

令和 6 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03668

研究課題名（和文）パリ協定時代の脱炭素・気候変動対策シナリオ研究の新展開

研究課題名（英文）New frontiers of decarbonization and climate change mitigation scenario after the Paris Agreement

研究代表者

杉山 昌広（Sugiyama, Masahiro）

東京大学・未来ビジョン研究センター・教授

研究者番号：20503428

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,100,000円

研究成果の概要（和文）：気候科学、緩和策などの分野横断型のシナリオ研究を基本とし、関連する研究分野として、持続可能性トランジション研究や地球システムガバナンス研究、公衆認知などを参照しながら、公開されているシナリオの再解析、文献調査や概念整理を通じて、現状と新たなシナリオ研究の枠組みおよび今後の課題を明らかにした。またシナリオの社会的受容性を理解するために、太陽放射改変や需要側対策それぞれについて複数国で社会調査を行った。個別具体的な技術イノベーションやライフスタイル変容などをユーザーを想定し、明示的に扱ったシナリオを、異なる国の文脈などで開発する枠組みの必要性が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動に関する政府間パネル（IPCC）などで中心的な役割を果たしてきた、シナリオ研究は、グローバルで普遍的な理解を確立し、気候変動問題とその解決策の世界での共通理解を築き上げるのに貢献してきた。しかし本研究で示されたシナリオの方向性とその使い方は、旧来と真逆と断言し、個別具体的に文脈依存的な枠組みである。また本研究ではシナリオのコミュニケーションの困難な点、すなわち専門家が重視する点が伝達に難しいことも気候工学の事例で示した。こうした新たな枠組みを示したところに本研究の学術的意義と社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：Based on cross-disciplinary scenario research, including climate science and mitigation, and referring to related research fields such as sustainability transitions research, earth system governance research, and public perception, the current status and new scenario research framework and future issues are clarified through reanalysis of published scenarios, literature review, and conceptualization. In order to understand the social acceptability of the scenarios, social surveys were conducted in several countries for solar radiation modification and demand-side solutions, respectively. A new framework to develop scenarios that explicitly address specific technological innovations, lifestyle changes, etc., with users in mind, and in the context of different countries, has been proposed.

研究分野：環境政策、長期気候政策

キーワード：気候政策 シナリオ 気候工学 公衆認知 ELSI

## 1. 研究開始当初の背景

2015年に合意されたパリ協定は、人為的な気候変動による気温上昇を2度より十分に低い水準に抑え、さらに1.5度に抑える努力を追求することを目標としている。同時に地球温暖化対策の枠組みは、京都議定書のトップダウンからボトムアップを含んだハイブリッドの枠組みに変化してきている。そのため、取り組みは各国中央政府に限られず、地方自治体、ビジネス、金融、環境保護団体にも広がりを見せつつあり、ESG(環境・社会・ガバナンス)投資も活発になってきている。こうした潮流の中で、気候変動対策のシナリオ研究の役割も大きく変化してきている。

シナリオ研究の難しさは、こうした新たな要求にもかかわらず、統合的なシナリオを扱う必要があるという点である。一定の多様性は許容されるが、例えばTaskforce on Climate-related Financial Disclosure (TCFD)のシナリオだけが Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC、気候変動に関する政府間パネル)で扱うシナリオと根本的に異なるものを用いることはできない。したがって、広義の気候ガバナンスを促進するためには、旧来のIPCCでのシナリオを超えた新たなシナリオが必要となってきている。

## 2. 研究の目的

本研究は、パリ協定の実施段階に入った中で、脱炭素・気候変動対策シナリオの方法論に求められている新たな導出枠組みと具体的な創出方法を明らかにすることを目的とする。シナリオには主に三つの課題がある。(1)自治体、ビジネス、環境保護団体といった多様なステークホルダーがシナリオの新たなユーザーとして現れてきている。(2)急速な技術変化を明示的に考慮する必要が生じてきている。(3)負の排出技術、温暖化対策としての人工的気候改変、大幅な社会変革と需要減などの極端な地球温暖化対策もシナリオで扱う必要が生じている。

