Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-05-23

意思決定主体間の協調的行動創発に関する研究

井寄，幸平

(Degree)
博士（学術）

(Date of Degree)
2003-03-31

(Date of Publication)
2013-04-08

(Resource Type)
doctoral thesis

(Report Number)
甲2805

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1002805

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。

博士論文

意思決定主体間の協調的行動創発に関する研究

平成15年1月

神戸大学大学院自然科学研究科

井寄　幸平

目 次

第 1 章　緒論 **3**
1.1　研究の背景 3
1.1.1　理論によるアプローチ 3
1.1.2　計算機科学的なアプローチ 5
1.1.3　被験者実験によるアプローチ 6
1.2　研究の目的 7
1.3　本論文の構成 7

第 2 章　消費者間の協調行動：セルオートマトンを用いた寡占市場の分析 **8**
2.1　緒言 8
2.2　セルオートマトンと市場モデル 8
2.3　ネットワーク外部性を導入した消費者の意思決定モデル 10
2.4　計算機実験における寡占市場のモデル 11
2.5　計算機実験結果 13
2.5.1　製品価格が変化しない場合 1：$\theta = 0$ の場合 13
2.5.2　製品価格が変化しない場合 2：$\theta = 0.02$ の場合 17
2.5.3　2 製品の価格が製品によって変化する場合 20
2.6　考察 22
2.7　結言 23

第 3 章　企業間の協調行動：ベルトラン競争モデルを用いた価格競争の分析 **24**
3.1　緒言 24
3.2　マーケットマイクロストラクチャー理論とベルトラン競争モデル . 25
3.3　被験者実験 29
3.3.1　被験者実験のモデル 29
3.3.2　被験者実験の概要 30
3.3.3　被験者実験の結果 32
3.4　考察 55
3.5　結言 56

第 4 章　行動主体間の協調行動：ネットワーク型囚人のジレンマを用いた協調行動の創発　57
4.1　緒言　. 57
4.2　ネットワーク型囚人のジレンマ　. 58
4.3　被験者実験　. 60
4.3.1　被験者実験の概要　. 60
4.3.2　被験者実験の結果　. 63
4.4　計算機実験　. 71
4.4.1　プレイヤの行動のモデル化　. 71
4.4.2　計算機実験の手順　. 73
4.4.3　計算機実験結果　. 74
4.5　考察　. 77
4.6　結言　. 78

第 5 章　結論　79

付録 A: ベルトラン競争実験での実験説明書　87

付録 B: ネットワーク型囚人のジレンマ実験での実験説明書　102

第1章　緒論

1.1　研究の背景

システムを構成する意思決定主体は，単体のみで意思決定を行っているわけではない．互いに相互作用を行って影響を与えあい，その行動を変化させていく．人工システムや社会システムでしばしば見られる全体の複雑な挙動はこれらの意思決定主体の相互作用の結果として生み出されたものと考えられる．このような現象は「創発」という概念で捉えることができる．本研究における創発とは,「要素間の局所的な相互作用により大域的挙動が現れ，その大域的挙動が要素の振る舞いを拘束するという双方向の動的過程を通して，新しい機能や形質，行動を示す秩序が形成されること」[34, 41, 52] と定義される．本研究では意思決定主体間に創発する現象のうち，特に「協調的行動」に着目する．意思決定主体間の協調的行動は，システム全体に大きな影響を与える．例えば複数のロボットが構成するような人工システムにおいて，効率的に目的を達成するにはロボット同士の協調が非常に有効であるし，経済システムにおける消費者や企業の協調的行動（口コミによる製品の普及や企業による価格協定など）は経済システム全体の挙動を大きく変化させるものである．このような意思決定主体の行動を理解し，記述するには様々なアプローチがある．

1.1.1　理論によるアプローチ

理論によるアプローチは，個々の意思決定主体の行動規則を定式化し，解析的あるいは数値的に解を求めようとするものである．意思決定主体のうち，人間の社会的関係と合理的意思決定を定式化したものとしてゲーム理論がある．ゲーム理論は，Von Newmann と Morgenstern によって提唱され [35]，Harsanyi，Selten，Nash らによって現在の形へと拡張されてきた [18] 相互連関的意思決定理論である．ゲーム理論におけるゲームはプレイヤ（すなわち独立した意思決定主体），ルール，結果，利得の 4 つの要素で構成される．各プレイヤはルールに応じて行動を決定し，全員の意思決定の結果としてルールに定められた利得を得る．複数のプレイヤが意思決定を行う場合，あるプレイヤの利得は自分自身の行動だけでなく，

他のプレイヤの行動に依存する．よって，他のプレイヤとの相互関係や依存性を予測した上で意思決定を行うことがきわめて重要となる．ゲーム理論において各プレイヤの合理的意思決定の結果を説明する概念としてもっとも有名なのは「ナッシュ均衡」の概念である．ナッシュ均衡とは,「他のプレイヤがとる戦略を前提に考えた時に自分が最適な戦略をとっている」 [48] 状態であり，ナッシュ均衡にある場合に自分だけが戦略を変えても得をすることがない状態である．ゲーム理論とナッシュ均衡概念は，合理的な意思決定主体の相互作用とその結果あらわれる安定的な状態の記述と分析のために広く応用されている．

人間の意思決定過程を理解し，適切にモデルとして記述するためには経済理論や社会科学の知見を取り入れることが有益である．しかし，従来の経済理論は本研究で対象としている個々の主体の意思決定やその相互作用を記述するには不十分なことが多い．マクロ経済理論はシステム全体の挙動や傾向を記述することはできるが，個々の主体の行動やその変化が全体に及ぼす影響などは記述しにくい．ミクロ経済的な手法は個々の意思決定主体をモデル化しているが，その相互作用については充分なモデル化がなされているとは言い難い．例えば消費者理論において，消費者の意思決定は消費者個人の嗜好や効用に基づいて行われるというモデル化が一般的である．しかし実際には消費者は多くの情報に接し，他の消費者や販売を担う企業と相互作用しながら意思決定を行っている．また，新古典派経済学では，市場での価格は需要と供給の一致によって決定される（ワルラス均衡）とされている．つまり消費側と供給側の相互作用によって価格や取引数量が決定されるというモデルではあるが，実際に価格と数量を一致させるという作業は単に市場の作用として説明され，市場の外に無償で行動する仮想的なオークショニアを置くというモデルを用いている．しかし，実際に価格設定や取引数量の調節という作業を行っているのは市場内に存在する何らかの意思決定主体であり，仮想的なオークショニアとは異なり自身の利益を増大させるための行動を行っていると考えられる．このような問題点に対して提案されたのがマーケットマイクロストラクチャー理論である．

マーケットマイクロストイラクチャー理論は市場システム内の取引制度や規制の枠内でミクロな主体が行う合理的行動の積み重ねとしての価格の決定や市場均衡を扱う理論であり，主に金融の分野で発展してきた [42]．Spullber [32] はこのモデルを製品市場に応用し，需要と供給を一致させる存在としてのオークショニアを企業の役割として市場に内在化した．この理論により，従来明確でなかった「需要と供給の一致」を担う意思決定主体が明確にモデル化され，企業の意思決定過程を消費者と供給者の仲介による利益の最大化として明示化できることとなった．

これらの理論的アプローチは意思決定主体の行動規則の定式化や分析に非常に重要な基礎を与えるが，いくつかの問題点がある．第 1 に，定式化された意思決

定主体の行動を分析する場合，比較的単純な場合には解析も充分に可能で明確であるが，意思決定主体の行動が複雑になったり大規模なシステムを分析しようとすると現実的に解を得られないという事態が起こりうる．第 2 に，厳密な定式化による現実からの乖離がある．多くの経済理論が仮定する「完全合理・完全情報」という意思決定主体は，工学で言うならば理想気体や完全流体といった現実には存在しない理想的なモデル化 [5] であり，おおよその挙動を知るための計算は可能であるが必ずしも現実と一致するとは言えない．第 3 に，意思決定主体の行動や相互関係が明確に記述できない場合の取り扱いである．特に現実の社会システムや経済システムなどを対象とする場合，すべてを完全に記述できるとは限らない．このような問題点を越えていこうとする試みとして，近年各分野に急速に広まったのが計算機科学的なアプローチである．

1.1.2 計算機科学的なアプローチ

計算機の性能向上に伴い，意思決定主体の行動の分析に計算機を援用する手法が各分野に急速に広まっている．特に有名なのは Axelrod [2, 3] による囚人のジレンマのトーナメントであろう．これは様々な戦略を持ったエージェントを計算機上に実装し，互いに対戦させて有用な戦略の発見を目指したものであり，その結果「しっぺ返し戦略」（第 1 手で協力しそれ以降は相手の手を真似る）という非常に有効な戦略を発見した．これは計算機科学的なアプローチによって従来の完全合理性の枠組みを越え，また計算の困難さを計算機によって緩和できたがための成果である．さらに近年では，社会システムの複雑な挙動を分析する手法として計算機実験が広く応用されている．これらの手法に共通するのは，均一もしくは単純な複数の意思決定主体とその相互作用をモデル化し，意思決定の結果として創発されるシステム全体の挙動とそのときの初期条件を関連づけて分析しようとするものである．Arthur[1] は限定合理的な意思決定主体を用いて人工的に株式市場を構築する研究を行った．また，Epstein と Axtell[10] は意思決定主体の相互作用を取り入れた人工社会のモデルとして “Sugarspace” を提案している．国内においても TRURL[33]，U-Mart[1] や X-Mart[2] といった人工市場の研究モデルが提案され，社会システム研究のあらたな分野として認知されつつある．これらの計算機科学的なアプローチの利点はいくつかの先行研究で述べられている [5, 50, 51]．が，まとめると以下のようなものが挙げられる．

(1) それぞれの意思決定主体の合理性を限定したり，異なる属性を持たせることが容易である．

[1] http://www.u-mart.econ.kyoto-u.ac.jp/
[2] http://www.carc.aist.go.jp/ kurumata/w-econ.org/sp/

(2) 理論解析では解を得るのが困難な複雑な状況であっても，モデルの実行によって全体の挙動を知ることができる．また，均衡解析などでは最終的に現れる静的な状態しか分からないが，そこに至る動的な過程を観察することができる．

(3) 意思決定主体間の相互作用を明示的にモデルに導入することができ，空間的，時間的なつながりを簡潔にモデル化できる．

しかし，このような計算機科学的アプローチには理論解析や数学的モデリングと比べて重大な問題点がある．それは計算機による実験が示された結果の妥当性や頑健性についての情報をほとんど与えないという点である．数学的解析であれば微分方程式や統計的解析を通じて証明できることであっても，計算機実験がその頑健性を示すには唯一，パラメータや初期条件を変えながらひたすら何度も何度もモデルを実行する以外にない．また，結果の妥当性については和泉 [39] が言うような「ヤッコー（とにかくやってみたらこうなった）」という疑惑が常につきまとう．計算機実験が示す結果と現実社会とを結びつけるには，現実経済における観察から理解を目指す歴史・実証研究と，人工的環境における人間行動を観察して理論化をはかる被験者実験にもとづくアプローチの 2 種類がある．

1.1.3 被験者実験によるアプローチ

現実の人間行動を観察・分析する手法としてあらたに注目を浴びているのが実験経済学 [7, 23, 17] である．従来行われてきた歴史・実証研究は事実の解明として極めて重要であるが，受動的な観察のため，一般的理解を得ることは必ずしも容易ではない．すなわち各事例を完全に知ることは難しい上に，たとえ完全に理解できて「そのときにはそうであった」と断言できても,「もし…ならば…である」という一般的陳述をすることは難しい．これに対して実験には，研究者が調べたい環境で何度でも繰りかえし被験者の行動を観察できるという利点がある．もちろん様々な制約のため実験者が調べたい環境を常に完全に実験室に再現できるとはかぎらないが（たとえば多額の利益あるいは損失を被験者に実際にもたらすかもしれない実験は倫理的にも経済的にも実施できない），研究者が調べたい環境を自分で選び何度でも観察できるという利点は，人間行動の既存理論の検証にも新理論の構築にも有効に活用できる．

この利点を生かして，理論や計算機実験の妥当性を被験者実験によって検証しようとする研究が増えつつある．例えば Erev & Roth [12, 13] や Feltovich [15] は 2 人対戦ゲームを対象に，強化学習を用いておこなった計算機実験の結果と理論が予測するナッシュ均衡解との比較をおこなっている．その結果，固定した利得

構造を持つ繰り返しゲームにおいてはナッシュ均衡解よりも強化学習の方が被験者実験の結果に近いことを示した．理論や計算機実験と現実の人間行動との乖離が問題となる現状において，被験者実験による結果の妥当性や頑健性の検証は今後ますます重要な課題となると考えられる．

1.2 研究の目的

背景で述べた意思決定主体間の協調行動を記述し，現実のシステムにみられる複雑な挙動を分析するには従来の理論モデルだけでなく，意思決定主体間の相互作用を考慮した新しいモデル化やエージェントベースアプローチに基づく計算機実験を行い，さらに実際の人間行動を観察する被験者実験を導入して総合的に対象をモデル化・検証する必要がある．

そこで本研究では，

- 意思決定主体間の相互作用を記述し，システム全体の複雑な挙動を創出する新たなモデルの提案
- 理論解析・計算機実験・被験者実験を用いた提案モデルの分析と検証

を行うことを目的とする．

1.3 本論文の構成

本論文では意思決定主体の協調行動について，(1) 消費者間の協調行動，(2) 企業間の協調行動，の順にモデル化と分析を行う．次に，より自由度の高い行動主体をモデル化し，(3) 行動主体間の協調行動の創発，について計算機実験と被験者実験の両方を行う．

第 2 章では消費者間の相互作用を導入した意思決定モデルを構築し，セルオートマトン法による計算機実験とその結果について述べる．第 3 章ではマーケットマイクロストラクチャー理論を用いて企業を価格設定者としてモデル化し，ベルトラン競争による価格競争と協調行動の過程を分析する．第 4 章では従来の囚人のジレンマに加えて対戦相手の選択が可能である「ネットワーク型囚人のジレンマ」を用いて行動主体の経済活動をモデル化し，被験者実験と計算機実験により分析を行う．最後に第 5 章で結論を述べる．

第2章　消費者間の協調行動：セルオートマトンを用いた寡占市場の分析

2.1　緒言

本章では消費者間の協調行動をセルオートマトン法 [36, 37] を用いてモデル化し，寡占市場における製品普及過程を分析する．

消費者間の協調行動のうち，特に他者とのコミュニケーションを通して発生する口コミ等の影響に着目する．便益や効果を事前に評価するのが困難な財やサービス（コンピュータなど技術的な知識を要する製品や，服飾品のように流行に左右される製品）の購買において，知人や販売業者からの情報が重要な役割を果たすことがある．現実社会において，特定の商品が爆発的に普及したり，逆に急速に衰退するなどの現象には消費者間のコミュニケーションの影響が少なからず存在していると考えられる．このように，消費者が意思決定において他者から影響を受けることを「ネットワーク外部性」と呼ぶ．本章では消費者間のコミュニケーションをセルオートマトン法によってモデル化し，消費者個人の意思決定に他者からの影響を導入する．従来の消費者理論では個人の意志決定は個人の嗜好に基づくとすることが多い [9, 47] が，他者からの影響を明確にモデル化することによって市場の複雑な挙動を再現するモデルの構築を目指す．

2.2　セルオートマトンと市場モデル

セルオートマトン（Cellular Automata）とは，時間経過（時刻）・空間位置・状態などが離散的に表現されるセル（格子）を多次元状に接続して構成されるシステムである．ある時刻におけるシステムに属するセルの状態は，そのセルが隣接しているセルの状態に依存して定まる．その状態変化はあらかじめ遷移関数として与えられており，セルが取り得る状態も所与のものである．しかしこの単純なシステムは非常に複雑な振る舞いを示す．

Wolfram [36] によれば，セルオートマトンの特徴は以下のように表される．

(1) 空間的に離散である．

(2) 時間的に離散である．

(3) 有限の遷移状態をとる．

(4) 状態の更新は同期して行われる．

(5) 各セルに適用される規則は決定論的に定められている．

(6) 各セルに適用される規則は空間的に局所的である，すなわち状態遷移はそのセルの近傍のセルの状態にのみ依存する．

(7) 各セルに適用される規則は時間的に局所的である，すなわち先行する固定時間ステップ（通常は 1 ステップ）の状態にのみ依存する．

また，Wolfram はセルオートマトンの振る舞いは次の 4 種類：

- クラス 1 - 収束する系
- クラス 2 - 周期的な系
- クラス 3 - カオス系
- クラス 4 - 複雑系

に分類できるとしている．Langton [22] はその中のクラス 4（複雑な系）がカオスの辺縁（edge of chaos），すなわちカオスと周期的な系の境目で出現することを示した．

この複雑性により，セルオートマトンは複雑で予測の困難なシステムの挙動を研究する手法として，社会科学，自然科学を問わず広まっている．

本章では「市場」という複雑な挙動をとるシステムをセルオートマトンを用いて表現する．それぞれのセルを消費者と考え，セルの状態は消費者が購入し使用している製品とする．前節で「他者からの影響」を消費者の周囲で特定の製品が使用されている割合として定義したが，セルオートマトンを用いて他者の影響をモデルに導入することが出来ると考える．各セルは有限数の状態をとることが出来るが，本研究では 2 種類の状態を仮定する．すなわち，セルオートマトンによって表現される仮想市場に 2 種類の製品が存在し，各セル即ち消費者が周囲の影響を受けながら購入・使用する製品を決定してゆくシステムを構築できる．ただし，

セルオートマトンのみでは「消費者の経験」がモデルに取り入れられていない．そこで，セルオートマトンの各セルに過去の状態を有限個記憶させ，その情報を状態遷移の際に使用するものとする．本研究では過去の状態（すなわち使用した製品）の種類と回数を記憶させる．これによって各セル（消費者）は他者の影響に加えて自律的な選択を行うことが可能であり，各セルはシステム内の自律要素（エージェント）としても定義される．このようにセルオートマトンに各セルの自律性を導入したモデルは “Sugar Space” [10] として多くの応用研究がある．本研究ではこの手法を用いて仮想的な寡占市場を構築し，セルの状態遷移を規定する規則を与えてその挙動を観察する．

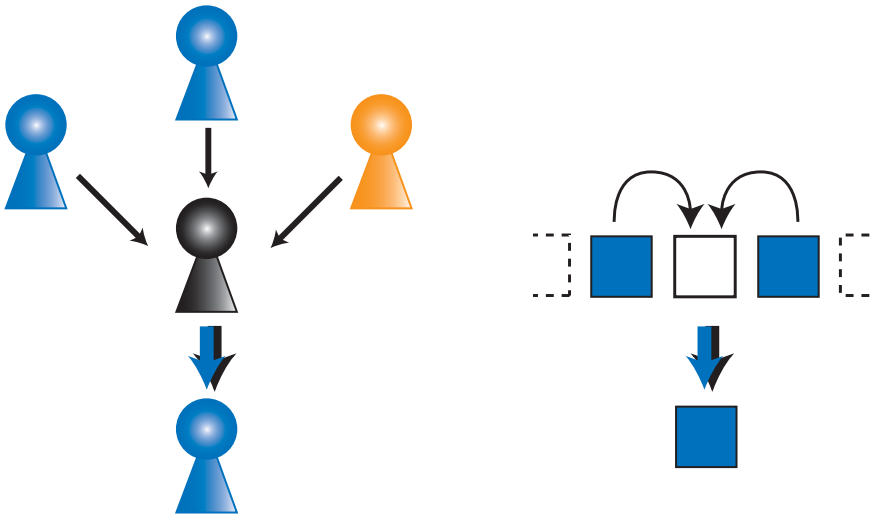


Figure 2.1: Cellular Automata model

2.3 ネットワーク外部性を導入した消費者の意思決定モデル

消費者の意思決定の行動原理として「欲求充足最大化」仮説がある [47]．消費者の消費活動の目的は欲求の充足，いわば満足度の最大化となり，その欲求充足の程度を「効用」と呼ぶ．本章でも消費者は欲求充足最大化，即ち効用最大化を目的として行動するものと考える．効用の大きさを決定する要因には消費者の心理状態や嗜好，消費財の数量など様々なものが考えられる．

効用は嗜好など消費者個人の評価基準において定義されることが多いが，本研究では他の消費者の選択から受ける影響を効用に導入する．他者からの影響は「ネッ

トワーク外部性」と呼ばれ，ある種の製品選択においては非常に重要な役割を果たす [21, 25]．ここでは消費者が購入する財（製品）を計算機のオペレーティング・システムと仮定する．このような製品の消費者にとっての評価基準として「過去に特定の製品をどれだけ使用していたか」や「自身の周囲でどれだけの消費者が特定の製品を使用しているか」が考えられる．前者は消費者の「経験・学習」を表す．計算機では特定の製品を使用することで知識や技術が向上し，製品を使用することで得られる効用も増加すると考えられる．これは消費者の個人的基準に従って評価されるものである．後者は本研究で導入する「ネットワーク外部性」である．自身の周囲に特定の製品を使用している消費者が多数存在すれば自ずとその製品に対する知識が多く得られる．また，計算機のような製品ではデータやプログラムの交換・共有が容易であること，トラブルへ対処の利便性などから自身の周囲で多く使われている製品への評価が高くなると考えられる．

本研究における消費者の効用は上述の「消費者の経験」と「他者からの影響」の和として製品の評価価格 (Reservation Price) を決定し，実際の製品価格との差を計算することで得られる．効用最大化仮説より，消費者は複数の製品に対する効用を比較して最大の効用を得られる行動をとるものとする．

2.4 計算機実験における寡占市場のモデル

M^2 人の消費者が存在する仮想社会を考える．各消費者はそれぞれ計算機を所有し，2 種類のオペレーティング・システム（OS）を使用する事が出来る．一つの OS を使用するためにはその OS を供給している企業と各期間 t において新規もしくは継続の契約をしなければならない．ここで，消費者 m が企業 n と契約を交わす場合に $X(m,n,t)=1$ であると定義する．また，消費者 m が期間 t において計算機を使用することによって得られる効用を

$$U(m,t) = \max_{n\in(1,2)} (X(m,n,t)U(m,n,t) + \alpha X(m,3-n,t)U(m,3-n,t)) \quad (2.1)$$

とする．ここで α は（$0 \leq \alpha < 1$）の定数とし，2 つの OS を同時に使用する場合でもその効用は 1 種類の OS を使用する場合の 2 倍にはならない．

また，OSn を使用することによって消費者が得る効用 $U(m,n,t)$ を以下のように定義する．

$$U(m,n,t) = U_{min} + \theta(U_{max} - U_{min})L(m,n,t) + (1-\theta)(U_{max} - U_{min})N(m,n,t) \quad (2.2)$$

ここでU_{min}，U_{max}，θは所与の定数であり，($0 \leq U_{min} \leq U_{max}$，$0 \leq \theta \leq 1$）とする．$U_{min}$は消費者$m$が計算機を使用することによって得る基本的な効用の値であり，第2項$\theta(U_{max} - U_{min})L(m,n,t)$は消費者の使用経験による学習効果の影響を表す．すなわち消費者は，特定のOSを長く使用することによってさらに高い効用を得ることが出来るようになる．$L(m,n,t)$は消費者mがOSnを使用する経験値を表す項であり，以下のように定義する．

$$L(m,n,t) \begin{cases} = L(m,n,0) & \text{for } t = 0 \\ = \lambda \sum_{k=1}^{t} (1-\lambda)^k \max(X(m,n,t-k), \beta X(m,3-n,t-k)) & \text{for } t \geq 1 \end{cases} \tag{2.3}$$

λとβはそれぞれ所与の定数であり，($0 \leq \lambda \leq 1$，$0 \leq \beta \leq 1$）とする．また$L(m,n,0)$は$0 \leq L(m,n,0) \leq 1$で与えられる初期値である．λはある特定のOSを使用する技能の向上速度を表す重みであり，βはあるOSを使用した経験をβだけ他のOSを使用する技能に転用できることを示す．すなわち，あるOSを使い慣れていればそれ以外のOSにもその技能をある程度転用でき，高い効用が得られるということになる．

第3項$(1-\theta)(U_{max} - U_{min})N(m,n,t)$は「ネットワーク外部性」の影響を表す項であり，項$N(m,n,t)$は次のように定義される．

$$N(m,n,t) = \frac{\sum_{i \in \Omega(m)} \max(X(i,n,t), \gamma X(i,3-n,t))}{|\Omega(m)|}. \tag{2.4}$$

ここでγは所与の定数（$0 \leq \gamma \leq 1$），$\Omega(m)$は消費者mの仮想的な近傍に位置する消費者の集団であり，以下のように定める．

$$\Omega(m) = \{\text{Consumer } i | \text{dis}(i,m) < r\} \tag{2.5}$$

ここでRは所与の定数（$1 < R$）であり，消費者mの近傍の範囲として定められる．

各消費者は以上から導出される効用と製品の価格を比較して購入の是非を決定するものとし，価格は以下のように定める．

$$C(m,t) = X(m,1,t)P_1 + X(m,2,t)P_2 \tag{2.6}$$

ここでP_nは所与の定数とする場合と，付近の製品使用者数に応じて変化する場合とを考えるものとする．

$$P_n \begin{cases} = \text{const} \\ or \\ = P(m,n,t) \end{cases} \tag{2.7}$$

また，$P(m,n,t)$ は以下のように定める．

$$P(m,n,t) = Q(n,t) + R(m,n,t) \tag{2.8}$$

ここで

$$Q(n,t) = Q_{n\min} + (Q_{n\max} - Q_{n\min})x(n,t) \tag{2.9}$$

$$R(m,n,t) = R_{n\min} + (R_{n\max} - R_{n\min})y(m,n,t) \tag{2.10}$$

$$x(n,t) = rZ(n,t) + \frac{x(n,t)}{1+r} \tag{2.11}$$

$$y(m,n,t) = rW(m,n,t) + \frac{y(m,n,t)}{1+r} \tag{2.12}$$

とする．$Q_{n\max}$，$Q_{n\min}$，$R_{n\max}$，$R_{n\min}$，r はそれぞれ所与の定数である．$Z(n,t)$ は全消費者に対する OSn の使用者数の割合であり，$W(m,n,t)$ は消費者 m の近傍 $\Omega(m)$ における OSn の使用者数の割合である．

すなわち，消費者 m は時刻 t において

$$V(m,n,t) = U(m,t) - C(m,t) \tag{2.13}$$

を計算し，$V(m,n,t)$ の値を最も大きくするような $X(m,1,t)$ と $X(m,2,t)$ の組み合わせを選択する．

2.5 計算機実験結果

計算機実験の結果を以下に示す．計算機実験では $N(m,n,t)$ を 1 期間前のネットワーク外部性の値 $N(m,n,t-1)$ とする．即ち各消費者は自分の周囲に存在する消費者に対し，ある時刻で使用している製品を次の時刻においても使用していると仮定している．また，OSn の初期使用者数（計算機実験開始時点での OSn の使用人数）を I_n で表す．

各実験について共通となる初期条件は以下の通りである．$M = 50$，$r = 2$，$U_{min} = 0.2$，$U_{max} = 0.4$，$\alpha = \beta = \gamma = 0$，$\lambda = 0.5$，$L(m,n,0) = 0.5$．

2.5.1 製品価格が変化しない場合 1：$\theta = 0$ の場合

はじめに製品価格が固定されており，変化しない場合の実験結果を示す．図中の四角い領域が仮想的な市場となる．図中において黒点で表されるセルは OS1 を，

灰点で表されるセルは OS2 を使用している消費者である. 各例の上段は計算機実験過程の様子の画面写真, 下段は計算機実験時の両製品の使用者数を示したグラフである.

Example1，2 は市場に 1 種類の製品のみが存在する場合の実験結果である．また，$\theta = 0$ すなわち消費者の経験を考慮せずに他者からの影響のみが効用に作用するとしている．製品の初期使用者数は Example1 と Example2 でわずかに Example2 の方が多く設定されている．

図より Example1 では製品使用者が実験開始直後に市場から姿を消している．これは初期使用者数が少ない為にネットワーク外部性の影響が小さく，コストを支払って製品を購入するよりも製品を使用しない方が効用が高くなる為と考えられる．しかし初期使用者数をわずかに増加させると（Example 2）製品は徐々に普及し，最終的には全消費者が製品を使用するようになる．実験の結果，十分長い期間が経過した後は全消費者が製品を使用するか，どの消費者も製品を使用しないかのいずれかに収束する．即ち，初期状態のほんのわずかな違いが最終的な市場の状態を大きく変化させることが観察された.

次に，市場に競合する 2 種類の製品が存在する寡占市場について実験を行う．Example3，4，5 は市場が寡占状態である場合の実験結果であり，Example 1，2 と同じく消費者の経験に基づく効用の変化は考慮しない．実験において OS1 の初期使用者数は Example3，4，5 に関して同じであり，OS2 の初期使用者数のみを Example 3，4，5 の順にわずかずつ増加させている．製品の初期使用者数以外の条件はそれぞれの例について共通である.

Example3 より，OS2 の初期使用者数が少ない場合には OS1 が最終的に市場を独占している．これは使用者が少ない OS2 よりも使用者の多い OS1 の方が高い効用を得られる為と考えられる．Example4 は OS2 の初期使用者数を Example3 よりわずかに増加させた場合の結果である．この場合，2 種類の製品がどちらも同様の普及過程を示していることがグラフより読みとれる．しかし約 30 期間経過した後，OS1 の使用者数は減少し始める．これは，OS1 を使用していた消費者が自分の周囲で OS2 が多く使用されていることの影響を受けて OS2 へと使用する製品を変更する為である．十分長い期間が経過すると両製品が市場に占める使用率は安定し，それ以降は変化しない．これは周囲の消費者から受ける影響力が均衡し，それ以上の変化が起こらない為である.

