〔論　説〕

ジレンマ型ゲームにおける行動様式の実験*

内　海　幸　久
宮　田　大　輔

1．序

囚人のジレンマや社会的ジレンマと呼ばれるゲームは，ゲーム理論の応用例としてよく注目されている。プレイヤーにとって，もしくは，社会的に，望ましい状況があるものの，各プレイヤーが独立に行動した結果，プレイヤーにとって，もしくは，社会的に望ましくない状況が実現してしまう可能性があるというゲームである。このようなジレンマ型のゲームを適用できる社会現象は意外に多いことが知られている。

本論文の目的は，ジレンマ型のゲームにおけるプレイヤーの行動様式を実験することである。具体的には，プレイヤー同士のコミュニケーションが戦略選択行動にどのように影響を与えるのかについて検証を行う。コミュニケーションが可能な場合の行動様式には，様々な状況が理論的に考案されている。結託耐性 Nash の行動様式，強 Nash 均衡の行動様式，α コアの行動様式などがその代表例である。本稿では，プレイヤー同士がコミュニケーション不可能な Nash 的行動様式とプレイヤー同士がコミュニケーション可能な場合の行動様式を観察することに焦点を当てて分析を行う。

囚人のジレンマを繰り返す実験は古くから存在するが，ゲームの最中にプレイヤー同士がコミュニケーション可能な状況を実験している研究は非常に少ない。Cooper et al.（1991）は，一回限りの囚人のジレンマゲームを繰り返し実験するというものである。実験の初期段階においては，協力的な行動が観察されるものの，実験の回数が進行するにつれて非協力的な行動が大勢を占めることが観察されている。このような囚人のジレンマゲームにおける初期段階における協力行動の観察を，Andreoni and Miller（1993）は，利得関数の形状を純粋利他主義，義務，互恵的利他主義の３パターンの利得関数を用いることで説明した。荒井（1995）は，囚人のジレンマゲームにおけるコミュニケーションや第三者による説得の効果を分析している。ゲームを行う前にコミュニケーション行うことができるが，ゲームの最中はコミュニケーションを取ることができないチープトークゲームの実験を行う。統計的な分析がなされていないなどの問題点はあるもののおおむね，コミュニケーションや第三者の説得によって協力関係が誘発されている。Nash 的な状況においても事前のコミュニケーションや説得といった手段によって行動選択に変化が生じている可能性が示唆されている。鵜沢（2004）は，均衡の優位性というよりも，囚人のジレ

＊　本研究は平成24年度の学術研究助成金の支援を得て実験を行ったものである。

ンマゲームにおいてどのような戦略パターンが合計の高い利得を獲得できるのかを中心の分析を進めている。有限回の状況でも TFT 戦略を採用する被験者の獲得利得が高いことが確認されている。

これらとは一線を画し，ゲームの最中にコミュニケーションが可能な状況を分析したのが，Moreno and Wooders（1998）である。彼らは，待ち合わせゲームと類似の協調ゲームにおいて結託耐性 Nash 均衡が実験によって有意に出現することを示唆している。

本論文の構成は以下のようである。２章にて本稿で検証するコミュニケーションが可能な場合の行動様式の理論的な解説を行う。３章にて実験の大まかな手順を解説し，本稿で使用したゲームや開発したソフトのインターフェースなどを説明する。４章にて観察されたデータの分析を行い，いくつかの統計的な帰結をまとめる。５章にて帰結や展望を述べることにする。

２．行動様式

本稿で考察される行動様式と均衡について定義をする。$N=\{1, \ldots, n\}$ をプレイヤーの集合，各 $i \in N$ について集合 X^i をプレイヤーi の戦略集合，各 $i \in N$ について関数 u_i：$\Pi_{i \in N} X^i \to \mathbb{R}$ をプレイヤーi の利得関数と呼ぶ。これらからなる $\{X^i, u_i\}_{i \in N}$ を戦略型ゲームと呼ぶ。プレイヤーの集合の部分集合 $S \subset N$ を提携と呼び，非空な提携の集合を $\mathcal{N}=2^N \setminus \{\phi\}$ と標記する。提携 $S \in \mathcal{N}$ の戦略集合を $X^S=\Pi_{i \in S} X^i$ とする。また，記号が煩雑になるので，$x=(x_1, \ldots, x_n) \in X^N$ を $(x^S, x^{N \setminus S})$ によって，x を表すとする。

定義１.

