

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24日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22560412

研究課題名（和文） 音響アレイと時間反転波による可視化法の応用研究

研究課題名（英文） Study on Application of Visualization of Using Acoustic Array and Time-Reversal Wave

研究代表者

若槻 尚斗（WAKATSUKI NAOTO）

筑波大学・システム情報系・准教授

研究者番号：40294433

研究成果の概要（和文）：本課題は時間反転波のシミュレーションに基づいて音場や音響散乱体などの可視化を行う手法の構築と可視化装置の開発を行うものであった。他の可視化手法に比べ、特に反射の多い環境において有効であることが示された。また、可視化装置を実際に試作し実験を実施した結果、特に可視化対象となる領域を囲むように反射境界が存在するような空間においては、少ないアレイ素子数で可視化が可能となる。また GPU を用いる並列計算などによりほぼリアルタイム（例えば秒間1フレーム程度）の可視化も可能であった。

研究成果の概要（英文）：This study is aimed to the developments of visualization method of sound fields or acoustic scattering objects, and also the implementation for the application of this method. As the results of this study, it has been proved that this method is suitable in heavily reflective sound fields, compared to other visualization methods. Especially in the space surrounded by reflective boundaries, the visualization can be achieved by using small number of array elements. Real-time visualization could be also possible with parallel computing by using graphical processing unit (GPU).

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード：計測システム

1. 研究開始当初の背景

(1) 従来法

音源を音響的な手法により可視化する技術はいくつか存在するが、従来法として、計測空間内においてグリッド状にセンサを配し直接音圧を観測する方法と近距離音響ホログラフィ法が挙げられる。前者は、シンプ

ルで確実な方法であるが、対象領域内をセンサで埋め尽くす必要があり、本研究が目的としている対象領域の周囲からのセンシングではない。後者は、離れたところからマイクロホンアレイにより観測した音圧分布から任意の距離における音圧・粒子速度分布を再構成する手法である。基本的にはアレイに平行な面での音場が再構成され、周辺で取得し

た情報から内部の再構成を行う目的のものではなかった。

(2) 本課題における提案法

ある波源で発生した波動をそのまわりを取り囲む境界面で全て受波しておき、それを時間反転させて境界面から送波すると元の波動が、あたかも映画のフィルムの逆転再生のように逆向きに伝搬して波源まで戻って行く。これを時間反転波と呼び、その自己収斂性から海洋音響通信などの分野での応用も研究されている^[1]。

本研究は、時間反転波を計算機シミュレーションで追跡することにより物体内部の状態を高速に検出し映像化する方法を検討するものである。物体内部に傷など何らかの不連続性があれば、そこで散乱された波動はあたかもその位置を波源とする波動のように振舞うことから音源探査と同様な方法がこの用途に利用可能であると想定される。この手法が原理的に可能であることは、離散ホイヘンスモデルによる時間反転シミュレーションにより証明されている^[2]。

[1] 志村拓也, 渡邊佳孝, 菊池年晃, 信学技報, 超音波, Vol.103, No.277, pp. 7-12, (2003).

[2] Y. Kagawa, T. Tsuchiya, K. Fujioka and M. Takeuchi, Journal of Sound and Vibration, Vol.255, No.1, pp.61-78, (1999).

2. 研究の目的

マイクロホンアレイ (以下、アレイ) で収集した音圧情報から時間反転シミュレーションで3次元空間における音源および空間内媒質の可視化システムの構築を目標とする。また実用化を念頭に入れ、少数アレイを設計し、少ないデータ数で効率的に音源分布を可視化する方法を検討する。更にこの手法を応用して空間内に任意の音場を生成することが出来るシステムの検討を行う。

3. 研究の方法

研究手法は、まず数値実験によりアルゴリズムの確立を行い、続いて検証実験を行う事である。研究初期の段階では可視化アルゴリズムの構築を行う。理論上は波長程度以下の間隔でアレイを構成して空間のまわりを完全に囲めば完全な場の再構成が可能であるが、実際にはセンサ数の制約や反射波の影響などが想定され、これらの問題の解決法を見出すことが目標となる。

