

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(B) (特設分野研究)

研究期間：2016～2019

課題番号：16KT0108

研究課題名(和文) 統合的逐次データ同化による人工物システムの体系的オンラインモニタリング法の構築

研究課題名(英文) Construction of systematic online-based monitoring method for artificial structure systems by integrated sequential data assimilation

研究代表者

樋口 知之 (Higuchi, Tomoyuki)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：70202273

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：データ同化とは、複雑な現象の高精度予測のために、数値シミュレーション計算と、不完全かつ部分的情報である観測・計測データを統合することにより、シミュレーションの初期値や境界値、パラメータ等を実際の現象をなるべく再現するように定め、時にはシミュレーションモデル自体にも手を加える(リモデリング)一連の計算作業である。本研究により、人工物システムの機能実現をオンライン的にサポートする理論的枠組み、つまり統合的逐次データ同化システムの数理的基盤を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

橋梁やトンネルのような人工物に多数配置されたセンサーの情報をリアルタイムで構造体シミュレータに取り入れるような、オープンな環境下での効率的な社会インフラ整備計画に資する数理的枠組みを構築した。特に、シミュレーションモデルに内在する不確実性のモデル化と、統合するセンサーデータに含まれる信号ノイズの同定法の確立に取り組んだ。この枠組みに基づいた計算の効果的な大規模化を支援する目的のために、Pythonによるライブラリの公開と解説論文を執筆し、口頭発表を多数行うことで有効な普及活動が行えた。

研究成果の概要(英文)：Data assimilation integrates numerical simulation and observation/measurement data, which is incomplete and partial information, for high-precision prediction of complicated phenomena. To reproduce the actual phenomenon as much as possible is realized by adjusting initial values, boundary values, parameters, etc. The simulation model itself can be sometimes modified for that purpose. Through this research, we have established a theoretical framework that supports the functional realization of artificial structure systems in on-line, that is, the mathematical foundation of an integrated sequential data assimilation system.

研究分野：データ同化

キーワード：逐次データ同化 実験計画 ベイズ最適化 ビッグデータ IoT 社会インフラ 人工物

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 新しい学術の体系として、『設計科学』が学術会議から提言されたのは今から12年前のことである(文献①)。設計科学は、人間の全体性を現す人工物システムを研究対象とし、目的や価値を正面から取り込んだ新しい科学である。人工物システムには、製造(建造)目的の効果的実現のために計算可能なモデルが必ず存在し、我々は通常それをシミュレーションモデルと呼ぶ。巨大なシステムになると全ての要素間の関係は、シミュレーションモデルの計算結果を通じて、逆解析的にしか求められない。従って、設計科学においては、データサイエンス(統計学、機械学習、最適化、データマイニング等)とシミュレーションの果たす役割は非常に大きい。残念ながらデータサイエンスとシミュレーションの両分野は、流体工学の一部を除いて工学分野ではこれまで並進的に発展してきたと言わざるをえない。

(2) 地球科学の分野では、世界的な大規模災害の頻度の増加にも促される形で、シミュレーションと観測データの融合を実現するデータ同化の研究開発がこの30年間活発になってきている。データ同化とは、シミュレーションなどの物理(演繹)モデルベースでの物理量の時間発展更新(空間情報の再配置)と、さまざまな計測装置からの実際の物理量の計測に基づく状態把握(帰納)の二つを適切に組み合わせる手法である。近年のセンシング技術の著しい発達(高精度化と小型化および廉価化)とその蓄積形であるビッグデータの登場は、この分断されていた両分野が有機的につながる可能性を生み出している。

### 2. 研究の目的

(1) データ同化では、通常、シミュレーションの初期値、境界値、パラメータ等を、実際の現象をなるべく再現するように定めるが、時にはシミュレーションモデル自体にも手を加える。このことはリモデリングと呼ばれる。高精度の現象再現や予測の以外にも、計測点数が固定(あるいは予算が固定)の場合、どの点でのどのような計測量を獲得できたならば全体としての予測性能が向上するか、つまりセンサー配置の最適化など、センシングの高度化法の提案も可能である。本研究では、経済効率性の高い合理的な計測デザインの提案のため、人工物システムの機能実現をオンライン的にサポートする理論的枠組みを構築する。具体的には、統合的逐次データ同化システムの数理的基盤を確立する。

