

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 5 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360219

研究課題名(和文)空間従属性を考慮した新たな面補間法の開発とその実用化

研究課題名(英文)Development and application of new areal interpolation methods considering spatial dependence

研究代表者

堤 盛人(TSUTSUMI, MORITO)

筑波大学・システム情報系・教授

研究者番号：70292886

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円、(間接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：社会経済データの多くは空間的な単位毎のデータとして提供されており、その分析に際しては集計単位毎の変換を表す面補間が必要となる場合が多い。本研究では、空間データの特性である空間的従属性や空間的異質性を考慮しながら精度よく面補間を行う手法を、空間統計学・空間計量経済学を拡張することで開発した。また、面補間に関連する問題である可変単位地区問題についても検討した。開発した手法は空間詳細なデータセットの構築に応用した。

研究成果の概要(英文)：Most socio-economic data are provided as spatially aggregated data, and areal interpolation, which is a process of transferring data from one zonal system to another, is often required in socio-economic analysis. This study develops areal interpolation methods incorporating spatial phenomena, such as spatial dependence and spatial heterogeneity, by extending spatial statistics and spatial econometrics. We also discuss the modifiable areal unit problem (MAUP), which is deeply related to the areal interpolation problem. Our developed methods are applied to estimations of spatially detailed datasets.

研究分野：空間統計学・空間計量経済学

科研費の分科・細目：土木工学・土木計画学・交通工学

キーワード：空間従属性 空間統計学 空間計量経済学 集計データ 面補間

1. 研究開始当初の背景

社会経済データの多くが空間的な単位毎の集計データとして提供されており、市町村合併などの社会的なデータ環境の変化や分析の目的に応じて、異なる集計単位毎へのデータ変換が必要となる場合が多い。そのようなデータの変換は、面補間(areal interpolation)と呼ばれ、計量経済学分野や空間統計学と呼ばれる分野などを中心に様々な手法が提案されてきた。しかしながら、例えば市販のメッシュ単位のデータの多くは、未だに行政単位別の作成されたデータを簡便な方法により面補間されており、提供されるデータの精度に関して大きな問題がある。

一方で、近年、空間統計学と空間計量経済学の二つの学問分野が目覚ましい進展を遂げている。両分野においては、空間データの基本的な特性である空間的自己相関(近接した2地点のデータが相互に依存関係にあり、結果として特性値が類似した傾向を持つという性質)や空間的異質性(データの特性値が場所毎に異なるという性質)を考慮した方法論が活発に議論されている。両分野の方法論を応用することで、空間的自己相関や空間的異質性(ここでは両者を総称して「空間的従属性」と呼ぶこととする)を考慮した精度の良い面補間が構築できる可能性がある。しかしながら、空間統計学・空間計量経済学のアプローチを面補間に応用した研究はまだまだ少なく、議論の余地がある。

2. 研究の目的

空間統計学と空間計量経済学を応用することで、空間的従属性を考慮しながら精度よく面補間を行うことのできる新たな方法を開発する。また、実際のデータへの適用を通じて、開発する方法の実用化を目指す。

3. 研究の方法

初年度において、面補間のための手法(「面補間法」)に関する既存研究を体系的に整理すると同時に、我が国及び諸外国において面補間を必要とする状況並びに実用化の観点からデータ環境の実情を整理し、次年度以降の実証分析に相応しいデータセットを構築した。その後、空間統計学・空間計量経済学を応用した面補間法を開発する。また、開発した手法と既往の面補間法との理論的関係を明確にするとともに、実データを用いて面補間の精度を比較することで、開発した手法の有用性を吟味した。さらに、集計単位の取り方が分析結果に影響を及ぼす問題である Modifiable Areal Unit Problem(MAUP)についても、理論・実証の両面から考察した。

