

ヒトの協力行動における前頭前野の機能を解明 ～相手の期待と自身の行動の差(罪悪感)をシミュレート～

【ポイント】

- 前頭前野が、相手の期待を裏切る程度である“罪悪感”を実現していることを証明
- ヒトの協力行動において、新旧の脳領域が“罪悪感”と“不平等”という異なる機能を担う
- ヒトの社会の進化メカニズムや社会認知と深く関係する発達や精神疾患の理解に貢献

独立行政法人 情報通信研究機構(NICT、理事長: 坂内 正夫)脳情報通信融合研究センター(CiNet)の春野雅彦主任研究員らは、従来、ヒトの協力行動において、自分の取り分を増やそうとする脳の活動を抑制するとされてきた前頭前野^{*1}が、相手の期待を裏切る程度である“罪悪感”^{*2}を表現するということを、機能的MRI(fMRI)実験と経頭蓋直流電流刺激^{*3}により証明しました。一方で、進化的に古い脳である扁桃体^{*4}では、相手と自分の取り分の差の大きさである“不平等”^{*5}が表現されていました。

今回、進化的に異なるこれらの脳部位が協力行動における異なる機能を担うことが明らかになったことで、ヒトの社会が高度に発達してきた過程の解明や、社会認知と関係する発達・精神疾患の類型化が進むことが期待されます。

本研究は、岐阜聖徳学園大学の二本杉剛准教授との共同研究であり、一部は、JST 戦略的創造研究推進事業 個人型研究(さがけ)の研究領域「脳情報の解読と制御」の一環として行われました。

本成果は、米国科学雑誌「*The Journal of Neuroscience*」の 2 月 25 日号に掲載されます。

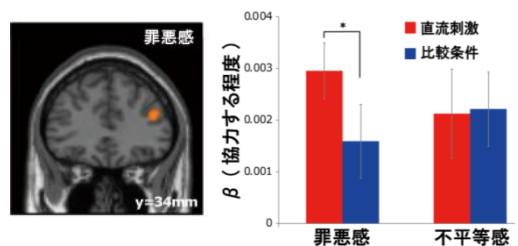
【背景】

ヒトはなぜ協力するのか? 多くの研究者が、社会的な生き物であるヒトにとって根源的なこの問題に取り組んできました。近年まで、「自分の取り分を増やしたいと活動する古い脳(皮質下)の働きを、理性的な新しい脳(前頭前野)が抑制して協力が生じる」とする説が有力でした。2010 年に春野主任研究員らは、皮質下に位置し、情動を司る扁桃体が“不平等”に対し反応し、その活動が協力行動の個人差を良く説明すると報告^{*6}しました。この結果は、従来説が必ずしも正しくないことを示します。一方、前頭前野が協力行動に関わるという多くの報告もあり、その機能は謎のままでした。今回、近年の経済学で“不平等”とともに、その重要性が指摘される“罪悪感”に着目し実験を行いました。

【今回の成果】

今回の実験結果より、大脳皮質の高次認知機能の中核である前頭前野の活動が“罪悪感”を表現し、皮質下の原始的な領域である扁桃体の活動は“不平等”を表現することを証明しました。また、これらの表現が、ある程度独立していることもわかりました。

つまり、進化的に異なる新旧の脳領域がヒトの協力行動において異なる機能を担うことを意味しています。“罪悪感”は、他者や社会の期待と、自分の仮定の行動で生じる結果との差であり、相手の意図に基づく将来に対する動的なシミュレーション能力です。その表現が高次認知機能の中核である前頭前野に存在する一方、他者との相対的な結果を示す“不平等”に対する表現は、原始的な脳である皮質下の扁桃体と側坐核に見られました(実験内容とデータ解析は補足資料参照)。



脳活動解析と電流刺激の結果 (詳細は補足資料)

【今後の展望】

ヒトの協力行動における新旧の脳の異なる機能を示し、数年前には常識とされた「利己的な皮質下領域を前頭皮質が抑制することで協力行動が生じる」という 1 次元図式は正しくなく、2 次元の脳内表現を考える必要性を示唆します。今回の知見は、ヒトに固有な大規模な社会やコミュニケーション能力が進化したメカニズムの理解や社会認知と深く関係する発達や精神疾患の類型化に貢献することが期待されます。

< 本件に関する 問い合わせ先 >

NICT 脳情報通信融合研究センター
春野 雅彦
Tel: 080-9098-3239
E-mail: mharuno@nict.go.jp

< 広報 >

NICT 広報部 報道担当
廣田 幸子
Tel: 042-327-6923、Fax: 042-327-7587
E-mail: publicity@nict.go.jp

<掲載論文>

掲 載 誌: *The Journal of Neuroscience*

U R L: <http://www.jneurosci.org/>

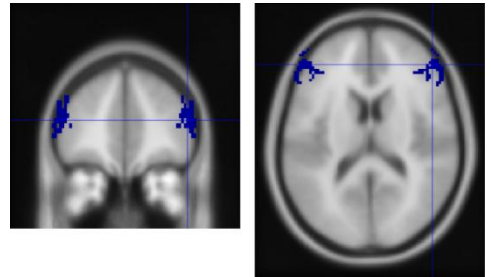
掲載論文名: Selective Increase of Intention-based Economic Decisions by Noninvasive Brain Stimulation to the Dorsolateral Prefrontal Cortex.

著 者 名: Tsuyoshi Nihonsugi, Aya Ihara, Masahiko Haruno

<用語解説>

*1 前頭前野(背外側前頭前野)

前頭前野(背外側前頭前野)は、ヒトで発達した高次の認知中枢。前頭前野は、思考や創造性を担う脳の最高中枢であると考えられている。ヒトで最もよく発達した脳部位(右図の青い部分)であるとともに、個体発生的には最も遅く成熟する脳部位である。また、老化に伴って、早く機能低下が起こることも知られている。この脳部位は、ワーキングメモリー、反応抑制、行動の切替え、プランニング、推論などを担うことが多くの先行研究で確認されており、協力行動など社会的行動への関与も報告されている。しかし、協力行動における機能は知られていなかった。

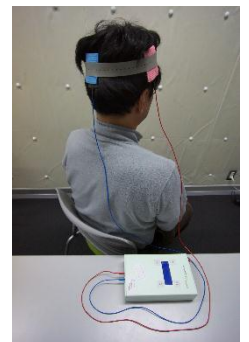


*2 罪悪感と罪悪感回避 (Guilt aversion)

“罪悪感”(Guilt)は、G. Charness と M. Dufwenberg により 2006 年に経済学の分野で提案された概念であり、自分の行動が相手をがっかりさせる程度を示す。具体的には、相手の期待(期待確率と協力時の取り分のかけ算: 補足資料の例では 0.8×800 円)と自分の行動から生じる結果(補足資料の例では 200 円)の差で定義される。“罪悪感”を減らす行動を選ぶことは、罪悪感の回避 (Guilt aversion) と呼ばれる。“罪悪感”は、自分の行動に対する相手や社会の反応を先読みする能力であり、ヒトに固有の巨大な社会の形成やコミュニケーション能力の進化に大きな意味を持ってきたと考えられている。

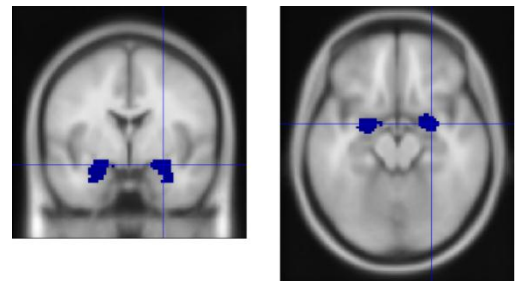
*3 経頭蓋直流電流刺激

経頭蓋直流電流刺激(transcranial direct current stimulation)は、頭皮の表面にプラスとマイナスの電極(数センチ角)を貼り、乾電池とほぼ同程度の 1-2 ミリアンペアという弱い電流を流すことにより脳活動を変化させる技術。現在、脳卒中のリハビリや精神疾患の治療への応用が試みられている。直流電流は、ニューロンの膜内外の電位差を変化させると考えられ、脳部位にプラス極を置き通電状態にすることで、周辺のニューロンの膜電位がプラス方向に変化して、発火(活動)しやすくなると考えられている。経頭蓋直流電流刺激は、最初の数 10 秒程度軽い痒みのような感覚を感じることがあるが、以降その感覚は減少する。このことから、比較条件では、課題開始の 5 分前から 4 分 30 秒前の 30 秒間だけ刺激を行った。



