

## ゲーム理論の歴史と現在

——人間行動の解明を目指して——

岡 田 章

### I はじめに

2005年のノーベル経済学賞は、ゲーム理論の研究者であるロバート・オーマンとトマス・シェリングが受賞した。ゲーム理論の分野にノーベル経済学賞が授与されるのは、1994年のジョン・ハルサニ、ジョン・ナッシュ、ラインハルト・ゼルテンに続いて2回目である。ハルサニ、ナッシュ、ゼルテンが非協力ゲーム理論の基礎を確立したのに対して、オーマンとシェリングはゲーム理論を用いた利害の対立と協力の分析が評価された。ゲーム理論は、インセンティブの経済学（1996年）、厚生経済学（1998年）、非対称情報の経済学（2001年）、行動経済学と実験経済学（2002年）など最近の受賞分野の発展にも大きな貢献をしている。ノーベル経済学賞の近年の動向が示すように、現在、ゲーム理論は経済学のほとんどあらゆる分野に応用されていて一般均衡理論とともに経済学的方法論的基礎を成している。

本論文の目的は、ゲーム理論の誕生からこれまでの研究の歴史と現状を概説するとともにその研究成果を再検討することである<sup>1)</sup>。

ゲーム理論はジョン・フォン・ノイマンとオスカー・モルゲンシュテルンによる共著『ゲームの理論と経済行動』（1944）の出版によって誕生し、厳密な数理的方法論を用いて経済主体の行動を解明することを目的とする<sup>2)</sup>。ゲーム理論が新古典派経済学など他の経済理論と異なる重要な点は、経済社会とは人々が一定のルール

の下でそれぞれの目的を実現しようとする一つの「ゲーム」であり、人々の意思決定は互いに影響を及ぼし合うという意味で相互依存的であるという社会認識である。ゲーム理論の基礎にあるこのような社会認識が経済学の発展の過程でいかに形成されてきたかを論ずることは本論文の目的を超えるものであるが、ゲームと人間社会の類似に注目する視点がすでにアダム・スミスの『道徳情操論』（1759）の中に見出せることは学説史上興味深い。

「人間社会という偉大なるチェス盤の上では、個々の駒は立法府が押しつけようとする行動原理とは異なるそれ自身の行動原理を有する。…もし二つの行動原理が一致するならば、人間社会のゲーム（the game of human society）は困難なく調和的に進み、幸福で成功的である可能性が非常に高い。しかし、もし異なるならば、ゲームは悲惨であり社会は大きな混乱に陥る」（『道徳情操論』第6部「有徳の性格について」、著者訳）。

このアダム・スミスの考察をゲーム理論の言葉で言い直せば、次のようになる。人間社会では二つの合理性が存在する。一つの合理性は、個人が自分の目的を可能な限り追求するという個人合理性であり、もう一つの合理性は、社会全体として望ましい状態を実現しようとする社会合理性である。価格をシグナルとして個々の経済主体が最適な消費と生産を行う完全競争市場では、見えざる手によって財の需要と供給が一致し効率的な資源配分が実現されるという意

味で、二つの合理性が一致する。しかし、一般に、人間社会のゲームでは二つの合理性が対立する。ゲーム理論は誕生以後、経済社会における個人合理性と社会合理性の性質を厳密に研究し、どのようにして二つの合理性の調和を実現するか、経済行動と社会秩序の関係を探求してきた。

論文の構成は、以下の通りである。II 節では、『ゲームの理論と経済行動』の内容を概観し、フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの問題意識について考察する。III 節では、非協力ゲーム理論の創始者としてのナッシュの研究について述べる。IV 節では、協力ゲーム理論の発展の歴史を概説する。V 節では、ハルサニとゼルテンによる非協力ゲーム理論の展開の意義と現代の経済学に与えた影響を考察する。VI 節では、進化ゲーム理論や行動ゲーム理論などのゲーム理論の新しい展開を紹介する。VII 節では、ゲーム理論の現状について述べる。

## II ゲーム理論の誕生：フォン・ノイマンとモルゲンシュテルン

ゲーム理論はフォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの大著『ゲームの理論と経済行動』が1944年に出版されることによって誕生したが、その数学的基礎はフォン・ノイマンの1928年論文(von Neumann, 1928)から始まる。この論文では、ゼロ和2人ゲームのミニマックス定理が区間 $[0, 1]$ で定義された点対集合写像の不動点定理(後に角谷の不動点定理(Kakutani 1941)として一般化される)を用いて証明されるとともに、戦略形 $n$ 人ゲームと戦略の定式化、提携とマックスミニ値を用いたゼロ和3人ゲームの分析など、ゲーム理論の基礎概念と分析方法が提示されている。

フォン・ノイマンの論文は、次の問題提示から始まる：「 $n$ 人のプレイヤー $S_1, S_2, \dots, S_n$ がある与えられた戦略ゲームをプレイしている。参加者の一人 $S_m$ は最も有利な結果を実現するためにいかにプレイすべきか?」。論文が次に強調するのは数学的分析のために必要な概念の明晰さである。このため、戦略形 $n$ 人ゲームの

公理系が提示され、利得の数学的期待値の最大化およびゼロ和2人ゲームのマックスミニ値とミニマックス値の概念によって「最も有利な結果」の意味が明確にされる。問題の提示、モデル概念の公理化、定理の記述と証明という論文で示された科学的研究のプロセスは、その後のゲーム理論と経済理論の研究方法(と論文の書き方)に多大な影響を与えた。

1928年論文では戦略ゲームの例としてルーレットやチェス、じゃんけんなどの室内ゲームに言及しているだけであるが、最初の頁の脚注で、「戦略ゲームは与えられた外生的条件の下で利己的なホモエコノミカスはいかに行動するかという古典経済学の主要問題である」と述べている。「社会的ゲーム」という論文のタイトルとともにこの脚注で示されている問題意識は、明らかにフォン・ノイマンがゲーム理論を単に室内ゲームの数学理論でなく経済行動の数学理論として認識していたことを示している。

『ゲームの理論と経済行動』では1928年論文の内容が拡大し発展されている。主な内容は、展開形ゲームの公理系と戦略形ゲームの構成、凸集合の分離定理を用いたミニマックス定理の証明、特性関数形ゲーム、一般 $n$ 人ゲームの解としての安定集合、ゼロ和3人、4人、 $n$ 人ゲーム、単純ゲーム、非ゼロ和3人ゲームにおける安定集合の分析、期待効用(フォン・ノイマン-モルゲンシュテルン効用)の公理系などである。

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの目標は、社会経済における参加者の合理的行動を定義する数学的に完全な原理(mathematically complete principles)を発見し合理的行動の一般特性を導くことである。この「社会経済における合理的行動の理論」を探求するという二人の目標は、ゲーム理論のその後の研究と性格を決定づけた。『ゲームの理論と経済行動』でも、1928年論文と同じく科学的探究の態度と方法が顕著である。すなわち、物理学などの自然科学の分野における研究と同様に、問題が明確に定式化された限定的な状況から分析を始め、でき得る限りの明晰な結論が得られた後により複雑な問題の分析が行われる。研究の出発点は、

ゼロ和2人ゲームである。この限定された状況でミニマックス定理という明確な結果を得たのち分析はより複雑なゼロ和 $n$ 人ゲーム、非ゼロ和 $n$ 人ゲームへと拡張された。

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンは、理論の限定的な仮定を明確に述べている。主な仮定は、(1) 無限に分割可能な貨幣的財の存在と譲渡可能な効用、(2) ゲームの情報完備性：考察対象となるすべての経済主体は経済の物理的特性について完全な知識を有し知識が可能とするすべての統計的および数学的演算を実行できる、(3) 理論は静学的であり動学的でない、などである。その後、譲渡可能な効用の仮定は、60年代にAumann and Peleg (1960) や Scarf (1967) などの研究によって解消された。情報完備性の仮定は60年代にハルサニ (1967-68) によって緩和され、情報不完備ゲームの理論が定式化された。ゲームの動学理論は80年代になるまで主な進展はなかった。しかし、生物学における進化ゲーム理論の研究に刺激を受け、80年代後半から経済学の分野でも進化と学習の動学モデルの研究が活発に研究されるようになり、現在、ゲーム理論の中心的な研究課題の一つになっている。

ゲーム理論の研究は、モデルの定式化と解の理論が中心である。ゲームのモデルは、現在でも『ゲームの理論と経済行動』の中で定式化された展開形ゲーム、戦略形ゲームと特性関数形(または提携形)ゲームの三つが基本である。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンが安定集合を定式化して以来、数多くのゲームの解が提示されてきた。しかし、ゲームの解が何を意味するのか、その意味と性格は必ずしも自明でない。むしろ、ゲーム理論が発展する過程でその内容が豊かになり深められてきたと言ってよい。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンはゲームの解を合理的行動の数学的原理として捉える一方で、社会経済の文脈の中ではプレイヤーの行動基準 (standard of behavior) として解釈した。そして、行動基準がもつべき安定性として、(i) 解の中に含まれるどの二つの配分も互いに他を優越することはない、(ii) 解に