さらに OS2 の使用者数を増加させた実験（Example 5）では，Example 3 とは逆に OS2 が市場を独占する状態が発生する．グラフより，実験途中の製品普及過程は Example 4 と類似しているが，Example 4 では OS1 が市場に生き残るのに対して Example5 では OS1 は市場から姿を消してしまう．これは OS2 の初期使用者数が増加したことで OS2 の使用者が周囲に与える影響が強化され，OS1 を使用

している消費者により強く選択の変更を促した為である．Example 4，5 に関して実験を観察している限りでは同様の経過を示すが，最終的な市場の状態は全く異なっている．

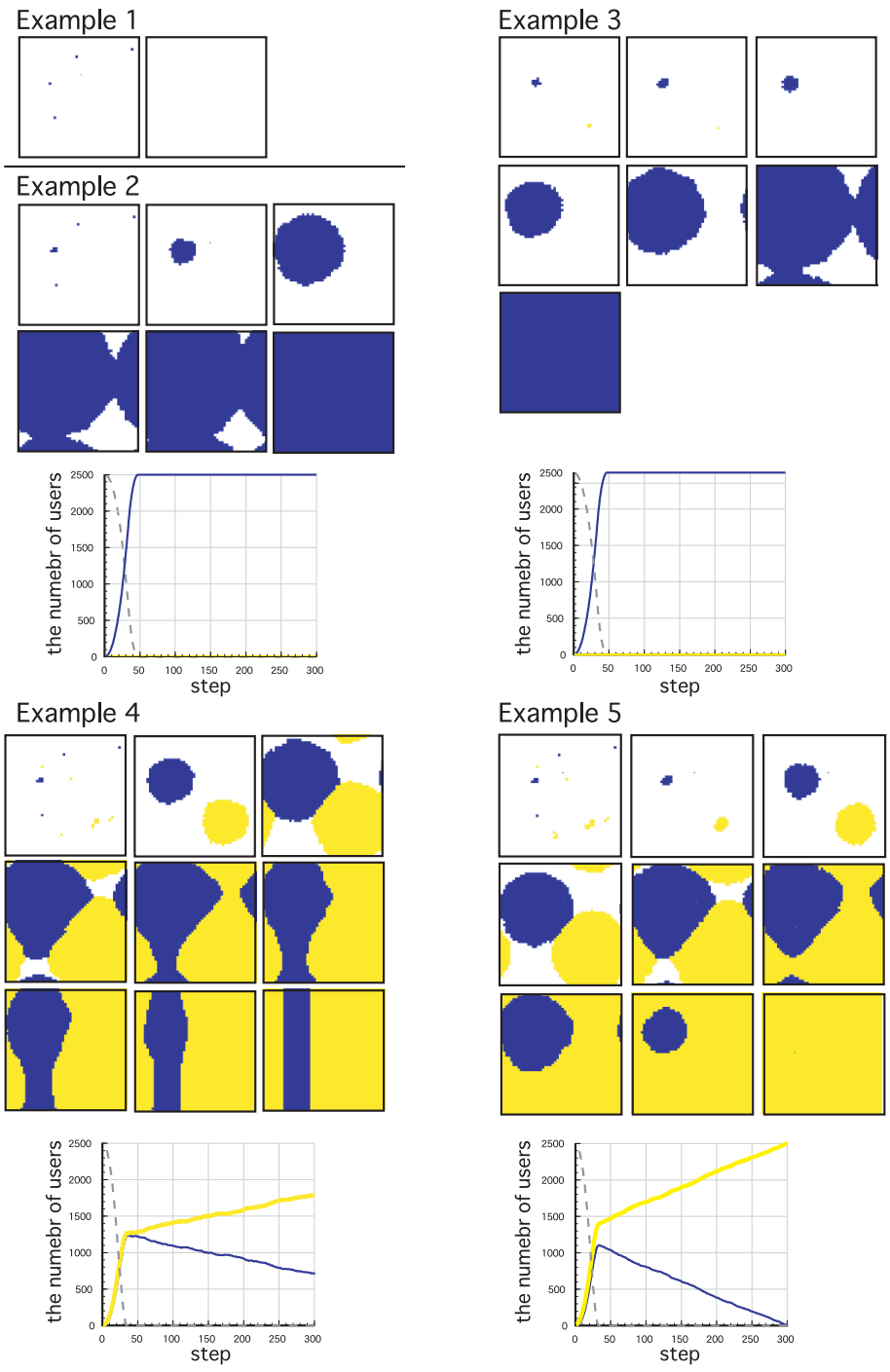


Figure 2.2: Results of simulations ($\theta = 0$)

2.5.2　製品価格が変化しない場合 2：$\theta = 0.02$ の場合

次に，消費者の製品使用経験が効用に影響する場合について実験を行う．Example 6 から Example 10 については $\theta = 0.02$ とする．これにより消費者は特定の製品を使用し続けることでその製品に対する効用が上昇する．以下では Example 1 から Example 5 にそれぞれ対応する実験を行い，その結果を比較する．

Example 6，Example 7 は Example 1，Example 2 にそれぞれ対応する結果である．市場には 1 種類の製品のみが存在するとし，消費者の経験による効用の増加が製品の普及にどう影響するかを観察する．Example 6 において，初期使用者数は Example 1 と共通である．Example 1 では初期製品使用者が少なかった為に製品が普及することなく市場から姿を消してしまっていたが，経験による効用の上昇を取り入れるとわずかではあるが製品を使用し続ける消費者が現れる．実験開始後の数期間で製品を使用し続けることを選択した消費者は，その製品使用経験によって効用が上昇し，十分長い期間を経ても同じ製品を使用し続けている．

Example 7 の結果は Example 2 とほぼ同じものである．製品の普及する様子，使用者数の増加過程を見ても大きな差異は観察されない．よって，製品が 1 種類である場合，製品の使用経験が効用に与える影響は製品の普及速度については関与していないと言える．

Example 8 から Example 10 はそれぞれ Example 3 から Example 5 に対応する結果である．市場には 2 種類の競合する製品が存在し，消費者の使用経験が製品普及にどのような影響を与えるかを観察する．

Example 8 は OS1 が市場を占有する場合の実験結果である．実験の過程は Example 3 と比較して大きな違いは見られないが，この場合の OS1 の初期使用者数は Example 3 の場合よりも若干多く設定されている．Example 3 と初期条件で実験を行った場合は十分な期間が経過した後も OS2 を使用する消費者が市場にわずかであるが存在する．つまり，経験による効用の上昇を考慮に入れれば寡占状態が発生することが多くなり，市場を独占するためにはより多くの初期使用者が必要である．

Example 9 は最終的に寡占状態が発生する場合の例である．両製品の初期使用者数は Example 4 と共通であるが，製品の普及過程は大きく異なっていることが観察される．これは，Example 4 では実験開始直後に一旦製品の使用をやめ，製品が普及するに従ってまた使用を再開した消費者が比較的多く存在するのに対して Example 9 の場合では初期状態で製品を使用していた消費者がそのまま長く製品を使用し続ける為に起こると考えられる．経験による効用の増加を考えない場合では，ある程度使用者が集中している場所から徐々に周囲へと普及していく．それ以外は初期状態で製品を使用していても十分な効用が得られず，一旦製品の使用を停止する．しかし経験によって効用が上昇する場合，製品の使用を中断する

ことなく使い続ける場合が多くなり，かつそういった消費者が周囲の消費者に影響を与える為に製品の普及過程が複雑になる．また，グラフより両製品の使用者数は増加した後安定しており，Example 4 で見られたように途中から減少していない．つまり一旦特定の製品を使用し始めた消費者はあまり製品を変更しないことがうかがわれる．

Example 10 は OS2 が市場を占有する場合の結果である．図からも見て取れるように，OS2 の初期使用者数は Example 5 に比べてかなり多く設定されている．Example 8 の場合と同様，製品の使用経験によって効用が上昇することから市場の独占を行う為にはより多くの初期使用者数が必要となることが確認された．

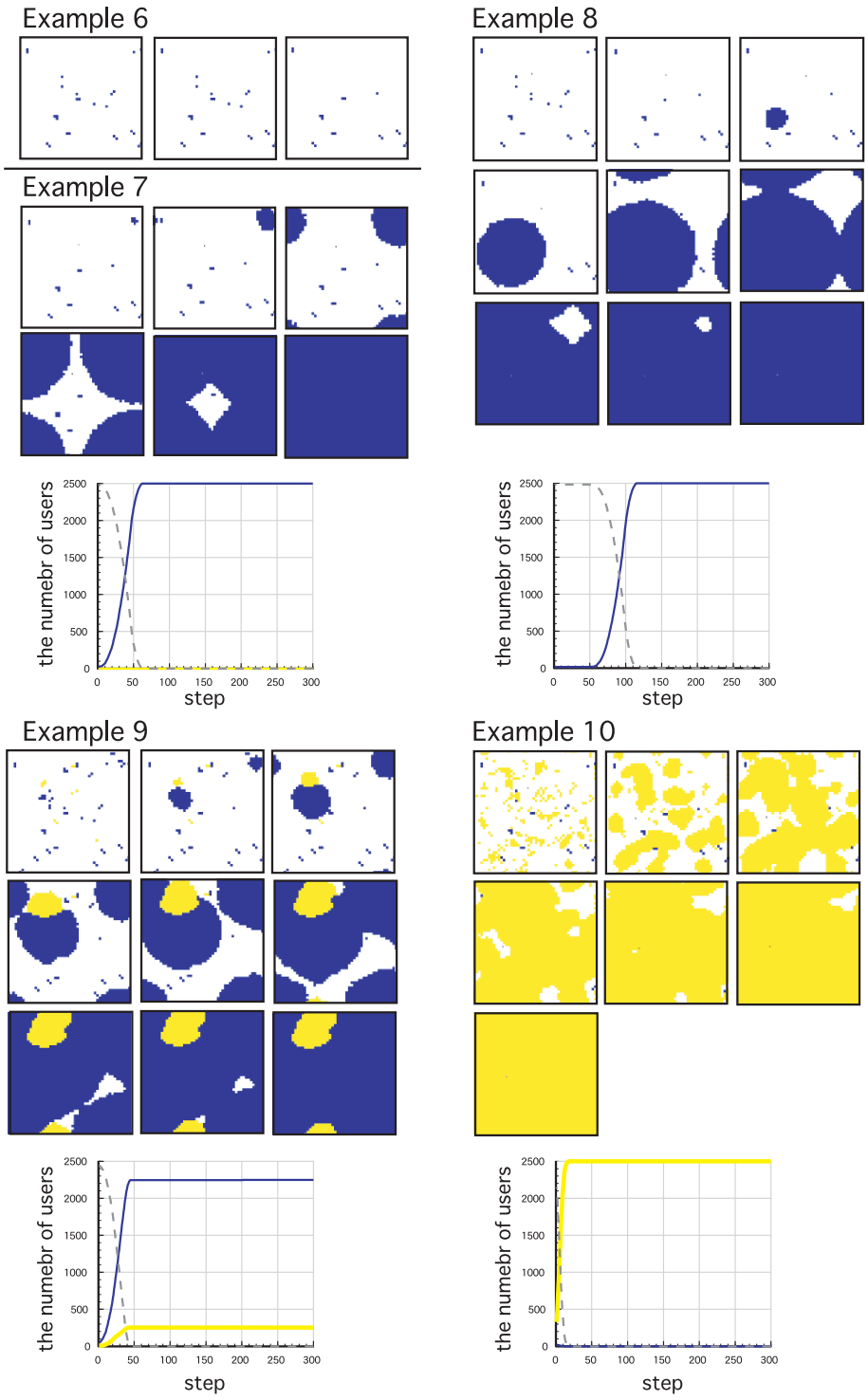


Figure 2.3: Results of simulations 2 ($\theta = 0.02$)

2.5.3　2 製品の価格が製品によって変化する場合

消費者の購買決定には製品の価格が大きく関与している．これまで製品の価格は一定として実験を行って来たが，ここでは製品の価格が一定の範囲内で変化する場合を考える．この場合の価格は (2.8) 式で定義されるものである．また $Q_{n\max} = Q_{n\max} = 0.15$，$R_{n\max} = R + a$，$R_{n\min} = R - a$ とし，$R = 0.1$ として価格の変化幅 a の違いが市場にどのように影響するかを観察する．

Example 11 は $a = 0$，すなわち価格が一定の場合の実験である．製品の初期使用者数は最終的に市場が寡占状態になるよう設定されている．以下の実験では初期使用者数をこの実験と同じに設定して a の値のみを変化させている．

Example 12 は $a = 0.03$ の場合の実験結果である．最終的に市場は寡占状態となり両製品の使用者数もほぼ同じ値となって変化しない．しかし図に見られるように製品の使用者数が収束した後でも製品を使用している消費者は変化している．図中の帯状の部分が移動するように変化しており，すなわちある製品を使用している消費者は一定の周期で使用する製品を変更している．これは他の消費者から受ける影響と価格変化によって製品に対する効用が周期的に変化する為である．

Example 13 は $a = 0.04$ の場合である．図より市場の挙動が複雑になり，非常に長い期間が経過しても完全に収束することがなかった．Example 12 と同様に，長い期間を経た後は消費者が周期的に使用する製品を変化させる様子が分かるが，完全に周期的にはならない．価格変化の幅をわずかに大きくとることによって他の消費者の選択が周囲に影響を与える割合が大きくかつ複雑になり，このような結果になったと考えられる．

Example 14 は $R = 0.09$ の場合である．製品の価格変化の幅が大きく，消費者の選択が周囲に与える影響もより大きくなる．図より，市場の挙動は複雑で予測が困難な状態になっており，製品使用者数も大幅に変化する．長期間経過した後でも安定した挙動は観察されず，変動し続ける結果となった．

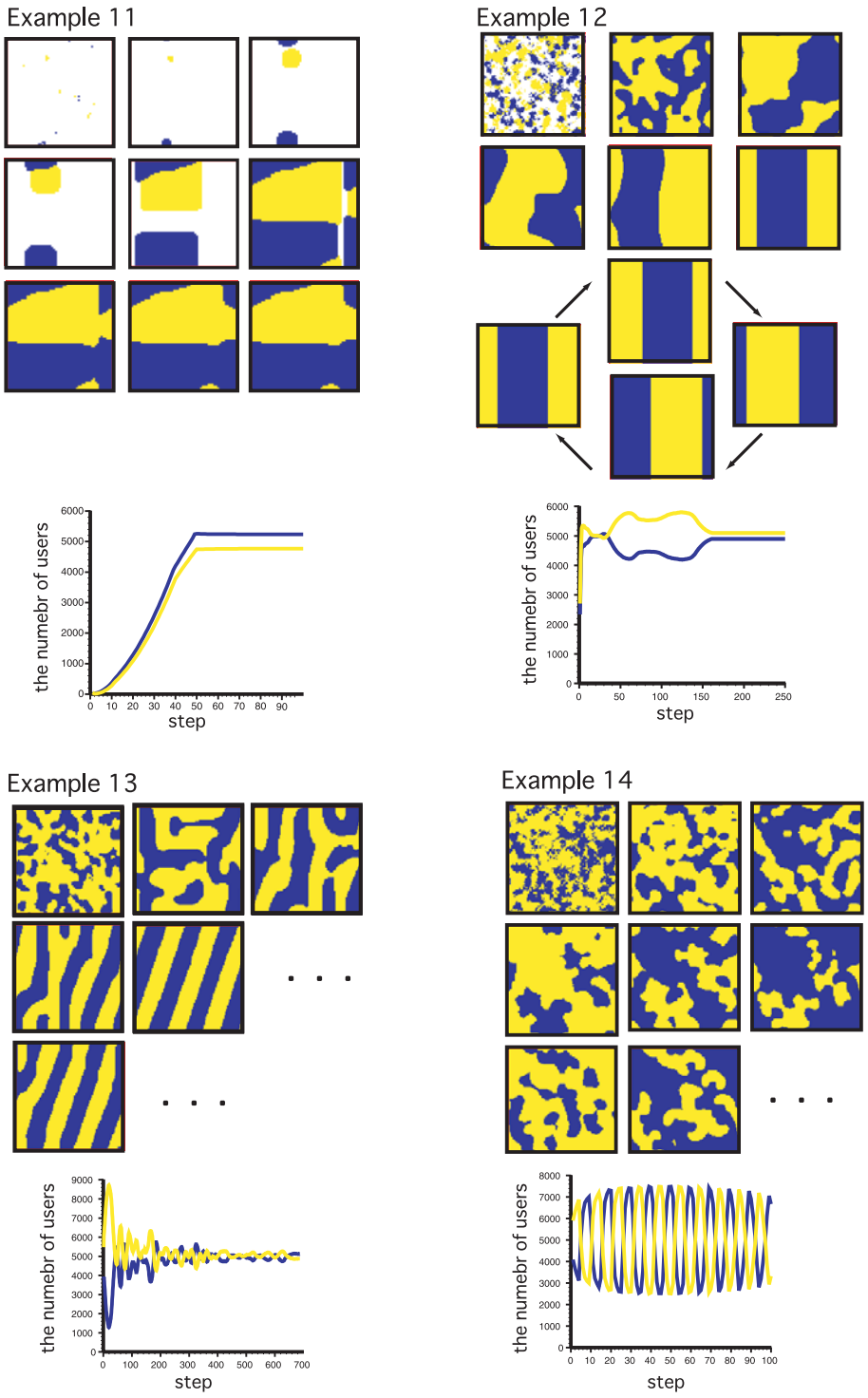


Figure 2.4: Results of simulatinons 3 (Cases where the price of products changes)

2.6 考察

計算機実験により，初期条件の変化が消費者の選択や市場の状態，製品の普及過程に及ぼす影響を観察した．Example 1 と Example 2 では市場に 1 種類の製品のみが存在する場合，製品が市場に普及するためには初期使用者数がある一定の値以上でなければならないことが示された．初期使用者はイノベータ（新しい物を好み新製品導入に伴うリスクを厭わない者）やモニター使用者等が考えられる．販売開始時点においてどれだけの使用者を確保することができるかが製品の普及に大きな影響を及ぼしていると言える．また，実験結果では製品が市場全てを独占する場合と全く使用されなくなる場合の両極端の結果しか観察されなかった．消費者の効用関数をはじめ，各パラメータは計算機実験途中で変化しないにも関わらず製品の急速な普及と衰退が確認された．初期条件のわずかな違いが最終的な結果を大きく変化させる現象は「バタフライ効果」と呼ばれている．

Example 3 から Example 5 では競合する 2 種類の製品が市場に存在する場合の製品普及過程を観察さした．ここでも製品の初期使用者数が最終的な市場の状態を大きく変化させていることが確認された．ネットワーク外部性によって，ある程度の使用者を獲得した製品の普及は推進されるが，競合製品が存在する場合にはいずれかの製品が独占状態を形成することが多く，寡占状態に収束するのは希である．以上より，ネットワーク外部性を考慮した場合の製品普及には初期使用者の数が決定的な影響を与えていると言える．

Example 6 から Example 10 では消費者の製品使用経験が効用に与える影響を考慮して実験を行った．実験結果より製品の使用経験に伴う効用の上昇が市場に特定の製品を生き残りやすくしていることが観察された．初期使用者数が少ない場合でも市場から駆逐されることなく製品が使用されている場合が観察されることから，製品の使用経験が少数派の製品を支えていると言える．実際の市場においても少数派の製品を頑なに使用している消費者は存在するが，製品の使用経験に伴ってその製品に対する効用が高くなっていることがその一因と考えられる．

以上の実験は製品の価格が一定かつ両製品について同じと仮定して行った．しかし製品の価格は需要と供給の関係で動的に変化する場合も多く，また価格は消費者の購買決定の大きな要因である．Example 11 から Example 14 では製品の価格が局所的に異なると考えて実験を行った．ある消費者の周囲で使用されている製品の割合が高いほど価格は低くなり，逆に使用されていない製品の価格は高くなる．実験では製品価格がある範囲内で変化するとし，価格の変動範囲を変えてその影響を調べた．実験結果より市場の挙動が価格変化の幅によって多様に変化することが確認された．価格が変化することによって消費者の選択は一定の場合から周期的，さらに複雑な状態へと遷移した．価格の変動幅が大きいほど消費者

の選択は複雑となり，予測も困難となる．実際の市場では他に様々な要因が絡み合って複雑な挙動を生み出していると考えられるが，その要因の一つとして価格の変動が大きな影響を与えていると思われる．

2.7 結言

本章ではセルオートマトン法を用いて消費者間の協調行動をモデル化し，寡占市場における製品普及過程を計算機実験によって分析した．ネットワーク外部性，すなわち他者からの影響を明確に消費者の意思決定モデルに導入することで，市場における製品の急速な普及や衰退，価格変化にともなう製品シェアの複雑な変動などが観察された．今後は対象とする製品や市場の特徴を適切にモデルに導入するなどの方法を用いて現実市場における製品普及や新製品の販売予測などに本章で用いたセルオートマトンモデルが応用できると考えている．

第3章　企業間の協調行動：ベルトラン競争モデルを用いた価格競争の分析

3.1　緒言

本章ではマーケットマイクロストラクチャー理論 [27, 32] に基づいて複占企業をモデル化し，価格戦略における競争と協調について分析する．

企業が独占状態にある場合，その企業は自らの利益を独占するように価格を設定することができるが，複数の企業が存在する場合には価格を下げるなどして競争相手に対抗することが予想される．実際に，家電量販店や外食産業での価格競争は従来の価格からは考えられないほどの安値に達することも多い．一方，同様の機能を持つ製品が異なるメーカーの製品であってもほとんど同じ価格で販売されていることもある．このような価格競争や価格協定を企業の立場から分析するには，まず企業が価格決定者である必要がある．従来の新古典派経済学では，価格は需要と供給の一致によって決定されるもの，としており企業に価格設定の能力はない．そこで，本章ではマーケットマイクロストラクチャー理論において企業が売り手と買い手の仲介業者として取り扱われており，価格設定者であることに着目する．

本章ではまずマーケットマイクロストラクチャー理論に基づいて企業を価格設定者としてモデル化し，2 社の企業がベルトラン競争を行う場合の均衡状態について述べる．次に理論が想定する状況の被験者実験を行い，実際に人間がどのような意思決定を行うのかを分析する．

3.2 マーケットマイクロストラクチャー理論とベルトラン競争モデル

マーケットマイクロストラクチャー理論は，市場システム内の取引制度や規制の枠内でミクロな主体が行う合理的行動の積み重ねとしての価格の決定や市場均衡を扱う理論であり，主に金融の分野で発展してきた [42]．近年では製品市場への応用もめざましく，本研究では Spullber [32] による製品市場の理論に基づいて市場のモデル化を行う．従来の新古典派理論では，価格は需要と供給の一致した点において決定され（ワルラス均衡），需給を一致させる作業を無償で行う存在（オークショニア）の存在が市場の外部に仮定されている．しかし，現実の製品市場において無償で需給の一致という非常に困難な作業をおこなう存在，しかも市場の外にいるとは考えにくい．製品市場のマーケットマイクロストラクチャー理論では企業を売り手と買い手の間の仲介業者として市場に内在化し，利益の最大化という企業の行動原理を明確化した上で価格形成のメカニズムを説明している．本研究ではこの理論に従って企業を売り手と買い手の間の仲介業者かつ価格設定者であるとし，複数の企業がベルトラン競争をおこなっている市場をモデル化する．

ベルトラン競争は複数の企業の価格競争をモデル化したものであり，もっとも基本的なモデル化は winner-take-all と equall-sharing である．すなわち，複数の企業のうちで価格競争にうち勝った者がすべての売り上げを独占するという仮定と，もし複数の企業が同じ価格を設定した場合にはその価格での配分量を等しく分け合うという仮定に基づいたものである．

以下に本研究で用いる複占市場のモデルとその均衡解析について述べる．

まず，市場に同質の製品を扱う 2 社の企業が存在するとする．企業はそれぞれ売り手（サプライヤ）から製品を仕入れ，買い手（消費者）に販売することで利益を得る．ここで製品の仕入れ，販売には上述の winner-take-all と equall-sharing の仮定が適用される．取引の流れは以下のようになる．

(1) 企業がサプライヤに同時に仕入れ価格を提示する．高値をつけた企業がその価格での仕入れ量を独占することができる．また，両者が同じ価格を提示した場合にはその価格での仕入れ量を 2 等分して双方が仕入れることができる．

(2) 製品を仕入れることのできた企業が消費者に販売価格を提示する．もし 2 社が仕入れに成功していれば消費者に対し同時に販売価格を提示する．このとき，安値をつけた企業が優先的に販売を行う．ただし，高値をつけた企業も残差需要によって利益を得る可能性がある．

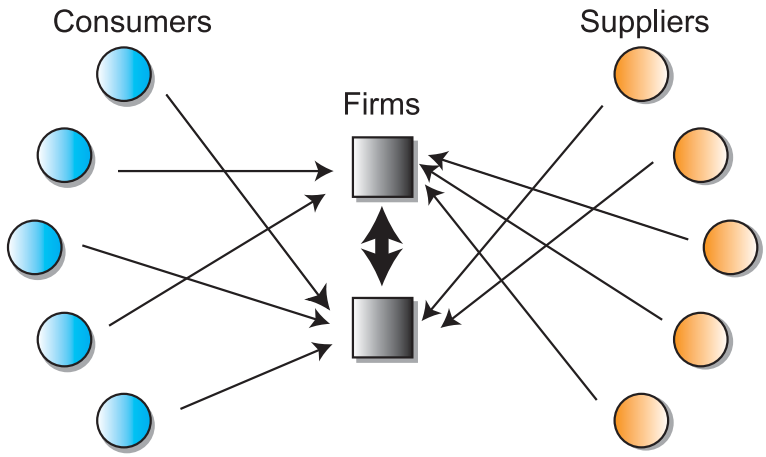


Figure 3.1: The market model

以上のモデルにおける市場均衡（ベルトラン均衡）の解析を行う．まず企業をそれぞれ企業 1，企業 2 とし，それぞれの仕入れ価格を w_1，w_2，販売価格を p_1，p_2 とする．価格 w でのサプライヤの供給量を $S(w)$，価格 p での消費者の需要量を $D(p)$ とする．同質財の製品市場では両企業は対称であるため，以下では企業 1 についてのみ考える．第 1 段階での企業 1 の仕入れ量 x_1 は以下のようになる．

$$x_1 = \begin{cases} D(w_1) & (\text{if } w_1 > w_2) \\ D(w_1)/2 & (\text{if } w_1 = w_2) \\ 0 & (\text{if } w_1 < w_2) \end{cases} \tag{3.1}$$

もし企業 1 が仕入れを独占した場合には，その仕入れ量でもっとも利益の高い販売価格で販売することができる．また，仕入れができなかった場合には販売を行うことはできない．両企業が対称であることを考慮すると，均衡点では両企業の提示する仕入れ価格は同じになるため，以下では両企業が同じ仕入れ価格を提示する場合のみを考えればよい．

第 2 段階では企業は仕入れた製品を消費者に販売する．企業 1 の販売量 q_1 は以下のようになる．

$$q_1 = \begin{cases} \min\{x_1, D(p_1)\} & (\text{if } p_1 < p_2) \\ \min\{x_1, D(p_1)/2\} & (\text{if } p_1 = p_2) \\ \min\{x_1, RD(p_1, p_2, x_1)\} & (\text{if } p_1 > p_2) \end{cases} \tag{3.2}$$

ここで $RD(p_1, p_2, x_1)$ は残差需要である．残差需要とは安値をつけた企業が販売できるだけ販売した後に，高値をつけた企業が売ることのできる需要量を表し

ており，$RD(p_1, p_2, x_1)$ は p_1，p_2 に関して連続であり p_1 についての単調減少関数であるとする．よって，以下の式が得られる．

$$\lim_{p_1 \to p_2} RD(p_1, p_2, x_1) = \max\{D(p_2) - x_2, 0\} \tag{3.3}$$

つまり，高値をつけた企業の得る残差需要はその価格が本来得る市場での需要の半分以下にしかならない．

$$RD(p_1, p_2, x_1) \leq D(p_1)/2 \tag{3.4}$$

次に価格の均衡点について考える．仮に第 1 段階でどちらかの企業がすべての仕入れを独占する場合を考えると，仕入れを独占した企業の利益 π^* は

$$\pi^*(w) = R^*(S(w)) - wS(w) \tag{3.5}$$

となる．ここで $R^*(x)$ は企業が得る利益を最大化するよう定義されたものであり

$$R^*(x) = \max\{pD(p) | D(p) \leq x\} \tag{3.6}$$

と表される．

ここで w^0 を $\pi^*(w^0) = 0$ となる価格（zero-monopoly-rent bid）とするといずれの企業も w^0 以上の買値をつけると利益が負となるために，w^0 以上の買値を提示することはない．しかし，仕入れを独占するために買値を w^0 までの間で相手よりも高くつけようとする意思は持っていることになる．

次に p^R を売り上げが最大となる売値とすると，

$$p^R D\prime(p^R) + D(p^R) = 0 \tag{3.7}$$

を解くことによって得られる．

まず，売り上げが最大となる価格がワルラス価格より大きい場合（$p^R > p^W$）の場合を考える．

このとき，均衡点は存在しない．仮に買値・売値ともにワルラス価格であるとするとその時の利益は

$$\pi = p^W D(p^W) - p^W S(p^W) = 0 \tag{3.8}$$

となるが，売り上げは売値 p^R で最大となるため $p^R D(p^R) > p^W S(p^W)$ となり，売値 p^R，買値 p^W での利益は正となる．

$$\pi = p^R D(p^R) - p^W S(p^W) > 0 \tag{3.9}$$

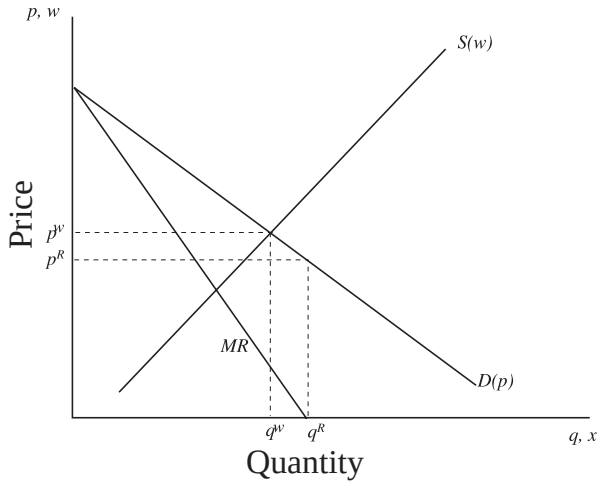


Figure 3.2: A case where $p^R > p^W$

供給関数が単調増加であることより，zero-monopoly-rent bid w_0 はワルラス価格より大きくなる（$w_0 > p^W$）．よって，仕入れ過多による売れ残りが発生しても売値 p^R をつけることで正の利益を得ることができる．各企業は買値において w_0 まで価格を上昇させる誘因を持ち，売値においては p^R で正の利益となるが，市場を独占するために相手より低い価格をつけようとする誘因を持つ．よって，この場合の均衡点は存在しない．

次に，売り上げが最大となる価格がワルラス価格以下の場合（$p^R \leq p^W$）を考える．

この場合，仕入れ・販売ともにワルラス価格 p^W が唯一の均衡価格となる．$p^R < p^W$ のとき，$w > p^W$ ならば供給関数が単調増加であることから利益は負となる．また，$w < p^W$ ならば超過需要となり仕入れた量 $S(w)$ しか売れない（つまり売れ残りが発生し，結果的に損失となる）．このことから仕入れ値は必然的に p^W まで上昇もしくは下降する．このとき，売値 p が $p < p^W$ となると利益が負となるため p^W まで下降して停止する．よって，このときの利益は $\pi = 0$ となり $w^0 = p^W$ となる．そこで，第 1 段階（仕入れ）での両企業の買値を w^0 とすると第 2 段階で唯一のサブゲームナッシュ均衡が得られる．このときの供給量は $x = S(w)/2$ であり，ワルラス価格より低い価格では $S(p^w)/2 < D(p)/2$ であるから売値をワルラス価格より低くしても追加利益はない．また，残差需要の定義からワルラス価格より大きい価格では収入が減少する．よって，売値をワルラス価格より引き上げても追加利益はない．以上のことから，第 2 段階での均衡価格はワルラス価格 p^W となる．

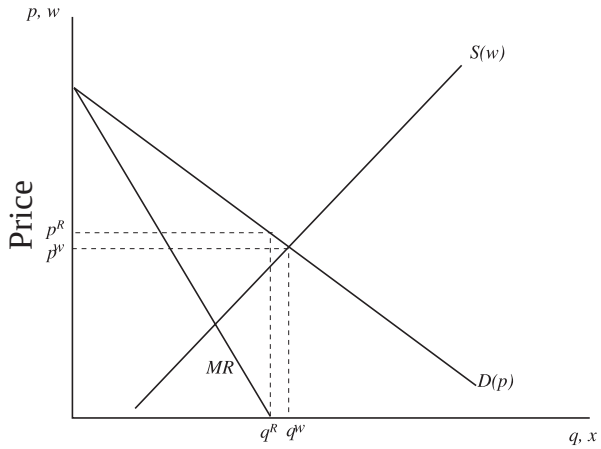


Figure 3.3: A case where $p^R \leq p^W$

3.3 被験者実験

3.3.1 被験者実験のモデル

被験者実験では各被験者が仲介業者として売り手から製品を仕入れ，買い手に販売する．また，仕入れ・販売は 1 人ではなく 2 人での対戦とする．被験者実験を行うにあたって，需要関数・供給関数を Figure 3.4 のように設定した．

被験者実験では設定できる価格を 1 から 50 までの整数とする．2 人の提示価格が同じだった場合のことを考え，仕入れ・販売数量が全て整数となるように図 3.4 に示す階段状の需要・供給関数を設定した．また，残差需要 $RD(p_1, p_2, x_1)$ には Uniform Rationing を用いる．

$$RD(p_1, p_2, x) = \max(D(p_1 - x), 0) \tag{3.10}$$

このとき，ベルトラン均衡（ワルラス価格）となるのは価格が 30 から 32 の間となり，独占価格（企業が独占状態である場合にもっとも利益の高くなる価格）は仕入れ価格 21，販売価格 41 である．被験者実験の手順は以下のようになる．

(1) 各被験者が仕入れ価格を提示する．

(2) 各被験者の仕入れ価格に基づいて仕入れ量が決定される．

(3) 仕入れに成功した被験者は販売価格を提示する．

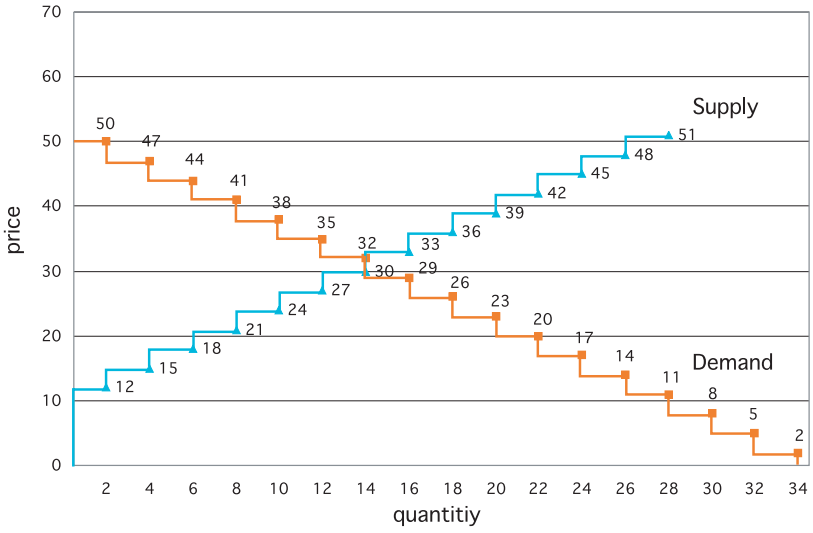


Figure 3.4: Demand and Supply functions

(4) 仕入れ価格に基づいて販売量と利益が決定される．

以上の手順を繰り返し行う．

3.3.2 被験者実験の概要

前節で述べたモデルを用いて被験者実験を行った．実験は 2002 年 10 月 25 日と 29 日の 2 日間行われ，大学生（交換留学生を含む）から募集された 48 名（1 日目 22 名，2 日目 26 名）が実験に参加した．実験室は 25 台の専用机[1]（他の被験者と隔離するための仕切り板付き）それぞれに計算機が 1 台ずつ設置されており，被験者は計算機を用いて実験に参加した．参加者募集はホームページと掲示によりおこなわれ，いずれも実験結果に比例する金銭が報酬として支払われることが明記された．実験は 1 日に 2 種類行われた．1 つ目の実験では，被験者に需要・供給関数は知らされない．2 つ目の実験は 1 つ目の実験と同じ需要・供給関数を用い，その内容がグラフと表により被験者に明示された．いずれの実験も，被験者は実験が何回続くかは一切知らされない．第 1 日目の 1 回目の実験を MB1-1，2 回目の実験を MB1-2，第 2 日目の 1 回目の実験を MB2-1，第 2 日目の 2 回目の実験を MB2-2 とする．各被験者は計算機の画面に表示される実験画面を通してゲームをおこなう．

