

課題番号：3-2201

研究課題名：カーボンニュートラル目標と調和する日本の物質フロー構造の解明

研究代表者名：南齋規介（国立研究開発法人国立環境研究所）

体系的番号：JPMEERF20223001

重点課題：主：【⑪】ライフサイクル全体での徹底的な資源循環に関する研究・技術開発

重点課題：副：【⑦】気候変動の緩和策に係る研究・技術開発

行政ニーズ：（2-6）循環経済（サーキュラーエコノミー）への移行による脱炭素社会の実現に向けたシナリオ分析の高度化

研究実施期間：2022年度～2024年度

### 【研究体制】

#### サブテーマ1

南齋規介、小出瑠、渡卓磨  
（国立研究開発法人国立環境研究所）

#### サブテーマ2

平井康宏、矢野順也  
（国立大学法人京都大学）  
河井紘輔、牧誠也  
（国立研究開発法人国立環境研究所）

#### サブテーマ3

井伊亮太、山本圓、  
長野尚也、永友佑  
（パシフィックコンサルタンツ株式会社）

# 1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

## 【研究背景】

日本における物質利用の全体像は「循環型社会形成推進基本計画（循環基本計画）」に基づく物質フローの観測で把握される。そして、物質フローの「入口」「循環」「出口」に注目した4つの物質フロー指標を規定し、各指標には2025年度の目標値が設定されている。

しかし、現在の目標値は日本が2050年カーボンニュートラル社会を宣言する前に定められている。カーボンニュートラルの実現には革新的な物質フローの転換の必然性を鑑みると、カーボンニュートラルと物質フロー目標の整合性を検証し、今後の目標設定の考え方を深化させることが求められる。

## 【研究開発目的】

本研究では、GHG排出量を経済社会における物質のフロー、ストック、循環、廃棄の動態変化を基礎に算定するモデルを新たに開発し、2050年カーボンニュートラル社会と整合する日本の物質フロー構造を解明することを目的とする。



# 1. 研究背景、研究開発目的及び研究目標

## 【研究目標（全体目標）】

本研究の全体目標は、物質のフローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する数理モデルの開発を通じ、2050年カーボンニュートラル社会と調和する日本の物質フロー構造をシナリオ分析に基づき解明することである。その科学的知見と数値情報の提供により、物質フローの転換を担う多様なステイクホルダー（関係主体）が「カーボンニュートラル先導型の循環経済へ移行するための物質フロー管理」を実践することを支援する。これにより、脱炭素社会づくりを資源管理から促進する。

モデル開発は日本の物質フローを入口から捉えるトップダウン型のフロー・ストックモデルと循環・出口の物質フローを実態調査データから組み上げるボトムアップ型モデルを軸として行い、循環基本計画に基づく物質フロー指標の目標設定に利用可能な解像度を付与する。同時に、資源循環CCUS（二酸化炭素回収・利用・貯留）技術のライフサイクル評価手法を開発し、廃棄物処理CCUS技術を上記モデルに搭載するための論理基盤を強化する。

## 2. 研究目標の進捗状況

### (1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ1)

#### サブテーマ1：日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発

##### 【サブテーマ1の研究目標】

日本国内の物質フローとストックの変化に応じたGHG排出量の増減を推計する動的最適化モデルを開発し、カーボンニュートラルに向かうGHG排出制約下で利用可能な物質量（物質バジェット）を算定する。さらに、二次資源利用、素材代替、寿命延長等の循環経済オプションによるGHG排出削減効果をモデルに組み込み、物質バジェットへの影響を定量化する。得られる知見を総括し、カーボンニュートラル移行過程における物質フローの転換像を循環経済の進展度に応じて提示する。

##### 【令和4年度研究計画】

- ・ 金属資源を対象にGHG排出量と連動する日本のフロー・ストックモデルの設計と開発。
- ・ 金属資源に関する循環経済オプションデータの収集と整備。
- ・ 日本の物質フローと消費構造との関係をフットプリント分析に基づき同定

