

アルゴリズム的意思決定のゲーム理論的考察

Game Theoretic Analysis of Algorithmic Decision

稲垣 耕作 Kosaku INAGAKI

京都大学大学院情報学研究科

Graduate School of Informatics, Kyoto University

要 旨

意思決定の基礎理論は、一方で民主主義社会の根本原理にかかわるものとして、社会科学理論の大テーマとなってきた。また他方では、アルゴリズム的な知能の機械化の根幹をなす問題として、近年の必要が増していると思われる。本論文ではこの問題を Arrow の一般不可能性定理を参照しつつ、機械知能のゲーム理論的研究の一環として分析する。囚人のジレンマ、ムカデのゲーム、投票のパラドックスなど、知的で合理的な判断が望ましくない解を与える実例が含まれる。限定合理性が完全合理性を生まないだけでなく、根本的に完全合理性が成り立たない。類似のパラドックスはパターン認識や人工知能分野において頻繁に出現する。今後の人工知能型情報処理機器や知能ロボットなどの開発に関連して、情報文化学的にこの種の問題意識を明確にもつ必要があることを指摘し、知能の不完全性のテーゼを提唱する。

Abstract

Fundamental theory of decisions has been studied intensively in social sciences as a main subject of liberal and democratic societies. This subject should be as well paid much attention to by researchers in artificial intelligence as algorithmic or mechanical decisions. This paper discusses difficulties associated with algorithmic decision problems from the standpoint of Arrow's general impossibility theorem in the course of game theoretic study on machine intelligence. Such difficulties include the famous prisoners' dilemma, the centipede game, and the voting paradoxes. Since intellectual algorithmic reasoning does not always produce desirable result, complete rationality might lose its basis. Such paradoxes are frequently found in artificial intelligence and pattern recognition problems. Information-culturological studies and the thesis of incomplete intelligence could make some contribution to the future of intelligent devices and robots.

1. まえがき

ゲーム理論の誕生は文献的には J. von Neumann による 1928 年の「ゲーム理論の基本定理」の発表^[1]にさかのぼる。そして O. Morgenstern との共著『Theory of Games and Economic Behavior』(1944 年)^[2]により確立されたとされる。

ゲーム理論の基本定理は 2 人ゼロ和ゲームに関するものであり、確率的振る舞いによるミニマックス戦略がゲームで最強であるという驚くべきものであった。しかしながら、その後のゲーム理論の展開を見ると、M. M. Flood と M. Dresher が 1950 年代初めに RAND 研究所で考案し、「囚人のジレンマ」と呼ばれることとなった「非協力的な 2 人」ゲーム^[3]の方が現状では影響度が大きいようである。

本論文の主テーマは囚人のジレンマの延長上にあつて、意思決定理論 (decision theory) に属するテーマである。「投票理論 (voting theory)」とよばれることも多い。投票の問題の数理的扱いは民主主義の根本問題であるとして、古くから研究がなされてきたが、同様の定式化は知能の機械化という問題において、近年初歩的な検討が行われることもある^[4]。著者は人間と機械知能との来るべき共生時代を想定しつつ、それをゲーム理論の視点を主とする基礎研究の立場で考察しており、本論文はその一環である。やがて文理融合的な情報文化学上の重要

研究テーマになるのではないかと考えている。

ゲーム理論以前の経済学は、「ロビンソン・クルーソー経済学」とも言いならわされてきた。1 人で最適化する問題は、多人数での最適化よりもはるかに易しい。多人数の相互作用のもとでの最適化を考えるゲーム理論では、ジレンマやパラドックスが頻繁に発生し、厳密な数学的体系でありながら、解を求めることが困難であるか、万人が納得しうる最適解が存在しない。

本論文で例示する問題では、投票問題もパラドックスに満ちている。このテーマは古代ローマの小プリニウス (Gaius Plinius Caecilius Secundus) の時代から知られており、フランス革命期に再注目を浴びたり、Lewis Carroll という筆名 (童話『Alice's Adventures in Wonderland』で有名) を使ったイギリスの論理学者 C. L. Dodgson が 3 本の論文を執筆して、その困難さを論じるなど、歴史上も繰り返し研究テーマとされてきた。

この問題を公理化という手法で再定式化したのは経済学者 K. J. Arrow であった。彼の基本定理^[5]は現在「一般不可能性定理」と呼ばれることが多い。Arrow やその系統で理論展開を行った A. Sen が Nobel 経済学賞を受賞するなど、経済学分野では高度で重要な理論とみなされている。また Arrow と独立に同時期から研究を行っていた D. Black^[6]の先駆的研究も貴重である。

