

令和 2 年 6 月 9 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H03914

研究課題名(和文)手術支援のための人腹腔の力学シミュレーションの高度化

研究課題名(英文) Advancement of Numerical Simulation of Deformed Human Abdominal Organs for Computer Aided Surgery

研究代表者

山田 貴博 (Yamada, Takahiro)

横浜国立大学・大学院環境情報研究院・教授

研究者番号：40240022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、腹腔鏡下・ロボット補助下の手術における患者個別シミュレーション・ナビゲーションシステムの基盤となる臨床応用可能な高精度かつ高速な腹腔内組織全体の力学シミュレーション技術を開発することを目的とした。本研究課題により、膜組織を考慮した幾何学モデルの生成および力学シミュレーション手法、シミュレーションで用いるための摘出直後臓器の物性値を計測手法および機械学習によるメタモデリングに基づく高速化手法についての基本的な枠組みを構築することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、これまでほとんど例がなかった腹腔内の膜組織を考慮した腹腔内組織の幾何学的モデルの生成とそれに基づく力学シミュレーション手法を提案した。これらの研究は、腹腔鏡下・ロボット補助下の手術における患者個別シミュレーション・ナビゲーションシステムの開発の1ステップであり、今後の術者のトレーニングやリハーサルおよび術中のコンピュータシステムによる危険情報の提示などの安全な手術の施行に資する技術発展が期待される。

研究成果の概要(英文)：The objective of this work is to develop a high-fidelity mechanical simulation technique for the whole abdominal tissue that can be applied clinically to a patient-specific simulation and navigation system in laparoscopic and robot-assisted surgery. In this work, we propose the generation of the geometric model of the membrane, mechanical simulation technique considering the membrane, measurement technique of mechanical properties of the organ right after extraction, and metamodelling by the machine learning for the high-speed mechanical simulation.

研究分野：計算力学

キーワード：バイオメカニクス 手術支援 力学モデル 人腹腔 生体計測 計算力学 有限要素法 機械学習

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

解像度の高い X 線 CT, MRI などの画像診断装置や微細な制御が可能なロボットの開発とコンピュータの高速化, 小型化が相まって, コンピュータ技術を援用することにより高度な外科手術を可能とする技術(CAS, Computer Aided Surgery)が近年発展してきている. このような中, 研究代表者等の研究グループでは泌尿器系の内視鏡手術のための手術シミュレータの開発を行っている.

内視鏡手術においては, 術野と操作範囲が限定されているため, 術前の計画や訓練が重要である. 研究代表者等の手術シミュレータでは, 医用画像の再構成に基づき患者固有の組織の有限要素モデルを作成し, 組織変形の実時間有限要素解析をハプティックデバイスが組み込まれた VR システムに実装することで, 力覚を含んだ手術の再現として事前訓練が可能となっている. このような力学モデルを実時間で有限要素法の基づき評価することで実現した手術シミュレータは, 他に類を見ないものとして内外で注目されているものである.

しかしながら, このシステムにおいては, 特定の臓器近傍の局所的な有限要素モデルを用いているのみであり, 腹腔内組織全体の変形を予測するものとはなっていない. また, 手術シミュレータにおいて術者の手技に対する臓器の応答の実時間計算を実現するため, 疑似的な大変形を取り扱う簡易的な力学モデルが用いられてきた. このような簡易的な力学モデルをより現実に近いものとするため, 研究代表者等は平成 25~27 年度の挑戦的萌芽研究の研究課題として, それまでは取り扱われることのなかった腹腔内の臓器の膜・網組織による支持状態を考慮した腹腔内組織全体を表現した力学モデルの構築を目指し, 研究を行ってきた. この研究課題においては, 膜・網組織を有限要素法における膜要素により表現し, 膜・網組織が臓器に対して接触状態にあるものとしてモデル化するための有限要素モデルの生成手法と変形を計算する数値計算技術を開発した.

このような背景の下で, 手術計画段階の信頼性の高いリハーサルを行うための手術シミュレータと危険回避のための手術ナビゲーションシステムを構築するためには, 腹腔内組織全体の変形を高精度に予測可能なシミュレーション技術が必須であると認識した. しかしながら, このようなシミュレーションを実現するための技術は他の分野ではまだ開発されておらず, 要素技術段階からの研究が必要であると考えた.

