

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H01821

研究課題名（和文）多重散乱情報をもちいる次世代イメージング手法の数理解析

研究課題名（英文）Mathematical and Numerical Analysis of Next-generation Imaging from Multiple Scattering Signals

研究代表者

藤原 宏志 (Fujiwara, Hiroshi)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：00362583

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,600,000円

研究成果の概要（和文）：現在広く利用されるエックス線断層撮影法（トモグラフィ）は、信号（エックス線）の直進性が本質である。一方、ガンマ線や近赤外光などによる医用イメージングは信号が散乱されることが特徴である。これらの信号の生体内の伝播状況の解析ため、超大規模数値シミュレーションの実現および数値解の収束性の証明、ならびにイメージングについてのアルゴリズムの提案と数値実験の成功例を示した。また現在のエックス線トモグラフィに対しても、局所観測によるイメージング手法の数学的アルゴリズムを提案し、公開されている実測データによってその有効性を確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

医用イメージングでの散乱信号の伝播は、輻射輸送方程式とよばれる数理モデルで表される。これは微分積分方程式であり、本研究では数値的取り扱い手法、得に数値シミュレーション結果の正しさを保証する方法と高速計算手法を確立した。また局所観測からのエックス線トモグラフィでは、約100年の間、研究開発の中心であった従来の積分方程式から、微分方程式へと数理モデルを転換して数値的手法を確立したことが大きな点である。

研究成果の概要（英文）：One of the imaging modalities considered in this research project is diffuse optical tomography using near-infrared light for monitoring brain activity. We achieved a fast and reliable numerical method for light propagation in tissue with multiple scattering. In the numerical simulation, problems with approximately one billion degrees of freedom were processed, and the convergence of numerical solution with suitable norm was proved. We also proposed an imaging algorithm from near-infrared light, and showed its numerical realization. X-ray computerized tomography (CT) is also known as a practical imaging modalities, and mathematical algorithm of X-ray CT from local measurement was established. The algorithm is estimated with experimental measurement data, and its effectiveness was shown.

研究分野：応用数学

キーワード：逆問題 数値解析 断層撮影法 多重散乱 輻射輸送方程式 トモグラフィ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

生体の情報を非侵襲にとらえる手法として断層撮影法(トモグラフィ)がある。種々のトモグラフィ法のうち、生体の解剖学的情報を取得する手法として代表的なエックス線トモグラフィは、既に実用化・高精度化が進み、医用のみならず産業でも広く利用されている。この解剖学的情報に加えて、タンパク質の凝集など生化学的情報、あるいは酸素消費などの活動情報を取得することで、疾患の早期発見や脳科学への寄与が期待されている。

これら生化学情報のトモグラフィ例として、陽電子断層撮影(ポジトロン断層撮影法;PET)、また活動情報のトモグラフィ例として、近赤外光をもちいる拡散光トモグラフィがあり、研究・開発が進められている。これらの手法に共通する特徴のひとつとして、利用する信号が生体内で強い散乱を受けることが挙げられる。この散乱を表す数理モデルとして輻射輸送方程式が知られているが、この輻射輸送方程式の数学的な性質は十分に解析されていないため、この方程式の数理的性質に基づくトモグラフィの技術開発は十分に進展しておらず、別の数理モデルがもちいられる。上述のPETでは、散乱を無視して直進性を本質とするエックス線トモグラフィのアルゴリズムが利用されることが多く、アーティファクトの大きな要因となることが指摘されている。また拡散光トモグラフィでは、輻射輸送方程式の扱いの困難さから、拡散近似で得られる方程式がもちいられるが、入力・観測にもちいる光ファイバのもつ指向性を数理モデルに反映させられない。いずれの場合も、信号の散乱という本質を十分扱えておらず、この研究方針の延長上には高精度化・高信頼性は望めず、信号の散乱を考慮する新たなトモグラフィのために輻射輸送方程式の数理的研究が囑望されていた。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、散乱信号をもちいるトモグラフィを念頭におき、媒質中で多重散乱する信号の伝播の数理モデルである輻射輸送方程式の数理的性質を明らかにする。またイメージングでもちいる数学的再構成手法および信頼性の高い数値的取り扱い手法を提案する。また、すでに実現されているエックス線トモグラフィについても新たな知見が得られないか検討し、これらを総合して、次世代トモグラフィ・次世代医用イメージングの数理的研究に取り組む。

