

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04325

研究課題名(和文) 忌避物質のマテリアルフロー分析と資源循環高効率化の余地の定量化

研究課題名(英文) Material Flow Analysis of repellent elements and quantifying the potential improvement of resource efficiency

研究代表者

村上 進亮 (Murakami, Shinsuke)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授

研究者番号：40414388

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：研究課題の目的に沿って、多様な素材中を検討対象となる忌避元素がどのように流れるのかをマテリアルフロー分析(MFA)を用い検討した。今回主たる対象としてはクロムを題材とし、特に二次原料中をどのように流れていくのかについて検討した結果、国際貿易における鉄スクラップの貿易における変化が結果的にセメント産業に対して忌避元素であるクロムの流入量を増やすことなどを明らかにした。他方で、データ入手の難しさと決定論的に精度の高いマテリアルフロー分析の困難さが浮き彫りにされたが、ここで大域的感度分析手法の一つであるRegional Sensitivity Analysis(RSA)の有用性を明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義としては、中間処理、製錬技術の専門家とのタッグにより技術的な情報を最大限活かしたMFAを実施した。にも関わらず決定論的に正確なMFAの実施が難しい場合に、大域的感度分析手法、特にRSAの援用をもって、社会的に制御したい変数に対して影響力の高いパラメタの同定に役立つことを明らかにしたことは先駆的な学術的成果である。つまり、マテリアルフロー情報が不足していても、RSAの援用によって、社会的にどのパラメタへの対応が望ましい成果を生むか、例えばどのプロセスの前の分別を良くすれば結果的に排除したい忌避物質を取り除けるかが明らかになる手法を開発した点が社会的意義である。

研究成果の概要(英文)：In line with the objective of the research project, we used material flow analysis to examine how the repellent elements flow through a variety of material flows. As a result, it was clarified that changes in the international trade of steel scrap increase the inflow of chromium, a repellent element, to the cement industry. On the other hand, the difficulty of obtaining data and conducting deterministically accurate material flow analysis was highlighted. However, the usefulness of Regional Sensitivity Analysis, one of the global sensitivity analysis methods, was revealed here.

研究分野：産業エコロジー、社会システム設計・評価

キーワード：マテリアルフロー分析 大域的感度分析 忌避元素 社会制度 評価手法開発

### 1. 研究開始当初の背景

学術的にみれば、忌避元素に対するマテリアルフロー分析 (Material Flow Analysis, 以下 MFA) は先行研究の少ない未開拓分野であった。忌避元素の分析に際して、これらの忌避元素が「何処に」「どの程度の濃度で」流れているのかの情報は必要不可欠だが、これらを念頭に置いた分析事例は非常に少ないものであった。

社会的にみれば、我が国の循環型社会形成が順調に進む中、リサイクル等もある意味適切に進捗しており、次の一手が見いだせない状況にあった。ここで、いくつかのプロセスにおいて忌避元素の問題が明らかになってきたこともあり、例えばとあるプロセスにとっての忌避元素が除去され、しかも他の適切なプロセスで有価物として回収されるならば、社会全体としてのリサイクル率の向上、ひいては資源効率の向上などが望まれることから、忌避元素の MFA はそのための基礎情報を与えるものとして大変有意義であることが分かりつつあった。

### 2. 研究の目的

上記の社会的・学術的背景を受け、社会的に問題の大きそうなプロセスの忌避元素を題材に MFA を実施すること、それを踏まえて社会的な課題解決策を見出すことが大目的である。忌避元素の同定自体も研究期間中に確定したものであるが、最終的には二次原料中のクロムの流れを題材に実施することとした。

MFA で得た結果に対する改善提案を行うことと、そもそも MFA の背景情報に資する技術情報を収集することを目的に、中間処理、製錬技術の研究者と MFA の研究者のチームでこれを実施することも学術的な試行としては目的の一つでもある。

特に二次原料の MFA を実施するためには二次原料の発生量を予測する必要があり、そのために消費者の最終製品の使用期間の分析等を行うとともに、MFA によって明らかになったフローや、またこれを改善した場合の間接的な効果を定量化するために必要になる評価手法を検討、既存手法で不足している場合にはこれを開発することも追加的な目的として設定した。

