

# 美人投票ゲームの神経科学的分析\*

松葉 敬文 佐藤 淳 蔵 研也

## 概要

この研究は、美人投票ゲームにおける被験者の思考過程を脳波測定という神経科学の手法によって直接分析し、被験者がヒューリスティックな思考をしているかどうかの判別を試みるものである。我々は被験者が美人投票ゲームをしている場合と、ゲーム理論的な思考に最低限必要となる計算をしている場合のそれぞれについて脳波を測定して、計算負荷に差があるかどうかを分析した。その結果、被験者4名のうち3名がヒューリスティックな思考をしていることがわかった。また、ゲーム理論的な思考をする被験者と似たような回答をしている場合でもこの手法によってヒューリスティックな思考をする被験者を判別できることが明らかになった。

## 1. はじめに

Keynes (1936) が株式市場を美人投票に例えて以来、人々はどの程度まで他人の意思決定を考慮して自らの意思決定をするのかという推論レベルの問題が様々な形で分析されている。実験経済学ではゲーム理論の枠組みを使ってNagel (1995)、Stahl (1996)、Ho, Camerer, and Weigelt (1998) などがこの問題を探り上げている。これらの実験で行われるゲームは、 $N$ 人の参加者がある範囲（例えば0から100）の中から同時にひとつの数字を選び、回答値の平均の  $p$  倍に最も近い数字を回答した者が勝つというものである。これらの研究によって、このようなゲームではNash均衡が選択されず、推論レベルはあまり高くないことが明らかにされた。この推論レベルとNash均衡の乖離は、ヒューリスティックな思考、すなわち単純なルールに基づく思考をしている人々が存在することを示唆しているとも考えられる。実際、松葉・佐藤・蔵 (2008) は日本の大学生を対象に同様の実験を行った際に集めたアンケートを分析した結果、ゲーム理論的な推論に基づいて回答する被験者は少数であり、多くの被験者がゲーム理論的な推論とは関係なく回答値を選択している可能性が高いことを指摘している。したがって、ヒューリスティックな思考をする被験者がどの程度存在するのかを知る必要がある。

しかし、これまでの研究はいずれも回答値という結果から被験者の思考過程を間接的に推察するため、ゲーム理論的な推論をする被験者とヒューリスティックな思考をする被験

---

\* この研究は岐阜聖徳学園大学経済情報学部より特別教員研究費の助成を受けている。

者が似たような回答をした場合には両者を区別することができなくなる。また、アンケートでは無回答や回答がある場合でもあいまいな表現が多く、どのような思考をしていたかを正確に知ることは困難である。この論文は、美人投票ゲームにおける被験者の思考過程を脳波測定という神経科学の手法によって直接分析し、被験者がヒューリスティックな思考をしているかどうかの判別を試みるものである。

脳波とは、大脳皮質の多数のニューロン（神経細胞）に発生する後シナプス電位を頭皮上の電極で集積してとらえたものである。ニューロンでの活動電位が1msと持続時間の短いパルスであるのに対し、後シナプス電位はその数倍から数十倍長い時間持続する。脳波は周波数帯域によって $\delta$ 波（4Hz未満）、 $\theta$ 波（4Hz以上、8Hz未満）、 $\alpha$ 波（8Hz以上、13Hz未満）、 $\beta$ 波（13Hz以上、30Hz未満）などに分類されるが、実際に観測される脳波は主に $\alpha$ 波と $\beta$ 波から構成され、 $\delta$ 波と $\theta$ 波は少量観測される程度である。特に $\delta$ 波が多く観測される場合はアーチファクト、すなわち脳波の記録に混入する脳波以外の電位変動である可能性が高い。 $\alpha$ 波の振幅は100 $\mu$ V以下で、安静時や閉眼時に後頭部優位に出現する一方、開眼、緊張、精神的集中などによって抑制される。 $\beta$ 波の振幅は10 $\mu$ V程度で30 $\mu$ Vを越えることはない。 $\beta$ 波も開眼、緊張、精神的集中などで減衰するが、その程度が $\alpha$ 波よりも小さいため、 $\alpha$ 波が消滅しても $\beta$ 波が残存して見える。したがって、作業の負荷が大きい場合や作業に集中している場合は、 $\alpha$ 波成分の $\beta$ 波成分に対する比率（ $\alpha$ - $\beta$ 比）は低下する。

