

## 目 次

卷頭言 中西 重忠（京都大学名誉教授） .....	3
特集 1 リレー対談 .....	4
第 8 回 機械学習と脳科学 岡田 光弘 × 杉山 将	
特集 2 論文紹介 .....	8
<b>Rhythmic Firing of Pedunculopontine Tegmental Nucleus Neurons in Monkeys during Eye Movement Task.</b> (小林 康)	
背側縫線核による報酬・嫌悪情報処理 (中村 加枝)	
特集 3 大会参加記 .....	10
脳科学若手の会 春合宿開催記 (脳科学若手の会第 7 回合宿運営スタッフ：村井祐基・ 池田宗樹・磯村拓哉・川端政則・杉浦綾香・長野祥大・ 渡邊真弓)	
新学術領域研究「予測と意思決定」第 9 回領域会議 参加記 (市之瀬 敏晴)	
チュートリアル「光学イメージングと操作の拓く可能性」 参加記 (谷本 拓)	
特集 4 アウトトリーチ活動 .....	13
玉川大学 脳科学トレーニングコース体験記 (高岸 治人・坂上 雅道)	
Vol. 7 訂正箇所について .....	14
イベント情報 .....	15

表紙図 出典

Hayashi, K., Nakao, K., and Nakamura, K.,  
Appetitive and Aversive Information Coding in the Primate Dorsal Raphe Nucleus,  
The Journal of Neuroscience 35(15), 6195-6208, 2015.



## 予測と意思決定：分子神経科学の視点から

中西重忠

京都大学 名誉教授

最近、「意思決定・予測」の脳科学研究の研究成果は一流科学誌に毎号報告されているという感があり、また一般読者向けにも多くの書籍が出版されている状況を迎えるに至っている。これは意思決定・予測の脳活動が単に円滑な個人の社会活動に必須であるのみならず、経済や政治にも大きな影響を与えるものであり、脳科学研究の新手法を用いて多くの脳科学者がこの問題に取り組み、単に心理学や社会科学の研究のみならず、脳科学の研究によって意思決定・予測の理解がどのように進んだかが大きな注目を浴びていることによる。この点、本研究課題の重要さを認識し沖縄科学技術大学院大学の銅谷賢治先生を代表者として新学術領域「予測と意思決定」を4年前に立ち上げられたことは極めて時宜を得たものであり、この4年間の班員の努力によって多くの影響力のある研究成果を挙げられたことに敬意を表するものである。

さて本学術領域のプロジェクトも本年度で終了になる。一方で意思決定・予測の脳研究はまさに“予測”されたように益々重要になっている。我々の日々の行動が予測と意思決定によって支配されているのみならず、行動時の状況（記憶や学習、情動、身体的状態等々）によって予測と意思決定が非論理的で偏見を持ったものであることも明らかにされている。これは意思決定に動機、意図、注意、不安、恐怖などの種々の精神活動が密接にかかわっていることを考えると当然であり、事実最近の脳科学の研究によって意思決定と予測には多くの脳部位の神経回路の制御が関わっていることが明かにされている。さらに意思決定と予測の制御機構の障害が統合失調症や鬱病などの精神障害とも密接に関わっていることも示されている。

意思決定・予測はヒトの脳活動が示す極めて高次な脳機能を示す言葉の感じを与える。一方最近の脳研究は種々の脳機能がヒトとモデル動物で類似した神経回路と共通の機構を介して誘発されている事を明らかにしている。この結果、分子生物学的手法を用いたモデル動物の神経回路の研究、特にマイクロサーキットの分子生物学的研究が欧米では勢力的に進められ、ヒトの高次な脳機能の基本的な機構を理解する上で極めて重要な成果が報告されている。さらにこの数年の間に神経回路を解析する革新的な分子生物学的手法、例えばオプトジェネティックス、DREADD 法、顕微内視鏡、遺伝子エディティング法等が開発、適用が可能になり、複雑な脳機能の根底にある神経回路の制御機構の一端が次々と明らかにされつつある。一方、「意思決定・予測」は重要かつ魅力的な研究分野であるが、モデル動物の研究によって「行動選択」の解析は可能であるが、「意思決定・予測」の行動解析が可能であるかという問題があり、モデル動物の行動解析に基づいて研究を進めている分子神経科学者にとってはなかなか提案しにくい研究テーマもある。いずれにしても最近のシステムズ神経科学の新展開を考えると、欧米に伍して本分野をさらに発展させるために一線の分子神経科学者をより積極的に取り込むテーマと方策を検討されることも必要でないかと考える。