[1] 被験者が 26 名の場合は簡易机の追加で対応した．簡易机も他の専用机と同様，仕切り板と計算機を備えている．

Figure 3.5: Experimental laboratory

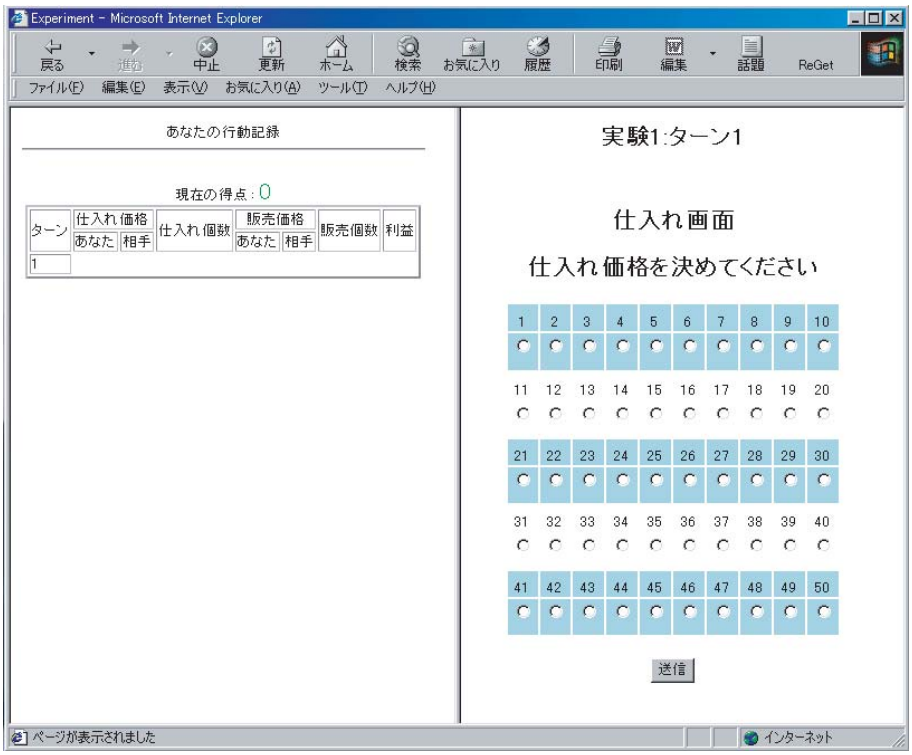


Figure 3.6: Subjects' screen

- メイン画面： 画面右のフレーム．仕入れ価格および販売価格の決定をおこなう．また，ゲームの結果（仕入れ量，販売量，利益）が表示される．
- 履歴画面：画面左のフレーム．過去のラウンドにおける自分と相手の仕入れ価格，自分の仕入れ量，自分と相手の販売価格，自分の販売量，自分の利益が表示される．

すべての実験が終了すると，被験者はゲームでの総得点に応じた報酬を支払われる．報酬の計算式は $0.4 \times$ (総得点) $+ 2000$（円）とし，実験前に被験者に明示された．

3.3.3 被験者実験の結果

被験者実験の結果を以下に示す．Table 3.1 より，明らかに 2 回目の実験（需要・供給関数を被験者に開示しておこなった実験）の方が得点が高くなっている．これは 1 回目の実験の初期に需要・供給関数を知らないために大きな損失を出してしまうことが主な原因と思われる．また，1 回目の実験での経験からある程度相手の行動を予測できることも得点が高くなった一因と考えられる．

Table 3.1: Overall performance

–	MB1-1	MB1-2	MB2-1	MB2-2
rounds	103	107	102	109
exp. time [minutes]	60	45	50	45
max points	3961	7636	1982	8904
min points	-10203	516	-2761	923
average points	-126.8	3372.0	217.5	3887.9

次に仕入れ価格・販売価格については以下のような特徴が観察された．

- 価格がある値に収束する場合と変動し続ける場合がある．
- 最終的な価格はベルトラン均衡（ワルラス価格）付近，すなわち価格 32-34 付近で推移することがほとんどであるが，一部の被験者は独占価格での協調を行う．

ここで価格がベルトラン均衡付近に収束する場合を BF，ベルトラン均衡付近で変動する場合を BC，独占価格付近で収束する場合，変動する場合をそれぞれ MF，MC とすると，実験結果は以下のように分類できる．

Table 3.2: The classification of results

–	MB1-1	MB1-2	MB2-1	MB2-2
BF	5	1	5	5
BC	3	9	4	6
MF	0	1	0	2
MC	1	0	0	0
other	2	0	4	0

“other”に分類されているものの中には (1) 価格の変動幅が大きい，(2) ベルトラン均衡よりも仕入れ – 販売価格の幅がやや大きい，ものの 2 種類がある．以下にそれぞれの場合の例を示す．グラフの縦軸は価格，横軸はラウンド数を示す．また，図の左側は仕入れ価格（bid price），右側は販売価格（ask price）の推移である．

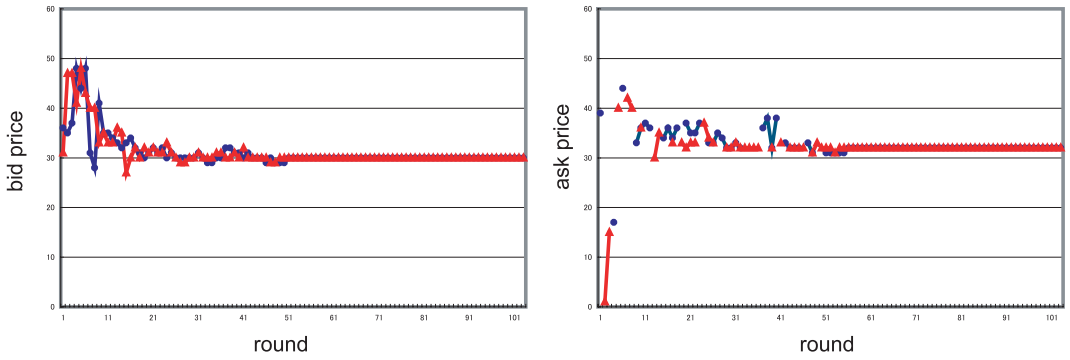


Figure 3.7: An example of BF

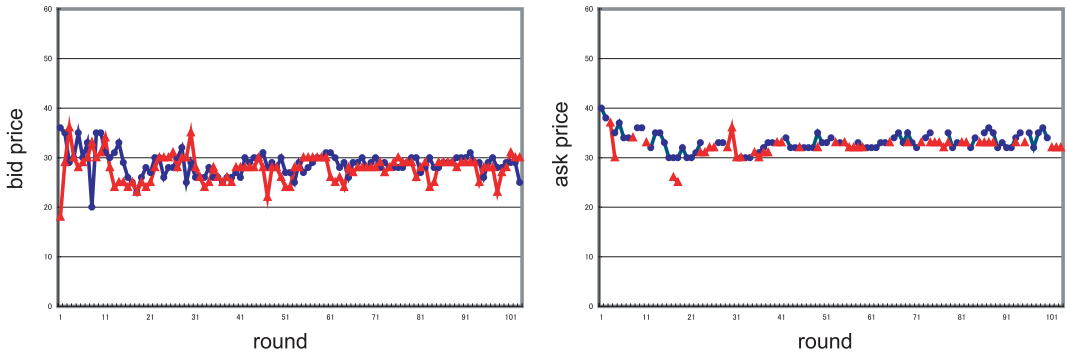


Figure 3.8: An example of BC

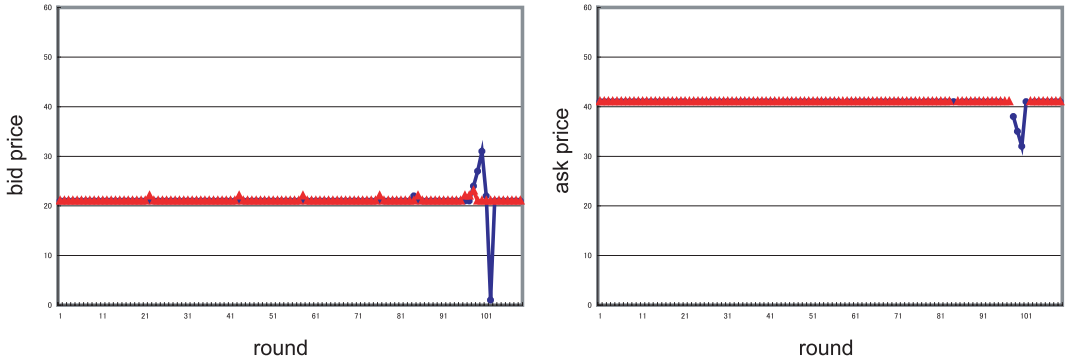


Figure 3.9: An example of MF

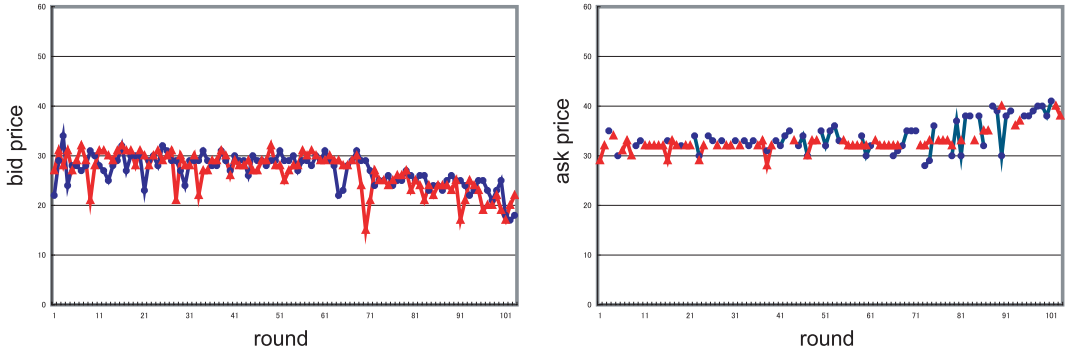


Figure 3.10: An example of MC

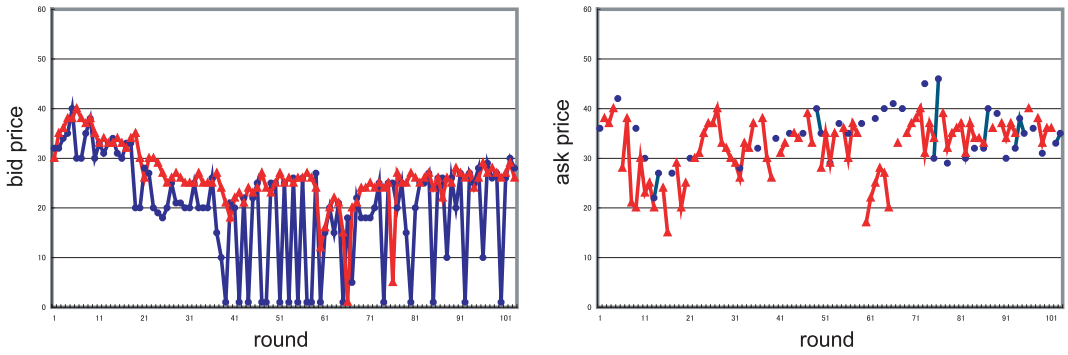


Figure 3.11: The exceptional case 1

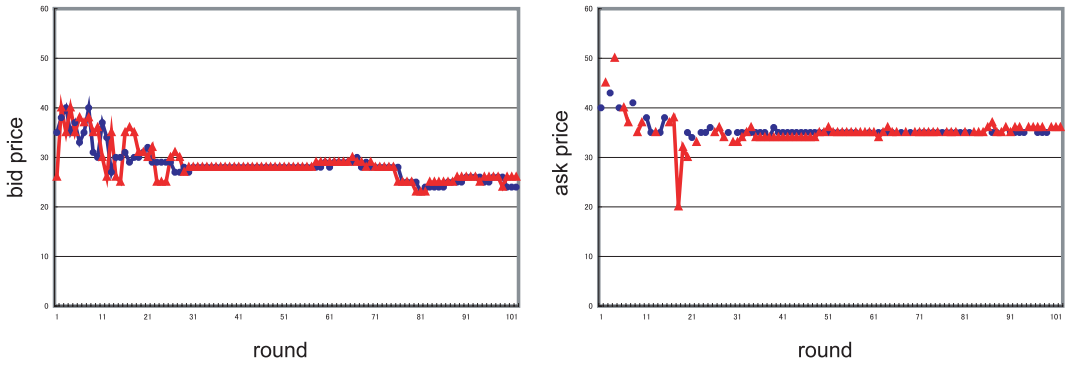


Figure 3.12: The exceptional case 2

実験結果より，ほとんどの場合（約 81%）でベルトラン均衡付近の価格をとることが分かる．しかし一部ではあるが独占価格で相手と協調し，高い得点を得ているペアがある（MB1-1，MB1-2 で各 1 ペア，MB2-2 で 2 ペア）．特に 2 回目の実験（MB1-2，MB2-2）では比較的長期間にわたって独占価格での協調が続いており，需要・供給関数を開示することで互いに最も利益の高い点を正確に把握し，なおかつ相手を裏切らない（わずかに高い仕入値の提示やわずかに低い売値の提示）ことによってその関係を維持している．需要・供給関数が被験者にとって未知である 1 回目の実験では初期段階で大きな損失を被ることも多く，ある程度利益の出る点を発見した場合にそれ以上の探索を行わないペアがいくつか見られた．ベルトラン均衡より若干利益は出るものの，最も利益の高い独占価格（付近）まで探索を続けたのは MB1-1 の 1 ペアだけであり，独占価格に到達したのも 100 ラウンド近く経過してからであった．小川 [26] による独占市場の実験では，需要・供給関数が未知であっても多くの被験者が独占価格を発見することが示されており，対戦相手がいることで価格探索が複雑になるものと思われる．