Arrow の定理を最もわかりやすく表現すれば、「民主主義は不完全である」ということになろう。民主主義の根底にある「多数決原理」がパラドックスを生むため、「最大多数の最大幸福」は数学的に保証されない。しかしながら、民主主義を超える政治原理もまた示しえないという困難な定理である。民主主義の欠点に言及するため、Arrow が当初「一般可能性定理」と名づけたなど、政治経済学分野などでは慎重な表現を用いられることの多い研究である。

本論文では、情報学上のテーマとして「アルゴリズム的意思決定」という視点をおきつつ、Arrow の定式化などをもとにした検討を行う。知能の機械化という研究テーマと密接に関連した研究の一環であり、人工知能における困難性という問題の考察という側面をもっている。限定合理性が完全合理性を導かないのみならず、完全合理性も成り立たないため、今後の人工知能型情報処理機器や知能ロボットなどの開発や、人間と知能機械との共生において大問題であると考えている。

このテーマは、その重要性にもかかわらず、常識でとらえにくく、また他分野で生まれた数理的テーマであるためか、情報学系の学界でまだまだ知られることが少ないのは残念である。また、政治学分野などではきわめて慎重な表現を用いる文献が稀でないためか、数理的結論があいまいな表現になったり、内容の数理解が誤解に基づくことがないとはいえない。著者は機械の知能に関する主テーマの一つとして1990年代初めから研究しており、筆名による解説書^[7]もある。

2. 囚人のジレンマ

囚人のジレンマは多くの文献で解説されている。知らない方のためにごく簡略に述べるが、非協力ゲームの一種である。

共犯だと思われる囚人が2人いる。2人は互いに隔離されていて、検察官の取り調べを受けている。図1のように、2人に許されるのは、「黙秘」か「自白」かの二者択一である。ただし、いずれの囚人も、他の囚人がどちらを選んだかの情報を知ることとはできない。

		囚人 B	
		黙秘	自白
囚人 A	黙秘	A : 2 年 B : 2 年	A : 10 年 B : 釈放
	自白	A : 釈放 B : 10 年	A : 5 年 B : 5 年

図1 囚人のジレンマ

選択によって、2人に科される刑は図1のとおりである。黙秘は相手との「協調」、自白は相手への「裏切り」とみなされる。このゲームは「協調-裏切りゲーム」と表現するのが一般である。

さて、通常において合理的と考えられる解法は、部分問題分解法(場合分け法)である。すなわち、相手が黙秘であるか自

白であるかに分解して、部分問題を個別に解く。

A の立場に立つとき、まず B が黙秘したと仮定すると、B が黙秘の側の欄のみで判定して、A が黙秘すれば2年の刑、自白すれば釈放であるから、A にとっては自白が有利である。一方、B が自白の側の欄での判定でも、A にとって自白が有利な解であることがわかる。

以上によって、A にとっては、常に自白が有利である。A は自白という合理的なはずの解に到達する。問題設定は A, B にとって対称的であるため、B も同じ解に到達するはずである。その結果、2人の刑は5年ずつである。

ところが、図1を見直してみると、不合理なはずの黙秘を2人が選んでいたら、2人の刑は2年ずつである。つまり、不合理な解の方が有利なため、ジレンマと呼ばれる。

囚人のジレンマ自体は toy problem であるが、同様のゲーム構造は店舗間の安売り競争や国際外交ゲームなどにおいて頻繁に発生すると考えられている。また生物の進化戦略として扱われ、J. Maynard-Smith^[8]は京都賞を受賞した。R. Axelrod は「繰り返し囚人のジレンマ」という定式化によって、コンピュータプログラムでは、A. Rapoport による「しっぺ返し戦略」(協調を旨とし、裏切られたら即座に裏切り返す)が最強であるとの結果^[9]を得た。

3. ムカデのゲーム

R. W. Rosenthal は「ムカデのゲーム」^[10]という定式化で囚人のジレンマを発展させた。この完全情報2人ゲームを見れば、機械的な意思決定の問題の困難さがより明らかとなる。

ムカデのゲームにおいては、図2のようなルールがあらかじめ対戦者 A と B とに示されている。2人は互いに非協力的である。第1回目に A がイエスと言え、そこでゲームが終わって、2人は1ドルずつもらえる。一方、A がノーと言え、B に手番が移ると続けていって、そして最終回に B がイエスと言え、A は98ドル、B は101ドルもらえるが、もし B がノーと言え、2人は100ドルずつもらって終わる。

