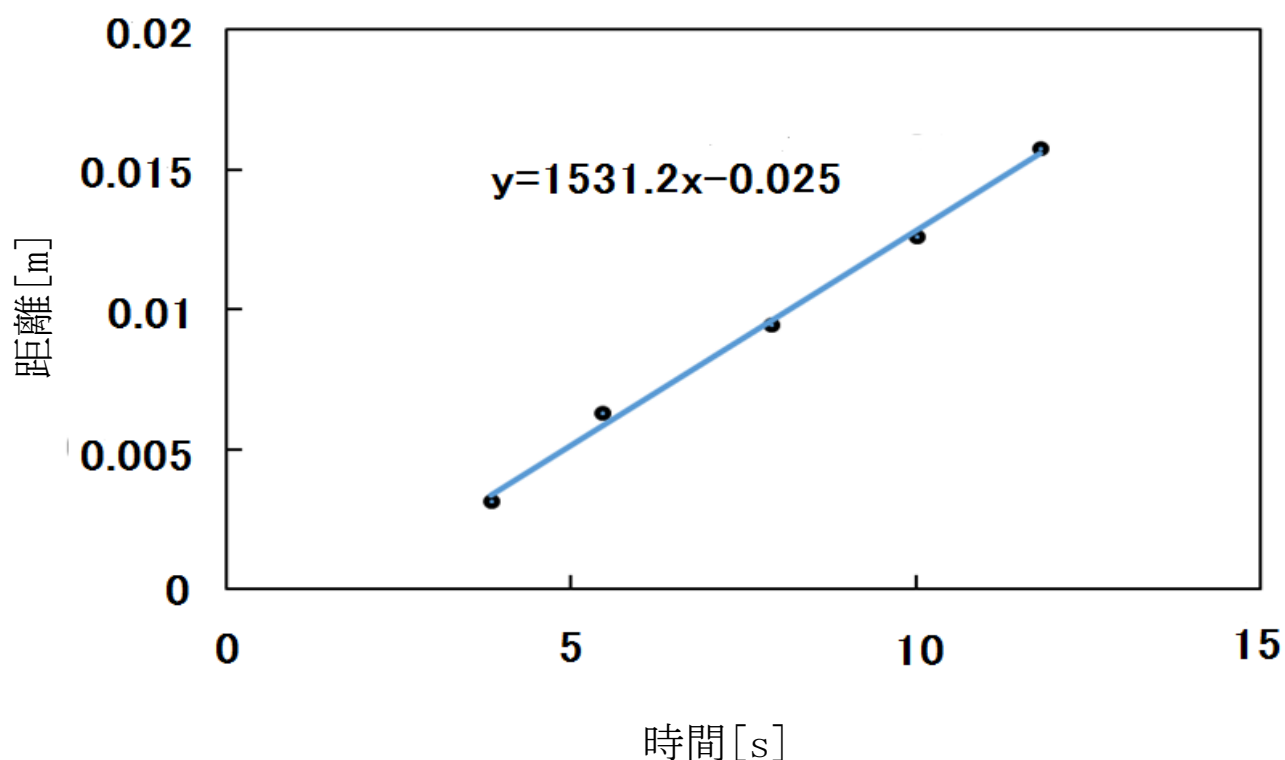


図 5.4 水中の音速の 0 点補正

5.3 気液混相流中の音速測定

5.3.1 実験装置及び方法

江頭研究室からお借りしたマイクロバブル発生装置を用いて音速の測定を行う。水の音速測定で使用した容器内にマイクロバブルを循環させて、水中が目測で真っ白になった状態の時に音速の測定を行った。実験の方法は水中の音速測定と同様である。実験装置を図 5.5 に示す。実験より求めた音速に式 (5) を用いてボイド率に換算してボイド率の理論値を求めた。

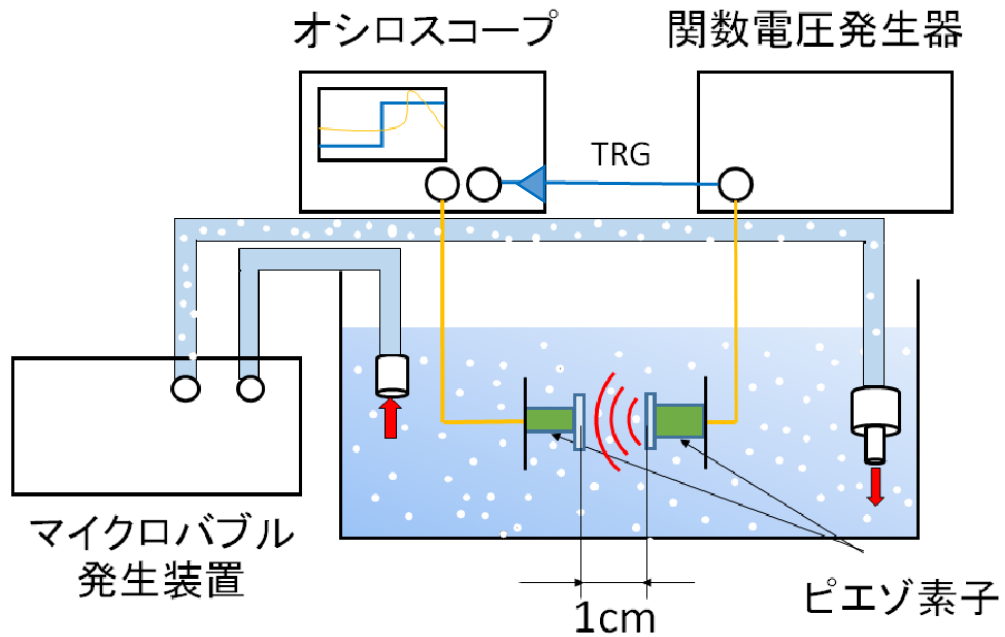


図 5.5 積層型ピエゾ素子を用いた気液混相流中の音速測定

5.3.2 体積変化から求めたボイド率の測定

図 5.6 ように、太い注射器の先端に細い注射器を取り付け、気泡が上昇することによる体積の減少を見てボイド率を算出した。

測定方法は、音速の測定と同時にマイクロバブルを採取し、最初に入っている注射器の中の空気を抜き、気泡を上昇させるために金槌などで叩く。



図 5.6 ボイド率の測定に用いた気液混相流を採取する注射器の先端部分

5.3.3 実験結果及び考察

図 5.7 は実験結果である。 Δt [s]は 5.2×10^{-5} [s]となり、音速は 192[m/s]となった。この音速を式(5)の理論計算の値と比較するとボイド率が約 0.37%と算出された。気泡が入ることにより、音速が遅くなることが確認できた。

