

平成 24 年 5 月 29 日現

機関番号：12612
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540116
 研究課題名（和文）波動伝播現象の数値解法と情報・エネルギー伝達問題への応用に関する研究
 研究課題名（英文）Study on numerical methods of wave propagation phenomena and its applications to information and energy transmission problems
 研究代表者
 加古 孝（KAKO TAKASHI）
 電気通信大学・電気通信学部・教授
 研究者番号：30012488

研究成果の概要（和文）：情報やエネルギーの伝達は、波動伝播現象を利用することで可能になる。本研究では、音波による音声言語情報伝達やアンテナによる様々な周波数の電波放射などの情報伝達の典型例を取り上げ、無限領域における問題を有限領域に帰着させる2種類の方法を用いて有限要素法や差分法による数値解法を考案した。また、弾性波や電磁波などによるエネルギー伝達についても同様の手法を開発し、地震波やMRIにおけるオーム加熱などの問題にその結果を応用した。

研究成果の概要（英文）：Transmissions of information or energy can be performed by use of the wave propagation phenomena. In this study we treated the information transmission by spoken language and electromagnetic radiation with various frequencies from antennas. We developed the methods to reduce the problem in unbounded region into the one in a bounded region using two techniques and then discretized the problems by FEM or FDM. We also developed similar methods for energy propagation phenomena such as those in elasticity or in electromagnetism and applied the method to several problems in seismology or electromagnetic wave heating phenomena in MRI.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：数学・数学一般

キーワード：波動伝搬、FDTD、アンテナ、マルチコア分散並列、PML、複素共鳴固有値、ディリクレ・ノイマン写像、エッジトーン

1. 研究開始当初の背景

研究の全体構想：情報やエネルギーの伝達は、波動伝播現象を利用することで可能になる。音波による音声言語情報伝達や、アンテ

ナによる様々な周波数の電波放射などが情報伝達の典型例である。また、地震波や津波、電磁波オーム加熱などはエネルギー伝達の例である。このことから、波動伝播現象に対

する有効な数値計算法の開発とそれに基づく現象の予測、そして波動場の制御を目指す研究は科学技術計算分野における重要な研究課題として位置づけられる。

本研究で対象とする線形の波動伝播現象は、スカラー場には通常は通常の波動方程式、電磁場などのベクトル場に対してはマックスウェル方程式を含むより一般の双曲型の方程式で記述される。多くの場合、波動現象は無限領域において問題を扱う必要があり、このため現象を記述する波動方程式やマックスウェル方程式の解の無限遠方での挙動を反映させた数値解法の開発が必要になる。また、波動の発生・生成過程を考えると、波源の数理モデル化と数値シミュレーションは現象の再現とそれに基づく制御や設計などの応用問題では重要な研究課題である。本研究では、関数解析や作用素論などの数理的枠組みの中で問題を定式化し、それに基づき有限要素法や差分法などの離散化手法を適用して数値計算が可能な近似方程式を導く。さらに、音波や電磁波に関する現象を統一した数理システムと捉えて研究する。具体的には、音声問題では声帯から声道そして外部音響場までを、電磁波放射では給電方法からアンテナ電流解析と外部放射場の扱いまでを、いずれも波動場をトータルに取り扱う計算アルゴリズムを開発し形状設計問題などへの応用に至るまで考究する。

2. 研究の目的

本研究では、波動伝播現象に対する有効な数値計算法の開発とそれに基づく現象の予測、そして波動場の制御を目指す。まず、関数解析や作用素論などの数理的枠組みの中で問題を定式化し、それに基づき有限要素法や差分法などの離散化手法を適用して数値計算が可能な近似方程式を導く。さらに、音波や電磁波に関する現象を統一した数理システムと捉えて研究する。具体的には、音声問題では声帯から声道そして外部音響場までを、電磁波放射では給電方法からアンテナ電流解析と外部放射場の扱いまでを、いずれも波動場をトータルに取り扱う計算アルゴリズムを開発し形状設計問題などへの応用に至るまで考究する。研究手法としては、散乱理論や変分法などにおける数学解析の枠組みを用いて問題をモデル化し、次いで適切な離散化手法を見だし、さらに声道やアンテナの形状同定や設計問題について最適化理論の結果も援用しつつ総合的に研究していく。特に3次元問題に対する解析・計算手法を確立することを目標とする。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、以下のように4つのテーマを設定して研究に取り組む。

