

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月31日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22360400

研究課題名（和文）フェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計の開発

研究課題名（英文）Development of Phased Array Ultrasonic Inspection Flow Rate Measurement System

研究代表者

木倉 宏成（KIKURA HIROSHIGE）

東京工業大学・ソリューション研究機構・准教授

研究者番号：00302985

研究成果の概要（和文）：本研究では、従来行ってきた超音波流速分布計測法の高精度超音波流量計にフェーズドアレイ法を用いた診断技術を融合して、配管壁内の探傷を行いながら、流れ場の流速分布計測が可能なフェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計の基礎開発を目的としている。本研究では、まず、フェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計に必要なアレイセンサの設計を数値解析を用いて行い、3次元音圧計測実験装置を用いた音圧分布計測から、センサの特性を調べた。次に、8ch パルサ/レシーバ、AD コンバータおよび信号処理装置を組み合わせてハードウェアを構築し、汎用信号制御ソフトを用いてアレイ素子からの送受信制御および流速分布計算のアルゴリズムを処理出来るソフトウェアを構築した。そして、構築したフェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計を用いて、配管流れおよびフェイズド探傷の基礎実験を行い、本手法の有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）：A phased array Ultrasonic inspection flow rate measurement system was developed. This measurement system employs phased array technique to reduce noise from multiple reflections which occurs in a wedge. However, phased array technique has several difficulties one of them is about grating lobes. Thus, the array sensor was designed to reduce the grating lobes using numerical analysis. Performance of the manufactured array sensor was evaluated by experimental measurements of sound pressure distribution emitted from the array sensor, and optimal parameters to control the array sensor were obtained. Hardware with a 8-channel pulser/receiver and a PC with A/D converter, and software of the ultrasonic velocity profile measurement system with a phased array sensor were also developed. The software is based on ultrasonic Doppler method with autocorrelation method.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	7,300,000	2,190,000	9,490,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			0
年度			0
総計	14,200,000	4,260,000	18,460,000

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：原子力計測・放射線物理

1. 研究開始当初の背景

原子力発電プラントの出力向上技術の一つである計測精度改善型出力向上に関連して、原子炉給水流量の高精度計測技術が注目されており、中でも、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る。

一方、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きている。特に近年、1つのセンサに複数の素子を連続的に埋込んだアレイセンサを用いて、アレイセンサ内の各素子に遅延を掛けて振動させることにより、音響ビームを集音させたり、任意角度で発信させたり出来るフェー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、従来行ってきた超音波流速分布計測法の高精度超音波流量計にフェーズドアレイ法を用いた診断技術を融合して、配管壁内の探傷を行いながら、流れ場の流速分布計測が可能なるフェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計の基礎開発を目的としている。

3. 研究の方法

本研究では、まず、フェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計に必要なアレイセンサの設計を、数値解析を用いて行い、3次元音圧計測実験装置を用いた音圧分布計測から、センサの特性を調べた。次に、8ch パルサ/レシーバ、AD コンバータおよび信号処理装置を組み合わせるハードウェアを構築し、汎用信号制御ソフトを用いてアレイ素子からの送受信制御および流速分布計算のアルゴリズムを処理出来るソフトウェアを構築した。そして、構築したフェーズドアレイ探傷式超音波流速分布流量計を用いて、配管流れおよびフェイズド探傷の簡単な実験を行い、本手法の有効性を確認した。

4. 研究成果

(1) アレイセンサの設計および音場測定

①アレイセンサの設計

アレイセンサの概略図を図1に示す。アレイセンサは複数の配列された超音波発信素子からなり、各素子を異なるタイミングで発信させることが可能である。フェーズドアレイ技術は、アレイセンサの隣り合う素子間に設ける超音波発信遅延時間を変化させ、各素子から発信された超音波の干渉を制御することで、任意の方向に超音波ビームを形成することができる(図2)。超音波の走査角 θ_s は

$$\theta_s = \sin^{-1}(c\Delta t / d) \quad (1)$$

と表される。なお、 c は音速、 Δt は遅延時間、 d はアレイセンサの素子ピッチである。

フェーズドアレイ技術を用いる際に、意図する走査角とは異なる方向でも超音波の干渉により強い超音波ビーム、すなわちグレーティングローブが生じる事がある。グレーティングローブからの反射信号は SN 比低下の原因となるため、グレーティングローブの抑制がセンサ設計には重要となる。

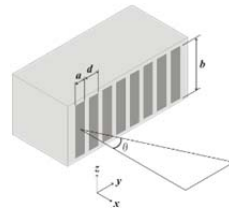


図1 アレイセンサの概略図

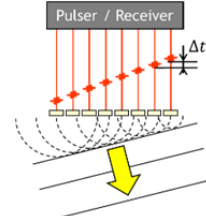


図2 フェイズドアレイの概念図.

