

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：20103

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25590048

研究課題名(和文)非対称コーディネーション問題における認知プロセスの神経経済学的研究

研究課題名(英文)A neuroeconomic study of cognitive process in asymmetric coordination games

## 研究代表者

川越 敏司 (Kawagoe, Toshiji)

公立はこだて未来大学・システム情報科学部・教授

研究者番号：80272277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、シェリングの非対称コーディネーション・ゲームを題材に、焦点形成による均衡選択のプロセスを解明することが目的である。研究では、アイカメラによる被験者の視線追跡の手法を用いてその認知過程を調べ、強化学習によるモデル化を行った。初めに、一度に1人の被験者がアイカメラを装着して意思決定を行ったが、1回限りの実験では十分な協調が見られなかった。そこで、3人の被験者が同時に選択を行う実験を繰り返したところ、協調に向かう行動が観察され、そのプロセスは強化学習によってモデル化可能であることが分かった。さらに、強化学習に従って選択する2台のコンピュータと1名の被験者が対戦する実験環境を構築した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the cognitive process of equilibrium selection in Shelling's coordination game was investigated. For this purpose, we used an eye-tracking system for analyzing the cognitive process in forming a focal point. Our first experiment was conducted in the situation where only one subject used an eye-tracking system at a time, then a group of three was formed and the result of the game was determined. But as only one-shot play was possible in this situation, only a few coordination was achieved. Then, in a repeated interactions in our second experiment, subject's coordinating behavior toward equilibrium was observed and such a behavior was well organized a version of reinforcement learning. Finally, we incorporated those findings into our eye-tracking system. In this system, one human player plays with two computerized agents who follow reinforcement learning.

研究分野：実験経済学

キーワード：ゲーム理論 実験経済学 コーディネーション 神経経済学

## 1. 研究開始当初の背景

非協力ゲームにおいてナッシュ均衡が複数存在する場合に、どの均衡が選ばれやすいかに関しては、均衡選択理論という形で研究が続けられてきた。その古典的な研究に、トーマス・シェリングの著書『紛争の戦略』において提示された焦点(フォーカル・ポイント)の考え方がある。

この考えでは、複数存在する均衡の中で特に際立った特徴のあるものが焦点となって、プレイヤー間の行動を調整するものと考えられている。ところが、選択肢のどういった特徴が焦点を誘発するかについては、文化的・歴史的な偶然によるものと考えられており、その点でプレイヤーの行動を予測するという目的にとってはあまり有用な概念であるとは言えない。

また、ある選択肢が焦点になっていく一般的なメカニズムについては、バカラックによる理論化などが見られるものの、抽象的な理論的モデルに過ぎず、実証的に有用な手がかりが十分得られているとはいえない(Bacharach and Bernasconi, Games and Economic Behavior, vol.19, 1997)。

一方、ここ10年余りの間に神経経済学的手法が発展し、個人的意思決定を中心に経済学の諸理論の背後にある神経プロセスの解明が進んでいる(例えば、Camerer, Loewenstein, Prelec, J.Eco.Lit., vol.43, 2005)。

ところが、複数プレイヤー間の戦略的相互依存関係を調べるゲーム理論的な状況の神経経済学的検討はまだ端緒にすぎたばかりである。その一つの理由が、例えばfMRIを用いた計測はプレイヤー毎に個別に行わなければならない、実際にはいくつかのゲームの結果(利得の配分)を提示した上で、それらに関する社会的選好(不平等回避や互惠性)を尋ねる形式にせざるをえない点である。これでは本当の意味で、プレイヤー間の戦略的な駆け引きを研究しているとは言えない。

一方、本研究では、アイカメラによる視線移動計測という手法を用いて、プレイヤー間の戦略選択過程をインタラクティブに研究する。

この手法では、他のプレイヤーとの戦略的なやり取りをしている状態のプレイヤーの視線移動を調べるので、プレイヤーが選択肢のどのような特性に着目し焦点を形成していくのかについての認知的プロセスを解明する手がかりが得られるだろう。こうして、より実証的なデータに基づいた均衡選択理論を開発することが期待される。

