

ネットワーク外部性市場における不完全情報下での意思決定と製品普及プロセス

西野 成昭^{†1} 金子 陽平^{†1}
小田 宗兵衛^{†2} 上田 完次^{†1}

本研究では、ネットワーク外部性が働く市場において、不完全情報下での意思決定がどのような製品普及のプロセスを導き出すかを分析した。近年、ネットワーク外部性をともなう市場は大きく拡大しており、その製品普及プロセスの解明は重要な要素となっている。そこで、消費者と生産者からなるネットワーク外部性が働く環境における意思決定モデルを構築し、先に意思決定した消費者の行動を観察できないような不完全情報のもとで、理論、計算機実験・被験者実験によって、行動主体の意思決定と製品普及のメカニズムについて統合的にアプローチした。ゲーム理論の枠組みで記述してナッシュ均衡を導出し、強化学習を行うエージェントで構成されるマルチエージェントシミュレーションを行ったところ、容易にナッシュ均衡解を発見することができた。次いで、実験経済学的手法に基づいて被験者実験を行った。被験者実験の結果からは、ナッシュ均衡とは異なる結果が多く観察された。これは、他の消費者の行動を知ることができないという不完全情報が原因であり、そのために新製品が普及する状態へと導かれる可能性を示唆した。

Decision-making under Incomplete Information and Product Diffusion in Market with Network Externalities

NARIAKI NISHINO,^{†1} YOHEI KANEKO,^{†1} SOBEI H. ODA^{†2}
and KANJI UEDA^{†1}

This study examines behavior of economic agents and product diffusion under conditions of incomplete information in a market where network externalities are present. Product markets with network externalities have been expanding through development of information technology. We construct a market model in which network externalities are present, where a producer and two consumers exist. In the model, we introduce incompleteness of information that a consumer cannot observe behavior of the other consumer. We analyze their economic behavior by game theory, multi-agent simulation, and experi-

ments with human subjects. Simulation shows that agents' behavior converges to Nash equilibrium, but outputs in experiments with human subjects deviate from equilibrium. As a result, we find that diffusion of new products can arise by incompleteness of information.

1. はじめに

近年、技術革新と規制緩和の結果、情報通信・エネルギー・放送などのネットワーク外部性をともなう市場は国の経済成長に重要な影響を及ぼすようになってきている¹⁾。たとえば、情報通信産業では、1985年に電電公社が日本電信電話（NTT）に民営化され、新規事業者（NCC）も1987年から営業を開始した。さらに、最近では携帯電話の契約数が9,000万件を超え^{*1}、インターネットやEメールの利用者数も爆発的に伸びている²⁾。また、電力産業では新規参入規制の撤廃や供給の部分自由化など、国内市場の競争は活発化している。

ネットワーク外部性とは、「ある財から得られる個人の効用が同じ財を消費する人数増加とともに上昇するような外部性」である。たとえば、ファックスマシンを1人の消費者が所有していても、得られる効用はほぼないに等しいが、他の多くの消費者がファックスマシンを利用すれば、通信する相手が増え、効用が増加する。

ビデオ市場にはかつてVHSとベータという非互換的な2つの規格が存在していたが、ベータの方が技術的には優れているといわれていたにもかかわらず、VHSを利用することによるネットワーク外部性の効果によりVHSがデファクトスタンダードとなってしまった³⁾。つまり、技術的に優れた製品が市場に導入されたとしても、既存品から得られるネットワーク外部性が障壁となり、それらが必ず普及するとは限らないなど、技術のみでは解決できない問題があり、技術的な側面だけでなく、消費者の購買・消費などの経済的側面を考慮する必要性がある。

消費者と生産者の双方が存在する市場としてネットワーク外部性市場をとらえた場合に、指摘されている最も大きな問題点として「過剰慣性」と「過剰転移」があげられる⁴⁾。過剰慣性とは、すでに多数の消費者により利用されている製品が過剰に普及し続けるという現

^{†1} 東京大学人工物工学研究センター

Research into Artifacts, Center for Engineering (RACE), The University of Tokyo

^{†2} 京都産業大学経済学部

Faculty of Economics, Kyoto Sangyo University

*1 電気通信事業者協会 (<http://www.tca.or.jp>) の平成19年1月の報告では、携帯電話とPHSを合わせた契約数が1億を超えている。

象である。新製品が旧製品よりも優れていたとしても、1度ネットワークに加入した消費者は、製品を乗り換えるコストとリスクを考慮してしまい、その転移が進まず社会厚生が最適な状態に至らない。過剰転移とはその逆であり、多くの消費者が過剰に新製品に乗り換えてしまい、旧製品を利用し続ける消費者が市場に取り残されてしまうために、社会厚生が最適とならない。

一方、消費者が購買意思決定を行う際には、製品に関する様々な情報を蓄積・処理し、自分の効用を高めるための製品を選択している。たとえば、インターネットやテレビコマーシャル、広告などの大域的なメディアからの情報や、消費者間で局所的になされる相互的な情報伝達（口コミ）などである。情報化社会である現在、消費者は情報取得のためのチャネルを多く持っているが、社会全体の製品の普及状況を把握するのは非現実的で、身近な知人であっても、製品の購入状況を完全に把握しているとはいえず、一般的に不完全な情報下での意思決定となる。

ネットワーク外部性市場では、他の消費者が選択した製品やサービスにより自身の得る効用が変化するため、選択した、または選択する予定の製品やサービスに関する消費者間のコミュニケーションは、各消費者の意思決定に大きな影響力を与えるといえる。したがって、消費者の持つ情報が不完全な状況での市場の振舞いは、経済理論によって導かれるような完全情報下における均衡とは大きく異なる可能性が高い。これらのことから、消費者が取得する情報とその結果としてとられる行動の関係を考察し、製品普及の問題を考慮することが重要となる。

そこで、本研究では、ネットワーク外部性が働く市場において、生産者と消費者からなる意思決定モデルを構築する。モデルでは、ある消費者が他の消費者の意思決定を知ることができないという不完全情報を導入し、どのように製品普及が生じるかを分析する。

本論文の構成は以下のとおりである。2章で関連研究を述べ、3章では本研究で採用する統合的なアプローチについて説明する。次いで、4章でネットワーク外部性市場における意思決定モデルについて述べ、次の5章では、ゲームとして記述し理論的な解を導出している。6章では、マルチエージェントシミュレーションの結果を示し、7章では被験者実験の結果を示す。そして、得られた結果をもとに8章で製品普及について考察する。最後に9章で結論を述べる。

