

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成24年6月1日現在

機関番号：33704

研究種目：新学術領域研究（研究課題提案型）

研究期間：2009～2011

課題番号：21200008

研究課題名（和文） 経済学における神経科学的基礎付けの研究

研究課題名（英文） The survey of Neuroscientific Foundation on Economics

研究代表者

松葉 敬文 (MATSUBA TAKAFUMI)

岐阜聖徳学園大学・経済情報学部・准教授

研究者番号：00295619

研究成果の概要（和文）：経済学上の幾つかのパラドックスに対し、神経科学の知見と技法を用いてアプローチした。不確実性下の選択課題の行動データと、テストステロンなどの生理化学指標との間に、幾つかの有意な相関が見つかった。また、課題の確率を被験者が知っている状況と知らない状況で扁桃体の活動を見るために、不快画像と中立的画像を利用しながらリスクおよび不確実性課題に直面した被験者を、3T-fMRI 装置を利用し脳機能画像解析を行った。結果は、リスク状況と不確実状況で抑制系の活動は異なることを示唆するものであった。

研究成果の概要（英文）：We approached some anomalies of economics by using the knowledge and techniques of neuroscience. In the experiments, we found some significant correlations between the decision making under uncertainty and indexes of physiological chemical substances (e.g., Testosterone). The subjects also underwent functional magnetic resonance imaging (3T-fMRI) to observe the activation of their amygdala, both under risk (i.e., with known probability) and under ambiguity (i.e., with unknown probability) while viewing blocks of unpleasant images and neutral images. The results suggest that the activity of inhibitory system under ambiguity may be different from that in risky situation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2010年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2011年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
総計	24,100,000	7,230,000	31,330,000

研究分野：社会科学、総合領域

科研費の分科・細目：経済学・理論経済学、神経科学・神経科学一般

キーワード：神経経済学、生理化学物質、テストステロン、コルチゾール、脳機能画像解析

## 1. 研究開始当初の背景

行動経済学と実験経済学の開拓に対し、2002年にDaniel Kahnemanらにノーベル経済

学賞が授与されて以来、経済学では新しい実験手法の導入と、そして神経科学・心理学分野の知見との急速な融合などが活発に行われ、この分野の発達は目覚ましいものがあった。

特に fMRI (機能的核磁気共鳴計測装置) を用いた非侵襲的な脳機能解析の技法の広まりは、神経科学と経済学の学際領域研究を大きく進展させた。経済学への神経科学的なアプローチは神経経済学と呼ばれており、2005年には経済学の主要誌である AER や "Games and Economic behavior" に神経経済学の特集が組まれようになり、JEL には Camerer ら著名な神経経済学者による Survey 論文が掲載された。2008年には Polster や Glimcher et al. などの、神経経済学のテキストが執筆されるまでに至っている。特に経済学における主要なパラドックスの一つであるエルズバーク・パラドックスを、脳機能画像解析の手法を用いて説明を試みた Hsu et al. (2005, SCIENCE) らの研究は脳機能部位の違いによりパラドックスの解明を企図したものであり、伝統的な経済学の分析手法では不可能なアプローチであった。

しかし斬新な研究が活発に行われつつも、膨大な未開拓領域が残されている研究分野であった。特に神経科学分野の重要な知見である生理化学物質 (ホルモン) や神経伝達物質が行動に与える影響についての研究、そして生体電気信号と行動との相関研究は、脳画像解析やその他の実験経済学研究と比べ、国内の経済学分野では皆無に近い状況であった (神経生物学分野では Tanaka et al. (Nature Neuroscience 2004, The Journal of Neuroscience 2008) などが、また認知心理学分野では Ohira (2008) などが存在していた)。経済学分野での化学物質関連の研究は、国内ではほぼ完全に新規の研究分野となる状況であった。

日本国外の状況においても、Kosfeld et al. (2005, Nature) や Zak (2005, AER) らによる研究が著名であったが、扱っている物質の数は決して多くなかった。神経科学分野での知見の蓄積に対し、経済学における化学物質の扱いは課題として世界的に見ても確立しているとは言い難いものであった。従って、経済的な選択行動における神経科学的な影響をより明示的に扱う実験を行い、課題として確立することが急務と考えられた。

