



玉川大学脳科学研究所

## 目標達成までの収益予測を計算する脳のしくみを発見

～脳のドーパミン細胞の活動を記録～

- 米国科学雑誌に論文を発表 -

玉川大学脳科学研究所（町田市玉川学園 6-1-1 所長：木村實）の榎本一紀（えのもとかずき）研究員と木村實（きむらみのる）教授らは、目標達成のために意志決定や行動をする上で、脳のドーパミン細胞の放電活動が、将来得られると予測される報酬の価値を計算していることを世界で初めて実証しました。意志決定の脳の作動原理解明につながる成果です。この成果は、米国科学アカデミー紀要（Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America）オンライン版に2011年9月6日（日本時間）に掲載されます。

### 【掲載論文名】

Dopamine neurons learn to encode the long-term value of multiple future rewards  
（ドーパミン細胞の活動は目標達成に向けて予測される報酬価値を表現する）

### 1. 研究の概要

試験問題に回答する場合には、いきなり第一問から取り組むのではなく、すべての問いに目を通し、まず容易な問いから回答を仕上げて余裕をもった上で難解な問題に挑戦します。テニスやサッカーなどの試合においては、経験の浅いプレーヤーは最初から全力で戦い、試合の途中で息切れがしてしまうこともあります。経験を積んだプレーヤーは、勝負どころである試合の中盤で優位に立つように配分を考えて戦います。他にも、囲碁や将棋における現在の局面から最終的に勝利するための戦略決定や、株取引での将来予測、ダイエット中の目標設定と生活改善計画など、私たちは、目標達成に向けて様々な選択肢を選ぶ場合に、予想される報酬（食料・金銭、名誉や達成感など）を考えて意志決定をしています。「朝三暮四」の故事にあるように、目先の利益だけにとらわれて振る舞えば、将来大きな利益を得ることはできません。ゲームに勝ち、富を築き、またダイエットに成功するためにも、目標に照らし合わせて二手先、三手先に有利な行動を選ぶことが必要です。

中脳にあるドーパミン細胞は、選択肢のもつ価値（報酬の量と確率）の予測と、報酬予測誤差（選択して得られた実際の報酬と予測との差）を放電活動によって表現することが知られています。しかし、様々な行動を組み立てて目標を達成する場合に、途中で得られる報酬を予測するかどうかは分っていませんでした。私たちは、複数の行動を行なって報酬を得る過程で、脳のドーパミン細胞が、将来得られると予測される報酬の価値を計算していることを見出しました。この研究によって、強化学習理論（試行錯誤で目

標を達成する際に、進歩・後退する行動の価値を上げ下げし、価値の合計を最大にする目標を実現する)の最も基本的な役割を、脳のドーパミン細胞が担っていることが立証されました。これは意志決定の脳の作動原理解明につながる成果です。

<例1> 受験で良い結果を得るための解答順の決め方

## 受験で良い結果を得るための解答順の決め方



- 問題は5問あり、第3問が解き易く、第1問は難解

<例2> 朝三暮四

### 朝三暮四 (ちょうさんぼし)

目先の違いにとらわれて、  
全体のことに気づかないこと。



宋の国に狙公という人がいた。猿を可愛がって群れをなすほど養っていた。サル  
の気持ちを理解することができ、猿も同様に主人の心をつかんでいた。自  
分の家族の食べ物を減らしてまで、猿の食欲を充たしていた。  
ところが急に貧しくなったので、猿に与える餌の茅(どんぐり)を減らすことにした。  
猿たちが自分になつかなくなってしまうのではないかと心配したので、  
まず猿たちを誑かして言った。  
「お前たちにどんぐりをやるのに、朝は三つで暮は四つにする。足りるか」  
すると猿たちは皆立ち上がって怒りだした。そこで狙公は急に言い変えて、  
「それじゃ、朝は四つで暮は三つにしよう。足りるか」と言うと、  
猿たちは皆平伏して喜んだ。

