

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2013～2016

課題番号：25380224

研究課題名（和文）インセンティブ理論の新展開

研究課題名（英文）Advances in the Theory of Incentives

研究代表者

神取 道宏（KANDORI, Michihiro）

東京大学・大学院経済学研究科（経済学部）・教授

研究者番号：10242132

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：私的観測下のくり返しゲームにおいて均衡を見つけ出す一般的手法を編み出すことは、長らく未解決問題であったが、これに対する解答を部分観測マルコフ意思決定理論の応用によって与え、見間違いのある場合にどのようにすれば協調できるかを明らかにした。また、1回限りの関係においても、戦略をあらかじめ準備してこれを機会があることに改訂する場合には、協調が達成できることを示す理論モデルを開発し、基礎理論と応用を研究した。さらに、私的観測下の世代交代型くり返しゲームの理論モデルに非常に近い構造を持つ労働組合を発見し、詳細な調査を行うことにより、私的観測下で協調を達成する新たなメカニズムを発見した。

研究成果の概要（英文）：This project provided an answer to a long-standing open problem of finding a general method to identify equilibria in repeated games with private monitoring. This was done by an application of Partially Observable Markov Decision Problem, and simple and robust ways to sustain cooperation under misperception were identified. The project also proposed a new class of game theoretic models, revision games, to show that cooperation is sustained in one-shot relationship, through the process of revising strategies. Furthermore, detailed empirical study was conducted about a labor union of an unusual form, a striking real-life example of OLG repeated game with private monitoring. Based on hearings and data analysis, it was discovered that there is a clever way to sustain cooperation, even though labor union members have very limited information about who helped whom.

研究分野：理論経済学

キーワード：ゲーム理論 くり返しゲーム 私的不完全観測 協調 ケーススタディ 労働組合

## 1. 研究開始当初の背景

人間や企業がおたがいに協調することは望ましいが、通常は自分一人だけが手を抜く方が得であるため、協調はなかなか十分には達成できない。社会にとって望ましい協調状態を達成・維持するためにはどのようなことが必要なのか？ この、経済学ひいては社会科学一般において重要な問題を扱う一般理論として、くり返しゲームの理論が開発されてきた。くり返しゲームの理論は、利己的な個人も長期的関係を結べば協調できることを示すものである。

長期的関係においては、今日相手を裏切ると、明日以降相手に仕返しをされる、あるいは大切な協調関係が崩れてしまう、という思惑が働いて、協調が達成できる。もちろん、「今日協力すると将来見返りがある」「今日裏切ると将来仕返しされる」ならば協調が達成できるということは、ほとんど自明であるが、「協力する人にはきちんと見返りを与える」「裏切った人にはきちんと罰を与える」ことがなぜ・どのように達成できるかは全く自明ではない。くり返しゲームの理論は、ゲーム理論を使って、関係者が要所所で適切な行動を取るインセンティブをあたえるにはどのようなことが必要かを明らかにするのである。

くり返しゲームの理論は、まず相手の行動を間違いなく見ることができ「完全観測」のケースについて理論が完成し、続いて相手の行動が直接観察できない「不完全観測」の研究が進んでいた。特に、相手がどのくらい努力しているかはわからないが、努力の成果は観察できる（共同でやっているプロジェクトが成功するか失敗するかなど）という、「公的不完全観測」のケースについては理論は完成しており、きわめて一般的な条件の下で協調達成が可能なが分かっている。

しかしながら、相手の行動を見間違える可能性があるという「私的不完全観測」のケースについてはまだ研究は十分進んでおらず、均衡（協調を達成するための行動パターン）を発見する一般的方法を見つけること、および通常人間が取りそうなシンプルで頑強な均衡戦略を見つけ出すことは、経済理論における重要な未解決問題であった。

