

# 選択行動と不快画像刺激による扁桃体賦活 ～リスク及び不確実な状況下における脳機能画像解析

松葉敬文<sup>a</sup>, 佐藤 淳<sup>b</sup>, 蔵 研也<sup>c</sup>, 加藤大輔<sup>d</sup>, 村上 弘<sup>e</sup>

## 要旨

健康な右利きの歯科医師 21 名に対し、リスク(risk)状況および不確実(ambiguity, または uncertainty)状況において不快画像刺激と中立的画像刺激を呈示し、3T の fMRI 装置を用いて脳機能画像解析を行った。fMRI 装置内で被験者が行う課題には Balloon Analogue Risk Task (BART) 課題を利用した。被験者が直面している課題の確率を事前に告知している状況をリスク状況、確率を全く告知していない状況を不確実状況とした。結果、不快画像刺激により不確実な状況では扁桃体と線条体(被殻)が有意に賦活し、リスク状況では前帯状皮質の活動が有意であったが扁桃体の賦活は確認されなかった。この結果は、リスク状況では不確実状況と異なり、扁桃体の活動を抑制するような機能が働く可能性を示唆するものである。

JEL classification number: D01, D03, D87

キーワード: リスク, 不確実性, 扁桃体, テストステロン

## 1. 背景

行動科学では経験的に、確率が不明である不確実(ambiguity)な状況での選択は、確率が判明している状況(リスク状況)と比べ避けられる傾向にあることが知られている。これは期待効用理論におけるエルズバークのパラドックス(Ellsberg paradox)として知られている。このパラドックスに対し神経科学的なアプローチを試みた Hsu *et al.*(2005)は、確率が不明な不確実(ambiguity)な状況で選択に直面している経済主体は眼窩前頭野(OFC)と扁桃体が活動するのに対し、リスク状況に直面している経済主体は線条体が賦活することを明らかにし、経済主体は扁桃体が賦活する不確実な状況を嫌い、リスク状況をより選好すると指摘した。

また、リスク選択に直面した経済主体に対する神経科学的なアプローチとしては、アンドロゲン(男性ホルモン)の一種であるテストステロンを利用した分析も良く知られている。van Honk *et al.*(2004)や Sapienza *et al.*(2009) はテストステロンをリスク選択に相関している物質として報告しており、Zak *et al.* (2005, 2010)は

---

a 岐阜聖徳学園大学経済情報学部 tmatsuba@gifu.shotoku.ac.jp;

b 岐阜聖徳学園大学経済情報学部 jsato@gifu.shotoku.ac.jp

c 岐阜聖徳学園大学経済情報学部 kkura@gifu.shotoku.ac.jp

d 愛知学院大学歯学部 daidai@dpc.agu.ac.jp

e 愛知学院大学歯学部 hiroshi@dpc.aichi-gakuin.ac.jp

ゲーム状況における攻撃的行動と関係する物質あることを示している。また Coates and Herbert (2008)は、現実の経済主体であるロンドンシティのトレーダーがテストステロンの影響を受けていると報告している。その一方で、Zethraeus *et al.* (2009)は、経済主体のリスク選択においてテストステロンの影響を全く確認できなかったという報告をしている。神経科学の分野では Mazur and Booth (1998) などによりテストステロンは競争心を励起する物質として報告がされているが、生理化学物質(ホルモン物質)であるテストステロンがどのような機序により行動の変容を導くのか、というテストステロンの機序については未知の点が多い。

こうした状況の中、Ryan and Breedlove (2010)は、扁桃体のバソプレシン作動性ニューロンに対してテストステロンが作用し、その結果として行動に変容が生じるという可能性を指摘した。テストステロンが扁桃体に対し作用するのであれば、高濃度のテストステロンが扁桃体をより強く賦活させる結果として、選択行動を変容させる可能性が考えられる。テストステロンの濃度変化が脳機能に与える影響を調べるためには、本来ならばテストステロンの濃度を人為的に制御し、濃度差のある被験者集団において実験を行うことが望ましい。しかし被験者のアンドロゲン受容体の個人差等によりテストステロン濃度が扁桃体の活動に及ぼす影響が異なる可能性もあり、テストステロン濃度の制御が脳機能の観察に必ずしも適していないことも考えられる。よってまず、リスク状況と不確実状況において扁桃体が賦活された際、どのような脳活動の変化が生じるのかについて、確認することが必要であろう。

