

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 9 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H00833

研究課題名(和文)地球温暖化問題における割引率と国際環境協定に関する研究

研究課題名(英文)Discount rate and international environmental agreement in climate change

研究代表者

赤尾 健一 (Akao, Ken-Ichi)

早稲田大学・社会科学総合学院・教授

研究者番号：30211692

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：地球温暖化問題は超長期に影響が及ぶため、割引率の選択が対策のあり方に重大な影響を及ぼす。本研究は、手続き的正義の観点から世代間衡平を満たし、政策に応用可能な社会的割引率の概念を提案した。例示的にいくつかのモデルで社会的割引率を導出しその性質を論じた。

地球温暖化問題はまた、地球公共財に関わる問題であり国際協調を必要とする。その国際環境協定を非協力微分ゲームの解とみなし、非対称モデルについて不連続マルコフ戦略を含む戦略空間でマルコフナッシュ均衡の分析を試みた。均衡経路の安定定常状態の集合について、割引率との関係等の特徴づけとともに、解の存在や一意性といったより基礎的な問題に関しても結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地球温暖化問題は世代間衡平である。世代間衡平を満たし道徳的に望ましいゼロ割引率は、実際にそれに従うことが難しいという問題があり、一方、実証的に得られる正割引率は道徳的に正当化できないという問題がある。1世紀にわたっていまも続くゼロか正かをめぐる割引率の論争に対して、本研究は、手続き的正義の観点から答えを与え、特に正の割引率(割引功利主義)を正当化することで、社会を手続き的に衡平な社会に導くための政策への示唆を与えた。また、社会的にも学術的にも重要な国際環境協定の評価と可能性に関して、それを非対称微分ゲームとして、世代内、世代間衡平(割引率)に関連付けて分析した。

研究成果の概要(英文)：The choice of discount rate critically affects the climate change policy because the emissions of greenhouse gases influence the global climate system over thousands of years and a slight difference in discount rates makes a huge difference in the present values of the benefits and costs in the far future. We propose a social discount rate that is intergenerationally justifiable from procedural fairness. We investigate the properties of the discount rate with some parametric models.

Another crucial challenge against climate change in social sciences is understanding the efforts for international coordination and how to realize the desired outcome. This study formulates the international environmental negotiation as an asymmetric noncooperative differential game. We investigated the properties of the Markov perfect Nash equilibrium, including the stability of the steady states and the relation with discount rates, among others. We also addressed the existence of a solution.

研究分野：経済学

キーワード：地球温暖化問題 国際環境協定 政策担当者 手続き的正義 社会的割引率 微分ゲーム 利得優越均衡

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化問題は、原因物質の放出から問題発現まで 50 年以上のタイムラグがあるため、割引率の選択が、温暖化対策のあり方に重大な影響を及ぼす。このため、世代間衡平の観点から支持されるゼロ割引率と、実証的に得られる代表的個人の実証的割引率のいずれが適切かという論争が今日まで続いている。しかしいずれも問題があり、前者の割引率に基づく最適政策は過激すぎて社会受容性に欠け、後者ではその逆に破滅的な気候変動被害を回避できないという懸念がある。

2. 研究の目的

これに対して、本研究では、政府が国際交渉で用いる割引率とは何かという、従来とは異なる観点から割引率の選択問題に取り組む。また、温暖化交渉を微分ゲームとして定式化し、国際環境協定を多均衡から望ましいナッシュ均衡を選ぶものとみなす。そのナッシュ均衡を特徴づけることが本研究の課題である。

3. 研究の方法

(1) 割引率の選択問題について、政策担当者へのヒアリングに基づき、地球温暖化問題のような超長期的問題に用いられる / 用いられるべき割引率を経済動学モデルから導出する。

(2) 温暖化交渉の微分ゲームでは、国際合意をナッシュ均衡と見なし、環境的に持続可能なナッシュ均衡が存在するための条件を、政府がもつ割引率やその他の選好と技術条件として明らかにする。