## 2. 研究の内容

複数の選択肢から 1 つの正解を探すために一連の意志決定とボタン押し行動をおこなって、合計 3 回の報酬を得ることを目標とする課題 (図 1) を実験動物である日本ザルに学習させました。この課題では、まず、試行錯誤によって、3 つの選択肢から 1 つの正解を探します (第 1 探索)。選んだ選択肢が正解だった場合は、報酬 (ジュース) が得られますが、不正解だった場合は、報酬は得られず、次のステップ (第 2 探索) で他の 2 つの選択肢から 1 つを選びます。それでも不正解ならば、さらに次のステップ (第 3 探索) で、残った 1 つの選択肢を選びます。一度正解すると、続く 2 回の試行では、同じ選択肢を選ぶことで、2 回続けて報酬が得られます (第 1・第 2 繰り返し試行)。すなわち、第 1 探索では三分の一、第 2 探索では二分の一、第 3 探索と繰り返し試行では、ほぼ 100% の確率で報酬が得られることになります。

この課題を十分学習させた後、脳のドーパミン細胞 (図 2) の放電活動を調べました。各試行開始の合図に対する応答は、第 1 探索から第 3 探索にかけて、報酬確率が上がると共に大きくなりましたが、第 1 繰り返し、第 2 繰り返し試行へと進むと、報酬確率はどちらもほぼ 100% であるにもかかわらず (図 3、点線のプロット)、応答は逆になくなりました (図 3、棒グラフ)。

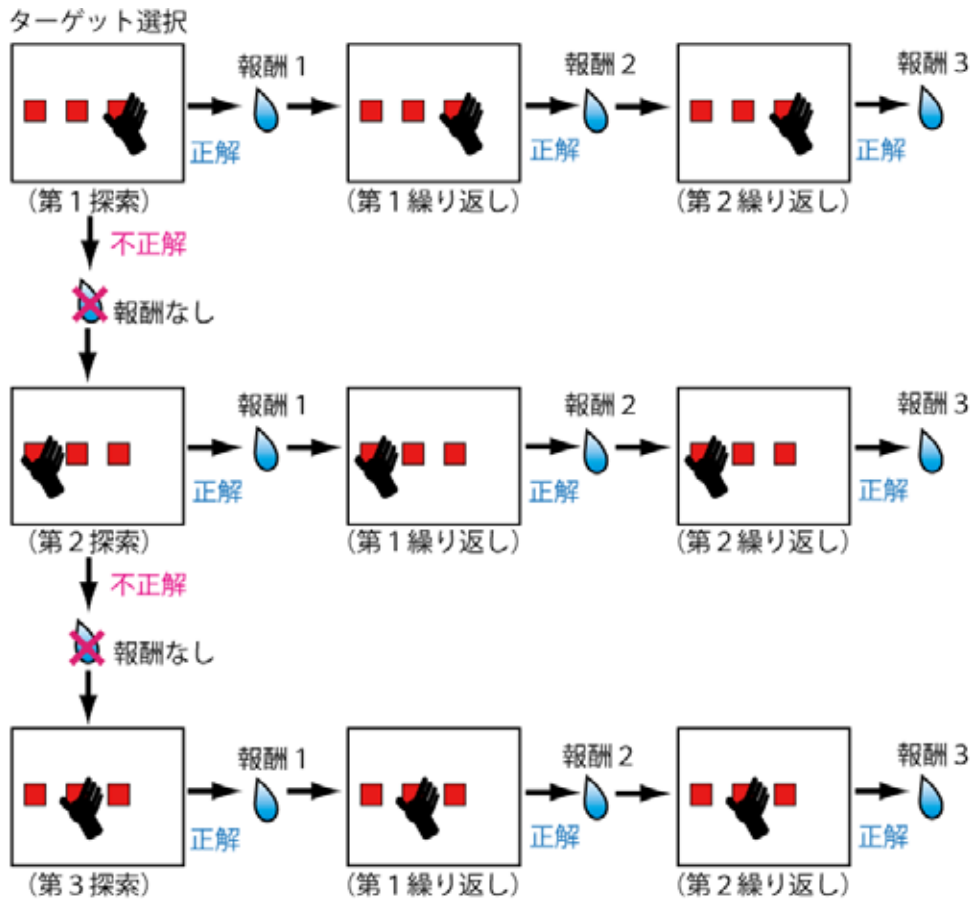
このことは、ドーパミン細胞の応答が、各試行での報酬 1 回分だけの確率 (予測) を表現するのではなく、探索試行で 1 回、繰り返し試行で 2 回、合計 3 回分の報酬の予測を表現していることを示しています。つまり、探索試行では 3 回の総報酬の 1 回分の報酬を得るための確率を、第 1 繰り返し試行ではすでに 1 回分の報酬を得たので残り 2 回分、第 2 繰り返し試行では過去に 2 回報酬を得ているので残り 1 回分の報酬情報が表現されています。したがって、ドーパミン細胞の放電活動は、3 回分の報酬を得るための最初から最後までの一連の試行における価値 (報酬の量と確率) を表現していることが分かりました (図 3、実線のプロット)。また、課題の学習が不十分な状態ではこのような活動は見られないので、探索試行で 1 回、繰り返し試行で 2 回、合計 3 回分の報酬が得られるという長期的な収益予測を、ドーパミン細胞を中心とする脳の神経回路が学習によって獲得したものと考えられます。

