

平成21年6月1日現在

研究種目：基盤研究（B）
研究期間：2006～2008
課題番号：18360453
研究課題名（和文） 原子力発電プラント増出力のための高精度超音波流量計測システムの開発
研究課題名（英文） Development of Accurate Ultrasonic Flow Rate Measurement System for Up-rate of Nuclear Power Plants
研究代表者：
木倉 宏成（KIKURA HIROSHIGE）
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教
研究者番号：00302985

研究成果の概要：

パルス超音波を用いた高精度流量計測法として、伝搬時間差式と流速分布計測式の双方の利点を生かしたハイブリッド型超音波流量計測法を用いて、原子力発電プラントの効率向上による増出力のための高精度給水流量計測システムの検討を行った。実機適用を鑑み、金属配管での超音波の透過率に起因するセンサ設置角を線形理論と実験から求め、高温条件でのセンサ開発とその最適化を行った。また、高分解能の測定には測定システムの時間・空間分解能を上げるため新しい信号処理アルゴリズムとして時間領域相関法を取り上げ、システム構築を行うと共に、計測手法として3測線およびアレー型センサを用いた複測定線計測を提案し、その有効性を確かめた。また、ハイブリッド型超音波流量計の基本概念を確かめるため、超音波流速分布計を用いて伝播時間差式超音波流量計の流量補正係数のキャリブレーション効果を調べ、原子力発電プラント増出力のための高精度超音波流量計測システムの基礎データを得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2007年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
2008年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	15,300,000	4,590,000	19,890,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：高精度給水流量計測技術、原子力発電プラント増出力、伝搬時間差式超音波流量計、流速分布式超音波流量計、ハイブリッド型超音波流量計、超音波流速分布計測法、パルス超音波のドップラー効果、超音波時間領域相関法

1. 研究開始当初の背景

現有の設備を大きく変えることなく、原子力発電プラントを増出力する技術が米国で取り入れられ、我が国においてもその導入が検討されている。原子力発電プラントの増出力技術にはいくつかの型式があり、中でも計測精度向上型の増出力技術として、原子力プラントの高精度給水流量計測技術が着目されている。しかしながら、米国における基準や技術をそのまま我が国に適用することは容易ではなく、学術的に十分な検討が必要である。たとえば、米国の発電所では伝播時間差式およびクロスフロー式の超音波流量計の導入が増出力技術として先行的に進められているが、配管内部の表面粗さや、高レイノルズ数での偏流に依存する速度分布が正確に模擬できず、また実機条件とは大きく異なる常温常圧条件で流量計補正係数を設定しているため、その精度に問題が生じている。そこで我が国では、日本原子力学会において専門家委員会を設置して、導入の際の学術的検討を行っている。検討対象には、従来の超音波流量計の他に、本研究での流速分布型超音波流量計があり、我が国の独自技術として注目を集めている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、従来の超音波流速分布計測法(UVP法)の高精度超音波流量計へ適用に関する基礎研究をもとに、原子力発電プラント増出力のための超音波計測に必要な基礎データとそのハードウェアおよびソフトウェアの整備、そして実機適用に向けた開発研究を行うために、以下に示す課題(2.1~2.4)について説明を図ることを目的としている。

2.1 金属配管における超音波透過率に対する超音波入射角の最適化

金属配管での計測において、超音波の金属壁透過を考慮する場合、壁厚さに対する超音波の最適周波数の選択が必要である。最適周波数は壁の材質、厚さおよびセンサの設置角度などに依存するため、音場測定装置の自動計測アルゴリズムを開発し、これを用いて音場計測を行い、金属配管における超音波透過率に対する最適入射角度を検討することを目的としている。なお、超音波センサには、従来の単一および二波長センサに加え、アレー型センサについても検討を行った。

2.2 新しい信号処理アルゴリズムと複測定線計測法の構築

UVP法は速度を繰り返しパルスを用いて計算するため、ナイキストのサンプリング理論に起因する測定限界が存在すると共に、高分解能化が困難とされていた。そこで、システムの時間・空間分解能を上げるため新しい信号処理アルゴリズムと計測手法が必要となる。本研究では、信号処理としての時間領域相関法(UTDC)と、計測手法として複数センサおよびアレー型センサを用いた複測定線計測システムの構築を目的としている。

2.3 気泡注入と測定精度への影響

UVP法では超音波反射体が必要である。超音波反射体として水素や酸素などの気泡注入が考えられるが、その場合、流れ場は気液二相流となる場合がある。そこで、気泡の追従性および気相液相分離方法を考慮しながら、超音波計測の確からしさを調べる必要がある。本研究では、マイクロバブルを用いた気泡注入方法の検討を行うと共に、マルチウェイセンサを用いた気相液相同時計測法と高速度カメラシステムを用いた画像処理手法による気泡注入時の流速分布型超音波流速計の確からしさを調べることを目的としている。

