

平成 30 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15H01750

研究課題名（和文）サプライチェーンが産み出す価値と環境・資源ストレスの統合的ホットスポット分析

研究課題名（英文）Integrated Hotspot Analysis of Values and Environmental and Resource Stresses Produced in the Supply Chain

研究代表者

森口 祐一（Moriguchi, Yuichi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30157888

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 31,000,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、国内産業および輸入原料を含む国産製品のサプライチェーンを対象として、それが産み出す社会価値と、地域レベルおよび地球レベルで発生する環境・資源ストレスの統合的ホットスポット分析の枠組みを確立することを目的とした。輸入資源の国際サプライチェーン分析、地域における再生可能エネルギー供給システム、産業廃棄物の地域間分析、サプライチェーンの地震リスクといった数多くの事例分析を実施し、それぞれ潜在的なストレス・リスク要因のホットスポットを特定した。さらに、分析方法のアルゴリズムおよび原単位のデータベースをソフトウェアに実装することで、ホットスポット分析の枠組みの汎用化を目指した。

研究成果の概要（英文）：This study aims at developing a framework of integrated hotspot analysis of social values, environmental and resource stresses produced in the supply chains of domestic products including domestic industries and imported raw materials. Through a lot of case studies, such as international supply chain analysis of imported resources, regional supply systems of renewable energy, interregional analysis of industrial waste, and earthquake risks of supply chains, we identified respective hotspots of potential stress/risk factors. Moreover, we developed a software in which the algorithm and database are implemented for generalizing the framework of hotspot analysis.

研究分野：産業エコロジー

キーワード：環境・資源ストレス リスク要因 社会価値 国際物質フロー分析 鉱物資源 地域資源 再生可能エネルギー 地震リスク

1. 研究開始当初の背景

サプライチェーン全体を把握して、そこに潜在するリスク要因やストレス要因（環境影響や資源消費）を管理することが、事業継続計画（BCP）や社会的責任（CSR）の観点からも重要性を増している。一方で、適切なサプライチェーンの構築は、地域内外・国内外において社会価値を産み出す。こうした社会価値や環境・資源ストレスのホットスポット（どこに改善のための労力を集中させるべきか）の特定・評価は、製品の改善やサプライヤの選定などの意思決定を指南しうる。ライフサイクル評価（LCA）はホットスポット分析にも適した概念の上に成り立っているが、分析の枠組みとデータの両面からホットスポット分析への適用は未成熟であった。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究課題では、国内産業および輸入原料を含む国産製品のサプライチェーンを対象として、それが産み出す社会価値と、地域レベルおよび地球レベルで発生する環境・資源ストレスのホットスポット分析の枠組みを確立することを目的とした。数多くの事例分析を実施し、地域レベルの調査や国際物質フロー分析を活用して、それぞれ潜在的なストレス・リスク要因のホットスポットを特定した。さらに、分析方法のアルゴリズムおよび原単位のデータベースをソフトウェアに実装することで、ホットスポット分析の枠組みの汎用化を目指した。

3. 研究の方法

(1) サプライチェーンのストレス要因の実態調査

上記の目的の達成には、まずサプライチェーンの潜在的なストレス要因を把握する必要がある。そのため、事例調査や外部の研究者や実務者との議論を通して、現状および将来的なストレス要因の実態を調査した。

(2) サプライチェーンの社会価値の定量化

資源の有限性や機能とのデカップリング、資源効率や環境効率に関する世界的な動向をレビューした上で、サプライチェーンの社会価値について検討した。特に、資源消費とのデカップリングのための方策の1つとして資源の価値向上が考えられることから、サプライチェーンにおける資源の社会価値の定量化を検討した。価値の評価には主観が伴うと考えられたため、ここでは物理的な特性値から機能を定量化する手法を構築した。

(3) 輸入資源の国際サプライチェーン分析

国際的な鉱物資源のサプライチェーンについて、潜在的なリスク要因を広範に把握するための枠組みを設計した。ニッケルを対象

として、採掘・製錬段階における供給障害の事例を収集するとともに、鉱山や製錬所の所在情報や要因別リスク情報を整理した。また、ニッケル鉱石の産出国における生態系の多様性を背景に、ストレス要因の一つとして各国の採掘に伴う土地改変量を推計した。さらに、供給障害に関わる要因別の発生件数と、資源採掘に伴う土地改変面積に加えて、特定の鉱山への鉱石生産の集中度を取り上げ、それぞれについて定量的に解析した。