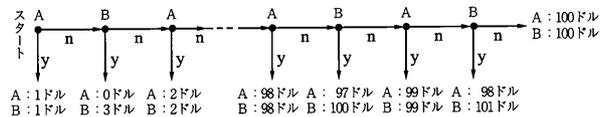


図2 ムカデのゲーム

このゲームでは、一見すると、2人とも100ドル近い金額を獲得できそうに見える。ところが、ゲーム戦略では先読みが通常行われる。しかも完全情報ゲームであるため、最終回まで進んだという仮定のもとで、後戻り推論で解析することが可能である。その結果、困難な状況が現出する。

先読み推論において、ゲームが最終回まで進んだと仮定して、B の立場に立ってみよう。B はイエスとノーのどちらを選ぶだろうか。当然ながら B は合理的であって、自分の利益になる選択を行うという自然な仮定をおける。イエスと言え、101ド

ル、ノーと言えば100ドルであるので、この自然な仮定のもとではイエスを選んで101ドルをもらうことになる。するとAは98ドルもらえることになる。

その前提で、Aも先読み推論を行っているはずである。最終回の1回前を考えれば、Aはこの回にイエスと言えば99ドル、ノーと言って最終回に進めば98ドルもらえるだけである。その結果、最終回の1回前では、Aはイエスと言ってゲームを終える決断をすることとなり、Bは99ドルをもらえる。

それを前提に、Bは最終回の2回前の推論も行う。ここでの推論も同様であり、ノーと言って次回に進むのはBにとって損であり、イエスと言って、100ドルもらうという結論に到達する。すなわち推論を行うごとにゲームの終了は早まっていく。

このような推論を続けた結果、ついにゲームの第1回目に到達する。そこでAはイエスと言って、2人とも1ドルずつもらって終わると結論する。すなわち、合理的な推論の連鎖によって、2人は1ドルずつしか獲得できない、というのがこのゲームの提示する困難性である。

ゲーム理論の背後には、プレイヤーは全員が知的で常に合理的な判断を行うとの前提がある。しかしながら、知的かつ合理的な推論の結末が、大局的に見て最良の結果ではなく、最悪の結果に陥るところが、囚人のジレンマから一歩進めた定式化となっている。

この困難さの背景には「非協力ゲーム」という前提がかかわっている。もしも2人が分け前の交渉を行うなどのゲーム理論における普通の手順で協力し合うならば、2人の獲得金額はもっと増えただろう。しかしながら徹底して非協力の場合、ときに最悪の結末に導かれるわけである。

このゲームもtoy problemにすぎないが、実世界での事例では、人類史の中で戦争という形で何度も繰り返されてきたとでもいえようか。ほんの1回だけの決断で即座に戦争に導かれることはないが、多段の意思決定を行う努力の積み重ねが、やがて最悪の戦争という引き金を引かないとはかぎらない。

また、この例の推論はいかにもコンピュータアルゴリズム的であって、知能ロボットなどにおいては、深刻な問題となるおそれがないとはいえない。

4. 投票のパラドックス

Arrowの文献^[5]の謝辞によれば、彼が投票問題の研究を始めたのは1948年の夏、軍事研究機関であるRAND社の顧問をしていたときだった。つまりFloodらがそこで囚人のジレンマを発見しようとするちょうど同時期に、同じRAND社で研究を始めたわけである。ArrowはFloodらに言及していないが、問題意識は同根であったと推測される。

囚人のジレンマやムカデのゲームは軍事科学的解釈を受けやすいが、Arrowは厚生経済学者であるため、その定式化に軍事的色彩は見えない。また、彼の研究の開始時期はC. E. Shannonの情報理論やN. Wienerのサイバネティクスが発表された年であるなど、当時の状況は情報学型の研究がようやく開花しかけた時代であったとみられる。

投票のパラドックスの基本型は、じゃんけんと同じ「三すくみ型」である。しかしそれでは矛盾が単純すぎるため、パラドックスがより明瞭な「7つの選択肢型」の例題を用いよう。それを図3に示す。

順位	ア	イ	ウ
1	A	B	C
2	D	A	B
3	C	E	A
4	B	D	F
5	G	C	E
6	F	G	D
7	E	F	G

図3 投票のパラドックスの例

A～Gの対象に対して、投票者ア、イ、ウの3人は、図3のような選好順位をつけている。投票者アはAに対する選好度が最も高いなどである。3人はこの選好順位に基づいて投票を行う。

用いるのは「勝ち抜き多数決」である。まず、AとBとのどちらを好むかの投票を行い、多数決に従ってどちらかを残す。残った側を次はCと比較して多数決を取る。それをアルファベット順にGまで続けていくのである。