### 3. 研究の方法

輻射輸送方程式は、信号を粒子の移動というメソスコピックな立場で記述するものである。本研究課題では生体の大きさに比してガンマ線や近赤外光が十分高速であることを考え、輻射輸送方程式の境界値問題を考える。この定常輻射輸送方程式は微分積分方程式であり、境界値をあたえたうえでの解の存在や一意性、安定性など適切(well-posed)となる枠組みの議論も十分ではない。また、トモグラフィへの応用では、数値的手法による解析、すなわち数値解を通じた考察も有用であるが、標準的な手法は確立されていない。この理由のひとつは信号強度が空間(3次元)と信号の速度方向(2次元)に依存し、離散問題は本質的に5次元の超大規模問題となることにあると考えられる。そのため、スーパーコンピュータによる大規模計算のみならず、効率的な負荷分散による高速計算手法も必要となる。

これら順問題に相当する境界値問題に続けて、トモグラフィの数理モデルとして逆問題を考察する。逆問題としては様々な設定が考えられるが、PETは輻射輸送方程式の非斉次項同定問題となり、拡散光トモグラフィは係数のうち吸収係数同定問題となる。散乱信号をとらえる手法はいくつか考えられるが、A.L.Bukhgeimによって提案されたA-analytic理論[1]をもちいる。これは代表者が先行研究でも数値的基盤を確立しているものであり、本研究でも有効と考えて利用する。

このA-analytic理論は元来、エックス線トモグラフィに対して理論が構築されている。そこでの数理モデルは古典的なRadon変換ではなく輸送方程式であり、上述の輻射輸送方程式と違って散乱積分を含まない微分方程式である。そのため、輻射輸送方程式について得られた知見があれば、輸送方程式にも適用できる可能性がある。そのため、これら類似の数理モデルを介してエックス線トモグラフィへの適用可能性を検討し、その新手法にも挑む。

参考文献 [1] A.L.Bukhgeim, "Supplement: Inversion formulas in inverse problems", in *Linear Operators and Ill-Posed Problems* (1995), pp.323-376.

### 4. 研究成果

(1) 輻射輸送方程式の境界値問題に対し、不連続性を捉えうる数値スキームの確立  
輻射輸送方程式の境界値問題では、不連続な境界値を設定すると、その不連続性に起因して解に

も不連続性が生じることが、分担者の先行研究により示されている。これは輻射輸送方程式の解の構造として重要な性質である。微分方程式の離散化および数値計算で基本的な差分法ではスキームの構成は容易であるが、その理論的基礎は Taylor 展開であり、捉えうる解は古典的な意味で滑らかな関数に限られるため、この差分法では解の不連続性を高精度に扱うことは困難である。また本研究課題のひとつである拡散光トモグラフィの数値シミュレーションにおいて、光ファイバによる局所的な入射、入射付近での光強度の指数的な減衰、さらに入射点から充分離れると光強度がほとんど変化しないなどの特徴も現象論的に重要であり、数値計算で活用することで計算の効率化も図られる。これらを実現するには差分法のような一様なメッシュではなく、非等間隔のメッシュ (graded mesh) の利用が望ましい。