心理学の分野ではShah *et al.* (2009)などにより、不快画像刺激による情動の変化によって扁桃体が強く賦活することが広く知られている。そこで今回の実験では、1)リスク下における経済的選択行動(選択肢の発生確率が判明している状況下における金銭を伴う選択)、2)不確実性下における経済的選択行動(選択肢の発生確率が不明な状況下における金銭を伴う選択)、のそれぞれにおいて不快画像を呈示し、扁桃体の賦活を試みた際の影響について調査した<sup>1</sup>。不確実な状況を経済主体が回避する理由が扁桃体の賦活に求められるのであれば、扁桃体を強く賦活させることにより行動に変化が生じる可能性がある。またテストステロンが扁桃体の活動を通じて行動に影響を及ぼすのであれば、高濃度のテストステロンが脳活動に与える影響を、扁桃体を賦活させる刺激をもって擬似的に代替できる可能性があり、物質が行動に及ぼす影響を再現できる可能性がある。

## 2. 実験方法

3TのfMRI装置<sup>2</sup>を用いて脳機能の測定を行った。装置内において被験者が行う作業(タスク)として、リスク状況を表すタスク(TR)と不確実状況を表すタスク(TA)を被験者に行ってもらい、それぞれのタスクに対し、不快画像刺激(PS)、中立的画像刺激(NS)を被験者に呈示した。従って被験者が行ったタスクは、それぞれの組合せにより合計で四種である。1タスクあたりの所要時間は10分程度であり、装置の調整時間等を含めるfMRI装置中における被験者の拘束時間は約50分であった。実験に参加する被験者として歯学部付属病院に勤務

<sup>1</sup> 今回の実験の実施にあたっては、国際電気通信基礎技術研究所・株式会社 ATR-Promotions による「fMRI・MEG 研究安全/倫理審査」(10-38, 11-019)および「岐阜聖徳学園大学臨床研究倫理審査(平成22年度岐阜大第210号, 平成23年度岐阜大第76号)」の二つの審査を受け、それぞれから実験許可を得ている。

<sup>2</sup> 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

する歯科医師の中から<sup>3</sup>健康に問題のない右利きの男性を募集し、25～29歳(平均27.24歳、標準偏差1.26)の21名の参加を得た<sup>4</sup>。

## 2. 1. 被験者が行うタスク

Balloon Analogue Risk Task (BART)をfMRI装置内で被験者が行うタスクとして利用した。このタスク(BART)は、「送風機により風船を膨らますタスク」をディスプレイ上で再現するものであり、被験者がfMRI装置内で所定のボタンを押すことにより送風が行われ、呈示されている風船が一定の大きさだけ膨らんでいく。風船が破裂する、あるいは被験者が送風を停止するまでを1試行とし、被験者はタスクで定められた規定の試行回数もしくは規定時間に達するまで試行を繰り返す。被験者は1回の試行において何回でも送風できる(ボタンを押す)ことができ、一度の送風につき5円を賞金として獲得できる。ただし、事前に定められた送風回数に達すると風船が破裂し、破裂した場合は賞金がゼロとなる。タスクにおける被験者の目的は、風船が破裂する直前まで送風を繰り返し、獲得賞金を最大にすることである。

タスク中の各試行において、風船が破裂する規定の送風回数が10回以内に設定されていることを被験者が事前に知っている状況で行われるBARTを、リスク状況下のタスク(TR)とした。TRにおいて、各試行の最初に呈示される風船のサイズ(初期状態)はランダムに設定されている<sup>5</sup>。TRはタスク開始より600秒を経過するか、180試行が行われるかをもって1タスクとした。一方、風船が破裂するように設定された規定の送風数を被験者が知らない状況下のBARTを、不確実状況下のタスク(TA)とした。ただし、最初に呈示される風船サイズは全試行で同一サイズである。すなわち、初期状態では同じサイズの風船であるが、設定された破裂点が異なっている風船を膨らますタスクがTAである。TAは600秒を経過するか、30試行をもって1タスクとした。

## 2. 2. 不快画像刺激

被験者に対し各タスクにおける試行の直前に、TRにおいては6試行につき1枚、TAでは1試行につき1枚<sup>6</sup>の画像を0.5秒間呈示した。呈示する不快画像としてフロリダ大学<sup>7</sup>が提供している不快画像群を利用した。また、不快画像として呈示した画像を2～8pixel単位で分割し、ランダムに再配列したモザイク画像(NS)を中立的画像刺激として用いた<sup>8</sup>。被験者に呈示するTRとTA、PSとNSの組合せ順序はランダムとした。

## 3. 結果

被験者21名分の画像データを変量効果モデル(rfx)で解析した(自由度=20)。不確実な状況(TA)では不

---

<sup>3</sup> fMRI装置内での拘束が比較的長時間に及び、かつ不快画像を呈示するため、基礎医学教育を受け実験に十分に理解ある人物を募集することを目的とした。