含まれないいかなる配分よりも解の中のある配分の方が優越する、という二つの性質を要求した。ここで、配分 $x$ が配分 $y$ より優越するとは、配分 $x$ を実現できるプレイヤーの提携 $S$ が存在して $S$ のすべてのメンバーにとって配分 $x$ の方が配分 $y$ より好ましいことを意味する。提携の概念と配分間の優越関係はフォン・ノイマンとモルゲンシュテルンによって始められた協力ゲーム理論で中心的役割を果たす。

最後に、次節で述べるナッシュの理論と比較するために、協力の問題を分析するフォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの理論の特徴を述べる。ゼロ和2人ゲームを除いて一般のゲームでは他のプレイヤーと協力することでプレイヤーは利得を増加できるため、フォン・ノイマンの理論ではプレイヤーの協力が重要な要素となる。そこで問題となるのは、協力(または提携)の合意の実行可能性である。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンは合意の成立と実施のメカニズムを提供する更なるゲームの存在を指摘しながらもその分析に立ち入ることはしない。提携の合意は当該のゲームの外で締結され、その合意はプレイヤーに遵守されると仮定した。

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの分析は二段階から構成される。(1) 最初に、プレイヤーの任意の提携 $S$ と $S$ 以外のプレイヤーの提携 $N-S$ によるゼロ和2人ゲームを解き、提携 $S$ のマックスミニ値を提携 $S$ の特性関数値とする。(2) 次に、(1)で構成した特性関数形ゲームに安定集合の解を適用してプレイヤーの利得分配を考察する。

このような分析方法は、理論が未発達な初期段階では困難さを分解するために有用であるが、各段階の分析の整合性が十分でない欠点をもつ。特に、提携の特性関数値を提携のマックスミニ値で定義するために、非ゼロ和ゲームの分析は提携外のプレイヤーの利得最大化行動と矛盾する可能性を内包する。IV節で述べるゼルテン (1965) の理論が「信憑性のない脅し」と指摘する問題点である。このため、その後の協力ゲームの理論では、(1)の段階の分析はほ

とんど採用されず、特性関数形ゲームが所与とされるか、(外部性のない)市場モデルのようにゼロ和2人ゲームの理論を必要としないゲームに分析が限られた。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルン自身は二段階分析の欠点について十分に認識し、一般  $n$  人ゲームの統一的理論の必要性を指摘して『ゲームの理論と経済行動』の著述を終えている：「私たちの現在の理論の弱点は、分析を二段階に分けて行う必要があることのように思える。…  $n$  人ゲームの全体系を統一的に扱う理論がこれらの困難を克服するであろう」(von Neumann and Morgenstern 1944, 608)。

### III 非協力ゲーム理論：ナッシュ・プログラム

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの理論は1948年にカーネギー工科大学(現在のカーネギー-メロン大学)からプリンストン大学の数学科の大学院に入学したナッシュ(1951)の博士論文によって新しい方向に発展した<sup>3)</sup>。

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンはゲームをゼロ和ゲームと非ゼロ和ゲームに分類したが、ナッシュは非協力ゲームと協力ゲームという新しい分類を提示した。非協力ゲームとは、プレイヤーは他のプレイヤーと話し合いや協力することなく互いに独立に戦略を選択するゲームである。一方、協力ゲームとは、プレイヤーが他のプレイヤーとの合意に基づいて戦略を選択できるゲームである。プレイヤーの合意は実行可能であると仮定される。ゼロ和2人ゲームは非協力ゲームであるが、600頁を超える『ゲームの理論と経済行動』の約2/3を占める内容は協力ゲームの理論である。

ナッシュは非協力ゲームの解として均衡点の概念を定義した。 $n$ 人ゲームの戦略の組  $s^* = (s_1^*, \dots, s_n^*)$  がゲームの均衡点であるとは、他の  $n-1$  人のプレイヤーが均衡点  $s^*$  の戦略を選択するとき、各々のプレイヤー  $i$  は均衡戦略  $s_i^*$  を選択することで利得を最大化できることをいう。言い換えれば、均衡点ではすべての

プレイヤーの戦略は他のプレイヤーの戦略に対して最適であり、他のプレイヤーが均衡戦略に従う限りどのプレイヤーも均衡点から離脱する動機をもたない。ナッシュは、純戦略の数が有限な  $n$  人ゲームでは確率的な戦略(混合戦略)の範囲で少なくとも一つの均衡点が存在することを証明した。1950年論文(Nash 1950a)では角谷の不動点定理を用いた証明の概略が示され、1951年に発表された博士論文(Nash 1951)ではブラウワーの不動点定理を用いる証明が与えられた。ナッシュの証明は、その後のArrow and Debreu (1954)による完全競争市場の一般均衡の存在証明に大きな影響を与えた。

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンが『ゲームの理論と経済行動』の中で研究の問題意識とゲームの解の解釈を詳細に述べたのに対して、わずか10頁のナッシュの1951年論文には、数学論文の体裁に従って均衡点の概念を導入する動機やその解釈についてはほとんど説明がない。そのため、近年まで、フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンに従って、ナッシュ均衡点(およびゲーム理論の研究全般)に対して次のような合理主義的な解釈を与えるのが大方の研究者の理解であった。すなわち、ナッシュ均衡点は(一回しかプレイされない)ゲームにおけるプレイヤーの合理的行動を規定し予測する解概念である。この解釈では、プレイヤー自身が均衡点の示す合理的行動を演繹できるように、プレイヤーは(他のプレイヤーの利得関数を含む)ゲームの全構造を完全に知り均衡点を計算できると仮定される。合理主義的な解釈では、プレイヤーはこのような理想的な合理性をもつことが仮定される。

一方、ナッシュのノーベル賞の受賞を契機に1951年論文の基礎となる未公開の博士論文(Nash 1950c)が注目され、博士論文では公開論文にはない“motivation and interpretation”と題された節に合理主義的解釈とともに均衡点のもう一つの解釈として「集団均衡」(原論文ではmass-action)の説明があることが発見された。この新しい解釈では、合理主義的解釈のよ

うにプレイヤーに強い合理性を仮定する必要はない。毎回、ゲームに参加するプレイヤーはそれぞれの母集団からランダムに選ばれ、ゲームは繰り返しプレイされる。プレイヤーはゲームの全構造を完全に知っている必要はなく、選択可能なすべての純戦略の平均利得に関する情報をゲームのプレイの履歴から蓄積できればよい。このような情報が可能であれば、毎回のプレイで最も有利な（平均利得が最大の）純戦略を用いることが自然である。もし各純戦略の平均利得が他のプレイヤー母集団の戦略分布（混合戦略）に対する期待利得と等しいならば、動学的なプレイの定常点では他のプレイヤーの混合戦略に対して最適な純戦略のみが正の確率でプレイされなければならない。これは、（混合戦略による）均衡点の状態に他ならない。このように、ゲームの均衡点を、ある母集団からランダムに選ばれたプレイヤーによってゲームが繰り返しプレイされるような動学プロセスの定常状態と見なすというアイデアはVI節で述べる進化ゲーム理論の基礎である。ナッシュが進化生物学の研究者に先立って集団均衡のアイデアを示していることは重要である<sup>4)</sup>。

ゲームの均衡点に関する合理主義的および限定合理主義的（集団均衡）な二つの解釈の違いを身近な例で説明すれば、次のようになる。地下鉄のエスカレータの乗り方として、急いでいる人のために片側を空けるルールが定着している。東京では右側を空けるが、関西地方では左側を空けることが多い。どちらのルールもゲームの均衡点であるが、合理主義的解釈では、各人が他人の行動を合理的に予想した結果として（1回限りの状況でも）そのようなルールが実現すると考える。限定合理主義的な集団均衡の解釈では、人々が何度もエスカレータに乗る機会を（違う相手と）経験した結果、過去の成功例にならってどちらを空けるかを選択し、このような人々の適応行動の結果、乗り方のルールが定着したと考える。

ナッシュは、均衡点の理論を提示するだけでなく、均衡点による解理論の妥当性を検証するために交渉ゲームの実験を行っている。この研

究は、最近の実験経済学の研究の先駆けとしても注目される（Kalisch, Milnor, Nash and Nering 1954）。

非協力ゲームでは、プレイヤーは互いに協力せず独立に戦略を決定することが前提とされる。このため、当初はナッシュの非協力ゲームの理論はフォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの協力ゲームの理論と比べて応用範囲の狭い理論と見なされた。しかし、これは誤った理解であった。実際、ナッシュは1951年論文の最後で、非協力ゲーム理論を用いた協力ゲームの研究の可能性について次のように述べている。

