

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656073

研究課題名(和文)断熱系でない音場の解明に関する研究

研究課題名(英文)Studies on sound field with non-adiabatic system

研究代表者

及川 靖広(Oikawa, Yasuhiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：70333135

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円、(間接経費) 870,000円

研究成果の概要(和文)：これまで断熱系として論じられてきた音の伝搬であるが非常に細い管の中などでは熱の移動を無視できない状態となる。本研究では、分子動力学法を導入した音波伝搬の計算、音場の解析を行い、さらに音場に影響を及ぼさない音場測定手法を実現し、計算と実験の両面から熱の移動を無視できない状態の音場を解明することを目的とする。

分子動力学法を用いることにより熱の移動を考慮した音場計算を可能とした。また、非線形音場の解析手法を提案し、種々の非線形現象の計算を可能とした。さらに、レーザーや高速度カメラを用いた音場に影響を及ぼさない音場測定技術を確立、計算と実験の両面から現象を解析し、細い管の中の音場の挙動を確認した。

研究成果の概要(英文)：It is the propagation of sound, which has been discussed as adiabatic system so far, but the movement of heat can not be ignored, for example, in the tube very thin. In this study, I perform the calculation of wave propagation which introduced the molecular dynamics method, the analysis of the sound field, and I also realize the sound field measurement technique does not affect the sound field further, and then it is intended to elucidate the sound field in a state that can not be ignored transfer of heat from both the calculations and experiments.

Which made it possible to sound field calculation in consideration of heat transfer by using the molecular dynamics method. I also proposed methods to nonlinear sound field, which makes it possible to calculate the non-linear phenomena. Further, establishing sound field measurement techniques that does not affect the sound field using a high-speed camera or a laser, it was confirmed the behavior of the sound field in the thin tube.

研究分野：音響学、音響工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎

キーワード：シミュレーション工学 数理物理 音響学 分子動力学 可視化

1. 研究開始当初の背景

我々にとって切っても切れない関係にある音であるが、物理的には空気の疎密により生じる気圧変動が波として伝わっている。このことがわかってきたのは空気というものの正体が明らかになった17世紀以降であり、その後、様々な科学者により音の性質が解明されてきた。たとえば、約100年前、クントは音速の測定を行うために音響管の中の一次元音場をコルクなどの軽い粒子を使って可視化した。また、日本で始めて音響工学に関し統一的・体系的にまとめられた伊藤毅の音響工学原論にも紹介されているが、水面に生じる波紋を観測することにより音波の伝搬の様子を模擬するなど実験を工夫し見えない音の伝搬を可視化し現象を把握しようと努力されてきた。このように現象の可視化は物理量の測定、現象の解明に非常に役立つものとなる。

一方、計算機の誕生により音の伝搬過程の把握にも計算機の導入が行われてきた。音の粒子性に着目し波動性を無視した解析方法として音線法や鏡像法などが提案されてきたが、より正確な計算を行うために近年では波動方程式に基づき空気中の音波の伝搬の様子、音場の解析を行うことが主流となっている。具体的には有限要素法、境界要素法、差分法等の様々な計算方法が導入され、最近では計算機の発達によりリアルタイムでのシミュレーションも可能となってきている。

音の伝搬は波動方程式を満たすとされていることからそれを完全に解けば音響のすべての問題が解析できると思われるが、これまでの音に関する議論は断熱系で論じられており熱の移動は無視されている。たとえば非常に細い管の中では熱の移動を無視できない状態となり、波動方程式を解くだけでは説明が不十分な現象も発見されてきた。

2. 研究の目的

音は波動方程式に基づき空間を伝搬し、音場を形成する。音場の数値計算においては、近年、波動方程式に基づいた有限要素法、境界要素法、差分法等の様々な計算方法が導入されてきた。一方、これまで断熱系として論じられてきた音の伝搬であるが非常に細い管の中では熱の移動を無視できない状態となる。そのような状態で起こる現象として熱音響現象などがあり、それを利用した冷凍機等が実用化され応用が進みつつある。しかし、いまだその現象の把握が不十分な状況にある。これまで我々も熱音響現象を利用した冷却の研究を行ってきたが、その設計は経験によるところが多く、詳細な原理の解明と理論の確立の必要性を感じてきた。本研究では、空気分子の運動に着目し分子動力学法を導入した音波の伝搬の計算、音場の解析を行い、これまで無視されてきた熱の移動を無視できない状態の音場を解明することを目的とする。さらに、レーザや高速度カメラを用い

