

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：24405

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K12434

研究課題名（和文）衛星観測データを用いた建築物ストック量の推計

研究課題名（英文）Estimation of Building Stock Using Satellite Observation Data

研究代表者

杉本 賢二（SUGIMOTO, Kenji）

大阪公立大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：70596858

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：持続可能な社会の実現に向けて、人間活動に伴い投入・蓄積・廃棄される物質の挙動を定量評価することが重要である。本研究課題では、衛星観測データを用いて土木構造物ストック量の空間分布を定量化することを目的とする。データ整備が進んでいる日本を対象に、建築物データと人工衛星による観測データとを用いて、関東地方1都4県（茨城県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県）をサンプルとして、建物延床面積の推計式を算出した。得られた推計式を海外の都市に適用することで、精度検証と課題を明らかにした。具体的には、高層建物が多い地域では過小に、沿岸部の工場地帯では過大に推計されることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物質動態分析には経年の統計データが必要であるため、適用範囲は先進国が多く、人口増加と経済成長が著しい発展途上国では、データの入手可能性や精度が分析の制約となっていた。本研究課題により、人工衛星による観測データである夜間光とSARを用いることで、構造物の空間分布を推計可能であることを示した。ただし、高層建物が多い地域では過小推計になっていることから、今後この手法を拡張するとともに検証により推計精度を高めることができれば、世界全体のストック量分布を定量化でき、効率的な資源に向けた物質動態分析に資する基礎的なデータ整備として貢献できる。

研究成果の概要（英文）：To realize a sustainable society, it is important to quantitatively evaluate the behavior of materials that are input, accumulated, and disposed of as a result of human activities. The objective of this research project is to quantify the spatial distribution of the stock of civil engineering structures using satellite observation data. Using building data and satellite observation data for Japan, a prefecture in the Kanto region (Ibaraki, Chiba, Saitama, Tokyo, and Kanagawa), we calculated an estimation equation for the total floor area of buildings. By applying the obtained formulas to cities in other countries, we were able to verify their accuracy and clarify issues. Specifically, the results showed that the total floor area was underestimated in areas with many high-rise buildings and overestimated in coastal industrial areas.

研究分野：空間情報科学

キーワード：建物分布 夜間光 SAR

## 1. 研究開始当初の背景

今日の社会経済は、自然から大量の資源を採取し、それを様々な形に加工した物質を利用したり、そこから得られる社会サービスを活用することにより発展してきた。日本では、総物質投入量(15億トン)に占める蓄積純増(4.5億トン)の割合は30%であるが、2002年まで50%を超えており、その後は減少傾向にあるものの、特に人と構造物が密集する都市域では多量の物質が蓄積している現状がある<sup>1)</sup>。今後の持続可能な社会の実現に向けて、人間活動に伴い投入・蓄積・廃棄される物質の挙動を定量評価することが重要であり、それには物質ストック・フロー分析(Material Stock Flow Analysis; MSFA)が有効である<sup>2)</sup>。

MSFAに関する既往研究では、統計を用いた分析が数多くなされてきた<sup>2)3)</sup>。しかし、これらの推計結果の解像度は、使用する統計の集計単位に依存しているため、都市域や地区といった空間詳細なMSFAが難しい。さらに、分析には時系列のデータが必要になるため、対象地域は統計が整備され、精度も確保されている先進国に限られるという制約があった。そのため、今後、顕著な人口増加と経済成長が予測されている発展途上国では、統計の整備状況や精度に課題があるため、既往研究は少なかった。また、街区や地区での物質動態分析を行うため、経年GISデータを用いた空間詳細なMSFAを行った既往研究もあるが<sup>4)5)</sup>、この場合も分析にはGISデータが整備されている必要があり、統計を用いたMSFAと同様に発展途上国では適用可能であるとは言えない。以上のことから、統計の入手可能性・精度に制約がある発展途上国を含めた世界全体でのMSFAには、空間詳細かつ普遍的で均質な時系列データを用いた推計手法が求められている。