戦略の組 $x \in X^N$ が Nash 均衡とは,

$$\forall i \in N, \neg \exists y^i \in X^i,\ u_i(y^i, x^{N \setminus \{i\}}) > u_i(x)$$

を満たすことである。

戦略型ゲームにおいて各プレイヤーが独立に，コミュニケーションをすることなく行動する行動様式から得られる解概念が Nash 均衡である。

次に，プレイヤーがコミュニケーションを通して戦略を協調できる行動様式を定義する。プレイヤー１人の逸脱を提携までに広げたのが強 Nash 均衡と呼ばれる概念である。

定義２.

戦略の組 $x \in X^N$ が強 Nash 均衡とは,

$$\forall S \in \mathcal{N}, \neg \exists y^S \in X^S,\ \forall i \in S,\ u_i(y^S, x^{N \setminus S}) > u_i(x)$$

を満たすことである。

以下では，強 Nash 均衡を単に強均衡と呼ぶ。強均衡は，すべての提携での逸脱を考えているが，提携を形成するのが不適切と考えられるものもある。逸脱を考える提携を，信頼できる提携のみに制限した解概念が結託耐性 Nash 均衡である。

定義３．

提携 $S \in \mathcal{N}$ と戦略の組 $x \in X^N$ について，提携 S が x から，信頼できる逸脱（credible deviate）をするとは，

1．$\forall i \in S, u_i(z^S, x^{N\setminus S}) > u_i(x)$
2．(a) $|S| = 1$ または，
   (b) $|S| > 1$ ならば，

$$\forall T \subsetneq S, \neg\exists y^T \in X^T, \forall i \in T, u_i(y^T, z^{S\setminus T}, x^{N\setminus S}) > u_i(z^S, x^{N\setminus S})$$

を満たす $z^S \in X^S$ が存在することである。

１番目の条件が，提携 S で逸脱することを表している。２番目の条件は，逸脱する提携が，信頼できるかどうかという意味を表している。１人提携（$|S| = 1$）は，仲間割れしないので，信頼できる提携である。$|S| > 1$ の時は，S よりも小さい提携で逸脱できない（仲間割れしない）時，S という提携が実現するだろうということをあらわす。これより，信頼できる逸脱とは，x という状態から，提携 S で逸脱するという状況を考えた時，仲間割れせずに逸脱が成功できるという意味になる。

定義４．

戦略の組 x が結託耐性 Nash 均衡とは，

$$\forall S \in \mathcal{N},\ S \text{ は } x \text{ から信頼できる逸脱をしない}$$

ことである。

３種類の解概念には，「強 Nash 均衡⊂結託耐性 Nash 均衡⊂ Nash 均衡」という包含関係が定義からすぐに確認できる。

これらとはことなる行動様式であるのが α コアの概念である。α コアの行動様式は，プレイヤーは最悪のケースを想定して，つまり，悲観的な予想のなか，もっとも良い行動を見つけるという max min 行動原理の提携を考慮した形である。

定義５．

提携 S は x を α 改善（α-improve）するとは，

$$\exists y^S \in X^S : \forall z^{N\setminus S} \in X^{N\setminus S}, \forall i \in S, u_i(y^S, z^{N\setminus S}) > u_i(x)$$

を満たすことである。

提携 S，$N\setminus S$ も共に，各プレイヤーは，コミュニケーションを通して戦略を協調することができる。

定義６．

戦略の組 x が α コアであるとは，

$$\forall S \in \mathcal{N}, \neg\exists y^S \in X^S : \forall z^{N\setminus S} \in X^{N\setminus S}, \forall i \in S, u_i(y^S, z^{N\setminus S}) > u_i(x)$$