2. 関連研究

ネットワーク外部性の経済理論的な研究の草分けとして、Leibenstein による研究があげ

られる⁵⁾。Leibenstein は他者が同じ財を購入することによって自分の効用が上昇する「バンドワゴン効果」が存在することを示した。これは後に呼ばれるようになったネットワーク外部性と実質的に同じである。Rohlf's⁶⁾ は通信サービスから得られる効用がネット加入者数とともに増加する「通信需要の相互依存性」をネットワーク外部性の動学モデルにより示し、不安定な均衡点と安定した均衡点の2つの存在を明らかにした。

その後、ゲーム理論を用いたネットワーク外部性の研究がさかんに行われるようになり、Katzら⁷⁾ は消費者と企業が存在するネットワーク外部性市場をモデル化し、製品が持つ互換性の有無について自己実現期待クールノー均衡を用いて分析を行っている。

市場への技術導入の研究については、Farrellら⁸⁾ が企業が持つ新技術導入の私的誘因と社会的誘因について均衡分析を行い、連続的に市場に参加する消費者をモデル化し、既存技術が非効率に普及し続ける過剰慣性と新技術が必要以上に普及する過剰転移の発生を示した。これに対してKatzらは生産者をモデル内に含め、ネットワーク外部性市場への新技術導入の分析を行っている⁹⁾。その結果として、過剰慣性が起こらずに新技術が普及し、普及する新技術は旧技術と非互換的となる可能性が高いことを示した。また、Tse¹⁰⁾ は技術革新のプロセスを明らかにするために Grabber-holder モデルを構築し、パソコン市場におけるインテル社のように、補完財を供給する企業の存在の重要性を指摘した。

上記の理論研究では、製品を販売する生産者をモデル内に含めて扱っていないものが多いこと、またモデル内の行動主体が他の行動主体の意思決定結果を完全に観察できる完全情報の前提がなされている。

一方、実証的な研究として、Maddenら¹¹⁾ はネットワーク効果を考慮した携帯電話の普及モデルの妥当性を実データを用いることで検証している。実データを用いた数式モデルの妥当性の検証について、Economidesら¹²⁾ がアメリカのファックス市場の実データを用いた研究を行っている。また、Shankarら¹³⁾ は任天堂とセガのゲーム機の売り上げに関する実証研究を行い、理論的分析とは異なり既得基盤の小さかった任天堂が売り上げを伸ばした原因が広告費や製品価格にあると結論づけている。

また、エージェントベースのシミュレーションによるアプローチも行われている。井庭ら¹⁴⁾ はビデオレコーダの製品普及と2企業間の競争を消費者ベースのマルチエージェントシステムにより分析している。そのほかにも、山本ら¹⁵⁾ は情報の受発信の積極性・消極性により消費者を4タイプにモデル化し、消費者間での情報の伝達をマルチエージェントシステムに取り入れ、音楽ソフト市場の実データと比較しながらシミュレーションを行っている。Odaら¹⁶⁾ は、セルオートマトンを用いて消費者をモデリングし、2製品市場の製品普

及過程を分析している。また、川村ら¹⁷⁾は複雑ネットワークを用いて消費者をエージェントとして記述し、ネットワークの構造に応じて企業にとって有効なプレゼン戦略が異なるという結果を得ている。

被験者実験を用いたネットワーク外部性の研究も行われており、Ruebeckら¹⁸⁾はスイッチングコストがより優れた性能の製品普及の妨げになることを示している。

本研究は、Farrellら⁸⁾のモデルを参考に、消費者の使用に関する不完全情報をモデルに組み込み、生産者と消費者からなる単純な意思決定のモデルを構築する。先行研究の多くは、生産者の意思決定のみに着目したものや、逆に消費者の選択のみを扱うものが多く、本研究では、生産者の新製品導入の意思決定と消費者の購買意思決定との相互作用によって、どのような製品普及が生じるかという点に着目する。さらに、両者の意思決定から、過剰慣性・過剰転移に関する議論を進めるところも特徴である。また、先行研究の多くは、理論研究、エージェントベースシミュレーション、被験者実験といった、それぞれ単独のアプローチで分析を進めている。実社会での問題として扱うためには、それらを統合したアプローチが必要である。本研究では、それらを統合するアプローチを提案している。詳細は次章で説明する。

3. イノベーションプロセス分析のための統合的アプローチ

上記で述べたとおり先行研究は、理論やシミュレーション、被験者実験を用いた研究など、単独のアプローチで行われている研究がほとんどであるが、それらを統合的に用いることが重要となる。そこで、本研究では製品普及のプロセスを明らかにするために、統合的なアプローチを採用する。本章では、そのアプローチについて述べる。

3.1 理論分析

経済理論、ゲーム理論などの社会科学に関連した理論は、社会におけるイノベーションプロセスの根源となる行動主体の意思決定を分析するのに有用である。しかし、多くの場合で非常に極端な仮定がなされていたり、完全情報や完全な合理性が前提条件として課されていたりすることがほとんどである。そのため、実社会の問題にそのまま適用するには、困難な場合が多いが、極端な状況下での理論的な基準として用いることが重要である。

3.2 計算機実験

計算機実験は、社会システムにおける意思決定に関してより深い分析を行うことが可能である。たとえば、マルチエージェントシミュレーションによって、局所的に振る舞う行動主体や限定合理的なエージェントをモデルに容易に導入可能で、その相互作用から得られるシ

ステム全体の挙動を観察することができ、どのようなイノベーションが形成されるかを計算機上でシミュレートできる。また、ヒューリスティクスな最適化アルゴリズムを用いることで、数学的に導出が困難な場合でも、最適解/適用解を得ることができる。理論的な枠組みだけでは、不可能な分析を可能にする。

3.3 被験者実験

近年、行動主体の意思決定の分析や経済理論の検証に、被験者を用いた経済実験が行われている。それは実験経済学とよばれ最近注目を浴びている¹⁹⁾。これは、仮想的な経済環境あるいはゲーム環境を実験室に構築し、実際の被験者をその環境内で意思決定させる。特徴的な点として、実験で得られた得点に応じて、現金報酬を被験者に与えることである。それにより、被験者に経済的インセンティブを与えている。この手法を用いることで、統制された環境での実際の人間の意思決定を観察することができ、社会システムや経済システムでの行動分析に有効であると考えられる。