1) 3次元音響場の数値計算法の確立と数値計算プログラムの実装：手法としては、ディリクレ・ノイマン写像の近似を利用した人工境界上での境界条件を課したヘルムホルツ方程式を、3次元有界領域において有限要素法を用いて離散化して問題を数値計算する手法を確立し、計算プログラムを開発し実装までを行う。特に、声道の形状同定・設計問題では、声道形状を如何に数理的・数値的に取り扱うかが重要な研究テーマになる。最近注目されているNURBSと呼ばれる曲面の非一様な有理関数近似を用いる方法の適用も視野に入れつつ、最初はより素朴な曲面の三角形パッチ近似による試験的な計算から研究を始めてゆく。

2) 流体音源の数値計算法の開発と数値実験：音源の研究として流体音の数値シミュレーションを取り上げる。音声の場合などでは、最終的には圧縮性のナビエ・ストークス方程式と声帯の弾性体との連成問題を解く必要があるが、当面は固定領域での非圧縮性流体と「音響アナロジー」と呼ばれている手法を組み合わせる計算を行う。またエアリード楽器の発音におけるジェット的不安定性と音場の共鳴問題にも取り組む。

3) アンテナの数理モデルの検討と数値計算法の開発：マックスウェル方程式の数値解法としては、電磁界数値計算の研究者が標準的に採用しているFDTD法について、その妥当性の検討と3次元数値シミュレーションを行う。無限遠の取り扱いには完全吸収層を用いる方法が計算コストの面から有力である。さらに、アンテナからの放射問題に関しては、問題に含まれる特異性に関して数理的な定式化をより明確にする必要があり、具体的な数値計算法の開発を通して適切なモデル化を絞り込んでいく。アンテナ電流の計算法や給電現象のモデル化に付いても電気回路的な考察を取り入れながら適切なモデル化を探究する。

4) 関連する問題の数値手法の開発と理論誤差解析の展開：以上の3種類の問題に共通する、無限領域における偏微分方程式の数値解法の計算法の一般的な取り扱いに関する研究と、自由境界を含む界面の数値的取り扱いに関する研究を進める。また、関連する理論誤差解析に取り組む。

4. 研究成果

平成21年度の課題として設定した4つの課題に付いてそれぞれに成果を得た。まず、3次元音響場の数値計算法の確立と数値計算プログラムの実装については、研究分担者の小山大介により、音響多重散乱問題に対する応用を念頭においた領域分割並列計算法の開発が進められた。特に、多重Dirichlet to Neumann写像を利用した並列シュワルツ法

を開発し、その収束証明を数理的に行い数値的にも収束性を確認した。ついで、流体音源の数値計算手法の開発と数値実験については、大学院生の水谷俊とエアリードによる音波の生成に関する研究を行い、PCによる使い勝手の良いフロントエンドの作成を含む計算手法の開発と数値実験を通して、ジェットの不安定性や音響アナロジーによる音波の発生を確認し、これらの研究成果を研究集会で発表した。また、アンテナの数理モデルの検討と数値計算手法の開発については、大学院生の大井祥栄と共同研究を進め、完全吸収層(PML)を伴うFDTD法による電磁場の3次元計算プログラムを作成し、高電気伝導度モデルによる完全導体の近似手法を考案し、デルタギャップ給電法によるアンテナからの電磁波の放射現象のシミュレーションに成功した。これらの成果は領域分割法国際会議DD19において発表し講演論文集に採録されることになった。さらに、関連する問題の数値手法の開発については、分担者の今村俊幸により、マルチコアに特化した固有値計算アルゴリズムの研究がおこなわれ、マルチコアを意識した高効率な固有値ソルバーの並列アルゴリズムの開発と実装について検討が進んだ。また、今後の波動問題に対する並列計算を行うための基礎的研究として、マルチコアの一例であるGPGPUを用いた多重極展開の高速計算について研究した。

初年度に引き続き、平成22年度では4つの課題に対して研究を進め、着実に研究成果を得て国内外の研究集会で発表するとともに論文として公表した。まず、3次元音響場の数値計算プログラムの実際問題への適用に関連しては、分担者の小山により、多重散乱問題に対するDtN有限要素法の事前誤差評価式と証明法が精練され、論文投稿を行った。また、散乱問題の誤差解析で重要であり長らく懸案であったハンケル関数の次数が大きい場合の漸近式に証明を与え、さらに高次の漸近展開式まで導出した。研究代表者は大学院生とともに研究を進め、音声生成問題の音源のモデル化に関連して、管楽器の音源であるエッジトーンについての研究を行い、2次元流体モデルをもとに音の生成までの数値計算プログラムを作成した。また、電磁場の伝播問題については、波源としてのアンテナの数理モデルの確立と数値計算手法について考察し、応用として、磁気共鳴イメージング(MRI)装置におけるラジオ周波数(RF)アンテナからの放射電磁波の計算方法について研究し独自の手法を確立した。そこでは、高電気伝導度領域としてアンテナ領域をモデル化して捉えるなどの基本的な数値計算方法の確立と、八木・宇田アンテナやループアンテナなどの典型的なアンテナについての数値計算を行って既存の数値結果とも照合

