

平成22年3月31日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19330161  
 研究課題名（和文） 意思決定における知覚と報酬の関係—fMRI・神経細胞記録・計算モデルの統合研究  
 研究課題名（英文） Roles of perception and reward in decision-making: an integrative study using fMRI, single unit recording, and computational models  
 研究代表者  
 奥田 次郎（OKUDA JIRO）  
 京都産業大学・コンピュータ理工学部・准教授  
 研究者番号：80384725

研究成果の概要（和文）：人間や動物の意思決定における脳内の報酬情報処理と刺激知覚処理との関係をヒトの fMRI 実験、実験動物(サル)の神経細胞活動記録、並びに理論計算モデルの3点から検討した。ジュースなどの報酬と条件付けられた視覚刺激の明瞭度を変化させたときに、大脳基底核が明瞭度の高い刺激に対して刺激の入力情報に基づいて報酬予測的な活動を示し、内側前頭皮質が明瞭度の低い刺激に対して知覚判断情報に基づいて報酬予測活動を示すことを明らかにした。本研究の結果は、刺激の知覚的曖昧性に応じて脳内の異なった報酬処理回路が意思決定に寄与することを明らかにするものである。

研究成果の概要（英文）：We investigated roles of stimulus processing and reward information processing in decision-making by using human fMRI experiments, monkey electrophysiology, and computational models. Using random-dot motion stimuli and gabor patch stimuli as reward-predictive stimuli, we found that the basal ganglia predicted rewards based on sensory input information of perceptually salient stimuli and that the medial prefrontal cortex predicted rewards based on discrimination output of ambiguous stimuli, thereby suggesting multiple reward circuits according to multiple stimulus processes in the brain.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
年度			
年度			
総計	13,400,000	4,020,000	17,420,000

研究分野：社会科学

科研費の分科・細目：心理学・実験心理学

キーワード：意思決定、報酬予測、知覚的曖昧性、ドーパミンニューロン、黒質一線条体、内側前頭葉、強化学習モデル、機能的MRI

## 1. 研究開始当初の背景

これまで、特定の刺激や反応に対する報酬の経験が意思決定に際して決定的な役割を

果たすことを示す実験データや理論計算モデルが多数報告されてきた。しかし、従来の研究で扱われてきた刺激は知覚的に明瞭・完

全なものばかりであり、意思決定の対象となる刺激が明瞭でない場合にその知覚判断と報酬情報がどのように意思決定に関わるかについては不明であった。即ち、知覚的に明瞭な刺激のみを用いた従来の実験・理論の枠組みでは、入力刺激が知覚的に評価され、過去の報酬情報の修飾を受けて反応が選択・出力されるに至る内部情報処理メカニズムは検討されていなかった。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、不明瞭で知覚的に曖昧な刺激を用いることにより、刺激の入力から反応の出力に至る意思決定過程における知覚判断と脳内報酬処理の関係を実験的に検証するとともに、このような系を包括的に説明するより現実的で柔軟な学習・意思決定の理論モデルを提唱することを目的とした。動物種に依存しない包括的な結果を見出すため、ヒトの機能的 fMRI (fMRI) 実験、実験動物 (サル) における神経細胞活動記録、ならびに理論計算モデルの3点を有機的に統合した研究を行なった。

## 3. 研究の方法

### (1) サル神経活動記録

刺激の弁別難易度を実験的に操作することが出来るランダムドットモーション刺激 (ランダムな方向に動く多数のドットのうち右や左の一方向に一致して動くドットがある割合で含まれる刺激) やガボールパッチ刺激 (輝度が正弦波様に空間分布して右や左に傾いた縞模様を形成する刺激) を呈示して、その方向を基に被験者にジュース報酬を予測させる課題を開発した。実験ではまず初めに、方向が自明な刺激 (全てのドットが右か左の一方向に動く 100% コヒーレンスのモーション刺激あるいは格子縞の山と谷の輝度差が最大であるガボールパッチ) を用いて刺激の方向とジュース報酬の条件付け学習を行った。その後、各被験者毎に方向弁別正答率が 90% (明瞭刺激) あるいは 60% (曖昧刺激) となるようにコヒーレンスや輝度差を操作した刺激を呈示し、これら刺激に対する報酬弁別的な脳活動を記録した。サル単一神経細胞活動記録の実験では特に、報酬関連活動を生成する領域であることが先行研究から明らかになっている中脳黒質のドーパミンニューロンに焦点を絞り、ニホンザル 2 頭から課題遂行中の神経活動を記録した。

