

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289353

研究課題名(和文) スペクトラム拡散法を用いた曲流路探傷式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 Penetrant Testing Accurate Flow Rate Measurement System in Bent Pipe Flow by using Spread Spectrum Method

研究代表者

木倉 宏成 (Kikura, Hiroshige)

東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授

研究者番号：00302985

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：超音波パルスの発信信号に変調を施し、エコー信号のSN比を高めて高空間分解能を達成するスペクトラム拡散技術を超音波流速分布計測法(UVP)に取り入れると共に、UVPの高精度流量計測性能を利用して、曲流路後流での高精度流量計測を行い、同一円周上のいくつかの速度分布計測値からFFT解析することによって最小センサ数を決定する、新しい最小センサ数決定解析手法を考案した。また、曲がり管内路の探傷と流れ場の把握に、フェイズドアレイ技術を応用したフェイズドアレイ二次元ベクトル法を考案して実験結果と数値流体解析結果を比較するとともに、スペクトラム拡散法を用いた曲流路探傷式高精度超音波流量計測システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：A spread spectrum method which has high performance signal noise ratio of echo signal are applied to the Ultrasonic Velocity Profile (UVP) method. UVP method can be applied and succeeded for complicated flow as short inlet length from the double bent pipe. However, the flow of out-of-plane double bent pipe is more complicated and also more difficult to measure the highly accurate flowrate compare to in-plane double bent pipe. To solve this difficulty, multiple measurement lines are investigated and Fourier transform technique has been applied. Penetrant tastings and flow measurement have been investigated by using phased array ultrasonic technique. Two-dimensional velocity filed measurement has been successfully developed. Experimental data are used for validation commercial computational fluid dynamic code in double bent pipe flow. Then finally a penetrant testing accurate flow rate measurement system in bent pipe flow by using spread spectrum method has been developed.

研究分野：工学

キーワード：計測工学 原子力エネルギー 流体工学 超音波 流量計測

1. 研究開始当初の背景

東京電力福島第1原子力発電所事故は、我が国はもとより全世界の原子力政策に大きな影響を与えたが、一方既存の設備を大きく変えることなく安全性を保ちつつ原子力発電プラントを増出力する原子炉出力向上が注目されていた。中でも計測精度改善型の出力向上技術として高精度給水流量計測技術が有力視され、我が国においても、日本原子力学会の専門家委員会にて学術的検討が行われており、主に米国等で実績のある伝播時間差式超音波流量計や相関式超音波流量計が検討される中、超音波流速分布計測法(Ultrasonic Velocity Profiler method; UVP法)を応用した流速分布型超音波流量計が、我が国の独自技術として注目を集めていた。特に本手法は、短い助走区間において適用可能で有り、曲がり管などの複雑配管における高精度流量計測に適していると考えられた。一方、原子力安全の立場では、従来から原子炉溶接部配管の疲労亀裂や応力腐食割れ等の探傷技術に超音波探傷が利用されており、1つのセンサに複数個の素子を連続的に埋込んだアレイセンサを用いて、音響ビームを任意角度で発信する事の出来るフェイズドアレイ探傷が注目を集めている。

2. 研究の目的

そこで本研究では、超音波パルスの発信信号に変調を施し、自己相関性の高いパルス波を用いる事によって、エコー信号のSN比を高めて高空間分解能を達成するスペクトラム拡散技術を超音波流速分布計測法に取り入れると共に、フェイズドアレイ技術を応用した超音波探傷と流速分布計測の同時計測により、発電プラント等で用いられている複雑配管(曲がり管)の安全性向上と高精度流量計測を可能とするスペクトラム拡散法を用いた曲流路探傷式高精度超音波流量計測システムを開発する事を本研究の目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、まず、曲流路後流の探傷式高精度流量計測システムの開発にあたり、超音波センサの最適設置方法、スペクトラム拡散法を用いた新しい信号処理およびフェイズドアレイ流速分布計測システム(フェイズドUVP)について検討した。そして、曲流路後流での流量計測では、従来の超音波センサ配置方法よりも超音波センサ数を増加させる必要がある事を明らかにし、同一円周上のいくつかの速度分布計測値からFFT解析することによって最小センサ数を決定する、新しい最小センサ数決定解析手法を考案し、数値流体解析による解析結果と比較することにより本手法の有効性を明らかにした。また、曲がり管内路の探傷と流れ場の把握に、フェイズドアレイ技術を応用した実験結果を示し、流れ場計測では、数値解析結果と比較すると共

