

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：12613

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2019

課題番号：16K13351

研究課題名（和文）昆虫を使った経済実験による意思決定理論の実証

研究課題名（英文）Empirical study of decision-making theory by economic experiments with insects

研究代表者

竹内 幹 (Takeuchi, kan)

一橋大学・大学院経済学研究科・准教授

研究者番号：50509148

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：混合戦略ナッシュ均衡は、ゲーム理論における頑健な行動予測のひとつである。しかし、複雑な意思決定をする人間が、その予測通りに振る舞うことは稀であり、経済実験は理論の妥当性を検証しているとは必ずしも言えなかった。

そこで本研究課題では、簡明な意思決定モデルを持つと想定される虫を使った経済実験の可能性を示すことを試みた。具体的には、雄のカブトムシを実験に用い、各個体の頭角長や体幅と闘争行動を分析し、カブトムシがナッシュ均衡戦略をとっていることを実証した。この結果は、カブトムシの行動分析に成功したというだけでなく、虫を使った実験が経済理論の検証および理論の精緻化に有用であることを示したといえる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オークション理論やマッチング理論など多くの経済学モデルが社会実装されつつある近年、経済実験による理論の妥当性検証はますます重要になってきている。その際、実際の人間が理論予測と、どのように異なるのかをあらかじめ分析する必要がある。ただし、理論と実際の行動の乖離が大きすぎる場合、それは理論の前提が特殊すぎるからなのか、人間の行動が特殊すぎるからなのか、判別が困難である。それゆえ、標準的な意思決定モデルを持つであろう虫を使った実験に価値がある。その潜在的価値の大きさを示したのが、本研究課題の成果でもある。

研究成果の概要（英文）：The mixed strategy Nash equilibrium is one of the robust theoretical predictions of human behavior. Humans with their complex decision-makings, however, rarely play the equilibrium strategy, and thus economic experiments have not necessarily tested the validity of the theory.

This research project, therefore, intends to show the potentials of economic experiments with insects, which presumably have simple internal decision-making models. Specifically, using male Japanese rhinoceros beetles, we analyze the horn lengths, the body sizes, and their fighting tactics and we find that they precisely play the Nash equilibrium strategy.

This result is not only the successful replication of the model prediction but also the successful proof of the potentials of economic experiments with insects.

研究分野：実験経済学

キーワード：実験経済学 ゲーム理論 ナッシュ均衡 昆虫実験 カブトムシ 頭角長 混合戦略均衡 経済実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ゲーム理論は、経済学に限らず、社会科学の多くの分野で、社会における相互作用を分析する手法として定着している。混合戦略ナッシュ均衡という頑健な均衡概念は、その中心命題のひとつだ。しかし、混合戦略は、どのような行動をとるかを確率的に定めた行動計画（確率分布）であり、その分布を現実データで観察するのはそもそも容易でない。また、実験室実験も多く行われてきたものの、混合戦略を確証できた実験結果は少ない。

実験による理論の検証をしてこなかった経済学においても、特に1980年代以降、人を対象とした実験室実験が導入され、ゲーム理論の実証研究が行われるようになった。経済学における実験手法の導入は画期的であり、2002年のノーベル経済学賞は、実験経済学の創始者ヴァーノン・スミス博士に授与された（心理学者ダニエル・カーネマン博士と共同受賞）。実験結果が蓄積されることで、経済理論と人間行動との乖離が明らかになり、理論が修正されていくことが期待された。しかしながら、経済学者のマインドセットを変えたという成果は大きいですが、理論の修正が十分にすすんだかといえば、そうとは言い切れない。

むしろ、経済実験によって得られたアノマリー（既存理論と相容れない実験結果）自体が経済学者には新鮮であり、心理学的知見を経済学につけ加えるような実験研究が盛んにおこなわれた。人間の行動のノイズは大きいと捉えるよりも、ノイズ自体を研究対象とした新分野が成立したともいえる。その評価は分かれるだろうが、このことは、既存理論を実験によって検証しながらその修正を図るといった深化・発展がなかった一因でもある。経済実験が理論の検証・修正を行う余地は依然として大きいと考える。

