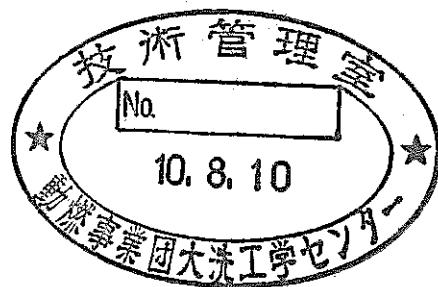


区 分 变 更	
変更依頼資料番号	二〇一
決戻年月日	平成13年7月31日

超音波による流速分布計測手法の高度化研究

1998年1月



動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製、
て下

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



社 内 資 料

PNC/TN9430 98-002

1 9 9 8 年 1 月

超音波による流速分布計測手法の高度化研究

平林 勝¹⁾、小林 順¹⁾、A. Tokuhiro^{1,2)}、
大木義久¹⁾、林田 均¹⁾、荒 邦章¹⁾

要　旨

原子炉工学室では、超音波流速分布測定装置をナトリウムに適用する研究を実施している。現時点では、高温用の超音波トランスデューサを開発し、ナトリウム中の流速分布測定に適用可能なことを確認しているが、今後、解析コードの検証用として充分な精度をもったデータを取得するためには超音波の散乱現象に対する基礎的な試験も含めた研究が必要であり、最適な信号処理技術の開発が必要である。

本報では、原子炉工学室で実施した超音波流速分布測定装置によるナトリウムの流速分布測定結果に対する考察を行うとともに、超音波を用いた計測の基礎理論と現状技術および課題という視点からまとめ、それを踏まえて超音波による流速分布計測手法の高度化研究を実施する。

1) 大洗工学センター安全工学部原子炉工学室　計測グループ

2) 国際特別研究員



OFFICIAL USE ONLY

PNC T N9430 98-002

January, 1998

A study on a velocity distribution measurement system applying the ultrasonic technique

Masaru Hirabayashi¹⁾, Jun Kobayashi¹⁾, Akira Tokuhiro¹⁾⁽²⁾,
Yoshihisa Ooki¹⁾, Hitoshi Hayashida¹⁾, Kunihiko Ara¹⁾

Abstract

To measure the velocity distribution in flowing sodium, a measurement system applying an ultrasonic technique is being developed. We have confirmed that an ultrasonic transducer for high temperature is capable of measuring the velocity distribution.

In this report, various details are considered, and the identified problems of a measurement system are discussed. After careful consideration of the details, an advanced measurement system is proposed.

1) Reactor Engineering section, Safety Engineering Division, O-arai Engineering Center, PNC
2) PNC International Fellow

目 次

1. 緒言	• • • • 1
2. 計測手法の基礎	• • • • 2
2.1 計測の原理	• • • • 2
2.2 超音波の基礎理論	• • • • 4
3. 現状技術及び課題	• • • • 8
3.1 現状技術	• • • • 8
3.1.1 手法	• • • • 8
3.1.2 要素技術	• • • • 9
3.1.3 原子炉工学室における研究開発	• • • • 11
3.2 技術課題	• • • • 13
4. 高度化の目標	• • • • 15
4.1 用途（反映先）	• • • • 15
4.2 仕様	• • • • 15
4.3 各段階の開発仕様	• • • • 15
5. 研究計画	• • • • 17
5.1 実施項目	• • • • 17
5.1.1 基礎特性研究	• • • • 17
5.1.2 手法の最適化研究	• • • • 21
5.1.3 センサ要素の開発	• • • • 22
5.1.4 手法の検証・改良及びシステム化	• • • • 24
5.2 実施場所（使用施設及び装置）	• • • • 24
6. 結言	• • • • 25
7. 参考文献	• • • • 26

図表リスト

表 1. 代表的な圧電素子の特性	• • • • 27
表 2. ポリマーセンサと無機系圧電素子の物性比較	• • • • 27
図 1. ドップラーソナー法	• • • • 28
図 2. ドップラーソナー式超音波流速計系統図	• • • • 28
図 3. ドップラーソナー式超音波流速計検定結果	• • • • 29
図 4. 超音波パルス式ドップラーソナーフローメーター系統図	• • • • 29
図 5. 振動子中心軸上の音圧変化	• • • • 29

1. 緒言

液体金属ナトリウムの熱流動現象の研究に必要な計測技術として、超音波を応用した流動状況の計測手法が検討されてきた。この方法は流体中で被測定対象場に超音波を伝播させ、その超音波信号の周波数が流体の流速によって変化する、いわゆるドップラー効果を利用したものである。この手法に対しては1950年代から様々な実験研究がなされてきたが、通常の超音波応用技術では主として対象物の完全反射波を取り扱うのに対して、この手法は微少かつ微弱な散乱波が対象となり、取り扱うことが技術的に困難であるため、これまで充分な基礎的検討や理論の実験検証がなされた例は少ない。これまででも流動現象の研究者らによって超音波散乱波を用いた計測装置が種々の実験で使用されているが、基礎的な研究が不充分なため、計測器としての精度や性能の保証に至るまでの最適化はなされていないのが現状である。

しかしながら、超音波を利用した計測手法は不透明な被測定対象場に適用できるため、液体金属ナトリウムの熱流動現象研究にとって有力な手段であり、流動状況の実測が可能になればこの分野の研究が大きく発展することは間違いない。そこで、超音波応用技術の状況を踏まえて、液体金属ナトリウムに適用することを最終目標とした散乱超音波による流速分布計測技術の高度化研究を行う。

本研究の主たる狙いは、第1に液体中での移動する微小散乱源による散乱現象の把握と散乱超音波の周波数変化をとらえるための系の最適化を図ることであり、第2に主として超音波センサなどを液体金属ナトリウムへ適用させるためにハードウェアの高度化開発を行うことである。

本書は、これまでの超音波技術に関する研究経験を基に、散乱超音波計測の知見、情報を調べるとともに、今後の超音波を利用した計測技術の高度化研究についてまとめたものである。

2. 計測手法の基礎

本章では、開発計画の本題に入る前に、後述する専門的あるいは詳細な技術的項目のより正確な理解を助けるために、散乱超音波による流速計測手法について簡単にその要点をまとめておく。

2.1 計測の原理

超音波を利用した流量あるいは流速計測で一般的な方法は、超音波が流体中を伝播する時、流速によりみかけの伝播速度が異なる原理を利用したもので、これには位相差法、パルス伝播時間差法及びシングアラウンド法がある。また、特殊な手法として超音波ビームが強い指向性を持つ特性から、このビームの進行方向が流れにより曲げられる（下流側に歪む）現象を利用するビーム偏位法もある。以上が流れ場の一般的な流速を計測する手法であるが、これに対して、本件で対象とするような流れ場の局所の流速を計測する手法がある。

この手法は、所定位置の水塊から超音波ビームを反射（あるいは散乱）させ、その水塊の速度によるドップラー効果から流速を求める方法で、ドップラー法又はドップラーソナー法などと呼ばれている。以下にドップラーソナー法の原理を単純解の展開として記す。

この方式は、超音波を所定の方向に発射し、所定距離の水塊中に混在する微粒子などからの反射波（あるいは散乱波）を受信し、受信信号の周波数が水塊の速度により変化するドップラー効果を利用し流速を求める方法である。これには大別して2種の方法がある。その一つは連続した超音波を使用するもので、鋭い指向性を持つ2個の超音波振動子を、その超音波ビームが鋭角で交叉するように配置し、一方を送信用、他方を受信用として使用する。図1に示すように周波数 f_T で発射された超音波が流速 V の水塊により反射（散乱）され、周波数 f_R で受信されたとすると、受信周波数 f_R と送信周波数 f_T との関係は次の式で表される。

$$f_R = \frac{C - V \cos\theta}{C + V \cos\theta} f_T \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、 C は音速、 V は流速である。したがって、周波数変化 Δf は、

$$\Delta f = f_T - f_R = \frac{2V \cos\theta}{C + V \cos\theta} f_T \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

一般に $V \ll C$ であるから、

$$\Delta f \approx \frac{2V}{C} f_T \cos\theta \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

これにより流速Vが求められる。ただし、実際は音速の変化の影響があるため、補正が必要となる。この方式で水用として実用化され、市販されているものとしては、計測範囲0~2.5m/s、精度2mm/s、ドリフト0.01%以内、応答周波数500Hz、周波数10MHz、ビーム指向（半）角約1°、ビーム交叉角30°、送受信素子からビーム交叉点までの距離0.05~0.5mのものがある。この回路概略を図2に、検定結果の一例を図3に示す。