世界全体を対象とした高解像度のデータとして、人工衛星による観測データがある。人工衛星による観測は日々行われており、データの蓄積・公開が進んでいるため、高解像度で時系列のデータが利用可能な環境が整っている。人工衛星による観測データは、国境に関係なく広域を一度に観測可能である。さらに、地表面の状態を物理量として観測しているため、データの収集や集計過程において人為的なバイアスが混入する可能性が低いという、データの均質性に特徴がある。衛星観測データの中でも、夜間における地表面付近の光強度(輝度)を観測した「夜間光データ」は、経済活動と密接な関係があることが示されており、経済指標の補正や都市域の推定に利用されている<sup>6)</sup>。また、衛星からマイクロ波を照射し、地物によって反射や散乱した偏波を計測する「合成開口レーダ(Synthetic Aperture Radar; SAR)」は、建物や橋梁などの、高さのある構造物の密度分布と相関があることが明らかになっている<sup>7)</sup>。これらの背景から、人工衛星による観測データである夜間光とSARを用いることで、構造物の空間分布を精度良く推計できれば、世界全体のストック量分布を定量化でき、効率的な資源に向けた物質動態分析に資する基礎的なデータ整備として貢献できる。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、衛星観測データを用いて土木構造物ストック量の空間分布を定量化することを目的とする。土木構造物の種類は、蓄積量の多い建築物を対象とする。まず、衛星観測データである夜間光及びSARデータを用いて、データ整備が進んでいる日本において、建物面積を推計する手法の開発を試みる。その後、推計式の精度を検証するとともに、海外の都市において推計式を適用することで、地域特性や課題を明らかにする。

## 3. 研究の方法

### (1) 研究フロー

図-1に、本研究の推計フローを示す。最初に、データ整備が進んでいる日本を対象として、建築物データと人工衛星による観測データとを用いた回帰分析により、建物延床面積の空間分布を推計する式を算出する。ここで、回帰式の推定には、大都市部から農村地域まで土地利用が多様な、関東地方1都4県(茨城県、千葉県、埼玉県、東京都、神奈川県)から400メッシュをサンプルとして抽出する。得られた推計式を海外の都市(インドネシア・ジャカルタ市)に適用することで、精度検証と課題を明らかにする。

### (2) 建築物データ

建築物のGISデータとして、ゼンリンの「Zmap TOWN II 2016年度版」を使用した。このデータは、各建築物の形状を表すポリゴンと、各ポリゴンとリンクした建物属性情報が格納されている。GISのジオメトリ演算により平面での建物面積を算出し、それに属性情報の階数を乗じて延床面積が計算される。なお、特に戸建住宅では、階数により床面積がことなる。そのため、算出した延床面積に、都道府県・建物用途別の延床面積補正係数を適用する、各建物の延床面積を補正した。回帰分析を行うために、各建物の延床面積を、夜間光データの空間解像度である500m(15 arc-seconds)メッシュで集計した。図-2に、建物延床面積の空間分布を示す。

### (3) 夜間光データ

夜間光データとして、地球観測衛星Suomi-NPP(Suomi National Polar-orbiting Partnership Mission)に搭載されている可視赤外線放射計群VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)により観測された、夜間における地表付近の輝度データを用いる。データは、Earth Observation Groupe, Payne Institute for Public Policy<sup>8)</sup>により公開されており、翌日にはデータが利用可能な準リアルタイム性が特徴である。また、2012年以降の日別データのほか、雲量などを補正した月別・年別の輝度データも利用できる時系列データとなっている。