<sup>4</sup> 2011年3月に9名、2011年8月に12名。

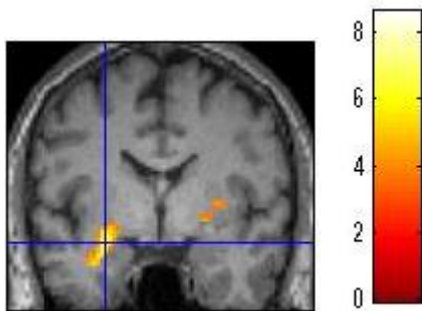
<sup>5</sup> 膨張時の風船から生じる圧迫感により、送風回数が影響を受ける可能性を排除するため、多様なサイズの風船を呈示した。被験者が直面しているタスクは、10回以内に破裂するように設定された多様なサイズの風船を、できる限り膨らますものとなっている。

<sup>6</sup> 画像呈示後の試行間隔をおおよそで同一間隔に統制することを目的とする。

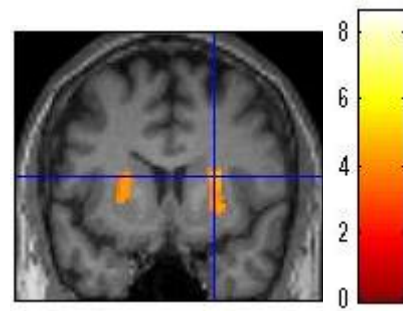
<sup>7</sup> フロリダ大学精神生理学研究センター(The Center for Research in Psychophysiology, University of Florida)。不快画像群は、情動に対する効果が確認されている画像群であり、学術的に限定され使用が許可されているものである。

<sup>8</sup> 中立的画像刺激による被験者への投射エネルギー量を、呈示した不快画像と同水準に統制することを目的とする。

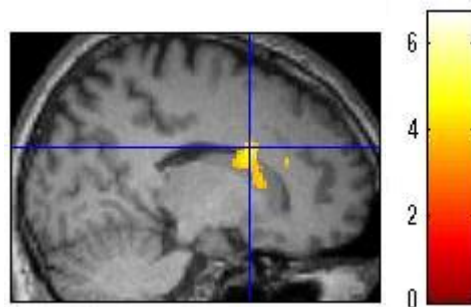
快画像刺激により, 左扁桃体と左右の被殻(線条体の一部)<sup>9</sup>が有意(左扁桃体・左右の被殻において uncorrected- $p < 0.001$ , corrected- $p < 0.001$ , クラスター- $k \geq 300$ )に賦活した(図1, 図2). 一方, リスク状況下(TR)では不快画像刺激による扁桃体の賦活を確認できなかったが, 腹側および背側の前帯状皮質<sup>10</sup>が有意(uncorrected- $p < 0.001$ , corrected- $p < 0.001$ , クラスター- $k \geq 100$ )に賦活していた(図3).



「図1 不確実性下(TA)で賦活した左扁桃体(y=-2)」



「図2 不確実性下(TA)で賦活した被殻(y=10)」



「図3 リスク下(TR)で賦活した前帯状皮質(x=16)」

#### 4. 議論と結語

リスク状況では不快画像の呈示により前帯状皮質が賦活したが, 扁桃体の賦活を確認できなかった. 前帯状皮質は, 扁桃体と密接な連絡が取られている部位であり, 扁桃体の活動をコントロールしていると考えられている. 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する機能がリスク状況では働いていると考えられる. 一方, 不確実状況では不快画像の呈示により, 左扁桃体と被殻が賦活した. 被殻が賦活する理由は不明だが, 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)という可能性が考えられる<sup>11</sup>. 以上により, 扁桃体を抑制する機能がリスク状況と不確実状況によって異なることが, エルズバーク・パラドックスの原因である可能性が示唆される.

<sup>9</sup> MNI 座標において(-28,-2,-16)を含むクラスターを扁桃体と左被殻, (24,10,12)を含むクラスターを右被殻とした.

<sup>10</sup> MNI 座標において(16,10,28), (18,30,22)を含むクラスターを前帯状皮質(ブロードマンエリア 24 と 32)とした.

<sup>11</sup> 従って, 生理化学物質が扁桃体に作用する結果として選択行動の変容を生じさせるのであれば, リスク状況においては行動の変容が生じにくい(あるいは生じない)という可能性が示唆される.