に実機適用性について検討した。

4. 研究成果

(1) スペクトラム拡散法を用いた信号処理

従来用いられてきたトーンバースト方式では単一周波数の信号を連続パルスとして狭帯域の信号を発信しているのに対し、周波数変調方式では、パルス内で周波数を変化させることにより、図1の様に広帯域な信号を発信する。そして、受信した信号に参照波形を用いて相関処理等による整合フィルタを用いて、圧縮パルスを得え、窓関数をかけて重み付けをすることにより、時間帯域幅積を低減し、相関関数におけるサイドローブの発生(図2)を防いで信号処理を行った。また、符号変調においては、自己相関性の高い符号を用いた広帯域パルスによってノイズ耐性を高める様、信号処理システムを構築した。

スペクトラム拡散法を用いた新しい信号処理では、超音波センサの特性やエコー信号の相関処理による影響から、本手法で用いるパルス波は、従来使用してきたトーンバースト波とは音場分布が異なることが考えられるため、自動三次元音場測定装置(図3)を用いて、16波トーンバースト、線形FM方式、13bits バーカー符号および16bits グレイ符号等による圧電素子駆動した際に発信される音場計測を行い、有効音波圧力やSN比の変化などを実験的に調べた。また、従来用いられてきたトーンバースト方式では、単一周波数の信号を連続パルスとして狭帯域の信号として発信しているのに対し、周波数変調方式ではパルス内で周波数を変化させることにより広帯域な信号を発信するため、受信した信号に参照波形を用いて相関処理等に

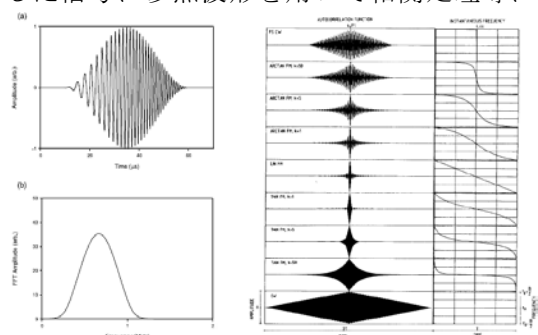


図1 パルス変調波 図2 相関関数とサイドローブ

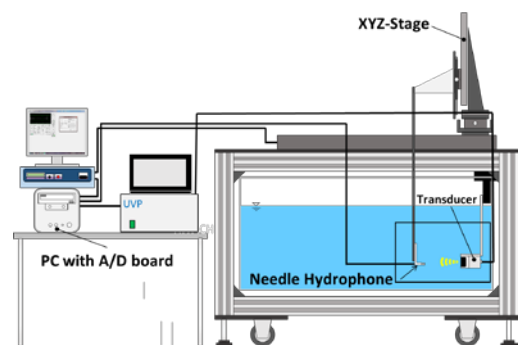


図3 自動三次元音場計測装置

よる整合フィルタを用いて圧縮パルスを得て、窓関数をかけて重み付けをすることにより、時間帯域幅積を低減し、相関関数におけるサイドローブの発生を防ぐ信号処理を検討した。