他一つは超音波パルスあるいはトーンバースト信号を使用する方法で、前述の方法と同様に鋭い指向性を持つ超音波振動子を用いる。図4に回路の系統図を示す。振動子から超音波パルス（あるいはトーンバースト信号）を発射し、ある一定時間後にゲートを開いて短時間だけ反射波を受信すれば、振動子から一定距離（時間）にある水塊からの反射（あるいは散乱）波が受信されることになり、受信波の周波数変化から、その水塊の流速を求めることができる。この方式では、前述の方式が送受信合わせて2個の振動子を被測定場に配置する必要があったのに比べ、超音波パルスを同一経路で往復させることから1個でよいことになる。送受信素子が1個になれば、素子配置上の制約が少なくなり、簡便かつ容易に計測が可能になる反面、現実には前述の音速変化の影響や距離同定の不確かさなどのために精度確保に問題が生じる。この方法においても、求める位置の流速Vと周波数変化△f並びに送信（キャリア）周波数f_Tの関係は(3)式で表される。

ドップラーソナー法による流速計測を可能なものとするためには、超音波を十分反射（散乱）するだけの微粒子が水中に混在している必要がある。目標以外に反射（散乱）レベルの非常に大きい物体がある場合や温度揺らぎにより伝播媒質の密度が異なる場合には、超音波の音速が変化するために正確な流速計測ができなくなる、あるいは誤差が大きくなることが考えられる。前述の(1)式の展開から理解されるように、この場合は、受信周波数は微粒子からの反射（散乱）信号のみを取り扱っているが、現実には、送信周波数や時間（距離）的に等価な他の位置での多重反射信号も含まれているため、実際の受信信号のスペクトルはかなり複雑であり、計測精度に影響を与えている。実際の空間的にある広がりを有する超音波照射領域での信号スペクトルとその領域の平均流速v₀の関係は次式で表される。

$$\bar{v}_0 = k \frac{\int_0^{\infty} \omega S(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} S(\omega) d\omega} \quad \dots \quad (4)$$

ここで、kは比例定数、 $\omega=2\pi f_d$ 、 f_d は各粒子の持つドッpler一周波数、S(ω)は照射域内での粒子の集合を考えた場合のパワースペクトル密度である。したがって、S(ω)を求めれば平均流速v₀が求められる。この手法を具体化する手段としてフーリ

工変換法などを用いた信号処理変換が考えられる。

これまで記述した方法は水中での使用を対象にしているが、水中の微粒子が小さい場合には、反射（散乱）をよくするために超音波の周波数を上げる必要がある。しかし、周波数をあげると水中を伝播していく間の減衰が増加（距離減衰効果という）し、超音波の到達距離が減少する問題がある。さらにナトリウム中での使用を考えた場合には、散乱源となりうる微小粒子（物質）が異なること、及び温度搖らぎによる密度変化など、手法だけについて考えても困難な課題が想定される。

2.2 超音波の基礎理論

前節では、計測手法の原理について記したが、本節では、この手法に係わる超音波技術について整理しておく。

(1) 音速

音速は波動方程式から明らかにされ、一般には次式で与えられる。

$$C = \sqrt{\frac{K}{\rho}} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ここで、Cは音速、Kは弾性率（気中及び液中では体積弾性率）、ρは密度である。

また、個体中では縦波と横波が存在するが、液体や気体では横波は存在しない。水の場合、20°Cで1480m/sの音速となる。液体金属ナトリウム中での音速は、簡易的に次式で与えられる。

$$C_s = 2577.25 - 0.524T \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、Tは温度(°C)を表す。

(2) 波長と散乱源の大きさの関係

液中の微小粒子からの反射（散乱）を考えるとき、微小粒子の大きさ（直径）Dと超音波の波長λの関係が重要となる。一般には次のように考えられている。

●波長λ < 直径Dの場合：超音波が粒子に衝突した場合は反射となってその物質で規定される入射角に従って反射される。

●波長λ ≫ 直径Dの場合：超音波が粒子あるいは粒子群に照射されると、超音波は粒子あるいは粒子群によって散乱される。一方、波長λに比べて粒子直径Dが極めて（無視できるほどに）小さい場合には超音波は粒子を透過するものと考えられる。

●上記以外の場合：反射と散乱の複合的な現象と考えられる。

超音波の波長 λ は一般に次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{C}{f} \quad \dots \dots \dots \quad (7)$$

ここで、 C は音速を示す。

通常使用される超音波の周波数は数MHz程度であるから、その波長は数百 μm 程度となり、散乱源となりうる粒子径は百 μm 程度の直径と推測できる。

したがって、液体中の微小粒子直径によって適切な超音波の波長（周波数）を選定する必要がある。

(3)指向性

ドップラーソナー法の場合、前述のように原理的に鋭い指向性が必要となる。ここでは平面円盤状の振動子（ピストン音源）の指向特性について整理しておく。

円盤が速度 U_0 でピストン運動しているとき、十分に遠方の任意の一点 (R, θ) の音圧 p は次式で計算される。

$$p = \frac{U_0 \rho f S}{R} \times \frac{2J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta} \times \sin(\omega t - k R) \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

ここで、 f は周波数、 ρ は密度、 S は振動子円盤の面積、 a は振動子円盤の半径、 k は係数である。また、 J_1 はベッセル関数を示す。

(8)式を近似的に実用設計式として表すと次式となる。

$$\theta \approx 70 \frac{\lambda}{2a} \quad \dots \dots \dots \quad (9)$$

したがって、ドップラーソナーに適するような鋭角な指向特性を選定できるように振動子径と使用周波数を選定することになる。

(4)音圧（音場）分布特性

微弱な散乱波を取り扱うドップラーソナー法では、計測領域ではできるだけ超音波の音圧分布を均等にする必要がある。一方、超音波振動子から放射される音圧はその進行方向で音圧の変化が生じる。

振動子中心軸状 $(\theta = 0)$ の音圧は以下の簡易式で計算できる。

$$p = 2\rho c U_0 \sin \left[\frac{ka}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{a} \right)^2} - \frac{x}{a} \right) \sin(\omega t - kx) \right] \quad \dots \dots \dots \quad (10)$$

このとき、 $\sin(\omega t - ka)$ は時間的に+1～-1の間の変化であり、音圧を考える場合は係数のみを考慮すればよい。この係数は音圧の最大値であるから、それを p_m と表せば、 x が大きい、つまり遠距離の時に上式は $k = 2\pi / \lambda$ を入れ近似的に下式で表される。

$$p_m \approx 2\rho c U_0 \sin 1.57 \frac{a^2}{\lambda x} \quad \left(\frac{x}{a} > 2 \right) \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

あるいは、

$$\begin{aligned} p_m &\approx 3.14 \rho c U_0 \times \frac{a^2}{\lambda a} \\ &= \frac{\rho f S}{x} U_0 \quad \left(\frac{\lambda x}{a^2} > 2 \right) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

以上の音圧変化を図5に示す。

ここで、 $\frac{x}{a^2} = 1$ の点以降は音圧が距離とともに滑らかに減少する。この距離を近距離音場限界距離 x_0 といい、簡易的には次式で計算できる。

$$x_0 = \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{D^2 f}{4C} \quad \dots \dots \dots \quad (13)$$

また、近距離音場限界距離以遠の中心軸上における音圧 P （遠距離音場という）は(11)、(12)式から近似的に次式で与えられる。

$$P \approx \frac{\pi D^2}{4\lambda x} P_0 = \frac{A}{\lambda x} P_0 \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

ここで、 A は振動子の面積である。

(14)式からわかるように、振動子の中心軸上音圧は、遠距離音場では振動子面積に比例し、距離 x に反比例している。中心軸上の音圧が距離に反比例して小さくなるということは超音波が広がりながら伝わっていくことと対応しており、遠距離音場では振動子から一定の距離における音圧は振動子の中心軸上で最大と

なる。一方、前述の近距離音場では振動子の中心軸上で音圧が最大になるとは限らない。このため、近距離音場の領域で得られた信号は必ずしも振動子の中心軸上の位置を示すものではないことに注意を要する。