## 2. 研究の目的

行動経済学、特に神経経済学の分野では脳機能画像解析研究の経済学への応用が大きく脚光を浴びることが多い。しかし、カリフォルニア工科大学やクレアモント大学、そしてチューリッヒ大学等、神経経済学の中心的研究拠点では、体内化学物質が経済的選択行動に与える効果に関する調査研究も重要な位置を占めている。

例えば神経伝達物質のセロトニンは、その分泌量の低下がリスク下の選択行動で危険回避的な行動を導くとして Cloninger らによ

り指摘されていることが広く知られている。またオキシトシンと経済的選択行動との関係について、Zak (2005, Hormones and Behavior) 等の研究が米国では極めて著名な研究として知られている。オキシトシンは個体間の「信頼」の度合いと正の相関を示す物質として報告されており、利他的行動を明示的に扱う測度因子として利用できるものと考えられている。高濃度のオキシトシンは、経済取引を高い信頼度で支え、経済活動を促進する物質として予測される。経済取引と信頼度の関係について、1983年にノーベル賞を受賞した Arrow は、"Philosophy and Public Affairs" (1972) において「経済的遅滞の多くは相互信頼の欠如によって説明しうる」と述べており、経済における信頼の重要性を強調している。Zak らの報告は人間の利他的行動について神経科学的な説明を試みたものとして位置付けられる。

さらに男性ホルモンの一種であるテストステロンの濃度が高い場合、他者への攻撃性が増大し、行動科学においては、不信度の上昇を捉える指標として指摘されている。また、Apicella et al. (Evolution and Human Behavior, 2008) では、危険愛好性とテストステロン濃度の間に正の相関があると報告されている。

これらの化学物質の研究では特に、Tanaka et al. (Nature Neuroscience 2004) と Coates (2008, PNAS) の報告が注目に値する。Tanaka は、時間割引率とセロトニン (神経修飾物質) の関係について論じており、Coates は株トレーダーの収益性とテストステロンの濃度に、有意に正の相関があると報告している。

ここまで述べてきたように、近年の研究では各種の体内物質により人間の選択行動が影響を受けることが明らかにされつつある。しかしながら、日本の経済学研究では化学物質が選択行動へ与える影響について、極めて少数の研究報告しか行われていない。また国際的にも、各種の体内物質調査が、脳画像解析や生体電気信号の調査と総合的に行われた研究は、認知心理学の分野では報告が行われている (Ohira (2008)) が、経済学分野ではほとんど見つからない状況である。体内物質が経済的選択に与える影響のみならず、脳波測定や脳機能画像解析を併用し、情報処理過程や脳の賦活部位に関して総合的に検討するアプローチは経済学研究では未確立の分野である。本研究はこの未開拓の分野に取り組むことを志したものである。

本研究では、経済的選択に直面している被験者の選択行動について以下の三つの点で実験調査を行うことを目指した。

① 被験者から生体試料 (唾液・血液) を採

取し、選択行動が行われる際の生理的な背景（個人の体内化学物質の濃度水準や経時的な濃度変化、個人間の濃度差）を調査する。

- ② 被験者の安静閉眼時脳波（生体電気信号）を記録し、選択行動（特に確率課題における選択）との関係を調査する（Ernst Fehrらによるコンピュータ実験を基本的手法とした）。
- ③ fMRI装置内において被験者に経済的選択課題を与え、物質的な背景と脳機能画像解析を併用した選択行動について調査する。

これら三点からのアプローチにより、神経科学が経済的行動に与える相互関連的な影響を研究することにより、経済実験により蓄積されるデータに対し、神経経済学的基本モデルを科学的に構築する分野の開拓、すなわち”経済的選択行動の神経科学的基礎付け”の開拓を行うことが本研究の目的である。