3.4 統合的アプローチ

どのようにイノベーションプロセスが起こりうるかという問題に対しては、上記のアプローチを統合的に用いて、問題を構成論的に扱う必要がある。過去のイノベーションの事例を分析するのみでは、真の意味でイノベーションを理解するのは困難であろう。そこで、行動主体などの構成要素間の相互作用や構造から、どのようなイノベーションプロセスが形成されるか調べるには、マルチエージェントシミュレーションなどの計算機実験や、仮想経済空間での被験者実験などが有効で、理論的な均衡解との比較を通じて、イノベーションを構成する基礎メカニズムを明らかにできる可能性がある。さらに、得られた分析結果をもとに、実データを用いながら実社会のフレームワークとの比較により考察を深め、実証研究へと発展させ、最終的に実社会へ展開できると期待される。

次章以降では、本アプローチをベースにしてネットワーク外部性市場における製品普及の分析を行っている。

4. ネットワーク外部性市場における不完全情報下での意思決定モデル

ネットワーク外部性は、他の消費者が選択した製品やサービスによって大きく影響されるために、他の消費者の情報は非常に重要となる。しかし、現実社会を考えると、ITの発達により容易に情報を手に入れることができるが、信頼性が低いものや探索に手間も生じる。そのため、完全に把握することは困難であり、実際にはある程度は不完全な情報のままでの意思決定を余儀なくされる。

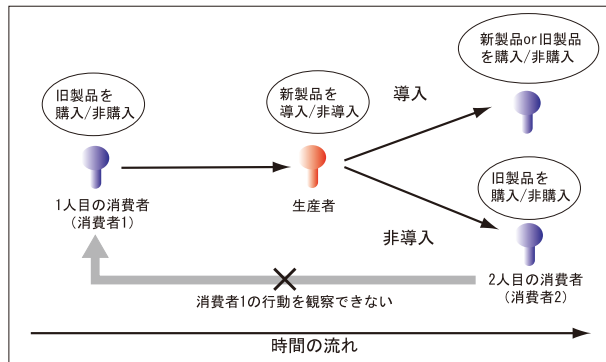


図 1 モデルの概要
Fig.1 Overview of our model.

そこで、ネットワーク外部性をともなう市場において、他の消費者の行動を知ることができないという不完全情報を導入し、生産者 1 人と消費者 2 人からなる単純な意思決定モデルを考える。

4.1 モデルの概要

図 1 にモデルの概略を示す。図に示すとおり、消費者 1、生産者、消費者 2 の順で意思決定を行う。消費者 1 が旧製品を購入するかどうかの意思決定を行い、次に生産者が新製品を導入の是非を決定する。もし、新製品が導入されれば、消費者 2 は新製品・旧製品・購入しないの 3 つの選択肢から意思決定を行う。一方、新製品が導入されない場合は、消費者 2 は旧製品・購入しないのどちらかを選択する。ここで、消費者 1 が意思決定を行う時刻を $t = 0$ 、消費者 2 が意思決定を行う時刻を $t = 1$ とする。

そして本研究では、ネットワーク外部性市場における不完全情報として「消費者 2 は消費者 1 の行動を知ることができない」と定義し、消費者間での情報の不完全性を導入している。

4.2 生産者

生産者は新製品の導入と非導入について意思決定を行う。次のようにモデル化されている。

- 生産者は、利潤 Π を最大化するように意思決定を行う。利潤 Π は式 (1) のように定式化される。利潤 Π は、価格とコストの差に製品の販売数を乗じて、時間で割り引いた式である。なお、各パラメータと変数の定義は消費者のものともまとめて表 1 に示す。

表 1 パラメータの定義
Table 1 Definition of parameters.

α	旧製品を 1 人で使用したときのネットワーク外部性以外の効用
β	旧製品を 1 人で使用したときのネットワーク外部性の効用
γ	新製品を 1 人で使用したときのネットワーク外部性以外の効用
δ	新製品を 1 人で使用したときのネットワーク外部性の効用
t	時刻： $t = 0$ (消費者 1 の意思決定), 1 (消費者 2 の意思決定)
j	製品の種類： $j = 0$ (旧製品), 1 (新製品)
e^{-r}	時間割引因子*
P_j	製品 j の価格
C_j	製品 j の限界コスト
$z_{j,t}$	時刻 t における製品 j の購入者数 (ただし, $z_{j,-1} = 0$ とする)

*時間割引因子が小さくなるほど、将来における価値が低くなる。

$$\Pi = \sum_{j=0}^1 \sum_{t=0}^1 (P_j - C_j)(z_{j,t} - z_{j,t-1})e^{-rt} \tag{1}$$

- 生産者は消費者 1 の意思決定結果を知ることができるが、消費者 2 の意思決定結果を知ることができない。
- 消費者 1 には旧製品のみを販売する。
- 消費者 1 の購買意思決定後、新製品導入の有無を決める。
- 新製品を導入した場合には、消費者 2 に旧製品と新製品のいずれかを販売することができ、導入しなければ旧製品しか販売することができない。

4.3 消費者

市場には 2 人の消費者が存在しており、消費者 1 は旧製品の購買の有無を、消費者 2 は旧製品と新製品のいずれかの購買の有無を決定する。ただし、消費者 2 は消費者 1 の行動を知ることができないという不完全情報下での意思決定となるようモデル化している。

- 消費者 i ($i = 1, 2$) は、効用を最大化するように意思決定する。効用は式 (2) のように定式化される。各時刻で得る $u_j(t)$ が製品から得られる便益であり、便益から価格を引いた式となっている。ネットワーク外部性の効果は、 $u_j(t)$ が製品 j の使用人数である

変数 $z_{j,t}$ によって線形に増加することで表現されている．

$$U_{i,j} = \sum_{t=i-1}^1 u_j(t)e^{-rt} - P_j e^{-r(i-1)} \quad (2)$$

$$u_j(t) = \begin{cases} \alpha + \beta z_{j,t} & (\text{旧製品のとき}) \\ \gamma + \delta z_{j,t} & (\text{新製品のとき}) \end{cases}$$

- 消費者 1 は生産者と消費者 2 の意思決定を知ることができない．
- 消費者 1 は旧製品のみを購入することができる．
- 消費者 2 は生産者の意思決定を知ることができるが、消費者 1 の意思決定を知ることができない．
- 消費者 2 は、生産者が新製品を市場に導入すれば旧製品と新製品のいずれかを購入することができるが、生産者が導入しなければ旧製品しか購入することができない．

5. ゲーム構造と理論均衡

前章で説明したモデルを、ゲーム理論の枠組みで記述し、ナッシュ均衡と社会余剰最大の理論解を導出する．

5.1 パラメータ設定

表 2 のように 4 種類のパラメータの組合せを用いる．それぞれゲーム 1 からゲーム 4 と呼ぶことにする．

5.2 ナッシュ均衡

表 2 のパラメータを用いて、4 種類のゲームをツリー構造で図 2 に示す．図中の数字は、左から消費者 1 の効用、生産者の利潤、消費者 2 の効用を表している．問題を単純化するために、4 つのゲームすべてにおいて消費者 1 に支配戦略が必ず存在するようにパラメータを設定している．つまり、図から分かるように、消費者 1 については、旧製品を買えばつね

表 2 パラメータ設定
Table 2 Configuration of parameters.