これらの性質を考慮して、本研究では輻射輸送方程式に対する不連続 Galerkin 法による離散化スキームを導出し、その求解において Gauss-Seidel 法が有効であることを示した。まず、関数の近似のため、形状関数に区分定数要素をもちいる。これにより、差分法や一般的な区分線型 ( $P_1$ ) 要素をもちいる有限要素法と異なり、未知関数である粒子密度の不連続性を効率よくとらえることが可能となる。また領域分割には三角形や四面体などの単体分割をもちいる必要はなく、多角形が混在したり、ひとつの辺の途中に節点が存在するような非適合メッシュも利用可能である。このため、入射点近傍では精細なメッシュを、そこから離れば疎なメッシュを利用することも可能であり、物理的な特性を反映しやすいとともに、そのようなメッシュの生成が極めて容易となるという利点がある。さらに数値実験においては、不連続性を反映する自然なノルムのもとで、誤差がメッシュの大きさの  $1/2$  乗のオーダーで減衰するという極めて妥当な誤差評価を示した。また、微分作用素と積分作用素の局所性・大域性に起因して、演算コストやメモリアクセスのアンバランスが生じ、高速計算の妨げとなる。これに対して BLAS の利用などにより効率的な計算アルゴリズムを提案した。

### (2) 有限要素法ソフトウェア FreeFEM の出力機能の改善

前述のスキームの数値計算において利用するメッシュ生成のため、2次元では FreeFEM というソフトウェアを利用した。これは O. Pironneau 氏が開発を開始し、現在は F. Hecht 氏を中心に開発が進められている有限要素解析のためのソフトウェアである。有限要素法の数値計算では、領域のメッシュ生成、弱形式の定義と離散化、その過程での数値積分、連立方程式の求解、結果の可視化など種々のアルゴリズムを要するが、FreeFEM はこれらをまとめて記述できる統合開発環境である。このうち、2次元の計算結果の数値解のグラフをファイルに出力する際のファイル形式として、開発開始当初から PostScript 形式がもちいられる。この PostScript 形式は多くのオペレーティングシステムで対応しておらず、表示や印刷に際しては FreeFEM に加えて別途のソフトウェアが必要となる。しかし、そのようなソフトウェアは減少の一途をたどり、現在は非標準的と言わざるを得ず、これは FreeFEM を利用する上での問題点であった。そこでこの2次元の計算結果のグラフのファイル保存に際して、現在標準的 (de facto standard) な PDF (portable document format) 形式および SVG (scalable vector graphics) 形式のファイルに出力する機能を開発した。さらに、メッシュについて頂点・辺・要素番号、および境界条件を課す際にもちいるラベルなども出力し、プログラム開発を補助する機能を実現した。また、区分2次 ( $P_2$ ) 要素で得られる計算結果も線分で近似されるなど、実際の数値解の形状を反映しない出力が得られる場合もあった。これに対して滑らかなベジェ曲線で表示することにより解決する機能も搭載した。本研究課題で開発したこのソフトウェアは FreeFEM の標準機能として取り込まれ、現在、同ソフトウェアに同梱されて配布・利用されている。

### (3) 減衰係数同定問題に対する数学解析と数値的再構成

輻射輸送方程式には吸収係数、散乱核が現れる。このうち散乱核の積分量は散乱係数と呼ばれ、吸収係数と散乱係数の和は減衰係数と呼ばれる。これは粒子が伝播する過程において媒質によって吸収と散乱による強度の減弱を表す。輻射輸送方程式の境界値は、領域への粒子の流入と、領域からの粒子の流出に対応するものがあるが、逆問題では流入境界条件を与え、出力境界条件を観測して系の性質を決定する問題となる。分担者のひとりによって、不連続な流入境界条件を与えることで解に不連続性が生じ、これが出力境界条件にも現れることが示されている。さらに、この出力における不連続性は減衰係数の Radon 変換になるため、逆 Radon 変換によって減衰係数が同定される。このとき、先行研究では内部の減衰係数の不連続性が領域の generalized convexity 条件を満たす領域分割と関係するもとの解析が行われていたが、この条件を緩和し、より一般的な領域でも出力境界条件の不連続性が減衰係数の Radon 変換となることを示した。これにより、従来のエックス線トモグラフィのアルゴリズムにより減衰係数の再構成が従う。さらに本研究課題ではこのアルゴリズムの数値的実現可能性を検証した。ここでは前述の不連続性を扱う数値計算スキームによって観測に相当する量を効率的に生成し、領域内の減衰係数を定量的に再構成することに成功した。しかも再構成過程においては散乱核の情報を一切もちいていないため、散乱核と吸収係数のいずれもが未知の場合であっても、減衰係数を再構成できるという特徴がある。2次元においては境界上の任意の2点の組に対して不連続な境界条件を設定し、出力を計測する必要があり、多数の計測を要することになる。一方3次元の場合では、トモグラフィを取得したい断面を一つ決めると、その断面に沿って不連続な境界条件をひとつ設定し、観測を一度おこなうことで、その断面のトモグラフィを取得できることがわかった。