しつつ妥当性を検証し、研究成果を国際会議の会議録と査読付き論文で公表した。関連する並列計算アルゴリズムの開発としては、分担者の今村により、大規模な固有値解析のための実対称固有値ソルバーがマルチコア分散並列計算機ならびにGPU上で実装された。さらに、最適化アルゴリズムなどを提案・実装し、従来にない高性能な固有値ソルバーの開発に成功した。

最終年度の平成23年度も4つの研究課題に対して研究を進め、研究成果を国内外の研究集会で発表するとともに論文等で公表した。特に、平成24年3月には本科学研究費のサポートの下で国際的なワークショップを開催し、研究成果の発表と集会参加者による評価も参考に研究成果の確認を行った。個別の研究成果としては、代表者加古は、大学院生とともに電磁波放射散乱に関わるアンテナの数理モデルの確立と数値計算手法の応用について研究を進め、放射電磁波の計算方法について高電気伝導度モデルでアンテナ領域を捉えるなどの基本的な計算方法の確立し、それに基づく一連の数値計算を行い、既存の数値結果との照合なども行った上で、研究成果を国際会議の会議録で公表した。また、音声生成問題と地震波伝搬問題に共通する波動伝搬の計算方法を研究し、無限遠を扱うためのPML領域の導入法の有効性を数値的に確認しつつ、これらの問題に付随してあらわれる複素共鳴固有値の重要性について明らかにした。また研究成果は研究集会等で発表し論文としてまとめる作業に入っている。分担者の小山は3次元線形水面波の散乱問題に対するDtN有限要素法の事前誤差評価の導出し論文として投稿した。その導出過程において無限級数で表現されるDtN境界条件の打ち切り誤差を評価するためにHankel関数と変形Bessel関数の新たな性質を証明した。関連する並列計算アルゴリズムの開発として、分担者の今村は大規模な固有値解析のための実対称固有値ソルバーをマルチコア分散並列計算機ならびにGPU上で実装した。また、通信やマルチスレッド最適化アルゴリズムなどを提案・実装し、従来にない高性能な固有値ソルバーの開発に成功した。

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10件)

Toshiyuki Imamura, Susumu Yamada and Masahiko Machida: “Development of a High Performance Eigensolver on the Peta-Scale Next Generation Supercomputer System” Progress in Nuclear Science and Technology,

pp. 643-650 (2011) (査読有)
<http://www.aesj.or.jp/publication/pnst02/data/643-650.pdf>

Daisuke Koyama: "A parallel Schwarz method for multiple scattering problems" DDM in Science and Engineering XIX,, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, pp.351-358 (2011) (査読有)
http://www.ddm.org/DD19/proceedings/num Erik.mi.fu-berlin.de/DDM/DD19/Contributed_Koyama.pdf

Takashi Kako, Yoshiharu Ohi: "Numerical method for antenna radiation problem by FDTD method with PML" DDM in Science and Engineering XIX,, Lecture Notes in Computational Science and Engineering p pp. 359-365 (2011) (査読有)
http://www.ddm.org/DD19/proceedings/num Erik.mi.fu-berlin.de/DDM/DD19/Contributed_Kako.pdf

Daisuke Koyama: "Well-posedness of the Helmholtz problem with the multiple DtN boundary condition" Adv. in Mathematical Sciences and Applications, Vol.20-2, pp. 349-370 (2010) (査読有)
<http://www.ams.org/mathscinet/search/publication.html?pg1=INDI&s1=640529&vfpref=html&r=2&mx-pid=2815745>

Zhi-Guang Xiong, Takashi Kako and Daisuke Koyama: "Superconvergence of a finite element method for the Webster equation" Numer. Math. J. Chinese Univ., Vol. 32-2, pp. 106-117 (2010) (査読有)
<http://www.ams.org/mathscinet/search/publication.html?pg1=IID&s1=659259&vfpref=html&r=2&mx-pid=2722730>

H. P. Pham, Toshiyuki Imamura, Susumu Yamada and Masahiko Machida: "Novel approach in a divide and conquer algorithm for eigenvalue problems of real symmetric band matrices" Proceedings of Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010) [CD-ROM] (2010) (査読有)

