

令和 2 年 5 月 27 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01989

研究課題名（和文）遅延報酬の直接経験に基づく報酬獲得行動の形成機構

研究課題名（英文）Neural mechanisms for the formation of self-control choice preference

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、自己制御のある選択指向がどのように形成されるかを調べるために、数十秒遅延する液体報酬に関する選択課題を行うヒトの脳活動を機能的MRIで撮像した。被験者が、将来の報酬を初めて待っているとき、前頭前野頭極部の活動は、待つことに対する効用を反映した信号動態を示した。そして、この信号は、自己制御の選択指向がより強い被験者ほど大きく、前頭前野当局部の信号が大きくなると腹側線条体の信号が弱くなる傾向も強かった。一方で報酬を消費している時に腹側線条体の活動が小さくなると、自己制御の強い選択が行われることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来に起こる好ましい出来事を期待することは、脳がもつ重要な機能であり、自己制御のある選択を可能にする。しかし、自己制御のある選択が、いつ、どのように形成されているかはよくわかっていない。そこで、本研究は、遅延する液体報酬を経験・選択する際の脳活動を計測し、自己制御の選択指向がどのように形成されるかを調べた。本研究で発見された前頭前野の信号の時間的特徴は、将来の報酬を待つことの楽しさが、自己制御の選択指向の形成に関わっていること示唆している。

研究成果の概要（英文）：In the current study, we aimed to explore neural mechanisms for the formation of self-controlled choice preference and measured brain activity using fMRI while human participants performed a choice task for real liquid rewards. While they were awaiting a future reward, the anterior prefrontal cortex showed dynamics signals that reflected utility of anticipation, which was enhanced in self-controlled individuals. When the anterior prefrontal activity was increased, activity in the ventral striatum was diminished; this tendency was also enhanced in self-controlled individuals. On the other hand, during consumption of a liquid reward, reduced activity in ventral striatum was associated with subsequent self-controlled choice.

研究分野：認知神経科学

キーワード：異時的意思決定 自己制御 機能的MRI

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) ヒトは他の生命体と比較すると、環境の変化に柔軟に適応している。この柔軟性は、将来の大きな報酬を得るために、現在の容易な報酬の獲得の衝動を制御する、適切な行動と選択をしているからだとされている。これまで、報酬に対する選択行動は、行動経済学による「効用(価値)」によって説明されてきた。

(2) 将来の報酬についての選択と行動は多くの動物種で研究されている。とりわけ、量と獲得までの時間が異なる報酬に関する意思決定(異時的意思決定)は選択行動の衝動性と自己制御を反映すると考えられている。衝動性と自己制御は、報酬の効用が獲得までの時間に依存して単調減少する「時間割引」によって説明されてきており、前頭前野外側・内側面、腹側線条体等の神経機構が関連されていることが示唆されている。

(3) 研究代表者は、幅広い種で観察される時間割引と、上記の行動課題の違いとの関係を調べるために、非ヒト種の行動課題をヒト被験者に適用した。この課題ではヒト被験者が、遅延する液体報酬(最大 60 秒の遅延と最大 16ml のジュース)に対し、選択・遅延・消費を直接経験しながら異時的選択行動を行う。そして研究代表者は、ヒトも、非ヒト種のように、短時間遅延の少量報酬で時間割引を示すことを示した。

(4) 研究代表者のこれまでのものでは、被験者が実験環境に慣れるよう、十分な練習試行が実験前に行われている。さらに、選択肢に対して定量的な情報が与えられている。そのため、報酬価値は、比較的容易に形成されることが考えられる。しかし、これらの実験での報酬量、遅延時間、報酬供給方法の環境は、被験者にとって親しみが少ないと思われる(図 1A)。すなわち、安定した選択行動が現れるには、実験前の練習試行における遅延と報酬の経験が重要だと推定される。非ヒト種の研究では、定量化不可能な状況で強制選択によって遅延報酬を経験し、その後、自由選択行動を行っている。