2. 研究の目的

本研究課題ではより高精度な腹腔内組織全体を表現した力学モデルを実時間処理として高速に計算する技術を確立することを目的とする. これにより, 患者固有の形状データに基づく術前訓練のみではなく, 正確な力学モデルにより再現された腹腔内組織のシミュレーションに基づき, 事前の手術計画を行うことが可能となる. さらに, 手術中にシミュレーションを並行して実施することで, 術者に手術中の危険回避のための情報を提示する手術ナビゲーションシステムの構築が可能になると考えている.

このような研究は, 医学的には手術の安全性, 信頼性の向上に貢献するものであり, さらに医工学分野に新たな計算力学の適用分野を開拓する独創的な研究と位置付けられる. 本研究課題では, 手術支援システムとして術前の計画や訓練を行う手術シミュレータの大幅な改良と, 術者に手術中の危険回避のための情報を提示する手術ナビゲーションシステムを実現するための基盤技術となる高精度な腹腔内組織全体を表現した力学モデルの生成手法と, そのモデルを実時間処理として高速に計算する技術を確立することを目的とした.

3. 研究の方法

本研究課題では, 手術支援を目的とした高精度な腹腔内組織全体の力学シミュレーションを実現するための研究期間内に取り込む技術課題として, 次の 3 つテーマを設定し, 研究を実施した.

(1) 膜・網組織を考慮した腹腔の幾何学モデル生成と力学シミュレーション手法

腹腔内の膜・網組織は薄肉の組織であることから, 医療用画像から判別することは困難である. そこで, 本研究課題では医療用画像から得られた臓器の状況に解剖学知見に基づき膜・網組織に対応する幾何学モデルを生成する手法とそのモデルに基づく力学シミュレーション手法を開発する.

(2) 臓器の物性値同定手法

手術ナビゲータの開発を前提にしたとき, 現在知られている臓器の力学的パラメータは必ずしも十分に信頼できるものとは言えない. そこで, 研究代表者等が提案する力学シミュレーション技術において利用可能な形での臓器の生体内に近い状態での力学的パラメータを計測する技術を開発する.

(3) 手術支援を目指した高速なシミュレーション手法

手術シミュレータおよび手術ナビゲーションシステムにおいて有限要素法に基づく力学シミュレーションを適用するためには, ロバストで高速なアルゴリズムを実装し実時間処理を行う技術が必要となる. しかしながら, 本研究で取り扱う腹腔内の力学挙動を表現した力学モデルで

は、臓器と膜・網組織の接触を考慮することから複雑かつ詳細なモデルとなり、その計算負荷は非常に大きい。このような負荷の高い数値計算の実時間処理を実現するための新たな手法の開発を行う。

4. 研究成果

本研究課題で設置した上述の3つの技術課題に対して、それぞれ以下のような研究成果が得られた。

(1) 膜・網組織を考慮した腹腔の幾何学モデル生成と力学シミュレーション手法

膜・網組織の幾何学モデルにおいて、医療用画像から判別することが困難である。一方、解剖学的知見から膜・網組織の配置に関しては患者固有ではない位相的構造が存在することが知られている。本研究では、まず、この位相的な幾何構造を再現した標準モデルを作成し、それをモーフィングし、患者固有モデルを生成する手法を検討した。平成29年度までの研究では、transfinite 写像によるモーフィング技術を開発した。しかしながら、この手法では、特徴点を定義し、その標準モデルと患者固有モデルとの対応関係でモーフィングを行うものとなり、特徴点の設定をモデル作成者が行う必要があった。このとき少ない特徴点では適切なモーフィングができないため、モデル作成者の負担が大きい手法となっていた。

これに対して、平成30年度からは位相が変化しないフェーズフィールド方程式に着目した新たな膜組織に対する幾何学的モデルの生成手法の開発に取り組んだ。このアプローチでは、解剖学的知見により位相的な幾何構造を再現した標準モデルを初期値とし、フェーズフィールド方程式として記述された発展方程式を解く。このとき、患者固有モデルにおける臓器の位置を用いて方程式のソース項を生成することで、臓器のみで構成される患者固有モデルに膜組織の幾何学情報を追加することが可能となった。また、この手法では、現在医用画像からの生成手法が確立している各臓器を分離した内蔵の3次元モデルのみが入力データとなり、自動的に膜組織の生成が可能となっている。

