

氏名 (生年月日)	多田由彦 (1992年8月18日)
学位の種類	博士 (経済学)
学位記番号	経博甲第124号
学位授与の日付	2023年3月16日
学位授与の要件	中央大学学位規則第4条第1項
学位論文題目	Theoretical Studies in Unawareness and Discovery Process
論文審査委員	主査 瀧澤 弘和 副査 浅田 統一郎・谷口 洋志・石川 竜一郎

### 内容の要旨及び審査の結果の要旨

#### 1 本論文の意義と要旨

本論文は近年徐々に経済学界において知られるようになった, unawareness (気づいていないこと) 研究の領域における多田氏の一連の研究をまとめたものである。

周知の通り, 経済学で意思決定の状況をモデル化するとき, 経済主体は通常すべての生じうる状況について気づいていることが仮定されている。また複数の経済主体が含まれるゲーム的狀況を分析するゲーム理論においては, ゲームのルールは共通知識であるというさらに強い仮定がなされるのが通常である。多くの経済学者たちは, これらの諸仮定が強すぎることに, またそこからアノマリーが生じること気づいてきた。しかし同時に, これらの仮定を緩めたモデルの定式化が困難であること, 仮にモデル化に成功したとしても, そこからどのような豊かな含意が得られるかわからないことから, 同分野の研究について, 比較的懐疑的であったと言えるだろう。

一般的に言うならば, unawareness の研究はこうした経済学の状況に挑戦するものである。たとえば, ゲーム理論が扱うゲーム的狀況であれば, そもそも自分や相手が取り得る選択肢に気づいていなかったときに何が生じうるのかを論じることができるし, 意思決定理論が扱う一人の意思決定者の意思決定状況では, 生じうる状態の集合の中に, これまで気づいていなかった状態がありうるようなモデルを構築することができる。Unawareness 研究はこのような状況を論じることができるモデル化を探ろうとするものである。

本論文は, ゲーム的狀況と一人の意思決定状況の両面で unawareness を扱っている。具体的には, 第2部において, ゲーム的狀況で, 相手が自分の気づかなかった戦略をとってきたときに立ち上がると考えられる discovery process (発見過程) を具体的に分析し, ゲーム的狀況の認識のアップデートとプレーの変化を通じて, その認識とプレーが収束するための条件を検討している。また第3部においては, 一人の意思決定状況において, これまで標準的な情報構造モデル (そこでは状態空間の分割によって意思決定者の持ちうる情報と知識が表現される) のもとでは意味のある

unawareness の表現が不可能であるとされてきた通念に挑戦し、標準的な情報構造モデルにおいても、それを少し改変することで、trivial でない unawareness の表現が可能ではないかという問題意識のもとに、公理的な考察を行っている。

今日、経済学者の間でも unawareness 研究が徐々に知られるようになったものの、unawareness の正確な意味、どのようなモデルで定式化すべきか、さらには経済学的に意味のある応用については、各人がさまざまな試みを提示している段階であり、基準的なものがあるわけではない。こうした状況において、多田氏は世界的に見ても早い段階でこの問題に取り組んできた。たとえば、discovery process の分析は、多田氏が修士論文の段階で取り組み始めたものであるが、世界的にはカリフォルニア大学デビス校の Burkhard Schipper 教授らのグループの例があるのみである (Schipper 2021)。多田氏はこの分野において、取り扱い可能な問題を設定して分析をなしとげている。

具体的な結論は以下の通りである。ゲーム的狀況を扱った第 2 部では、第一に、unawareness を伴う同時手番ゲームを反復的にプレーする状況において、前回プレーされた行動に対して myopic な最適応答を行うような discovery process を分析し、主観ゲームとそこにおけるゲームのプレーが Basu and Weibull (1991) が提案した CURB (closedness underrational behavior) という集合論的な解概念に収束すること (そのための条件) を示している。また第二に、discovery process の考え方をコーディネーション・ゲーム的狀況 (しかし、プレイヤーたちは必ずしも自分たちが利用できる行動のすべてを知らないのでコーディネーションに失敗するかもしれない状況) に応用し、imitative discovery process を通して、コーディネーションに成功するようなゲームに導かれることを証明している。