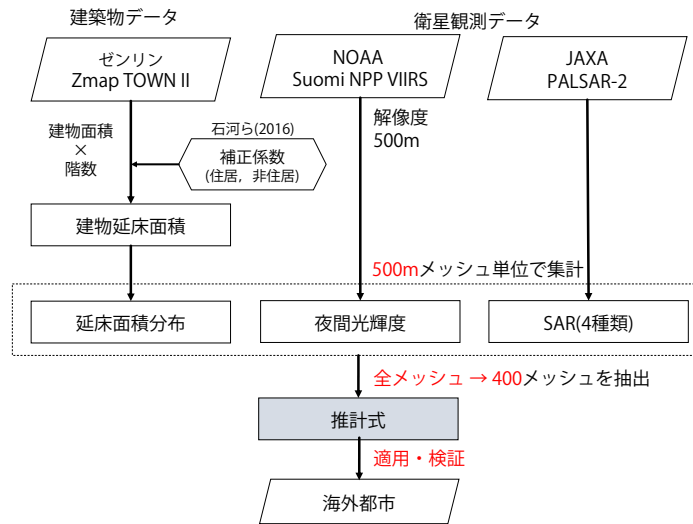


図-1 本研究課題のフロー

#### (4) SAR データ

SAR データは、ALOS2 に搭載された PALSAR-2 により観測された計測値<sup>10)</sup>を用いた。PALSAR-2 では、送信・受信時の偏波を水平(H)と垂直(V)に切り替えることより、4 種類の偏頗(HH, HV, VH, VV)を観測している。このうち、垂直(V)は高さのある地物で散乱する特性があり、高層建物等の建築物が多い地域では反射強度が大きな値となる。なお、PALSAR-2 の画像データは DN 値(Digital Number; 画素値)として表現されており、下記の式を適用することにより後方散乱係数へ変換することができる。

$$\sigma^0 = 10 \log_{10}(DN^2) - 83.0 \quad (1)$$

ここで、 $\sigma^0$ は規格化後方散乱係数[単位：dB]を表している。

#### (5) 推計式

建物面積の推計モデルは、延床面積を目的変数、衛星観測データを説明変数として重回帰分析により推定する。すなわち、

$$Area = a_1 ntl + a_2 hh + a_3 hv + a_4 vh + a_5 vv + b \quad (2)$$

による。ここで、Area：延床面積 [千 m<sup>2</sup>]、ntl：夜間光輝度 [nW/cm<sup>2</sup>/sr]、hh, hv, vh, vv は SAR の後方散乱係数[dB]、a は係数、b は切片、をそれぞれ表している。

### 4. 研究成果

#### (1) 推計式

関東地方の約 9 万メッシュの中から、400 メッシュをランダムに抽出し、回帰分析を行った。表-1 に、回帰分析の結果を示す。自由度調整済み決定係数は 0.775 であり、回帰式は高い説明力を有している。説明変数をみると、夜間光(ntl)の t 値が 32 を超えており、輝度の寄与度が高いといえる。また、SAR の偏波のうち、HH(送信時に水平、受信時に水平)は有意とはならなかった

