

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2006～2008

課題番号：18540114

研究課題名（和文）無限領域における波動現象の数値解法と形状設計問題への応用

研究課題名（英文）Numerical methods for wave propagation phenomena in unbounded region and its applications to shape design 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：

無限領域における波動現象で現れる周波数応答問題や共鳴現象に対して、有限要素法や FDTD 法による数値計算手法の開発と関連する研究を行った。その中で、外部ディリクレ・ノイマン写像の離散化手法の開発とその応用について数値実験を含む検証を行って成果を得た。応用として、音声生成では声道設計問題に対してアルゴリズムを考案して数値実験により有効性を確認した。また騒音低減問題などに関係した構造音場連成問題の数値解法の応用研究を展開した。DtN(Dirichlet-to-Neumann)境界条件を課した問題にたいする有限要素法については、3次元水面波動問題へも適用し数値解法の事前誤差評価を導出すると共にヘルムホルツ問題については修正 DtN 境界条件や多重 DtN 境界条件を課した場合についても事前誤差評価を導出した。さらに、アンテナからの電磁波の放射問題とその応用に関して PML 技法を用いた無限領域における電磁場の非定常現象の数値解法の開発に取り組み3次元計算コードの基本的な部分を完成させ、幾つかの応用についても成果を得た。また、偏微分方程式の数値解法である基本解法（代用電荷法）についても、従来同法の適用が難しいとされた周期的構造を持つストークス流問題や弾性問題への拡張をおこない、さらに境界要素法、およびその複素関数論的拡張である複素変数境界要素法について従来適用困難とされた空間周期的2次元ポテンシャル問題への拡張を行った。関連する問題としては、量子多体系で現れる行列の対角化問題においてLOBPCGの効率的な並列実装を行い世界記録となる1600億次元の計算に成功した。さらに、来るべきペタスケール計算機時代に備えた大規模固有値計算について、段階的な収束をブロックレベルでコントロールする手法を提案するとともに、密行列の対称行列についてマルチコア向けのブロック化手法により帯行列化の系統のアルゴリズムの研究で成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,700,000	0	1,700,000
2007年度	700,000	210,000	910,000
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	480,000	3,780,000

研究分野：

科研費の分科・細目：数学・数学一般

キーワード：波動伝播現象，音声生成，形状設計，アンテナ，FDTD法，PML，大規模固有値計算，有限要素法，基本解法

1. 研究開始当初の背景

偏微分方程式の解を数値的に求めることは、2次元有界領域における標準的な楕円型の問題であれば手近にあるPCで手軽に実行できるようになってきている。しかし、振動波動問題に対しては、問題を無限領域で考える事が多く、有限領域での問題に帰着させるために様々な工夫を必要とする。現在まで、定常振動音響場の場合は、支配方程式であるヘルムホルツ方程式に対してディリクレ・ノイマン型の境界条件を人工境界上で課すことで問題を有限領域に帰着させ、有限要素法などの離散化手法で数値解を得る手法が確立され、理論誤差解析も進展している。また、ヘルムホルツ方程式の基本解の重ね合わせで近似解を求める方法も試みられているが、収束証明や誤差解析などの数値解析的な裏付けに関しては解決すべき課題が多く残されている。一方、過渡現象などの非定常問題については、まだ標準的な手法が確立されているとは言い難い状況であり、音声問題での二つの連続した母音を発生する際に生じる調音結合などについて解析することは興味深い研究課題である。

2. 研究の目的

無限領域での波動現象における周波数応答や共鳴現象に焦点を当てて有効な数値計算手法の確立を目指す。具体的には、主として外部無限領域が柱状や球状の場合に、適切な外部領域の取り扱いについて系統的に研究する。特に、3次元問題において球面上の微分作用素や擬微分作用素の適切な離散化を探究し、無限領域の扱いにおいて重要な外部ディリクレ・ノイマン写像の離散化手法の開発と数値実験による検証を行う。また、吸収層の導入による無限領域における非定常現象の数値解法の可能性について研究する。これらの数値解法の応用として、音声生成問題や騒音低減問題などで重要な役割を果たす周波数応答や過渡応答の適切な計算法を開発し、さらに散乱体や放射体の形状設計問題に対する研究を展開する。特に、形状変形に伴う変分公式を利用した最適形状探索問題の数値計算手法を確立する。

3. 研究の方法

I. 研究の基本姿勢と主眼：

本研究では、研究代表者の無限領域における有効な数値計算法の開発とその応用としての音声生成問題に関する研究を核として、各分担者およびその研究協力者と海外研究協力者が各自の研究を進めつつ研究代表者と

