

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25241027

研究課題名(和文)世界の長期発展に係る鋼材のダイナミックマテリアルフロー分析

研究課題名(英文)Dynamic material flow analysis for steel in the world from a long-term perspective

研究代表者

松野 泰也 (Matsuno, Yasunari)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：50358032

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、世界全体での鋼材のダイナミックMFAを実施した。具体的には、鋼材の最終用途(自動車、土木、建築、機械など)に関して2050年までのストック量を推計するとともに、需要量、使用済み製品からのスクラップ発生量を推計した。統計データ等ダイナミックMFAを実施するためのデータが得られない地域に関しては、夜間光衛星画像やGISを用いて、ストック量を推計した。さらには、国際貿易に伴う取引量(グローバルマテリアルフロー)を推計するとともに、途上国でのスクラップの回収状況を調査、推計することで、将来需要を鑑みたスクラップの利用に関して提言を得た。

研究成果の概要(英文)：We have conducted a dynamic MFA to depict the global in-use steel stock, demand and generation of scraps from all end-uses, e.g. automobile, civil engineering, building, machinery, etc. towards 2050. We have also tried to use nighttime light images and GIS to estimate the in-use steel stocks used for civil engineering and building whose data for the dynamic MFA were not available. Then, global material flows associated with steel were investigated. Collection and use of steel scraps in developing countries were explored, and appropriate ways to use steel scraps were discussed.

研究分野：リサイクル工学

キーワード：ライフサイクル評価 マテリアルフロー分析 衛星画像

1. 研究開始当初の背景

2011年における世界の粗鋼生産量は15億トンを超え、鋼材ストック量はその10倍程と推計される。今後、地球温暖化の抑制と天然資源保全のためには、社会中の製品に蓄積された素材を二次資源として有効活用する必要がある。そのためには、世界大での素材の需要量、ストック量および廃棄量の把握が必要であり、2000年頃より国内外において、マテリアルフロー解析(Material Flow Analysis, MFA)による世界各域の各種素材のフローとストックの解析が盛んに行われてきた。

その中でも本研究の代表者らは、MFAに時間軸を導入したダイナミックモデル化を行い、将来の人口増大、経済(GDP/人)発展に伴う社会中の素材ストック量の変化、そして各年のストック量の差から素材需要量を推計する手法を開発し、鋼材等各種素材に適用してきた。さらに、データの欠落によりダイナミックMFAを適用することのできない地域には、衛星画像や地理情報システム(Geological Information System, GIS)を用い素材ストック量を推計する手法を開発した。

平成23年10月に米国ではNASAが新たな人工衛星SUOMI NPPを打ち上げ、平成24年4月から、搭載されたセンサーモジュール(Visible /Infrared Imager /Radiometer Suite, VIIRS)で撮影された画像データの受信が開始された。VIIRSは、それまでに用いられていたセンサと比べ、高解像度等が飛躍的に向上したため、このVIIRSデータを用いれば、研究が飛躍的に進捗することが確信された。本研究は、これまでの研究代表者らの成果を基に、世界全体での鋼材のダイナミックMFAを完成させるために実施する。

2. 研究の目的

本研究の目的は、鋼材の最終用途(自動車、土木、建築、機械など)に関して2050年までの需要を推計するとともに、社会でのストック量、使用済み製品からのスクラップ発生量を推計することで、世界全体での鋼材のダイナミックMFAを完成させることにある。統計データ等ダイナミックMFAを実施するためのデータが得られない地域に関しては、夜間光衛星画像やGISを用いて、ストック量を推計する。さらには、国際貿易に伴う取引量(グローバルマテリアルフロー)を推計するとともに、途上国でのスクラップの回収状況を調査、推計することで、将来需要を鑑みたスクラップの利用に関して提言を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

鋼材は、世界で最も消費量の大きい金属素材であり、主として社会基盤を構成する多種の製品に用いられている。従って、消費量の大きい用途等、影響の大きい因子に関して重

点的に取り組み、推計の精緻化に取り組むのが望ましい。対象とする分野、用いる手法も多岐にわたる。そこで、本研究を遂行するにあたり、研究代表者と4名の研究分担者(総勢5名)からなる研究体制を構築した。以下、項目ごとに手法を説明する。