この論文では $\alpha$ - $\beta$ 比に注目する岡田（2008）の方法を用いて、美人投票ゲームにおける被験者の思考過程を分析する。具体的には、被験者が美人投票ゲームをしている場合と、ゲーム理論的な思考に最低限必要となる計算をしている場合のそれぞれについて脳波を測定して $\alpha$ - $\beta$ 比を求め、計算負荷に差があるかどうかを分析する。Camerer, Loewenstein, and Prelec（2005）が紹介しているように、神経科学の手法の経済学への応用はfMRI（機能的磁気共鳴計測装置）などを使った高次脳機能画像解析において近年大きく進展しており、Coricelli and Nagel（2009）は美人投票ゲームにおいてレベルの高い推論と低い推論とでは賦活する脳の部位が異なることを報告している。また、Zak, Borja, Matzner, and Kurzban（2005）、Coates and Herbert（2008）、Matsuba, Sato, and Kura（2008）などは各種のホルモンが経済行動に影響を与えることを明らかにしている。しかし、脳波測定に関しては心理学や人間工学などの分野において応用が進んでいるものの、経済学への応用は皆無に近く、特に経済主体の思考過程の分析への応用はこの論文が最初のものではないかと思われる。

## 2. 実験方法

実験には経済学専攻の学部男子学生4名が参加した。参加に先立ち、被験者には実験に関する説明を行い、自らの自由意志により実験に参加することを確認した上で被験者から実験参加同意書を提出してもらった。実験参加後には、実験が事前の説明どおり行われ、自由意志によって参加したことを確認した上で事後確認書を提出してもらった。

まず、国際基準の10/20法に従って被験者のFpz（前頭極正中部）、Fz（前頭正中部）、Cz（中心正中部）、Pz（頭頂正中部）に電極を装着した。10/20法は、鼻根から後頭結節までの距離を10%および20%で均等分割していく方法である。Fpzは鼻根と後頭結節の間の距離の10%だけ鼻根の上部の点であり、FzはFpzよりも20%後方、CzはFzよりも20%後方、PzはCzよりも20%後方に位置する。このうち、Fpzの電極は交流障害を軽減するためのものであり、ボディーアースと呼ばれる。次に、A1（左耳朶）とA2（右耳朶）に基準電極を装着した。脳波の測定は基準電極誘導法で行った。基準電極が活性化していないという条件が満たされれば、記録された波形はその点における脳波そのものの変化とみなすことができる。脳波計は時間分解能が高い反面、交流障害やアーチファクトの影響を受けやすい。このため、脳波計のアースをとり、照明器具等の電気製品の使用も最小限に抑えるとともに、被験者にはリラックスするように指示した。

以上の準備の後、まず美人投票ゲームを行った。この実験では予め別の大学の経済学専攻の学部学生25人に対して $p = 0.7$ として1から100の中から数字を選ぶゲームを実施して得られた結果を使った。したがって、被験者の回答は正解の計算には反映されないものの被験者自身が26人目の参加者であると想像して回答するように被験者に指示した。実験で使用したゲームの回答値の平均と標準偏差は図1に示すとおりである。