一方、膜・網組織の力学シミュレーションについては、当初は通常の有限要素法における三角形1次要素を用いた膜要素の適用を検討していた。しかしながら、曲げ剛性を有しない膜要素は、張力を導入することで発生する幾何剛性で形態を維持するものであり、数値的に不安定となることも多い。したがって、このような手法で複雑な形状の内蔵組織を覆う膜の変形を、臓器等との接触条件を考慮しながらロバストに計算することは困難であることが明らかとなった。

そこで研究代表者等は、このような問題に対応する計算手法として、Cenanovic 等が提案するソリッド要素に埋込まれた膜要素のアプローチを参考に、空間で定義された変位場により膜の変形を表す手法を開発した。このアプローチでは、膜の変位は直交格子を用いた空間の近似関数で表すとともに、膜の幾何形状については、同じ直交格子を用いたレベルセット法で表現するものとした。平成29年度までの研究では、変位を表す空間近似に3重1次要素を用いた有限要素法を用いていた。しかしながら、3次元の膜を考える場合、低次要素を用いた空間の有限要素近似では、曲面の変形を滑らかに近似すること困難であることが明らかとなった。そこで平成30年度からの研究では、空間の離散化にスプライン関数を用い、曲面の変形を滑らかに近似する手法を導入した。

一方、膜の大変形問題を考えるためには、変位と応力を物質点において追跡することが必要である。そこで本研究課題では、研究代表者等が開発した Euler 型解法であるマーカ積分有限要素法の考え方を採用し、膜上にマーカ粒子を配置し、変形と応力の追跡を行うものとした。また、仮想仕事式の積分においては、マーカ粒子を頂点とする三角形パッチを用いた数値積分を用いた。

さらに、ここで開発した手法では、形状表現にレベルセット関数を用いていることから、臓器を表すソリッド要素との接触を考慮する際の接触判定がレベルセット関数で表された距離を用いて行うことが可能である。したがって、この手法は、本研究課題が対象とする腹腔内組織全体の力学シミュレーションに適したものであると考えられる。

(2) 患者固有の物性値同定手法

手術シミュレータや手術ナビゲーションシステムに用いる臓器の力学的パラメータを計測する手法として本研究課題の計画段階では、X線CTやMRIによる画像診断装置中で使用可能な外力を非浸潤で腹部に作用させる装置を開発し、その応答を医療用画像として取得する計測手法を開発することを検討していた。しかしながら、このような手法では、不確定性の多い人体を直接取り扱うこととなり、得られた物性値の妥当性を確認することが非常に困難となることが予想された。

そこで、当初の計画を変更し、手術によって摘出された直後の臓器に対して、逆解析手法により物性同定を行う手法の開発を進めることとした。本研究では、摘出直後の臓器に複数の載荷点を設定し、順次荷重を加える装置を開発した。また、臓器の初期形状と変形については、深度情報が取得可能なカメラ(Intel Realsense)を用いて、3次元計測を行う手法を構築した。このようなシステムで得られた形状と変形の情報を基に、物性値を仮定し計測で得られた形状を用いて行う臓器の有限要素解析の計算結果と比較することで、物性値を同定する逆解析手法を構築することが可能となる。

また、このようなアプローチであれば、物性値を計測可能な材料で模擬臓器を作成し、それを

用いて実験を行うことで、逆解析手法で同定される物性値の妥当性を定量的に検証することが可能である。本研究課題では、まずエラストマーなどの高分子材料を用いて模擬臓器を作成する手順を検討し、材料の力学的パラメータを計測するための2軸試験装置の作成を行った。2軸試験装置の試験結果から得られた模擬臓器の物性値を用いることで、摘出直後臓器の物性値同定手法の妥当性が評価できると考えたが、研究期間内には模擬臓器用の材料の試験の段階までしか到達できなかった。装置等は基本的に完成しており、今後も研究を継続し、摘出直後臓器の物性値の同定を行う予定である。