本研究では、実験課題にシェリングの非対称コーディネーション・ゲームを用いる。このゲームでは、均衡において全員が同じ選択肢を選ぶことになるが、どの均衡においてもプレイヤー間の利得には格差が生じるという利害対立がある。そのため、プレイヤーに

は均衡実現のための協調と自己利益の追求との間でジレンマが発生する。

本研究は、こうしてプレイヤーの均衡に向かった行動調整に関する認知的・神経的データを収集することで焦点形成の認知プロセスの解明に貢献すると共に、神経経済学的手法を複雑な戦略的状況へと拡張するという点で、神経経済学にも貢献することができると期待している。

## 2. 研究の目的

複数均衡が存在するゲームにおいて、どの均衡が選ばれるかを巡る均衡選択の問題はゲーム理論における中心的な課題の一つである。

本研究では、シェリングの考案した非対称コーディネーション・ゲームを取り上げ、神経経済学の方法論に基づき、プレイヤー間の行動調整のプロセスをアイカメラによる視線追跡の手法で研究する。

このゲームではどの均衡でもプレイヤー間の利得には格差が生じるので利害対立があり、プレイヤーには均衡実現のための協調と自己利益の追求との間でジレンマが生じる。そうした葛藤のプロセスについては、さらに脳波計測などの補助的情報を用いても検討する。

こうして均衡選択プロセスに関する認知的基礎を探求するのが本研究の目的である。

## 3. 研究の方法

まず、本研究課題であるシェリングの非対称コーディネーション・ゲームについて説明する。このゲームの基本となる構造は以下の通りである。

それぞれA, B, Cとラベルづけられた3人のプレイヤーが同時に、ABCの順列(ABC, ACB, BAC...など)のどれか1つを選ぶ。もし3人全員が同じ順列を選んだ場合には、選ばれた順列の先頭文字のプレイヤーに3点、2番目の文字のプレイヤーに2点、最後の文字のプレイヤーに1点が与えられる。1人でも違う順列を選んだ場合は全員の利得が0となる。

純戦略のナッシュ均衡においては、3人が一致してどれか1つの順列を選ぶことになる。したがって、6通りの純戦略の均衡が存在する。そのため、均衡選択の問題が発生するのである。

本研究では、まず最初に、このシェリングの非対称コーディネーション・ゲームを中心に、均衡選択の理論や実験研究について文献のサーベイを行う。これを通じて、本研究で実施する実験で注目すべき被験者の認知的・行動的特徴について研究仮説を立てる。

特に、アイカメラや視線追跡ソフトウェアを用いて行われている実験に関する論文を精査し、実験手順や実験実施上で注意すべきバイアスなどの確認を行う。

こうした予備調査を踏まえて、アイカメラで被験者の視線を追跡するための実験システムを構築する。実験システムは、被験者に課題の説明を行ったり、選択肢を提示するコンピュータ・ソフトウェアと、被験者の視線を追跡するためのアイカメラおよびそのデータ記録装置からなる。

こうして実験システムを構築した後、少数の被験者を募集して、その動作テストを行う。また、実験説明が明瞭であったかどうかなどもこの時点でチェックする。こうした予備的なチェックを踏まえて実験システムを改善した上で、本実験を実施する。

本実験での実験手順はおおむね次のようになる。まず被験者は、実験待合室に入室後、概略説明を受けた後で承諾書にサインする。続いて、実験室に移動し、アイカメラを装着、カリブレーションを行う。この後、被験者はコンピュータ画面に向かい、詳しい実験説明と実験課題の提示を受ける。実験後にアンケートに答えた後で解散する。

募集した被験者は、1グループ3名となり、それぞれA、B、Cトラベル付けられるアルファベット課題と、無意味な文字列(\$、#、\*)が割り当てられる無意味文字列課題の2つの条件の実験に参加する。