第 3 部では、標準的な情報構造モデルをできるかぎり保持しながら、unawareness が意味を持ちうるような定式化を探り、それに伴う公理系とその性質を解明している。これまでの定式化では、Necessitation (任意の状態で状態空間全体を知っている) が満たされており、主体は状態空間全体を知っていなければならないことになってしまう。だが、そうすると unawareness を形式的に定義したときに、どんな事象に対しても unaware であるような状態が存在しないという trivial な unawareness と呼ばれる事態が生じてしまう。したがって、Necessitation という一見逃れがたい性質をいかに除去できるかが問題になる。

第一に、Ewerhart (2001) に倣って、状態空間 (集合) とその上の分割を扱うという意味では「標準的」だが、主観的な状態空間が客観的な状態空間と必ずしも一致しない情報モデルを用いて、知識演算子の特徴づけを行い、標準的モデルでは知識演算子が満たしている Necessitation, Monotonicity (ある集合が他の集合の部分集合であるとき、前者の事象を知っているならば、後者の事象を知っている), Negative Introspection (ある事象を知らないならば、その知らないこと自体を知っている) などが成立する条件を同定している。また、このモデルのもとで unawareness 演算子についての特徴づけも行い、Symmetry (ある事象の発生に気づいていないことと、ある事象が発生していないことを気づいていないことは同じである) の成立条件も同定した。

第二に, Modica and Rustichini (1994) によって定義された unawareness 演算子を受け入れたうえで, 知識演算子が Necessitation の性質を持たなくても, AU introspection(ある事象に気づいていないならば, 気づいていないことに気づいていない)と Symmetry が同値になることを示している. これは Chen, Ely, and Luo (2012) の定理の一般化である. また, Necessitation の成立は, Triviality(気づかないような事象は存在しない)と固く結びついているので, このことは unawareness が trivial でない状況を, unawareness 演算子のもっともらしい性質(AU introspection と Symmetry) を保存しながら, 同定したと言える.

第三に, 標準的な情報構造モデルにおいては, 事実上, 情報集合が非空であることが仮定されることが多いが, 多田氏は情報集合が空であることを許容したうえで, さらにこの状況に対して, 「主体が何らの知識も持てない状況」であるとの解釈を付与して, 知識演算子の再定義とその特徴づけを行っている. このとき, Monotonicity, Truth, Positive Introspection (ある事象を知っているならば, 知っていること自体を知っている) が常に成立するものの, Necessitation は必ずしも成立しないことが示される. また, この知識演算子から unawareness 演算子を定義したうえで, Triviality がすべての情報集合が非空である場合に限りて成立する条件を同定している.

## 2 本論文の構成と概要

本論文の構成は以下の通りである (部や章などは日本語表記にしてある).

### 第1部 Introduction Part

#### 第1章 Introduction

#### 第2章 Theoretical Review and Motivation of the Thesis

### 第2部 Discovery of Actions in Simultaneous-Move Games with Unawareness

#### 第3章 Unawareness of Actions and the Myopic Discovery Process in Simultaneous-Move Games with Unawareness

#### 第4章 Coordination and Imitation under Unawareness

### 第3部 Reexamining Unawareness in Standard Information Structures

#### 第5章 Non-Trivial Unawareness in Standard Information Structures

#### 第6章 Relationships between Symmetry and AU Introspection

#### 第7章 Unaware Non-Decision Makers

### 第4部 Conclusion Part

#### 第8章 Concluding Remarks

### 参考文献

各章の内容を要約する.

第1部の第1章ならびに第2章は取り上げる問題の背景を説明している. 具体的には, 標準的な

ゲーム理論、意思決定理論の根幹をなす情報構造モデルを定式化したうえで、それがもたらす変則的結果についてサーベイするとともに、近年登場しつつある games with unawareness のモデルについて説明している。以降の議論の前提をなす部分である。

第2部は、第3章と第4章からなる。

第3章は、最初の時点で相手の行動集合に自分が知らない行動があるゲーム的状况を扱っている。より特定のには、unawareness を伴う同時手番のゲームである（すなわち simultaneous games with unawareness）。ここで相手が未知の行動（unnoticed action）をプレーした場合、そのプレーを観察した上で、自分の主観ゲームをアップデートさせる discovery process に焦点を当て、discovery process におけるプレーの収束について考察している。