##### 【令和5年度研究計画】

- ・ 土石資源とプラスチックを対象としたフロー・ストックモデルの設計と開発。
- ・ 土石資源とプラスチックに関する循環経済オプションデータの収集と整備と廃棄物CCUS技術のモデルへの組み込み。
- ・ 金属、土石、プラスチックの物質フロー時系列変化に対応する消費転換策の検討。

##### 【令和6年度研究計画】

- ・ バイオマス資源を対象としたフロー・ストックモデルの開発、循環経済オプションデータの整備と輸入製品に伴う国外GHG排出の算定。
- ・ 主要産業別のカーボンニュートラルと調和する物質フロー目標の開発。
- ・ カーボンニュートラルと調和する消費の脱物質化目標の開発。

【自己評価】 計画通り進展している

## 2. 研究目標の進捗状況

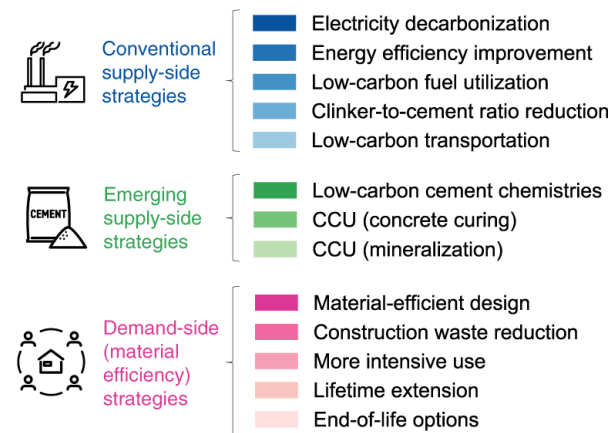
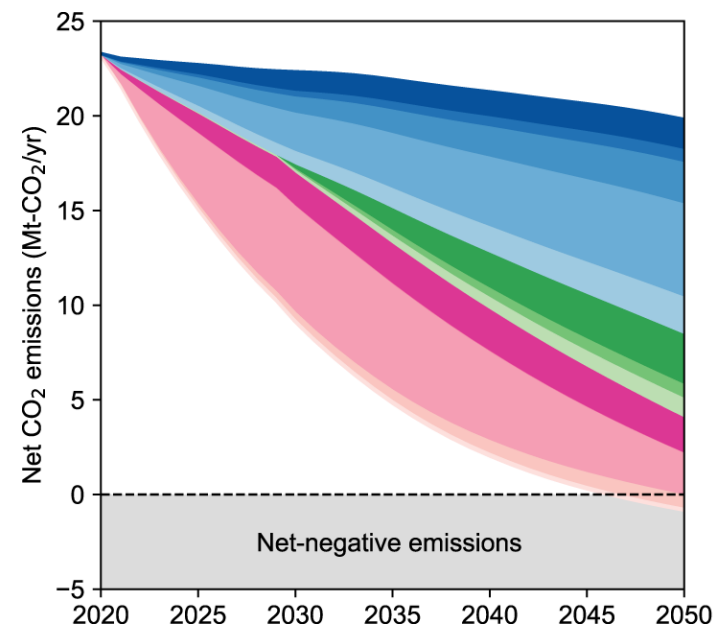
### (2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ1)

#### 【具体的な理由・根拠】

国内の物質フロー・ストック動態と温室効果ガス排出との関係をモデル化する日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発は計画通り進み、金属資源、土石資源への応用研究の成果が国際的に著名な学術雑誌に掲載されており、産業エコロジー学を中心とする学術分野への貢献ができた。さらに、論文成果の報道発表を通じて国内の企業や団体からも問い合わせがあり、意見交換の機会を得て迅速な成果の社会還元も実施できた。