以下に全ての実験結果を示す．

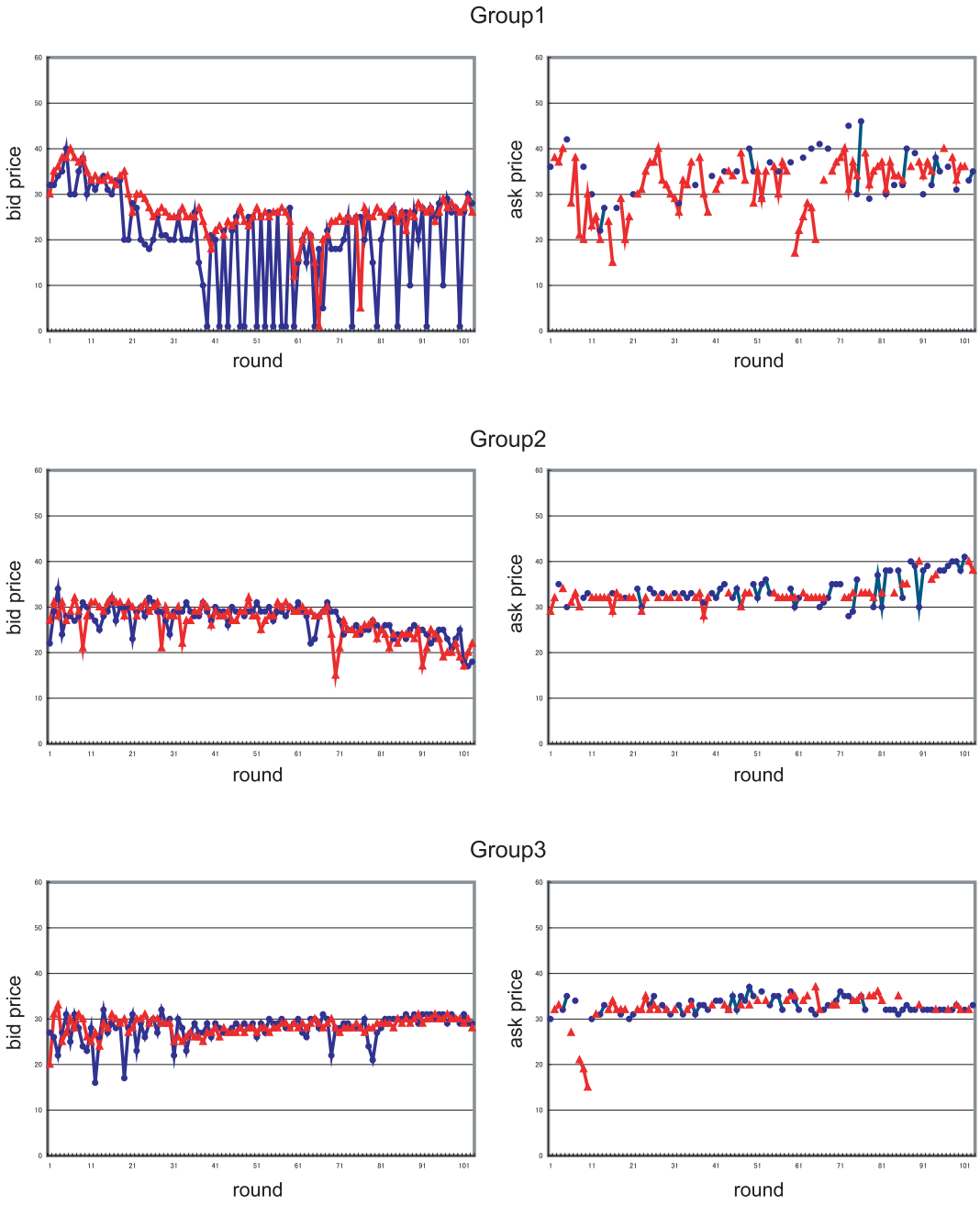


Figure 3.13: MB1-1, group1 - 3

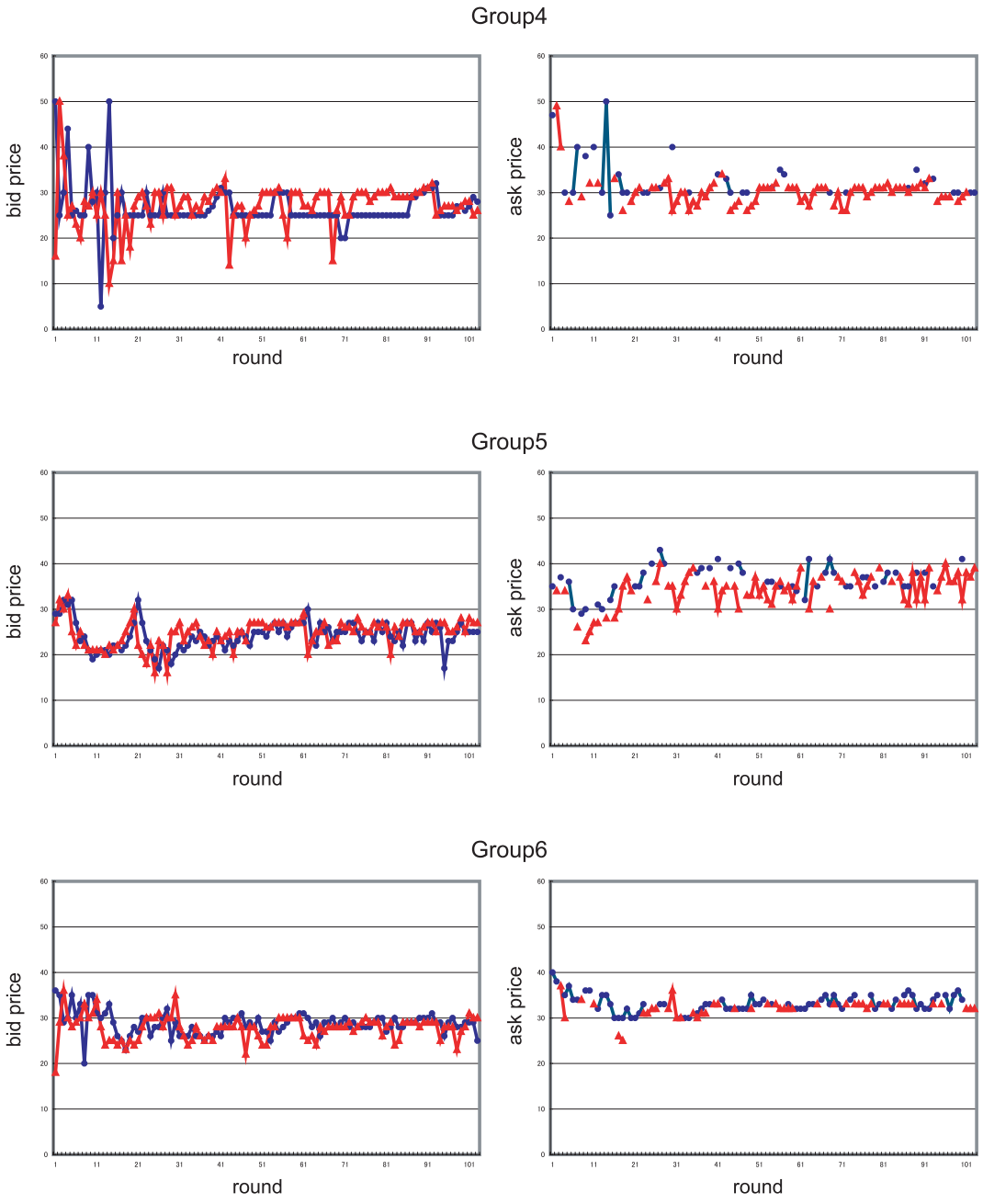


Figure 3.14: MB1-1, group4 - 6

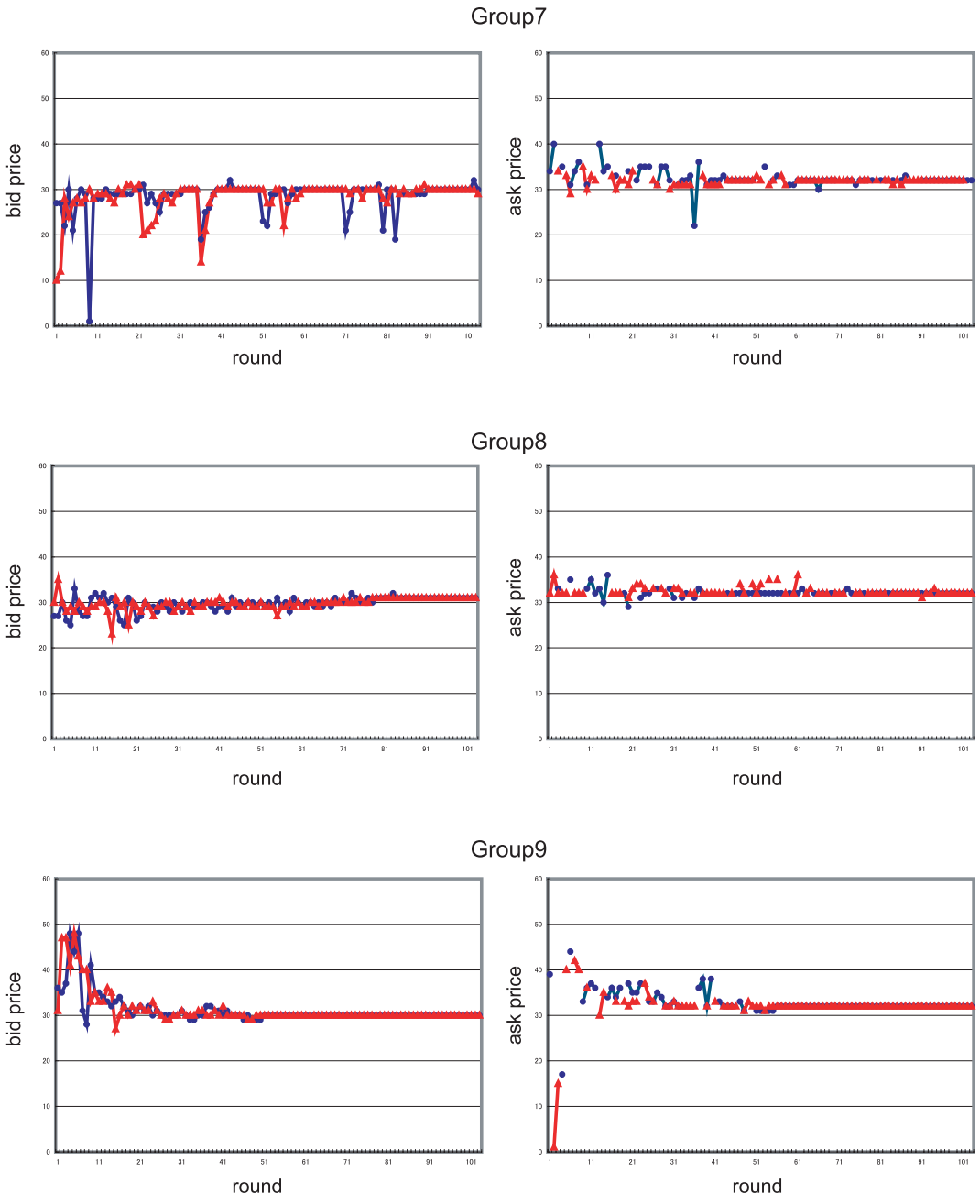


Figure 3.15: MB1-1, group 7 - 9

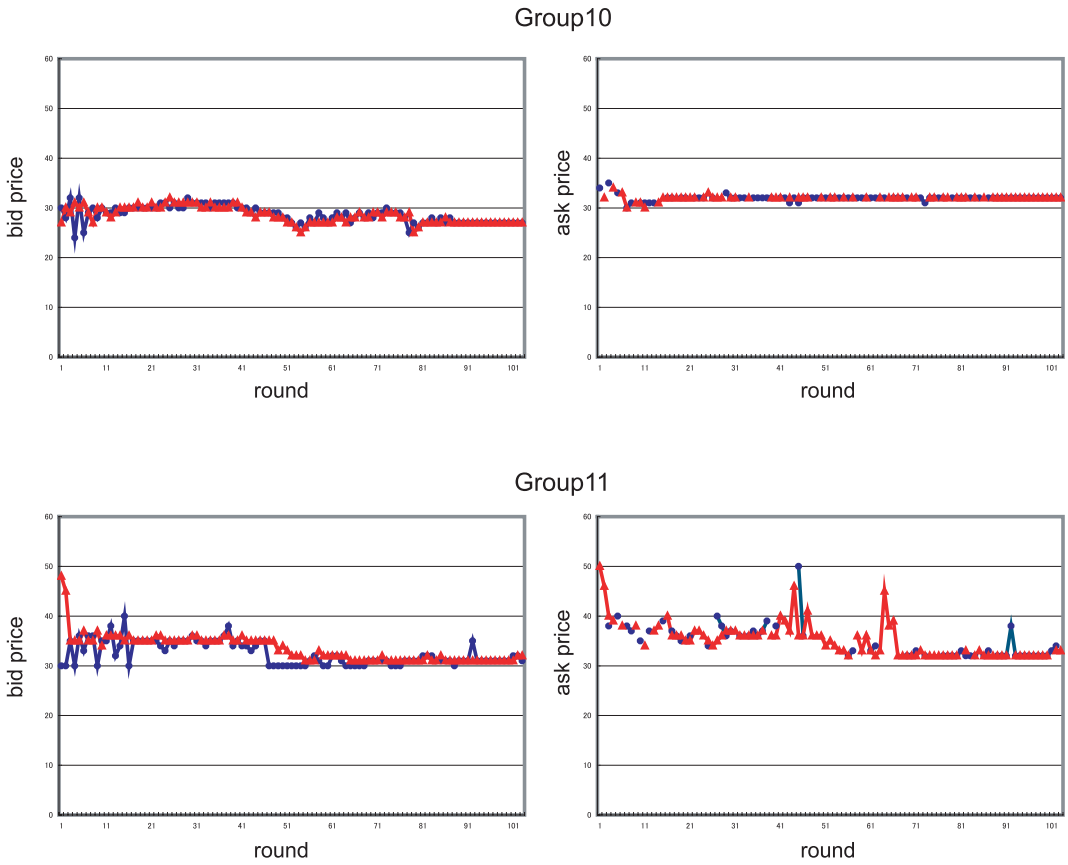


Figure 3.16: MB1-1, group10 - 11

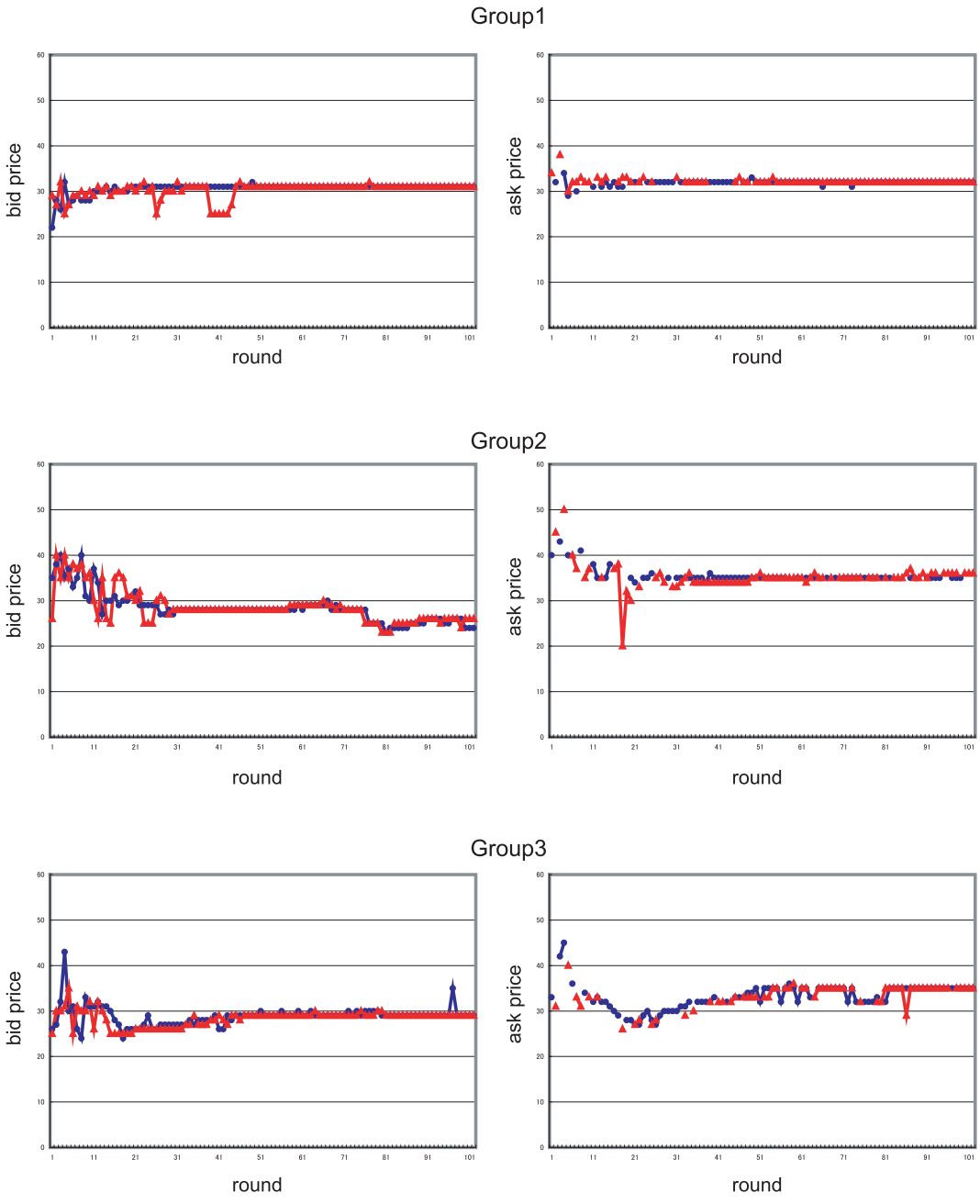


Figure 3.17: MB2-1, group1 - 3

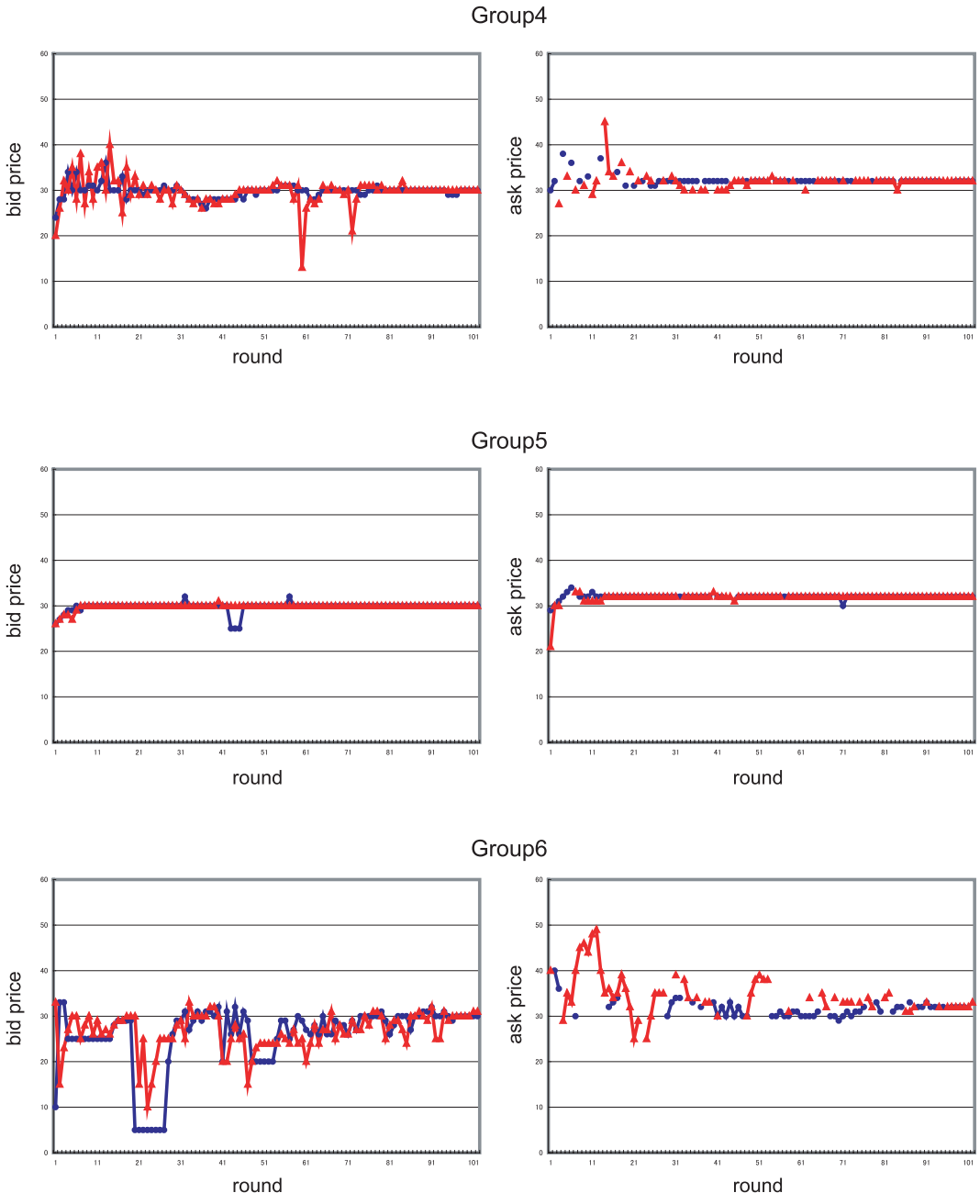


Figure 3.18: MB2-1, group4 - 6

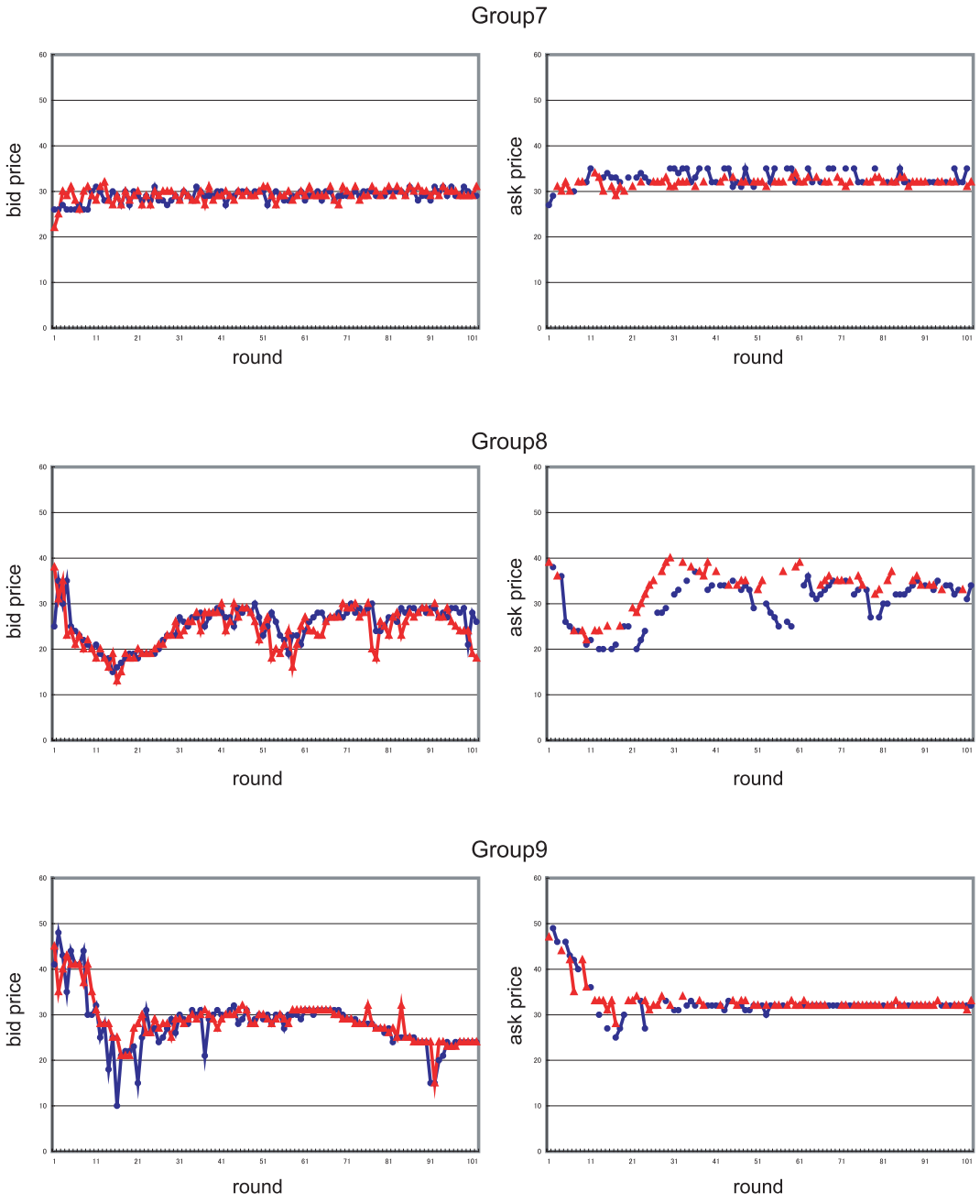


Figure 3.19: MB2-1, group7 - 9

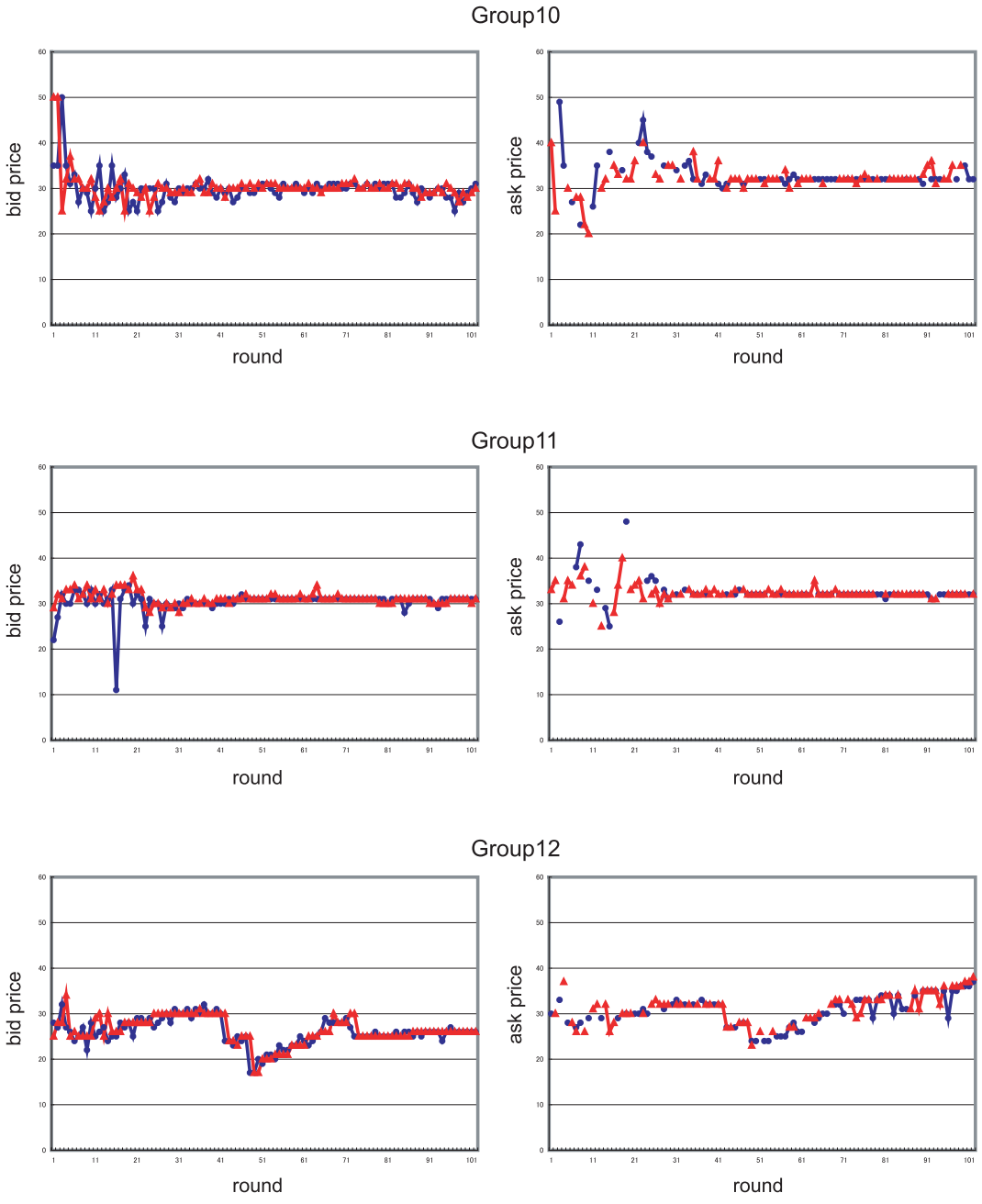


Figure 3.20: MB2-1, group10 - 12

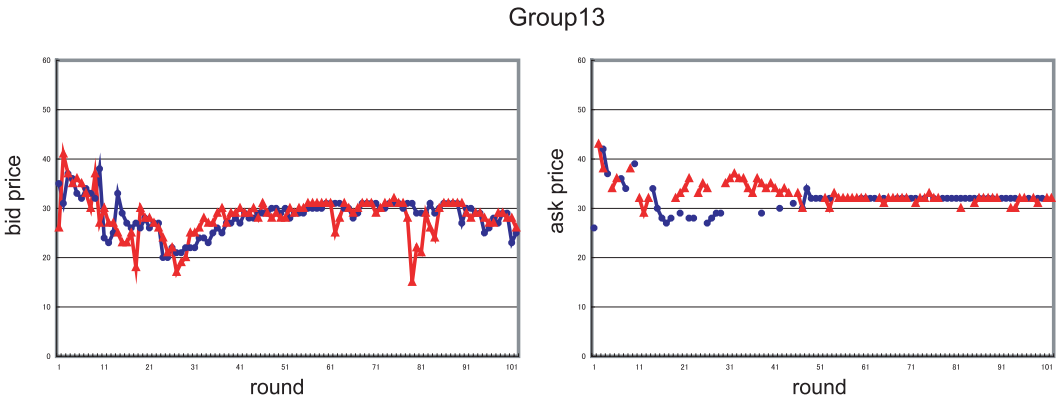


Figure 3.21: MB2-1, group13

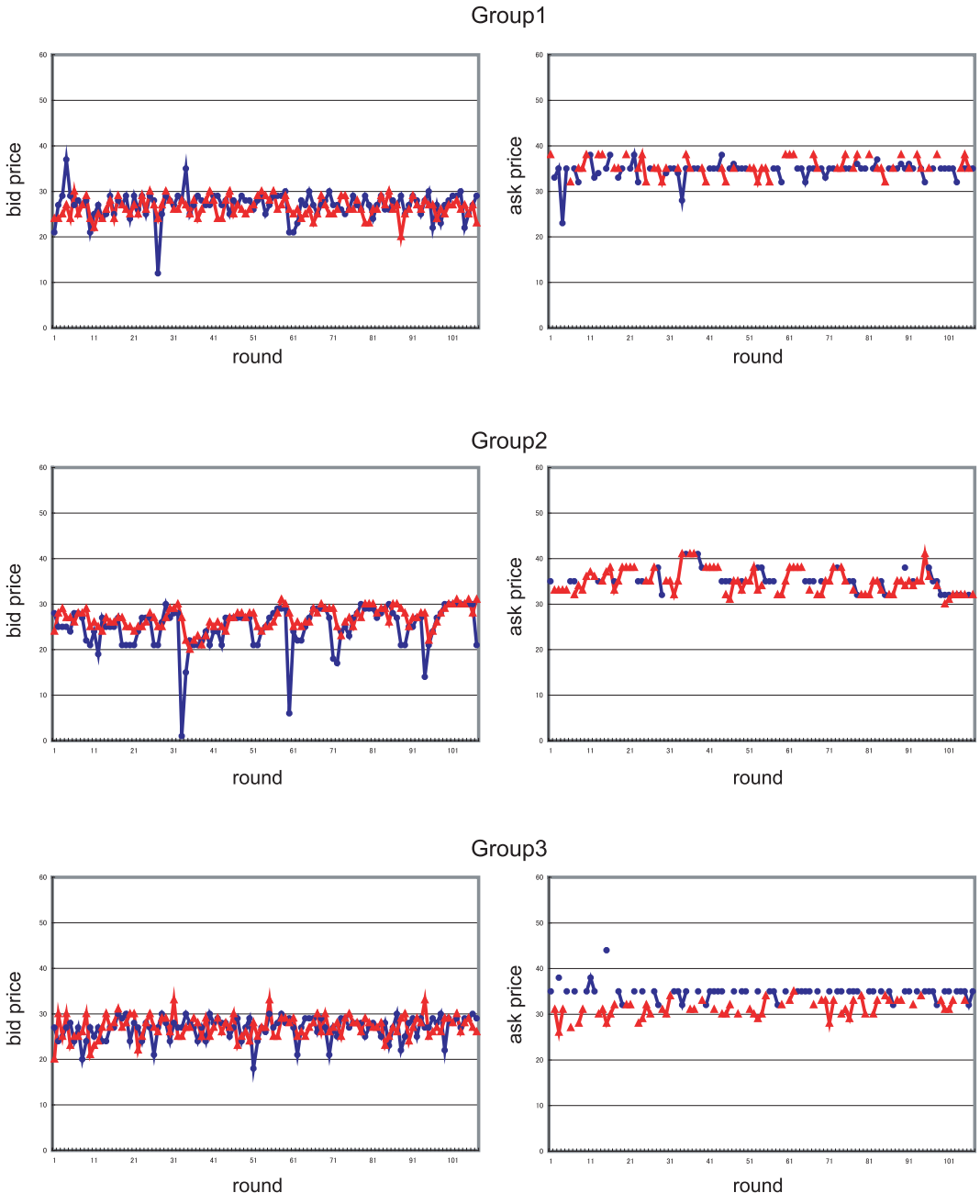


Figure 3.22: MB1-2, group1 - 3

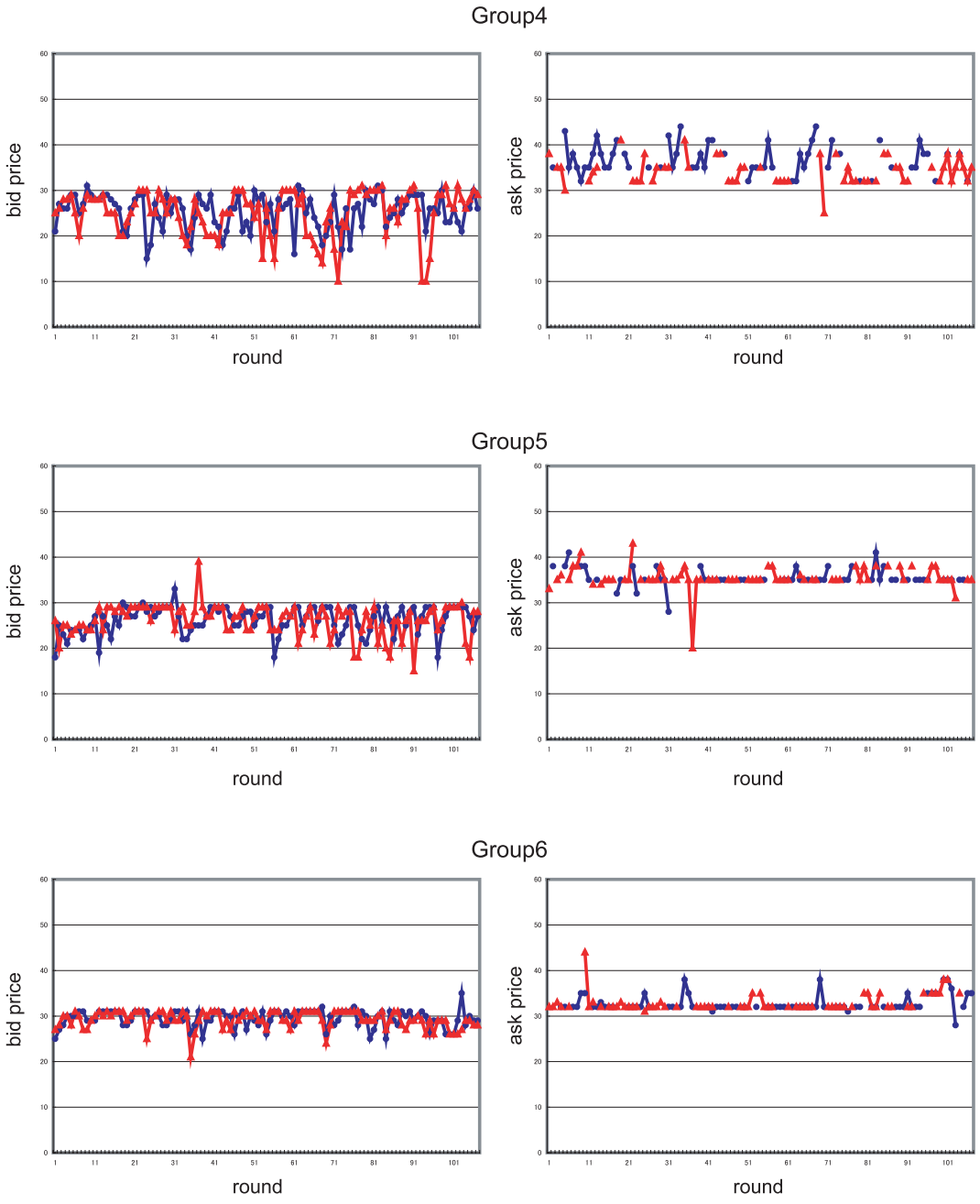


Figure 3.23: MB1-2, group4 - 6

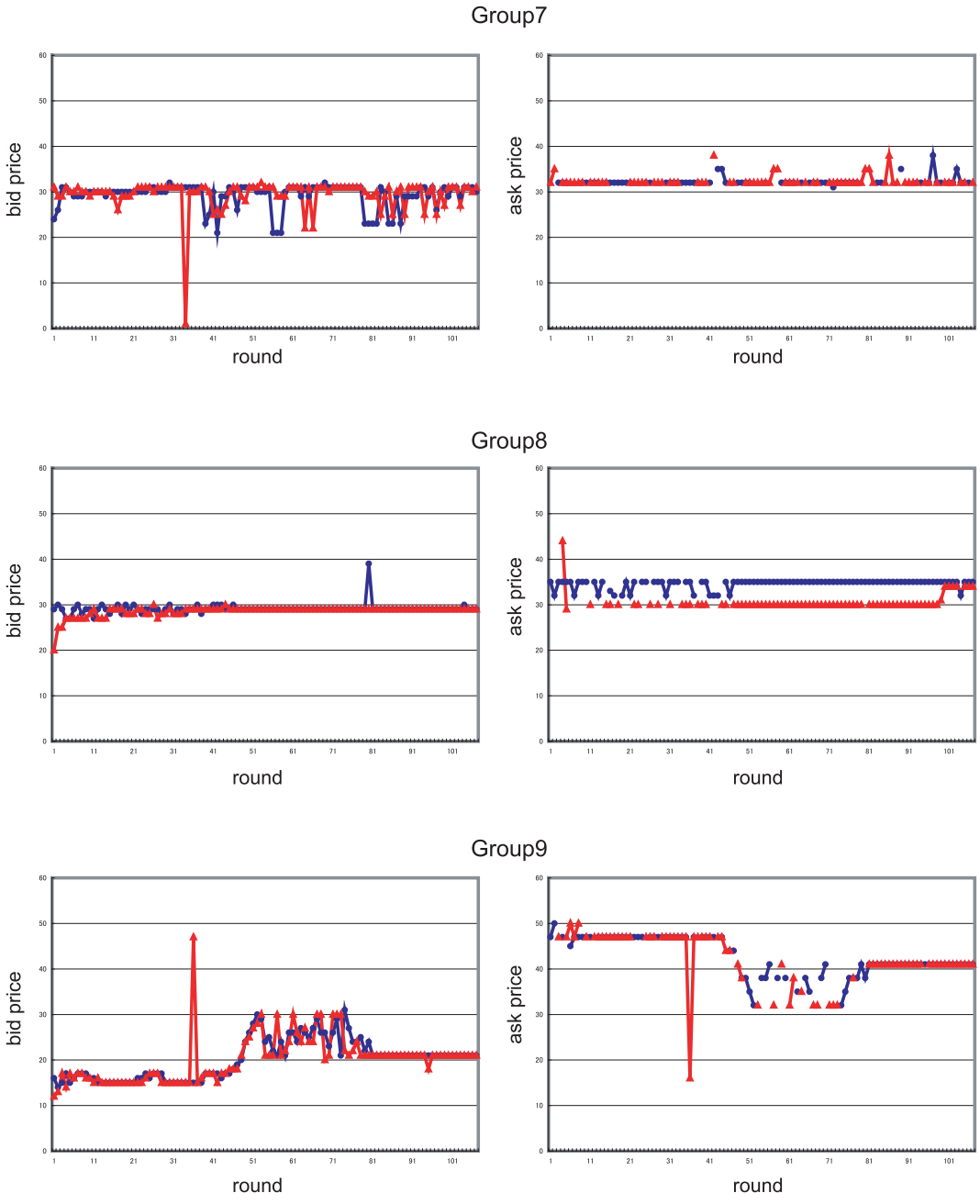


Figure 3.24: MB1-2, group7 - 9

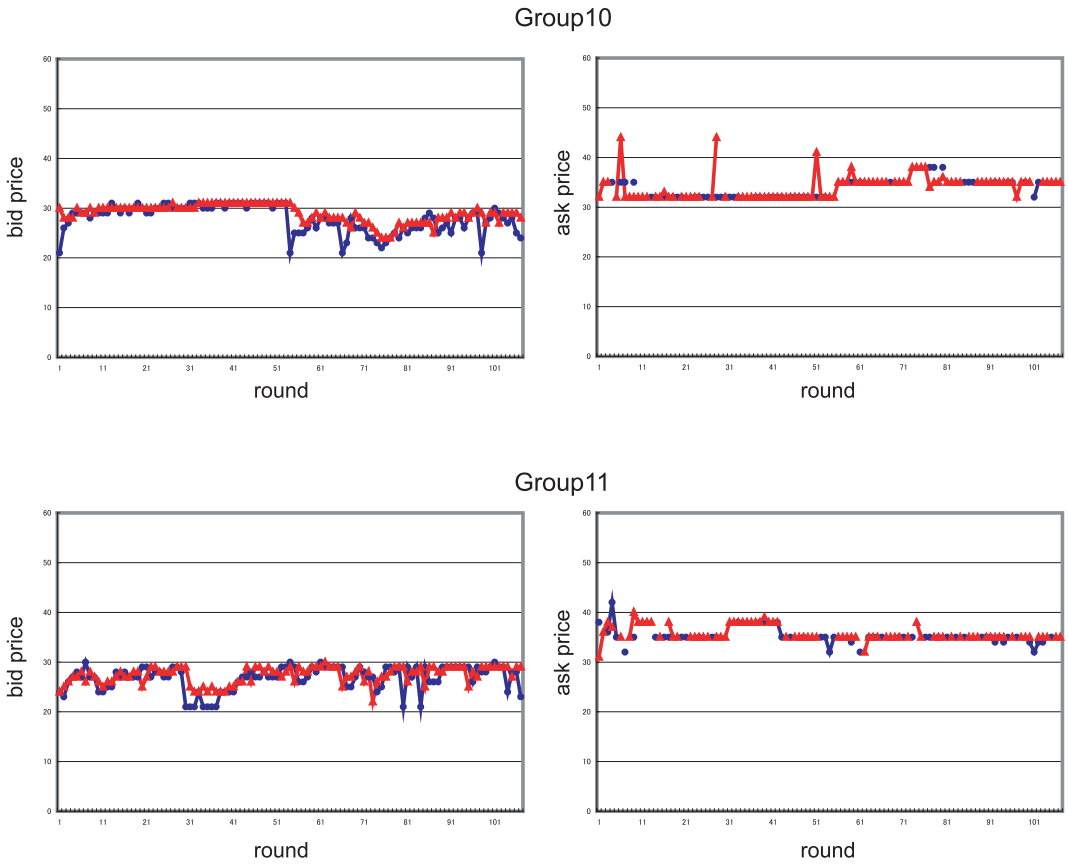


Figure 3.25: MB1-2, group10 - 11

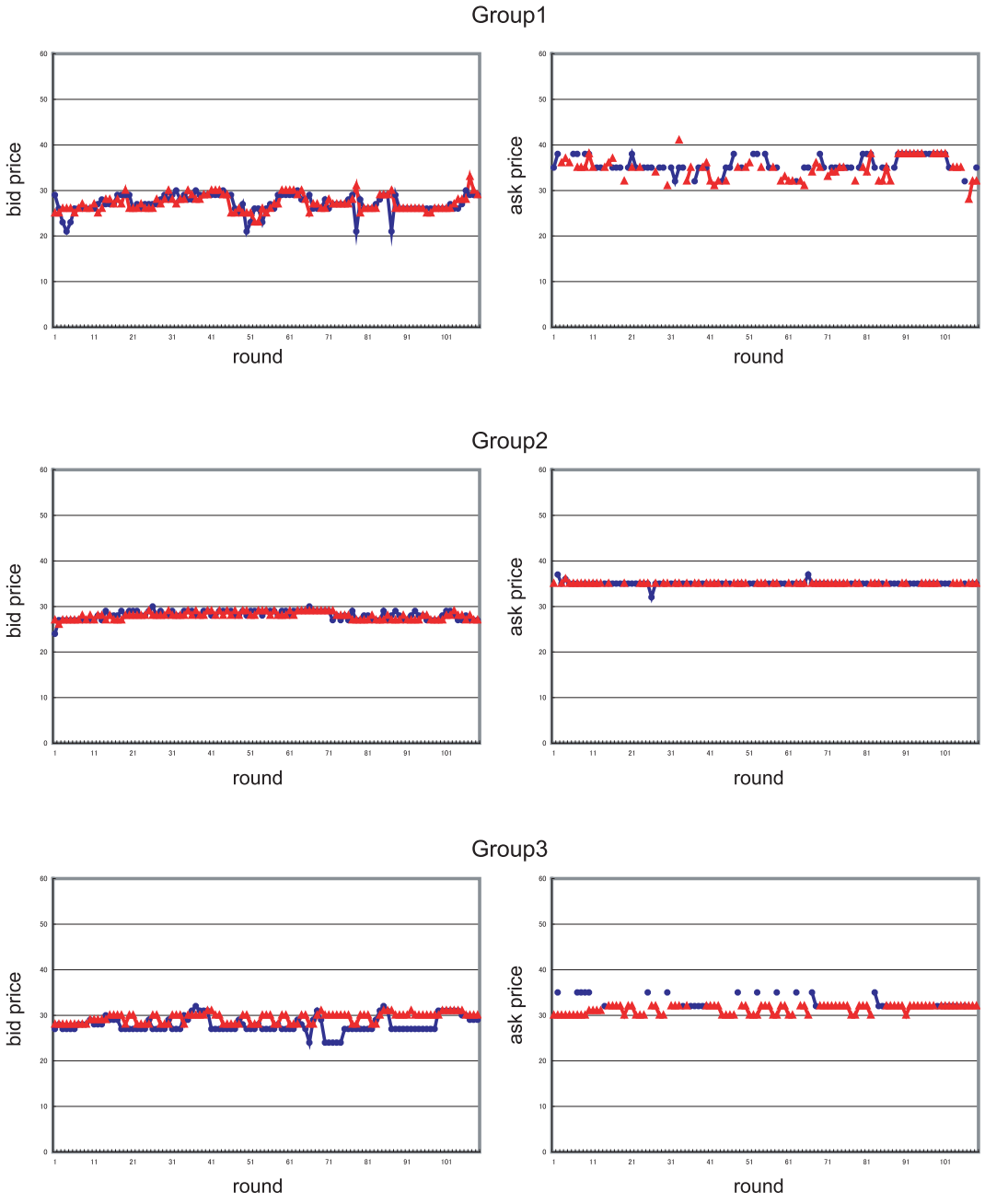


Figure 3.26: MB2-2, group1 - 3

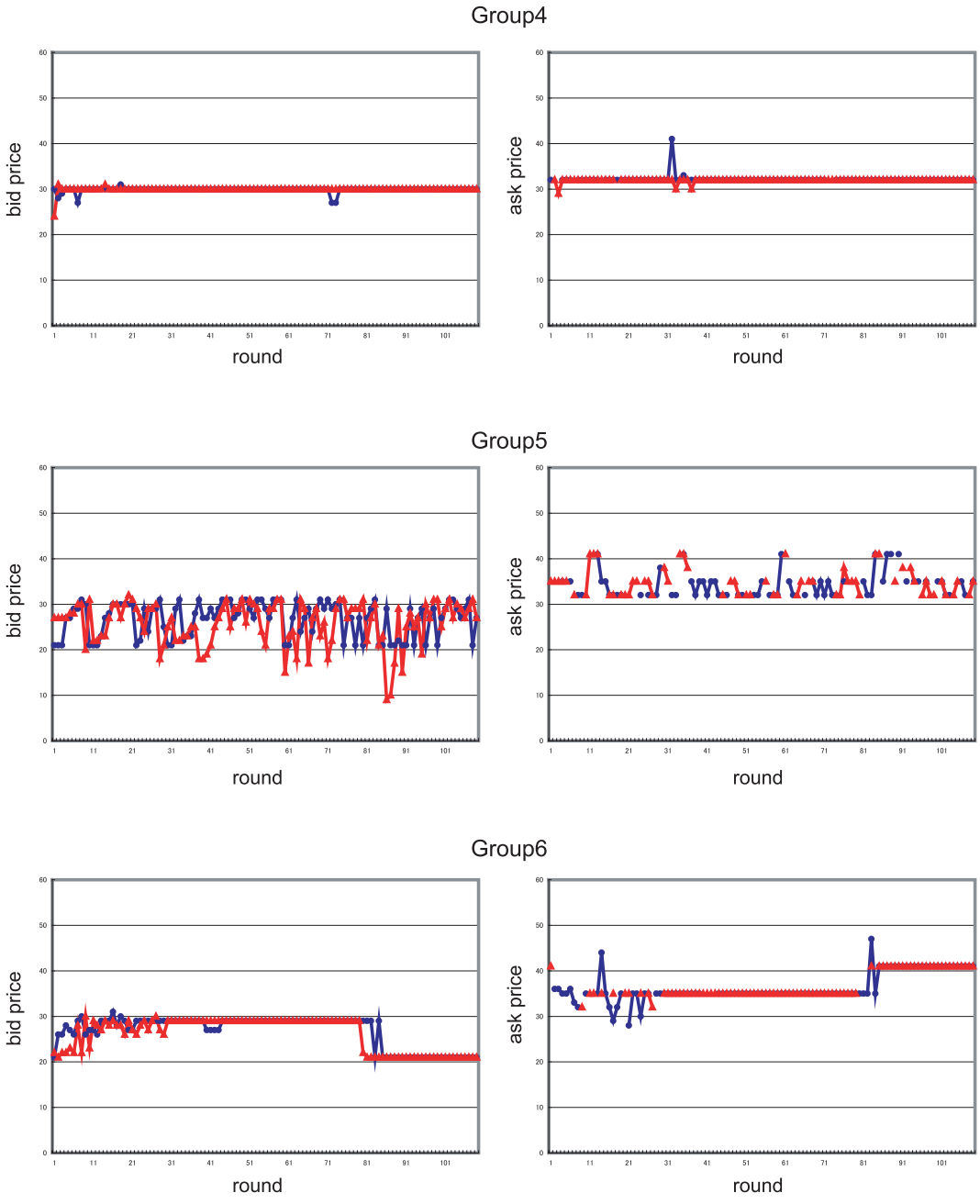


Figure 3.27: MB2-2, group4 - 6

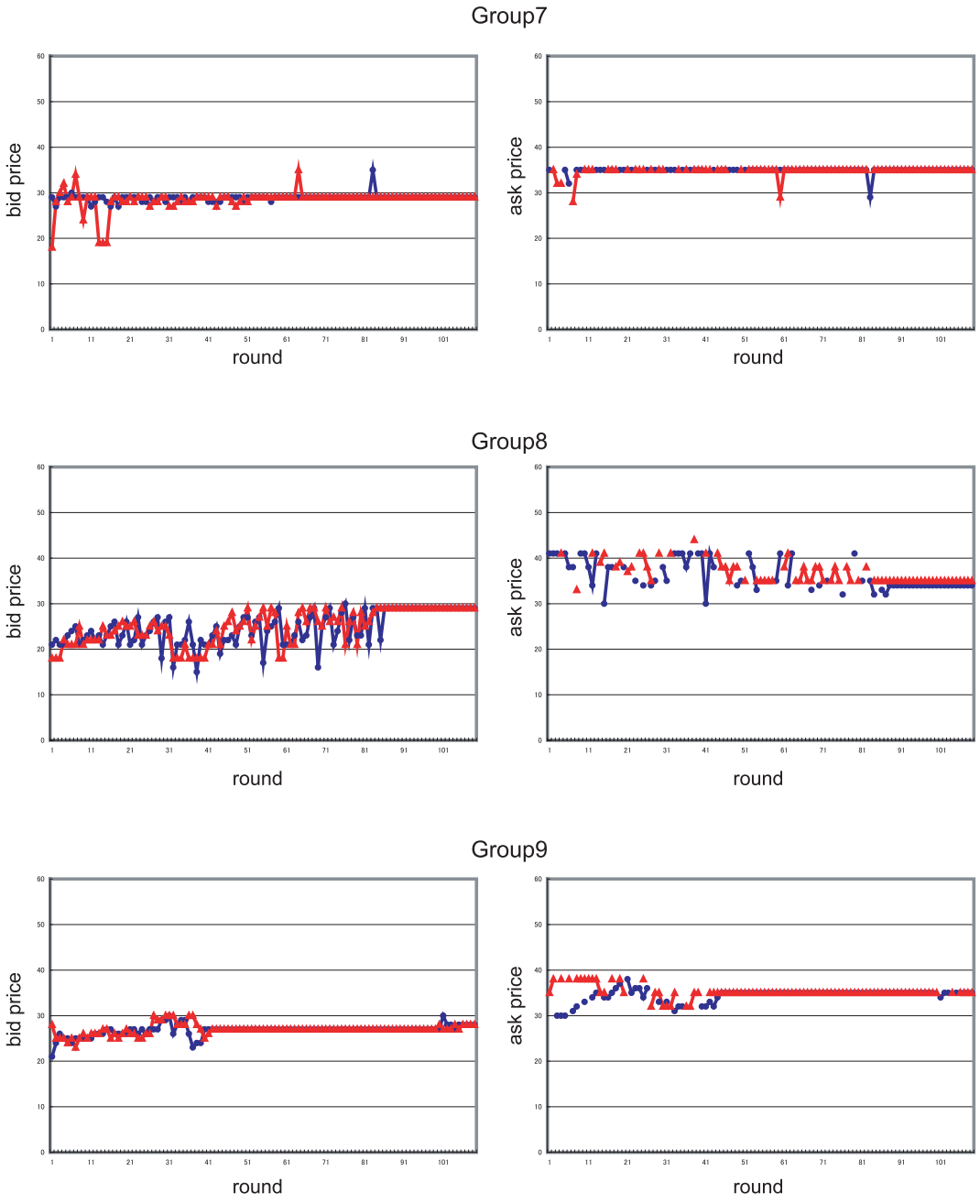


Figure 3.28: MB2-2, group7 - 9

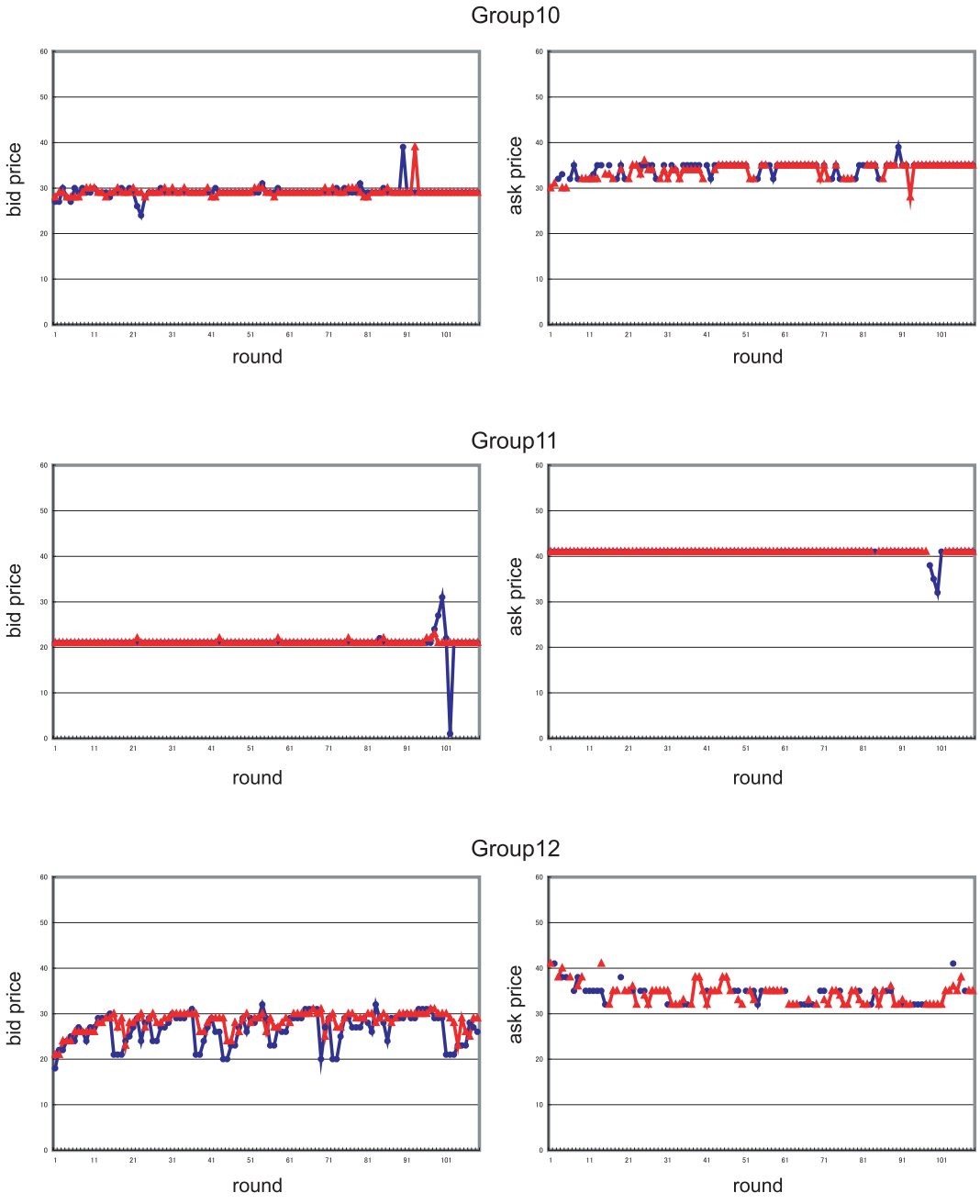


Figure 3.29: MB2-2, group10 - 12

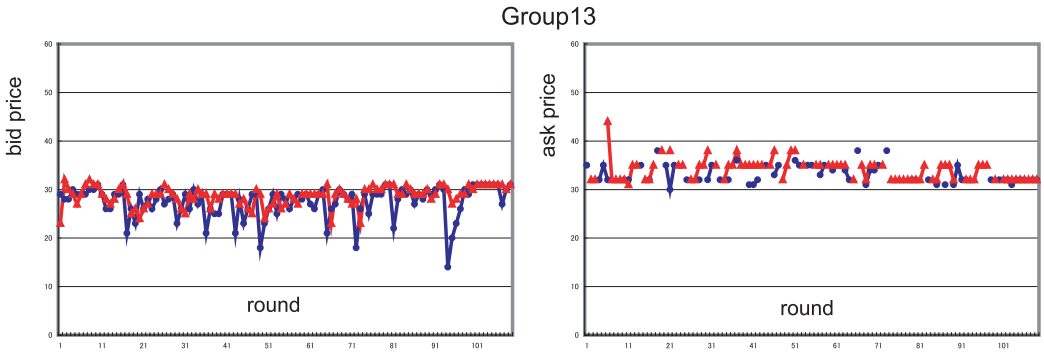


Figure 3.30: MB2-2, group13

3.4 考察

被験者実験により，仕入れ価格・販売価格ともある特定の値に収束する場合と変動し続ける場合があることが分かった．価格の変動は需要・供給関数が未知の場合の探索行動と，価格競争に勝って市場を独占しようとする行動の 2 種類によるものと思われる．一方，特定の価格への収束は競争の結果（すなわちこれ以上価格を変化させると利益を得ることができなくなる）として発生する場合と，高い利益を得る点を把握した上で両者がその利益を等分することを目的とした協調行動とがあると思われる．

また，ほとんどのペアが理論均衡であるベルトラン均衡（ワルラス価格）に収束するか，もしくはその付近で価格を変動させることが分かった．需要・供給関数を被験者に開示した 2 回目の実験でもベルトラン均衡に向かうペアの割合は減少せず，むしろ増加している．これは相手より高い仕入値，もしくは低い売値をつけることによって市場の独占が可能であるためで，需要・供給関数が開示されても市場独占の誘因により競争状態が起こるためである．その結果として利益が相対的に減少するとしても，価格競争に敗れれば一切利益が得られないこともあるために競争状態に甘んじるしかない，という悪循環に陥っている．現実社会において家電量販店や外食産業での価格競争に見られるように，利益を削ってでも価格を下げないと顧客がつかめないという状態が被験者実験により再現されたと言える．

ただし一部のペアはより高い利益を求めて探索を行ったり，高い利益を得る価格で相手と協調して（すなわち相手と同じ価格をつけることによって利益を等分して）ベルトラン均衡よりもかなり高い利益を得ている．1 回目の実験では需要・供給関数が示されていないために各被験者はそれぞれ利益が出るような価格を探索している．その結果 1 つのペアは独占価格付近に到達し，最終的には高い利益を得ることができている．他のペアも独占価格には到達しなかったがベルトラン均衡で得られる利益より高い利益が出る点まで価格を変化させている．2 回目の実験では需要・供給関数が示されているので，利益が最大となる点は既知である．この場合に重要となるのは「独占価格で相手と協調する」ことにあると言える．もし一方が市場の独占を狙って仕入れ値を上げるようなことがあると，他方もそれに対抗して価格競争が始まり，最終的にはベルトラン均衡へと向かう．しかし互いに同じ価格をつけることによって利益を等分しておけば価格競争は回避され，長期にわたって利益を得ることができる．この状態は実社会で考えると暗黙の価格協定が成立していると捉えることができる．被験者実験の結果から，このような価格協定が発生するには (1) 互いが市場を熟知していること，(2) どちらも自分から裏切らない（価格を変化させない）ことが必要であると言える．特に (2)

に関しては別の角度からも考察が可能である．今回の実験は実験回数が被験者に知らされていないため，無限回繰り返しゲームの構造でもとらえられる．有名なAxelrod[2, 3] の計算機実験トーナメントが示すように，ともに独占価格で利益を等分している状態ではTFT 戦略（第1 手目で協調を選択し，以降は相手の手を真似る）やトリガー戦略（相手が裏切らない限り協調を続けるが，相手が一度でも裏切った場合にはそれ以降常に裏切りを返す）がナッシュ均衡として成立する可能性がある．被験者が互いに長期間の関係を予想していたならば，裏切りによって利益を得る誘因はない．よって協調が持続したのだと考えられる．また，今回の実験では他の被験者（現実社会では企業）の参入がない閉じた市場を対象としている．もし市場に新たな被験者（企業）が参入し，価格が変化したとすると競争が開始され，最終的には理論が示す均衡価格へと推移していくことが考えられる．

3.5 結言

本章ではマーケットマイクロストラクチャー理論に基づいて複占企業をモデル化し，被験者実験を用いて価格戦略における競争と協調について分析した．実験の結果，被験者が提示する仕入れ価格および販売価格は以下のような特徴を持つことが分かった．

- 特定の値に収束する場合と変動し続ける場合がある．
- ベルトラン均衡（ワルラス価格）付近で推移することがほとんどであるが，独占価格での協調を行うペアも存在する．

これらの結果は被験者の競争もしくは協調の結果として発生する．現実社会において見られる価格競争や価格協定の構造を被験者実験は再現しており，今後実社会での企業行動や戦略を分析する手法として応用できると考えている．

第4章　行動主体間の協調行動：ネットワーク型囚人のジレンマを用いた協調行動の創発

4.1　緒言

本章では,「ネットワーク型囚人のジレンマ」[38, 46, 54] を用いて行動主体間に発生する関係と協調行動について分析する．

従来の囚人のジレンマ研究は主体間の関係を「継続的」かつ「強制的」なもの，すなわち変更や解消が不可能なものとして取り扱ってきた．しかし山岸らは現実社会で観察される継続的関係の多くは当事者間の合意によって成立したものであり，また変更や解消が可能な「非強制的」関係であるとしている [46, 54]．たとえば消費者間の情報のやりとりや企業間の取引関係は必ずしも強制力を持つものではなく，むしろ互いが自由に選択することが可能である．このような問題に対して山岸らは「ネットワーク型囚人のジレンマ」を提案している．ネットワーク型囚人のジレンマでは各行動主体が集団の中から自由に自分の対戦相手を選ぶことができ，相互の合意にもとづいて成立したペアによってゲームの対戦がおこなわれる．

「ネットワーク型囚人のジレンマ」では各行動主体（プレイヤ）が集団の中から自分の対戦相手を自由に選ぶことができ，行動主体間の合意によって成立したペアでゲームの対戦が行われる．このような状況下で行動主体間に構築される関係は創発現象として捉えることができる．ネットワーク型囚人のジレンマでは行動主体は互いの選択と行動決定により相互作用をおこない，その結果として継続的な相互関係を構築してゆく．行動主体が構築した関係はそれぞれの行動主体にとっての環境となり，時には高い利得を得るため，また時には損失を最小限にとどめるための秩序を形成してゆく．本研究では行動主体間に創発する関係のうち，特に「相互協力」を継続的に維持する協調行動に着目する．現実社会における消費者間の口コミ，企業間の価格協定など，経済主体間の協調行動は社会全体に大きな影響を及ぼす．本章ではこのような経済主体間の協調行動をネットワーク型

囚人のジレンマによりモデル化し，被験者実験と計算機実験を用いて分析する．

4.2 ネットワーク型囚人のジレンマ