また、長期的関係を結ぶことがなくても、何らかの方法で協調を達成できないかということについては、ほとんど既存の研究はなかった。

さらに、くり返しゲームの理論は経済や一般の社会問題への幅広い応用が可能であるにもかかわらず、実際のデータに基づいた実証研究はあまり進展していなかった。

## 2. 研究の目的

研究の第一の目的は、「相手の行動を見間違える可能性がある」ような、私的観測のケースにおいて、協調を達成するための行動パ

ターン（均衡戦略）を発見するための一般的手法を発見する、という未解決問題に解決を与えることである。

これが長らく未解決であった理由は次のような事情による。相手の行動が観察できる場合（完全観測）、あるいは相手の行動が観察できないが、共同プロジェクトの失敗・成功といった結果が観察できる場合（公的不完全観測）には、プレイヤーが過去の行動や結果に関する情報を共有しているので、どんなことが起こった後でも、「これから将来にわたって相手がどう出るか」をお互いに正しく予想することが可能になる。一方で、相手の出方を見間違える可能性がある場合（私的不完全観測）には、お互いに過去に何を観察したかはわからないので、「これから将来にわたって相手がどう出るか」をお互いに正しく予想することが困難となる。このような状況において、プレイヤーが要所所で適切な行動を取る（相手が協調したと思えば見返りを与え、裏切ったと思ったら罰を与える）ようにさせるには、膨大な数の複雑な条件をチェックする必要があるため、「私的不完全観測」のくり返しゲームで協調を達成する方法（均衡）を見つけ出す一般的手法を編み出すのは困難と目されてきた。

本プロジェクトの目的は、この困難を解決するために、プレイヤーが相手の行動に対して抱く信念（確率分布）に注目し、この信念が時間を通じてどのように変化するかをうまく追跡する手法を開発し、長年の未解決問題に解決を与えることである。

また、1回限りの関係でも協調関係が達成できる方法を見出すために、1回限りの状況においてもくり返しゲームと同様のメカニズムが働く状況がないかに着目し、協調達成の新たな一般理論を開発することを目的とする。

さらに、くり返しゲームの理論が現実世界での人間や企業の協調行動をたしかに記述・説明するのに役に立つことが、十分に納得できるような詳細な実証分析を行うことも重要な目的の一つである。

## 3. 研究の方法

私的不完全観測のもとで協調を達成する均衡戦略を見つけ出すには、膨大な数の複雑な条件をチェックしなくてはならない。この困難を緩和するため、各人が均衡において取る行動パターンが、有限個の状態を持つ流れ図で記述できるものに注目する。すると、各人が各時点で相手の行動に対して抱いている不確実性は、相手が有限個あるどの状態にどんな確率で現在いるのか？という、確率分布で表されることになる。たとえば、相手が3つある状態のどれかに居るようなケースでは、ある時点で相手の出方を読むには、相手が3つの状態それぞれに居る確率、すなわち  $(p, q, r)$  という3つの数を考えればよいことになる。これを、各人の信念と呼ぼう。

今期の自分の信念が与えられると、今期の自分の行動と今期自分が観察した情報を使って、相手が明日どの状態にいるかをあらわす「明日の信念」が計算できる。このことは、私的不完全観測下のくり返しゲームに参加するプレイヤーが、各期に最適な意思決定をする際に必要なすべての情報は信念（上の例では  $(p, q, r)$  という3つの数）に集約され、プレイヤーはこの信念を追跡してゆくことによって最適な行動を計算できることになる。

このような意思決定問題は、「部分観測マルコフ意思決定問題」(POMDP)として、オペレーションズ・リサーチや計算機科学で研究が進んでいた。本研究の方法の大きな特徴は、各人の行動が有限個の状態を持つ流れ図で記述できる場合に着目し、部分観察マルコフ意思決定理論を応用して均衡戦略を発見する一般的手法を開発することである。

また、くり返しゲームの理論がたしかに現実世界の協調行動を説明することを説得的に示す実証分析を行うために、たんなるデータの収集と統計的分析にとどまらず、聞き取りや事実関係の解明を通じ、詳細な制度的知識を得たうえでさまざまな説明仮説のうちどれが説得的なのかを分析する、ケーススタディの手法を採用することとした。