### 3. 研究の方法

MFA については手法的にはある程度確立されたものではあるが、今回主たるものの流れがある中にどの程度忌避元素が微量含有分として流れているのかを検討することが目的であったために、非常に多くの含有量、組成等の情報が必要になった。これについて、一部技術系の研究者が実験的にみた部分もあるが、多くは参画研究者のネットワークから業界等に依頼してデータを入手したものである。当然のようにこうしたデータは大きな分散を持つはずであり、これに対応できるような MFA およびその結果の解釈の方法を探索することを行った。

評価手法等については、既存の評価手法をレビューした上で、適切な手法を抽出、実際にケーススタディを通してその有用性を確認することとした。

### 4. 研究成果

#### (1) 忌避元素の MFA と RSA の有用性について

研究開始当初には、忌避元素の MFA を多少の分散を持った形で描くことは可能だと考えていた。実際にこれを実施した結果、描くことは出来たものの、入手された組成等の情報が持つ分散が余りに大きく、全体的な精度を必要最低限のレベルまで上昇させることが難しいことが明らかになった。これは既存の MFA がこの種の元素を対象にしてこなかった理由でもある。

そこで、こうした分散の情報を失うことなく、社会的に意味のある結果の解釈をもたらす手法を検討した結果、大域的感度分析手法、その中でもマッピングを得意とする Regional Sensitivity Analysis (以下 RSA) と呼ばれる手法の有用性を確認するに至った。大域的感度分析とは検討対象の系に不確実性を持つ変数が多数ある場合に、どの変数が出力の不確実性に大きく寄与するかを明らかにするために行うものである。RSA はこれをマッピングという形で実現する。例えば、今回の事例において、とある中間処理プロセスの分別効率を横軸に、最終的にみたいあるプロセス中の忌避元素の含有率を縦軸に取った散布図を図 1 の上図のように描いたとする。多くの不確実性を持つ変数が存在するため、ローカル感度分析手法を実施した際のように横軸側の値に対

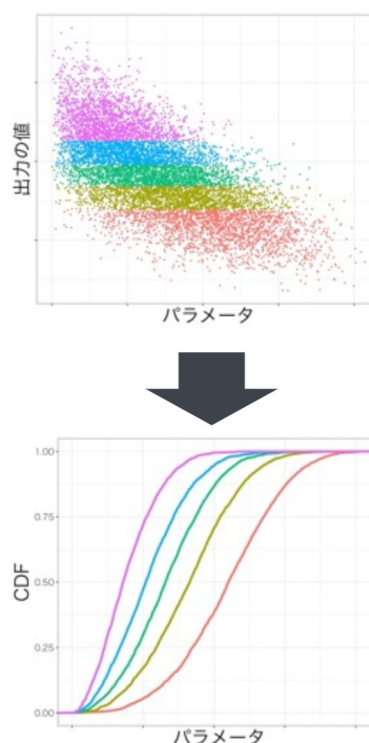


図 1 RSA のイメージ図

応する縦軸の値は一意には決まらず、同じパラメータの値をとっても縦軸の値は様々になる。とは言え、この散布図には明らかに右肩下がりの傾向が見られる。そこで、解釈の容易性と統計的な有意性の検定を目的に、この散布図を出力側の値の大小で5群に分割したとする。そのそれぞれの群について累積密度分布を描くと図1の下図のようになる。このCDFの曲線のばらつきを見れば、それぞれのパラメータが結果の出力にどのようなインパクトを持つのかが分かることになる。このCDFについてここでは解釈のために5群に分けているが、例えば上位10%と残りの2群にわけCDFに関してKS検定を実施するなどすれば、統計的に有意に違う分布かどうかの検証が可能になる。

逆にここで5群に分けていることの意味だが、例えば最上位の群のCDFが大きくなる場合と、最下位の群が大きくなる場合では意味が異なる。つまり最下位(茶色)の群だけがずれるような場合、このパラメータは結果を良くする(忌避元素の含有量を下げる)方向に大きな影響を持つと言える。逆に最上位(紫色)の群だけがずれるような場合は、結果を悪化させる方向に大きな影響を持つと言え、押さえ込みたいのならば非常に重要なパラメータだと言える。

