

2019 年度 生理学研究所研究会

「認知神経科学の先端 脳の理論から身体・世界へ」

要旨集 ver. 1.01

[目次]

研究会概要	-----	p. 1
生理学研究所までの交通案内	-----	p. 2
生理学研究所の案内図	-----	p. 4
参加者の方へ	-----	p. 5
講演者の方へ	-----	p. 6
ポスター発表者の方へ	-----	p. 6
研究会 プログラム	-----	p. 7
ポスター リスト	-----	p. 8
講演要旨	-----	p. 10

[研究会概要]

日時： 2019 年 9 月 1 日(日)15:00 ～ 9 月 2 日(月)17:30 (受付開始は 1 日 14:00, 2 日 9:30)

場所： 自然科学研究機構 生理学研究所 大会議室(講演)およびセミナー室(ポスター)

Web site： http://www.nips.ac.jp/~myoshi/nips_workshop2019/

参加費：無料

Get-together：自然科学研究機構 生理学研究所 セミナー室にて開催 (参加登録時に申し込みが必要です。会費は 1000 円に値下げしました。当日受付でお支払いください。)

提案代表者：島崎 秀昭 (京都大学 大学院情報学研究科)

所内対応教官：磯田 昌岐 (生理学研究所 認知行動発達研究部門)

世話人：吉田 正俊 (生理学研究所 認知行動発達研究部門)

[Version history]

ver. 0.9: 2019/8/17 公開バージョンを作成

ver. 1.00: 2019/8/23 最終バージョンを作成 (講演要旨追加、ポスター変更、開場時間変更)

ver. 1.01: 2019/8/23 ポスター追加

[生理学研究所までの交通案内]

〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中 38

1) 名鉄東岡崎駅までの道のり

●関東方面から

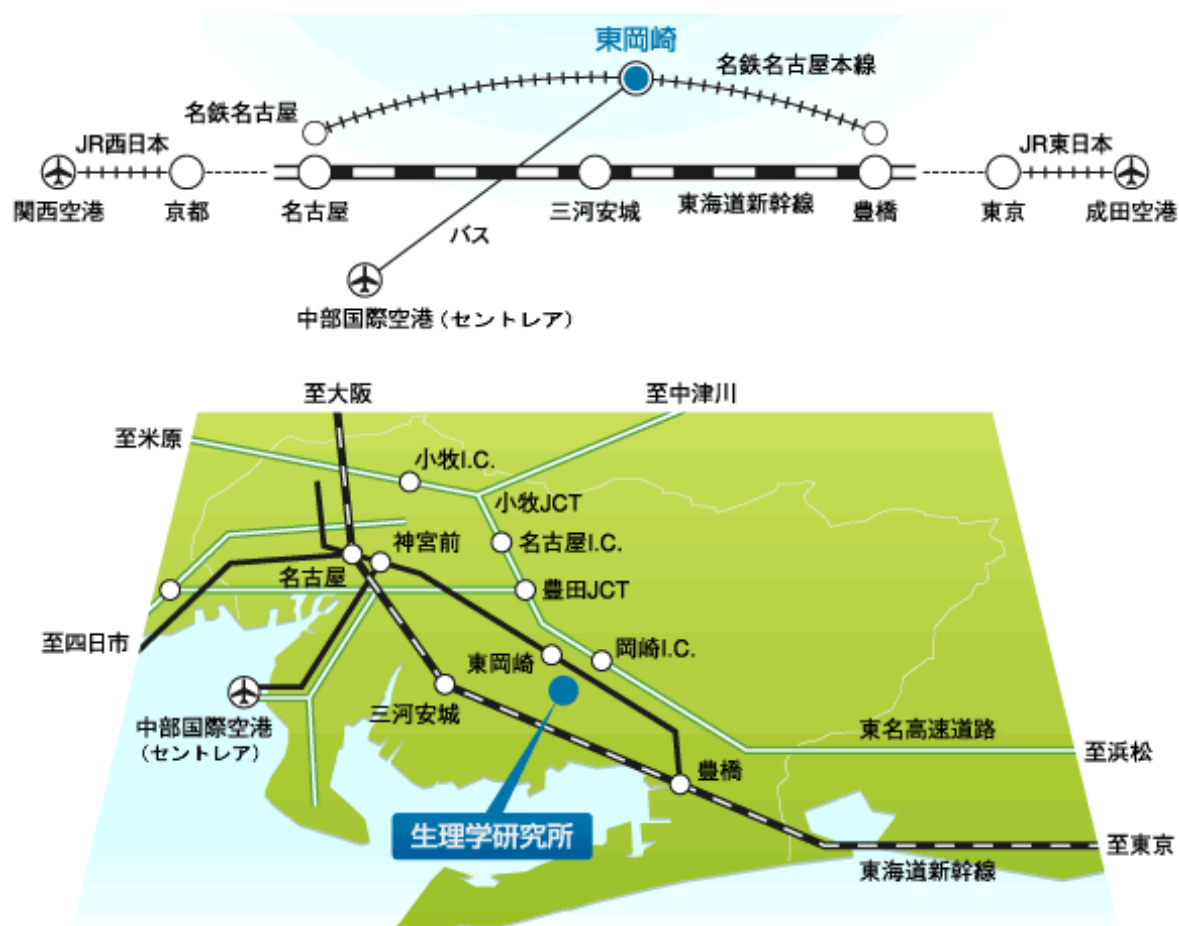
豊橋駅（東海道新幹線「ひかり号」は2時間毎に停車）で名古屋鉄道（名鉄）に乗換え、東岡崎駅下車（豊橋駅－東岡崎駅間約20分）。

●関西方面から

名古屋駅で名古屋鉄道（名鉄）に乗換え、東岡崎駅下車（新名古屋駅－東岡崎駅間約30分）。

●中部国際空港から

名鉄特急「新鵜沼」行で金山駅乗り換え、東岡崎駅下車（所要時間約65分 1210円）。(注意！空港バスは8/5までで廃止となりました。)



2) 名鉄東岡崎駅から生理学研究所までの道のり

- 徒歩で

地図のマゼンタの部分歩いてください。10分程度で到着します。緩やかな上り坂です。

- タクシーで

駅の南口にタクシー乗り場があります。最低料金(650円くらい)で到着します。

コンビニでなにか買い込みたい方は駅南口のサークルKが便利。岡崎コンファレンスセンターの南にあったローソンは閉店しましたので注意。



[生理学研究所の案内図]

- 正門から入場します。守衛所での書類記入は不要です。
- 生理研 研究棟(1 番の建物)の 1F が会場です。玄関でスリッパに履き替えていただきます。
- 初日の 9/1 は日曜日であるため、受付時間の前後(14:00-15:30)のみ出入り可能となっております。その時間帯以外で出入りしたい方は受付までお申し出ください。
- 受付：玄関入ってすぐのエレベーター前
- 講演：1F 大会議室
- ポスターおよび Get-together：1F セミナー室



[参加者の方へ]

当日の受付：

- 9月1日(日)14時から生理研 研究棟 1F エレベーター前にて行います。14時まで「脳の自由エネルギー原理チュートリアル・ワークショップ」を行っていますが、いったん全員大会議室から退出したところで 受付を行います。
- 入場時間は 14:30 です。それ以前に受付を済ませた方は講演会場(大会議室)の手前のセミナー室で待機してください。ポスター掲示もこの時間から可能です。
- Get-together に参加される方は会費 1000 円の支払いを受付で済ませてください。参加登録時に申し込みが必要です。
- 当日の受付では要旨集の印刷したものを用意しません。冊子が必要な方は御自身で印刷の上ご持参ください。
- クロークはありません。キャリーバッグなどの大きな荷物は荷物置き場を設置しますので、貴重品などは入れないようにして、自己責任でご使用ください。

講演会場：

- ネットワーク接続は用意しませんので必要な方は自前でご準備ください。

Get-together：

- 生理研 1F セミナー室で 18:00 開始、19:30 終了です。実費で軽食とお酒を提供します。夕食が必要な方はその後各自で済ませていただきますようお願いします。

宿泊：

- 周辺のホテルを予約される方はご自分での予約をお願いします。生理研 web サイトに生理学研究所周辺の主なホテルのリストと地図があります。ご利用ください。

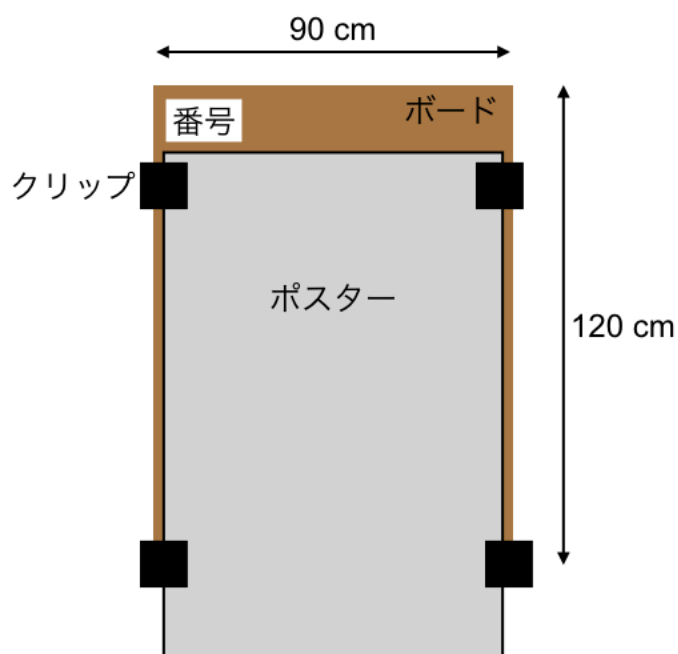
<http://www.nips.ac.jp/accommo/index.html>

[講演者の方へ]

- 講演内容に関してはとくに縛りはありませんが、さまざまな領域の参加者が見込まれていますので、ご講演の前提となる基礎的な話についての紹介をお願いします。
- 9/1 は英語での講演、9/2 は日本語での講演となっております。スライドは日本語、英語どちらでも構いません。
- ラップトップ PC のご持参をお願いしております。PC が必要な方はあらかじめお申し付けください。
- PC のセットアップはセッションが始まる前の休憩時間のあいだにお願いします。
- 例年、講演途中での質問を許可しております。これはスライドの情報の確認などに絞って、議論が長引きそうな場合には後回しにするなど座長がさばいてゆきます。ご了承ください。

[ポスター発表者の方へ]

- ポスターは英語、日本語どちらでもかまいません。
- ポスター用のボードのサイズは横 90cm * 縦 120cm となります。
- ポスターボードは四隅をクリップで留めるタイプとなります。横幅が 90cm になるように印刷しておいてください。作成したポスターの横幅が短いとクリップで留めることができなくなるのでお気をつけください。A4 用紙などを複数印刷する場合はボードの内側はコルクボードになっているので画鋲の使用が可能です。
- ポスター掲示は受付が済みましたらいつでも始めていただけて構いません。Get-together の時間をポスター説明に活用していただくと良いと思います。
- ポスターの回収は午後のコーヒブレイクまでに済ませてください。それ以降の時間に残っているものについては研究会事務局で処分します。



[研究会プログラム]

9月1日(日) 生理学研究所 1F 大会議室

[Day 1: 英語での講演]

14:00 受付開始

14:30 入場開始

15:00-15:05 Introduction

島崎 秀昭 (京都大学 大学院情報学研究科)

15:05-16:05 [Talk #1] Introduction to discrete active inference

Martin Biehl (Araya Co.)

16:05-16:50 [Talk #2] Learning action-oriented models through active inference

Chris Buckley (University of Sussex)

16:50-17:35 [Talk #3] Active Inference: a principled approach to the exploration-exploitation dilemma in reinforcement learning?

Alec Tschantz (University of Sussex)

18:00-19:30 Get-together (生理学研究所 1F セミナー室)

9月22日(月) 生理学研究所 1F 大会議室

[Day 2: 日本語での講演]

9:30 受付開始、入場開始

10:00-10:05 Opening remarks

磯田 昌岐 (生理学研究所 認知行動発達研究部門)

10:05-11:05 [Talk #4] 知覚から思考までの基本機構を明らかにする自由エネルギー原理

乾 敏郎 (追手門大学)

11:05-12:05 [Talk #5] Biological plausibility of variational free energy as a cost function for neural networks

磯村 拓哉 (理研 CBS)

12:05-13:30 昼食 + ポスターセッション (昼食は研究会では用意しません)

13:30-14:30 [Talk #6] *in-vivo* imaging of the telencephalic neural activities in the closed-loop virtual reality environment revealed active inference in decision making

岡本 仁 (理研 CBS)

14:30-15:10 [Talk #7] 逆強化学習による動物行動戦略の解釈

本田 直樹 (京都大学)

15:10-15:40 コーヒーブレイク (ポスターはこの時間までに剥がしておいてください)

15:40-16:20 [Talk #8] 再認の段階的創発を時間構造の変形から考える

平井 靖史 (福岡大学)

16:20-17:20 [Talk #9] 学習と認識の熱力学：ニューラルエンジンとはなにか？

島崎 秀昭 (京都大学)

17:20-17:30 Closing remarks

吉田 正俊 (生理学研究所 認知行動発達研究部門)

[ポスターリスト] (発表者、所属およびタイトル)

- 1 島崎秀昭 (京都大学情報学研究科) "Optimal stimulus coding by neural populations"
- 2 田中大 (東京大学人文社会系研究科心理学研究室) "Sense of agency in continuous motor control"
- 3 堀井隆斗 (大阪大学大学院基礎工学研究科) "能動的推論による人口ロボット感情コミュニケーション"
- 4 佐藤那由多 (大阪大学人間科学部) "音楽に喚起される快情動の逆 U 字と予測誤差のフローモデル"
- 5 松居哲生 (祭サイエンスアカデミー) "分離脳での意識の発現 Emergence of Consciousness in the Split Brain"
- 6 森裕紀 (早稲田大学 次世代ロボット研究機構) "確率的予測モデルに基づく全身新生児モデルの寝返り動作生成"
- 7 小笠原 淳 (慶應義塾大学医学部大学院) "Circadian rhythms under self-regulation of environmental illuminance"
- 8 谷本悠生 (理研 CBS 意思決定回路動態研究チーム) "Calcium imaging of basal ganglia output to cortex during decision-making in zebrafish"
- 9 上田奈津貴 (NCNP, 東京医科歯科大学) "Generalization and expectation of interval timing in patients of schizophrenia"
- 10 吉田正俊 (生理学研究所・認知行動発達機構) "自由エネルギー原理と視覚的意識"
- 11 中村絢斗 (東京大学大学院情報理工学系研究科) "バクテリアの化学走性における環境感知と行動の連鎖"
- 12 Yutaro Koyama (生理研 定藤研) "fMRI 時系列の基底分解による whole brain deconvolution"
- 13 和田幹彦 (法政大学法学部法律学科) "健常者とてんかん患者を被験者とした fMRI 実験による「法的思考と判断」の脳内ネットワーク研究"
- 14 Ochiai Koji (理化学研究所 生命機能科学研究センター) "Hierarchical cortical model with neural processing delay"
- 15 鈴木 大地 (NINS, ExCELLS) "The role of the optic tectum for visually evoked orientating and evasive movements"
- 16 鳥越万紀夫 (理研 CBS 意思決定回路動態研究チーム) "Future state prediction errors guide active avoidance behavior by adult zebrafish"

講演要旨

[Talk #1] Introduction to discrete active inference

Martin Biehl (Araya Co.)

In this talk I will give an overview of the formal ingredients and assumptions of Friston's active inference. Starting from a Markov chain I will clarify the relation of the "standard" or "internal" formulation of active inference to the "external" free energy principle associated to Markov blankets. The internal version can be seen as an approach to reinforcement learning for partially observable Markov decision problems (POMDPs) i.e. to POMDPs where the transition function is not known to the agent. The external version claims that a particular dependency structure (called a Markov blanket) between subsets of variables in a dynamical system always leads to some subset "appearing" to perform Bayesian inference on another.

I will then present in detail the internal active inference procedure. This procedure relies on a powerful but also computationally intractable graphical generative model. The model includes parameters for the transition function of the environment states and for the dependency of the sensor values on these environment states. The generative model then specifies a joint probability distribution over these parameters as well as all past and future actions, sensor values, and environment states. Conditioning on past taken actions, observed sensor values, and future actions results in an up-to-date posterior (we call it the active posterior) which represents what the model predicts about the consequences of future actions. A policy can then be derived by evaluating its consequences according to some given criteria. The standard criterion in active inference is the expected free energy but other choices are equally compatible with the overall approach. For example, in the reinforcement learning setting it is the expected sum over a particular sensor value called the reward. Obtaining the active posterior and choosing the optimal future action exactly are generally intractable problems. Active inference therefore proposes to turn both of these problems into a single optimization problem. This is achieved by introducing two new objects. The first is a variational active posterior to approximate the true active posterior. There is then an optimal policy associated to this variational active posterior, the variational optimal policy. The second object is a policy to approximate this variational optimal policy. The single optimization procedure then minimizes the sum of the divergence between the variational active posterior and the true active posterior and the divergence between the approximate policy and the optimal variational policy.

[Talk #2] Learning action-oriented models through active inference
Chris Buckley (University of Sussex)

In predictive processing accounts of perception and action, great importance is placed on generative models that encode predictions about the sensory consequences of actions. Such models, which underpin 'active inference' formulations of predictive processing, provide a computational basis for theories of perception and phenomenology that emphasize sensorimotor interactions or contingencies. How such action-oriented models are learned, especially in complex environments, remains an open question. One approach is to learn in the presence of goal-directed actions, however this strategy can suffer from so-called 'bad bootstraps' by prematurely converging to suboptimal solutions. Another approach is to learn in the presence of exploratory or epistemic actions: while this approach can deliver accurate models, these models are not tuned to any particular behavioural niche and are therefore inefficient. Here, we demonstrate a principled and pragmatic approach to learning action-oriented models. Our approach balances goal-directed and epistemic behaviours through minimization of 'expected free energy' according to principles of active inference. We demonstrate this approach using a simple model of bacterial chemotaxis in which agents learn models that are parsimonious, tailored to action, and which avoid 'bad bootstraps'. Intriguingly, our model shows how probabilistic models can support adaptive behaviour not only in spite of, but because of, their departure from veridical representations of the external environment.

[Talk #3] Active Inference: a principled approach to the exploration-exploitation dilemma in reinforcement learning?

Alec Tschantz (University of Sussex)

In recent years, models of active inference have provided compelling accounts for a number of empirical phenomena. However, these models have tended to focus on low-dimensional problems. It, therefore, remains unclear whether active inference can be successfully applied at scale. In this talk, I will introduce a model of active inference that is applicable to high-dimensional domains, such as complex control tasks based on pixel inputs. I will first present empirical results that demonstrate that this model is competitive with both model-free and model-based RL, before discussing the similarities that the model shares with these approaches. I will then move on to highlight novel aspects of the active inference framework that could be beneficial for the field of RL, before finally considering whether the proposed model is biologically plausible.

[Talk #4] 知覚から思考までの基本機構を明らかにする自由エネルギー原理
乾 敏郎（追手門学院大学）

自由エネルギー原理は脳のさまざまな機能を説明できる重要な理論である。特に事後信念と呼ばれる主観を扱う理論として注目される。自由エネルギー原理という名前は Friston et al. (2006)で初めて登場する。2009 年になると、自由エネルギー原理は大きく発展する。それは能動的推論（active inference）という考え方を導入したことによる（Friston, 2009）。これにより、知覚以外のさまざまな機能を説明してみせる理論となった。この理論では基本的に脳があらゆる感覚の予測器であると考え、そこには運動指令というものもなく、運動もまた感覚の予測（期待）と考えるのである。基本的に「ベイズ脳（Bayesian brain）」のアプローチである。この予測は入力された感覚信号に基づき、外環境や内環境（内臓などの内受容系）の状態を推論する。これは基本的にはベイズ推定であり、学習を通じてベイズ最適な（Bayes-optimal）推論を行っていると考え、本講演では、知覚、運動、感情、意思決定、思考などの機能がいかにより、一つの式から導出されるさまざまな関係式で説明されるのかを紹介する。

[Talk #5] Biological plausibility of variational free energy as a cost function for neural networks

Takuya Isomura (RIKEN Center for Brain Science)

This presentation comprises two parts. In the first part, I will review the free-energy principle proposed by Karl Friston. This theory aims at explaining various functions and behaviors of neural networks and biological organisms in terms of minimization of variational free energy, as a proxy for surprise. Variational free energy minimization provides a unified mathematical formulation of inference and learning processes in terms of self-organizing neural networks that function as Bayes optimal encoders. Moreover, biological organisms can use the same cost function to control their surrounding environment by sampling predicted (i.e., preferred) inputs, known as active inference. The free-energy principle suggests that active inference and learning are mediated by changes in neural activity, synaptic strengths, and the behavior of an organism to minimize variational free energy. I will mathematically describe how neural and synaptic update rules are derived from variational free energy minimization.

In the second part, I will introduce our recent work. We consider a class of biologically plausible cost functions for neural networks, where the same cost function is minimized by both neural activity and plasticity. We analytically show that such cost functions can be cast as variational free energy under an implicit generative model. Our results suggest that any neural network minimizing its cost function implicitly minimizes variational free energy, indicating that variational free energy minimization is an apt explanation for a canonical neural network.

[Talk #6] *in-vivo* imaging of the telencephalic neural activities in the closed-loop virtual reality environment revealed active inference in decision making
Hitoshi Okamoto (Lab. for Neural Circuit Dynamic of Decision Making, RIKEN Center for Brain Science)

Selecting a logical behavioral choice from the available options, i.e. decision making is essential for animals. We aimed at directly addressing this process by establishing the closed-loop virtual reality system for the head-tethered adult zebrafish with the 2-photon calcium imaging system. The adult zebrafish harboring G-CaMP7 in the excitatory neurons were trained to perform visual-based active avoidance tasks and simultaneously the neural activities were imaged at the cellular level. Furthermore, after learning was once established in the closed-loop condition, we suddenly removed the visual feed-back to make the system open-loop. The Non-negative Matrix Factorization analysis revealed the one ensemble of neurons whose activities were suppressed by the recognized backward movement of the landscape, and the other ensemble suppressed by reaching the goal compartment. These ensembles recovered throughout the trials under the open-loop condition. These results suggest that these two ensembles encode the prediction errors between the status represented by the real sensory inputs and the favorable predicted status to successfully escape from the danger, and the behaviors are taken so that these errors become minimum. Our result supports that the adult zebrafish behaves in decision making based on the active inference in the free energy principle, where agents take actions to suppress the prediction errors by trying to make the internal representation of the bottom-up sensory states match those of the top-down predictions, and demonstrate the strong conservation of the basic principle of decision making throughout the evolution.

[Talk #7] 逆強化学習による動物行動戦略の解読

本田直樹 (京都大学 生命科学研究科 生命動態研究センター)

動物やヒトは外界の状況に応じて、より多くの報酬が期待できる行動戦略を持って行動していると考えられる。しかし、報酬には食料などの直接的なもののみならず、間接的にそれらに結びつくものもあるため、動物の行動を単に観察しているだけでは、「動物が何を報酬として行動しているのか、何に価値を置いて行動しているのか？」を知ることは困難であった。また脳内では、報酬はドーパミンによって表現されていることから、動物にとって何が報酬となっているかを明らかにすることは、行動戦略を司る神経メカニズムの理解のためにも重要である。そこで我々は行動時系列データからその裏に潜む戦略や未知の報酬を解読する機械学習法（逆強化学習）を考案した。この手法を線虫の温度走性行動へと応用することで、線虫にとっての報酬や行動戦略を明らかにした。

一定の温度で培養した線虫は、その培養温度を記憶し、温度勾配下では培養温度を目指して移動し、逆に一定の温度で餌のない飢餓状態を経験した線虫は、温度勾配下で飢餓温度を避けることが知られている。しかし、線虫がどのような戦略にしたがって行動しているのかは全くの不明であった。線虫を温度勾配において追尾することで、行動時系列データを取得し、そして逆強化学習法により、線虫にとっての報酬を推定した。その結果、餌が十分ある状態で育った線虫は、「絶対温度」および「温度の時間微分」に応じて報酬を感じていることを明らかにした。この報酬に基づく戦略は2つの異なるモードから構成されており、一つは効率的に成育温度に向かう移動、もう一つは同じ温度の等温線に沿った移動を説明するものであった。また飢餓を経験した線虫は「絶対温度」のみに依存した報酬により、飢餓温度を避ける戦略を持っていることを明らかにした。さらには、推定された報酬を用いて線虫行動をシミュレーションすると温度走性行動が再現され、逆強化学習法の妥当性が示された。

この手法は行動とそれに伴う状態変化が定量的に観測可能な場合、線虫に限らず他の動物へも適用可能であることから、神経科学や行動生態学の基盤技術になることが期待される。

[Talk #8] 再認の段階的創発を時間構造の変形から考える

平井靖史（福岡大学）

あるタイプの対象や性質をそれとして同定することなしには、生物の認知も行動も成り立たない。生物の知覚に見られる再認（分類・同定）の働きは、そもそもどのようにして成立したのか。進化の偶有的産物である特定の器官に訴えることなしにこれを説明するためには、（器官でも生物でもなく）環境世界と生物の相互作用連関のシステム全体が、進化を通じてどのように変形してきたかをモデル化する起源論的アプローチが有効と考えられる。一般的な意味での再認は脳を持つ生物の特権ではないから、問題は「どうやって脳が再認を可能にしたか」ではなく、「脳が可能にしたのはどのような再認であったのか」であり、さらに「脳以前にシステムはどのようにして再認を実現したのか」である。

このような観点から、ベルクソンが素描していた「時間を組み込んだシステム論的描像」を紹介する。以下の三つの時間スケールで再認可能性の変形が生じることを確認する。進化論的時間スケールで説明される刺激選別の水準、学習する生物の行動可能性によって説明されるカテゴリー化の水準、オンラインの知覚において動的に生じる注意的焦点化の水準。

[Talk #9] 学習と認識の熱力学：ニューラルエンジンとはなにか？

島崎秀昭（京都大学）

本講演では脳が外界を学習し、推論する仕組みを情報理論・機械学習・ベイズ統計学の視点から概観し、加えて神経活動のエントロピー変化に基づいて脳の学習・推論を記述する熱力学的な枠組みを紹介する。脳の学習・推論は順方向結合・リカレント結合からなる神経回路網の非線形なダイナミクスによって実現される。感覚野では順方向結合による初期応答は刺激特徴のみに依存し、気づき・注意・報酬価値等の有無にかかわる内発的な状態は初期応答後の活動に対する変調として表れることが報告されている。この遅延変調は高次領野からのリカレント結合に起因するものと考えられている。逆向マスキングやTMS刺激を用いた人に対する研究では、この遅延部分の活動の選択的阻害により意識的体験が消失することが示されている。講演では刺激応答の神経ダイナミクスが観測と事前知識を統合する動的なベイズ推論として記述されることを示し、さらにリカレント回路による遅延変調を伴う推論過程が情報論的なエンジンを構成することを示す（ニューラルエンジン）。これにより感覚入力に対する内発的な変調の程度やその効率を神経活動のエントロピー変化に基づいて定量化する方法を提案する。