

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350986

研究課題名(和文) 異時的選択行動における衝動性と自己制御を形成する報酬強化の神経機構

研究課題名(英文) Neural mechanisms for formation of impulsivity and self-control in intertemporal choice behavior

研究代表者

地村 弘二 (Jimura, Koji)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・准教授

研究者番号：80431766

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、報酬に対する衝動性や自己制御が脳でどのように形成されるのかを解明することを目的とし、遅延する液体一次報酬を直接経験して、その後自由に選択する行動課題遂行中のヒト脳活動を機能的MRIで断続的に計測した。自己制御の形成は、前部前頭前野における報酬遅延時間の期待効用に関する時間特徴に関連し、衝動性はその逆の時間特性に関連していることがわかった。また液体報酬の消費中、衝動的な被験者では、前部前頭前野と腹側線条体の活動が大きく、前頭前野から腹側線条体への結合が大きかった。一方、意思決定の際には、決定の難度が上がると前部前頭前野における認知制御機構が関係していることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The current study aimed to elucidate neural mechanisms underlying formation of impulsivity and self-control in intertemporal choice behavior. During fMRI scanning, human participants performed an intertemporal choice task in which they first directly experienced delayed liquid rewards, followed by free choice trials. Formation of self-control was associated with temporal dynamics of anticipatory utility in the anterior prefrontal cortex (aPFC) during delay period, whereas that of impulsivity was associated with reverse dynamics in ventral striatum (VS). During consumption of delayed rewards, impulsive individuals showed greater activity in aPFC and VS and stronger functional connectivity from aPFC to VS. On the other hand, difficulty in decision-making was associated with prefrontal control mechanisms during choice.

研究分野：認知神経科学

キーワード：意思決定 前頭前野 腹側線条体 機能的MRI

1. 研究開始当初の背景

獲得までの時間と量が異なる報酬についての選択(異時的選択)は、選択行動における衝動性と自己制御を反映すると考えられている。異時的選択における衝動性と自己制御は、遅延報酬の効用(主観的価値)の時間的減衰(時間割引)によって説明されてきた。しかし、報酬に対する衝動性や自己制御がどのようにして形成されるかはよくわかっていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、非ヒト動物実験の手続きをヒトに適用した行動課題を用いて、報酬の遅延と消費を直接経験する際のヒトの脳活動を計測する。そして、報酬経験に関連した脳活動を抽出し、経験後の遅延報酬に選択傾向の関係を調べることで、自己制御と衝動性を形成する機構を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 本研究は、研究代表者が開発した、遅延する液体報酬による異時的選択課題(Jimura et al., Psychon Bull Rev 2009; Behav Proc 2011; J Neurosci 2013)をもとに、遅延報酬を初めて直接経験する際のヒトの脳活動を測定し、その後の選択行動との関係を調べた。

まず被験者は、数十秒遅延する液体報酬と、遅延しない(即時)液体報酬を強制選択法により経験する。報酬の量は遅延報酬の方が大きい。そして2種類の報酬を経験したのち、自由選択により、どちらか好みの報酬を選ぶ。この間断的にfMRIにより脳活動の計測を行う。

解析では、行動経済学の選択行動モデルの一つである期待効用にもとづいて、遅延時間の脳活動動態を記述した(Jimura et al. J Neurosci 2013)。

(2) 上記の計測実験結果を補間するために、研究代表者が過去に収集したデータ(Jimura et al. J Neurosci 2013)の未発表部分を追加解析した。

まず、自由選択法で選ばれた遅延する液体報酬を消費する際の脳活動を抽出し、衝動性との関係を調べた。そして、報酬消費時における関連領域間の機能的結合を調べた。

また、認知課題遂行中の脳活動と、遅延する金銭報酬に関する異時的意思決定課題との脳活動の関係を調べた。

4. 研究成果

(1) まず、遅延時間における脳活動の時間変化を期待効用モデルによってモデル化した(Jimura et al. 2013)。自由選択時では、過去の研究で同定された前頭前野領域が同様に期待効用の時間特性を示した(図1)。また腹側線条体では、負の期待効用に関連していた。

