

平成23年度 戦略的基盤技術高度化支援事業

「半導体製造装置用クランプ式超音波流量計の開発」

研究開発成果等報告書

平成25年 3月

委託者 内閣府沖縄総合事務局

委託先 国立大学法人琉球大学

再委託先 株式会社琉SOK

再委託先 独立行政法人産業技術総合研究所

目次

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標
2. 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）
3. 成果概要
4. 当該プロジェクト連絡窓口

第2章 本論

1. ガイド波の解析と基礎実験
2. 流量計本体の設計と試作
3. 小型演算回路の開発
4. 温度試験
5. 電磁ノイズ試験

第3章 全体総括

参考文献

第1章 研究開発の概要

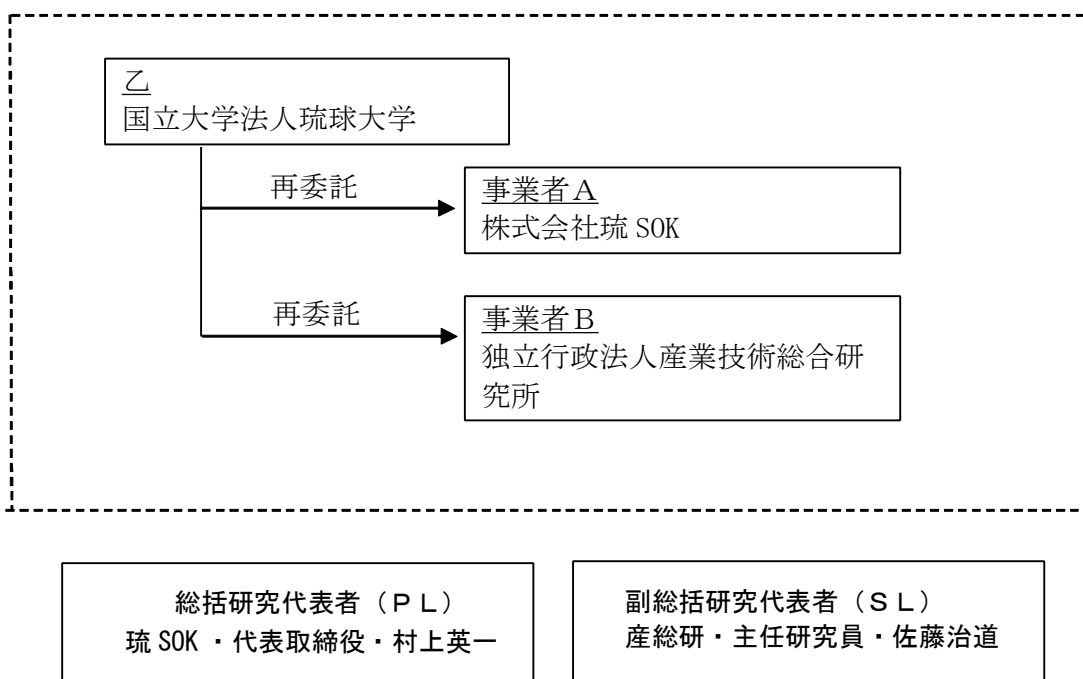
1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

本事業の特定研究開発等計画では、非接触、後付け(クランプ式)、高精度(誤差±1%)の流量計を開発することを最終目的としているが、本年度はガイド波を活用した非クランプ式流量計の設計・一次試作を行い、小型演算回路の開発、電磁ノイズ試験及び温度試験の実施などを 行うことを目的とする。

3次元実装は研磨、洗浄、レジスト塗布工程が何度も繰り返されるため、これら薬液の精密流量制御が重要な課題である。一方、半導体製造装置には多くの流量計が用いられているが、研磨工程における研磨剤供給、洗浄工程における洗浄液生成、フォトリソ工程におけるフォトリソ液塗布などでの精密流量制御に用いられる流量計が存在しない。そこで、新型流量計を開発し、実装技術の小型・高密度集積化、低コスト化を図る。

2. 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

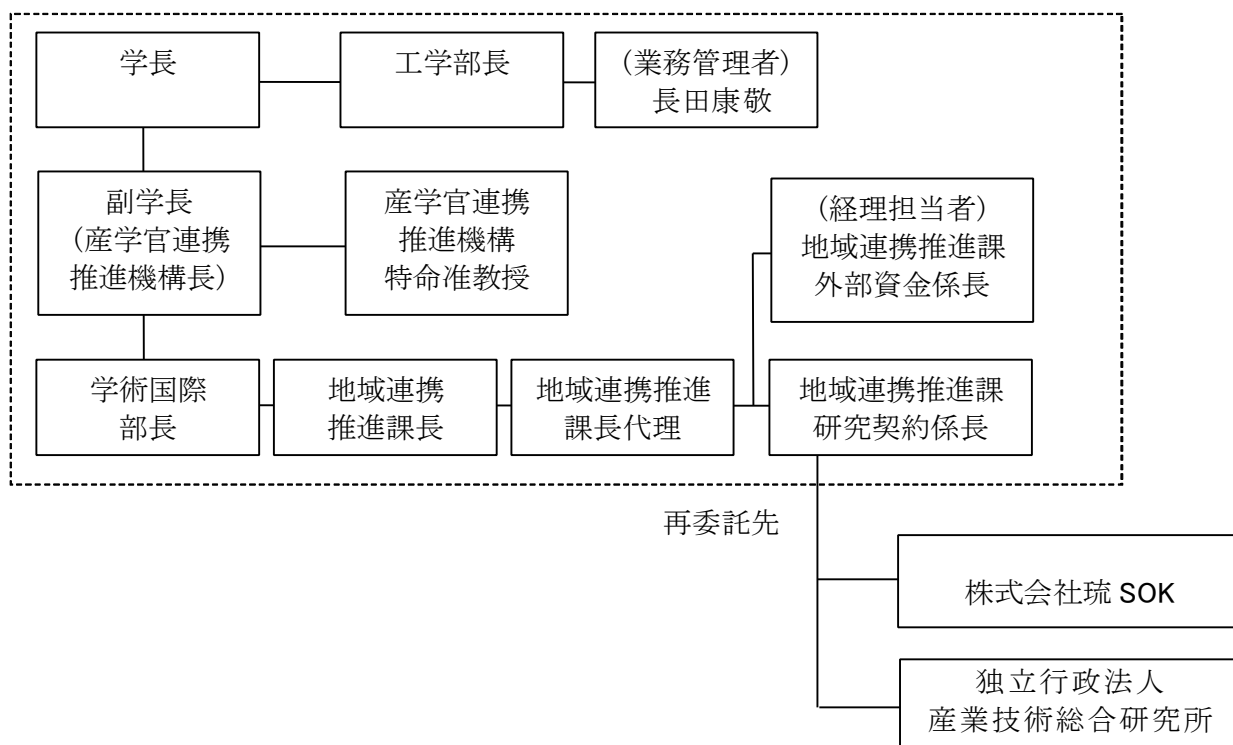
(1) 研究組織



(2) 管理体制

①事業管理者

[国立大学法人琉球大学]



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】 国立大学法人琉球大学

①管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長田 康敬	工学部 電気電子工学科 教授	⑥
宫里 大八	産学官連携推進機構 特命准教授	⑥
山内 未実	学術国際部地域連携推進課 研究契約係長	⑥
比嘉 康子	学術国際部地域連携推進課 外部資金係長	⑥

②研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
長田 康敬(再)	工学部 電気電子工学科 教授	③

【再委託先】

株式会社琉 SOK

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
村上 英一	代表取締役	① ②、③、④、⑤
鈴木 吉昭		①、②、③、④、⑤
星 之雄		③、④、⑤
高瀬 和之		②、④、⑤

独立行政法人産業技術総合研究所

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
明渡 純	先進製造プロセス研究部門 上席研究員	① ②
佐藤 治道	先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ 主任研究員	①、②

（４）他からの指導・協力者名及び指導協力事項
（研究開発推進委員会 委員）

氏名	所属・役職	備考
村上 英一	株式会社琉 SOK 代表取締役	PL
佐藤 治道	独立行政法人産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 集積加工研究グループ 主任研究員	SL
鈴木 吉昭	株式会社琉 SOK	再委託先
明渡 純	先進製造プロセス研究部門 上席研究員	再委託先
長田 康敬	琉球大学工学部 電気電子工学科 教授	事業管理者
坂口 佳規	東京エレクトロン九州株式会社 資材購買グループ長	アドバイザー
長谷川 公二	大日本スクリーン製造株式会社 装置技術部長	アドバイザー

3. 成果概要

本事業の特定研究開発等計画では、非接触、後付け(クランプ式)、高精度(誤差±1%)の流量計を開発することを最終目的としているが、本年度はガイド波を活用した非クランプ式流量計の設計・一次試作を行い、小型演算回路の開発、電磁ノイズ試験及び温度試験の実施などを行うことを目的とする。

多くの流量計が開発・販売されているが、半導体製造装置の研磨工程における研磨剤供給、洗浄工程における洗浄液生成、フォトリソ工程におけるフォトリソ液塗布などでの精密流量制御に用いられる流量計は存在しない。

例えば、研磨剤に研磨されてしまうような流量計や、流量計内部に研磨剤が堆積してしまうような流量計は使えないし、液の漏れやシステム全体の圧を変えてしまうような流量計も実用上の問題がある。半導体製造装置用なので、当然のこのように、コンタミ(汚染)の危険性がある流量計も使えない。これらの問題をクリアできる流量計はクランプ式の超音波流量計だが、3次元実装の精密流量制御に用いるには精度が足りない。これは、半導体製造に使われている液体搬送用のチューブが細く、超音波の送受信子の間隔が短くなることに起因する。そこで、その欠点を解消し、測定精度を改善するため、ガイド波を用いたクランプ式超音波流量計の試作機を開発した。

ガイド波は回折による信号の減少がないため長距離伝搬する。その性質を利用すれば精度を向上させることができ、かつ従来は不可能であった細さのチューブに使える流量計になる。ただし、ガイド波は速度分散を持つので、周波数の選定が重要である。

また、ガイド波はチューブとチューブ内部の液体の連成振動であるので、流速の変化を検出する仕組みが必要になる。解析の結果、流速の変化がガイド波の伝搬速度の変化として測定できるモードが判明したので、その条件を用いて、かつ、励起・検出効率が低い送受信子の取り付け角度等を解析し、試作機を作成した。

それと並行して専用の電子回路も設計、試作し、送受信子と組み合わせて流量試験も行い、ナノテク展2012にも出品した。数年後には商品化し、3次元実装技術の小型化・高密度集積化、低コスト化に貢献する。

4. 当該プロジェクト連絡窓口

国立大学法人琉球大学
産学官連携推進機構 特命准教授 宮里大八
〒903-0213 沖縄県西原字千原1番地
TEL (098)895-8599 FAX (098)-895-8957
Email daiya@lab.u-ryukyu.ac.jp

第2章 本論

1. ガイド波の解析と基礎実験

琉SOKおよび産総研の担当者が、パイプを伝搬するガイド波の解析やシミュレーション(固体-液体FEM, 熱流体FEM等)をおこない、流量計の設計を行うのに必要な情報(周波数、超音波送受信子の材質、取り付け角度、界面の材質、軸方向の長さ、温度の影響等)を得た。

さらに、インピーダンス・アナライザ等を用いて超音波送受信子に利用する圧電素子の特性評価と選定を行うとともに、超音波送受信機や任意波形発生装置等を用いて、基礎実験および最適な駆動波形の探索を行った。さらに、実際に水を流してセンサーの基本特性を調べた。

初年度の目標として、一次試作機の設計と試作に必要な情報を提供した。

(1) 超音波伝搬解析の基礎

超音波(弾性波)には縦波と横波が存在する。媒質の振動が波の進行方向に対して平行であるものが縦波で、垂直であるものが横波である(図1-1)。縦波と横波は伝搬速度が異なり、等方体の伝搬速度(音速)は下式で表される。

$$\text{縦波音速: } v_1 = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad \text{横波音速: } v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

ラメ定数: λ , μ , 密度: ρ

式から分かるように縦波の方が速く、横波の音速は縦波の音速の半分程度となる媒質が多い。ここで、音速とは無限媒質内を伝搬する超音波の伝搬速度のことである。

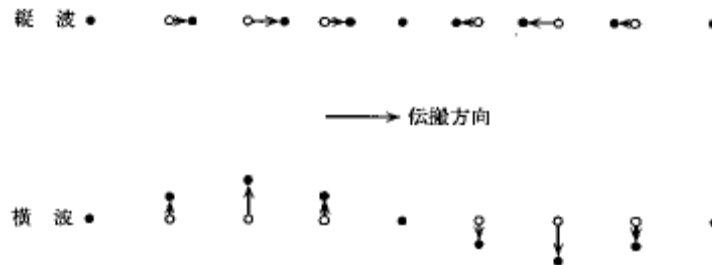


図 1.3 縦波と横波に伴う原子の変位

図 1-1 縦波と横波¹

媒質の大きさが有限であれば境界が存在し、境界では超音波が反射する。このとき、仮に縦波が入射しても反射波は縦波だけでなく横波も生じ、横波でも同様のことが起こる(図1-2)。この現象はモード変換と呼ばれる。一方、媒質の表面では応力がゼロという境界条件を満たさねばならない。そのため、縦波と横波が結合して伝搬する。媒質のサイズが波長より大きければ、縦波と横波が分離して観測できるが、波長程度の場合には縦波と横波が分離されず、縦波と横波が結合した波として伝搬する。そのような波をガイド波と呼ぶ。ガイド波は媒質の形状により独特の名称を持つものもあり、例えば、媒質が無限平板であれば、平板内を伝搬する弾性波を板波と呼ぶ(図1-3)。板波が速度分散を持つのはそのような理由による。一方、超音波の振幅の減少は回折(図1-4)と減衰によるが、ガイド波は回折の影響は織り込み済みなので、いわばエネルギーを媒質内に閉じ込めた状態になり、遠方まで伝搬するという特徴を持つ。