(5)音響インピーダンス

音響学では音の強さの定義を「単位面積を単位時間に通過するエネルギーを音の強さ I とする」としている。一方、実際の計測の手段として超音波を用いる場合は、受信したエコー信号を電気的に取り扱うので、通常は横軸を時間あるいは距離縦軸をエコーの高さ（強度）とする2次元座標のCRTで観測する。この時、エコーの高さ h の二乗は超音波のエネルギーに比例している。超音波計測における信号の取扱については、前述しているように、理論展開する場合には物理的に正確なエネルギーで展開し、同一周波数で同一媒質であるなどの場合には実用的に音圧 p として取り扱うことが便利であり、本書では、これに従う。

音圧 p は最大振幅 p_m が定義されていれば、 $p = p_m \sin(\omega t - kx)$ なる関係式で表される正弦平面波に対して次の式が成立する。

$$I = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho c} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

$$h \propto p_m \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

ここで、 ρ は媒質の密度であり、それに音速 c を乗じた ρc を音響インピーダンス Z と呼び、超音波伝播媒質の物性により定まる固有の定数である。

したがって、音響インピーダンス Z は超音波の透過、反射などの伝播特性に重要な物理的意義を有しており、伝播媒質に合わせた素子材料にするなどの超音波伝播経路の設計や水中特性とナトリウム中特性の違いの評価などに不可欠な検討パラメータである。例えば、水の場合の音響インピーダンス Z_w は約 $1.48 (\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{s})$ であるのに対して、 400°C の液体ナトリウム中での Z_s は約 $2.37 (\times 10^6 \text{ kg/m}^2 \text{s})$ となり、同じ素子を使用した場合に、約 1.6 倍 ($Z_s / Z_w = 2.37 / 1.48$) の感度（音圧）の違いとなる。また、振動子材質やダイヤフラムの有無及びその材質などにより、同様に感度の違いが生じることになる。したがって、水中試験の結果からナトリウム中試験の結果を予測する場合や、両者の結果の比較評価を行う場合には音響インピーダンス Z の違いを考慮しなければならない。

3. 現状技術及び課題

3.1 現状技術

3.1.1 手法

ドップラーソナー法は、1950年代には盛んに研究が行われ、日本においても、1960年代には水中及び海中用の流速計測機器として市販されている記録がある。これらの技術は主として送受信の素子を個々に設けて、連続波を使用し送受信の超音波ビームが鋭角に交叉するように配置したものである。この場合の測定範囲や精度は、2章に記したように、それぞれ0~2.5m/s、2mm/sである。一方、一つの超音波素子でパルス信号あるいはバースト信号を用いて、受信信号の処理にゲートを掛け、そのタイミングを時間軸にスイープさせる方式は、研究用途が主で十分な精度保証ができる実用化までには至っていなかったようである。その理由は、当時の技術では後述する信号処理回路の高周波取り扱いの制約があったためである。

その後の技術の進展は、主として信号処理に電子回路技術の進歩を反映させていくが、その基本機能は、現在に至るまでに格段の進歩は認められない。特に、水中で使用する場合には、より高精度が期待できるレーザードップラー法がレーザー技術の著しい進展により実現されるに至って、ドップラーソナー法の研究開発がレーザーに比較して遅れたものと推測する。

一方、手法に不可欠の超音波の散乱現象に関する研究については、構造材料の劣化診断手法などを代表例として、研究が行われている。それらは何れも超音波伝播経路に微細な不連続構造が存在することにより、これらが散乱源となって、反射波あるいは透過波のスペクトルが送信波のそれに比較して変化していることから、対象物の物理的な変化の程度を推測する試みであり、材料の診断としては水素脆化などの検査技術として研究が行われている。これらの研究においては、実験による定性的な測定の有効性を示すデータは示されているものの、散乱現象を正確に捉えようとした研究は報告されていない。また、液中の散乱現象に関する研究としては、医療分野において血管の血液流速を計測する試みで研究が行われている。この場合、血液は超音波の伝播特性の観点からは、微小散乱体を含む懸濁（不均質）媒質としての取り扱いになる。そこで、血管断面の平均流速を求めるために、血管に超音波を照射して、微小散乱体群による散乱波（後方散乱、側方散乱など）あるいは透過波のドップラーシフトを分析して流速を算出している。この分野においては、微小散乱体を含むいわゆる懸濁液中の超音波伝播挙動に関する理論研究や実験研究も行われている。特に、その大きさに分布を有する微小球懸濁液中の音速及び減衰係数についての研究、並びに、それらの近似物理モデルとしてのポリエチレンを使用した実験なども行われている。ここで、これらの研究と本件で対象とする計測との現象論的な差異について明らかにしておく必要がある。血液中の血流計測では、微小散乱体を統計的な群として取り扱うのに対して、本件では、個々の散乱体の形状の効果を群として超音波伝播挙動の複

合的取り扱いを行う必要がある。これは超音波の照射領域の物理的な大きさの違い及び超音波の波長と散乱体の大きさの関係の違いによる。

3.1.2 要素技術

(1)センサ技術

超音波素子については、水浸用の素子が一般に広く用いられている。ただしこれまでに記述したように、散乱現象計測用としては現象に結びつけた研究が不十分であるために、素子の最適化には至っていない。通常、流速計測に用いられる素子の仕様は次の通りである。周波数2~10MHz程度で振動子外形で数ミリメートルのものが一般的である。

一方、200°Cを越える高温用の素子については、現在までに数種類のものが研究、実用化されている。実績のある材料としては、ニオブ酸リチウムの単結晶、チタン酸鉛系セラミックス及びPZT系セラミックスである。各振動子材料の代表的な物性の比較を表1に示す。耐熱作動温度を支配するのはキュリ一点Tcであり、250°C程度まではPZT系が、300°C程度まではチタン酸鉛系が使用できることになる。ただし、比誘電率から分かるようにPZT以外の素子の値はPZTに比較して一桁小さく、感度の点で改善が必要となる。振動子の高温下の研究は需要の少なさから極めて小規模に行われているが、近年になって音響変換効率を改善する試みもなされている。特に、表中のニオブ酸リチウムについては、Zカットと呼ばれる従来の結晶切り出し方向に変えて理論上圧電効果のより高いY-36と呼ばれる切り出しが可能となり、わずかながら特性が改善されている。また実際に、振動子を超音波素子として使用する場合には、電極の接合、バッキング材の接合、ダイヤフラムの取り付けなど種々の加工が必要となり、現実の耐熱性に制約を与えるのは、これらの加工製作に関する条件によっている。例えば、キュリ一点の高いニオブ酸リチウムの耐熱性を決めているのは、電極やダイヤフラムを接合する材料や加工方法であり、素子の耐熱性を向上させるには振動子物性の他に、素子化するために必要な材料開発や製作技術の高度化が重要となる。また、高温に耐えしかも音響的に優れた特性（物性）を有する素子の開発のためには、振動子材料の物性研究が不可欠である。特に筆者が期待するのは、セラミック系振動子の材料組成比を変えることによる特性の改善研究と、振動子の分極過程をキュリ一点より高い温度で高温再分極と呼ばれる処理を行うことによる効果の研究であり、これまでの材料物性からの研究でその可能性が指摘されており、特性改善のための物性研究をする必要がある。

ポリマーセンサ

1969年にポリフッ化ビニリデン（PVDF）膜を分極し、大きい圧電効果があることを発見して以来、高分子圧電膜（ポリマーセンサ）の研究が行われてきた。1989年に超音波素子として実用的な電気機械変換効率ktを有するフッ化ビニリデン（VDF）と3フッ化エチレン（TrFE）の共重合体P（VDF-TrFE）

が開発されて以来、医療用分野を中心に研究や実用化が図られてきた。現在では無機系の圧電素子に比較して、高周波化しやすく高分解能であること、加工成形が比較的容易で理論に近いものが設計できること、小さい物が製作可能であること、並びに、人体に無害であることなどを主たる理由として、広く医療用に供されている。

ここで、ポリマーセンサと従来の無機系センサの違いについてまとめておく。表2に従来の無機系の圧電素子であるPZT及びZnO系とP（VDF-TrFE）及びP（VDCN-VAc）の特性の比較を示した。ここでポリマーを無機圧電材料と比較すると次のようなことが言える。