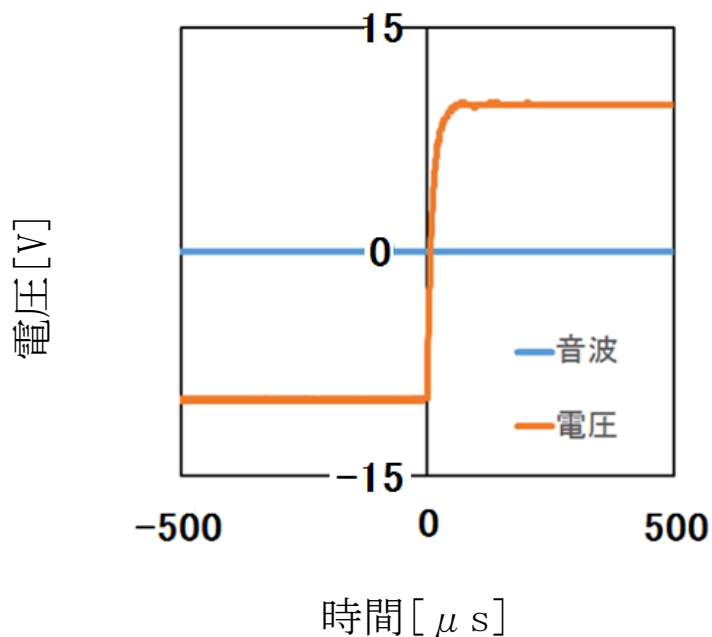


図 5.7 積層型ピエゾ素子を用いた電圧と時間の関係(気液混相流)

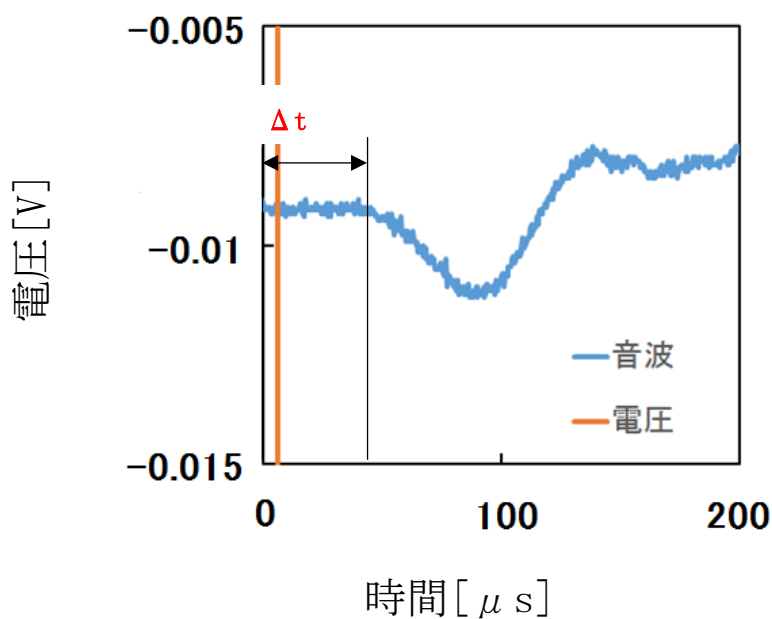


図 5.8 図 5.7 の拡大図

同様の実験方法でマイクロバブルを容器内で循環させて真っ白になった状態からスイッチを切って0秒後、10秒後、30秒後、60秒後で音速を測定し、同時に図5.6を用いたボイド率の測定も行った。

図5.9は実験結果である。体積変化から求めたボイド率は、0秒後の1点しか測定していないが、その1点では音速から求めたボイド率と近い値になることがわかった。

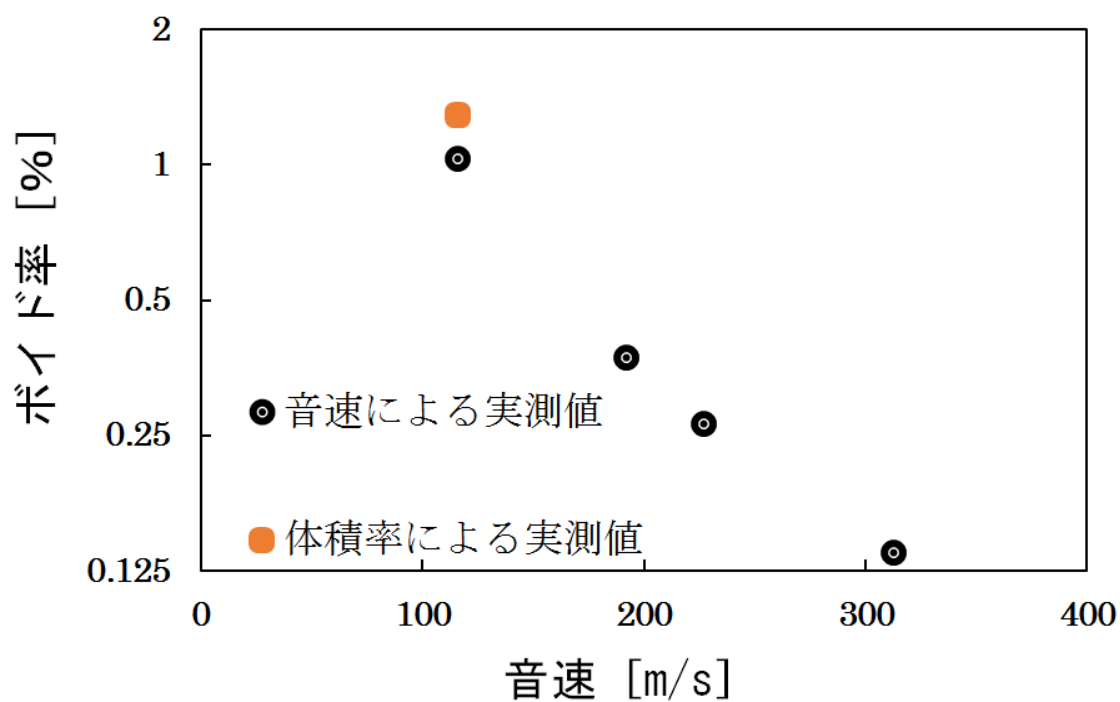


図 5.9 音速に対するボイド率の関係

第6章 超音波センサーを用いた音速測定

6.1 実験装置及び方法

超音波センサーは、一般的に空気中で使用されるが防滴加工がされているため、水中での音速測定が可能だと思い使用した。実験装置を図 6.1 に示す。先程の実験方法同様にスイッチを切って 0 秒後、10 秒後、30 秒後、60 秒後気液混相流中の音速の測定を行う。同時に図 5.6 を用いたボイド率の測定も行う。