4. 研究成果

(1) 割引率の選択問題

温暖化交渉に携わった政策担当者に対して、自身および他国担当者の外交交渉における行動と態度についてヒアリングを行った。ヒアリング及び文献調査の結果、外交担当者が割引率を意識することはなく、割引率は as if 的にとらえるべきものであることがわかった。同時に、外交担当者は複数の目標を調整しつつ交渉にあたっていることを理解した。すなわち、国際交渉において何らかの合意に到達すること、既存の国際合意を具体化し、より望ましい方向に進めること、NGO を含む利益集団間の要求の間のバランスをとること等である。

割引率選択に対する規範的研究として、地球温暖化問題が世代間衡平に関わることから、世代間の手続き的正義の観点から社会的割引率を導くモデルを定式化し考察した。

経済動学で用いられる標準的な経済モデルであるラムゼーモデルは、2つの世代間衡平上の問題がある。1つは、正の割引率を用いることにより、将来世代の福利を現在世代よりも低く評価するが、そのことを規範的に正当化できないこと、もう1つは、その均衡経路は時間整合的であり、また将来世代への利他意識を反映するものの、現在の意思決定に将来世代の意向は反映されないことである。後者は、割引のないラムゼーモデルにも当てはまる。本研究ではこの後者の点について、手続き的正義を欠くと見なし、次のような仮想的交渉モデルを分析した。すなわち、現在世代は隣り合う世代、あるいは重なり合う世代と資源配分や分配について交渉を行い、その際、各世代は後の世代との交渉を織り込む。その交渉経路は、各将来世代の意向が直接的間接的に現在の意思決定に反映されるという点で、世代間衡平に関する手続き的正義を満たす。このことからそれを手続き的世代間衡平経路 (Procedurally Intergenerationally Equitable Path: PIEP) と呼ぶ。

その交渉経路 PIEP は、将来の交渉を織り込むことで時間整合性を満たす。したがって標準的なラムゼーモデルと同様に、経路は自律的な力学系によって表現される。この同質性によって、交渉経路 PIEP を、ラムゼーモデルの解として得る可能性が生じる。同じファンダメンタルズで、ただし割引率を調整して、ラムゼーモデルの解として PIEP を得ることができるかを本研究は調べた。ラムゼーモデルはマクロ経済を記述するための標準的なモデルであり、割引率

の調整を政策的に行うことで、経済は世代間衡平に関する手続き的正義を満たす経路を実現することが期待できる。そこで用いられる割引率を本研究は社会的割引率と呼んでいる。これは従来とは全く異なる新しい社会的割引率の概念である。

この意味での社会的割引率について、本研究では、将来世代への利他意識を持たない主体を想定した3つのモデルを分析した。そのモデルとは、世代が重ならないモデル、2世代重複モデル、2世代重複モデルで人口の選択を交渉するモデルである。すべてのモデルでPIEPをラムゼーモデルで実現するための社会的割引率を得ることができた。得られた知見は、a) 3つのモデルに共通して社会的割引率は生産技術の影響を受ける、b) 社会的割引率は主体の割引率と異なり、2世代重複モデルの場合、PIPEは非効率である、c) 人口に関する世代間衡平を実現するためには割引率の調整だけでは不可能であり、人口増加の抑制が必要となることである。

本研究ではまた、手続き的正義とRawlsの原初状態との関係を考察した。原初状態を世代間衡平の文脈で考えると、そこでは人々は自身が将来世代に生まれる可能性を考え、将来世代の立場を社会契約において考慮することになる。したがって、原初状態で選ばれる社会厚生関数は手続き的正義を満たす。Rawls(1971)は、原初状態からRawls流の平等主義を導いたが、それだけでなく(割引のない)功利主義(Harsanyi, 1977)とNash交渉解もまた選択される可能性がある(Binmore, 2005)。本研究の手続き的世代間衡平経路PIPEは、このうちBinmoreが考える原初状態で選ばれるNash交渉解の動学版であると見なすことができる。

PIEPを、原初状態で選ばれる世代間衡平に関する社会厚生関数の1つとして見なすことによって、平等主義社会厚生関数、功利主義社会厚生関数との比較という課題が生じる。平等主義社会厚生関数のもつさまざまな問題点はよく知られている。すなわち、我々の道徳観からの乖離(発展を望ましいものと認めない)と、世代間利他主義を考慮することで生じる時間整合性に関する問題(Arrow, 1973; Dasgupta, 1974)である。一方、(割引のない)功利主義は、時間整合的であり、また我々の道徳観に矛盾しないが、実際に我々はそのルールに従おうとはしていないという問題がある。この道徳と行動の不一致の問題は、地球温暖化問題への対応のなかで議論されてきた(Arrow, 1999; Nordhaus, 2007)。