を満たすことである。

提携が α の意味で，逸脱しない状態を α コアと呼ばれる。

例

２人囚人のジレンマでそれぞれの均衡を求めてみよう。

表１：２人囚人のジレンマ

1さん ＼ 2さん	C	D
C	5, 5	1, 6
D	6, 1	3, 3

１．Nash 均衡は（D, D）。

２．強 Nash 均衡は，なし。

なぜなら，（D, D）から，$\{1, 2\}$ で（C, C）へ逸脱するが，（C, C）からは，１人提携で逸脱してしまうからである。

３．結託耐性 Nash 均衡は，（D, D）。

（D, D）から，$\{1, 2\}$ で（C, C）へ逸脱するが，（C, C）からは，１人提携で逸脱される。従って，この逸脱は信頼できる逸脱とはならない。

４．α コアは，（C, C）。

（D, D）から，$\{1, 2\}$ で（C, C）とすることで α 改善できる。（C, C）からは，$\{1\}$ は，D を選んで逸脱を考える。

$$\text{すべての } x_2 \text{ について，} u_1(D, x_2) > u_1(C, C) = 5$$

となる時，α 改善できるが，２さんが $x_2 = D$ を選ぶと１さんの利得は，$u_1(D, D) = 3$ となり，５よりも利得が低くなる。これより，１人で α 改善することができない。

本稿では，これらの行動様式が実験にてどのように観察されるのかについて考察をおこなう。

３．実験の手順

本稿では，複数のジレンマ型のゲームの繰り返し実験を通して，コミュニケーションの有無と行動様式の関係についての実験を行う。実験では，２種類のタイプのゲームを繰り返し行う。最初のタイプは相手とコミュニケーションができない状況を扱う。この場合，

各プレイヤーは，対戦相手と相談することなく戦略を決めることになる。次のタイプは自分の戦略を決める前に，相手と自由にコミュニケーションできる状況である。戦略を選択する前に対戦相手と自由に相談することが可能なため，相手と戦略を協調することが可能な状況になる。本実験ではコミュニケーションの有無に差があるのかないのかを検証してゆく。実験で利用したゲームの説明をおこなう。

3.1　２×２囚人のジレンマゲーム

２×２の囚人のジレンマと呼ばれる有名な状況から，行動様式の比較実験を行う。囚人のジレンマゲームとは，二人のプレイヤーが協調的に行動するか否かを選択でき，共に協力的な行動する方が二人にとって良いにもかかわらず，非協力的な行動を選択してしまうという状況である。本稿では，表２のような利得表を持つ囚人のジレンマゲームを実験する。プレイヤーの取り得る戦略はＡとＢである。Ａを選択すると協力的で，Ｂを選択すると非協力的な行動と解釈できよう。

表２：囚人のジレンマ

１さん ＼ ２さん	A	B
A	5, 5	1, 6
B	6, 1	3, 3

表２における Nash 均衡は，(B, B) である。強 Nash 均衡はなし，結託耐性 Nash 均衡は (B, B)，α コアは，(A, A) となる。

3.2　４×４待ち合わせゲーム

戦略の数が４種類の増えた状況を考察する。待ち合わせゲームと呼ばれる有名な状況を用いて行動様式の比較実験を行う。待ち合わせゲームとは，二人のプレイヤーが同じ場所にいると待ち合わせ成功となり，それ以外の場合は待ち合わせ失敗となる状況である。本稿では，表３のような利得表を持つ４×４の待ち合わせゲームを用いて実験を行った。

表３：待ち合わせゲーム

１さん ＼ ２さん	A	B	C	D
A	4, 4	0, 0	0, 0	0, 0
B	0, 0	3, 3	0, 0	0, 0
C	0, 0	0, 0	2, 2	0, 0
D	0, 0	0, 0	0, 0	1, 1

表3における Nash 均衡は，（A, A），（B, B），（C, C），（D, D）である。強 Nash 均衡は（A, A），結託耐性 Nash 均衡は（A, A），α コアは，（A, A）となる。

3.3　4×4ジレンマゲーム

本稿の主要な実験である 4 × 4 ジレンマゲームを紹介する。4 × 4 ジレンマゲームどは，基本的に，戦略が4つの Cournot 競争や Bertland 競争のモデルである。支配戦略が存在し，支配戦略の組みが唯一の Nash 均衡となっている。加えて，Nash 均衡よりもパレートの意味で改善できる状態が存在のがジレンマを表している。二人のプレイヤーが戦略 A を選択すれば，Nash 均衡（B, B）の利得よりも二人共改善できる。

本実験では，利得表4をベースに実験を行った。ジレンマ状況でのコミュニケーションの有無に意味があるのか否かを検証するべく，被験者に対して，数値の縮尺のみを変更した数値を提示して実験を行った。数値の縮尺は異なるものの，支配戦略，均衡は不変となっている点に注意をせよ。

