

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2005～2008

課題番号：17530138

研究課題名（和文） 秩序・規範・協力関係の理論分析

研究課題名（英文） Theoretical Studies in Order, Norms and Cooperation

研究代表者

神取 道宏 (KANDORI MICHIMIRO)

東京大学 大学院経済学研究科・教授

研究者番号 10242132

研究成果の概要：本プロジェクトでは、秩序・規範・協力関係がどのように発生し維持されるかを、ゲーム理論に基づいて分析した。特に、長期的関係における協調を達成するには、相手の行動についてどのような情報が必要であるかという点について、従来にはない新しい発見を達成した。また、オフィスや家具などの分割できない財を試行錯誤で交換してゆく過程において、ランダムなミスが発生すると、かえって望ましい最終結果を得られることなどが明らかとなった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	500,000	0	500,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,200,000	330,000	2,530,000

研究分野：ゲーム理論、ミクロ経済理論

科研費の分科・細目：経済学・理論経済学

キーワード：くり返しゲーム、進化ゲーム

1. 研究開始当初の背景

社会経済のきわめて広範囲の問題において、協調を達成するためには「ぬけがけ・裏切り」を抑止するなんらかのメカニズムが必要である。その一つの代表的な方法は、当事者同士が長期的関係を結ぶことである。長期的関係においては、今期協調からぬけがけして目先の利益を上げると、将来報復に遭遇してかえって損をする可能性が出てくる。したがって、「利己的な個人も、長期的関係においては協調を達成できる」ということが予想される。しかしながら、このメカニズムがうまく

働くかどうかを調べるには、「どのような形で裏切り者に報復ができるか」「そのような報復活動に当事者が果たして本当に参加する誘因をもつのか」等を、明確な形で検討しなければならない。こうした要請にこたえるため、長期的関係を明確な数理モデルで表現し分析するのが、「くり返しゲームの理論」である。その中で、参加者がお互いの行動を完全に観察できる、いわゆる「完全観測のケース」に関しては、ほぼ完全な分析がなされていた。これに比して、相手が裏切ったかどうか完全にはわからないという、より現実的

で重要なケースは、「不完全観測のケース」と呼ばれ、本プロジェクト開始時には不完全な理解しか得られていなかった。不完全観測のケースはさらに、お互いの行動に関する不完全な情報を全員が共有する「公的不完全観測のケース」と、各人がお互いの行動について、ばらばらな（不完全な）情報を持つ「私的不完全観測のケース」に分かれる。前者に関しては、「各人が共有した情報にもとづいて行動するような均衡状態」（公的完全均衡）の性質は詳細に知られていたが、共有情報に加えて自分のみが知りえる私的情報をさらに反映させるような均衡があるかどうか、またそのような均衡は公的完全情報よりもよい結果を導くかどうかは不明であった。

また、「私的不完全観測」のケースでは、「どのような形で裏切り者に報復ができるか」「そのような報復活動に当事者が果たして本当に参加する誘因をもつのか」等をすべて詳細にチェックすることがそもそも難しく、このようくり返しゲームにおいて均衡を構成する方法はごくわずかしかなかった。

また、ゲーム理論は一般的に、試行錯誤の調整過程が行き着いた先の、安定した社会状態をゲームの「均衡」として捉え、その性質を明らかにすることによって大きな成果を上げてきた。これに対して、安定した状態へいたる試行錯誤の調整過程自体を明示的に分析し、「はたして社会は（ゲーム理論が予測するような）安定な状態（ゲームの均衡）に到達するのか」「安定な状態が複数あった場合、そのどれが実現するのか」などの問題に答えようとするのが、いわゆる「進化ゲームの理論」である。試行錯誤にはランダムな要素がつき物で、そうした調整過程にはゆらぎが存在する。このようなゆらぎを明示的にモデルに組み入れたものが「確率進化ゲームの理論」である。ゆらぎが存在すると、たとえば社会がある安定な状態（均衡）に行き着いたとしても、ランダムなショックによってその均衡が崩れ、新たな均衡へと社会が移動する可能性が出てくる。このようなプロセスを長い目で見た場合、最終的にどのような状態が観察されるのかを明らかにするのが、確率進化ゲーム理論の一つの大きな目的である。研究代表者（神取）はこうしたことを定式化し、長期的に安定な状態を判別する手法を1993年に Mailath, Rob, Young らとともに編み出し、確率進化ゲームという研究分野を創出した。ゆらぎのもとで長期的な社会状態の分布がどうなるかを、一般に正確に計算することは困難ではあるが、いくつかの強い条件の下ではこうした定常分布が分析的に求まることが知られていた。そこでキーとなる条件は、考察しているゲームにいわゆるポテンシャル関数が存在するというものである。