1) ダイナミックMFAと夜間光衛星画像を用いた鋼材ストック量、需要量、スクラップ発生量の推計

統計データ等により解析可能な国に関して、ダイナミックMFAを実施し、2012年に至るまでの全用途の鋼材ストック量を推計した。

夜間光衛星画像に関しては、1996年から2010年にかけてのRadiance Calibrated Data, RCDを入手した。SUOMI NPPにより撮影されたVIIRSデータによる夜間光画像に関しては、2013年1月及び2014年5月画像を、観測回数を考慮し合成することで近似年間画像(図1)を作成した。



図1 VIIRSによる夜間光衛星画像

合成された画像に、バックグラウンドの削除、ガスフレアに起因する光を削除した。そしてOak Ridge National Laboratory (ORNL)が作成した人口分布データLandScanを用い、夜間光衛星画像から都市部を抽出した。更に、各緯度と赤道とのピクセル面積の比を算出し、比を輝度に掛け合わせることで空間補正を行った。

そして、土木・建築鋼材ストック量と夜間光強度との相関を解析し、他の地域のストック推計へ適用した。得られた回帰式から統計データが不足している国を含む世界全体の土木建築鋼材蓄積量を推計する。なお、対象は世界の夜間光の99.5%を占める輝度上位119の国と地域とした。

さらに、ロジスティック曲線を用い、2050年までの世界の土木・建築用鋼材蓄積量を予測した。なお、各国の飽和値は、既に飽和傾向が見られた日本の47都道府県の土木鋼材蓄積量と人口密度との関係から相関式を得て、各国の1人あたり土木鋼材蓄積量の飽和値を設定した。建築用途に関しては、アジアとその他地域に分け、先進国における蓄積量と1人あたりGDPとの関係から飽和値を設定した。

2) GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) および夜間光衛星画

像を用いた都市域ストックの推計

GISと衛星夜間光データを用いてマテリアルストックの推計モデルの開発を行った。まず、詳細なストックデータを既に先行研究で把握している日本国内にて、基礎的なモデルの確立を目指し、対象地域を1都4県（東京都・神奈川県・千葉県・埼玉県・茨城県）とした。大都市の中心部から郊外部まで適用可能な汎用性の高い推計モデルの開発を検討した。対象地域について、衛星夜間光データを用いて活動単位である都市域を抽出し、その分類された都市域ごとに建物延床面積・道路面積の整備を行い、衛星夜間光と建設ストックとの相関性の検討を行った。対象年は2003年と2011年とした。基礎モデルにより1都4県で推計精度の検証を行い、日本全域に対しても同様の検討を行うことで推計精度及び汎用性の検証を行った。さらに本手法をアジアの都市域に適用した。

3) 下水道構造物として地下に埋設された鋼材の蓄積量と将来の飽和蓄積需要量の推計

土木鋼材のなかでも下水道管渠に代表される地下構造物については、蓄積量の推計が相対的に困難であり、構造物に埋設された鋼材の回収性も地上構造物とは異なる。そこで、各国の法規・指針、入手可能な下水道管渠整備統計および文献調査に基づいて、下水道管渠に関する鋼材蓄積量および飽和量のグローバル推計を実施した。

4) 途上国における使用済み製品からの鋼材スクラップ回収、利用および鋼の混入現況調査とモデル化

発展途上国、特にGDP/人が2,000 USD以下のバングラデシュなどにおける金属素材のマテリアルフローはほぼ解明されていない。特に鉄鋼についてはその国際的な統計資料が、転炉・高炉を中心に作成されており、小さな電炉や伸鉄に頼る途上国のデータはほぼ存在しないことが分析を阻んできた。そこで、バングラデシュの鋼材に関するマテリアルフロー分析を詳細化、その途上で鋼の混入可能性を含め分析を実施した。その中で課題抽出を行い、こうした経済成長レベルにある諸国にとってのあるべき資源循環の姿について提言を行った。

5) 鉄を対象とした国際貿易に伴う取引量(グローバルマテリアルフロー)の推計

鋼材は、自動車および産業機械、輸送機械(鉄道)、建設機械など機械類としての国際取引量が大きくマテリアルフローとストックへの影響が大きい。また、中古製品としての取引量が多いことも知られているが、実態が正確に把握されていないのが現状である。そこで、国際貿易統計(UN-Comtradeなど)および廃棄物産業連関に基づくマテリアル