研究中期では可視化システム全体を組み上げ検証実験を行う。数値シミュレーションだけでは把握しきれない実装上の問題が発生する可能性もあり、実際にシステムを組ん

で検証実験を行うことは不可欠である。

研究後期には発展研究として時間反転波に相当する波動を実際に発生させることにより、空間中に任意の音場を作り出すことを試みる。ここではマイクロホンアレイのかわりにスピーカアレイを用いることになる。実際に生成された音場は、ここまでの研究で用いていたマイクロホンアレイを走査することにより3次元測定を行い確認する。

4. 研究成果

可視化原理に関する研究の成果

システム構築のため、研究初期では波動伝搬の数値シミュレーションを用いて可視化アルゴリズムの検証と各種設計パラメータの決定を行うとともに、2次元問題として実験を行った。理論的には、可視化する空間を覆うようにマイクロホンアレイを設置すれば、場の完全な再構成が可能であるが、実際には素子数などの制約があるため、少ない素子数で精度良く可視化像を得るためのアルゴリズム開発とパラメータ設定について検討を行った。同時に実際に可視化システムを構築し実機による検証も行った。各研究項目について以下に述べる。

可視化アルゴリズムの開発

可視化法は2種類検討した。一つは医療などの分野で用いられる断層影画法 (CT法) を応用して音波伝搬時間から金属ビレット内部の欠陥を検出するシステムに発展させたものである。これは内部欠陥の傍を波動が回折することを利用するもので、経路が直線ではないことから生じる伝搬時間増加を利用するものである。もう一つは時間反転波のシミュレーションに基づくものである。これは解析領域を囲む吸収境界に入射した音圧信号を時間反転して境界に入射するものであり、前者の手法より送波回数が圧倒的に少なくなるのが利点であるが、可視化像には多くのアーチファクト (虚像) が発生する欠点もある。これをなるべく軽減するアルゴリズムを考案し実装を行った。そのアルゴリズムの一つが片側吸収境界である。本可視化手法では時間反転波が音源または反射点の位置に集束するまでの音響パワー分布を累積することにより可視化像を得ているが、集束した後も音波が伝搬し続け再拡散するため、その過程が可視化像におけるアーチファクトとなる。そこで、音波の集束点を判定しそこに音波が集束した後ではその点の周囲を、内側から外側への波動だけを吸収する境界条件を設定することにより、アーチファクトを軽減するアルゴリズムを考案した。図1は計算機シミュレーションによる検証結果である。図1(a)に示すように、矩形領域の3辺を

反射境界とし、1辺を吸収境界とした。吸収境界上の1点から音波を入射し、境界上でマイクロホンアレイにより音波を取得するという構成を検証した。図1(b)は片側吸収境界を設定せず、通常通りに再構成を行った結果で

