

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2019

課題番号：15H03338

研究課題名（和文）気候変動政策統合評価の分析枠組みとモデリング技法に関する研究

研究課題名（英文）Assessing analytical framework of climate policy modeling

研究代表者

前田 章（Maeda, Akira）

東京大学・大学院総合文化研究科・教授

研究者番号：30317309

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は気候変動政策モデル分析で一般的となっているモデル構造を見直し、そのビルディングブロックである目的関数や制御方式について、新たな考え方と技法を提示するものである。一般的な統合評価モデルにおいて重要な要素となっている割引法についての見直し、確率制御と最適停止問題の枠組みの導入、投資ゲーム均衡におけるスピルオーバーの影響について理論分析を行った。あらゆる気候変動政策モデル分析に関わる汎用的な理論と技法を開発することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

気候変動問題を中心とした地球規模かつ超長期の環境エネルギー問題が注目されるようになって久しいが、この政策問題を扱う学術研究も大きな転換期を迎えている。特に、経済学の考え方に基づいた政策モデル分析においては、その分析枠組みが二つの点で見直しが必要となっている。一つは、これまで見逃されてきたモデル構造の問題が認識され出したこと、もう一つは、これまで想定されていなかった革新的な技術が登場し、それらを扱う新たなモデルと理論が必要となってきたことである。本研究はこうした問題意識のもと、あらゆる気候変動政策モデル分析で利用できる汎用的な理論と技法について研究した。

研究成果の概要（英文）：This study aims at assessing analytical framework of climate policy modeling. Reviewing a standard framework of integrated assessment models that are popular in the community of climate policy studies, the study points out several critical elements of integrated models need to be modified and proposes alternative model-building blocks. Those include discount factors, optimal stop and stochastic models, spillover effects on investment games, equilibrium, etc. The results and findings directly contribute to better policy debates.

研究分野：応用経済学

キーワード：割引率 最適停止 確率制御 投資 技術革新

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

気候変動問題を中心とした地球規模かつ超長期の環境エネルギー問題が注目されるようになって久しいが、この政策問題を扱う学術研究も大きな転換期を迎えていると言える。特に、経済学の考え方に基づいた政策モデル分析においては、その分析枠組みが二つの点で見直しが必要となっている。一つは、これまで見逃されてきたモデル構造の問題が認識され出したこと、もう一つは、これまで想定されていなかった革新的な技術が登場し、それらを扱う新たなモデルと理論が必要となってきたことである。

【問題意識(1) 標準とされてきた分析モデルの構成要素に対する疑問】

超長期の気候変動政策研究は、これまで、大規模なエネルギー・環境モデルを構築し、コンピュータシミュレーションを行うという形式が王道であったと言える。このモデル構成要素とその基礎にある理論に、近年いくつかの問題提起がなされている。

これまで、この分野では、経済成長モデルとして一般的な「ラムゼーモデル」を基礎にして、これにエネルギー技術の記述を付加した「エネルギー＝経済モデル」、さらには、気候変動の影響を考慮し、簡易的な気候モデルを付加した「統合評価モデル」を構成し、シミュレーションするというのが最もポピュラーな分析の枠組みであった。ところが、こうした研究の流れに対して、Pindyck (2013: JEL)は、モデルを構成する各種の要素に未解決な問題が潜んでいることを指摘した。それら一つひとつは、通常の短期的な経済分析ではあまり大きな問題とはならないが、気候変動のような超長期の政策分析では看過できない論点となり、そうしたもとでモデル全体をいかに精緻化しても意味がない旨、論じている。なかでも、ラムゼーモデルの中核にある社会厚生関数を気候変動問題にそのまま適用することには、多くの研究者が問題点を指摘している。Weitzman (2013: JEL)は、社会厚生を測る際の割引法について、問題を提起している。Stern (2013: JEL)も同様に、割引法、将来リスク・不確実性評価を論点にしている。

【問題意識(2)前提とする環境エネルギー産業技術の変革】

一方、「統合評価」の前提となる技術に関しても、大きな変化が見られる。これまで、経済成長に関わるような長期の経済分析のなかでは、技術革新の可能性はモデルとしてある程度は想定されていた。しかし、近年、環境エネルギー産業技術に予想外の大きな技術革新が起っており、これまでとは異なる評価の枠組みが必要となってきている。