適宜共同研究を組織するという研究スタイルを取った。その中で、この分野における新たな研究テーマの提唱と、いくつかの具体的な応用テーマに対しての数値計算手法の発見と計算プログラムの開発を大学院生の力も結集しつつ実行した。

II. 研究組織：

本研究の研究グループを以下のようにテーマごとに組織した：

1. 振動波動現象の数値解法の基礎研究
2. 音声生成数値手法の開発
3. その他の無限領域問題の応用研究
4. 並列計算とアルゴリズム開発

III. 研究交流・情報交換の推進：

毎年、2回ほど東京地区で分担者全員を含む当該分野の研究者が集まる研究集会を開催し、研究成果の確認と情報交換、今後の研究方向の検討を行った。さらに、日本応用数理学会年会や、研究代表者が代表を務める研究部会「科学技術計算と数値解析」の研究発表会、応用数学合同研究集会などの機会を捉えて研究発表や研究連絡を行った。

IV. 国際的研究活動：

諸外国における本研究分野の研究動向を的確に把握することに務め、対応して国内の研究の活性化を意識的に追究した。具体的には、研究代表者が、上記の国際会議に参加する機会を捉えて、スイス、フランス、英国、中国、韓国などにおける振動波動や流体問題の計算手法の開発が活発に行われている研究機関を訪れ、レビューを受けるなどして情報収集を行う。また、領域分割法国際会議、応用数理関係の国際会議などへ参加し、研究発表や研究交流を実施した。

V. 研究グループごとの個別課題の研究：

1) 振動波動現象の数値解法の基礎研究グループ：波動現象に対する数値計算手法の開発を集中的に押し進めた。特に、無限領域におけるヘルムホルツ方程式の定常振動や振動問題の解法をもとに、過渡現象の数値解法の確立を図った。さらに、無限領域問題に対するいくつかの数値手法同士の比較を行い、与えられた問題設定に対して最良の数値解法の発見を目指した。また、過渡現象において標準的な手法として用いられている有限差分時間領域(FDTD)法とそこにおいて無限領域を扱う手法として注目を集めている“完全吸収層(PML)”の妥当性の検討を系統的に実施した。

2) 音声生成数値手法の開発グループ：声道の形状に関する妥当な既存のモデルを調査し、MRIなどのデータの入手を図り、それに基づく独自のモデル構成を追求した。さらに、声道形状の表現法を確立し、それに基づく単母音の周波数応答曲線の数値計算を系統的に実施した。それらのデータを基に周波数応答曲線の特徴づける複素固有値に関する変分公式を利用しつつ、実際の人間の母音を再現する声道の設計問題に取り組み、結果の評価を音声認識の研究成果を用いて行った。また、母音同士の調音結合や“渡り”現象を解明するために、音声問題における無限領域における時間発展問題の数値解法を、FDTD法などを有力な候補として検討した。ヘルムホルツ方程式の基本解を用いた近似解法の有効性を検討した。

3) その他の無限領域問題の応用研究グループ：流体音発生の数値モデルのサーベイから始めて数値手法を系統的に調査研究した。また渦音による音源シミュレーションに取り組んだ。流体のストークス問題に関して基本解法による無限領域問題の解法について研究をおこなった。

4) 並列計算とアルゴリズム開発グループ：領域分割を用いた大規模計算手法に力点を置きつつ、ポアソン方程式やヘルムホルツ方程式の3次元問題の計算手法を開発する。その中で、並列計算の有効性についてPCクラスタシステムを使って実証することを目指した。さらに、前処理つき反復法の有効性の数値的検証と理論解析を行った。

4. 研究成果

平成18年度：

無限領域での波動現象における周波数応答や共鳴現象に焦点を当てて有効な数値計算手法の確立を目指して研究を行うと共に、関連する流体現象に対する数値計算手法の開発、および並列計算手法の開発を行い、それらの研究成果を学術雑誌や口頭発表で発表した。具体的には、研究代表者の加古は、音声生成問題において周波数応答関数の複素固有値の変分公式を利用した設計問題に対するこれまでの研究成果をまとめると共に、新たに韓国語の母音への適用例も含めて具体的な計算手法の開発を行った。また、完全吸収層を用いたFDTD法による過渡現象に対する数値計算手法の開発に取り組み研究成果を国際会議で発表した。さらに、関連する流体現象の数値計算手法の開発や構造音場連成問題の研究にも取り組み一定の成果を挙げた。研究分担者の小山は、長年の研究成果を学位論文「波動問題に対するDirichlet-to-Neumann有限要素法」としてまとめると共に、外部ヘルムホルツ問題に対する修正DtN境界条件を用いた有限要素法の誤差評価と、