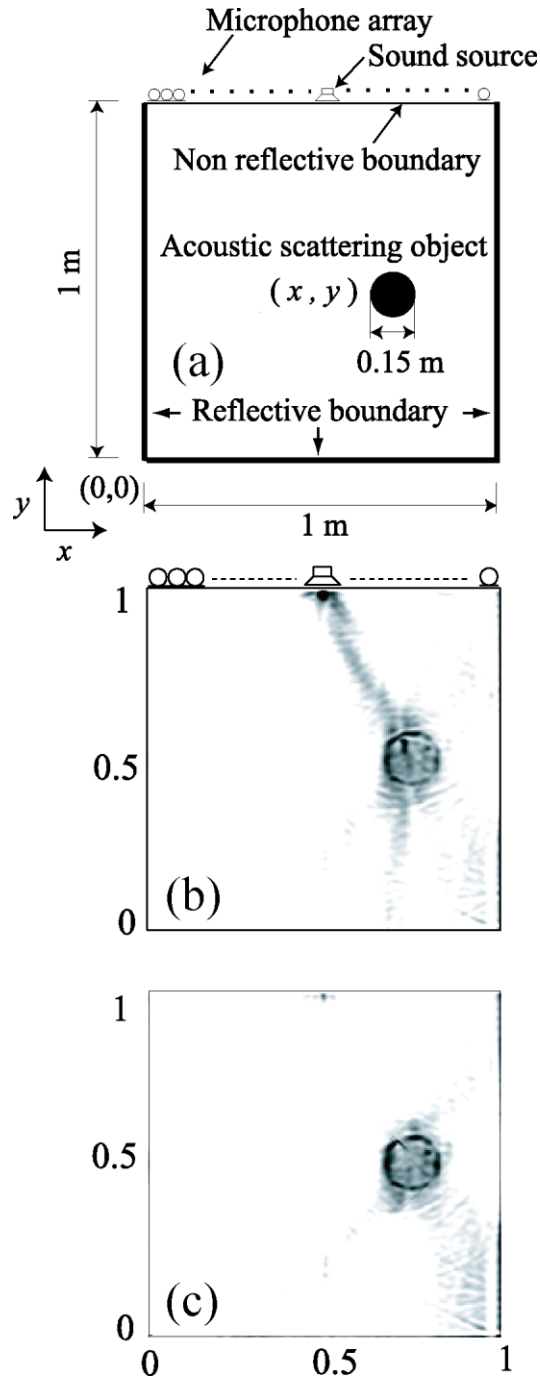


図1. 片側吸収境界を用いる可視化シミュレーション; (a)シミュレーションの設定, (b)片側吸収境界を用いない場合, (c)片側吸収境界を用いる場合
ある。円形の散乱体と音源の間に特に顕著な

アーチファクトが発生していることが確認できる。一方、図1(c)は上述の片側吸収境界を用いた結果である。散乱体と反射境界の間で僅かにアーチファクトが見られるものの、音源と散乱体との間に見られていた顕著なアーチファクトはほぼ解消することが確認された。(学会発表⑥)

また、実際のアプリケーションを想定してトンネル内における異常音検出のシミュレーションも実施した。本シミュレーションでは極端な多重反響環境であるトンネルの入り口のみマイクロホンアレイを設置して、異常音の発生箇所を特定するものである。従来法であるビームフォーミング法などでは、多重反射環境で音源の位置を同定することは困難であるが、本手法では図2のような程度場所が特定できる可能性が示された。(学会発表⑨)

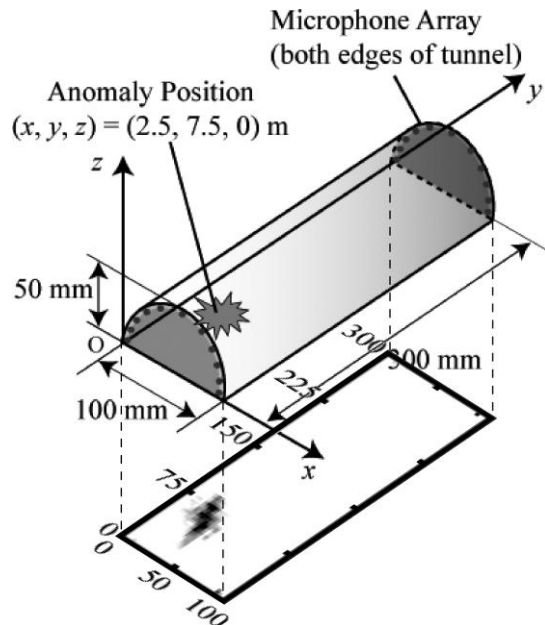


図2. トンネル内異常音検出シミュレーションの結果

実装方法と検証実験に関する研究成果

研究期間の中期以降では高速に可視化を行うための計算法および実機を用いる検証実験を中心に研究を実施した。各研究項目について以下に述べる。

計測システムのセットアップと検証実験

アルゴリズムの検証段階で、トランスデューサを多数用いる場合には、トランスデューサをアレイ化するのはコストの問題もあることから、送受波で対のトランスデューサをそれぞれスキャンすることでアレイの代用として検証実験を行った。CT法の計測シ