### 3. 研究の方法

#### (1) 実験における主たる調査内容

体内化学物質により経済的選択行動に対し励起される攻撃性や利他性、危険（リスク、不確実性）回避性・愛好性の影響を調査するため、被験者を募って行動データと生体試料を収集し解析した。2010年度以降は、健康保険が適用されない歯科インプラント治療を検討する患者の選択行動が、現実の不確実性下における選択課題になっている点に注目し、呈示する実験課題において治療を検討する患者の選択行動を暗黙裡に想定した。これにより医療系研究者との連携研究を行うことで、倫理面・実験実務面における諸問題を解決し、また不確実性選択課題における現実的妥当性の向上を図っている。

#### (2) 実験倫理に対する姿勢

2009年度から2011年度までの研究機関を通じ、神経科学の成果を社会科学的研究に取り入れる上で不可欠な問題として、実験倫理面の整備に取り組んだ。本研究グループが行った、生体試料を取り扱う全ての研究は大学および研究機関に設置された倫理委員会による倫理審査を受け、実験許可を得たものである。特に血液試料を取り扱う実験では、医療系研究機関の倫理審査をうけるなど、厳格な姿勢で実験倫理に臨み、試料採取を医療機関の診察室で行い、倫理面・安全面で細心の注意を払っている。

#### (3) 生理化学物質の解析

##### ① 行動データ・生体試料の収集

実験の参加者を募集し実験参加同意書を提出してもらった後、被験者として実験に参

加してもらった。

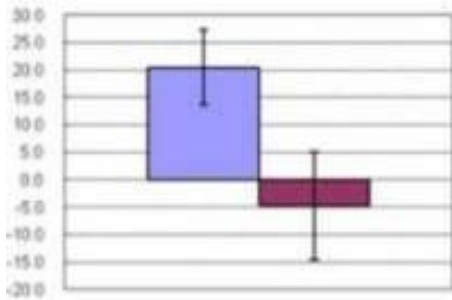
研究期間を通じて利用した主な手法は、実験票（アンケート）を用いた経済的意思決定課題を被験者の集団に呈示し、行動データを回収する方法である。また被験者から提供してもらった生体試料として、唾液試料を主に利用した。この手法は、参加者数に一定の制約が生じるコンピュータ実験と異なり、多数の被験者から同時に生体試料を採取できるという利点があった。2009年9月にクレアモント大学神経経済学研究センターを視察した際、血液試料の利用に関する法的制約が米国では日本と比べて少ない等、研究環境面の違いが強く認識された。本研究グループは、血液試料を用いる実験では研究環境面で他国と比し厳しい状況にあると考えられたため、唾液試料の利点を生かす実験を志向したことも、本手法を採用した理由の一つである。ただし血液試料を利用した実験も、2010年度に、歯科医師、看護師、そして民間の血液試料解析機関の協力の下で実験環境を整え、生理化学物質の血中濃度の測定も行き、実験精度の向上を図っている。

##### ② 体内物質の解析

唾液試料中の生理化学物質の解析は酵素免疫測定法（EIA）を用い、唾液中テストステロン濃度、唾液中コルチゾール濃度を測定した。血液試料の解析にあたっては外部検査機関に委託している。

また2010年度において、体内化学物質の変容が行動選択に与える影響を明確に観察するため、被験者のテストステロン水準を低下させた上で課題を呈示する実験を行っている。諸外国ではアンドロゲン・クリームを塗布するなどの手法により、被験者群の生理化学物質の体内濃度を制御して行動データを検討する実験が行われている。しかし国内では倫理的な問題等により同様の手法を採用することは困難であった。そこで本研究グループは、医師の協力を得て経口グルコース負荷試験によるインスリン反応を利用し、被験者のテストステロン濃度を内生的に低下させる手法を用い、濃度差のある被験者群を創出することを試みた。対照群にはインスリン反応を起こさないフルクトースを投与している。

インスリン反応によりグルコース投与群の平均濃度は126.0pg/mLから103.7pg/mLに低下した一方、フルクトース投与群の平均濃度はほとんど変化が生じなかった。各投与群に生じた投与前後の平均濃度差には、t検定（t値=2.06, p値<0.023）、及びWilcoxon検定（W=332, p値<0.017）において有意な差が存在した。図1はグルコース投与群（左）とフルクトース投与群（右）のテストステロン濃度低下量を示したものである。



(図1)

