

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月 1日現在

機関番号：12102
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22300138
 研究課題名（和文） 報酬獲得のための行動決定制御の脳内情報処理機構
 研究課題名（英文） Brain information processing mechanism of reward-seeking behavior and decision-making.
 研究代表者
 設楽 宗孝（SHIDARA MUNETAKA）
 筑波大学・医学医療系・教授
 研究者番号：10357189

研究成果の概要（和文）：報酬獲得のための行動決定を調べるために、報酬までの労働負荷と報酬量の組み合わせを選択する行動決定課題をトレーニングしたサルを用いて課題の誤答率を検討したところ、指数関数を使った割引モデルによってよく説明できた。次に、眼窩前頭皮質には、2つの選択肢の報酬価値の差に相関した反応を示すニューロン群があった。一方、報酬スケジュール課題遂行時に背側縫線核のニューロンはスケジュール開始情報と報酬情報をコードするものが多く、ニューロン反応の時間変化の成分に情報があることが明らかになった。

研究成果の概要（英文）：We investigated information processing mechanism of decision-making by using the task of choosing one of two alternatives that have different work load and reward amount. The error rate of the task performance was well explained by the exponential discounting model of the reward value. Neurons in the orbitofrontal cortex responded to the differential value of the two alternatives. On the other hand, in reward schedules, neurons in the dorsal raphe coded the beginning of the schedule and the reward information not only by the spike strengths but also by their temporal patterns.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2011年度	6,200,000	1,860,000	8,060,000
2012年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,600,000	4,080,000	17,680,000

研究分野：システム脳科学

科研費の分科・細目：脳神経科学・融合社会脳科学

キーワード：報酬価値、行動決定、労働負荷、単一ニューロン記録、アカゲザル

1. 研究開始当初の背景

(1) 我々は通常、最終的な報酬を得ることを目的に、報酬を最大化するように報酬獲得までの道筋を計画し行動する。この過程では、報酬を得るのに必要な労働負荷および時間と、予測される報酬量との兼ね合いを考えてどのような行動選択を行うかを決定する。近年、脳ではどのような情報処理によってこの

ような行動決定を実現しているのかを調べるために、行動決定要因となりうる、報酬確率、報酬遅延、報酬量の効果を調べる研究が盛んである。報酬遅延と報酬量の関係については、これまでに、すぐに獲得できる小さな報酬と、長く待つが大きな報酬を獲得できると予想される場合、どちらを選ぶのかという研究がさまざまな課題条件で行われている。

一方、これまでの研究の問題点として、1) 現実の世界では、報酬を単に待っているという報酬遅延のケースは稀であり、報酬獲得のために努力するのが常である。従って、報酬獲得の行動決定のためには、報酬獲得までの労働負荷を考えることが重要と思われる、2) 報酬量についても大・小の2通りしか用いない研究が大部分であるが、強化学習理論を応用した数理モデルにより正確に報酬割引率を解析するにはより多くの選択肢が必要であろう、3) 一要因としての報酬遅延を動物で調べる場合、これまでの研究では、遅延は数秒～十数秒という短い時間のものだけが用いられていることが多い。これらの点を克服するための行動決定課題として、行動選択型報酬スケジュール課題を開発した。これは、報酬量と報酬獲得までの労働負荷（視覚弁別試行数）の双方を可変（それぞれ4段階）にし、これらの組み合わせ16通りの内、2つ提示して、動物（サル）に2つのうち1つを選択させる課題で、このときの行動選択のデータおよびニューロン活動を解析することとした。

2. 研究の目的

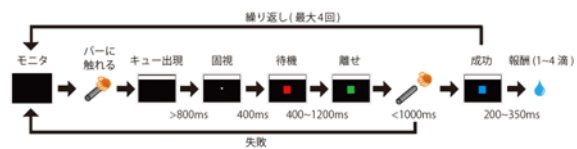
行動決定課題を用いて、報酬量と労働負荷の組み合わせによる報酬価値の計算を脳内ではどのように行っているのか、この計算に影響を与える因子は何か、を行動実験、ニューロン活動記録、そして数理モデル解析により明らかにしていく。具体的には、(1) サルが報酬量と労働負荷の組み合わせを選択するときの行動を、強化学習理論を応用した数理モデル解析によって明らかにする。(2) この行動選択に影響を与える因子としてのセロトニンの役割を明らかにするために、まず、報酬スケジュール課題遂行時の背側縫線核のニューロン活動を記録・解析する。また、報酬系の他の領域のニューロン活動も解析する。(3) 行動決定課題を用いて、行動選択の際の報酬価値の計算と価値に基づく選択を行っている、或いは影響を及ぼす可能性のある脳の領野（眼窩前頭皮質など）のニューロン活動記録によって、報酬価値の計算や行動選択がニューロンレベルでどのように表現されているのかを明らかにする。