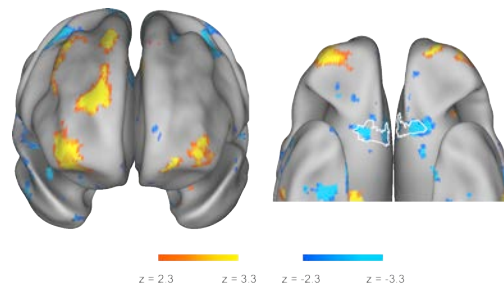


図1

強制選択時における期待効用の効果を調べたところ、後の自由選択で選ばれる遅延報酬では、前部前頭前野および腹側線条体でそれぞれ顕著な正と負の期待効用の効果が見られた(図2左)。一方で、自由選択で選ばれなかった遅延報酬では、期待効用の効果は見られなかった。

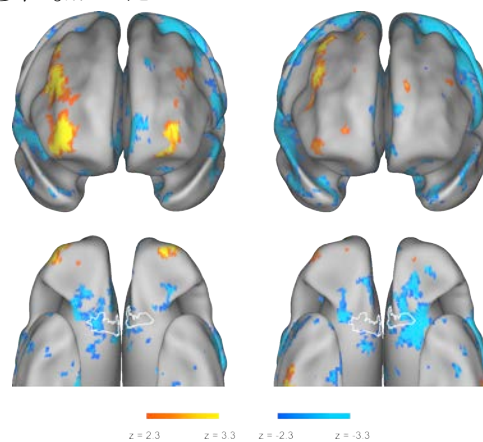


図2

これらの結果は、遅延報酬を経験する際、遅延時間で期待効用が大きいと、その後の選択で遅延報酬が選ばれることを示唆している。

次に、強制選択試行における報酬消費時の脳活動を調べた。腹側線条体では、即時報酬の消費時において、後の自由選択試行で選ばれなかった場合(非被選択)、活動が小さくなっていることが観察された。これは、即時報酬を消費している際に、腹側線条体の活動が小さいと、衝動性のある選択行動が小さくなることを示唆している。

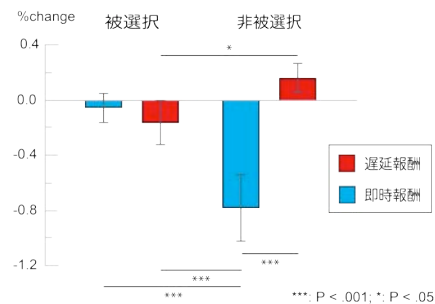


図3

以上の結果は、異時的意思決定の遅延時間と報酬消費における、自己制御の形成の前頭前野・腹側線条体機構を示唆している。

(2) 報酬消費時の脳活動を調べたところ、衝動性の高い被験者では、前頭前野の活動が大きくなっていることがわかった。一方で、腹側線条体では前部と後部で異なっていた。すなわち、前部では衝動性の高い被験者ほど活動が大きいが、後部では、衝動性が高い被験者に加え、中程度の被験者でも活動が大きかった。

そこで、前頭前野、腹側線条体の前部・後部の3領域における機能的結合を調べるために、心理生理相互作用解析を行なった。腹側線条体前部には前頭前野および腹側線条体後部からの強い結合が観察された(図4左)。一方で、腹側線条体の後部からは前部へ強い結合が観察された。

これらの機能的結合が衝動性の高さによる前頭前野

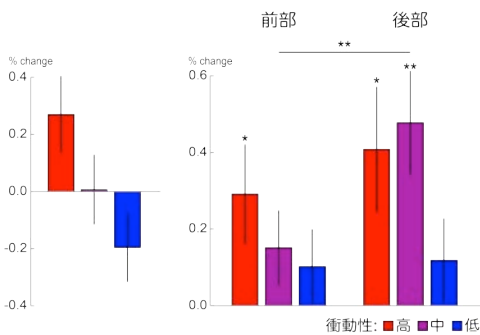


図4

ってどのように変わるかを調べたところ、腹側線条体後部から前部への結合は、衝動性の高い被験者で強くなっていることが観察された(図4右)。

これらの結果は、3領域の活動の大きさと、3領域間の機能的結合による、衝動性に関連する前頭前野-腹側線条体の機構を示唆している(図5)。すなわち、衝動性が高い被験者

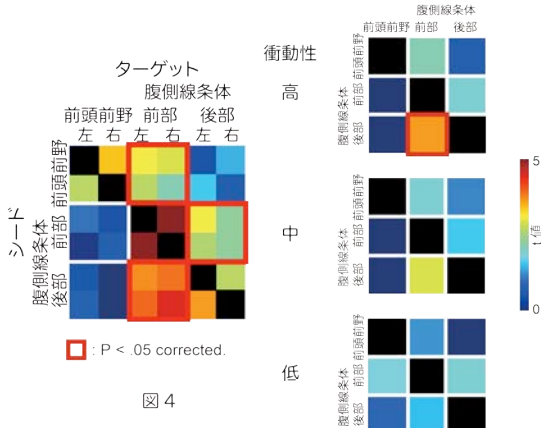


図4

では、前頭前野と腹側線条体後部の強い活動が、腹側線条体前部への強い機能的結合により、活動が大きくなる。一方で、中程度の被験者では、腹側線条体後部は強いが、後部から前部への結合が弱いため前部の活動は大きくならない。以上から、前頭前野・腹側線条体後部での活動が、前部に累積することが衝動性と関連していると推察される。

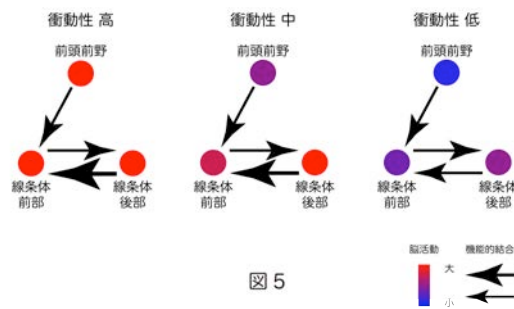


図5

金銭報酬に関する異時的意思決定課題では、即時報酬量と遅延報酬の主観的価値との差を系統的に操作することにより、意思決定の難度の効果を調べた(Jimura et al. Cereb Cortex in press).

作業記憶課題の負荷効果を示す領域を同定し、その領域内で難度効果に関連する領域を探索したところ、前部前頭前野が同定された。この領域では、難度効果が大きい被験者ほど、作業記憶の負荷効果が大きかった。

さらに腹外側前頭前野では、難度効果が遅延報酬に対する衝動性と相関していることがわかった。すなわち、衝動性が低い(自己制御が強い)被験者ほど、難度効果が大きかった。

以上の結果は、前頭前野における、異時的意思決定に関連する制御機構を示唆している。

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7件)

- ① Jimura, K., Chushak, S. M., Westbrook, A., Braver, T. S. Intertemporal decision-making involves prefrontal control mechanisms associated with working memory. *Cerebral Cortex*, 査読あり, 印刷中. doi:10.1093/cercor/bhx015.
- ② Jimura, K., Hirose, S., Wada, H., Yoshizawa, Y., Imai, Y., Machida, T., Sirouzu, I., Koike, Y., Miyashita, Y., Konishi S. Relatedness-dependent rapid development of brain activity in anterior temporal cortex during pair-association retrieval. *Neuroscience Letters* 査読あり, vol. 627, 2016, pp. 24-29.
- ③ Terai, A., Nakagawa, M., Kusumi, T., Koike, Y., Jimura, K. Enhancement of visual attention precedes the emergence of novel metaphor interpretations. *Frontiers in Psychology*, 査読あり, vol. 6, 2015, pp. 892.
- ④ Osada, T., Adachi, Y., Miyamoto, K. Jimura, K., Setsuie, R. Miyashita, Y.

Dynamically allocated hub in task-evoked network predicts the vulnerable prefrontal locus for contextual memory retrieval in Macaques. PLoS Biology, 査読あり, vol. 13, 2015, pp. e1002177.