「私は、協力ゲームの研究を非協力ゲーム形式に還元する“動的”なアプローチを発展させた。…交渉の各ステップがより大きな非協力ゲームの手番となるようにプレイの事前交渉モデルを定式化する。…交渉モデルは、この論文で展開された理論を用いて分析できる。このようにして、協力ゲームの問題は適切で説得力のある交渉の非協力ゲームモデルを定式化する問題になる。」（Nash 1951, 295）

ナッシュが提唱するように、交渉を非協力ゲームとしてモデル化しゲームの均衡点によってプレイヤーの協力や提携行動を分析する研究を「ナッシュ・プログラム」という。ナッシュはこの研究プログラムに沿って2人交渉ゲームを研究し、Nash (1953) では Nash (1950b) で公理的に導出した交渉解（ナッシュ交渉解）を非協力交渉ゲームの唯一の均衡点として説明することに成功した。

非協力交渉ゲームの理論によるナッシュ・プログラムの研究内容は、数学的には、社会的に望ましい利得配分（協力ゲームの解）を均衡として実現するメカニズム（交渉ゲーム）を提示するものであることが多く、このことから、ナッシュ・プログラムを、社会選択論やメカニズム設計論における implementation の研究の一部と見なす研究者も多いが、この理解は正しくない。ナッシュ・プログラムの研究は、個人の選好に関する情報を集計し社会的選択を実施

するためのメカニズムを設計する central planner を想定しない。プログラムの研究対象はプレイヤーの自発的な交渉である。協力の実現はプレイヤーの合意によるものであり、第三者による仲裁やメカニズム設計によるものではない。

1950年代初期の他の重要な研究に、キューン (Kuhn 1953) による展開形ゲームの研究がある。キューンは行動戦略、完全記憶、部分ゲームなどの重要な概念を提示し、完全記憶をもつ展開形  $n$  人ゲームでは行動戦略による均衡点が存在することを証明した。キューンの研究はナッシュの理論とともに70年代に入ってハルサニとゼルテンによって推進される「非協力ゲーム革命」の礎となった。

#### IV 協力ゲーム理論の発展

フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの後、50年代のゲーム理論の研究はプリンストン大学の数学者を中心に展開された。ナッシュとキューンの研究を除いてその大半は協力ゲームの研究であり、60年代後半までのゲーム理論の研究は協力ゲーム理論を中心に発展した<sup>5)</sup>。

50年代は、フォン・ノイマン-モルゲンシュテルン解 (安定集合) の存在と数学的性質の解明に多くの努力が費やされた。しかし、経済学への応用があまり見出されず、Lucas (1969) によってその存在が否定されたこともあり、その後、安定集合はゲーム理論の研究の中心にはならなかった。

協力ゲームの解の中で経済学に活発に応用され精神的に研究されたのがコア (core) の概念である。コアは他の配分に優越されない配分の集合として定義され、ロイド・シャプレーや Gillies (1959) によって安定集合とは独立した解の概念として発表された。コアの存在条件は、線形計画法の理論を用いて Bondareva (1963) と Shapley (1967) によって与えられた。

コアや安定集合は複数の配分をゲームの解として与え、ゼロ和2人ゲームのマクスマニ値のように唯一の配分を与えるものではない。一般の協力  $n$  人ゲームに一意的な配分を割り当てる解の研究は、フォン・ノイマンとモルゲン

シュテルン以後の重要な研究課題であったが、Shapley (1953) によって協力  $n$  人ゲームの値 (シャプレー値) の公理化がなされた。シャプレー値は利得分配や費用分担、投票力指数などの問題に広く応用され、コアと並んで協力ゲームの代表的な解と見なされている。その他に、60年代に定式化された協力ゲームの解に、交渉集合 (Aumann and Maschler 1964)、カーネル (Davis and Maschler 1965)、仁 (Schmeidler 1969) などがある。

50年代は協力ゲームの数学的研究が活発に行われる反面、経済学への応用は少なかった。しかし、Shubik (1959) がフランシス・イシドロ・エッジワースの市場の理論を協力ゲームとして定式化した後、60年代になると市場の完全競争均衡と協力ゲームのコアの関係を解明する研究が次々と発表された。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの理論が広く経済学の問題に応用されるためには譲渡可能な効用の仮定を解消する必要があったが、Aumann and Peleg (1960) は譲渡可能な効用を前提としない協力ゲームのモデルを提示した。Debreu and Scarf (1963) は、有限人経済において経済主体の数が無限大になるとき、市場ゲームのコアは完全競争均衡配分の集合に収束することを証明した。また、Aumann (1964) は連続濃度の経済主体からなる市場ゲームのモデルを提示し、完全競争均衡配分の集合とコアの一致を証明した。コアと競争均衡の一致を示す一連の定理 (同値定理と呼ばれる) の重要な意義は、一般均衡理論では市場価格の存在が前提とされるが、ゲーム理論による分析では経済主体の自発的な取引の帰結として競争均衡価格が実現し、市場価格の生成を説明できることである。

この時期の重要な研究としては、他に Scarf (1967) の譲渡可能効用を前提としない協力ゲームのコアの存在条件と計算アルゴリズムの研究がある。ハーバード・スカーフの研究によって不動点アルゴリズムが開発され、一般均衡の計算理論が発展した。60年代は協力ゲームの研究が全盛の時代であり、協力ゲーム理論と数理経済学の密接な関係によって新古典派の完

全競争市場の理論が完成した。

## V 非協力ゲーム理論への転換

70年代に入ると経済学者の関心は、完全競争市場における資源配分の問題を超えて、不完全競争、外部性、企業組織、不確実性、情報の非対称性、制度などの広範囲な問題に移行した。新古典派的な完全競争市場のモデルでは、無数の経済主体が市場価格をシグナルとしてそれぞれ独立に行動し経済主体は互いの行動の影響を考慮しないことが前提とされる。経済主体の相互依存関係を研究対象とするゲーム理論は、このような新古典派の市場分析に対する批判として登場した。経済学の新しい問題では、相手の行動を考慮した戦略的意思決定の分析が必要不可欠であり、ゲーム理論が一般均衡理論に代わって分析の枠組みを提供した。しかしながら、(ゼロ和2人ゲームはもちろんのこと) 伝統的な協力ゲーム理論はこのような経済学の新しい問題を分析するには、次にあげる理由により大きな限界をもつことが指摘された。

第一に、フォン・ノイマンとモルゲンシュテルン以来、協力ゲーム理論はプレイヤーのさまざまな提携に対して提携の実現可能な配分の集合を対応させる提携形ゲーム(または特性関数形ゲーム)という過度に縮約されたモデルを採用するため、経済主体の戦略的行動やゲームの情報構造を適切に表現できない。また、経済主体の動的な(または逐次的な)意思決定を表現することにも不向きである。さらに、協力ゲーム理論ではすべての合意は拘束力をもち実行可能と仮定されるが、一部の合意だけが実行可能であるような一般的な状況の分析には適さない。

第二に、これまでに数多く提示されている協力ゲームの解概念はそれぞれ個別には興味ある行動原理に基づいて定義されているが、互いの関連が不明である。言い換えれば、どの解はどの問題に適切であるかについて協力ゲーム理論は有用な解答を提供しない。

第三は、方法的な問題である。非協力ゲーム理論では個々のプレイヤーの意思決定が分析

の基礎であるのに対して、協力ゲーム理論の分析の基礎はプレイヤーの提携である。提携による集団的意思決定はメンバーの意思決定を交渉や投票など何らかの方法で集計したものであり、プレイヤーの提携行動は、本来、個々のメンバーの意思決定から説明すべきである。また、協力ゲーム理論では、提携のすべてのメンバーにとって協力が有益であるならば協力は実現するという「協力の原理」を公理として採用する。「協力の原理」は、協力ゲーム理論に限らず、パレート最適原理や「コースの定理」などこれまで多くの経済学者の思考に強い影響を与えてきた。しかし、協力の有益さは協力が実現するための必要条件ではあるが十分条件ではない。協力の実現には各個人が離脱するインセンティブがないという安定性が必要である。

以上の理由から、戦略的行動と情報構造が重要な役割をもつ経済学の新しい問題の分析に対して協力ゲーム理論より非協力ゲーム理論の方が適切であると多くの研究者が次第に認識するようになった<sup>6)</sup>。

非協力ゲーム理論が経済学の研究に与えた大きなインパクトは、ゲームのルール(市場構造)とゲームの解(行動原理)の明確な区別である。ゲーム理論以前の経済学のモデルは、一般均衡理論を始めとしてこの区別があいまいであった。例えば、従来の寡占理論のテキストでは、クルノー均衡、シュタッケルベルク均衡、ベルトラン均衡などは均衡概念の違いとして説明されてきたが、非協力ゲーム理論はこれらの均衡をナッシュ均衡として統一的に説明する。三つの均衡概念の違いは想定している市場構造の違いとして説明される。70年代に多くの研究者が関心をもった産業組織論や非対称情報の経済学の新しい問題の分析では、さまざまな市場構造を展開形ゲームとしてモデル化することが有効であり、非協力ゲーム理論における展開形ゲームが経済分析の基本モデルとなった。