すなわち、従来用いられてきたトーンバースト方式では単一周波数の信号を連続パルスとして狭帯域の信号を発信しているのに対し、スペクトラム拡散法では、符号化系列や周波数変調を行い広帯域な信号を発信する。そして、受信した信号に参照波形を用いて相関処理等による整合フィルタを用いて、圧縮パルスを得ることで、サイドローブの発生を防ぐ。公称周波数 8MHz の UVP 用トランスデューサを用いた際の送信波形の違いによる相関関数の変化を図 4 に示す。長いバーカー符号においてサイドローブが改善している事が分かる。一方、公称周波数 4MHz のトランスデューサにおいては、符号長が短い方が逆に良い性能が示された。通常の探傷用トランスデューサでは高分解能を志向して広帯域特性で設計されるが、UVP 用のもでは比較的狭帯域特性に設計される。この特性の違いがサイドローブの違いに現れたためである。従って、スペクトラム拡散法を UVP 法に応用する際、計測に用いるトランスデューサに適した基本周波数を適宜用いる事が必要となる。この知見を基に、本研究では計測時に最適な周波数が選択できるように計測システムを構築した。

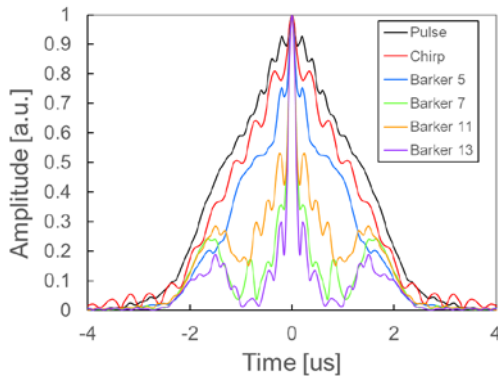


図 4 相関関数

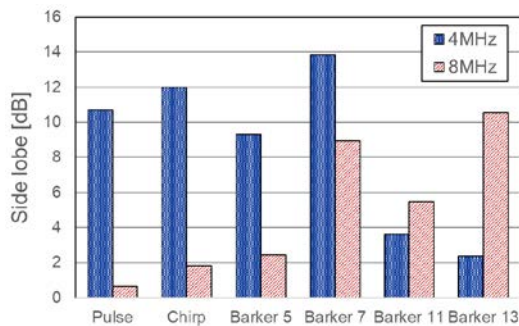


図 5 サイドローブ

また、従来の UVP 信号処理手法では、単一周波数のみの周波数成分を利用する狭帯域信号処理が行われていた。一方でスペクトラム拡散法を用いた際には、得られた信号の

広周波数帯から速度信号を算出する事で耐雑音性を向上させることが出来る。FFT から求められた複素系列 Z_T に対して速度 V は周波数 f の関数として次式で表される。

$$V(f) = \frac{f_{PRF}}{4\pi f_0} c \cdot \arg \sum_{n=0}^{N-1} z_T^*(n) \times z_T(n+1) \quad (1)$$

これを各周波数成分の信号強度で重みを付けて平均することで速度を求める。

$$V = \frac{\sum_f V(f) \sum_n \|z_T^*(n) \times z_T(n+1)\|}{\sum_{n,f} \|z_T^*(n) \times z_T(n+1)\|} \quad (2)$$