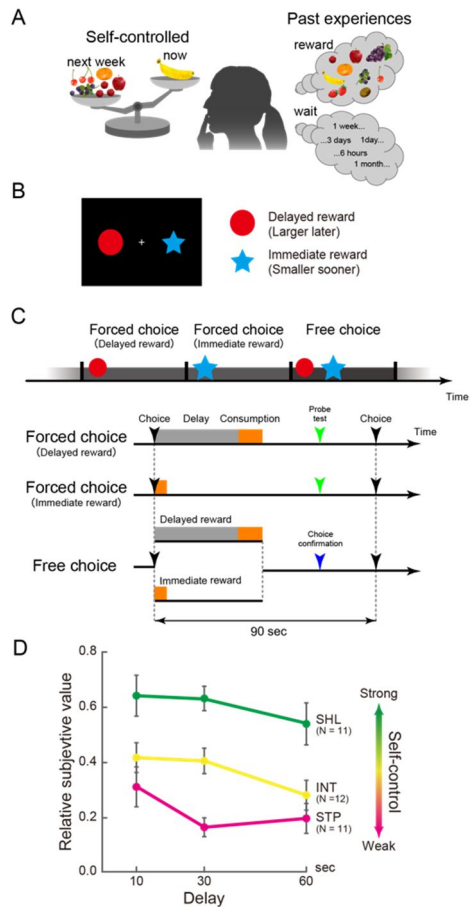


図 1

2. 研究の目的

そこで、本研究は、遅延と報酬消費の経験が、その後の報酬獲得行動とどのような関係にあるのかを調べる。研究代表者の開発した行動課題をもとに、異時的選択課題(図 1B/C)と報酬探索課題の 2 つの行動課題を開発し、課題遂行中のヒトの脳活動を機能的 MRI により断続的に撮像する。そして、大域的な機能的回路の解析をすることにより、報酬獲得行動形成の基礎にある脳と行動の機構を明らかにしようとしている。

3. 研究の方法

(1) 機能的 MRI 撮像中に、遅延する液体報酬を直接経験する行動課題を用い、ヒトを対象にし、報酬の経験が、後の意思決定にどのように関わるかを調べる。行動課題は、異時的選択(図 1B/C)と報酬探索の 2 種類を実施した。

(2) 異時的選択課題では、液体を用いた遅延報酬と即時報酬のそれぞれを表す図形が 2 つ提示される(図 1B)。強制選択により、被験者は遅延報酬と即時報酬を経験する(図 1C)。遅延報酬の場合は、数十秒の遅延後に十数 ml の液体報酬を、即時報酬の場合は選択直後により少ない液体報酬を消費する。その後、自由選択により、2 つの報酬のいずれかを好きな方を選ぶ。この 3 試行(強制選択: 2, 自由選択: 1)を繰り返しながら、即時報酬の量を調整して遅延報酬の主観的価値を推定していく。

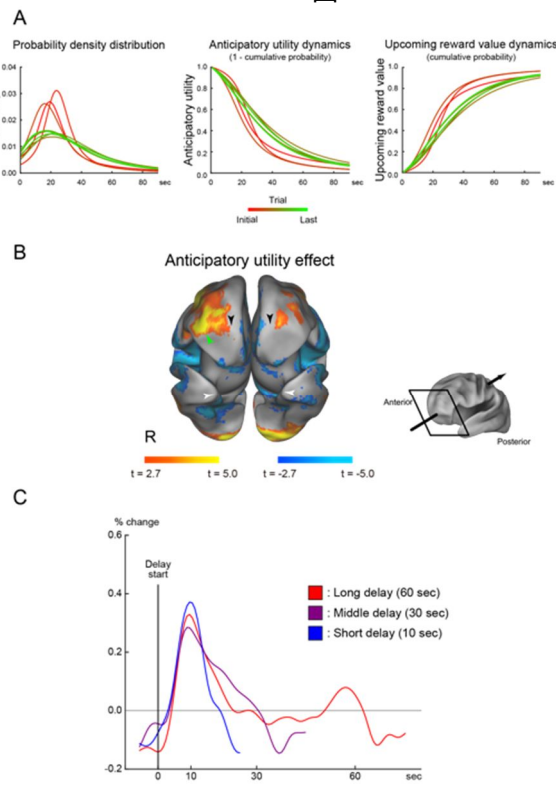


図 2

(3) 報酬探索課題では、上記の異時的選択課題を相同にした。まず、遅延する液体報酬を表す図形が提示され、被験者は強制選択により報酬を経験する。その後、同じ図形が提示され、被験者は報酬を待ちつづけるか、待つのをやめて次の試行に移ることができる(探索試行)。すなわち、被験者は次の試行に移るためにいつでも待つのをやめることができる。