この数値的再構成の成功は、拡散光トモグラフィによって減衰係数の再構成が可能であることを示唆している。この結果は国内の応用数理学会、逆問題に関する国際ワークショップ、応用数理に関する最大規模の国際学会などで順次発表した。

#### (4) 非斉次項同定問題に対する局所観測からの部分再構成の数学解析と数値的再構成

従来のエックス線トモグラフィに対する要求のひとつとして、患部の経過観察のために繰り返しエックス線を照射する場合や小児を対象とする場合には、患部にのみ局所的にエックス線を照射するなどして被ばく量を低減したいという要求があった。このエックス線の数理モデルは、1917年に提唱されたRadon変換である。これはエックス線の直進性をもとに構成された積分変換であるため、信号の直進性および観測が大域的であることが前提となる。したがって前述のような局所的な照射・観測からの部分的なイメージングは原理的にできないとされていた。これに対して、海外の研究者とともに、輻射輸送方程式の場合を対象として、境界の一部分(弧)上を通る出射信号のみを観測する場合の断層画像の取得法を考察した。A-analytic理論は断層画像を撮影する平面を複素平面と同一視して記述するが、本研究課題では特に、弧を結ぶ線分が複素平面の実軸に含まれ、観測する弧が上半平面側に含まれるように座標軸を設定することが最大のアイデアである。この設定下では、断層画像の取得法は楕円型初期値問題を解くことに相当することがわかった。しかしこれは典型的な非適切問題(ill-posed problem)として知られている。特にHadamardの反例によってその不安定性がseverely ill-posedであることも指摘されており、再構成が非常に不安定な問題として定式化される、すなわち数値計算の過程で離散化誤差、観測誤差、さらに計算機上での実数とその演算の近似による丸め誤差が急激に増大して数値的再構成は破綻することが当初予想された。本研究課題では、この困難点を次のアルゴリズムで解決した。まずA-analytic理論の最大の特徴である一般化されたCauchyの積分公式は、正則関数に対するCauchyの積分と同様、境界積分によって内点の値を与えるものであるが、この内点を実軸への極限をとることにより、Sokhotski-Plemeljの公式(jump relation)によって特異積分方程式が導かれる。その際、一部の未知関数の実軸上での値が現れるが、前述の座標軸の設定により、未知関数を含む項に同時に現れる共役複素数が打ち消しあい、未知関数がひとつのみ残された特異積分方程式となる。さらにこの特異積分方程式は、弧の両端を結ぶ線分上での有限Hilbert変換を含むが、その有限Hilbert変換作用素のスペクトル構造および単射性より、この求解が $L^2$ の意味で不安定となることがわかる。この特異積分方程式の解および弧から出射するエックス線を観測することで、弧の凸包での断層画像が得られる。一方、この手法からイメージングをおこなうには数値計算手法が必須であるが、アルゴリズムを数値計算するうえで、この積分方程式の数値的可解性および安定性が問題となる。本研究課題では区分定数要素での離散化で得られる連立一次方程式に対して、その係数行列が狭義正定値であることを示した。これは連立一次方程式が一意的な解をもつことを意味しており、アルゴリズムがブレイクダウンすることなく進行することを意味する。さらにそのEuclidノルムでの条件数が分割数について高々線型増大であるという不安定性に対する定量的評価を示した。これは明示的な正則化をおこなうことなく、誤差の増大が計算結果に与える影響は軽微であることを示すものである。また有限Hilbert変換作用素のスペクトルの構造から自明な正則化も導出され、その離散化問題の安定性に関して、条件数が分割数によらず一様であるという安定性も示され、正則化の有無に関わらず、数値的再構成が信頼性をもって実行できることが示された。また、これらの結果はすべて、エックス線トモグラフィを数理モデルとして輸送方程式によって考察する場合にも成立する。実際、分担者とともにおこなった実測データからの再構成では、境界の3分の1の弧から出射するエックス線の情報からだけ再構成をおこなったところ、従来の全周観測の場合の標準的手法と同様の画質の再構成に成功した。この成果を発表した論文に対し、数理・計算・応用にわたる取り組みが評価され、共著者らとともに日本計算数理工学会論文賞を授与された。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計28件（うち査読付論文 24件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 藤原宏志, 大石直也, SADIQ Kamran, TAMASAN Alexandru	4. 巻 2022-2
2. 論文標題 Cauchy型積分による部分観測のもとでのX線計算機断層撮影法	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学会レビュー	6. 最初と最後の頁 33-48
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Okada Tomohisa, Fujimoto Koji, Fushimi Yasutaka, Akasaka Thai, Thuy Dinh H. D., Shima Atsushi, Sawamoto Nobukatsu, Oishi Naoya, Zhang Zhilin, Funaki Takeshi, Nakamoto Yuji, Murai Toshiya, Miyamoto Susumu, Takahashi Ryosuke, Isa Tadashi	4. 巻 12
2. 論文標題 Neuroimaging at 7 Tesla: a pictorial narrative review	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Quantitative Imaging in Medicine and Surgery	6. 最初と最後の頁 3406 ~ 3435
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.21037/qims-21-969	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Abdelrahman Hiba Abuelgasim Fadelmoula, Ubukata Shiho, Ueda Keita, Fujimoto Gaku, Oishi Naoya, Aso Toshihiko, Murai Toshiya	4. 巻 Volume 18
2. 論文標題 Combining Multiple Indices of Diffusion Tensor Imaging Can Better Differentiate Patients with Traumatic Brain Injury from Healthy Subjects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neuropsychiatric Disease and Treatment	6. 最初と最後の頁 1801 ~ 1814
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2147/NDT.S354265	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 川井郁哉, 吉川仁	4. 巻 22
2. 論文標題 境界要素法により数値的に求められた散乱音場と頭部伝達関数によるバイノーラル信号の合成	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 131 ~ 138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中園昂志, 吉川仁	4. 巻 22