3. 研究の方法

報酬獲得のための行動決定を調べるために、まず、報酬までの労働負荷と報酬量の組み合わせを選択する行動決定課題をサルにトレーニングする。この課題では、4段階の報酬量と4段階の仕事量を組み合わせた16通りから、その内の2つを選択肢として提示し、1つを選択させる。選択はモンキーチェア内に装備した左右のバーのいずれかを握ることで行う。仕事としては報酬スケジュールを

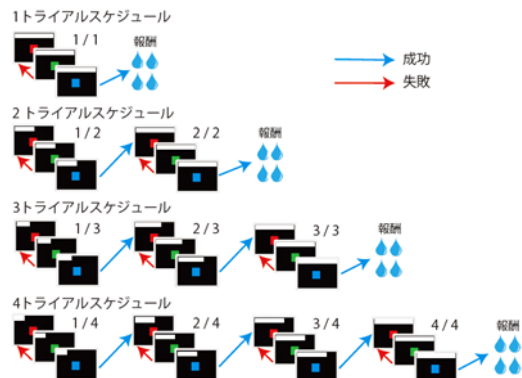
使う、すなわち、3試行スケジュールならば、画面に表示される視覚刺激の色が赤から緑に変わったら、モンキーチェア内の中央バーから1秒以内に手を離す、という視覚弁別試行を3回行う。さて、労働負荷と報酬量の組み合わせは全部で16通りあり、これから2つを選ぶ組み合わせは全部で120通りある。それぞれのパターン刺激と選択肢との連合は事前に十分学習させる。様々な選択肢の組み合わせを用いたときの行動決定の結果を報酬価値の割引モデルによって数理モデル化する。また、行動決定課題における選択時のニューロン活動、および報酬スケジュール課題時のニューロン活動を解析する。

「視覚弁別試行」



画面中央の視覚刺激の色が赤から緑に変わったら1秒以内にバーから手を離す。正解ならば視覚刺激の色が青に変わり、報酬として水が得られる。

「報酬スケジュール課題（報酬量が4滴の場合）」



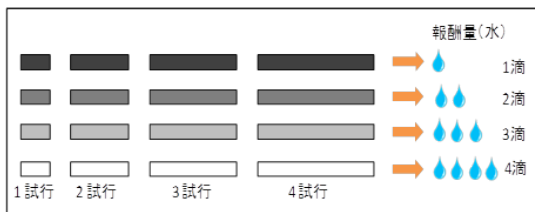
視覚弁別試行を複数回行う。報酬獲得までの進行度は画面上部のキューの長さで表す。

「行動選択型報酬スケジュール課題の進行」



画面中央の固視点の左右に選択肢が提示され、左の選択肢を選ぶときは左のバー、右の選択肢を選ぶときは右のバーを手で握る、その後、選んだ選択肢で示される報酬スケジュール課題が行われる。

「行動選択型報酬スケジュール課題に用いる選択肢のセット（労働負荷4通りと報酬量4通りの組み合わせの場合）」



必要な試行数（労働負荷）はキューの長さで、報酬の量はキューの明るさで表す。

4. 研究成果

(1) 行動決定の選択結果を報酬割引モデルによる数理モデルによってフィッティングすると、指数関数を使った割引モデルによってよくフィットできた。また、行動決定を行った場合のスケジュール課題とコンピューターにより条件を与えられた場合のスケジュール課題の行動成績を比較検討した結果、自ら行動決定を行った場合の方が課題の誤答率が低いという自己選択効果が見られ、報酬価値の割引モデルを用いた解析により、自己選択により報酬価値が上がるために誤答率が低くなったということが示唆された。

(2) ①報酬系の行動決定に影響を与える因子としてのセロトニンニューロンの働きを調べるため、背側縫線核のニューロンが報酬スケジュール課題遂行時にどのような報酬情報のコーディングをしているかを解析した。その結果、背側縫線核では、スケジュールの初めにはスケジュール開始情報、スケジュールの後半には報酬情報をコードするものが多いことがわかった。更に、スパイクの平均発火頻度だけでなく、発火頻度の時間変化の成分にも情報があり、これはスケジュール進行の情報を持っていることが明らかになった。

②報酬系の他の領域として、報酬スケジュール遂行時の前部帯状皮質吻側部のニューロン活動を解析した結果、記録したニューロンの内5-7割がスケジュールに関する情報を持つニューロンであり、報酬量に関する情報を持つニューロンは1-3割程度と少なかった。また、前部帯状皮質尾側部では、スケジュールの進行に伴って徐々に反応が変化するニューロンの内、約2/3は徐々に反応が大きくなるニューロンであったが(Shidara & Richmond 2002)、今回記録した吻側部では、約6割が徐々に反応が小さくなるタイプであり、情報処理に違いがある可能性が示唆された。