#### 【目標達成の見通し】

日本版物質フロー・ネクサスモデルの開発を継続し、日本の温室効果ガス排出に関連する主要資源についてカーボンニュートラル社会と統合的な物質フロー動態を解明する。一方で、動態変化の消費側への影響を同定するための手法開発にも着手しており、目標達成の見通しは明るい。



図：日本におけるセメント・コンクリート部門を対象とした供給側（青・緑）と需要側（赤）の組み合わせによるカーボンニュートラル達成経路

## 2. 研究目標の進捗状況

### (1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ2)

#### サブテーマ2：静脈フローモデルの開発

##### 【サブテーマ2の研究目標】

CE（サーキュラーエコノミー）&CN（カーボンニュートラル）社会における将来の廃棄物発生量を推計する。家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルを開発・拡張し、CE&CN社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提示する。さらに、カーボンニュートラルを見据えた素材産業の生産技術変化を踏まえた廃棄物処理・リサイクル工程のボトムアップ型プロセスモデル群を開発し、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを提示する。

##### 【令和4年度研究計画】

- ・GHG排出量半減を目指した廃棄物発生量推計モデルβ版、及び、一般廃棄物の細組成情報を活用した家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルβ版を開発。
- ・食品消費・廃棄に関する行動把握のためのアンケート調査の実施。焼却、埋立などの基本的処理技術、食品廃棄物リサイクル等に係るモデル開発。

##### 【令和5年度研究計画】

- ・廃棄物発生量推計モデルを拡張し、CE&CN社会における廃棄物発生量を推計。また、結合モデルを時間軸（過去・現在→将来）・空間軸（地域→全国）に拡張。
- ・プラスチック、金属類リサイクル等に係るモデル開発。GHG排出原単位に係る廃棄物試料の分析。代表的な素材産業における再生資源受け入れ可能量の推定。

##### 【令和6年度研究計画】

- ・家計消費及び廃棄物発生量の将来シナリオを描き、廃棄物発生量推計モデル及び結合モデルを用いて感度分析を行い、家計消費及び廃棄物発生量の変動を明示。
- ・古紙リサイクル・木質材料リサイクル等に係るモデル開発。カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・循環利用量・処理技術の転換シナリオを提示。

【自己評価】 計画通り進展している

## 2. 研究目標の進捗状況

### (2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ2)

#### 【具体的な理由・根拠】

廃棄物発生量および組成の将来推計に関しては、廃棄物発生量推計モデルおよび家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルを予定どおり進めている。また、ボトムアップ型プロセスモデル群の作成に関しては、一部計画を前倒しし、令和5年度目標の「代表的な素材産業における再生資源受け入れ可能量の推定」を既に実施しており、順調である。研究成果は投稿論文が1報掲載された他、学会での口頭発表や、地方自治体におけるごみ処理広域化の検討会での報告により、社会還元を実施している。

#### 【目標達成の見通し】

引き続き、廃棄物発生量予測モデルおよび家計消費と一般廃棄物発生量の結合モデルの開発を進め、CE&CN社会における消費行動と廃棄行動のあり方を提示する。また、ボトムアップ型プロセスモデルの対象をより広範なプロセス・廃棄物に拡張して、カーボンニュートラル移行過程における廃棄物発生量・処理技術の転換シナリオを示す。ケーススタディの実施に耐えるモデルを既に開発しており、目標達成の見通しは明るい。