### (2) ヒト fMRI 計測

サルに対して行なった上記課題をヒト fMRI 計測用にアレンジし、ほぼ同じ実験パラダイムにて健常人の全脳から fMRI 計測を行った。ランダムドットモーションを用いた実験とガボールパッチを用いた実験を別々に

行い、それぞれ 30 名程度の被験者が実験に参加した。MRI 装置内でサルと同様のジュース報酬を呈示するチューブシステムを開発することから開始し、同じ実験系で種を超えた結果の検討が行えるように考慮した。

### (3) 理論計算モデル

従来提唱されてきた報酬予測誤差学習の計算モデルに刺激知覚弁別の曖昧性 (90% や 60%) のファクターを加味したモデルを構築、実験により得られた脳活動の時系列とモデル計算から推定される報酬値ならびに報酬予測誤差値の変遷との相関を検討した。特に、ガボールパッチを用いた fMRI 実験において報酬予測誤差を引き起こす試行の割合を最大の 50% とし、計算モデルとの相関を効率的に評価できるよう考慮した。

## 4. 研究成果

### (1) サル神経活動記録

中脳黒質より記録されたドーパミンニューロンの活動は、刺激呈示直後と、これより数百ミリ秒後に遅れて生じる活動との 2 成分からなり、前者は刺激の種類によらない実験全体の平均的な報酬期待値を、後者は刺激の方向やコヒーレンスによって決まる報酬確率をそれぞれ反映することが明らかとなった (Nomoto et al., Society for Neuroscience 2007)。すなわちドーパミンニューロンは刺激検知 (第 1 成分) から刺激同定 (第 2 成分) にかけて、各時点での感覚情報を反映した報酬情報を段階的に生成することが示唆される。さらに、第 2 成分はサルの知覚判断ではなく入力刺激の方向に依存することもわかった (Nomoto et al., Society for Neuroscience 2008)。

### (2) ヒト fMRI 計測

ヒト fMRI 実験からは、明瞭な刺激に対して報酬/非報酬を弁別する脳活動が大脳基底核 (尾状核頭部) において見いだされ、曖昧な刺激に対する報酬弁別活動は基底核ではなく内側前頭葉皮質に見いだされた (山本他, 神経回路学会誌 2008)。さらに、被験者が刺激方向の弁別を誤った試行、すなわち与えられた刺激の方向と被験者が判断した方向とに乖離が生じる試行の解析から、基底核の報酬活動は与えられた刺激の方向のみに依存し、逆に内側前頭葉皮質の活動は被験者の知覚判断結果のみに依存することがわかった (Yamamoto et al., Society for Neuroscience 2007)。従って脳内には刺激の感覚情報処理の段階に応じて異なる少なくとも 2 つの報酬情報処理ルートが存在することが示唆される。大脳基底核は刺激の感覚入力情報を受けて自然界の報酬構造を忠実に反映した報酬情報処理を行うのに対し、内側前頭葉皮質

は感覚入力に伴う基底核の報酬情報が十分でない場合に自己の刺激弁別結果を基にした補足的な報酬情報処理を進めることが考えられる。

### (3) 理論計算モデル

計算モデルから算出した報酬予測誤差の理論値の試行ごとの変遷と相関する脳活動を、ガボールパッチを用いた fMRI 実験データについて検討した結果、中脳にのみ報酬予測誤差脳活動と理論計算値とが有意に相関する領域が見つかった。さらに、この中脳領域の活動は、刺激知覚弁別の曖昧性を加味したモデルにおいて、これを加味しない従来どおりのモデルよりも有意に強い相関を示した(竹村他, 信学技報 2007; 日本神経科学大会 2007)。また、このモデルとの相関は課題セッションの初期から強く見出されるものであり、曖昧な刺激と報酬との連合が課題を通じて徐々に学習されて生じた結果ではないと考えられた。このことは即ち、中脳で行なわれる報酬予測誤差の計算には、実際には経験していない曖昧な刺激に対しても、これまで経験した刺激の報酬価を知覚の曖昧性によって適切に割り引いて計算するという柔軟な機構が備わっていることを示唆するものである。