被験者には、実験経済学の方法論に従って、実験中に獲得した得点に応じた金銭的報酬を支払う。

実験後はまず、各条件の下で各役割の被験者がどのような選択を行ったのか、どれくらいの時間で意思決定を終えたのかといった基礎データを整理する。

例えば、ABC課題の場合、アルファベット順のABCが比較的焦点になりやすいが、この場合、最低利得になるプレイヤーCの葛藤が大きく、意思決定を終えるまでの反応時間が一番長くなると予想される。

こうした行動レベルでのデータ分析の後、アイカメラで記録した視線移動のデータを分析する。こうした認知科学的探究法を用いることで、被験者が協調問題において焦点を作り出していくプロセスを克明に調査するのである。

実験後は、こうして得られたデータをもとに、被験者の認知と行動の相互作用をモデル化する行動経済学的モデルを複数構築し、統計的検定などを通じて、より妥当なモデルを選定していく。

#### 4. 研究成果

##### (1) アイカメラを用いた測定

実験は2013年5月に公立はこだて未来大学において実施された。情報科学専攻の大学生が被験者として参加し、全員ゲーム理論実験については未経験者であった。

実験には全部で51名の被験者が参加した。最初にアルファベット課題で実験を行い、次

に無意味文字列課題を実施した。被験者のそれぞれはAかBかC(\$か#か\*)いずれかの役割を演じたので、17グループが形成された。

アイカメラは研究室に1台しかないため、実験実施に当たっては、1名ずつの意思決定に分割せざるを得なかった。そのため、A、B、C(あるいは\$、#、\*)3人のプレイヤーが独立に意思決定した後、全員を集合させて3人グループをランダムに形成し、ゲームの結果を決定した。

また、被験者が実験室に入室した後、アイカメラを装着し、カリブレーションなどを行うと相当な時間を要する。しかも、51名の被験者全員にそうした作業を行うには数日が必要である。そのため、1回のゲームの結果が決定した後、再び実験室に戻って、再度アイカメラを装着させる時間的余裕はなかった。したがって、この実験では1回限りの意思決定の結果のみを報告する。

なお、全員が一致して同じ順位を選んだ場合、先頭文字のプレイヤーに1500円、2番目の文字のプレイヤーに1000円、最後の文字のプレイヤーに500円を支払い、これに加えて参加費500円が支払われた。平均報酬は約1046円であった。

次に実験結果について述べる。まず、アルファベット課題においても無意味文字列課題においても、全員一致したの17グループ中1グループのみであった。これは、1回限りの意思決定では無理もないことなのかもしれない。

次に、各プレイヤーの戦略選択についてであるが、アルファベット課題において最も多く選ばれた順位はABCで、プレイヤー全体の選択の28.9%であった。これに対し、ACBはたった9.8%であった。なお、プレイヤーAの58.8%がABCを、23.5%がACBを選んでいった。

プレイヤーBの47.1%がBACを、23.5%がBCAを選んでいった。また、順位BACのプレイヤー全体の選択に占める割合は21.6%であった。

このように、プレイヤーAとBはそれぞれ自分が有利になるような順位を選んでいくことが確認できたが、プレイヤーCについては若干様相が異なっている。プレイヤーCが最も多く選んだ順位はCBAで29.4%であった。次に、CABとBCAがともに23.5%の割合で選ばれている。

自然な順位ABCでは一番不利な状態になるCは、全員一致できないとしてもあくまで先頭がCである文字列にするべきか、それともBが先頭、Cが2番目の順位BCAを選ぶことでプレイヤーBとの協調を目指すか、揺れ動いていたことが推測される。

意思決定に至るまでの時間は、平均で見ると、プレイヤーAは12.4秒、Bは18.9秒、Cは14.1秒であった。仮説では、最も葛藤が多いプレイヤーCの反応時間が一番長いと予測さ

れたが、中間的な立場にあるプレイヤーBが最も判断に時間を要していることがわかる。

次に、無意味文字列課題であるが、最も多く選ばれた順列は\* # \$で、プレイヤー全体の選択の29.4%であった。この比率はアルファベット課題における順列ABCの比率よりも若干高い。