(4) 地域における再生可能エネルギー供給システムの分析

種子島を事例として、農林業から発生する未利用資源、再生可能資源の供給速度を調査した。さらに、これらを有効利用することにより得られるサプライチェーン全体への波及効果に関する基礎データを収集、整備して、資源消費および社会価値について分析した。

(5) 産業廃棄物のホットスポットの地域間分析

国内の地域間産業連関表を用いて、地域別・部門別の需要や供給に起因する、地域別・種類別の産業廃棄物の発生量を評価した。各地域における各最終需要部門に起因して、どの地域のどの内生部門に需要が発生し、どの地域で各種類の産業廃棄物がどれだけ発生しているか、6次元の分析を行った。特に、地域間分析の精度を高めるため、各都道府県の産業廃棄物発生量の調査結果を入手し、地域別・産業別の発生原単位を算定した。

(6) サプライチェーンの地震リスクの分析

工業統計調査の個票データより、全国の事業所の住所データ（約22万件）を引用した。地震予測については、南海トラフ巨大地震の予測震度および今後30年の地震発生確率（震度ごと）のメッシュデータを入手した。さらに、化学製品275品目については、指標の精度を高めるため、国内生産拠点（のべ2,252工場）の生産能力の市場調査データに加え、それらの所在地を独自に調査した。

(7) ホットスポット分析の枠組みの確立とソフトウェア実装

サプライチェーンの脆弱性評価[雑誌論文1]をベースとして、ストレス・リスク要因のホットスポット分析の枠組みを確立した。さらに、その枠組みを実装したソフトウェアを開発した。

4. 研究成果

(1) サプライチェーンのストレス要因の実態調査

レアメタルを含む資源やエネルギーの分野の専門家と、それらの安定確保の問題やサプライチェーンに潜む様々なストレス要因について議論した。また、欧米におけるLCAの動向に精通した専門家から、社会LCAのデ

データベースや評価指標の最新動向について情報提供を受けるとともに、サプライチェーン管理への適用可能性について議論した。

(2) サプライチェーンの社会価値の定量化
資源は、そのライフサイクルの中で、物質としての特性が決定される材料を対象とした。機能を発現しているライフステージが使用段階であることに着目し、その工業規格で規定されている項目を物性値として参照して、使用中の物質ストック量の果たす機能量の変化を評価する手法を開発した。様々な異なる次元の複数の物性値が要求されていることから、包絡分析法 (DEA) を各評価軸が従属であるとの仮定において修正した手法を開発した。普通鋼における1967年から2015年の質量と機能量の変遷を評価し、機能量は質量より約1.2倍の増加を果たしてきたことを示した [学会発表 12・14・15・21・23]

(3) 輸入資源の国際サプライチェーン分析
リスク要因を広範に把握するために、環境・社会・経済・地政・技術の5分類による枠組みを提示した。ニッケルを事例として、鉱物資源の供給障害に関する事例を扱う Web ニュースや報告書等を対象とした検索により、81件の供給障害に関する事例を抽出した (図1)。時勢に応じて社会的な関心が高いものの事例が多く収集される傾向があると考えられた。資源利用の持続可能性を高める上では、従来の関心に加えて、生物多様性への影響やジェンダー差別、教育など今までに注視されにくかったリスク要因にも配慮をする必要があることが示唆された。

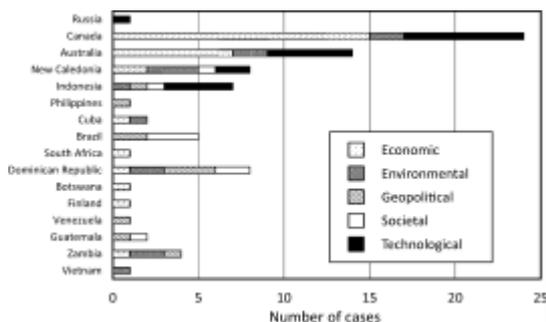


図1 ニッケルの調達に係る各種のリスク要因の国別・要因別の報告件数 (1967~2016年) [雑誌論文 16]