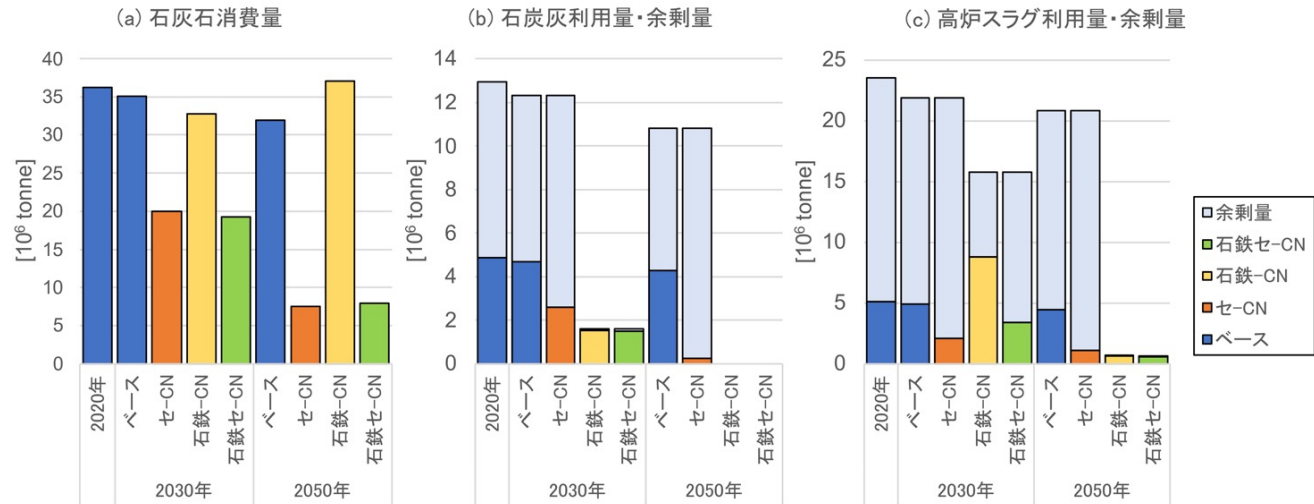


図 セメント産業での石灰石・石炭灰・高炉スラグの消費量等の将来推定結果

## 2. 研究目標の進捗状況

### (1) 進捗状況に対する自己評価 (サブテーマ3)

#### サブテーマ3：資源循環CCUS技術のカーボンニュートラル評価

##### 【サブテーマ3の研究目標】

資源循環分野へ導入するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage) 技術を対象に、2050年カーボンニュートラル目標を達成する物質・エネルギーシステムの将来シナリオへの適合性を踏まえたライフサイクル評価を実施する論理的枠組を提案し、複数種類の技術で試算・適用することで、関連技術開発の立案・評価や導入ロードマップの作成等での活用を念頭においた評価情報を提示する。

##### 【令和4年度研究計画】

- ・国内外のCNシナリオとそのCCUSの取扱内容、評価関連ガイドラインや研究事例・国際標準化動向及び廃棄物処理技術への組合せも踏まえたCCUS技術の調査・整理。

- ・CNシナリオに調和したCCUS技術の評価の枠組案を作成。

##### 【令和5年度研究計画】

- ・作成した枠組案に基づく2050年に向けた日本のCNシナリオに適合するCCUS技術の要件の導出。

- ・技術実証事業等の事例調査も含めて評価に必要なデータの収集。

- ・要件に照らしたCCUS技術の評価の試行と結果に基づく評価枠組みの見直し。

##### 【令和6年度研究計画】

- ・本研究における物質フロー・静脈フローの転換シナリオに対応した資源循環分野でのCCUS技術の2050年へ至る導入可能性を、炭素需給等を踏まえ定量的に試算。

- ・技術開発等の関係者への評価内容の提示・説明を実施。

【自己評価】 計画通り進展している



## 2. 研究目標の進捗状況

### (2) 自己評価に対する具体的な理由・根拠と目標達成の見通し (サブテーマ3)

#### 【具体的な理由・根拠】

資源循環CCUSに関する国内外の動向や技術の調査・整理を行った上で、CNシナリオに調和したCCUS技術の評価の枠組案を作成し、そのうちCN面からの評価指標値を複数の技術を対象に計算した。動向・技術の調査・整理結果を国や自治体の環境行政における検討過程に適宜提供するなど、迅速な成果の社会還元が実施できた。