- 音響インピーダンスZが小さい
- 電気機械結合係数ktが小さい
- 圧電定数g33が大きい
- 誘電率が小さい
- 誘電損失と力学損失が大きい
- 誘電率と弾性率（音速）の温度変化による変化が小さい
- 介電場Ecが大きい

音響インピーダンスは水やプラスチックに近く、水中での使用に適していることを示す。また、誘電率が小さいことは低周波かつ小面積の素子には不向きなことを示しており、散乱現象を扱う場合の比較的高い周波数には向いている一方、振動子直径はある程度の面積を有する必要があることになる。また、この他の特徴として、周波数帯域が比較的広いこと、振動子の加工性にすぐれていること、及び理論に近い特性の設計が可能なことが挙げられ、音圧分布やビームプロファイルの自由な設計には適していることになる。

以上から、水中での散乱現象の実験研究には、高周波が期待でき、設計の自由度が高いポリマー素子を無機系素子と併用して使用することが良いと思われる。無機系素子との使い分けは、詳細な散乱現象を計測する場合で高周波が必要となる場合や散乱効率を挙げるために高周波化する必要がある場合、あるいは散乱現象の周波数依存性を調べる場合に適用することが望ましい。また、散乱粒子径に比較して同程度の波長の超音波を発生できれば、より精度の高い計測のできる可能性もある。

(2)信号処理技術

散乱源からの反射信号の処理については、前述したアルゴリズムの中でドップラーシフト周波数の計測が流速変換で主要な処理となる。従来は、次に示すゼロクロスと呼ばれる方法が主流であった。この方法は不規則信号の振幅が0となる頻度を計測し、その信号の統計的性質、例えば平均周波数などを取り扱うもので、平均ドップラー周波数の平均流速に比例するという関係を利用するものである。実際の処理は、送信波と散乱源によるドップラーシフト周波数を含んだ受信波を混合検波し、ローパスフィルタによりドップラーシフト周波数領域

以下の周波数を取り出すと、ドップラーシフト周波数そのものが得られる。この信号は、2章の(4)に記したようなパワースペクトルを有する不規則な波形の信号である。このドップラー信号のゼロクロス頻度を入とすれば

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 S(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \quad \dots \dots \quad (17)$$

で表せる。この式と(3)式の関係から、 λ と \bar{v}_0 との比例関係が成立する実用的な流速の範囲においては超音波照射領域の平均流速 \bar{v}_0 が算出される。

一方、ゼロクロス方式が高周波を直接取り扱う電子回路の制約から簡易的に用いられた手法であるのに対して、新しい技術としては近年進歩の著しいデジタル信号処理技術の応用がある。デジタル信号処理技術を適用すれば、数十MHz程度のアナログ信号を直接デジタル変換して、分解能数Hz程度で波形解析できる。したがって、近年のデジタル信号処理技術により、ドップラーシフトを受けた受信信号を增幅し、デジタル変換して、時間軸方向にゲートを掛けてそのスペクトル変化をとらえることにより比較的容易に流速信号を得ることが原理的に可能になっている。

さらに、最近では、非破壊検査分野での定量化、データの質の向上を図る観点から、使用する超音波素子の特性の偏差を抑制するために、送信波形も任意にデジタル成形して出力信号の均一さを保証する技術も実用化されている。したがって、この技術を応用すれば、送信波のスペクトルも散乱現象や受信信号処理の要求にしたがって自由に作れることになり、計測精度の向上に寄与できるものと推測される。

3.1.3 原子炉工学室における研究開発

原子炉工学室においては、これまでに高温ナトリウムの流速分布計測技術開発として、水用に市販されているスイス MET FLOW 社の UVP (Ultrasonic Velocity Profile Monitor) を購入し、これにナトリウム中用超音波素子としてニオブ酸鉛 ($PbNbO_3$) 及びニオブ酸リチウム ($LiNbO_3$) を組み合わせて、一素子方式でナトリウム配管内の流速分布を計測し、ナトリウムへの適用の問題を明らかにする検討が行われた。この時の散乱あるいは反射源はナトリウム中の不純物及び物理的に外部から注入した微小気泡である。このうち、ニオブ酸鉛の素子を使った実験結果が報告されているので、これについて、技術レベル及び明らかになつた課題を筆者の評価を含めてをまとめると

(1) 結果の総論

計測可能な温度範囲は最高300°C程度で、流速計測の精度は、電磁流量計をレ

ファレンスとした場合、計測範囲90mm/s～560mm/sで約±20%以内の精度であったことが報告されている。

(2)センサ技術

ニオブ酸鉛系圧電素子のキュリ一点は380～400°C程度であり、試験で使用したものは400°Cと報告されている。通常ニオブ酸鉛系は300°C弱で比誘電率の相転移点が存在するが、300°C程度まで共振特性を保持する。この材料の特徴としては共振周波数の変動が極めて大きいことが挙げられ、相転移点を一旦越えると温度を常温に戻しても共振周波数は元には戻らない。これは材料の機械的品質係数 Q_m が小さいことによる。

したがって、通常のニオブ酸鉛系の素子を使用した場合には、計測可能範囲の上限は300°Cであるという結果とそれ以上の温度で共振周波数が失われるという結果は明快に説明できる。

一方、感度については、水中での感度測定データ及びナトリウム中での完全反射源のエコーデータがないので評価ができない。したがって、今後は、供試前後に水中でレファレンス用感度データを採取し、ナトリウム中においても温度及び時間の変化に合わせてデータを探る必要がある。

また、ナトリウムと素子ダイヤフラムのwettingについては、供試した素子に金メッキが施されており、酸化皮膜が着きにくいようになっているものの、水中での感度と比較していないので、wettingは問題とならないと結論づけることはできない。通常、金メッキを施した場合でも、ナトリウムに浸漬した場合、感度は時間と温度により変化する。金を溶融させて音響結合を維持するような方法で微小散乱源からの微弱な散乱波を計測する手法においては、特に近距離音場での散乱超音波挙動の把握を行い、影響が極小であることを明らかにする必要がある。

(3)微小散乱源

散乱源については、ナトリウム中の不純物を微小散乱源としたケースと外部から注入した気泡を散乱源としたケースの2種類のケースの試験が実施されている。前者においては、不純物の体積濃度に関するコールドトラップ温度を変化させた時の測定範囲について言及されており、それによればコールドトラップ温度が高い、すなわち、不純物の濃度が高い場合には測定範囲が狭くなるという結果が示されている。しかし、これは散乱減衰に起因すると推測され、減衰係数及びそれを求める基礎研究がこれまで行われていないので測定可能な範囲は推測できない。また、流速の違いによる計測の信頼性について言及されており、それによれば、管内の平均流量が大きい場合、すなわち超音波ビームを横切る散乱源の単位時間あたりの絶対数が大きいほど信頼性が高いと結論づけている。しかし、これはUVPで処理できる信号が入力されることを前提として計測の可否が判断されており、流速が高い場合に計測の信頼性が高いということは、ドップラーシフト周波数の分解能がある値以上にならないと計測できないという、計測回路の能力を示していることになり、散乱現象による計測の限界を示唆す

るものではない。

一方、気泡を注入した場合の計測結果であるが、ビーム軸方向のある距離より遠方はほぼ同一流速値となっている。この理由として考えられるのは、気泡及び気泡群による散乱よりもむしろ反射に近い現象で超音波が後方に反射されているために信号強度が高くなり、また、本来近距離領域の信号であるにもかかわらず、気泡あるいは気泡群で多重散乱しているために遠方領域の信号として処理されているためと推測できる。したがって、超音波の散乱現象を詳細に研究し、計測手法と結びつけることが必要である。

(4)精度

管内断面の流速分布の平均的な誤差は±20%以内との結果が得られているが、ビーム軸方向の精度は素子から距離が遠くなるほど低下している。その要因は、ビーム路程が長くなるにつれて増大する誤差の蓄積に加えて、超音波ビームの広がりや音圧分布による散乱、超音波の減衰、不純物以外での散乱現象、さらに散乱体間（群間）での多重散乱（反射）などが推定できる。しかし、現象把握研究が十分でない状況にあり、その因子間の効果の程度及び計測に与える影響を明らかにするには至っていない。