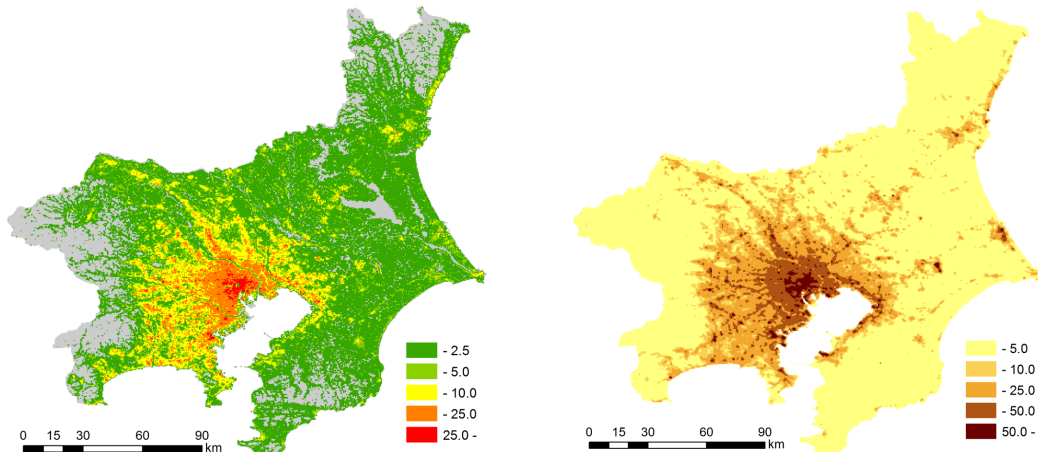


図-2 建物延床面積(左)及び夜間光輝度(右)の空間分布

表 1 回帰分析の結果

変数		係数	t-value	p-value	
切片	b	17.565	4.995	<0.001	
夜間光	ntl	a <sub>1</sub>	3.223	32.230	<0.001
	hh	a <sub>2</sub>	-0.053	-0.128	0.898
SAR	hv	a <sub>3</sub>	-1.333	-1.785	0.075
	vh	a <sub>4</sub>	1.722	2.450	0.015
	vv	a <sub>5</sub>	1.116	2.516	0.012

$R^2 = 0.778, \text{adj-}R^2 = 0.775$

ものの、それ以外の VH と VV といった垂直(V)の偏波は t 値が 2 以上あり、統計的に有意であるといえる。

(2) 精度検証

400 サンプルを抽出して推計した回帰式を用いて、関東地方の全サンプルで誤差の空間分布を検証した。図-3 に、推計誤差の空間分布を示す。東京都や神奈川県では誤差率が小さくなっていることから、人工衛星による観測データを用いることで精度良く建物の空間分布を推計できることが示された。その一方で、霞が関などの水部では、実測値より推計値が小さくなる過小推計となっており、茨城県太平洋側や房総半島では推計値が過大になる地域特性が見られた。それぞれの地域を詳しく検証すると、前者の水部では、建物がほとんどないにも関わらず、HV や VV の値が大きくなっていることが、誤差に影響している。また、後者の沿岸部における工業地帯では、とりわけ石油産業の工場操業により発せられる光により輝度が大きくなることで、推計値が大きくなることがわかった。

推計式の精度を検証するため、実測値  $\hat{y}$  と推計値  $y$  との差による RMSE (Root Mean Square Error)を算出した。RMSE は、

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\hat{y} - y)^2} \tag{2}$$

による。関東地方での推計誤差は、 $RMSE = 28.8$  [千  $m^2$ ]であり、説明変数が夜間光のみの場合は  $RMSE = 29.234$  [千  $m^2$ ]であることから、SAR を含めることで精度が良くなることが示された。

(3) 海外都市における適用

関東地方で推計した式を、海外の都市に適用して精度検証を行った。ここで、海外の都市として、インドネシアのジャカルタ市を対象とした。同地域の建物データとして、AW3D ビルディング 3D データを用いた。このデータは、衛星画像から取得された建物高さや建物形状を統合したデータであり、機械学習による自動抽出技術が活用されている<sup>10)</sup>。なお、このデータは建物の高さ[m]情報が建物属性として格納されているため、1階 = 3.5m として延床面積を算出した。

ジャカルタ市でも、関東地方と同様に、夜間光の空間解像度である 500m に合わせて建物及び SAR データを集計し、建物面積の推計を行った。図-4 に、実測値と推計値の散布図を示す。図中の線は 45 度線であり、線より上の領域は過大推計を、下の領域は過小推計を、それぞれ意味