(2) 統合的逐次データ同化システムの適用できる有望な候補として以下が考えられる。

①近年は、試作品製作をごくわずかにして、膨大なシミュレーション計算でもって製品開発を行なうことも普通になってきている。このシミュレーションに高性能センサー情報を取り込むシステムがあれば、製品・サービス設計と検証(テスト)作業を一体化でき、結果としてプロセスの超高速化と開発予算の大幅な削減が実現できる。

②巨大な社会インフラに対しては、その建築前に構造体シミュレーションにより、さまざまな入力に対する応答(挙動)の検討がなされてはいる。本研究により、橋梁やトンネルなどの人工物に多数配置されたセンサーの情報を、リアルタイムで構造体シミュレータに取り入れるような、オープンな環境下での効率的な社会インフラ整備計画の立案が可能となる。

### 3. 研究の方法

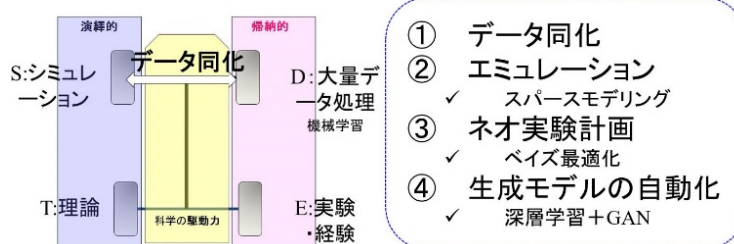
(1) 本研究では、逐次データ同化法を先端的センシング技術やさまざまな人工物シミュレーションと統合化する上での数理的課題に取り組む。その主たる課題は、逐次データ同化理論の高度化とオンライン計算手法と先端的センシング技術の統合となる。特に、人工物シミュレーションの逐次データ同化との接合部分に生ずる問題に取り組む。具体的には、①開放形シミュレーションの逐次データ同化との整合化、②人工物シミュレーションにかかわる不確実性の定量化・指標化、③人工物シミュレーションモデル自体の評価法の整理となる。

(2) 実証性を示す観点から、具体的な応用を視野に入れた研究(応用プロトタイプの構築)にも取り組む。短期間での研究となるため、モデル内の不確実性に関する知見をある程度持っているシステムを選択する。具体的には、①地盤工学のセンサーネットワークの高度化、②風洞実験と流体シミュレーション環境の同時最適化、③破片スペースデブリのモデル化を想定している。

### 4. 研究成果

(1) 本研究は異分野融合的色彩が濃いため、調査研究と意見交換を精力的に行った。初年度は、本課題と関連する国際的な先端研究所に所属する研究者等との意見交換を通し、統合的逐次データ同化の基盤構築に必要な数理要素技術を洗い出した。その概念図を下に示す。

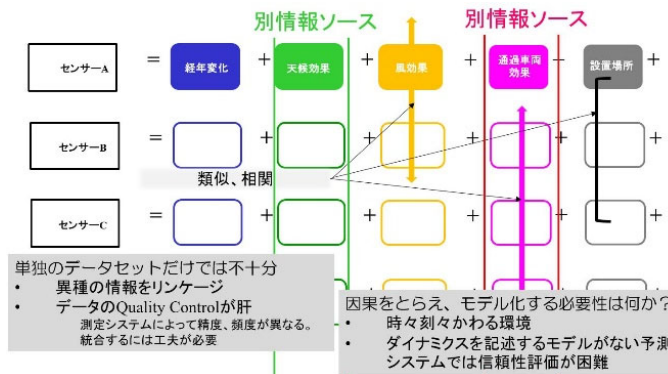
また、数理基盤の構築をめざした課題の整理とともに、先進的センシング技術が計算モデルと統合されることによって得られる価値についても調査と議論を行い、研究計画後半での応用プロトタイプの構築が具体的なイメージをもって着実に進められるように準備的研究も実施した。