実際に行ってみよう。最初にAとBとを比較する。アはAが第1順位であるので、Aに1票を投じる。イはBが第1順位であるので、Bに1票を投じる。そして、ウはBを第2順位、Aを第3順位とするので、比較によりBに投票する。よって、1:2でBが勝ち残り、Aが消える。

勝ち残ったBと、新たなCとの比較を、同様の多数決によって行う。ここでも同様に、Cが勝ち残る。そして、C対D以後も同様に、最後のF対GでGが勝利するまで続き、最終的にGが勝ち残ることとなる。

ところが、図3をよく見ると、大局的にはGは“最悪の選択”と思われる対象である。大局的にはAへの選好度が平均的に最も高い。一方、Gは平均的に最低とみなすのが妥当だろう。それにもかかわらず、民主的にGが選ばれてしまうのが、投票のパラドックスである。

5. Arrowの公理系と一般不可能性定理

これらの問題は、ジレンマやパラドックスとして有名なものであるが、個々の問題としては、決定方法すなわち情報学的にアルゴリズムと呼ぶものを変えれば、合理的と見える決定に到達することも可能である。

しかしながら、個々の問題では可能であったとしても、この種のすべての意思決定問題に対して、常に合理的な解を与えることは不可能だというのが、K. J. Arrowの業績である。すなわちそのようなアルゴリズムは存在しない。Arrowの業績は、投票問題を公理体系として定式化し、それに対して不可能性定

理（民主主義は不完全であるという意）を証明した点にある。

彼の公理系は簡潔なものであるので、それを示そう。ただし Arrow の定式化が完璧とはいきれなかったので、その後の表現形がさまざまある。本論文ではなるべくわかりやすい形で表現している。

公理 I（選好の自由性）

各人の選好順位がどのようなものであろうと、全員を集計した社会的選好順位を決定できる。

公理 II（パレート原理）

全員が A を B より選好しているとき、社会的決定において B が選ばれてはならない。

公理 III（無関係対象への非依存性）

A と B との比較が、第 3 の対象 C に対する選好に影響されない。

公理 IV（非独裁性）

独裁者を容認しないものでなければならない。

しかしながら、このような公理系のもとで、Arrow は次のような重要な定理を導いた。

[Arrow の一般不可能性定理]

公理 I～IV を同時に満たす社会的意思決定法は存在しない。

すなわち、ごく当然の前提に基づいて民主主義を運営していても、不合理な結論を社会が決定してしまうことが起こるのを避けられない、というのがこの定理の主張である。

Arrow の原著は当初、可能な民主主義を考えるという意味で「一般可能性定理 (general possibility theorem)」という言葉を用いた。しかし、後に「一般不可能性定理 (general impossibility theorem)」と呼ばれることが多く、彼自身もその表現を使うようになった。

6. 多様化する社会と非推移性

前述した公理 I は、個人的選好の多様性をいくらかでも許容するという原則である。これと公理 II、III を用いると、独裁制の許容が導かれる。すなわち自由と平等とは両立しえないことが示唆されるなど、その意味するところは非常に深いとともに、公理 IV も必要とされることがわかる。

選好順位を不等号で表現すると、実はこのような社会的選好には、数学でいうところの「推移律」がかならずしも成り立たないというのが問題の根幹である。図 3 の場合にも、 $A < B < C < \dots < G$ という結論を得たが、実は A と G との直接比較では、明らかに $A > G$ である。

そのような非推移性が、民主的多数決など Arrow の公理系を満たす社会的な意思決定方法すべての背後に潜んでいるために、投票のパラドックスという困難な問題が発生するわけである。民主的多数決などの社会的意思決定の結果は、数学でいう全順序や半順序で扱えるものではない。したがって、情報学で

用いる強力な手法である総当たり法や、動的計画法などの数理計画法の手法を用いても、だれもが納得する結果を得ることは不可能である。その点で、数学上の「不可能性定理」となっているのである。

そのさらに背後にあるのは、社会に必然的に存在する「多様性」である。各人が行う選好順位付けはまったく自由である。いわば藜食う虫も好き好きであって、それを集約した民主主義において、結果的に困難なパラドックス状況が発生する。

このような状況は、単に机上の問題とはいえ、時に現実にも生起することがある。学術論文で言及するのが適当かはわからないが、たとえば 1989 年の自由民主党の総裁選では、図 3 の例に似た経過をたどり、最終的に総裁に就任したのは、国民にごくなじみの薄い人物で、しかも 69 日で失脚した。

この政治力学をわかりやすく述べるとすれば、A と B という対立候補同士がいるとき、まず A が敗れたとする。そのとき、A 派は再度 B を破るために、他派と結束して対立候補 C を立ててくる。その結果、B がまた敗れ、さらに C への対立候補 D の擁立を新たに画策する。その繰り返しが起こり、総裁候補者はだんだん小粒になっていく。