Toshiyuki Imamura, Susumu Yamada and Masahiko Machida: "Development of a high performance eigensolver on the peta-scale next generation supercomputer system" Proceedings of Joint International Conference on

Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo 2010 (SNA+MC2010) [CD-ROM] (2010) (査読有)

大井祥栄, 加古孝: "アンテナからの電磁波放射に対する完全適合層を伴う FDTD 法を用いた数値計算とその応用" 日本応用数理学会論文誌, Vol.20-4, pp.241-263 (2010) (査読有)
http://ci.nii.ac.jp/els/110008007210.pdf?id=ART0009597460&type=pdf&lang=jp&host=cinii&order_no=&ppv_type=0&lang_sw=&no=1339650412&cp=

水谷俊, 加古孝: "エッジトーンの 2 次元数値計算の PC による試み" 京都大学数理解析研究所講究録, Vol.1697, pp.72-79 (2010) (査読無)
<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/bitstream/2433/141671/1/1697-07.pdf>

Daisuke Koyama: "Error estimates of the finite element method for the exterior Helmholtz problem with a modified DtN boundary condition" Journal of Computational and Applied Mathematics Vol.232, pp.109-121 (2009) (査読有)
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377042708005505>

[学会発表] (計 11 件)
川村稔也, 加古孝: "PML を用いた有限要素法による地盤構造連成解析" 日本応用数理学会 2012 研究部会連合発表会(20120309), 九州大学 伊都キャンパス (福岡市)

今村俊幸 "京コンピュータに向けた密行列固有値ソルバーの開発について" (招待講演), 2012 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2012) (20120124), 名古屋大学 豊田講堂 シンポジオンホール (名古屋市)

大瀧嵩, 藤山慧太, 今村俊幸, 山田進, 町田昌彦: "Eigen_sg+ASPEN.K2 の性能評価" 2012 年ハイパフォーマンスコンピューティングと計算科学シンポジウム (HPCS2012) (20120124), 名古屋大学 豊田講堂 シンポジオンホール (名古屋市)

Kako, Takashi: "Designing the vocal tract shape of vowels based on resonance poles" (Invited talk), Finnish-Japanese-Korean workshop on inverse problems (20111214), University of Helsinki (Helsinki, Finland)

今村俊幸, 山田進, 町田昌彦: “eigen_sg: マルチコア+GPGPU 環境における固有値ソルバ開発” HPCS2011 (ポスター発表) (20110118), 産業技術総合研究所 (つくば市)

Takashi Kako: “Numerical method for radiation for antennas” The Third China-Japan-Korea Joint Conference on Numerical Mathematics (20100819), Gangneung-Wonju National Univ., (Gangneung, Korea)

大井祥栄, 加古孝: “FDTD 法を用いたアンテナに流れる電流の計算法と給電法” 日本応用数理学会研究部会連合発表会. (20100309), 筑波大学筑波キャンパス (つくば市)

吉田晋三, 今村俊幸: “GPU を利用した 2 次元 FMM の高速化” 日本応用数理学会研究部会連合発表会. (20100309), 筑波大学筑波キャンパス (つくば市)

Toshiyuki Imamura, Susumu Yamada, Masahiko Machida: “Narrow-band reduction approach of a DRSM eigensolver on a multicore-based cluster system” International Conference on Parallel Computing ParCo 2009. (20090903), Ecole Normale Supérieure de Lyon (Lyon, France)

加古孝, 水谷俊: “エッジトーンの 2 次元数値計算の PC による試み” 京大数理解析研究所共同研究計画・RIMS 研究集会「オイラー方程式の数理: 渦運動と音波 150 年」. (20090722), 京都大学人間環境学研究所 (京都市)

今村俊幸: “マルチコア環境における固有値ソルバ” 日本計算工学会講演会. (20090512) 東京大学生産技術研究所 (東京都)

[図書] (計 1 件)

田端正久, 萩原一郎(監訳), 第 3 章訳: 小山大介: “計算力学理論ハンドブック” 朝倉書店. 736 (2010)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加古 孝 (KAKO TAKASHI)
電気通信大学・情報理工学研究科・教授
研究者番号: 30012488

(2) 研究分担者

今村 俊幸 (IMAMURA TOSHIYUKI)
電気通信大学・情報理工学研究科・准教授
研究者番号: 60361838

(3) 研究分担者

小山 大介 (KOYAMA DAISUKE)
電気通信大学・情報理工学研究科・助教
研究者番号: 60251708