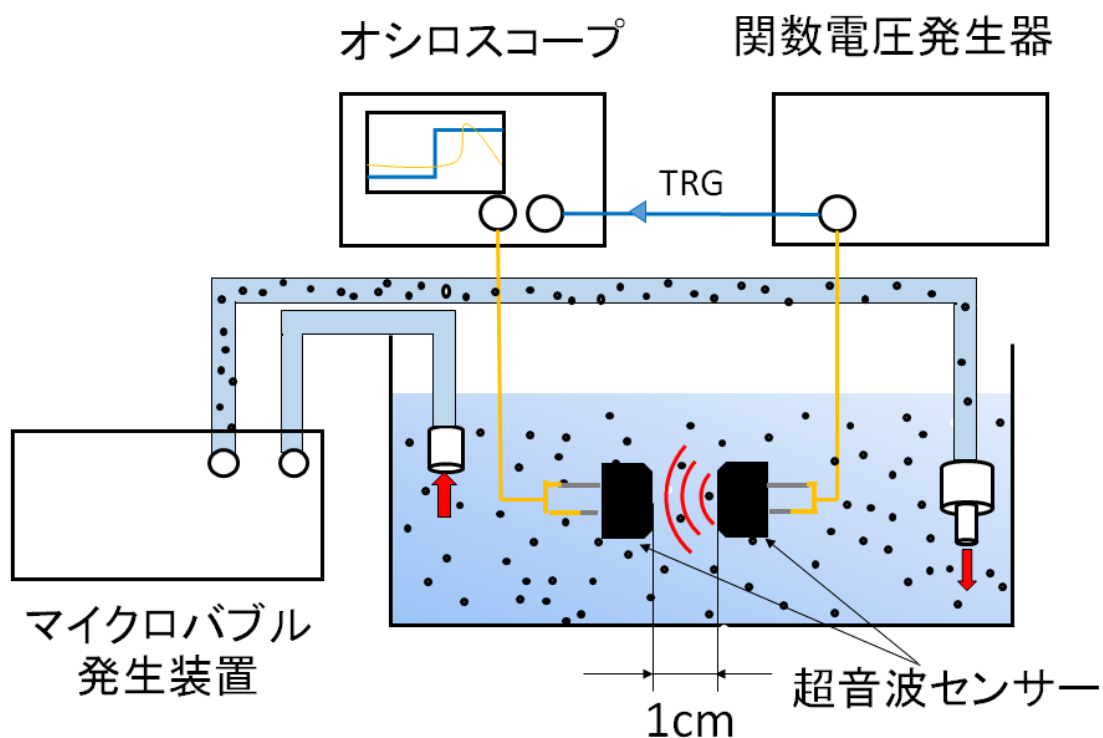


図 6.1 超音波センサーを用いた気液混相流中の音速測定装置

6.2 実験結果及び考察

実験結果は図 6.2 になる。この時の Δt [s] は 8.0×10^{-5} [s] となり、音速は 125 [m/s] となり、式 (5) を用いてボイド率を算出すると 0.89% となる。このことから、超音波センサーでも気液混相流中の音速が測定できることを確認できた。

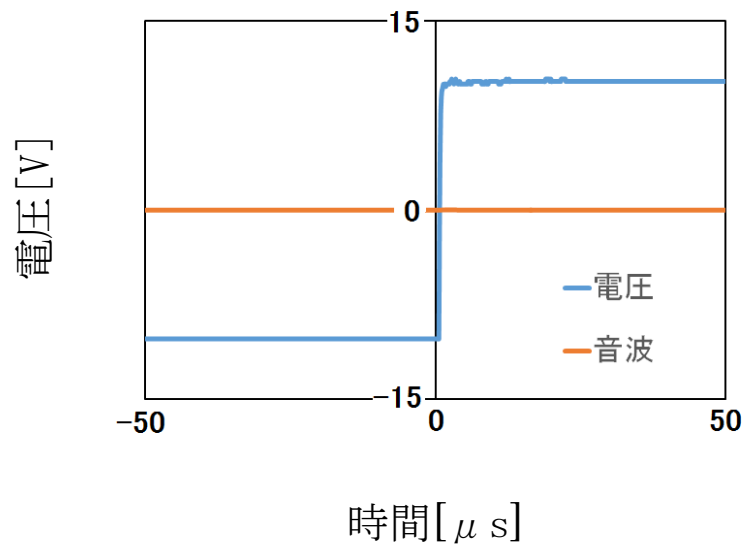


図 6.2 超音波センサーを用いた電圧と時間の関係(気液混相流)

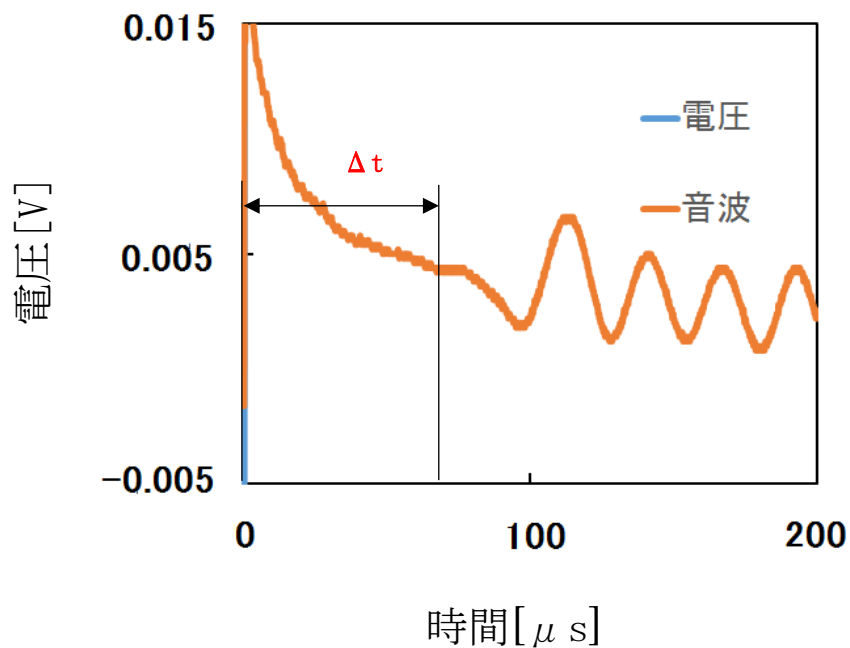


図 6.3 図 6.2 の拡大図

ボイド率の理論値と実測値を比較したのが図 6.4 である。比較した結果、理論値と近い値が出たが、最後の点だけ誤差が大きいのは注射器から水が溢れたなどの原因が考えられる。時間の変化とともに、ボイド率は低下していき、音速は水に近づいていくことを観測できた。