## 3. 研究の成果と展望

私たちの研究によって、ドーパミン細胞の活動は、強化学習理論が唱えるように、目標に到達するまでに期待される二手先、三手先の複数の報酬価値を表現することが明らかになりました。この成果は、目先の利益だけを優先するのではなく、長期的な収益予測に基づいて意志決定と行動選択を行うという、意志決定の脳の作動原理解明につながる里程碑となると期待されます。

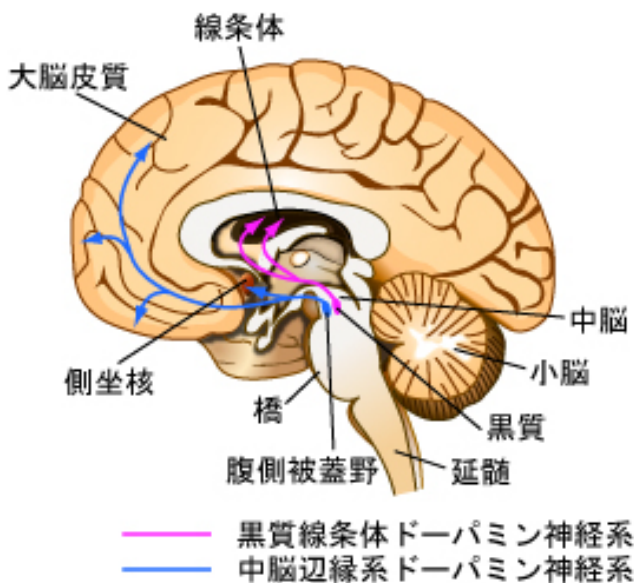
また、たばこ、麻薬などへの依存やギャンブル依存などは、ドーパミン細胞を中心とする脳の報酬系神経回路の異常なはたらきを通して生じると考えられており、今後更に目標達成までの収益予測を計算するドーパミン細胞と脳の報酬系神経回路のメカニズムの理解が進むことによって、薬物やギャンブル依存を含む社会性・社会性行動異常の病態の解明や治療法の開発にもつながる可能性が期待されます。

< 図1 > 合計3回の報酬を得るための意志決定と行動選択課題



3つの選択肢(ターゲットボタン)の中から、試行錯誤で1つの正解を探す(探索試行)。正解ボタンを探し当てると、続く2回の試行(繰り返し試行)で同じボタンを選択することで、合計3回の報酬(ジュース)が得られる。第1探索試行においては三分の一、第2探索試行では二分の一、第3探索試行ではほぼ9割の確率で正解できた。サルはこれらの複数試行を経て、合計3回の報酬を得ることを目標として課題を行う。