標準的なマクロ経済学では、我々があたかも割引功利主義モデルにしたがっているかのように行動することを仮定している。このことは、実証における割引功利主義モデルの優越性を示している。一方で、割引功利主義モデルは、各世代を等しく扱わないという意味で世代間衡平を満たさない(Ramsey, 1928; Chichilnisky, 1999)。さらにいえば、それは手続き的正義を満たさず、Rawlsの原初状態でも選ばれない。

Arrow(1999)はゼロ割引率をprescriptive discount rateと呼び、経済を記述するために使われる正の割引率をdescriptive discount rateと呼んでいる。本研究の課題でも述べたように、これら2つの割引率のいずれかを用いるかは100年来の論争であり、地球温暖化問題の発現が論争を再燃させている。これに対して、本研究の社会的割引率は、手続き的正義という観念によって、交渉解を仲介者として、割引功利主義と世代間衡平を和解させようとするものである¹。

本研究では、実際の温暖化交渉の背後でas if的に現れる割引率と本研究の社会的割引率の関係を論じるまでには研究が至らなかった。今日の温暖化交渉の重要な議題は、パリ協定で定められた長期目標を最小費用で実現する温室効果ガス(GHG)排出経路と、各国の自発的な

¹ 社会的割引率はゼロ割引率を意味する場合のほか、外部性のある経済において最適経路を競争均衡によってミミックする際に現れる利子率の意味で使われてきた。これらと区別するために「本研究の社会的割引率」と表現している。

計画（NDC）による国別 GHG 排出経路の集計値の差（emissions gap）の解消である。現在国連は、パリ協定加盟各国に対してより野心的な汚染削減を求め、見直された各国は NDC の見直しを行っている。各国の NDC がどのような割引率に対応するか、そしてそれが本研究の社会的割引率とどのように異なるかを調べることは今後の研究課題である。

（2）微分ゲームの研究では、国際環境交渉をモデル化し、payoff dominant ナッシュ均衡（NE）を分析すること、特に温暖化交渉における異質プレイヤーモデルを分析することを課題としている。モデルは、国際汚染ゲームで著名な Dockner and Long (1992) の 2 人 LQ モデルである。これは、状態方程式が 1 次式（Linear）、利得関数が 2 次式（Quadratic）の 1 状態変数（汚染ストック）1 制御変数（汚染排出）モデルである。汚染排出は、経済活動の代理変数として正の利得を生み、同時に汚染蓄積を通じて負の利得を生む。

非対称モデルで不連続な戦略を含む戦略空間においてマルコフ完全ナッシュ均衡（MPNE）を特徴づけることを課題としていたが、次のような困難に逢着した。a) MPNE は排出量の非自律的微分方程式、あるいはそれに汚染ストックを状態変数に追加することで自律的微分方程式として記述され、いかなる初期値からも MPNE の候補を作り出すことができる。それらの解析的な分類・特徴づけを行うこと。b) MPNE は定義域全域で汚染に対して単調であることを示すことができる。上記の微分方程式の解はしばしば非単調なため、MPNE を構成するために別の解へのジャンプが必要となる（不連続な均衡戦略）。均衡戦略の値関数は連続である（ことを示すことができる）ために、ジャンプは時間集計利得（値関数の値）が等しい解経路を接続するものとなるが、上記微分方程式の解のうち、この値関数の値が等しいものを見つけること。これらの課題に対して、研究期間内では解決することができなかった。このため MPNE の導出には至らず、定常状態近傍で局所的に安定となるマルコフナッシュ均衡の集合およびその性質を明らかにするにとどまった。例えば割引率が大きくなればその集合は小さくなる等である。