#### 4. 研究成果

(1) 私的不完全観測のもとでのくり返しゲームにおいて、均衡を発見する一般的手法を開発することに成功し、ならびにこの手法を計算機に実装することにより、「相手の行動を見間違える」可能性があるような場合に、どのようにしたら協調が達成できるかを明らかにした。

手法の概要は次のとおりである。ゲーム理論において均衡戦略を見つけ出す際に最も頻繁に用いられる手法は、均衡になりそうな戦略をまず推測し、つぎにこれが均衡条件を満たすことをチェックすることである。本研究によって発見された手法もこれに従う。まず、均衡の候補になるような行動パターンを、有限個の状態を持つ流れ図（オートマトン）で記述する。各プレイヤーは、相手がどの状態にどんな確率で居るのかという確率判断を各時点で持っているため、この確率判断（信念）を状態変数とした動的計画法問題を解くと、相手に対する最適な戦略が計算できる。

動的計画法問題を解くには、「今日の信念が与えられたとき、今後達成できる最大の利得」を表す評価関数を求めればよい。このためには、任意の評価関数から出発して、順次評価関数を改訂してゆく手法（いわゆる「逐次近似法」）を使えばよいことは一般的によく知られている。POMDPの理論が示すことは、状態変数が信念という確率分布であり、最大化すべきものが利得の期待値であることを使うと、逐次近似の計算の各段階が、（状態変数が連続であるにもかかわらず）有限回のステップで

きわめて要領よく正確に行えるというものである。

この手法を使って評価関数を見つけ出し、最終的に初めに推測した戦略がお互いに最適に反応し合っていることが分かれば、均衡が発見できるわけである。

評価関数を求める逐次近似法は、真の評価関数を求めるまでに最悪の場合無限のステップが必要になるが、一定の条件の下で有限会で必ず収束する均衡の判定方法を発見した。

(2) また、以上の方法を計算機に実装し、少ない状態数を持つ戦略に限定して網羅的探索をすることにより、「見間違えのある場合のくり返し囚人のジレンマ」ゲームで協調を達成する方法を見出した。相手の「行動を見間違える」ようなケースでは、「まず協調から始め、（相手が裏切ったように見える）悪いシグナルをみたら協調をやめ、悪いシグナルを  $n$  回連続してみたら協調に戻る」という戦略が協調を達成することがわかった。

また、お互いの行動が直接観察できないが、共同で行っているプロジェクトの成功・失敗といった結果を、それぞれのプレイヤーが見間違える可能性がある「結果の見間違え」のケースでは、まず協調から始め、（結果が失敗したように見える）悪いシグナルをみたら協調をやめ、（結果が成功したように見える）良いシグナルを  $n$  回連続してみたら協調に戻る」という戦略が協調を達成することがわかった。

このような比較的簡単な戦略が私的観測下のくりかえしゲームの均衡になることがいまままで分かっていなかったのは、均衡行動こそ簡単であるが、均衡から逸脱した後に取るべき最適行動がきわめて複雑になるあるからである。

(3) 1回限りの関係においても、戦略をあらかじめ準備してこれを機会があるごとに改訂するような場合には、協調が達成できることを示す理論モデル（戦略改訂ゲーム revision games）を開発し、基礎理論と応用を研究した。

たとえば、2人の漁民が魚を取ってこれを魚市場に出荷して利益を得るが、共謀して漁獲高を抑え、価格を吊り上げることで最大の利益がえられる状況を考えよう。たとえこの漁民が1回だけしか出会わないとしても、つぎのような理由で共謀（協調）が達成できる可能性がある。まず、早い時間に漁に出て、魚市場での価格を吊り上げるための少ない量の魚を捕っておく。魚群がやってくるたび、漁民は魚の量を改訂できるが、これを次のように使う。もし初めの方で相手が裏切って必要以上に魚を捕ったなら、あとで魚群がやってきたときに自分もたくさん魚を捕って仕返しをする。そして、魚市場が漁港で開かれる時間が来たら、取れた魚を市場で売るのである。

