

選択肢の価値比較は眼窩前頭皮質で行われる
～より良い選択肢を選ぶための脳内機序を解明～

研究成果のポイント

1. 霊長類において、その個体にとって「どちらの選択肢がより価値が高いか」、という選択行動にかかわる処理は、脳の眼窩前頭皮質で行われていることを、神経細胞のレベルで明らかにしました。
2. 眼窩前頭皮質を薬理的に不活性化すると、非合理的な選択行動の頻度を増加させることを確認し、眼窩前頭皮質の活動と実際の選択行動の間の因果関係を初めて示しました。
3. 行動決定の基礎である、選択行動の情報処理過程を解明することにより、脳部位損傷による行動決定の障害への治療応用につながると期待されます。

国立大学法人筑波大学 医学医療系 設楽宗孝教授・瀬戸川剛助教らの研究グループは、国立研究開発法人産業技術総合研究所、米国国立衛生研究所(NIH)と共同で、脳の前頭前野の腹側表面に位置する眼窩前頭皮質^{※1)}において、その個体にとって「どちらの選択肢がより価値が高いか」、という選択行動にかかわる処理が行われていることを神経細胞のレベルで明らかにしました。

私たちが複数の選択肢の中から1つを選ぶとき、まずそれぞれの選択肢の主観的な価値を見積もり、次にそれらを比較し、最後に比較結果に基づいて選択することで、個人にとってより良いものを選んでいて考えられています。その主観的な価値の見積もりにあたっては、複数の先行研究により、眼窩前頭皮質が重要であることが明らかにされてきました。しかしながら、それを見積もられた選択肢の価値が、脳内のどこで比較されているかは未だ不明のままでした。

本研究グループは、主観的な価値の比較の処理もまた、眼窩前頭皮質が担っているのではないかと仮説を立て、報酬価値に基づく行動選択を行わせる認知課題を、ヒトに近縁なアカゲザルに訓練し、課題遂行中の眼窩前頭皮質の神経細胞の活動を、単一神経細胞活動記録法^{※2)}を用いて記録しました。その結果、眼窩前頭皮質の神経細胞の活動は、提示された2つの選択肢の主観的な価値の差分と相関を示す、つまり価値の比較を行っている可能性があることがわかりました。そこで、この眼窩前頭皮質の活動を薬理的に不活性化したところ、提示された2つの選択肢の主観的な価値が近く、どちらを選んだ方が良いかの選択が難しい場合にのみ、より価値の低い方を選ぶという非合理的な選択の頻度が増加しました。以上の結果から、眼窩前頭皮質は、選択行動において必要不可欠な「どちらの選択肢がより価値が高いか」という価値の比較の処理を担っていることが明らかになりました。

行動決定の基礎である、選択行動の脳内における情報処理過程を解明することで、当該部位の損傷によって引き起こされる、適切な選択行動の障害に対する治療にも大きく貢献できるものと期待されます。

本研究の成果は、Nature Researchが提供するオープンアクセス・ジャーナル「Communications Biology」に2019年4月5日付で公開される予定です。

* 本研究は、科研費(22300138, 25282246, 16H03301, 26119504, 26330266)、科研費特定領域研究(17022052)、およびNEDO「次世代人工知能・ロボット中核技術開発」によって実施されました。

研究の背景

私たちは生活の中で、しばしば複数の選択肢の中から1つを選択して行動しなければならない場面に直面します。例えば、ある作業を2時間行くと3000円の報酬が得られる場合と、3時間行くと4000円の報酬が得られる場合を想像してみてください。あなたはどちらを選択するでしょうか？このような意思決定に基づく行動選択を行う際には、その選択肢を選んだことで得られると期待される報酬(プラスの価値、Benefit)と、その報酬を得るまでに必要な作業負荷(価値を下げる要因、Cost)との兼ね合いから、それぞれの選択肢の主観的な価値を見積もると考えられています。最終的な行動に至るためには、これら見積もられた選択肢の価値を比較し、どの選択肢がその個体にとってより良いものなのかを決定する必要があります。これまで、価値の見積もりに重要な役割を果たす脳部位として、前頭前野の腹側表面に位置する眼窩前頭皮質が注目されてきました。しかしながら、先行研究では、複数の選択肢を同時に提示していたため、見積もられた選択肢の価値を比較する処理が、脳内のどこで行われているかまでは、わかっていませんでした。また、脳の活動と行動の因果関係のチェックも行われていませんでした。

研究内容と成果

本研究グループでは、見積もられた選択肢の価値の比較もまた、眼窩前頭皮質で行われているのではないかという仮説を立てました。この仮説を検証するために、ヒトと比較的近い脳構造を持ち、複雑な行動課題を学習・遂行することができるアカゲガールを用いて実験を行いました。