## 引用文献

- Camerer, Colin. 2003, *Behavioral game theory: Experiments on strategic interaction*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Camerer, Colin., T-H.Ho and J-K.Chong, 2002, “Sophisticated Experience-Weighted Attraction Learning and Strategic Teaching in Repeated Games”, *Journal of Economic Theory*, Vol.104(1), pp. 137-188.
- Coates, J.M. and J.Herbert, 2008, “Endogenous steroids and financial risk taking on a London trading floor”, *Proceedings of National Academy of Science*, Vol.105(16), pp. 6167-6172.
- Eisenegger, C., M.Naef, R.Snozzi, M.Heinrichs, E.Fehr, 2010, “Prejudice and truth about the effect of testosterone on human bargaining behaviour”, *Nature*, Vol.463(7279), pp.356-9.
- Gianotti, L.R.R., D.Knoch, P.L.Faber, D.Lehmann, R.D.Pascual-Marqui, C.Diezi, C.Schoch, C.Eisenegger and E. Fehr, 2009, “Tonic Activity Level in the Right Prefrontal Cortex Predicts Individuals’ Risk Taking”, *PSYCHOLOGICAL SCIENCE*, Vol.20(1), pp.33-38.
- Ho, Teck-Hua., C.Camerer and J-K.Chong, 2007, “Self-Tuning Experience Weighted Attraction Learning in Games”, *Journal of Economic Theory*, Vol.133(1), pp. 177-198.
- Hsu, Ming., M.Bhatt, R.Adolphs, D. Tranel, C.F.Camerer, 2005, “Neural Systems Responding to Degrees of Uncertainty in Human Decision-Making”, *SCIENCE.*, Vol.310, pp.1680-1683.
- Gianotti, L.R.R., D.Knoch, P.L.Faber, D.Lehmann, R.D.Pascual-Marqui, C.Diezi, C.Schoch, C.Eisenegger and E.Fehr, 2009, “Tonic Activity Level in the Right Prefrontal Cortex Predicts Individuals’ Risk Taking”, *Association for Psychological Science*, Vol.20(1), pp.33-38.
- Mazur, Allan and A.Booth, 1998, “Testosterone and dominance in men”, *The Behavioral and brain sciences*, Vol.21(3), pp.353-63, (discussion pp363-97).
- Ryan, T.Johnson and S.M.Breedlove1, 2010, “Human trust: Testosterone raises suspicion”, *Proceedings of National Academy of Science*, Vol.107(25), pp.11149–11150.
- Sapienza, P., L.Zingales, D.Maestriperieri, 2009, “Gender differences in financial risk aversion and career choices are affected by testosterone”, *Proceedings of National Academy of Science*, Vol.106(36), pp.15268-15273.
- Shah , S.G., H.Klumpp, M.Angstadt, P.J.Nathan and K.L.Phan, 2009, “Amygdala and insula response to emotional images in patients with generalized social anxiety disorder”, *J Psychiatry Neurosci*, Vol.34(4), pp.296-302.
- van Honk, J., D.J.Shutter, E.J.Hermans, P.Putman, A.Tuiten and H.Koppeschaar, 2004, “Testosterone shifts the balance between sensitivity for punishment and reward in healthy young women”, *Psychoneuroendocrinology*, Vol.29, pp.937-943.

- Zak, P. J., K.Borja, W.T.Matzner and R.Kurzban, 2005, “The Neuroeconomics of Distrust: Sex Differences in Behavior and Physiology”, *American Economic Review*, Vol.95, 360-365.
- Zak, P. J., R.Kurzban, S.Ahmadi, R.S.Swerdlhoff, J.Park, L.Efremidze, K.Redwine, K.Morgan and W.Matzner, 2010, “Testosterone administration decreases generosity in the ultimatum game”, *PLoS ONE* Vol.4(12)
- Zethraeus, N., L. Kocoska-Marasb, T. Ellingsena, B. von Schoultzb, A. L. Hirschbergb, and M. Johannesso, 2009, “A randomized trial of the effect of estrogen and testosterone on economic behavior”, *Proceedings of National Academy of Science* Vol.106(16), pp.6535-6538.
- カールソン, N.R., 中村克樹(訳), 泰羅雅登(訳), 2007年, 『神経科学テキスト 脳と行動 (第二版)』, 丸善
- 蔵研也・松葉敬文・佐藤淳, 2008年, 「体内化学物質に関する覚書」, 岐阜聖徳学園大学紀要, Vol.9., No.1&2
- ジョン・ピネル, 佐藤敬(訳), 泉井亮(訳), 若林孝一(訳), 飛鳥井望(訳), 2005年, 『ピネル バイオサイコロジー 脳一心と行動の神経科学』, 西村書店
- 松葉敬文・佐藤淳・蔵研也・青木貴子・村上弘, 「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年プロシーディングス
- 松葉敬文・佐藤淳・蔵研也・青木貴子・村上弘・加藤大輔, 2011年, 「経口ブドウ糖負荷試験によるテストステロン濃度の変化と美人投票ゲーム」, 岐阜聖徳学園大学紀要 Vol.11, No.1&2