しかしながら、多くの応用問題についてはこのポテンシャル条件は成り立たないため、定常分布が求められるより広いクラスのゲームを見つけ出すことが、本プロジェクトの開始段階での大きな課題であった。

2. 研究の目的

本プロジェクトは上記のような背景を踏まえ、くり返しゲームと進化ゲームの更なる進展を図るべく企画されたものである。研究の目的は、大きく言って「長期的関係における協調を達成するには、相手の行動についてどのような情報が必要であるかを明らかにすること」、および「ランダムな試行錯誤の調整過程を経た後に、社会が行き着く状態を特定する新たな手法を見出すこと」にあるといえる。

より具体的には、本プロジェクトの主要な目的は、次の3つに集約できる。

公的不完全観測のくり返しゲームにおいて、各プレイヤーが独自に持つ私的情報を反映するような均衡はないかを調べる。あるとすれば、そうした均衡が、従来ほぼすべての研究が対象としてきた「公的完全均衡」よりも、より望ましい結果を実現できるかどうかを調べる。私的不完全観測のくり返しゲームにおける均衡を構成する新たな理論を構築し、従来得られた均衡よりも優れた性質を持つものを見つけ出すこと。

具体的な現実問題に対応するようなモデルにおいて、ランダムな試行錯誤の末に到達する社会状態の分布を明らかにすること。

3. 研究の方法

目的 にかなう結果を得るためには、公的不完全観測のくり返しゲームにおいて、各プレイヤーが、自分独自に持つ私的情報を反映するような行動を取ることが均衡状態になるための条件を明らかにする必要がある。理論的に見ると、この問題は、私的不完全観測下のくり返しゲームで均衡を構成する問題を極めて密接にかかわっている。このため、本プロジェクトでは、私的不完全観測に関してプロジェクト発足当時知られていいたいくつかの理論結果を踏まえ、それをいっそう発展させる方向で検討を試みた。

目的 に関しては、私的不完全観測くり返しゲームの研究手法の主流である、いわゆる Belief-free アプローチの長所は残しつつ、その欠点である均衡の非効率性を緩和する方法を模索した。私的不完全観測の場合には、相手の行動を読むために、相手が現在までにどのような私的情報を観測したかを、自らの

私的情報の履歴を考慮しながら推測しなければならない。この統計的推測の問題は、相手が比較的単純な戦略に従っているときでさえ、時間とともに複雑さを増してゆく。こうした困難を緩和するため、Belief-free アプローチは、相手がどんな情報を得ているかを全く推測する必要がないような均衡の構成方法を与えるものである。しかしながら、Belief-free の均衡においては、各人の利得が相手の得た私的情報に従って独立に動くという性質があり、これは、すべてのプレイヤー利得が同時に引き下げられることがたびたび発生することを意味している。すなわち、Belief-free の均衡は、その構成方法の副作用として、非効率性を持つことになる。本プロジェクトは、Belief-free アプローチの条件を緩和することによって、統計的推測問題を大幅に簡略化しつつ、Belief-free 均衡につきものであった非効率性を緩和することを目指した。