まず、サルを3本のバーが付いたイスに座らせ、その前に行動課題が提示されるモニターを設置します(図1A)。サルが真ん中のバーに触れることで行動課題が開始され、最終的に得られる報酬の量と、その報酬を得るまでに必要な作業負荷の、2つの情報を示したターゲット(選択肢)が順々に2つ提示されます(図1B)。それぞれのターゲットは、その明るさで報酬の量を、長さで作業負荷の回数を表しています(図1C)。各ターゲットを順々に提示したのち、それら2つのターゲットがモニター中央の注視点の左右に再度提示されます。この時サルは、イスに付属の左右どちらかのバーに触れることで、左・右にそれぞれ対応したターゲットを選ぶことができます。選択後は、作業負荷としてそのターゲットが示す回数だけ視覚弁別試行^{注3)}を行うことで、報酬である水を得ることができます。この行動選択課題を行っている最中の眼窩前頭皮質の個々の神経細胞の活動を、単一神経細胞活動記録法を用いて記録しました。この課題では、選択を行わせる前に、順々に選択肢を提示する工夫をしたことで、これまでの研究では明らかにすることができなかった「選択肢の価値の比較に関わる神経細胞の活動」の有無を調べることができます。つまり、2つ目の選択肢が提示されたときの眼窩前頭皮質の神経細胞の活動と、1つ目と2つ目に提示されたターゲットの主観的な価値の差分との間に相関があれば、その神経細胞の活動は、選択肢の価値の比較に関わっている可能性があるわけです。

そこで、数理モデル解析を用いて、サルの実際の選択行動から、それぞれのターゲットの主観的な価値を数値化しました。次に、2つ目の選択肢が提示されたときの眼窩前頭皮質の神経細胞の活動を解析した結果、多くの神経細胞の活動が、提示された2つのターゲットの価値の差分と相関を示すことが分かりました(図2A)。このような相関は、2つ目の選択肢が提示されたタイミング以外ではほとんど観察されませんでした(図2B)。さらに、この神経細胞の活動と実際の選択行動の間の因果関係を調べるため、両側の眼窩前頭皮質にGABA_A受容体^{注4)}の作動薬であるムシモルを局所注入することで一時的にこの部位を不活性化し、対照実験として生理食塩水を注入した場合と行動課題の成績を比較しました。すると、ムシモルを注入した際には、特に、提示された2つのターゲットの価値の差分が小さいとき(2つの選択肢の価値が近く、どちらを選んだら良いかの選択が難しいとき)に、より価値の低いターゲットを選ぶという、非合理的な選択の頻度が有意に上昇しました(図3)。

以上の結果から、選択行動において、眼窩前頭皮質は、提示された選択肢の価値の差分、すなわち「どちらの選択肢がより価値が高いか」という、価値の比較に関わる処理を担っていることが示唆されました。

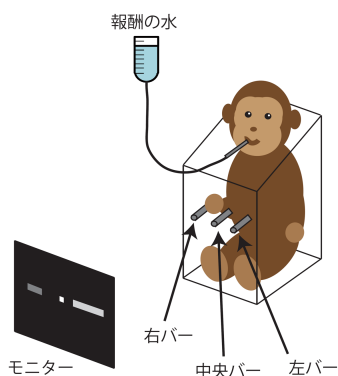
今後の展開

眼窩前頭皮質で処理された「どちらの選択肢がより価値が高いか」を表す信号が、脳内のどの経路を通り、最終的な選択となって実際の行動として出力されるのかを明らかにすることが、今後の課題です。意思決定に基づく行動選択に関わる、神経ネットワークの情報処理機構を解明することができれば、眼窩前頭皮質を含めた脳部位の損傷により引き起こされる適切な選択行動の阻害の治療に役立つだけでなく、ヒトの購買行動を予測するモデルの構築など、マーケティングの分野にも広く貢献できるものと期待されます。

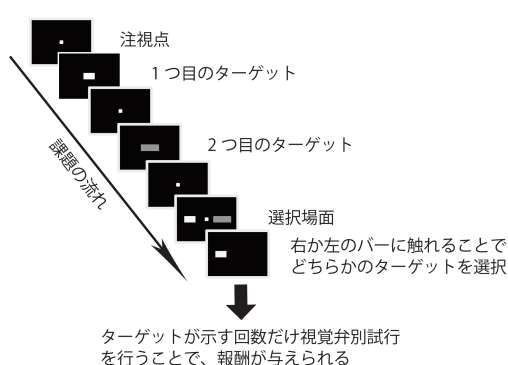
参考図

図1. 行動課題

A. 実験のセットアップ



B. 行動課題の流れ



C. ターゲットの種類

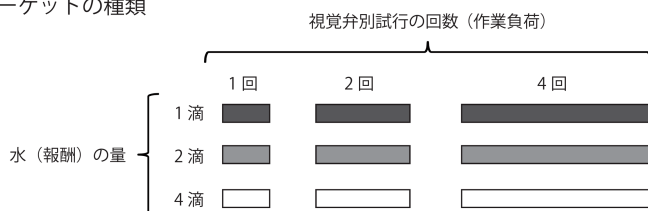
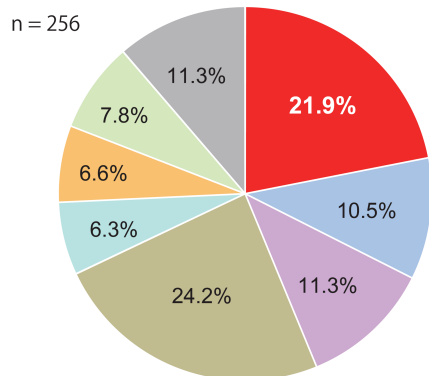