しかしながら、非協力ゲーム理論が経済学の広範囲な問題に応用できるためには、ナッシュの理論を二つの方向に拡張する必要があった。一つは、フォン・ノイマンとモルゲンシュテル

ン以来の伝統であるゲームの情報完備性を仮定しない情報不完備ゲームの理論を確立することである。他の一つは、不完全情報下での逐次的な意思決定のモデルである展開形ゲームにナッシュ均衡の理論を拡張することであった。この二つの困難な課題の解決は、協力ゲームの研究が全盛な60年代にハルサニとゼルテンによってなされた。

1965年にイスラエルで開催されたゲーム理論の第1回国際ワークショップ(参加者17名の伝説的な研究集会)で、ハルサニは情報不完備ゲームの理論(Harsanyi 1967-68)を発表した。ハルサニの理論では、ベイズ主義の立場から確率的モデルを用いて、プレイヤーがゲームの構造(ルール)について完全な知識をもたないゲーム状況を定式化する。例えば、財の品質について不完全な知識しかもたない買い手は財の品質を主観的に予想する。買い手の主観的予想は可能な品質に対する確率分布(事前分布)として定式化される。売り手は財の品質について完全な知識をもっている買い手のこのような予想を考慮して取引の交渉を行う必要がある。売り手は買い手の予想をさらに予想する。もし売り手も買い手も品質に関して同じ予想をもつとき、取引の状況は、共通の事前分布に従って財の品質が確率的に定まり、売り手は実現した財の品質に関して完全情報を得るが買い手は何らの情報を得ない(情報完備であるが)不完全情報ゲームとして定式化できる。このゲームの構造は共通の事前分布を含めて売り手と買い手は完全な知識をもち、ナッシュの理論が適用可能である。ハルサニの理論の核心は、プレイヤーが共通の事前予想をもつことを前提として情報不完備ゲームを情報完備な不完全情報ゲームに変換することである。情報不完備ゲームのナッシュ均衡を、特にベイジアン均衡という。

70年代に入ると、情報不完備ゲームの理論はAkerlof(1970)のレモン市場の逆選択の問題やSpence(1973)の労働市場のシグナリングの問題に応用され、その後、経済学のさまざまな分野で情報不完備ゲームの理論を用いて非対称

情報と戦略的行動の関係が次々と研究されるようになった。

次に、展開形ゲームの理論の発展について述べる。ナッシュは1951年論文で戦略形ゲームにおける均衡点の理論を提示した。戦略形ゲームはプレイヤーの戦略と利得の対応を示す利得関数によって記述され、プレイヤーが独立にただ1回限り行動を選択するゲームである。これに比べて現実の経済状況はより複雑であり、経済主体は過去のゲームのプレイに関してさまざまな情報を得て逐次的に意思決定を行う。このような経済主体の動的な意思決定は、展開形ゲームのモデルによって適切に表現される。しかしながら、ゼルテンの研究以前は、展開形ゲームの分析はゲームを戦略形ゲームに縮約しナッシュ均衡点を適用するのが伝統的であった。

ゼルテン(Selten 1965)は、展開形ゲームのナッシュ均衡点はプレイヤーのすべての手番で合理的な行動を規定するとは限らず、均衡プレイによって到達されない手番(より正確には、部分ゲーム)においてプレイヤーの非合理的な(利得最大化に反する)行動を記述することを指摘した。展開形ゲームでは均衡プレイの合理性は均衡プレイ外のプレイヤーの行動によって正当化されるため、上記の問題点をもつナッシュ均衡点はゲームの解として適切でない。プレイヤーの合理的な行動を記述する均衡点は(均衡プレイに到達されるかどうかに関わらず)すべての部分ゲームにおいてプレイヤーの利得最大化行動を規定しなければならない。ゼルテンはそのような均衡として部分ゲーム完全均衡点を提示した。部分ゲーム完全均衡によって、寡占企業の参入阻止行動、長期的継続関係における協調行動、逐次交渉における脅し、金融政策の時間整合性など広範囲にわたる経済行動の動的な合理性の問題が適切に分析できるようになり、部分ゲーム完全均衡は展開形ゲームの基本的な均衡概念として確立された。

ゼルテンは1975年により強い均衡概念として完全均衡点(Selten 1975)の概念を提示し、展開形ゲームの均衡理論をさらに発展させた<sup>7)</sup>。

その後、80年代前半までの約10年間はナッシュ均衡の概念をより精緻なものにし適切な均衡概念を探求する「均衡の精緻化 (refinement)」がゲーム理論のホットな研究分野であった。その中でも Kreps and Wilson (1982) は、ベイジアン意思決定理論の視点から完全均衡を再定式化し逐次均衡点の概念を提示した。その後、逐次均衡はハルサニのベイジアン均衡とともに経済分析の有力な道具となった。

ナッシュ均衡点の合理主義的解釈 (3節) で述べたように、いかに行動することが合理的かを考察するゲームの規範的理論はプレイヤーへの合理的な助言としてナッシュ均衡を指示しなければならない。もしそうでなければ、少なくとも一人のプレイヤーは理論から離脱する動機をもち、そのような理論は自己破滅的である。さらに、助言として意味をもつためには規範的理論は一意的な均衡を選択しなければならない。

また、ナッシュ・プログラムでは、プレイヤーの交渉を非協力ゲームとしてモデル化し、プレイヤーの協力の成立を非協力交渉ゲームの均衡点として説明する。一般に、交渉ゲームには多数のナッシュ均衡が存在するばかりでなく多くの均衡は均衡点の精緻化の規準を満たす。Nash (1953) は革新的な摂動法の手法を用いて2人交渉ゲームの一意的な均衡点を選択し、均衡結果としてナッシュ交渉解が実現することを証明した。しかし、ナッシュ・プログラムの研究をより広いクラスのゲーム ( $n$ 人協力ゲームや情報不完備ゲーム) に拡張するためには、均衡選択の一般理論が必要である。

もし均衡選択の一般理論が確立されるならば、ナッシュ・プログラムを通じて非協力ゲーム理論と協力ゲーム理論が統一され、フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンが目指したゲームの一般理論の体系が構築される。この方向への重要なステップが1988年に発表されたハルサニとゼルテンの均衡選択の理論 (Harsanyi and Selten, 1988) である。これ以後、研究者の関心は均衡点の精緻化から均衡選択の研究に移り、現在までハルサニとゼルテンの理論がさまざまな角度から検討されるとともに新しい均衡

選択の理論の探求が続いている<sup>8)</sup>。

## VI 進化ゲーム理論と行動ゲーム理論： 合理性から限定合理性へ

70年代後半から80年代にかけて非協力ゲーム理論が経済学の標準的な分析手法となり、産業組織論や情報の経済学を始めとする経済学のほとんどあらゆる分野でナッシュ均衡 (およびその精緻化) を用いた分析が行われるようになった。このことは、ゲーム理論の研究者に非協力ゲーム理論を経済学に応用することの妥当性について再検討を促した。特に、多くの研究者は合理性に基づくナッシュ均衡の伝統的な解釈、すなわち、プレイヤーは (他のプレイヤーの利得関数を含む) ゲームの構造について完全な知識をもち無制限の計算能力を有してナッシュ均衡を演繹できるという想定に満足できなかった。理論家は、現実の人々ははたしてナッシュ均衡を実際にプレイするだろうかという素朴な問いに確信をもって答えることができなかった。

ゲーム理論だけでなく、新古典派経済学でも消費者や企業家は合理的な意思決定主体であることが仮定される。このような合理性アプローチに対する経済学者の標準的な弁護はミルトン・フリードマン (Friedman 1953) の as if 仮説である。その考えは、実証 (または事実解明的) 理論はその仮定や前提の現実的妥当性で評価されるべきでなく、いかに意味のある命題仮説を導けるか、また、さまざまな経済現象を統一的に説明しわれわれの理解を深めることができるかで評価されるべきであるというものである<sup>9)</sup>。言い換えれば、もしナッシュ均衡の理論が現実の経済行動を適切に説明できるならば、分析者は、実際の人々はあたかもナッシュ均衡の伝統的な解釈に見られるような理想的な合理性をもって行動すると想定することができる。

社会科学における合理性の仮定に関する研究者の意見は、次のように整理できる。第一は、(好むと好まないに関わらず) 人々は合理的に行動せざるを得ないのであり、合理的行動の理論は現実の人々の行動を適切に描写できると

考える（あるいは、信じる）立場で、「ナイーブな合理主義」（naïve rationalism）と呼ばれる。この立場では、合理性と現実とは同一視される。これに対して、第二は、「現実の人々は理論が仮定するような合理性をもたないから、合理性を仮定する理論は人々の行動の分析には役に立たない」とする立場で、「ナイーブな反合理主義」（naïve anti-rationalism）と呼ばれる。