表4：ジレンマ型ゲーム

1さん ＼ 2さん	A	B	C	D
A	5, 5	2, 6	1, 4	0.5, 3
B	6, 2	3, 3	2.5, 2.5	2, 2
C	4, 1	2.5, 2.5	2, 2	1.5, 1.5
D	3, 0.5	2, 2	1.5, 1.5	1, 1

表 4 における Nash 均衡は，（$B,\ B$）である。強 Nash 均衡は存在しない。結託耐性 Nash 均衡は（B, B），α コアは，（A, A），（A, B），（B, A）となる。

3.4　インターフェースの紹介

被験者が利用した実験プログラムのインターフェースについて紹介する。図1，図2は，ジャンケンゲームを用いたサンプルプログラムである。

まず，図1のコニュニケーションが付加されていない状態から紹介しよう。画面の多くの部分を占めるのが利得表と戦略の選択ボタンである。プレイヤーは，表示されている情報を利用して，戦略のボタンを選択する仕組みになっている。被験者の利得は，太文字で表されている分数の左側の数値である。これに対し，分数の右側の文字が対戦相手の利得である。画面の右側が履歴欄である。この部分に，対戦相手の戦略や自分の戦略が表示される。同一の実験中，履歴は初期までたどることができる。画面左上部に表示されている数値が，獲得ポイントのなっている。合計のポイントやそのゲーム一回での得点が表示される。縦に並ぶボタンが被験者の戦略である。選択すると選択した戦略や利得が自動的にハイライトされる。すべての被験者が，縦に並ぶボタンを選択することになる。