今回のクロムの検証に際しては、最終的にみたい出力の値をセメント産業へのクロム混入率とし、フローの各断面を横軸にみるような形で検証を行った。その結果、特殊鋼スクラップが普通鋼電炉に混入する比率が与える影響は高く、例えば非鉄製錬スラグ中にクロムが流入したとしても結果への影響はそこまで大きくないことが明らかになった。

MFAにおける情報源の不確実性の扱いは大きなテーマの一つであり続けてきた。それに対して、不確実性を保持したまま意味のある結果を見せるという一つの解答を見せたことは大きな学術的な成果だと言える。今後は多くのケーススタディに対して援用していくことでその有用性を検証していく必要がある。

## (2) これ以外の研究による成果と今後の展望

これ以外の研究成果についてだが、技術系の研究者の情報をMFAに持ち込んだことは改めて重要な成果である。MFAそのものを専門とする研究者だけでは難しい情報の解釈等が可能になった。その中で、より精緻な技術的な研究を実施し、いくつかの成果を得ていることは述べておく。

また、二次原料の発生量予測のために実施した消費者の製品保有期間(使用期間)に対する分析からは、消費者行動につながる様々な背景要因が明らかになり、これが発生量予測における不確実性のデータを与えることにもつながった。

更に循環の促進により天然資源の採取量が減少することを踏まえ、その環境影響評価等も実施し、それぞれが高い成果を上げていることを付け加えたい。

今後はこうした削減効果や、消費者行動による二次原料の発生量の変動等も含めたより大きなMFAを実施し、そこにRSAを援用することで社会全体として望ましい姿へとももの流れを変えていくためにどのようなパラメータを変えていくことが最も効率的なのかを検討し、社会全体の資源効率を向上させるような、より望ましいサーキュラー・エコノミー型の社会への変容を検討するような研究へとつなげていくことを進めていきたい。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 6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 Murakami Shinsuke, Takasu Taiga, Islam Kamrul, Yamasue Eiji, Adachi Tsuyoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Ecological footprint and total material requirement as environmental indicators of mining activities: Case studies of copper mines	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental and Sustainability Indicators	6. 最初と最後の頁 100082 ~ 100082
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.indic.2020.100082	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 Sugimura Yoshihisa, Murakami Shinsuke	4. 巻 170
2. 論文標題 Designing a Resilient International Reverse Logistics Network for Material Cycles: A Japanese Case Study	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105603 ~ 105603
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2021.105603	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 Kosaku Yoshihiro, Tsunazawa Yuki, Tokoro Chiharu	4. 巻 32
2. 論文標題 Investigating the upper limit for applying the coarse grain model in a discrete element method examining mixing processes in a rolling drum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advanced Powder Technology	6. 最初と最後の頁 3980 ~ 3989
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.appt.2021.08.039	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 Nitta Ayano, Tsunazawa Yuki, Tokoro Chiharu	4. 巻 58
2. 論文標題 Evaluation of Effect of Feed Rate in a Hydraulic Gravity Separator for High-Quality Plastic Separation Using DEM-CFD Simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Powder Technology, Japan	6. 最初と最後の頁 100 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.58.100	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 Murata Takashi, Yamaguchi Katsunori	4. 巻 62
2. 論文標題 Recovery of palladium and platinum particles suspended in the Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -CaO-SiO <sub>2</sub> slag using copper-based extractants at 1723K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1495 ~ 1501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.M-M2021844	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 Daigo Ichiro, Tajima Keijiro, Hayashi Hideo, Panasiuk Daryna, Takeyama Kentrao, Ono Hideki, Kobayashi Yoshinao, Nakajima Kenichi, Hoshino Takeo	4. 巻 61
2. 論文標題 Potential Influences of Impurities on Properties of Recycled Carbon Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 498 ~ 505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-377	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 Sugimura Yoshihisa, Kawasaki Tomoya, Murakami Shinsuke	4. 巻 35
2. 論文標題 Potential for Increased Use of Secondary Raw Materials in the Copper Industry as a Countermeasure Against Climate Change in Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sustainable Production and Consumption	6. 最初と最後の頁 275 ~ 286
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.spc.2022.11.007	査読の有無 無
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 Islam Kamrul, Motoshita Masaharu, Murakami Shinsuke	4. 巻 15