(5)特異現象

計測された結果においては、素子近傍、ダイヤフラムから40mm程度で局所的に流速の数倍の大きな値が観測されている場合がある。実現象でこれに相当する流れが存在しないことから、何らかのエラーであることは明らかであるが、報告書中ではその理由が明らかにされていない。推定では、信号処理回路に特有な事象、あるいは素子の近距離音場領域における比較的音場の局所的に広角な部分に計測対象配管の素子取り付け箇所が配置されているために、超音波ビームと流れが交叉する角度が本来あるべき条件とは極端に異なっているにもかかわらず、特段の配慮のない換算係数で処理しているために生じていると思われる。これは実現象と処理のアルゴリズムの不整合、並びに超音波ビームプロファイルなどの超音波仕様の不整合が問題であると思われる。したがって、これらの基礎的な現象の把握が必要である。

3.2 技術課題

以上から、本件で設定される開発課題は次のように整理される。個々の課題の内容については5章の実施項目の中で詳述する。

<計測手法に係わる課題>

- (1)液中での散乱源による散乱現象の把握
- (2)超音波挙動、特性の把握
- (3)手法の最適化

<要素技術の高度化>

- (1)センサ要素の高度化
- (2)信号処理手法の高度化

(3)音響伝播解析技術の高度化

4. 高度化の目標

本研究では、計測システムの開発の目標を次のように設定する。

4.1 用途（反映先）

熱流動現象の実験計装手段として水及びナトリウム中で使用する。

4.2 仕様

(1)環境条件

- ・水中 : 最高600°C

過去のR&Dの実績の上限

- ・ナトリウム中 : 200°C～650°C程度

プラントの通常運転から異常な過渡事象までを含めて、燃料集合体出口近傍を代表とするナトリウムの最高温度として設定

- ・耐久時間 : 24×30時間 at max.600°C

ナトリウムループに設置して使用する場合に、耐久以外の個々の熱流動現象に関する試験に要する最大期間に当該試験ループの起動停止の時間を加味した期間約1ヶ月を設定。あわせてセンサの耐熱耐久性の高度化の程度（現状技術からの外挿）を考慮

- ・放射線 : 考慮せず

炉外実験計装用

(2)性能仕様

- ・測定範囲 : 50mm/s ~ 10m/s

最小値は、対応するドップラーシフト周波数を処理するための回路の分解能（数Hz程度）を考慮して有効2桁を保証する値を設定
最大値は、対象とすべき最高流速を設定

- ・測定距離範囲 : 15mm ~ 2m

至近距離は、音圧分布が均等になる超音波の近距離音場限界距離以遠（遠距離音場）を設定
最遠距離は、超音波の距離減衰及び計測誤差保証の観点から設定

- ・精度 : ± 5mm/s以内

ドップラーシフト周波数処理回路の分解能（数Hz程度）から設定

4.3 各段階の開発仕様

4.2を満足するために、各研究段階の目標達成度を示す。

(1)Phase1 基礎現象の整理

水中の超音波散乱現象について以下の項目について知見を得ることを目標とする。

達成目標： ○トレーサーを混合しない水中において、散乱効果が信号に及ぼす影響を調べるために周波数依存性及び減衰係数 α を求める。

- 不均一媒質（トレーサーや微小粒子が懸濁している場合）中に対し、散乱源メカニズムの同定とドップラーシフトの定量検証を行い、時間差計測による超音波ビーム軸方向の空間的な計測の可否について判断する。
- 不均質媒質（温度揺らぎなどによる密度差がある場合）中に対して、伝播媒質の密度境界上における散乱や反射現象を確認し、計測に与える影響を明らかにする。

(2)Phase2 現象計測の最適化研究

Phase1の結果を踏まえて、散乱現象の計測に関する最適な条件を実験により求める。

- 達成目標：
- 散乱源の仕様を明らかにする。
 - 現象と超音波の相関関係を整理して、以下の超音波仕様の最適化を図る。
 - ・中心周波数、周波数スペクトル、ビームプロファイル及び音場分布
 - 信号処理について、流速分布計測処理アルゴリズムの構築、検証及び信号スペクトル変換時の流速換算係数等の主要係数を最適化する。

(3)Phase3 共通基盤要素の研究

Phase1及びPhase2と並行してセンサ要素及び音響特性解析技術の高度化を図る。

- 達成目標：
- 水中計測用の理論研究用及び高精度計測用に最適な条件となる素子の開発を実現する。
 - 高温ナトリウム中用センサを開発する。このため、課題である次の個々の目標を達成する。
 - ・振動子物性の比較検討及びそれによる振動子仕様の選定
 - ・高ダンピングの実現（収束条件1波程度のダンピングを狙って材料を選定、振動子接合技術の開発）
 - ・音響結合条件（ダイヤフラム仕様の設定、接合技術開発）
 - 不均質媒質の時系列音圧計算プログラムの作成、検証
 - 同上、不均一媒質の取り扱いの実現

(4)Phase4 手法の検証・改良及びシステム化

- 達成目標：
- 計測システムを試作する。
 - 水中の性能予測解析を行うとともに、水中で性能検証する。精度、計測範囲などの主要計測条件について、検証した仕様を得る。
 - 水中試験の結果からナトリウム中での性能予測解析を行うとともに、ナトリウム中で性能検証する。

以上を以て、4.2に示す開発目標仕様を達成する。

5. 研究計画

5.1 実施項目

開発目標を達成するために必要な実施項目を以下に記す。

5.1.1 基礎特性研究

(1) 静止場及び流れ場での音響伝播挙動研究

主たる狙いは、液中での減衰特性を把握することにある。流速計測では流体内の微小粒子を散乱源とする反射信号を取り扱うが、この計測のために液中に⼊れて使用する微小粒子（トレーサー）が存在しない場合においても、2章に記したように理論的には散乱が生じており、予めこれらの影響を評価しておくために、トレーサーを入れない場合の散乱現象を調べ、スペクトルの変化及び発生因子との相関についてまとめる。また、超音波は液中で減衰するので、計測システムの設計に必要となる減衰効果を定量評価するために、減衰（散乱減衰、粘性減衰などの総和の効果）量を調べ減衰係数 α を実験的に求める。また、これらは、静止液中だけでなく、等温状態の流速場でも確認しておく。

(2) 不均一媒質中及び不均質媒質中の音響伝播挙動研究

液中にトレーサーあるいは不純物等の超音波の反射源（散乱源）が存在する場合、すなわち、超音波伝播媒質が不均一である場合の超音波と反射（散乱源）及びその群との相互作用を調べる。具体的には以下の項目について水中で調べる。

<ドップラーシフトの検証>

流れ場にある粒子からの散乱波スペクトルシフトが粒子の流速に依存（比例）していることを確認する。

- ・送信波スペクトルと超音波伝播軸方向位置での散乱スペクトル及び透過スペクトルとの比較を行う。

速度を持たない粒子からの散乱波のスペクトルが有意にシフトしていないことを確認する。原理上は粒子が存在しなくとも散乱はあるので、(1)の結果と比較する。

- ・送信波スペクトルと反射（散乱）スペクトルとの比較を行う。

<分布計測原理の確認>

一つの送受信素子で超音波伝播パス上距離方向の流速分布計測ができることを確認する。

- ・距離方向各位置での散乱波スペクトルと送受信同一プローブ受信散乱スペクトルの比較を行う。

上記の計測値が粒子の流速分布に合致することを確認する。

- ・同上

<散乱源の同定>

散乱源が粒子単体か、粒子群（粒子間間隔）かを確認する。これまで E.Krainerは個体中ではあるが微細に分散した異相粒子による散乱における異相粒子間距離と超音波の波長の関係について言及しており、それによれば、粒子間距離が長い場合には、減衰係数 α は粒子径の 6 乗に比例し波長の 4 乗に反比例すること、また粒子間距離が波長より長い場合には減衰係数 α が粒子径の 3 分の 2 乗に比例し波長の 5 分の 2 乗に反比例することを指摘しており、後者の場合にはRayleigh散乱とは異なることになる。実際に使用する粒子の径は波長より十分小さい場合が殆どであるので、通常の考え方では Rayleigh散乱と理解されるが、これまでの試験結果からは必ずしも粒子の体積密度と反射音圧の相関関係は認められていないので粒子間間隔の効果も確認するとともに散乱源を同定し、散乱源の条件と反射音圧の関係を求める。

＜密度差境界での散乱現象の把握＞

また、液中に温度揺らぎなどにより超音波の伝播経路上に密度差が存在する場合、すなわち、超音波伝播媒質が不均質である場合の超音波の密度境界上の屈折や散乱挙動及びその影響を調べる。水中にて挙動確認を行い、ナトリウム中については後述する伝播特性解析により水中で検証し、ナトリウム中を予測評価する。