システムはトランスデューサのスキュンには3次元空間を自在にスキュンできるステージを用いて構築した。逆伝搬法の検証は無響室内に音源と反射物体を設置し空中音波用送受波器をリニアステージでスキュンして行った。

鉄ビレット内部の可視化実験

鉄ビレットの非破壊検査には超音波が一般的に利用されるが、多くは内部欠陥からの反射波を観測する反射法に基づくものである。鉄ビレットは内部での音波減衰が大きいこと、欠陥からの反射波が小さいことから反射法を適用できる深さには限度があり、100~200mm角オーダサイズのビレットに適用するのが難しい。研究代表者らは従来より透過超音波の伝搬時間を用いる断層映像法を提唱している。ここでは、従来用いていたパルス波ではなく連続波の位相情報を用いて可視化が可能かどうかを検討し、定性的ではあるものの可視化が可能であるという結論を得た。(雑誌論文②, 学会発表⑦, ⑧)

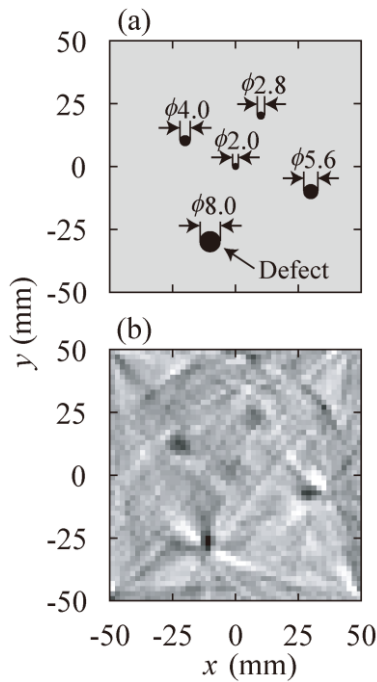


図3. 鉄ビレット内の欠陥可視化実験の結果

可視化のための高速計算法の開発

時間反転波の計算は波動伝搬を時間領域で計算することから、時間領域有限差分法(FD-TD法)や伝達線路行列法(TLM法)のような数値解法が有効である。この種の計算手法は並列化による計算速度向上の効率が良いことが知られていることから、ここではマルチCPU(マルチコアを含む)、およびGPGPU(General Purpose Graphic Processing Unit)を用いる並列計算の使用を試みた。さ

らに並列計算機のハードウェアを含む開発環境のセットアップと、有限差分法における並列計算による高速化のための予備実験を行った。また差分法における斜めの境界による計算誤差の検討も行った。(学会発表④)

検証実験のための実験装置製作と検証実験

時間反転波を用いる可視化法にはトランスデューサのアレイが必要となる。ここではマイクロホンとアンプの製作を行いアレイ化の準備を行った。

時間反転波シミュレーションに基づく可視化アルゴリズムの妥当性を示すため、実際にシステムを構築して実証実験を行った。波動伝搬の計算には高速性および時間領域での解法という観点から時間領域差分法を並列化して用いた。中でもメモリアクセスが少なく高速とされる波動方程式に基づく有限差分法WE-FDTD法を採用した。実験にはIntelのx86アーキテクチャのマルチコアCPUによるSMP並列計算機を用いてOpenMPによりマルチスレッド化する方法、もう一つはNVIDIA社のCUDAの登場以降特に脚光を浴びているGPGPU技術を用いる方法を試みた。