試みとして、非対称 LQ ゲームは割引のない工学モデルにおいて扱われているため、割引のある経済モデルを割引率のないモデルに変換し（状態変数が 1 つ増える。Engwerda, 2005 を参照）、いわゆる coupled Riccati 微分方程式の研究の応用可能性を探った。工学では線形ナッシュ均衡のみが扱われており、本研究のような非線形不連続な戦略の分析に関するヒントは得られなかった。また、数値シミュレーション（次図）から、情報を引き出すことも試みたがよいヒントは得られなかった。

微分ゲームの経済学への応用で通例行われることであるが、以上の非協力解とともに協力解の特徴づけも試みた。効率的な解は無数にあり、その集合は戦略空間にパレートフロンティアを構成する。個々の効率的解は、2 人の利得関数に与えるウェイトによって特徴づけられる。興味深い発見として、等しいウェイトを与える方が、大きなウェイトを一方のプレイヤーに与えるよりも汚染水準は大きくなることがわかった。すなわち、衡平性は環境保全と両立するとは限らない。これは一見すると意外な結果だが、そのメカニズムは容易に理解できる。すなわち、小さなウェイトを与えられたプレイヤーは、効率ウェイト上で利得を低く抑えられ、汚染排出量も小さくなるためである。

プレイヤーの異質性を許す非対称微分ゲームは、線形解といった特定の解に限定した研究がほとんど全てである一方、本研究では、非線形かつ場合によっては不連続な均衡戦略を研究対象とした。微分ゲームでは、状態方程式に他のプレイヤーの戦略が加わるため、このような均衡戦略によって、状態方程式を凹関数と考えることはできず、さらには連続性も仮定できない。このため、非凸モデルの解の存在や、状態変数に関して不連続な微分方程式が一意的な解を持つための条件といった基礎的な研究が必要となる。それらに関する研究成果として、凸性を仮定しない

ラムゼーモデルの解の存在証明を完成させた (Akao, Ishii, Kamihigashi, and Nishimura, forthcoming)。なお、凸性を仮定する場合も消費や投資に上限を課さないモデルにおいて存在証明はこれまでなかった。(ただし凸性を仮定する場合、Arrow や Mangasarian の十分条件が使えるため、それらを利用して実際に最適経路を構成することで解の存在を確認できる。) また、本研究の LQ モデルについて、不連続な関数をもつ微分方程式が一意的な解を持つ条件を明らかにした。

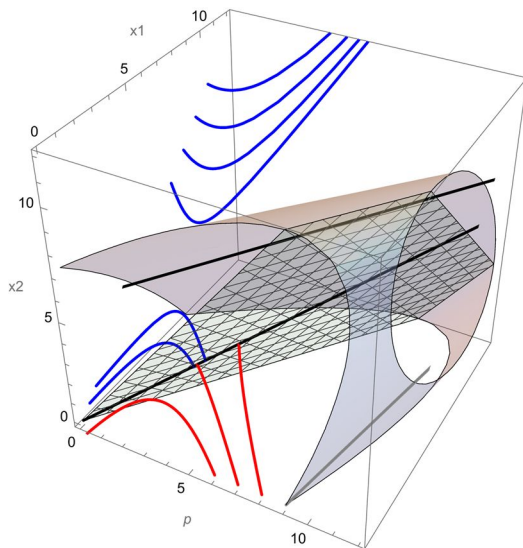


図 非対称ゲームの数値シミュレーション例
注: p は汚染ストック、 x_1, x_2 は汚染排出量(戦略)