このような状況は、「各人が戦略（上の例では漁獲量）をあらかじめ準備する」「機会が来たたびに戦略を改訂できる」「あらかじめ決まっている適切な時間がきたら、そのときに用

意している戦略が実行される」というモデルで表現できる。これを、戦略改訂ゲームと呼び、そこにおける最適な協調行動が、簡単な微分方程式で記述できることを発見した。

さらに、この基礎理論を使い、上記の漁民の例では戦略改訂を通じて完全な共謀(協調)を行う場合の利得の95%以上が達成できることを示したほか、選挙戦で2大政党の政策がキャンペーン期間中を通じて徐々に近づいてゆく様子を記述できることも明らかとなった。

(4)日本には、一人だけでも加入できる特殊な労働組合がある(コミュニティ・ユニオン)。コミュニティ・ユニオンは、異なる職場から来たお互いを良く知らない人々からなる組織で、きわめて頻りにメンバーが入れ替わっている。にもかかわらず、メンバー間では、お互いの抗議行動や裁判に出席するなどの協調行動が観察される。これは、世代交代型(OLG)のくり返しゲームの驚くべき実例であり、しかも、メンバーは誰がいつ誰をたすけたかについて、ばらばらな、部分的情報しかもっていないため、いかにして協調が達成・維持されているかは実証的にみても理論的にみても大きな謎である。このことを解明するため、東京にある比較的大きなコミュニティ・ユニオンに関して、聞き取り・データ収集などの詳細なケーススタディを進めた。その結果、インタビューを通じて、「誰が誰をいつ助けたか」があまりよくわからない場合でもうまく機能する助け合いの方法が発見された。この研究結果の一旦は、権威ある科学雑誌である米国アカデミー紀要に発表された。本研究終了後も、より正確な理解を得るために、データ収集と分析を引き続き行っている。

## 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 1 件)

① Kandori, M. and S. Obayashi, Labor Union Members Play an OLG Repeated Game, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111 supplement 3, 2014, 10802-10809, DOI: 10.1073/pnas.1400827111, 査読あり

[学会発表] (計 8 件)

① 神取 道宏, Cooperation and Dynamic Network Formation in an OLG Repeated Game: A Case Study

Econometric Society Australasian Meeting 2016,

オーストラリア、シドニー、2016年7月7日

② 神取 道宏, A Computationally Feasible Method for Verifying Equilibria in Repeated Games with Private Monitoring, Stochastic Methods in Game Theory,

National University of Singapore,  
シンガポール、シンガポール市

2015年12月2日

③ 神取 道宏, Labor Union Members Play an OLG Repeated Game

The 25<sup>th</sup> International Conference on Game Theory

アメリカ合衆国 ニューヨーク州 ストーンブルック

2014年7月8日

④ 神取 道宏, 大林 真也, Reputation and Punishment, In the Light of Evolution VIII Conference, 米国科学アカデミー

アメリカ合衆国 カリフォルニア州 アーバイン

2014年1月10日

\*以上はすべて招待講演である。

ほか学会発表 4 件

[図書] (計 1 件)

青木 昌彦、岡崎 哲二、神取 道宏 監修、NTT出版、比較制度分析のフロンティア、2016、155-180.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

神取 道宏 (KANDORI, Michihiro)

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

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

小原 一郎 (OBARA, Ichiro)

米国 UCLA・経済学部・教授

横尾 真 (YOKOO, Makoto)

九州大学・システム情報科学府・教授

岩崎 敦 (IWASAKI, Atsushi)

電気通信大学・情報システム学研究科・准教授

鎌田 雄一郎 (KAMADA, Yuichiro)

米国 UC Berkely・Haas ビジネススクール・助教授

大林 真也 (OBAYASHI, Shinya)

東京大学・大学院経済学研究科・日本学術振興会特別研究員 (PD)