# 「予測と意思決定」リレー対談：第8回

慶應義塾大学 文学部 教授

 岡田 光弘


## 機械学習と脳科学

▼岡田 本日は杉山先生にいろいろお伺いしたいと思います。まず、杉山先生が銅谷新領域プロジェクトに参加することになったきっかけをお聞かせください。

■杉山 私のバックグラウンドはコンピュータサイエンスですが、学生時代、工学的なニューラルネットワークを扱う研究室に入ったのがきっかけで、脳科学を研究している先生方とふれあうようになりました。銅谷先生ともその頃お話ししさせていただく機会があったんです。私自身は、脳の機能を解明することよりも、脳から学んで脳のように学習するコンピュータを作ることに興味を持っています。

▼岡田 この新領域プロジェクトには、行動心理学、行動科学、意思決定のシステムとしてのモデルフリーとモデルベース、TD学習などさまざまなテーマで研究されている先生方が参加されています。主として脳科学をバックグラウンドとする先生方が多いわけですが、杉山先生の専門分野であるニューラルネットワークによる機械学習と脳科学にはどういう関わりがありますか。

■杉山 私がニューラルネットワークの研究をはじめたのは

90年代の後半です。それより少し前に、ニューラルネットワーク研究のブームが到来しました。そのとき多くの人が、人間の脳に学んで学習機械を作れば人間のように賢いコンピュータができるだろうと考えた。ところが、その期待通りにはいかず、研究が壁にぶつかって、当時のニューラルネットワークは満足できる性能を出せなかったんです。私の先生は、元々数理を専門としていましたが、人間の脳から学ぶことも大事だという考えを持っていました。しかし、80年代、90年代以降、脳から学ぶ研究が進められましたが、私に

はそれがあまりうまくいっていないように見えて、これからはもう少し数学に基づいた研究をした方がいいと感じていたんです。そこで私は90年代後半からは数理寄りの研究に取り組んだ。機械学習の研究の主流も、数理的なアプローチに移っていました。

▼岡田 数理的なモデルを構成して、そのモデルが実際に機械の上でどう機能するかを研究するわけですか。

■杉山 まずは理論的に機械学習の仕組みを解明しようとしてきたんです。脳の仕組みを真似てモデルを作るのではなくて、数学的な基礎の上にアルゴリズムを作つて性能を保証する。そういうアプローチです。

▼岡田 ダ・ヴィンチは鳥を調べ、鳥の筋肉系を機械的にかなり精巧に再現しましたね。しかし、実際に飛べる飛行機を作るには流体力学のような数学的なモデルが必要だった。

■杉山 まさにその話と同じ事情ですね。2000年代前半からITブームとも連動して、機械学習に関する数学的な研究が盛んに行われ、大きな成果を上げましたが、一方、2007年頃から、数理的なアプローチにも限界が見えてきた。数理的なアプローチで可能なことはほとんどしつくして、性能を飛躍的に上げることが困難になってきた。そこでもう一度、ニューラルネットワークが注目を集めはじめました。人間の

# 機械学習と脳科学

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 槍理工学専攻 教授

杉山 将



脳は機械よりも複雑なことを簡単にできている。どうして機械にはできないのか。やはり人間の脳に学ぶべきではないか、と。こうして今、再びニューラルネットワークの研究が盛んになってきたのですが、1980年代、90年代前半と現在の最大の違いは、計算機の環境です。使っているアルゴリズムそのものは以前と変わらなくても、大量のコンピュータ、大量のデータでニューラルネットワークに学習させることができます。実際にやってみると、これまで10年、15年かけて数理的なアプローチで実現してきた性能をはるかに凌駕する結果が得られた。

▼岡田 現在のニューラルネットワークが扱うデータ量は、人間の神経系で扱っている量と同じ程度なんですか。

■杉山 人は毎日、信じられないくらいのデータ量を扱っていると思います。そのレベルにはまだ達していないでしょうね。それでも古典的なコンピュータサイエンスで扱われていたデータ量と比べると今では何桁も多い量を扱えるようになっています。昔はとても学習できなかったものを、今は大量のデータのおかげで学習できるようになってきました。ニューラルネットワークのような複雑なモデルでもいよいよ学習が可能になったわけです。我々の分野でも、脳科学から学んでアルゴリズムの開発に活かしていくことが重要であるという認識を持つ人が増えてきました。