*4 扁桃体

扁桃体は、多くの動物と共通する原始的な脳の領域で、情動反応の処理と記憶において主要な役割を持つことが知られ、顔の表情の理解、恐怖条件付けなど、素早い状況判断に関係する(アーモンド状の青い部分)。扁桃体の不平等に対する脳活動が協力行動の個人差と相関することが、春野主任研究員により 2010 年に初めて報告され (Haruno, Frith, *Nature Neuroscience*, 2010)、以降そのことを支持するデータが発表されている。



*5 不平等と不平等回避 (Inequity aversion)

自分と相手の報酬の差である“不平等”は、社会行動における重要な要因として長年研究されてきた。本研究では、自分と相手の取り分の差の絶対値で“不平等”を定義している。“不平等”(Inequity)を減らす行動を選ぶことを不平等回避 (Inequity aversion) と呼ぶ。

*6 2010 年の春野主任研究員らの報告

Haruno, Frith, *Nature Neuroscience* 13 160-161, 2010

【実験の内容と結果】

-信頼ゲーム-

41 名の被験者に新たに考案した信頼ゲームに取り組んでもらい、この時の脳血流量を fMRI 装置で観測しました。信頼ゲームは、2 名のプレイヤー A、B がペアとなって行います。まず、プレイヤー A がゲームへの参加・不参加かを決定し、次に、プレイヤー B が協力するかどうかを決めます。プレイヤー A、B は、選択肢に応じて異なるお金を受け取ります。なお、参加を選ぶプレイヤー A には、プレイヤー B が協力するかどうかの期待確率も答えてもらいます(0-100%の間で 10%刻み)。つまり、プレイヤー B は、協力する場合としない場合の A、B の配分額と、A による期待確率を知った上で行動を決めます(図 1 参照)。

本研究では、被験者に期間を置いて、A、B 両方の役割をやってもらいました。まずは、プレイヤー A として 1 度だけ参加・不参加を選択してもらった数日(平均 8 日)後、今度は、fMRI 装置の中でプレイヤー B として協力・非協力の選択ボタンを押すことを、毎回異なるプレイヤー A を相手に 45 回行ってもらい、このときの脳血流量の変化を計測しました。

信頼ゲームでは、A の配分額を、B が協力する時が最も多く、次に、A が参加しない時、B が協力しない時の順になるよう設定しました。一方、B の配分額を、協力しない時が最も多く、次に、協力する時、A が参加しない時の順になるよう設定しました。A が参加を選択する場合、B に協力について信頼を寄せることとなります。また、B は、非協力を選択する時、信頼を裏切り、高い配分を受けるので“罪悪感”を感じます。これらの配分額を試行ごとにばらばらに設定することで、プレイヤー B が感じる“不平等”と“罪悪感”の程度を操作することができます。

例えば、ある回においては、A が参加しない場合のプレイヤー A、B の取り分をそれぞれ 300 円、500 円とし、B 協力時は 800 円、650 円、非協力時は 200 円、910 円と設定しました。このとき、プレイヤー B が感じる“不平等”は、A、B の取り分の差の絶対値から算出でき、協力する時 150 円分、しない時 710 円分になると考えられます。一方、プレイヤー A が B に対して 80%を期待した時、B 協力時の A が期待する取り分は 800 円の 80%すなわち 640 円分で、B 非協力時に B が感じる“罪悪感”は、A の期待(640 円分)から非協力時の A の取り分 200 円を引いた 440 円分になると考えられます。

