

令和 6 年 4 月 30 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K13474

研究課題名（和文）非線形な解析的統合評価モデルの開発と応用

研究課題名（英文）Development and applications of non-linear analytic integrated assessment models

研究代表者

阪本 浩章（Sakamoto, Hiroaki）

神戸大学・経済学研究科・准教授

研究者番号：80758996

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）：二酸化炭素に代表される温室効果ガスは、経済活動に多様な便益をもたらす一方で、気候変動を引き起こすことを通じて社会に損害を及ぼします。温室効果ガスを、誰が、どれだけ、どのようなペースで削減すべきかを判断するには、その費用と便益を定量化して比較する必要がありますが、そのためには経済と気候の両面を同時に考慮しなければなりません。この研究課題では、経済と気候の両面を同時に考慮できるモデルを改善し、最新の科学的な知見をより正確に反映できるように工夫しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動問題は、気候科学の専門家だけでなく、様々な分野の専門家が協力して解決すべき課題です。ただ、地球の気候を大規模計算機で再現する気候モデルは非常に複雑なもので、他分野の研究者がその成果を正確に理解し、自らの研究に活用することは簡単ではありません。この研究で開発した理論は、複雑な気候モデルのエッセンスをシンプルなモデルで再現できるようにすることで、非専門家が最新の気候科学にアクセスするためのインターフェイスとして機能します。幅広い分野における応用研究や政策における意思決定をサポートすることも期待されます。

研究成果の概要（英文）：Greenhouse gases, particularly carbon dioxide, offer economic benefits but also contribute to climate change, causing societal harm. To determine optimal emission reduction strategies, it is crucial to quantitatively compare the costs and benefits, considering both economic and climate factors simultaneously. This research project aims to refine an integrated model that incorporates the latest scientific insights, enabling a more accurate assessment of the trade-offs between economic activities and their environmental impact. By enhancing the model's ability to capture the complex interplay of these factors, policymakers can make more informed decisions regarding emission reduction targets, timelines, and the allocation of responsibilities among different actors. Ultimately, this research seeks to provide a robust framework for navigating the challenges posed by climate change while minimizing economic disruptions.

研究分野：経済学

キーワード：経済政策 気候変動 統合評価

1. 研究開始当初の背景

気候変動に関する経済分析は、複雑な統合評価モデルを用いた数値分析と、簡素な経済モデルに基づく理論分析とに大別され、両者はおおよそ独立に進められてきた。統合評価モデルは、動学一般均衡モデルに気候モデルを追加したもので、気候システムと経済システムの双方を現実に即した形で描写することが可能である。ただ、統合評価モデルの解を解析的に求めることは困難で、計算機に解かせる場合であっても扱える問題は限られてくる。一方、理論分析で用いられる簡素な気候経済モデルは、多くの場合解を閉形式で表現することができるため、政策手段の比較や不確実性の影響、非協力解の特徴付けといった定性的な分析に適している。しかしながら、理論モデルは気候と経済との関係を極めて単純な形でしか記述できず、したがって現実経済への影響を定量的に評価できるだけの汎用性を持たない。

近年になって、このような理論分析と数値分析との間にある溝を埋めるべく、「解析的統合評価モデル」と呼ばれる次世代の気候経済モデルの開発が活発化している。解析的統合評価モデルは、各システムの細部を記述できる複雑な構造を維持しながら、なおかつ計算機に頼らずに解を求めることができる。そのため、純粋理論の結果に定量的な意味を与えて政策形成への活用を図ったり、逆に数値分析に解析的な構造を与えることで解ける問題の範囲を拡大したりといった形で、様々に応用され始めている。現実をバランスよく抽象化した解析的統合評価モデルは、自然科学的な知見と社会科学的な知見とを単一の枠組みの下で統合し、それを政策に反映させるための効果的なプラットフォームとして機能する。

