

平成 30 年 6 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H02862

研究課題名(和文) 関与物質総量のボトムアップ解析による資源デカップリング戦略

研究課題名(英文) Decoupling Strategy by Bottom-up Analysis of Total Material Requirement

研究代表者

山末 英嗣 (Yamasue, Eiji)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号：90324673

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究ではまず約700種類の素材・材料・製品についてのTMR係数を整備した。この結果の一部をwebsite(<http://www.ritsumeai.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html>)上に公開している。この結果を基に日本の1990年から2013年における関与物質総量を推定し、当該期間で約25%増加していることを明らかにした。また関与物質総量を国別に分析する手法を提案し、資源依存の多様性を評価した。さらにリサイクルの効果をTMR削減量という視点から評価した。そして、LCCO2と関与物質総量を比較することで、効率的なデカップリングのための指針を提案した。

研究成果の概要(英文)：In this study, the specific TMR for about 700 substances, materials, and products have been estimated, and they are available at a website (<http://www.ritsumeai.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html>). Economy-wide TMR in Japan from 1990 to 2013 was also estimated, and it showed an increase by 25 % over 23 years. Country-by-country breakdown of TMR enabled a diversity evaluation in terms of resource dependency. The effect of recycling was also evaluated using an indicator of TMR-reduction. Comparison between LCCO2 and TMR provided a quantitative strategy for effective decoupling.

研究分野：産業エコロジー

キーワード：関与物質総量 隠れたフロー 物質フロー分析 TMR デカップリング

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は大量生産・大量消費・大量廃棄に基づくフロー型社会を構築し大幅な発展を遂げた。1990年代以降、低成長期に入ると、社会圏のストックを活用するストック型社会へと徐々に移行し、一種のデカップリング（相対的デカップリング）の契機となった。日本はドイツと並びデカップリングに向けて精力的に取り組んでいる国であり、国内資源消費はわずかな減少さえ示している（循環型社会形成推進基本法）。しかしその両国においても深く分析すると、多くの財に組み込まれている材料が、海外で大量の資源を使用して生産されている。このように一部の先進国は資源強度の高さを、一部他国に「輸出」することで過小評価している側面がある。また輸入素材量は減少している一方で、鉱石品位の低下に伴い採掘活動自身は増加している場合もある。消費者が直接扱う製品の重量を「消費者端重量」と考えると、土地改変といった資源採取に関わる重量は「資源端重量」と考えることができる。循環型社会形成推進基本計画第二次循環基本計画から、推移をモニターする指標として関与物質総量（Total Material Requirement, TMR）が追加されたが、これは正に資源端重量を扱う指標である。すなわち真のデカップリングを論じる際には、関与物質総量を評価しなければならない。

### 2. 研究の目的

以上より、本研究では、

- 人間の生産活動に関わる「関与物質総量」を素材、材料、製品を通じて計測し、それらをプロセス別、地域別、時系列ごとに分析することで資源端への依存構造を明らかにする。またリサイクルによる資源の外国依存性、コンフリクトメタル問題の回避効率を解析することで天然資源からの脱却メカニズムを明らかにし、都市資源利用のデカップリングに対する効率を定量化する。
- 先進諸国だけでなく、発展途上国や新興国、特に東アジア諸国における事例研究を通じ、国家や都市の発展に伴う関与物質総量の変化とその要因を定量的に解析し、シナリオ分析やケーススタディを援用しながら資源端利用効率の高い社会のあり方を提言する。
- 関与物質総量を GHG 排出量といった他指標の解析結果と有機的に結合し、それらの成果を国・都市レベルで地図上に可視化することで、資源デカップリングに向けた総合的な提案を行う

ことを目的として研究を進めた。

### 3. 研究の方法

本研究課題は、申請者が提案した関与物質総量の評価手法「自然鉱石 TMR」および「都市鉱石 TMR」をベースとし全体で 4 つのバ

ート (1). 関与物質総量(TMR)データの整備, (2). フレームワーク拡張, (3). 資源端への依存度分析モデルの開発, (4). 関与物質総量の観点から見たデカップリング評価) から構成される。