本研究では，4 人 1 組の集団を仮定して以下のようにネットワーク型囚人のジレンマのモデルを定義する．囚人のジレンマの対戦をおこなうペアを形成するにあたり，2 種類の規則を導入する．

(1) 各プレイヤは集団の中から対戦を希望する相手を 1 名選択し指名する．

(2) 各プレイヤの指名にもとづいてペアを形成する．本研究で用いるペアの形成規則は以下の 2 つである．

  (a) 指名ペア（PDNα）：互いに指名しあったプレイヤ同士をペアにする．

  (b) 強制ペア（PDNβ）：まず，互いに指名しあったプレイヤ同士をペアにする．次に相互指名が成立しなかったプレイヤをランダムに組み合わせてペアとする．

(3) ペアが成立したプレイヤ同士で囚人のジレンマゲームの対戦を行う．ペアを形成したプレイヤは相手に対し「協力」か「非協力」を選択する．

(4) 各プレイヤの行動と 4.1 に示す利得表をもとに各プレイヤに利得が与えられる．PDNα においてゲームに参加できなかったプレイヤには利得が与えられない．

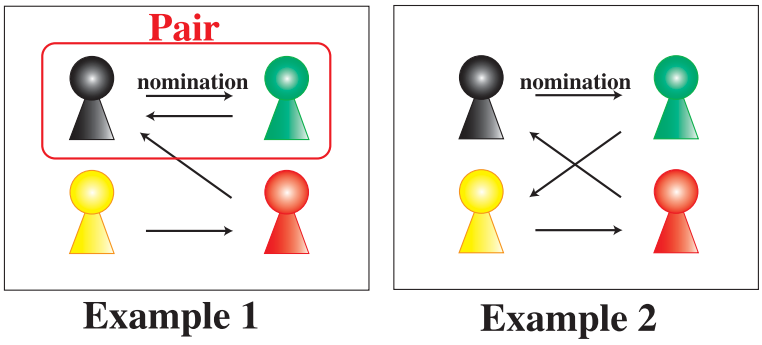


Figure 4.1: Pairing rule in PDNα

以上の手順を 1 ラウンドとする．また，同じ被験者と規則のもとでゲーム終了までおこなわれる複数回のラウンドを 1 セッションとする．

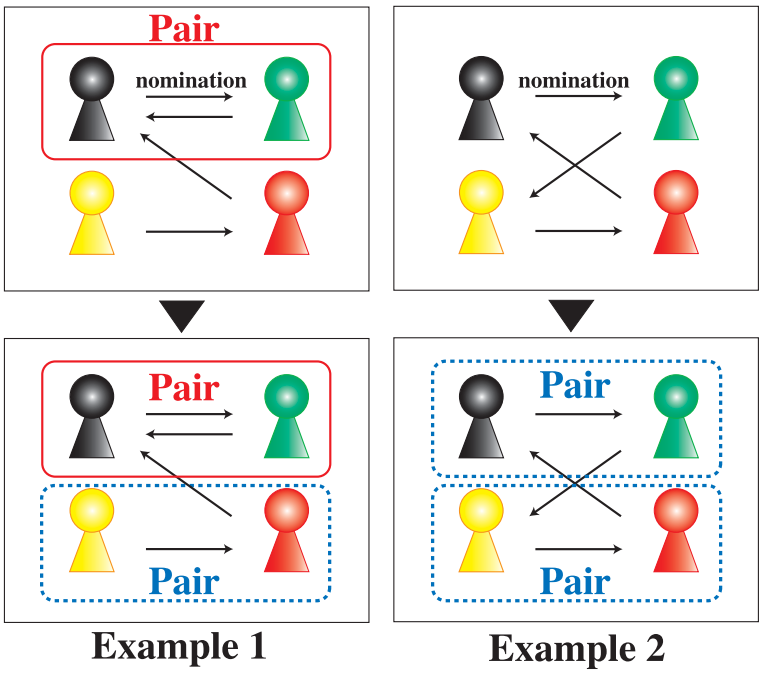


Figure 4.2: Pairing rule in PDNβ

Table 4.1: Payoff matrix

	cooperate	defect
cooperate	3, 3	0, 5
defect	5, 0	1, 1
1 if not paired		

プレイヤが協力的に行動した場合にペア数がどのように推移するかを理論的に解析する．対象として PDNα について考える．仮定として以下の 2 点を導入し，その条件下で形成されるペア数について計算する．

- 各プレイヤは他のプレイヤの中から 1 名をランダムに指名する．
- 指名によるペアが成立した場合，その後そのペアを維持し続ける．

t 回目のラウンドにおいて n 組のペアが成立している確率を $P_n(t)$ $(n = 0, 1, 2)$ とすると，以下のような式が得られる．

$$P_0(0) = \frac{30}{81}, \tag{4.1}$$

$$P_1(0) = \frac{48}{81}, \tag{4.2}$$

$$P_2(0) = \frac{3}{81}, \tag{4.3}$$

$$P_0(t+1) = \frac{30}{81}P_0(t), \tag{4.4}$$

$$P_1(t+1) = \frac{48}{81}P_0(t) + \frac{8}{9}P_1(t), \tag{4.5}$$

$$P_2(t+1) = \frac{3}{81}P_0(t) + \frac{1}{9}P_1(t) + P_2(t). \tag{4.6}$$

Figure 4.3 は $P_0(t)$，$P_1(t)$ および $P_2(t)$ の推移を示すグラフである．このグラフより，約 50 ラウンドを経過するとかなり高い確率で 2 組のペアが形成されることが分かる $(P_2(50) = 0.997)$.

4.3 被験者実験

4.3.1 被験者実験の概要

上述のモデルを用いて被験者実験をおこなった．実験は 2002 年 7 月 24 日と 7 月 27 日の 2 日間行われ，大学生（交換留学生を含む）から募集された 48 名（各日 24 名）が実験に参加した．参加者募集はホームページと掲示によりおこなわれ，いずれも実験結果に比例する金銭が報酬として支払われることが明記された．実験は 1 日に 2 種類おこなわれ，それぞれペア形成規則が異なる実験がおこなわれた．

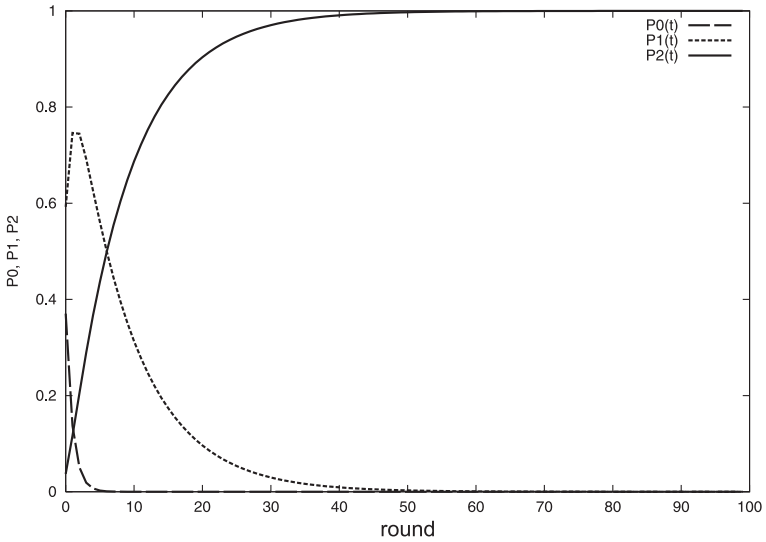


Figure 4.3: $P_0(t)$, $P_1(t)$ and $P_2(t)$

第 1 日目は指名ペア-強制ペアの順（PDNα-1，PDNβ-2 とする）で，第 2 日目は強制ペア-指名ペア（PDNβ-1，PDNα-2 とする）の順でおこなわれた．各被験者はコンピュータ画面に表示される実験画面を通してゲームをおこなう．

- メイン画面： 画面右上のフレーム．相手の指名および行動決定をおこなう．また，ゲームの対戦結果が表示される．数字による順序効果を避けるため他のプレイヤは色で表示されており，ゲームの手の選択の際には心理的効果を避けるため「協力」「非協力」ではなく「A」「B」と表記されている．
- 履歴画面：画面左のフレーム．過去のラウンドにおける自分の指名した相手，実際にペアになった相手，自分と相手の行動，ゲームの得点の履歴が表示される．
- 得点表：画面右下のフレーム．囚人のジレンマゲームの利得表が表示される．被験者に分かりやすくするため「得点表」と表記されている．

すべての実験が終了すると，被験者はゲームでの総得点に応じた報酬を支払われる．報酬の計算式は $6 \times$ (総得点) $+ 1000$（円）とし，実験前に被験者に明示された．

Figure 4.4: Subjects' screen

4.3.2 被験者実験の結果

被験者実験の結果の概要を Table 4.2 に示す．各実験セッションで繰り返し回数が異なるため，比較のために 100 回までの結果を括弧内に示してある．

Table 4.2: Overall performance

–	PDNα-1	PDNα-2	PDNβ-1	PDNβ-2
rounds	104 (100)	114 (100)	127 (100)	117 (100)
exp. time [minutes]	35 (34)	40 (35)	50 (39)	30 (26)
max points	254 (242)	342 (300)	383 (300)	348 (300)
min points	104 (100)	97 (83)	129 (91)	102 (85)
average points	149.6 (143.4)	251.4 (218.7)	261.7 (201.6)	237.8 (202.2)

被験者実験の結果，2 つの大きな特徴が観察された．第一に，実験が進むにつれてほとんどのグループで継続的な協調関係（常に同じ相手を指名してペアになり，協力を選択する）を維持するペアが固定することが観察された．このようなペアを継続的協調ペアと呼ぶこととする．実験結果は形成された継続的協調ペアの数で分類することができる．Case n は n 組の継続的協調ペアが形成されたことを示す．Table 4.3 は各セッションで観察された Case n に分類されるグループ数を示す．

Table 4.3: The classification of experiments

–	Case 0	Case1	Case 2	others
PDNα-1	3	3	0	0
PDNα-2	0	3	2	1
PDNβ-1	1	3	2	0
PDNβ-2	2	1	2	1

Figure 4.5 から Figure 4.9 はそれぞれの場合の例を示す．左側の図において横軸は実験回数を示し，縦軸はペア数を示す．灰線は相互指名によって形成された

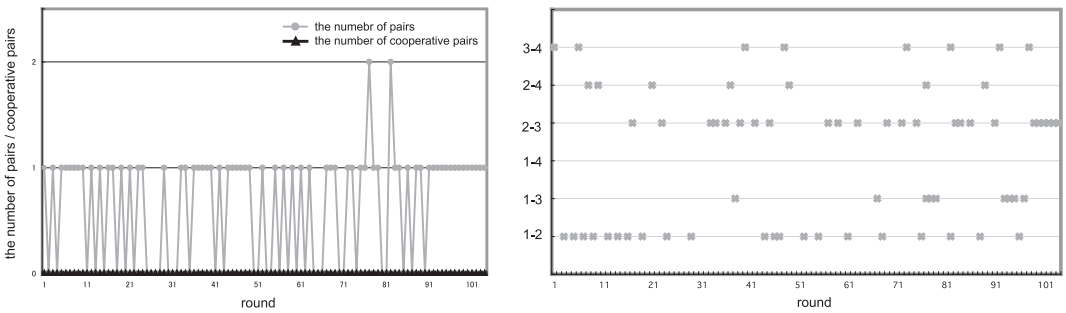


Figure 4.5: An example of Case 0

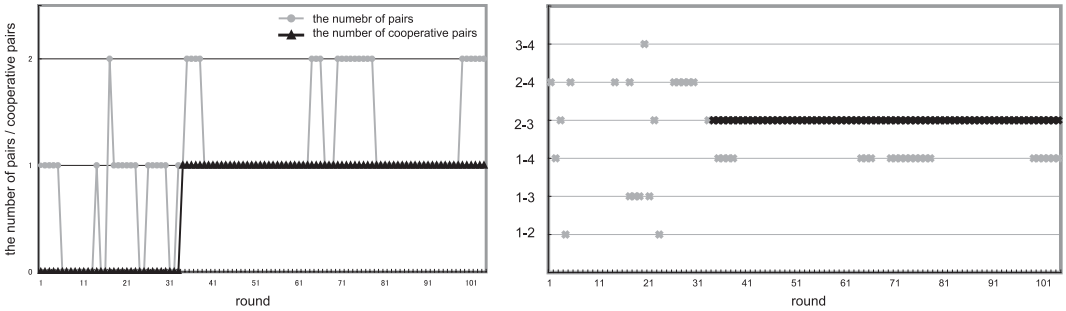


Figure 4.6: An example of Case 1

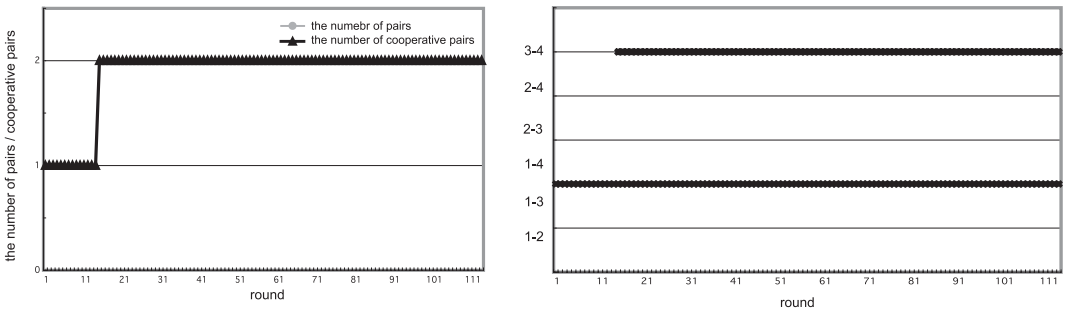


Figure 4.7: An example of Case 2

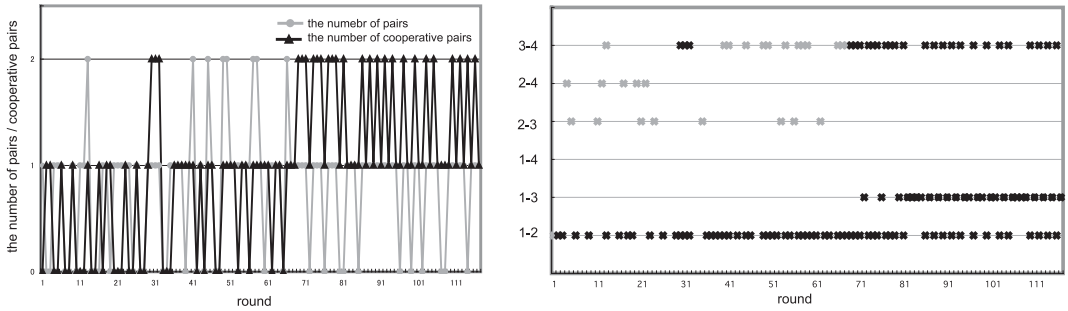


Figure 4.8: The exceptional case in PDNα-2

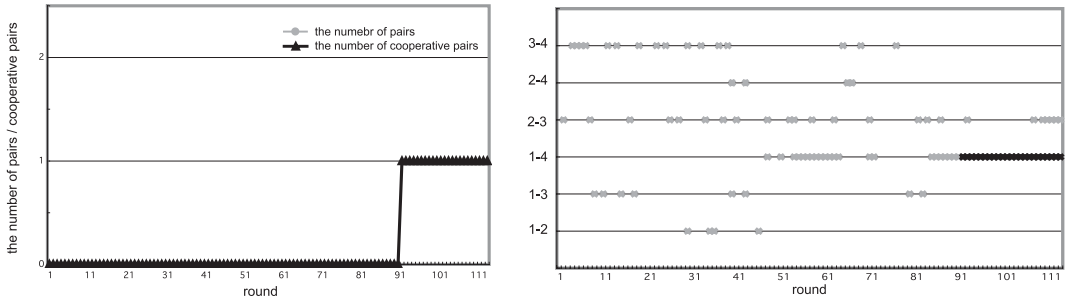
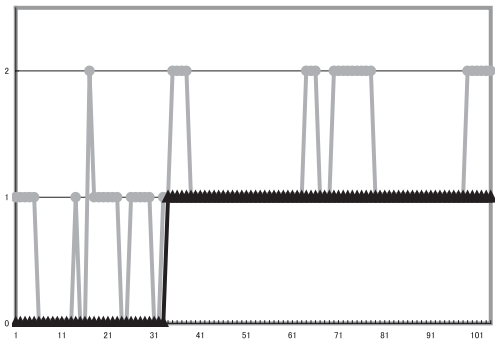


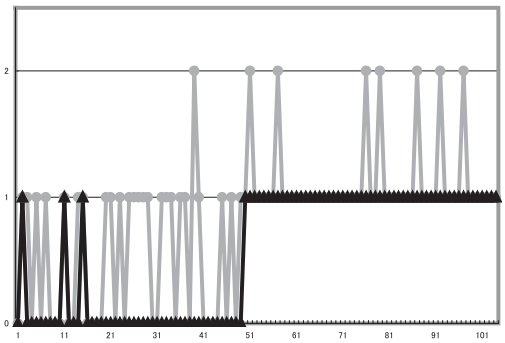
Figure 4.9: The exceptional case in PDNβ-2

ペアであり，黒線は相互協力状態にあるペアを示している．また，右側の図において縦軸は各被験者の組み合わせ（4 人 1 組であるので 6 通り）であり，横軸は実験回数である．灰点は相互指名によってペアが成立したことを示し，黒点は相互協力状態にあることを示している．

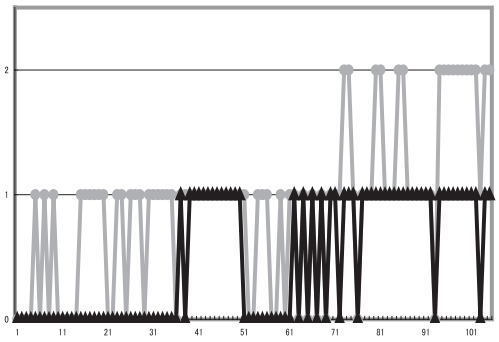
第二に，被験者が得た総得点は協力的な被験者ほど高いことが分かった．Figure 4.14 と Figure 4.15 は被験者が得た平均得点と協力率の関係を示す．図において，横軸は被験者の協力率（協力を選択した回数をペアが成立した回数で除したもの）を示し，縦軸は平均得点を示している．図より，協力率の高い被験者ほど平均得点が高いことが分かる．ただし Figure 4.14 に示すように PDNα では協力率に関わらず平均得点が 1 付近の被験者の集団が存在する．これは，PDNα では相互指名によってのみペアが成立するために，ペアが成立した回数が少ない被験者の平均得点がペア不成立時の 1 点に近くなるためである．



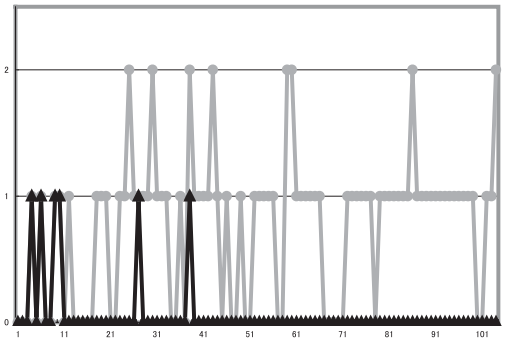
Group1 (Case 1)



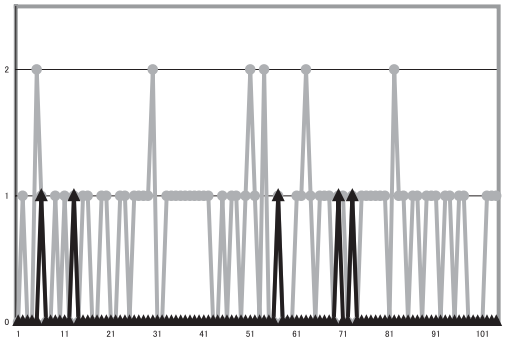
Group4 (Case 1)