文献^[11]では、1988 年のアメリカ大統領選挙での民主党候補の決定に言及していて、アメリカでも同様なことが起こったと記している。この種の紛糾が起こることは、さほど珍しいことではないと考えられる。

7. 論理学の体系と情報操作

推移律が成り立たないことは、通常の論理学の体系と整合しないことを意味するのか、という問いを持つ人もいるだろう。この点について言及しておきたい。論理学で用いる「ならば」が、「A ならば B」と「B ならば C」から、「A ならば C」が導かれるが、社会的選択と同様に崩れるおそれがないかという問いである。

しかしながら、厳密に論理学を展開するならば、上記で用いる推論で「A ならば B」とは、A が成り立つすべての対象について B が成り立つとの意味である。他もそのような全称命題である。

一方、多数決などの社会的選択の場合には、投票の参加者の選好順位付けはさまざまである。論理でいえば、存在命題型の「A ならば B」と「B ならば C」である。それらから全称命題型の「A ならば C」のみならず、存在命題型の「A ならば C」さえ導かれることはないといえれば十分であろう。

すなわち、投票のパラドックスによって論理学の体系が崩れるわけではない。推移律の不成立は論理学に影響を与えるものではない。その点では Gödel の不完全性定理や Turing 機械の停止問題のような深刻さはない。

後二者の場合には、体系に無限概念（形式上は非有界性）を含んでおり、有限を超えるところでパラドックスが発生する。それに対して、投票のパラドックスは厳密に有限の範囲で生じる問題であって、通常の論理学の範囲で扱うことが可能である。ただしパラドックスを解決できるわけではないことは、Arrow

の定理が示しているわけである。

注意しなければならないのは、社会的決定過程において、このような厳密な論理性が意識されることはまずないことである。しかしながら、社会的決定の結果は、政治の場などで、論理の構築に用いられるのが通常である。そのとき、一種の情報操作などのおそれが発生するだろう。そして、構成員のだれしもが望んでいない結論に到達することが起こりうる。

ここではそのような具体的手法を詳述することは避けるが、たとえば構成員のほとんどが軍備に反対の場合であっても、「あなたはテロを許しますか?」、「あなたは家族を守りますか?」、「侵略されたら甘んじますか?」など、世論を誘導する問いを発し続けるのは難しくない。戦争の悲惨さや、軍備がテロを誘発するおそれなどには言及しないわけである。

テロを許さないという前提から、軍備を行うという結論が論理的に導かれるわけでない。しかし、社会的決定は上で指摘したように論理学における推論とは異なる。世論を誘導する多数の問いを発し続け、社会的選択の結果としての多数の情報軍備という社会的決定を導くことがありうる。多くの人が軍備を支持する意見に取り巻かれてしまい、それに反対する意見が少なくなってしまうので、情報操作の一種ともいえよう。

すなわち、本論文で扱っているパラドックスは、論理とも密接な関係をもつ問題としてもとらえざるをえないわけである。情報文化学では、情報操作など社会における問題を論じる重要性が徐々に高まるべきだといえるであろう。

8. 人工知能——機械的推論における限界として

このようなパラドックスは、社会的決定過程のみに固有の問題であると考えべきではない。人工知能やパターン認識の研究者が日常的に体験してきた困難さもまた同根として発生してきたと指摘できるからである。今後の情報技術の発展においては、むしろそちらの方が同等以上に大問題であるといえるのかもしれない、著者も研究を続けている。

たとえば人工知能やパターン認識に関するシステムを開発する際、100パーセントの完全さで条件判定を行うシステムを完成させることがいかに困難であるかを、この分野のすべての研究者が体験してきた。そのようなシステムのソフトウェアを書けば、無数の条件判定からなるソフトウェアができあがる。しかしながら、その判定精度はけっして完璧といえるものからは程遠く、人間並みよりもはるかに低い品質の判定しか行えないのが通常である。

しかも、うまく判定できない部分に対して、つぎはぎのように新たな論理を付け加えたとしよう。その結果、うまく判定できなかった部分に対する局所的改善にはなったとしても、新たな判定条件が別の対象の判定への悪影響を及ぼして、結局は総合的にほとんど改善にならないということが頻繁に生起する。この分野の研究者が日常的に経験する現象である。

典型的な例として、ニューラルネットワークにおける「過学習 (overlearning)」^[12] という問題がある。1990年前後からしきりに指摘されるようになった現象である。

過学習とは、学習用サンプル数が十分でない場合、ニューラルネットワークに過剰に学習させすぎると、それらの学習サンプルに対する判定精度は上がるが、新たに与えた未知データに対する判定精度がむしろ下がってしまうという現象である。