また、完全には水の音速には戻らなかった。その原因として、目に見えないナノバブルが存在しているのでは無いかと考えた。

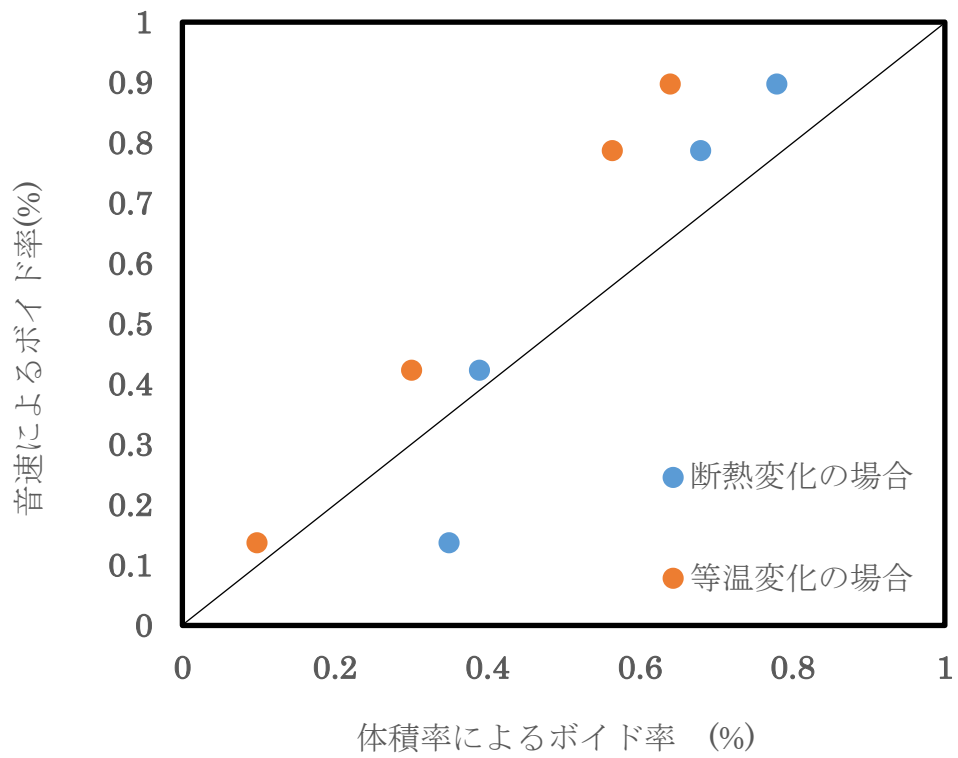


図 6.4 音速によるボイド率と体積率によるボイド率の比較

第7章 ナノバブルの存在探求

7.1 実験装置及び方法

図7.1に実験装置を示す。ナノバブルの存在を確認するために、石英ガラス製の容器の中に気液混相流を入れ、半導体励起固体レーザーを用いて波長 532[nm]のグリーンレーザーを照射した。照射されたレーザーは光チョッパーによってチョップされる。チョップされた信号は光検出器によってロックインアンプに同期信号として取り込まれる。また、チョップされずに通過したレーザーは容器内を通過し、気泡によって散乱する。散乱したレーザーは光検出器によってロックインアンプに観測信号として取り込まれる。この時、容器と散乱光を検出する光検出器は外光の影響を受けやすいため、光遮断カバーをかぶせた。気泡の散乱光を利用し、時間の変化とともに散乱光の強さがどのように変化するかを観測した。

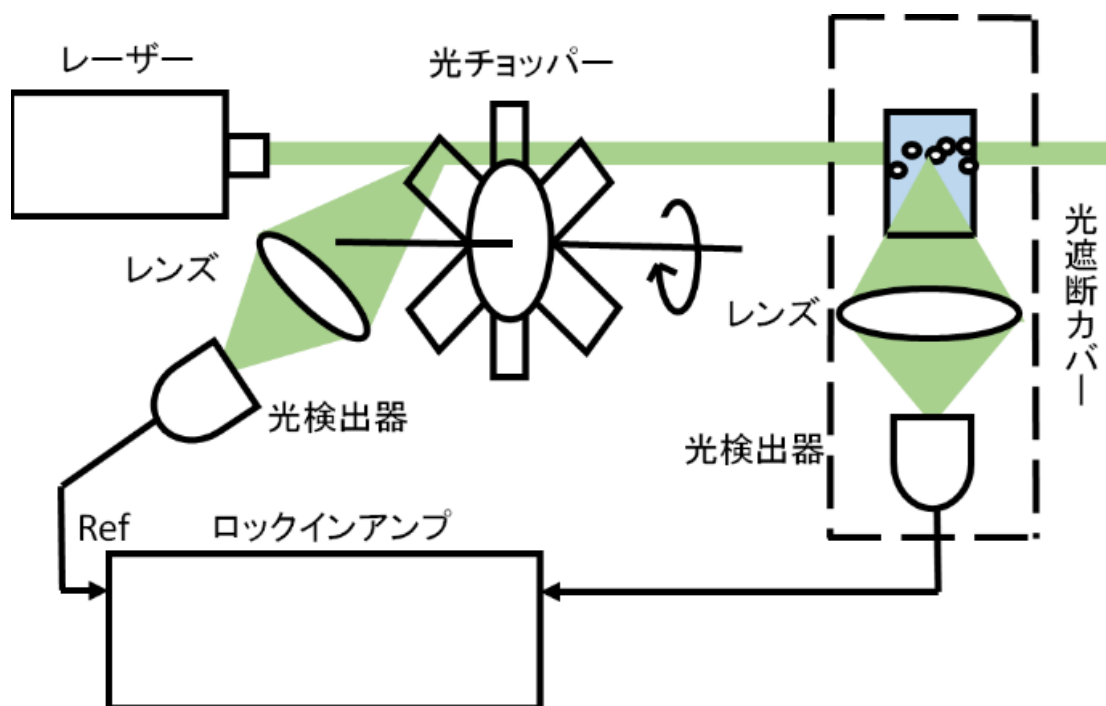


図7.1 グリーンレーザーを用いた散乱光の計測装置

7.2 実験結果及び考察

図 7.2 は実験結果である。数 10 秒の間は、気泡の上昇とともに散乱光が減少していくのが見られた。その後、数時間の間は水よりも 2 倍ほど強い散乱光を示した。水の状態に戻らないことから、微粒子が存在していたと考えたが、その粒子が塵か気泡か判断できないため、ナノバブルの存在は証明できなかった。