これまで扱われた discovery process とは異なり、多田氏は各プレイヤーが直前のステージゲームにおける相手のプレーに対して最適応答をとる myopic best response をとるような過程に注目し、それを myopic discovery process と名付けている。本章は Basu and Weibull (1991) によって定義された CURB 概念を games with unawareness に一般化したうえで、任意の myopic discovery process に対して、プレイヤーたちの myopic best response が一般化された CURB 集合（common realizable CURB set）に収束することを示した。これが主要定理である。本章ではこのほかに他の解概念との関係性（一般化ナッシュ均衡、認識的安定性、自己確認均衡、合理化可能性など）や知識の節約（economy of knowledge）、適応的プレー（adaptive play）などについて議論している。

第4章は、unawareness が存在するもとのコーディネーション・ゲームの分析を行っている。これまでの unawareness の研究では、応用例はほとんど検討されてこなかったが、コーディネーション・ゲームという具体例を分析することで、さらに discovery process の概念が展開されていることが注目すべき点となる。お互いに気づいていない行動が含まれるコーディネーション・ゲームでコーディネーションが成功することを保証するために、多田氏が考察したのは、imitative discovery process というものである。これは、各プレイヤーは、相手が直前のステージゲームで選択したプレーに対し、もしそれが unaware なものであったならば、主観ゲームをアップデートする際に、自分もそのプレーを模倣することができるという改訂プロセスである。unawareness 下でのコーディネーション・ゲーム特有の解概念として successful-coordination equilibrium を提案したうえで、任意の coordination game with unawareness に対して、imitative discovered game が必ず successful-coordination equilibrium を持つことが示されている。これが本章の主要定理である。本章ではこのほかに、一般化ナッシュ均衡と認識的安定性との関係について触れている。また、games with unawareness における unawareness の概念化が、それ以前の先行研究で想定されていた“lack of conception”としての unawareness 概念とずれている可能性があることについても言及されている。

第3部は、第5章から第7章までの3章からなる。

第5章は標準的な（ただし非分割的）情報構造モデルでも有意義な仕方で unawareness が議論できることを示すために、Ewerhart (2001) のモデルを単純化し、unawareness の性質について分析

を行なっている。このモデルでは主体が主観的に認識できる主観的狀態空間と客觀的狀態空間が異なりうるように定式化されている。ただし、主觀的狀態空間は Ewerhart (2001) のものとは異なり、任意の狀態に対して同じものに固定されているので、その意味では特殊ケースを扱っていることになる。いずれにしても、このモデルの特徴は、主觀的狀態空間が情報集合の和集合として与えられており、客觀的狀態空間の真部分集合であるかもしれないという点にある。

知識演算子については、主觀的狀態空間上の任意の事象を与えられた場合には、主体はその事象について知識を持つが、主觀的狀態空間の部分集合になっていないような事象を与えられた場合には、主体はその事象について知識が持てないものと定義される。このとき知識演算子は、情報関数が部分分割的であるならば Truth (ある事象の発生を知っているならば、それは真である) と Positive Introspection が成立する。また主觀的狀態空間と客觀的狀態空間が一致する場合に限り、Necessitation と Monotonicity が成立する。さらに、主觀的狀態空間と客觀的狀態空間が一致し、かつ情報関数が部分分割的であることに限り、Negative Introspection が成立することが示される。

次に unawareness 演算子を上記の知識演算子をベースに定義している。このとき、主觀的狀態空間と客觀的狀態空間が一致する場合に限り unawareness の性質の 1 つである Symmetry が成立し、一致しない場合には Symmetry が成立しないことが示されている。

第 6 章では、Chen, Ely, and Luo (2012) が与えた unawareness の 2 つの性質 AU Introspection と Symmetry の同値性定理を一般化している。Chen, Ely, and Luo (2012) は知識演算子が Necessitation, Monotonicity, Truth, Positive Introspection を満たし、unawareness 演算子が Modica and Rustichini (1994) によって定義されたものであるならば、AU Introspection と Symmetry が同値になることを示している。しかし同時に、この 2 つの性質は知識演算子の性質の 1 つである Negative Introspection と同値であることも示されている。Negative Introspection は trivial unawareness (i.e., Triviality) を導く性質でもあるので、AU Introspection と Symmetry の同値性が成立するもとは unawareness を有意義に議論することはできないことを意味している。