(2) 論文以外の文書としての成果物は以下のとおりである。初年度の調査結果を受け、数理要素技術の俯瞰マップを作成した。また大型の研究資金（JST の「未来創造」）へメンバーらと応募を行うため、本研究成果の実績を多面的に検討し、プロポーザルとしてまとめることができた。残念ながら採択には至らなかったが、理論の発展の方向性を確認し、応用可能事例を列挙できたことは大きな成果と言える。

(3) 統合的逐次データ同化の数理基盤の構築に関わる研究成果は以下である。

- ①オンライン計算性と拡張性の向上を目指して、逐次データ同化手法の近似的高速計算法の開発に取り組んだ。
- ②シミュレーションモデルに内在する不確実性のモデル化と、統合するセンサーデータの信号ノイズの同定とその数理モデル化に取り組んだ。
- ③橋梁やトンネルのような構造体にセンサーを多数設置した場合、センサー情報を構造体計算にどのように同化させるかについての方法論を研究した。その模式的な解説図を右に示す。



(4) 応用プロトタイプ構築に関する研究成果は以下の通りである。

- ①破片スペースデブリの散乱状態の観測モデルをもとに、状態を時々刻々追尾する粒子フィルタを用いたフィルタリングの開発を進めた。このモデルを用いて、収集されたデータを用いてモデルの定量的評価を行い、モデルの洗練化を進めた。アルゴリズムの改善工夫を行うとともに、適切なセンサー情報の獲得および入力の方法についても検討した。
  - ②流体シミュレーション内の不確実性をなるべく高速に同定する計算アルゴリズムの開発に取り組んだ。
  - ③構造体シミュレーションに適した逐次データ同化法の研究に取り組んだ。
- 最終年度は、これらのプロトタイプの適用性を向上させるための探索、推論手法の拡張、改良、システム洗練化を連携させながら研究を実施した。

(5) 計算の効果的な大規模化を支援する目的のために、Python によるライブラリ (Python Parallelized Particle Filter Library. 略して P3) の公開と解説論文を執筆した。公開サイト (<http://daweb.ism.ac.jp/support/software/P-cubed/P-cubed.html>) の様子を下に示した。

P3 は、粒子フィルタの適用対象としては、比較的規模の大きい非線形の問題に対しても、並列計算機を利用して状態推定を実現できる手段を提供する。粒子フィルタを並列計算機で実行しようとする、個々の粒子を並列処理するために並列プログラミングの知識が必要になる上、リサンプリング時に粒子を再配分する処理の実装に労力が必要となる。一方 P3 では、並列計算やリサンプリングの処理が抽象化されている。そのため、ユーザは煩雑な処理を自分でプログラミングしなくても、並列化効率の高い PF アルゴリズムを利用でき、状態空間モデルの構築に専念することができる。この P3 の普及活動も、研究期間中に多数行った口頭発表の際に積極的に取り組んだ。実際に大学院生が利用し発表するなどの具体的な利用実績が確認できた。

情報・システム研究機構  
データサイエンス共同利用  
基盤施設

データ同化研究  
支援センター

トップページ >

本センターについて >

支援実績 >

講演会・イベント >

学習資料・ソフトウェア >

関係機関 >

相談申し込み

English

### P-cubed

**P3 (Parallelized particle filter with Python)**

作成者	中野慎也, 樋口知之
概要	<p>本ソフトウェアは、Python用の並列粒子フィルタです。下記の2つの並列計算用アルゴリズムを利用できます。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>local PF + meta-PF (Nakano, 2010)</li> <li>Alternate switching of grouping patterns (Nakano and Higuchi, 2010)</li> </ul>
更新履歴	<p>2017年06月05日：ベータ版の配布を開始しました。</p> <p>現在ベータ版として、お申し込みいただいた方に配布しております。ご希望の方で、以下の条件をご承諾いただける方は、本ページ最後のメールアドレスにお申し込みください。（お申し込みから返信までお時間をいただく場合がございます。）</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>本ソフトウェアの著作権は作成者に帰属します。</li> <li>本ソフトウェアを使用した結果については無保証です。その使用によって生じたいかなる損害についても、作成者および情報・システム研究機構と統計数理研究所は一切の責任を負いません。</li> <li>本ソフトウェアを第三者に有償・無償問わず、再配布することは禁止致します。</li> <li>本ソフトウェアのバグを発見された場合は、本ページ最後のメールアドレスにご連絡ください。</li> <li>お申し込みのメールには、お名前、ご所属、ご利用目的をご記入ください。</li> <li>お申し込みいただいた内容によって、配布をお断りする場合がございます。</li> <li>使用条件は予告なく変更する場合があります。</li> </ul>
利用条件	<p>利用は下記のメールアドレスよりお申し込みください。</p> <p>da-software@daweb.ism.ac.jp</p>