2. 論文標題 レーザ干渉計による計測データを用いた弾性材料の非破壊評価のためのトポロジ導関数を用いた欠陥決定解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 171 ~ 178
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara Hiroshi, Sadiq Kamran, Tamasan Alexandru	4. 巻 16
2. 論文標題 Partial inversion of the 2D attenuated X-ray transform with data on an arc	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Inverse Problems and Imaging	6. 最初と最後の頁 215 ~ 215
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3934/ipi.2021047	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Lee, Yu-Hsun, 藤原宏志	4. 巻 21
2. 論文標題 Web-based Visualization Framework on FreeFEM	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 57 ~ 62
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 藤原宏志, 大石直也, SADIQ, Kamran, TAMASAN, Alexandru	4. 巻 21
2. 論文標題 部分観測による X 線計算機断層撮影法の数値的実現	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 37 ~ 43
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Mana Kato, Hiroshi Fujiwara and Hitoshi Imai	4. 巻 30
2. 論文標題 Numerical regularity map for simple one-dimensional fractional differential equations with Hölder continuous solutions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Adv. Math. Sci. Appl.	6. 最初と最後の頁 499 ~ 506
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara Hiroshi, Sadiq Kamran, Tamasan Alexandru	4. 巻 37
2. 論文標題 A source reconstruction method in two dimensional radiative transport using boundary data measured on an arc	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Inverse Problems	6. 最初と最後の頁 115005 ~ 115005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6420/ac2d75	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeda Tasuku, Fujiwara Hiroshi, Suga Mikio	4. 巻 16
2. 論文標題 Development of three-dimensional integral-type reconstruction formula for magnetic resonance elastography	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery	6. 最初と最後の頁 1947 ~ 1956
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11548-021-02517-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yu-Hsun Lee, Hiroshi Fujiwara	4. 巻 なし
2. 論文標題 Multiple-Precision Arithmetic of Biot-Savart Integrals for Reconnections of Vortex Filaments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Computational Science and Its Applications - ICCSA 2021, LNCS 12953 (Lecture Notes on Computational Sciences)	6. 最初と最後の頁 191 ~ 201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-86976-2_13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shibata Haruto, Uchida Yuto, Inui Shohei, Kan Hirohito, Sakurai Keita, Oishi Naoya, Ueki Yoshino, Oishi Kenichi, Matsukawa Noriyuki	4. 巻 94
2. 論文標題 Machine learning trained with quantitative susceptibility mapping to detect mild cognitive impairment in Parkinson's disease	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Parkinsonism Relat. Disord.	6. 最初と最後の頁 104 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.parkreldis.2021.12.004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Hiroshi Fujiwara	4. 巻 34
2. 論文標題 Piecewise Constant Upwind Approximations to the Stationary Radiative Transport Equation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 35 ~ 45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-15-6062-0_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤原宏志, 大石直也	4. 巻 20
2. 論文標題 境界積分による X 線計算機断層撮影法の正則化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 75 ~ 79
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 吉川 仁, 鈴木 賢人	4. 巻 20
2. 論文標題 時間域BIEMを用いたゲームエンジンによる3次元空間を移動する受音点のリアルタイム可聴化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 89 ~ 93
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -



1. 著者名 Ubukata Shiho, Oishi Naoya, Higashi Tatsuya, Kagawa Shinya, Yamauchi Hiroshi, Okuyama Chio, Watanabe Hiroyuki, Ono Masahiro, Saji Hideo, Aso Toshihiko, Murai Toshiya, Ueda Keita	4. 巻 16
2. 論文標題 Spatial Patterns of Amyloid Deposition in Patients with Chronic Focal or Diffuse Traumatic Brain Injury Using 18F-FPYBF-2 PET	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neuropsychiatric Disease and Treatment	6. 最初と最後の頁 2719 ~ 2732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2147/NDT.S268504	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Takashi, Ueno Tomohiro, Oishi Naoya, Fukuyama Hidenao	4. 巻 10
2. 論文標題 Intact in vivo visualization of telencephalic microvasculature in medaka using optical coherence tomography	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 19831
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-76468-6	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Fujiwara Hiroshi, Sadiq Kamran, Tamasan Alexandru	4. 巻 37
2. 論文標題 The Algebraic Range of the Planar X-Ray Transform of Symmetric Tensors and Applications to Noise Reduction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Practical Inverse Problems and Their Prospects, Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 47 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-2408-0_4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Chen I-Kun, Fujiwara Hiroshi, Kawagoe Daisuke	4. 巻 37
2. 論文標題 Tomography from Scattered Signals Obeying the Stationary Radiative Transport Equation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Practical Inverse Problems and Their Prospects, Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 27 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-2408-0_3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fujiwara Hiroshi、Sadiq Kamran、Tamasan Alexandru	4. 巻 16
2. 論文標題 Numerical Reconstruction of Radiative Sources from Partial Boundary Measurements	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 SIAM Journal on Imaging Sciences	6. 最初と最後の頁 948 ~ 968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1137/22M1507449	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 藤原宏志	4. 巻 2023-2
2. 論文標題 FreeFEM での境界要素法の数値計算と PDF 出力機能拡張	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計算数理工学会レビュー	6. 最初と最後の頁 11-35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 藤原宏志、川越大輔、大石直也	4. 巻 28
2. 論文標題 解の不連続性を利用する3次元散乱信号からのトモグラフィの数値的試み	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 第28回計算工学講演会講演論文集	6. 最初と最後の頁 C-04-01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 YOSHIOKA Tomoki、YOSHIKAWA Hitoshi	4. 巻 80
2. 論文標題 トポロジー導関数を用いた定量的非破壊評価のための LASSO によるクラック決定	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE (土木学会論文集特集号 (応用力学))	6. 最初と最後の頁 n/a ~ n/a
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscej.23-15005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 吉川 仁, 林 正磨	4. 巻 23
2. 論文標題 トポロジー導関数を用いた3次元スカラー波動散乱場のクラック決定解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計算数理工学論文集	6. 最初と最後の頁 129-136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Oishi Naoya	4. 巻 37
2. 論文標題 Denoising with Graphics Processing Units and Deep Learning in Non-invasive Medical Imaging	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Practical Inverse Problems and Their Prospects, Mathematics for Industry	6. 最初と最後の頁 15 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-99-2408-0_2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Fukumoto Takamasa, Amitani Haruka, Nishi Ryusei, Wada Midori, Oishi Naoya, Asakawa Akihiro	4. 巻 102