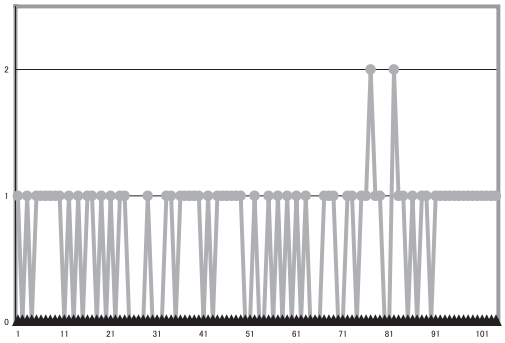
Group2 (Case 1)



Group5 (Case 0)

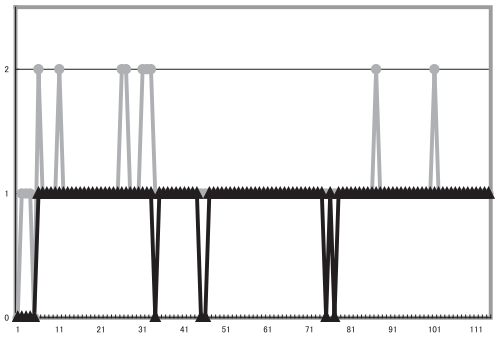


Group3 (Case 0)

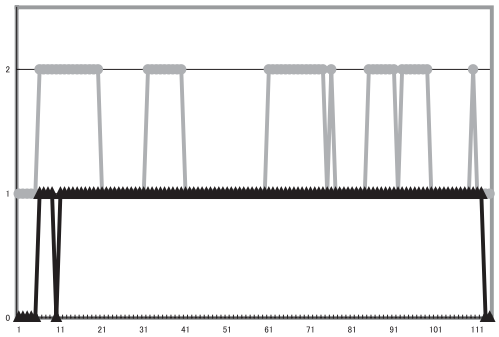


Group6 (Case 0)

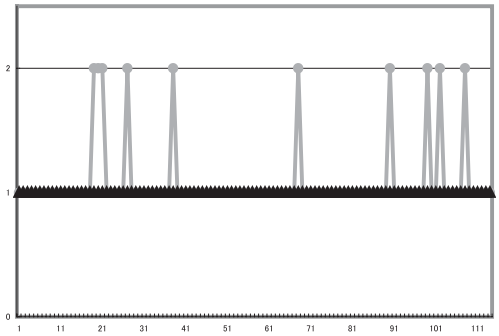
Figure 4.10: Results of PDNα-1



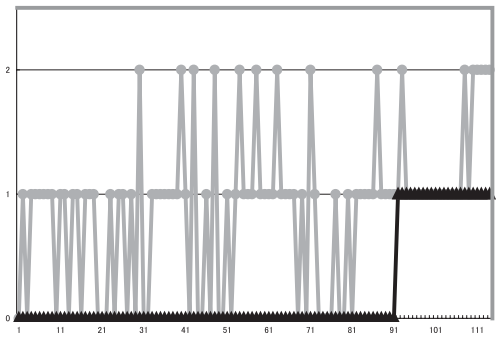
Group1 (Case 1)



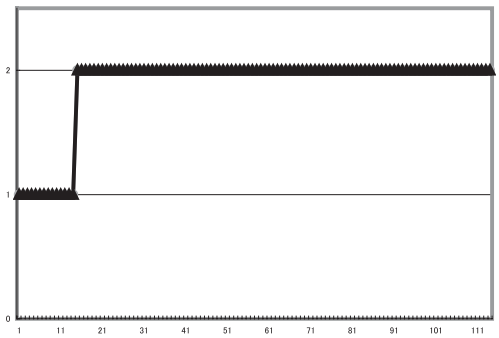
Group4 (Case 1)



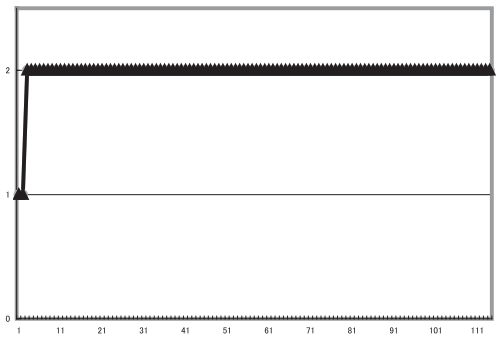
Group2 (Case 1)



Group5 (The exceptional case)

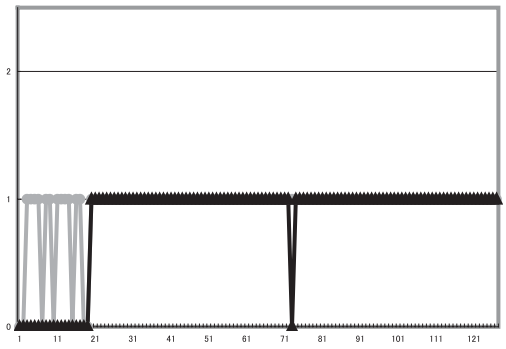


Group3 (Case 2)

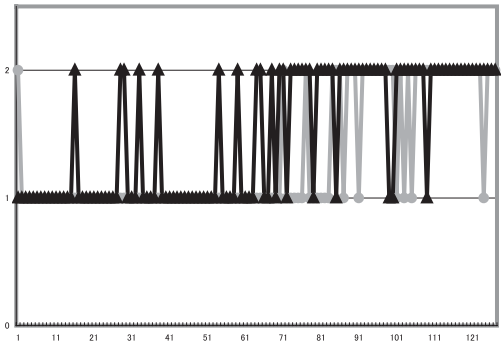


Group6 (Case 2)

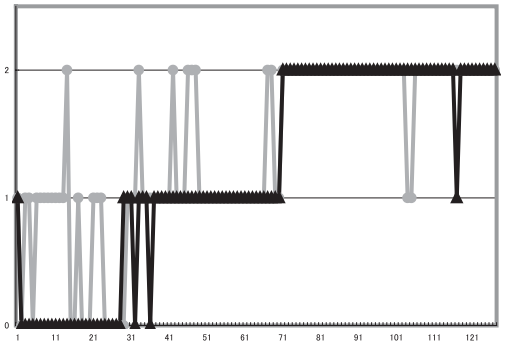
Figure 4.11: Results of PDNα-2



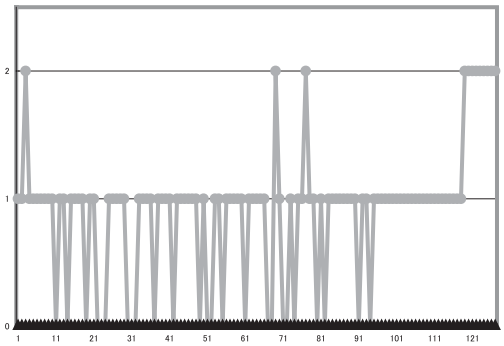
Group1 (Case 1)



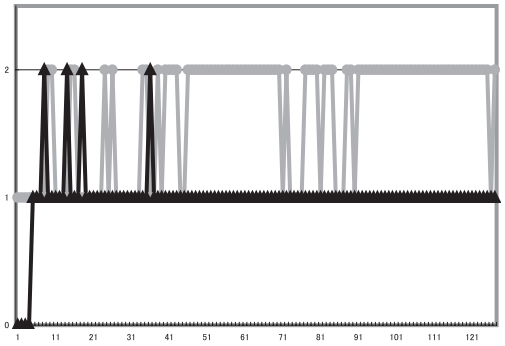
Group4 (Case 2)



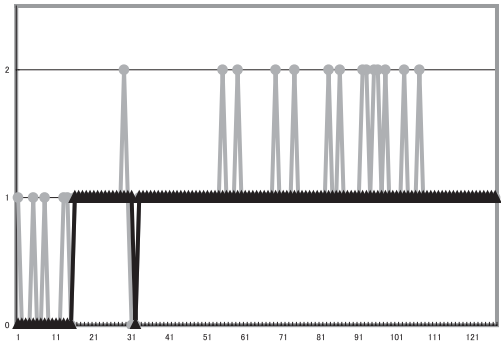
Group2 (Case 2)



Group5 (Case 0)

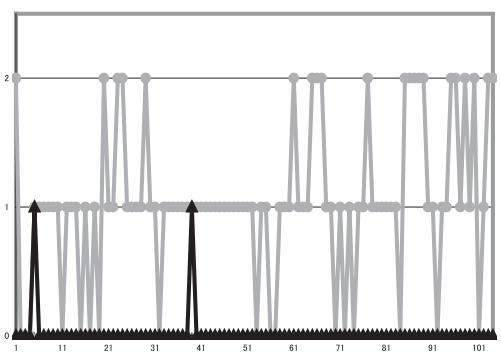


Group3 (Case 1)

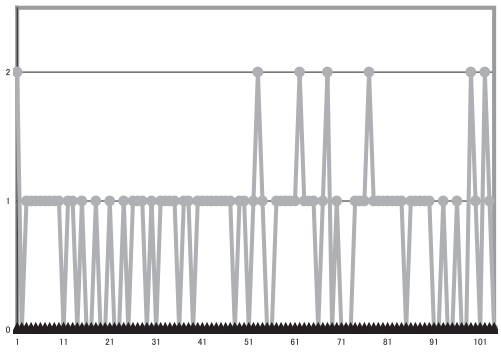


Group6 (Case 1)

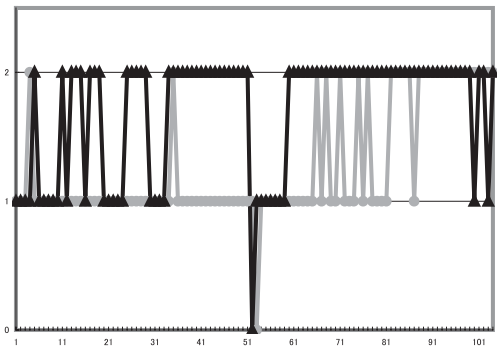
Figure 4.12: Results of PDNβ-1



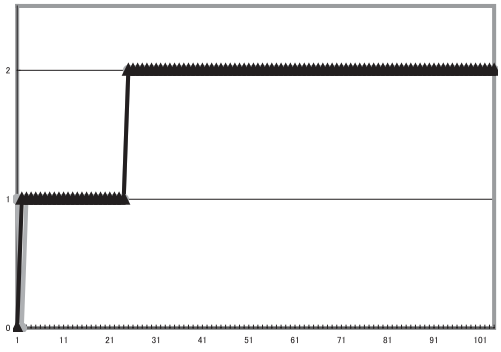
Group1(Case 0)



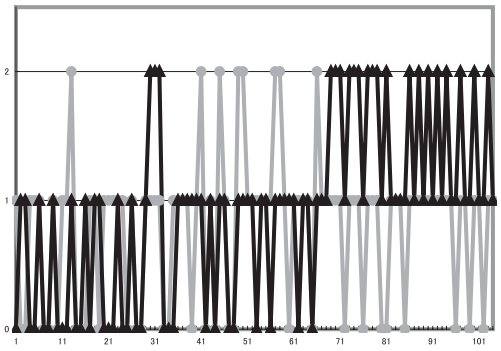
Group4(Case 0)



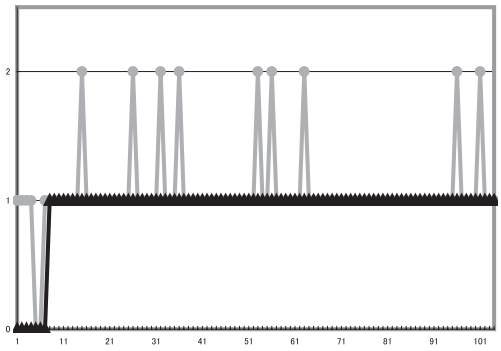
Group2(Case 2)



Group5(Case 2)



Group3 (The exceptional case)



Group6(Case 1)

Figure 4.13: Results of PDNβ-2

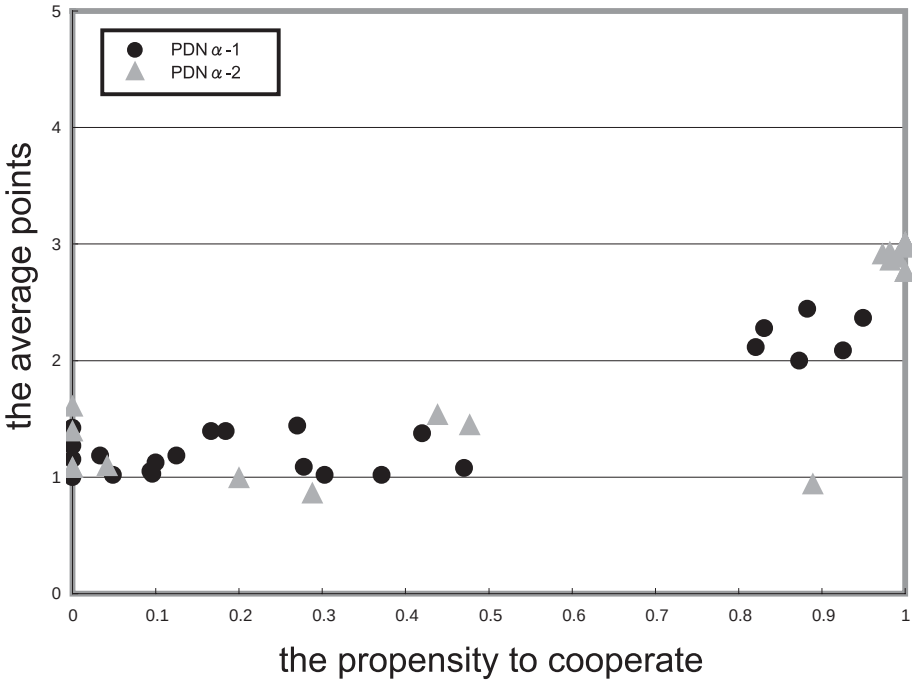


Figure 4.14: The average points (PDNα)

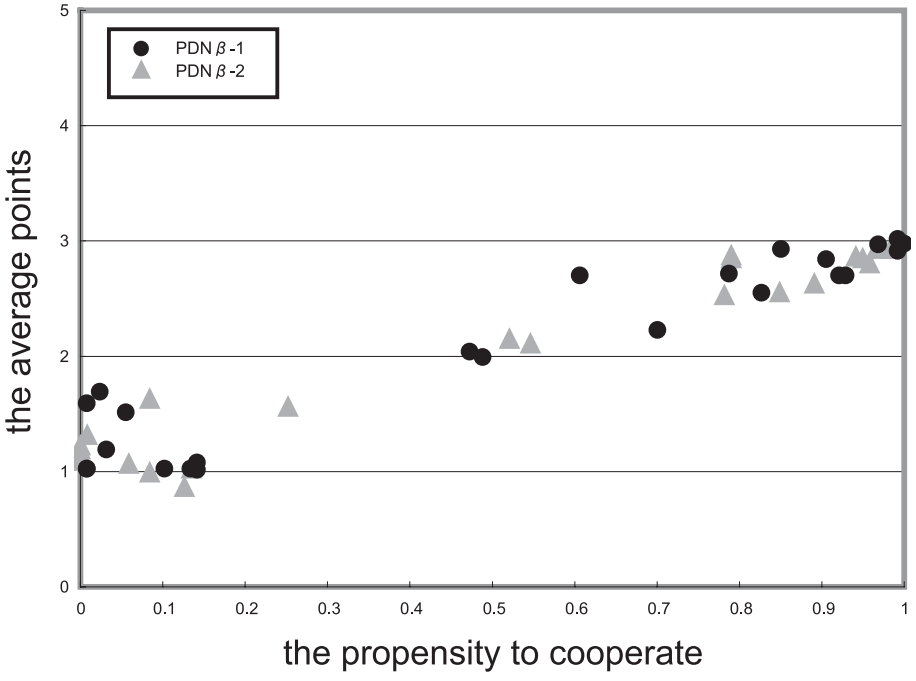


Figure 4.15: The average points (PDNβ)

4.4 計算機実験

次に，計算機実験により被験者実験の再現を試みる．繰り返し囚人のジレンマを取り扱った研究では，あらかじめ特定の戦略をプレイヤにプログラムする方法 [2, 3, 54] や，強化学習を用いて行動を決定させる [11, 12, 13, 31] ものなどがある．しかし，被験者が実際におこなう行動の多様性や変化を見る限り，特定の行動をあらかじめプログラムする方法は適切とは言い難い．また，強化学習を用いた方法では主に得られた得点をもとに行動を学習していくため，非協力によって高い利得が得られる方へ収束することが多い．Erev & Roth の強化学習アルゴリズム [13] はあらかじめ戦略のなかに「協力」,「非協力」に加えて「しっぺ返し戦略」を組み込むことで「しっぺ返し戦略」が学習され，プレイヤ間の相互協力が増加することが示されているが，この場合も被験者があらかじめそのような行動を準備しているとは考えにくい．また，ネットワーク型囚人のジレンマでは「協力」「非協力」の行動選択に加えて対戦相手の選択もおこなうため，さらに多様な戦略を表現する必要がある．そこで本研究では，相手の「信頼度」を数値化し，その値をもとに相手の指名と行動決定をおこなうアルゴリズムを提案する．本アルゴリズムの要点は以下の 3 つである．

- 信頼度の値を用いて相手の指名および行動決定をおこなうことにより，単一のパラメータで異なる多種多様な戦略を表現できる．
- 相手の行動によって信頼度を変化させることにより，状況に合わせた適切な行動選択を可能とする．
- 得られた得点ではなく相手の行動を評価基準とするため，強化学習にみられる非協力行動への偏向を回避できる．

4.4.1 プレイヤの行動のモデル化

本研究では,「信頼度」は相手がどのような行動をとるかに対する主観的な期待を数値化したものであり，以下のような仮定を満たすものとして定義する．

(1) 信頼度の値は対戦相手が「協力」した場合に増加し,「非協力」をとった場合には減少する．

(2) 信頼度の値は 0 から 1 の間とし，相手が常に協力した場合には 1 に，相手が常に非協力をとった場合には 0 に収束する．

(3) 同じ相手と複数回の対戦を行ったとき，新しい時点の行動ほど大きく評価する．すなわち相手の過去の行動については割引をかけて評価する．

(4) PDNα において，あるプレイヤを指名したにもかかわらず相手から指名されなかった場合には信頼度の値が減少する．

(5) 指名しなかったプレイヤに対する信頼度は変化しない．

以上の仮定を満たすものとして，時刻 t におけるプレイヤ i の j に対する信頼度を

$$T_{i,j}(t) = W_{i,j}(t)\left(\frac{1}{1+r}\right)\{rX_{j,i}(t) + T_{i,j}(t-1)\} + \{1 - W_{i,j}(t)\}T_{i,j}(t-1) \tag{4.7}$$

と定義する．

ここで r は割引率であり，$r > 0$ とする．r の値が大きいほど相手の直前の行動に対する信頼度の変化は大きくなる．たとえば $r = \infty$ ならば信頼度は相手の直前の行動のみによって決定され，$r = 0$ であれば相手の行動にかかわらず信頼度は一定の値をとり続ける．$X_{i,j}(t)$ は 時刻 t の対戦におけるプレイヤ i の j に対する行動であり，以下のように定義する．

$$X_{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{cooperate}) \\ 0 & (\text{defect}) \end{cases} \tag{4.8}$$

また $Y_{i,j}(t)$ は時刻 t においてプレイヤ i が j を指名したかどうかを表す変数であり，以下のように定義する．

$$Y_{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{nominate}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{4.9}$$

ここで，は時刻 t においてプレイヤ i が j とペアになったかどうかを示す変数として $Z_{i,j}(t)$ を定義する．

$$Z_{i,j}(t) = \begin{cases} 1 & (\text{paired}) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \tag{4.10}$$

$W_{i,j}(t)$ は $Y_{i,j}(t)$ と $Z_{i,j}(t)$ の最大値として定義する．

$$W_{i,j}(t) = \max\{Y_{i,j}(t), Z_{i,j}(t)\} \tag{4.11}$$

各プレイヤは (4.7) 式，(4.8) から (4.11) 式によって定義される信頼度を用いて相手指名および行動選択（協力か非協力）をおこなう．指名戦略として，各プレイヤは最も高い信頼度をもつプレイヤをゲームの相手として指名する．すなわち，プレイヤ i は $T_{i,j}(t)$ が最大となるプレイヤ j を指名する．信頼度の値が最大となるプレイヤが複数存在する場合にはその中からランダムに 1 人のプレイヤを指名するものとする．

ペアが成立した場合，囚人のジレンマゲームの対戦がおこなわれる．各プレイヤの行動決定（協力もしくは非協力）は信頼度の値にしたがって確率的におこなう．時刻 t の対戦においてプレイヤ i がプレイヤ j に対して協力を選択する確率 $P_{X_{i,j}(t)=1}$ を以下のように定義する．

$$P_{X_{i,j}(t)=1} = T_{i,j}(t-1) \tag{4.12}$$

すなわち各プレイヤは対戦相手の信頼度の値を協力の確率として使用する．

以上より割引率 r と信頼度の初期値 $T_{i,j}(0)$ の組み合わせにより様々な行動戦略を表現することができる．$r = \infty$ かつ $T_{i,j}(0) = 1$ とすると，2 人ゲームの場合によく知られた「しっぺ返し」戦略（第 1 手目は協力を選択し，それ以降は相手が直前にとった行動と同じ行動をとる）と同じになる．$r = 0$ のときは相手の行動に関係なく $T_{i,j}(0)$ の確率で協力か非協力かを選択する戦略となる．

4.4.2 計算機実験の手順

前述のモデルにもとづいて計算機実験をおこなう．実験の手順は以下の通りである．

(1) 4 人のプレイヤによる初期集団を生成する．r，$T_{i,j}(0)$ の値はランダムに各プレイヤに与える．

(2) 各プレイヤは 信頼度 $T_{i,j}(t)$ が最大となるプレイヤを 1 名指名する．

(3) 各プレイヤの指名にもとづいてペアを形成する．計算機実験においても PDNα，PDNβ の両方をおこなう．

(4) 形成されたペアの間で囚人のジレンマゲームの対戦を行う．

(5) 各プレイヤの行動にもとづいて利得が与えられる．

(6) 各プレイヤは対戦相手もしくは指名した相手の行動にもとづいて信頼度の値を変更する．

以上の手順を 1 ラウンドとし，100 ラウンドを 1 試行とする．実験は 50 万試行おこなわれる．割引率および信頼度の初期値は $0 < r < 100$，$0 < T_{i,j}(0) < 1$ で試行ごとにランダムに各プレイヤに与えられる．1 集団を 4 名のプレイヤとし，囚人のジレンマゲームには Table 4.1 に示す利得表を用いる．

4.4.3 計算機実験結果

Table 4.4 は計算機実験で得られたそれぞれの場合の比率を示す．表より，ほとんどの場合（約 90%）でいずれかの場合に分類できる．

Table 4.4: The classification of simulations

–	Case 0	Case 1	Case 2	others
PDNα	63.6%	24.8%	0.8%	10.8%
PDNβ	2.7%	61.9%	26.3%	9.1%

Figure 4.16 から Figure 4.18 は計算機実験におけるそれぞれの場合の例である．計算機実験でも被験者実験と同様にこれらの結果を再現することができた．また，被験者実験と同様に試行を重ねていく過程で協調関係を築くことのできる相手を選択し，その場合には自分から裏切りを選択することなく長期にわたる協調関係を維持していることが分かる．

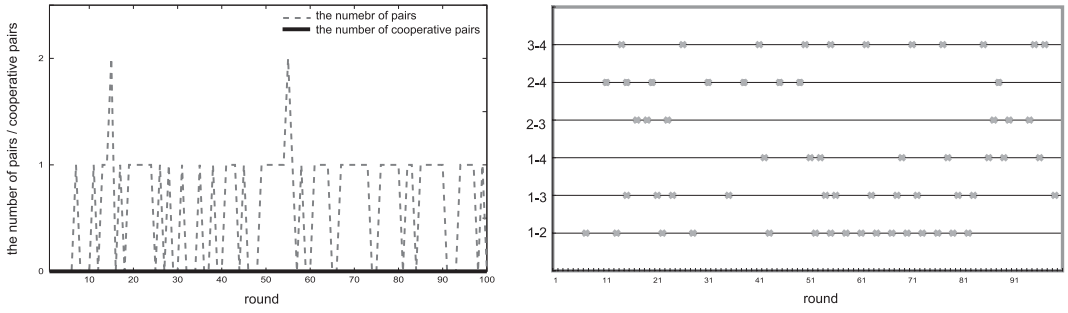


Figure 4.16: Case 0 in simulations

Figure 4.19 および Figure 4.20 は計算機実験におけるプレイヤの平均点と協力率の関係を示す．50 万試行のうちの 500 回の結果をランダムに抜き出して表示し

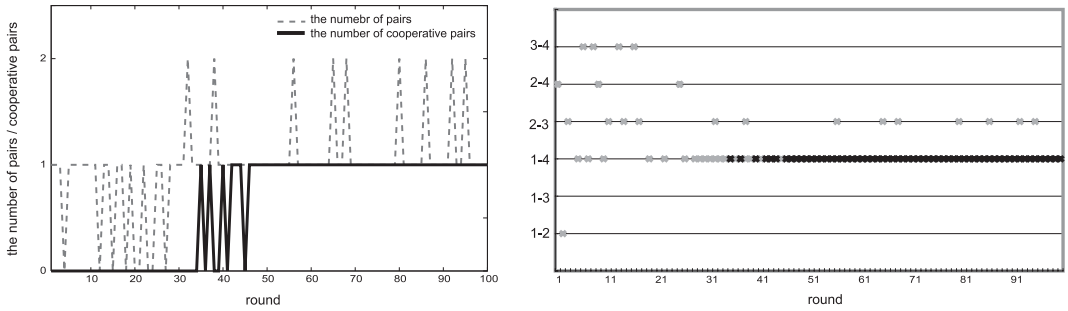


Figure 4.17: Case 1 in simulations

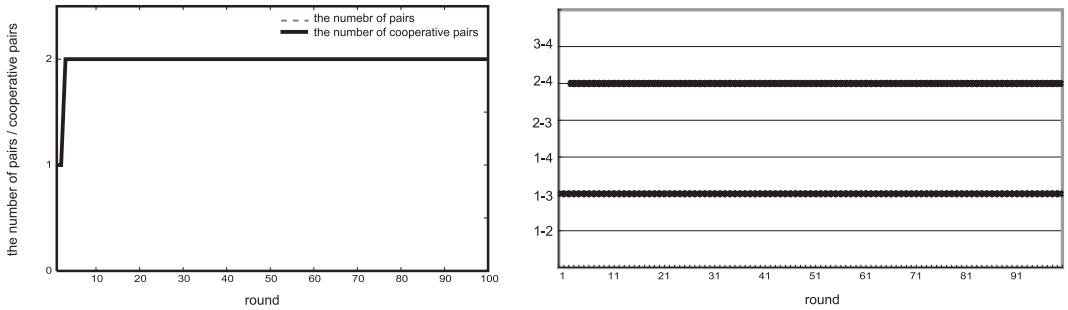


Figure 4.18: Case 2 in simulations

ている．協力率の定義は被験者実験の場合と同じである．平均点と協力率の関係においても，本研究で提案した手法によって被験者実験と同様の結果が得られた．特にPDNαにおいて，ゲームにあまり参加できなかったプレイヤが平均点1付近に集中する様子がはっきりと確認できる．

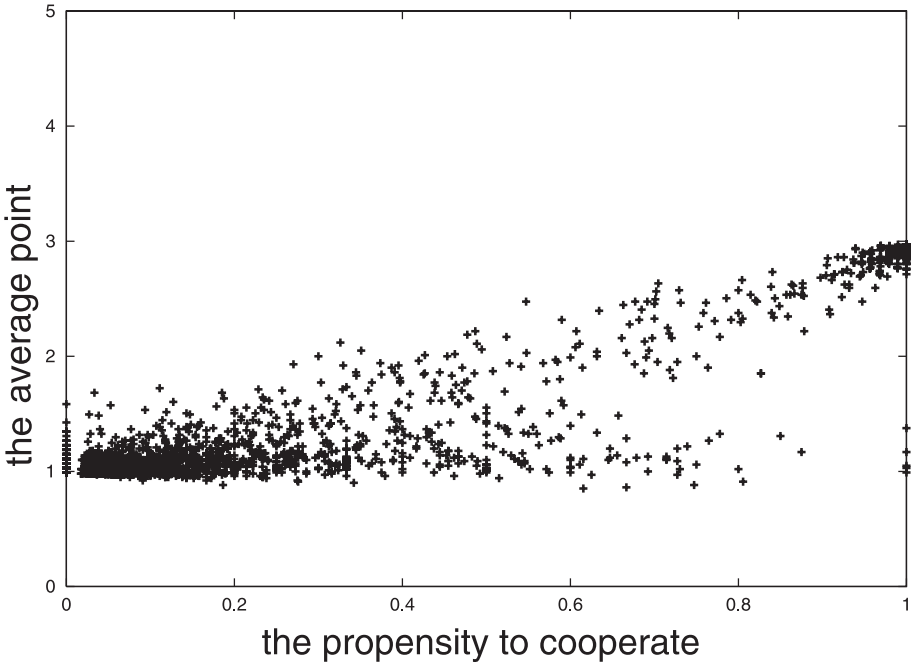


Figure 4.19: The average points in sumulations (PDNα)

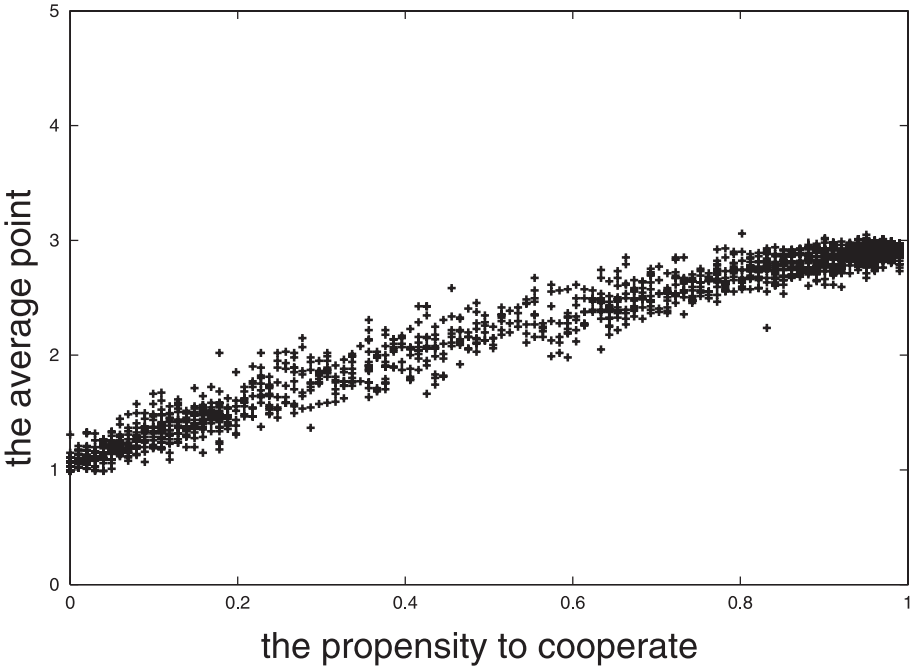


Figure 4.20: The average points in suimulations (PDNβ)

4.5 考察

被験者実験において，各セッションにおける平均ペア数（ Case n に分類されないグループは除外して計算）は PDNα-1，PDNα-2，PDNβ-1，PDNβ-2 でそれぞれ 0.5，1.4，1.2，1 となる．計算機実験においては PDNα で 0.29，PDNβ で 1 となる．被験者実験において，同じ日におこなわれた実験では第 1 セッションより第 2 セッションの方がペア数が増加している (0.5 → 1; 1.2 → 1.4)．また，4.2 より 100 ラウンドまでの平均点をみても第 1 セッションより第 2 セッションの方が大きくなっている (143.4 → 202.2; 201.6 → 218.7)．ペア形成規則が異なるにも関わらずこのような傾向が出ていることから，被験者はセッションを通じてゲームの構造や戦略を学習し，ペア形成規則が異なる場合のゲームにおいても協力的な関係を築いていると言える．

被験者実験における第 1 セッションの平均ペア数と，計算機実験における平均ペア数の比較を Table 4.5 に示す．計算機実験により，被験者実験に近い結果が得られたと言える．第 2 セッションの結果と計算機実験の結果はかなり異なるが，計算機実験における信頼度の初期値を変化させることで再現できるのではないかと考えている．実際に計算機実験において信頼度の初期値を大きくすれば平均ペア数や平均利得は増加する．今後さらに被験者実験をおこない，実際の被験者がどの程度の信頼の初期値を持っているのか，セッションを通じてどのように変化するのかを分析し計算機実験で検証したいと考えている．

Table 4.5: The comparison between experiments (1st session) and simulations

–	PDNα(-1)	PDNβ(-1)
experiments	0.5	1.2
simulations	0.29	1.25

次に協力率と平均得点の関係について見てみると，被験者実験において PDNβ ではほぼ線形に分布している．PDNα では相互の指名によってのみペアが成立するため，ペアが成立した回数の少ない被験者は協力率にかかわらず平均得点が 1 点付近に分布しているが，それ以外は線形に分布している．このことから，被験者実験においては非協力によって相手を搾取して高得点を得ようとしてもペアとして指名されなかったり，ペアになっても相互非協力となって低い得点に押さえられていると考えられる．つまり，ネットワーク型囚人のジレンマにおいては協力的に振る舞い，同じく協力的な相手と継続的な関係を維持することが高得点につながると言える．計算機実験はこの結果を非常に忠実に再現しており，協力的なプレイヤほど高い得点を得る結果となった．