こうした新たな社会的・政策的状況に対応でき、気候ガバナンスに資するシナリオ研究の新たなフレームワークとは何か。気候変動対策シナリオ研究は、倫理的、社会的、政治的、経済的、技術的な広義の気候ガバナンスの議論を促すためにはどうあるべきか。本研究課題では、これらの問いに対する回答を、文献調査や事例研究、アンケート調査、統合評価モデルなどを組み合わせ、立体的に明らかにしていくことを目的とする。

## 3. 研究の方法

研究の視角としては、気候科学、緩和策などの分野横断型のシナリオ研究を基本とし、関連する研究分野として、持続可能性トランジション研究や地球システムガバナンス研究、公衆認知などを参照しながら、公開されているシナリオの再解析、文献調査や概念整理を通じて、現状と新たなシナリオ研究の枠組みおよび今後の課題を明らかにした。またシナリオの社会的受容性を理解するために、太陽放射改変や需要側対策それぞれについて複数国で社会調査を行った。

文献調査としては、具体的に以下の項目を実施した。

- ・IPCCなどで活用されてきた分野横断型シナリオ研究の過去から現在までの推移について、気候モデリング、影響評価、統合評価モデリングまで広範なレビューを行った。

- ・太陽放射改変や二酸化炭素除去については、地球システムモデルや統合評価モデルなどの研究を収集し、学術界の動向とともに世界のガバナンスの議論を整理した。

- ・需要側対策シナリオについては、IPCCに採用されている統合評価モデルによるシナリオの最終エネルギー消費に関する頻度分布、需要側対策を評価できる変数の提出率などについて再解析した。さらにライフスタイルの変容や消費者の行動の変化を伴う需要側対策シナリオについての拡充を図るために、広範に関連する学術分野について文献調査を行った。

- ・また、シナリオの在り方を検討するためのIPCCと科学・政策インターフェースについても文献調査を実施した。

社会調査としては以下の項目を実施した。

- ・太陽放射改変について、シナリオについて問うオンラインアンケート調査を日本、インド、フィリピン、オーストラリアの四か国を対象に実施した。サンプル数は各国で600程度である。シナリオとしては、上述したレビューを参考に、太陽放射改変を緩和策の補完策として用いるシナリオと、太陽放射改変を最後の救済策として利用するシナリオの二つを構築し、一般市民に提示してアンケートに回答していただいた。調査票は以前、我々のグループが行ったアンケート調査(Sugiyama et al. 2020, <https://doi.org/10.1080/17524032.2019.1699137>)を元に開発し、シナリオについての項目を追加した。

- ・需要側対策については、オランダのフローニンゲン大学の研究グループと共同研究を実施し、オンラインアンケートを実施した。ライフスタイル変容など需要側対策が進んだシナリオをビデオ形式で提示し、日本とインドの一般市民に実現可能性と多次元のウェルビーイングなどについて質問した。

#### 4. 研究成果

分野横断型シナリオ研究や、太陽放射改変、二酸化炭素除去、需要側対策に関する一連の文献レビューから以下のことが明らかになった。

研究の背景でも指摘したように、気候変動問題の重点が、科学的な理解や影響評価から解決策や実際の政策に移る中、シナリオ研究にも多くの変化が見られる。例えば、太陽放射改変については、従来は理想的な二酸化炭素濃度 4 倍増による温暖化を相殺するために必要な太陽放射改変を実施して地球システムモデルの挙動を見るとというスーパーコンピュータのシミュレーション(GeoMIP G1 など)が行われていたが、最近では、具体的に将来の温室効果ガス排出削減がある程度進んだとき、太陽放射改変がどのように貢献できるか、また、その副作用はどれほどかを検討するシナリオが研究されている。さらに、工学の制御理論を用いて、太陽放射改変の不確実性が存在する中でも少なくともモデル上では狙った気温低下を実現し気温上昇を相殺するようなアルゴリズムを適用したシナリオも研究されてきている。