2.4 ハイブリッド型計測法におけるTOFキャリブレーションの有効性と高温センサの実機適用性

ハイブリッド型超音波流量計の基本概念を確かめるため、超音波流速分布計(UVP)を用いて伝播時間差式超音波流量計の流量補正係数のキャリブレーション効果を調べると共に、実機条件への適用性として、高温での計測に耐えうる超音波トランスデューサを開発し、その有効性を確かめることを目的としている。

3. 研究の方法

3.1 金属配管における超音波透過率に対する超音波入射角の最適化

超音波透過音圧を調べるにあたり、3次元音圧分布計測システムによる音圧計測を行った。本研究では、直径約1mm程度のマイクロホンで音場を走査することで振動子の電気入力を測定する方法であるマイクロホ

ン法を適用した。3次元音圧分布計測システムの概略図を図1に示す。本装置はパルサーレーザ、水槽、3次元自動ステージとそれを制御するPCで構成されている。水中を伝播した超音波パルスは、自動ステージに固定された小型 hidroフォンで受信され、PCに内蔵されたAD変換ボードに取り込まれる。PCは自動ステージ制御用コントローラとUSB接続されており、任意の測定領域の音圧分布が計測可能である。自動ステージとAD変換ボードは本研究で開発したアプリケーションソフトで制御される。本研究では、音圧分布計測から、3次元音圧分布、2次元断面音圧分布、軸方向透過強度を取得することにより、従来の単一および二波長センサに加え、アレー型センサでの超音波入射角への影響に関して調べた。

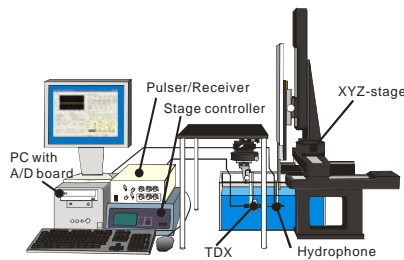


図1 3次元音圧分布計測システムの概略図

3.2 新しい信号処理アルゴリズムと複測定線計測法の構築

図2に時間領域相関法(UTDC)の概念図を示す。本手法は流れ方向に対して角度 θ で超音波センサ(TDX)を設置し、発射された超音波と微粒子からの反射波の遅れ時間によって速度場を計測する手法である。すなわち、 $t = t_0$ において発射された超音波が、微粒子に反射後 $t = t_1$ にてTDXに受信されたとする。さらに T 秒後に発射された $t = t_0 + T$ における他の超音波パルスによる反射波が $t = t_2$ にて受信されたとすると、粒子の移動速度 v は

$$v = \frac{(t_1 - t_2)c}{2T \cos \theta} \quad (1)$$

で表される。ここで T は超音波パルスの繰り返し周波数 f_{prf} を用いると $T = 1 / f_{prf}$ であり、 $\tau = (t_1 - t_2)$ とすると式(1)は、

$$v = c\tau \frac{f_{prf}}{2 \cos \theta} \quad (2)$$

となる。ここで、反射波信号 E_1 は測定対象領域 V_1 からの反射波を示す。 $T (= 1 / f_{prf})$ 秒後において反射体は V_1 から V_2 に移動し、その反射波は E_2 に示されるような波形を示す。すなわちこれらの反射信号から相互相関関数 $R(s)$

$$R(s) = \frac{\int E_1(t)E_2(t+s)dt}{\sqrt{\int E_1(t)^2 dt \int E_2(t+s)^2 dt}} \quad (3)$$

を求めることによって、反射体の移動距離を算出し微粒子の速度を獲得する。

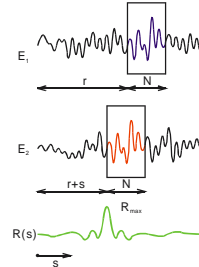


図2 時間領域相関法の概念図

複測定線計測として、図3(a)の様な複数センサ(3測線)を配管に設置する方法と、図3(b)のアレー型センサを用いた複測定線積分法を確立するため、アクリル製円管流路の試験流路および測定部を製作し、上昇・下降流の実験を行った。流速分布測定は超音波流速分布流速計(UVP)とレーザ・ドップラ流速計を用いて同時計測し、UVPの計測精度を調べると共に、UVPの瞬時流速分布の計測データからオンラインで流量を求めるソフトなど流量計測システムとして必要なソフトを整備した。