4.6 結言

本章では「ネットワーク型囚人のジレンマ」の被験者実験により行動主体間に発生する協調行動について分析し，計算機実験による被験者行動の再現をおこなった．我々が提案する「信頼度」にもとづく行動決定手法により，被験者実験でみられた以下の 2 点の特徴を計算機実験によって再現できた．

- ほとんどの被験者（プレイヤ）が常に同じ相手を指名し，協力する「継続的協調ペア」が一定数形成されるか，全く協調しないかのいずれかに分類される．
- 協力率の高い被験者（プレイヤ）ほど平均得点が高い．ただし，PDNα においてゲームにあまり参加できなかったプレイヤは協力率に関わらず平均得点が 1 付近となる．

現実社会で観察される継続的関係の多くは互いの合意にもとづくものであり，企業や消費者といった社会システムを構成する主体間の関係の分析は重要である．特に，ネットワークを通じた取引やオークションでの売買など，実際に相手と会って交渉しなくてもいい場合には相手が信頼できるかどうかを見極め，その上で有益な関係を築いていく必要がある．このような状況のモデル化，および分析にあたって本研究で用いた手法が応用できる．

今後は 1 グループの構成人数を増加させ，常に 1 対 1 の対戦ではなく 1 対複数，複数対複数の対戦などを導入することや，抽象的な利得表ではなく商品やサービスの取引を念頭においたモデル化をおこなうことでより現実的で有用な研究にできると考えている．

第5章　結論

本論文では意思決定主体間の相互作用によって創発される協調行動とそのシステム全体への影響に着目し，

- 意思決定主体間の相互作用を記述し，システム全体の複雑な挙動を創出する新たなモデルの提案
- 理論解析・計算機実験・被験者実験を用いた提案モデルの分析と検証

を行った．

まず第2章において消費者間の相互作用によって発生する協調行動，特に口コミの影響についてモデル化を行った．従来の消費者理論が個人の意志決定を個人の嗜好や効用のみに基づいて決定しているのに対し，本論文では他者からの影響（ネットワーク外部性）を消費者の効用関数に導入することで相互作用の影響を記述した．この消費者モデルとセルオートマトン法を用いて計算機のオペレーティング・システムの市場をモデル化し，計算機実験によりその挙動を分析した．計算機実験より，他者からの影響を考慮することで市場における急速な製品の普及や衰退，またほんの少しの初期条件の違いが最終的な市場の状態を完全に変化させてしまうこと（バタフライ効果）が確認された．次に製品の価格が需要に応じて変化する場合の計算機実験を行い，価格の変化幅によって市場の挙動が大きく変化することを観察した．価格が変化することによって消費者の選択は一定の場合から周期的，さらに複雑な状態へと遷移した．価格の変動幅が大きいほど消費者の選択は複雑となり，予測も困難となる．実際の市場では他に様々な要因が絡み合って複雑な挙動を生み出していると考えられるが，その要因の一つとして価格の変動が大きな影響を与えていると思われる．

第3章では企業間の価格競争と協調のモデル化を行い，被験者実験と理論解析の比較を行った．新古典派経済学では市場価格は需要と供給の一致によって決まるとされているが，実際に価格設定を行っているのは企業を中心とする製品の販売業者である．そこで本研究ではマーケットマイクロストラクチャー理論を用いて企業を売り手と買い手の仲介業者とし，価格設定を行う主体と考えた．さらに2社の企業がベルトラン競争という価格競争を行うモデルを構築し，被験者実験

によって実際に人間がどのような価格戦略をとるか分析した．被験者実験の結果，本モデルの理論均衡であるベルトラン均衡（ワルラス価格）付近の価格を提示する被験者がかなり多い（約 81%）ことが確認されたが，いくつかのペアは独占価格（独占状態で最も利益の高い価格設定）で協調し，互いに継続的な利益を得ることも観察された．現実社会で見られる価格競争や価格協定（家電量販店や外食産業に見られる非常な安値での競争や，異なるメーカーの製品がほとんど同じ価格で販売されている状況など）を現していると思われる．今後，それぞれの製品や市場に合わせてモデルを修正することで実社会での企業行動や戦略を分析する手法として応用できると考えている．

第 4 章では「ネットワーク型囚人のジレンマ」を用いて行動主体間に発生する関係と協調行動について分析した．従来の囚人のジレンマでは主体間の関係を変更や解消が不可能なものとして取り扱ってきたが，現実社会での継続的関係はむしろ互いの合意によって自発的に発生したものが多い．これは個人での情報のやりとりから企業間の取引まで応用が可能な概念である．ネットワーク型囚人のジレンマでは行動主体が自ら対戦相手を選択することができ，その関係の継続・解消も自由である．本研究では 4 人 1 組でのネットワーク型囚人のジレンマのモデルを構築し，まず被験者実験によってどのような関係が創発するかを観察した．被験者実験の結果より，ほとんどの被験者が (1) 特定の相手と継続的な協調関係を築く，(2) どの相手とも協調関係を築かない，といった 2 つに分けられることが分かった．また，被験者が得た得点を見ると協力的な被験者ほど高い得点を得ていることが分かった．これらの実験結果は現実社会においても継続的関係を維持し，利益を保つための戦略として考えることができる．次に計算機実験により被験者実験と同様の結果を創出するような意思決定モデルの構築を行った．本研究では相手の指名と行動を「信頼度」と言う尺度を用いて決定する手法を提案した．信頼度は個人が持っている相手一般への信頼と，相手の行動による信頼の変化によって定義するものとした．囚人のジレンマの計算機実験ではあらかじめ戦略をプログラムしておく方法や，強化学習を用いるものなどがあるがいずれも被験者実験と同様の結果を十分に創出しているとは言い難い．本研究で用いた信頼度モデルは被験者実験で得られた結果を非常によく現しており，今後現実社会での継続的関係の分析に応用できる．特に，ネットワークを通じた取引やオークションでの売買など，実際に相手と会って交渉しなくてもいい場合には相手が信頼できるかどうかを見極め，その上で有益な関係を築いていく必要がある．このような状況のモデル化，および分析にあたって本研究で用いた手法が有効であると考える．

上述の結果により，本論文では消費者，企業，さらに意思決定主体としての個人の相互作用を記述するモデルをそれぞれ提案できたと考えている．また意思決定主体の相互作用の結果として創発するシステム全体の挙動を分析する手法とし

ての計算機実験，被験者実験をそれぞれ構築し分析できた．特に第 4 章では理論解析，被験者実験，計算機実験をそれぞれ行い，総合的な分析を行うことができた．計算機実験が被験者実験と同様の結果を創出できたことより，提案したモデルの妥当性の検証も行えたものと考えている．

参考文献

[1] Arther, B.: Designing Economic Agents that act like Human Agents: A Behavioral Approach to Bounded Rationarity, American Economic Reaview, 81, pp. 353-409, 1991.

[2] Axelrod, R.: *The evolution of cooperation*, Basic Books, New York, 1984.

[3] Axelrod, R.: *The complexity of cooperation*, Princeton University press, New York, 1987.

[4] Axtell, R.: Why Agents? On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences, Working Paper No. 17, Brookings Institution Center on Social and Economic Dynamics , 2000.

[5] Axtell, R., Epstein, J. M. and Young, H. P.: The Emergence of Classes in a Multi-Agent Bargaining Model, *Social Dynamics*, MIT Press, 2000.

[6] Cooper, R. M.: *Coodination Games: Complementarities and Macroeconomics*, Cambridge University Press, 1999.

[7] Davis, D.D. and Holt, C. H.: *Experimental Economics*, Princeton University Press, 1993.

[8] Duffy, J. and Feltovich, N.,: Words, Deeds and Lies, The Proceedings of The 6th International Conference of COMPLEX SYSTEM 2002, pp98-116, 2002.

[9] Engel, J. F., Blackwell, R. D. and Miniard, P. W.: *Consumer Behavior* (8th ed.). Dryden Press, 1995.

[10] Epstein, J. M. and Axtell, R.: *Growing Artificial Societies*, MIT Press, 1996.

[11] Erev, I. and Barron, G.: On adaptarion, maximization, and reinforcement learning among cognitive strategies, Technion Working Paper, 2001.

[12] Erev, I. and Roth, A.E.: Predicting How People Play Games: Reinforcement Leraning in Experimental Games with Unique, Mixed Strategy Equilibria; *American Economic Reaview*, Vol. 88, No. 4, pp.848-881, 1998.

[13] Erev, I. and Roth, A.E.: Simple reinforcement learning models and reciprocation in the prisoner's dilemma game; *The Bounded Rationality : The Adaptive Toolbox*, pp.215-231, MIT Press, 2002.

[14] Fang, F. and Sanglier, M. (Eds).: *Complexity and Self-Organization in Spcial and Economic Systems*, LNEM 449, Springer, 1999.

[15] Feltovich, N., Equilibrium and Reinforcemant Leraning in Private-Information Games, *Journal of Economic Dynamics and Control*, 23, pp. 1605-1632, 1999.

[16] Gintis, H.: *GAME THEORY EVOLVING*, Princeton University Press, 2000.

[17] Hagel, J. H. and Roth, A. E.: *The Handbook of Expermental Economics*, Princeton University Press, 2002.

[18] Harsanyi, J and Selte, R., *A General Theory of Equilibrium Selection in Games*, Cambridge, MA, MIT Press, 1988.

[19] Hayashi, N. and Yamagishi, T. : Selective play: Choosing partners in an uncertain world; *Personality and Social Psychology Review*, Vol. 2, pp.276-289, 1998.

[20] Hillebrand, E. and Stender, J.: *Many-Agent Simulation and Artificial Life*, IOS Press, 1994.

[21] Iyori, K.,Hatono, I., Oda, S. H. and Ueda, K.: The emergence of cooperative behaviour in the Prisoner's Dilemma Network: Simulations and Experiments; *Proc. of the 6th International Conference on COMPLEX SYSTEMS*, pp.134-140 , 2002.

[22] Langton, C.: Life at Edge of Chaos, in Langton et al. (eds), Artificial Life II, ADDISON-WESLEY PUBLISHING, 1992.

[23] Miller, R. M.: *Paving Wallstreet: Experimental Economics and the Perfect Market*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

[24] Oda, S.H., MIURA Ken, Ueda, K.: The Application of Cellular Automata to Network Externalities in Consumers' Theory, in Langton et al. (eds), Artificial Life V, MIT Press, 1997.

[25] Oda, S. H., Iyori, K., MIURA Ken, Ueda, K.: The Application of Cellular Automata to the Consumer's Theory: Simulating the Diffusion of Rivalling Products, *Simulated Evolution and Learning*, LNAI 1585, Springer, pp. 454-461, 1999.

[26] Ogawa, K., Koyama, Y. and Oda, S. H.: An Experimantal Approach to Market Microstructure -Search and Market Efficiency, The Proceedings of The 6th International Conference of COMPLEX SYSTEM 2002, pp124-134, 2002.

[27] O'hara, M.: *Market Microstructure Theory*, Cambridge University Press, 1995.

[28] Price, T. C. : Using co-evolutionary programming to simulate strategic behaviour in markets, Journal of Evolutionary Economics 7, pp219-254, 1997.

[29] Rogers, E.M. and Rogers, R.A.: *Communication in organization*, Free Press, 1985.

[30] Roberts, G. and Sherratt, T.: Development of cooperative relationships through increasing investment, Nature 394, pp. 175-179, 1998.

[31] Sarin, R. and Vahid, F : Predicting How People Play Games: A Simple Dynamic Model of Choice; *Games and Economic Behavior*, 34, pp.104-122, 2001.

[32] Spullber, D. F. :*Market Microstructure: intermediaries and the theory of the firm*, Cambridge University Press, 1999.

[33] Terano, T., Kurahashi, T and Minami, U: TRURL: Artificial World for Social Interaction Studies, *Proc. 6th Int. Conf. on Artificial Life (A LIFE VI)*, pp. 326 - 335, 1998.

[34] Ueda, K: Synthesis and Emergence; *Artificial Intelligence in Engineering*, Elsevier, 15, pp321-327, 2001.

[35] von Neumann, J. and Morgenstern, O., *Theory of Games and Economic Behaviour*, Princeton University Press, 1944.

[36] Wolfram, S. : *Cellular Automata and Complexity*, ADDISON-WESLEY PUBLISHING, 1994.

[37] Wolfram, S. : *A New Kind of Science*, Wolfram Media Inc., 2002.

[38] Yamagishi, T., Hayashi, N. and Jin, N.: Prisoners dilemmas network: Selection strategy versus action strategy, Social dilemmas and cooperation, pp. 233-250, Springer-Verlag, Berlin, 1994.

[39] 和泉潔, 「人工市場の作り方 – ヤッコーと呼ばれないために」, システム/制御/情報, Vol. 46, No.9, pp. 547-554, 2002.

[40] 伊庭崇, 「マルチエージェントモデルによるバーチャル・マーケットと消費者行動」, 進化経済学論集第 2 集, 1998.

[41] 北村新三, 喜多一, 「創発システム」, 計測と制御, Vol.40, No.1, pp. 94-99, 2001.

[42] 大村敬一, 宇野淳, 川北英隆, 俊野雅司, 「株式市場のマーケットマイクロストラクチャー：株価形成メカニズムの経済分析」, 日本経済新聞社, 1998.

[43] 小林四一, 「コンピュータ・コミュニケーションにおける電子コミュニティの構造分析」, 筑波大学 経営・政策科学研究科 修士論文, 1996.

[44] 酒井泰弘, 「寡占と情報の理論」, 東洋経済新報社, 1990.

[45] 塩沢由典, 「複雑系経済学入門」, 生産性出版, 1997.

[46] 神信人, 林直保子, 篠塚寛美, 「ネットワーク型囚人のジレンマの実験的研究：PD 関係におけるコミットメントの形成」, 実験社会心理学研究, 第 33 巻第 1 号, 1993.

[47] 杉本徹雄,「消費者理解のための心理学」, 福村出版, 1997.

[48] 鈴木一功（監修）, グロービス・マネジメント・インスティテュート（編）, 「MBA ゲーム理論」, ダイヤモンド社, 1999.

[49] 高玉圭樹, 寺野隆雄, 下原勝憲, 堀浩一, 中須賀真一, 「マルチージェント学習における知識の再利用と電気回路設計への応用」, コンピュータソフトウェア, Vol. 16, No. 5, pp. 37-49, 1999.

[50] 寺野隆雄, 「学習するエージェントとその組織的問題解決」, オペレーションズ・リサーチ, pp. 598-602, 1997.

[51] 寺野隆雄, 「社会科学を実験科学に：エージェントで社会をみる」, 第 13 回人工知能学会全国大会, 1999.

[52] 日本学術振興会未来開拓学術研究推進事業,「シンセシスの科学」中間研究成果報告書「創発的シンセシスの方法論」, 1998.

[53] 南潮, 倉橋節也, 寺野隆雄, 「エージェント間のインタラクションによる世論形成モデルの考察」, 経営情報学会, pp. 132-135, 1997 年秋季全国研究発表会大会.

[54] 林直保子, 神信人, 山岸俊男, 「ネットワーク型囚人のジレンマ：戦略のシミュレーション」, 社会心理学研究, 第 8 巻第 1 号, 1993.

[55] 山岸俊男, 「安心社会から信頼社会へ」, 中央公論新社刊, 1999.

[56] 山岸俊男,「信頼の構造〜こころと社会の進化ゲーム」, 東京大学出版会, 1998.

[57] 山岸俊男, 小杉素子 「社会的交換における裏切り者検知」, 認知科学, Vol. 6, No. 2, pp. 179-190, 1999.

[58] 吉田敦也, 蓮花一己, 金川智恵, 佐古秀一, 米谷淳, 「行動科学ハンドブック」, 福村出版, 1989.

[59] ロバート・アクセルロッド著，松田裕之訳,「つきあい方の科学」，HBJ 出版局，1984.

付録A: ベルトラン競争実験での実験説明書

2002年10月22日および29日に実施されたベルトラン競争モデルの被験者実験の説明書である．実験説明書は実験1回目の開始前に被験者に配布され，説明が行われた．追加資料1から3は1回目の実験終了後に配布された．なお，一般的な諸注意等は省略した．

1　画面の見方

正しくログインされると以下の画面 (図 1) が表示されるはずです。表示されない場合は速やかに手を挙げて知らせてください。

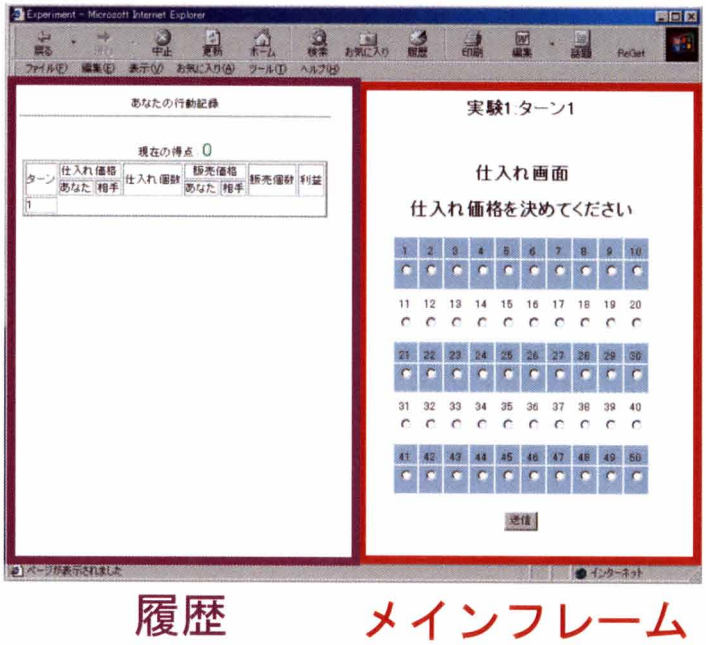


図 1: メイン画面

- メインフレーム : 画面右側のフレームです。皆さんが意思決定を行う部分です。1 から 50 のラジオボタンが並んでいます。
- 履歴 : 画面左側のフレームです。ここでは、過去のすべてのターンについて、「あなたと相手の仕入価格、あなたの仕入個数、あなたと相手の販売価格、あなたの販売個数、あなたの利益」が表示されます。上方にはあなたの総利益が表示されています。**緑字で表示されている場合は総利益がプラス、つまり黒字の状態です。逆に赤字で表示されている場合は総利益がマイナス、つまり赤字の状態です。**

2　実験の説明

これから行われる実験の説明をします。皆さんは２人のペアに分けられ、ペアになった人と対戦します。誰とペアになっているかは皆さんには知らされません。実験は２種類行われ、一つの実験が終わると新しいペアで対戦を行います。

2.1　あなたの役割

あなたは、ある商品を売手から仕入れて、買手に売ることで利益を得ます。ただし、あなたの他にもう一人同じ商品を仕入れ、販売する競争相手がいます。競争相手の行動を考慮に入れながらあなた自身の行動を決定してください。**皆さんへの報酬の金額は、ゲームを通じて皆さんが獲得した得点に比例して支払われます。**

あなたは仕入価格と販売価格の二つを決めることができます。最初に仕入価格を決定します。

2.2　手順１：仕入価格の決定

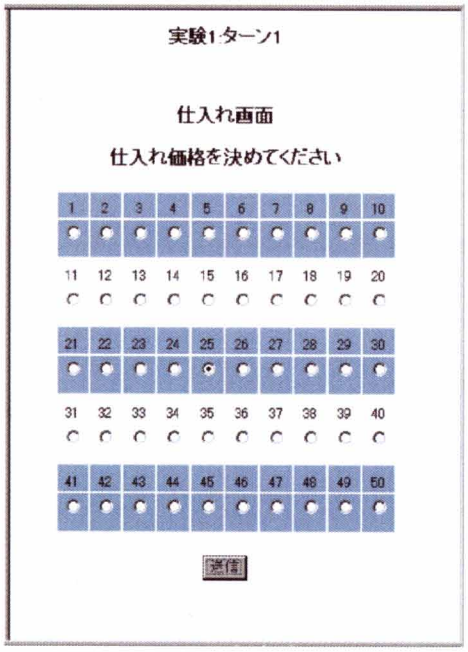


図 2: 仕入価格の決定

仕入価格は、メインフレームのラジオボタンをクリックすることで決めることができます（図2)。ラジオボタンは1から50まであります。
毎回の仕入価格を決めるときには、以下に注意してください。

1. あなたが仕入価格を高くつければつけるほど、商品をたくさん仕入れられます（仕入価格を下げると、仕入れられる商品の数は減ります)。

2. ただし、競争相手も同時に仕入価格を決定します。あなたの仕入価格と競争相手の仕入価格を比較して、高い方の価格をつけた人だけが商品を仕入れることができます。低い方の価格をつけた人は商品を仕入れることができません。

3. 競争相手の仕入価格とあなたの仕入価格が同じになった場合は仕入れられる個数をお互い半分ずつ仕入れます。

4. ゲームに偶然の要素はありません。一つの実験の中ではあなたと競争相手が同じ行動をとる限り、結果は常に同じです。

仕入価格を決定したら、「送信」ボタンを押してください。

1. 相手の仕入価格選択がまだの場合、メインフレームに図3が表示されます。

2. 相手の仕入価格選択が終わり、あなたが仕入に失敗した場合、メインフレームに図4が表示されます。

3. 相手の価格選択が終わり、あなたが仕入に成功した場合、メインフレームに図5が表示されます。

以上の画面では「更新」を押さない限り次の画面に進むことはありません。「更新」を押して次の画面に進んでください。

2.3 手順2：販売価格の決定

販売価格も仕入価格同様にメインフレームのラジオボタンをクリックすることで決めることができます。図5の下の部分に仕入価格の時と同じように1から50までのラジオボタンがあります。これをクリックして販売価格を決めてください。
毎回の販売価格を決めるときは、以下に注意してください。

1. **販売価格を決めることができるのは商品を仕入れることができたときだけです。**ですから、仕入価格が競争相手の仕入価格よりも低かった場合は、あなたは販売価格を決めることができません。

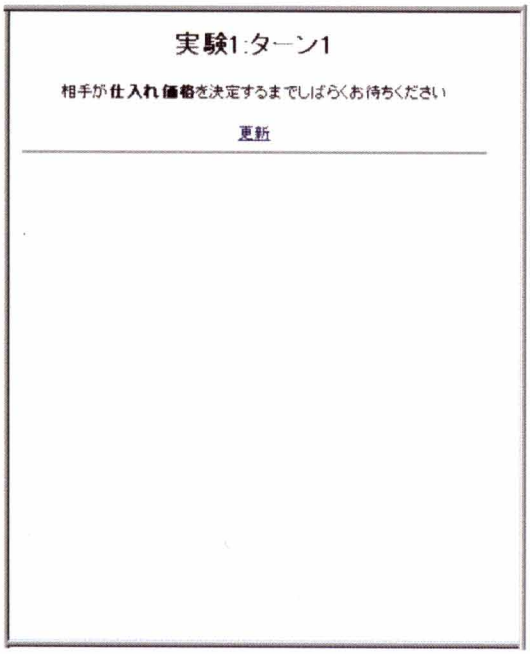


図 3: 待ち画面 (1)

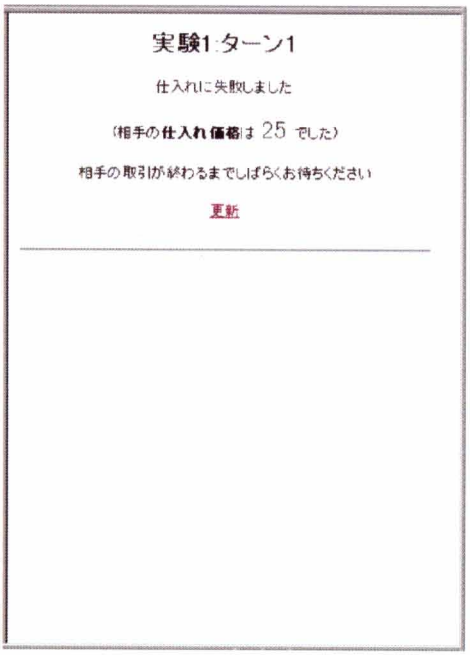


図 4: 仕入失敗表示

図 5: 仕入成功表示

2. あなただけが商品を仕入れることができた場合は、あなたが販売価格を低くつければつけるほど、商品をたくさん販売できます。いいかえれば、販売価格を上げると、あなたが販売できる商品の数は減少します。この時、販売価格を仕入価格よりも低くつけることは可能です。

3. あなたと競争相手の二人が商品を仕入れることができたかどうかは図 5 の上部にある「相手の仕入価格」を見ればわかります。あなたの仕入価格と相手の仕入価格が同じであれば、同時に販売価格を決定します。あなたの販売価格と競争相手の販売価格を比較して、安い方の価格をつけた人が商品を販売できる個数分販売します。**2 人の仕入価格が異なる場合、まず安い価格をつけた人が売れるだけ売ります。それでもまだ買ってもいいという買い手がいる場合、高い方の販売価格をつけた人も、その価格で売れるだけ売ることができます。**

4. 競争相手の販売価格とあなたの販売価格が同じになった場合は、販売できる個数を半分ずつ販売します。

販売価格を決め終わったら、「送信」ボタンをクリックしてください。

1. 販売できた場合は図 6 が表れます。「次のゲームへ」をクリックして、次に進んでください。ここでも**今回の利潤が黒字の場合は利潤が緑字で表示され、今回の利潤が赤字の場合は利潤が赤字で表示されます。**

2. 販売できなかった場合は図7が表示されます。「次のゲームへ」をクリックして、次に進んでください。ここでも**今回の利潤が黒字の場合は利潤が緑字で表示され、今回の利潤が赤字の場合は利潤が赤字で表示されます。**

3. あなたと競争相手がともに商品を仕入れていた場合に、相手がまだ販売価格を決定していなかった場合には図8が表示されます。

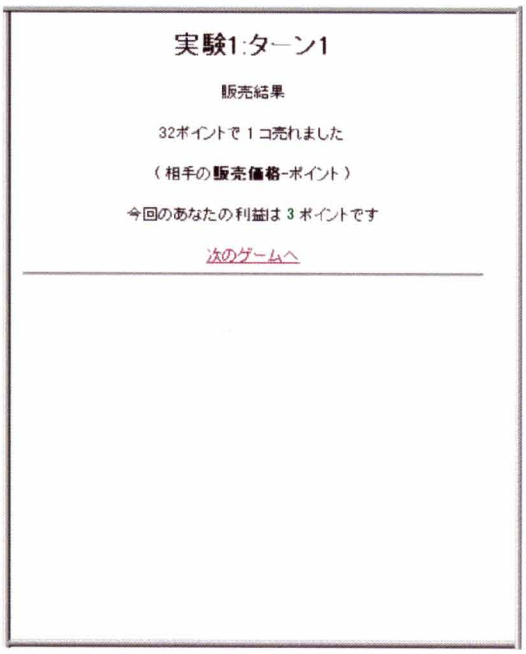


図 6: 販売成功表示

以上の画面では「更新」または「次のゲームへ」を押さない限り次の画面に進むことはありません。「更新」を押して次の画面に進んでください。

2.4 あなたの利益

あなたの毎回の利益は以下で与えられます。

利益 = (販売価格×販売個数) - (仕入れ価格×仕入れ個数)

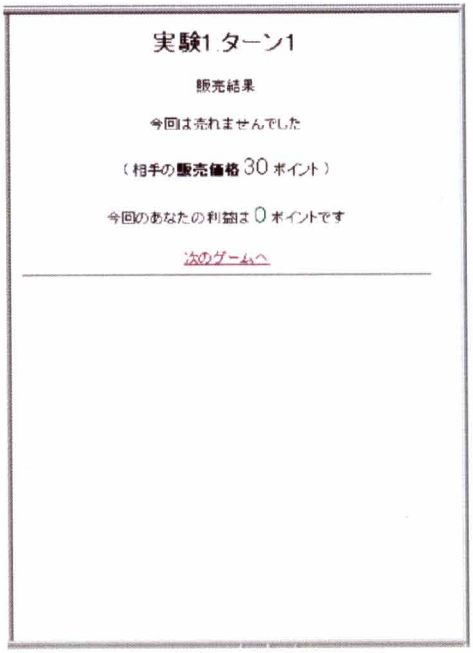


図 7: 販売失敗表示

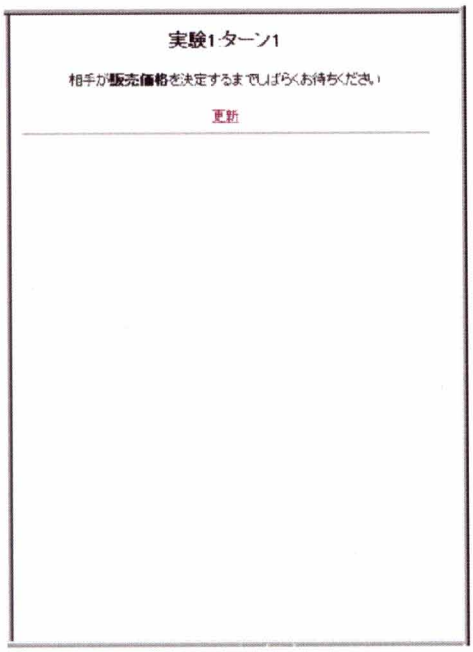


図 8: 待ち画面 (2)

2.5 例による説明

例を用いて説明しましょう。最初は仕入からです。あなたが仕入価格1000を、競争相手が仕入価格1200をつけたとします。このときあなたは商品を1個も仕入れることができません。よって商品を販売することができません。

次に仕入価格1200を、競争相手が仕入価格1000をつけたとしましょう。このときあなたは商品を仕入れることができます。例えば10個仕入れられたとしましょう。あなたはこの10個をもとに販売価格を決定することになります。

次に二人ともが仕入価格1200をつけたとしましょう。このときは二人ともが商品を仕入れることができ、5個ずつ仕入れることになります。

販売について例を用いて説明していきましょう。あなたが商品を一つも持っていない場合は販売することができません。あなたが一つでも商品を持っている場合は販売価格を設定することができます。

あなた一人が商品を持っている場合を考えましょう。あなたが商品を1000で10個仕入れ、販売価格1600で商品を10個完売したとしましょう。このとき$1600 \times 10 - 1000 \times 10 = 6000$の利潤を得ることになります。販売価格1800で8個しか売れなかったとしましょう。このときは$1800 \times 8 - 1000 \times 10 = 4400$となります。つまり、売れ残った2個は損失として計算されます。最後に販売価格3000で1つも売れなかったとしましょう。この時あなたの利益は$3000 \times 0 - 1000 \times 10 = -10000$となります。

3 報酬計算について

実験2回分の総利益に0.4をかけた金額に参加報酬(2000円)を加えた金額が皆さんへの報酬となります。なお、1円単位は切り上げとします。

報酬＝ 0.4 **×総利益＋** 2000**(円)**

4 実験終了手続

第1回目の実験が終了したら、以下の画面（図9）が表示されます。全員が終了し、実験者の合図があるまでしばらくお待ちください。

- 第2回目の実験では、みなさんに需要と供給の関係式（仕入れ価格がいくらで何個仕入れられるか、販売価格がいくらで何個売ることができるか）をお教えします。
- 第1回目の実験終了後に追加の資料をお渡ししますので、それを参考に第2回目の実験にのぞんでください。

実験者の合図の後、第2回目の実験が始まります。第2回目の対戦相手は第1回目と違う人です。

図 9: 第1回目実験終了時画面

第2回目の実験が終わると以下の画面（図10）が表示されます。第1回目と同じく全員が終了するまでしばらくお待ちください。実験者の報酬支払いが始まるまでの間「アンケート画面へ」をクリックしてアンケートにお答えください。ご協力よろしくお願いいたします。

以上で説明を終わります。少しでもわからないことがあれば手を挙げてお知らせください。

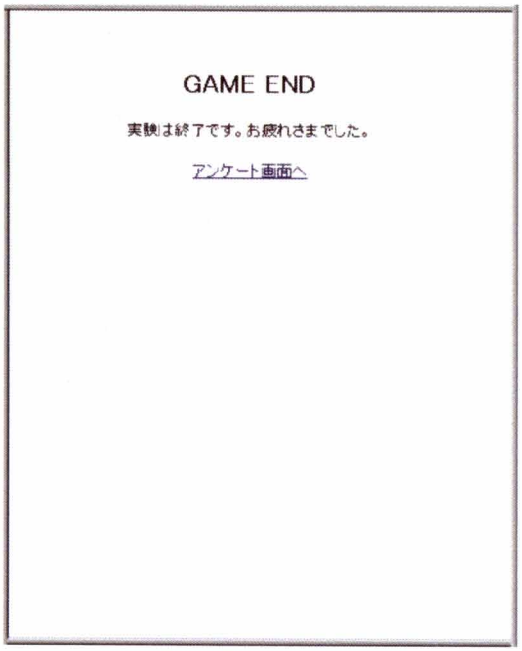
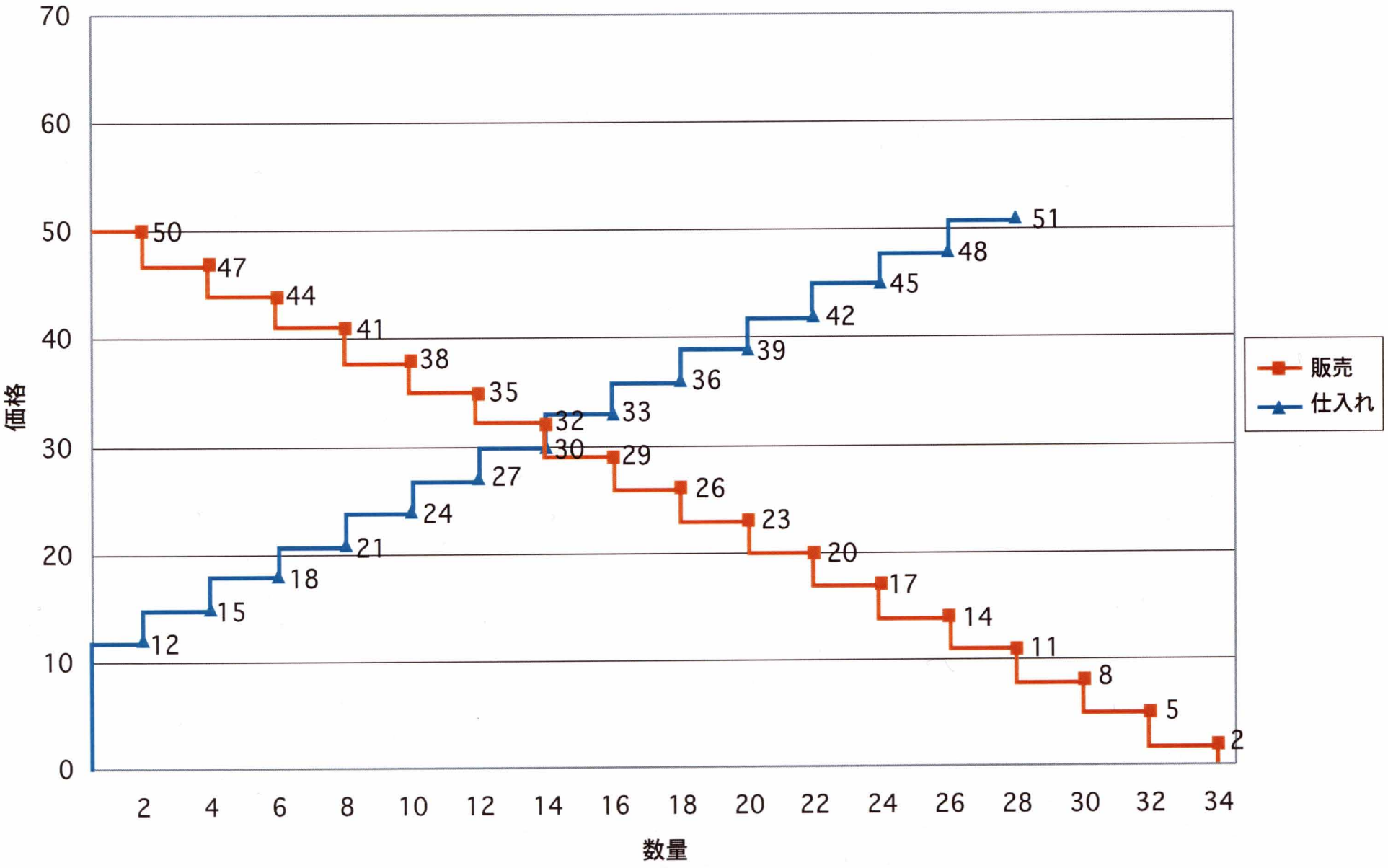


図 10: 第２回目実験終了時画面

追加資料１


70
60
50
40
30
20
10
0
価格
2
4
6
8
10
12
14
16
18
20
22
24
26
28
30
32
34
数量
50
47
44
41
38
35
32
29
26
23
20
17
14
11
8
5
2
51
48
45
42
39
36
33
30
27
24
21
18
15
12
販売
仕入れ

追加資料2

仕入れ価格	仕入れ可能な数量
1〜11	0
12〜14	2
15〜17	4
18〜20	6
21〜23	8
24〜26	10
27〜29	12
30〜32	14
33〜35	16
36〜38	18
39〜41	20
42〜44	22
45〜47	24
48〜50	26

仕入れ

販売価格	販売可能な数量
50〜48	2
47〜45	4
44〜42	6
41〜39	8
38〜36	10
35〜33	12
32〜29	14
28〜26	16
25〜23	18
22〜20	20
19〜17	22
16〜14	24
13〜11	26
10〜8	28
7〜5	30
4〜2	32
1〜0	34

販売

表 1: 仕入れ量・販売量の読みとり

追加資料3

1　追加資料の見方

追加資料1（仕入れと販売の関係式）の見方を説明します.