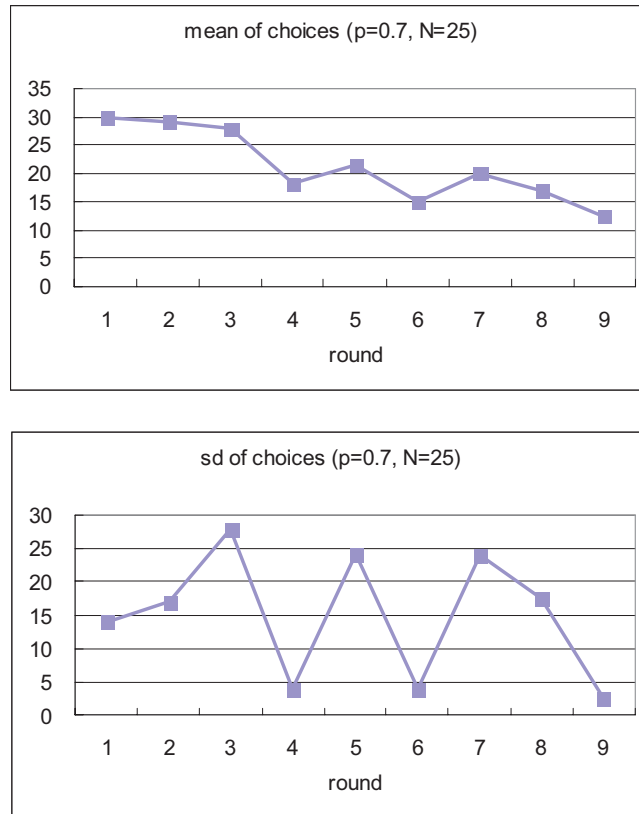


図1 実験で使用了した美人投票ゲームの回答値の平均と標準偏差

回答へのインセンティブとして1回の正解につき100円を被験者に与えることにした。被験者は閉眼で30秒間考えてから回答し、回答後に回答値の平均と正解を告げられ、再び閉眼で次の回答を30秒間考える、ということを9回繰り返した。

次に対照実験として、ゲーム理論的な思考をする場合に最低限必要となる計算問題を被験者に課した。ここで、ゲーム理論的な思考に最低限必要となる計算とは次のような考え方に基いている。 $b$ を前回の回答値の平均、 $k$ を整数、 $b \times 0.7^k$ を推論レベル $k$ の回答値とする。事前の参加者25人が同一の推論レベルの回答をしたとする。図1によれば、回答値の平均が減少傾向を示していることから参加者の推論レベルは1以上であると考えられる。そこで推論レベルを1とすると、被験者が勝つために選ぶべき回答値 $c$ は、被験者自身の回答値が平均に反映されないことから次のようになる。

$$c = b \times 0.7 \times 0.7.$$

そこで対照実験の1回目の問題は $100 \times 0.7 \times 0.7$ 、2回目の問題は $90 \times 0.7 \times 0.7$ とし、以下同様に9回目の問題は $20 \times 0.7 \times 0.7$ とした。これらは以下の理由でゲーム理論的な思考をする場合に必要となる計算の下限であると考えられる。第1に、 $0.7 \times 0.7$ に10の倍数を掛

けているため計算しやすくなっている。第2に、被験者以外の25人の推論レベルが2以上である場合や、被験者以外の25人の回答値に個人差がある場合は計算がもっと複雑になる。被験者は問題を告げられてから閉眼で30秒間考えて回答し、回答後に正解を告げられ、再び閉眼で次の問題の回答を30秒間考える、ということを9回繰り返した。

### 3. 実験結果

美人投票ゲームと対照実験における計算負荷を比較するために脳波の周波数成分を分析した。実験では各質問に対して脳波を30秒間測定しているが、アーチファクトの影響を最小限に抑えるために解析区間を短くする必要があることから、0-10秒、10-20秒、20-30秒の3つの区間に分割してそれぞれの脳波データをスペクトル解析した。具体的には、まず高速フーリエ変換によってピリオドグラムを求め、11項の移動平均を2度行って平滑化して標本スペクトル密度関数を求めた。