最終年度においては、開発した手法を我が国及び諸外国の空間詳細なデータセットの構築に応用し、構築したデータセットを、開

発手法の計算コードとともに公開し、成果の周知と利用促進のための準備を行った。

4. 研究成果

(1) 既往の面補間法の整理

分野横断的な文献レビューを行うことで、既往の面補間法を図1のように整理した。

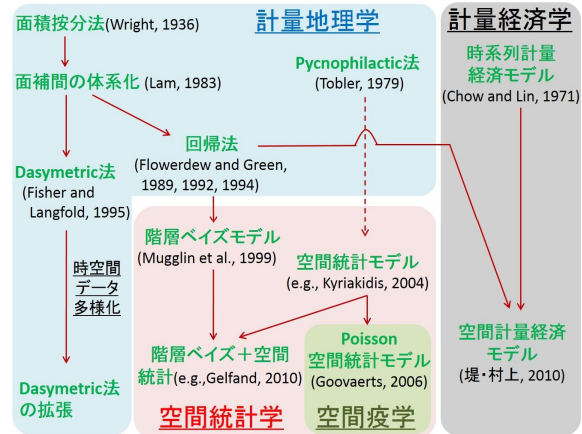


図1: 既往の面補間法の整理

ここでは、次のことを明らかにしている。

- ・少なくとも、計量地理学、空間統計学、計量経済学、空間疫学の4つの分野で面補間が議論されてきた。
- ・面補間の研究が最も活発な計量地理学では、面積に応じた比例配分を行う面積按分法や補助データを用いた比例配分を行う dasymetric 法などの確定論的手法が活発に議論されてきた。
- ・空間統計学では、2000年前後から面補間が議論されはじめた。近年はベイズモデルと空間統計モデルを組み合わせたモデルが発達してきている。
- ・計量経済学では、時系列データの集計単位変換(例えば年次別のデータの月次別のデータへの変換)のための手法が比較的古くに議論されている。一方で、(空間)計量経済学を空間データの面補間に応用した例は、堤・村上(2010)などの例外を除き、皆無である。
- ・各分野の面補間法はほぼ独立して発展を遂げてきた。このような整理を通し、本研究では次の議論が重要であるとの認識に至った。
- ・空間計量経済学：面補間の研究が希薄であり、その基礎理論の構築は重要である。特に、空間統計学とは異なり、ベイズ理論を応用した研究が皆無であり、ベイズ空間計量経済モデルの面補間への有用性を示すことの意義は大きい。
- ・空間統計学：既に一定の研究蓄積が見られるものの、面補間の研究が最も盛んな計量地理学とはほぼ独立に発達を遂げてきた。

より精緻な空間統計モデルを構築するには、計量地理学の知見も考慮しながらモデルを議論することが有用である。

以上の2点について、次節、でそれぞれ説明する。

ところで、集計単位の設定がその後の分析に影響することは、可変単位地区問題(MAUP)として知られている。本問題は、面補間と関連の深い問題として知られており、これまでに幅広く議論されてきた。しかしながら、未だ括弧としたMAUPの解決方法は確立されておらず、集計単位のとり方に優劣をつけることは難しい。

本研究では、MAUPへの空間統計学・空間計量経済学の応用についても次節で議論する。

(2)面補間法の開発

空間計量経済学を応用した面補間法

堤・村上(2010)において代表的な空間計量経済学のモデルである Spatial lag model (SLM)を応用した手法を提案し、方法論としては一応の完成に至っている。しかし、実際の適用に際して、データをそのまま用いるか、割合(率)あるいは面積当たりの密度等へ基準化を行うか否かで異なる結果が得られるという問題がある。この問題は「面補間の結果が分散項の与え方に依存するという問題」と同じと見なせる。そこで本研究では、

堤・村上(2010)をベイズ理論の枠組みで再構築した。それにより、空間的従属性だけでなく分散の不均一性も考慮した面補間法を提案した。ここでは、Markov-Chain Monte-Carlo法を用いて各集計データの分散を内生的に推定している。

提案手法と堤・村上(2010)を実証比較することで、分散不均一性を考慮することによる面補間の精度向上を確認している。また、例えば都道府県別人口データを用いた市区町村別人口の面補間の場合であれば、人口の集中する東京都心部や逆に人口の少ない県境で大きな分散値が検出されるなど、本拡張手法が直感と整合する分散の推定値を与えることも確認している。

堤・村上(2010)と本研究での本提案手法は、Expectation-Maximization (EM) アルゴリズムを用いた反復計算により非集計レベルモデルのパラメータを推定する必要があり、計算時間の面で難がある。この点を踏まえ、申請者らは集計メカニズムを考慮した空間計量経済モデルを新たに構築したうえで、より計算効率の良い、次の手順による面補間のアプローチについても議論している。i) 集計レベルモデルを用いてパラメータを推定する。ii) 集計レベルモデルの元となった非集計レベルモデルの予測式で面補間を行う。