研究目的の に関しては、オフィスや家具などの分割できない耐久財を、試行錯誤で交換してゆくプロセスの理論分析を行った。たとえば、このような問題において、每期ランダムに二人のプレイヤーが出会い、出会ったプレイヤーはお互いが持っている財を比較検討し、両者が合意すれば現在持っている財（の一部または全部）を交換するものとしてみよう。このように、各人が常に自分にとって有利な交換にのみ応じてゆくと、最終的に全体の利益が最大になる（効率的な配分が達成できる）ようにも思われるが、実はそうではない。最終的に行き着いた状態は、「どの二人が出会ってももはや交換の利益がない」状態に過ぎず、より多くの人数（たとえば 10 人）が一同に会して同時に交換を行えば、より良い状態に移行できる可能性があることは否定できない。つまり、各人がミスをおかすことなく、常に自分にとって有利な交換にのみ応じてゆくと、最終的には非効率な状態に落ち込んでしまう可能性が常に存在するのである。そこで、交換の過程に試行錯誤のゆらぎを導入し、各人は自分にとって本来不利な交換にも時として応じることがあるものとしてみる。こうしたゆらぎが起こる理由としては、(i) 単純なミス、(ii) 財に対する好みが一時的に変化する、(iii) 将来もっと良い財と交換できることに賭けて本来は好ましくない財を受け入れる、などがあげられる。交換の過程は、このようなゆらぎを取り入れたほうがより現実的といえる。また、人間はより深刻なミスは犯さないように慎重に行動する性向があるため、「自分にとってより不利な行動は、より小さい確率でおこる」モデルを構築する必要がある。このために、実証分析で広く用いられるロジット型のゆらぎの分布（タイプ I 型の極値分布）を仮定す

るモデルを分析した。

4. 研究成果

目的 に関しては、2006 に査読つき雑誌 *Econometrica* に掲載された論文として研究成果がまとまった。*Econometrica* は理論経済学一般においてもっともインパクトの強い学術雑誌と目されているものである。この論文で扱う「公的不完全観測のくり返しゲーム」は次のように多くの社会経済問題を定式化するものとなっている：

- ・企業の共謀（カルテル）：企業はお互いの出荷量を低く抑えて価格を吊り上げたい。各企業はライバル企業の出荷量を直接観察することはできないが、最終的に市場で成立する価格は全員が観測する。ただし、市場で値崩れが起こっても、市況が悪いだけかも知れず、ライバルがぬけがけして過大な出荷を行ったものとは限らない。

- ・地球温暖化と国際協調：各国は CO₂ の総排出量を削減し温暖化を防ぎたいが、各国は、他国に削減させておいて自分ひとりだけがぬけがけする誘惑に駆られる。また、各国は他国がどの程度ガスを排出しているかは正確にはわからないが、公表データによっておおよその値はわかる。

このような多くの重要な問題において、どの程度の協調が達成可能かを理論的に明らかにするために、従来の研究は分析が比較的容易な「公的完全均衡」にもっぱら関心を集中してきた。そこでは、各人が持っている私的情報（自分が実際にどんな行動を取ったか）は無視され、もっぱら公表データのみによって各人の行動がきまるような均衡のみが分析されてきた。このような制約をはずした場合なにが可能になるかは、くり返しゲーム理論の長年のみ解決問題の一つであった。本プロジェクトの研究成果は、これに対して解決を与えたものである。とくに、「公的完全均衡」の制約をはずした新たな均衡の構成方法が明らかになり、さらに、そうした均衡のほうが従来研究されてきた公的完全均衡よりも、より良い結果を達成できることが発見された。その理由は、つぎのように非常に直感的に理解しやすいものとなっている。工場工程の品質管理者が製品のランダムな抜き取り調査をするように、公的不完全観測のくり返しゲームに参加するプレイヤーは、ときとして「それ自体は高い利益をもたらさないが、有益な情報を発生させるのに役立つような行動」を取ることができる。そのような行動を取った結果得られた質の高い情報を使って戦略を練れば、全体としてより協調が達成しやすくなる。これは、自分の過去の行動に従って将来の行動を変化させることを意味し、従来の「公的完全均衡」とは異なったものとなっている。われわれの研究成果は、こ