た音場の測定を行い、計算と実験の両面から現象を解析し、その理解を目指す。

3. 研究の方法

本研究では波動方程式を解析するだけでは説明が不十分な現象を説明すべく、解析の出発点を波動方程式とするのではなく音が伝搬する媒質である空気の分子運動とし、より物理現象の根本から考え直した音場の解析を行う。具体的には、分子動力学法を導入し空気分子の運動に着目した音波の伝搬の計算、音場の解析を行い、熱の移動をも考慮した音の伝搬過程を明らかにする。また、レーザや高速度カメラを用いた音場測定技術を用い、音場に影響を与えずに測定を行い、理論と実験の両面から現象の解明に取り組む。以下、具体的研究項目を記す。

(1) 分子動力学法を用いた音場解析手法を確立するための基礎検討

分子動力学法に関する理論的検討として、これまで音響分野において導入されたことが無い手法であり従来の波動方程式による解析との比較も含め理論的検討を行う。

(2) アルゴリズムの開発と計算

音場解析に適したアルゴリズムの検討として、並列化技術、GPU技術などの利用を視野に入れ、アルゴリズムの最適化をはかる。さらに、基礎的波面の解析として平面波を対象とし分子動力学法に基づく方法により計算を行い、理論値、従来の波動方程式に基づく方法との比較を行う。

(3) 高速度カメラを用いた音場解析手法の提案

音場中の粒子の挙動の観測として高速度カメラを用いて音場中に散布した油滴や埃の動きを観測し、さらにその動きを解析することにより音情報の抽出を行う。

(4) 壁面との熱の移動を考慮した細管内を伝搬する音波の解析

分子動力学法を用い、分子位置と分子速度を逐次求めることができる。求められた分子位置、分子速度の分布から分子数密度、速度分布、圧力分布、温度分布などの熱力学に対する処量を導出することができる。さらに、気体分子が固体表面と相互作用する拡散反射モデルを取り入れることにより、壁面と期待との間に熱の移動のある系での音響現象を解析することができると考えられる。拡散反射モデルは、入射した気体分子が固体表面と十分に相互作用をし、反射する際には固体表面と熱平衡状態にあるという理想的な状況を考えているとも言える。このモデルを導入し、シミュレーション区間上下端の壁面と気体分子が衝突の様子、微細音場における圧力分布変化の確認を行う。通常の波動方程式を解く限り熱の移動を把握できないが、本手法によりそれらを考慮した数値計算が可能である。

(5) 気体の状態を考慮した数値計算

流体力学における連続の式、Navier-Stokes 方程式、熱力学の関係式を用いて空気粘性等の影響を含めることのできる音波伝搬の方程式、非線形な音波伝搬の方程式を導出する。これらの式に FDTD 法(時間領域差分法)を適用し、強力超音波による非線形現象の計算を行う。

(6)レーザを用いた音場測定と物理法則に基づいた音場の復元

レーザを用いることにより音場に影響を与えずに音場測定が可能である。レーザドップラ振動計を用いた音場測定においてはこれまで非常に多数の観測点を必要とする。物理法則に基づき測定結果を補間する手法を提案し、これまでの手法に比べ少ない観測点から高精度な音場補間が可能とする手法の確立を目指す。

(7)物理測定との比較

赤外線カメラでの温度分布測定、レーザドップラ振動計を用いた音場測定、高速度カメラを用いた PIV 解析等を用いて管内の音場を観測する。それら実験結果と計算結果との比較を行う。

4. 研究成果

(1)平成 23 年度は、分子動力学法を用いた音場解析手法を確立するための基礎検討を重点的に行った。

分子動力学法を用いた音場解析手法の検討

これまで音響分野において導入されたことが無い手法であり従来の波動方程式による解析との比較も含め理論的検討を行った。単純なモデルでの解析の可能性があることを確認するとともに、可聴音を対象とした場合波長や粒子数の関係から多くの計算量を要することを確認した。