本アプローチは、ベイズ空間計量経済モデルを応用した前述の手法とは異なり分散不

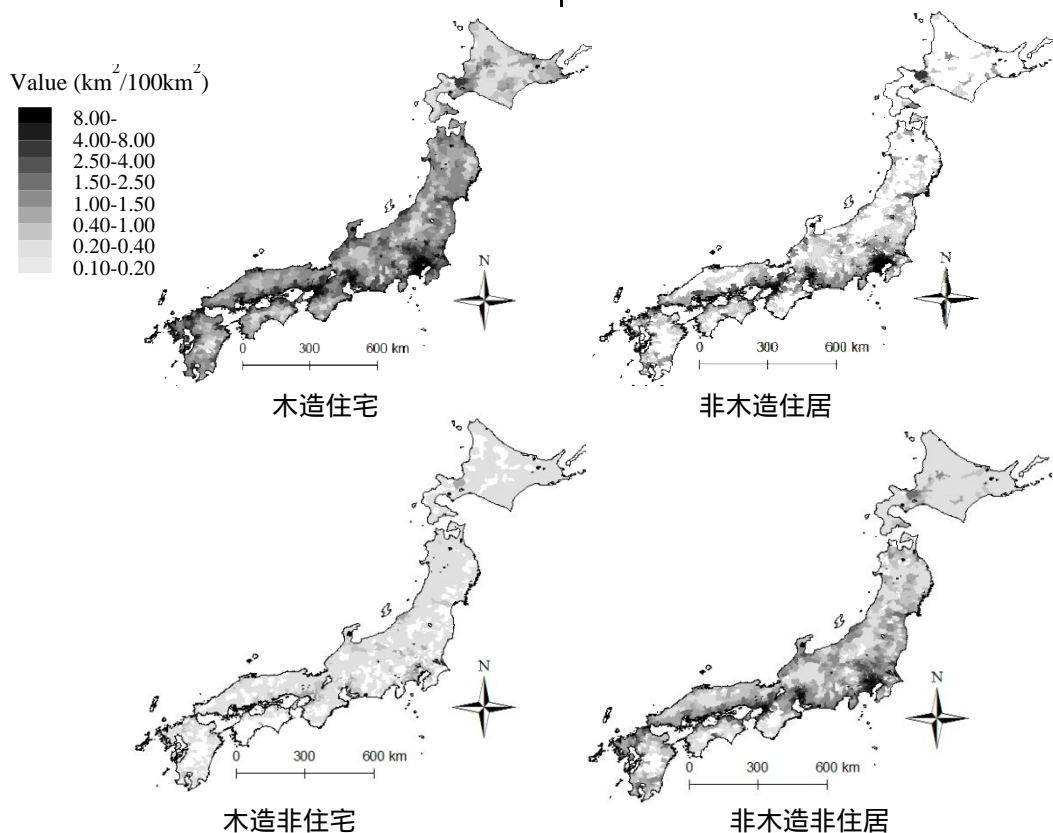


図2：市町村別建築物ストックの推計結果

均一性を考慮していない。しかしながら、本手法を従業者数の面補間に応用することで、実際には同手法の精度が良好であることを確認している。

空間統計学を応用した面補間法

空間統計学の面補間法は、予測誤差分散の最小化という理論的に優れた特性を持つ。一方で、その既往手法の多くは、精度向上のための補助データの活用の点では課題が残されている。計量地理学の多くの既往研究において、補助データを活用することの重要性が指摘されていることから、予測誤差分散を最小化し、かつ補助データを十分に活用する手法の構築は重要である。

そこで本研究では、空間可変パラメータモデルの一種である Geographically weighted regression (GWR) を応用することで、空間統計学の手法と同様に予測誤差分散を最小化しながら、補助データの影響を空間可変パラメータを用いて場所毎に推定する柔軟な面補間法を開発した。本提案手法が計量地理学・空間統計学の代表的な各手法の精度を上回することは実証比較により確認している。

空間計量経済学の MAUP への応用

空間波及効果の抽出が主要テーマの一つである空間計量経済学において、MAUP への対処は重要となる。そこで本研究では、集計メカニズムを明示的に考慮した空間計量経済モデルである(2)節 のモデルを、MAUP の観点から議論する。ここで、集計メカニズムを考慮した統計モデルが MAUP に頑健となることは既往研究で明らかとされており、本空間計量経済モデルもまた MAUP に頑健である可能性がある。