	α	β	γ	δ	e^{-r}	P_0	P_1	C_0	C_1
ゲーム 1	12	5	15	15	0.8	18	27	16	18
ゲーム 2	12	5	30	15	0.8	18	27	10	24
ゲーム 3	7	5	20	15	0.9	18	27	11	25
ゲーム 4	12	5	20	15	0.8	18	27	10	24

に正の効用が得られるため、買わない場合が効用が 0 であることから、旧製品を買うという行動が必ず合理的な行動となるのである．

そこで、支配される消費者 1 の非購入の行動をツリーから排除し、残りの状態から他の行動主体についても同様に支配される戦略を排除していけば、支配戦略となる戦略のみが残り、ナッシュ均衡となる．4 ゲームともにこのような手順で均衡が導き出せる．表 3 に均衡の状態をまとめる．表中の表記は、(消費者 1 の行動、生産者の行動、消費者 2 の行動) という順で表記し、旧は「旧製品購入」を表し、新は「新製品購入」を表し、導入は「新製品導入」、非導入は「新製品非導入」を表している．また、図 2 にも矢印で均衡を示してある．

5.3 社会余剰の最大化

ナッシュ均衡は各行動主体の合理的な行動の結果、導かれる解であるが、それとは別に、社会的に最も良い状態を導出することができる．ここで、社会余剰として、各行動主体の利潤・効用の総和であると定義する．すなわち、市場内に存在するすべての主体の満足度を合計したものであり、社会の効率性を表す指標として用いる．

よって、各ゲームにおいて、利潤・効用の総和が最大となる行動の組合せを示すと表 3 のとおりになる．

6. マルチエージェントシミュレーション

本章では、理論が想定するような完全に合理的な行動主体ではなく、各行動主体がそれぞれ適応的に学習する強化学習エージェントとして、マルチエージェント環境でシミュレーションを行った．

6.1 エージェントの行動ルール

各エージェントの行動は以下のとおりである．

- 生産者エージェント
生産者エージェントは消費者 1 の製品購入の行動結果を入力とし、新製品を市場に導入するか導入しないかを、Q 値に基づいて出力する．行動した結果、生産者の利潤が報酬として与えられる．
- 消費者 1 エージェント
消費者 1 エージェントは入力の情報はなく、Q 値に基づいて旧製品購入か購入しないかの行動を出力する．行動した結果、消費者 1 の効用が報酬として与えられる．
- 消費者 2 エージェント
消費者 2 エージェントは生産者の新製品導入の意思決定結果を入力とし、生産者が新

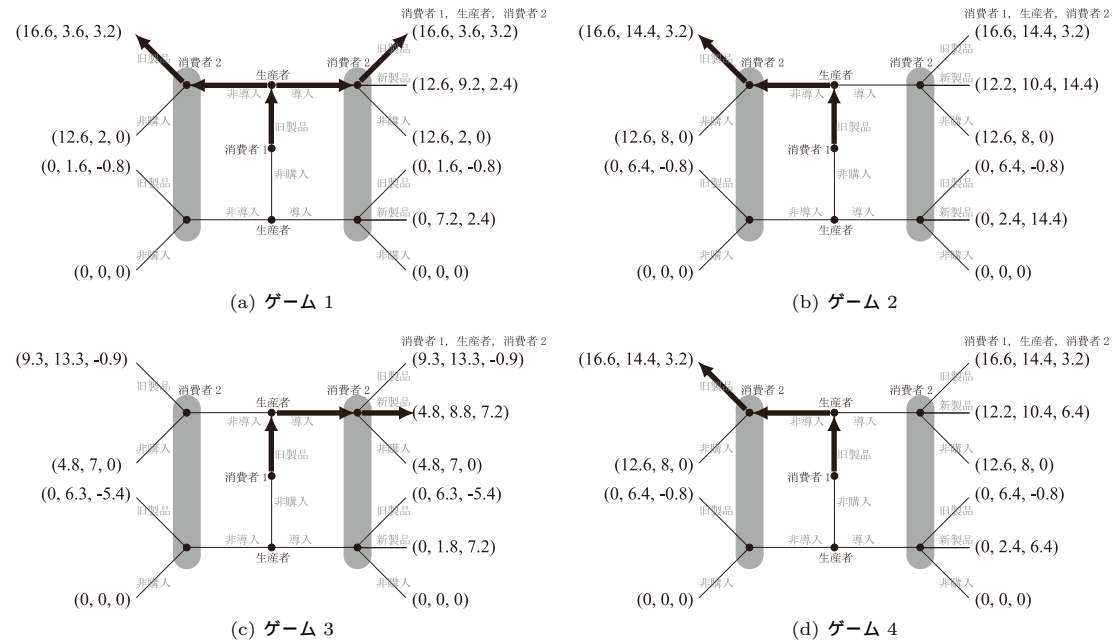


図 2 ゲーム構造とナッシュ均衡
Fig. 2 Structure of games and Nash equilibrium.

表 3 ナッシュ均衡と社会余剰最大化
Table 3 Nash equilibrium and maximization of social surplus.

	ナッシュ均衡	社会余剰最大
ゲーム 1	(旧, 導入/非導入, 旧)	(旧, 導入, 新)
ゲーム 2	(旧, 非導入, 旧)	(旧, 導入, 新)
ゲーム 3	(旧, 導入, 新)	(旧, 導入/非導入, 旧)
ゲーム 4	(旧, 非導入, 旧)	(旧, 非導入, 旧)

製品を市場に導入すれば旧製品購入, 新製品購入, 購入しないの 3 つの選択肢から, 導入しなければ旧製品購入, 購入しないの 2 つの選択肢から, Q 値に基づいて行動を出力する. 行動した結果, 消費者 2 の効用が報酬として与えられる.

- Q 値の更新
s を状態, a を状態 s における行動とすると, 各エージェントは行動の結果として Q 値

を式 (3) のように更新する.

$$Q(s, a) \leftarrow Q(s, a) + \alpha[r - \gamma \max_{a'} Q(s', a') - Q(s, a)] \quad (3)$$

ここで, α は学習率, γ は割引率を表し, r は行動の結果としてエージェントが得る報酬を表す. 各エージェントの 1 回の意思決定によって利得が決定するために, 意思決定後の状態 (遷移先の状態) を考える必要がなく, 状態遷移先の Q 値の最大値 $\max_{a'} Q(s', a')$ は 0 とする.