しかし、この実験方法で微粒子の散乱光を観測することに成功した。この手法はナノバブルの研究を進めるのに役に立つと考えている。

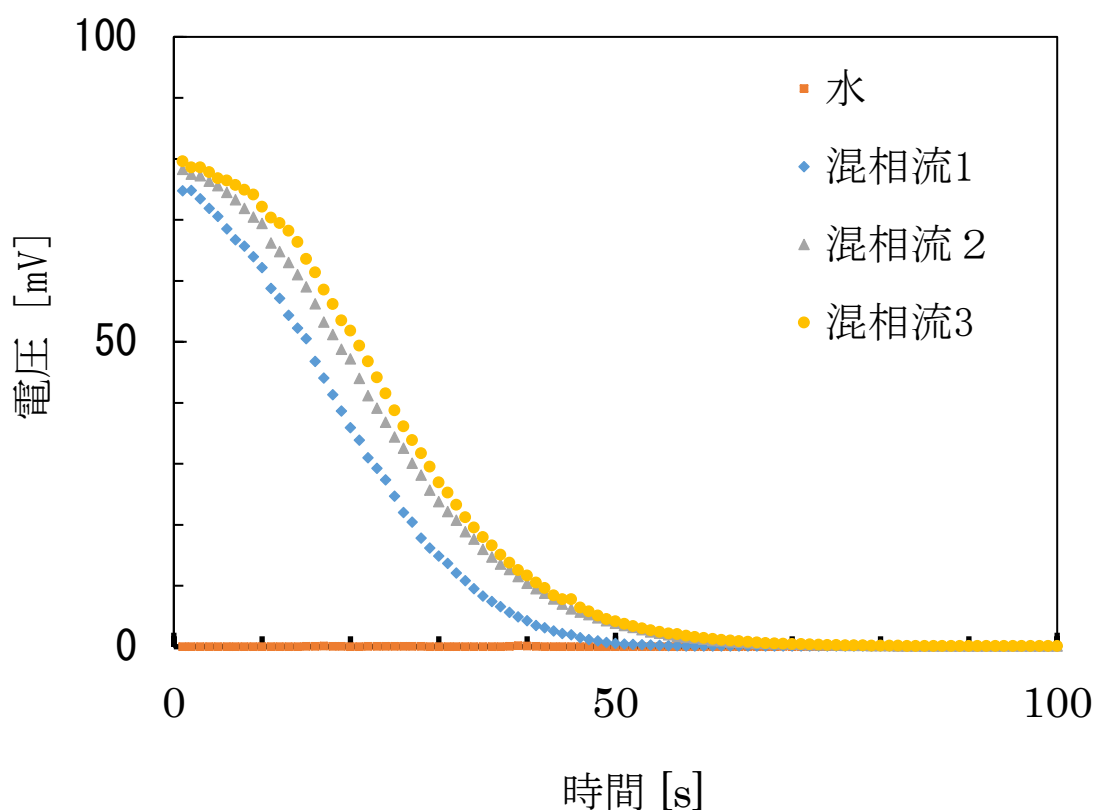


図 7.2 気液混相流の時間変化に伴う散乱光の変化

第8章 結言

本研究を行った結果、気液混相流中の音速が実際に遅くなることが観測できた。また、気液混相流中で時間の経過とともにボイド率が減っていき音速は水中の音速に近づいていくという結果も得られた。このことから、超音波を発生させて伝播速度を測定するという方法でボイド率の測定を行うという方法を開発した。現在この測定方法は特許申請中である。

時間経過した気液混相流中の目に見えない粒子が塵か気泡か判断するため、防塵室で超純水を用いて実験を行うことでナノバブルの存在の証明に近づくと考えられる。

参考文献

[1] 亀田正治 「気泡を含む液体中を伝わる圧力波」

https://www.jsme.or.jp/fed/Old/newsletters/2003_1/1-2.html#12

[2] 森北出版株式会社 「混相流計測法」 日本原子力学会編

謝辞

本実験を行うにあたり、河村良行教授をはじめ、機械科の先生方にはお世話になりました。特に、江頭竜准教授、江頭研究室の皆様のご指導、ご鞭撻のおかげでここまで実験を行うことが出来ました。また、高曾徹先生のご教授のおかげで様々な方法での実験が出来ました。また、モノづくりセンターの職員の皆様には工作機械の扱い方などをご教授していただき、大変お世話になりました。

ここに感謝の意を表します。大変ありがとうございました。

付録

- 付録 1 気液混相流中の気泡の体積弾性率
- 付録 2 断熱変化の証明
- 付録 3 静電容量の測定
- 付録 4 特許申請資料

付録 1 気液混相流中の気泡の体積弾性率

気液混相流中の気泡破裂による熱のやり取りは、等温変化と断熱変化の2種類の考え方がある。

等温変化の場合

空気の圧力 P [Pa]、空気の体積 V [m^3]、物質量 n [mol]、気体定数 R [J/k・mol]、絶対温度 T [K]を用いて、ボイル・シャルルの法則より、

$$PV = nRT$$
$$P = \frac{nRT}{V} \quad (1)$$

と表すことが出来る。
体積弾性率 K [Pa]は

$$K = -V \frac{dP}{dV} \quad (2)$$

と定義する。

式 (1) を微分して式 (2) に代入すると

$$= -VnRT \left(-\frac{1}{V^2} \right)$$
$$= \frac{nRT}{V}$$

となり、 $K = P$ となる。

断熱変化の場合

等温操作で定義したものと、比熱比 γ を用いてポアソンの法則より、

$$PV^\gamma = C \quad (C \text{ は定数})$$
$$P = \frac{C}{V^\gamma} \quad (3)$$

と表すことが出来る。

式 (3) を微分して式 (2) に代入すると

$$\begin{aligned} &= -VC(-\gamma)V^{\gamma-1} \\ &= \gamma CV^{-\gamma}VV^{-1} \\ &= \gamma \frac{C}{V^{\gamma}} \end{aligned}$$