まず、気候変動対策技術としては、いわゆる「ジオエンジニアリング(地球工学)」と呼ばれる技術が2000年頃に出現した。いまは萌芽的な技術であるが、今後の世界を変え得る可能性を秘めている。さらに、「気候変動対策」の意味合いもこれまでとは違ってより広範なものとなってきている。温室効果ガスを減らす緩和策(Mitigation)だけでなく、変化した気候のもとで、農業や工業がどのようにして時間的・空間的配置を変え、人類がいかに生活形態を変えるかという視点が重要視されてきた。これは適応策(Adaptation)と呼ばれる。

こうした技術と施策の利用は、これまでになく大規模で不可逆的な経済と地球システムの構造変化を伴うものと考えられる。たとえば、ジオエンジニアリングは気候メカニズムに直接働きかけるため、数学的には「状態変数」に対する直接的な制御にあたる。これは、これまでの「統合評価」では、技術としてもモデルとしても想定されていないものである。

2. 研究の目的

以上の2つの問題意識に基づくと、これまでのラムゼーモデルを中核とする統合評価モデルの分析枠組みそのものを、2つの点で見直す必要があることに気が付く。一つは、上記の問題意識(1)で挙げた割引法やリスク・不確実性評価など経済主体の時間選好に係るものであり、いわば「需要側」の見直しと言える。もう一つは、問題意識(2)の環境エネルギー産業技術の取扱いに係るものであり、いわば「供給側」の見直しである。前者は、統合評価モデル分析の構成要素としては、社会厚生関数、特にその割引係数の部分に相当する。後者は、最適化に付随する制約条件(具体的には生産関数、エネルギーモデル、気候モデルなどで表現されるもの)および制御変数・状態変数の定義に相当する。これら需給両面で理論的基礎を考察した後、その結果を受けて、本研究ではさらにシミュレーションモデルへの実装、その際の技術的な問題点を検討する。

本研究は、気候変動政策モデル分析で一般的となっているモデル構造を見直し、そのビルディングブロックである目的関数や制御方式について、新たな考え方と技法を提示するものである。まず、一般的な「統合評価モデル」を構成する重要な要素である割引法、革新技術導入の扱いの2点について、理論分析を行う。具体的には、時間選好・割引係数の内生モデル、不可逆的な技術導入の最適制御について考察する。その上で、そうした理論をシミュレーションへ実装するモデリング技法(具体的には、離散化とキャリブレーション)について検討する。新たな統合評価モデル自体を開発するのではなく、あらゆる気候変動政策モデル分析で利用できる汎用的な理論と技法を開発するものである。

3. 研究の方法

本研究は、気候変動政策研究において一般的なモデル分析の構造を、基礎理論と実際のモデリング技法の双方に渡って再検討し、新たな枠組みを提示するものである。理論面としては経済主体の内生的選好、不可逆的な新技術導入の二つを扱う。モデリング技法としては離散化とキャリブレーションについて検討する。具体的な研究内容は、以下の3つのサブパートに分けつつ、年度としてはオーバーラップしながら進めていく。

サブパート1．理論分析：内生的時間選好と習慣形成の割引理論
サブパート2．理論分析：インパルス制御による最適技術導入時期選定
サブパート3．モデリング技法：離散化とキャリブレーション

4．研究成果

気候変動政策経済研究の多くの分析モデルはラムゼーモデルを基礎としており、その中核となっている社会厚生関数は、各時点の瞬時効用に、指数関数の重み付けをして和をとったもの、すなわち割引効用(DU)モデルとなっている。近年の気候変動政策経済研究にまつわる問題提起の多くは、このDUモデルに対する賛否に関連していると言える。そもそも、DUモデルの形式はSamuelson(1937: RES)によって提案され、その後あらゆる動学モデルのスタンダードとなった。1970年代以降のマクロ経済動学の基本モデルはこのDUモデルであり、気候変動政策経済研究もこれを踏襲している。このDUモデルに代わる考え方の一つは、指数割引に代えて双曲割引を導入することである。ただ、双曲割引には、意思決定者にとって、ある時点で行った意思決定が次の時点で行ったものと論理的に整合しないという「時間非整合性」が内在されている。マクロ経済分析において、非合理的な消費・投資行動を分析するという目的であれば、こうしたモデルは大変有用なモデルであると言える。しかし、一般的なマクロ経済よりもはるかに長い時間的視野(100年以上)を持つ気候変動政策評価においては、こうしたモデルの性質は不便という他ない。また、Weitzman(2001, AER)は超長期の社会問題に対する割引について「ガンマ割引」を提案している。これも時間非整合のモデルである。これに対して、Dasgupta(2001: Human Well-being and the Natural Environment)はモデル構築の論理とその意味付けの両面で、批判を行っている。