以上まとめると、サル・ヒト・計算モデルを併用した本研究の一連の結果は、感覚皮質における刺激入力情報が中脳-基底核の確率依存的な報酬情報へと自動的に変換される一方、時間をかけて行われる皮質での知覚判断(感覚情報の統合)が高次連合情報に基づいた報酬情報を独立に生成するという、2つの独立な処理ルートの存在を示唆する。この2つのルートは、計算論研究から示唆されてきた仮想的な2つの学習アルゴリズム: モデルフリー学習(報酬予測誤差のみに基づく自動的な価値更新)とモデルベース学習(複雑なモデルを介した熟慮的な価値計算)の神経基盤にそれぞれ対応するものと考えられる。今後この結果を発展させ、最終的に1つの出力を得る意思決定過程における両者の機能的な役割や、皮質と基底核・中脳の間でどのように情報が統合されて意思決定へ至るのか、時空間的な脳領野間情報処理を明らかにしてゆくことが更なる課題である。

### 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16件)

- (1) Manami Yamamoto, Xiaochuan Pan, Kensaku Nomoto, Masamichi Sakagami. Multiple neural circuits in

value-based decision-making. *Attention and Performance XXII*, in press (2010) 【査読有】

- (2) 坂上雅道, 山本愛実. 意思決定の脳メカニズム-顕在的判断と潜在的判断-. *科学哲学* 42-2, 29-40 (2009) 【査読無】
- (3) 坂上雅道. 意思決定に関わる2つの神経回路. *計測と制御* 48(1), 4-10 (2009) 【査読有】
- (4) Xiaochuan Pan, Kosuke Sawa, Ichiro Tsuda, Minoru Tsukada, Masamichi Sakagami. Reward prediction based on stimulus categorization in primate lateral prefrontal cortex. *Nature Neuroscience* 11(6), 703-712 (2008) 【査読有】
- (5) 奥田次郎. 未来への予見に携わる脳神経ネットワーク. *玉川大学脳科学研究所紀要* 1, 13-23 (2008) 【査読有】
- (6) 吉田岳彦, 伊藤真, 森村哲郎, 鮫島和行, 奥田次郎, 吉本潤一郎, 銅谷賢治. 遅延を伴う確率的報酬獲得課題におけるヒトの意思決定に関する研究. *情報処理学会研究報告. BIO, バイオ情報学* 58, 67-70 (2008) 【査読無】
- (7) 山本愛実, 奥田次郎, 鮫島和行, 坂上雅道. 脳内報酬情報処理に及ぼす知覚的曖昧性の影響. *日本神経回路学会誌*. 15(1), 3-17 (2008) 【査読有】
- (8) Jiro Okuda. Prospection or projection: Neurobiological basis of stimulus-independent mental traveling. *Behavioral and Brain Sciences* 30(3), 328-329 (2007) 【査読有】
- (9) 竹村浩昌, 奥田次郎, 鮫島和行, 坂上雅道. 知覚確率が報酬予測誤差に及ぼす影響. *電子情報通信学会技術研究報告*. 107(410), 69-74 (2007) 【査読無】

[学会発表] (計47件)

- (1) Masamichi Sakagami. Signal interaction between prefrontal cortex and striatum in reward prediction. Batsheva Seminar on Reward and Decision Making in the Brain, 2010年2月16日, Hebrew University, Jerusalem
- (2) Manami Yamamoto, Noriyuki Hayamizu, Tetsuya Matsuda, Jiro Okuda, Masamichi Sakagami. Brain activity for monetary gain and loss prediction based on salient and uncertain perception. 39th Annual Meeting of Society for Neuroscience, 2009年10月17日, McCormick Place, Chicago
- (3) 坂上雅道. 意思決定と人間の自発性.