(3) 手術支援を目指した高速な計算アルゴリズム

手術シミュレータおよび手術ナビゲーションシステムにおいて用いる有限要素法に基づく力学シミュレーションでは、本研究課題が目指す腹腔内組織全体の力学シミュレーションを基盤技術とすること想定している。本研究でそのための要素技術を開発と並行してシミュレーションを実時間処理として実現するための数値計算技術の検討を行ってきた。しかしながら、想定されるモデルの複雑さや規模が具体化される中で試算を行ったところ、本研究課題が目指す力学シミュレーションが実現した場合、病院に設置されると想定した装置において実時間実行が可能な計算量を大幅に超え、アルゴリズムの改良や近い将来の計算機の高速化を考慮してもシステムの実現が困難となることが予見された。

そこで、平成30年度からこの決定的な技術的障害を克服する抜本的な解決策として、近年様々な分野で活用が進みつつあるニューラルネットワーク（以下NNと略記する）による機械学習を力学シミュレーションのメタモデリング技術とする手法の開発を開始した。ここで言う物理現象に対するメタモデリングとは、現象の物理的なメカニズムや素過程に対する数理モデルに基づいたシミュレーションを逐次実行するのではなく、想定される条件に対して予め実施された高精度なモデルを用いたシミュレーション結果を用い、その再現が可能な非線形写像を構成し、この非線形写像をシミュレーションの代替物として利用するものである。本研究では、この非線形写像の構成にシミュレーション結果を教師データとするNNによる機械学習を適用する。これにより、実際に高精度なシミュレーションで得られるものと同等な結果を学習済みNNが出力するものとなり、手術支援に必要な力学モデルの実時間処理が実現すると考えた。また、力学シミュレーションをシミュレータやナビゲーションの中で実施するのではなく、計算時間等の制約が大幅に緩和された計算環境で事前に実施すること（力学シミュレーションのオフライン化）も可能となる。

このようなアプローチに関しては既往の研究もほとんど無かったことから、基礎的な問題設定から出発し、実現可能性の検討を行った。具体的には、線形問題において本研究で扱う力学シミュレーションの問題をNNの学習に実装するためのデータの形式や誤差の評価法等について、多面的に比較検討し、それを大変形問題に拡張するとともに、手術シミュレーションで必須となる接触問題の取り扱い等についての手法の提案を行った。

以上より、本研究課題が目指した腹腔内組織全体の高精度な力学シミュレーションの実現に対して、要素技術の開発は達成された。しかしながら、研究期間内においては、要素技術を統合し実際に手術シミュレーションを実施する段階までには到達することはできなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 山田貴博	4. 巻 74
2. 論文標題 微圧縮超弾性体の大変形解析に対する近傍問題法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_265 ~ I_275
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.I_265	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 Yamamoto Takeki, Yamada Takahiro and Matsui Kazumi	4. 巻 63
2. 論文標題 Numerical procedure to couple shell to solid elements by using Nitsche's method	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 69 ~ 98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-018-1585-6	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 山本 剛大, 山田 貴博, 松井 和己, 斉木 功	4. 巻 74
2. 論文標題 鋼構造物を対象とした弾塑性解析への異種要素を接続したモデル化手法の適用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_147 ~ I_158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.74.I_147	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 山田 貴博	4. 巻 73
2. 論文標題 超弾性体の大変形問題に対する圧力安定化四面体1次要素	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A 2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_405 ~ I_415
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_405	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 山本 剛大、山田 貴博、松井 和己	4. 巻 73
2. 論文標題 Nitsche法を用いたシェル要素とソリッド要素の接合	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集A 2 (応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_177 ~ I_187
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.2208/jscejam.73.I_177	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 山田貴博	4. 巻 72
2. 論文標題 超弾性体の大変形有限要素解析への創成解の方法の適用	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 土木学会論文集 A2	6. 最初と最後の頁 I_277-I_284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejam.72.I_277	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 Azumi Araki, Kazuhide Makiyama, Hiroyuki Yamanaka, Daiki Ueno, Kimito Osaka, Manadu Nagasaki, Takahiro Yamada, Masahiro Yao	4. 巻 31
2. 論文標題 Comparison of the performance of experienced and novice surgeons: measurement of gripping force during laparoscopic surgery performed on pigs using forceps with pressure sensors	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Surgical Endoscopy	6. 最初と最後の頁 1999-2005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00464-016-5153-x	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 Takeki Yamamoto, Takahiro Yamada and Kazumi Matsui	4. 巻 59
2. 論文標題 A quadrilateral shell element with degree of freedom to represent thickness-stretch	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Computational Mechanics	6. 最初と最後の頁 625-646
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00466-016-1364-1	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 Yamamoto Takeki, Yamada Takahiro	4. 巻 121
2. 論文標題 A quadrilateral shell element incorporating thickness stretch for nearly incompressible hyperelasticity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal for Numerical Methods in Engineering	6. 最初と最後の頁 2001 ~ 2032
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/nme.6296	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 -