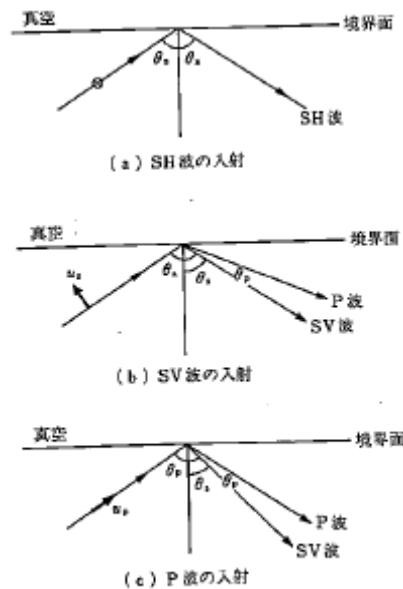


図 1-18 境界面に入射する弾性波

図 1-2 媒質境界での反射ⁱⁱ
P 波が縦波で、SH 波と SV 波が横波

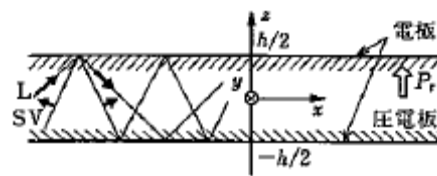


図 2-11 圧電板の中を伝搬するラム波

図 1-3 板波の概念図ⁱⁱⁱ
L が縦波

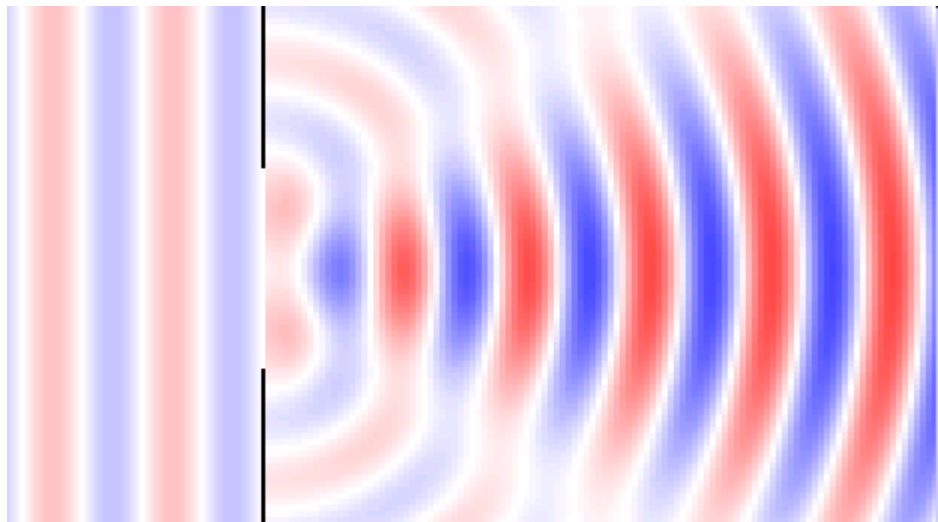


図 1-4 回折^{iv}

ガイド波は伝搬速度に周波数依存性があるが、伝搬距離が長いという特徴がある。一方、従来のクランプ式流量計を外径が 1/4 インチ程度の細いチューブに取り付けると、伝搬距離が短くなりすぎ精度が低くなり、反射角の温度依存性もあり、その点でも精度が低くなってしまっている(図 1-5)。そこで、ガイド波を用いた流量計を開発する。ガイド波を流量計に用いると、伝搬距離を長くでき、温度依存性も軽減できる可能性が高い(図 1-6)。

従来型

- ・送受信間の距離が短いので精度がでない。
- ・温度変化に弱い

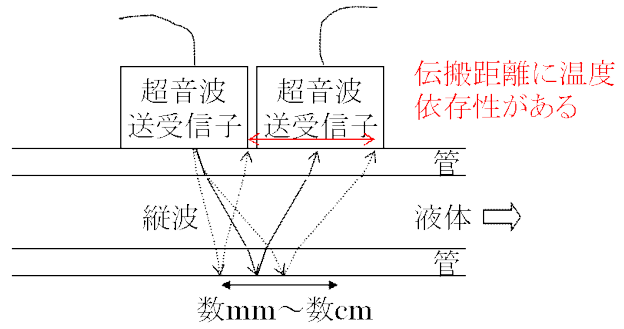


図 1-5 従来型の超音波流量計

新型

- ・従来型の欠点が解消できる。
- ・周波数選定が重要

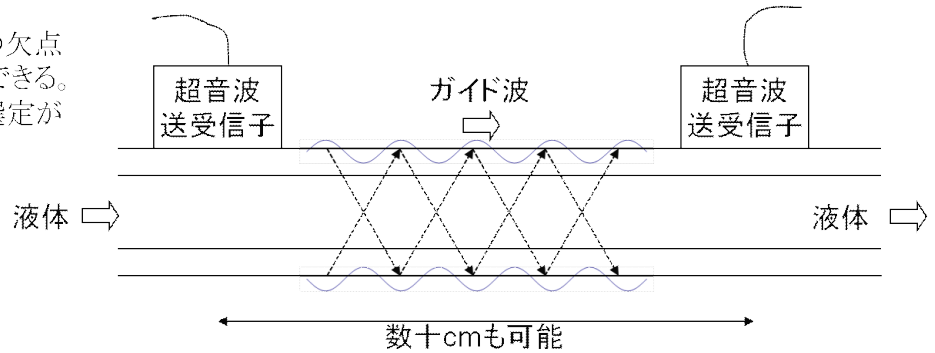


図 1-6 ガイド波流量計のコンセプト

今回の流量計の測定対象はパイプである。パイプを伝搬する超音波も、媒質の大きさが有限であることから、板波と同様の現象が生じる。ただし、板波より解析が複雑である。そこで、以下の手法で解析を行った。

計算に用いたモデルを図 1-7 に示す。パイプ部分の変位を回転が無い($\nabla \times \mathbf{u}_l = 0$)縦変位 \mathbf{u}_l と発散が無い($\nabla \cdot \mathbf{u}_s = 0$)せん断変位 \mathbf{u}_s に分解し、それぞれの変位をスカラーポテンシャルとベクトルポテンシャルを用いて表すと次式となる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_s = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H}$$

液体部分に関しては、せん断変位はないので、次式となる。

$$\mathbf{u}^{fluid} = \nabla \phi_f$$

各ポテンシャルはそれぞれ、次式で表される波動方程式を満たす。

$$v_1^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi / \partial t^2$$

$$v_2^2 \nabla^2 \mathbf{H} = \partial^2 \mathbf{H} / \partial t^2$$

$$v_f^2 \nabla^2 \phi = \partial^2 \phi_f / \partial t^2$$

$$v_1^2 = (\lambda + 2\mu) / \rho$$

$$v_2^2 = \mu / \rho$$

$$v_f^2 = \lambda_f / \rho_f$$

ここで、 v_f は流体の音速を示す。円柱座標のラプラシアンは次式で表される [2] ので、

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}$$

$$(\nabla^2 \mathbf{H})_r = \nabla^2 H_r - \frac{H_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_\theta}{\partial \theta}$$

$$(\nabla^2 \mathbf{H})_\theta = \nabla^2 H_\theta - \frac{H_\theta}{r^2} + \frac{2}{r^2} \frac{\partial H_r}{\partial \theta}$$

$$(\nabla^2 \mathbf{H})_z = \nabla^2 H_z$$

ポテンシャルを次式で表現し、

$$\phi = f(r) \cos n\theta \cos(\omega t - \xi z)$$

$$H_r = g_r(r) \sin n\theta \sin(\omega t - \xi z)$$

$$H_\theta = g_\theta(r) \cos n\theta \sin(\omega t - \xi z)$$

$$H_z = g_3(r) \sin n\theta \cos(\omega t - \xi z)$$

$$\phi_f = f_f(r) \cos n\theta \cos(\omega t - \zeta z)$$

$$\zeta = \omega \xi / (\omega + \nu \xi)$$

波動方程式に代入すると次式が得られる。ここで、 ν は流体の流速である。流速の分布は無視して、周波数は一定で、流体部分のガイド波のみが位相速度

$V_f = V - \nu = (\omega / \xi) - \nu$ で伝搬しているとしてモデル化した(図 1-8)。これは、波面が一致する条件である。

$$(\nabla^2 + \omega^2 / \nu_1^2) \phi = 0$$

$$(\nabla^2 + \omega^2 / \nu_2^2) H_z = 0$$

$$(\nabla^2 - 1/r^2 + \omega^2 / \nu_2^2) H_r - (2/r^2)(\partial H_\theta / \partial \theta) = 0$$

$$(\nabla^2 - 1/r^2 + \omega^2 / \nu_2^2) H_\theta + (2/r^2)(\partial H_r / \partial \theta) = 0$$

$$(\nabla^2 + \omega^2 / \nu_f^2) \phi_f = 0$$

ここで、次式で表される差分演算子を定義すると、

$$B_{n,x} = \left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} + \left(1 - \frac{n^2}{x^2} \right) \right]$$

次式となる。

$$B_{n,ar}[f] = 0$$

$$B_{n,\beta r}[g_3] = 0$$

$$B_{n+1,\beta r}[g_r - g_\theta] = 0$$

$$B_{n-1,\beta r}[g_r + g_\theta] = 0$$

$$B_{n,\chi r}[\phi_f] = 0$$

$$\alpha^2 = \omega^2 / \nu_1^2 - \xi^2$$

$$\beta^2 = \omega^2 / \nu_2^2 - \xi^2$$

$$\chi^2 = \omega^2 / \nu_f^2 - \zeta^2$$

上式の解は、パイプ部分に関しては、 $r > 0$ 、流体部分に関しては、 $r \geq 0$ であるので、 α 、 β 、 χ がそれぞれ実数であれば、Bessel 関数(J , Y)、虚数であれば変形 Bessel 関数(I , K)で表される。そこで、 $\alpha_1 = |\alpha|$ 、 $\beta_1 = |\beta|$ 、 $\chi_1 = |\chi|$ とおき、流体部分に関しては、 $r = 0$ でも有意な解が得られる条件も加味することにより、次式が得られる。

$$f = AZ_n(\alpha_1 r) + BW_n(\alpha_1 r)$$

$$g_3 = A_3 Z_n(\beta_1 r) + B_3 W_n(\beta_1 r)$$

$$2g_1 = (g_r - g_\theta) = 2A_1 Z_{n+1}(\beta_1 r) + 2B_1 W_{n+1}(\beta_1 r)$$

$$2g_2 = (g_r + g_\theta) = 2A_2 Z_{n-1}(\beta_1 r) + 2B_2 W_{n-1}(\beta_1 r)$$

$$f_f = A_f V_n(\chi_1 r)$$

ただし、 Z 、 W 、 V はそれぞれの α 、 β 、 χ が実数であれば、 J 、 Y 、 I 虚数であれば、 K 、 I である。ゲージ不変性により、3個の g_i ($i=1, 2, \text{ or } 3$)のうち、1個は0とおけるので、 $g_2 = 0$ とおくことにより、次式となる。

$$g_r = -g_\theta = g_1$$

さらに、円柱座標の勾配と回転は次式である。

$$\begin{aligned}
(\nabla\phi)_r &= \frac{\partial\phi}{\partial r}, \quad (\nabla\phi)_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial\phi}{\partial\theta}, \quad (\nabla\phi)_z = \frac{\partial\phi}{\partial z} \\
(\nabla \times \mathbf{H})_r &= \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial\theta} - \frac{\partial H_\theta}{\partial z} \\
(\nabla \times \mathbf{H})_\theta &= \frac{\partial H_r}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial r} \\
(\nabla \times \mathbf{H})_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(rH_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial\theta}
\end{aligned}$$

これらの結果から、変位場は次式となる。

$$\begin{aligned}
u_r &= [f' + (n/r)g_3 - \xi g_1] \cos n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
u_\theta &= [-(n/r)f - \xi g_1 - g_3'] \sin n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
u_z &= [\xi f - g_1' - (n+1)(g_1/r)] \cos n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
u_r^{fluid} &= f_f' \cos n\theta \cos(\omega t - \zeta z) \\
u_\theta^{fluid} &= -(n/r)f_f \sin n\theta \cos(\omega t - \zeta z) \\
u_z^{fluid} &= \zeta f_f \cos n\theta \cos(\omega t - \zeta z)
\end{aligned}$$

ただし、ここで、プライム記号は r の偏微分を意味する。ひずみと変位の関係式は次式で、

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{rr} &= \partial u_r / \partial r \\
\varepsilon_{rz} &= (1/2)[\partial u_r / \partial z + \partial u_z / \partial r] \\
\varepsilon_{r\theta} &= (1/2) \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial\theta} \right] = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial\theta} \right]
\end{aligned}$$