- シンポジウム：自発性の発現・物質プロセス研究会主催，2009年10月12日，東京大学山上会館
- (4) Masamichi Sakagami. Reward inference by prefrontal neurons. 第32回日本神経科学会 Symposium: The role of prefrontal cortex in context-dependent adjustment of executive control, 2009年9月18日，名古屋国際会議場
- (5) Manami Yamamoto, Madoka Matsumoto, Tetsuya Matsuda, Jiro Okuda, Masamichi Sakagami. Brain activity for monetary loss prediction based on ambiguous perception. 第32回日本神経科学会，2009年9月16日，名古屋国際会議場
- (6) Takehiko Yoshida, Makoto Ito, Tetsuro Morimura, Kazuyuki Samejima, Jiro Okuda, Junichiro Yoshimoto, Kenji Doya. Brain mechanisms for evaluating probabilistic and delayed rewards. 第32回日本神経科学会，2009年9月16日，名古屋国際会議場
- (7) Jiro Okuda. Memory and prospection of the brain: What can cognitive brain science suggest to inductive game theory and decision-making? Logic, Game Theory, and Social Choice 6, 2009年8月29日，筑波大学
- (8) 坂上雅道. 意思決定の神経メカニズム. 実験社会学サマースクール 2009, 2009年8月29日，大阪大学
- (9) Masamichi Sakagami. Multiple brain circuits for decision-making. IUPS 36th World Congress Symposium: Perspective of Decision Neuroscience: beyond the Biological Approach of Brain Science, 2009年7月30日，Kyoto International Conference Center
- (10) Jiro Okuda. Prediction, prospection, and planning: Some basic concepts on future-oriented human cognition and their neural implementations. TF4E Workshop 2009, 2009年3月27日，Kyoto Sangyo University, Kyoto
- (11) Masamichi Sakagami. Reward inference by monkey prefrontal and caudate neurons. Gambling, Reward, Decision-Making, and The Prefrontal Cortex, 2009年3月1日，Kyoto University, Kyoto
- (12) Masamichi Sakagami. Multiple decisions in the brain. Neuro Social Science Workshop, 2009年2月23日，千里阪急ホテル，大阪
- (13) Kazuyuki Samejima. Reward-based action selection and cortico-basal ganglia network. Neuro Social Science Workshop, 2009年2月23日，千里阪急ホテル，大阪
- (14) 奥田次郎. 経験 - 知覚 - 予測を結ぶ脳機構. ダイナミックブレイン&創造性メカニズム研究会，2008年10月31日，玉川大学，東京
- (15) 坂上雅道. 意思決定の脳メカニズム - 顕在的判断と潜在的判断 -. 日本科学哲学会第41回(2008年)大会 シンポジウム「脳科学と社会」，2008年10月19日，福岡大学，福岡
- (16) Masamichi Sakagami. Influences of stimulus discriminability and choice bias on dopamine activity. Workshop on Open Problems in the Neuro-science of Decision Making, 2008年10月16日，Okinawa Institute of Science and Technology, Okinawa
- (17) 奥田次郎. 大学教育と脳科学 - 経済学教育と報酬系の神経経済研究の事例から. 日本心理学会第72回大会シンポジウム，2008年9月20日，北海道大学，札幌
- (18) 坂上雅道. ヒトにおける報酬関連脳活動と知覚的曖昧性. 日本動物心理学会第68回大会，2008年9月13日，常磐大学，茨城
- (19) Masamichi Sakagami. Multiple neural circuits for reward prediction. 高麗大学学際的国際シンポジウム “Brain and Society”，2008年7月29日，Soeul, Korea
- (20) Masamichi Sakagami. Cortical systems & affective learning. International Symposium Attention & Performance XXIII Decision Making, 2008年7月14日，Stowe, Vermont
- (21) Xiaochan Pan, Masamichi Sakagami. Dissociable roles of lateral prefrontal cortex and striatum for reward prediction. 第31回日本神経科学大会，2008年7月11日，東京国際フォーラム，東京
- (22) Kensaku Nomoto, Wolfram Schultz, Takeo Watanabe, Masamichi Sakagami. Temporal evolution of reward prediction in dopamine neurons during decision-making. 第31回日本神経科学大会，2008年7月10日，東京国際フォーラム，東京
- (23) Masamichi Sakagami. How does brain create new information in unexperienced setting? International Symposium on Reward and Decision Making in Cortico-Basal Ganglia