(1). については、申請者が提案した 2 種類の関与物質総量の枠組み

自然鉱石 TMR: ある素材を自然鉱山から製錬して得るための関与物質総量,

都市鉱石 TMR: ある素材を都市鉱山からリサイクルして得るための関与物質総量

を用いて関与物質総量のデータベースを整備した。まず、日本を対象地域とする。製品は「食料」、「材料(素材)」、「中間製品」、「工業製品」、「エネルギー」に分類し、基本的に原材料に近いものから推算を進めた。特に酸やアルカリ、エネルギー資源は、種々の材料の製造プロセスで頻繁に使用される原材料であり優先度が高い。また肥料も作物の生産に必要な不可欠であるため重要度が高い。都市鉱石 TMR については、先述の自然鉱石 TMR で対象とした素材、特にベースメタルを中心に推算を進めた。その後、工業製品や食料など、消費者が直接使用するような製品を対象をシフトした。リサイクルについては In, Dy や Nd といった需要が急増しているレアメタルに注目する。新規導入技術についてもシナリオ分析などを導入しながら柔軟に対応した。

(2). については、関与物質総量の推算において鉱山の閉山処理やリサイクル残渣の無害化処理は、申請者だけでなく国内の他の研究者あるいは国外においてすら扱われていなかった。しかし、例えばリサイクル残渣中の鉛や、天然リン鉱石に含まれる資源起源放射性元素は、無害化の影響が無視できないことがわかってきた。本研究ではそのようなケースを扱えるように関与物質総量のフレームワークを拡張した。これにより、見かけ上リサイクルが不利でも、埋立する場合より負荷が小さいケースを評価可能になった。また、途上国のリサイクル村における型家電リサイクルの実態とワーカーの鉛中毒の影響をケーススタディとしてフィールド調査した。

(3). については、人間活動ベースの資源端依存度を分析できるモデルの構築を試みた。関与物質総量が大きい素材でも、その使用量が小さければ環境に与えるインパクトは小さい。そこで推算済みの関与物質総量データに生産量データを乗じることで、人間活動をベースとした単位期間あたりの関与物質総量（年間関与物質総量、年間 TMR）を推計する。また、資源端の地域別依存度を評価できるモデルも併せて構築した。すなわち、推算した関与物質総量を国別に分解し、そのシェアを評価した。

年間関与物質総量についてはさらに時間的・地域的な要素を追加し、国家や都市の発展に応じて人間社会がどのように資源端に依存してきたのかを解析する。資源端の地域

別依存度については、ハーフィンダール・ハーシュマン指数といった多様性評価指標を援用した評価も行った。

(4). 真のデカップリングを目指すためには、経済活動やそれに関わる GHG 排出との関連を十分に検討する必要がある。そのため上記の(1)~(3)で得られた成果を、経済活動や GHG 排出量と比較する。研究の初期段階では、評価のための枠組み構築に専念し、モデルの挙動を確認するために日本のみを対象にした近未来ケーススタディを実施する。その後、国際シナリオ分析へと発展させる。最終的には近い将来の資源端利用量の推移・特徴をグローバルスケールで行えるようにし、世界レベルでのデカップリングの実現に向けた提言を行う。

#### 4. 研究成果

まず TMR 係数の整備については、3 年間の研究機関において、約 700 種類（同一製品・異プロセスを含む）の製品についての TMR 係数を整備した。

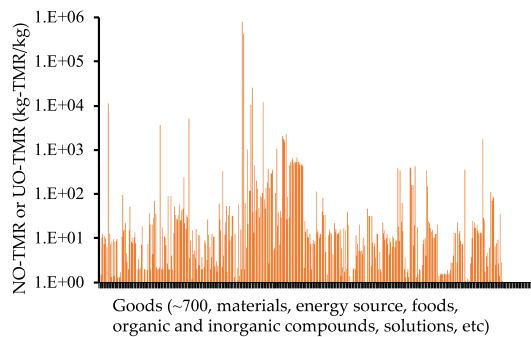


図1 本研究で推算した TMR 係数の一覧

また、上記のデータベースを基に、代表的な材料等について、2013 年度における年間の関与物質総量(年間 TMR)を推定した(図2)

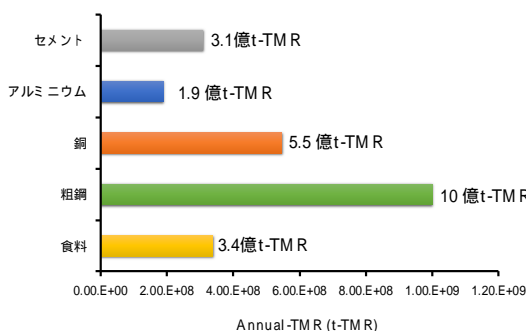


図2 セメント，アルミニウム，銅，粗鋼，食料の年間 TMR(2013)