無限領域における水面波動問題に対するDtN境界条件の打ち切りに関する誤差評価を導出に成功した。分担者の緒方は、波動現象と密接に関連する、周期的ストークス粘性流問題や周期的弾性問題に対して、従来の基本解を用いる数値解法の拡張を行うと共に、周期的ポテンシャル問題に対しては境界要素法の拡張を行なった。分担者の水藤は、振動波動場の制御方法を構築するため、最適制御アルゴリズムの研究を行い、遺伝的アルゴリズムの高性能化と古典的な勾配法系統の手法とのハイブリッドアルゴリズムによる高精度化を行った。分担者の今村は、並列計算手法の研究に取り組み、量子多体系における行列対角化問題においてKnayzevの提案するLOBPCGの効率的な並列実装を行い、世界記録となる1600億次元の計算に成功した。これらの研究成果は、個別に成果発表を行うとともに、3月の年度末には研究協力者の参加も得て、合同の研究成果発表の機会を持ち研究交流と情報交換を行った。

平成19年度

初年度に引き続き、無限領域での波動現象における有効な数値計算手法の確立を目指して研究を行った。特に本年度は、研究の一環として平成19年の秋に電気通信大学で国際研究集会IWAMCS2007を開催し、海外研究協力者との国際交流の場を実現し国際研究交流の拡大に努めた。その成果はその後の研究交流の活発化につながってきている。個別の研究成果として、研究代表者の加古は、共鳴極に着目した声道設計問題に対する研究成果を幾つかの国際および国内の研究集会で招待講演として発表し、研究集会参加者と音声問題や最適化問題、波動現象の数値計算法について情報交換と研究討議を行い今後の研究を発展させるための基礎固めを行った。これらの声道設計の研究成果に関連して日本応用数学会の論文賞を受賞した。また、過渡応答問題への研究の展開を目指してFDTD法の基礎的な理論研究と、電磁場問題における送受信アンテナのモデル化とMRIへの応用に関する研究を進め、成果の一部を大学院生との共著で発表した。分担者の小山は有限水深における水の表面波の放射散乱問題に対して、Dirichlet-to-Neumann写像を用いた3次元有限要素法の事前誤差評価の導出に成功した。分担者の緒方は、波動問題への拡張を視野に入れつつ、1次元周期的に配列された無限個の障害物をすぎる2次元Stokes流に対する基本解法や、無限個の伝導体をもつ静電場の問題に対する周期的基本解に基づく境界要素法を開発した。分担者の今村は、大規模固有値計算アルゴリズムのLOBPCGについて、計算コストを軽減する要素技術について研究し、量子多体系のジョセフソン接合

体における共鳴減少の解明に応用した。分担者の水藤は、振動・波動場の制御に必要なアルゴリズムについて研究を進め、遺伝的アルゴリズムと勾配法を組み合わせて大域的かつ高精度な最適化アルゴリズムの構築を行った。

平成 20 年度：

研究代表者の加古は、大学院生らとともに音声生成の 3 次元計算に取り組むとともに、音源のシミュレーションのモデルについて基礎的な研究を行い、渦音の 2 次元的な計算手法を開発し研究会で発表した。また、FDTD 法による電磁場のシミュレーションに関してもアンテナの数理モデルや給電のモデル化を考察し、得られた結果を研究集会で発表するとともに現在論文にまとめる作業を行っている。さらに、音声生成に関する従来の結果をいくつかの研究集会で発表した。分担者の小山は、水面波動散乱問題と Helmholtz 多重散乱問題に対する数値解法である DtN (Dirichlet-to-Neumann) 有限要素法、および多重散乱問題に対する「多重」DtN 有限要素法の事前誤差評価を導出した。分担者の緒方は、ポテンシャル問題の数値解法として近年開発された複素変数境界要素法 (complex variable boundary element method, CVBEM) を周期的ポテンシャル問題に拡張し、数値実験によりその方法の有効性を確認した。分担者の今村は、来るべきペタスケール計算機時代に備えた大規模固有値計算アルゴリズムの研究として、疎行列向けのソルバとして LOBPCG アルゴリズムについて段階的な収束をブロックレベルでコントロールする手法を提案すると共に、密行列の対称行列についてはマルチコア向けのブロック化手法により帯行列化の系統のアルゴリズムの研究を実施し、東大 T2K スパコンによりペタコンにつながる実行結果を得た。

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 18 件)