となり、 $K = \gamma P$ となる。

γ は等温変化の場合は1、断熱変化の場合は1.4となる。

ここで空気は1気圧(101300Pa)で考えるので、体積弾性率は等温変化で 1.0×10^5 [Pa], 断熱変化で 1.4×10^5 [Pa]である。

付録 2 断熱変化の証明

次にこの気泡はどちらの変化をしているかを考える必要がある。
気泡半径 r [m]、表面張力 γ [N/m] を用いて、ヤング・ラプラスの式より、

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \text{ [Pa]} \quad (4)$$

と表すことが出来る。

水の表面張力 7.3×10^{-2} [N/m]、マイクロバブルの径 50 [μm] を用いて、水と気泡の圧力差を計算する。

これらを (4) に代入すると、

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{2 \times 0.073}{50 \times 10^{-6}} \\ &= 2920 \text{ [Pa]} \end{aligned}$$

となり、混相流中の気泡の内部と外部の圧力差は 0.03 気圧である。このことから気泡内部と外部で圧力差はほとんど無いと言える。

次に、気泡内部から出る熱量 Q_1 と増えた内部エネルギー Q_2 の比較を行う。空気の熱伝導率 λ [w/m·K]、半径 r [m]、温度 T [K]、時間 τ [s]、空気の密度 ρ [kg/m³]、空気の比熱 c [J/m·K] を用いて比較すると、

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\frac{4}{3} \pi r^3 \rho c T}{\lambda \frac{T}{r} 4 \pi r^2 \tau} \quad (5)$$

となる。消せる文字があるので整理すると、

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{r^2 \rho c}{3 \lambda \tau} \quad (6)$$

となり、半径 25×10^{-6} [m]、空気の密度 1.29 [kg/m³]、空気の比熱 1000 [J/m³·K]、空気の熱伝導率 0.0257 [w/m³·K]、時間 10×10^{-6} (s)を(6)に代入すると、

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{(25 \times 10^{-6})^2 \times 1.29 \times 1000}{3 \times 0.0257 \times 10 \times 10^{-6}}$$
$$= 1.05$$

となる。比が約1となり、等温変化とも断熱変化とも考えることができる。図6.4より断熱変化で考えたほうが誤差は小さいため、断熱変化で考えた。

付録 3 静電容量の測定

エヌエフ回路設計ブロックさんからお借りした静電容量式変位計を用いて、水、空気、気液混相流（マイクロバブル）の静電容量を測定する。

以下に、江頭竜准教授、江頭研究室の皆様に発表したパワーポイントを貼り付ける。

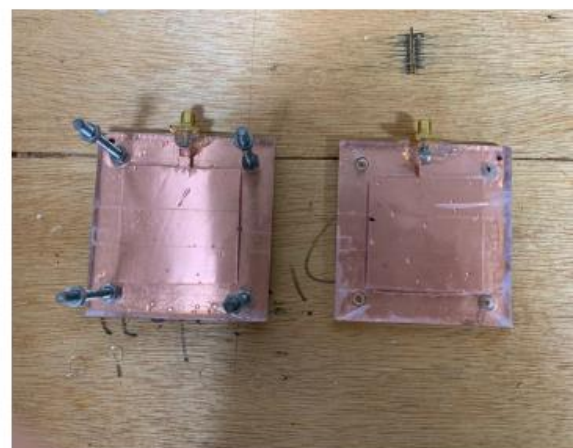
3.1. 静電容量式変位計を用いた静電容量の測定

- 江頭研究室からお借りしたマイクロバブル発生器と、エヌエフ回路設計ブロックさんからお借りした静電容量式変位計を用いて、水、空気、気液混相流（マイクロバブル）の静電容量を測定する。
- 平行平板での静電容量の定義は $c = \frac{\epsilon S}{d}$ である。
- 空気の比誘電率は約1であり、水の比誘電率は約80で変化は80倍である。