応力とひずみの関係式は次式である。

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{rr} \\
\sigma_{rz} &= 2\mu\varepsilon_{rz} \\
\sigma_{r\theta} &= 2\mu\varepsilon_{r\theta} \\
\sigma_{rr}^{fluid} &= \lambda_f \Delta_f \\
\Delta &= \nabla^2 \phi = -\omega^2 / v_p^2 \phi = -(\alpha^2 + \xi^2) f \cos n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
\Delta_f &= \nabla^2 \phi_f = -\omega^2 / v_f^2 \phi_f = -(\chi^2 + \zeta^2) f_f \cos n\theta \cos(\omega t - \zeta z)
\end{aligned}$$

よって、

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \lambda\Delta + 2\mu\varepsilon_{rr} = \lambda\nabla^2 \phi + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r} \\
&= \{-\lambda(\alpha^2 + \xi^2)f + 2\mu[f'' + \frac{n}{r}(g_3' - \frac{g_3}{r}) - \xi g_1']\} \cos n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
\sigma_{r\theta} &= 2\mu\varepsilon_{r\theta} = \mu \left[r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u_\theta}{r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial\theta} \right] = \mu \left[\frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_r}{\partial\theta} \right] \\
&= \mu \left\{ -\frac{2n}{r} \left(f' - \frac{f}{r} \right) - (2g_3'' + \beta^2 g_3) + \xi \left(\frac{n+1}{r} g_1 - g_1' \right) \right\} \sin n\theta \cos(\omega t - \xi z) \\
\sigma_{rz} &= 2\mu\varepsilon_{rz} = \mu \left[\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right] \\
&= \mu \left\{ 2\xi f' - \left[\frac{n}{r} g_1' + \left(\frac{n(n+1)}{r^2} - \beta^2 + \xi^2 \right) g_1 \right] + \frac{n\xi}{r} g_3 \right\} \cos n\theta \sin(\omega t - \xi z)
\end{aligned}$$

流体の応力は次式となる。

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr}^{fluid} &= \lambda_f \Delta_f = \lambda_f \nabla^2 \phi_f \\
&= -\lambda_f (\chi^2 + \zeta^2) f_f \cos n\theta \cos(\omega t - \zeta z)
\end{aligned}$$

ここで、境界条件は下記の通りである。

$$u_r = u_r^{fluid}, \quad \sigma_{rr} = \sigma_{rr}^{fluid}, \quad \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0 \quad \text{at } r = a$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0 \quad \text{at } r = b$$

境界条件に、上記変位や応力の式を代入すると次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} & c_{17} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} & c_{27} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} & c_{37} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} & c_{47} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} & c_{57} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} & c_{67} \\ c_{71} & c_{72} & c_{73} & c_{74} & c_{75} & c_{76} & c_{77} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ A_1 \\ A_3 \\ B \\ B_1 \\ B_3 \\ A_f \end{pmatrix} = 0$$

$$c_{11} = nZ_n(\alpha_1 a) - \alpha_1 \lambda_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{12} = -\xi a Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{13} = nZ_n(\beta_1 a)$$

$$c_{14} = nW_n(\alpha_1 a) - \alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{15} = -\xi a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{16} = nW_n(\beta_1 a)$$

$$c_{17} = [-nV_n(\chi_1 a) + \chi_1 \lambda_L a V_{n+1}(\chi_1 a)] \cos(\omega t - \zeta z) / \cos(\omega t - \xi z)$$

$$c_{21} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)a^2] Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{22} = -2\xi \beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1) Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{23} = 2n(n-1) Z_n(\beta_1 a) - 2\lambda_2 n \beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{24} = [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)a^2] W_n(\alpha_1 a) + 2\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{25} = -2\lambda_2 \xi \beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) + 2(n+1)\xi a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{26} = 2n(n-1) W_n(\beta_1 a) - 2n\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{27} = [\rho_f \omega^2 a^2 V_n(\chi_1 a) / (\rho v_2^2)] \cos(\omega t - \zeta z) / \cos(\omega t - \xi z)$$

$$c_{31} = -2n(n-1) Z_n(\alpha_1 a) + 2\lambda_1 n \alpha_1 a Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{32} = -\xi \beta_1 a^2 Z_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1) Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{33} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2] Z_n(\beta_1 a) - 2\lambda_2 \beta_1 a Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{34} = -2n(n-1) W_n(\alpha_1 a) + 2n\alpha_1 a W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{35} = -\lambda_2 \xi \beta_1 a^2 W_n(\beta_1 a) + 2\xi a(n+1) W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{36} = -[2n(n-1) - \beta^2 a^2] W_n(\beta_1 a) - 2\beta_1 a W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{37} = 0$$

$$c_{41} = 2n\xi a Z_n(\alpha_1 a) - 2\lambda_1 \xi \alpha_1 a^2 Z_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{42} = -n\beta_1 a Z_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2)a^2 Z_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{43} = n\xi a Z_n(\beta_1 a)$$

$$c_{44} = 2n\xi a W_n(\alpha_1 a) - 2\xi \alpha_1 a^2 W_{n+1}(\alpha_1 a)$$

$$c_{45} = -\lambda_2 n \beta_1 a W_n(\beta_1 a) + (\beta^2 - \xi^2)a^2 W_{n+1}(\beta_1 a)$$

$$c_{46} = n\xi a W_n(\beta_1 a)$$

$$c_{47} = 0$$

$$\begin{aligned}
c_{51} &= [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)b^2]Z_n(\alpha_1 b) + 2\lambda_1 \alpha_1 b Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{52} &= -2\xi\beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) + 2\xi b(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{53} &= 2n(n-1)Z_n(\beta_1 b) - 2\lambda_2 n\beta_1 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{54} &= [2n(n-1) - (\beta^2 - \xi^2)b^2]W_n(\alpha_1 b) + 2\alpha_1 b W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{55} &= -2\lambda_2 \xi\beta_1 b^2 W_n(\beta_1 b) + 2(n+1)\xi b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{56} &= 2n(n-1)W_n(\beta_1 b) - 2n\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{57} &= 0 \\
c_{61} &= -2n(n-1)Z_n(\alpha_1 b) + 2\lambda_1 n\alpha_1 b Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{62} &= -\xi\beta_1 b^2 Z_n(\beta_1 b) + 2\xi b(n+1)Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{63} &= -[2n(n-1) - \beta^2 b^2]Z_n(\beta_1 b) - 2\lambda_2 \beta_1 b Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{64} &= -2n(n-1)W_n(\alpha_1 b) + 2n\alpha_1 b W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{65} &= -\lambda_2 \xi\beta_1 b^2 W_n(\beta_1 b) + 2\xi b(n+1)W_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{66} &= -[2n(n-1) - \beta^2 b^2]W_n(\beta_1 b) - 2\beta_1 b W_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{67} &= 0 \\
c_{71} &= 2n\xi b Z_n(\alpha_1 b) - 2\lambda_1 \xi \alpha_1 b^2 Z_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{72} &= -n\beta_1 b Z_n(\beta_1 b) + (\beta^2 - \xi^2)b^2 Z_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{73} &= n\xi b Z_n(\beta_1 b) \\
c_{74} &= 2n\xi b W_n(\alpha_1 b) - 2\xi \alpha_1 b^2 W_{n+1}(\alpha_1 b) \\
c_{75} &= -\lambda_2 n\beta_1 b W_n(\beta_1 b) + (\beta^2 - \xi^2)b^2 W_{n+1}(\beta_1 b) \\
c_{76} &= n\xi b W_n(\beta_1 b) \\
c_{47} &= 0
\end{aligned}$$

よって、有意な解となるためには、この7×7の行列の行列式が0でなくてはならない。この解を数値的に計算することにより、ガイド波の位相速度が計算できる。流速 v を変化した時の位相速度もこの式から計算できる。

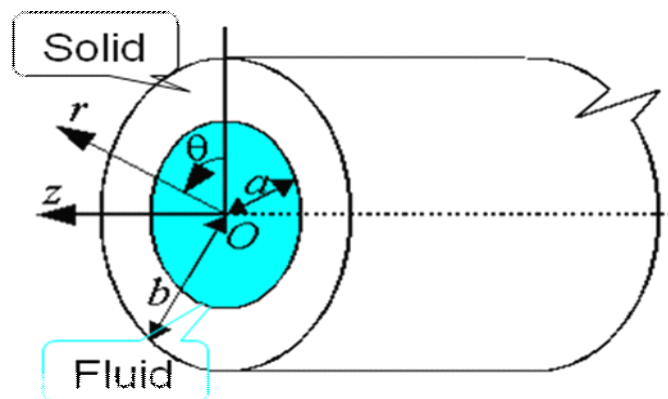


図 1-7 計算に用いたパイプのモデル

Wave front	
PFA	V, ω
Water	$Vf+v, \omega$
PFA	V, ω

図 1-8 流速のモデル化

今回の流量計のターゲットは肉厚 1mm の 1/4 インチおよび 3/8 インチの PFA なので、それらを伝搬するガイド波の位相速度を計算した (図 1-10, 1-11)。ただし、計算したのは、L(0, m) モードと F(1, m) モードのみである (図 1-12, 1-13)。L(0, m) モードは軸対称モードと呼ばれ、F(1, m) はベンディングモードと呼ばれることもある。ここで、実験的に観察されるガイド波の伝搬速度は群速度であるので、群速度も計算する。位相速度 (V) と群速度 (v_g) はそれぞれ下式となる。

$$V = \frac{\omega}{\xi}, \quad v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \xi}$$

よって、次式から群速度を計算した (図 1-14, 1-15)。

$$f \cong \frac{f_1 + f_2}{2}$$

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial \xi} \cong \frac{\omega_2 - \omega_1}{\xi_2 - \xi_1} = \frac{V_1 V_2 (f_2 - f_1)}{V_1 f_2 - V_2 f_1}$$

1/4 インチ、3/8 インチ共に 350kHz 近傍や 450kHz 近傍で群速度ピークとなる。よって、これらの周波数を用いるのが良いと考えられる。また、流速を変化させた時の群速度の変化を計算した結果が図 1-16 と 1-17 である。350kHz 近傍より 450kHz 近傍の方が流速感度がフラットな周波数域があるので、450kHz 近傍の方が周波数変化 (温度依存性) に強いと予想される。

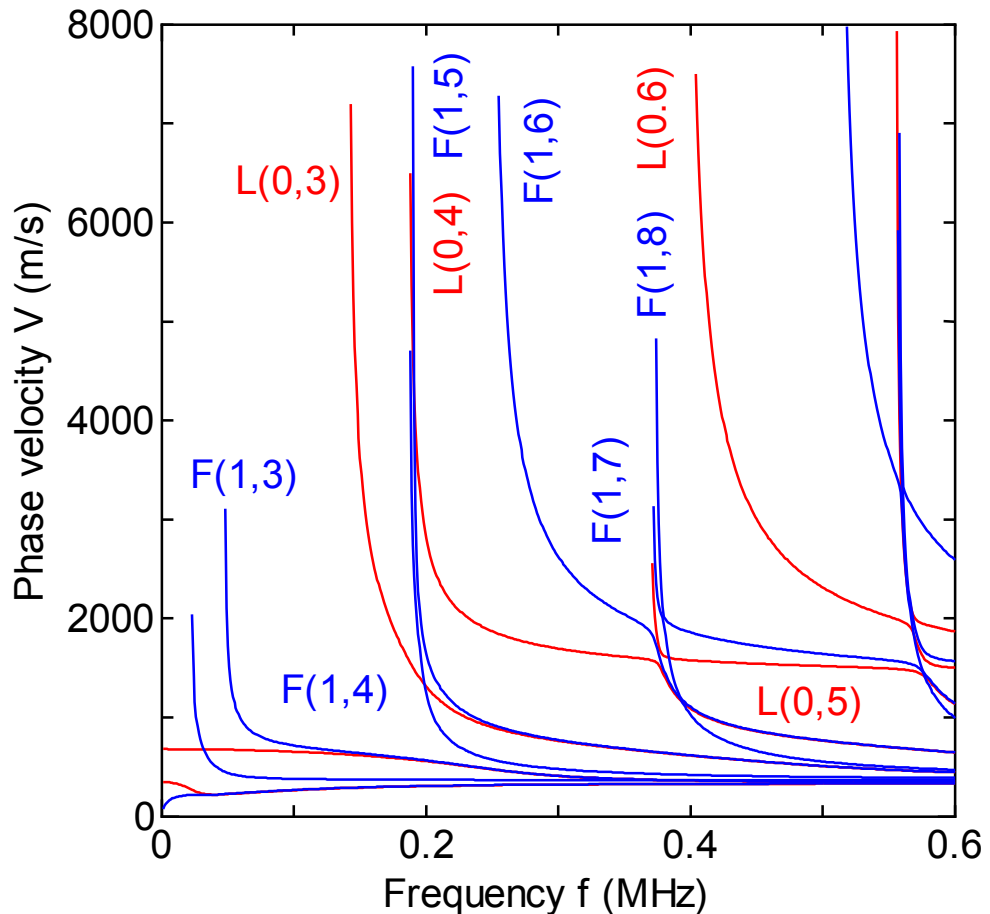


図 1-10 内部に静水を満たした肉厚 1mm の 1/4 インチ PFA を伝搬するガイド波の位相速度 L(0, m) モードと F(1, m) モードをプロットした。