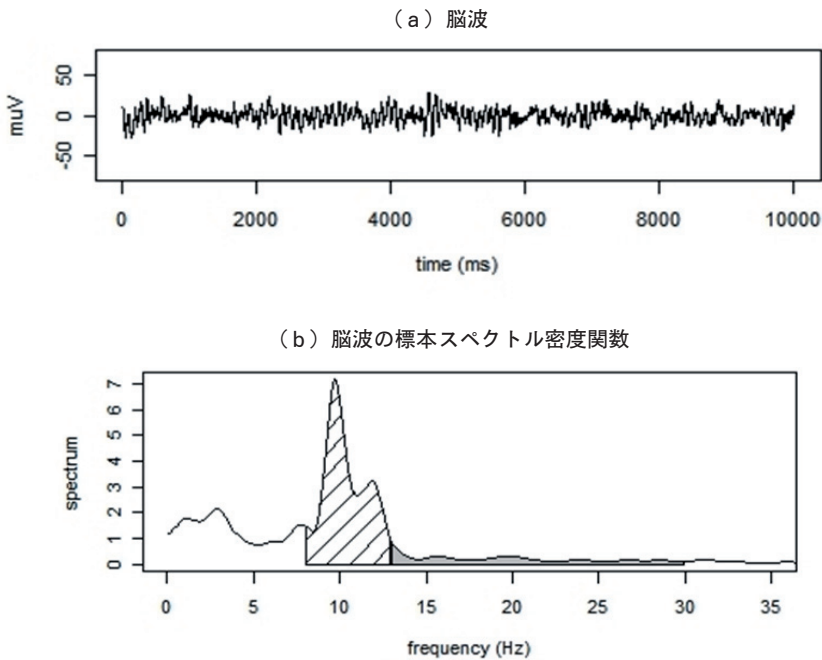


図2 脳波と脳波の標本スペクトル密度関数

次に、平滑化されたピリオドグラムを使って脳波の分散のうち $\alpha$ 波の周波数帯域によって説明される部分( $\alpha$ 波成分)(図2の斜線部分の面積の2倍)と $\beta$ 波の周波数帯域によって説明される部分( $\beta$ 波成分)(図2の灰色の部分の面積の2倍)を求めて $\alpha$ 波成分の $\beta$ 波成分に対する比率( $\alpha$ - $\beta$ 比)を計算した。最後に3つの区間の $\alpha$ - $\beta$ 比の平均を求めた。

Fz と Cz におけるデータはアーチファクトをチェックするための補助的なものであることから、ここでは Pz におけるデータの分析結果のみを報告する。なお、Fz と Cz におけるデータの分析結果からはアーチファクトによる大きな問題は確認されなかった。

表 1 に美人投票ゲームと対照実験の各回における  $\alpha$ - $\beta$  比を示す。また、図 3 は表 1 の  $\alpha$ - $\beta$  比の 9 回にわたる平均とその標準誤差を示している。それによると、被験者 1、被験者 2、被験者 4 については美人投票ゲームにおける  $\alpha$ - $\beta$  比の平均が対照実験よりも大きくなっている。1 標本  $t$  検定によるとこの差はいずれも有意である ( $p < 0.01$ )。また、被験者 3 の  $\alpha$ - $\beta$  比の平均の差は有意ではない ( $p = 0.646$ )。なお、Wilcoxon の符号付順位和検定によっても同様の結果が得られた。したがって、被験者 1、被験者 2、被験者 4 はゲーム理論的な思考で必要となる計算よりも負荷がかからない方法で美人投票ゲームの回答をしていたことになり、ヒューリスティックな思考をしていたことが明らかになった。

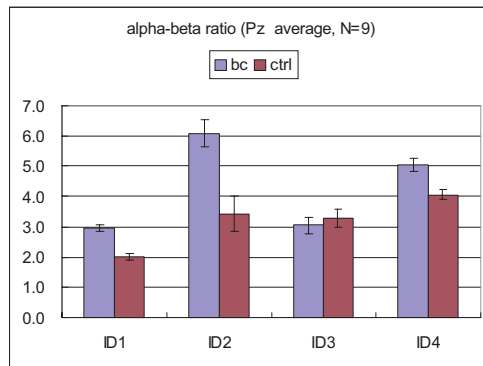


図 3  $\alpha$ - $\beta$  比の平均と標準誤差

表 1  $\alpha$ - $\beta$  比

round	ID 1		ID 2		ID 3		ID 4	
	bc	ctrl	bc	ctrl	bc	ctrl	bc	ctrl
1	3.609	2.263	8.714	7.277	3.826	3.544	5.063	3.495
2	2.806	1.984	7.259	4.399	3.185	3.543	5.635	4.240
3	2.676	2.062	4.419	2.960	4.022	3.863	4.128	4.604
4	2.866	1.480	6.274	4.526	3.325	3.422	4.920	4.904
5	2.961	2.728	5.260	2.538	2.176	3.352	4.735	3.703
6	3.299	2.009	5.810	2.402	3.245	2.367	5.839	4.237
7	2.926	2.016	5.229	2.934	3.650	2.355	4.546	3.624
8	2.858	1.785	6.807	2.131	1.348	4.820	4.588	3.941
9	2.638	1.786	4.815	1.672	2.679	2.211	5.953	3.772