3.1.1. 作った電極を用いた静電容量の測定

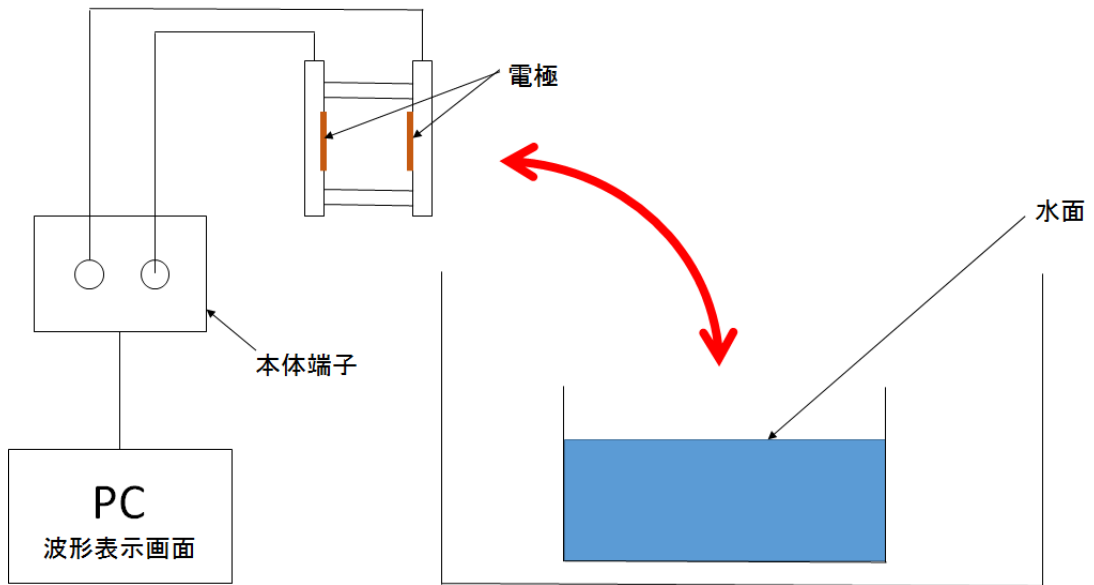
自分たちで製作した電極を用いて、空気、水、混相流の静電容量を測定。

箱の中に水を張り、その中に電極を出し入れさせて空気と水の静電容量を測定し、水に入れた状態のままマイクロバブルを発生させた。



電極

実験図

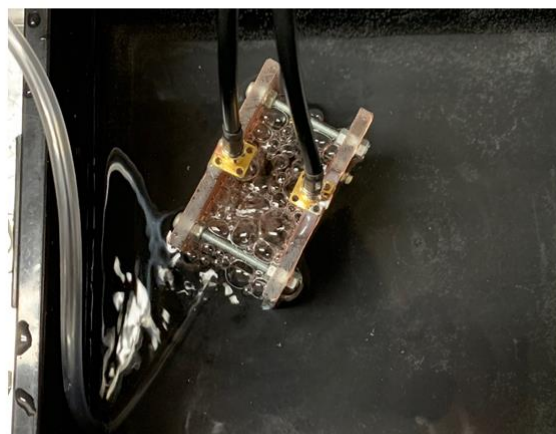


空気が0.8で水が24.177となり、変化は30倍であった。

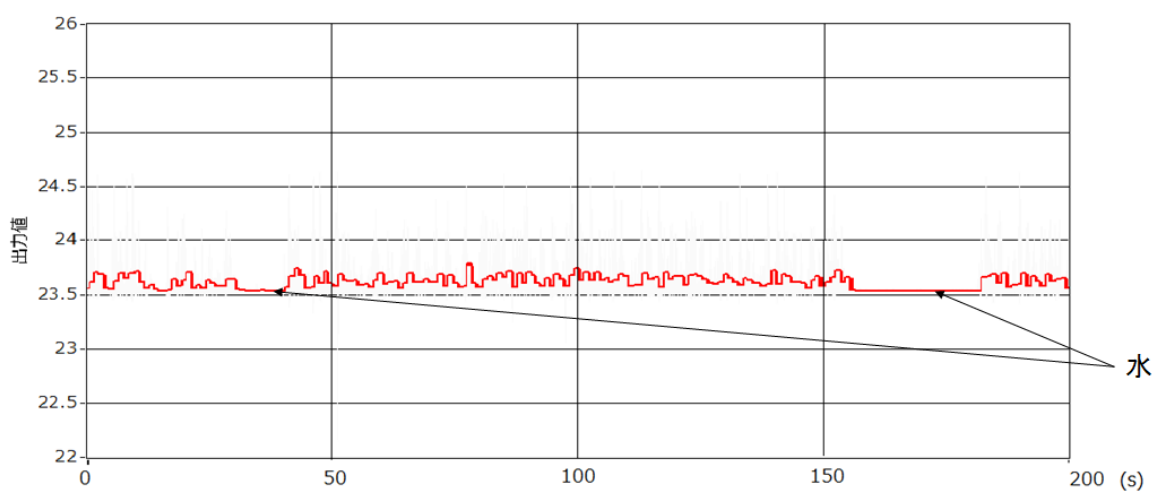
3.1.2. 一般に売ってある熱帯魚用のエアポンプを用いてマイクロバブルではなく、泡の大きさを覚えて静電容量の測定。



エアポンプ



エアポンプを用いた実験様子



エアポンプの泡のときの静電容量

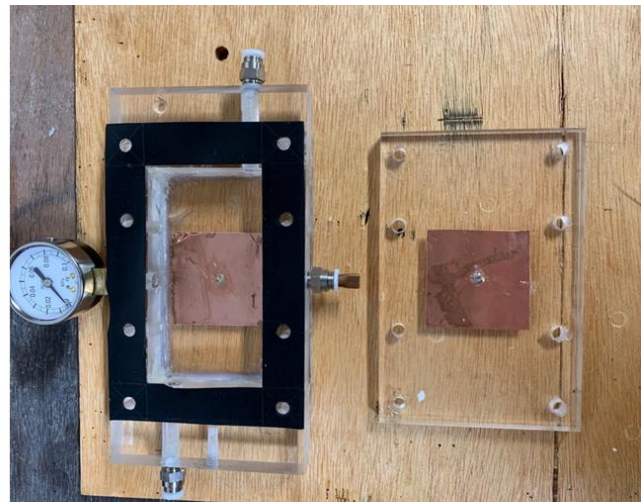
エアポンプで泡を発生させている時と水の状態の時で変化は見られたが、空気が入っている状態の方が静電容量が大きくなり、理論と逆になったため解析を断念した。

3.1.3.作った電極を用いた静電容量の測定

自分たちで製作した電極を用いて空気、水、混相流の静電容量を測定。

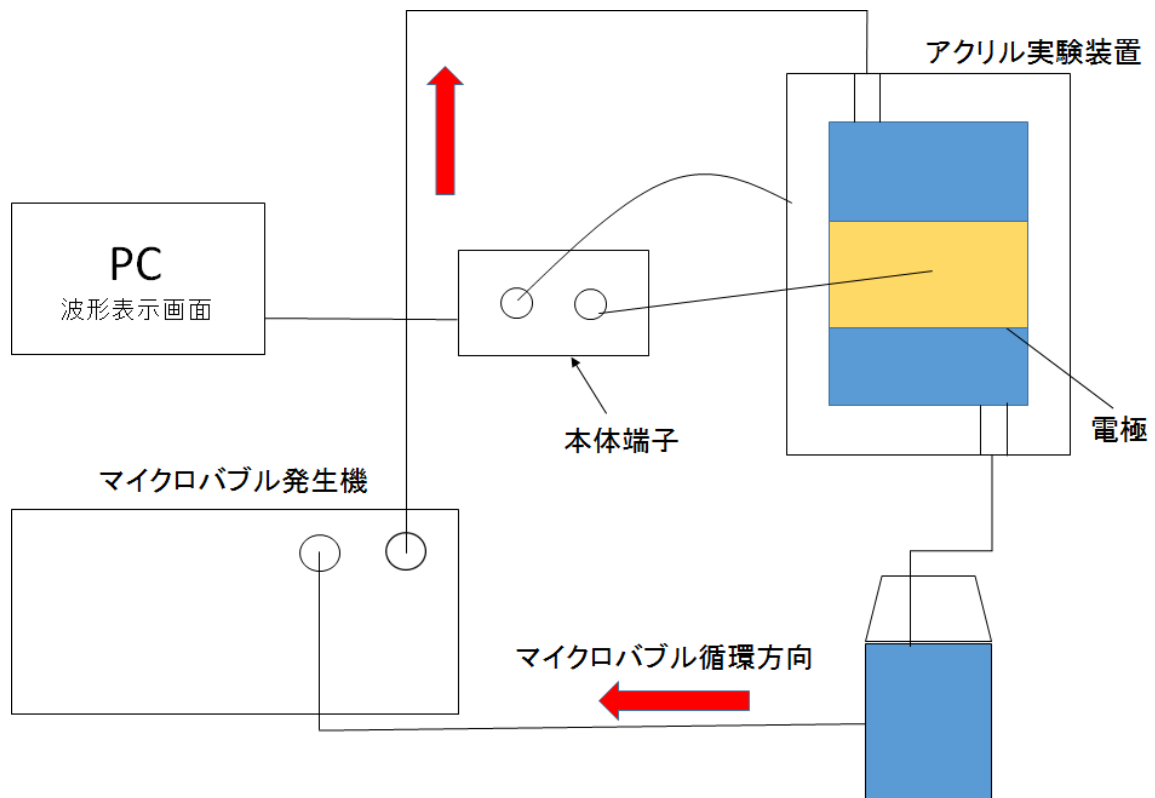
縦110mm 横60mm 高さ20mm のアクリル容器内に水をためて一様なマイクロバブルを発生させた。