2. 論文標題 Environmental Sustainability of Bricks in an Emerging Economy: Current Environmental Hotspots and Mitigation Potentials for the Future	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 5228 ~ 5228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su15065228	査読の有無 無
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 Yamamoto Haruhisa, Murakami Shinsuke	4. 巻 144
2. 論文標題 Which consumer psychological factors influence the lifetime of consumer electronic products? A case study of personal computers in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Waste Management	6. 最初と最後の頁 233 ~ 245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.wasman.2022.03.030	査読の有無 無
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 Daigo Ichiro, Tajima Keijiro, Hayashi Hideo, Panasiuk Daryna, Takeyama Kentrao, Ono Hideki, Kobayashi Yoshinao, Nakajima Kenichi, Hoshino Takeo	4. 巻 61
2. 論文標題 Potential Influences of Impurities on Properties of Recycled Carbon Steel	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ISIJ International	6. 最初と最後の頁 498 ~ 505
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-377	査読の有無 無
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 Panasiuk Daryna, Daigo Ichiro, Hoshino Takeo, Hayashi Hideo, Yamasue Eiji, Tran Duc Huy, Sprecher Benjamin, Shi Feng, Shatokha Volodymyr	4. 巻 26
2. 論文標題 International comparison of impurities mixing and accumulation in steel scrap	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Industrial Ecology	6. 最初と最後の頁 1040 ~ 1050
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1111/jieec.13246	査読の有無 無
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 SEKI Gosuke, MURATA Takashi, YAMAGUCHI Katsunori	4. 巻 68
2. 論文標題 Silver Solubility and Effect of Copper Concentration on the Activity Coefficient of Silver Oxide in the FeO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-slag system at 1573K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources Processing	6. 最初と最後の頁 70 ~ 76
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4144/rpsj.68.70	査読の有無 無
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 Murata Takashi, Yamaguchi Katsunori	4. 巻 62
2. 論文標題 Recovery of Palladium and Platinum Particles Suspended in the Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SiO <sub>2</sub> Slag Using Copper-Based Extractants at 1723 K	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 MATERIALS TRANSACTIONS	6. 最初と最後の頁 1495 ~ 1501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2320/matertrans.M-M2021844	査読の有無 無
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 Nitta Ayano, Tsunazawa Yuki, Tokoro Chiharu	4. 巻 58
2. 論文標題 Evaluation of Effect of Feed Rate in a Hydraulic Gravity Separator for High-Quality Plastic Separation Using DEM-CFD Simulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Society of Powder Technology, Japan	6. 最初と最後の頁 100 ~ 110
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4164/sptj.58.100	査読の有無 無
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3件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 日高祐輔
2. 発表標題 素材産業における忌避物質のマテリアルフロー分析を通じた資源効率向上の検討
3. 学会等名 一般社団法人資源・素材学会 2020年度春季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yusuke Fujii, Shinsuke Murakami, Haruhisa Yamamoto and Ryu Koide
2. 発表標題 Development of a stock-flow dynamics simulator to assess circular strategies
3. 学会等名 EARTH 2022 (16th International symposium on East Asian Resources Recycling Technology) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 藤井 雄介、村上 進亮、山本 悠久、小出 瑠
2. 発表標題 Circular Economy 戦略の評価に向けたストック・フロー・シミュレータの開発
3. 学会等名 第18回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔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	醍醐 市朗 (Daigo Ichiro)  (20396774)	東京大学・先端科学技術研究センター・准教授  (12601)	
研究分担者	山口 勉功 (Yamaguchi Katsunori)  (70220259)	早稲田大学・理工学術院・教授  (32689)	
研究分担者	所 千晴 (Tokoro Chiharu)  (90386615)	早稲田大学・理工学術院・教授  (32689)	

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
---------	---------