

藤本悠雅氏の博士論文 Social Structure Generated by Intention Recognition in Game Theory (他者認識を導入したゲーム理論における社会構造形成)は、ゲーム理論に他者のモデルを学習する過程を導入し、いかに協力、搾取などの社会構造が形成されるかをシミュレーションと理論によって解析したものである。

本博士論文は6章、114ページからなる。まず、第1章では戦略、行動、得点からなるゲーム理論の基本的枠組みが述べられ、相手の行動に対し得点を最適化することを目指して落ち着く均衡—特に Nash 均衡—などゲーム理論の基礎が紹介される。

第2章では自分の行動に対して相手がどのように行動するかという他者の意図を推定する関数を導入し、各自が相手との対戦結果を学習してその関数を変化させるという、独自の関数力学系が導入される。この関数力学系は、他者がどのような意図を持っているかを繰り返しゲームの中から読み取り、よりよく振る舞えるよう自分の意図を変化させることを表現している。この関数力学系をいくつかのゲームにあてはめると、時間発展の結果、均衡に到達する。ただし、この場合、これまでの Nash 均衡、また一方だけが学習する場合の Stackelberg 均衡だけでなく無限に異なる均衡が存在し、学習速度や初期状態に依存して異なる均衡が選択されることが示される。特にプレイヤー間の能力に差があると、弱者側の学習が両者の協力に重要であることも見出された。

次に第3章ではこの定式化を3者でのゲームに拡張し、それを3者が市場に製品を供給しその量に応じて価格が変動するゲームにあてはめている。興味深いのは3者がループ状に互いを認識するような状況で、その場合、供給が複雑に振動する現象が起り、一定の均衡状態には到達しない。このゲームにはプレイヤーが過度な供給を行うと価格が下がり、全員が利益を得られなくなるという「共有地の悲劇」が起りうるのであるが、この振動によりそれが部分的に避けられている。

第4章では、個人が相手の過去の行動によって自身の行動を選択し、その選択のしかたが学習で変化する力学系が議論される。繰り返しゲームを通して過去の経験から個人が自身の利益をより大きくするように戦略を変化させる学習過程が定式化され、これが囚人ジレンマ・ゲームにあてはめられる。ここで囚人ジレンマは個人が協力するか裏切るかを選択するゲームで、裏切るとは自身に利益をもたらすが、両者が裏切ると最悪の結果になるというものである。本章の定式化では、相手の1手前の協力、裏切りに応じて、自身が協力する確率を変えていく力学系が導入される。プレイヤー  $x$ 、 $y$  のそれぞれが協力  $C$ 、裏切り  $D$  に対しての次の手で協力する確率  $x_C$ 、 $x_D$  そして  $y_C$ 、 $y_D$  を持つので、結果  $2 \times 2 = 4$  変数の力学系となる。ゲームを繰り返し行うことにより、両者はスコアを増すように  $x_C$ 、 $x_D$ 、 $y_C$ 、 $y_D$  を変化させ、最終的には、戦略を表すこれらの変数は(初

期条件に依存しうる) 一定の値に収束する。この結果、両者がつねに協力ないし裏切るようにもなるのであるが、驚くべきことに、片方のプレイヤーがより高い確率で裏切り、他方はより高い確率で協力するという搾取関係の形成が広く見出された。ここで両者はゲーム及び学習の能力は等価であり、どちらも自分の利益を大きくしようと学習しているにも関わらず、一方がより裏切って相手を搾取しているのである。ここで搾取する側は、相手の裏切りを許さない一方、相手が協力してもある割合で裏切る、「心が狭い」戦略をとり、他方、搾取される側は、相手の協力には見返りを与え、その上相手が裏切って確率的に協力し返す、「寛容な」戦略をとっている。さらに搾取関係が最終的に形成されるまでの戦略の変化の過程を調べると、当初は似た戦略をとっていた両者が相互に学習を行うことで、戦略の差が増幅され、搾取関係が定着することが明らかになった。搾取関係はあらかじめ存在するわけではなく、相互学習によって対称性の破れとして生じたのである。本章ではこのような搾取、協力の生成が力学系の観点からも解析されている。

第5章では、前章の定式化に加えて1手前に自身が協力したか裏切ったことも参照する、「1記憶クラス」の戦略を含む場合への拡張が行われる。この場合は、プレイヤー  $x$  の戦略は1手前の自身と相手の  $C, D$  に応じての協力確率  $x_{CC}, x_{CD}, x_{DC}, x_{DD}$  の4変数で与えられ、より複雑なものとなり、前章の結果は自分の1手前を参照しないので  $x_{CC}=x_{CD}, x_{DC}=x_{DD}$  に制限したものとして与えられる。この場合、固定した戦略を持つ相手への一方的学習においては、複雑な側、1記憶クラスが前章の単純な戦略クラスよりも高い得点をとる。にもかかわらず、この両者が対戦して相互に学習していくと、しばしば1記憶クラスの側が単純な戦略に搾取されるようになり、搾取する側には決してならない。本章では、この直観に反する結果の由来が議論され、さらに協力や搾取の起こりやすさと戦略の複雑さに関する知見が述べられている。

最後に、第6章では、論文のまとめが行われ、今後の展望が議論されている。

以上、藤本悠雅哉氏の論文では、ゲーム理論に相手のモデルを推測、学習する過程を、関数力学系(第2、3章)、戦略を表す変数の結合力学系(第4、5章)によって導入し、その結果、学習によって協力や搾取がいかに形成されるかを議論したものである。この定式化の独自性のみならず、学習による搾取形成過程は大きな注目を集めている。また本研究で用いたゲームや学習過程は、社会において広く見られる性質を抽象化したものであり、今後の発展も期待される。

なお、本論文のうち第2章の内容は既に New J. Phys 誌に出版され、第4章の内容は Phys. Rev. Research 誌に掲載されている。第3、5章の内容はそれぞれ論文準備中である。本論文のうち第2-5章は、金子邦彦との共同研究であるが、論文の提出者が彼独自のアイデアを数理的に定式化し、シミュレーション、理論解析を行ったものであり、どの章も論文提出者の寄与が大きいと判断される。

よって本論文は博士(学術)の学位請求論文として合格と認められる。