上記手法を用いて、従来の信号処理法と時間領域相互相関法、本手法を切替ながら計測出来るシステムの構築を行った。

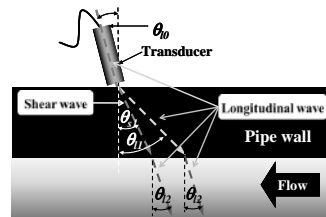


図 6 縦波と横波の超音波透過特性

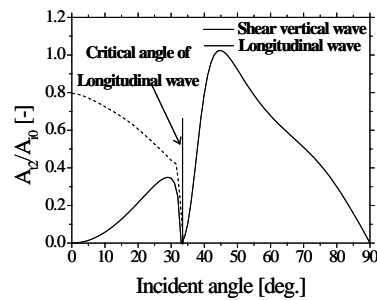


図 7 音場解析による超音波透過特性

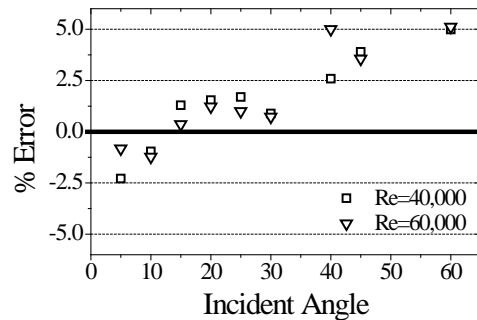


図 8 超音波透過特性実験結果

(2) 音場予備解析にもとづく透過実験

スペクトラム拡散を用いた際の超音波の透過特性(図 6)を考慮すると、壁厚さに対する超音波入射条件の選択が必要であり、特に大口径配管における超音波透過特性を、音場強度の数値計算(図 7)と音波計測(図 8)から解明するとともに、大口径配管での助走区間が短い場合での計測では、最適な超音波入射角は、従来考えられていた横波臨界角以上での最大透過率を利用するのではなく、配管厚さと縦波入射成分を考慮した入射角を用いて

できるだけ入射角を小さくすると良いこと

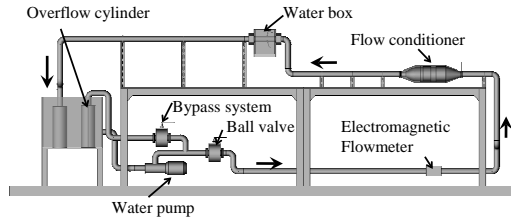


図9 実験流路の概略図

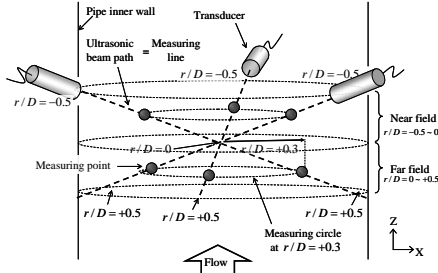


図10 センサー配置と測定線

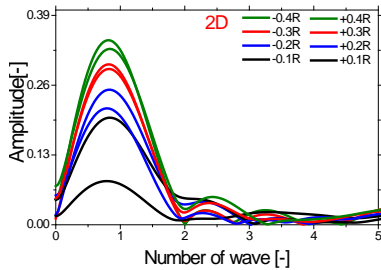


図11 2D位置におけるFFT解析結果

を示した。

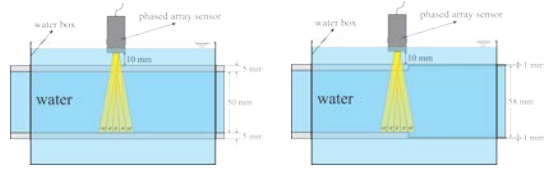
(3) 複測定線積分法の最適化

複数の超音波センサを取り付けた複測定線積分法を確立するため、既存の亚克力曲がり管流路(図9)において実験を行った。二重曲がり管後流の直軸流れでの従来センサ配置での流量計測では、二重曲がり管後流直後での計測誤差が大きいことから、従来の超音波センサ配置方法(図10)よりも超音波センサ数を増加させる必要があることを示し、同一円周上のいくつかの速度分布計測値からFFT解析することによって最小センサ数を決定する、新しい最小センサ数決定解析手法を考案し、数値流体解析による解析結果(図11)と比較することにより本手法の有効性を明らかにした。

(4) フェイズドアレイ技術を応用した探傷と流れ場計測

既存の亚克力製流路を用いて、フェイズドアレイ法による探傷実験を行い、水平円管の内壁がストレートな場合とクラックを模擬した段差壁がある場合のエコー信号を、発信角 $\theta = 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ で比較し結果、発信角 10° で段差を捕らえることが出来(図12)、本手法の有効性を示した。

また、亚克力製二重曲がり管流路を構築して流れ場計測を行うにあたり、ベクトルマ



(a) ストレート壁 (b) 段差壁(クラック模擬)