③報酬スケジュール遂行時の前部島皮質の

ニューロン活動を解析した結果、前部島皮質には報酬投与に反応するニューロン、すべてのスケジュール状態で反応するニューロンに加えて、報酬が得られるかもしれないという期待に関する情報を持つニューロンが多くあり、特に、報酬がいつ得られるかわからない条件では常に反応するニューロンがあった。これは、前部島皮質ニューロンが、報酬獲得が不確実な条件で報酬が得られるかもしれないという可能性の情報を持つということが示唆された。

(3) 行動決定課題遂行時のニューロン活動を調べるために、眼窩前頭皮質から単一ニューロン活動を記録し、行動決定の際に報酬価値と関連した反応を示すニューロンがあるかどうかを解析した。その結果、2つの選択肢の報酬価値の差に比例した反応を示すニューロン群と、報酬価値の差が無いときによく反応するニューロン群が存在することが明らかになった。

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9件)

- (1) Inaba K, Mizuhiki T, Setogawa T, Toda K, Richmond BJ, Shidara M. Neurons in Monkey Dorsal Raphe Nucleus Code Beginning and Progress of Step-by-Step Schedule, Reward Expectation, and Amount of Reward Outcome in the Reward Schedule Task. *Journal of Neuroscience*, vol. 33, 2013, 3477-3491. 査読有 DOI: 10.1523/JNEUROSCI.4388-12.2013
- (2) Mizuhiki T, Richmond BJ, Shidara M. Encoding of reward expectation by monkey anterior insular neurons. *Journal of Neurophysiology*, vol. 107, 2012, 2996-3007. 査読有 DOI: 10.1152/jn.00282.2011
- (3) Toda K, Sugase-Miyamoto Y, Mizuhiki T, Inaba K, Richmond BJ, Shidara M. Differential encoding of factors influencing predicted reward value in monkey rostral anterior cingulate cortex. *PLoS One* vol. 7(1), 2012, e30190. 査読有 DOI: 10.1371/journal.pone.0030190
- (4) Mizuhiki T, Inaba K, Setogawa T, Toda K, Ozaki S, Shidara M. The influence of passband limitation on the waveform of extracellular action potential. *Neuroscience Research* vol. 72(3), 2012, 214-220. 査読有 DOI: 10.1016/j.neures.2011.12.004

[学会発表] (計 24 件)

- (1) Setogawa T, Mizuhiki T, Inaba K, Akizawa F, Shidara M. Single neuronal activity in the rhesus monkey orbitofrontal cortex related to reward value processing during the decision-making schedule task. 42nd Annual meeting of the Society for Neuroscience, 2012年10月16日, Ernest N. Morial Convention Center, New Orleans (USA).
- (2) Setogawa T, Mizuhiki T, Inaba K, Shidara M. Comparison of monkeys' behavioral performances in reward schedule task with and without decision-making by temporal discounting model of reward value. 41st Annual meeting of the Society for Neuroscience, 2011年11月14日, Washington DC Convention center, Washington DC (USA).
- (3) Inaba K, Mizuhiki T, Setogawa T, Toda K, Shidara M. Neurons in monkey dorsal raphe nucleus showed activity related to unreward/reward expectancy and acquisition, and reward uncertainty in the reward schedule task. 41st Annual meeting of the Society for Neuroscience, 2011年11月13日, Washington DC Convention center, Washington DC (USA).
- (4) Setogawa T, Mizuhiki T, Inaba K, Shidara M. The behavioral performance of the rhesus monkey during reward schedule task with and without decision-making. 40th Annual meeting of the Society for Neuroscience, 2010年11月17日, San Diego Convention center, San Diego (USA).

[その他]

ホームページ等

<http://www.md.tsukuba.ac.jp/basic-med/physiology/sys-neurosci/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

設楽 宗孝 (SHIDARA MUNETAKA)
筑波大学・医学医療系・教授
研究者番号：10357189

(2) 研究分担者

松本 有央 (MATSUMOTO NARIHISA)
独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員
研究者番号：00392663
肥後 範行 (HIGO NORIYUKI)

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号：80357839

(3) 連携研究者

菅生 康子 (SUGASE YASUKO)

独立行政法人産業技術総合研究所・ヒューマンライフテクノロジー研究部門・主任研究員

研究者番号：40357257

水挽 貴至 (MIZUHIKI TAKASHI)

筑波大学・医学医療系・助教

研究者番号：60463824