フロー分析(WIO-MFA)モデルなどから得られる組成情報をもとに、鉄鋼材料および鉄含有製品(おもに自動車・機械)を介した国際貿易に伴う鉄の取引量(グローバルマテリアルフロー)の同定を行った。更に、グローバルマテリアルフローを時系列で解析する事により、世界各国の鉄の見掛け消費量、1人当たりの見掛け消費量の推計を実施した。

4. 研究成果

1) ダイナミック MFA と夜間光衛星画像を用いた鋼材ストック量、需要量、スクラップ利用可能性の推計

ダイナミック MFA により推計された世界の鋼材ストック量の推移を図2に示す。2012年における世界の鋼材蓄積量は173億トンと推計され、アジア地域の鋼材蓄積量は約92億トンであり全体の約53%を占めていることが分かった。1980年においてはアジアの建築鋼材蓄積量は全体の約22%であり、この30年でアジアが急激に蓄積量を伸ばしている。この急激な増加は中国とインドに起因する。

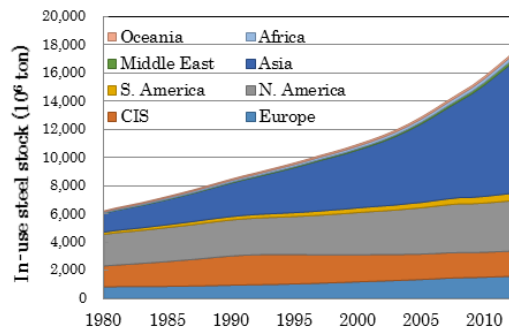


図2 ダイナミック MFA による世界鋼材蓄積量の推計(地域別)

土木用途における夜間光と鋼材ストック量の相関を解析した結果を図3に示す。全地域、用途で水準5%で決定係数が0.8を超える相関を確認した。

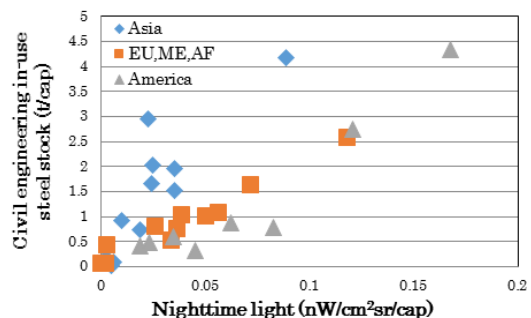


図3 土木用途における夜間光と鋼材ストック量の相関

得られた相関式を用いた、1996~2013年の間の土木建築鋼材ストック量の推計結果を図4に示す。1996年には13億トンであった蓄積量が2013年には倍増し、26億トンに達したことが分かった。

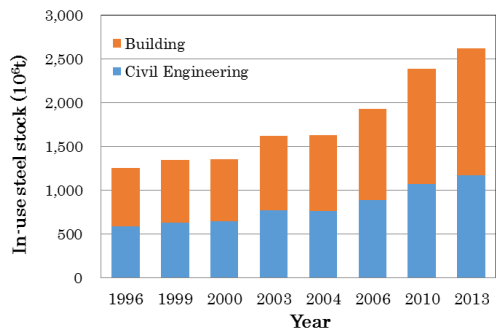


図4 1996-2013年における世界の土木・建築用途の鋼材ストック量の推移

得られたストック量データとGDPを説明変数とし、国ごとにロジスティック曲線を用いたフィッティングを行い2050年までの世界の土木・建築用鋼材のストック量、需要量およびスクラップ排出量を予測した。ストック量に関する結果を図5に示す。

2050年の鋼材ストック量は土木用途が173億トン、建築用途が390億トンと推計された。地域別にみるとアジア地域のストック量は400億トンであり、これは全体の7割以上を占める。全体の15%に相当する86億トンが統計データの不足でこれまで推計が困難であった地域に蓄積されると判明した。2050年における土木用鋼材の投入量及びスクラップ排出量は、それぞれ3.5億トン、2.5億トンと推計された。建築鋼材の投入量及び排出量に関しては、2050年における値はそれぞれ9.2億トン、7.3億トンと推計された。