図2のコミュニケーション機能が付加された画面では，画面左下側に，会話記入欄が用

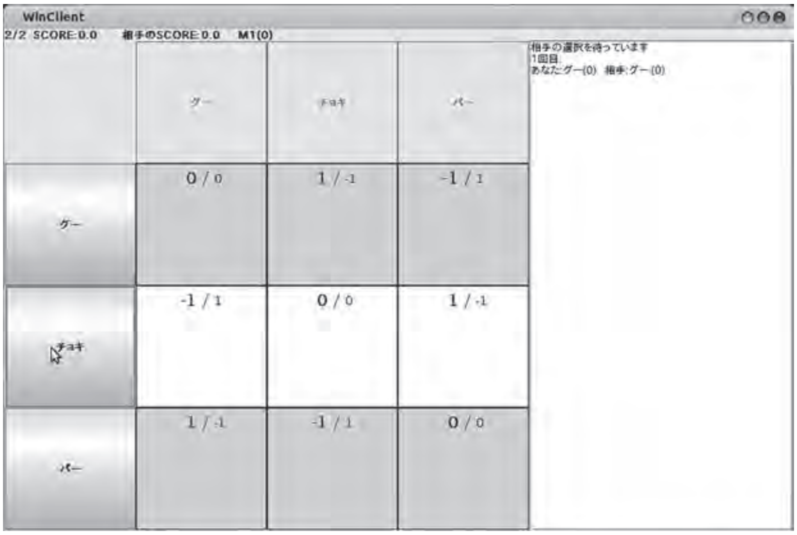

図１：実験プログラムのインターフェース

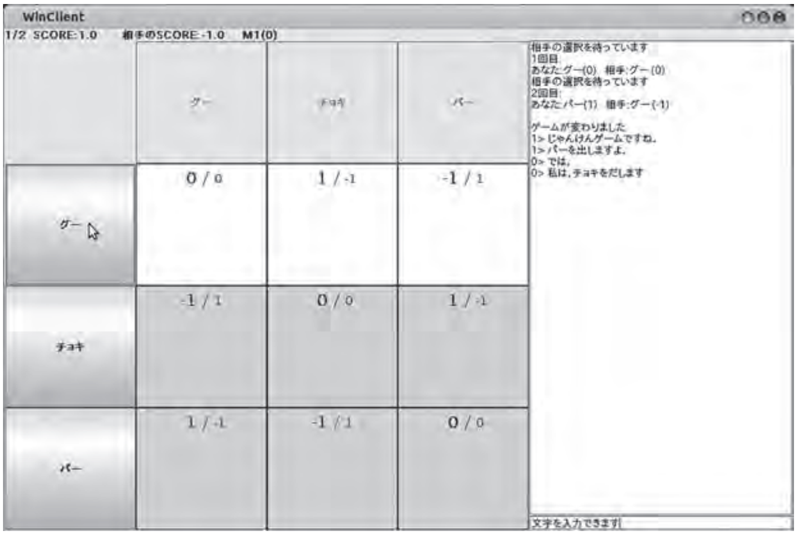

図２：コミュニケーション機能ありの画面

意されている。この欄に自由に文章を記入し送信すると，対戦相手の履歴欄に，会話の内容が表示される。会話の内容は自由に記入でき，特に制限を設けいているわけではない。

4　実験の帰結

4.1　２×２囚人のジレンマゲーム

囚人のジレンマゲームにおける均衡の状態は以下のようにまとめられる。

1．Nash 均衡は（B, B）
2．強均衡は，なし
3．結託耐性 Nash 均衡は（B, B）
4．α コアは（A, A）

図３より明らかなように，コミュニケーションがない場合，Nash 均衡である（B, B）が20回，非 Nash 均衡が10回出現している。
コミュニケーションが有効な場合，α コアである（A, A）が13回，結託耐性 Nash 均衡である（B, B）が９回出現している。
コミュニケーションがない場合から考察をしよう。Nash 均衡である（B, B）は，他の状態よりも有意に多く出現している。これより，独立して戦略が選べる状況においては，Nash 的な行動様式が確認されると言える。コミュニケーションがない囚人のジレンマの状況においては，Nash 均衡の状態が出現しない実験例も報告されているが千葉商科大学の学生においては，Nash 的な行動が有意になっている。

表５：コミュニケーションがない状況のｐ値

	p 値
Nash 均衡である検定	0.049368573 ＜ 0.05
α コアでない検定	0.0000000 ＜ 0.05

表６：コミュニケーションがある状況のｐ値

	p 値
Nash 均衡でない検定	0.021386973 ＜ 0.05
α コアである検定	0.292332356 ＞ 0.1

次に，コミュニケーションがある場合を考察する。α コア，結託耐性 Nash 均衡は，統計的に有意でない。様々な状態が出現しているという意味で有意な状態がないという意味で，強均衡が行動様式として観察されていると考えることも可能である。

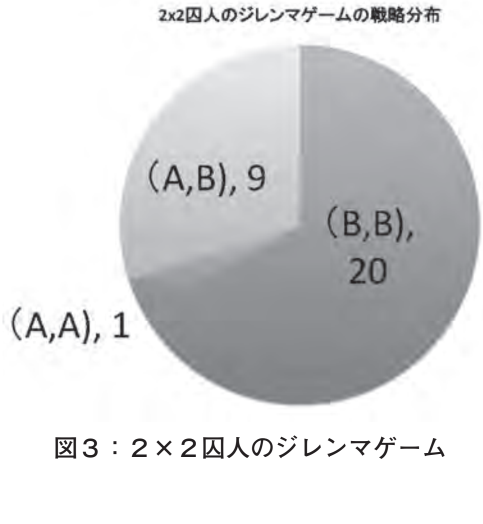

図３：２×２囚人のジレンマゲーム

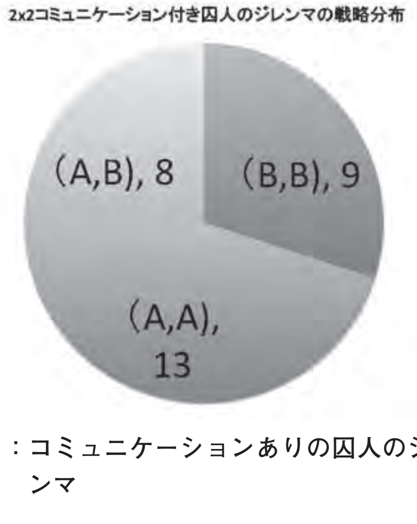

図４：コミュニケーションありの囚人のジレンマ

4.2　4×4待ち合わせゲーム

待ち合わせゲームにおける均衡の状態は以下のようにまとめられる。

1．Nash 均衡は（A, A），（B, B），（C, C），（D, D）
2．強均衡は（A, A）
3．結託耐性 Nash 均衡は（A, A）
4．α コアは（A, A）