しかしながら、既存の解析的統合評価モデルは、システムの非線形性を考慮できないという点で問題がある。全ての解析的統合評価モデルに共通するのは、複数のもっともらしい仮定を組み合わせることで、モデルの構造がある種の線形性を満たすよう巧妙に設計されていることである。具体的には、対数効用関数、生産関数の乗法分離性、指数損害関数、気候システムの線形性という4つの仮定が、解析的に取り扱いやすいモデルの構造（「状態変数についての線形性」と呼ばれる）を可能にしている。これらの仮定のうち、最初の2つの仮定は経済モデルで一般に用いられるもので、3つ目の仮定も気候の影響を集計的に記述する方法としてある程度の妥当性を持つことが知られている。一方、4つ目の仮定は、地球の気候という非線形なシステムを必要以上に単純化するもので、科学的な知見と十分な整合性を持たない。自然の定常状態から乖離するにつれて、気候システムは線形モデルでは十分に近似することが難しくなり、正のフィードバックを伴った強い非線形性を示すようになることが指摘されている。

実際、線形システムは現実の描写というよりも「モデルの解き易さ」を優先したもので、いくつかの重要な文脈で経済学的な分析に適さないことが知られている。モデルの構造に線形性を仮定すれば、その必然的な帰結として、均衡における価値関数も線形になる。これは解として導かれる政策関数が状態変数に依存しないことを意味し、例えば既存研究の中で、気候変動政策が不確実性の影響をほとんど受けないといった極端な性質や、各プレイヤーの戦略に代替関係が生じないといったもっともらしくない結果が導かれるのはこのためである。つまり線形性の仮定は、モデルを解くことを可能にする一方で、モデルを効果的に用いることのできる問題の範囲を著しく制限してしまっている。既存の解析的統合評価モデルは、確かに解くことができるが、不確実性やゲームといった経済学的に重要な文脈では「あまり使えない」のである。

2. 研究の目的

そこで本研究は、非線形性を許容する解析的統合評価モデルを開発することによって、気候変動に関する理論モデルと数値モデルとのより有機的な統合を目指した。また同時に、開発したモデルを理論分析と数値分析の両面で活用し、気候システムの非線形性が持つ定性的および定量的な含意を明らかにする。

3. 研究の方法

基本的なアイデアは、動学的最適化問題の「逆問題」を考えることによって、解析的に解けるモデルのクラスを特定するというものである。経済学で扱われる問題の多くは、特定のモデル（選好・技術や運動方程式）を所与として対応する解（価値関数や政策関数）を求める「順問題」として定式化される。既存の結果から分かることは、統合評価モデルの一部に線形性を仮定した場合、順問題が解析的な解を持つ（対応する価値関数も線形になる）ということである。この結

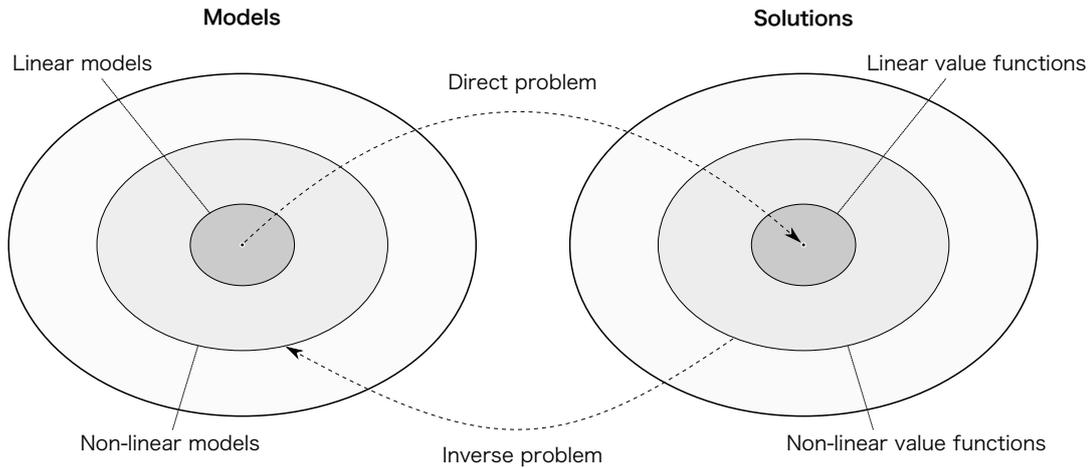


図 1 解析的統合評価モデルの逆問題

果を一般化する自然な方法としては、線形性の仮定を緩和し（例えば運動方程式に何らかの非線形性を導入した上で）、対応する順問題を解くことが考えられる。ただこの方法では、順問題の解が解析的な表現を持つ保証はなく、したがって非線形な「解析的」統合評価モデルを開発することは困難である。