粗鋼やセメントが我が国において大きな採掘活動を誘発していることは想定されていたが、図2からアルミニウム、銅、食料についてもそれらと比較しうるほどの採掘活動を誘発していることが分かった。さらに 1990 年から 2013 年において、TMR 係数の経年変

化について調査したところ、1990 年では約 96 億トン-TMR であるのに対し、2013 年では 122 億トン-TMR と大きく増加していることが分かった。この間、直接投入量は約 22 億トンから 16 億トンに減少していた。この乖離は、自動車のように 1 台当たりの重量はほとんど変わらないが、その高機能化のために資源強度の高い銅やレアアースが多用されるようになったこと、またそれらの鉱石品位が年々低下しており、同一の量を得るために必要な採掘活動量が増えていたことが主な要因である。例えば、自動車では、従来型の自動車は 1 台当たりの TMR が約 22 億トン-TMR であるのに対し、ハイブリッド車では 53~62 億トン-TMR、電気自動車では 74 億トン-TMR と数倍異なっていることが分かった。また食生活においても、特に日本は食事が欧米化しており、資源強度の低い魚介類から、資源強度の高い肉、特に牛肉へのシフトが大きく影響していた。

次に、従来関与物質総量はその内訳をプロセス毎に分析することしか試みられてこなかったが、本研究では国別に分析する手法を開発した。図3はケーススタディとして硫酸について分析を行った結果である。

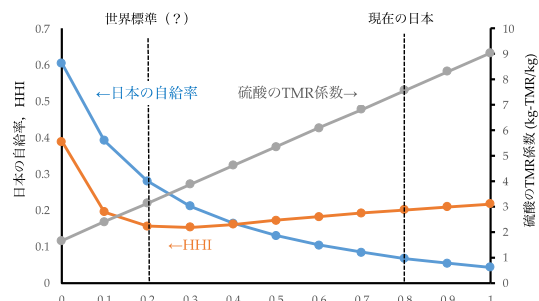


図3 関与物質総量をベースとした資源依存性評価結果(硫酸の例)

通常、硫酸は原油精製プロセス由来の硫黄および非鉄製錬から副産する硫黄(亜硫酸ガス)から生産される。従来、このように複雑なプロセスからなる製品は、その資源依存性を評価する手法が存在しなかった。図3は横軸が非鉄製錬由来の硫黄を使用する割合である。日本は銅のような非鉄製錬が盛んである一方、世界では原油由来の硫黄を使うことが一般的である。その結果、日本で生産する硫酸は TMR 係数が高いだけでなく、自給率は低く、HHI 指数(ハーフィンダールハーシュマン指数)も世界標準より高い、すなわち多様性に富んでないことが分かる。本手法は銅のように鉱石品位に由来する関与物質総量が支配的な場合、従来の直接輸入重量を用いた資源依存性評価と同じ結果が得られる。すなわち本手法は従来型の評価手法をカバーする、広義の資源依存性評価手法と見なすことが可能である。

次にリサイクルの効果を関与物質総量の視点から評価するため、TMR 削減量という指

標を提案した．これはある製品を全て1次資源から生産した場合と、全て二次資源、即ちリサイクル材で生産した場合に計算される関与物質総量の差に、その製品の年間の生産量を乗じたものである．これにより、リサイクルにより、その製品を生産するために必要な関与物質総量の削減量のポテンシャル量を定量的に評価できる．

$$\text{年間の TMR 削減量} = (\text{TMR 削減量}) \times (\text{年間生産量})$$

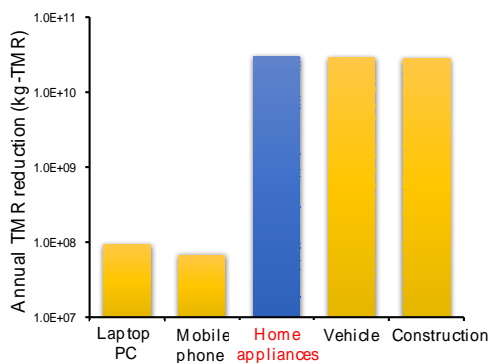


図4 日本における各種製品の年間 TMR 削減量

図4はケーススタディとして、日本におけるノートPC、携帯電話、家電製品、自動車、建築物について年間 TMR 削減量を推定した結果である．携帯電話やノートPCは生産台数は多いものの、1台当たりの重量が軽いため、総じて年間 TMR 削減量は小さくなった．自動車や建築物はその逆の傾向にある．興味深いのは家電製品であり、多くのレアメタルを含んでおり、かつ重量や生産台数も多いため、自動車は建築物と同等の TMR 削減量となった．すなわち、関与物質総量の視点からは、これらの製品のリサイクルが重要である．