実験室実験で混合戦略ナッシュ均衡を観察できない原因は他にも考えられる。たとえば、日常的に“rule of thumb”で混合戦略を取っている場合には、人工的な統制実験下ではその行動様式は必ずしも再現されない。あるいは、統制された利得関数を induce して被験者に組み込んだつもりでも、人間は与えられた利得関数を内部処理してしまうので、実験者が想定する均衡を観察されないとも考えられる。

したがって、混合戦略ナッシュ均衡の実証をするためには、より単純な意思決定主体を使う必要があるという仮説をたてた。かつて1970年代には、鳩やラットを使って、消費者理論や不確実性下での意思決定モデルの妥当性を検証する実験が行われたことがあった（例えばレビューとして Kagel et al. 1995）。その後、生態学で動物の行動を分析する際にゲーム理論は多く用いられたが、ゲーム理論モデルの実証を直接試みた研究は乏しい。そこで、本研究では、カブトムシ (*Trypoxylus dichotomus*) を使いゲーム理論の実証分析を試みた。

経済学の理論は、形式科学であり、経済学モデルは公理とそこから演繹される定理の集合であって、公理そのものの正しさについては先験的にはなにも言えない。ただし、実験結果があれば、どちらの公理体系に経験的妥当性があるかを判断できる。こうした観点から、検証すべき理論やモデルは多岐にわたる。主観的確率で表現される信頼、学習理論・ベイズ更新、曖昧さ回避・リスク回避の相違は直ちに検証可能である。経済理論を実験するという当初の理念は、昆虫を対象とすることで達成されうる部分もあるはずだ。

### 2. 研究の目的

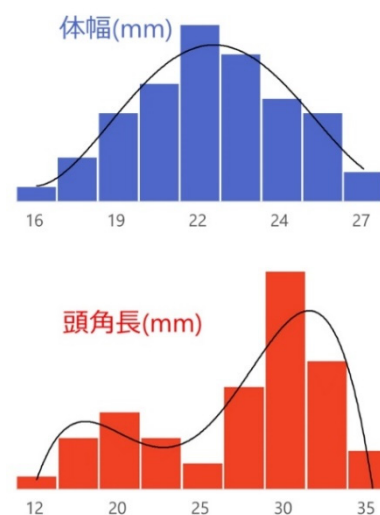
ゲーム理論・意思決定理論の経済実験を、昆虫（カブトムシ）を対象に行う。人間を被験者にした実験では観察できない理論的予測でも、昆虫を分析対象にした経済実験によって観察できることを示すのが目的である。

実験経済学の分野において、経済学モデルに近い「合理的」な行動主体として昆虫を対象にした実験を成功させ、その有効性を示す意義は大きいと考える。これまで実証できなかつたり、条件の統制が困難だったりした種々の経済学モデルについても、昆虫を使った経済実験によって検証が進むと期待できる。

心理学者は人間の心を、行動生態学者は動物・昆虫の行動を、経済学者は意思決定モデルや均衡概念を、それぞれが研究対象にしており異なった研究手法をとっている。20世紀後半の一時期にはハトやラットを使った消費者理論の実証もあったように、本研究は、昆虫の生態を研究するためにゲーム理論を使うのではなく、ゲーム理論の実証研究をするために昆虫を使う点に新規性がある。

そこで本研究は、具体的には、カブトムシの闘争行動と頭角長および体幅の関係进行分析し、そこにナッシュ均衡をみることにした。右図は採集したカブトムシの体幅と頭角長の分布を示している。着目したのは、カブトムシの角の長さの分布が均等ではなく、体格に比べて相対的に角の長い大型と角の短い小型がいることだ。

頭角長の分布が2極化する理由は次のように考えられている。オス同士の闘争に使われる角が長い個体ほど、多くの栄養を確保できるし、メスとの交尾にいたる確率も高い。だが小さい個体にとっては、闘争を避ける代替戦略の期待利得が高く、長い角は不要であるからだ。