<引用文献>

- ①新しい学術体系－社会のための学術と文理の融合－、第 18 期日本学術会議・新しい学術体系委員会、平成 15 年 6 月 24 日 (2003)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 中野 慎也, 有吉 雄哉, 樋口 知之	4. 巻 66
2. 論文標題 P-cubed: Pythonによる並列計算機用粒子フィルタライブラリ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 統計数理	6. 最初と最後の頁 339-351
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 樋口知之	4. 巻 54
2. 論文標題 Possibility for Technological Innovation in Construction Employing Statistical Mathematics Approaches	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 STEEL CONSTRUCTION TODAY & TOMORROW	6. 最初と最後の頁 15-18
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 Identification of signal and noise components in spacecraft neutral particle data using a bi-level mixture model	4. 巻 -
2. 論文標題 S. Nakano and Y. Futaana	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics	6. 最初と最後の頁 487-495
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/DSAA.2017.38	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 Kato, Makiko Ando, and Yasuhiro Fukuzoe	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Toward Uncertainty Quantification in Satellite Thermal Design,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The ISTS Special Issue of Transactions of JSASS Aerospace Technology	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 Akihito Sudo, Takehiro Kashiyama, Takahiro Yabe, Hiroshi Kanasugi, Xuan Song, Tomoyuki Higuchi, Shin'ya Nakano, Masaya Saito, Yoshihide Sekimoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Particle filter for real-time human mobility prediction following unprecedented disaster	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Proceedings of ACMSIGSPATIAL	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/2996913.29970000	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

〔学会発表〕 計30件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 10件)