次に、従来から行われていたライフサイクル二酸化炭素排出量(LCCO2)と関与物質総量(TMR)の指標としての関係性について調査を行った．

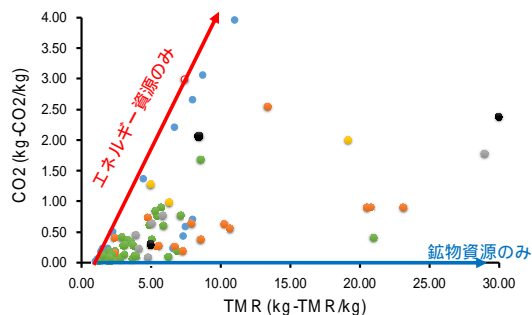


図5 LCCO2-TMR diagram

図5は種々の素材、材料、製品についてLCCO2とTMRの関係性をプロットしたものである．青は魚介類、黒は金属、緑は作物、黄色は畜産、橙色は肥料である．図から分かるように、同一カテゴリーの製品ではLCCO2

とTMRが似た傾向にあるものもあるが、多くの製品について相関は見られない．実際の製品はこれらの素材等の組み合わせであるため、LCCO2とTMRは異なるものを見ている指標と見なすことができる．この図を見ると、ある製品に対して鉱物資源のみを使用した場合、横軸上にプロットが乗る．一方、エネルギー資源のみを使用した場合、エネルギー資源も採掘活動が必要なため縦軸上ではなく、少し傾いた赤い直線上にプロットが乗る．全ての製品は鉱物資源とエネルギー資源から構成されるとすると、プロットは必ず二つの直線間に存在することが分かる．したがって、ある製品に対して、二つの直線の交点からの距離はLCCO2とTMRを考慮した総合的な環境影響、そして横軸から上部に何度(角度)逸脱しているかは、デカップリングの指針となる．即ち完全に横軸上にあるものは資源強度が高いため資源デカップリングを、赤い直線上にあるものは炭素強度が高いため炭素デカップリングが必要となる．このように本ダイアグラムを使用することで、行すべきデカップリングを定量的に示すことができるようになることがわかった．

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 18 件)

1. 山末英嗣, 安永玲華, ジョルディクラビオット, Tran Duc Huy, Nguyen Duc Quang: 「東南アジアにおける家電製品の素材リサイクルによる TMR 削減ポテンシャル評価」, 日本 LCA 学会誌, 第 14 巻, 第 1 号, (2018), pp.13-20, 査読有
2. Shoki Kosai and Eiji Yamasue: “Cost-Security Analysis Dedicated for The Off-grid Electricity System”, Renewable Energy, Vol.115, (2018), pp.871-879, 査読有
3. Akira Oyaizu, Jordi Cravioto, Ichiro Daigo and Eiji Yamasue: “Data Envelopment Analysis for steel production with the use of Total Material Requirement”, Matériaux et Techniques, (2018), 査読有
4. Shoki Kosai, Seiji Hashimoto, Kazuyo Matsubae, Benjamin C McLellan, and Eiji Yamasue: “Comprehensive Analysis of External Dependency in terms of Material Criticality by Employing Total Material Requirement: Sulfuric Acid Production in Japan as a case study”, Minerals, 8(3), 114 (2018), doi:10.3390/min8030114, 査読有
5. 山末英嗣, 光斎翔貴, 松八重一代, マクレランベンジャミン: 「食料生産における関与物質総量の枠組の提案と評価 ~ 国産食材の TMR 係数 ~」, 日本 LCA 学会誌, 第 14 巻, 第 2 号, (2018), pp.146-157, 査読有