のような直感的なメカニズムを織り込んだ形でくり返しゲームの均衡戦略を構成することが理論的に可能であることを明らかにし、これを「私的戦略による均衡」と名づけた。これは、従来の研究における制約を取り払うことに成功したという意味で大きなインパクトをもつ成果である。例えば、くり返しゲームの研究成果を集大成した大学院上級向けの教科書・研究書である G. Mailath and L. Samuelson (2006), *Repeated Games and Reputations*, Oxford University Press は、私的戦略による均衡に関して、1章を割いて紹介している (Ch. 10)。

この研究の過程で、上記のようなくり返しゲームにおいて、「公表データが実際の行動をあまり反映しなくなると、かえって協調がしやすくなる」という、パラドクシカルな状況があることが発見された。これにかんしては2006年に査読つき国際学術雑誌

International Journal of Game Theory に、その成果が掲載された。これは、それ自体興味のある現象であるのみならず、公的不完全観測において協調が漸近的に(プレイヤーの割引因子が1に近づくにつれ)完全に達成されるためには、従来知られていた条件が満たされなくてもよいことを示した点で重要である。より具体的には、公表データが実際の行動を不完全にしか反映しないにもかかわらず、あたかも行動が完全に観察されるときと同様の協調水準が達成されるためには、実際の行動が生み出す公表データの確率分布が、ある種のランク条件 (the pairwise full-rank condition) を満たしていれば良いことが知られていたが、この成果においてはこの条件が満たされなくても効率的な協調が達成可能であることが明らかになったのである。

目的 に関しては、"Weakly Belief Free Equilibria in Repeated Games with Private Monitoring" という論文にひとまず成果がまとめられ、香港大学での学会(2007)や、国際ゲーム理論学会の世界大会(2008)において、いずれも招待講演として発表された。この論文においては、均衡利得の集合を時間を通じて追跡してゆく従来の分析方法を離れ、各人が各時点で実質的にプレイしているローカルなゲーム(縮約ゲーム reduced game)に焦点を当てる。縮約ゲームは各期のゲーム(ステージゲーム)と同じ戦略を持ち、その利得は、今期のゲームの利得に、将来の利得の割引総和を加えて得られるものである。くり返しゲームにおいて均衡条件をチェックするには、動的計画法の基本定理である「一回逸脱の原理」が用いられる。これは、すべての歴史のあとで、各プレイヤーは「自分ひとりだけが今期1期だけ均衡から逸脱しても得しない」という条件が成り立てば、そのような状態はくり返しゲームの均衡にな

っていることを保証するものである。この、一回逸脱の原理をチェックすることと、各時点での縮退ゲームで相関均衡が成立していることは同値である。このようにして議論を整理すると、「私的不完全観測下のくり返しゲーム」の理論において主流であった Belief Free アプローチは、きわめて特殊なやり方でそのような状況を作り出していたことが判明した。同様の状況を簡単に作り出すもう一つの方法は、今期の公表データが公表される直前の時点で、「それ以前にどんなことが起こったかにかかわらず、次期の縮退ゲームで相関均衡が成立する」ことである。この条件が成立すると、今期以前に各人がどのような私的情報を得ていたかにかんして、複雑な統計的推測をする必要が全くなり、Belief Free アプローチと同程度の簡略化された分析が可能となる。しかも、Belief Free アプローチよりも自由度が高い方法で均衡を構成しているので Belief Free アプローチの欠点であった結果の非効率性を緩和することにも成功するものである。この成果については、これらの学会発表でのフィードバックをもとに、更なる発展を加えることを目指している。

このような、くり返しゲーム理論に関する本研究プロジェクトおよびこれまでの研究成果が評価された結果、経済学分野でもっとも権威ある百科全書 *New Palgrave Dictionary of Economics* の全面的な改訂版が刊行された際(2008)に、研究代表者(神取)はくり返しゲームに関する解説の担当者に選ばれ、これを執筆した。