(3)超音波特性との相関関係の整理

使用する超音波の仕様と計測に係わる信号特性について実験的に検討し、理論検証しておく。具体的には散乱波信号を取り扱う計測の場合に相関のある以下の特性について検討する。実験は外乱影響因子が少なく、比較的容易に実施が可能な水中で行う。

＜周波数＞

使用する超音波の中心周波数に対応する波長と散乱源となる微小粒子の径及び微小粒子間の粒子間隔との関係について調べ、散乱モードの同定によりこれらの相関関係を整理する。特にRayleigh散乱領域の境界条件や後方散乱限界並びに反射と散乱の取扱境界を明らかにしておく。

＜周波数スペクトル＞

散乱源に入射する超音波は計測の原理上出来るだけ単スペクトルであることが望ましいのに対して、受信信号のスペクトルは、ドップラーシフト周波数をフィルタリングしないような比較的帯域の広いスペクトルが要求される。このため、実際の散乱源からの反射信号をスペクトル解析及びドップラーシフト周波数を調べるためにフーリエ変換処理を行い、必要なスペクトルの条件を整理する。また、1 個の超音波素子で送受信する場合には、受信信号の処理に必要となる帯域幅を考慮して比較的広帯域の素子を用い、送信ではスペクトルを鋭くするために单一周波数のキャリア（この場合はトーンバースト信号）を使用することになるが、送信キャリアの条件（バースト信号波形の波数）と反射信号との関係を整理しておく。

<ビームプロファイル、音場特性>

散乱波による流速計測においては、原理上、対象測定領域へ照射される超音波のビームはできるだけ小さい（細い）ことが望ましい。しかし、実際に反射音圧が処理回路の入力条件に必要な程度の強度を有したり、また2章に解説したように振動子も有限の径を持つので超音波ビームはこれらの条件で決まる有限の幅を持っている。この場合、測定対象2次元断面に照射される超音波の有効面積の大きさは、測定誤差となって影響する。このため、ビームの広がりの程度と反射信号の強度及び誤差蓄積の程度を実験的に把握する。

また、超音波ビームは同じく2章に解説したように、ビームの進行方向に對して音圧分布を有しており、本件手法で必要条件となる音圧分布の均一さに對して、特に近距離音場での計測の影響について調べておく。特に近距離音場限界点付近での見かけ上の計測に対する誤差の影響を見ておく。

また、指向性についても、特に近距離音場でのビームの局所的な広がりによる計測への影響を確認しておく。

<ダンピング特性>

以上に記した他に、本件手法の必要条件として、微小な信号のスペクトルシフトを取り扱うこと及び計測位置同定と距離（時間）分解能確保のために、超音波信号はキャリア信号に対して、振動子のダンピング効果（パルスなどの信号を入力した後の残響を抑える効果）が優れていることが挙げられる。実際の超音波素子では残響が存在するために、実験でその影響を整理する。特にナトリウム用の素子では振動子全面にナトリウムバウンダリとして前面板（ダイヤフラム）を設ける必要があるため水用の素子に比較してダンピング効果が低下する。このため、特にダイヤフラムを有する素子のダンピング特性が計測に与える影響を整理する。

<信号強度>

ここまで述べた種々の着目パラメータについて整理した上で、現実の信号処理系の入力として十分な信号強度が得られる条件群を再整理する。特に、超音波ビーム方向（測定の距離方向）の信号は、ビームの進行に對して距離減衰や散乱減衰あるいは一部多重散乱により距離の2乗以上に反比例して信号強度が減衰する。このため、信号処理においては、距離で信号の增幅率を制御する必要があり、測定距離の範囲の制約となるので、限界距離の推定も行う。

(4)音響伝播シミュレーションコード開発

前述した超音波の液体中の伝播に係わる基礎現象を普遍化、一般化し、研究ツール及び設計のツールとして使うために、液中の音響伝播解析計算コードを作成する。

基本アルゴリズムは以下に示す音源重畠法を使用し、非均質媒質場の伝播に發展させることによってコードを作成する。また、微小気泡及び気泡群が存在する場合や音響インピーダンスの複雑な結合状態にある超音波素子内の伝播挙動

さらに干渉や伝播媒質中にある固体振動との連生についても取扱を考慮していく。

計算の基本的な手法は、有限境界液体媒質中の各境界面に音源を仮定し、全ての境界条件を満足するようにその音源値を定めることにより、通常の境界要素法より少ない計算量で任意位置の音場が計算できるというものである。この方法を拡張して、任意位置の非定常音源から音場を定める方法が検討されており、以下にその非定常信号に対する音源重畠法について記す。

ある特定周波数の定常問題では、平面境界面上の任意位置から放射される音場は次のように表せる。

$$P(r, \omega) = \frac{i\omega\rho}{4\pi} \int dS V_z(r', \omega) \frac{\exp(ik|r-r'|)}{|r-r'|} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

ここで、 r は観測点、 r' は音源位置、 k は波数 ($k = \omega/C$)、 V はその境界面に仮定した放射音源である。より一般的に自然境界条件における解も作ることができると、ここでは簡単に話を進めるために上記の解を用いて以下の説明をする。(18)式は。ラプラスの逆変換を施すと良く知られているように時間軸の解に戻すことができ、次のようになる。

$$P(r, t) = \frac{\rho}{4\pi} \int dS \frac{1}{|r-r'|} V_z\left(r', t - \frac{|r-r'|}{C}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

この解は、境界平面が振動で音を放射する時の正確な解である。全く同様に境界面が完全反射するときの正確な解析解は、次のように書ける。

$$P(r, t) = \frac{1}{4\pi} \int dS \frac{1}{|r-r'|} \frac{\partial}{\partial z'} P_1(r', t) \Big|_{z=z_0} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

ここで P_1 は、その壁面に入射してきた入射音圧である。元々の音波の方程式は線形方程式であるから、放射する音と反射する音とを重ね合わせができる。そこで壁面境界面の音波の放射を次のように仮定する。

$$P(r, t) = \frac{1}{4\pi} dS \frac{1}{|r-r'|} f\left(r', t - \frac{|r-r'|}{C}\right) \quad \dots \dots \dots \quad (21)$$

その音源値 f は次の式から定める。ここで境界面の大きさ及び時間刻みは、問

題とする外力の時系列波形の時間、空間変化をゆっくりとした変化だと見なせる程度に小さく取る。

$$f(r,t) = \rho U(r,t) + \frac{\partial}{\partial z} P_1(r,t) \Big|_{z=z_0} \quad \dots \dots \dots \quad (22)$$

この様に音源値が定まると、任意位置、任意時刻での音場を予測することができる。散乱のような問題の時は、散乱体をこの様な微小境界面で囲むことで表現できる。しかし音源に含まれる音波のほとんどの周波数成分が、散乱体の代表的長さから定まる波長より低い成分しか含まれていないとき、散乱体を多数の面を使って表現するのは、その形状を表現するための必要メモリー及び計算量から言って膨大な量となる可能性がある。そこで予想される最高周波数から定まる波長より小さな散乱体に於いては、個々の散乱体に応じた微小散乱体の近似解を用いて散乱波を表現する。

例として、ここではパルス波が、壁面を透過するモデルを示す。

壁面前後に音圧差があるとき、その音圧差によって壁面に生じる壁面の加速度 α は、次のような式で表現できる。

$$\alpha(r,t) = \frac{1}{4\pi A} \int_0^t dt' \int dS' f(r',t') I \left\{ \frac{|r_1 - r'_1|^2}{4A(t-t')} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (23)$$

$$f = \frac{P_1(r_1, t)}{h\rho\omega}$$

$$A = \left\{ \frac{Eh^2}{12(1-\sigma^2)\rho_\omega} \right\}^{1/2}$$

ここで ρ_ω は壁面密度、 h は壁厚さ、 r_1 は壁面上の位置で、 I は積分正弦関数を示す。

このように、境界上に非定常音源を仮定することによって、任意位置、任意時刻の音場を予測することができる。

5.1.2 手法の最適化研究

基礎特性研究（現象把握研究）の結果から、微小散乱体（群）からの反射信号による液中流速分計測において、各計測条件の最適化を図る。具体的には以下の条件を設定する。

(1) 散乱源の仕様

液中の微小散乱源の物性（音響インピーダンスに寄与する密度）、径（形状）、体積濃度、群分布などについて、超音波の仕様（周波数やビームプロファイルなど）に合わせて整理する。