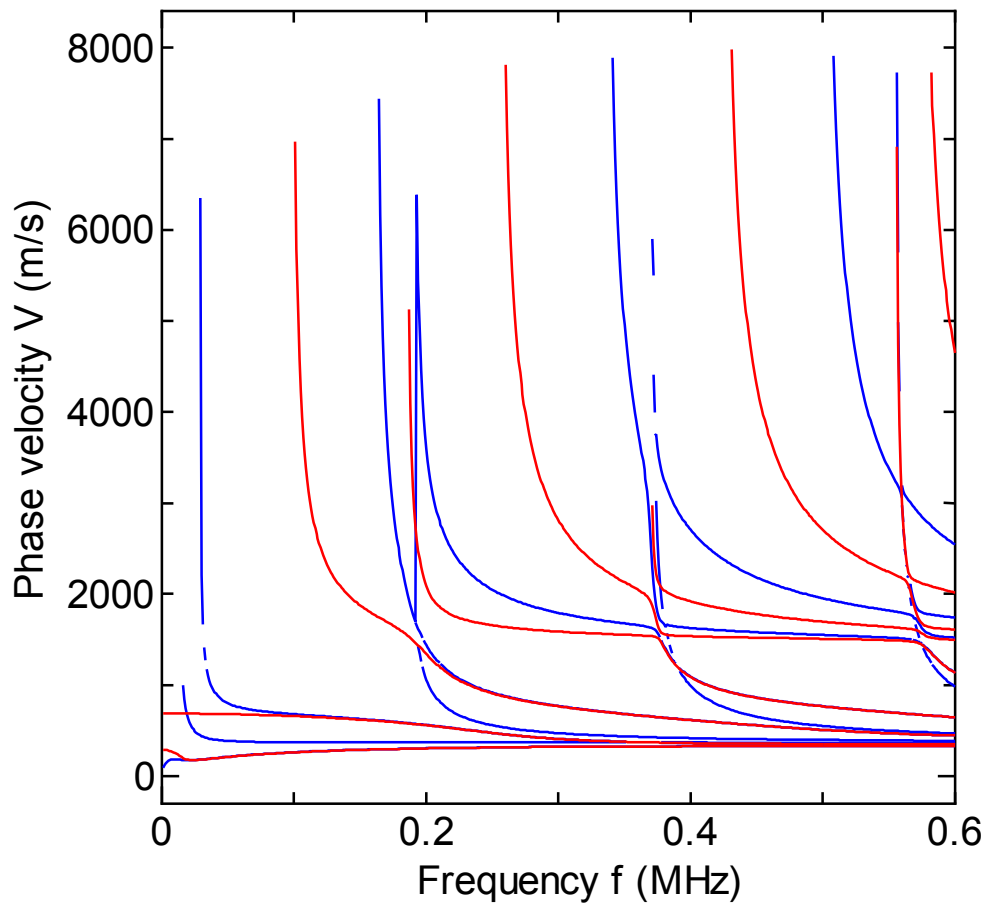


図 1-11 内部に静水を満たした肉厚 1mm の 3/8 インチ PFA を伝搬するガイド波の位相速度 $L(0, m)$ モードと $F(1, m)$ モードをプロットした。

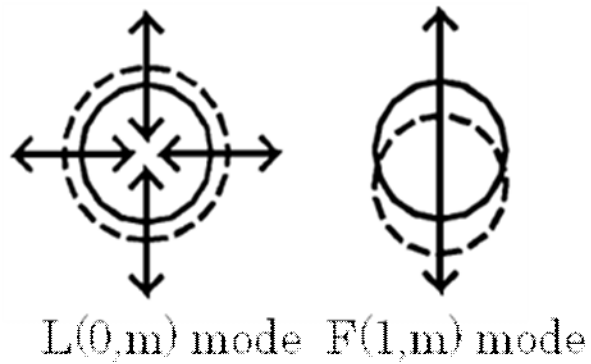


図 1-12 $L(0, m)$ モードと $F(1, m)$ モードの断面の概念図

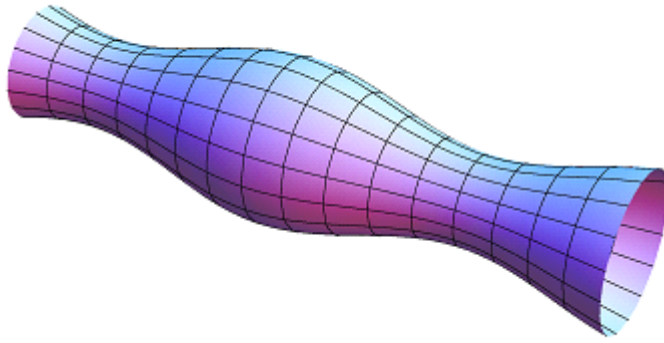


図 1-13 L(0, m) モードの概念図

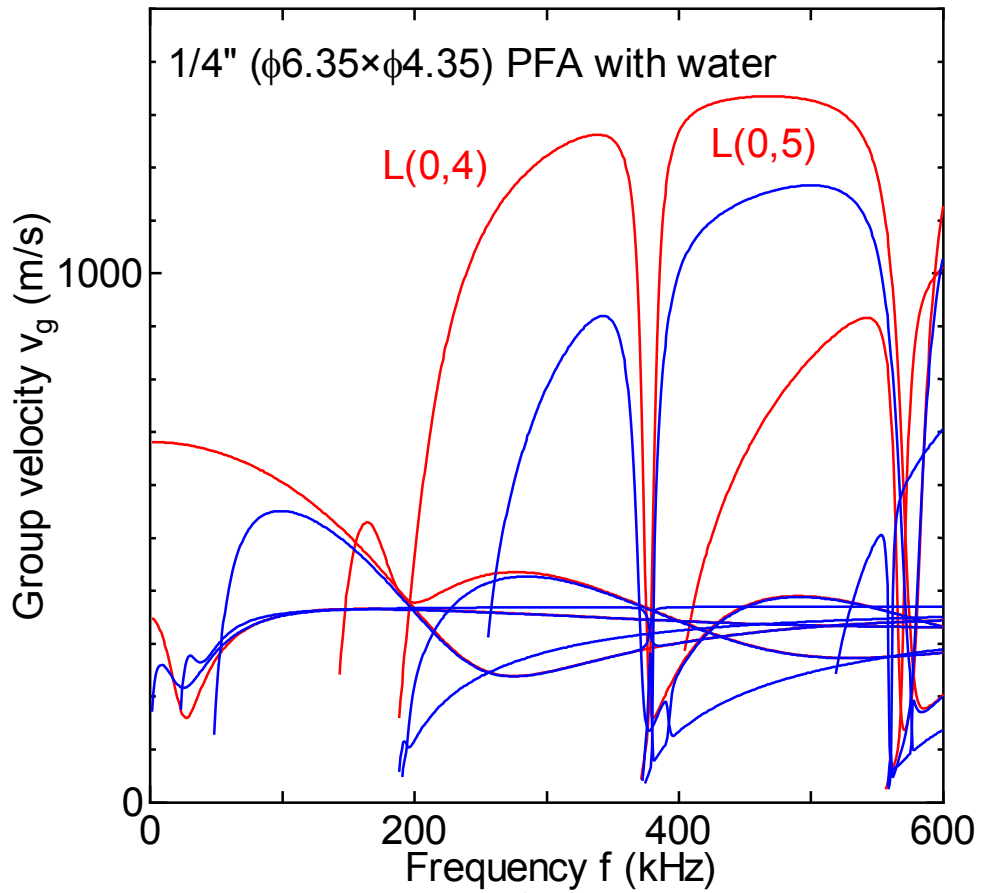


図 1-14 内部に静水を満たした肉厚 1mm の 1/4 インチ PFA を伝搬するガイド波の群速度 L(0, m)モードと F(1, m)モードをプロットした。

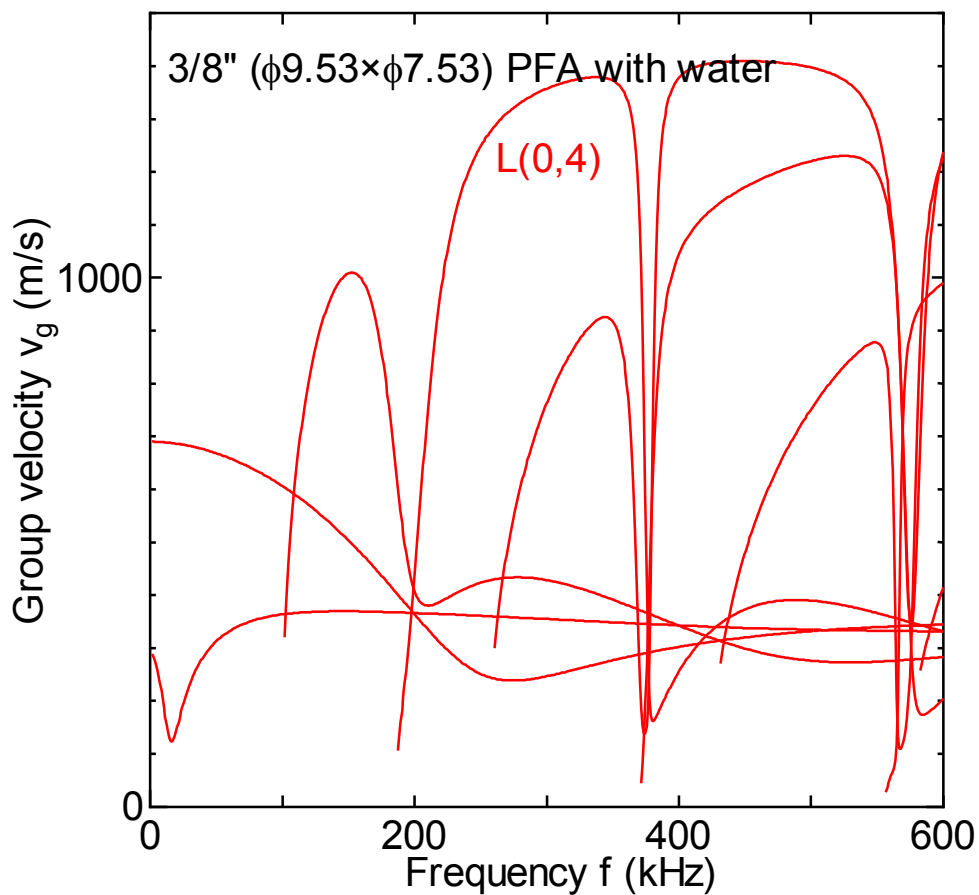


図 1-15 内部に静水を満たした肉厚 1mm の 3/8 インチ PFA を伝搬するガイド波の群速度 $L(0, m)$ モードのみをプロットした。

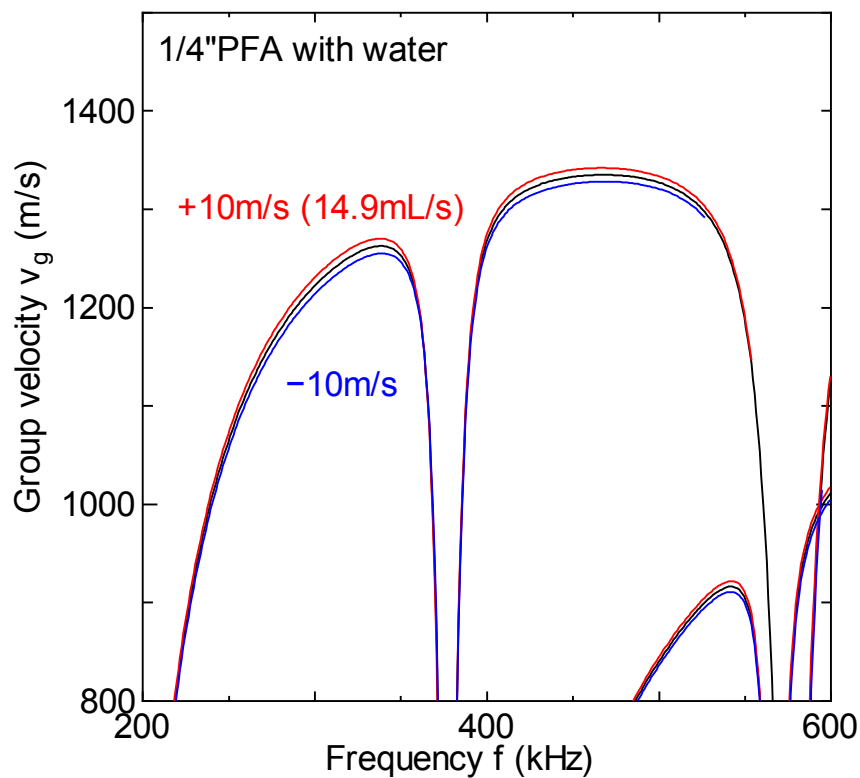


図 1-16 肉厚 1mm の 1/4 インチ PFA を伝搬する $L(0, m)$ モードのガイド波の群速度の流速依存性

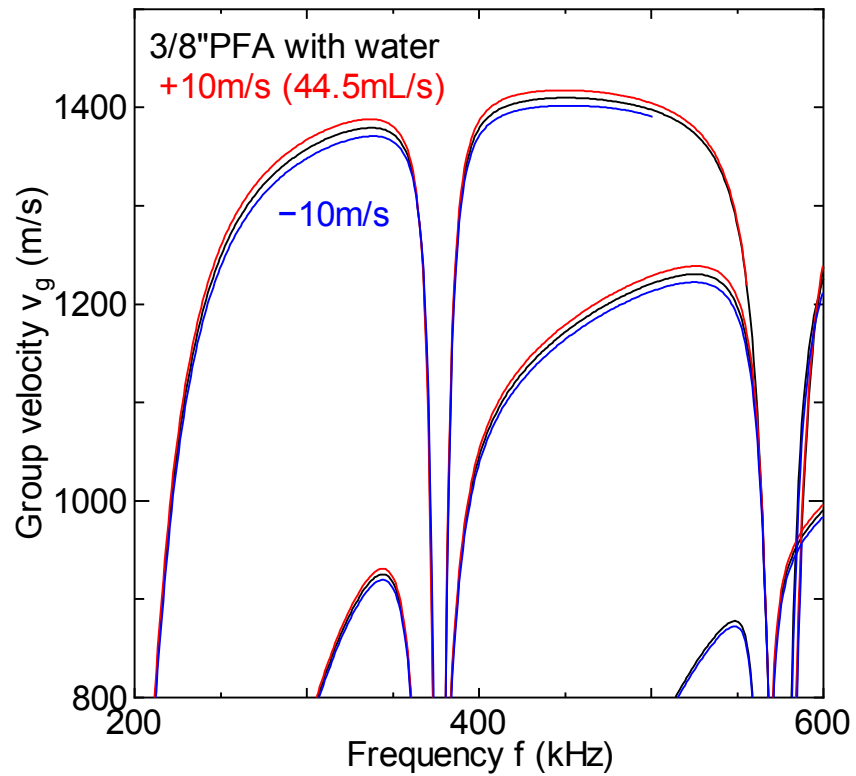


図 1-17 肉厚 1mm の 3/8 インチ PFA を伝搬する L(0, m) モードのガイド波の群速度の流速依存性

超音波送受信に用意した PZT は直径 10mm で厚さが 5.6mm, 4.4mm, 2mm, 1.7mm, 1.4mm のものであった。インピーダンスアナライザを用いて、それらの周波数特性を調べた(図 1-18)。直径に起因すると思われる 0.2MHz 近傍のピークが大きく、それ以外の周波数にも共振が存在することが確認される。