目的 については、数理経済学の分野に特化した雑誌としては最もインパクトの高い *Journal of Economic Theory* (査読つき)にその成果が掲載された(2008)。この論文においては、オフィスや家具などの非分割財を、各期間少数の人々が出会って交換をおこなうプロセスを定式化した。交換の過程はランダムな試行錯誤が伴うものとし、各人は基本的に自分にとって有利な交換に応じるが、ときとして不利な交換にも応じる可能性を考慮する。交換に応じるか否かを、実証分析においてよく使われるロジット型のモデルで表現すると、そのような試行錯誤のプロセスが行き着いた先に現れる定常分布が具体的に計算できることが発見された。そのようなことが可能であるのは、いわゆるポテンシャル関数をゲームがもつときであることが良く知られていたが、この論文ではポテンシャル条件がなくても同様な結果が得られることが明らかになった。さらに、研究の副産物として、社会全体の利益を計る「社会的厚生関数」に関して、新たな角度から光を当てることが可能となった。

社会的厚生関数にはさまざまなものがある

が、代表的なものとして次の2つのものが挙げられる。ひとつはベンサム型(功利主義型)の社会的厚生関数で、これは各人の利得の加重和である。第2は、ナッシュの社会的厚生関数で、これは各人の利得の積となっている。本論文で明らかになったことは、試行錯誤のゆらぎを表すノイズ項が利得に加えられる場合には、定常分布はベンサム型の社会構成関数を最大化する点に大きな確率を付与する。また、ノイズ項が利得に積の形で入ると、試行錯誤の交換プロセスの定常分布は、ナッシュの社会厚生関数を最大化する点に大きな確率を付与する。さらに、ノイズがゼロに近づくと、それぞれのケースで社会厚生関数が最大になる状態の確率が、1に漸近することが明らかになった。社会的厚生関数の意味合いは規範的な観点から議論されることが多かったが、本論文は、ある種の状況では、(当事者たちは意識しないにもかかわらず)最終的には特定の社会厚生関数が最大化されるようなことが起こることを示し、社会的厚生関数の事実開明的(positive)な意味づけを与えたという点が斬新である。いずれの場合においても、ノイズが小さければ社会的厚生関数が最大化される効率的な点が、高い確率で達成される。これは、ノイズがなく、各人が常に自分にとって得な交換のみを受け入れていくと、非効率的な点に落ち込んでしまうのとは対照的である。完全に合理的に目の利益を追求するよりも、あるていどランダムに試行錯誤をしたほうが全体としてよりよい結果が生まれる可能性が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

M. Kandori and I. Obara, "Efficiency in Repeated Games Revisited: The Role of Private Strategies", *Econometrica*, Vol. 74, No. 2, February, 499-519, 2006 査読つき

M. Kandori and I. Obara, "Less is More: An Observability Paradox in Repeated Games", *International Journal of Game Theory*, Vol.34, No. 4, 475-493, 2006 査読つき

M. Kandori, R. Serrano and O. Volij, "Decentralized Trade, Random Utility and the Evolution of Social Welfare", *Journal of Economic Theory*, Vol.140, No. 1, 328-338, 2008 査読つき

[学会発表](計 2 件)

神取道宏、"Weakly Belief Free Equilibria in Repeated Games with Private Monitoring", Summer Microeconomic Seminars, 2007年7月18日, University of Hong Kong.

神取道宏、"Weakly Belief Free Equilibria in Repeated Games with Private Monitoring", Game Theory Society World Congress 2008, 2008年7月15日, Northwestern University.

[図書](計 2 件)

M. Kandori, Palgrave Macmillan, "Repeated Games", in *New Palgrave Dictionary of Economics*, 2nd edition, 2008.

神取道宏 朝日新聞社、「ゲーム理論 社会の行き着く先を解き明かす」『新版 経済学がわかる。』2004, p.45-47.

[産業財産権]

出願状況(計 件)

取得状況(計 件)

[その他]

ホームページ

<http://www.e.u-tokyo.ac.jp/fservice/faculty/kandori/kandori.j/kandori.j.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

神取道宏 (KANDORI MICHHIRO)
東京大学・大学院経済学研究科・教授
研究者番号: 10242132

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者