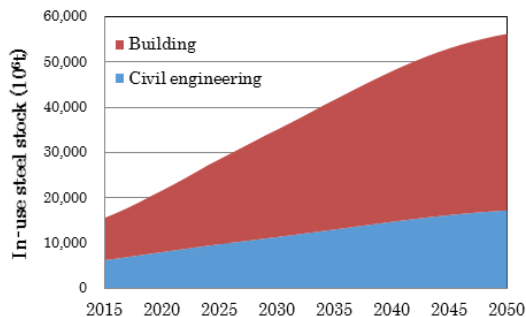


図5 世界の土木・建築用鋼材のストック量の推計結果

土木建築鋼材はリサイクル性が非常に高く、563億トンで約35から40年の世界の鋼材消費がまかなえると考えられる。良質かつ多量の二次資源である土木建築鋼材ストックの有効活用が望まれる。

2) GIS (Geographic Information System : 地理情報システム) および夜間光衛星画像を用いた都市域ストックの推計

2003年と2011年における衛星夜間光と建物延床面積の回帰分析を行ったところ、いずれの年・ストックにおいても衛星夜間光との高い相関が確認された(表1)。特に線形での回帰分析では決定係数がいずれの年、ストックに対しても0.9を上回っており、非常に高

い相関が確認された。非線形を用いても決定係数が0.8以上となり、高い適用性が示唆された。また衛星夜間光に対する係数へのt値がいずれの場合でも30を上回ることから、衛星夜間光を用いて建物延床面積を推計することが統計的に有意であることが示された。

表1 1都4県における回帰分析の結果

推計対象	延床面積				
	線形		非線形		
式の形	係数	t値	係数	t値	
2003	衛星夜間光	0.000578***	125.5	0.89***	42.5
	定数項	-1.64***	-7.73	0.00125***	-39.7
R ²		0.99		0.88	
2011	衛星夜間光	0.000820***	68.5	0.881***	43.2
	定数項	-1.32***	-4.71	0.00196***	-38.5
R ²		0.95		0.88	

※*** : 0.1%有意、** : 1%有意、* : 5%有意
R2 : 自由度調整済み決定係数

日本の基盤データより抽出した基礎モデルをもとに作成した推計モデルを用いることで、より高い精度で推計が可能となることが示された。そこで本推計モデルを使用して、世界全体の建物延床面積の推計を行った。図6に示すように、広範囲にわたって建築物の分布が推計された。本結果は非常に汎用性が高く、空間解像度も都市域別と活動領域の実態に適応していることから、グローバルモデルとの結果を比較することが可能である。

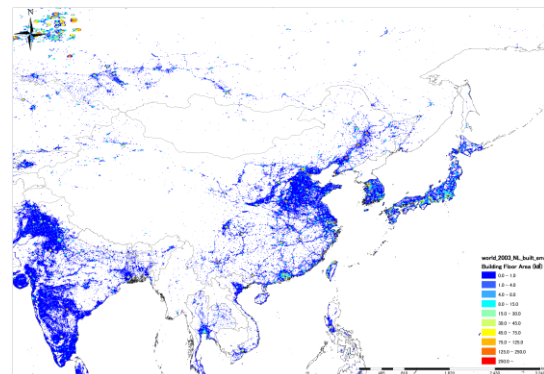
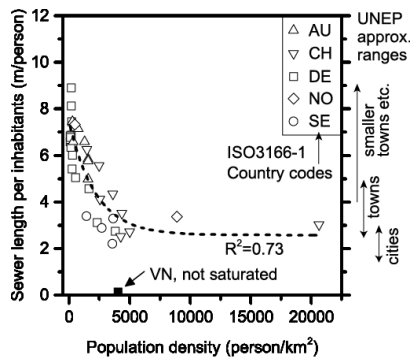


図6 東アジア推計結果

3) 下水道構造物として地下に埋設された鋼材の蓄積量と将来の飽和蓄積需要量の推計

先進国の都市部では、新規の下水管路整備工事が行われることは少ない。このことから、十分に成熟した都市においては、地域ごとの下水管路の量は飽和すると予想し、OECD諸国のうちHigh incomeに分類され、且つ下水道整備率100%の国・都市を抽出して分析をおこなった。その結果、飽和時における下水道管渠の人口あたり長さや都市の人口密度との間に高い相関があることを見出した。

各国法規・規格、OECDモデルおよび文献調査から、下水管渠を管径別にみると、鋼材系の管は小径が多く比率が概ね一定であること、鉄筋コンクリート管は大径が多くその比率も概ね共通することを見出した。



Data are collected from Gebhard et al., Ofwat report, and Venkatesh et al. Population <100,000 are excluded for analytical consistency with the global population data used for the stock estimation.