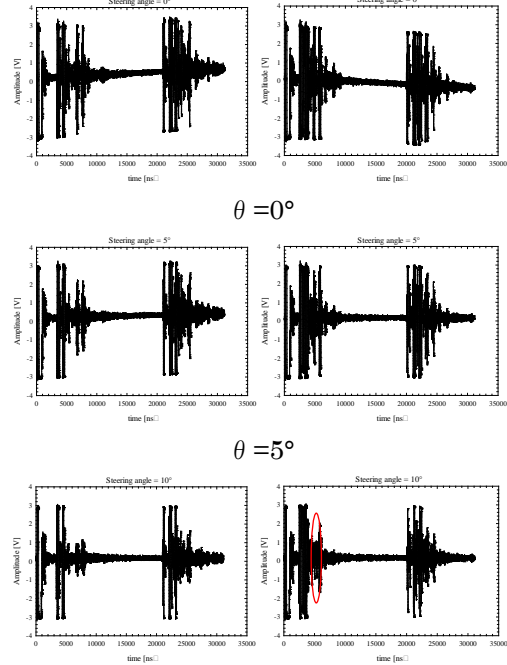


図12 フェイズドアレイ法による探傷結果

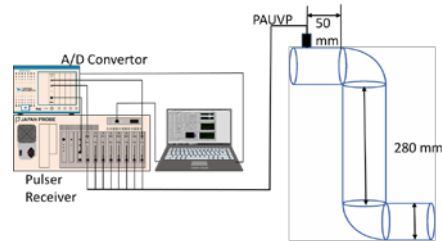


図13 フェイズドアレイ装置と試験部

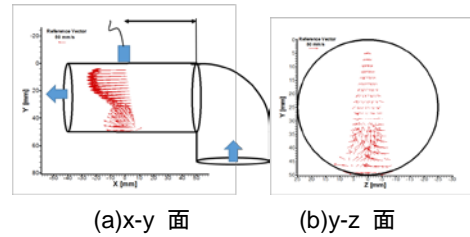


図14 実験結果

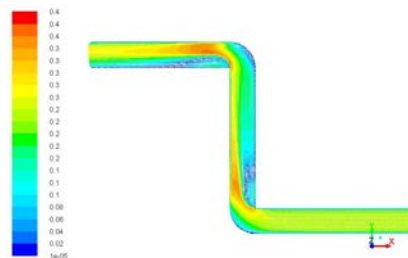


図15 FLUENTによる数値解析結果

ップ計測ではまず現有のフェイズドアレイ流速分布計測システム(UVPf)を用いて計測し(図 13)、UVPfの計測精度を調べると共に、UVPf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。予備実験では現有のリニアアレイセンサを利用したが、本実験には実験装置に適合したセンサを新たに設計しこれを使用した結果、FLUENTを用いた数値解析結果と良い一致を示す実験結果が得られた(図 14,図 15)。

現有のUVPfのドップラ法による信号処理アルゴリズムでは、測定分解能に限界があるため、超低速から超高速まで広範囲に測定可能な位相差アルゴリズムを構築するとともに、現有のフェイズドアレイ装置内の超音波パルスレシーバと高速デジタル信号処理装置を用いて、超音波時間領域相関法と位相差法を用いた計測システムを構築した。本研究では高速信号処理方法とSN向上技術の確立が必要であり、UVPfの基本プログラムは完成しているが、本研究課題に適応した仕様に改良を行った。