図５より明らかなように，コミュニケーションがない場合，パレート効率的な Nash 均衡である（A, A）が47回，非 Nash 均衡が３回出現している。

コミュニケーションが有効な場合，強均衡，結託耐性 Nash 均衡，α コアやである（A, A）が50回とすべての実現している。

コミュニケーションがない場合から考察しよう。パレート効率的な Nash 均衡（A, A）は，他の状態よりも有意に多く出現していることがわかる。次に，コミュニケーションがない場合を考察しよう。強均衡，結託耐性 Nash 均衡，α コアである（A, A）が，他の状態よりも有意に多く出現していることが確認できる。しかし，このゲームにおいてはコミュニケーションの効果は，認められない。

パレート効率的な Nash 均衡が存在する状況においては，プレイヤー達は，独立に非協力的に行動していたとしても個人の利得が最大になる戦略が選ばれる傾向があると考えられる。

4.3　4×4ジレンマゲーム

実験の度に，利得の数値が符号関係を保存したままランダムに変更されるものの，ジレンマゲームにおける均衡の状態は以下のようにまとめられる。

図５：４×４待ち合わせゲーム

図６：コミュニケーションありの待ち合わせゲーム

1．Nash 均衡は（B, B）
2．強均衡はなし。
3．結託耐性 Nash 均衡は（B, B）
4．α コアは（A, A），（A, B），（B, A）

α コアの状態が３種類あることに注意せよ。

図７より明らかなように，コミュニケーションがない場合，Nash 均衡である（B, B）が70回，非 Nash 均衡が30回出現している。ランダムに利得の数値が変更されているが，被験者たちは支配戦略が B であることを見抜いていると考えられる。実際 B を戦略として選んである回数は200回中，165回と82.5％に達している。Nash 均衡の頻度は，それ以外の状態よりも有意に多い。また，α コア戦略の頻度はそれ以外の状態よりも有意に少ない。コミュニケーションがない一回限りのジレンマタイプのゲームにおいて，千葉商科大学の学生は，理論の予想通り Nash 的な行動様式を取っていると言える。

表７：コミュニケーションがない状況のｐ値の表

	p 値
Nash 均衡である検定	0.00004 ＜ 0.05
α コアでない検定	3.0739E-11 ＜ 0.05

コミュニケーションが有効な場合，α コアは，61回，Nash 均衡・結託耐性 Nash 均衡は，21回となっている。α コアの戦略の内訳は，（A, A）が33回，（A, B）もしくは（B, A）が28回であり，ほぼ同程度出現している。p 値より Nash 均衡の頻度や結託耐性 Nash 均衡は，それ以外の状態よりも有意に少ない。α コアの頻度はそれ以外の状態よりも有意に多

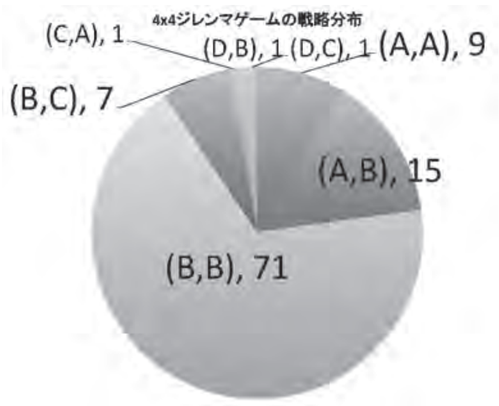

図７：４×４のジレンマゲーム

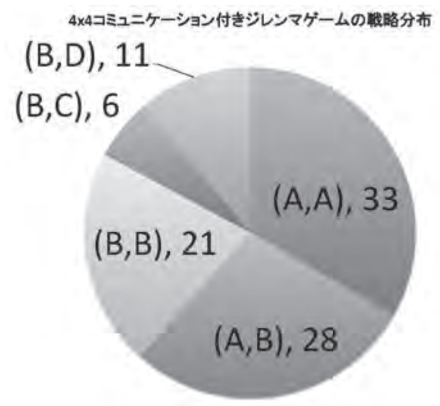

図８：コミュニケーションありのジレンマゲーム

い。有意な状態があることから，強均衡の状態は起こりにくいと言える。これらより，コミュニケーション一回限りのジレンマタイプのゲームにおける行動様式は，結託耐性 Nash 的な行動様式よりも，max min 行動原理である α コアの行動様式が観察されている。