- ① L. Deng, C. C. Douglas, G. Haase, T. Kako and I. Hagiwara, Application for a novel perturbation expansion method, Journal of Algorithms & Computational Technology, Vol. 3, 1-22 (2009) 査読有
- ② H. Ogata, Fundamental solution method for periodic plane elasticity, J. Numer. Indust. Appl. Math. (JNAIAM), Vol. 3, 249-267 (2008) 査読有
- ③ H. Ogata, Complex variable boundary element method for two-dimensional potential problems with one-dimensional

periodicity, Numerical Analysis and Applied Mathematics, Proceedings of International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics, Vol.1048, 411-414 (2008) 査読有

④ M. Machida, T. Kano, S. Yamada, M. Okumura, T. Imamura, and T. Koyama, Quantum Synchronization Effects in Intrinsic Josephson Junctions, Physica C, Vol. 468, 689-694 (2008) 査読有

⑤ D. Koyama, Error estimates of the finite element method for the exterior Helmholtz problem with a modified DtN boundary condition, J. of Computational and Applied Mathematics, (2008) in press

⑥ K. Kaneoya, T. Ueda, H. Suito, Y. Nanazawa, J. Tamaru, K. Isobe, Y. Naya, T. Tobe, K. Motoori, S. Yamamoto, R. Shimofusa, G. D. Rubin, M. Minami and H. Ito, Functional CT imaging of tumor-induced angiogenesis: Preliminary result of the new tracer kinetic modeling using a computer discretization approach, Radiation Medicine, Vol.26, 213-221, (2008) 査読有

⑦ T. Kako and Y. Ohi, Numerical method for wave propagation problem by FDTD method with PML, Lecture Notes in Computational Science and Engineering, Vol.60, .551-558 (2007) 査読有

⑧ 緒方秀教, 1 次元周期的 2 次元 Stokes 流に対する基本解法, 京都大学数理解析研究所講究録, Vol.1566, 119-131 (2007) 査読無

⑨ S. Yamada, T. Imamura, T. Kano, Y. Ohashi, H. Matsumoto and M. Machida, Ultra Large-scale Exact-diagonalization for Confined Fermion-Hubbard Model on the Earth Simulator: Exploration of Superfluidity in Confined Strongly Correlated Systems, Journal of the Earth Simulator, Vol.7, 23-35 (2007) 査読有

⑩ D. Koyama, Error estimates of the DtN finite element method for the exterior Helmholtz problem, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol.20, 21-31 (2007) 査読有

⑪ 東田憲太郎, 加古孝, 複素固有値に対する変分公式と母音の数値シミュレーション, 日本応用数学会論文誌, Vol.16, 237-253 (2006) 査読有

⑫ T. Kako and K. Touda, Numerical method for voice generation problem based on finite element method, J. of Computational Acoustics, Vol.14, 45-56 (2006) 査読有

⑬ T. Kako and K. Touda, Domain decomposition method for radiation and scattering problems with its applications,

GAKUTO International Ser. Math. Sci. Appl., Vol. 25, 182-214 (2006) 査読無

⑭ D. Li, C.C. Douglas, T. Kako, M. Suzuki and H. Hagiwara, A novel perturbation expansion method for coupled system of acoustics and structures, Comput. Math. Appl., Vol. 51, 1689-1704 (2006) 査読有

⑮ H. Ogata and K. Amano, A fundamental solution method for three-dimensional viscous flow problems with obstacles in a periodic array, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 193, 302-318 (2006) 査読有

⑯ H. Ogata, A fundamental solution method for three-dimensional Stokes flow problems with obstacles in a planar periodic array, Journal of Computational and Applied Mathematics, Vol. 189, 622-634 (2006) 査読有

⑰ 山田進, 今村俊幸, 町田昌彦, 量子大規模固有値問題における共役勾配法の収束性: 適応的シフト前処理の収束性の評価, 日本計算工学会論文集, Vol. 4, 論文番号 20060027 (2006) 査読有

⑱ 七澤洋平, 水藤寛, 植田琢也, 南学, 腎臓組織における造影剤の濃度による浸透係数の推定問題に対する数的手法, 応用数理学会論文誌, Vol. 18, 435-452 (2006) 査読有

[学会発表] (計 16 件)

① 水谷俊, 加古孝, PC を用いたエッジトーンの数値シミュレーション, 日本応用数理学会研究部会連合発表会 OS「科学技術計算と数値解析」, 2009 年 3 月 8 日, 京都大学, 京都

② 大井祥栄, 加古孝, PML を伴う FDTD 法を用いた MRI 用アンテナの数値シミュレーション, 日本応用数理学会研究部会連合発表会 OS「科学技術計算と数値解析」, 2009 年 3 月 8 日, 京都大学, 京都