時間整合性を持ちつつ、DUモデルに代替しうるモデルの一つの候補は、習慣を織り込んで自身の割引率を変えていくようなモデルである。良く知られているものとして、Uzawa-Epstein型と呼ばれるものがある。初年度から着手したサブパート1は、内生的時間選好と習慣形成の割引理論に関するものであるが、時間整合性を持ちつつ、DUモデルに代替しうるモデルの一つである「習慣形成」の時間割引モデルを考察した。成果は

・前田章・長屋真季子「必要最低消費と習慣形成を考慮した枯渇性資源の動学」経済政策ジャーナル12(1):40-43(2016)

のほか、国内外の学会報告となっている。

ラムゼーモデルの枠組みに欠落している重要な考え方の一つは「最適導入時期」である。この考え方自体は、応用数学として発達してきた「最適停止問題」に由来しており、経済学の他の分野、特に数理ファイナンスや理論経済学でも比較的良好に知られたものとなっている。その多くは、連続系の確率過程・確率微分方程式を用いる。これを明示的に環境政策分析に持ち込んだのは、Dixit and Pindyck(1994)であると言ってよい。ここから多くの研究が派生しているが、その特徴は、将来の不確実な要因に着目し、そのもとで、それに対処する措置(不確実性をヘッジする技術・政策の導入あるいは保険の権利行使)の導入すべき時期を算定するというものである。これは「リアルオプション」とも呼ばれている。

これまでの最適停止問題あるいはリアルオプションとしての環境政策分析には、数理モデル化上の一つの大きな問題点がある。それは、そこで想定されている環境制御技術がフローの制御に限定されているという点である。環境負荷物質(たとえば二酸化炭素)の「排出(=フロー)」を増減させることが「制御」として想定され、既に蓄積された物質(ストック)自体を制御することは、モデルとして想定されていないのである。

こうしたモデル化は、これまでのところ自然であったと言える。なぜなら、現実的に、大気中の累積二酸化炭素やそれに対応する地球の熱容量そのものを人為的に変化させることは、技術的に不可能であったからである。ところが、「研究目的」中の「問題意識(2)」で論じたように、近年のジオエンジニアリングは、まさに、地球の熱容量そのものを制御する技術である。また、近年範囲の広がりつつある「適応策」も、そのいくつかはストックに直接働きかける性質を持っている。ストックを直接的に変化させる制御方式は、数学的には「インパルス制御」と呼ばれる。この考え方を応用した経済分析はいまだ多くは無く今後の発展が期待される領域である。

サブパート2の理論分析(インパルス制御による最適技術導入時期選定)においては、上記のように応用数学として発達してきた「最適停止問題」を中心にして、環境政策分析を考察した。確率制御問題におけるインパルス制御の位置付けについて整理をしつつ、理論の体系化を行った。その成果は次の著書としてある程度の完成をみた。

・辻村元男・前田章『確率制御の基礎と応用』朝倉書店(2016年9月)

サブパート2の「最適停止問題」についてさらに深く考察し、サブパート3(モデリング技法:離散化とキャリブレーション)へとつなげるにより、単発的な投資を行う複数の経済主体のゲーム理論分析を行った。これは、エネルギー・環境政策上の社会的インフラ投資を想定し、そこに発生し得るゲームの状況と外部性について離散モデル化するものである。より具体的には経済主体同士の投資時期決定ゲームにおいて、正の外部性あるいはスパルバー効果がどのような影響を及ぼすか考察するものである。

次のような設定を考える。複数の同一生産・コスト構造を持った企業がいるとする。それぞれは設備投資を検討している。一旦投資を行うとそれ以降は毎期の収益がa倍になる。投資にはIだけのコストがかかる。しかし、もし他社が自社よりも先にその投資に乗り出すなら、自社は事