可視化実験は周囲を反射壁で囲った一辺270mmのミニチュアサイズのモデル空間で、素子数10個の小規模なアレイを用いた。空間内に設置した音源からバンド幅の広い音響信号を送信した場合、アレイから遠方にある音源であっても概ね波長程度の分解能で音源の可視化が可能であった。このとき可視

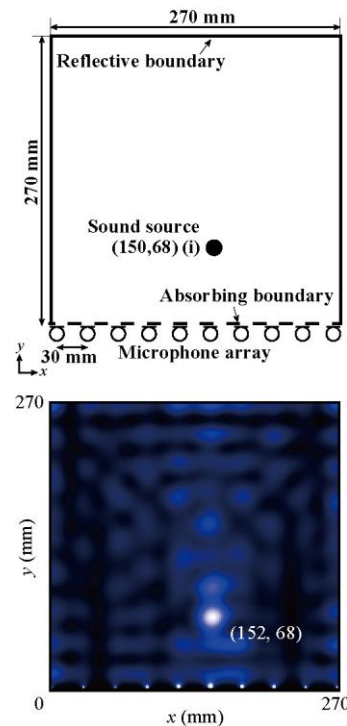


図4. 音源可視化装置による可視化結果
化にかかる時間は1フレームあたり約1秒で

あり、ほぼリアルタイムで図4のような可視化が実現された。ただしこれはミニチュアサイズの空間において2次元の可視化を行う場合であり、SMPタイプの並列計算機とGPGPU技術による並列計算機では速度面での差はあまりないことが明らかになった。同時に、図5に示すように問題の規模が大きくなるほどGPGPUの方が高速になる傾向が顕著になり、将来3次元問題に拡張する場合には問題サイズが大きくなることからGPGPUの有効性が大きくなることが示された。(学会発表①)

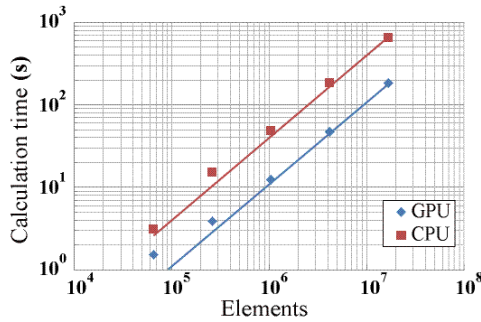


図5. 並列計算機による可視化時間の比較

空間の反射境界形状の推定

本可視化法では空間の境界形状が既知である場合に特に有効であることから、今後の布石として境界形状を音響的に計測する手法についても検討をはじめ、反射音と直達音の到来方向から数学的な演算(図6)により反射点における境界の方向が推定できること、音源の移動に伴い推定結果を累積することで境界形状が推定可能であることが示唆された(図7)。現状では推定出来る境界は限定的であるが、将来的には本手法を用いることにより、予め空間形状を把握していなくても時間反転波による可視化法が適用出来る可能性が見出された。(雑誌論文①, 学会発表②)