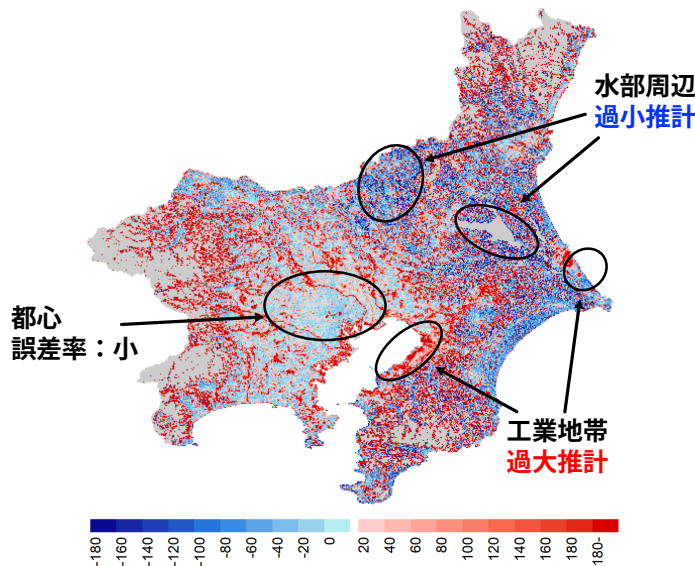


図-3 推計誤差(%)の空間分布

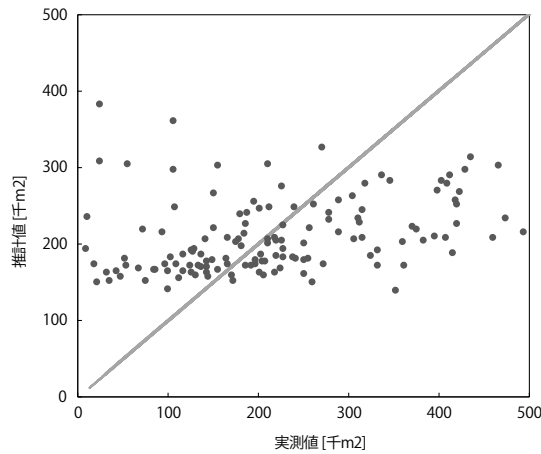


図-4 実測値と推計値との比較

している。RMSEは214.9[千m<sup>2</sup>]であり、関東地方よりも誤差が大きくなっていることが明らかになった。

#### (4) 制約と課題

本研究課題では、以下のような制約や課題がある。まず、夜間光の輝度は光の特性により、当該メッシュだけでなく、周辺地域にも影響する。すなわち、高層建物が多く立地する地区では輝度が高くなる一方で、隣接する地区の輝度も高くなる傾向がある。そのため、今後の推計において周辺の画素値を含める検討が必要である。ただし、その場合は空間解像度が低くなるため、スケールとのトレードオフが発生する。次に、さらなる他地域での適用と精度検証が不可欠である。本研究課題の背景として挙げたデータの入手可能性が適用の課題となっているが、最近では住宅地図と衛星画像からの建物3Dデータの構築手法が提案されており<sup>11)</sup>、それらが利用可能になれば、より多くの都市で検証することができ、それらの結果を踏まえて、地域や世界全体での分析することが期待できる。