- 行動の選択手法
各学習器エージェントはソフトマックス手法を用いて確率的に行動を選択する. 式 (4) に示すようにボルツマン選択を用いて $Q(s, a)$ から行動を選択する. なお, $p(a|s)$ を $Q(s, a)$ の価値を持つルールが選択される確率, T を温度パラメータとする.

$$p(a|s) = \frac{e^{Q(s,a)/T}}{\sum_{a_i \in A} e^{Q(s,a_i)/T}} \quad (4)$$

6.2 シミュレーション結果

シミュレーションでは、学習率 $\alpha = 0.1$ 、温度パラメータ $T = 0.2$ を用いた。図 3 にシミュレーション結果の例を示す。図 3 は、シミュレーションの 100 試行の平均の利得をプロットしている。各エージェントの利得が、時間経過とともにナッシュ均衡である (16.6, 3.6, 3.2) の利得の値に収束していることが分かる。他のゲーム 2~4 の結果の図は省略するが、まったく同じ傾向の学習曲線が得られた。

ゲーム 1~4 までの、シミュレーション結果を表 4 にまとめる。表は各ゲームの 100 試行のシミュレーションのうちで、学習の収束後に現れた製品普及の分布の割合を示している。なお、ナッシュ均衡は太字にしてある。

以上のシミュレーション結果から、学習の結果として、ほぼ完璧にナッシュ均衡が見つけ出されていることが分かる。つまり、理論が仮定するような完全に合理的なエージェントではなく、適応的に学習するエージェントであっても合理的な均衡解であるナッシュ均衡を見

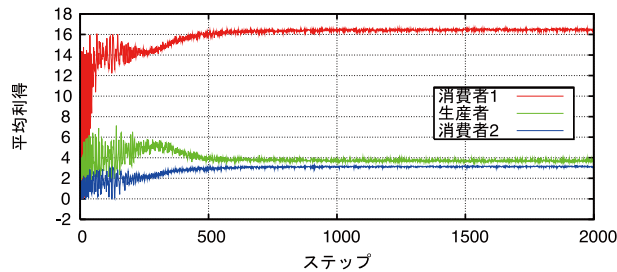


図 3 シミュレーション結果 (ゲーム 1)
Fig. 3 Simulation result (Game 1).

表 4 シミュレーション 100 試行中の製品普及の状況

Table 4 Classification of product diffusion in 100 simulations.

	(旧, 旧)	(旧, 新)	(旧, 非)	(非, 旧)	(非, 新)	(非, 非)
ゲーム 1	96	2	2	0	0	0
ゲーム 2	100	0	0	0	0	0
ゲーム 3	0	99	1	0	0	0
ゲーム 4	100	0	0	0	0	0

(注) ここで、非は「非購入」を表す。

つけることができたといえる。

7. 実験経済学的手法に基づく被験者実験

次に、実際の人間を被験者として実験を行った。被験者実験は、専用の実験室を用いて制御された環境での意思決定を調べた。さらに、実験経済学的手法に基づき、実験中の得点に応じて、現金報酬を被験者に支払っている。以下に実験の詳細を示す。

7.1 被験者実験の詳細

7.1.1 被験者について

2006 年 12 月 6 日に京都産業大学大学院の実験室で被験者実験を行った。実験の被験者は、掲示板などを通じて京都産業大学の学部生から募集した。集まった被験者数は 27 人であった。

7.1.2 被験者への実験の説明

実験説明の冊子を作成し、その冊子をもとに実験開始前に約 30 分かけて被験者実験を説明した。

7.1.3 実験環境

被験者はそれぞれパーティションで区切られたブースに設置したコンピュータから実験を行う (図 4)。被験者は、各デスクで PC を通じて意思決定する。他の被験者とコミュニケーションできないようにし、完全に制御された環境下で実験を行っている。また、実験には経済実験用のアプリケーションである z-Tree²⁰⁾ を用いた。

7.1.4 報酬の支払い

実験終了後、実験で各被験者が得た得点と比例した金額を報酬として与えた。実際には、

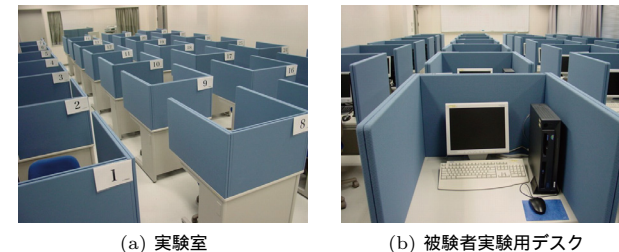


図 4 被験者実験の環境
Fig. 4 Experimental laboratory.

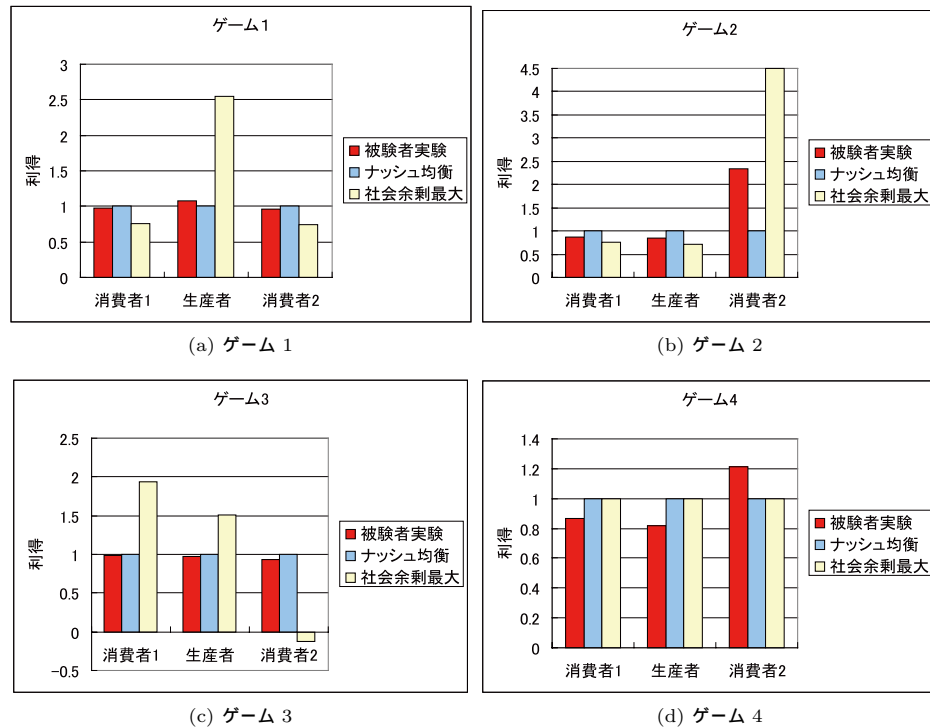


図 5 被験者実験の結果 (各行動主体の利得)
Fig. 5 Results of experiments with human subjects (payoff).