図 2 は、45 回の各試行で、“自分の報酬”、“罪悪感”、“不平等”について協力の場合から非協力の場合を引いた値を横軸に、その試行で協力を選んだプレイヤー B の割合を縦軸に示します。“罪悪感”が“不平等”とともに協力行動を変化させています。

次に、協力か非協力かの決定前後のプレイヤー B の fMRI データを解析し、脳の中で“罪悪感”、“不平等”と同じように活動が変動する部位を探しました。解析の結果、右前頭前野の活動(図 3 左参照)が“罪悪感”と、扁桃体と側坐核の活動(図 4 参照)が“不平等”と連動して変化しました。これらの結果は、行動決定における前頭前野の機能が“罪悪感”の計算であることを示唆するとともに、扁桃体に関するこれまでの研究結果と一致しています。

さらにもう一步、前頭前野の脳活動と“罪悪感”に基づく協力行動の因果関係を検証するために、22 名の別の被験者に対し、前頭前野への経頭蓋直流電流刺激を行いながら信頼ゲームを行ってもらいました。電流刺激を行う直流刺激条件と電流刺激を行わない比較条件で、“罪悪感”、“不平等”のそれぞれが協力行動に及ぼす影響を比べたところ、電流刺激によって“罪悪感”に基づく協力行動が増加するのに対し、“不平等”に基づく協力行動は変化しませんでした(図 3 右参照)。

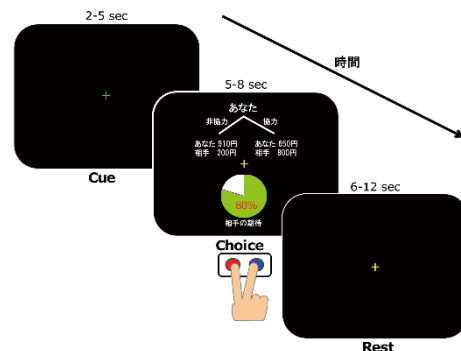


図 1 信頼ゲームでプレイヤーが見る画面

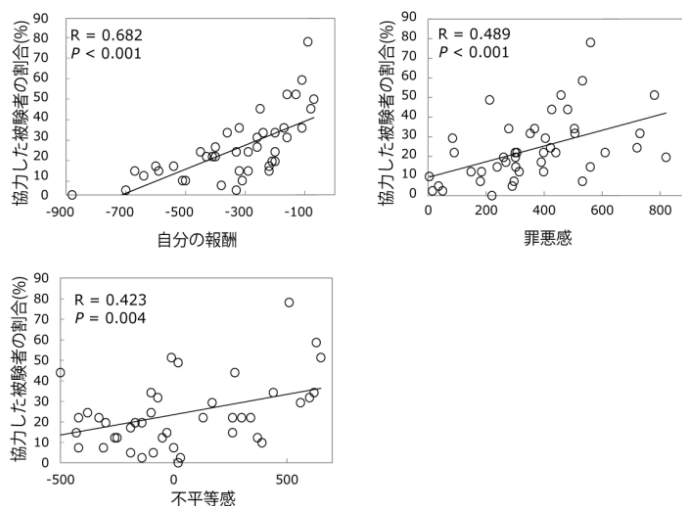


図 2 行動結果

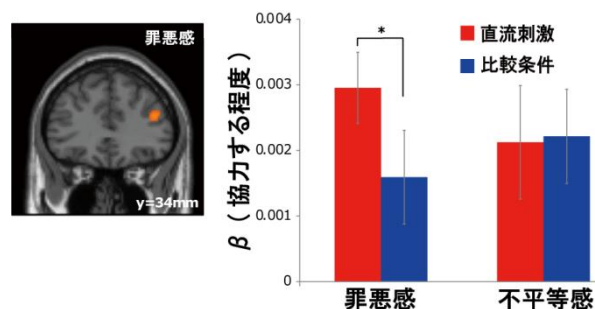


図 3 脳活動解析と電流刺激の結果

データ解析の詳細説明

実験データの解析

fMRI 実験の解析では、まず、信頼ゲームにおける 45 回の試行それぞれに対し、“罪悪感” (相手の期待と実際の差) と“不平等” (相手と自分の取り分の差の絶対値) を計算します。次に、これらの変数と fMRI 計測で得られた脳の血流データとの相関解析を行うことで、“罪悪感”と“不平等”を表現する脳の部位を探しました。この解析の結果、“罪悪感”と“不平等”に相関する部位は、それぞれ右前頭前野 (図 3 左参照) と、扁桃体と側坐核 (図 4 参照) でした。