〔学会発表〕 計19件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 体積離散化に基づく弾性膜の大変形解析
3. 学会等名 第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Yamada
2. 発表標題 Method of Manufactured Solutions in Large Deformation Problems of Hyperelasticity
3. 学会等名 13th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takahiro Yamada
2. 発表標題 Method of Nearby Problems for Large Deformation Analyses of Hyperelasticity
3. 学会等名 ASME V&V symposium 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Makoto Tsukino, Takahiro Yamada
2. 発表標題 Frictionless Contact Analysis in Finite Cover Method Using Nitsches Method
3. 学会等名 13th World Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 熊谷卓大, 山田貴博
2. 発表標題 直交格子を用いた膜の大変形解析
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山田貴博, 小市萌子
2. 発表標題 ALE有限要素法に基づく棒要素とソリッド要素の摩擦無し接触解析
3. 学会等名 第23回計算工学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Yamada
2. 発表標題 Method of Manufactured Solution for Large Deformation Problem of Hyperelasticity
3. 学会等名 ASME Verification and Validation Symposium
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Yamada
2. 発表標題 Method of Manufactured Solution for Large Deformation Finite Element Analysis of Hyperelasticity
3. 学会等名 14th U.S. National Congress on Computational Mechanics
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 T. Yamada
2. 発表標題 Verification of Pressure Stabilized Tetrahedral Element for Hyperelasticity by Method of Manufactured Solutions
3. 学会等名 The 2nd International Conference on Computational Engineering and Sciences for Safety and Environmental Problems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 微圧縮超弾性体大変形問題に対する創成解について
3. 学会等名 2017年度応用数理学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 微圧縮超弾性体に対する近傍問題法
3. 学会等名 第30回計算力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 角田健也, 山田貴博, 荒木あずみ, 長坂学, 横山和秀, 窪田吉信
2. 発表標題 臓器の材料定数同定のための 3 次元形状計測
3. 学会等名 第16回日本VR医学会学術大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 創成解による大変形問題に対する有限要素近似の検証
3. 学会等名 日本応用数理学会2016年度年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Tomoyuki Iwata and Takahiro Yamada
2. 発表標題 The Procedure for Identifying Material Parameters of Hyperelasticity by Considering Stress State in the Structure
3. 学会等名 The 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Yamada
2. 発表標題 Method of Nearby Problems for Large Deformation Analyses of Nearly Incompressible Hyperelasticity
3. 学会等名 The 7th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Yamada
2. 発表標題 Numerical Verification Procedure for Finite Element Analysis of Contact Problem / Numerical Verification Procedure for Finite Element Analysis of Contact Problem
3. 学会等名 15th U.S. National Congress on Computational Mechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 一様スプライン直交格子による体積離散化に基づく弾性膜の数値計算
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田貴博
2. 発表標題 接触問題の近傍問題法による数値的検証
3. 学会等名 第24回計算工学講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takahiro Yamada
2. 発表標題 Method of Nearby Problems for Contact Analysis of Solid / Method of Nearby Problems for Contact Analysis of Solid
3. 学会等名 ASME Verification and Validation Symposium
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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	槇山 和秀 (Makiyama Hidekazu) (40347307)	横浜市立大学・医学部・准教授 (22701)	
研究分担者	松井 和己 (Matsui Kazumi) (00377110)	横浜国立大学・大学院環境情報研究院・准教授 (12701)	
研究分担者	山本 剛大 (Yamamoto Takeki) (00802860)	東北大学・工学研究科・特任准教授 (11301)	