アルゴリズムの開発と計算

音場解析に適したアルゴリズムの検討として、並列化技術、GPU 技術などの利用を視野に入れ、アルゴリズムを検討、最適化はかった。2 分子間の相互作用ポテンシャルとして分子動力学計算に広く用いられるレナード=ジョーンズ・ポテンシャルを用いた。さらに、基礎的波面の解析として平面波を対象とし分子動力学法に基づく方法により計算を行い、理論値、従来の波動方程式に基づく方法との比較を行った。まずは熱の移動を考慮しない場合の解析を行った。計算コストを考慮し、まずは超音波領域の音を対象にして計算を行った。その結果、音波伝搬の様子を確認することができた。

高速度カメラを用いた音場解析手法の提案

計算と実験の両面から現象を解明していくには、音場に影響を与えずに観測する手法の確立が求められている。センサ・ディスプレイ複合アレーにより音場の状況を詳細に把握する手法、高速度カメラによる音場観測手法について検討を加えた。前者については、

マイクロホンと LED を一体化した小型のセンサ・ディスプレイ素子を作成、音が伝播する空間に分散配置しマイクロホンアレイを構築し音圧を光で表現する手法の検討を行った。後者については、音場中の粒子の挙動の観測として高速度カメラを用いて音場中に散布した油滴や埃の動きを観測し、さらにその動きを解析することにより音情報の抽出を行った。これら結果により、媒質を離散的な複数の粒子の集合と見なし音波伝搬に関する解析が可能であることが示された。これら手法では観測者がリアルタイムで直感的に音源の把握ができ、かつ定常的な音場でなくとも観測ができる。

(2)平成 24 年度は、前年度に得られた結果を基にして、壁面との熱の移動のある系を対象とした解析を中心に行い、本手法の有効性を示すとともに、その原理の解明、理論の構築を目指した。

壁面との熱の移動を考慮した細管内を伝搬する音波の解析

シミュレーション区間左右端に対し周期境界条件または剛体壁を、上下端に熱交換を行なう壁面を設定し、ごく細い管状の領域でシミュレーションを行い、熱音響現象を引き起こすスタック内部の現象などの解析を目標とした。周期境界において粒子は連続的な運動をし、上下端の壁面では気体分子との相互作用を考慮したうえで、エネルギーの交換を設定した粒子の反射モデルを使用した。まずは壁面におけるエネルギー交換が正しく行われているかどうかを確認するために、音源によるエネルギーの入力を考慮しない状態でシミュレーションを行なった。系が定常状態であれば、壁面とのエネルギーのやり取りの総和は 0 に近づくはずである。その結果、気体粒子と壁面が等しくエネルギーをやり取りしており、系が平衡状態にあることが確認できた。続いて音波の入力を考慮しシミュレーションを行った。シミュレーション区間中央部分において気体分子に対し、設定した振幅・周波数の正弦波に従った速度を加えることでシミュレーションを行なった。この音源壁面上では粒子とのエネルギー交換を考えず、シミュレーション領域上下壁面においてのみエネルギー交換を考慮するものとした。また、音源の周波数は約 200kHz、シミュレーション時間長は音源周波数の半周期以内とした。シミュレーション区間中央より右方向に高いエネルギーが与えられている様子が確認され、これは音源によって加速された気体分子の影響によるものと思われる。音波を発生させることで、壁面にエネルギーが伝達される様子が観測できた。

分子動力学法を音響シミュレーションに応用し、壁面とのエネルギーのやり取りを考慮した解析を行なった。その結果、音源から気体分子に対して入力された運動エネルギーが壁面へと伝達する様子を観察すること

ができた。

気体の状態を考慮した数値計算

流体力学における連続の式、Navier - Stokes 方程式、熱力学の関係式を用いて空気粘性等の影響を含めることのできる音波伝搬の方程式、非線形音波伝搬の方程式を導出した。これらの式に FDTD 法(時間領域差分法)を適用し、温度勾配や湿度、風などの複雑な大気条件の影響を考慮した非線形音場の数値計算、音源近傍の音場の解析、強力超音波による非線形現象の計算に成功し、音波伝搬における気象条件の影響、平板スピーカ近傍の音の放射特性、パラメトリックスピーカでの可聴音復元の様子を明らかにした。

