

有限要素法を用いた流れ場中の超音波伝搬解析

＝流れ場が超音波伝搬速度、経路、周波数に及ぼす影響を解析可能に＝

伊藤忠テクノソリューションズ㈱ 池上 泰史

1. はじめに

気体・液体の流れ場中を超音波が伝搬すると、伝搬速度、伝搬経路、そして周波数が変化することが知られている。超音波流量計や風速計等はこのような性質を利用し、流量・流速を計測している。当社が開発している有限要素法による超音波シミュレーションソフトウェアComWAVE™は、これまで静止した気体・液体中の超音波伝搬解析を行うことで流量計等の特性解析を行ってきた。静止した気体・液体中の解析であってもノイズ原因の解明、最適なセンサ周波数や配置・形状等を求めるには十分な場合が多く、これまで原子力プラントの流量計設計等、利用実績も多い¹⁾。

しかし、流れを伴う実際の計測を再現することができないために、計測精度や検出性評価等には用いることが困難であり、流れを考慮した解析機能の開発が望まれてきた。

本稿では、まず有限要素法に流れ場を導入する手法について述べ、次に二次元の流れ場モデルでの超音波伝搬解析と理論解との比較を実施し手法の妥当性を評価する。さらに、三次元の流れ場モデルを定義し、超音波流量計の解析および流れに沿って移動する散乱体を付したモデルによる解析を示し、実際の流量計測の解析にも適用可能であることを示す。

2. 流れ場導入手法

ComWAVEでは、有限要素法 (FEM) を採用し、三次元空間での超音波伝搬を計算している。使用し

ている基礎方程式は以下の通りである。

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} - b_i = 0 \quad \dots(1)$$

ここで、 ρ は密度、 u_i は変位ベクトル、 σ_{ij} は応力テンソル、 b_i は体積力ベクトルである。この運動方程式を忠実に解くことにより、縦波、横波、レイリー波など伝搬の過程で生じる様々な振動挙動を自動的に再現することが可能である。

流れ場については、FEMメッシュの節点上の物理量をEuler座標を用いて流れに沿って動かし、物理量自体はLagrange座標で解くことで導入した。この手法は、semi-Lagrange法²⁾を参考に構成した。

3. 空気中の超音波ドップラー効果解析による検証

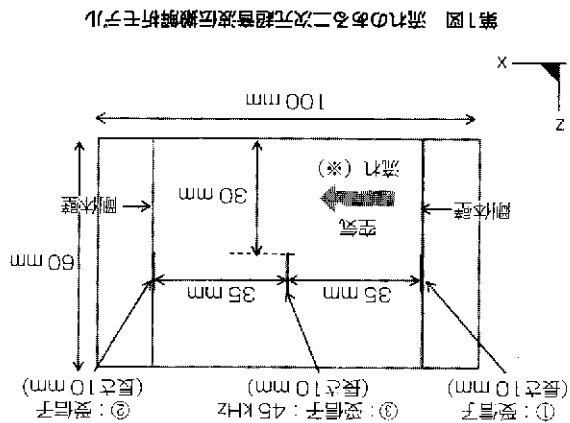
流れ場中の超音波伝搬解析の妥当性を評価するために、空気中の超音波ドップラー効果を二次元解析し、流れのある空気中を超音波が伝搬した際の受信波到達時刻、周波数の変化を理論解と比較した。

第1図に解析モデルを示す。ここでは45 kHzの超音波送信子をモデル中央に配置し、左右35 mm離れた位置に受信子を配置している。

解析結果を第2図に示す。ここでは(a)流れなし、(b)55.6(m/s)の一樣流れ、および(c)最大111(m/s)の分布流れの3つのケースについて、受信波形および超音波伝搬図を出力した。なお、受信子に到達する直前で、流れの速度を0にすることでドップラー効果を再現している。結果は以下の通りである。

