

令和 3 年 6 月 21 日現在

機関番号：82101

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2019～2020

課題番号：19K24391

研究課題名（和文）大規模エネルギー転換国が資源採掘国へ強い環境的犠牲に関する長期予測モデルの開発

研究課題名（英文）Environmental impacts in mining countries induced by global energy transitions

研究代表者

渡 卓磨（Watari, Takuma）

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・研究員

研究者番号：10845811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、世界的なエネルギー転換に伴う資源採掘量の変化を詳細かつ包括的に解析することで、持続可能な資源利用を伴った気候変動緩和策の実装支援を目的として研究を進めた。主要な研究成果として、発電部門のエネルギー転換は資源採掘量を削減するのに対し、運輸部門は特定の金属需要増加によって、資源採掘量を2050年にかけて倍増させることを初めて明らかにした。また、鉱山開発モデルを援用することで、資源採掘量増加の32-40%が資源ガバナンスの貧弱な国で発生する可能性を確認した。一連の研究により、脱炭素技術導入下での責任ある資源管理のために、特に注視すべき技術・鉱種・国（ホットスポット）の特定に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脱炭素技術導入の背後で管理すべき資源量が増加するという、これまで見過ごされていたトレードオフの可能性を明らかにした点が本研究の重要な貢献の一つである。これにより、持続可能な資源利用を伴った気候変動緩和策の重要性を広く国際社会に発信することが出来た。加えて、本研究で明らかになった注視すべき鉱種・技術・国という情報は、消費側からの有効な介入策を検討する際の優先順位付けに利用可能である。

研究成果の概要（英文）：This study shows that the decarbonization of both the electricity and transport sectors will curtail fossil fuel production while paradoxically increasing resource extraction associated with metal production by more than a factor of 7 by 2050 relative to 2015 levels. Importantly, we find that approximately 32-40% of this increase in resource extraction is expected to occur in countries with weak, poor, and failing resource governance, indicating that the impending mining boom may result in severe environmental degradation and lower economic growth, rather than benefiting local communities. A suite of circular economy strategies, including lifetime extension, servitization, and recycling, can mitigate such risks, but they may not fully offset the growth in resource extraction. Our findings underscore the importance of institutional instruments that enhance the resource governance of entire low-carbon technology supply chains, along with circular economy practices.

研究分野：環境システム学

キーワード：脱炭素 物質フロー 鉱山開発

## 1. 研究開始当初の背景

気候変動の緩和に向けた化石燃料からの脱却には、太陽光発電や電気自動車等の大量導入を伴う大規模エネルギー転換が急務である。しかし、こうした新技術は材料構成や利用時の燃料消費、さらには廃棄時の資源リサイクルという観点から従来技術とは大きく特性を異にするものであり、大規模なエネルギー転換は既存の資源需給構造を激変させる可能性がある。しかし既存研究では、どの国のエネルギー転換が、いかなる資源国の採掘活動の基に成立し得るのか、という資源の国際貿易によって形成される“空間的利害関係”の解明に至っていない。これは大規模エネルギー転換実施国と資源採掘に起因する環境被害国との利害拡大を許すだけでなく、それを是正する両国の協働の機会を損失する。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、大規模エネルギー転換が牽引する国際資源フローとそれに起因する資源採掘活動の将来予測を可能とする数理モデルを開発し、国家間に生じる空間的利害関係を時系列で同定することである。これにより、気候目標達成に向けたエネルギー転換が、いかなる資源国に、どの程度の資源採掘を誘発するのかが初めて明らかになる。つまり空間的利害の大きさと構造に関する長期的変化について、学術的知見が集積され、利害縮小に資する世界貿易機関による補助金制度やフェアトレード等の枠組み構築に科学的根拠を提供することが可能となる。

## 3. 研究の方法

システム分析を基礎とする以下の手順を実施することで上述の目標達成を試みた。

- (1) 工学型エネルギーモデルと動的物質フロー分析モデルの接続
- (2) エネルギー技術材料強度データの構築
- (3) 手順(1)と(2)の統合による将来の物質フロー推計
- (4) 鉱山開発スケジューリングモデルを用いた将来の資源採掘量推計

## 4. 研究成果

以下に示す主に3つの研究成果を得た。

- (1) 既存研究における限界点の抽出：国際学術誌に発表された約150本の文献レビューを実施し、環境影響や廃棄物リサイクル偏向のモデル化といった既存研究における限界点を抽出した。ここでの成果は、以降の実証研究の基礎となるものである。また、本研究では約800のデータポイントを含む将来金属需要データベースを構築し、多くの学術論文や政策レポートで参照されるに至っている(図1)。研究成果は資源保全分野の国際誌である Resource, Conservation & Recycling 誌に発表した。
- (2) 世界的エネルギー転換に伴う資源採掘量の変化：包括的な資源投入量指標である関与物質総量指標を用いて、2050年までの世界的なエネルギー転換に伴う資源採掘量の変化を解明した。発電部門のエネルギー転換は資源採掘量を削減するのに対し、運輸部門は特定の金属(主に Fe, Cu, Ni, Ag, Te, Li, Co) 需要増加によって、資源採掘量は逆に増加することが初めて明らかとなった(図2)。また、鉱山開発スケジューリングモデルを援用することで、資源採掘量増加の32 - 40%が資源ガバナンスの貧弱な国で発生する可能性を確認した。一連の研究により、脱炭素技術導入下での責任ある資源管理のために、特に注視すべき技術・鉱種・国(ホットスポット)の特定に成功した。研究成果は環境学分野の国際誌である Journal of Cleaner Production 誌に発表した。
- (3) 電気自動車普及に対する希少金属供給制約の影響評価：技術選択モデルに希少金属資源の需給動態を内在化したモデルを開発することで、エネルギーシステムと金属需給システムの統合的解析に向けた初歩的取り組みを実施した。研究成果は環境工学分野の国際誌である Environmental Science & Technology に発表した。