ここでは、シミュレーション実験により、本モデルより推定される空間波及パラメータと構造(回帰)パラメータの挙動を、集計メカニズムを考慮しない従来の空間計量経済モデルと比較した。ここでは、分析結果が集計単位サイズに依存するというスケール問題と、(たとえ集計単位サイズが概ね同一であったとしても)分析結果が集計単位の与え方に依存するというゾーニング問題の両方に着目しながら両手法の挙動を議論した。最後に、構築した手法を実データに適用することで、その有用性を確認した。

空間統計学の MAUP への応用

GWR モデルは MAUP への有効な対処法の一つとして知られている。また、上述のように、集計メカニズムを考慮した統計モデルは MAUP に対して頑健である。従って、集計メカニズムを考慮した GWR モデルの拡張である(2)節 のモデルは、MAUP の下で信頼性の高いパラメータ推定結果を与える一手法で

ある可能性が高いと考えた。

そこで、同モデルの MAUP に対する頑健性を、シミュレーション実験により検証した。その結果、集計の空間スケールが大き過ぎず、かつパラメータの空間変動が局所的過ぎない場合に、提案手法は有効な MAUP への対処法となるということを明らかとした。また、提案手法の MAUP への頑健性は、シミュレーション実験において想定した全ケースについて、従来型の GWR を上回るということもまた確認している。

(3)提案手法の実データへの適用

我が国における適用

我が国におけるデータ環境の実情を整理した。それにより、都市計画分野における重要な原単位である建築物ストック(延床面積)データの整備は必ずしも十分とは言えず、特に住宅ストック・非住宅ストックの両方を全国市区町村について整備したデータは存在しないということを明らかとした。そこで、(2)節 で開発した手法を、市区町村別建築ストックデータの推計(都道府県別データからの面補間)に適用した。また、計量地理学の代表的な手法である面積按分法、dasymetric 法及び空間統計学の代表的な手法である area-to-point kriging についても同様に適用し、各手法の精度を比較した。なお、(2)節 で提案した手法については、計算負荷が大きいため全国を対象とした場合には適用できなかった。今後、例えばベイズ推定の近似手法として近年着目されている Integrated Nested Laplace Approximation などを応用することで計算負荷の問題に対処したいと考える。

本実証分析により、次の点を明らかとした。

- ・空間統計手法(提案手法と area-to-point kriging)の精度は確定論的手法(面積按分法、dasymetric 法)よりも良好。
- ・確定論的手法の残差には顕著な空間的従属性がみられた(即ち、空間的従属性が十分に説明されなかった)。空間統計学の残差からも一定の空間従属性が検出されたものの、その大きさは確定論的手法よりも十分に小さい。
- ・提案手法の精度は area-to-point kriging よりも良好。

以上を要約すると、提案手法の精度は既存の代表的な手法よりも良く、また、確定論的手法と比較すると、空間的従属性を適正に説明するという観点からも提案手法が有用であることを明らかとした。

参考までに、提案手法による建築物ストックの推計結果を図 2 に示す。この図より、例えば主要都市周辺で高い推計値がみられる点や、東海道・山陽新幹線に沿った地域にストックの集中がみられるなど、直感と整合した結果が得られていることがわかる。

最後に、日本エネルギー学会提供の『天然ガスコージェネレーション計画・設計マニュアル』を活用することで、推計した建築物ストックデータを電力需要推計に応用している。

世界における適用

空間詳細な単位毎の社会経済データベースは、例えば将来の気候・社会シナリオ構築のような全球レベルの分析から、例えば発展途上国を対象とした社会経済分析のような国家レベルの分析に至るまでの、あらゆる分