実験における 1 点を 5 円とした。さらに、それとは別に参加報酬として固定額の 1,000 円を支払った。

7.2 実験手順

実験は 3 人 1 組で行われる。実験において、被験者には生産者または消費者として役割が与えられる。また、実験では、各被験者が選択した行動の結果としてそれぞれに与えられる得点をまとめた表を渡しておく。

実験における被験者の手順は以下のとおりである。

- (1) 与えられた得点表をもとに、消費者 1 が旧製品/非購入を決定する。
- (2) 生産者の画面には消費者 1 の行動結果が表示される。その結果と得点表をもとに、新

表 5 被験者実験結果 (製品普及の状況)

Table 5 Results of experiments with human subjects (product diffusion).

	(旧, 旧)	(旧, 新)	(旧, 非)	(非, 旧)	(非, 新)	(非, 非)
ゲーム 1	92.2	5.6	1.1	1.1	0	0
ゲーム 2	53.3	38.9	6.7	0	1.1	0
ゲーム 3	0	92.2	6.7	0	1.1	0
ゲーム 4	45.6	37.8	16.7	0	0	0

(注) 表中の数値は%を示す。

製品の市場への導入/非導入を決定する。

- (3) 消費者 2 の画面には消費者 1 の行動結果が表示されず、生産者が市場へ新製品を導入した場合、旧製品/新製品/非購入のいずれかを得点表を用いて選択する。また、新製品が導入されなければ、旧製品/非購入を決定する。
- (4) 各被験者の意思決定に対応した得点がそれぞれに与えられ、(1)に戻る。

以上の手続きを 1 ターンとし、10 ターンまで繰り返し行う。ただし、ターンが変わるごとに、役割は固定したまま 3 人の組合せをランダムに変更している。

7.3 実験結果

図 5 に、各行動主体の平均利得を示す。図中には比較として、ナッシュ均衡と社会余剰最大化の行動解も同時に示している。ただし、ナッシュ均衡を 1 として正規化してある。図から分かるように、ゲーム 1 とゲーム 3 では被験者結果はナッシュ均衡に近いのに対し、ゲーム 2 とゲーム 4 ではナッシュ均衡から逸脱している。

詳しく見るために、被験者の行動の結果どのような製品普及状態になっているか調べる。表 5 に各ゲームにおける普及状態の割合を示す。ゲーム 1 ではナッシュ均衡である(旧, 旧)が 90%以上を占め、ゲーム 3 も同様にナッシュ均衡である(旧, 新)が 90%以上を占めている。しかし、ゲーム 2 とゲーム 4 では、ナッシュ均衡が(旧, 旧)であるのに対し、(旧, 新)という状態が多く観察されている。すなわち、生産者が新製品を市場に導入する意思決定をしているために、新製品を購入する消費者 2 が多くなっているのである。

8. 考察

計算機実験では、ナッシュ均衡に容易にたどり着いたにもかかわらず、被験者実験の結果は、それとは異なり、ゲーム 2 とゲーム 4 で(旧, 新)という普及状況になっている被験者が多く観察された。この結果について、いくつかの視点から考察する。

8.1 ゲーム 2 と 4 における新製品普及の理由

表 5 より、ゲーム 2 で 6.7%、ゲーム 4 で 16.7%の割合で(旧, 非)が観察されており、消費者 2 が非購入を選択する場合があることが分かる。これは、消費者 1 が非購入だった場合、消費者 2 が旧製品を購入することで効用が負になるので、リスクを回避するために非購入を選択していると考えられる。しかし、もし生産者が新製品を導入する意思決定をしていれば、消費者 2 は新製品を購入することで、確実にそれよりも高い利得を得ることができる。

上記の状況を生産者側から見てみる。生産者が新製品を導入しない場合(旧, 旧)ならば利得 14.4 を得るのに対し、(旧, 非)の場合は利得が 8.0 になる。しかし、もし生産者が新製品を導入すれば、消費者 2 は確実に新製品を購入することが明らかなので、(旧, 新)で利得は 10.4 になり、消費者 2 の非購入によって利得が 8.0 になることを回避することができる^{*1}。

したがって、ゲーム 2 と 4 においては、生産者が「消費者 2 がリスクを回避するために、非購入を択選するかもしれない」ということを考え、それによって利得が減少する可能性を危惧し、確実にある程度高い利得を得ることができる新製品導入の意思決定をするのである。しかし、理論的には消費者 1 は旧製品を選択することが支配戦略であり、必ず消費者 1 は旧製品を購入すると気づけば情報の不完全さが失われ、このような意思決定は生じない。この現象は、消費者 1 の行動が分からないという不完全性が、消費者 2 のリスク回避的行動の可能性を引き出し、その結果、生産者が新製品を導入するという行動が誘発され、(旧, 新)の普及状況が導かれるのである。

8.2 比較実験：完全情報の場合との比較

上記で述べた不完全さが、消費者 2 のリスク回避的な行動を導き、生産者の意思決定に影響を与えているかどうかを検証するために、消費者 2 が消費者 1 の行動結果を知ることができる状況を考える(完全情報ゲーム)。この場合でも、消費者 1 は旧製品を購入することが支配戦略となり、支配される戦略を除いていけば、結果として不完全情報下のゲームと同じ均衡が得られる。そこで、比較実験として完全情報下での被験者実験を行った。その結果を表 6 に示す。表から、ゲーム 2 と 4 において(旧, 非)の行動が減少し、結果としてナッシュ均衡の普及状態が多く観察された。

*1 ゲーム 3 でも(旧, 非)が 6.7%の割合で確認されており、消費者 2 の非購入の可能性も無視できないが、ゲーム 3 では、消費者 2 の意思決定にかかわらず、生産者は新製品を導入することが合理的な意思決定なので、消費者 2 の非購入の意思決定は生産者の意思決定に影響を及ぼさない。

表 6 完全情報での被験者実験結果(製品普及の状況)

Table 6 Experimental results in perfect information games (product diffusion).