無意味文字列では特に協調をする際の手がかりがないため、アルファベット課題よりも協調しづらいという予想からすると、この結果は若干矛盾しているように思えるかもしれない。

しかし、どちらの実験でも全員一致したグループが17グループ中1グループしかなかったことから考えると、全体の約3割のプレイヤーが同じ文字列を選ぶだけでは全体の協調は難しく、特にアルファベット課題において焦点になりやすいと考えられたABCでさえ、十分な支持者を得られていなかったと考えた方がよさそうである。

実際、無意味文字列課題における反応時間の平均を見ると、\*が10.7秒、#が12.9秒、\$が12.4秒と、全体の平均がアルファベット課題よりも低い。すなわち、無意味文字列課題の方が被験者は素早く決断しているということである。アルファベット課題において、そのようなランダムな意思決定の結果と大差ない結果が得られているということから、この1回限りの意思決定では、被験者が協調行動を学ぶには不十分であることが分かった。

なお、アイカメラによる視線追跡結果については、被験者がその使用にあまり慣れていなかったためか、十分に精度の良い測定ができておらず、半数以上の被験者のデータは分析に使用できなかった。残りの被験者のデータを見る限り、はっきりとした傾向性を発見することはできなかった。

## (2) 被験者実験の結果

アイカメラを用いた実験の結果から、少なくとも何度か実験を繰り返さない限り、被験者はこのゲームの均衡を学習できないことがわかった。

また、既存のアイカメラでは測定精度が悪いため、さらに感度の良い機材を準備する必要性が生じた。

また、実験の繰り返し回数を増やすためには、3人が同時にアイカメラを着用して意思決定を行う必要がある。そのための準備作業が必要なことから、アイカメラ等を用いずに、通常の被験者実験を実施し、その後の神経経済学的研究のベースラインとすることにした。

実験は2013年10月に中央大学において実施された。様々な学科から募った大学生が被験者で、ゲーム理論実験については未経験者であった。全部で120名の被験者が参加し、60名ずつに分割されて、それぞれアルファベ

ット文字列および無意味文字列を用いた実験に参加した。したがって、それぞれの実験ごとに20グループが形成された。

各グループの被験者は、シェリングの非対称コーディネーション・ゲームを、グループのメンバーは変えずに8回繰り返し行った。これは、1回限りの意思決定では互いに協調することは難しいと考えられたからである。

8回の意思決定の後、そのすべての回で得た利得に比例して金銭報酬を支払った。全員が一致して同じ順列を選んだ場合、先頭文字のプレイヤーに900円、2番目の文字のプレイヤーに600円、最後の文字のプレイヤーに300円を支払い、これに加えて参加費500円が支払われた。平均報酬は約2000円であった。

図1には、アルファベット文字列条件と無意味文字列条件それぞれの下で、全員一致した割合が時系列的に示されている。縦軸は割合で、横軸は実験回数である。

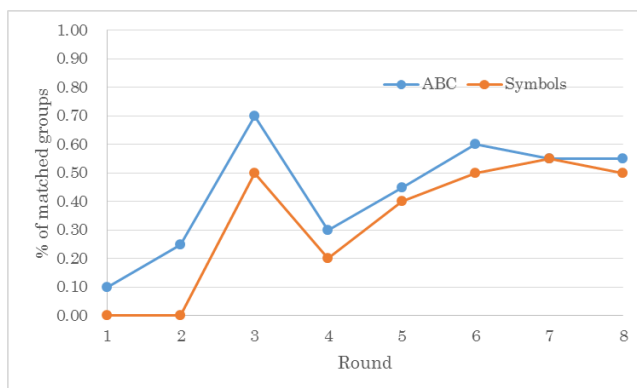


図1. 全員一致した割合の時系列的

これを見ても分かるように、はじめ全員一致する割合はかなり低いものであるが、回を重ねるごとにその割合は増加していき、最終的には約50%のグループが協調を達成できている。また、全般にアルファベット文字列条件の方が協調を実現する程度が高い。