(2)超音波の仕様

(1)と同様、超音波についても、5.1.1に記した諸パラメータについて最適な条件を求め、実験で検証する。また、ナトリウム中の仕様については、現象では温度揺らぎによる境界面での散乱、屈折、音速変化に加えて、超音波素子についてもダイヤフラムや高温仕様による素材原料の制約により、水用のそれに比較して最適化しにくい条件となるので、素子設計仕様への要求を含めて、最適条件についてパラメータスタディを行う。あわせて、送信キャリアについても最適化を図る。

(3)信号処理アルゴリズム

基本的な信号処理の流れは、2章に解説した通りであるが、受信はスペクトルの解析の際の時間分解能、精度の要求条件をあきらかにする。また、フーリエ変換時の不要なスペクトル成分の除去やドップラーシフト量の流速換算係数の最適化などを図る。信号処理系（回路）設計に必要な条件を明らかにすることを狙いとし、試作回路により検証する。

5.1.3 センサ要素開発

現象把握研究とともに、もう一方のキー技術であるセンサの開発を行う。水用については、高周波化が比較的容易で設計自由度が高いポリマー素材で高性能化を図り、汎用として従来の無機素子の特性改善を行う。また、ナトリウム用としては、課題である高温化や高ダンピング化の改善を主とする要素開発を行い、あわせて5.1.2の結果から出される要求仕様を踏まえて、特性の適正化を図る。

(1)水用高性能センサ開発

ポリマー振動子を応用して以下の項目を実施する。液中散乱源の径に比べて、同程度の波長を持つ素子を開発することにより、散乱現象から、反射現象の計測をめざす。この場合は微弱で複雑なスペクトルを持つ散乱信号の処理に代わって比較的単純な拳動の反射波の取扱いとなるために、受信音圧レベルの違い及び処理アルゴリズムの単純さなどにより、測定精度と測定範囲の大幅な向上が期待できる。これによる問題は、距離方向で多重反射が生じて、距離方向に正確な計測ができる可能性があるということである。送受信を分ける2素子方式あるいは送信波にM系列等の識別機能を持たせることにより、多重反射を識別することが考えられる。高周波化の課題は振動子形状の制約及びインピーダンス整合にある。また、システム設計上は、信号処理の高速化が課題となる。

(2)水用汎用センサの特性改善

従来の無機振動子を主体にしたセンサについて5.1.2の結果を踏まえて特性改善を図り、測定対象（距離、精度、流速範囲）などに応じたセンサの専用設計を図る。

(3)ナトリウム用センサ開発

ナトリウム中用センサについては、課題が多く、以下に示す項目を実施する。

<振動子物性研究及び振動子仕様の選定>

200~400°Cの領域では、比誘電率 ϵ 及び電気機械結合係数 kt が大きく高感度が期待できるPZTについて、物性の面から検討を行い高温化を図る。特にキュリ一点（290~320°C）以上の高温から再分極処理を行うことによるPZTの高温特性記憶効果について調べて高温化の可能性を探る。あわせてPbTiO₃系圧電材料やZTL（Zircon-Titanium-Lead）をベースとした振動子の最適化を図る。

また、400°C以上より高温使用を可能にするため、キュリー温度が高い（1210°C）LiNbO₃系については、結晶方向と感度の関係等の基本特性の把握を行ない、欠点である感度の向上を図る。特にLiNbO₃系は比誘電率 ϵ の値が小さい（PZT系に比べて2桁小さい）ために、電気機械結合係数 kt が同様な値（50程度）であっても得られる音圧が低く感度向上が必要であるため、物性研究に力点を置く。

<ダンピング特性の向上>

高温用センサの場合、有効なパッキング材料が使用できないために、ダンピング特性が室温用に比較して低下する。このため、高温用のパッキング材料の選定を行う。候補材としてはセラミックベースの材料が有望であるが、熱膨張係数が極めて小さかったり、場合によっては負になるなど、振動子面との接合に問題を生じるので、パッキング材料と接合方法の検討を主に選定する。

<ダイヤフラム>

ナトリウムバウンダリとなる前面板（ダイヤフラム）は、振動子から発生する超音波が接合界面で反射したりダイヤフラム内で多重反射することなく効率よく液中に放射されるためには、ダイヤフラムの厚みが超音波の波長の2分の1以下になっていることが必要となる。例えば4MHzの超音波でナトリウム温度500°Cの場合には、ダイヤフラムの厚みは0.3mmより薄く、10MHzの場合では0.1mmより薄くする必要がある。このため、ダイヤフラムの加工技術を調査して実現の可能性を探る。また代替措置を含めてバウンダリ機能確保について検討する。

また、ダイヤフラムは振動子とよく音響的に結合している必要があるが、振動子材質は焼結金属であるため、金属のダイヤフラムとは熱膨張係数が異なるので接合方法を工夫する必要がある。接合材料及びその方法について検討する。

<wetting特性>

ナトリウム中に超音波素子を浸漬して使用する場合に、信号が受信できなかったり、予想する強度が得られない場合がある。これは、ダイヤフラム表面のナトリウムとの“wetting特性”いわゆる“濡れ性”による音響結合の不足によるものである。

ナトリウムと接するダイヤフラムのような金属表面における音響結合には、

wetting特性が支配因子となる。ナトリウムと金属は元々前述の音響インピーダンスが大きく異なるために、その界面では、超音波の反射が起こりやすい状態にある。金属表面が酸化して酸化皮膜が形成されていたり、表面形状が複雑であったり粗雑である場合には、ナトリウムとの境界間に不純物や酸化物が存在して超音波が音響インピーダンスの異なる物質との境界面で反射することにより、超音波の透過が減少し、結果として信号が得られないものと考えられている。300°C以下の比較的低温領域のナトリウムで良好な音響結合が得られにくいのは、酸化皮膜が取り除かれる条件が低温で得られ難いことによると推定されている。

5.1.4 手法の検証・改良及びシステム化

(1) 基本システムの開発

以上に示した試験研究の結果から、センサ及び信号処理回路を試作し、水中及びナトリウム中で性能検証を行う。

5.2 実施場所（使用施設及び装置）

使用する試験装置及び施設は以下のとおりである。

水流動試験施設：主として、基礎特性、手法最適化試験研究を実施する。使用する装置は現有のUVP特性試験装置を改造、機能追加することを基本にする。また、この他、散現象の基礎特性や超音波素子の特性試験には、簡易的に水中試験用の小規模な装置を製作する。

原子炉工学室既存のナトリウム施設：高温ナトリウム用センサの特性試験、ナトリウム流速測定の基礎試験およびナトリウム中の流速分布計測手法のシステム検証試験に使用する。

一方、信号処理回路やセンサの製作、並びに音響伝播解析コードのプログラミングなどの作業は、外注にて行う。

6. 結言

液体金属ナトリウム中のナトリウム流動現象の解明のために、超音波流速分布測定装置によるナトリウムの流速分布測定結果に対する考察を行うとともに、超音波を用いた計測の基礎理論と現状技術および課題という視点からまとめた。超音波技術を応用するこの手法研究は約半世紀近い歴史を有しているが、流動現象と超音波伝播挙動の相関関係を説明する基礎的な研究は十分ではない。このため、本検討では、まず散乱現象の計測に必要となる最小限の基礎理論の整理を行い、現象把握のための研究として、散乱挙動、とりわけ微小散乱源からの超音波散乱挙動を明らかにし、適切な計測条件を求めるための研究過程について検討した。それは、3つのステップとそれを支える共通基盤要素の研究から成る。最初のステップは、前述の基礎的な現象把握のための研究である。次のステップは現象を計測するための計測パラメータの最適化を図るための研究である。最後のステップは、提案された手法を検証し、実用的な計測手法として手法を確立する開発である。加えて、ここの段階に必要なセンサ要素や現象を正確に解析（シミュレーション）できる技術を整備することである。ナトリウム中の流速分布計測を成功させるためには以上の研究開発を実施する必要がある。

また、本件技術は、ナトリウムの熱流動現象の実験計装手段の提供だけでなく、その技術のさらなる高度化を図ることにより、温度と流量、流速分布、液位並びに構造物の可視化を同時に計測しうる可能性を有している。高速炉のナトリウム固有の技術の高度化を図る観点からも有望な技術と思われ、本件で開発される技術をベースにして、ナトリウム技術の向上に寄与することが重要である。