	(旧, 旧)	(旧, 新)	(旧, 非)	(非, 旧)	(非, 新)	(非, 非)
ゲーム 1	100	0	0	0	0	0
ゲーム 2	91.1	4.4	2.2	1.1	1.1	0
ゲーム 3	0	92.2	5.6	1.1	1.1	0
ゲーム 4	72.2	27.8	0	0	0	0

(注)表中の数値は%を示す。

この結果から、ゲーム 2 と 4 において、完全情報で消費者 2 のリスクがない場合には、消費者 2 は非購入の意思決定が減少し、生産者は非導入を選ぶ割合が増加し、結果としてナッシュ均衡が導き出されていることが示された。この比較実験によって、消費者 2 が消費者 1 の行動を知ることができないという情報の不完全性が、(旧, 新)という状況を生みやすくしていることが明らかになった。

8.3 過剰慣性と過剰転移

Farrell ら⁸⁾での過剰慣性・過剰転移の議論にならない、ナッシュ均衡と社会余剰の観点から、本研究では次のように定義する。

- 過剰慣性：ナッシュ均衡が(旧, 旧)で、社会余剰最大が(旧, 新)の場合
- 過剰転移：ナッシュ均衡が(旧, 新)で、社会余剰最大が(旧, 旧)の場合

次に、ゲーム 1~4 を、過剰慣性・過剰転移の観点から説明する。

ゲーム 1 では、ナッシュ均衡が(旧, 旧)で社会余剰最大が(旧, 新)である。つまり、これは社会的には、新製品が普及した方が良いにもかかわらず、合理的な行動の結果、旧製品のみが市場を独占することになる。過剰慣性が発生するゲームの構造になっている。

ゲーム 2 も、ナッシュ均衡が(旧, 旧)で社会余剰最大が(旧, 新)であり、過剰慣性が発生するゲームである。ゲーム 1 では、生産者が導入しても(旧, 旧)にしかならないのに対して、ゲーム 2 の場合では、生産者が新製品を導入すれば消費者が新製品を購入し(旧, 新)の普及状態になる。これは、生産者によって非導入が選択され(旧, 旧)となるケースである。生産者の独占的な市場支配力によって過剰慣性が引き起こる構造ともいえる。

ゲーム 3 では、ナッシュ均衡が(旧, 新)で社会余剰最大が(旧, 旧)であり、過剰転移が発生するゲーム構造である。これは、ゲーム 1, 2 とは反対で、社会的には新製品が普及しない方が良いが、合理的な行動の結果として普及してしまう状況である。

一方、ゲーム 4 ではナッシュ均衡と社会余剰最大が同じ(旧, 旧)である。すなわち、過

剩慣性も過剰転移も起こらない状況である。

前節の比較実験によって、情報の不完全性が(旧, 新)の状況を導き出すことが明らかになったが、ゲーム2においては情報の不完全性によって、新製品の普及を促すことができ、過剰慣性の解消の手助けになる可能性がある。ゲーム4では反対に、情報の不完全性によって社会的に良い状態の(旧, 旧)から、(旧, 新)の状態へとシフトしてしまう可能性があるということの意味する。よって、社会的な視点から見た場合、新製品を普及させたいゲーム2のような場合には、消費者の使用状況が把握できないような制度や枠組みを作ればよい。たとえば、企業などに利用者数の公開を控えるような制度や提言をすることで、消費者の使用状況の把握が困難になり、本モデルが想定するような不完全情報下での意思決定に近い状況になる。一方、ゲーム4のように新製品を普及させたくないような状況では、企業などが積極的に利用者数や契約者数を公開することで消費者の使用状況を示し、情報が完全に近づくようにすればよいのである。

8.4 統合的アプローチの有効性

本研究は、理論、計算機実験、被験者実験による統合的なアプローチで分析を行った。ナッシュ均衡は、各行動主体が高い利得を得るように(合理的に)行動すると仮定した場合に導かれる解である。一方、計算機実験では理論とは異なり、置かれた環境での限られた情報を入力とし、利得が高くなるよう適応的に行動した結果得られる適応解である^{*1}。被験者実験では、統制された環境下で、ゲームの得点に応じた現金報酬を与え、明確な経済的インセンティブを与えているが、被験者の背後にある戦略や行動指針をもとに行動する。背後にある行動原理は、被験者実験の結果を見るだけでは明らかにできない。被験者とまったく同じ状況を計算機上に構築し、学習エージェントが互いに相互作用を及ぼすマルチエージェント環境で得られた行動解と、被験者の行動解を比較することで被験者の裏に潜む行動原理などを明らかにできる可能性がある。

本研究では、ナッシュ均衡と計算機実験の行動が一致するという結果が得られた。すなわ

ち、ゲーム構造が非常に単純であるために、不完全情報下であっても、学習エージェントは適応的な行動によって、簡単に理論解を見つけることができている。一方、被験者の4割近くがゲーム2と4において、理論解に反して新製品が普及するという行動をとっている。この理論解からの逸脱原因は不完全情報であるという仮説のもと、検証のために比較実験として完全情報ゲームの実験を行ったところ、情報が完全になると新製品普及の行動は減少し、理論解と一致する行動の増加が見られた。よって、不完全情報が消費者2のリスク回避的な行動の可能性を導き出し、生産者に新製品導入の意思決定を促したと結論づけている。少し補足すると、本研究での不完全情報のモデルは、消費者1に支配戦略があるため、実は消費者2はリスクなく合理的な意思決定ができる。すなわち、少し考えれば情報の不完全性の意味がなくなるのである。学習エージェントは正しく認識できているのに対し、被験者はそれを認識できず、リスクを考慮してしまい、新製品普及という結果が導かれているのである。以上の統合的アプローチによる分析は、理論だけでは明らかにできないような、不完全情報が製品普及に与える影響を明らかにできたといえる。

9. おわりに

本研究では、ネットワーク外部性が働く市場において、不完全情報下での意思決定がどのような製品普及のプロセスを導き出すかを分析した。そのために、理論、計算機実験、被験者実験からなる統合的なアプローチを提案した。1人の生産者と2人の消費者からなる単純なネットワーク外部性市場をモデル化し、先の消費者の意思決定が分からないという不完全情報を導入し、個々の意思決定と製品普及のプロセスについて分析を行った。

結果として、計算機実験では容易にナッシュ均衡を発見できたのに対し、被験者実験では、均衡から逸脱する結果が多く見られた。完全情報の比較実験によって、不完全情報がその逸脱原因であることを示し、不完全情報が新製品の普及を促す可能性があることを示唆した。

参 考 文 献

- 1) 依田高典：ネットワークエコノミクス，日本評論社（2003）。
- 2) 総務省統計局．<http://www.stat.go.jp/>
- 3) 新宅純二郎，田中辰雄，柳川範之：ゲーム産業の経済分析，東洋経済新報社（2003）。
- 4) Farrell, J. and Saloner, G.: Standardization, Compatibility, and Innovation, *Rand Journal of Economics*, Vol.16, pp.70-83 (1985).
- 5) Leibenstein, H.: Bandwagon, Snob and Veblen Effects in the Theory of Consumers' Demand, *Quarterly Journal of Economics*, Vol.64, pp.184-207 (1950).