2. 論文標題 Correlation between trait emotional intelligence and prefrontal activation during a verbal fluency task: A functional near-infrared spectroscopy study	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Medicine	6. 最初と最後の頁 e34418 ~ e34418
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1097/MD.00000000000034418	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takahashi Yuki, Oishi Naoya, Yamao Yukihiro, Kunieda Takeharu, Kikuchi Takayuki, Fukuyama Hidenao, Miyamoto Susumu, Arakawa Yoshiki	4. 巻 13
2. 論文標題 Voxel based clustered imaging by multiparameter diffusion tensor images for predicting the grade and proliferative activity of meningioma	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Brain and Behavior	6. 最初と最後の頁 e3201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/brb3.3201	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計30件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 藤原宏志, Kamran Sadiq, Alexandru Tamasan
2. 発表標題 On a Cauchy-type singular integral equation for x-ray computerized tomography with partial measurement
3. 学会等名 日本数学会 2023年度年会 応用数学科会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川越大輔, 藤原宏志, 陳逸昆
2. 発表標題 ひかりトモグラフィのための定常輻射輸送方程式の解の不連続性の解析,
3. 学会等名 2022年度応用数学合同研究集会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yoshifumi Kimura, Hiroshi Fujiwara, Yu-Hsun Lee
2. 発表標題 Numerical investigation of the 3D regularized Biot-Savart model towards vortex reconnection
3. 学会等名 American Physical Society, 75th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原宏志
2. 発表標題 Cauchy型境界積分によるエックス線断層撮影法の安定化パラメータの選択
3. 学会等名 第14回最適化シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西田孝明, 藤原宏志
2. 発表標題 Heat convections in the horizontal layer with non-uniform heat supply. Stommel model
3. 学会等名 日本数学会 2022年度秋季総合分科会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原宏志
2. 発表標題 FreeFEMにおける2次元数値計算結果のPDFファイル出力の機能拡張
3. 学会等名 日本応用数理学科2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原宏志, 川越大輔, Chen, I-Kun
2. 発表標題 不連続性に基く散乱信号からのトモグラフィの数値的実現
3. 学会等名 第27回計算工学講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大石直也
2. 発表標題 ハイパースペクトルイメージングの脳領域への応用
3. 学会等名 第25回日本ヒト脳機能マッピング学会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川越大輔
2. 発表標題 A remark on the generalized convexity condition and propagation of boundary-induced discontinuity in stationary radiative transfer
3. 学会等名 RIMS 共同研究 (公開型) 逆問題と医用イメージングとその周辺 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kazushi Fukazawa, Hitoshi Yoshikawa, Kazuo Kashiya
2. 発表標題 Time Domain Sound Field Analysis Using the Finite Element Method and the Fast Multipole Boundary Element Method
3. 学会等名 WCCM-APCOM YOKOHAMA, APACM, IACM, JSCES, JACM (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 林正磨, 吉川仁
2. 発表標題 3次元スカラー波動問題におけるトポロジー導関数を用いたクラック決定解析
3. 学会等名 第14回最適化シンポジウム2022, 機械学会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤原宏志, Kamran Sadiq, Alexandru Tamasan
2. 発表標題 特異積分方程式による部分観測でのX線計算機トモグラフィ
3. 学会等名 日本応用数学会2022年度年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 On feasibility of numerical reconstruction of the attenuation coefficient in the stationary radiative transport equation
3. 学会等名 Practical inverse problems and their prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Naoya Oishi
2. 発表標題 Denoising in non-invasive medical imaging
3. 学会等名 Practical inverse problems and their prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Daisuke Kawagoe
2. 発表標題 Propagation of boundary-induced discontinuity in stationary radiative transfer and its application to the optical tomography