- ⑤ Chen, M.-Y., Jimura, K., White, C. N., Maddox, W. T., Poldrack, R. A. Multiple brain networks contribute to the acquisition of bias in perceptual decision-making. Frontiers in Neuroscience 査読あり, vol. 9, 2015, pp. 63.
- ⑥ Jimura, K., Hirose, S., Kumimatsu, K., Ohtomo, K., Koike, Y., Konishi S. Late enhancement of brain-behavior correlations during response inhibition. Neuroscience 査読あり, vol. 274, 2014, pp. 383-392.
- ⑦ Katsura, M., Hirose, S., Sasaki, H., Mori, H., Kunimatsu, A., Ohtomo, K., Jimura, K., Konishi, S. Decreased fronto-temporal interaction during fixation after memory retrieval. PLoS ONE 査読あり, vol. 9, 2014, pp. e110798.

[学会発表] (計 11 件)

- ① Tsumura K., Aoki R., Nakahara K., Huk, A. C., Poldrack R. A., Jimura, K. Prefrontal-temporal mechanisms involved in response inhibition under perceptual uncertainty. 第 40 回日本神経科学大会. 2017 年 7 月 21 日, 幕張メッセ. 千葉県・千葉市. (発表決定済み)
- ② Tanaka, D., Aoki, R., Nakahara, K., Jimura, K. Prefrontal-Striatum Mechanisms Involved in Formation of Self-Controlled Choice. 第 40 回日本神経科学大会. 2017 年 7 月 21 日, 幕張メッセ. 千葉県・千葉市. (発表決定済み)
- ③ Jimura, K. Statistical mediation as an approach for brain mechanism inference: analyses for delay discounting with large-sample open resource data. 第 40 回日本神経科学大会. 2017 年 7 月 20 日, 幕張メッセ. 千葉県・千葉市. (発表決定済み)
- ④ Terai, A., Nakagawa, M., Kusumi, T., Sakagami, M., Jimura, K. Dynamic neural mechanisms associated with emergence of creative metaphor interpretations. 第 39 回日本神経科学大会. 2016 年 7 月 21 日, パシフィコ横浜. 神奈川県・横浜市.
- ⑤ Noro, Y. Jimura, K. Periodic polarization of brain-wide functional network revealed by resting-state fMRI. 第 39 回日本神経科学大会. 2016 年 7 月 20 日, パシフィコ横浜. 神奈川県・横浜

市.

- ⑥ Misonou, A., Jimura, K. Prefrontal-striatal mechanisms of impulsivity during reward attainment. 第 39 回日本神経科学大会. 2016 年 7 月 20 日, パシフィコ横浜. 神奈川県・横浜市.
- ⑦ Terai, A., Nakagawa, M., Kusumi, T., Sakagami, M., Jimura, K. Neural mechanisms for generation of emergent interpretations in metaphor comprehension. Society for Neuroscience Annual Meeting. 2015 年 10 月 19 日, シカゴ (アメリカ合衆国).
- ⑧ Osada, T. Adachi, Y., Miyamoto, K., Jimura, K., Setsuie, R., Watanabe, Y., Miyashita, Y. Hub-centric prefrontal network predicts lesion-effective site for contextual memory in macaques. Society for Neuroscience Annual Meeting. 2015 年 10 月 19 日, シカゴ (アメリカ合衆国).
- ⑨ Osada, T., Jimura, K., Hirose, S., Kunimatsu, A., Ohtomo, K., Koike, Y., Konishi, S. Temporal changes in brain-behavior correlation during response inhibition. Society for Neuroscience Annual Meeting. 2014 年 11 月 19 日, ワシントン DC (アメリカ合衆国).
- ⑩ Hirose, S., Jimura, K., Kunimatsu, A., Abe, K. Ohtomo, K., Konishi, S. Cerebro-cerebellar network associated with learning of response inhibition as revealed by functional connectivity analysis. Society for Neuroscience Annual Meeting. 2014 年 11 月 19 日, ワシントン DC (アメリカ合衆国).
- ⑪ Jimura, K., Hirose, S., Wada, H., Yoshizawa, Y., Imai, Y., Akahane, M., Machida, T., Shirouzu, I., Koike, Y., Miyashita, Y., Konishi, S. Fronto-temporal mechanisms involved in rapid formation of pair-association memory. Society for Neuroscience Annual Meeting. 2014 年 11 月 16 日, ワシントン DC (アメリカ合衆国).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

地村 弘二 (JIMURA, Koji)
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号: 80431766