探索試行における遅延時間は、強制選択試行のそれと比較して、必ずしも同じにはしない。ただし、1試行の長さは被験者の選択(待つ・次の試行に移る)にかかわらず一定とする。すなわち、獲得報酬量を最大化するための選択法略は常に待ち続けることである。

(4) 脳画像解析では、被験者が、選択肢で示された報酬の遅延を、強制選択で経験する際の脳活動の時間変化に着目した。重要なことに、強制選択の遅延時間では、被験者は遅延がいつ終了するかわからない。そこで、本研究は、被験者は過去の経験に基づいて、遅延がいつ終わるか予測している、その予測は、確率密度分布により表現されると仮定し、モデル化を行った。そして、その確率密度分布は、試行ごとに更新されていくと仮定した。確率密度はガンマ関数により記述し、ベイズ学習により分布のパラメータを更新した(図2A右)。このとき、遅延開始時刻を0とし、遅延中のある時刻を t としたとき、確率密度分布の $[0, t]$ における積分値は、時刻 t において、遅延が終了して液体報酬が得られるという期待の大きさの時間変化を反映していると考えられる(図2A左)。一方でその逆の動的特性を持つ関数(図2B中)は、まだ遅延は終わらないと思っている確率を表しており、待つこと自体の価値(期待効用)を反映していると考えられる。すなわち、遅延が始まり、待つことの効用がどのように変化していくかを表していると考えられる。本研究では、この2つの時間特性を持つ価値関数(図2A中/右)を機能的MRIの標準血液動態反応関数で畳み込み積分をし、探索的解析を行った。

4. 研究成果

(1) 行動解析の結果、異時的選択課題では、遅延報酬の主観的価値は、遅延時間が長くなるほど小さくなった(遅延割引; 図1D)。一方、報酬探索課題では、経験試行での遅延が長いほど、探索思考の途中で棄権することが多かった。

(2) 画像解析の結果、まず、異時的選択課題の自由選択試行の遅延時間において、研究代表者が過去に報告した、2つの時間変化を示す領域が再現された。

(3) つぎに、異時的選択課題の強制選択思考における遅延時間の解析を、上記3.(3)に基づいて行ったところ、上記前頭前野頭極部において、顕著な期待効用効果が観察された(図2B)。この領域の脳活動は、図2Cで示すように、期待効用で予測される時間変化が観察される。この現象は、報酬探索課題における経験試行でもみられた。

(4) そして、この前頭前野頭極部における期待効用効果が被験者の自己制御選択の指向とどのような関係があるかを探索した。各被験者について、遅延報酬の主観的時間の時間変化(図1D)の曲線下面積(AuC)を求め、AuCと期待効用効果の大きさを前頭前野において探索したところ、有意な正の相関が観察された(図3A)。この領域ではAuCが大きい(すなわち自己制御選択思考が強い)被験者ほど、期待効用効果が大きいことを示している。実際にAuCが大きい(割引が浅い: SHL)群、小さい群(割引が深い: STP)、その中間(INT)群にわけて時間変化をみると、期待効用効果は、SHLでより顕著であることがわかる。

(5) 遅延時間における前頭前野頭極部の期待効用効果が、腹側線条体の活動とどのような関係にあるかを調べるために、階層型重回帰モデルを用いて機能的結合を調べた。このモデルでは、腹側線条体の活動が、前頭前野頭極部の活動によって説明され、さらに各被験者のAuCによって説明される(図3E)。その結果、前頭前野の信号が大きくなると、腹側線条体の信号は小さくなり、その度合いはAuCが大きい被験者ほど大きくなることが示された。