6. Jordi Cravioto, Reika Yasunaga, and Eiji Yamasue: "Comparative analysis of average time of use of home appliances", *Procedia CIRP*, Vol.61, (2017) pp.657-662, 査読有
  7. Nakajima K., Daigo I., Okada K., Koike S., Nansai K., Matsubae K., Takeda O., Miki T.: "Bottlenecks in material cycle of nickel", *Matériaux et Techniques*, Vol.104, No.604, 2017, pp.1-7, doi: 10.1051/mattech/2017011, 査読有
  8. Fujimori T., Hayashi H., Nakajima K.; "Phosphorus Speciation in Sludge from Nickel Electroplating", *Materials Transactions*, Vol. 58, 2017, pp.1337-1340, doi: <http://doi.org/10.2320/matertrans.M2017152>, 査読有
  9. 佐々木翔, 松八重一代, 中島謙一, 村上進亮, 長坂徹也, 「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巻, (2017), pp. 2-11, 査読有
  10. Kenichi Nakajima, Keisuke Nansai, Kazuyo Matsubae, Makoto Tomita, Wataru Takayanagi, Tetsuya Nagasaka; "Global land-use change hidden behind nickel consumption", *Science of The Total Environment*, Vol.586, 2017, pp. 730-737, 査読有
  11. Ohno H., Matsubae K., Nakajima K., Kondo Y., Nakamura S., Fukushima Y. Nagasaka T.; "Optimal Recycling of Steel Scrap and Alloying Elements: Input-Output based Linear Programming Method with Its Application to End-of-Life Vehicles in Japan", *Environmental Science & Technology*, Vol.51, 2017, pp. 13086-13904, doi: 10.1021/acs.est.7b04477, 査読有
  12. Kazuyo Matsubae, Eiji Yamasue, Tadahiro Inazumi, Elizabeth Webeck, Takahiro Miki, and Tetsuya Nagasaka: "Innovations in Steelmaking Technology and Hidden Phosphorus Flows", *Science of the Total Environment*, 542 (2016), pp.1162-1168, 査読有
  13. Benjamin McLellan, Eiji Yamasue, Tetsuo Tezuka, Glen Corder, Artem Golev, Damien Giurco: "Critical minerals and energy – impacts and limitations of moving to unconventional resources", *Resources*, vol.5, No.2, (2016), pp.19-50, 査読有
  14. Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Kenichi Nakajima, Ichiro Daigo and Keiichi N Ishihara: "Total Material Requirement of Scrap Steel from End-of-Life Vehicles", *ISIJ International*, Vol.56, No.8 (2016), pp.778-787, 査読有
  15. Fujimori T.; Eguchi, A.; Agusa, T.; Tue, N. M.; Suzuki, G.; Takahashi, S.; Viet, P. H.; Tanabe, S.; Takigami, H. : "Lead Contamination in Surface Soil on Roads from Used Lead-Acid Battery Recycling in Dong Mai, Northern Vietnam", *Journal of Material Cycles and Waste Management*, Vol.18, 2016, pp.599-607, doi: 10.1007/s10163-016-0527-7, 査読有
  16. Keisuke Yoshida, Tomer Fishman, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa; "Material stock's overburden: Automatic spatial detection and estimation of domestic extraction and hidden material flows"; *Resources, Conservation and Recycling*, 2016, doi: 10.1016/j.resconrec.2016.09.010, 査読有
  17. Alessio Miatto, Heinz Schandl, Tomer Fishman, Hiroki Tanikawa; "Global Patterns and Trends for Non-Metallic Minerals used for Construction"; *Journal of Industrial Ecology*, Vol.21, No.4, 2016, pp.924-937, doi: 10.1111/jiec.12471, 査読有
  18. Tomer Fishman, Heinz Schandl, and Hiroki Tanikawa; "Stochastic Analysis and Forecasts of the Patterns of Speed, Acceleration, and Levels of Material Stock Accumulation in Society"; *Environ. Sci. Technol*, Vol.50, No. 7, 2016, pp.3729-3737, doi: 10.1021/acs.est.5b05790, 査読有
- [学会発表](計 75 件)
1. Eiji Yamasue, Shoki Kosai, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Shinsuke Murakami and Benjamin C McLellan: "Decoupling Evaluation using Total Material Requirement and Life-Cycle CO2 emission", 12th International Conference on Society & Materials, SAM12, 2018
  2. Benjamin C McLellan, Eiji Yamasue: "Minerals-Energy Nexus and the Future of Low-Carbon Technologies", RFG2018, 2018
  3. Eiji Yamasue, Shoki Kosai, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Shinsuke Murakami, and Benjamin C McLellan: "Criticality Analysis of Rare Earth Elements based on Total Material Requirement", 2018
  4. Akira Oyaizu, Jordi Cravioto, Ichiro Daigo, Eiji Yamasue: "DATA Envelopment Analysis for Steel Products considering Mining Activities in terms of Total Material Requirement", 11th edition of the Society and Materials Conference SAM-11, 2017
  5. Eiji Yamasue, Akira Oyaizu, Kenyu Matsui, Kenichi Nakajima, Kazuyo Matsubae, Benjamin McLellan, Ichiro Daigo, and Shinsuke Murakami: "Reconsideration of Prioritization of automotive materials recycling in terms of Total Material Requirement", 11th edition of the Society and Materials Conference SAM-11, 2017
  6. Akira Oyaizu, Ichiro Daigo, Cravioto Jordi, Eiji Yamasue: "Date Envelopment Analysis