(3)平成 25 年度は、それまでに続き壁面との熱の移動を考慮した細管内を伝搬する音波の解析、気体の状態を考慮した数値計算を中心に研究を進め、熱の移動のある系での音響現象の解析、非線形音場の解析を行った。また、分子の動きに立脚した熱音響現象理論の構築を目指し、細管が束になったスタック内の音場について実験と計算を行い、それら結果の比較を行った。

壁面との熱の移動を考慮した細管内を伝搬する音波の解析

分子動力学法を音響シミュレーションに応用し、気体 固体表面のミクロな相互作用から生じる熱の移動を考慮した音場解析を行った。これまで同様計算コストの点から超音波領域での計算を行ったが、音源から気体分子に対して入力された運動エネルギーが壁面へと伝達する様子をシミュレーションにより明確に確認することができた。実験結果と計算結果との間には類似の傾向を見ることができた。

レーザを用いた音場測定と物理法則に基づいた音場の復元

レーザドップラ振動計を用いた音場測定においてはこれまで非常に多数の観測点を必要としたが、物理法則に基づき測定結果を補間する手法を確立し、これまでの手法に比べ観測点を 2 桁削減することができた。非常に少ない観測点から高精度な音場補間が可能とし、さらに音以外に要因があるノイズの影響を受けにくい測定方法を確立した。

物理測定との比較

赤外線カメラでの温度分布測定、レーザドップラ振動計を用いた音場測定、高速度カメラを用いた PIV 解析を用いて管内の音場を観測した。それら実験結果と計算結果との比較を行った。類似の傾向を見ることができたが、完全は一致する結果はまだ得られていない。今後、粒子法など分子動力学法より大局的な粒子を想定した解析手法の検討を加え、細大漏らさず現象の解明を進める所存である。

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)

矢田部浩平, 及川靖広, “レーザドップラ振動計を用いた音場測定への境界要素法の逆解析の導入,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J97-A, No.2, pp.104-111, 2014.2. 査読有

Mariko Akutsu, Yasuhiro Oikawa, Yoshio Yamasaki, “Extraction of Sound Field Information from High-Speed Movie of Flowing Dust,” Acoust. Sci. & Tech., Vol.33, No.5, pp.316-319, 2012.9. 査読有

及川靖広, 大内康裕, 山崎芳男, 田中正人, “音響テレビを用いた音源情報の可視化,” 騒音制御, Vol.35, No.6, pp.445-451, 2011.12. 査読無

藤森潤一, 栗原誠, 本地由和, 及川靖広, 山崎芳男, “センサ・ディスプレイ複合アレーによる音場の可視化,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J94-A, No.11, pp.846-853, 2011.11. 査読有

[学会発表] (計 7 件)

矢田部浩平, 及川靖広, “レーザによる可視化音場の復元における偏微分方程式制約の導入,” 日本音響学会春季研究発表会, 東京, 2014.3.10-12.

矢田部浩平, 及川靖広, “レーザによる測定音場の逆解析における定式化と精度の関係,” 日本音響学会アコースティックイメージング研究会, 東京, 2013.10.18.

小坂勇人, 矢田部浩平, 及川靖広, 山崎芳男, “分子シミュレーションを用いた熱の移動を考慮した音場解析,” 日本音響学会秋季研究発表会, 豊橋, 2013.9.25-27.

矢田部浩平, 及川靖広, “レーザを用いた音場測定への逆解析の導入,” 日本音響学会秋季研究発表会, 豊橋, 2013.9.25-27.

Satoshi Ogawa, Yasuhiro Oikawa, “Numerical sound analysis considering atmospheric conditions,” Proc. Inter-Noise, Innsbruck, 2013.9.15-18.

Mariko Akutsu, Yasuhiro Oikawa, “Extraction of Sound Field Information from Flowing Dust Captured with High-Speed Camera,” Proc. ICASSP, Kyoto, 2012.3.25-30.

阿久津真理子, 及川靖広, 山崎芳男, “高速度カメラを用いた空气中浮遊物からの音情報取得,” 日本音響学会アコースティックイメージング研究会, 東京, 2011.10.26.

6 . 研究組織

(1)研究代表者

及川 靖広 (OIKAWA, Yasuhiro)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：7 0 3 3 3 1 3 5