実上コストゼロで、同様の投資とその効果を得ることができる。

このような状況で、あり得そうなことは、各社とも他社の投資を待って自社での投資を行わず、社会全体では永遠に生産拡大がなされないことである。また、そのことが予見されるなら、逆に各社は相手の動向を考慮しても仕方ないものとして、自社のみの判断で投資に乗り出すことも考えられる。その場合、投資は同時になされることになる。これはすなわち、社会全体で見て過剰投資となる。いずれの場合も社会的に見て非効率である。

理論分析によって、そのような非効率性が発生するとしたら、それは投資コストが極端に低い場合に限られるということが示された。こうした結果は、政府の介入を無用にし、市場競争のみで社会的効率性が達成されることを意味している。

上記の成果は

・ Akira Maeda and Makiko Nagaya “Optimal Time Choice Game for Energy Infrastructure Investment with Spillover Effect” Hellenic Association for Energy Economics, The 3rd HAEE Annual Conference (May 3-5, 2018) Greece

・ Akira Maeda and Makiko Nagaya “Optimal Time Choice Game of Multiple Firms with Investment Spillover Effect” Business & Economics Society International 33rd B&ESI Conference (July 6-9, 2018) Switzerland

をはじめ国内外の学会で発表することができた。査読付き論文として完成すべく取り組みを続けているところである。

最後に、サブパート3のうち、当初予定にあった「キャリブレーション」については十分な成果が得られなかった。当初計画の路線では狙い通りの成果が出なかったためであるが、代わりに新技術導入における需給モデルのパラメータの役割について研究の端緒を得た。これは、一般的に言われる新技術普及の阻害要因（投資コスト、市場の不完全性、参入障壁、社会的心理要因など）に対して、これらのどれにも帰着されないモデルパラメータを同定することである。成果としては、

・ Akira Maeda and Makiko Nagaya “What Drives or Hinders Autonomous Energy Efficiency Improvement” 4th AIEE Energy Symposium (December 10-12, 2019) Rome

として発表されている。査読付き論文としての完成を目指して取り組みを続けていきたいと考えている。

以上、研究成果としては当初計画にほぼ沿う形で順調に成果が得られたといえる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 前田章, 長屋真季子	4. 巻 12(1)
2. 論文標題 必要最低消費と習慣形成を考慮した枯渇性資源の動学	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 経済政策ジャーナル	6. 最初と最後の頁 40-43
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 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 前田章, 長屋真季子	4. 巻 11(2)
2. 論文標題 方向性のある価格付けの理論と電力取引への適用	5. 発行年 2015年
3. 雑誌名 経済政策ジャーナル	6. 最初と最後の頁 51-54
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 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 H. Shiogama, D. Stone, S. Emori, K. Takahashi, S. Mori, A. Maeda, Y. Ishizaki, M.R. Allen	4. 巻 6:18903
2. 論文標題 Predicting future uncertainty constraints on global warming projections	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/srep18903	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 H. Ishijima, A. Maeda	4. 巻 1983
2. 論文標題 A Note on an Extension of Asset Pricing Models	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 数理解析研究所講究録	6. 最初と最後の頁 22-26
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28件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 20件）

1. 発表者名 Akira Maeda
2. 発表標題 What Drives or Hinders Autonomous Energy Efficiency Improvement
3. 学会等名 4th AIEE Energy Symposium (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 前田章
2. 発表標題 生産技術進歩の受容性と阻害要因に関する一考察
3. 学会等名 日本経済政策学会第 76 回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Akira Maeda
2. 発表標題 Identifying Obstacles to Autonomous Energy Efficiency Improvement
3. 学会等名 IAEE 2020 International Conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akira Maeda and Makiko Nagaya
2. 発表標題 Optimal Time Choice Game for Energy Infrastructure Investment with Spillover Effect
3. 学会等名 Hellenic Association for Energy Economics, The 3rd HAEE Annual Conference (May 3-5, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima and Akira Maeda
2. 発表標題 A Note on Pricing ESG Investment
3. 学会等名 Business & Economics Society International 33rd B&ESI Conference (July 6-9, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Maeda and Makiko Nagaya
2. 発表標題 Optimal Time Choice Game of Multiple Firms with Investment Spillover Effect
3. 学会等名 Business & Economics Society International 33rd B&ESI Conference (July 6-9, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima and Akira Maeda
2. 発表標題 A Note on Pricing Model of ESG Investing
3. 学会等名 INFORMS 2018 Annual Meeting (November 4-7, 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石島博・前田章
2. 発表標題 ESGを考慮した資産価格評価モデル
3. 学会等名 日本経済政策学会第75回全国大会(2018年5月26-27日)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Maeda
2. 発表標題 Optimal Stopping Game of Multiple Firms with Investment Spillover Effect
3. 学会等名 Japan Economic Policy Association, The 16th International Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima, Akira Maeda
2. 発表標題 A Generalized Real Estate Pricing Model with Exogenous Affine-Form Variables and Its Applications
3. 学会等名 Quantitative Methods in Finance 2017 Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 前田章
2. 発表標題 スピルオーバー効果を考慮した環境エネルギー投資競争のゲーム均衡
3. 学会等名 第34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 2018年