7. 参考文献

- (1) 西巻正郎、「音響工学上下巻」、近代科学者
- (2) 今市憲作、辻本良信、「流体音響学」、共立出版株式会社
- (3) 島川正憲、「超音波工学-理論と実際-」、(株)工業調査会
- (4) 甲藤好郎、他、「流体計測法」、(社)日本機械学会
- (5) J. Krautkramer, H. Krautkramer, 「Ultrasonic Testing of Materials」, Springer-Verlag
- (6) I. Alder, 「Library of Congress Cataloging in Publication Data」, Plenum Press
- (7) A. F. Metherell, L. Larmore, 「International Symposium on Acoustical Holography」, Plenum Press

表1. 代表的な圧電素子の特性

材料		kt(%)	$\varepsilon_{33T} / \varepsilon_0$	Tc(°C)
P Z T 系	C - 2	48	1400	320
	C - 5	45	1100	320
	C - 6	50	2000	320
	T - 9 6	51	2000	290
P T 系	M - 2	38	185	385
P N 系	F 1 0 0	39	300	530
L N 系	Y - 3 6	55		1210

表2. ポリマーセンサと無機系圧電素子の物性比較

	P(VDF-TrFE)	P(VDCN-VAC)	PVDF	PZT	ZnO
密度 ρ (10^3 kg/m ³)	1.88	1.20	1.78	7.5	5.7
音速 c (km/s)	2.40	2.62	2.26	4.60	6.4
音響化ヒンダス ρc (10^6 kg/m ² s)	4.51	3.14	4.20	34.8	36.4
弾性定数 c ^D (10 ⁹ N/m)	11.3	8.2	9.1	159	233
結合係数 k _t	0.30	0.22	0.20	0.51	0.28
圧電定数 e ₃₃ (C/m ²)	-0.23	0.14	-0.16	15.1	1.14
h ₃₃ (10 ⁹ V/m)	-4.3	2.6	-2.9	2.7	14
g ₃₃ (Vm/N)	-0.38	-	-0.32	0.025	0.06
d ₃₁ (pC/N)	12.5	7.0	25.0	-123	5.2
誘電率 $\varepsilon^S / \varepsilon_0$	6.0	6.0	6.2	635	8.84
力学損失正接 tan δ _m	0.05	-	0.10	0.004	-
誘電損失正接 tan δ _e	0.15	-	0.25	0.02	-

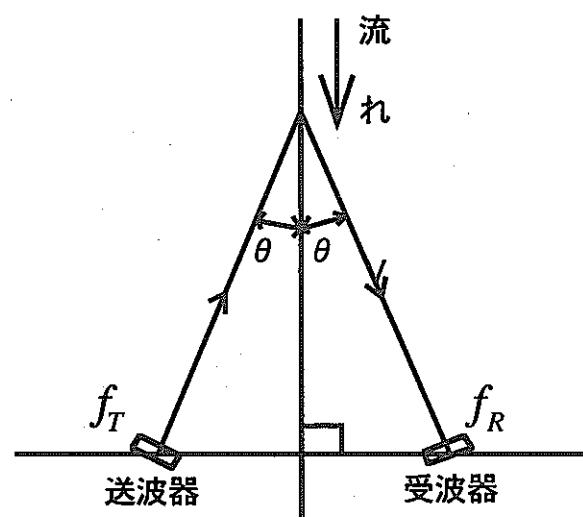


図1. ドップラーソナー法

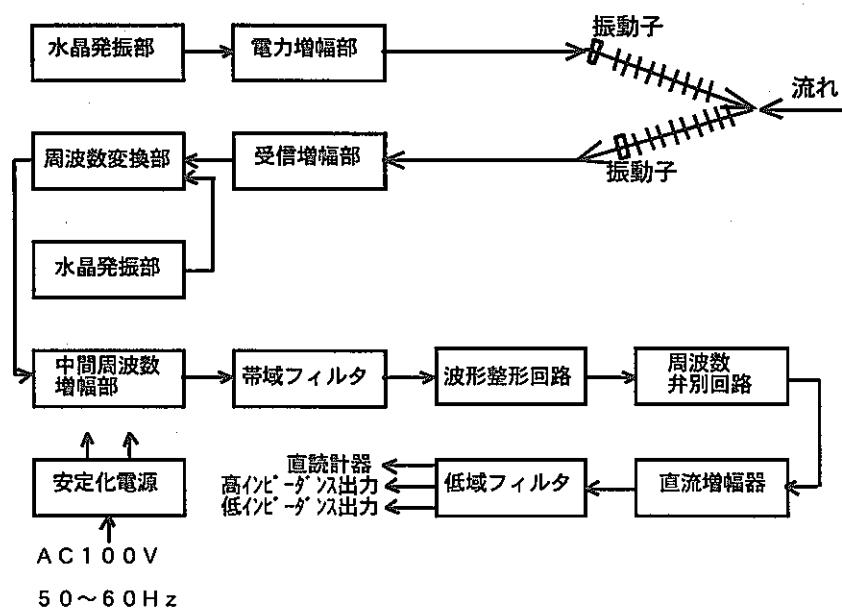


図2. ドップラーソナー式超音波流速計系統図

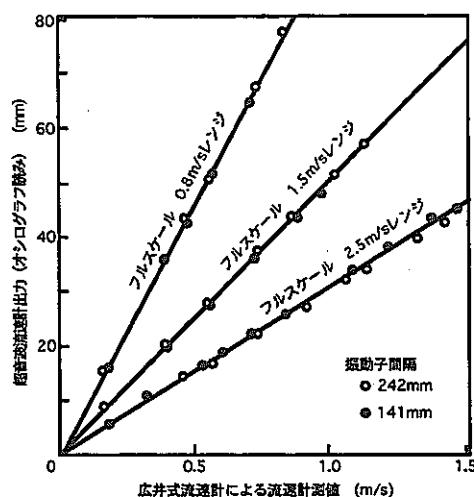


図3. ドップラーソナー式超音波流速計
検定結果、ビーム交差角30°

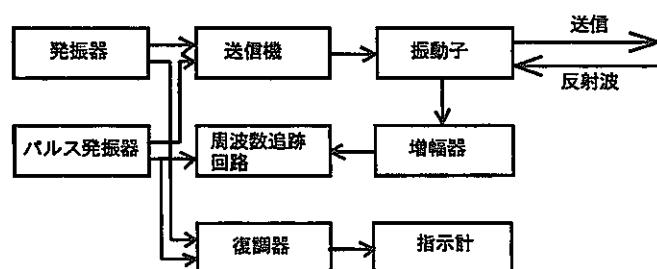


図4. 超音波パルス式ドップラーソナーフローメータ系図

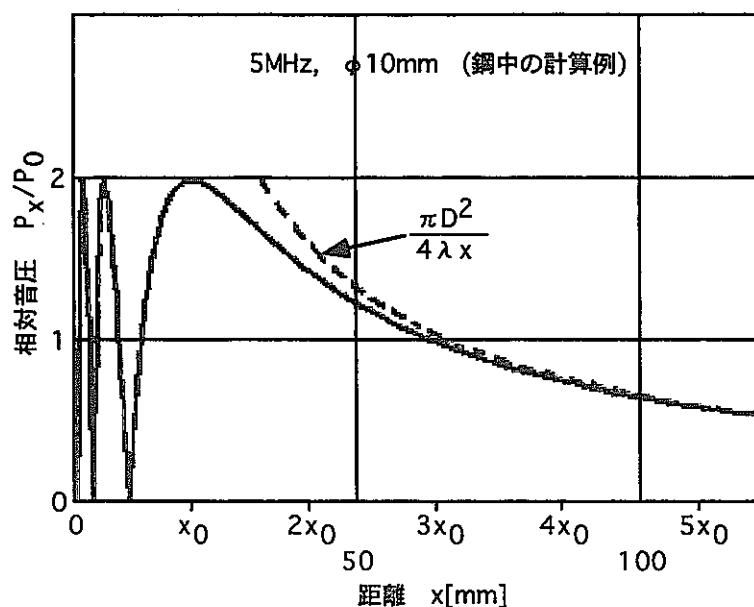


図5. 振動子中心軸上の音圧変化