- for Steel Productions with The Use of Total Material Requirement for Mining Activities”, EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), 2017
7. Jordi Cravioto, Duc-Quang Nguyen, Tran-Duc Huy, Eiji Yamasue, Akira Oyaizu, Ichiro Daigo: “Industrial symbiosis of steel and cement production in Vietnam”, EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), 2017
  8. Kazuyo Matsubae, Elizabeth Webeck, Eiji Yamasue, Takahiro Miki, Tetsuya Nagasaka: “Analysis of Total Material Requirement for Automotive Technological Change”, EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), 2017
  9. Kenichi Nakajima, Ichiro Daigo, Hiroki Hatayama, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Yoshinao Kobayashi, Wataru Takayanagi: “Framework for Expressing Social Value of Materials: Social Value of “TETSU””, EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), 2017
  10. Kenyu Matsui, Akira Oyaizu, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka: “Hidden Phosphorus Flow caused by Steelmaking Activity”, EMECR2017 (1st International Conference on Energy and Material Efficiency and CO2 Reduction in the Steel Industry), 2017
  11. Shoki Kosai, Seiji Hashimoto, Eiji Yamasue: “Diachronic Comparison of Material flow in Japan from Perspective of both Direct Material Input and Total Material Requirement”, 4th International Conference on Final Sinks, 2017
  12. Kenyu Matsui, Akira oyaizu, Eiji Yamasue, Kazuyo Matsubae, Tetsuya Nagasaka: “Analysis of Total Materials Requirement and resource demand caused by technological change in automobile”, 4th International Conference on Final Sinks, 2017
  13. Nakajima K.; “Japan activities for designing a sustainability strategy for global resource network.”, Nickel Seminar LCA WORKSHOP, 2017
  14. Nakajima K., Daigo I., Nansai K., Matsubae K., Takayanagi W., Tomita M., Matsuno Y.; “Global distribution of material stocks: iron, copper, and nickel.”, 11th International Conference on Society & Materials, 2017
  15. Nakajima K., Nansai K., Matsubae K., Tomita M., Takayanagi W; “Global Distribution of Hidden Flows Induced by Consumption of Metals.”, World Resources Forum 2017, 2017
  16. Bungo Nishio, Kenji Sugimoto, Keijiro Okuoka, Hiroki Tanikawa; “Inter calibration of Radiance Calibrated Nighttime Lights and Quantification of urban dynamics in Southeast Asia”, International Symposium on Remote Sensing 2017, 2017
- 〔図書〕(計1件)
1. 山末英嗣: りんの辞典(第2-3-7節, 第9-3-6節), 大竹久夫(編), 朝倉書店, 東京, 2017年, 360ページ, 70-71ページ, 336-337ページ
- 〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www.ritsumei.ac.jp/~yamasue/tmr/database.html>
6. 研究組織
- (1)研究代表者  
山末 英嗣 (YAMASUE Eiji)  
立命館大学・理工学部機械工学科・准教授  
研究者番号: 90324673
  - (2)研究分担者  
藤森 崇 (FUJIMORI Takashi)  
京都大学・地球環境学堂・助教  
研究者番号: 20583248
  - (3)研究分担者  
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
  - (4)研究分担者  
谷川 寛樹 (TANIGAWA Hiroki)  
名古屋大学・環境学研究科・教授  
研究者番号: 90304188
  - (5)研究分担者  
中島 謙一 (NAKAJIMA Kenichi)  
国立研究開発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