(4) 地域における再生可能エネルギー供給システムの分析

地域資源の利活用によって、化石資源を代替できるだけでなく、地域産業の活性化を通して社会価値が創造される可能性を示した。分析対象とした種子島には、基幹産業としてサトウキビが栽培されており、製糖工場において原料糖に変換されている。発生するバガス(搾りかす)を燃料として利用するため、製糖工場は化石燃料をほぼ投入することなく稼働しており、余剰エネルギーも存在する。近年、人口減少などによる作付面積の減少と、

気象条件の変動により十分な収穫量を確保できず、製糖工場の採算性が悪化している。それに対して、余剰エネルギーを島内で利用できるように外販することで、製糖工場の収益性を改善しながら化石資源消費量を削減できる可能性に加え、エネルギー外販に必要な設備の導入によって、結果的に地域の木質バイオマスなど他の未利用資源の利用や、排熱を用いた新たなプロセスの導入に結び付く可能性を、シミュレーションなどによって明らかにした [雑誌論文 12~15]

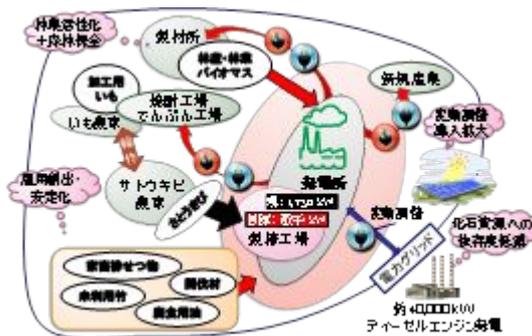


図2 種子島における地域資源と分散型エネルギーシステムの概念図

(5) 産業廃棄物のホットスポットの地域間分析

地域別・部門別の最終需要に起因する、地域別・種類別の産業廃棄物発生量を分析することができた。例えば、関東における飲食料品への民間消費支出に起因する産業廃棄物 (動物のふん尿) の発生量が北海道や東北、九州など全国に分布しているのに対して、北海道や九州については、多くの割合が自地域で発生しているといった、地域依存度の差異が明らかになった (図3)。

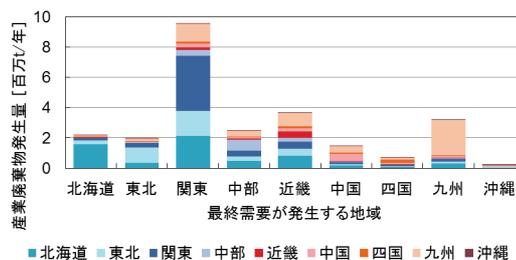


図3 各地域における飲食料品への民間消費支出に起因する動物のふん尿の地域別発生量 [学会発表 27]

(6) サプライチェーンの地震リスクの分析

工業統計調査による全国の事業所の住所データを経緯度に変換し、地震予測 (南海トラフ巨大地震の予測震度および今後30年の地震発生確率) のメッシュデータと対応させることで、約1,500品目について出荷金額に基づく地震リスク指標を算定した [学会発表 3]。同様に、独自に調査した化学製品の国内生産拠点の所在地も地震予測のメッシュデータと対応させて、生産能力に基づく地震リスク指標を算定した。

(7) ホットスポット分析の枠組みの構築とソフトウェア実装

任意の製品に対してストレス要因となる国内生産プロセスや輸入原料, 逆にストレス要因のホットスポットとなる原料から波及的に影響を受ける製品を特定し, それらの経路をサンキー図によって可視化する機能によって, 製品とストレス要因(原料)の関係を双方向で分析できるソフトウェアを実装した。さらに, 地震リスクのホットスポットとなる原料について, 国内生産拠点の分布を地震予測マップ(南海トラフ巨大地震および地震発生確率)に可視化する機能を付加した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計18件)