図2. 記録した神経細胞の分類

A. 2つ目のターゲット提示時



B. 選択場面

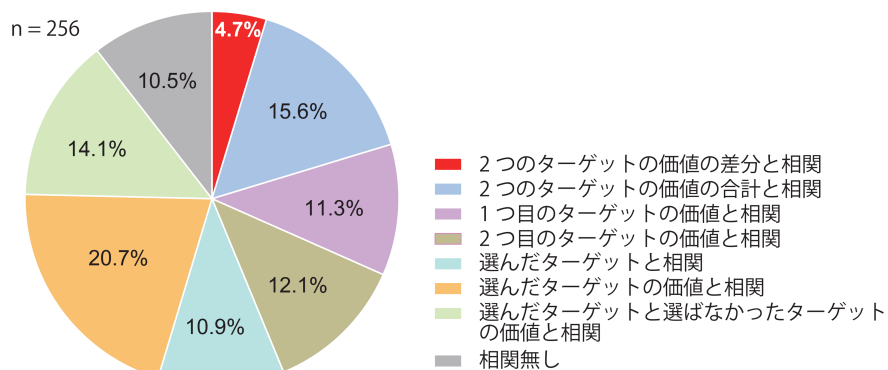
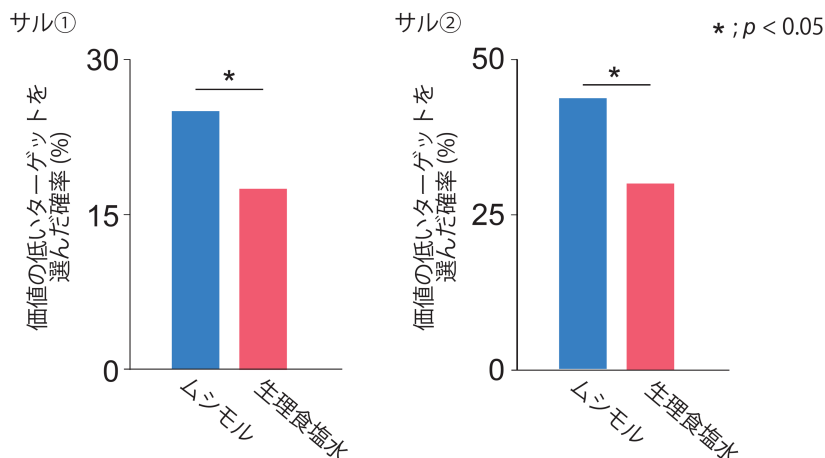


図3. 2つのターゲットの価値の差分が小さいときの選択確率



用語解説

注1) 眼窩前頭皮質

眼窩の直上にある脳の皮質領域で、意思決定に重要な役割を果たすと考えられている。

注2) 単一神経細胞活動記録法

微小電極を脳部位に刺入し、単一の神経細胞から発生する活動電位を反映した細胞外の微弱な電位変化を測定する手法。

注3) 視覚弁別試行

サルはモニター中央に赤色のキューが提示されている間、中央のバーを握り続ける必要がある。その後、キューの色が緑色に変わったら、1秒以内に中央のバーから手を離すことが求められる。正しく反応すれば報酬の水が与えられる。

注4) GABA_A受容体

イオンチャネル型受容体の1つ。塩素イオン Cl⁻を選択的に透過させることにより神経細胞に過分極を生じさせ、神経伝達の阻害効果を引き起こす。作動薬の1つとしてムシモルが挙げられる。

掲載論文

【題名】 Neurons in the monkey orbitofrontal cortex mediate reward value computation and decision-making (サル眼窩前頭皮質のニューロンは、報酬価値の計算と行動決定を仲介する)

【著者名】 Tsuyoshi Setogawa¹⁾, Takashi Mizuhiki¹⁾, Narihisa Matsumoto²⁾, Fumika Akizawa¹⁾, Ryosuke Kuboki¹⁾, Barry J. Richmond³⁾, Munetaka Shidara¹⁾

1) Univ. of Tsukuba, 2) AIST, 3) NIH, USA

【掲載誌】 Communications Biology (DOI: 10.1038/s42003-019-0363-0)

問い合わせ先

設楽 宗孝 (しだら むねたか)

筑波大学 医学医療系 教授