*1 最近では、実験経済学の分野でも、学習アルゴリズムを用いた研究が多い。たとえば、Rothら²¹⁾やErevら²²⁾は、ゲームなどで被験者の行動を再現するような学習アルゴリズムを構築している。これらの研究は、新しい理論構築を行うことに主眼を置いているが、本研究の立場と異なる。マルコフ決定過程において(無限回の試行で)必ず最適解に収束することが理論的に保証されているQ学習は、同じ環境では同じ行動をする(混合戦略も含む)戦略固定のエージェントに対しては、ほとんどの場合で最適反応を学習できるはずである。つまり、静的な環境で最適反応戦略を見つけることができるエージェント同士が、動的なマルチエージェント環境でどのような行動を学習するかという点に着眼しており、上記の考え方は異なる。マルチエージェント環境では、一般的にナッシュ均衡への収束が保証されていないので、その学習過程を分析することで、さまざまな知見を得ることができる。

- 6) Rohlfs, J.: A Theory of Independent Demand for a Communications Service, *Bell Journal of Economics and Management Science*, Vol.5, pp.16–37 (1974).
- 7) Katz, M.L. and Shapiro, C.: Network Externalities, Competition, and Compatibility, *The American Economic Review*, Vol.75, No.3, pp.424–440 (1985).
- 8) Farrell, J. and Saloner, G.: Installed Base and Compatibility: Innovation, Product Preannouncements, and Predation, *The American Economic Review*, Vol.76, No.5, pp.940–955 (1986).
- 9) Katz, M.L. and Shapiro, C.: Product Introduction with Network Externalities, *The Journal of Industrial Economics*, Vol.40, No.1, pp.55–83 (1992).
- 10) Tse, E.: Grabber-holder Dynamics and Network Effects in Technology Innovation, *Journal of Economic Dynamics and Control*, Vol.26, pp.1721–1738 (2002).
- 11) Madden, G., Coble-Neal, G. and Dalzell, B.: A dynamic model of mobile telephony subscription incorporating a network effect, *Telecommunication Policy*, Vol.28, pp.133–144 (2004).
- 12) Economides, N. and Himmelberg, C.: Critical Mass and Network Size with Application to the US FAX Market, Working Paper (1995).
- 13) Shankar, V. and Bayus, B.L.: Network Effects and Competition: An Empirical Analysis of the Home Video Game Industry, *Strategic Management Journal*, Vol.24, pp.375–384 (2003).
- 14) 井庭 崇, 竹中平蔵: マルチエージェントによるバーチャル・マーケットと消費者行動, *進化経済学論集第2集* (1998).
- 15) 山本仁志, 岡田勇, 小林伸睦, 太田敏澄: 音楽ソフト市場における消費者選択の多様性に対する情報チャネル効果: Winner-Take-All 現象への Agent-Based Approach, *Journal of the Japan Society for Management Information*, Vol.11, No.5, pp.37–54 (2002).
- 16) Oda, S.H., Iyori, K., Miura, K. and Ueda, K.: The Application of Cellular Automata to the Consumer's Theory, Simulating the Duopolistic Market, *Simulated Evolution and Learning*, pp.454–461, Springer (1999).
- 17) 川村秀憲, 大内 東: ネットワーク外部性の働く製品市場のモデル化とプレゼント戦略の評価, *日本オペレーションズ・リサーチ学会和文論文誌*, Vol.48, pp.48–65 (2005).
- 18) Ruebeck, C., Stafford, S., Tynan, N., Alpert, W., Ball, G. and Butkevich, B.: Network Externalities and Standardization: A Classroom Demonstration, *Southern Economic Journal*, Vol.69, No.4, pp.1000–1008 (2002).
- 19) Friedman, D. and Sunder, S.: *Experimental Methods: A Primer for Economics*, Cambridge University Press (1994). 秋永利秋, 内木哲也, 川越敏司, 森 徹 (訳): *実験経済学の原理と方法*, 同文館 (1999).
- 20) Fischbacher, U.: z-Tree: Zurich toolbox for ready-made economic experiments, *Experimental Economics*, Vol.10, No.2, pp.171–178 (2007).

- 21) Roth, A.E. and Erev, I.: Learning in Extensive-Form Games: Experimental Data and Simple Dynamic Models in the Intermediate Term, *Games and Economic Behavior*, Vol.8, pp.164–212 (1995).
- 22) Erev, I. and Roth, A.E.: Predicting How People Play Game: Reinforcement Learning in Experimental Games with Unique, Mixed Strategy Equilibria, *American Economic Review*, Vol.88, pp.848–881 (1998).

(平成 19 年 6 月 30 日受付)

(平成 20 年 1 月 8 日採録)



西野 成昭 (正会員)

1976 年生まれ。1999 年神戸大学工学部機械工学科卒業。2001 年同大学大学院博士前期課程修了。2004 年東京大学大学院博士課程修了。現在、東京大学人工物工学研究センター助教。実験経済学やマルチエージェントの手法をもとに社会システムの研究に従事。博士 (工学)。人工知能学会、システム制御情報学会等の会員。



金子 陽平

1981 年生まれ。2005 年東京大学工学部システム創成学科知能社会システムコース卒業。同大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。ゲーム理論によるネットワーク経済の分析等に従事。



小田宗兵衛

1956 年生まれ。1991 年サセックス大学科学政策研究所博士課程修了。1999 年より京都産業大学経済学部教授。多部門動学理論に基づく不比例成長経済学、被験者実験の計算機実験による再現、ゲームにおける人間の思考の論理的表現等に従事。日本経済学会会員。



上田 完次

1946 年生まれ．1972 年大阪大学大学院精密工学専攻修士課程修了．同年神戸大学工学部助手，1980 年金沢大学工学部助教授，1988 年同教授を経て，1990 年神戸大学工学部教授．2002 年 6 月より東京大学人工物工学研究センター教授．創発的シンセシス，共創工学，人工物工学，生物指向型生産システム，人工生命の工学的展開等の研究に従事．工学博士．精密工学会論文賞，計測自動制御学会論文賞等受賞．日本機械学会フェロー，精密工学会，計測自動制御学会，日本ロボット学会，CIRP 等の会員．