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 アンサンブル変分法に基づく非線型システムの解析
3. 学会等名 固体地球データ同化に関する研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 Statistical Machine Learning in the Era of Big Data and AI
3. 学会等名 Roundtable Discussion on "New Global Era of Digital Economies"-T20Japan Associated Event- (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 Smart simulation and Smart experimental design
3. 学会等名 NTNU-ISM Joint Workshop on Sustainability and Statistical Machine Learning (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 ビッグデータ、AI、IoT時代のオートメーションとその先
3. 学会等名 アズビル・アカデミー講演会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤博司
2. 発表標題 データ同化による疎計測情報からの乱流遷移流れの再解析技術
3. 学会等名 日本機械学会第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野慎也
2. 発表標題 Data assimilation in highly uncertain systems
3. 学会等名 RIMS Gasshuku-style Seminar : Mathematical science in numerical modeling and data assimilation of planetary atmospheres from Earth and Mars to Venus (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野慎也
2. 発表標題 アンサンブルによる簡易データ同化
3. 学会等名 研究集会「データ科学の応用と展望」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 宇宙科学における撮像観測とデータ同化
3. 学会等名 予測モデリングとその 周辺 -機械学習・統計科学・情報理論からのアプローチ-
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Nakano, Y. Ariyoshi, and T. Higuchi
2. 発表標題 A Python library for parallelised particle filter
3. 学会等名 International Workshop on Data Science 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 On marginal likelihood estimation methods in ensemble-based data assimilation
3. 学会等名 第9回 データ同化ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 Use of kernel regression in ensemble Kalman filters
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Kato, Makiko Ando, and Yasuhiro Fukuzoe
2. 発表標題 Toward Uncertainty Quantification in Satellite Thermal Design,
3. 学会等名 31st International Symposium on Space Technology and Science
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 データ同化手法とその考え方
3. 学会等名 FAMCOワークショップ2017 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 有吉 雄哉, 中野 慎也
2. 発表標題 軌道履歴を用いた破片スペースデブリの物理的特性の推定
3. 学会等名 第64回理論応用力学講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 粒子フィルタと深層学習が拓くエミュレーション技術
3. 学会等名 第35回日本ロボット学会学術講演会 (RSJ2017)
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 ニーズ駆動型イノベーションと気象ビジネス
3. 学会等名 日本気象協会 技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 シミュレーションをAIにつなぐ生成モデル
3. 学会等名 東京大学新学術領域研究スパースモデリング (SpM)主催平成29年度第2回公開シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nakano and Y. Futaana
2. 発表標題 Identification of signal and noise components in spacecraft neutral particle data using a bi-level mixture model
3. 学会等名 The 4th IEEE International Conference on Data Science and Advanced Analytics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nakano
2. 発表標題 Support project for data fusion computation: Current status and future prospects
3. 学会等名 International Workshop on Sharing, Citation and Publication of Scientific Data across Disciplines (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 S. Nakano
2. 発表標題 Various aspects of data assimilation techniques and expansion of their applications
3. 学会等名 The 8th Symposium on Polar Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 中野 慎也, 有吉 雄哉, 樋口 知之
2. 発表標題 Python による並列計算用粒子フィルタライブラリ開発
3. 学会等名 第8回 データ同化ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 統計数理アプローチによる建設分野の技術革新の可能性 ~維持管理/防災・減災へのビッグデータ、AIの活用
3. 学会等名 第22回土木鋼構造研究シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中野 慎也
2. 発表標題 2次元流れ場の推定に関するいくつかの事例
3. 学会等名 研究集会「データ科学の応用と展望」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Nakano
2. 発表標題 A non-parametric model for estimating a divergence-free vector field
3. 学会等名 US-Japan Workshop on Bridging Fluid Mechanics and Data Science (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 データ同化入門
3. 学会等名 iTHESデータ同化スクール
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 背景・状態空間モデルとカルマンフィルタ
3. 学会等名 平成28年度統計数理研究所公開講座「粒子フィルタとその応用」
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 樋口知之
2. 発表標題 実世界データの機械学習
3. 学会等名 センサエキスポジャパン2016 - SICE計測部門・システムインテグレーション部門共催セミナー
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 中野慎也
2. 発表標題 データ同化の手法とその最近の動向
3. 学会等名 日本機械学会講習会「流体とインフォマティクス～最適化，統計データ分析で見えてくる新しい世界～」(招待講演)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 加藤博司，安藤麻紀子，福添森康
2. 発表標題 衛星熱設計における不確定性定量化を目指して
3. 学会等名 平成28年度宇宙科学情報解析シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shin'ya Nakano
2. 発表標題 Kernel regression approach for ensemble Kalman filters
3. 学会等名 The 3rd RIKEN International Symposium on Data Assimilation / 7th Annual Japanese Data Assimilation Workshop (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 伊庭 幸人，樋口知之	4. 発行年 2017年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 160
3. 書名 岩波データサイエンス	

1. 著者名 伊庭 幸人, 樋口知之	4. 発行年 2018年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 184
3. 書名 ベイズモデリングの世界	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>統計数理研究所  <a href="http://www.ism.ac.jp/index.html">http://www.ism.ac.jp/index.html</a>          樋口知之ホームページ  <a href="http://www.ism.ac.jp/~higuchi/researchmap">http://www.ism.ac.jp/~higuchi/researchmap</a>  <a href="https://researchmap.jp/matrix">https://researchmap.jp/matrix</a>          統計数理研究所  <a href="http://www.ism.ac.jp/index.html">http://www.ism.ac.jp/index.html</a>          樋口知之ホームページ  <a href="http://www.ism.ac.jp/~higuchi/researchmap">http://www.ism.ac.jp/~higuchi/researchmap</a>  <a href="http://researchmap.jp/matrix">http://researchmap.jp/matrix</a></p>
---

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	中野 慎也  (Nakano Shin'ya)  (40378576)	統計数理研究所・モデリング研究系・准教授   (62603)	
研究分担者	加藤 博司  (Kato Hiroshi)  (70722536)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・研究開発部門・研究開発員   (82645)	
研究分担者	有吉 雄哉  (Ariyoshi Yuya)  (80735019)	統計数理研究所・データ同化研究開発センター・特任研究員   (62603)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 協力者	中村 和幸  (Nakamura Kazuyuki)	明治大学・総合数理学部・教授  (32682)	