中心の銅板は縦50mm 横50mmである。

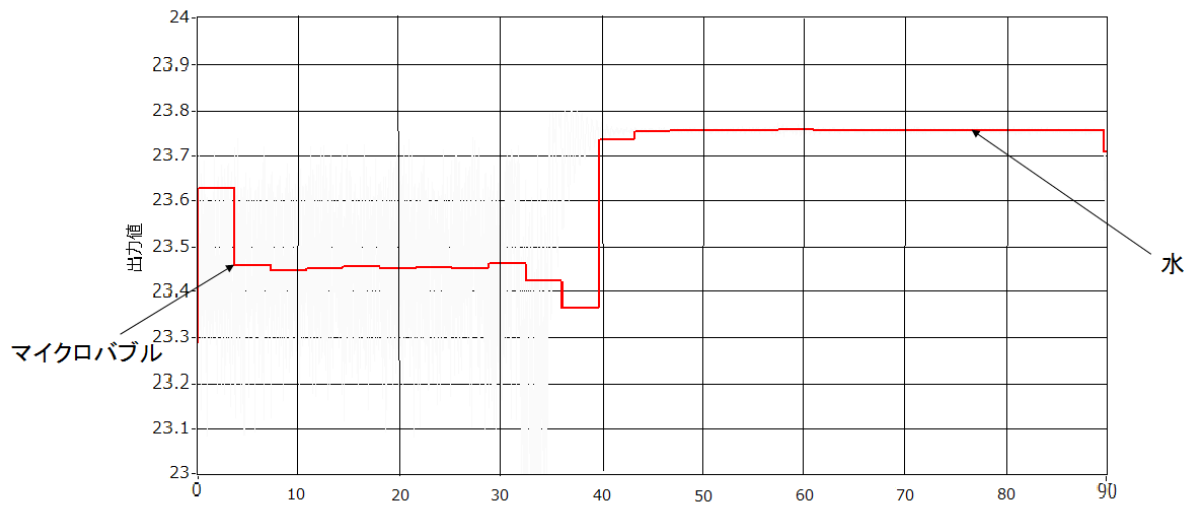


電極

実験図



静電容量式変位計を用いた静電容量の測定の装置概略

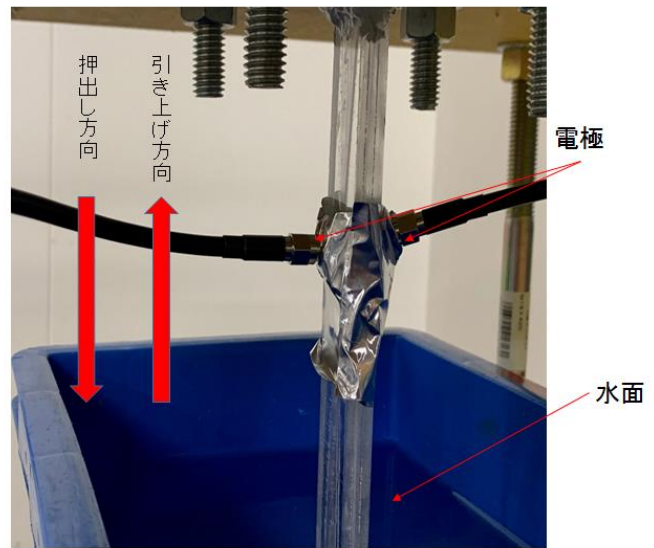


マイクロバブルから水の静電容量

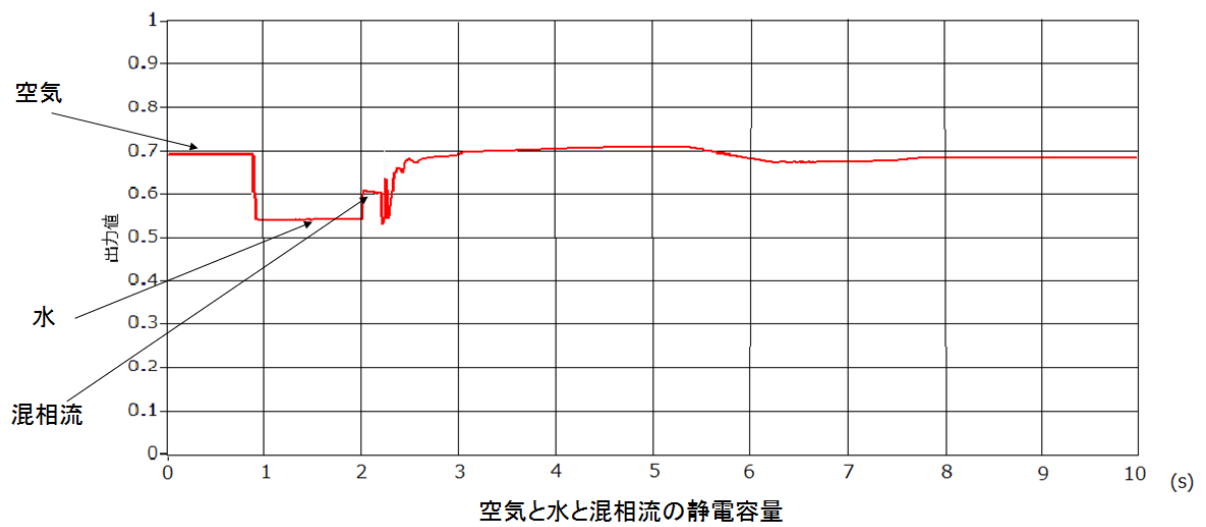
3.1.4.エアシリンダのノズル部の静電容量の測定

エアシリンダのノズル部の外側に電極を貼り付け、空気、水、混相流の静電容量を測定。

青の箱の中に水を張ってノズルの先端を水面に付けて引き上げ方向に気圧をかけることで水を吸い上げてから、押し出し方向へ1MPaをかけて水を押し出す。この時、ノズル内ではキャビテーションの影響で混相流が発生している。



ノズルの外側に貼り付けた電極



まとめ

今回の実験で空気, 水, 気液混相流(マイクロバブル)で静電容量の差が見られたが, 計測結果に誤差や逆の結果が出ることもあった。

正確な数値を出すためには, 時間をかけて実験装置の改良, 解析を行う必要がある。

付録 4 特許申請資料

本研究で行った，超音波伝播速度によるボイド率計測法は特許申請中である。
特許申請に用いた資料を次に示す。