カブトムシ成虫の体形は幼虫期の栄養摂取量に依存し、羽化後には変化しない(Iguchi, 1998)。体格の小さいオスは、角を使った闘争行動では勝率が低いので、そもそも闘争を避ける代替戦略の期待利得が高いと考えられる。したがって、栄養摂取量が少なければ蛹になるときに角を短くするほうが有利である。

### 3. 研究の方法

カブトムシを統制された条件で闘争させ、その行動(攻撃のイニシアチブおよび勝敗)を観察し、戦略の同定、それらの戦略の期待利得を計算する。複数の戦略が混在しているのであれば、その比率が混合戦略ナッシュ均衡に対応している可能性が高い。

まず、カブトムシの個体を採集し、ランダムに2個体を選び、それぞれを闘争させる。Hongo(2003)によるとカブトムシの闘争行動は次の4段階をとる:「出会い」→「角の突き合せ」→「逃走・取っ組み合い」→「追い出し・投げ飛ばし」。ここで、能動的に闘争に臨むか否かを各個体の選択として定義し、その選択基準をデータから明らかにする。

そのために、闘争行動の直前に体重を計測し、すべての観察が終了した後、各個体の頭角長および体幅を計測する。

均衡を特徴づけるためには、闘争に勝ったときの利得  $V$  と負けた時の損失  $C$  の比率を求めなければならないが、それは先験的に与えられない。そこで、本研究では、闘争行動の観察データから事後的な  $V/C$  を以下のように求めた。まず、各個体は自分ならびに相手の頭角長および体幅を知っているものと仮定し、闘争したときの期待利得、闘争しなかったときの期待利得を計算し、いずれか大きい方の行動を選ぶとみなした。そのうえで、各対戦においてそれぞれが能動的に闘争に挑む確率を推定するのである。推定確率が50%とみなせるものについては、闘争したときの期待利得が闘争しなかったときの期待利得に等しいと考え、等式を得る。その等式を  $V/C$  について解けば、次のようになる:

$$\frac{V}{C} = \frac{\text{Pr(Lose)} \text{Pr(Attacked)}}{\frac{1}{2}(1 - \text{Pr(Attacked)}) + \text{Pr(Win)} \text{Pr(Attacked)}}$$

ここで、 $\text{Pr(Lose)}$ は闘争に負ける確率を、 $\text{Pr(Attacked)}$ は対戦相手が闘争を選ぶ確率を、 $\text{Pr(Win)}$ は闘争に勝つ確率を表す。

以上のようにして均衡を特徴づけ、均衡戦略(頭角長が相対的に長くなる閾値付近での大型と小型の割合)の理論値と測定値を比較する。

### 4. 研究成果

第一実験では、オスカブトムシ55頭を採取し、うち46頭を延べ606回対戦させてデータを採取した。第二実験では、111頭のカブトムシを各4回(延べ444)闘争させ、データ分析を行った。闘争傾向を個体間で比較するためには、対戦相手を固定する必要がある。そこで、第二実験では、基準となる個体を設け、その個体の四肢を取り去り、実験者がそれを操作し、ほかの個体はその基準個体に対して闘争行動をとるかどうかを観察した。また、体重、頭角長および体幅に加えて、フォースゲージを用い各個体の筋力もあわせて測定し、データ分析に活用した。

観察結果を以下に整理する。

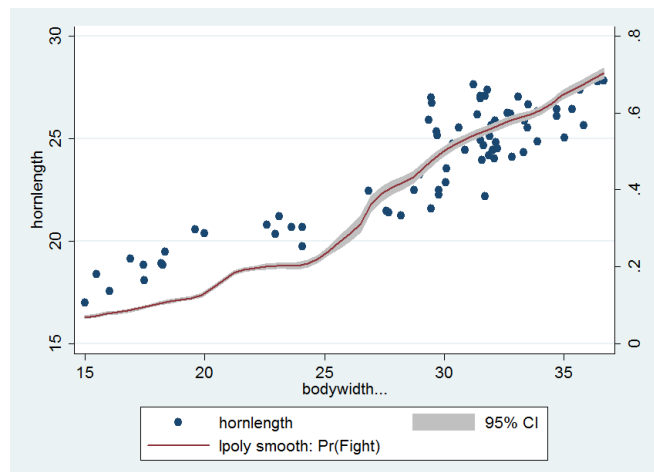
結果1: 小型と大型とを区別すると、その闘争頻度には顕著な差がみられ、代替戦略の存在をうかがわせた。