そのようなシステムで用いられる論理は、AND や OR や NOT の接続からなるものであるが、一般にはしきい値論理に属する。すなわち多数決関数を含めたその一般化である。その典型がニューラルネットワークであって、明示的にすべてしきい値論理を用いて、システムを組み上げている。すなわち一般多数決の連鎖というアルゴリズムでシステムは動いているのである。焼きなましと呼ばれる乱数操作を導入することもあるが、上記が基本形である。

そのようなモデルのニューラルネットワークでは、投票のパラドックスが起こりうるのが容易に推論されよう。すなわち、ニューラルネットワークが下す判定は、パラドックスを避けがたいものとみなされるのである。

人間の脳内の論理もそれとかなり近いものであると推測されているが、その当否はともかく、実際に人間も日常のごく不完全な論理判断しか行えないわけである。そして導かれる結論は、首尾一貫性など望むべくもない程度なのが通常である。

さて、もしその延長上に機械の知能があるならば、情報技術の前途には大きな障壁が控えていると考えざるをえないことになろう。すなわち、ニューラルネットワーク型などの情報処理機械によって、人間並みかそれを超える水準の機械的推論を自動的に行える時代を予想した場合、その機械はこの種のパラドックスを免れえないとの障壁である。

ニューラルネットワークは、きわめて“人間的”に間違えるだろう。人間と同じような不完全さを備えるだろう。機械の判定だからと信頼するわけにはいかない。しかし知能機械として高度になってくれば、たかが機械の判定と軽視するわけにもいなくなる。人間と同様に不完全な知能機械とわれわれは共存しなければならないのである。

ニューラルネットワークは一般多数決を原理とするが、それ以外の原理に基づく知能機械に関しては、Arrow の理論の延長上で論じるわけにはいかない。しかし、実際にコンピュータ上にソフトウェアでシステムを実現してきた経験からいえば、完全な機械を構築するのは非常に困難である。

論理学の体系を応用した知能機械の場合、論理学においては、矛盾する前提が1組でもあるならば、任意の結論を導くことが可能であるというよく知られた定理が障害になるおそれがある。プロダクションシステムなどにおいて、矛盾する規則を1組でも入れてしまうと、何でも真であると結論することが可能だからである。プロダクションシステムのごく限定された専門知識の集合からなるのではなく、大量の知識をもたせた知能機械の場合には、その実現はきわめて困難なものとなる。

9. 限定合理性と完全合理性

Arrow の一般不可能性定理をはじめとして、本論文で扱ってきたジレンマやパラドックスの意味するところは、知能にお

ける合理性の問題と密接に関連する。そのような問題は、経済学分野などでは、限定合理性や完全合理性などの表現で議論されることが多かった。

ただし情報学分野では、厳密で教科書的な体系がすでに確立しているため、経済学分野などでの議論を価値づける必要さえ感じなかったことにも注意しなければならない。

限定合理性、あるいは局所的判断だけでは、多くの人工知能問題などをうまく処理できない。それは日常や人工知能研究の中で体験していることである。

一方、限定合理的でしかない局所的判断が、完全合理性たる大域的情報処理の成功につながるアルゴリズムもまた、情報学分野ではさまざまに研究されてきた。たとえば人工知能処理などで用いられる緩和法 (relaxation method) ^[13] が一例である。限定合理性が完全合理性に結びつく場合に関して、このようなアルゴリズムが示唆することは、局所から大域への橋渡しには、隠された単調性 (単調減少などで表現する) が情報処理の背後に潜んでいること、すなわちなんらかの推移律の成立が関与することである。それを完全に一般化した理論体系はまだ存在しないとされるが、興味深いことではある。

完全合理性に関しては、Gödel や Turing の定理など教科書的な理論を見ただけでも、知性の完全合理性は望むべくもないと感じるであろう。ただ、「非可解」であることを含めて知性が認識するとすれば、Gödel や Turing の理論があながち完全合理性を否定する証明になっていると考えられないことにも注意しなければならない。

情報学分野では、総当たり法や動的計画法など、完全合理性に相当するアルゴリズムが数多く使用されてきた。局所から大域への合理性を保証できない場合は総当たり法しか用いることができず、分割統治法などのアルゴリズム高速化の技巧は導入できない。総当たりでは計算量の爆発がありながらも、理論上は完全合理性を達成できるとみられがちだが、そのアルゴリズムは問題が well-defined である場合にしか有効でないことに注意しなければならない。つまり別の表現をすれば、問題はコンピュータプログラムによって完全に表現できなければならないということである。