インスリン反応によりグルコース投与群の平均濃度は126.0pg/mLから103.7pg/mLに低下した一方、フルクトース投与群の平均濃度はほとんど変化が生じなかった。各投与群に生じた投与前後の平均濃度差には、t検定(t値=2.06, p値<0.023)、及びWilcoxon検定(W=332, p値<0.017)において有意な差が存在した。図1はグルコース投与群(左)とフルクトース投与群(右)のテストステロン濃度低下量を示したものである。

なお、神経経済学分野では女性の生理周期が生理化学物質および選択行動に対して与える影響がしばしば指摘され、女性被験者の参加する実験の解析精度が疑問視されることも多かった。しかし、本研究グループが行った100名以上の女性被験者の黄体期・卵胞期と選択行動に関する調査においても、実験期間中に発表されたLiening et al. (2010)の結果においても、調査対象物質と生理周期の間に特に相関関係は存在しなかった。よって本研究における一連の実験では、女性被験者の生理周期の問題は無視している。

#### (4) 脳波測定 (生体電気信号解析)

脳の右半球・左半球の機能にはリスク選好に対し機能差(接近-回避)があると心理学分野では指摘されている。精密な電位測定が可能である脳波計(生体電気アンプ)を用い、安静閉眼時の周波数解析を行い、被験者の左右の脳波差とリスク回避性との相関について観察した。この実験では、実験票による課題とコンピュータ実験によるリスク選択課題の二つの手法で、被験者から行動データを回収している。

前頭部に表れる脳波差を観察するため、F3、F4、Fz、A1(左耳)、A2(右耳)、EOG(左目下)、ボディーアース(Fpz、額中央)、システムリファレンス(REF、※Cz付近)の各所に被験者に電極を装着してもらい、デルタ波からベータ波(1.5~30Hz)の各EEGを調査した。

#### (5) 脳機能画像解析

- ①fMRI装置による脳機能画像解析の意図  
テストステロンやオキシトシンが扁桃体

の活動に対して作用し、眼窩前頭野や脳幹との情報伝達機能を賦活あるいは抑制という作用をもたらすというRyan and Breedlove

(2010)の指摘に注目した。fMRI装置内において被験者に不快画像を呈示することで、扁桃体の賦活状況に差を作り出し、抑制作用と選択行動に関する実験調査を行い、物質が賦活実性に与える影響を疑似的にfMRI装置内で再現する実験を試みた。脳機能の測定にあたっては、株式会社ATR-Promotions脳活動イメージングセンター(BAIC)が保有する3T-fMRI装置Verioを使用している。

#### ②装置内における課題と指標

被験者にfMRI装置内で呈示するリスク選択に関する実験課題として、経済実験では広く利用されているBalloon Analogue Risk Task(BART)を利用した。この課題では、被験者は装置内のディスプレイ上に図2のように表示される風船(Balloon)を、ボタンクリックにより送風機から仮想的な送風をすることで膨張させる。被験者は送風ボタンのクリック数に応じて賞金を獲得することができるが、ランダムに事前設定されたクリック数を超えると風船は破裂してしまい、賞金を獲得することができない。



(図2)

被験者は破裂点を確率的に知っている状態と知らない状態で課題を試行する。被験者が危険回避的であればクリック数は少なくなる。試行において記録されるクリック数を、破裂確率の判明下・不明下で比較(破裂点までの平均到達率を比較)し、対数指標化したものの比率をとり、不確実性回避度と定義した。

#### ③課題における呈示画像

fMRI実験中の短時間の間に扁桃体を刺激する手法として、フロリダ大学精神生理学研究センター(The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida)が学術目的用途に限って使用許可を与え提供する、不快画像群を利用した。これらの画像群は情動に与える効果が学術的に確認さ

れているものである。また脳機能の賦活を比較するベースとして、画像をピクセル単位で分解した画像を中立的画像として提示した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 生理化学物質と選択行動

###### ① テストステロンの影響

テストステロン濃度が選択行動に与える影響は、その絶対値水準よりも経時変化による差分値の方が回帰分析における適合度が高い傾向が見られたため、差分値に注目した解析を中心として行った。