第三は、多くの研究者が支持する as if 仮説の立場である。例えば、現在まで長年の間、経済理論が分析の基礎として採用している効用最大化原理にこの考え方を適用すれば、次のようになる。効用最大化原理の有益さは、現実の人間の行動を正確に描写する点ではなく、さまざまな経済行動を統一的に説明し理解できる点にある。事実、効用最大化原理はこの点で大きな成功を収めてきた。ゼルテンは、このような考え方を「洗練された合理主義」（sophisticated rationalism）と呼んでいる。

「洗練された合理主義」の立場からは、合理的行動の規範的理論と現実行動の記述的理論の区別は明確ではなく、また明確にする必要もない。これに対して、ゼルテン（Selten 1998a）は、第四の立場として「方法論的二元主義」（methodological dualism）の考えを提唱し、合理的行動の規範的理論と現実行動の記述的理論を明確に区別する必要があると主張する。完全な合理性に基づくゲーム理論は「いかに行動するのが合理的か」を問う規範的理論であり、記述的な妥当性は論点ではない。問題は哲学的であり、実証的でない。これに対して、記述的理論は「実際の間人はどう行動するか」を問い、経済行動の実験データに基づく人間の（限定された）合理性の性質を実証的に解明することが目的である。方法論的二元主義は、どちらの理論も等しく重要ではあるが両者を混同してはならないとする。近年の実験経済学や行動経済学の急速な展開は、「洗練された合理主義」の立場を超えて「方法論的二元主義」に基づく経済学の新しい発展の始まりと見なすことができる<sup>10</sup>。

完全な合理性を前提とする伝統的な経済学やゲーム理論への反合理主義からの批判に対し

て、「洗練された合理主義」は一定の説得力をもつ。筆者を含めて多くの理論家は「洗練された合理主義」の考えに共感する。しかし、as if 仮説の立場をとるこの考えが経済分析として有効であるためには、合理性に基づく理論によって現実の人々の行動が適切に説明できる必要がある。近年、チェーンストア・パラドックス（Selten 1978）、有限回繰り返し囚人のジレンマや最後通告交渉ゲームなどの実験データによって合理性に基づく理論予測の妥当性が問題視され、現実の人間がもつ（限定された）合理性に基づく理論の必要性が、80年代に入って多くの研究者に強く認識されるようになった。

そのような研究者に大きなインパクトを与えたのが、70年代に生物学で始まった進化ゲーム理論（evolutionary game theory）である。Maynard Smith and Price（1973）は戦略形対称2人ゲームのモデルを用いて生物行動を分析した。進化ゲーム理論はIII節で述べたナッシュ均衡点の集団均衡の解釈に基づき、その典型的なモデルは次のようなものである。大多数のプレイヤーから成る単一の集団内で2人のプレイヤーがランダムに選ばれてゲームを繰り返しプレイする。プレイヤーの利得（適応度）はプレイヤーが選択する行動と集団内の行動分布によって定まる。より高い利得を得たプレイヤーの行動が次の期に集団内でより大きな割合を占めるように淘汰（selection）の力が作用し、集団内の行動分布が時間とともに変化していく状況を考える。Maynard Smith and Price（1973）は集団内のすべてのプレイヤーがある戦略を選択するとき他のどのような戦略（突然変異, mutant）も集団内に侵入できない戦略として進化的に安定な戦略（evolutionary stable strategy, ESS と略す）の概念を定式化した。数学的には、ESSは対称2人ゲームのナッシュ均衡とほぼ同じ概念である（正確には、ESSの方が少し強い均衡概念である）。生物学における進化ゲーム理論の基礎は、Maynard Smith（1982）の著作によって構築された。

ESSは進化プロセスの安定状態を分析するための静学的概念であるが、進化の動学プロセ

スの研究も精力的に研究されている。進化生物学の分野での代表的な動学モデルにリブリケータ動学系 (replicator dynamics) があり, ESS とリブリケータ動学系の安定状態の関係が分析されている。主な結果として, (リアプノフ) 安定な定常点はナッシュ均衡であり, さらに ESS は漸近安定な定常点であることが知られている。

進化ゲーム理論を経済学に応用する場合, 行動様式が継承されるメカニズムは生物学的な遺伝の他に, 模倣, 最適応答, 学習や文化的継承など多様なものが考えられる。それぞれの継承メカニズムに応じてさまざまな動学モデルが研究され, 利得単調性を満たす広いクラスの動学ゲームで漸近安定な定常点はナッシュ均衡であることが証明されている (Friedman 1991, Weibull 1995)。この一般的な結果は, ナッシュ均衡の動学的基礎を与える。

進化ゲーム理論は, 人々はナッシュ均衡を実際にプレイするだろうかという問題とともに, 複数の均衡が存在する場合, どの均衡がプレイされるかという均衡選択の問題も考察する。ハルサニとゼルテンの合理性に基づく一般理論とは異なり, 進化ゲーム理論は限定合理性の視点からゲームにおける均衡選択の問題を分析する。

ESS やリブリケータ動学モデルは突然変異の出現によってシステムの確率的変動が 1 回限り起こり得る状況の均衡点の安定性を問題とする。これらのモデルでは, どのナッシュ均衡がプレイされるかはゲームの初期状態に依存する。

これに対して, Young (1993) と Kandori, Mailath and Rob (1993) によって始められた確率進化 (stochastic evolution) のモデルは, 突然変異や試行錯誤などによってシステムが継続的に確率的変動を受けるとき, 長期的にどのナッシュ均衡が最も起こりやすいかを考察する。確率進化の典型的なモデルでは, 有限人の集団内で 2 人のプレイヤーがランダムにマッチしてゲームを繰り返しプレイする。毎回, プレイヤーは集団の戦略分布に対して最適に行動す

るが, 微小な確率  $\varepsilon > 0$  でランダムに戦略を選択する。このとき, 集団内の戦略分布の推移は有限マルコフ連鎖の数理モデルによって定式化される。ゲームが確率的変動  $\varepsilon$  を受けるとき, マルコフ連鎖は唯一の定常分布  $\mu(\varepsilon)$  をもつ。変動の大きさ  $\varepsilon$  が 0 に限りなく近づくとき, 定常分布  $\mu(\varepsilon)$  の極限分布が正の確率を付与する戦略の組を, 長期均衡 (long-run equilibrium) または確率的に安定な (stochastically stable) 均衡点という。マルコフ連鎖のエルゴード定理より, 定常分布が各戦略に付与する確率の値は時間を通じた戦略の相対比率とほぼ等しい。これにより, ゲームの長期均衡が唯一存在する場合, それは動学プロセスにおいてほぼ確率 1 で観察される戦略の組である。また, 定常分布の収束定理より, ゲームが十分に長い間プレイされるとき, 各時点での集団内の戦略分布は長期均衡に収束する。Young (1993) と Kandori, Mailath and Rob (1993) は, 2 人対称協調ゲームの長期均衡はハルサニとゼルテンによって導入されたリスク支配的なナッシュ均衡であることを証明した。

進化ゲーム理論は限定合理性の視点からナッシュ均衡の動学的基礎を与えるが, プレイヤーの行動選択のメカニズムは現実の人間行動の記述としては過度に単純化されている。「人々には実際にナッシュ均衡をプレイするか?」という問いに対して抽象的な理論だけで答を出すのは不可能であり, 現実の人々の行動の実験研究および実証研究が必要不可欠である。このような理由から, 80 年代からゲームの実験研究が精力的に行われるようになった。現在, ゲームの実験は, 意思決定問題や市場メカニズムの実験とともに実験経済学の主要な研究テーマとなっている。

ゲームの実験研究の目的は, 単に理論の検証だけでなく理論と観察の不一致の原因と考えられる人間の動機, 認知および推論の心理的要因や社会的要因を組み入れた新しいゲーム理論を構築することである。このような理論を総称して, 行動ゲーム理論 (behavioral game theory) という。

ゲームの実験研究の歴史は古く、III 節で述べたように 50 年代にすでにナッシュは協力ゲームの実験を行い、被験者のパーソナリティの違いがゲームのプレイに重要な影響を与えることを指摘している。60 年代には *Behavioral Science* 誌で実験ゲームの特集号が編集されている (Rapoport and Orwant, 1962)。しかしながら、この時期の実験研究は当時の理論研究の動向を反映して多くは協力ゲームに関するものであり実験手法も未発達であった。

現在の行動ゲーム理論における重要な実験研究は、ほとんどが 80 年代以後に行われたものである。その一つに、Güth, *et al.* (1982) による最後通告交渉 (ultimatum bargaining) の実験がある。ゲームでは 2 人のプレイヤーが一定額の分配について交渉する。交渉の手順は、一方のプレイヤーが分配を提示し他のプレイヤーがそれを受け入れるかどうかを決定する。もし受け入れれば分配の合意は成立するが、もし拒否すれば交渉は決裂し 2 人のプレイヤーは何も得ることができない。もしプレイヤーの利得関数が自分の金銭的利得によって与えられるならば、ゲームの部分ゲーム完全均衡は提案者がほとんどすべての金額を独占する分配である。実験結果は、この理論予測と異なり、提案者は平均的に 40% から 50% の額を相手に与える分配案を提案し回答者はそれを受け入れるものである。また、回答者は 20% 以下の分配額の提案を高い割合で拒否する。その後、同じ実験が多く研究者によって被験者のタイプや国籍、分配額の大きさなど実験条件を変えて行われているが、実験結果に大きな違いはない。

最後通告交渉の実験結果は、現実の人間は自分自身の金銭的利得の最大化だけに興味があるのではなく、他人の利得や公平性に対する考慮も行動の大きな誘因であることを示している。また、利得の最大化だけでなく互恵主義も人間行動の重要な原理である。交渉実験の結果に関して現在広く受け入れられている説明の一つは、回答者の行動は負の互恵主義 (不親切な行為に対しては不親切な行為で仕返しをする) に基づくものであり、提案者はそのことを予想し

て 40% から 50% の間の分配額を相手に提示するというものである。人々がもつこのような「社会的選好」(social preference) をとり入れた理論の試みが、Fehr and Schmidt (1999), Bolton and Ockenfels (2000), Rabin (1993) らによってなされている。

合理性に基づく伝統的なゲーム理論では、プレイヤーは他のプレイヤーの戦略に関する推論の回数を無制限に深くできることが想定される。プレイヤーの推論能力を検証する実験が、「平均値推測ゲーム」(Nagel 1995) である。ゲームはジョン・メイナード・ケインズの『雇用・利子および貨幣の一般理論』(1936) 中の有名な「美人投票」の例に基づき、次のようなルールをもつ。ゲームの参加者は 0 から 100 までの数字を一つ選ぶ。選ばれた数字の平均値を 0.7 倍した数字に最も近い数字を選んだ参加者が勝者で一定の賞金を得る。もしそのような参加者が複数の場合はくじで勝者を決める。

ゲームのナッシュ均衡は、次のような被支配戦略の連続除去の議論によって求まる。可能な平均値の 0.7 倍は  $70 (=100 \times 0.7)$  以下であるから、70 より大きな数字を選ぶことは不合理である (専門用語では、そのような戦略は 70 を選ぶ戦略に支配されるという)。この事実をすべての参加者が合理的に推論すれば、ゲームは同じルールの下で 70 以下の数字を選ぶものになる。同じ推論をもう一回繰り返すと参加者の戦略集合は 0 から  $49 (=70 \times 0.7)$  までになる。以下、同じ推論を無限に繰り返すと戦略集合は限りなく小さくなり 0 に収束する。すなわち、すべての参加者が 0 を選ぶことがゲームの唯一のナッシュ均衡である。

平均値推測ゲームの実験 (Nagel 1995, Camerer, *et al.* 1997) はこの理論予測を支持せず、被験者が選ぶ数字の平均値は 20 から 45 の間である。実験結果は、現実の人々がプレイするゲームは次の二点で伝統的な理論と乖離することを示す。第一に、現実の人々の推論能力は限られていて 1 回または 2 回程度の推論しか行われられない。第二に、人々は他人のもつ合理性の程度に関して不確実であり、理論が想定するよう

なプレイヤーの合理性がプレイヤー全員の共有知識として成立する状況は現実には少ない。

以上、現実の人間行動は動機や推論の仕方が理論の前提と異なる可能性があることについて述べたが、この他にもゲームの記述の仕方（例えば、戦略の名前のつけ方）がプレイに影響を及ぼす（フレーム効果）など、実際の人間の認知や判断の仕方も伝統的なゲーム理論では適切に考慮されていないことがゲーム実験の研究によって指摘されている<sup>11)</sup>。

## VII ゲーム理論の現在

20世紀中葉に誕生したゲーム理論は、20世紀後半に幾多の発展段階を経て現在、経済学を超えた社会科学および自然科学（とくに生物学）の学問分野を横断する学際的な理論に成長した。ゲーム理論の誕生を「20世紀前半の科学における主要な出来事の一つ」（Copeland 1945）とした評価は、21世紀初頭の現在から回顧して正当であったと言える。本論の最後に、現在のゲーム理論の研究動向を概観し、ゲーム理論の今後の研究について議論する。

90年代に始まった進化ゲーム理論と行動ゲーム理論がゲーム理論の主要な研究分野として定着した後、ゲーム理論の研究は多様な分野に広がっている。ゲーム理論の主要学術雑誌 *Games and Economic Behavior* の創始者であり編集者である Ehud Kalai は、ゲーム理論第2回世界大会（4年に1回開催）での会長講演（Kalai 2004）で1992年と2002年における雑誌に掲載された分野別論文数のデータでこの傾向を示した。1992年では協力ゲーム理論の論文数が最も多く30%を超えていたが、2002年では、非協力ゲーム理論、協力ゲーム理論、経済学への応用、ゲーム実験、その他の5つのカテゴリーの論文がほぼ15%から25%の間に分布している。分野別では、非協力ゲーム理論では繰り返しゲーム、動学・学習ゲームの論文が増加し、経済学への応用ではオークションの論文数の増加が顕著である。その他のカテゴリーでは、進化ゲームの論文数の増加が著しい<sup>12)</sup>。

ゲーム理論の現在を考える手がかりとして、

これまでの研究成果によって科学的方法論を用いて経済行動を解明するというゲーム理論の目標はどの程度実現し、それによって経済行動に対するわれわれの理解はどのように深められてきたかを検討する。

第一に、ゲーム理論の誕生によって経済行動の分析対象が単に財・サービスの生産、交換、消費にとどまらず、広くインセンティブに基づく人間行動全般に拡大された。ゲーム理論はアルフレッド・マーシャルが目指した「人間科学の一分科」としての経済学の進歩に大きく貢献したと言ってよい。第二に、ゲーム理論によって、経済行動を単に目的関数の最大化行動としてのみ理解するだけではなく、人間の感情、動機、認知、推論のレベルで理解する分析枠組みを経済学研究に取り入れることが可能になった。

第三に、ゲーム理論の発展によって、完全合理性と限定合理性を含む経済行動の合理性の意味内容が深められた。フォン・ノイマンとモルゲンシュテルン以来、ゲーム理論は合理的行動の数学原理を発見し合理的行動の一般特性を探求してきたが、研究が発展するにつれて理想的な（無制限の）合理性と現実の人間がもつ（限定的な）合理性の違いが研究者に次第に認識されるようになった。本論文で述べてきたように、ゲーム理論は伝統的に新古典派経済学と同様に、主観的期待効用最大化として定式化される合理的な経済行動の解明に多くの努力を費やしてきた。ベイジアン合理主義アプローチが経済学研究の主流であり、これまで多くの研究者は合理的な経済行動の性質を解明することによって、現実の人間の経済行動を適切に理解できる、さらに現実の行動を近似できると考えてきた。現実の経済行動と理論予測が異なってもそれは一時的なもので、進化ゲーム理論や学習ゲーム理論の最近の研究成果が示すように、長期的には現実の経済行動は合理的行動に収束すると想定してきた。

しかし、理論上は実際の行動が合理的行動に収束することが期待できる場合でも、収束までの時間は現実的には意味の無いほど長い可能性

があり、合理的行動から乖離する人間行動の性質を研究する必要性が多くの研究者に認識されている。さらに、行動ゲーム理論におけるゲーム実験は研究者の楽観的な予想はすべての経済環境で正当化できるものではないことを示している、現実の人間の経済行動を解明する理論の構築が必要とされている。

現在のゲーム理論の研究の動向は全体として、ベイジアン合理性 (Bayesian rationality) と現実の人間がもつ合理性 (human rationality) の両面から経済行動の解明が行われている。

しかしながら、ゲーム理論研究の現状は、合理性および限定合理性の研究のいずれもが十分なものでなく多くの問題が未解決である。合理性アプローチによる研究では、ハルサニとゼルテンの均衡選択の一般理論以後、特定のゲームに対しては新たな均衡選択の研究が進んでいるが、ハルサニとゼルテンの理論と競合できる一般理論はいまだ構築されていない。また、ハルサニとゼルテンの理論も研究者に広く受け入れられているとは言えない。また、非協力ゲーム理論と協力ゲーム理論の統合を目指すナッシュ・プログラムの研究も一般の  $n$  人交渉ゲームや情報不完備交渉ゲームに対しては十分でなく、いかに人々が利害の対立を克服して協力関係を構築するかについて十分な理解に達していない<sup>13)</sup>。

限定合理性の研究では、生物学や心理学の知見を取り入れて人間の意思決定の構造を解明する必要がある、その研究はまだ初期段階である。ゼルテン (1990) は、生物学、心理学や文化人類学における人間行動の進化と学習の研究成果を踏まえて、人間行動を決定する動的プロセスの階層を変化の速度の遅い順に次のように提示している。

- (1) 突然変異による遺伝子の代替
- (2) 突然変異を伴わない状況での遺伝子型の適応
- (3) 世代間の文化的継承
- (4) (模倣を含む) 学習

生物進化に関して重要なプロセスは (1) と (2) であるが、経済学の研究に関しては (3) と (4)

のプロセスが重要である。しかしながら、信頼、互惠主義、公平性、欲求、不確実性に対する態度など人間行動を規定する多くの要素は、生物進化の長い年月を経て徐々に形成されてきたものであり、生物学、心理学、文化人類学などの学問分野と経済学の交流は今後さらに緊密なものになると予想される。

さらに、人間社会のゲームでは社会に存在する個人間の相互関係が本質的な要因であり、社会を構成する個人、組織、社会制度の相互連関を分析するためには、経済学はこれまで以上に政治学、社会学、法学などの社会科学の他の学問分野との協力が必要である。ゲーム理論はそのための共通の言語として大きな役割を果たしている。今後、ゲーム理論が人文科学、社会科学、自然科学の学問分野を総合して人間とは何かを探求する科学の一つとして成長するかどうかは不確かではあるが、フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンが創生したゲーム理論は、現在も多くの研究者を魅了する刺激的で活気に満ちた研究領域である。

[付記] 本論文の執筆にあたって、山崎好裕氏 (福岡大学)、川俣雅弘氏 (法政大学) および早稲田大学で開催された経済理論史研究会の出席者の方々から大変貴重なコメントを頂いた。記して謝意を表します。本研究は、科学研究費基盤 A (No. 16203011) 「ゲーム理論のフロンティア」の研究助成を受けている。

岡田 章：一橋大学大学院経済学研究科

#### 注

- 1) ゲーム理論の標準的な内容については、鈴木 (1994)、岡田 (1996) 等を参照。
- 2) フォン・ノイマンとモルゲンシュテルンの研究の学説史的検討については、Leonard (1995)、Nakayama (1997)、Schmidt (2002)、Weintraub (1992) 等を参照。Morgenstern (1976) による回想録は共同研究の背景を知る上で貴重である。
- 3) 学説史の視点からナッシュの研究の意義について考察した研究として、Leonard (1994) および Myerson (1999) 等がある。
- 4) ナッシュの集団均衡のアイデアについての解説は、van Damme and Weibull (1995) を参照。

- 5) この時期の研究は, Kuhn and Tucker (1950, 1953), Dresher, Tucker and Wolfe (1957), Luce and Tucker (1959) と Dresher, Shapley and Tucker (1964) に編集されている。
- 6) 80年代に非協力ゲーム理論が経済学に浸透していく背景について経済理論の研究者の視点から考察したものに, 神取 (1994) がある。
- 7) ゼルテンの研究の全体像を理解するには, ゼルテンによる回顧録 (Selten 1993) が有益である。
- 8) 80年代までのゲーム理論の発展の優れた概説については Aumann (1987) を参照。
- 9) 経済理論やゲーム理論が前提とする合理性の仮定に関して多くの研究者がもつこのような考え方を知らするためには, オーマン (1985) およびその付録に掲載されているゼルテンのコメント, van Damme によるオーマンへのインタビュー記録 (Aumann 1997) が有益である。
- 10) ゼルテンの限定合理性の最近の研究成果については, Selten (1993, 1998b, 1999) を参照。
- 11) 行動経済学の発展については, Camerer, Loewenstein and Rabin (2004) 等を参照。
- 12) 最近のゲーム理論の発展については, Aumann and Hart (1992, 1994) や今井・岡田 (2002, 2005) が編集した論文集を参照。
- 13) ナッシュ・プログラムの最近の研究報告に岡田 (2005) がある。

#### 参考文献

Akerlof, G. A. 1970. The Market for 'Lemons': Quality Uncertainty and the Market Mechanism. *Quarterly Journal of Economics* 84: 488-500.

Arrow, K. J. and G. Debreu 1954. Existence of an Equilibrium for a Competitive Economy. *Econometrica* 22: 265-90.

Aumann, R. J. 1961. The Core of a Cooperative Game without Side Payments. *Transactions of the American Mathematical Society* 98, 539-52.

— 1964. Markets with a Continuum of Traders. *Econometrica* 32: 39-50.

— 1985. What is Game Theory Trying to Accomplish? In *Frontiers of Economics*, edited by K. J. Arrow and S. Honkapohja. Oxford: Basil Blackwell: 28-76.

— 1987. Game Theory. In *The New Palgrave: Game Theory*, edited by J. Eatwell, M. Milgate and P. Newman. London: Macmillan: 1-53.

— 1997. On the State of the Art in Game Theory: An Interview with Robert Aumann. In *Understanding Strategic Interaction: Essays in Honor of Reinhard Selten*, edited by W. Albers and W. Gueth. Berlin: Springer-Verlag: 8-38.

Aumann, R. J. and S. Hart (eds.) 1992, 1994. *Handbook of Game Theory with Economic Applications*, Vols. I, II. Amsterdam: North-Holland.

Aumann, R. J. and M. Maschler 1964. The Bargaining Set for Cooperative Games. In M. Dresher, L. S. Shapley and A. W. Tucker (eds.), 443-76.

Aumann, R. J. and B. Peleg 1960. "Von Neumann-Morgenstern Solutions to Cooperative Games without Side Payments. *Bulletin of the American Mathematical Society* 66: 173-79.

Bolton, G. E. and A. Ockenfels 2000. ERC: A Theory of Equity, Reciprocity, and Competition. *American Economic Review* 90(1): 166-93.

Bondareva, O. N. 1963. Some Applications of Linear Programming Methods to the Theory of Cooperative Games (in Russian). *Problemy Kibernetiki* 10: 119-39.

Camerer, C. F., G. Loewenstein and M. Rabin (eds.) 2004. *Advances in Behavioral Economics*. Princeton: Princeton University Press.

Copeland, A. H. 1945. A book review. *Bulletin of the American Mathematical Society* 51: 498-504.

Davis, M. and M. Maschler 1965. The Kernel of a Cooperative Game. *Naval Research Logistics Quarterly* 12: 223-59.

Debreu, G. and H. Scarf 1963. A Limit Theorem on the Core of an Economy. *International Economic Review* 4: 236-46.

Dresher, M. A., L. S. Shapley and A. W. Tucker (eds.) 1964. *Advances in Game Theory*, Annals of Mathematics Studies, No. 52. Princeton: Princeton University Press.

Dresher, M. A., A. W. Tucker and P. Wolfe (eds.) 1957. *Contributions to the Theory of Games*, Vol. III, Annals of Mathematics Studies, No. 39. Princeton: Princeton University Press.

Fehr, E. and K. M. Schmidt 1999. A Theory of

- Fairness, Competition, and Cooperation. *Quarterly Journal of Economics* 818-68.
- Friedman, D. 1991. Evolutionary Games in Economics. *Econometrica* 59 : 637-66.
- Friedman, M. 1953. *Essays in Positive Economics*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gillies, D. B. 1959. Solutions to General Non-zero-sum Games. In *Contributions to the Theory of Games*, Vol. IV, edited by R. D. Luce and A. W. Tucker, 47-85.
- Güth, W., R. Schmittberger and B. Schwarze 1982. An Experimental Analysis of Ultimatum Bargaining. *Journal of Economic Behavior and Organization* 3 : 367-88.
- Harsanyi, J. C. 1967-68. Games with Incomplete Information Played by 'Bayesian' Players, Parts I, II and III. *Management Science* 14 : 159-82, 320-34, 486-502.
- Harsanyi, J. C. and R. Selten 1988. *A General Theory of Equilibrium Selection in Games*. Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Kakutani, S. 1941. A Generalization of Brouwer's Fixed Point Theorem. *Duke Mathematical Journal* 8 : 457-59.
- Kalai, E. 2004. What Would von Neumann and Morgenstern Say? (If They Were Here). The Presidential Address of the Second World Congress of the Game Theory Society. Marseille.
- Kalisch, G. K., J. W. Milnor, J. F. Nash and E. D. Nering 1954. Some Experimental  $n$ -person games. In *Decision Processes*, edited by R. M. Thrall, C. H. Coombs and R. L. Davis. New York : John Wiley & Sons : 301-27.
- Kandori, M., G. J. Mailath and R. Rob 1993. Learning, Mutation, and Long Run Equilibria in Games. *Econometrica* 61 : 29-56.
- Kreps, D. and R. Wilson 1982. Sequential Equilibrium. *Econometrica* 50 : 863-94.
- Kuhn, H. W. 1953. Extensive Games and the Problem of Information. In *Contributions to the Theory of Games*, Vol. II, edited by H. W. Kuhn and A. W. Tucker. Princeton: Princeton University Press : 193-216.
- Kuhn, H. W. and A. W. Tucker (eds.) 1950. *Contributions to the Theory of Games*, Vol. I, *Annals of Mathematics Studies*, No. 24. Princeton : Princeton University Press.
- 1953. *Contributions to the Theory of Games*, Vol. II, *Annals of Mathematics Studies*, No. 28. Princeton : Princeton University Press.
- Keynes, J. M. 1936. *The General Theory of Employment, Interest and Money*. London : Macmillan. 塩野谷裕一(訳)『雇用・利子および貨幣の一般理論』東洋経済新報社, 1995.
- Leonard, R. J. 1994. Reading Cournot, Reading Nash : The Creation and Stabilization of the Nash Equilibrium. *The Economic Journal* 104 : 492-511.
- 1995. From Parlor Games to Social Science : von Neumann, Morgenstern, and the Creation of Game Theory 1928-1944. *Journal of Economic Literature* XXXIII : 730-61.
- Lucas, W. F. 1969. The Proof That a Game May Not Have a Solution. *Transactions of the American Mathematical Society* 137 : 219-29.
- Luce, R. D. and A. W. Tucker (eds.) 1959. *Contributions to the Theory of Games* Vol. IV, *Annals of Mathematics Studies*, No. 40. Princeton : Princeton University Press.
- Maynard Smith, J. 1982. *Evolution and the Theory of Games*. Cambridge : Cambridge University Press. 寺本英・梯正之(訳)『進化とゲーム理論』産業図書, 1985.
- Maynard Smith, J. and G. R. Price 1973. The Logic of Animal Conflict. *Nature* 246 : 15-18.
- Morgenstern, O. 1976. The Collaboration between Oskar Morgenstern and John von Neumann on the Theory of Games. *Journal of Economic Literature* XIV : 805-16.
- Myerson, R. B. 1999. Nash Equilibrium and the History of Economic Theory. *Journal of Economic Literature* XXXVII : 1067-82.
- Nagel, R. 1995. Unraveling in Guessing Games : An Experimental Study. *American Economic Review* 85 (5) : 1313-26.
- Nakayama, C. 1997. The Process of Collaboration between Oskar Morgenstern and John von Neumann. *History of Economics Review*, History of Economic Thought Society of Australia, 26 : 40-50.
- Nash, J. F. 1950 a. Equilibrium Points in  $n$ -person games. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 36 : 48-49.
- 1950 b. The Bargaining Problem. *Econometrica* 18 : 155-62.
- 1950 c. Non-cooperative Games. Ph. D. Diss., Princeton University.
- 1951. Non-cooperative Games. *Annals of*

- Mathematics* 54 : 286-95.
- 1953. Two-person Cooperative Games. *Econometrica* 21 : 128-40.
- Rabin, M. 1993. Incorporating Fairness into Game Theory and Economics. *American Economic Review* 83(5) : 1281-1302.
- Rapoport, A. and C. Orwant 1962. Experimental Games: A Review. *Behavioral Science* 7 : 1-37.
- Scarf, H. E. 1967. The Core of an  $n$ -Person Game. *Econometrica* 35 : 50-69.
- Schmeidler, D. 1969. The Nucleolus of a Characteristic Function Game. *SIAM Journal of Applied Mathematics* 17 : 1163-70.
- Schmidt, C. (ed.) 2002. *Game Theory and Economic Analysis: A Quiet Revolution in Economics*. London: Routledge.
- Selten, R. 1965. *Spieltheoretische Behandlung eines Oligopolmodells mit Nachfrageträgheit*. *Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft* 121 : 301-24 ; 667-89.
- 1975. Reexamination of the Perfectness Concept for Equilibrium Points in Extensive Games. *International Journal of Game Theory* 4 : 25-55.
- 1978. The Chain-store Paradox. *Theory and Decision* 9 : 127-59.
- 1990. Evolution, Learning, and Economic Behavior. *Games and Economic Behavior* 3 : 3-24.
- 1993. In Search of a Better Understanding of Economic Behavior. In *The Makers of Modern Economics*, Vol. I, edited by A. Heertje. New York : Harvester Wheatsheaf : 115-39.
- 1998 a. Game Theory, Experience, Rationality. In *Game Theory, Experience, Rationality : Foundations of Social Sciences, Economics and Ethics in Honor of John C. Harsanyi*, edited by W. Leinfellner and E. Kohler. Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- 1998 b. Features of Experimentally Observed Bounded Rationality. *European Economic Review* 42 : 413-36.
- 1999. What is Bounded Rationality? In *Bounded Rationality : The Adaptive Toolbox*, edited by G. Gigerenzer and R. Selten. Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Shapley, L. S. 1953. A Value for  $n$ -Person Games. In *Contributions to the Theory of Games*, Vol. II, edited by H. W. Kuhn and A. W. Tucker, 305-317.
- 1967. On Balanced Sets and Cores. *Naval Research Logistics Quarterly* 14 : 453-60.
- Shubik, M. 1959. Edgeworth Market Games. In *Contributions to the Theory of Games*, Vol. IV, edited by R. D. Luce and A. W. Tucker, 267-78.
- Smith, A. 1759. *The Theory of Moral Sentiments*, edited by D. D. Raphael and A. L. Macfie. Indianapolis : Liberty Fund, 1984. 米林富男(訳)『道徳情操論』未来社, 1969.
- Spence, M. 1973. Job Market Signalling. *Quarterly Journal of Economics* 87 : 355-74.
- van Damme, E. and J. W. Weibull 1995. Equilibrium in Strategic Interaction : The Contributions of John C. Harsanyi, John Nash and Reinhard Selten. *Scandinavian Journal of Economics* 97 : 15-40.
- von Neumann, J. 1928. Zur Theories der Gesellschaftsspiele. *Mathematische Annalen* 100 : 295-320. English translation by S. Bergmann. In *Contributions to the Theory of Games IV*, edited by R.D. Luce and A.W. Tucker, 1959, 13-42. Princeton : Princeton University Press.
- von Neumann, J. and O. Morgenstern 1944. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton : Princeton University Press.
- Weibull, J. W. 1995. *Evolutionary Game Theory*. Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Weintraub, E. R. 1992. *Towards a History of Game Theory*. Durham : Duke University Press.
- Young, H. P. 1993. The Evolution of Conventions. *Econometrica* 61 : 57-84.
- 今井晴雄・岡田 章(編), 2002. 『ゲーム理論の最新展開』勁草書房.
- 2005. 『ゲーム理論の応用』勁草書房.
- 岡田 章, 1996. 『ゲーム理論』有斐閣.
- 2005. 「ナッシュ・プログラムの新しい展開—協力  $n$  人ゲームの非協力モデル」日本経済学会 2005 年度春季大会特別報告.
- 神取道宏, 1994. 「ゲーム理論による経済学の静かな革命」岩井克人・伊藤元重(編)『現代の経済理論』所収, 東京大学出版会 : 15-56.
- 鈴木光男, 1994. 『新ゲーム理論』勁草書房.

# The History and Present State of Game Theory : Toward a Better Understanding of Human Behavior

Akira Okada

This paper considers the history of game theory since von Neumann and Morgenstern published their monumental work *The Theory of Games and Economic Behavior* in 1944. It points out changes in research themes and discusses what game theory has achieved up to the present. The aim of von Neumann and Morgenstern was “to find the mathematically complete principles which define rational behavior for the participants in a social economy, and to derive from them the general characteristics of that behavior.” Extending the theory of von Neumann and Morgenstern, Nash classified all games as either non-cooperative games or cooperative games and defined the notion of an equilibrium point for a non-cooperative game. Nash also suggested a research program, now called the Nash program, to analyze a cooperative game by constructing a non-cooperative game model for negotiations. The main field of game theory was cooperative games in the 1950s and the 1960s. Thereafter, research trends in game theory in the 1970s and the 1980s shifted from cooperative games to non-cooperative games, led by the seminal works of Harsanyi on incomplete information games and Selten on perfect equilibrium in extensive games. This so-

called non-cooperative revolution greatly promoted applications of non-cooperative game theory to economics. At the same time, researchers became increasingly dissatisfied with the strong assumption of rationality in traditional game theory, and consequently research interest turned toward two new fields in the 1990s. One is evolutionary game theory, developing out of evolutionary biology, and the other is behavioral game theory, which collaborates with psychology. Evolutionary game theory investigates dynamic processes of evolution and learning in economic behavior, and it reformulates game equilibrium as a stable stationary state of those dynamic processes. Behavioral game theory studies the structures of motivation, cognition, and reasoning in human decision-making using the methodology of experiments. This paper shows how present-day research in game theory is developing in divergent fields that consider both traditional theory based on unbounded rationality and behavioral theory exploring human bounded rationality. Game theory continues to be one of the most active research fields in economics.

JEL classification numbers: B 21, B 23, C 70.