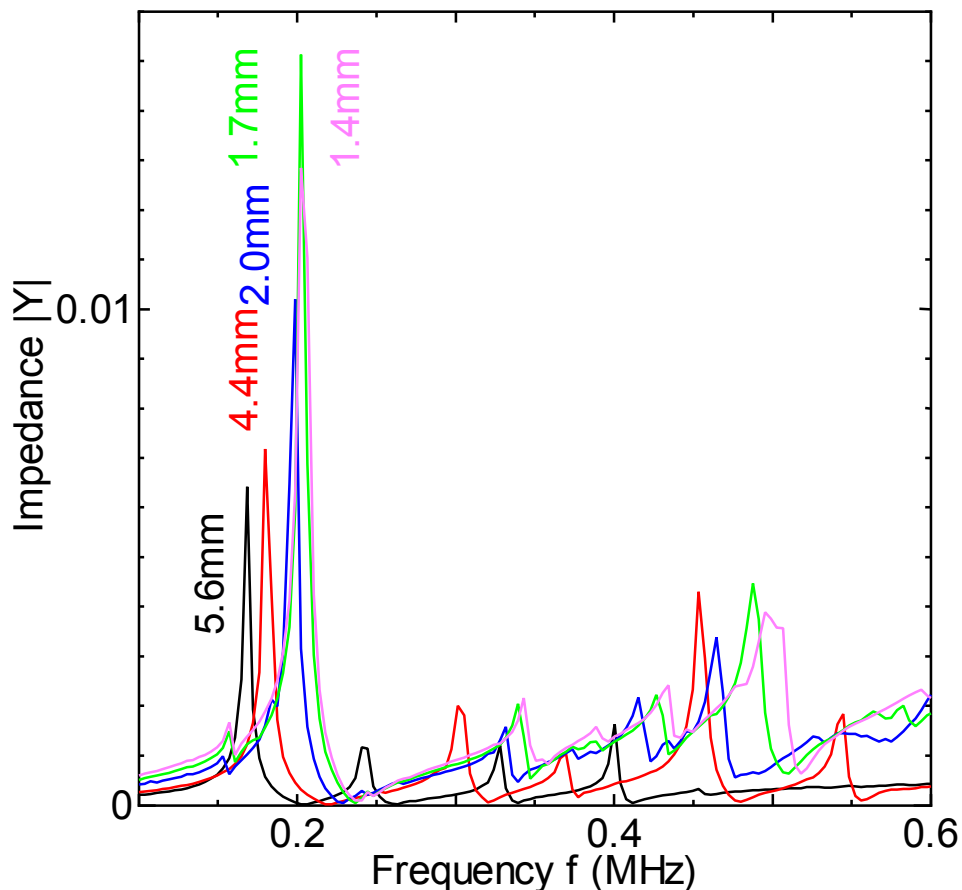


図 1-18 PZT のインピーダンス曲線

テストとして、厚さ 5.6mm の PZT を用いて、ガイド波を励起した。実験の模式図を図 1-19 に、写真を図 1-20 に示す。励起した信号の波形は図 1-21 のように sin 関数とガウス関数の積を用いた。この波形のパワースペクトルのピークはほぼ 500kHz であることも確認した(図 1-22)。実験で得られた波形を図 23 に示す。周波数により波形や伝搬速度が異なることが見て取れる。ただし、250kHz と 350kHz で同じような伝搬時刻にピークが存在するなど不自然なところがある。そこで、図 1-23 の波形のパワースペクトルと PZT の共振周波数をプロットしたのが図 1-24 である。図 1-24 から、駆動周波数より PZT の共振周波数の信号が検出されていることが分かった。これは、PZT の Q 値が大きいため、送信子は共振周波数の信号を励振し、受信子は共振周波数の信号のみを受信したためと考えられる。

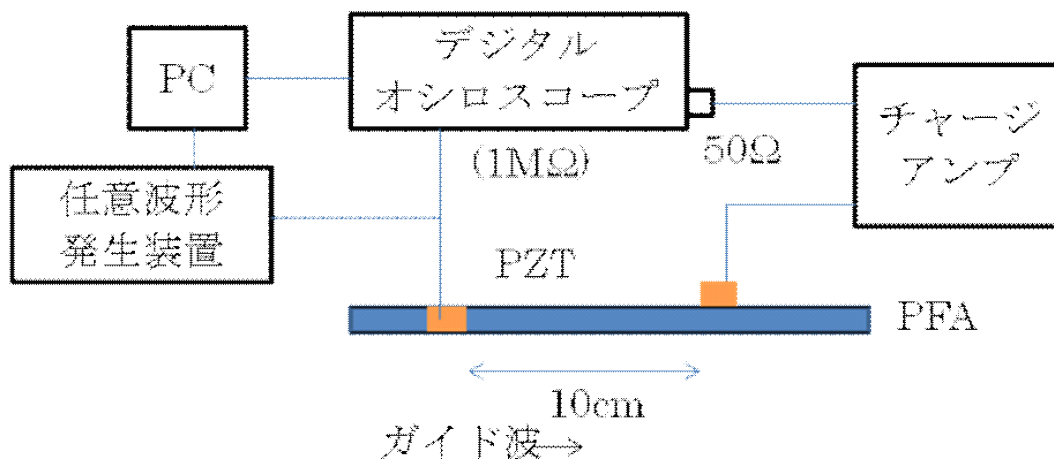


図 1-19 実験模式図

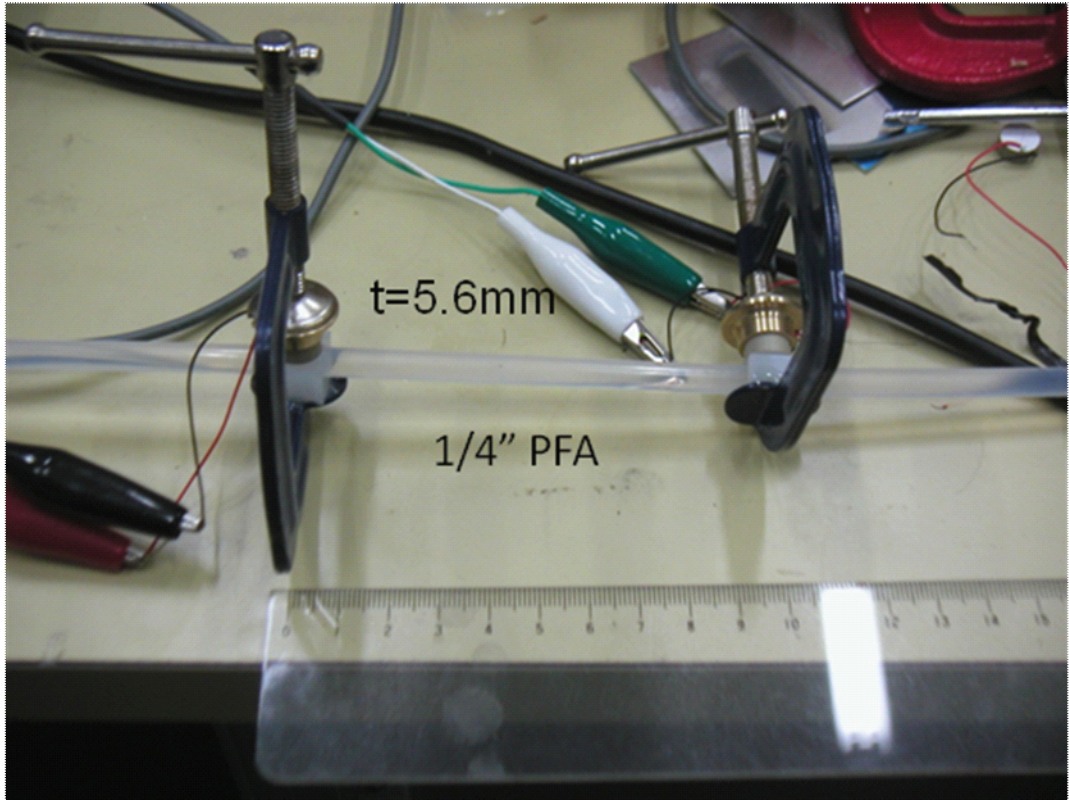


図 1-20 実験風景

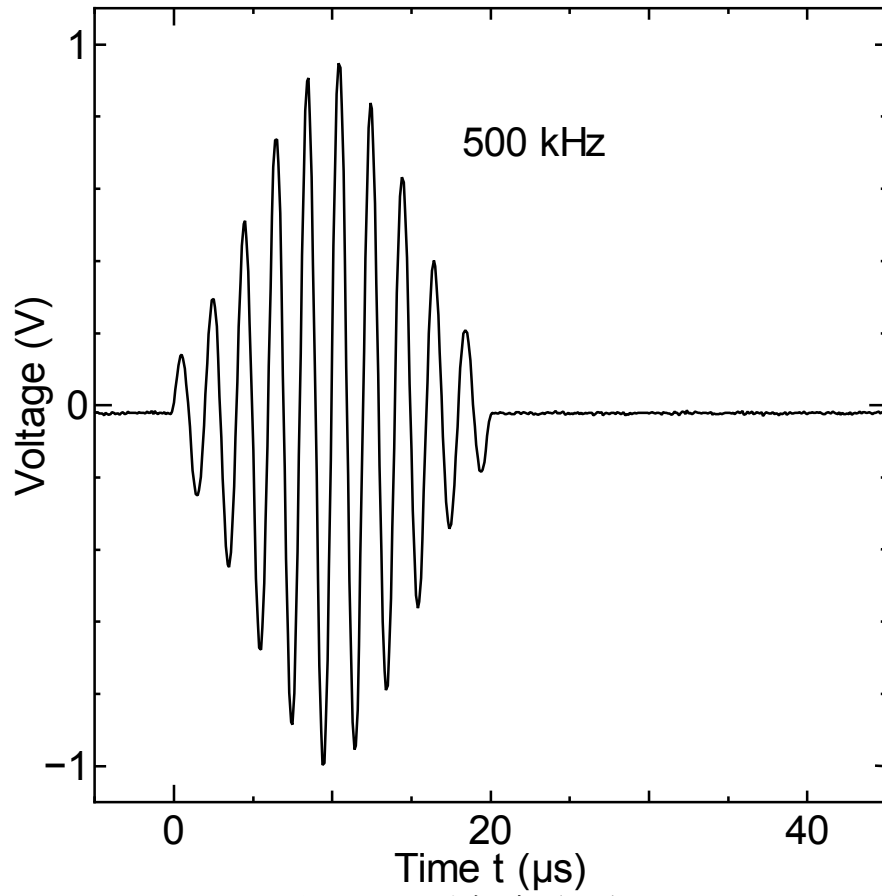


図 1-21 励起波形の例

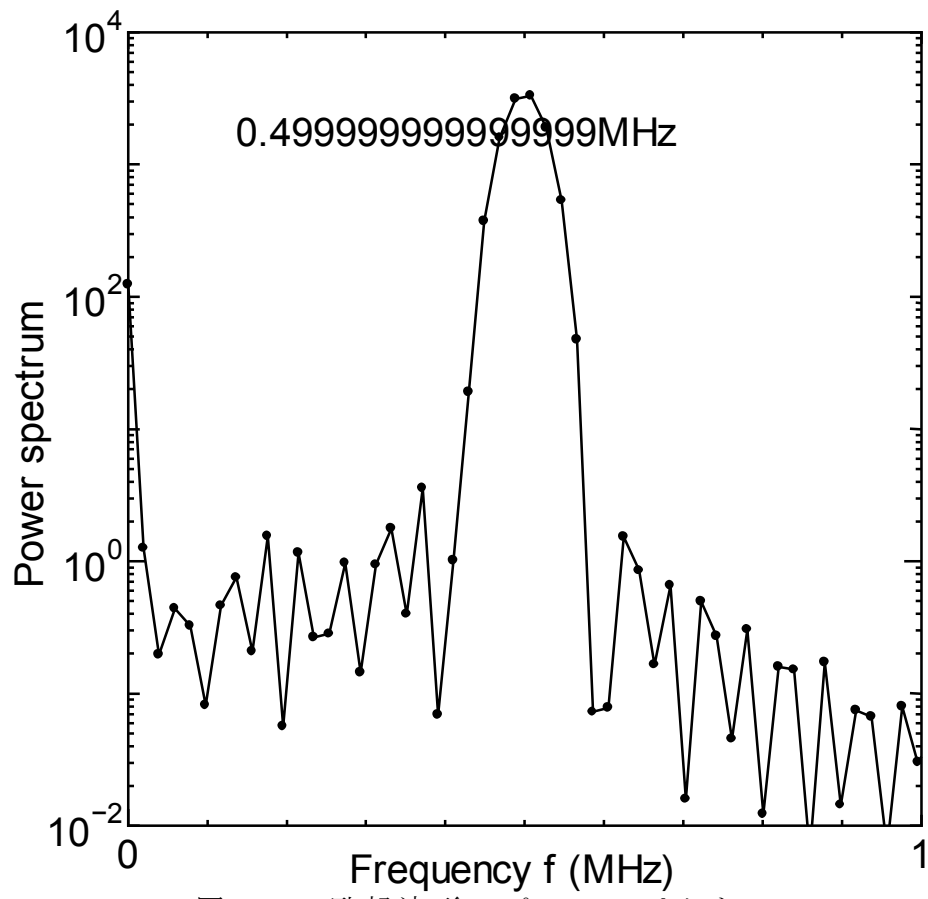


図 1-22 励起波形のパワースペクトル

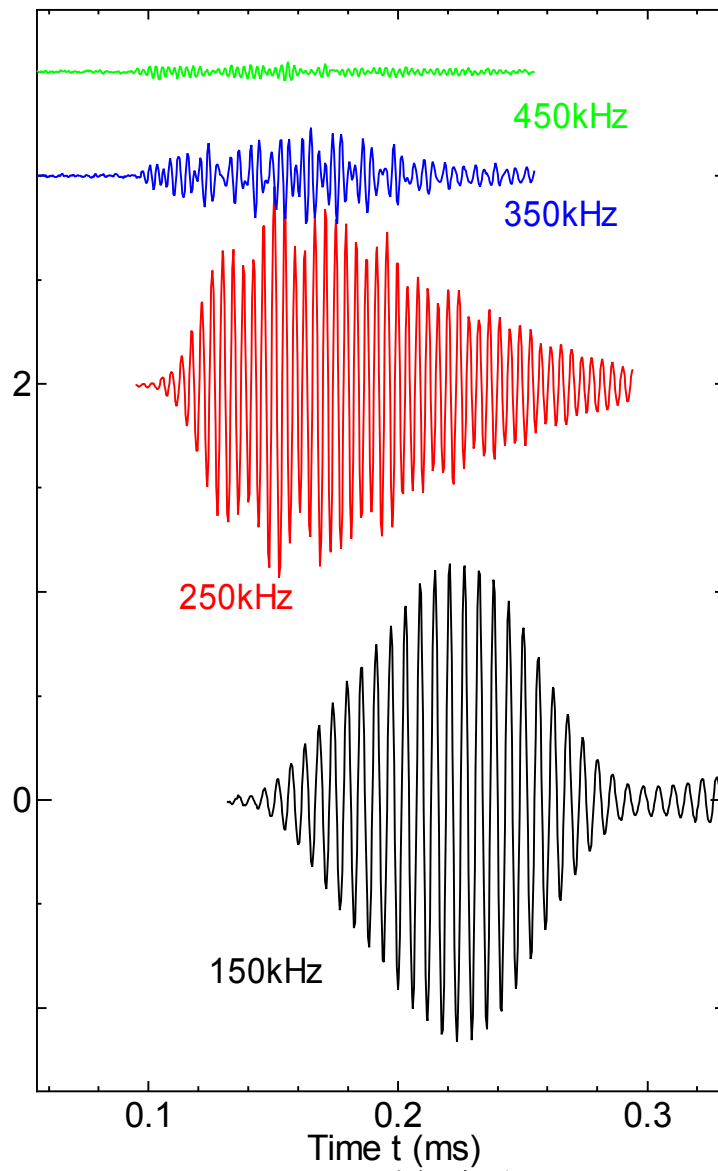


图 1-23 受信波形

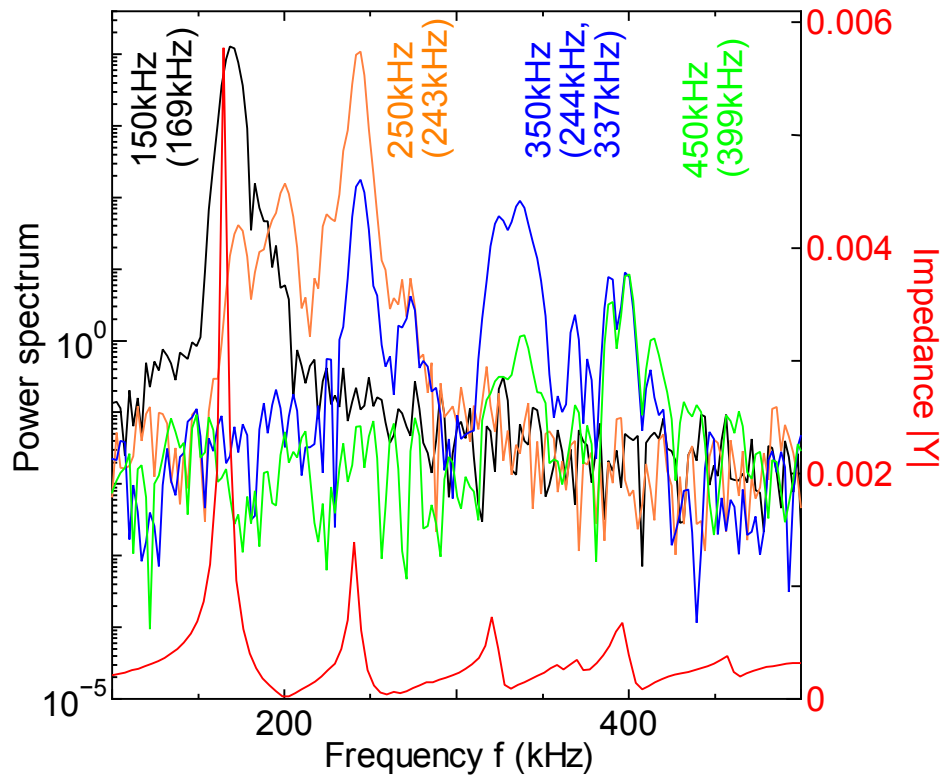


図 1-24 受信波のパワースペクトルと PZT の共振周波数

理論との比較のためガイド波の群速度を測定する実験を行った。この実験は広帯域の超音波送受信子を用いた。まずは送受信子を接触させて(図 1-25)、青線で示した入力信号に対する励起波(黒線)を受信した(図 26, 27)。受信波のパワースペクトル(図 1-28)から、350kHz で励振すると 368kHz、450kHz で励振すると 468kHz の超音波が励起されることが分かった。そこで励起波のピーク時刻を知るため、励起波をそれぞれ 368kHz および 468kHz でウェーブレット変換し、包絡線を抽出したのが赤線である。次に約 300mm 伝搬させたガイド波を受信した。実験の様式図を図 1-29 に、実験の様子を図 1-30 に、受信波形を図 1-31 と図 1-32 に示す。図 1-31 と図 1-32 の赤線はウェーブレット変換して得た包絡線である。図 1-31 と図 1-26 のピークタイムの時間差および図 1-32 と図 1-27 のピークタイムの時間差からガイド波の伝搬時間が分かり、伝搬距離をその伝搬時間で割ることによって、ガイド波の伝搬速度(群速度)が得られる。その結果、ほぼ理論値どおりであることが確認された。

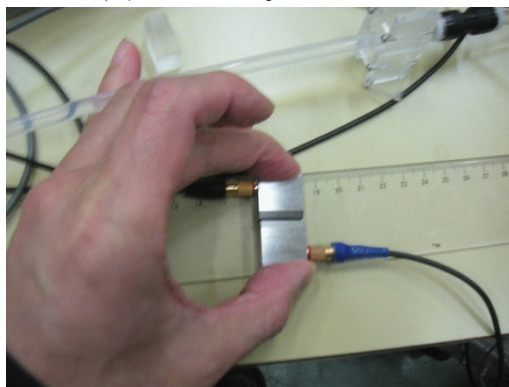


図 1-25 励起波の受信実験

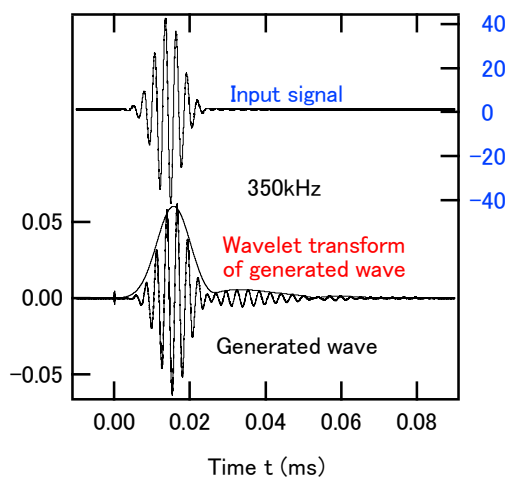


図 1-26 350kHz で励振したときの励起波

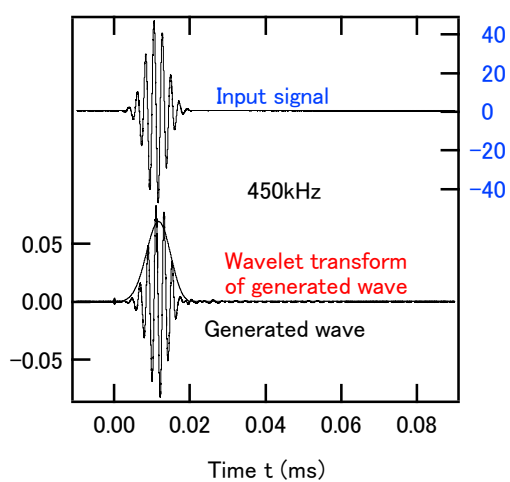


図 27 1-450kHz で励振したときの励起波

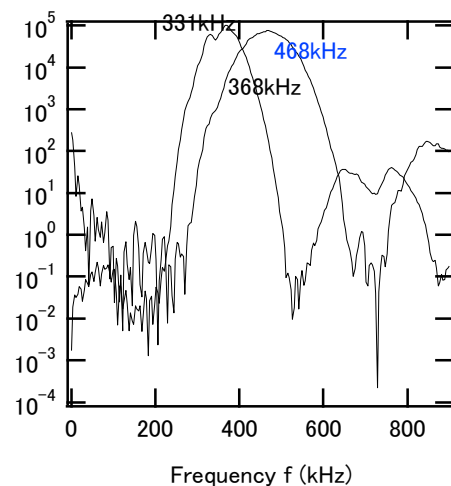
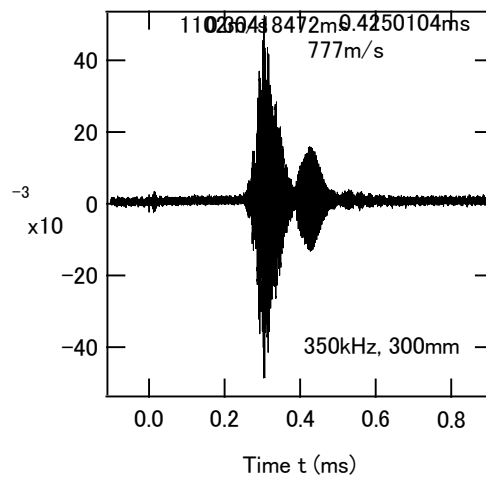
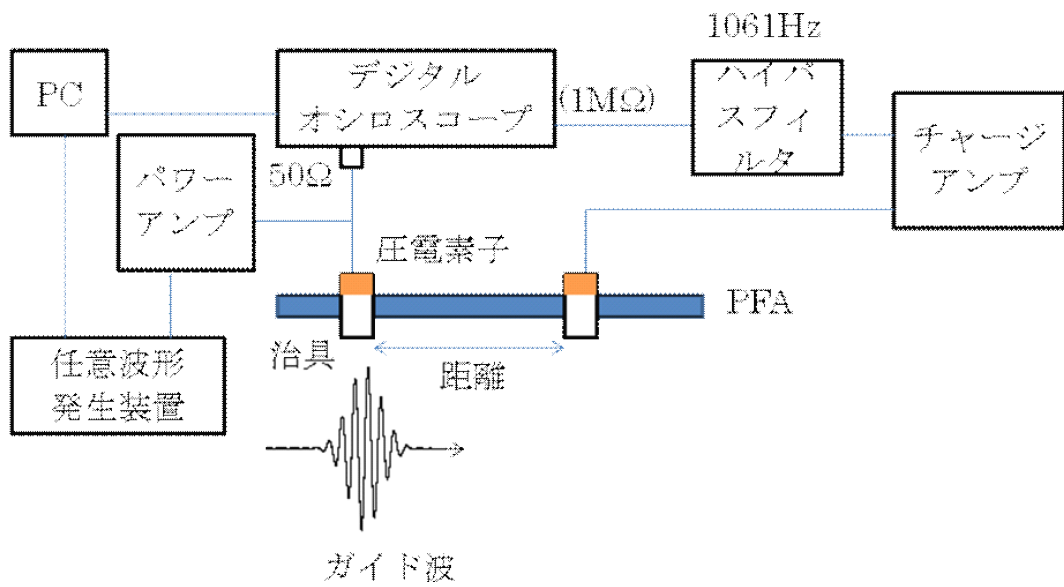