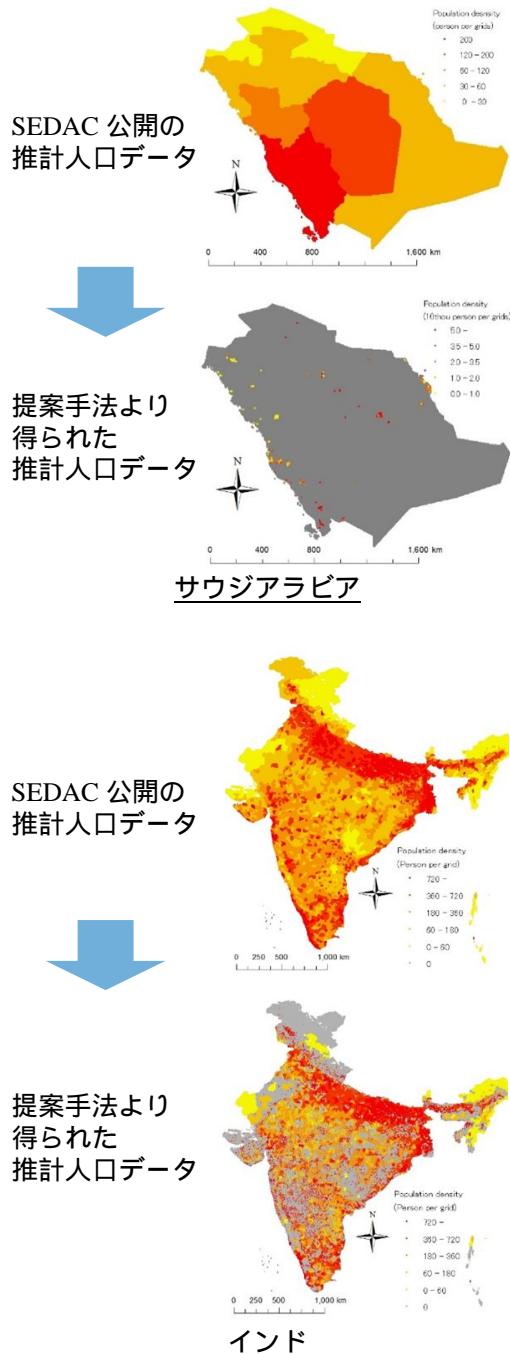


図3：SEDAC 公開の推計人口データと提案手法により得られた推計人口データ

析の基礎となりうる重要なデータである。

コロンビア大学は、SEDAC (<http://sedac.ciesin.columbia.edu/>)にて全球の詳細グリッド(最も細密な単位: 2.5度×2.5度)毎の推計人口データを無償公開している。しかしながら、本データは行政単位毎のデータからの簡便な按分を用いて構築されていると思われる、その人口値は、必ずしも直観に整合しない地域もある(図3参照)。

そこで本研究では、SEDAC 公開の推計人口データを、これまでに提案してきた空間統計手法・空間計量経済手法を用いて補正することで、より信頼性の高い推計人口データセットを構築する。

テストサイトとして選定した、インドとサウジアラビアにおける、SEDAC 公開の人口推計値と、(2)節で開発した空間統計手法により得られた人口推計値を図3に示す。この図より、SEDAC 公開の推計人口は、例えばサウジアラビアにおいては、砂漠部で一定の値を示しており、直感に整合しない。一方で、提案手法より得られた推計結果は、都市部にのみ人口が割り当てられており、直感に整合する。また、インドにおける推計結果からも、提案手法の有用性を確認している。

以上より、提案手法が世界の空間詳細データセットの構築に有用であることを確認した。今後、提案手法を全世界の詳細人口推計に応用する予定である。ここで得られる推計人口データは、その他の社会経済データとともに一般公開する予定であり準備中である。

(4) 成果の周知と利用促進

本研究における一連の成果(既往の面補間法の体系的整理、空間計量経済学・空間統計学を応用した新たな面補間法の開発、面補間法の実証比較)を不動産・空間計量研究室HP(<http://www.surveyor-tsukuba.com/>)にて公開予定である。

さらに、既往の本章(2)で開発した2手法の計算コードについても、本章(3)で構築した建築物ストックと電力需要の両推計データとともに、公開予定である。

なお、本成果の周知の一環として、地理情報システム学会第22回学術研究発表大会にて特別セッションを開催予定であったが、台風の影響で本学会が中止となり実施には至らなかった。周知を目的としたワークショップ等の開催を検討中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計9件)

Sadahiro, Y. and Kobayashi, T.: Exploratory analysis of time series data: Detection of partial similarities, clustering, and visualization. *Computers, Environment and Urban Systems*,