(a) 3測線法 (b) アレー型センサ法

図3 複測定線計測法

3.3 気泡注入と測定精度への影響

超音波反射体として近年注目を集めているマイクロバブルを用いた計測が有望視されている。図4に自吸式マイクロバブル発生装置の概略図を示す。得られた気泡流に対して、マルチウェイブセンサを用いた気相液相同時計測法と高速度カメラシステムを用いた画像処理手法を適用して、気泡注入時の流速分布式超音波流速計を行い、測定精度への影響を調べた。

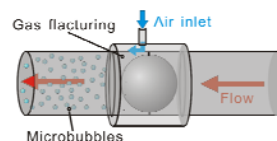


図4 自吸式マイクロバブル発生装置

3.4 ハイブリッド型計測法における TOF キャリブレーションの有効性と高温センサの実機適用性

ハイブリッド型計測法の概要を図5に示す。本手法は、管内流量計測において、通常は超音波反射体を必要としない超音波伝播時間差式計測法 (TOF) による流量計測を行い、経年変化や偏流等の流速分布変化が起きた場合、一時的に超音波流速分布計測法 (UDM) に切り替えることで、実機の流速分布計測布から流量を算出し、変動した流量実験係数(PF)に補正をかけることで、流量計測精度の向上を行い、TOF での流量計測を継続

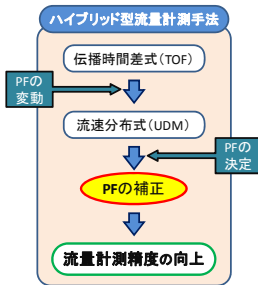


図5 ハイブリッド型流量計測手法の概念図

することができる。本研究では、図6の実験装置を用いてレイノルズ数、測定位置、偏流がPFに与える影響を実験的に求めるとともに、TOF流量計に必要な実機流速分布を超音波流速分布計(UVP)にて計測し、TOFを校正するキャリブレーション手法の有効性を調べた。また、本手法を実機適用条件の高温条件に適用するための、超音波センサの基本設計を行った。高温計測には、センサに使用する音圧素子の高温対応と、遅延材を冷却して測定する冷却方法を調べるとともに、高温用センサを用いた沸騰流計測を行った。

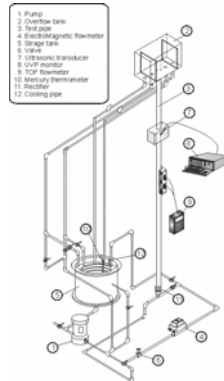


図6 実験装置の概念図

4. 研究成果

4.1 金属配管における超音波透過率に対する超音波入射角の最適化

超音波音圧計測プログラムでは、まず、

Windows アプリケーション(NIusPress)上で計測格子の座標データを作成する。そして、NIusPress から超音波パルスの受信と自動ステージの接続状態を確認し、計測領域の原点設定を行う。このときの原点は TDX 端面の中心とする。次に、作成した座標データを読み込ませた後、計測が開始される。自動ステージが移動するたびに、ハイドロフォン位置によって決定される計測窓内の受信波形から最大音圧を計測する。1つの xy 断面が計測されたら、瞬時に線形補間し、無数の xy 断面を計測することで、三次元音圧分布を計測する。図8に代表的な平板(ステンレス鋼)透過後の超音波パルスの2次元空間音圧分布を示す。このような音圧分布から音圧値の高い代表的な超音波パルスの伝播方向から放射角度を算出できる。スネルの法則によれば入射角と放射角は等しくなるはずであるが、図9に示した超音波入射角に対する入射角と放射角の差 $\Delta\theta$ から分かるように、屈折角度が変化し、スネルの法則に従わない領域がある事がわかった。

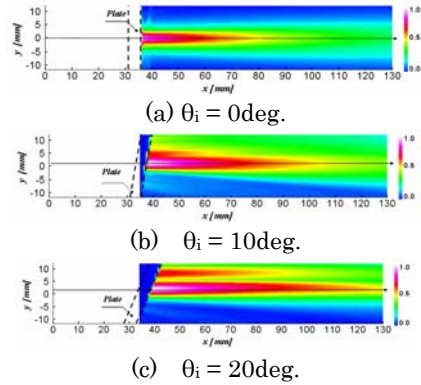


図8 二次元音圧分布 (ステンレス鋼)

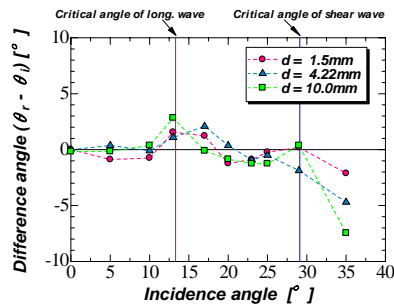


図9 入射角度 θ_i に対する放射角度変化(アルミ)