図7 下水道管渠における鋼材原単位の飽和

これらの知見から、鋼材推計に必要な管径・材質別の管渠長さ分布モデルを構築した。以上の管渠長さ飽和モデルおよび管径別・材質別管渠長さ分布モデルと、人口・人口密度分布のグローバルモデルから、下水道管渠に含まれる飽和時の鋼材量をグローバルレベルで推計した。また、この飽和量推計とグローバルレベルの下水道整備率(United Nations)を組み合わせることでグローバルレベルの下水道管渠の鋼材蓄積量を推計した。

4) 途上国における使用済み製品からの鋼材スクラップ回収、利用および鋼の混入現況調査とモデル化

今回主たる分析対象としたバングラデシュの鉄に関するマテリアルフローを図8に示す。

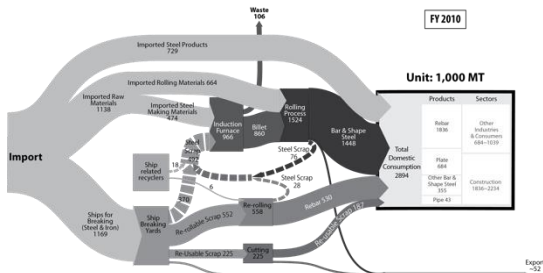


図8 バングラデシュの鉄のマテリアルフロー(2010年度)

鋼材としての輸入が73万トン、冷鉄源(スクラップとビレットなど)が114万トンある一方、船舶として輸入され鉄源となるものが117万トンある。その中で鋼材が鋼材としてリユースされるものが19万トン存在することも特徴的である。バングラデシュの鋼材フローのかなりの部分を船舶解体由来の鉄源が占める。ここでの解体、選別等のプロセスを現地調査により詳細に確認したところ、次工程への鋼等の混入はほぼ起こっていないことが分かった。特に伸鉄(Re-rolling)に関して言えば、船体を手作業で切断したスクラップ100%で、他の鉄源は混入せずに操業しているケースがほとんどであり、その他の素材

が混入する理由はほぼ無い。同じく発展途上ではあるがより経済成長レベルの高いインドでも同種の調査を行ったところ、より多様な使用済製品が発生、リサイクルされるため、より混入の可能性が高いことを確認した。

バングラデシュに限らず発展途上国での主たる鋼材需要は土木・建築であることが多い。これらが今後数十年の経済発展を支えていくことを考えれば、品質の低い鋼材を供給することは望ましくない。従って、高品質な原料を低レベルな技術で加工している産業については技術力の向上を、逆に低品質な原料を比較的高レベルな技術で加工している産業については原料に関する知見を提供することが肝要である。さらに、ユーザー側にはどのような要素が鋼材の質を決定付けるのかについて正しく理解し、最終的には社会が正しい判断をするように誘導することが必要である。

5) 鉄を対象とした国際貿易に伴う取引量(グローバルマテリアルフロー)の推計

国際貿易に伴う鉄の移動量を対象として、鉱石・製品・スクラップ等を含めた網羅的な国際マテリアルフローデータを時系列で整備した。図9に、2005年の国際貿易に伴う鉄の移動量を示す。世界全体の国際貿易を介した鉄の取引量は 1.15×10^9 t-Feであり、その内訳は、鉱石が43.2%、銑鉄や鋼材等の素材が35.5%を占めると得られた。各国間の取引量をみると、鉄鉱石の主要産出国(ブラジル、オーストラリア、インドなど)から粗鋼の主要生産国(中国、日本、アメリカなど)への取引が上位を占めており、231の国・地域間の鉄の移動量のうち上位の10位までの移動量が占める割合は27.2%に達し、上位の40位までの移動量が占める割合は43.7%に達すると得られた。特筆すべきは、世界における資源の流れに対してBRICS(ブラジル、ロシア、インド、中国、南アフリカ)およびNext eleven(N-11:韓国、フィリピン、パキスタン、イラン、インドネシア、エジプト、トルコ、ナイジェリア、バングラデシュ、ベトナム、メキシコ)の諸国が占める割合である。世界の資源輸入量に対する中国を除いたBRICS諸国が占める割合は2.8%であり、N-11を加えた15か国を見ても僅かに15.7%に留まると得られた。