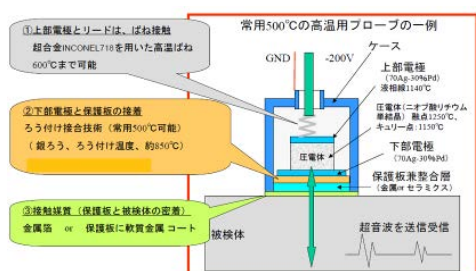


図 16 ニオブ酸リチウムを用いたセンサ概念図



図 17 ニオブ酸リチウム超音波センサ

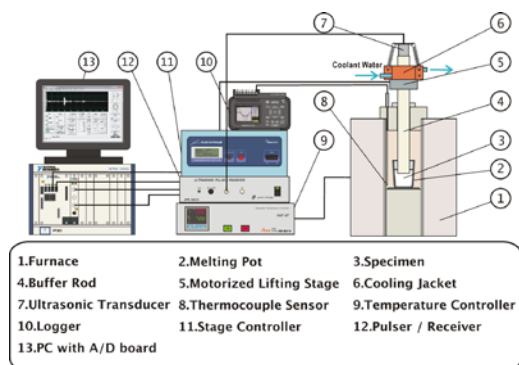


図 18 電気炉を用いたUVP試験装置

(5) 実機適用性に関する検討

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検討し、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検討した。また、音圧素子の高温対応に関しては、キュリー温度の高いニオブ酸系の素子(図)を用いるか、常温用センサを冷却する方法等を検討した後、現有のニオブ酸リチウム試作品(図 16,図 17)を再検討した。高温用センサにおいては、電気炉を用いた試験(図 18)において 500°Cまで感度および周波数特性が変化しないことを確認した。しかしながら、感度がまだ十分ではなく、UVP計測に用いるためには、今後の更なる改善が必要であるという見通しを得た。一方、常温用センサにおいてはそれ自体では高い感度が得られ、冷却型遅延材を用いてセンサの温度上昇を行う事ができる。この遅延材の形状について検討を行い、製造が容易な形状として、テーパ形状を見いだした。さらに、遅延材周囲に音響吸収材層を付加することで、遅延材内の乱反射による計測ノイズの発生を抑制できることを示した。しかしながら、コンポジット系の圧電素子を用いた場合には、素子温度が上昇するに伴い、周波数特性が変化する傾向が見られた。上記の知見により、高温計測に対しては実際の計測対象に最適なセンサを選定する指針が得られた。

実機に近い条件で実験を行うための産業技術総合研究所所有の実験流路の前年度予備調査に加え、現地調査を行い、現場適用に向けたシステム設計を検討した。計測結果を基に超音波流量計の流量計測における不確かさ評価として、レイノルズ数依存性、温度圧力依存性、上流攪乱要素の影響(偏流、助走区間等)、配管内面粗さの影響等を検討した。なお、速度分布計測結果にデータ欠損が多い場合は、ディエイリアッシングやフィッティング手法を用いて補正をすることを考えた。また、この場合の不確かさ評価を検討した。

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4件)

- ① Ari HAMDANI, Tomonori IHARA, Nobuyoshi TSUZUKI and Hiroshige KIKURA, Experimental Study of gas-liquid swirling flow in a Vertical Tube using UVP and WMS, Journal of Mechanical Science and Technology, Springer (Germany), 査読有, Vol. 30 (9) (2016), pp. 3897-3905
- ② Ari HAMDANI, Tomonori IHARA, Hiroshige KIKURA, Experimental and Numerical Visualizations of Swirling Flow in a Vertical Pipe, Journal of Visualization, Springer (Germany), 査読有, Vol. 19 (3) (2016), pp. 369-382.