- 1) Nakatani, J., Tahara, K., Nakajima, K., Daigo, I., Kurishima, H., Kudoh, Y., Matsubae, K., Fukushima, Y., Ihara, T., Kikuchi, Y., Nishijima, A., Moriguchi, Y. (2018): A graph theory-based methodology for vulnerability assessment of supply chains using the life cycle inventory database, *Omega* 75, pp. 165-181 [査読有] DOI: 10.1016/j.omega.2017.03.003
- 2) Yokoi, R., Nakatani, J., Moriguchi, Y. (2018): Calculation of characterization factors of mineral resources considering future primary resource use changes: A comparison between iron and copper, *Sustainability* 10 (1), pp. 267: 1-18 [査読有] DOI: 10.3390/su10010267
- 3) Daigo, I., Kiyohara, S., Okada, T., Okamoto, D., Goto, Y. (2018): Element-based optimization of waste ceramic materials and glasses recycling, *Resources, Conservation & Recycling* 133, pp. 375-384 [査読有] DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.11.012
- 4) Kikuchi, Y., Kanematsu, Y., Yoshikawa, N., Okubo, T., Takagaki, M. (2018): Environmental and resource use analysis of plant factories with energy technology options: A case study in Japan, *Journal of Cleaner Production* 186, pp. 703-717 [査読有] DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.110
- 5) Shimizu, T., Tsukushi, Y., Hasegawa, K., Ihara, M., Okubo, T., Kikuchi, Y. (2018): A region-specific analysis of technology implementation of hydrogen energy in Japan, *International Journal of Hydrogen Energy*, in press [査読有] DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.128
- 6) Shimizu, A., Okubo, T., Kikuchi, Y. (2018): Simulation-based analysis of sewage sludge treatment considering regional, social, and technological characteristics, *Computer-Aided Chemical Engineering*, in press [査読有]
- 7) Nakatani, J., Konno, K., Moriguchi, Y. (2017): Variability-based optimal design for robust plastic recycling systems, *Resources, Conservation and Recycling* 116, pp. 53-60 [査読有] DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.09.020
- 8) Zhang, Q., Nakatani, J., Wang, T., Chai, C., Moriguchi, Y. (2017): Hidden greenhouse gas emissions for water utilities in China's cities, *Journal of Cleaner Production* 162, pp. 665-677 [査読有] DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.042
- 9) Nakajima, K., Daigo, I., Nansai, K., Matsubae, K., Takayanagi, W., Tomita, M., Matsuno, Y. (2017): Global distribution of material consumption: Nickel, copper, and iron, *Resources, Conservation & Recycling* 133, pp. 369-374 [査読有] DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.029
- 10) Daigo, I., Iwata, K., Oguchi, M., Goto, Y. (2017): Lifetime distribution of buildings decided by economic situation at demolition: D-based lifetime distribution, *Procedia CIRP* 61, pp. 146-151 [査読有] DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.221
- 11) Kikuchi, Y., Oshita, Y., Mayumi, K., Hirao, M. (2017): Greenhouse gas emissions and socioeconomic effects of biomass-derived products based on structural path and life cycle analyses: A case study of polyethylene and polypropylene in Japan, *Journal of Cleaner Production* 167, pp. 289-305 [査読有] DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.179
- 12) Kikuchi, Y., Ouchida, K., Kanematsu, Y., Ohara, S., Fukushima, Y. (2017): Retrofit energy integration for selective fermentation in cane sugar mills under hot/cold energy availability, *Journal of Chemical Engineering of Japan* 50 (4), pp. 297-308 [査読有] DOI: 10.1252/jcej.16we130
- 13) Kanematsu, Y., Oosawa, K., Okubo, T., Kikuchi, Y. (2017): Designing the scale of a woody biomass CHP considering local forestry reformation: a case study of Tanegashima, Japan, *Applied Energy* 198, pp. 160-172 [査読有] DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.021