次に、ヒューリスティックな思考をしていた被験者の回答の特徴を見てみよう。図 4 は美人投票ゲームの回答値と正解の推移を比較したものである。ヒューリスティックな思考をしていた被験者 1 と被験者 4 は初回こそ正解とは大きく異なる回答をしているが、次第に正解に近い回答をしていることがわかる。また、ヒューリスティックな思考をしていた

被験者2の回答と、被験者3の回答に大きな差が見られない。したがって、この方法によれば回答が似ている場合でもヒューリスティックな思考をする被験者を判別できることがわかる。

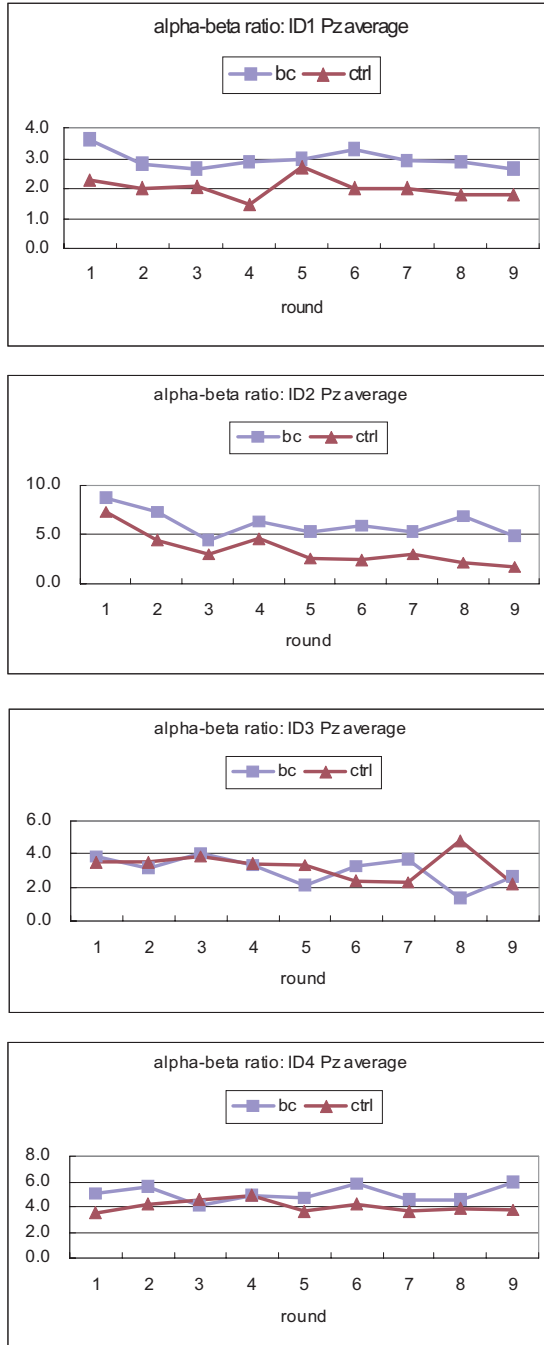


図4 美人投票ゲームの回答値と正解

正解を当てた回数は被験者1が1回、被験者2が0回、被験者3が0回、被験者4が1回となっている。25人による事前の美人投票ゲームでは0回が13人（52%）、1回が10人（40%）、2回が2人（8%）という結果になっている。したがって、ヒューリスティックな思考の被験者1と被験者4の正答率は良好であるといえよう。

表2 美人投票ゲームの正答数

ID1*	ID2*	ID3	ID4*
1	0	0	1

表3 事前の25人の正答数の分布

	0回	1回	2回
人数	13	10	2
%	52.0	40.0	8.0

一方、対照実験において正解を当てた回数は被験者1が9回のうち8回、被験者2が1回、被験者3が6回、被験者4が1回であった。したがって、被験者1はゲーム理論的な思考に必要な計算能力を持っているにもかかわらず、美人投票ゲームにおいてヒューリスティックな思考をしていたことになる。

表4 計算課題の正答数

ID1*	ID2*	ID3	ID4*
8	1	6	1

#### 4. おわりに

伝統的な経済学では経済行動から思考過程を間接的に推察するしかなかったが、脳波測定という神経科学の手法を取り入れることによって思考過程を直接分析することが可能になった。この手法で美人投票ゲームを分析した結果、被験者がヒューリスティックな思考をしているかどうかを判別できることが明らかになった。今回の実験では資金面での制約により被験者は4名であったが、今後は被験者数を増やすことによって、美人投票ゲームにおいてどの程度の者がヒューリスティックな思考をするのか、ヒューリスティックな思考をする者とゲーム理論的な思考をする者との間で正答率に差があるかどうか、などの問題を分析することにした。

今回の実験によりヒューリスティックな思考をする者が存在することを確認できたが、彼らがどのように情報を処理して回答を導いているのかは不明である。Coricelli and Nagel (2009) はfMRIを使った分析によって、低次の推論をするとき賦活する脳の部位は高次の推論をするときに賦活する部位が異なることを明らかにしている。fMRIを使った分析の結



果が、脳波を使う我々の判別方法とどのように対応するかを調べることができればヒューリスティックな思考メカニズムの解明の手がかりが得られるかもしれない。また、Matsuba, Sato, and Kura (2008) はホルモンのひとつであるテストステロンの濃度と美人投票ゲームの回答値の間に相関関係があることを報告していることから、ホルモンがヒューリスティックな思考に何らかの影響を与えている可能性も考えられる。仮にそうであるとすれば、現実には観察されながらも経済学では説明できていない経済行動の解明につながる事が期待される。

## 参 考 文 献

- Bloomfield, Peter. *Fourier analysis of time series: An introduction, second edition*. New York, New York: John Wiley & Sons, 2000.
- Camerer, Colin; Loewenstein, George and Prelec, Drazen. "Neuroeconomics: How Neuroscience Can Inform Economics." *Journal of Economic Literature*, 2005, 43(1), pp. 9-64.
- Coates, J. M. and Herbert. "Endogenous Steroids and Financial Risk Taking on a London Trading Floor." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(16), pp. 6167-6172.
- Coricelli, Giorgio, and Nagel, Rosemarie. "Neural Correlations of Depth of Strategic Reasoning in Medial Prefrontal Cortex." *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(23), pp. 9163-9168.
- Hamilton, James D. *Time series analysis*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1994.
- Ho, Teck-Hua; Camerer, Colin and Weigelt, Keith. "Iterated Dominance and Iterated Best Response in Experimental  $p$ -Beauty Contests." *American Economic Review*, 1998, 88(4), pp. 947-969.
- Keynes, John Maynard. *The general theory of interest, employment and money*. London: Macmillan, 1936.
- Luck, Steven J. *An introduction to the event-related potential technique*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press, 2005.
- Matsuba, Takafumi, Sato, Jun, and Kura, Kenya. "Do female testosterone levels have influences on the distrust game, the beauty contest game, and risk-aversion?" *Economics and Information Studies, Working Paper No.41*, 2008, Gifu Shotoku Gakuen University.
- Nagel, Rosemarie. "Unraveling in Guessing Games: An Experimental Study." *American Economic Review*, 1995, 85(5), pp. 1313-1326.

- Pizzagalli, Diego A. "Electroencephalography and High-Density Electrophysiological Source Localization," in Cacioppo, John T., Tassinari, Louis G., and Berntson, Gary G., eds., *Handbook of psychophysiology*. New York, NY: Cambridge University Press, 2007.
- R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2008. URL <http://www.R-project.org>.
- Stahl, Dale O. "Boundedly Rational Rule Learning in a Guessing Game." *Games and Economic Behavior*, 1996, 16(2), pp. 303-330.
- Zak, Paul J.; Borja, Karla; Matzner, William T. and Kurzban, Robert. "The Neuroeconomics of Distrust: Sex Differences in Behavior and Physiology." *American Economic Review*, 2005, 95(2), pp. 360-363.
- 大熊輝雄・松岡洋夫・上埜高志 『脳波判読 step by step 「入門編」第4版』 医学書院 2006年
- 岡田保紀 『人間工学分野における脳波測定』 メディカルシステム研究所 2008年
- 松葉敬文・佐藤 淳・蔵 研也 「美人投票ゲームにおける推論レベルの分析」 *Review of Economics and Information Studies*, 2008, 8(3&4), pp. 65-77, 岐阜聖徳学園大学