図 1-28 励起波のパワースペクトル



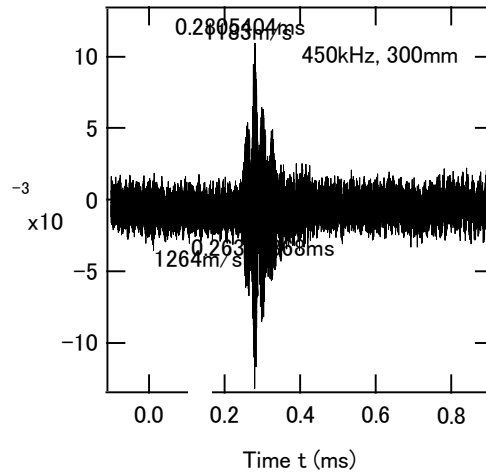


図 1-32 450kHz で励振したときの受信波

超音波送受信子を取り付けるのは、垂直に取り付ける方法と、斜めに取り付ける方法がある。送信子を垂直に取り付けると全ての方向に超音波が伝搬し(図 1-33)、斜めに取り付けると位相整合条件に合致するガイド波のみが一方方向に伝搬する(図 1-34)。位相整合条件は、取り付け角度を θ 、整合部の音速を V_c 、ガイド波の位相速度を V とすると、 $V \sin \theta = V_c$ となる。ただし、 $V > V_c$ でなければならない。受信子を垂直に取り付ける(図 1-35)と受信感度は $\frac{\lambda}{\pi} \left| \sin \frac{\pi L}{\lambda} \right|$ に比例する(図 1-36)。ここで波長 $\lambda = V/f$ である。受信子を斜めに取り付けると位相整合条件に合致するガイド波のみが選択的に受信できる。

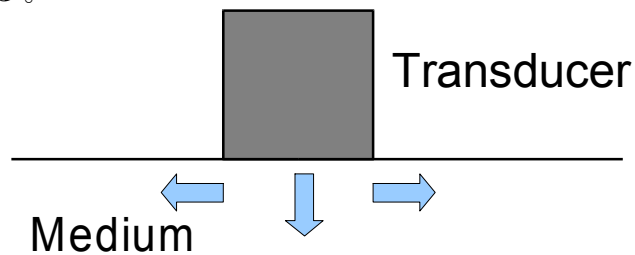


図 1-33 送信子の垂直取付

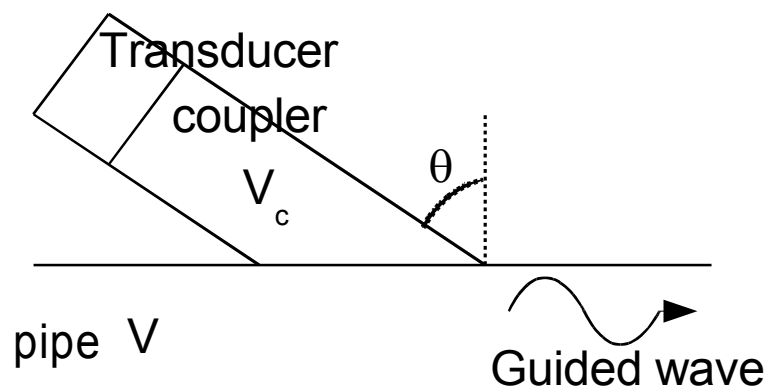


図 1-34 送信子の斜め取付

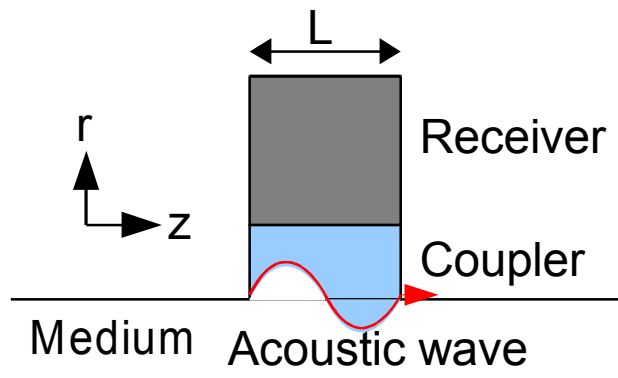


図 1-35 受信子の垂直取付

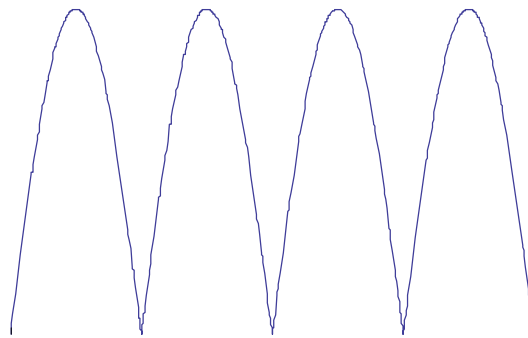


図 1-36 波長と受信子長さの比と受信感度の関係

2. 流量計本体の設計と試作

琉SOKおよび産総研の担当者が、ガイド波の解析結果等を元に、超音波の送受信部(演算回路を除く流量計の本体、センサー)の設計およびセンサー評価を行った。

本年度は、設計用のCADを用いて一次試作機を開発した。琉SOKおよび産総研の担当者が①等の成果を元にセンサーの概念設計を行い、それを元にした構造(詳細)設計(センサー設計)および試作(センサー試作)は特許性が無いので外注した。

一次試作は非クランプ式(直線流量計)とし、次年度のクランプ式の二次試作を経て、最終的には量産試作まで行った。次年度以降開発するクランプ式は、超音波送受信子とパイプ間の音響インピーダンスの整合を取るのが難しい。さらに、ガイド波と組み合わせた例は世界的にもない。そのため、次年度以降は特殊高分子ジェルとクランプ機構と伝搬解析等を組み合わせた開発を行う予定である。最終年度は量産試作のための、量産用治具、金型の製作も行う。量産試作機は電磁ノイズ試験もクリアできる仕様とし、小型演算回路と組み合わせて、精度を誤差 $\pm 3.0 \sim 5.0\%$ R.D.から $\pm 1.0\%$ R.D.にした。

初年度の目標として、一次試作機の設計と試作を行った。

(1) 流量計本体の設計

簡易的な実験を行ったところ(図2-1)、320kHzと460kHzでは流量を測定できそうなガイド波が検出された。そこで、速度分散(図1-10および1-11)から320kHzおよび460kHz近傍での送受信子の取り付け角度を計算した(表2-1)。その結果、おおむね50度程度に設定すれば良いことが示された。

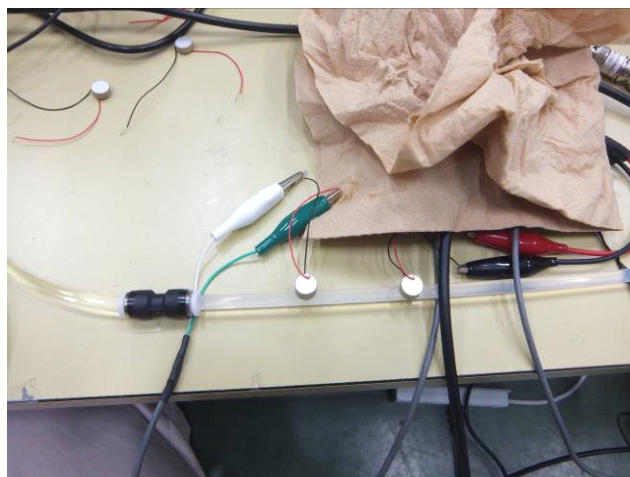


図2-1 1/4インチPFAチューブを使った簡易実験の様子

表2-1 送受信子の取り付け角度

サイズ	周波数 (kHz)	位相速度 (m/s)	取り付け角 (度)
$\phi 6 \times \phi 4$	339	1645	48.4
	470	1538	53.1
$\phi 8 \times \phi 6$	338	1584	50.9
	458	1526	53.7

(2) 流量計センサーの製作及び試作

概念設計されたセンサーを元にした超音波の送受信部(演算回路を除く流量計の本体、センサー) の設計及び試作を行った。

センサー設計

- ① 概念設計されたセンサーを元に構造設計を行った。
- ② センサーはクランプ式とする。
- ③ 5周波数の各PZT使用を考慮して部品設計を行った。
- ④ 流体側PFAチューブ2種類(1/4・3/8インチ)とする。
- ⑤ PZT角度36.3度、53.7度の2種類とする。(PFA2種、角度2種の計4種類)
- ⑥ 組立性や強度を考慮する
- ⑦ 10℃～60℃の温度にも耐えうること。

センサー試作

- ① 構造設計されたセンサーを製作すること。
- ② 初期評価用を除き、部品は切削にて製作した。
- ③ センサー試作は下図のPZTを使用し、5周波数×10個ずつ製作した。
- ④ 初期評価用センサーをPZT 5周波数×2台 計10台製作した。
- ⑤ 切削型評価用センサーをPZT 5周波数×PFAチューブ2種×角度2種×2台 計40台を製作した。

表 2-2 評価用センサーの外径、周波数、厚み

PZTタイプ	外径	周波数	t (厚み)
1	φ 10	1. 0MH z	2. 0 mm
2	φ 10	1. 4MH z	1. 4 mm
3	φ 10	1. 2MH z	1. 7 mm
4	φ 10	3 4 0 k H z	5. 6 mm
5	φ 10	4 6 0 k H z	4. 4 mm

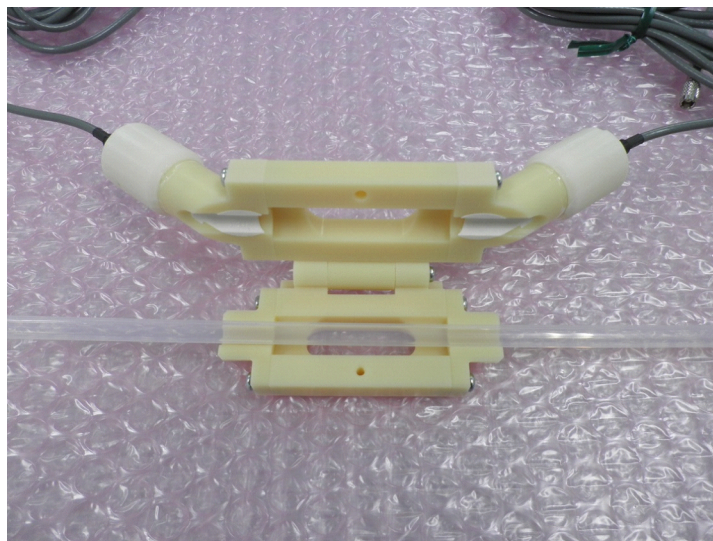


図 2-2 設計・作製したセンサー

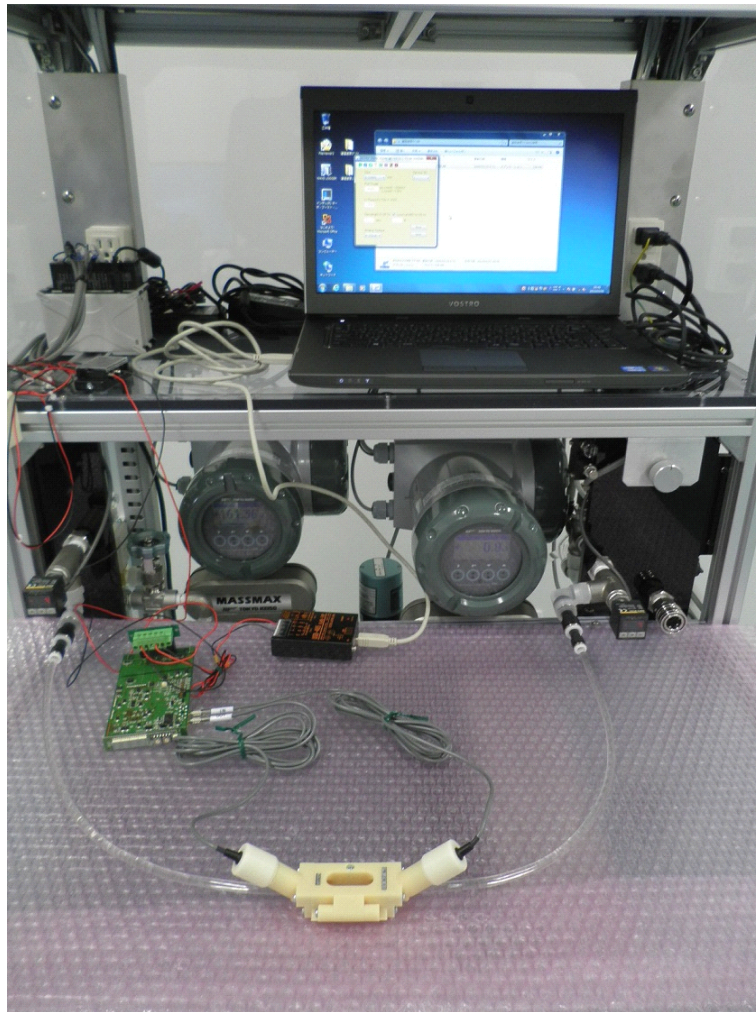


図2-3 設計・作製したセンサーの実験の様子

3. 小型演算回路の開発

琉 SOK および琉大の担当者が、流量計本体の設計と試作で試作されたクランプ式超音波流量計に対し、流速の測定精度目標値および、電磁ノイズ試験をクリアできる専用回路を開発した。そのために回路設計用 CAD を用いて電子回路のデザインを行い、流量計本体の設計で試作されたクランプ式超音波流量計に対し、流速の測定精度目標値及び、電磁ノイズ試験をクリアできる専用回路を開発した。