- Networks, 2008年7月1日, UCLA Conference Center, Lake Arrowhead
- (24) 吉田岳彦, 伊藤真, 森村哲郎, 鮫島和行, 奥田次郎, 吉本潤一郎, 銅谷賢治. 遅延を伴う確率的報酬獲得課題におけるヒトの意思決定に関する研究. 電子情報通信学会 バイオ情報学研究会, 2008年6月26日, 琉球大学, 沖縄
- (25) Jiro Okuda, Nobuhito Abe, Maki Suzuki, Toshikatsu Fujii. Activity in the medial temporal lobes predicts realization of intentions for future actions. 14th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, 2008年6月19日, Melbourne Convention Center, Melbourne
- (26) Jiro Okuda, Masataka Watanabe, Maki Suzuki, Nobuhito Abe, Minoru Tsukada, Toshikatsu Fujii. Roles of the medial frontal cortex and hippocampus in memory-guided future planning. 15th Annual Meeting of the Cognitive Neuroscience Society, 2008年4月15日, Hyatt Regency Hotel, San Francisco
- (27) Jiro Okuda. Neuroscience of the reward system. Workshop on Experimental Economics, Economics Education and Neuroeconomics, 2008年2月17日, Kyoto Sangyo University, Kyoto
- (28) 竹村浩昌, 奥田次郎, 鮫島和行, 坂上雅道. 知覚確率が報酬予測誤差に及ぼす影響. ニューロコンピューティング研究会, 2007年12月22日, 名古屋大学, 名古屋
- (29) Masamichi Sakagami. Multiple brain circuits for reward prediction. Tamagawa-Caltech Joint Workshop "Neural Mechanisms of the Social Mind", 2007年12月6日, Tamagawa University, Tokyo
- (30) Kensaku Nomoto, Wolfram Schultz, Takeo Watanabe, Masamichi Sakagami. Dopamine responses to complex reward-predicting stimuli. 37th Annual Meeting of Society for Neuroscience, 2007年11月6日, San Diego Convention Center, San Diego
- (31) Manami Yamamoto, Jiro Okuda, Kazuyuki Samejima, Masamichi Sakagami. Differential reward prediction on salient and uncertain perception as revealed by random dot motion stimuli and fMRI. 37th Annual Meeting of Society for Neuroscience, 2007年11月4日, San Diego Convention Center, San Diego
- (32) Kazuyuki Samejima. Action value in the

- striatum and reinforcement learning model of cortico-basal ganglia network. 第30回日本神経科学大会, 2007年9月12日, パシフィコ横浜, 横浜
- (33) Hiromasa Takemura, Jiro Okuda, Kazuyuki Samejima, Masamichi Sakagami. Perceptual ambiguity by luminance contrast and reward predictive activity in the brain. 第30回日本神経科学大会, 2007年9月10日, パシフィコ横浜, 横浜
- (34) Manami Yamamoto, Jiro Okuda, Kazuyuki Samejima, Masamichi Sakagami. Brain activity for reward prediction on ambiguous perception. 第30回日本神経科学大会, 2007年9月10日, パシフィコ横浜, 横浜
- (35) Kensaku Nomoto, Wolfram Schultz, Takeo Watanabe, Masamichi Sakagami. Dopamine responses to complex reward-predicting stimuli. 第30回日本神経科学大会, 2007年9月10日, パシフィコ横浜, 横浜

〔図書〕(計2件)

- (1) Bernard Balleine, Kenji Doya, John O'Doherty, Masamichi Sakagami. Reward and Decision Making in Corticobasal Ganglia Networks. Blackwell (2007) 300頁

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

奥田 次郎 (OKUDA JIRO)  
京都産業大学・コンピュータ理工学部・  
准教授  
研究者番号: 80384725

### (2) 研究分担者

坂上 雅道 (SAKAGAMI MASAMICHI)  
玉川大学・脳科学研究所・教授  
研究者番号: 10225782  
(H20→H21: 連携研究者)  
鮫島 和行 (SAMEJIMA KAZUYUKI)  
玉川大学・脳科学研究所・准教授  
研究者番号: 30395131  
(H19→H20: 連携研究者)