451, 24-33, 2014 (peer-reviewed).
Sadahiro, Y.: A method for comparing numerical variables defined in a region. *Computers, Environment and Urban Systems*, **41**, 65-74, 2013 (peer-reviewed).
貞広幸雄: 変数変換を用いた離散空間上における数値変数比較. 「都市計画論文集」, **48**, 885-890, 2013 (査読有).
津田敏明, 塚井誠人: 小地域補完のための空間集計モデルの適用可能性. 「土木学会論文集 D3」, **69** (5), I391-I400, 2013 (査読有).
Murakami, D. and Tsutsumi, T.: Practical spatial statistics for areal interpolation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, **36** (6), 1016-1033, 2012 (peer-reviewed).
Sadahiro, Y.: Exploratory analysis of polygons distributed with overlap. *Geographical Analysis*, **44** (4), 350-367, 2012 (peer-reviewed).
Tsutsumi, T. and Murakami, D.: New spatial econometrics-based areal interpolation method. *International Regional Science Review*, DOI: 10.1177/0160017612463233, 2012 (peer-reviewed).
村上大輔, 堤盛人: 固有ベクトル空間フィルタリングに基づく面補間. 「土木学会論文集」, **68** (1), 59-69, 2012 (査読有).
村上大輔, 堤盛人: Kriging を用いた実用的な面補間. 「GIS-理論と応用」, **19** (2), 59-70, 2011 (査読有).

[学会発表] (計 12 件)

津田敏明, 塚井誠人: 空間計量経済モデルにおける空間重み行列設定に関する検討. 応用地域学会第 27 回研究発表大会, 京都大学, 2013 年 12 月 14 日.
村上大輔, 瀬谷創, 山形与志樹, 堤盛人: 空間統計モデルを用いた建築物ストックの詳細推計. 応用地域学会第 27 回研究発表大会, 京都大学, 2013 年 12 月 14 日.
Tsuda, T. and Tsukai, M.: Applicability of the spatial aggregation model for small area interpolation. *The VII World Conference of the Spatial Econometrics Association (oral presentation)*, Washington, USA, July 11, 2013.
Murakami, D. Tsutsumi, T.: A Geographically weighted regression-based approach for the Change of support problem, *7th World Conference of the Spatial Econometrics Association*, Washington, USA, July 11, 2013.
津田敏明, 塚井誠人: 空間的異質性を考慮した空間計量経済モデルの開発. 応用地域学会第 27 回研究発表大会, 青森公立

大学, 2012 年 11 月 18 日.
津田敏明, 塚井誠人: 小地域補完のための空間集計モデルの適用可能性. 第 45 回土木計画学研究発表会, 京都大学, 2012 年 6 月 3 日.
村上大輔, 堤盛人: 空間的な相関を考慮した新たな dasymetric 法. 日本写真測量学会平成 24 年度年次学術講演会, 東京大学生産技術研究所, 2012 年 5 月 22 日.
Murakami, M. and Tsutsumi, M.: A new areal interpolation method based on spatial statistics, *International Conference Spatial Thinking and Geographic Information Sciences 2011*, The University of Tokyo, Japan, September 15, 2011.
Murakami, M. and Tsutsumi, M.: Areal interpolation employing Bayesian spatial econometrics. *5th World Conference of the Spatial Econometrics Association*, Toulouse France, 7 July, 2011.
村上大輔, 堤盛人: 固有ベクトル空間フィルタリングに基づく面補間, 第 43 回土木計画学研究発表会, 筑波大学, 2011 年 5 月 29 日.
村上大輔, 堤盛人: 異方性のある空間的相関を考慮した面補間, 日本写真測量学会平成 23 年度年次学術講演会, 東京大学生産技術研究所, 2011 年 5 月 24 日.
Murakami, M. and Tsutsumi, M.: Considering spatial dependence in areal interpolation method based on eigenvector spatial filtering, *Japan Geoscience Union Meeting Makuhari Messe International Conference Hall*, Chiba, Japan, May 25, 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堤 盛人 (TSUTSUMI, Morito)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 70292886

(2) 研究分担者

貞広 幸雄 (SADAHIRO, Yukio)
東京大学・空間情報科学研究センター・教授
研究者番号: 10240722
塚井 誠人 (TSUKAI, Makoto)
広島大学・工学研究院・准教授
研究者番号: 70304409