#### 文献

- 1) 環境省 (2022) 令和4年版 環境白書。
- 2) Tanikawa, H., T. Fishman, K. Okuoka and K. Sugimoto (2015) The weight of society over time and space: A comprehensive account of the construction material stock of Japan, 1945-2010. *Journal of Industrial Ecology*, Vol.19, No.5, pp.778-791.
- 3) Krausmann, F., D. Wiedenhofer, C. Lauk, W. Haas, H. Tanikawa, T. Fishman, A. Miatto, H. Schandl, and H. Haberl (2017) Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 201613773.
- 4) Tanikawa, H. and Hashimoto, S. :Urban stock over time : spatial material stock analysis using 4d-GIS, *Building Research & Information*, 37 (5), pp.483-502, 2009.
- 5) 青柳淳之介, 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2015) 名古屋市中心部における4d-GISを用いた都市の経年変化によるMSFAに関する研究. *土木学会論文集 G (環境)*, Vol.71, No.6, pp.II\_467-II\_474.
- 6) Henderson, J.V., A Storeygard and D. N. Weil (2012) Measuring Economic Growth from Outer Space. *American Economic Review*, 102 (2), pp.994-1028.
- 7) 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 谷川寛樹 (2014) 合成開口レーダと建築物面積との相関性評価. *土木学会論文集 G (環境)*, Vol.70, No.5, pp.I\_79-I\_85.
- 8) Earth Observation Group, Payne Institute for Public Policy : <https://eogdata.mines.edu/products/vnl/>
- 9) JAXAALOS 利用推進研究プロジェクト: 全球 PALSAR-2/PALSAR/JERS-1 モザイク 及び森林・非森林マップ([https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/fnf\\_j.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/jp/dataset/fnf_j.htm))
- 10) NTT Data, RESTEC : AW3D ビルディング 3D データ (<https://www.aw3d.jp/products/building/>)
- 11) 山野寺瞭太, 岡田佳佑, 秋山祐樹, 宮崎浩之, 宮澤聡, 菅澤翔之助, 小川芳樹 (2022) 住宅地図と衛星画像を活用した建物高密度地域における建物データの開発, CSIS DAYS 2022 研究アブストラクト集, D09.

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 SUGIMOTO Kenji, TANI Shintaro, YAGI Takamasa	4. 巻 79
2. 論文標題 EVALUATION OF THE IMPACT OF FLOODED UNDERPASSES ON EVACUATION ROUTES IN OSAKA PREFECTURE	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	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.22-22003	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 Okada K., Nishiyama N., Akiyama Y., Miyazaki H., Miyazawa S.	4. 巻 X-4/W3-2022
2. 論文標題 DEVELOPMENT OF DETAILED BUILDING DISTRIBUTION MAP TO SUPPORT SMART CITY PROMOTION -AN APPROACH USING SATELLITE IMAGE AND DEEP LEARNING?	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	6. 最初と最後の頁 189 ~ 196
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.5194/isprs-annals-X-4-W3-2022-189-2022	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 杉本賢二, 松村寛一郎, 一ノ瀬俊明
2. 発表標題 夜間光データを用いた人流把握の可能性
3. 学会等名 環境科学会2021年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本賢二
2. 発表標題 コロナ禍における夜間光輝度と人流データとの相関性評価
3. 学会等名 第30回地理情報システム学会研究発表大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 衛星夜間光を用いた停電地域と期間の特定
3. 学会等名 第29回地理情報システム学会学術発表大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 南海トラフ巨大地震の津波による建物由来の災害廃棄物発生量の推計 -和歌山県を対象として-
3. 学会等名 日本環境共生学会第23回(2020年度)学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 衛星観測データを用いた建物延床面積推計モデルの構築
3. 学会等名 環境科学会2020年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 南海トラフ巨大地震の津波による災害廃棄物量の推計
3. 学会等名 第28回地理情報システム学会研究発表大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 南海トラフ巨大地震の津波による災害廃棄物発生量の推計
3. 学会等名 CSIS DAYS 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 経年建物GISデータの構築と建物動態の時空間分析
3. 学会等名 環境科学会2022年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本賢二, 奥岡桂次郎, 秋山祐樹
2. 発表標題 経年建物GISデータによる大阪市における建物動態の分析
3. 学会等名 CSIS DAYS 2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 杉本賢二	4. 発行年 2019年
2. 出版社 NTS出版	5. 総ページ数 506
3. 書名 中山裕則, 杉村俊郎監修「リモートセンシングの応用・解析技術」	

〔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	秋山 祐樹  (AKIYAMA Yuki)  (60600054)	東京都市大学・建築都市デザイン学部・准教授    (32678)	
研究 分 担 者	奥岡 桂次郎  (OKUOKA Keijiro)  (90714436)	岐阜大学・社会システム経営学環・准教授    (13701)	

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