- ③ Weerachon TREENUSON, Nobuyoshi TSUZUKI, Hiroshige KIKURA, Masanori ARITOMI, Sanehiro WADA and Kenichi TEZUKA, Accurate Flowrate Measurement on the Double Bent Pipe using Ultrasonic Velocity Profile Method, 実験力学, 査読有, Vol. 13, No. 2 (2013), pp. 200-211.
- ④ Sanehiro WADA, Kenichi TEZUKA, Weerachon TREENUSON, Nobuyoshi TSUZUKI and Hiroshige KIKURA, Estimating the number of transducers for flow rate measurement using the UVP method downstream of double elbows, Flow Measurement and Instrumentation, 査読有, Vol. 32 (2013), pp. 51-62.
- [学会発表] (計9件)
- ① Ari HAMDANI and Hiroshige KIKURA, Numerical Study of Vortex Core in Turbulent Swirling Flow, Proceedings of the ANS Winter Meeting and Expo, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 115, Las Vegas, USA (2016-11), pp. 1-4, Paper No. 1569.
- ② San Shwin, Ari HAMDANI, Hiroshige KIKURA, Flow Visualization on Downstream of the Double Bent Pipe by Phased Array Ultrasonic Velocity Profile Method, The 15th Wakate-Kenkyusha-Happyou-Touronkai, AESJ Kantoukouetsu-Branch Tokyo, Japan (2016-11), Paper No. A-13.
- ③ Ari HAMDANI, Tomonori IHARA and Hiroshige KIKURA, Flow Mapping in Two-phase Swirling Flow using Ultrasonic Array Sensors, The 10th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM' 15), Matsue, Japan, (2015-11), pp. 1-5, Paper No. ISEM-047.
- ④ Ari HAMDANI, Tomonori IHARA and Hiroshige KIKURA, Flow Mapping in Swirling Flow Using Ultrasonic Array Sensors, Proceedings of the 9th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows (9th ISMTMF), Sapporo, Japan (2015-9), pp. 1-2. Paper No. C-213.
- ⑤ Takuya FUKUMOTO, Takuya KAWACHI, Nobuyoshi TSUZUKI and Hiroshige KIKURA, A Study on Two-Dimensional Flow Mapping by Using Ultrasonic Array Sensors, The 9th Korea-Japan Symposium on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety (NTHAS-9), Buyeo, Korea (2014-11), Paper No. N9P0100.
- ⑥ Takuya FUKUMOTO, Takuya KAWACHI, Nobuyoshi TSUZUKI and Hiroshige KIKURA, A Study on Two-Dimensional Flow Mapping by Using Phased Array UVP, 5th Korea - Japan Joint Seminar on Nuclear Thermal Hydraulics and Safety for Students and Young Researchers, Gyeongju, Korea, (2014-11), pp. 1-2.
- ⑦ 福本拓哉・塚田圭祐・井原智則・都築宣嘉・木倉宏成, フェイズドアレイ UVP 法を用いた

2次元フローマッピングに関する研究, 日本原子力学会関東・甲越支部若手研究者発表討論会, (2014-11), pp. 15-16.

- ⑧ 福本拓哉・塚田圭祐・井原智則・都築宣嘉・木倉宏成, 超音波フェイズドアレイ技術を用いた二次元流速分布計測法に関する研究, 第92期日本機械学会流体工学部門講演会, 富山, (2014-10), USB-proceeding, No. GS04.
- ⑨ Takuya FUKUMOTO, Keisuke TSUKADA, Tomonori IHARA, Nobuyoshi TSUZUKI, Hiroshige KIKURA, A Study of Phased Array Ultrasonic Velocity Profile Monitor for Flow Rate Measurement, The 21th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE21), ICONE21-16601, Chengdu, China, (2013-7), CD-ROM Paper No. ICONE21-54524, pp. 1-6.

[その他]

ホームページ等

東京工業大学木倉研究室

<http://www.lane.iir.titech.ac.jp/~kikura/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

木倉 宏成 (KIKURA HIROSHIGE)
東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授
研究者番号：00302985

(2) 研究分担者

古市 紀之 (FURUICHI NORIYUKI)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員
研究者番号：10334921

小池 義和 (KOIKE YOSHIKAZU)
芝浦工業大学・工学部・教授
研究者番号：30251672

村川 英樹 (MURAKAWA HIDEKI)
神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・助教
研究者番号：40467668

都築 宣嘉 (TSUZUKI NOBUYOSHI)
一般財団法人エネルギー総合工学研究所・原子力工学センター・主任研究員
研究者番号：50578151

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし