

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 30 日現在

機関番号：38005

研究種目：新学術領域研究（研究領域提案型）

研究期間：2011～2015

課題番号：23120007

研究課題名（和文）予測と意思決定の神経回路ダイナミクスの解明

研究課題名（英文）Elucidation of the Neural Circuit Dynamics for Prediction and Decision Making

研究代表者

銅谷 賢治（Doya, Kenji）

沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授

研究者番号：80188846

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 113,200,000円

研究成果の概要（和文）：聴覚仮想ナビゲーション課題を実行中のマウスの頭頂連合野の二光子顕微鏡による記録実験を行い、ニューロン活動から音源位置を推定するベイズデコーダーにより、音が提示されない期間にも音源位置の予測が更新され、音提示により不確かさが減少するという動的ベイズフィルターを特徴づける振る舞いが確認された。確率報酬による意思決定課題中のラットの線条体ニューロン活動の記録と解析により、背内側線条体に行動価値を表現するニューロンが存在することを明らかにした。また内視鏡型超小型顕微鏡による海馬および線条体の神経活動の光学記録を行い、線条体では報酬予測に応じた活動が条件付学習にともない形成されることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：We performed two-photon imaging of the mouse parietal cortex during an Auditory Virtual Navigation Task. By using Bayesian decoder of the target location from neural activities, we showed that the target location is updated by prediction even during no-sound periods and that the target location is disambiguated during sound presentation, which are the signatures of Dynamic Bayesian Filtering.

We recorded and analyzed the striatal neural activities of rats during a probabilistic reward task and revealed that the many neurons in the dorsomedial striatum encode action values. We also used a miniature endoscope microscope to image the neural activities of the hippocampus and the striatum and showed that reward predictive responses develop in the striatum during learning of conditioned responses.

研究分野：脳科学

キーワード：意思決定 モデルフリー モデルベース 強化学習 ベイズ推定 二光子顕微鏡 大脳基底核 大脳皮質

1. 研究開始当初の背景

人の意思決定と行動には、直感的、習慣的な要素と、予測的、計画的な要素があることが知られているが、近年それらを「モデルフリー」、「モデルベース」の計算方式として捉える可能性が試みられている (Doya, 1999; Daw et al., 2005)。意思決定の理論では、行動の各選択肢の与える価値をそれぞれ評価し、最大の価値が期待される行動を選択するというのが基本である。モデルフリーの手法では、各行動に対する価値は単純に過去にその行動を取った時に経験した報酬や罰の平均として記憶、更新される。一方モデルベースの手法では、ある行動を取った場合に何が起こるかを短期的、長期的に予測し、その予測された状況で得られる報酬や罰をもとに行動の価値を評価し選択する。

モデルベースの意思決定では、候補となる行動を取った場合の状況の変化を予測する「脳内シミュレーション」の機能が決定的に重要であり、これが脳のどのような仕組みにより可能になっているかは脳科学の重要な問題である。これまでの研究により、行動の結果を予測する脳内モデルが、前頭前野や、そこと相互連絡を持つ小脳の一部に存在することが示唆されているが (Doya, 1999, 2007)、それがどのような神経回路や物質の働きにより可能になっているかはいまだ明らかでない。

2. 研究の目的

本計画研究は「予測と意思決定」新学術領域研究の中核を担う研究として、領域の3つの研究項目：

A01: 動物や人間は、モデルフリー、モデルベースの意思決定と行動学習を、どのように使い分け、組み合わせているのか？

A02: 脳内シミュレーション、価値評価、行動選択は、ニューロン回路のどのようなダイナミクスにより実現されているのか？

A03: 先読みの深さ、報酬と罰の重みづけなどのパラメータはいかに制御されているのか？

に包括的に取り組む。

特に A02 に関して、行動中のマウスの脳の局所回路の多数のニューロンの活動を同時記録することにより、脳内シミュレーションの神経回路機構の実体を明らかにし、予測と意思決定の脳機構の研究に新たなブレークスルーをもたらすことをめざす。

3. 研究の方法

頭部を固定したマウスがトラックボール上で歩行運動が可能な装置を作製し、意思決定課題を実行中の脳内の特定部位の多数のニューロンの活動を二光子顕微鏡により同時計測し、感覚情報の識別、仮想的な行動の結果の予測、その報酬価値の評価の動的なプロセスを明らかにする。行動課題としては仮想音源到達課題を新たに開発し、行動結果の

モデルベースの予測による意思決定と、単純な行動-報酬のモデルフリーの連合による意思決定が行われる条件を明らかにする。記録部位としては、まず頭頂皮質、運動皮質、前頭皮質など脳表面に位置した部位からスタートし、後に海馬、線条体など脳深部の神経活動を捉えるための手術法と光学系を開発する。

4. 研究成果

1) 脳内シミュレーション過程の可視化

前進すると音源位置が接近し、音源に最接近した時点でリッキングを行うと水報酬が得られるという「聴覚仮想ナビゲーション課題」を実行中のマウスの、頭頂連合野および第2次視覚野のニューロン活動の二光子顕微鏡による記録実験とデータ解析を行った。

ニューロン活動データから音源位置を推定するベイズデコーダーにより、音が提示されない期間にも音源位置の予測が更新され、音提示によりその不確かさが減少するという、動的ベイズフィルターを特徴づける振る舞いが確認された。この結果を論文にまとめ投稿した。

2) モデルベースとモデルフリーの意思決定の神経回路

確率報酬による意思決定課題中のラットの行動系列は有限状態マシンとしてモデル化し予測できること、その特定の状態遷移に関わるニューロンが背内側線条体に存在することを明らかにし、論文を出版した。

内視鏡型超小型顕微鏡による海馬および線条体の神経活動の光学記録とデータ解析を行い、海馬には場所だけでなく歩行の停止に関連する活動成分が強く見られること、線条体では報酬予測に応じた活動が条件付学習にともない形成されることを明らかにした。

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 20 件)

① Caligiore D, Pezzulo G, Baldassarre G, Bostan A. C., Strick P. L., Doya K, Helmich R. C., Dirks M, Houk J, Jörntell H, Lago-Rodriguez A, Galea J. M., Miall R. C., Popa T, Kishore A, Verschure P. F. M. J., Zucca R, Herreros I (2016). Consensus paper: Towards a systems-level view of cerebellar function: the interplay between cerebellum, basal ganglia, and cortex, *The Cerebellum*, 15, 1-27 (査読有). DOI: 10.1007/s12311-016-0763-3

② Balleine B, Dezfouli A, Ito M, Doya K (2015). Hierarchical control of

goal-directed action in the cortical-basal ganglia network, *Science Direct*, 5, 1-7 (査読有).
DOI:10.1016/j.cobeha.2015.06.001

③Elfwing S, Uchibe E, [Doya K](#) (2015). Expected energy-based restricted boltzmann machine for classification, *Neural Networks*, 64, 29-38 (査読有).
DOI: 10.1016/j.neunet.2014.09.006

④船水章大, [銅谷賢治](#) (2015). 予測 大脳新皮質のベイジアンフィルタ仮説, *生体の科学*, 66, 33-37 (査読無).
DOI:http://dx.doi.org/10.11477/mf.2425200100

⑤Funamizu A, Ito M, [Doya K](#), Kanzaki R, Takahashi H (2015). Condition interference in rats performing a choice task with switched variable- and fixed-reward conditions, *Frontiers in Neuroscience*, 9, 27 (査読有).
DOI:10.3389/fnins.2015.00027. eCollection 2015.

⑥Ito M, [Doya K](#) (2015). Parallel Representation of value-based and finite state-based strategies in the ventral and dorsal striatum, *PLoS Computational Biology*, 11, e1004540 (査読有).
DOI: 10.1371/journal.pcbi.1004540

⑦Ito M, [Doya K](#) (2015). Distinct neural representation in the dorsolateral, dorsomedial, and ventral parts of the striatum during fixed- and free-choice tasks, *Journal of Neuroscience*, 35, 3499-3514 (査読有).
DOI:10.1523/JNEUROSCI.1962-14.2015.

⑧Nakano T, Otsuka M, Yoshimoto J, [Doya K](#) (2015). A spiking neural network model of model-free reinforcement learning with high-dimensional sensory input and perceptual ambiguity, *PLoS One*, 10, e115620 (査読有).
DOI: 10.1371/journal.pone.0115620

⑨宮崎佳代子, 宮崎勝彦, [銅谷賢治](#) (2015). 報酬のための辛抱強さを調節するセロトニンの役割, *生体の科学*, 66, 38-43 (査読無).
DOI:http://dx.doi.org/10.11477/mf.2425200101

⑩Elfwing S, [Doya K](#) (2014). Emergence of polymorphic mating strategies in robot colonies, *PLoS One*, 9, e93622 (査読有).
DOI: 10.1371/journal.pone.0093622

⑪Miyzaki Kayoko W., Miyazaki K, Tanaka F. K., Yamanaka A, Takahashi A, Tabuchi S, [Doya K](#) (2014). Optogenetic activation of dorsal raphe serotonin neurons enhances patience for future rewards, *Current Biology*, 24, 2033-2040 (査読有).
DOI: 10.1016/j.cub.2014.07.041

⑫銅谷賢治 (2013). 脳内シミュレーションと意志決定の神経回路, *生体の科学*, 64, 297-300 (査読無).
DOI:http://dx.doi.org/10.11477/mf.2425101458

⑬Elfwing S, Uchibe E, [Doya K](#) (2013). Scaled free-energy based reinforcement learning for robust and efficient learning in high-dimensional state spaces, *Frontiers in Neuroinformatics*, 7, 3 (査読無).
DOI:10.3389/fnbot.2013.00003

⑭Kinjo K, Uchibe E, [Doya K](#) (2013). Evaluation of linearly solvable markov decision process with dynamic model learning in a mobile robot navigation task, *Frontiers in Neuroinformatics*, 7, 7 (査読有).
DOI: 10.3389/fnbot.2013.00007

⑮Nakano T, Yoshimoto J, [Doya K](#) (2013). A model-based prediction of the calcium responses in the striatal synaptic spines depending on the timing of cortical and dopaminergic inputs and post-synaptic spikes, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 7, 119 (査読有).
DOI: 10.3389/fncom.2013.00119

⑯吉本潤一郎, 伊藤真, [銅谷賢治](#) (2013). リレー解説: 強化学習の最近の発展 (第10回: 脳の意思決定機構と強化学習), *計測と制御*, 5, 749-754 (査読有).
URL:http://www.sice.or.jp/org/journal/moku52-08.html

⑰Doya K, Shadlen M N. (2012). Decision making, *Current Opinion in Neurobiology*, 22, 911-913 (査読無).
DOI:10.1016/j.conb.2012.10.003

⑱Funamizu A, Ito M, [Doya K](#), Kanzaki R, Takahashi H (2012). Uncertainty in action-value estimation affects both action choice and learning rate of the choice behaviors of rats, *European Journal of Neuroscience*, 35, 1180-1189 (査読有).
DOI:10.1111/j.1460-9568.2012.08025.x.

⑱Miyazaki Kayoko W., Miyazaki K, Doya K (2012). Activation of dorsal raphe serotonin neurons is necessary for waiting for delayed rewards, Journal of Neuroscience, 32, 10451-10457 (査読有). DOI:10.1523/JNEUROSCI.0915-12.2012

⑳Ito M, Doya K (2011). Multiple representations and algorithms for reinforcement learning in the cortico-basal ganglia circuit, Current Opinion in Neurobiology, 21, 368-373 (査読有). DOI: 10.1016/j.conb.2011.04.001

[学会発表] (計 38 件)

①船水章大, 後頭頂葉におけるモデルベース意思決定時の神経表現, 第 54 回日本生体医工学会大会, 2015. 5. 7, 名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市

② Doya K, Neural implementation of mental simulation, The 5th International conference on Cognitive Neurodynamics, 2015. 6. 5, Sanya, China

③Ito M, Doya K, Neural representations of memory-based and value-based decision strategies in the cortico-basal ganglia loops, Neuroscience 2015-38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2015. 7. 28, Kobe International Conference Center, Kobe, Hyogo

④Funamizu A, Kuhn B, Doya K, Action-dependent state prediction in mouse parietal cortex during an auditory virtual navigation task, Neuroscience2015-38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2015. 7. 29, Kobe International Conference Center, Kobe, Hyogo

⑤Yoshizawa T, Ito M, Doya K, The role of the cortico-basal ganglia loops for reward-motivated choice motor behavior, Neuroscience2015- 38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2015. 7. 29, Kobe International Conference Center, Kobe Hyogo