引用文献

- [1] Akao, K., H. Ishii, T. Kamihigashi, and K. Nishimura "Existence of an Optimal Path in a Continuous-time Nonconcave Ramsey Model," Pure and Applied Functional Analysis (forthcoming).
- [2] Arrow K.J. (1999) "Discounting, morality, and gaming," in Portney, P.R. and J.P. Weyant (eds.) Discounting and International Equity, Chapter 2. Resources for the Future.
- [3] Arrow, K.J. (1973) "Rawls' principle of just saving," Swedish Journal of Economics 75, 323-335.
- [4] Binmore, K. (2005) Natural Justice, Oxford University Press.
- [5] Chichilnisky, G. (1996) "An axiomatic approach to sustainable development," Social Choice and Welfare 13, 231-257.
- [6] Dasgupta, P. (1974) "On some alternative criteria for justice between generations," Journal of Public Economics 3, 405-423.
- [7] Dockner, E.J. and N.V. Long (1993) "International pollution control: Cooperative versus noncooperative strategies," Journal of Environmental Economics and Management 25, 3-29.
- [8] Harsanyi, J. (1977) Rational Behavior and Bargaining Equilibrium in Games and Social Situations. Cambridge University Press.
- [9] Nordhaus, W.D. (2007) "A Review of the Stern Review on the Economics of Climate Change," Journal of Economic Literature 45, 686-702.
- [10] Ramsey, F.P. (1928) "A mathematical theory of saving," Economic Journal 38, 543-559.
- [11] Rawls, J. (1971) A Theory of Justice, Harvard University Press
- [12] Engwerda, J.C. (2005) LQ Dynamic Optimization and Differential Games, Wiley.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Ken-Ichi Akao, Hitoshi Ishii, Takashi Kamihigashi, & Kazuo Nishimura	4. 巻 1905
2. 論文標題 Existence of an optimal path in a continuous time nonconcave Ramsey model	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIEEM Discussion Paper Series	6. 最初と最後の頁 1 - 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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ken-Ichi Akao, Takashi Kamihigashi, & Kazuo Nishimura	4. 巻 1906
2. 論文標題 Critical capital stock in a continuous time growth model with a convex-concave production function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIEEM Discussion Paper Series	6. 最初と最後の頁 1 - 41
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ken-Ichi Akao, Takashi Kamihigashi, & Kazuo Nishimura	4. 巻 1907
2. 論文標題 Optimal steady state of an economic dynamic model with a nonconcave production function	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 RIEEM Discussion Paper Series	6. 最初と最後の頁 1 - 13
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 オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 公開 International Environmental Agreement as an Equilibrium Choice in a Differential Game
3. 学会等名 2021 Asian Meeting of the Econometric Society（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Payoff dominant equilibrium in a differential game for pollution control
3. 学会等名 Society for the Advancement of Economic Theory 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Discounting and Intergenerational Equity as a Bargaining Solution
3. 学会等名 East Asian Association of Environmental and Resource Economics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 International Environmental Agreement as an Equilibrium Choice in a Differential Game
3. 学会等名 Association for Public Economic Theory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Existence of an optimal path in a continuous time nonconcave Ramsey model
3. 学会等名 Society for the Advancement of Economic Theory 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 International Environmental Agreements as an Equilibrium Choice in a Differential Game
3. 学会等名 WCERE 2018 - 6th World Congress of Environmental and Resource Economists (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Critical capital stock in a continuous time growth model with convex-concave production function
3. 学会等名 PET 2018: Association of Public Economic Theory (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Existence of an optimal path in a continuous time nonconcave Ramsey model
3. 学会等名 SAET 2019: Society for the Advancement of Economic Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 International Environmental Agreements as an Equilibrium Choice in a Differential Game
3. 学会等名 PET 2019: Association of Public Economic Theory (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ken-Ichi Akao
2. 発表標題 Discounting and Intergenerational Equity as a Bargaining Solution
3. 学会等名 8th Congress of EAAERE: East Asian Association of Environmental and Resource Economics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Ken-Ichi Akao (Homepage) http://www.f.waseda.jp/akao/KA/Kenichi_Akao.htm 早稲田大学研究者データベース https://researchers.waseda.jp/profile/ja.7e8d1fb11c6dd273a61d631028462b56.html Research Gate https://www.researchgate.net/profile/K_Akao Google Scholar https://scholar.google.co.jp/citations?hl=ja&user=LLLNdcIAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate RePEc https://ideas.repec.org/e/pak134.html</p>
--

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	上東 貴志 (Kamihigashi Takashi) (30324908)	神戸大学・計算社会科学研究所・教授 (14501)	
研究分担者	西村 和雄 (Nishimura Kazuo) (60145654)	神戸大学・計算社会科学研究所・特命教授 (14501)	
研究分担者	石井 仁司 (Ishii Hitoshi) (70102887)	津田塾大学・数学・計算機科学研究所・研究員 (32642)	

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
---------	---------