③ T. Imamura, An approach of full diagonalization via reduction of a band matrix; Performance and scalability on a multicore and multiprocessor environment, SIAM CSE09, March 5, 2009, Florida, USA

④ 大井祥栄, 加古孝, PML を伴う FDTD 法を用いた MRI 用アンテナの数値シミュレーション日本応用数理学会年会 OS「科学技術計算と数値解析」, 2008 年 9 月 19 日, 東京大学, 柏

⑤ 今村俊幸, 山田進, 町田昌彦, マルチコア時代の固有値計算アルゴリズムを考える, 日本応用数理学会年会 OS「科学技術計算と数値解析」, 日本応用数理学会年会 OS「科学技術計算と数値解析」, 2008 年 9 月 19 日, 東京大学, 柏

⑥ T. Kako, Numerical simulation of voice generation and vocal tract shape design problem via resonance poles, DCABES

(Distributed Computing and Algorithms for Business, Engineering, and Sciences) 2008, 2008 年 7 月 28 日, 大連, 中国

⑦ T. Kako, Vocal tract shape design problem based on resolvent poles for the Helmholtz equation, 5th European Congress on Computational Method in Applied Science and Engineering (ECCOMAS 2008), 2008 年 7 月 1 日, Venice-Lido, Italy

⑧ T. Kako, Numerical method for Maxwell equation by FDTD method with PML applied to MRI problem, Scientific Computing and Applications (SCA) 2008, 2008 年 6 月 3 日, 釜山国立大学, 釜山, 韓国

⑨ 大井祥栄, 加古孝, PML を伴う 3 次元 FDTD 法による電磁場数値計算, 2008 年度日本応用数理学会研究部会連合発表会, 2008 年 3 月 8 日, 首都大学東京, 東京

⑩ 加古孝, 東田憲太郎, 共鳴極を利用した声道形状設計, 日本応用数理学会数理設計研究部会第 9 回研究集会, 2008 年 2 月 9 日, 茨城大学インフォメーションセンター, 水戸

⑪ T. Kako, Finite element method and spectral analysis for wave propagation phenomena, International workshop on Applied Mathematics and Computational Sciences (IWAMCS2007), September 26, 2007, Chofu, Japan

⑫ T. Imamura, High-Performance Quantum Simulation: A Challenge to Schrodinger Equation on 256^4 Grids, International workshop on Applied Mathematics and Computational Sciences (IWAMCS2007), September 25, 2007, Chofu, Japan

⑬ T. Kako, Numerical Method for Shape Design Problem Related to Voice Generation Phenomena, Conference in Honour of Jacques Rappaz on the Occasion of his 60th Birthday, September 7, 2007, EPF-Lausanne, Suisse

⑭ 今村俊幸, 山田進, 町田昌彦, 疎行列固有値ソルバーの自動チューニング LOBPCG の量子多体問題への応用を中心に, 情報処理学会第 111 回 HPC 研究会, 2007 年 8 月 2 日, 旭川市旭川国際会議場

⑮ H. Suito, Y. Nanazawa, Y. Horikawa, T. Tsukazaki, T. Moroizumi and Y. Ono, Evaluation of Hybrid Algorithms Using Real-coded Genetic Algorithms and Gradient Methods, EUROGEN 2007, June 12, 2007, Jyvaskyla, Finland

⑯ H. Suito, S. Mohri and Y. Ono, An Integrated System for Human Risk Assessment related to Discharged as from Incinerators, SETAC Europe 17th Annual Meeting, May 20, 2007, Porto, Portugal

〔図書〕（計2件）

- ① 加古孝, 数値計算, コロナ社, 178 ページ (2009)
- ② F. Magoules and T. Kako Edited, Domain decomposition methods: theory and applications, Gakkotosho Co., Ltd., 271 (2006)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

緒方 秀教 (OGATA HIDENORI)
電気通信大学・電気通信学部・准教授
研究者番号：50242037

今村 俊幸 (IMAMURA TOSHIYUKI)
電気通信大学・電気通信学部・准教授
研究者番号：60361838

小山 大介 (KOYAMA DAISUKE)
電気通信大学・電気通信学部・助教
研究者番号：60251708

水藤 寛 (SUITOU HIROSHI)
岡山大学・廃棄物マネジメントセンター・
准教授
研究者番号：10302530
(平成18, 19年度)

(3) 連携研究者

水藤 寛 (SUITOU HIROSHI)
岡山大学・廃棄物マネジメントセンター・
准教授
研究者番号：10302530
(平成20年度)