提示した課題群の中で、一定の確率で賞金を獲得できるクジに対し、被験者が適正と考える購入金額（クジの等価金額）を回答する設問（適合課題）で、テストステロン濃度が上昇局面（濃度の経時変化が正）にある被験者は、クジを高く評価するという結果を有意に得た（ $p$  値 $<0.05$ ）。この課題は、回答値の確率分布そのものは被験者は分からないため、不確実性回避に関する問題として考えることができる。すなわち、テストステロン濃度の上昇は不確実性回避度を低下させる（不確実性を好むと考えられる）。

###### ② コルチゾールの影響

fMRI 装置内で行った BART 課題に対する不快画像提示時の不確実性回避度とコルチゾール濃度との間に、有意な正の相関関係が観察された（相関係数 $=0.59$ 、 $p$  値 $<0.01$ ）。すなわち、不快画像を提示された被験者のコルチゾール濃度が高いほど、不確実な選択を回避する傾向にあった。コルチゾールはストレス指標として利用できるため、コルチゾール濃度の高い状態は、意思決定主体のストレスが高い状態として想定できる。よって、高ストレス状態で確率的に不明な選択に直面し意思決定を行った主体は、何らかの不快な状況に遭遇すると、以前より回避的な意思決定をする可能性が高い。

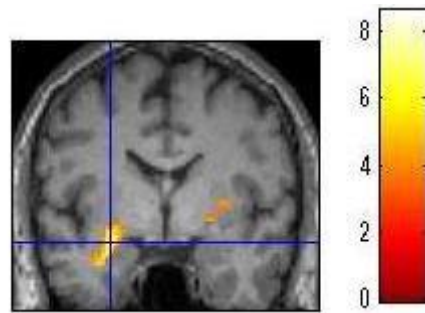
##### (2) 生体電気信号と選択行動

EEG と選択行動に関する実験では、質問票を利用した場合は有意な結果が得られなかった。しかし画像提示型のコンピュータ実験では、安静時に計測した左右半球での  $\delta$  波・ $\beta$  波の非対称性と不確実性回避度との間に 5% 水準ながら有意な相関を得た。但し、先行研究の結果と部分的に整合性を欠き、課題前の安静時脳波と選択行動との相関関係については疑問も残る結果となっている。

##### (3) 脳機能画像解析と選択行動

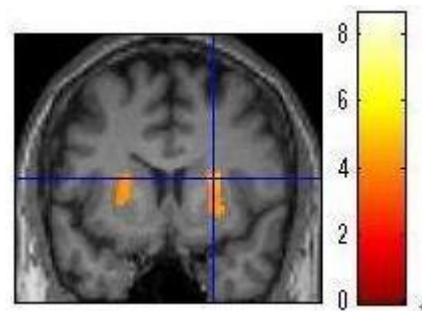
fMRI 装置内で 21 名の被験者に、風船の破裂確率が不明な BART 課題（TA）と、破裂確率が事前に判明している BART 課題（TR）の双方を試行してもらった。各試行の直前に不

快画像と中立的画像を提示し、課題試行中の脳機能を観察した画像データを変量効果モデル（rfx）で解析した（自由度 $=20$ ）。



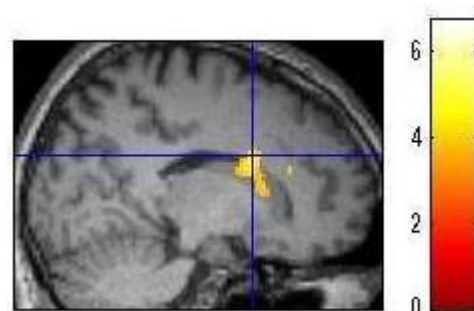
(図 3)

不快画像刺激に対し、被験者は確率が不明な不確実な状況（TA）では左扁桃体（図 3）と左右の前帯状皮質（図 4）が有意に賦活した（corrected- $p < 0.001$ 、クラスター $k \geq 300$ ）。



(図 4)

一方、直面している選択問題を被験者が確率的に認識しているリスク状況下（TR）では、不快画像刺激を与えられた際の選択行動において本来なら賦活するはずの扁桃体の賦活が見られず、図 5 に見られるように腹側と背側の前帯状皮質が不快画像刺激に対して有意に賦活した（corrected- $p < 0.001$ 、クラスター $k \geq 100$ ）。