本年度は、琉 SOK および琉大の担当者が、計算用 PC に組み込んだ回路設計用 CAD を用いて電子回路のデザインを行い、ソフトウェアの概念設計も行った。特許性がないプリント基板 (PCB) の作成やソフトウェアの設計は外注により行った。

琉 SOK および琉大の担当者が、PCB 用安定化電源、基準電圧発生器、突入電流測定器等からなる PCB 評価装置を用いて作成した PCB を評価し、DSP デバッカーや FPGA デバッカーにより DSP や FPGA のプログラミングを行った。

この回路は流量計本体の超音波送受信子と接続し、超音波の送受信・解析、流量の演算・出力を行った。そのため、次年度以降は温度試験の結果も踏まえ、自動温度補償機能のついた流量を測定するアルゴリズムを組み込んだ、演算回路を開発した。量産試作機では、DSP や FPGA を用いて小型化を図った。さらに、電磁ノイズ試験に耐えられる回路とした。

最終目標は、回路用コンフィグレーターを作成するところまでとするが、初年度は設計、次年度は試作、最終年度には動作試験対策を行う。

初年度の目標として、演算回路を設計した。

(1) 流量計センサーデータ変換器 製作、回路設計、ソフトウェア設計、PCB 作成

概念設計を元に変換器（回路設計、ソフトウェア設計、PCB 作成）の製作を行う。同回路は、流量計本体の超音波送受信子と接続し、超音波の送受信、解析、流量の演算、出力を行った。

回路設計

- ① 概念設計された専用回路を元に構造設計を行った。
- ② 自動温度補正機能の付いた流量を測定するアルゴリズムを組み込んだ回路とする。

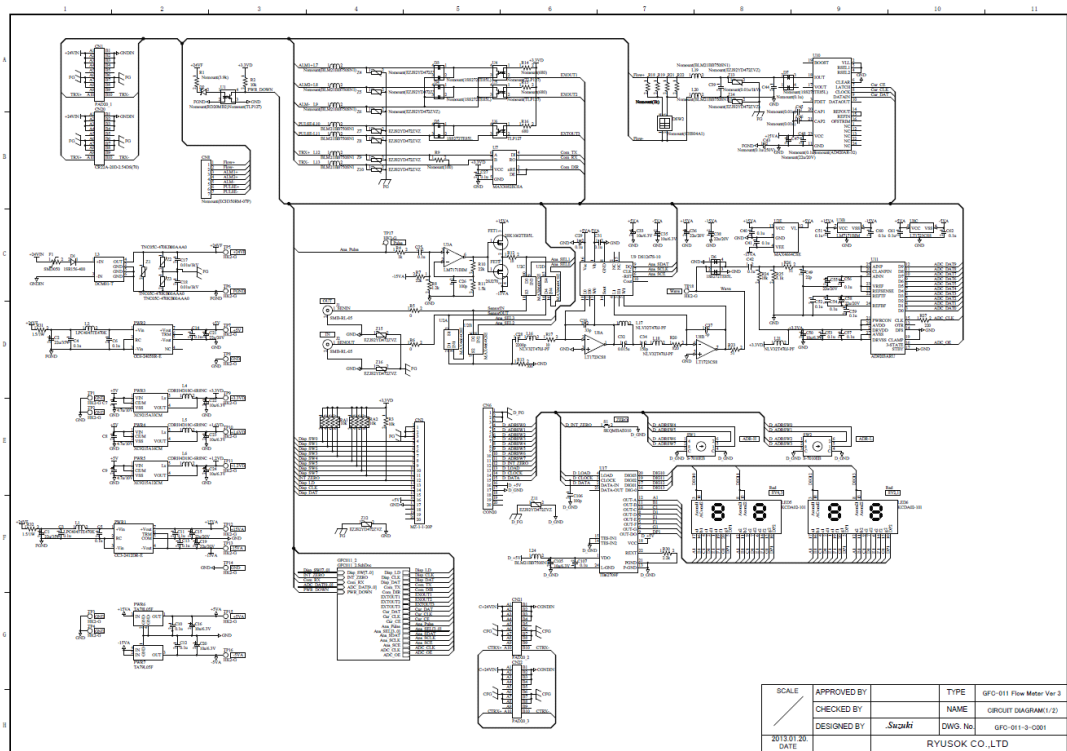


図 3-1 回路設計

ソフトウェア設計

- ① 概念設計された専用回路を元に構造設計を行った。
- ② FPGA などのプログラミングが行えること。

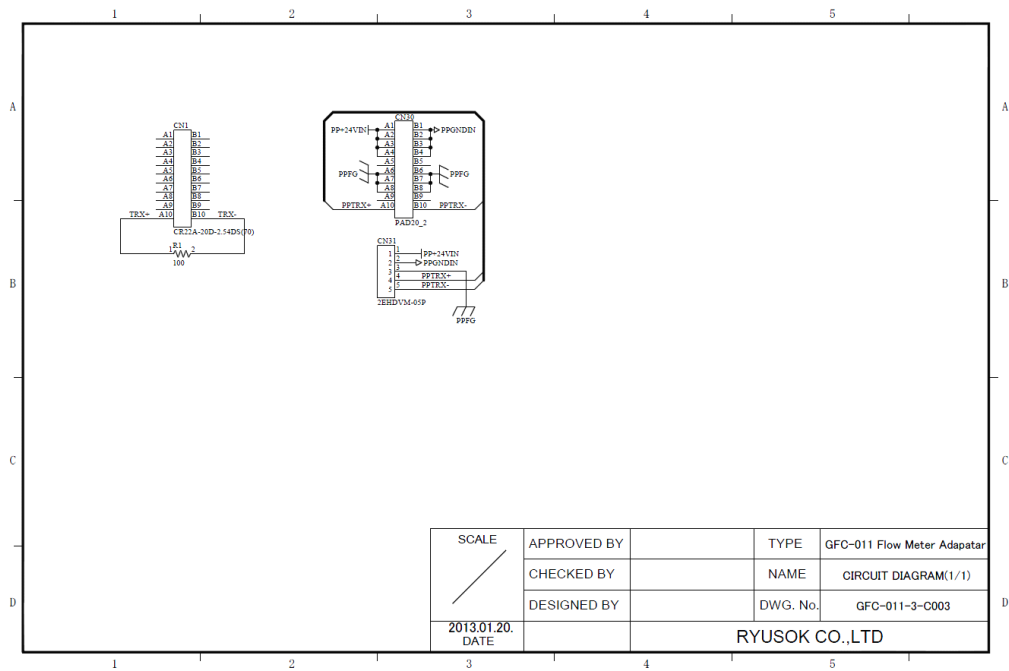


図 3-2 ソフトウェア設計

PCB 作成

- ① 回路、ソフトウェアの構造設計されたプリント回路基板 PCB を製作すること。
- ② 本仕様に適したプリント回路基板 PCB を 4 種類作成した。



図 3-3 PCB 作成

4. 温度試験

実環境下での試作品の性能評価を行い、商品のプロトタイプ(量産試作機)を作成することを最終目標とする。

琉SOKの担当者が、実環境で想定される温度範囲内で流量計を試験するための流量試験装置を設計し、外注等を活用し制作した。作成された試作機を用いて、センサー部分の温度・圧力・粘度依存性などを詳細に調査し、小型演算回路に反映させ、それによって動作保障できる温度域を確保した。

そのため、流量調整機能付ポンプ、恒温槽、恒温水槽、基準流量計、精密秤、圧力計、温度計、データロガー、データ収集用PC、温度管理実験室等と試験装置作成費用を用いて流量試験装置を作成し、これにより温度だけでなく、圧力や粘度に対するデータも取得した。

試験結果は、演算回路に組み込まれる流量を計算するアルゴリズムに反映させ、試作機を温度試験に耐えられるようにした。

試験温度範囲は実環境で想定される10～60℃とする。初年度および次年度は温度データの取得を行い、次年度と最終年度は動作試験を行う。

初年度の目標として、温度データの取得を開始し、流量試験装置による試験を開始した。



図 4-1 温度管理装置

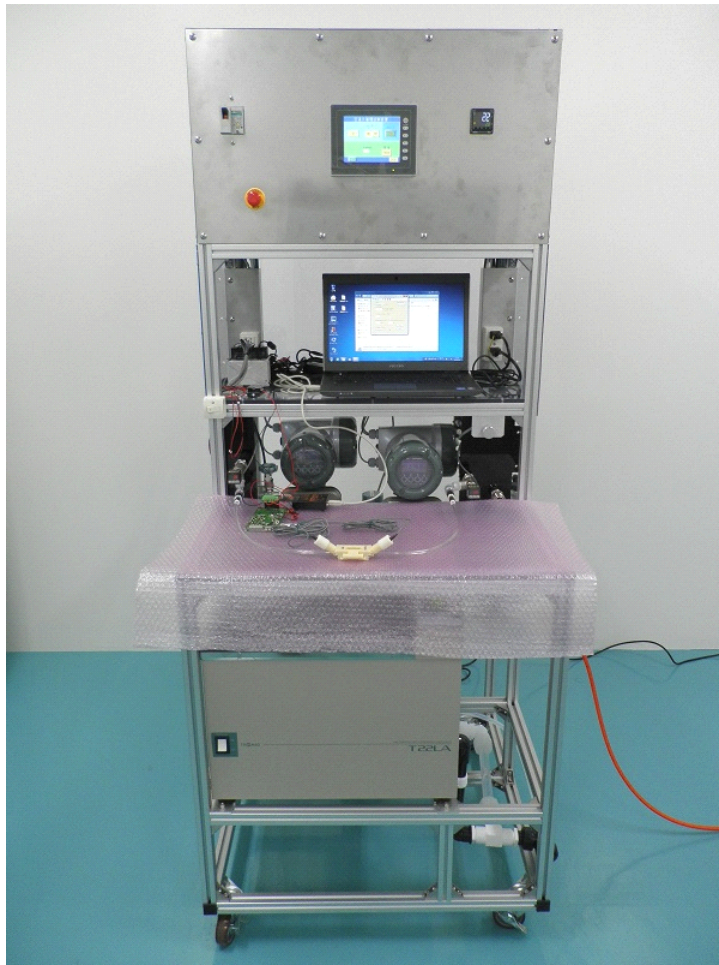


图 4-2 流量試驗裝置

5. 電磁ノイズ試験

実環境下での試作品の性能評価を行い、商品のプロトタイプ(量産試作機)を作成することを最終目標とする。

琉SOKの担当者が、試作機に対し実環境の電磁ノイズに耐えられるか試験するための装置の準備を始める。実環境で電磁ノイズによる誤動作をしないように、流量計周囲の電磁ノイズに耐えられ(EMS)、かつ周囲の電子機器や人体に悪影響を及ぼす電磁ノイズを発生しない(EMI)クランプ式超音波流量計の量産試作機を作る。

具体的には、顧客からの要望でEMC試験のEMI規格(CISPR11)とEMS規格(IEC/EN61000-4-3)およびサージ(IEC/EN 61000-4-5)とラジオノイズ伝導性無線周波妨害(IEC/EN 61000-4-6)の規格を満たすことを目標とする。初年度は準備を行い、次年度と最終年度は動作試験を行う。

初年度の目標として、動作試験の準備を行った。

第3章 全体総括

多くの流量計が開発・販売されているが、半導体製造装置の研磨工程における研磨剤供給、洗浄工程における洗浄液生成、フォトリソ工程におけるフォトリソ液塗布などでの精密流量制御に用いられる流量計は存在しない。

例えば、研磨剤に研磨されてしまうような流量計や、流量計内部に研磨剤が堆積してしまうような流量計は使えないし、液の漏れやシステム全体の圧を変えてしまうような流量計も実用上の問題がある。半導体製造装置用なので、当然のこのように、コンタミ(汚染)の危険性がある流量計も使えない。

これらの問題をクリアできる流量計はクランプ式の超音波流量計だが、3次元実装の精密流量制御に用いるには精度が足りない。これは、半導体製造に使われている液体搬送用のチューブが細く、超音波の送受信子の間隔が短くなることに起因する。そこで、その欠点を解消し、測定精度を改善するため、ガイド波を用いたクランプ式超音波流量計の試作機を開発した。

ガイド波は回折による信号の減少がないため長距離伝搬する。その性質を利用すれば精度を向上させることができ、かつ従来は不可能であった細さのチューブに使える流量計になる。ただし、ガイド波は速度分散を持つので、周波数の選定が重要である。

また、ガイド波はチューブとチューブ内部の液体の連成振動であるので、流速の変化を検出する仕組みが必要になる。

解析の結果、流速の変化がガイド波の伝搬速度の変化として測定できるモードが判明したので、その条件を用いて、かつ、励起・検出効率が高い送受信子の取り付け角度等を解析し、試作機を作成した。

それと並行して専用の電子回路も設計、試作し、送受信子と組み合わせて流量試験も行い、ナノテク展2012にも出品した。数年後には商品化し、3次元実装技術の小型化・高密度集積化、低コスト化に貢献する。



図1 ナノテク展2012に出品した試作機



図 2 電子回路試作機



図 3 流量試験

参考文献

- ⁱ 超音波スペクトルスコピー[基礎編] 和田八三久, 生島明 培風館
- ⁱⁱ 弾性波素子技術ハンドブック 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会, オーム社
- ⁱⁱⁱ 弾性波素子技術ハンドブック 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会, オーム社
- ^{iv} <http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/~maeno/Java/tanslit.html>