これに対して、本章は知識演算子から Necessitation の性質のみを外しても AU Introspection と Symmetry の同値性が保たれることを示している。Necessitation の性質のみが外れているときは、Triviality (もしくは Negative Introspection) は成立しないかもしれないので、本章のフレームワークのもとであれば、AU Introspection と Symmetry の同値性が保たれているもともとも unawareness を有意義に議論することが可能となる。

第 7 章は COVID-19 の無症状感染者や意思決定から除外されてしまうような無知の主体を想定し、知識と unawareness について分析している。本章のモデルは標準的な (非分割的) 情報構造モデルであるが、まず情報関数の仮定を第 5 章の部分分割の仮定よりもさらに緩めている。そして主体に与えられた情報集合が空集合である場合には、主体は任意の事象について知識を持つことができないものと仮定し、知識演算子をそのように再定義した。

本章で定義した知識演算子のもとでは、Monotonicity, Truth, Positive Introspection (ある事象を知っているとき、知っていることを知っている) は常に成立するが、Necessitation と Negative

Introspection は任意の情報集合が非空である場合に限り成立する。また、本章で提案した知識演算子に基づいて unawareness 演算子を定義し、その性質を分析している。たとえば AU Introspection と Symmetry については第 6 章と同様に同値性が成立する。ただし、本章のフレームワークでは AU Introspection や Symmetry が必ず成立するかどうかは判明しない。最後に本章は AU Introspection を仮定した場合、Triviality は情報集合が非空である場合に限り成立することを示した。

第 8 章では本論文の議論を振り返った上で、今後の研究の方向性について提示を行なっている。

### 3 本論文に対する評価

すでに「本論文の意義と要旨」でも指摘したように、本論文において多田氏は、今日経済学界において徐々に関心が広まりつつある unawareness 研究において、修士論文当時からの問題意識を引き継ぎ、洗練させ、独自の貢献をなすとげていると評価することができる。たとえば、discovery process の本格的な数理的な研究は、世界的に見ても、上述したカリフォルニア大学デイビス校の Schipper 氏らのグループ以外には見当たらない。Games with unawareness 研究にまで広げてみても、日本人では学習院大学の佐々木康朗氏による一般化されたナッシュ均衡とその安定性に関する研究があるのみである。また第 3 部で取り上げられたテーマは、筆者が独自に閃いたアイディアに基づくものだが、日本人では、イタリアのボッコニ大学の福田慧氏の AU Introspection の成立しない unawareness の研究などがあるのみで、いまだに少数である。この部分でも、unawareness が trivial でないような状況を同定することに、一定程度成功していると考えられる。

本博士学位請求論文が扱っている研究分野では、モデルの定式化の工夫が求められるほか、独自の概念を自ら設定して、定理を証明することが求められるが、多田氏は本論文において、myopic discovery process や imitative discovered game などの概念を次々と導入し、一定の数理的結果を得ており、その独創性は高く評価できる。

なお、問題点も指摘することができる。

本論文においてなされている定式化とそこから得られる結論はきわめて抽象的なレベルに留まっていることである。単に定式化に成功したということ以上に、こうしたモデルからいかなる現実的含意が得られるのかに関して、さらなる研究が求められる。ただし、多田氏が現実関連性を意識して、現実的含意を引き出そうとする努力をいくつかの箇所で行っていることも事実である。たとえば、第 4 章における、コーディネーション・ゲームで discovery process の持つ意味、第 7 章における、情報を得られない経済主体が陥る状況の分析なのである。しかし、今後、unawareness 研究への関心を高めていく上でも、よりわかりやすく、訴求力のある適用例が求められるだろう。

しかし、こうした問題点は、本論文の筆者が将来研究を進展させていく際の課題とみなされるべきであり、本論文が優れた独創的な研究成果であることを決して否定するものではない。

審査員一同は、本論文の内容を慎重に検討した結果、本論文が優れた研究であり、博士（経済学）の学位を授与するに値することを、一致して認めるものである。