次に、どの順列で全員一致したかであるが、アルファベット文字列条件では順列ABCで一致した割合が最も高く、全体の約20%であった。このことから、アルファベット順ということがシェリングのいう焦点になったことが示唆される。一方、特にそうした焦点になりうる自然な手掛かりのない無意味文字列条件では、特に突出した順列はなかった。

さらに、各グループごとの行動を細かく見ていくと、特にアルファベット文字列条件において、いくつかの特徴が抽出できた。それは次のようなものである。

まず第一に、2人が偶然ある順列で一致すると、次の回には彼らはその選択を変えずに、もう1人のプレイヤーが同じ順列を選ぶのを待つという行動である。

もう1つは、ある順列で全員一致したら、次の回は別の順列に移行し、全員の利得を均

等化するようなサイクルが生じていたことである。そのため、例えば、最初に一番自然な順列 ABC で一致したなら、次は BCA で一致を目指すというように、被験者は暗黙の協調を行っていたのである。

この結果、順列 ABC が最も選ばれやすいものの、それだけが独占的に選ばれるものでもなかったのである。

### (3) 強化学習モデルの構築

先ほどの被験者実験の結果から、被験者の行動パターンは、基本的に強化学習に従っているものと推測された。つまり、「2人が偶然ある順列で一致すると、次の回には彼らはその選択を変えずに、もう1人のプレイヤーが同じ順列を選ぶのを待つ」という行動は、強化学習の基本である win-stay, lose-shift に従っていると考えられた。ただし、これに「ある順列で全員一致したら、次の回は別の順列に移行」という行動を加味しなければならない。

こうした考えを下に、強化学習モデルを作成し、実験データによるパラメータ推計を行った。

次に、それに基づいて確率的に選択を行うプログラムを作成し、1人の被験者と2台のコンピュータによってゲームを行わせる形で、繰り返し実験を可能にするシステムを開発することにした。

それは、測定精度の高いアイカメラを3台購入することは予算上難しいことがわかったことと、仮に購入できたとしても、3つのアイカメラによる測定を同期させるための機構作りなど、付随した諸課題が発生するためでもある。

事実、アイカメラによる測定装置を、精度の高い固定式ではなく、被験者が頭部に装着するような安価なもので、3人が同時にアイカメラを装着した状態でゲームをプレーさせる予備実験を行ったところ、3つの測定データを統合する際に、様々な問題点が発生することが分かったのである。

そこで、1人の被験者が、強化学習に基づき先ほどの被験者実験の結果を反映した行動をとる2台のプログラムと対戦するシステムを作って予備実験を実施したところ、全員一致した後にコンピュータが別の選択に変える頻度が高く、全員一致の頻度が下がってしまう結果となった。

その後、パラメータを色々に変更したものの、被験者実験の結果を十分に再現するには至っていない。

また、3人がアイカメラを頭部に装着するシステムについても、測定の同期を十分に取るには至っておらず、いずれも今後システムの調整作業を続ける必要があることが分かった。

現時点では、アイカメラによって3人のプ

レーヤーの視線移動を同時計測するという課題は達成できていないものの、シェリングが自身の著書『紛争の戦略』で報告して以来はじめて実施された本格的な被験者実験を通じて、非対称コーディネーション・ゲームにおいて焦点が形成され、均衡選択がなされること、またその協調形成プロセスを強化学習モデルによって再現できることを解明したことは一定の成果として認められる。この成果はすでに国際会議で発表しており、現在専門学術雑誌への投稿に向けて論文を準備中である。

今後、アイカメラによる測定システムを改善していくことで、さらに協調プロセスの認知的・神経経済学的解明を進めていけるものと期待している。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 15 件)

1. Naoyuki Sato, "Spatial consistency of neural firing regulates long-range local field potential synchronization: a computational study." *Neural Networks*, 62, 52-61, 2014年(査読有)