表８：コミュニケーションがある状況のｐ値

	p 値
Nash 均衡でない検定	2.16868E-09 ＜0.05
α コアである検定	0.000039 ＜0.05

５．帰結

実験を通して，以下のような傾向が確認された。コミュニケーションがない場合は，パレート効率的な Nash 均衡が実現しやすい。コミュニケーションがある場合において，逸脱を信頼できる提携に制限した結託耐性 Nash 均衡は，あまり観察されなかった。２×２という単純な状況においては，複雑な思考の結託耐性 Nash 均衡よりも単純な強均衡が行動様式として観察されている。また，max min 行動原理である α コアも統計的に有意ではないものの，かなりの頻度で出現していることが確認された。これらのことから，コミュニケーションが可能な場合は，行動様式として α コアが実現しやすいと考えられる。

次に，コミュニケーションの効果について考察する。コミュニケーションの効果は，プレイヤー同士の協調により利得が大きくなるジレンマ型のようなゲームにおいては有効であることが確認される。しかし，パレート効率的な Nash 均衡が存在する場合，コミュニケーション有無に差がない。待ち合わせゲームのように，コミュニケーションがなくとも利得の観点から双方の行動を予想しやすい状況においては，意思疎通よって互いの行動を確認し合う必要がそれほどないのかもしれない。

本稿では，プレイヤー同士のコミュニケーションに注目して実験を行った。理論上，プレイヤー同士のコミュニケーションが許されない場合は，Nash 的な行動様式，プレイヤー同士のコミュニケーションが許される場合は，複数の行動様式が考案されている。本稿の実験を通し，コミュニケーションが許可される場合，max min 行動原理である α コアが多く観察された。どのような理由でこの行動原理が採用されているのかについては不明瞭な点が多い。多種のゲームにおいて，コミュニケーションが可能な状況での行動原理を探る必要があるだろう。

参考文献

Andreoni,, J. and J. H. Miller（1993）"Rational Cooperation in the Finitely Repeated Prisoner's Dilemma: Experimental Evidence", *Economic Journal*, 103: 570-85

Cooper, R. W., D. V. DeJong, R. Forsythe, and T. W. Ross（1991）"Cooperation without Repu- tation", Working Paper, University of Iowa

Darai D., and S., Gratz（2010）"Golden Balls: A Prisoner's Dilemma Experiment" mimeo

Gong B., and C Yang（2010）"Reputation and Cooperation: An Experiment on Prisoner's Dilemma with Second-oerder Information" mimeo

Moreno. D and J. Wooders "An Experimental Study of Communication and Coordination in Noncooperative Games" *Games and Economic Behavior* 24, 47-76

荒井一博（1995）「繰り返し囚人のジレンマゲームにおけるコミュニケーションと説得」一橋論叢第114巻 6 号38-48

鵜沢秀（2004）「10人総当たり，50回繰り返し囚人のジレンマ・ゲームの実験」商学討究第54巻 4 号37-82

〔抄　録〕

本論では，ジレンマ型ゲームにおける行動様式の検証を実験によって検証した。行動様式は，戦略型ゲームという枠組みにおいて，プレイヤー同士のコミュニケーションが許されない Nash 均衡，コミュニケーションを考慮した，強 Nash 均衡，結託耐性 Nash 均衡，α コアを利用した。理論上，プレイヤー同士のコミュニケーションが許されない場合は，Nash 的な行動様式，プレイヤー同士のコミュニケーションが許される場合は，複数の行動様式が考案されている。本稿では，実験を通し，コミュニケーションが許可される場合の行動様式について検証を行った。

本実験での帰結は，以下の通りである。コミュニケーションがない場合は，パレート効率的な Nash 均衡が実現しやすい。コミュニケーションを考慮した場合において，逸脱を信頼できる提携に制限した結託耐性 Nash 均衡は，あまり観察されなかった。2×2 という単純な状況においては，複雑な思考の結託耐性 Nash 均衡よりも単純な強均衡が行動様式として観察されている。ただ，max-min 行動原理である α コアも統計的に有意ではないものの，かなりの頻度で出現していることが確認された。これらのことから，コミュニケーションが可能な場合は，行動様式として α コアが実現しやすいと考えられる。

コミュニケーションの効果は，プレイヤー同士の協調により利得が大きくなるジレンマ型のようなゲームにおいては有効であることが確認された。