- 14) Ouchida, K., Fukushima, Y., Ohara, S., Sugimoto, A., Hirao, M., Kikuchi, Y. (2017): Integrated design of agricultural and industrial processes: A case study of combined sugar and ethanol production, *AIChE Journal* 63 (2), pp. 560-581 [査読有] DOI: 10.1002/aic.15374
- 15) 兼松祐一郎・大久保達也・菊池康紀 (2017): 農林業地域における産業共生の計画プロセスのアクティビティモデルとデータモデル, *化学工学論文集* 43 (5), pp. 347-357 [査読有] DOI: 10.1252/kakoronbunshu.43.347
- 16) 佐々木翔・松八重一代・中島謙一・村上進亮・長坂徹也 (2017): 責任あるサプライチェーンの実現に向けたニッケル資源利用に関わるリスク要因の整理と解析, *日本 LCA 学会誌* 13 (1), pp. 2-11 [査読有]【第9回 日本 LCA 学会論文賞】
- 17) 菊池康紀・尾下優子・福島康裕 (2016) 帰結的ライフサイクル思考に基づく離島地域のエネルギーシステム設計, *ペトロテック* 39 (6), pp. 461-467 [査読無]
- 18) Nakatani, J., Maruyama, T., Fukuchi, K., Moriguchi, Y. (2015): A practical approach to screening potential environmental hotspots of different impact categories in supply chains, *Sustainability* 7 (9), pp. 11878-11892 [査読有] DOI: 10.3390/su70911878
- [学会発表](計 29 件)
- 1) 中島謙一: Global distribution of hidden flows induced by consumption of metals, *World Resources Forum* 2017 (2017 年 10 月 24 日 ~ 25 日) The International Conference Centre Geneva (Switzerland)
- 2) 菊池康紀: 種子島における産学公民の連携への取り組み, *日本学術会議 公開シンポジウム「社会協働と地域社会における社会ビジョン創成への挑戦」* (2017 年 9 月 5 日) 西之表市民会館 (鹿児島県西之表市)【招待講演】
- 3) 中谷隼: Assessment of supply chain Vulnerability to Earthquake Risks, *Joint ISIE-ISSST 2017 Conference* (2017 年 6 月 25 日 ~ 29 日) The University of Illinois at Chicago (USA)
- 4) Zhang, Q.: Impacts of urban configuration on resource and energy efficiency of water infrastructure in China, *Joint ISIE-ISSST 2017 Conference* (2017 年 6 月 25 日 ~ 29 日) The University of Illinois at Chicago (USA)
- 5) 栗島英明: Development of evaluation methodology for community resilience based on a workshop of the local residents, *Joint ISIE-ISSST 2017 Conference* (2017 年 6 月 25 日 ~ 29 日) The University of Illinois at Chicago (USA)
- 6) 菊池康紀: A regional empowerment by industrial symbiosis involving agriculture and forestry: A case study of remote island in Japan, *Joint ISIE-ISSST 2017 Conference* (2017 年 6 月 25 日 ~ 29 日) The University of Illinois at Chicago (USA)
- 7) 大内田弘太郎: System design of combined sugar and bioethanol production based on analysis integrating agricultural and industrial processes, *Joint ISIE-ISSST 2017 Conference* (2017 年 6 月 25 日 ~ 29 日) The University of Illinois at Chicago (USA)
- 8) 中島謙一: Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel, *11th Society and Materials International Conference* (2017 年 5 月 15 日 ~ 16 日) Gløshaugen campus, The Norwegian University of Science and Technology (Norway)
- 9) 佐々木翔: 責任あるニッケル資源利用に向けたサプライチェーンリスク要因解析, *第 12 回 日本 LCA 学会研究発表会* (2017 年 3 月 1 日 ~ 3 日) 産業技術総合研究所 (つくば)
- 10) 中駄将人: 生産資源の安定的供給に向けたクリティカリティ評価手法の構築, *第 12 回 日本 LCA 学会研究発表会* (2017 年 3 月 1 日 ~ 3 日) 産業技術総合研究所 (つくば)
- 11) 吾妻優美: 金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築, *第 12 回 日本 LCA 学会研究発表会* (2017 年 3 月 1 日 ~ 3 日) 産業技術総合研究所 (つくば)
- 12) 河村洋佑: 提供サービスに基づいた物質ストック変遷の分析, *第 12 回 日本 LCA 学会研究発表会* (2017 年 3 月 1 日 ~ 3 日) 産業技術総合研究所 (つくば)
- 13) 佐々木翔: Extraction of risk factors behind the international supply chain of nickel, *EcoBalance 2016* (2016 年 10 月 3 日 ~ 6 日) 京都テルサ (京都)
- 14) 松井大輔: Evaluation method of function and functionality-wise quantity performed by materials thorough their life cycle, *EcoBalance 2016* (2016 年 10 月 3 日 ~ 6 日) 京都テルサ (京都)
- 15) 太田暁: Functionality-wise evaluation method based on MIPS: A case study on frame structures, *EcoBalance 2016* (2016 年 10 月 3 日 ~ 6 日) 京都テルサ (京都)
- 16) 中谷隼: Vulnerability assessment of