⑥Doya K, Miyazaki Kayoko W, Miyazaki K, Serotonin and the regulation of patience, Neuroscience2015-38th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2015. 7. 30, Kobe International Conference Center, Kobe, Hyogo

⑦銅谷賢治, 行動学習の多層的な表現・アルゴリズムとその制御, 発達神経科学学会第 4 回大会, 2015. 9. 6, 大阪大学, 大阪府吹田市

⑧Doya K, Neuronal mechanism of reward-based Learning and decision, Brain Conference 2015; Joint Conference of KSBNS and KSND, 2015. 9. 11, Korea Brain Research Institute, Daegu, Korea

⑨Funamizu A, Kuhn B, Doya K, Investigating neural implementation of model-based decision making by two-photon microscopy, The 6th FAONS Congress and 11th Biennial Conference of the Chinese Neuroscience Society (CNS), 2015. 9. 22, Wuzhen, China

⑩Ito M, Uncovering representations and algorithms of decision making by model-based analysis of striatal neuron activities, The 6th FAONS Congress and 11th Biennial Conference of the Chinese Neuroscience Society (CNS), 2015. 9. 22, Wuzhen, China

⑪銅谷賢治, モデルベース予測の脳機構, 日本心理学会第 79 回大会, 2015. 9. 23, 名古屋国際会議場, 愛知県名古屋市

⑫ Doya K, Neural circuits and neuromodulations prediction and decision under uncertainty, 7th International Symposium on Optogenetics : Neural Circuits and Neuromodulations, 2015. 12. 4-5, Akio Suzuki Memorial Hall, Tokyo Medical and Dental University, Tokyo

⑬Miyazaki K, Miyazaki Kayoko W, Tanaka K, Yamanaka A, Takahashi A, Doya K, Optogenetic activation of dorsal raphe serotonin neurons enhances patience for future rewards, The 87th Annual Meeting of the Japanese Pharmacological Society, 2014. 3. 19-21, Sendai, Miyagi

⑭Uchibe E, Doya K, Combining learned controllers to achieve new goals based on linearly solvable MDPs, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2014. 5. 31-6. 7, HongKong

⑮内部英治, 銅谷賢治, 密度比推定を用いた逆強化学習, 第32回日本ロボット学会学術講演会, 2014. 9. 4-6, 九州産業大学, 福岡県福岡市

⑯Yoshizawa T, Ito M, Doya K, Neural representation of task-level and motor information in the cortico-basal ganglia loops, Neuroscience 2014, 2014. 9. 11, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa

- ⑰Ito M, Dissociation of working memory-based and value-based strategies in a free-choice task, Neuroscience 2014, 2014. 9. 12 , Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa
- ⑱Funamizu A, Investigation of action-dependent state prediction in the mouse parietal cortex with two-photon microscopy, Neuroscience 2014, 2014. 9. 12 , Pacifico Yokohama, Kanagawa
- ⑲銅谷賢治, 機械学習と脳科学, 第24回インターネット・システム・シンポジウム FAN2014, 2014. 9. 18-19, 北見工業大学, 北海道北見市
- ⑳Doya K, Toward the neurophysiology of mental simulation, 17th World Congress of Psychophysiology (IOP2014), 2014. 9. 24, International Conference Center Hiroshima, Hiroshima
- ㉑Sezener C. E, Uchibe E, Doya K, Obtaining reward functions of rats using inverse reinforcement learning, Turkish Autonomous Robots Conference, 2014. 11. 6-7, Ankara, Turkey
- ㉒銅谷賢治, 観測と制御の双対性と脳アーキテクチャー, 第57回自動制御連合講演会, 2014. 11. 11, 天坊ホテル, 群馬県渋川市
- ㉓Miyazaki K, Miyazaki Kayoko W, Tanaka K, Yamanaka A, Takahashi A, Doya K, Promotion of patience by dorsal raphe serotonin neuron activation depends on the certainty of future rewards, Neuroscience 2014(SfN), 2014. 11. 16, Washington, D. C USA
- ㉔Funamizu A, Kuhn B, Doya K, Action-dependent state prediction in the parietal cortex of mouse during a virtual navigation task, Neuroscience 2014(SfN), 2014. 11. 15-19, Washington, D. C USA
- ㉕Doya K, Machine learning and brain science, 14th International conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA2014), 2014. 11. 27, OIST Seaside House, Okinawa
- ㉖Funamizu A, Ito M, Kanzaki R, Takahashi H, Value-updating interaction among contexts in choice behaviors of rats, COSYNE2013, 2013. 3. 1, Salt Lake City, USA
- ㉗Doya K, Neural networks for reinforcement learning, Francis Crick Symposium on Neuroscience, 2013. 5. 6-9, Suzhou Dushu Lake Conference Center, China
- ㉘Ota S, Uchibe E, Doya K, Analysis of human behaviors by inverse reinforcement learning in a pole balancing task, Symposium on Biology of Decision Making 2013, 2013. 5. 29-30, Paris, France
- ㉙Funamizu A, Ito M, Doya K, Knazaki R, Takahashi H, Role of prefrontal and striatal neurons in task-condition-dependent action selection of rat, Neuro2013, 2013. 6. 22, Kyoto International Conference Center, Kyoto
- ㉚Ito M, Doya K, Hierarchical coding in the striatum during a free-choice task, Neuro2013, 2013. 6. 22, Kyoto International Conference Center, Kyoto
- ㉛Ito M, Doya K, Hierarchical population coding of trial phases by the striatal neurons during a choice task, Neuroscience2013 (SfN) , 2013. 11. 12, San Diego, USA
- ㉜Miyazaki Kayoko W, Miyazaki K, Tanaka K, Ymanaka A, Takahashi A, Doya K, Optogenetic activation of dorsal raphe serotonin neurons enhances patience for future rewards, Neuroscience2013 (SfN) , 2013. 11. 12, San Diego, USA
- ㉝伊藤真, 報酬に基づく意思決定のアルゴリズムと線状体の情報表現, 第40回ホミニゼーション研究会, 2012. 3. 15-16, 愛知県犬山市
- ㉞Doya K, Multiple strategies for decision making, SBDM 2012: Second Symposium on Biology of Decision Making, 2012. 5. 10, Paris, France
- ㉟Doya K, Reinforcement learning and the basal ganglia, CogSci2012: Neural Computations Supporting Cognition: Rumelhart Prize Symposium in Honor of Peter Dayan, 2012. 8. 2, Sapporo, Hokkaido
- ㊱Doya K, Model-free and Model-based Reinforcement Learning, The 76th Annual Convention of the Japanese Psychological Association, 2012. 9. 13, Senshu University, Kawasaki, Kanagawa
- ㊲Funamizu A, Ito M, Doya K, Kanzaki R, Takahashi H, Uncertainty-seeking in rats' choice behaviors and its

dependence on reward context, 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2011.9.16, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa

㊥Ito M, Doya K, Neural coding of value-based and finite state-based decision strategies in the dorsal and ventral striatum, 34th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, 2011.09.16, Pacifico Yokohama, Yokohama, Kanagawa

〔図書〕 (計 1 件)

①Doya K, Kimura M, Elsevier, The basal ganglia, reinforcement learning, and the encoding of value. In Glimcher PW, Fehr E (eds.) Neuroeconomics: Decision Making and the Brain, 321-333. Academic Press.

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 2 件)

名称: Inverse reinforcement learning by density ratio estimation

発明者: Eiji Uchibe, Kenji Doya

権利者: 沖縄科学技術大学院大学

種類: 特許

番号: PCT/JP2015/004001

出願年月日: 2015 年 8 月 7 日

国内外の別: 国際 PCT

名称: Direct inverse reinforcement learning with density ratio estimation

発明者: Eiji Uchibe, Kenji Doya

権利者: 沖縄科学技術大学院大学

種類: 特許

番号: US Patent Application 6230872

出願年月日: 2016 年 3 月 15 日

国内外の別: 米国

〔その他〕

ホームページ等

<https://groups.oist.jp/ncu>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

銅谷賢治 (DOYA, Kenji)

沖縄科学技術大学院大学

神経計算ユニット・教授

研究者番号: 80188846

(2) 研究分担者: なし

(3) 連携研究者

クン, ベアン (KUHN, Bernd)

沖縄科学技術大学院大学 光学ニューロ

イメージングユニット・准教授

研究者番号: 90599557