アレイセンサの特性は、素子の中心周波数 f_0 、素子数 N 、素子幅 a 、素子ピッチ d で決定される。中でも素子ピッチが小さいほど、グレーティングローブが抑制されることが知られている。一方、素子ピッチの縮小に伴い素子幅も縮小するため、超音波の発信強度および受信感度の低下が懸念される。そこで、アレイセンサから発信される超音波ビームの指向性に関して Huyghens の原理に基づいた数値計算を行い、素子ピッチの最適化を行った。設計するセンサの仕様に関して、従来の UVP 計測ではトレーサ粒子の大きさの 2~4 倍程度の波長となる超音波を使用していることを考慮し、本研究では 4 MHz の素子を使用した。また、アレイセンサ内の素子数は 8、素子間距離 ($d \cdot a$) を加工限界である 0.05 mm とし、UVP 計測が可能となるよう最大走査角を 10° 程度となるよう設計した。

アレイセンサから発信される超音波の二次元平面上の指向性は以下のように計算される。素子幅 a の一つの素子から発信される超音波の指向性 H_1 は次のように表される。

$$H_1(\theta) = \left| \frac{\sin(\pi a \sin \theta / \lambda)}{\pi \sin \theta / \lambda} \right| \quad (2)$$

なお、 λ は超音波の波長、 θ は素子から放射される超音波の角度(図1参照)である。また、フェーズドアレイ法による指向性への影響は、等間隔 d に配列された線音源から走査角 θ_s となるよう発信した場合、以下の H_2 の様に表される。

$$H_2(\theta) = \left| \frac{\sin[\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta) / \lambda N]}{N \sin[\pi d(\sin \theta_s - \sin \theta) / \lambda]} \right| \quad (3)$$

なお、 N は線音源の数である。以上から、アレイセンサから発信される超音波の指向性 H は H_1 および H_2 を複合したものと考えら

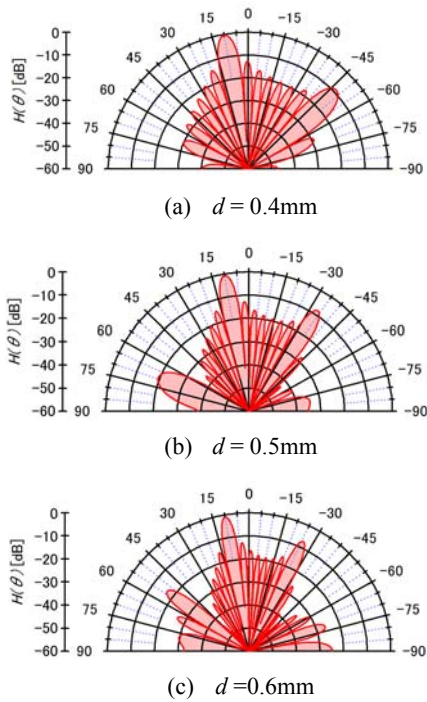


図3 センサーの指向性

れ、次のように表される。

$$H(\theta) = H_1(\theta)H_2(\theta) \quad (4)$$

指向性の数値計算を設計仕様で行った実験結果を図3に示す。図中の半円の中心にセンサーがあり、上方をセンサの正面とした場合の各方向への音場の強度分布を示しており、走査角 10° としてフェイズドアレイ技術による超音波発信を行った場合に、その走査角 10° の箇所を 0 dB とした場合の値で示している。図3から、素子ピッチが小さくなるにつれグレーティングローブの発生する角度および強度が小さくなるのが分かる。しかし、素子ピッチが大きいほど超音波のビーム幅が狭くなる、すなわち指向性が向上している。