- 一樣流れの結果より、左右受信子の超音波到達時刻と中心周波数の違いは、理論値と良く一致

※本記事は第34回超音波シンポジウムで発表された論文に基づいております。



第1図 流れのある二次元超音波伝搬解析モデル

- 受信振幅については、風上側は超音波の波長が短くなり、超音波が存在する領域が狭くなるため振幅が大きくなること、また、風下側は超音波の波長が長くなり超音波が存在する領域が広くなるため振幅が小さくなる。
- 分布流れの結果より、流れの不均一性により超音波伝搬経路が流れに沿って曲げられる。

4. 超音波流量計への適用例

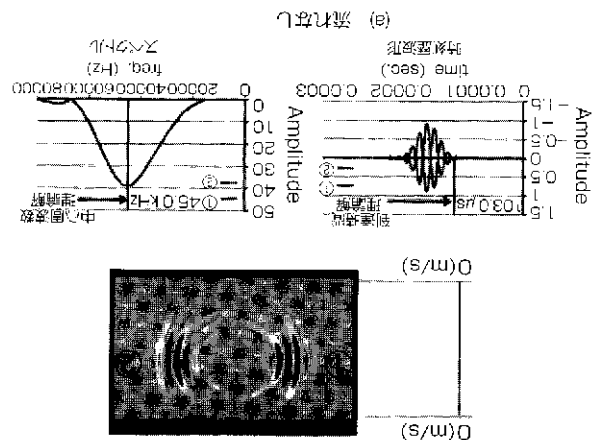
本章では、超音波流量計の解析を通して実際の計測装置への適用を示した。解析は、配管内の液体に分布を持たせた流れ場を導入したものと、および流れのある液体内に流れと同じ速度で移動する散乱体を導入したものの2つの場合について実施した。

(1) 三次元流れ場を考慮した超音波流量計解析
超音波流量計の解析モデルを第3図に示す。

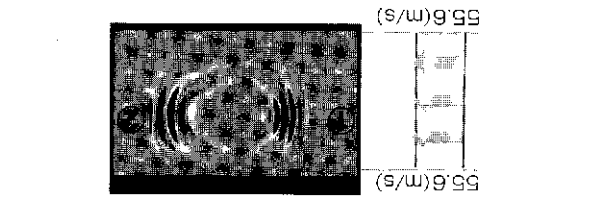
ここでは管を流れる液体の流れ場の分布を、管中央で最大流速とし、管壁に近づくにつれ流速が減少し、管壁面では流速0になるようにモデル化した。

また、超音波の送受信については、100 kHzの超音波を送信し、管の裏面に設置されている受信子①により受信波を得た。

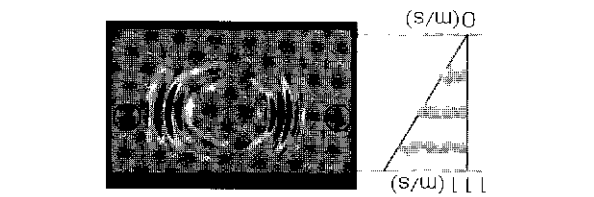
なお、最大流れ場速度は今回200 m/sとした。この値は液体中の超音波伝搬速度と比較して13%程度とかなり高速であるが、今回の解析では、固体の管



(a) 流れなし



(b) 一球流れあり



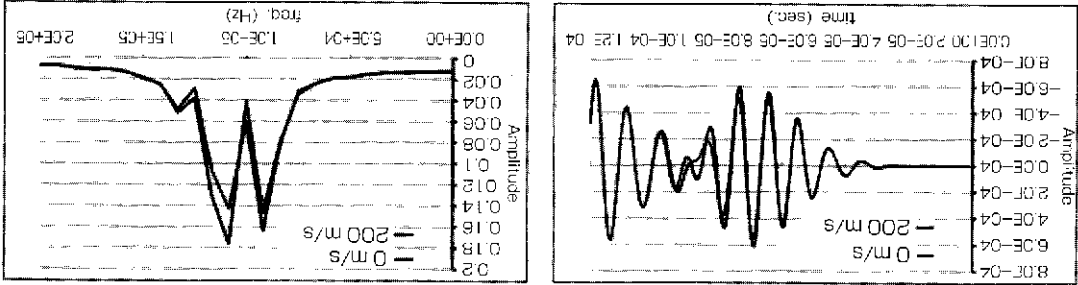
(c) 分布流れあり

第2図 流れのある二次元超音波伝搬解析結果

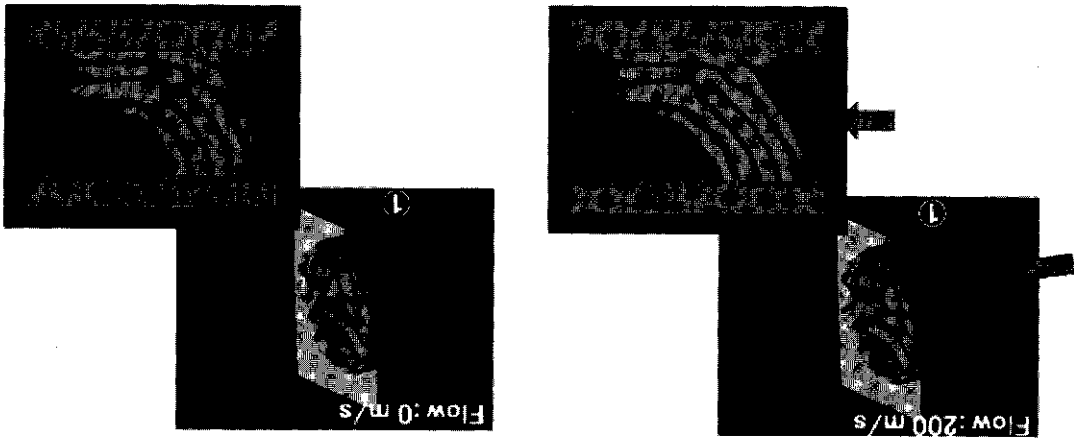
と流れを伴う液体の両方が存在する場合でも、計算が安定的に実施できるかどうかを確認することを主な目的としたため、速い流速で計算を実施した。またこの程度の流速であれば、管内の超音波伝搬を可視化した際に、流れの影響を明確に確認することがで

第4図 流れのある配管の超音波流量計解析結果

(b) 流れの有無による①での超音波受信波形の変化
(左図：時間波形、右図：周波数入ベクトル)

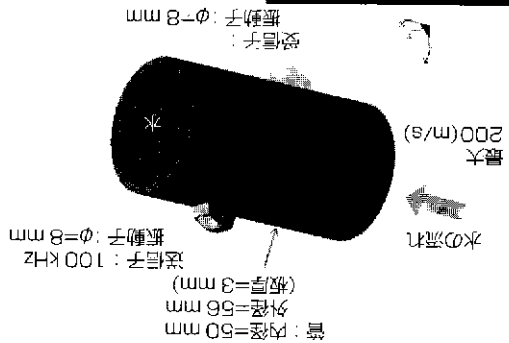
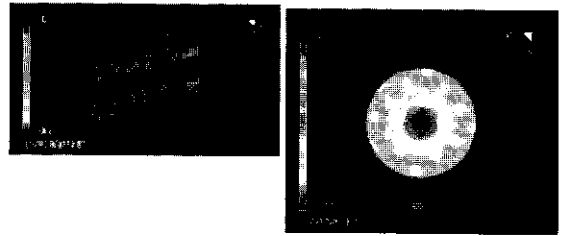


(a) 流れの有無による超音波伝搬図の変化



第3図 流れのある配管の超音波流量計解析モデル

流れ場速度分布図 (Y-Z面) 流れ場速度分布図 (X-Z面)



きるメリットもある。
解析結果として得られた超音波伝搬図を第4図(a)、
管裏面に設置された受信子①での受信波を第4
図(b)に示す。その結果、流れにより波面の傾きが変
わっていること、および受信波の時刻歴波形および
周波数入ベクトルに影響を及ぼしていることが確認
できる。
時刻歴波形の変化については、流れがない場合と
の比較において、先の空気中の受信波の特長と異な
り、受信波の到達時刻に変化が見られないことが分
かる。
これは、超音波の送受信子を管外壁に設置してい
るため、水中を通らずに管壁を伝搬する超音波が先
に受信され、水中を伝搬した超音波は遅れて受信さ
れるためである。この状況は解析で得られた超音波
伝搬図からも確認することができる。

(2) 三次元流れ場および液体内の散乱体を考慮した

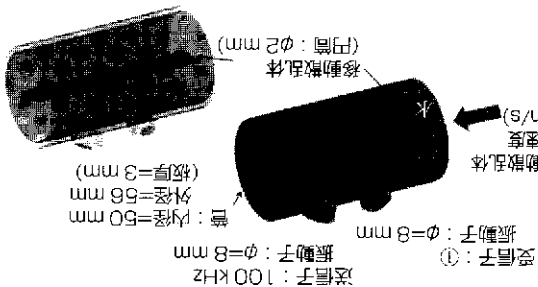
超音波流量計解析

ここでは配管内を流れる液体に乗って散乱体が移動する場合の超音波流量計の解析を行った。

流れ場は第5図に示す通り、流速222(m/s)の一樣な場を定義した。

なお散乱体としては、例えば気泡や、血液中の赤血球、または流れを見るために入れられる散乱体等が考えられるが、今回導入した流れ場の定義では粒子をそのまま移動させることが定式上不可能である。このため、散乱体を、粒子の移動方向に伸びる円筒管とし、円筒管自体が粒子と同じ方向に動くことで粒子移動をモデル化した。

本解析では散乱体として、第5図に示す通り、φ2mmの円筒管を液体中央部に平行に7列配置した。またこの散乱体は各設置場所の液体の流速と同じ速度で移動すること、散乱体の移動を再現した。本解析では、この移動散乱体のある場合とない場合の2つのケースについて解析を実施し、流れ場の影響を評価した。

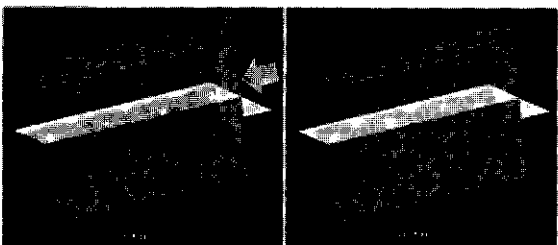


第5図 散乱体のある超音波流量計解析モデル

移動散乱体のある解析結果を第6図に、移動散乱体のない解析結果を第7図に示す。

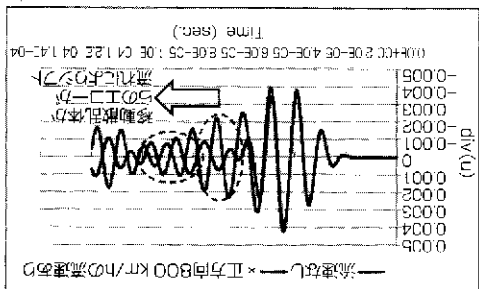
解析結果は以下の通りである。

- 散乱体からのエコーが、流れにより遅れて受信される。
- 散乱体がある場合、管底部からのエコーは散乱体により遮られて、振幅が低下している。また散乱体がない場合には、散乱体エコーと同様に管底部からのエコーが流れにより遅れて受信される。
- 超音波伝搬図では、流れの影響により波面の方向



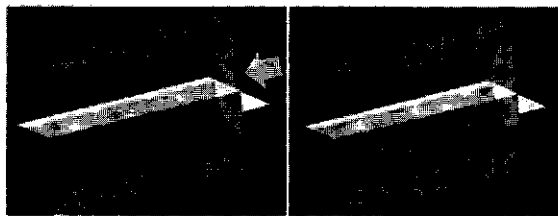
(左図：流れなし、右図：流れあり)

(a) 散乱体のある超音波伝搬図



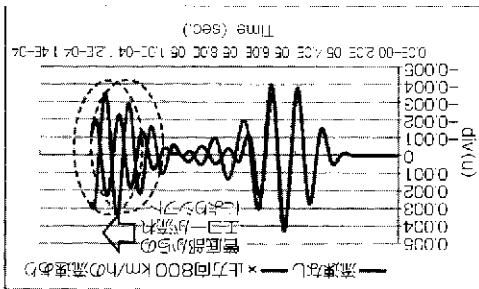
(b) 散乱体のある①での受信波形

第6図 散乱体のある超音波流量計解析結果



(左図：流れなし、右図：流れあり)

(a) 散乱体のない超音波伝搬図



(b) 散乱体のない②での受信波形

第7図 散乱体のない超音波流量計解析結果

きが流れのない場合と比べて変化している。特に風上側受信では周波数が高くなっている。最初に到達するエコー(管および管上部の水中を伝わってくるエコー)の後ろの方が流れのある場合に周波数が高くなっている。これは、管

壁を伝わってきた超音波に惹かれて、水中を伝わり流れ場の影響を受けている超音波が到達するためと考えられる。

5. まとめ

本稿では、有限要素法による流れ場中の超音波伝搬解析に必要な手法を紹介し、その解析を通して、流れ場が超音波伝搬の受信波到達時刻、周波数および伝搬経路に影響を及ぼすことを示した。また、基礎的な検証を通して解析の妥当性を示し、さらに超音波流量計解析を通して実際の計測にも適用できることを示した。

6. おわりに

今後は、実際の超音波流量計の計測結果との比較等も実施し、より現実的な解析への適用など事例を増やしていきたい。
また、現状の流れ場は流入する境界に分布を与え、方法で定義するため、流れの途中で方向を変えることができるようにし、乱流を計測する超音波流量計の解析にも対応できるように改良を進めていく予定である。

ソニックフェルトロニクス のすべて (PDF版)

注目が高まるソニックフェルトロニクスの基礎・応用展開から最先端技術までの本技術のすべてを分かり易く関係研究者、技術者に提供。

- 主な内容
- ソニックフェルトロニクスとは何か
- ソニックフェルトロニクスのプロセス技術
- ソニックフェルトロニクスの材料技術
- ソニックフェルトロニクスの応用展開
- ソニックフェルトロニクスの最先端技術開発

日本工業出版 0120-974-250
http://www.nikko-pb.co.jp/netsai@nikko

- 著者：大阪大学 菅沼克昭 他
- 体裁：PDF判 CD-R
- 定価：1,500円 (税込)



【著者紹介】

池上 泰史

伊藤忠テクノソリューションズ㈱

科学システムサポーターチーム 超音波・電磁技術課

課長

TEL: 03-6203-7344 (代表)

<参考文献>

(1) Ikegami Y, Sakai Y, and Nakamura H: "A Highly Accurate Ultrasonic Simulator Capable of Over One Billion Elements for Non-Destructive Evaluations", 7th Int Conf on NDE in Relation on Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components (2010)

(2) K.TEZUKA, M.Mori, S.WADA, M.MARTOMI, H.KIKUKA and Y.SAKAI: Analysis of Ultrasound Propagation in High-Temperature Nuclear Reactor Feedwater to Investigate a Clamp-on-Ultrasonic Pulse Doppler Flowmeter, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY April (2008)

(3) Takahashi S, Muramatsu K and Kimoto A: 3D Transient Analysis of Ultrasound Propagation in Flow Field Using Finite Difference Time Domain Method, IPSJ SIG Technical Report (2008)