2. Toshiji Kawagoe, Yuusuke Narita, "Guilt aversion revisited: an experimental test of a new model." *Journal of Economic Behavior and Organization*, 102, 1-9, 2014年.(査読有)

3. 川越敏司, 「実験経済学 経済理論を検証・改善するのに不可欠のツール」, 週刊エコノミスト臨時増刊号『経済学のチカラ』2013年12月9日, 82 - 83.(査読無)

4. 川越敏司, 「実証実験が示す合理的期待への疑問」, 週刊エコノミスト 2013年9月10日号, 28 - 31.(査読無)

5. Naoyuki Sato, "Fast entrainment of human electroencephalogram to a theta-band photic flicker during successful memory encoding." *Front Hum Neurosci*, 7, 208-208, 2013年.(査読有)

6. Naoyuki Sato, T. Sato, T. Okazaki, M. Takami, "Electroencephalogram dynamics during social communication among multiple persons." *Lecture Note in Computer Science*, 8226, Part I, 145-152, 2013年.(査読有)

〔学会発表〕(計 13 件)

1. Toshiji Kawagoe, "Bounded rationality

in a generalized volunteer ' s dilemma. ”  
第 3 回京都大学実験経済学ワークショップ,  
京都大学(京都府京都市), 2015 年 2 月 1 日 .

2. 瀧澤弘和, 「経済学の変容と方法論をめぐる諸問題」, 名古屋哲学フォーラム, 南山大学(愛知県名古屋市), 2014 年 9 月 7 日 .

3. 瀧澤弘和, 「変わる社会科学の人間像」, 経済制度の学際的ワークショップ, 駒澤大学(東京都世田谷区), 2014 年 5 月 10 日 .

4. Toshiiji Kawagoe, “Level-k analysis of experimental games.” Conference doctorale UP2DATE, Universite Pantheon Assas (Paris 2), Paris, France, 2014 年 4 月 30 日(招待講演).

5. Hirokazu Takizawa, “An experimental study of Schelling ' s asymmetric coordination game.” 6th International Nonlinear Science Conference 2014, Radboud University, Nijmegen, Holland, 2014 年 3 月 20 日 22 日 .

6. 瀧澤弘和, 「経済学的人間像はどのように変わるのか」, 日本感情心理学会第 7 回セミナー, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2014 年 3 月 8 日 .

7. 川越敏司, “Equilibrium Refinement vs. Level-k Analysis: An Experimental Study of Cheap-talk Games with Private Information.” 行動経済学・行動ファイナンスの発展シンポジウム, 大阪大学中之島センター(大阪府大阪市), 2014 年 2 月 14 日 .

8. 川越敏司, 「経済学に脳と心は必要か?」, 大阪大学経済学会講演会, 大阪大学(大阪府吹田市), 2013 年 6 月 24 日(招待講演).

〔図書〕(計 5 件)

1. 川越敏司, 『マーケット・デザイン オークションとマッチングの経済学』, 講談社選書メチエ, 2015 年, 全 256 ページ .

2. 川越敏司・小川一仁・佐々木俊一郎 『実験マクロ経済学』, 東洋経済新報社, 2014 年, 全 207 ページ .

3. 川越敏司・瀧澤弘和・他 6 名, 『経済学に脳と心は必要か』, 河出書房新社, 2013 年, 全 212 ページ .

4. 川越敏司, 『現代経済学のエッセンス 初歩から最新理論まで』, 河出書房新社, 2013 年, 全 241 ページ .

〔産業財産権〕  
出願状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計 件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
取得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
川越 敏司(KAWAGOE, Toshiiji)  
公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・教授  
研究者番号: 8 0 2 7 2 2 7 7

(2) 研究分担者  
佐藤直行(SATO, Naoyuki)  
公立ほこだて未来大学・システム情報科学部・教授  
研究者番号: 7 0 3 1 2 6 6 8

瀧澤 弘和(TAKIZAWA, Hirokazu)  
中央大学・経済学部・教授  
研究者番号: 8 0 2 9 7 7 2 0

(3) 連携研究者  
( )

研究者番号: