

令和 6 年 5 月 7 日現在

機関番号：82101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12344

研究課題名（和文）地球の環境容量と整合する資源フロー・ストック・生産性目標の開発

研究課題名（英文）Science-based targets for material use in line with the Earth's carrying capacity

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・資源循環領域・研究員

研究者番号：10845811

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：地球の環境容量を超過することなく、増加し続ける世界人口の基本的欲求を充足する資源生産・消費システムの構築は人類が直面している最重要課題である。しかし“環境容量下において、いかなる資源を、いかなる国が、どの程度利用可能か”は科学的に解明されておらず、国際調和のとれた取り組みに不可欠な科学的目標値が確立されていない。本研究は、環境制約下における世界の資源循環構造を精緻に表現する新規の数値モデルを開発し、地球の環境容量と厳密に整合する資源フロー・ストック・生産性目標の構築を目的として実施された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の一連の成果によって、1.5 目標と整合的な資源効率性のベンチマークが世界で初めて科学的に提案された。本成果は資源利用に関する国際的目標設定の議論を支援すると共に、日本の次期循環型社会推進基本計画における各種数値目標の科学基盤強化に貢献する。

研究成果の概要（英文）：This study explores the global feasible supply of steel and cement within Paris-compliant carbon budgets, explicitly considering uncertainties in the deployment of infrastructure. Our analysis reveals that despite substantial growth in recycling- and hydrogen-based production, the feasible steel supply will only meet 58-65% of the expected baseline demand in 2050. Cement supply is even more uncertain due to limited mitigation options, meeting only 22-56% of the expected baseline demand in 2050. These findings pose a two-fold challenge for decarbonizing the steel and cement industries: on the one hand, governments need to expand essential infrastructure rapidly; on the other hand, industries need to prepare for the risk of deployment failures, rather than solely waiting for large-scale infrastructure to emerge. Our feasible supply scenarios provide compelling evidence of the urgency of demand-side actions and establish benchmarks for the required level of resource efficiency.

研究分野：環境工学

キーワード：コンクリート 鉄鋼 脱炭素 資源効率

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

大量生産・大量消費型の経済発展によって人類は豊かさを享受した一方、生存の基盤である地球環境は限界点に近づいている。現在までに、9つの指標のうちの4つ(気候変動や生物多様性損失を含む)が既に地球の環境容量を超過した影響度に達していることが明らかになっており、その重大要因となっているのが金属やプラスチック、セメントを含む資源の生産活動である。UNEP 国際資源パネルによると、世界の温室効果ガス排出の50%以上、水消費と生物多様性損失に至っては90%以上が資源生産活動に起因しているという。即ち、地球の環境容量を超過することなく、持続的な経済活動を可能にする新たな資源生産・消費システムの確立は人類が直面している最重要課題であると言えよう。

その実現に向けた重要な第一歩は、資源利用に関する目標値を世界各国で共有し、国際調和のとれた取り組みを推進することである。しかし、地球の環境容量と整合する資源利用構造は科学的に解明されておらず、国際的目標値確立に向けた議論を支援できていない。こうした状況を受けて UNEP 国際資源パネルは、当該分野における研究を学術コミュニティーに強く求めているが、必要なデータの膨大さと解析の複雑さが故に研究は十分に進展しているとは言い難い。そのため、資源利用に関する国際的目標値の確立に向けて、「地球の環境容量下において今後、いかなる資源を、いかなる国が、どの程度利用可能なのか？」を早急に解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、地球の環境容量と整合する資源フロー・ストック・生産性目標を開発することである。既存の研究では、環境容量と資源循環構造の連動、目標値の資源種内訳、地域解像度、時系列変化が欠如しており、その科学的根拠と可用性が極めて低い状況にある。これに対して本研究では、多様な統計データと世界の資源循環構造を詳細に表現する数理モデルを統合することで、複数の環境容量と厳密に整合した資源種別の時系列目標値を、231カ国の地域解像度を有したまま開発する点に最大の独自性を有する。これにより、資源利用に関する目標値確立に対する国際貢献、および日本の循環型社会推進基本計画で5年おきに設定される各種数値目標の科学的基盤強化を達成する。

3. 研究の方法

システム分析を基礎とする以下の①から④を各種資源に順次適用することで上記の目的を達成する。

① 現状分析の実施：世界231の国・地域における過去110年間の資源フロー・ストック・生産性を同定することで、目標値開発の基礎となるデータを確立する。

② 物質フロー指標体系の構築：現状分析と並行して、物質フロー指標の体系的レビューを実施することで、持続可能な資源生産・消費システムへの転換の進展度合いを適切に表現する一連の評価指標体系を構築する。

③ 動学最適化型モデルの開発：動学資源フロー・ストックモデルを、ライフサイクルインベントリデータベースおよび環境容量データと接続することで、時系列目標値を導出するための動学最適化型モデルを開発する。

④ 動学最適化型モデルの適用による時系列目標の開発：動学最適化型モデルを各種資源に適用することで、資源フロー・ストック・生産性目標を開発する。

4. 研究成果

知見1：炭素予算内での基盤材料の供給は世界的に不足の可能性

気温上昇を1.5°C~2°C未満に抑制するためのCO₂排出許容量内での鉄鋼・セメントの供給可能量は世界的需要に対して不足する可能性が高い(図1参照)。具体的には、1.5°C目標と整合的な炭素予算内での供給可能量は2050年の成り行き需要と比較して、鉄鋼で58%から65%(四分位範囲)、セメントで22%から56%(四分位範囲)のレベルに留まると推定された。比較的低位な需要に対しても不足の傾向は同じであり、需要と供給は一致しない。なお、セメントの供給可能量は鉄鋼よりも不確実性の幅が大きく推定されているが、これは使用済み製品からのリサイクルによって一定程度の鉄鋼供給が可能である一方、セメントはそれが困難であること、インフラ整備が不確実なCCUSへの依存度がセメントでより高いこと等を反映している。これらの結果は、社会基盤材料が豊富で安価に手に入る時代の終わりを示唆するものである。鉄鋼・セメント部門の脱炭素化に向けては、関連インフラの整備を着実に進める一方、カーボンニュートラル社会と整合的な材料供給の世界的不足に社会全体で備える必要がある。

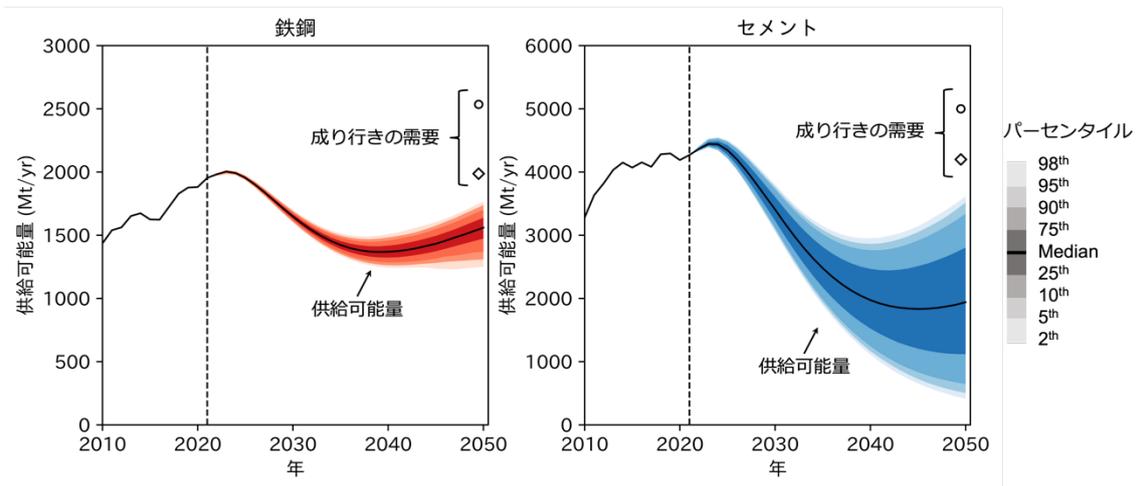


図1 気温上昇を1.5°C未満に抑制するための炭素予算内での鉄鋼・セメントの供給可能性（黒の実線は推定の中央値を、色付きの範囲は技術開発やインフラ整備に起因する不確実性を示す）

知見2：資源効率性を高めることで供給不足に対応可能

同じ量の材料でより多くのサービス（移動や居住等）を提供することが可能であり、世界的な供給不足に対応可能である。具体的には、設計最適化や車体の小型化、モノの共有化や長期利用、製造ロス削減等の取り組みが鍵となる。すなわち、材料をより大切に、効率的に利用する資源効率性を高める取り組みが求められる。必要な資源効率性のレベルは技術開発やインフラ整備の進展度合いに依存するが、本研究課題では推定結果の中央値を基に、製造業で約40%、建設業で約60%の資源効率性向上（すなわち40%~60%少ない材料利用で同レベルのサービス提供）を1.5°C目標と総合的なベンチマークとして提案した。

知見3：課題は総量の不足ではなく公平な分配

このような資源効率性を高める取り組みは、特に日本を含む高所得国に強く求められる。これは、高所得国では既に大量の社会基盤材料が製品やインフラとして社会に溜め込まれている一方、多くの低所得国では基本的ニーズを満たすために必要な量が依然として確保されていないためである（図2参照）。供給可能性に対する必要量（共に2050年までの累積値）は、鉄鋼で15%程度、セメントで60%程度であり、供給可能性の一部が「公平に分配」されれば、全世界の基本的ニーズを満たすことは可能である。しかし、現在も高所得国では、自動車の大型化や短期的なモノの買い替え、別荘の所有等を通して高い水準の材料需要が維持されており、公平な分配を実現するためには、特に高所得国の資源効率性を高めることで、限られた資源の囲い込みや溜め込みを抑制する必要がある。

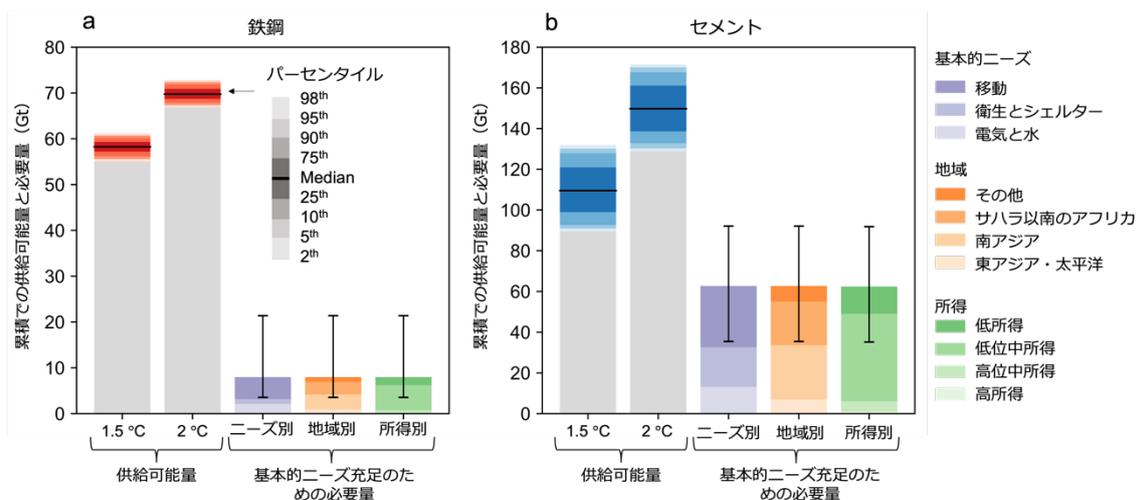


図2 炭素予算内での鉄鋼・セメントの供給可能性と基本的ニーズ充足のための必要量の比較（各データは2015年から2050年までの累積値）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Takuma Watari, Zhi Cao, Sho Hata, and Keisuke Nansai	4. 巻 13
2. 論文標題 Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 4158
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41467-022-31806-2	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, Sho Hata, Keisuke Nansai, and Kenichi Nakajima	4. 巻 6
2. 論文標題 Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Sustainability	6. 最初と最後の頁 336
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41893-022-01025-0	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 Takuma Watari, Zhi Cao, Andre Cabrera Serrenho, and Jonathan Cullen	4. 巻 26
2. 論文標題 Growing role of concrete in sand and climate crises	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 iScience	6. 最初と最後の頁 106782
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.isci.2023.106782	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, Stephen Northey, Damien Giurco, Sho Hata, Ryosuke Yokoi, Keisuke Nansai, and Kenichi Nakajima	4. 巻 179
2. 論文標題 Global copper cycles and greenhouse gas emissions in a 1.5 °C world	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Resource Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 106118
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.resconrec.2021.106118	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 Ryosuke Yokoi, Takuma Watari, and Masaharu Motoshita	4. 巻 15
2. 論文標題 Future greenhouse gas emissions from metal production: gaps and opportunities towards climate goals	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Energy and Environmental Science	6. 最初と最後の頁 146-157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1039/D1EE02165F	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 and Kenichi Nakajima	4. 巻 69
2. 論文標題 Contraction and convergence of in-use metal stocks to meet climate goals	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Global Environmental Change	6. 最初と最後の頁 102284
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.gloenvcha.2021.102284	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, and Damien Giurco	4. 巻 312
2. 論文標題 Sustainable energy transitions require enhanced resource governance	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 127698
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2021.127698	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 南齋 規介, 渡 卓磨	4. 巻 33
2. 論文標題 物質利用の革新的変化からカーボンニュートラル社会の実現に迫る	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 廃棄物資源循環学会誌	6. 最初と最後の頁 17-24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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23件（うち招待講演 7件 / うち国際学会 16件）

1. 発表者名 Zhi Cao and Takuma Watari
2. 発表標題 Envisioning sustainable material cycles in a carbon-neutral future
3. 学会等名 The 14th ISIE Socio-Economic Metabolism section conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横井峻佑, 渡卓磨, 本下晶晴
2. 発表標題 SSPシナリオに基づく将来の金属生産に伴う温室効果ガス排出量と気候変動目標の関係
3. 学会等名 エコデザイン・プロダクツ&サービス 2022シンポジウム (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takimoto H., Kosai S., Watari T., Kashiwakura S., Yamasue E.
2. 発表標題 Global target by 2050 to reduce natural resource use in the automotive industry
3. 学会等名 The 15th Biennial International Conference on EcoBalance (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yokoi R., Watari T., Motoshita M.
2. 発表標題 Future metal production and associated greenhouse gas emissions with implication for climate goals
3. 学会等名 The 15th Biennial International Conference on EcoBalance (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Cheng Y., Watari T., Nakajima K., Seccatore J., Veiga M. Marcello, Nansai K
2. 発表標題 Gold production and mercury consumption from artisanal and small-scale mining
3. 学会等名 The 15th Biennial International Conference on EcoBalance (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Cheng Y., Watari T., Seccatore J., Nakajima K., Nansai K.
2. 発表標題 Comprehensive Review of Gold Production, Mercury Consumption and Emission in Artisanal and Small-scale Gold Mining (ASGM)
3. 学会等名 The 15th International Conference on Mercury as a Global Pollutant (ICMGP) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yokoi R., Watari T., Motoshita M.
2. 発表標題 Temporally-explicit abiotic depletion potential (TADP) of mineral resources based on future demand projections
3. 学会等名 SETAC Europe 32nd Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 Bulk material cycles at national level in a zero-emission future
3. 学会等名 12th session of the ISIE Online Perpetual Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 The availability of copper - a perspective from science
3. 学会等名 14th Copper Academy (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 Critical material risks in the global energy transition
3. 学会等名 9th Japan-U.S. Bilateral Meeting on Rare Metals (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡卓磨, Zhi Cao
2. 発表標題 カーボンニュートラル社会と統合的なセメント・コンクリート循環構造の解明
3. 学会等名 第17回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 横井峻佑, 渡卓磨, 本下晶晴
2. 発表標題 金属生産に伴う将来の温室効果ガス排出量と気候変動目標との関係
3. 学会等名 第17回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 滝本響, 光斎翔貴, 渡卓磨, 柏倉俊介, 山末英嗣
2. 発表標題 次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化
3. 学会等名 第17回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡卓磨
2. 発表標題 世界金属資源循環システムモデルの開発と脱炭素シナリオへの適用
3. 学会等名 第38回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡卓磨
2. 発表標題 金属ストックの節減と収斂
3. 学会等名 日本鉄鋼協会 サステナブルシステム部会 グリーンエネルギーフォーラム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Yokoi, Takuma Watari, and Masaharu Motoshita
2. 発表標題 Future projection of greenhouse gas emissions associated with metal production based on shared socio-economic pathways
3. 学会等名 the 10th International Conference on Life Cycle Management (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Watari, Keisuke Nansai, Masahiro Oguchi
2. 発表標題 Global plastic production and use in a carbon-constrained world
3. 学会等名 International Industrial Ecology Day 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Yokoi, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Takuma Watari, Masaharu Motoshita
2. 発表標題 Responsibility of Consumers for Pressure on Mining Capacity: Decomposition Analysis of Scarcity-weighted Metal Footprints in Japan
3. 学会等名 2021 International Conference on Resource Sustainability (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryosuke Yokoi, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Takuma Watari, Masaharu Motoshita
2. 発表標題 Responsibility of Consuming Countries for Mining Capacity - Decomposition Analysis of Scarcity - weighted Metal Footprints in the Case of Japan -
3. 学会等名 SETAC Europe 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 The role of critical minerals and resource governance in sustainable energy transitions
3. 学会等名 Australia Japan Symposium: Critical minerals for climate change mitigation; Reducing risks in lithium supply chains (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渡卓磨
2. 発表標題 カーボンニュートラル社会における金属生産・利用・循環システム
3. 学会等名 一般社団法人日本メタル経済研究所「カーボンニュートラルとメタル」セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takuma Watari
2. 発表標題 The future of plastic use in a carbon-constrained world
3. 学会等名 World Resources Forum 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 横井峻佑，南齋規介，中島謙一，渡卓磨，本下晶晴
2. 発表標題 日本の消費活動が世界の採掘容量へ及ぼす影響の低減：希少性メタルフットプリントの要因分解分析
3. 学会等名 第49回環境システム研究論文発表会
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			
英国	University of Cambridge	University College London		
ベルギー	University of Antwerp			
オーストラリア	University of Technology Sydney			
中国	Chinese Academy of Science	Nankai University		
米国	University of California, Santa Barbara			