仕入れ量と販売量は，追加資料1のように階段状のグラフとなっています．グラフの縦軸は価格（あなたの仕入れ価格と販売価格）を，横軸は数量（その価格での仕入れ量と販売量）をそれぞれ表しています．グラフを見るときは，まず縦軸の価格を見て，そこから右へまっすぐ線を引いてください．その線とグラフの線が交差する点（右端）からまっすぐ下へ線をおろすと，その価格で仕入れることのできる，もしくは売ることのできる最大の数量が分かります.

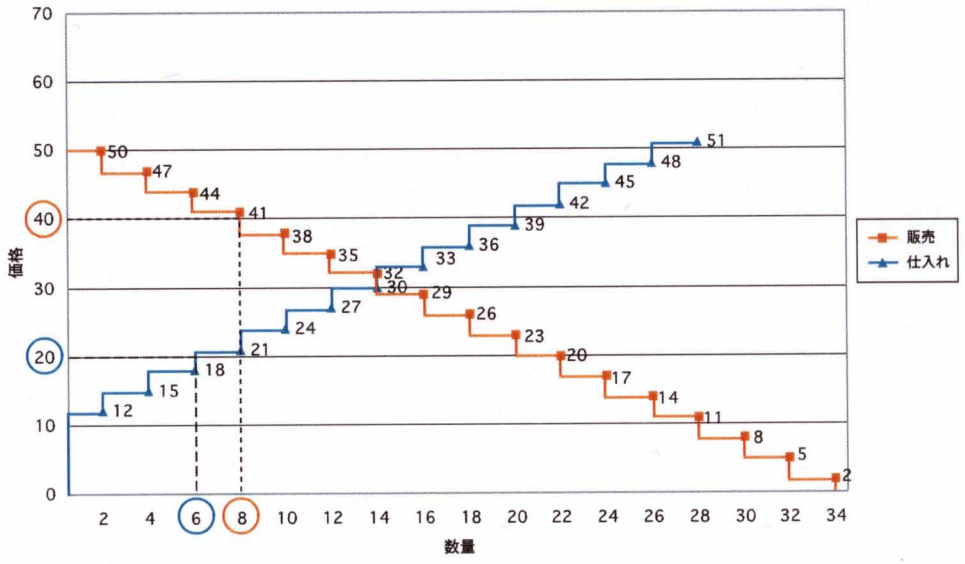


図 1: 仕入れと販売の関係式

たとえば図1のように,

- 仕入れ価格が20であれば最大6個仕入れることができます.
- 販売価格が40のとき，最大8個販売することができます.

追加資料2はこのグラフを表にしたものです．ある価格で仕入れることのできる，もしくは売ることのできる最大の数量が表示されています．

仕入れ価格	仕入れ可能な数量
1〜11	0
12〜14	2
15〜17	4
18〜20	6
21〜23	8
24〜26	10
27〜29	12
30〜32	14
33〜35	16
36〜38	18
39〜41	20
42〜44	22
45〜47	24
48〜50	26

仕入れ

販売価格	販売可能な数量
50〜48	2
47〜45	4
44〜42	6
41〜39	8
38〜36	10
35〜33	12
32〜29	14
28〜26	16
25〜23	18
22〜20	20
19〜17	22
16〜14	24
13〜11	26
10〜8	28
7〜5	30
4〜2	32
1〜0	34

販売

表 1: 仕入れ量・販売量の読みとり

たとえば表1より，

- 仕入れ価格が31であれば最大14個仕入れることができます．
- 販売価格が44のとき，最大6個販売することができます．

追加資料1，2ともに表しているのは仕入れることのできる，または販売することのできる**「最大の」**量であることに注意してください．

たとえば，あなたの仕入れ価格が相手より低ければあなたは仕入れることができません．また，たとえばあなたの仕入れ価格と相手の仕入れ価格が同じであれば仕入れ量は追加資料1，2で示された数量の半分となります．

付録B: ネットワーク型囚人のジレンマ実験での実験説明書

2002年7月25日および27日に実施された被験者実験の説明書である．ここでは7月25日に使用した分の説明書を掲載する．両日で実験順序が異なるため，7月27日に実施された実験の説明書では「実験1」と「実験2」の説明順序が逆になっている．一般的な諸注意等は省略している．

1　画面の説明

正しくログインすると，図 2 のような画面があらわれます．

- メイン画面 : 図 2 の画面右上，青色で囲まれた部分です．みなさんは主にここで示される情報や指示にしたがって意志決定を行い，ゲームを進めていきます．
- 行動履歴 : 図 2 の画面左側，赤色で囲まれた部分です．みなさんがそれまでのゲームで行った行動やその結果が示されます．
- 得点表 : 図 2 の画面右下，緑色で囲まれた部分です．ゲームで使用する得点表が示されています．

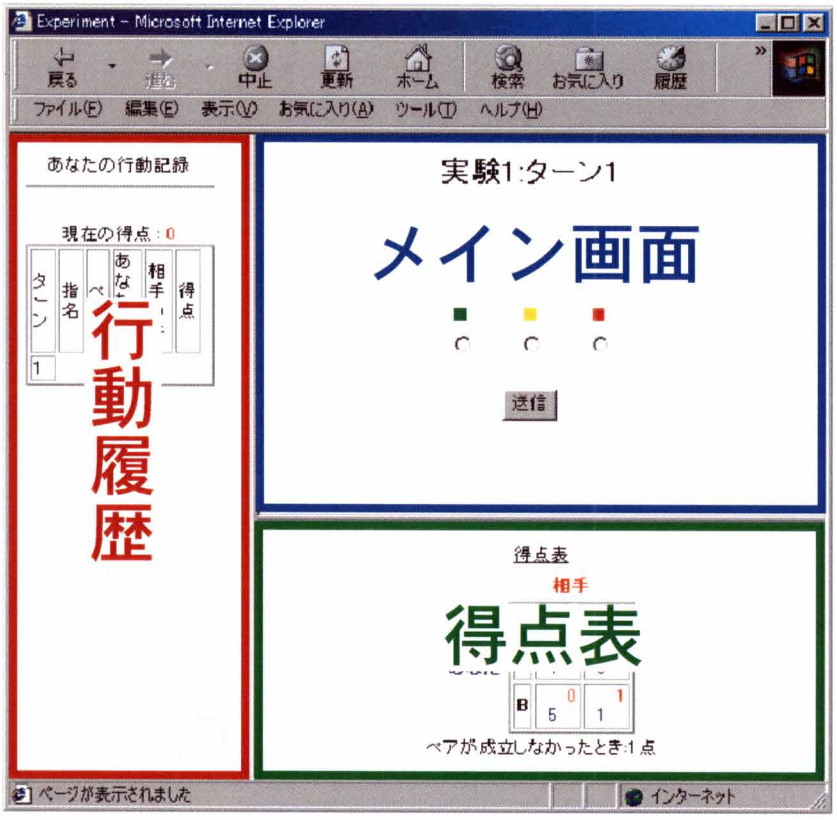


図 1: ゲーム画面

2　実験の概要

実験のおおまかな内容を説明します．みなさんは4人1グループでゲームの対戦を行います．あなたがどのグループに入るかはランダムに決められます．また，あなたのグループに誰が入っているかは知らされません．

今日は2つの実験を行ないます．2番目の実験のグループは最初の実験とは変わりますので注意して下さい．

手順1 (相手の選択)：同じグループの中から，ゲームで対戦を希望する相手を1人選びます．

手順2 (相手の決定)：全員の対戦希望をもとに，あなたの対戦相手（ペア）が決定されます．このとき相手を決定するルールが**実験1と実験2で異なります**．

実験1：お互いに指名し合っている場合のみ，ペアになります．

実験2：お互いに指名し合っている場合にまずペアになります．指名によるペアができなければ，コンピュータがあなたの相手を決定します．

手順3 (ゲームの手の決定)：対戦相手が決まったら，2つのゲームの手のうちいずれかを選びます．誰ともペアにならなかった場合にはゲームに参加できず，次の回を待ちます．

手順4 (得点)：あなたとあなたの対戦相手の手をもとに，得点が決定されます．

以上の手順を「1ターン」とします．みなさんは画面に「GAME END」の表示が出るまでこの手順を繰り返し行います．

みなさんへの報酬の金額は，ゲームを通してみなさんが獲得した得点に比例して支払われます．

3　手順1：相手の選択

まずみなさんは，自分の所属するグループの中からゲームの対戦を希望する相手を1人選び，指名します．あなたのグループに所属するあなた以外の3人の方は，図3のようにそれぞれ色のついた■で表されています．一つの実験の間，同じ色は常に同じ人を表しています．

あなたは3人の中から1人（1つの■）の下にあるラジオボタン（○ボタン）をクリックして選び，「送信」ボタンを押すことで相手の指名をすることができます．

いったん「送信」ボタンを押すと取り消しはできませんので，慎重かつ確実に操作を行って下さい（「送信」ボタンを押す前であれば選んだ相手を変えることが可能です）．

図 2: 手順 1 – 相手の指名（メイン画面）

4　手順 2：相手の決定

みなさんが行った指名をもとに，それぞれのゲームの対戦相手が決定されます．相手を決定する方法が実験 1 と実験 2 で異なります．

> **実験 1**　：あなたの指名した人があなたを指名している場合，つまりお互いに指名しあっている場合にのみ，その人とペアになります．
>
> あなたの指名した人があなた以外を指名している場合，あなたはペアになることができず，このターンは終了です．

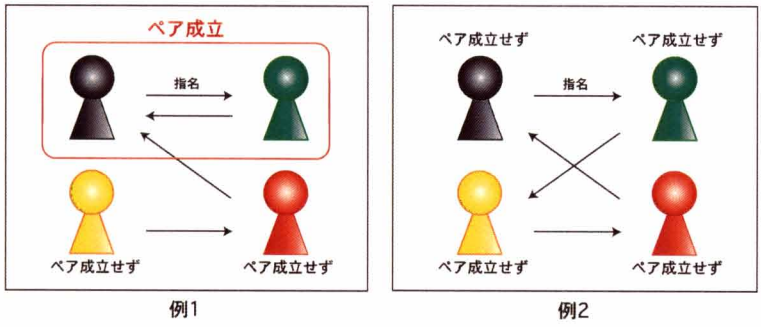


図 3: 相手の決定（実験 1）

実験 2 ：実験 1 と同様に，お互いに指名し合っている場合にはその人とペアになります．

指名によってペアができなかった場合，コンピュータがあなたの相手を決定します．コンピュータはあなたのグループの中で，指名によってペアになれなかった人をランダムに組み合わせてペアにします．

つまり，実験 2 では（あなたが指名した相手とは限りませんが）必ずペアになってゲームに参加することができます．

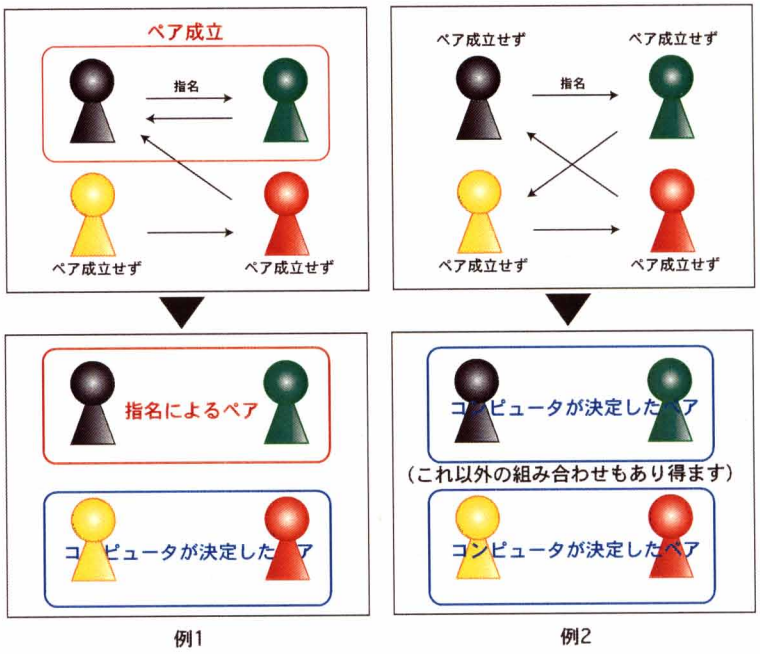


図 4: 相手の決定（実験 2）

5 手順 3：ゲームの手の決定

ペアが成立しなかった場合 ：実験 1 でペアが成立しなかった場合，あなたはゲームに参加できません．「次のゲームへ」を押して次へ進んで下さい．

ペアが成立した場合 ：あなたとペアになった人が対戦相手として表示されます．ゲームの手である「A」もしくは「B」を選んで「送信」ボタンを押して下さい．一度「送信」ボタンを押すと取り消しできませんので注意して下さい．

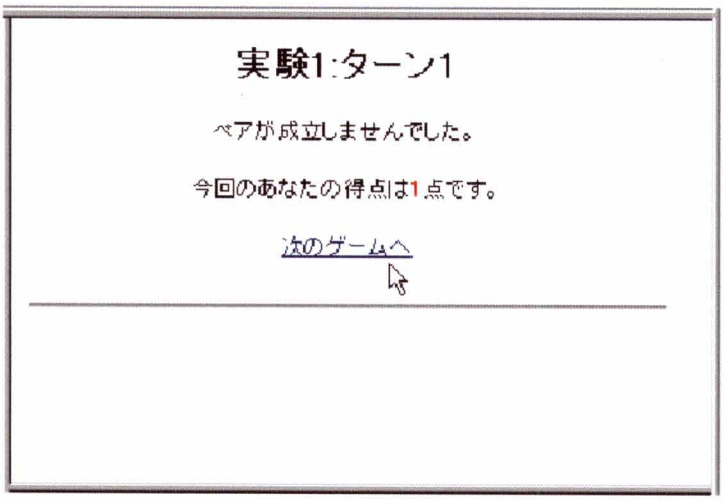


図 5: ペアが成立しなかった場合（実験 1 のみ）

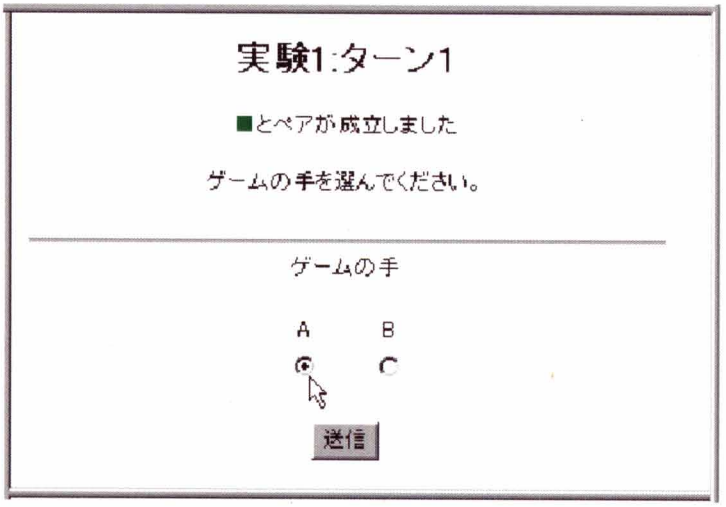
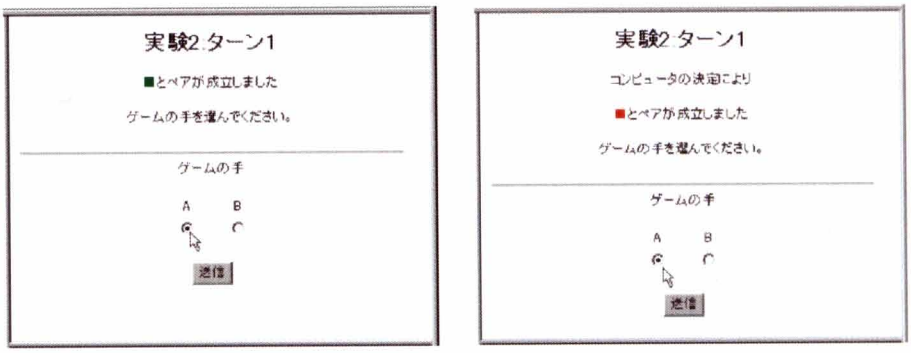


図 6: ゲームの手の選択（実験 1）



指名によるペアが成立した場合

指名によるペアが成立せず
コンピュータがペアを決定した場合

図 7: ゲームの手の選択（実験 2）

6　手順 4：得点の決定と表示

実験 1 でペアが成立しなかった場合，あなたの得点は **1 点**となります．

ペアが成立した場合，手順 3 であなたとあなたの対戦相手が選んだ手の組み合わせによって得点が決定されます．ゲームの得点表は画面の右下のフレームに示されています（図 9）．得点表は実験 1，実験 2 ともに同じです．

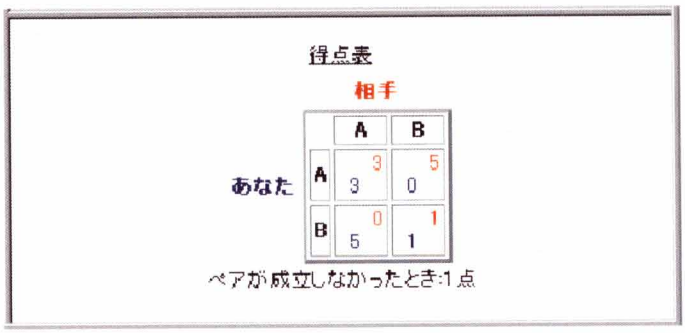


図 8: 得点表

得点表のぞれぞれのマス目の左下側，青色で表示されているのがあなたの得点です．右上側，オレンジ色で表示されているのは相手の得点です．つまり，

- あなたの手 : A，相手の手 : A → あなたの得点 : 3 点，相手の得点 : 3 点
- あなたの手 : A，相手の手 : B → あなたの得点 : 0 点，相手の得点 : 5 点
- あなたの手 : B，相手の手 : A → あなたの得点 : 5 点，相手の得点 : 0 点
- あなたの手 : B，相手の手 : B → あなたの得点 : 1 点，相手の得点 : 1 点

となります．

あなたの選んだ手，相手の選んだ手，あなたの得点は図 10 のように画面に表示されます．

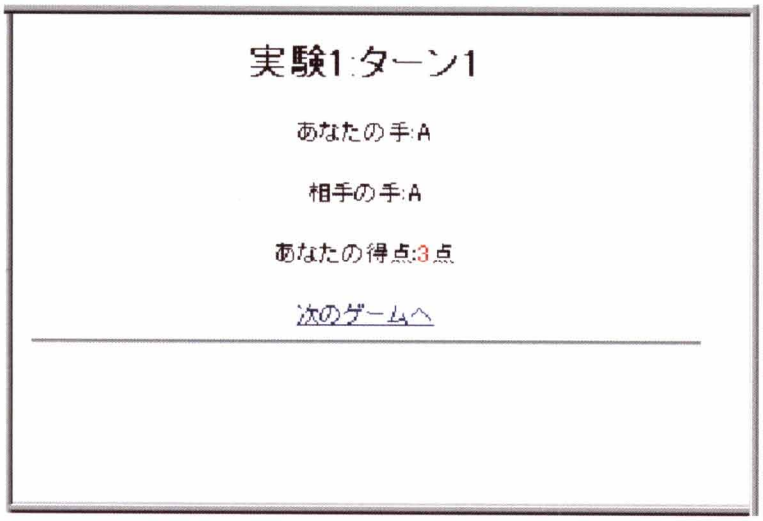


図 9: 得点の表示（例）

以上で 1 回のゲームは終了です．「次のゲームへ」をクリックして先へ進んで下さい．手順 1 の相手選択画面が再度表示され，次の回が始まります．

7　待ち画面について

実験の途中，あなたのグループ全員の行動が終わるまで，相手の指名やゲームの手の決定，コンピュータによるペア決定などを待つ画面が表示されることがあります（他の人の行動が終わっていればこの画面は表示されません）．この場合，「更新」をクリックして次の画面へ進んで下さい．

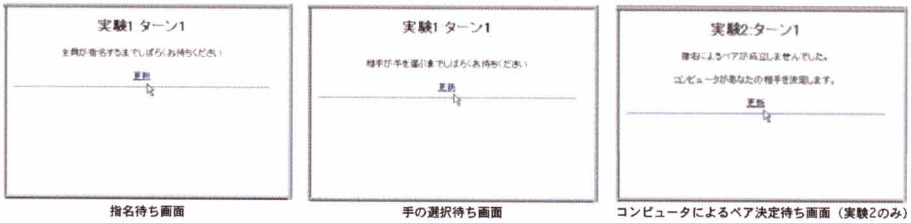


図 10: 待ち画面

「更新」をクリックしない限り次へは進みません．次の画面が表示されるまで何度か繰り返しクリックして下さい．

注：高速でクリックし続けるとエラーが起こる場合がありますので，「更新」

を連打するのはおやめ下さい.

8 行動履歴

画面左側のフレームには各ターンのあなたの行動と得点が表示されます. 表示される内容は実験 1 と実験 2 で若干異なります.

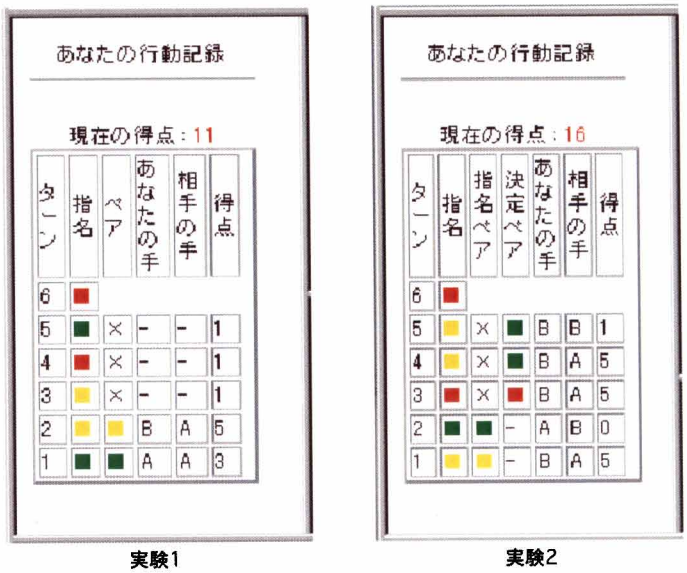


図 11: 行動履歴

- 現在の得点：その時点までの合計得点が表示されます.
- ターン：ターン数が表示されます.
- 指名：あなたの指名した相手が表示されます.
- ペア（実験 1）・指名ペア（実験 2）：指名によってあなたとペアになった相手が表示されます. 指名によるペアが成立しなければ「×」が表示されます.
- 決定ペア（実験 2 のみ）：コンピュータの決定によってあなたとペアになった相手が表示されます. コンピュータの決定によるペアが成立しなければ（指名によってペアが成立していれば）「–」が表示されます.
- あなたの手：あなたのとったゲームの手が表示されます.
- 相手の手：相手のとったゲームの手が表示されます.
- 得点：その回のあなたの得点が表示されます.

行動履歴はすでに終了したすべてのターンについて表示され，実験中はいつでも参照することができます．

8.1 実験が終了したら

実験 1 が終了すると，「GAME END」というメッセージが表示されます．全員が終了するまでしばらくお待ちください．

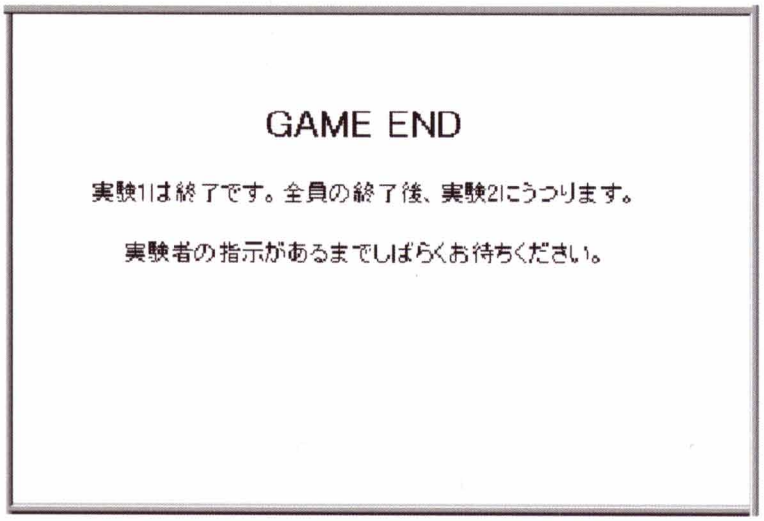


図 12: 実験 1 の終了

全員が実験 1 を終了したら，実験者の指示で実験 2 を開始します．ID カードに記された「実験 2」用の URL にアクセスし，ログイン画面で実験 2 用の Name，ID，Game を入力してログインして下さい．

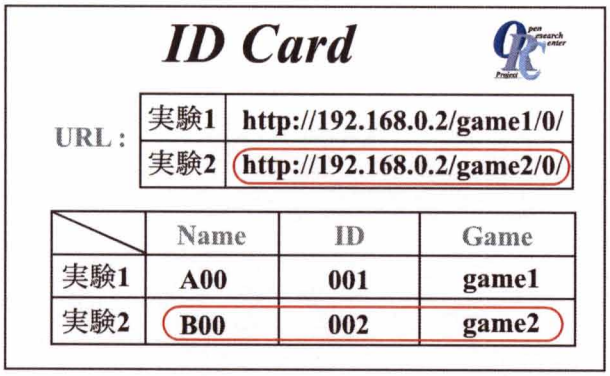


図 13: 実験 2 で使用する URL，Name，ID，Game

実験 2 では，みなさんは新たに 4 人ずつのグループに分けられます．実験 1 で対戦したグループとは異なりますのでご注意下さい．

実験 2 が終了すると，「GAME END」と「アンケート画面へ」という画面が表示されます．実験結果や合計点を確認したら「アンケート画面へ」をクリックして下さい．アンケートが表示されますので，配布されているアンケート解答用紙に質問の答えを記入して下さい．

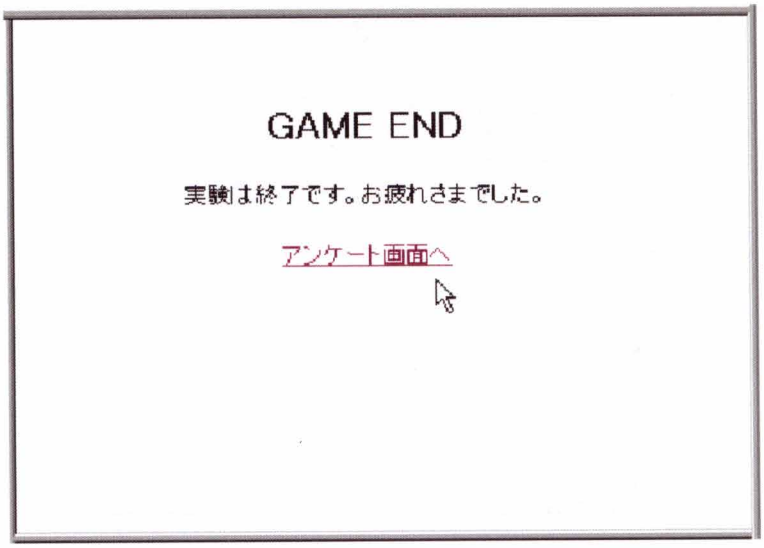


図 14: 実験 2 の終了

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始有益なご指導を賜りました知能システム創成学研究室教授，上田完次先生に深く感謝申し上げます．

また，博士論文の作成にあたり貴重なご教示をいただいた北村新三教授，田浦俊春教授に謹んでお礼を申し上げます．

鳩野逸生助教授，大倉和博助教授，藤井信忠助手には多くのご助言とご指導をいただきました．深く感謝いたします．

京都産業大学の小田宗兵衛教授には研究全般について，特に経済学の見地から様々なご助言とご指導をいただきました．ここに深く御礼を申し上げます．

研究室の諸先輩方，同期ならびに後輩諸氏には研究のみならず学生生活においても大変お世話になりました．心から感謝いたします．

東京工業大学講師の小山友介氏，京都大学経済学研究科の小川一仁氏，京都産業大学客員研究員の野澤孝之氏，濱口泰代さん，京都産業大学理学部の門田智則氏，廣瀬哲也氏には多くのご助言，ご助力をいただきました．厚くお礼を申し上げます．

研究室歴代秘書の川幡佐智子さん，竹内紀美子さん，石井久美子さん，西田夏菜さん，河合綾子さん，機械科事務室の江本栄梨奈さんには研究活動，学生生活全般にわたって大変お世話になりました．ここに深くお礼を申し上げます．

最後に，研究活動のみにとどまらず常にあたたかいご助言と多大なご助力をいただいた京都組の皆さん，岩崎敦氏，西野成昭氏，櫻井弘明氏，井村修一氏にこの場をお借りして心より感謝いたします．