1. 発表者名 Akira Maeda
2. 発表標題 Energy infrastructure investment game with spillover effect
3. 学会等名 39th IAEE International Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Motoh Tsujimura, Akira Maeda
2. 発表標題 Pollutant abatement investment under technological uncertainty
3. 学会等名 1st AIEE Energy Symposium (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima, Akira Maeda
2. 発表標題 An Analysis of Real Estate Prices with Exogenous Variables
3. 学会等名 15thInternational Conference of JEPA (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima, Akira Maeda
2. 発表標題 A Note On Real Estate Pricing With Exogenous Variables
3. 学会等名 INFORMS Annual Meeting 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Hiroshi Ishijima, Akira Maeda
2. 発表標題 Pricing of Japanese Real Estatewith Exogenous Variables
3. 学会等名 Quantitative Methods in Finance 2016 Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石島博, 前田章
2. 発表標題 マクロ経済変数を導入した不動産価格評価モデル
3. 学会等名 日本経済政策学会 第73回全国大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 A. Maeda, R. Takashima, M. Tsujimura
2. 発表標題 Optimal Stopping Game with Investment Spillover Effect
3. 学会等名 Institute for Operations Research and Management Science Annual Meeting 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 A. Maeda
2. 発表標題 Optimal Stopping Game with Investment Spillover Effect
3. 学会等名 Japan Economic Policy Association International Conference 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 A. Maeda
2. 発表標題 Optimal Stopping Game with Investment Spillover Effect
3. 学会等名 28th Business & Economics Society International Conferences (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 前田章
2. 発表標題 スピルオーバー効果を持つ環境エネルギー投資競争のゲーム理論分析
3. 学会等名 第32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 2016年

1. 発表者名 A. Maeda
2. 発表標題 Optimal Stopping Game with Investment Spillover Effect for Energy Infrastructure
3. 学会等名 International Association for Energy Economics 5th Asian Conference (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 H. Ishijima, A. Maeda
2. 発表標題 A Note on the Determinants of Real Estate Prices
3. 学会等名 Japan Economic Policy Association International Conference 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 H. Ishijima, A. Maeda
2. 発表標題 A Note on Real Estate Pricing
3. 学会等名 Columbia JAFEE Workshop 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 H. Ishijima, A. Maeda
2. 発表標題 A Note on Real Estate Pricing Models
3. 学会等名 RIMS Workshop on Financial Modeling and Analysis
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 石島博, 前田章
2. 発表標題 A Note on Real Estate Pricing Models with Macroeconomic Variables
3. 学会等名 44th JAFEE Conference
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 石島博, 數見拓朗, 前田章
2. 発表標題 センチメント・インデックスの株価と不動産価格の予測可能性
3. 学会等名 43rd JAFEE Conference
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 H. Ishijima, T. Kazumi, A. Maeda
2. 発表標題 Sentiment Analysis in the Japanese Financial and Real Estate Markets
3. 学会等名 Quantitative Methods in Finance 2015 (国際学会)
4. 発表年 2015年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 辻村元男, 前田章	4. 発行年 2016年
2. 出版社 朝倉書店	5. 総ページ数 145
3. 書名 確率制御の基礎と応用	

1. 著者名 瀧澤弘和, 小澤太郎, 塚原康博, 中川雅之, 前田章, 山下一仁	4. 発行年 2016年
2. 出版社 慶應義塾大学出版会	5. 総ページ数 408
3. 書名 経済政策論 - 日本と世界が直面する諸課題	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----