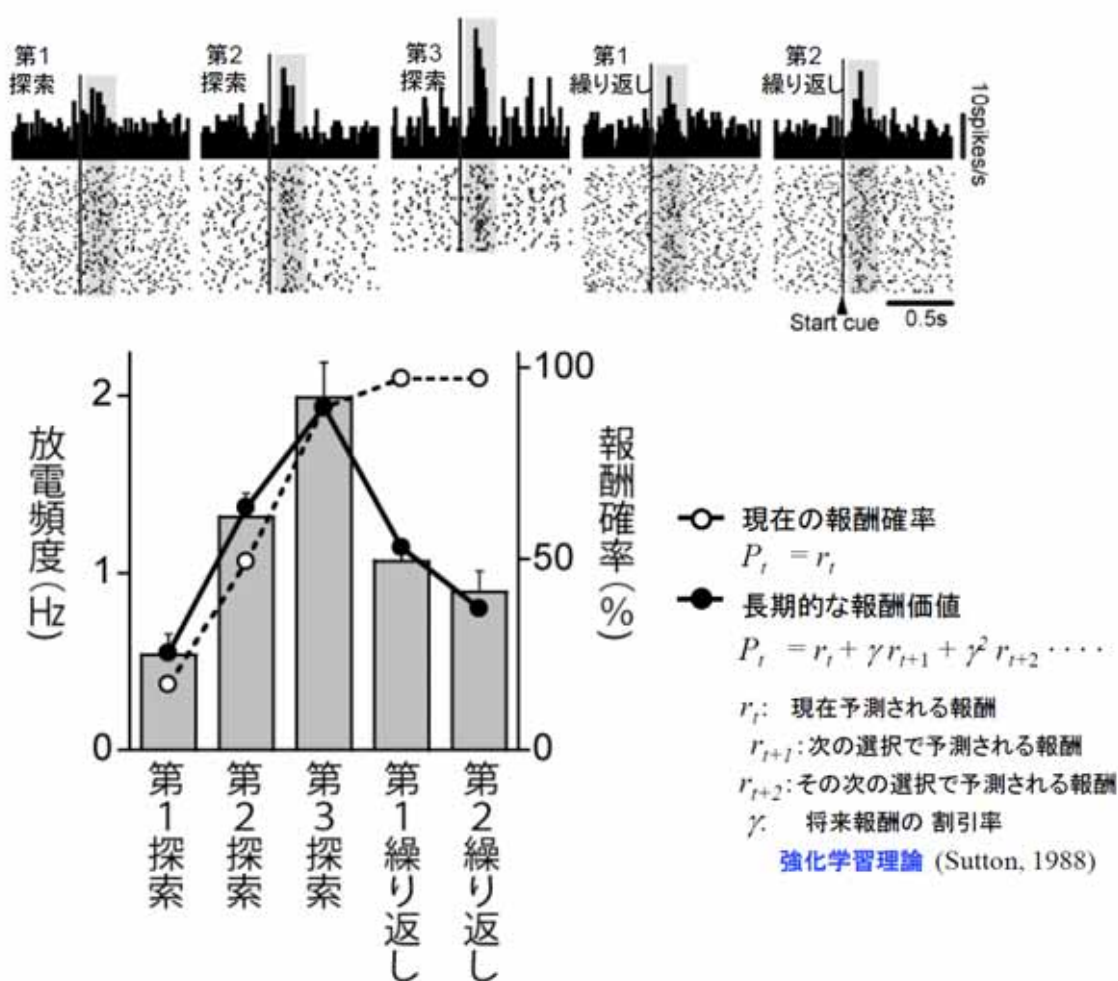
< 図2 > 中脳ドーパミン細胞とその放電活動の記録



脳のドーパミン細胞は中脳と視床下部にあり、線条体や前頭葉、大脳辺縁系などに投射してドーパミンを放出することで、判断や意志決定などの認知機能や運動機能に欠くことのできない調節している。

<図3> ドーパミン細胞の放電活動

## ドーパミン細胞の放電応答



試行開始の合図に対するドーパミン細胞の応答(棒グラフ)。第1～第3探索試行において、報酬を得られる確率が上がるにつれて活動は大きくなるが、ほぼ100%報酬が得られる繰り返し試行における活動は小さかった。このことは、探索試行においては、繰り返し試行の報酬も含んだ将来の3回分の報酬情報を、第1繰り返し試行においては2回分、第2繰り返し試行においては1回分の報酬情報が表現されていることを示す。折れ線グラフは、強化学習理論に基づいて推定した、長期的な報酬価値(実線)と各試行での報酬確率(点線)。

## 4. 謝辞

この研究成果は、文部科学省科学研究費補助金による支援、および脳科学研究戦略推進プログラム「社会的行動を支える脳基盤の計測・支援技術の開発」の一環として得られたものです。

### 【取材に関するお問い合わせ】

玉川学園 教育企画部  
 キャンパス インフォメーション センター  
 TEL: 042-739-8710 FAX: 042-739-8723  
 E-mail: pr@tamagawa.ac.jp  
 〒194-8610 町田市玉川学園 6-1-1

### 【研究内容に関するお問い合わせ】

玉川大学 脳科学研究所  
 所長 木村 實(きむらみのる)  
 研究室: 042-739-8667  
 携帯: 090-5155-3013  
 E-mail: mkimura@lab.tamagawa.ac.jp