3. 学会等名 Practical inverse problems and their prospects (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 An Efficient Numerical Scheme for Near-Infrared Light Propagation in Turbid Media
3. 学会等名 IUTAM symposium computational methods for large-scale and complex wave problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原宏志
2. 発表標題 輸送方程式のソース項同定逆問題による X 線計算機断層撮影の数値的実現
3. 学会等名 第26回計算工学講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原宏志
2. 発表標題 有限要素解析ツール FreeFem++ のファイル出力機能拡張と可視化の可能性
3. 学会等名 第25回計算工学講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤原宏志
2. 発表標題 Theoretical numerical analysis and computation of light propagation in biomedical tissue
3. 学会等名 第6回理論応用力学シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 PDF output extensions of 2D Computations in FreeFEM
3. 学会等名 FreeFEM Days 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 Numerical challenges in inverse and ill-posed problems
3. 学会等名 HKUST and Kyoto University Joint Symposium on Informatics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 Numerical feasibility of optical tomography by the stationary radiative transport equation
3. 学会等名 2024 Japan-Taiwan Joint Workshop on Numerical Analysis and Inverse Problems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara, Naoya Oishi, Kamran Sadiq, Alexandru Tamasan
2. 発表標題 On numerical instability of a singular integral equation in x-ray computerized tomography with partial measurement
3. 学会等名 RIMS workshop on "Some approaches on ill-posed problems -theory and practice-" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 On numerical analysis of x-ray computerized tomography with partial measurement
3. 学会等名 NCTS-Kyoto Mathematics Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 Numerical reconstruction of sources in transport equations and their applications
3. 学会等名 The 5th workshop on recent development of mathematical fluid dynamics and hyperbolic conservation laws (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 I-Kun Chen, Hiroshi Fujiwara, Daisuke Kawagoe
2. 発表標題 Numerical challenges to optical tomography by the stationary radiative transport equation
3. 学会等名 ICIAM2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Fujiwara
2. 発表標題 Some remarks on BemTool and treatment of PDF files in FreeFEM
3. 学会等名 Variational problem in engineering and numerical tools (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 櫻山 和男, 深澤 一志, 宮内 暖季, 吉川 仁
2. 発表標題 有限要素法による音場解析手法の構築とその可聴化
3. 学会等名 土木学会第26回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小金丸一輝, 吉川仁
2. 発表標題 ポイドとクラックが混在する材料に対するトポロジー導関数を用いた非破壊評価
3. 学会等名 機械学会第36回計算力学講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大石 直也
2. 発表標題 微小脳構造を核とした安静時機能結合MRI
3. 学会等名 第26回日本ヒト脳機能マッピング学会（招待講演）
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Exlib information <a href="http://www-an.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~fujiwara/exlib/">http://www-an.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~fujiwara/exlib/</a> FreeFEM Programs <a href="http://www-an.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~fujiwara/ff/">http://www-an.acs.i.kyoto-u.ac.jp/~fujiwara/ff/</a>
---

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川越 大輔  (Kawagoe Daisuke)  (30848073)	京都大学・情報学研究科・助教    (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	大石 直也  (Oishi Naoya)  (40526878)	京都大学・医学研究科・特定准教授    (14301)	
研究分担者	吉川 仁  (Yoshikawa Hitoshi)  (90359836)	京都大学・総合生存学館・特定教授    (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関