② 音圧分布計測

設計したアレイセンサの性能を実験的に評価するため、センサーから発信される超音波の二次元音圧分布を計測した。実験装置を Fig. 4 に示す。実験装置は水槽、アレイセンサ、ハイドロフォン、三軸自動ステージ、ADコンバータ内蔵のPC、8chパルサ/レシーバからなり、水槽内の水温は 10°C に保った。水中に固定したセンサーから超音波を発信し、ハイドロフォンを三軸ステージで移動させて音圧を計測する(図4)。この時、三軸ステージの原点をセンサーの中心に設定し、z軸は0のまま、x方向、y方向ともに 0.5 mm 間隔の点で音圧測定を行うことで二次元音圧分布を得た。アレイセンサの各素子の駆動制御には、8chパルサ・レシーバ(JPR-10C-8CH、ジャパンプローブ)

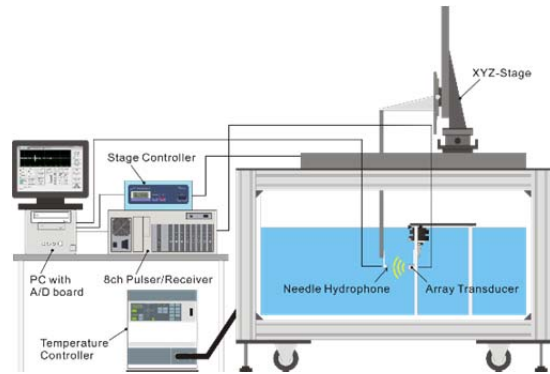
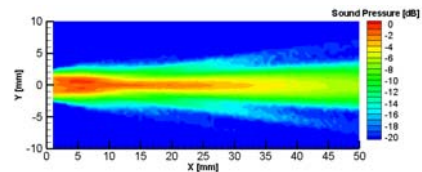
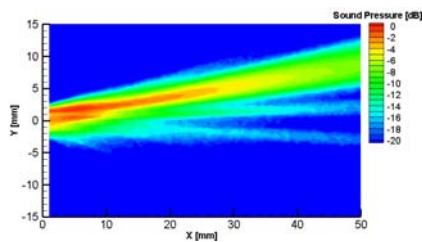


図4 3次元音場計測実験装置。

を使用した。はじめの音圧分布計測では、各素子に電圧を 100 V ずつ印加し、隣り合う素子間の遅延時間 Δt を 0 ns から 90 ns に変化させて計測した。その計測結果のうち、 $\Delta t = 0, 60 \text{ (ns)}$ の場合の音場分布を図5に示す。青は音圧が弱く、赤は音圧が強いことを示す。他の結果と合わせて、遅延時間 Δt の増加に伴い、走査角 θ_s も大きくなることが確認できた。遅延時間と走査角の関係を図6に示す。横軸は遅延時間であり、縦軸は最大強度の箇所から読み取った走査角である。また、図中の直線は式(1)から求めた理論値である。図6より、設計した探触子の遅延時間と走査角の関係は、およそ理論通りであることが確認できる。また図3の結果と比較すると、計測結果にグレーティングローブは見られなかった。一方、サイドローブは数値計算の結果に対し強く計測され、UVP計測への影響は無視できないと考えられる。そこで、サイドローブを低減させるため、アポダイゼーションを適用し、探触子の中心に位置している素子の超音波発信強度を強くしてサイドローブを低減させた。印加電圧はハミング窓関数を参考にし、1CHから順に 20 V 、 50 V 、 130 V 、 200 V 、 200 V 、 130 V 、 50 V 、 20 V に設定した。アポダイゼー



(a) $\Delta t = 0$



(b) $\Delta t = 60 \text{ ns}$

図5 音波強度分布

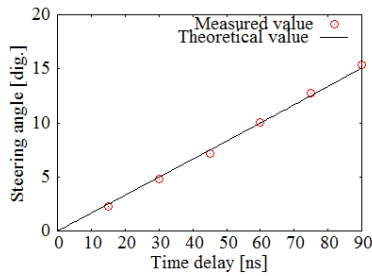


図6 測定された走査角

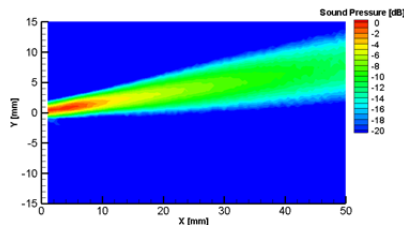


図7 電圧に重み付けをしたときの音場強度分布 ($\Delta t = 60$ ns)