問題が well-defined でない場合、あるいはコンピュータプログラムが想定しない考慮まで必要である場合には、完全合理性の幻想はもろくも崩壊するといわざるをえない。

そのような考察から推論されるのは、真の完全合理性に到達するには、ill-defined である実世界すべてを対象とすることをまず前提せざるをえなくなり、ほとんど達成しがたい目標であろうという見解である。ここに人工知能機械の越えがたい障壁が存在する。現在の方式のコンピュータのみならず、情報学研究者によって広く信じられている Church のテーゼは、いかなる知能機械も Turing 機械並みの能力しか持ちえないとするのであるから、その壁を越えられないことになるわけである。

そもそもゲーム理論の大前提の一つは、プレイヤーは全員が完全合理的であるという仮定であった。しかしながら、ゲーム理論あるいは経済学などの研究から得られてきた重要な知見は、むしろ完全合理性を達成することの困難さであった。それ

は翻って、情報学分野、特に人工知能分野にも理解と浸透を求めなければならない知見だということである。

10. 知能の不完全性のテーゼと困難を避ける道の模索

人工知能における最終的な困難は、機械の知能が人間を上回った時代に関するものである。そのような時代に、機械たちが人間に敵対するという決断を自ら下した場合に、人間はどうすればよいのだろうか。現在越えていない人工知能技術の壁のほるか先に存在しうる問題である。

半導体の Moore の法則が今後も成り立ち続けるならば、おそらく半導体チップの演算能力は、遅くとも 21 世紀半ばまでに人間の脳を明確に抜き去るものと思われる。そのため、ここで懸念する問題は極端に空想的なものではない ^[14]。

そのような時代を踏まえうえて、本論文の所論から著者が提示する推測あるいはテーゼは、以下のものである。

[知能の不完全性のテーゼ]

- (1) 人間の知能は不完全であり、誤りとみなされる判断を避けることができない。
- (2) 機械の知能も不完全であり、誤りとみなされる判断を避けることができない。

Gödel や Turing の理論が示すのは決定不能性や非可解性であるが、Arrow の理論が示すのは、判断を誤る可能性である。どのようなアルゴリズムを採用しようと、合理的とみなせないような解を得る可能性である。

人工知能分野では、従来、ほとんどの研究者が上記のテーゼを意識せずに研究開発を行ってきたと思われるが、今後はこのような不完全性を明確に意識したうえて研究開発を進める方がよいのではないかというのが本論文の提言である。

人間と知能機械との全面対決など起こるかどうかはわからないが、最終的な困難を避ける道としては、囚人のジレンマにおいて Axelrod が到達したのと同様の方法であろうか。すなわち、いわば進化における自然選択と同様に競わせて、最終的に勝ち残ったのはしつべ返し型、すなわち協調を基本としつつ、裏切りには即座に裏切り返すアルゴリズムであった。

厳密な論理構築によって解答を得ることはできないが、おそらく将来の人工知能には、協調を基本とするメカニズムを組み込みつつ、進化と同様の“実験”によって、最も“まし”な方法を採用せざるをえないではなからうか。それがこの種の問題への接近法として妥当な選択肢の一つである可能性が高からう。

翻ってみると、進化と類似の過程によって現在まで生き残ってきたのは、一つは民主主義という社会的決定方法である。古代ギリシャ以来の数千年にすぎないのと、近代社会はほんの数百年にすぎないので、まだ確定しきれものではないが、民主主義は生き残りやすい政治形態であったようである。

その民主主義と競い合うのは、宗教支配型の政治体制であろうか。キリスト教は千年王国を築いたし、西暦 610 年に成立し

たイスラム教が、現在も自由主義体制と並び立つのを見れば、宗教支配型システムにはまだまだ一日の長があるのかもしれない。

おそらく情報文化学という学問的立場からは、その優劣を論じるのはかならずしも適当ではなからう。生命進化と同じく、文化も進化のプロセスに組み込まれていると考え、自然選択過程に任せるしかないのであろう。

一方、生命進化は自然選択の独壇場と考えられてきたが、そこで実現された知能は、現在われわれがニューラルネットワークモデルを仮説とする形に進化を遂げてきた。そのような実現形態が比較的優れた方式であったのであろう。

同様の考え方をするならば、人工知能システムに関しても、進化的な方法を導入する方が自然だということになろうと著者らは仮説的に考えている。著者らは進化コンピュータ型の方法論を模索しつつ、漢字認識などの基礎実験を行っている^[15]。その方向性が妥当なものかを検討する手がかりとして、本論文における考察を行った。