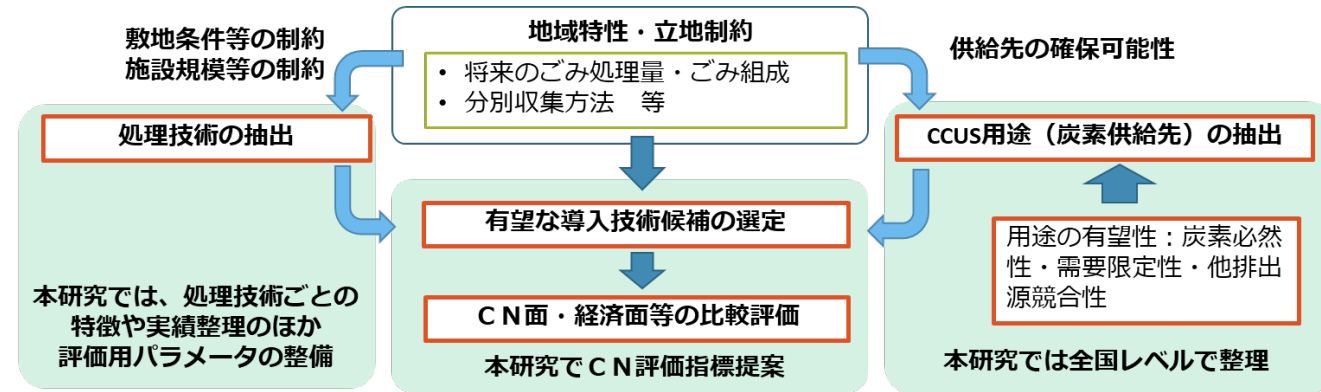


図 資源循環CCUS技術を選択するための評価枠組みと本研究の実施事項

#### 【目標達成の見通し】

CCUS技術や需要に関するデータ収集を継続し、地域特性を考慮した全国的な評価計算を実施することで、評価枠組案の検証・見直しを行うとともに、評価結果を技術開発者等の関係者への提示・説明を実施する。技術開発者等との接点は既に保有しており、目標を達成できる見込み。

### 3. 研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

【行政等が活用することが見込まれる成果】

・ UNEP-IRP（国連環境計画-国際資源パネル）が現在準備している「Science-based target for resources」に関するレポートにサブテーマ1による論文が引用されており、カーボンニュートラルへの転換と物質消費の抑制との整合性に関する知見が活用された。

・ 環境省が委託した「令和4年度廃棄物・資源循環分野における2050カーボンニュートラル実行計画等検討業務」において、循環経済が廃棄物・資源循環分野の脱炭素化に与える影響の検討・整理においてサブテーマ1における論文が引用されており、第38回環境省中央環境審議会循環型社会部会で提示された「廃棄物・資源循環分野における温室効果ガス排出実質ゼロに向けた中長期シナリオ(案)」を踏まえた今後の検討においての知見の活用が見込まれる。

・ 東京都の特別区長会調査研究機構が進めている「特別区におけるCO<sub>2</sub>の地産地消に向けて ～清掃工場のCO<sub>2</sub>分離・活用と23区の役割～」（提案区：東京二十三区清掃一部事務組合）の研究で、本研究サブテーマ3で得られた知見を求めに応じて提供する予定である

### 3. 研究成果のアウトカム（環境政策等への貢献）

#### 【行政等が既に活用した成果】

・サブテーマ3の分担研究者らは受託業務を通じて、グリーンイノベーション基金事業において環境省環境再生・資源循環局廃棄物適正処理推進課が進めている「廃棄物・資源循環分野におけるカーボンニュートラル実現」プロジェクトの研究開発・社会実装の検討（第5回 産業構造審議会 グリーンイノベーションプロジェクト部会 グリーン電力の普及促進等分野ワーキンググループ、2023年3月28日）を本研究の遂行を通じて得た知見に基づき支援し、直接的には本研究において調査した国外事例情報が活用された。

・第35回 環境省中央環境審議会循環型社会部会で提示された「資源循環分野からの地域循環共生圏モデル」を更新するための検討が、令和4年度廃棄物処理システムにおける脱炭素・省CO<sub>2</sub>対策普及促進方策検討委託業務で実施されており、本研究で調査した国内のCNシナリオの調査結果を活用した。