(6) 最後に、報酬消費中の腹側線条体の脳活動を調べたところ、腹側線条体では、遅延効果(図

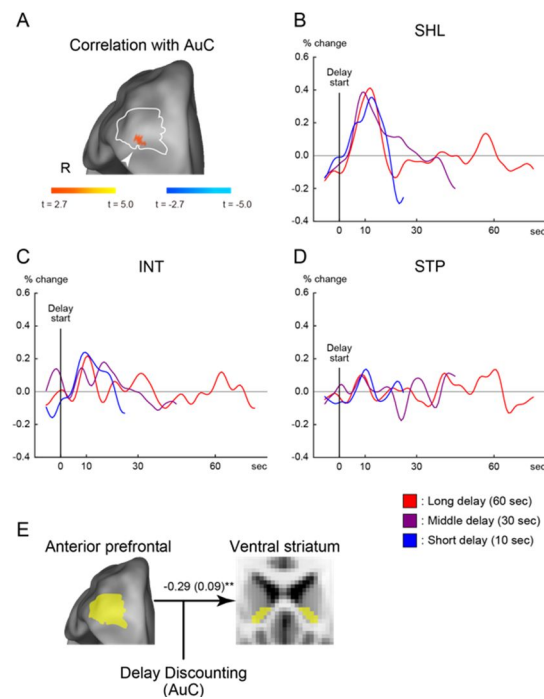


図 3

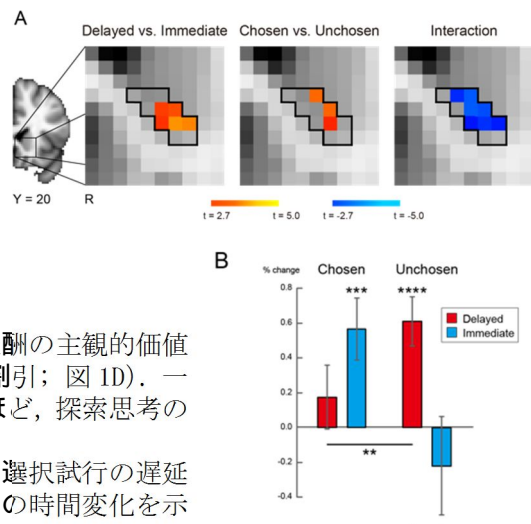


図 4

4A 右), 自由選択における選択効果(図 4A 中), それらの交互作用(図 4A 右)あることがわかった。それぞれの条件における脳活動の信号の大きさを見ると(図 4B), 腹側線条体における活動は, 直後の自由選択試行で自己制御のある選択がされる場合(すなわち, 後に選ばれない即時報酬と, 後に選ばれる遅延報酬の消費)において, より小さくなっていることがわかった。

(7) 以上の結果は, 未経験の状況から, 遅延報酬の遅延と報酬の消費をすると, 前頭前野と腹側線条体の機構に既存して, 自己制御のある選択指向が形成されることを示唆している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Keeratitivittayayut Ruedeerat, Aoki Ryuta, Sarabi Mitra Taghizadeh, Jimura Koji, Nakahara Kiyoshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Large-scale network integration in the human brain tracks temporal fluctuations in memory encoding performance	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 eLife	6. 最初と最後の頁 1-31
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7554/eLife.32696	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Sarabi Mitra Taghizadeh, Aoki Ryuta, Tsumura Kaho, Keeratitivittayayut Ruedeerat, Jimura Koji, Nakahara Kiyoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Visual perceptual training reconfigures post-task resting-state functional connectivity with a feature-representation region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 0196866 ~ 0196866
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0196866	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Jimura Koji, Chushak Maria S, Westbrook Andrew, Braver Todd S	4. 巻 28
2. 論文標題 Intertemporal Decision-Making Involves Prefrontal Control Mechanisms Associated with Working Memory	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex	6. 最初と最後の頁 1105 ~ 1116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhx015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Jimura Koji, Chushak Maria S, Westbrook Andrew, Braver Todd S	4. 巻 28
2. 論文標題 Intertemporal Decision-Making Involves Prefrontal Control Mechanisms Associated with Working Memory	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Cereb Cortex	6. 最初と最後の頁 1105 ~ 1116
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/cercor/bhx015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	中原 潔 (Nakahara Kiyoshi) (50372363)	高知工科大学・情報学群・教授 (26402)	