結果2: 闘争したときの期待利得としなかったときの期待利得を推計すると、体幅が小さいときには後者の期待利得が大きく、体幅が大きいとそれが逆転する。そして、その期待利得の大小が逆転する体幅は、小型と大型の閾値に一致することがわかった。

結果3: 理論的な結果として、以下に挙げる3つの異なる戦略空間のそれぞれにおいて均衡戦略が観察されうることをデータからも示した。(1)小型と大型とを分ける体幅の閾値、(2)閾値付近における小型と大型の構成比率、(3)成虫の各個体の闘争確率関数。

(1)の戦略空間では純粹戦略均衡が観察できると予想する。(2)ではデータから得られた  $V/C$  がその構成比率を表すと考えられる。

(3)に関して、観測データから推定された闘争確率(右図の曲線)をみると、小型の個体ですら、10~20%程度であったので、それは混合戦略として解釈



すべきものであった。闘争を選択するかどうかは、闘争相手の体格や頭角長の観測結果にも依存する。そこに一定の誤差が含まれるとしたうえで最適な行動をとっていると仮定すれば、闘争選択確率も整合的に説明可能である。論文の公刊に向けて、モデルの精緻化作業が残されているものの、データからは上記の結果が読み取れた。

以上の結果は、ゲーム理論の頑健な理論予測を合理的な行動主体を実験に使うことによって実証するという当初の目的を、一定程度果たしたものだといえる。

実験による検証が必要とされるのは、理論の仮定や公理に選択の余地が大きく、どの仮定に依拠して理論を構築するかが定まっていない場合である。逆にいえば、頑健な理論予測が得られている場合には、実は、経済実験による理論の検証の余地は小さいといえる。

しかし、人を被験者とした経済実験では頑健な理論の再現すら困難である。ましてや、理論予測が定まっていない領域においては、冒頭に述べた通り、ノイズの多い人の行動をもって理論の妥当性を確認することは不可能である。

このような学術的背景や課題に対して、本研究が示した、昆虫を使った経済実験の有用性はその解決の糸口を提示したといえよう。

#### 【引用文献】

- Hongo Y. (2003). "Appraising behaviour during male-male interaction in the Japanese Horned Beetle *Trypoxylus Dichotomus Septentrionalis* (Kono)," *Behaviour*, 140, pp. 501-517.
- Iguchi Y. (1998). "Horn dimorphism of *Allomyrina dichotoma septentrionalis* (Coleoptera: Scarabaeidae) affected by larval nutrition," *Annals of Entomological Society of America*, 91, pp. 845-847.
- Kagel, J., Battalio, R., Green L. (1995). *Economic Choice Theory: An Experimental Analysis of Animal Behavior*, Cambridge University Press.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Kan Takeuchi
2. 発表標題 Beetles play Nash: Mixed strategy equilibrium in their horn length
3. 学会等名 Economic Science Association 2017 North American Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kan Takeuchi
2. 発表標題 Beetles play Nash: Mixed strategy equilibrium in their horn length
3. 学会等名 Behavioural economics: Foundations and applied research (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kan Takeuchi
2. 発表標題 Beetles play Nash: Mixed strategy equilibrium in their horn length
3. 学会等名 2017 Asia-Pacific Economic Science Association Conference (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 竹内幹
2. 発表標題 カブトムシの戦略と頭角長：混合戦略均衡の実証実験
3. 学会等名 第20回実験社会科学カンファレンス
4. 発表年 2016年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----