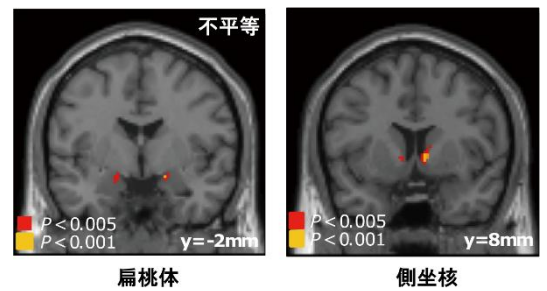


図 4 扁桃体と側坐核

図 2 は、“自分の報酬”、“罪悪感”、“不平等”が協力行動に大きな影響を持つことを示しています。したがって、各被験者が協力か非協力かの行動を決めるのに使う基準 (効用関数) は、“自分の報酬”、“罪悪感”、“不平等”を用いて以下の式で書けるはずです。式中の $\beta 1$ から $\beta 3$ は、各被験者が“自分の報酬”、“罪悪感”、“不平等”を重視する程度を示しており、個人ごとに異なります。例えば、“罪悪感”を避ける被験者なら $\beta 2$ が大きくなり、“不平等”を避ける被験者では $\beta 3$ が大きくなります。 $\beta 1$ から $\beta 3$ は、各被験者の行動結果 (協力か非協力か) を用いた最適化計算で求めることが可能で、図 3 右の協力する程度にはこれらの値が用いられています。

$$\text{効用} = \beta 1 \times \text{自分の報酬} - \beta 2 \times \text{罪悪感} - \beta 3 \times \text{不平等}$$

経頭蓋直流電流刺激の実験

経頭蓋直流電流刺激の実験では、fMRI 実験とは別の 22 名の被験者に fMRI 実験と同じ課題を 3 日間あけて 2 度行っただけでした (課題の長さは 552 秒、直流刺激条件と比較条件、条件の順序はランダムにしました。)。直流刺激条件では、課題開始の 5 分前から 2mA の刺激を開始し、課題中も連続して刺激を行いました。一方で、比較条件では、最初の 30 秒だけ (つまり、課題開始の 5 分前から 4 分 30 秒前まで) 刺激を行い、その後は刺激を止めました。被験者には、その日の体調により経頭蓋直流電流刺激の感じ方には差が生じるという教示を行ったこともあり、全実験終了後に両条件の差をレポートした被験者はいませんでした。

右前頭前野に経頭蓋直流電流刺激を行うことで生じた信頼ゲーム中の β の変化が図 3 右です。直流刺激条件では、比較条件と比較して、 $\beta 2$ つまり“罪悪感”の影響が有意に増加しました。これに対し、“不平等”の影響 ($\beta 3$) は変化しませんでした。この結果は、右前頭前野の脳活動が表現する“罪悪感”と協力行動の間の因果関係を示しています。

付記

本研究の実施に当たり、事前に被験者全員に対して実験内容を説明し、同意を得ました。また、実験計画については情報通信研究機構、及び玉川大学の倫理委員会の承認を受けています。

共同研究者の情報

岐阜聖徳学園大学
経済情報学部
准教授 二本杉 剛
Tel: 058-278-0763
E-mail: t.nihonsugi@gifu.shotoku.ac.jp

JST の事業に関すること

科学技術振興機構 戦略研究推進部 ライフイノベーショングループ
川口 貴史 (カワグチ タカフミ)
〒102-0076 東京都千代田区五番町 7 K's 五番町
Tel: 03-3512-3525、Fax: 03-3222-2064
E-mail: presto@jst.go.jp