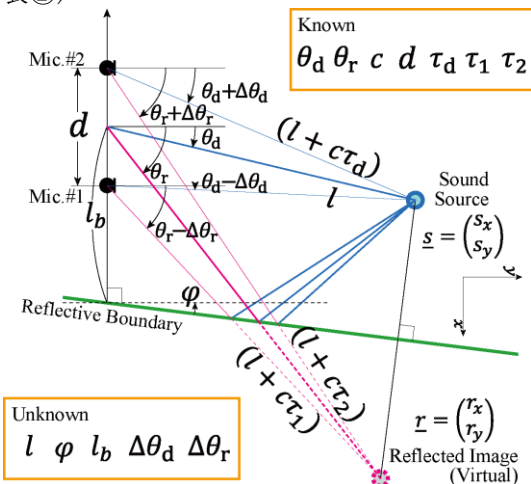


図6. 反射境界位置推定法の説明図

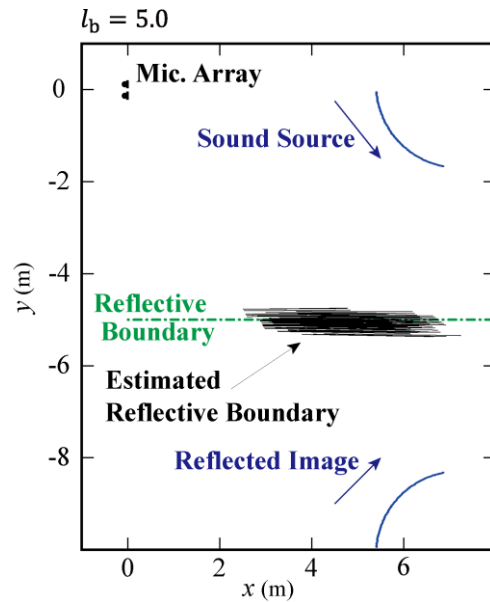


図7. 反射境界位置の推定結果

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 Keiichi Zempo, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, 'Localization of Acoustic Reective Boundary Using a Pair of Microphones and an Arbitrary Sound Source,' Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 52, 2013, (印刷中: 頁未定).

② Hideto Mitsui, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, 'Defect detection in square billet using time-of-flight of longitudinal waves,' Japanese Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. 49, 2010, 07HC13_1-07HC13_6.

[学会発表] (計9件)

① 青木拓也, 若槻尚斗, 水谷孝一, '時間反転波を用いる高速音源可視化システムに関する研究,' 日本機械学会, 関東学生会第52回学生員卒業研究発表講演会, 2013年03月15日, 八王子市.

② 善甫啓一, 水谷孝一, 若槻尚斗, '少数マイクロフォンアレーを用いた反射境界の位置推定,' 第33回超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム, 2012年11月15日, 千葉市.

③ Keiichi Zempo, Koichi Mizutani, and Naoto Wakatsuki, 'Estimation of Boundary Position by Direction-of-Arrivals of Direct and Reflected Sound,' 1st IEEE Global Conference on Consumer Electronics

(GCCE2012), 2012年10月3日, 千葉市.

④米田尚樹, 若槻尚斗, 水谷孝一, ‘差分法を用いる管内音場の解析,’ 日本音響学会音楽音響研究会, 2011年8月6日, 金沢市.

⑤ Tadashi Ebihara, Yoko Norose, Hideto Mitsui, and Koichi Mizutani, ‘Defect detection in square billet using phase-information of longitudinal waves,’ 31th International Symposium on Acoustical Imaging, 2011年4月11日, ワルシャワ (ポーランド).

⑥津隈和樹, 若槻尚斗, 水谷孝一, ‘時間反転波を用いる音場可視化法におけるアーチファクトの軽減,’ 平成22年度超音波医学会第4回基礎技術研究会, 2010年12月10日, 仙台市.

⑦ Hideto Mitsui, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Yoko Norose, ‘Measurement Point Reduction for Acoustic Imaging in Square Billet,’ 31th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2010年12月8日, 東京都.

⑧ Yoko Norose, Koichi Mizutani, Naoto Wakatsuki, and Hideto Mitsui, ‘Transfer characteristics between transmitter and receiver in scanning along rectangular surface,’ 31th Symposium on Ultrasonic Electronics, 2010年12月8日, 東京都.

⑨田中勝大, 海老原格, 水谷孝一, ‘時間反転波を用いるトンネル内の異常音検知,’ 土木学会・第35回情報利用技術シンポジウム, 2010年10月22日, 東京都.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若槻 尚斗 (WAKATSUKI NAOTO)
筑波大学・システム情報系・准教授
研究者番号: 40294433

(2) 研究分担者

水谷 孝一 (MIZUTANI KOICHI)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 50241790

(3) 研究協力者

海老原 格 (EBIHARA TADASHI)
筑波大学・システム情報系・助教
研究者番号: 80581602