ションを行った際の音圧分布計測結果を図7に示す。図5(b)と比較すると、サイドローブが低減され、アポダイゼーションによる指向性の向上が確認できる。以上から、制作したフェイズドアレイ探触子は遅延時間が60 nsすなわち走査角 10° 以内において、アポダイゼーションを行うことで、サイドローブおよびグレーディングローブの影響なく計測が行えると結論付けた。

(2) ハードウェアの構築

①計測装置

計測システムのハードウェアは、アレイセンサー、8chパルサ/レシーバ、受信信号をデジタルデータに変換するADコンバータ、データの収録および解析を行う信号処理装置で構成されている。8chパルサ/レシーバにはJPR-10C-8CH、ADコンバータとしてNational Instruments社製のPXI-5105を用いた。PXI-5105は8つの同時サンプリングチャンネルがあり、サンプリングレートは最高で60 MS/sec、12ビット垂直分解能を持っている。

②流速分布計測手法および信号処理

構築したシステムでは、2つの受信信号の位相差からドップラー周波数を算出する自己相関法を用いた。自己相関法のブロック図を図8に示す。超音波パルスの送受信により得られた受信信号は直行検波により実部と虚部に分離される。ドップラ周波数は、中心周波数と比較し非常に小さいため、ローパスフィルタによりドップラ周波数を含む低周波領域の信号が得られる。ローパスフィルタ通過後の実部、虚部の信号をそれぞれ $I(t)$ 、 $Q(t)$ とし、複素包絡信号 $z(t)$ を

$$z(t) = I(t) + jQ(t) \quad (5)$$

と表すと自己相関関数 R は以下のように表される。

$$\begin{aligned} R(T_{prf}, \tau) &= \int z(\tau) \times z^*(\tau - T_{prf}) d\tau \\ &= R_x(T_{prf}, \tau) + jR_y(T_{prf}, \tau) \end{aligned} \quad (6)$$

なお、 T_{prf} はパルス発信の時間間隔、 $z^*(t)$ は $z(t)$ は複素共役、 R_x および R_y は自己相関関数 R の実部および虚部である。このとき、 T_{prf} 後の信号との位相差 φ は

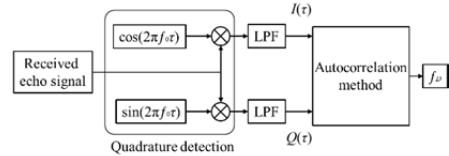


図8 信号処理のブロック図

$$\varphi(T_{prf}, \tau) = \tan^{-1} \frac{R_y(T_{prf}, \tau)}{R_x(T_{prf}, \tau)} \quad (7)$$

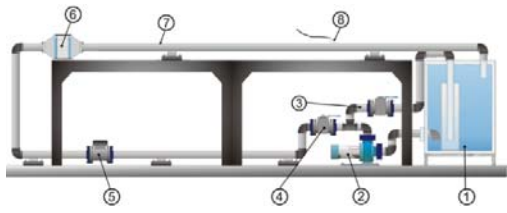
となり、ドップラー周波数 f_D は次のように表される。

$$f_D = \frac{1}{2\pi T_{prf}} \tan^{-1} \frac{R_y(T_{prf}, \tau)}{R_x(T_{prf}, \tau)} \quad (8)$$

(3) フェイズド流速分布計測

①実験装置および方法

構築した計測システムの評価にあたり、水平配管内の充分発達流を対象とした流速分布計測を行った。実験装置を図9に示す。実験装置は、タンク、ポンプ、ボールバルブ、電磁流量計、整流器、テスト部から成り、それらを配管で接続している。テスト部の配管はアクリル製で長さは3 m、直径は50 mmである。実験装置内の作動流体は水で、超音波反射体として平均粒径80 μm のナイロン粒子を混入させた。作動流体はタンクに溜められた後、ポンプによってテスト部に流入する。流量はボールバルブによって調整し、電磁流量計でモニタリングを行う。計測時の水温は 16°C 、流量は $0.001 \text{ m}^3/\text{s}$ に調整した(レイノルズ数: 23,000)。センサは整流器から1.5 mの位置に設置し、計測位置での配管壁の厚さは1 mmとした。センサは配管に対し垂直に設置し、配管壁とセンサの間にはゼリー状のカップリング材を塗布した。アレイセンサの遅延時間は60 nsに設定し、入射角を 10° とした。また、印加電圧にはアポダイゼーションを適用した。1パルスあたりに波数を4、パルス繰り返し周波数を2 kHzと設定した。流速分布は100回計測し、平均化を行った。



① Water tank ② Pump ③ Bypass ④ Ball valve ⑤ Electromagnetic flowmeter
⑥ Flow straightener ⑦ Test channel ⑧ US Array sensor

図9 実験装置の概略図

② 実験結果および考察

PAUVP および UVP-DUO での計測結果と FLUENT による数値シミュレーションの結果の比較を図10に示す。PAUVPの結果は前述のとおりセンサー近傍で流速分布が乱れているが、一方で、センサーから遠方の領域では、UVP-DUO および FLUENT の結果とおよそ一致していることが確認できた。

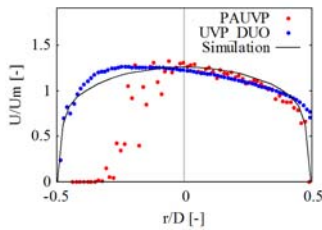


図10 流速分布

(4) フェイズド探傷計測

① 実験方法

試験片として、欠陥に見立てた直径 3mm の貫通穴のある 120mm×66mm×20mm のアルミニウム板を用い、探傷試験を行った。試験片の写真および断面図を図11、図12に示す。実験装置はアレイセンサー、8ch パルサ/レシーバ(JPR-10C-8CH, ジャパンプロープ社)、デジタル内蔵 PC(デジタル: PXI-5105, National Instruments 社)から成る。本計測では、試験片の右端の欠陥を検出するためにアレイセンサーを設置し、フェイズドアレイ技術により超音波の走査角を変え、走査角ごとにエコー信号を取得した。得られたエコー信号の包絡線を包絡線検波によって抽出し、2次元平面上にプロットすることで探傷画像を構成した。アレイセンサーの隣り合う素子ごとの超音波発信遅延時間を 0 ns ~ 75 ns まで 5 ns ずつ変化させ、走査角 θ が $0^\circ \sim 75^\circ$ の範囲を探傷した。また、超音波発信はすべての超音波素子を用いて行い、受信はセンサーの中心に近い一つの素子のみで行った。



図11 試験片外観

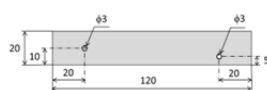


図12 試験片断面

② 実験結果

検査領域を図13に示す。この時の計測によって得られた探傷画像が図14である。図中の縦軸はアレイセンサーから深さ方向、横軸はアレイセンサーから長手方向の距離を表しており、図中の色は赤いほどエコー信号の強度が強くなり、青いほど信号強度が弱いことを示している。黄色の点線は底面の位置および欠陥の位置である。図14より、深さ 0mm~10mm の位置の信号強度が非常に高くなっている。これは、超音波がセンサー内で多重反射したためと考えられ、センサー内の吸音材を改良することで、多重反射の影響を軽減できると考えられる。また図14から、穴の近傍において信号強度が強くなっている箇所があり、欠陥の表面で反射した信号をとらえたものと考えられる。すなわち、欠陥の検出できていることが確認でき、本計測装置を用いてフェイズドアレイ探傷が可能であることが示された。

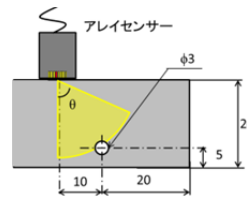


図13 検査領域

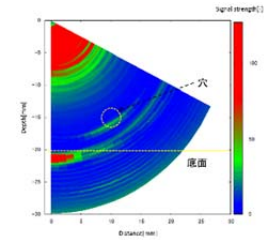


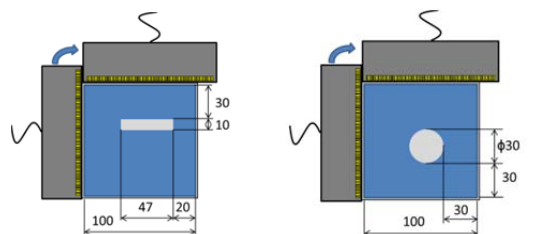
図14 2次元探傷画像

(5) CT技術の構築

実験装置には、断面形状が 100mm×100mm、厚さ 1mm の筒状水槽、水槽内に配置する断面形状 10mm×50mm のアクリル板および $\phi 30$ mm のアクリル円柱、超音波センサー、128ch 対応マルチプレクサ(MX-128, ジャパンプロープ社)、パルサ/レシーバ(TIT-10B, ジャパンプロープ社)、パルサ/レシーバ制御用 PC、デジタル内蔵 PC(デジタル: PXI-5105, National Instruments 社)を用いた。計測時、水槽内の高さ 300mm までを水で満たした。

この時、水温は 14°C であった。超音波センサーとして使用したリニアアレイセンサーは、配列された 128 個の超音波発信素子からなり、素子ごとに超音波の発信および受信が可能である。計測には 1ch~100ch までの振動素子を使用し、1ch ずつ順番に超音波信号の送受信を行い一つの投影データを得た。続いて、水槽の隣の面にリニアアレイセンサーを設置し同様に投影データを取得し、直交する二方向の投影データから断層画像の再構成を行った。リニアアレイセンサーは水槽の底から高さ 100mm の位置に設置し、センサーと水槽の壁面間にゼリータイプのカップリング剤(ソノゼリー, 東芝医療用品株式

会社)を塗布した。水槽中には検査対象として、
 アクリル板およびアクリル円柱を図 15 の様
 に設置した。検査領域の音速は水を同じと仮
 定し、データは超音波センサーから 100mm
 までの範囲を取得し解析を行った。なお、計
 測時のパルスレシーバの設定を表 1 に示す。



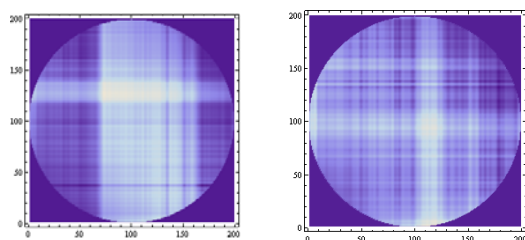
(a)アクリル板を検査対象とした場合 (b)アクリル円柱を検査対象とした場合
 図 15 水槽の断面形状およびリニアアレイセ
 ンサの配置

表 1 計測時の条件

中心周波数	8 MHz
波数	4
印加電圧	100 V
ハイパスフィルタ	1 MHz
ゲイン	0 dB

①実験結果

実験結果を図 16 に示す。図 16 (a)からは、
 アクリル板を配置した位置およびアクリル
 板の大きさを確認することができる。一方、
 図 16 (b)からは、円柱の位置は確認できるが、
 円柱の大きさはおよそ $\phi 10\text{mm}$ であり、実際
 の円柱より小さく検出された。これは、柱の
 表面は曲率があり、センサーとは異なる方向
 に超音波が反射してしまうため信号を受信
 できなかったためと考えられる。



(a)アクリル板を検査対象とした場合 (b)アクリル円柱を検査対象とした場合
 図 16 再構成した断層画像 (縦軸および横軸
 の一目盛は 0.5mm)

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 1 件)

- ① 井原智則・木倉宏成・村川英樹, フェイ
 ズドアレイ超音波流速分布計測法に関す
 る基礎研究, 電子情報通信学会技術研究
 報告[超音波], 111 巻, 21 号 (2011-4),
 pp. 29-34. (査読無し)

[学会発表] (計 2 件)

- ① 福本拓哉・塚田圭祐・井原智則・都築宣
 嘉・木倉宏成, フェイズドアレイ技術を用
 いた超音波流速分布計測法に関する基礎
 研究, 日本原子力学会関東甲越支部 第
 6 回学生研究発表会, A04, p4, 2013 年 3
 月 7 日, 東京工業大学(東京).
 ② 木倉宏成, パルス超音波を用いた流速分
 布計測とフェイズドアレイ計測への応用,
 フェイズドアレイ超音波探傷研究委員会,
 招待講演, 2012 年 8 月 6 日, 日本非破壊
 検査協会(東京都).

[その他]

ホームページ等
 東京工業大学木倉研究室
<http://www.nr.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・ソリューション研究機構・
 准教授
 研究者番号: 00302985

(2) 研究分担者

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

武居 昌宏 (TAKEI MASAHIRO)
 千葉大学・工学 (系) 研究科 (研究院)・
 教授
 研究者番号: 90277385

(3) 連携研究者

なし