・サブテーマ2のごみ処理広域化における最適施設配置の検討結果について、京都府・府内市町で構成する「第4回今後のごみ処理のあり方に関する検討会（2023年3月28日開催）」にて報告し、広域化計画の今後の具体化の検討資料として活用された。

## 4. 研究成果の発表状況

### 【誌上発表（査読あり：5件）】

- 1) Takuma Watari, Zhi Cao, Sho Hata, and Keisuke Nansai (2022) Efficient use of cement and concrete to reduce reliance on supply-side technologies for net-zero emissions, *Nature Communications*, 13, 4158.
- 2) Takuma Watari, Sho Hata, Kenichi Nakajima, and Keisuke Nansai (2023), Limited quantity and quality of steel supply in a zero-emission future. *Nature Sustainability*, 6, 336-343.
- 3) Takuma Watari, Zhi Cao, Andre Cabrera Serrenho, and Jonathan Cullen (2023) Growing role of concrete in sand and climate crises, *iScience*, 26, 106782.
- 4) Sho Hata, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima (2023) Supply chains factors contributing to improved material flow indicators but increased carbon footprint, *Environmental Science & Technology*, online available, doi.org/10.1021/acs.est.3c00859.
- 5) Yano J., Yanagawa R., Koshiba J., Hirai Y., Sakai S. (2023) Greenhouse gas reduction potential by household waste prevention, *Journal of Material Cycles and Waste Management.*, 25, 1792-1806.

### 【口頭発表（査読なし：24件）】

- ・ Nansai K. (国外) (2022) Material budgets towards a net-zero carbon society, 2022 International Conference on Resource Sustainability (icRS 2022), Aug. 2022, Online, Invited as Keynote.
- ・ 平井康宏 (国内) (2022) 廃プラ、紙くず、木くず中の化石由来炭素含有量, 第33回廃棄物資源循環学会研究発表会

### 【知的財産権：0件】

### 【国民との科学・技術対話：1件】

- 一般公開共催シンポジウム「TNFD対応における研究者との協働ポイントを知る」における企画セッション（カーボンニュートラル社会における物質消費と循環）（共催：国立環境研究所・第18回日本LCA学会研究発表会, 2023年3月8日, つくば国際会議場中ホール200, 観客数約200名（内, オンライン参加100名）にて成果報告

## 5. 研究の効率性

### 【研究体制】

3つのサブテーマの構成を物質フローの入り口からモデル化（サブ1）、出口側の廃棄物と循環側からモデル化（サブ2）、循環側に炭素循環を組み込む価値を評価（サブ3）する体制を組むことで、日本の物質フローを包括的に重複なく捉えることが可能な効率的な体制を取っている。

また、サブ2にサブ1と同じ所属の分担者が参画することで、サブ1とサブ2の連携を容易にしておき、サブ3を環境行政支援を専門とする民間会社が担うことで、研究成果の行政への情報提供に速報性を持たせることを狙った体制を敷いている。

### 【課題管理】

- ・ マイクロソフト社のTeamsに研究参画者全員で共有するTeamを作り、ファイルの共有だけでなく、ディスカッションと情報共有を円滑に実施。
- ・ アドバイザーボード（AB）のメンバーに経済学、工学、政策学系の専門家だけでなく、金融機関による企業環境価値を実践する実務家を招くことで、研究結果の解釈と成果の還元を政策面だけでなく、ビジネス面を意識したAB会合を実施。
- ・ 国民との対話の機会として、TNFD (Taskforce on Nature-related Financial Disclosures) に注目する金融機関の担当者が参加するシンポジウムで特別セッションを組むことで、研究成果の還元先を意識した課題運営を行なった。

### 【研究資金の運用】

- ・ 打ち合わせやAD会合をオンラインで実施し、旅費の支出を抑制することができた。