もちろん飛行機が空を飛ぶのに、鳥と同じように羽ばたく必要はないので、自然界の知能と同じ方式を人工知能で用いる必然性はかならずしもない。ただ、自然界の知能から学んでまねるべきはまねてもよいものと考えられる。

少なくともアルゴリズム的な意思決定は、本論文で述べてきたように、理論上の整合性を完全に保った方式を確立することはできないのであるから、自然選択の仕組みなどを積極的に導入せざるをえないのではなからうか。もちろんそれに反対の立場の研究者もいてよいわけで、結局、多数の技術的提案に対する擬似的な自然選択によって、どの方式が最終的に勝ち残るかを時の流れが決めるわけである。

本論文での結論は、人間の知性の不完全さが導いたものであるという欠点はあるが、人工知能も社会的決定も結局は自然選択型で決めるのが最重要の手順の一つであろうというものである。その点では laissez faire 型の自由主義というべきか、民主主義と対をなす近代の概念を追認するのが、情報社会においても一つの自然な道であるということになろう。

11. あとがき

本論文で述べたのは、著者らが悪戦苦闘を続けている進化コンピュータに関する哲学の一端を補強するための研究と考えていただきたい。機械がやがて人間の知能を上回る時代が来ると信じて研究を手がけているからには、広範囲にその影響するところを考察しつくすという立場で、情報文化的側面の考察も行っている。

多数決による民主的決定に関する Arrow の一般不可能性定理のようなパラドックスの存在を認識することなく、機械による知的判断（および人間による知的判断）を盲目的に信じるならば、それは危険であるといわざるをえないであろう。知能の不完全性のテーゼを考慮して、知的判断の不完全さを認識するところから研究を始めるのが、より望ましい人工知能への道であろう。

また同じ指摘は、社会的決定過程に対しても行っておかなければならない。民主的決定が最善の結果をもたらすとはかぎらず、投票のパラドックスにおいて最悪の結果を招来する場合は例示した。同じく、最善を尽くしたつもりでも、結果がよくない例がゲーム理論分野で頻出することを述べた。

著者らはこのような知見を考慮しつつ、進化コンピュータの方式に関する研究を続けている。単なる機械であるため、意思決定と呼ぶべきではないが、アルゴリズムにおける選択・判断に独自の仕組みを導入するなどの実験を行っている。完璧な判断を目指すのではなく、比較的よい判断を目指すという方針である。

謝辞 日ごろから貴重なご助言とご示唆をいただく上田院亮公立はこだて未来大学教授と嶋正利ビジュアルテクノロジー株式会社顧問に深謝する。また進化コンピュータに関連する開発研究を行っているサイエンス・イズ・マジック株式会社の諸氏にも感謝する。

参考文献

- [1] Neumann, J. von: Zur Theorie der Gesellschaftsspiele, *Mathematische Annalen*, vol. 100, pp. 295-320 (1928) .
- [2] Neumann, J. von, and O. Morgenstern: *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press (1944) .
- [3] Flood, M. M.: Some experimental games, *Research Memorandum RM-789*, RAND Corporation (1952) .
- [4] 石井健一郎, 上田修功, 前田英作, 村瀬洋: *パターン認識*, オーム社 (1998) .
- [5] K. J. Arrow: *Social Choice and Individual Values*, John Wiley & Sons (1951) .
- [6] Black, D.: *The Theory of Committees and Elections*, Cambridge University Press (1958) .
- [7] 逢沢明: *ゲーム理論トレーニング*, かんき出版 (2003) .
- [8] Maynard-Smith, J.: *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge University Press (1982) .
- [9] Axelrod, R.: *The Evolution of Cooperation*, Basic Books (1984) .
- [10] Rosenthal, R. W.: Games of perfect information, predatory pricing, and the chain-store paradox, *J. Economic Theory*, vol. 25, pp. 92-100 (1981) .
- [11] Dixit, A. K., and B. J. Nalebuff: *Thinking Strategically*, W. W. Norton & Company (1991) .
- [12] Dayhoff, J. E.: *Neural Network Architectures*, Van Nostrand Reinhold (1990) .
- [13] Rosenfeld, A., R. A. Hummel, and S. W. Zucker: Scene labeling by relaxation operations, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-6, pp. 420-433 (1976) .
- [14] 稲垣耕作, 嶋正利: 技術革新は Moore の法則を超える, *情報文化学会誌*, vol. 8, pp. 37-44 (2001) .
- [15] 稲垣耕作, 嶋正利, 上田院亮: 99.999% の漢字認識と言語情報処理 (1) —— 複雑系進化に基づく考察と基礎実験, *情報文化学会誌*, vol. 9, no. 1, pp. 6-13 (2002) .