4.2 新しい信号処理アルゴリズムと複測定線計測法の構築

図10に偏流を促進するためにテスト部入口に閉口比0.35の半月板を設置した際の測定位置に対する流速分布の変化を示す。得られた流速分布を比較すると、半月板後方の近傍 $L/D=3$ では非常に大きな偏流が観測された。UDMによる流量計測を行った結果、偏流が

顕著なL/D=3では流量偏差が大きくなることが分かった。しかし、複測定線計測を行うことで、流動場を三次元的に捉えるため流量偏差は小さくすることが出来た。

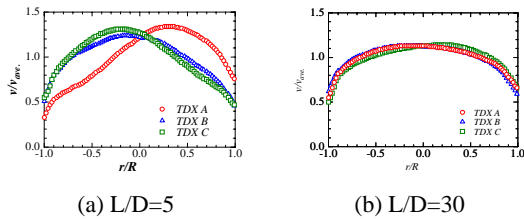
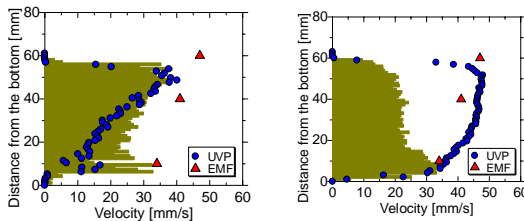


図 10 複測定線計測結果

2.3 気泡注入と測定精度への影響

図 11 に超音波流速分布計測(UVP)において、マイクロバブル混入の有無での流速分布を電磁流量計(EMF)での計測値と比較して示す。この様に UVP 計測では、反射対の影響が流量計測に顕著に表れることがわかる。また、マイクロバブルを用いた計測手法は、測定の安全性から考えても有効な手段であることがわかった。



(a) マイクロバブルなし (b) マイクロバブルあり
図 11 UVP 計測および EMF における流速分布

4.4 ハイブリッド型計測法における TOF キャリブレーションの有効性と高温センサの実機適用性

伝搬時間差式超音波流量計(TOF)などに用いられている流量実験係数(PF)に、UVP 計測による補正結果がどの程度影響を及ぼすかを調べるために、実験で得られた流速分布から PF を算出した。PF は面平均速度 V_A と線平均速度 V_L の式で定義し、式(4)で表わされる。

$$PF = \frac{V_A}{V_L} \quad (4)$$

PF の変化量はエルボからの距離が 40D の位置で得られた流速分布を基準とし、式(2)で定義した。

$$\Delta PF = \frac{PF - PF_{@40D}}{PF_{@40D}} \times 100 (\%) \quad (5)$$

測定位置に対する TOF 流量計の PF の変動を図 12 に示す。図 10 の流速分布からも分かるように、偏流が顕著に見られる未発達領域では TOF の PF 変動が大きいことが確認でき、

偏流が PF に与える影響を無視できないことが確認できる。

そこで、複測定線を用いた UDM 計測を行い、TOF をキャリブレーションした結果、偏流が非常に大きい場合にはキャリブレーション効果はあまり見られなかったものの、それ以外の条件では PF の変動が 0.7% 未満に収まっており、偏流、測定位置に因らない流量計測が可能であることを示した。このとき、12D/h 以降で高いキャリブレーション効果が確認できる。また、レイノルズ数に対する PF の変動を 12D/h の位置で計測した結果(図 13)、PF がレイノルズ数によっても変化することが確認した。(PF の基準値は $Re=10000$ での校正値を用いている。)しかし、同様にキャリブレーションを行うことで安定した流量計測が行えることを示した。

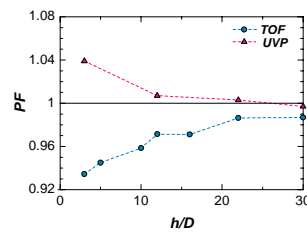


図 12 計測位置に対する PF の変動

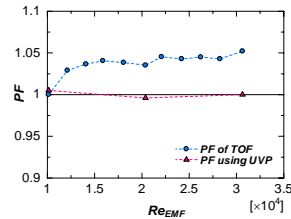


図 13 UDM によるキャリブレーション効果

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- 1 Y.Inoue, H.Kikura, H. Murakawa, M.Aritomi and M.Mori, A study of ultrasonic propagation for ultrasonic flow rate measurement, Flow Measurement and Instrumentation, 19, 223-232 (2008). (査読有り)
- 2 K.Tezuka, M.Mori, T.Suzuki, M. Aritomi, H.Kikura and Y.Takeda, Assessment of Effects of Pipe Surface Roughness and Pipe Elbows on the Accuracy of Meter Factors Using the Ultrasonic Pulse Doppler Method, Journal of Nuclear Science and Technology, 45, 304-312(2008). (査読有り)

[学会発表] (計 12 件)

- 1 H.Kikura and M.Aritomi, Bubbly Flow Measurement using Multi-wave Method, Proceedings of the Japan-US Seminar on Two-Phase Flow Dynamics, Santa Monica, USA, CD-ROM, 1-10 (2008-9-16).
- 2 H.Kikura, T. Hayashida, D.Ito, M.Aritomi and M.Mori, A pplication of linear ultrasonic array transducer to two-phase flow measurement, Proceedings of the 6th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD6), Prague, Czech Republic, CD-ROM, 91-94 (2008-9-10).
- 3 T.Hayashida, H.Murakawa, H.Kikura, M.Aritomi and M.Mori, Velocity Profile Measurements of Two-Phase Flow in Rectangular Channel using Ultrasonic Time-Domain Correlation Method, 5th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conference (FEDSM2007), San Diego, USA, CD-ROM Paper No.FEDSM2007-37072, 1-8 (2007-7-31).
- 4 M. Aritomi and H. Kikura, Development of Ultrasonic Flow Rate Measurements related to Power Up-rate for Light Water Reactors, The 2nd COE-INES International Symposium, INES-2, Tokyo, Japan, (2007-7-24).
- 5 D.Ito, H.Kikura, M.Aritomi and M.Mori, A study of Ultrasonic Velocity Profile Measurement on Boiling Two-phase Flow, 15th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE15), Nagoya, CD-ROM Paper No. ICONE15-10779, 1-6 (2007-4-24).
- 6 井上友人・木倉宏成・有富正憲・森治嗣, 流速分布計測法を用いた伝播時間差式流量計測法のキャリブレーションシステムに関する基礎研究, 第 84 期日本機械学会流体工学部門講演会講演概要集, 川越, 191 (2006-10-28).
- 7 井上友人・木倉宏成・有富正憲・森治嗣, 超音波流速分布計測法を用いた流量計測手法の開発; (30) 金属配管透過後の超音波挙動を考慮した流量計測, 日本原子力学会 2006 年秋の大会予稿集, 札幌, N59 (2006-9-29) .
- 8 Y.Inoue, H.Kikura, M.Aritomi and M. Mori, A study of ultrasonic propagation for flow rate measurement using ultrasonic flowmeter, 5th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering (ISUD5), Zurich, Switzerland, 89-92 (2006-9-13).
- 9 T.Hayashida, G. Yamanaka, H. Kikura and

M.Aritomi, Velocity Profile Measurements using Ultrasonic Velocity Profile Monitor and Ultrasonic Time-Domain Correlation, The 17th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-17), Toyama, JAPAN, CD-ROM Paper No.3-D-I-1, 1-4 (2006-9-7).

- 10 八名拓実・木倉宏成・有富正憲・森治嗣, 超音波流速分布流速計を用いた二次元曲がり管直後における流量測定, 日本実験力学学会 2007 年度年次講演会, 東京, 468 (2007-8-8) .
- 11 井上友人・西原隆広・木倉宏成・有富正憲・森治嗣, 超音波流速分布計を用いた高精度流量計測における反射体の影響, 日本混相流学会年会講演会 2006 講演論文集, 金沢, (2006-8-4), pp.264-26
- 12 H.Kikura, Y.Inoue, M.Aritomi and M.Mori, Development of Pulse Ultrasonic Doppler Method for Flow Rate Measurements of Power Plant (Characteristics of Sound Pressure Distributions and Evaluation of the Hybrid Ultrasonic Flowmetering System using TOF and UDM), 14th International Conference on Nuclear Engineering, Miami USA, CD-ROM, ICONE14-89695,1-8 (2006-7-19).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者:

木倉 宏成(KIKURA HIROSHIGE)
東京工業大学・原子炉工学研究所・助教
研究者番号: 0 0 3 0 2 9 8 5

(2) 研究分担者:

有富 正憲(ARITOMI MASANORI)
東京工業大学・原子炉工学研究所・教授
研究者番号: 6 0 1 0 1 0 0 2

小池 義和(KOIKE YOSHIKAZU)
芝浦工業大学・工学部・准教授
研究者番号: 3 0 2 5 1 6 7 2

(3) 連携研究者:

なし