そこで本研究では、逆に特定の価値関数や政策関数を所与として、それを解として導くようなモデルを求めるというアプローチをとる（図 1）。この逆問題を上手く定式化することによって（つまり経済学的に自然なモデルを導くような価値関数を出発点とすることで）、対応する順問題が解析的な解を持つことを保証しながら、モデルを可能な限り一般化することが可能になる。

4. 研究成果

研究計画に則り、動学的最適化問題の逆問題を解くことによって、気候システムの非線形性をできる解析的統合評価モデルを開発した。開発した理論モデルには、当初想定したよりも大きな自由度があり、目的に応じて様々な形で非線形性を導入することができることが分かった。

具体的には、気候システムをより正確に記述することを目的に、既存のモデルと比較してとくに次の 2 つの点で改善を試みた。第一に、炭素循環モジュールを拡張し、関数型を特定せずにモデルに非線形性を導入することで、炭素循環のフィードバック効果を柔軟に捉えられるように工夫した。第二に、気温モジュールについても、インパルス応答のラグを調整するレイヤーを導入することで、大気海洋大循環モデルの挙動をより適切に記述できるように工夫した。これらの改善により、従来は数値計算によって解く必要があった非線形な統合評価モデルについて、その解を解析的に特徴づけられるようになった。

また、解析的統合評価モデルの応用例として、国際環境協定に関する動学ゲームを考えた。従来の研究では定性的な特徴づけに主眼が置かれていたが、動学ゲームと解析的統合評価モデルを接合することによって、定性的な知見を定量的に評価することが可能になった。さらに別の応用として、炭素の社会的費用を解析的に特徴付ける研究を行った。線形モデルを仮定した場合と比較して、炭素の社会的費用が 3 割ほど大きくなると見積もられた。さらに、従来の解析的統合評価モデルでは考慮することが難しかった技術変化をモデルに導入し、摂動理論に基づく近似解析解を求めた。結果として、将来に開発されることが見込まれる脱炭素技術によって、現時点の炭素の社会的費用は低下することが分かった。ただし、技術変化の影響はそれほど大きいものではなく、フィードバック効果を相殺するほどではないことも明らかになった。このように、本研究で得られた知見を活用することによって、従来は使途が限られていた解析的統合評価モデルを幅広い経済分析に適用できるようになると考えられる。

以上のような個人研究を進める一方で、気候変動研究に関する成果やアイデアを共有し、学際的な研究者ネットワークを構築することを目的に研究会を立ち上げた。合計で 21 回のミーティングを開催し、経済学のみならず、理学や工学、法学、政治学、哲学、さらには学際領域を専門とする研究者とも広く意見交換を進めた。最終年度には、国内外から 10 名程度の研究者を招聘して国際ワークショップを開催し、プロジェクトの成果を共有するとともに、さらに関連研究を進呈させるための意見交換を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Karp Larry, Sakamoto Hiroaki	4. 巻 197
2. 論文標題 Sober optimism and the formation of international environmental agreements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Economic Theory	6. 最初と最後の頁 105321 ~ 105321
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jet.2021.105321	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8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Feedback-adjusted carbon prices
3. 学会等名 環境経済政策学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Self-enforcing stable sets
3. 学会等名 Workshop on Climate and Environmental Economics
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Feedback-adjusted carbon prices
3. 学会等名 2023 UCSB Workshop on Natural Resource Economics Theory（国際学会）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阪本浩章
2. 発表標題 Feedback-adjusted carbon prices
3. 学会等名 環境問題と非線形動学研究グループセミナー
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阪本浩章
2. 発表標題 Self-enforcing stable sets
3. 学会等名 環境資源経済学ワークショップ
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Self-enforcing stable sets
3. 学会等名 SURED 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Efficiency of self-enforcing agreements
3. 学会等名 Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroaki Sakamoto
2. 発表標題 Efficiency of self-enforcing agreements
3. 学会等名 環境経済・政策学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

気候変動研究のフロンティア https://ccseminar.com/
--

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1件

国際研究集会 Workshop on Climate and Environmental Economics	開催年 2023年～2023年
---	--------------------

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			
ノルウェー	オスロ大学			
米国	カリフォルニア大学バークレー校			