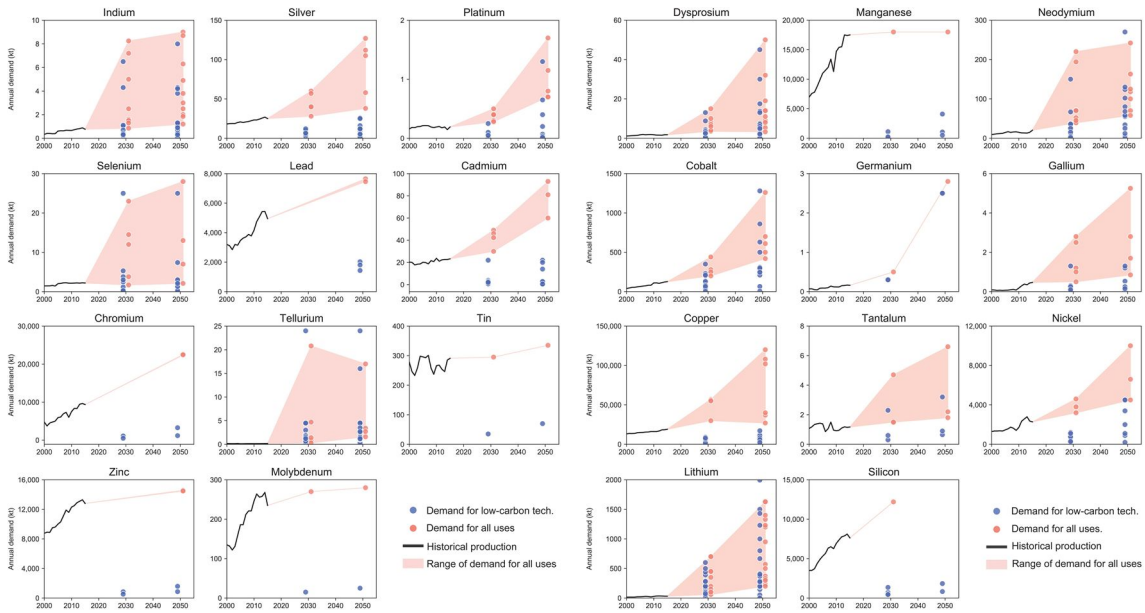


図1 将来金属需要データ

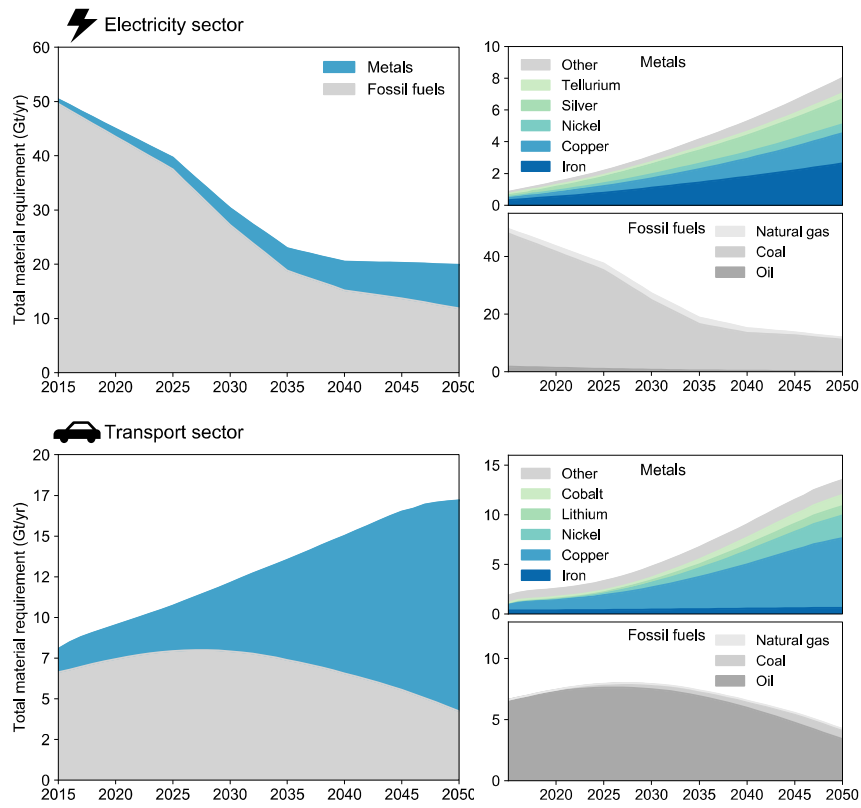


図2 世界的エネルギー転換に伴う資源採掘量の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takuma Watari, Ryosuke Yokoi	4. 巻 70
2. 論文標題 International inequality in in-use metal stocks: What it portends for the future	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources Policy	6. 最初と最後の頁 101968
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resourpol.2020.101968	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Watari, Keisuke Nansai, Damien Giurco, Kenichi Nakajima, Benjamin McLellan, Christoph Helbig	4. 巻 54
2. 論文標題 Global metal use targets in line with climate goals	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 12476 ~ 12483
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.0c02471	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Takuma Watari, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima	4. 巻 164
2. 論文標題 Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2020.105107	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takuma Watari, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima	4. 巻 155
2. 論文標題 Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 104669 ~ 104669
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2019.104669	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Takuma Watari, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Benjamin McLellan, Elsa Dominish, Damien Giurco	4. 巻 53
2. 論文標題 Integrating Circular Economy Strategies with Low-Carbon Scenarios: Lithium Use in Electric Vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Environmental Science & Technology	6. 最初と最後の頁 11657 ~ 11665
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1021/acs.est.9b02872	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 該当する

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 Critical materials demand in the green transition: a review
3. 学会等名 ISIE Socioeconomic Metabolism Section perpetual online conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡卓磨, Benjamin McLellan, Damien Giurco, Elsa Dominish, 中島謙一, 南齋規介
2. 発表標題 2050年までの世界的なエネルギー転換が資源採掘を介して誘引する地球改変量
3. 学会等名 第38回エネルギー・資源学会研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡卓磨, 中島謙一, 南齋規介
2. 発表標題 資源循環戦略と低炭素シナリオの統合化
3. 学会等名 環境科学会 2019年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡卓磨, 中島謙一, 南齋規介
2. 発表標題 2100年までの気候変動予測シナリオと調和する金属資源需給動態
3. 学会等名 第15回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横井峻, 渡卓磨, 本下晶晴
2. 発表標題 将来需要変化を考慮した中長期的な鉱物資源枯渇ポテンシャルの評価
3. 学会等名 第16回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2021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

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			
オーストラリア	University of Technology Sydney	The University of Sydney		
ドイツ	University of Augsburg			