二酸化炭素除去についても、旧来は一旦大気に排出されてしまった二酸化炭素をどれほど除去すればパリ協定で謳われた 1.5 度目標を達成できるかといったシナリオ研究が中心であったが、最近では、二酸化炭素除去がもたらす様々な副作用について具体的に検討し、またそれを回避するための新たなシナリオが研究されている。具体的には IPCC の第五次評価報告書を端緒に一大論争になった二酸化炭素回収貯留付きバイオマスエネルギーと食料供給などの土地に関する競合問題については、それを避けるための新しい直接空気回収やその他の二酸化炭素除去を取り込んだシナリオが研究されている。

需要側対策も同様である。需要側対策は全体的な方向性打ち出すのではなく、例えばどのようなハードルがあり、実現が難しいのか、どの対策が最も可能性が早く実施ができ効果があるのかといった議論が徐々に始まりつつある。なお、需要側対策というと、ライフスタイル変容について関心が集まるが、現状のところ、大きな温暖化対策効果を示しているのは電気自動車の導入やヒートポンプ式冷暖房・給湯器など、需要側の技術導入による効果が大きいことも明らかになった。こうして技術は一般消費者に一定の変化を求めるものの、肉食や飛行機利用の禁止ほど大幅な変化でもないため、今後も大きく広がる可能性がある。

こうした一連の変化を踏まえると、シナリオが中心的な役割を果たした IPCC などの科学と政策のインターフェースも変化をしてきている。従来はグローバルで普遍的な対策や原因を明らかにすることがシナリオ研究に求められてきたが、気候変動科学の解決策への転向と呼ばれるように IPCC や分野横断型シナリオ研究に求められる役割も変化しつつある。今後のシナリオの作成枠組みとしては、ユーザーを具体的に想定し、個別具体的な解決策に踏み込んだシナリオを作り出すことが重要であることが分かった。

太陽放射改変についてのオンラインアンケート調査では、既往文献の学部生対象のアンケート調査を一般市民に広げたときも、グローバルノース・グローバルサウスの間で太陽放射改変に関する態度の差が確認された。すなわち、気候変動の影響を受けやすいグローバルサウスの方が太陽放射改変について支持する傾向があることが統計的に有意に確かめられた。二つのシナリオをランダムに回答者に提示したところ、シナリオが回答者の態度へ与える影響は極めて限られるということが明らかになった。その理由の一つとしては、シナリオの理解度が非常に低かったことがあげられる。特に、研究者側が重要視する太陽放射改変の規模については回答者にとって理解が難しいことが示された。いずれにせよ、回答者は太陽放射改変について慎重であり、倫理的・社会的・法的側面を検討し、責任ある研究・イノベーションを進めていくことの重要性が再確認された。

需要側対策についてのオンラインアンケートでは、運輸のモーダルシフトや肉食減少、飛行機利用の減少などを伴う需要側対策シナリオは、気候変動対策としては、日本、インドの回答者どちらも有効であると回答した。一方、生活の質については向上すると回答した傾向がインドでは強かったのに対し、日本では変化しないと答えた回答者が多かった。技術イノベーションと違い社会的なライフスタイル変容などは潜在的には速いスピードで実施できる可能性があるが、国によって認識が異なることが示唆され、グローバルな効果についてはより細かな検討が必要である。

研究全体を通じて、個別具体的な技術イノベーションやライフスタイル変容などを明示的に扱ったシナリオを、異なる国の文脈などで開発する枠組みの必要性が明らかになり、具体的な事例も一部見て取れる。しかし、これはグローバルで普遍的な理解を確立し、気候変動問題とその解決策の世界での共通理解を築き上げるのに貢献してきたシナリオ研究の旧来の方向性とは大幅に異なることになる。このような枠組みを日本やアジアといった具体的な文脈で実施し、またグローバルなシナリオ研究とどのように接合していくべきかは、今後の大きな研究課題である。