- supply chains using the life cycle inventory database, EcoBalance 2016 (2016年10月3日~6日) 京都テルサ (京都)
- 17) Zhang, Q.: Environmental impact assessment of China's sulfur dioxide pollution through the supply chains, EcoBalance 2016 (2016年10月3日~6日) 京都テルサ (京都)
- 18) 中島謙一: Recent global trends in flows and apparent consumptions of nickel copper and iron, The Joint 12th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and the 5th ISIE Asia Pacific Conference (2016年9月28日~30日) 名古屋大学 (名古屋)
- 19) 佐々木翔: Analysis on risk factors behind the international supply chain of nickel, The Joint 12th ISIE Socio-Economic Metabolism Section Conference and the 5th ISIE Asia Pacific Conference (2016年9月28日~30日) 名古屋大学 (名古屋)
- 20) 吾妻優美: 金属材料の耐腐食性機能の定量評価手法の構築, 日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会 (2016年9月21日~23日) 大阪大学 豊中キャンパス (大阪)
- 21) 河村洋佑: 材料需要量の時系列変遷モデルの構築, 日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会 (2016年9月21日~23日) 大阪大学 豊中キャンパス (大阪)
- 22) 中駄将人: 資源のクリティカリティ評価手法の構築, 日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会 (2016年9月21日~23日) 大阪大学 豊中キャンパス (大阪)
- 23) 松井大輔: 機能量による鉄鋼材料の資本評価手法の構築, 日本鉄鋼協会 第172回秋季講演大会 (2016年9月21日~23日) 大阪大学 豊中キャンパス (大阪)
- 24) 菊池康紀: Simulation-based approaches for design of smart energy system, PSE Asia 2016 (2016年7月24日~26日) 東京大学 本郷キャンパス (東京) 【招待講演】
- 25) 佐々木翔: ニッケルの国際サプライチェーンに内在する多面的リスク要因の抽出と整理, 資源・素材学会 平成28(2016)年度 春季大会 (2016年3月28日~30日) 東京大学 本郷キャンパス (東京)
- 26) 醍醐市朗: 機能量のインベントリ, ミッドポイント エンドポイント, 第11回日本 LCA 学会研究発表会 (2016年3月2日~4日) 東京大学 柏キャンパス (柏)
- 27) 中谷隼: 地域間産業連関表を用いた産業廃棄物の地域依存的評価, 第11回日本 LCA 学会研究発表会 (2016年3月2日~4日) 東京大学 柏キャンパス (柏)
- 28) 佐々木翔: ニッケルの国際サプライチェーンの背後にあるリスク要因抽出, 第11回日本 LCA 学会研究発表会 (2016年3

- 月2日~4日) 東京大学 柏キャンパス (柏)
- 29) 中谷隼: How can environmental input-output analysis contribute to screening potential foreign hotspots of different impact categories?, ISIE 2015 Conference (2015年7月7日~10日) Guildford (UK)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕(計0件)

〔その他〕なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

森口 祐一 (MORIGUCHI, Yuichi)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 30157888

(2) 研究分担者

工藤 祐揮 (KUDOH, Yuki)
独立行政法人産業技術総合研究所・安全科学研究部門・主任研究員
研究者番号: 90391094

松八重 一代 (MATSUBAE, Kazuyo)
東北大学・大学院環境科学研究科・教授
研究者番号: 50374997

福島 康裕 (FUKUSHIMA, Yasuhiro)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 40345096

中島 謙一 (NAKAJIMA, Kenichi)
独立行政法人国立環境研究所・資源循環・廃棄物研究センター・主任研究員
研究者番号: 90400457

醍醐 市朗 (DAIGO, Ichiro)
東京大学・大学院工学系研究科・特任准教授, 研究者番号: 20396774

栗島 英明 (KURISHIMA, Hideaki)
芝浦工業大学・工学部共通学群 (人文社会)・教授, 研究者番号: 80392611

菊池 康紀 (KIKUCHI, Yasunori)
東京大学・プラチナ社会総括寄付講座・特任准教授, 研究者番号: 70545649

中谷 隼 (NAKATANI, Jun)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号: 40436522

(3) 連携研究者

田原 聖隆 (TAHARA, Kiyotaka)
独立行政法人産業技術総合研究所・安全科学研究部門・研究グループ長
研究者番号: 10344160

(4) 研究協力者

井原 智彦 (IHARA, Tomohiko)
兼松 祐一郎 (KANEMATSU, Yuichiro)