図9 世界の国際貿易に伴う鉄の取引量(上位40 flow)

世界全体の鉄の見掛け消費量に対する各地域のシェアは、1995年には、アジアが41%、西欧が20%、北米が16%、その他地域が23%であり、2010年には、アジアが65%、西欧が10%、北米が6%、その他が19%であった。中国の需要拡大を受けて、アジア地域の見掛け消費量が拡大している事が示された。一方で、今後の人口増加や経済発展に伴い需要の拡大が予想されるアフリカ地域は、いずれの年においてもそのシェアは3%程度にとどまると得られた。2010年時点においても、アフリカ地域の1人当たりの見掛け消費量は、アジアや欧米に比べて、未だ小さい事から、長期的には経済発展に伴い需要の拡大が生じる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計16件)

- 1) M. Sujauddin, R. Koide, T. Komatsu, M. M. Hossain, C. Tokoro, and S. Murakami, Ship Breaking and the Steel Industry in Bangladesh A Material Flow Perspective, Journal of Industrial Ecology, 査読有り, 2016(印刷中), DOI: <http://dx.doi.org/DOI:10.1111/jiec.12423>
- 2) H. Liang, H. Tanikawa, Y. Matsuno, L. Dong, Modeling In-Use Steel Stock in China's Buildings and Civil Engineering Infrastructure Using Time-Series of DMSP/OLS Nighttime Lights, Remote Sensing, 査読有, Vol.6, No.6, 2014, 4780-4800 DOI: 10.3390/rs6064780
- 3) K. Nakajima, K. Nansai, K. Matsubae, and T. Nagaska, Material Flow of Iron in Global Supply Chain, ISIJ International, Vol. 54 No. 11, 2014, 2657-2662 DOI: <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.54.2657>
- 4) R. Hattori, S. Horie, F. Hsu, C. D. Elvidge and Y. Matsuno, Estimation of in-use steel stock for civil engineering and building by nighttime light images, Resources, Conservation & Recycling, 査読有(2013) <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.007>

〔学会発表〕(計32件)

- 1) 藤本郷史, 河村千秋, 松野泰也: 世界の下水道構造物に蓄積された鋼材量推計とその飽和量予測, pp.312-313, 第11回日本LCA学会研究発表会講演要旨集, 2016年3月2日~3月4日, 東京大学柏キャンパス(千葉県千葉市)
- 2) Y. Matsuno, Dynamic Modeling of

Material Flow and Sustainable Resources Management, World Engineering Conference and Convention 2015, December 1st, 国立京都国際会館(京都府京都市左京区)(2015)(Invited)

- 3) K. Yoshida, K. Okuoka, Hiroki Tanikawa, Anthropogenic Disturbance of Nations with Geomorphologic Change, ISIE2015 8th International Society of Industrial Ecology, July 7-10, Stowe, USA (2015)
- 4) R. Hattori and Y. Matsuno, Estimation of global in-use steel stock by nighttime light images during 1996-2013, APAN 39th Conference, March 3rd, 福岡国際会議センター(福岡県博多区)2015
- 5) K. Nakajima, Y. Otsuka, Y. Iwatsuki, K. Nansai, H. Yamano, K. Matsubae, S. Murakami and T. Nagasaka, Global supply chain analysis of nickel: importance and possibility of controlling the resource logistics, 8th International Conference on Society & Materials, SAM8, Liège, Belgium, 20-21 May 2014

6. 研究組織

(1)研究代表者

松野 泰也 (MATSUNO YASUNARI)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 50358032

(2)研究分担者

谷川寛樹 (TANIKAWA HIROKI)
名古屋大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 90304188

藤本郷史 (FUJIMOTO SATOSHI)
宇都宮大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 30467766

村上 進亮 (MURAKAMI SHINSUKE)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 40414388

中島 謙一 (NAKAJIMA KENICHI)
国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・主任研究員
研究者番号: 90400457