一連の成果は、すでに査読付き論文やレビュー論文、論考、その他の出版物として公表されている(詳しくは実績一覧を参照)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 6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 Lockley Andrew, Xu Yangyang, Tilmes Simone, Sugiyama Masahiro, Rothman Dale, Hindes Adrian	4. 巻 4
2. 論文標題 18 Politically relevant solar geoengineering scenarios	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Socio-Environmental Systems Modelling	6. 最初と最後の頁 18127 ~ 18127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18174/sesmo.18127	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 陳 奕均、城山 英明、杉山 昌広、青木 一益、木村 宰、森 晶寿、太田 響子、松浦 正浩、松尾 真紀子	4. 巻 15
2. 論文標題 日本における持続可能性移行 (サステナビリティ・トランジション) 研究の現況と今後の展望	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 環境経済・政策研究	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14927/reeps.15.2_1	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 小杉隆信	4. 巻 44(3)
2. 論文標題 太陽放射変化の副次的影響を考慮した統合評価の動向	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 エネルギー・資源	6. 最初と最後の頁 176 ~ 180
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 -

1. 著者名 Kosugi Takanobu	4. 巻 283
2. 論文標題 Learning rate matters: Reexamining optimal power expansion planning with endogenized technological experience curves	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 129049 ~ 129049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2023.129049	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 Sugiyama, M., Wilson, C., Wiedenhofer, D., Boza-Kiss, B., Cao, T., Chatterjee, J. S., ... & Zimm, C.	4. 巻 8
2. 論文標題 High with low: Harnessing the power of demand-side solutions for high wellbeing with low energy and material demand	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Joule	6. 最初と最後の頁 1~6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.joule.2023.12.014	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

1. 著者名 Ju Yiyi, Sugiyama Masahiro, Shiraki Hiroto	4. 巻 4
2. 論文標題 Perceived feasibility and potential barriers?of a net-zero system transition?among Japanese experts	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	6. 最初と最後の頁 431
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s43247-023-01079-8	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 杉山 昌広、筒井 純一、高橋 潔	4. 巻 71
2. 論文標題 分野横断型気候シナリオ研究：過去，現在，未来	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 天気	6. 最初と最後の頁 57~68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24761/tenki.71.2_57	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 杉山昌広	4. 巻 44(3)
2. 論文標題 太陽放射改変ガバナンスのレビュー	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 エネルギー・資源	6. 最初と最後の頁 161~165
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 -

1. 著者名 杉山昌広	4. 巻 44(3)
2. 論文標題 気候変動対策のポートフォリオの観点から考える二酸化炭素除去と太陽放射改変	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 エネルギー・資源	6. 最初と最後の頁 156-165
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 -

1. 著者名 渡辺真吾	4. 巻 44(3)
2. 論文標題 太陽放射改変の科学的理解の現状と課題	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 エネルギー・資源	6. 最初と最後の頁 166-170
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6件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 杉山昌広
2. 発表標題 気候変動対策とシナリオ分析 / プランニング
3. 学会等名 環境経済・政策学会 SEEPSワークショップ2022年大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小杉隆信
2. 発表標題 経験曲線効果を考慮した新技術導入条件の解析と電源構成モデルでの検証
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2021年秋季研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Sugiyama, Masahiro
2. 発表標題 Energy scenarios for decarbonization transition
3. 学会等名 UTokyo Springer-Nature Symposium on Energy and SDGs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉山昌広,朝山慎一郎,小杉隆信,石井敦,渡辺真吾
2. 発表標題 太陽放射改変に対する市民の態度:4ヶ国アンケート調査
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺真吾
2. 発表標題 気候変動への介入:知らぬが仏か?
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡辺真吾
2. 発表標題 成層圏ジオエンジニアリング:これまでとこれから
3. 学会等名 日本気象学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 杉山昌広 (佐藤 靖、松尾 敬子、菊地 乃依瑠編)	4. 発行年 2024年
2. 出版社 東京大学出版会	5. 総ページ数 -
3. 書名 第1章 気候変動 IPCCと科学的アセスメント(「EBPMの組織とプロセス」所収)	

〔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	小杉 隆信 (Kosugi Takanobu)  (30273725)	立命館大学・政策科学部・教授  (34315)	
研究分担者	石井 敦 (Ishii Atsushi)  (30391064)	東北大学・東北アジア研究センター・准教授  (11301)	
研究分担者	渡辺 真吾 (Watanabe Shingo)  (50371745)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・地球環境部門(環境変動予測研究センター)・センター長代理  (82706)	

	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
研究協力者	朝山 慎一郎 (Asayama Shinichiro)	国立環境研究所	

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			
オーストリア	国際応用システム分析研究所			