(図 5)

前帯状皮質と扁桃体は密接な連絡関係にある部位であり、前帯状皮質は扁桃体の活動を制御している部位と考えられている。被験者が風船の破裂確率を知っている状

況では、前帯状皮質が扁桃体の抑制に関係し、そもそも扁桃体を賦活させないように機能していることが示唆される。一方、風船の破裂確率が被験者が知らない状況では、不快画像刺激に対し左扁桃体と被殻が賦活した。前帯状皮質の賦活が確認できないことから、扁桃体を抑制するような機能がリスク状況と比べて弱い（あるいは存在しない）ということが考えられる。つまり、直面している選択問題の確率が判明している状況であるか不明な状況であるかの相違により、扁桃体の活動を抑制する機能が異なる可能性が示唆される。

Hsu et al. (2005, SCIENCE) では確率不明時に扁桃体が賦活するため回避行動が誘発されると指摘しているが、本研究は確率判明下においては扁桃体の賦活を抑制する機能が働き、その結果としてエルズバーク・パラドックスが生じる可能性を示したものであり、先行研究の結果をさらに明確にするものである。

#### (4) 総合的な結果の位置付け

本研究は経済的選択行動と脳機能・生理化学物質における関係性について総合的な実験調査を試みたものである。中心的な研究課題として行った、経済主体の不確実性下の課題における行動選択に対する研究の結果として、生理化学物質（テストステロン、コルチゾール）の濃度、脳波、そして脳機能画像解析のそれぞれにおいて総合的な結果を得た。これらの関係は明瞭な科学的証明には至っていないものの、個別的にはあるが有意な関係を並列的に示しており、経済学の神経科学的な基礎を提供する、嚆矢的な報告となったものである。

#### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 9 件）

① 松葉敬文、佐藤淳、蔵研也、村上弘、加藤大輔、インプラント治療における性格的リスクマネジメントの研究—コルチゾールと意思決定の関連性—、日本口腔インプラント学会誌、査読有、発行予定、(2012)、(1 頁)

② 松葉敬文、佐藤淳、蔵研也、加藤大輔、村上弘、不快画像刺激による扁桃体賦活と選択行動、行動経済学会プロシーディングス、査読有、発行予定、Vol. 5、(2012)、(7 頁)

③ 松葉敬文、佐藤淳、蔵研也、村上弘、青木貴子、インプラント治療における性格的リスクマネジメントの研究—第 1 報。経口ブド

ウ糖負荷試験後のテストステロン濃度と意思決定—、日本口腔インプラント学会誌、査読有、Vol. 24、(2011)、pp. 246 (1 頁)

〔学会発表〕（計 10 件）

① 松葉敬文、不快画像刺激による扁桃体賦活と選択行動、行動経済学会、2011. 12. 11、関西学院大学

② 蔵研也、口腔インプラント治療における神経経済学的研究第一報：セロトニンと社会行動、日本口腔インプラント学会、2011. 9. 17、名古屋国際会議場

③ 蔵研也、テストステロンと経済行動：濃度変化がリスクをとらせる、行動経済学会、2010. 12. 4、上智大学

④ 佐藤淳、美人投票ゲームの神経科学的分析、日本経済学会、2009. 6. 7、京都大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松葉 敬文 (MATSUBA TAKAFUMI)  
岐阜聖徳学園大学・経済情報学部・准教授  
研究者番号：00295619

##### (2) 研究分担者

蔵 研也 (KURA KENYA)  
岐阜聖徳学園大学・経済情報学部・准教授  
研究者番号：80278275

佐藤 淳 (SATO JUN)

岐阜聖徳学園大学・経済情報学部・准教授  
研究者番号：70267920

##### (3) 連携研究者

村上 弘 (MURAKAMI HIROSHI)  
愛知学院大学・歯学部・教授  
研究者番号：50182100  
(H22 年度から連携研究者として参画)

加藤 大輔 (KATO DAISUKE)  
愛知学院大学・歯学部・専任講師  
研究者番号：00367616  
(H22 年度から連携研究者として参画)