▼岡田 ニューラルネットワークの考え方を見直されたとき、たとえばモデルベースについて新しい知見はありますか。

■杉山 新しい知見はなかなかないですが、ロボットとか何かのシステムの制御に使われている強化学習の研究では、モデルベースとモデルフリーのアルゴリズムの開発が盛んに進んでいます。たとえばモデルベースのポイントは環境をいかに精度よく、効率的にモデル化するかですが、そこにニューラルネットワークが使えるはずです。もし環境のモデルをうまく学習することができれば、ニューラルネットワークを使ってあらゆるシステムを効率よく学習することができるでしょうね。

## ● 中間レイヤーで何が起っているのか

▼岡田 ニューラルネットワークを使って学習したとき、何か、いかにもモデルベースだというような表象が形成でき

る、あるいは概念のようなものが生まれる、うまいカテゴリゼーションができるようになるのでしょうか。最終的な結果が得られる過程の中間的な表現はどのようなものでしょうか。

■杉山 そこは重要なポイントです。ニューラルネットワークは多層構造のモデルですので、中間のレイヤーで何らかの新しい表現が獲得されるだろうと期待できます。実際、画像データに対するニューラルネットワークでは、V1レイヤー、V2レイヤーのように、まずエッジが獲得されて、それを組み合わせた高次の特徴が自然に獲得されるのです。現実の世界を表す特徴を集めて、何か処理をするわけですが、その際、一般的な機械学習は、最終的に得られる結果が正しければ、途中経過はブラックボックスのままでもかまわないという立場で開発されてきました。しかしながらニューラルネットワークを使うと、中間的なレイヤーにおける表現を解釈することができる。今度はその解釈をもとに作った新しいパターンを組み合わせると、もっと効率のいいネットワークの構造を考えることもできる。そのあたりについて理論的にははっきりしていないものの、少なくとも実験的には、中間のレイヤーに面白いパターンが学習されていることが報告されています。

▼岡田 たとえば足し算をしているときに、中間レイヤーで「3」と出てきたときに、「3」だという概念であるとはわからないわけですか。

■杉山 解釈は後付けですね。何となく自然にグルーピングされる傾向はあるはずなので、それをどう活かすか。これから考えいかなければならぬ点です。機械学習の最大の目標は、予測を当てることです。しかし、予測を当てることと、中間的な表現に解釈を与えることが必ずしも両立しません。

▼岡田 中間的な表現が何なのか、哲学的な興味をかき立てられます。たとえばモデルベースの意思決定のとき、意識的な決定をしているのか。モデルフリーとモデルベースは、心理学でも、その後の行動主義論争の中でも扱われました。学習後、直観的で、習慣的なポリシーを決定するのか。知的なプロセスがあるのか。哲学の問題として考えると、そういう点が気になります。予測を立てるということと知的であるということの間に何か関係があるとお考えですか。

■杉山 そこは興味深いところですね。工学的な応用を考え

# 「予測と意思決定」リレー対談：第8回

慶應義塾大学 文学部 教授

 岡田 光弘

ると、予測さえ当たれば、そこに至る過程はどんなに無茶苦茶でもかまわないんですが……。

▼岡田 それは知的ということになる？

■杉山 工学的には、外から見たとき、その振る舞いが正しければ知的と判断しますね。ただし中身が伴っていないと今後の発展には繋がっていかないでしょ。どうしてこういう予測がなされたのか、どうしてこういう意思決定がなされたのか明らかにされないと、真実を理解したことにはならない。そういう場面では、中間的な表現はどうなのか、それを組み合わせてどういう決定がなされているのか説明する必要がありますね。

▼岡田 工学的には予測を当てることに主眼が置かれているとのことですが、予測がうまくいけば、機械学習としては進歩なんですね。

■杉山 アプリケーションによりけりではあります。たとえば医学に関わるアプリケーションであれば、なぜこういう決定がなされたのかについてきちんと説明がない限り、そのアプリケーションが使われることは決してない。あるいは、会社を使うとき、上司にわかるルールで意思決定がなされていないと、部下がいくら予測が当たるからといって、上司はそのアプリケーションを認めないでしょ。現実世界では、ある程度の説明能力が求められているわけです。

## ● 機械学習の今後

▼岡田 脳科学系の研究者たちも機械学習のモデルを使って研究している点を考えると、この新領域プロジェクトの中で、コンピュータサイエンスをバックグラウンドとする杉山先生との協力は重要な位置を占めていると言えます。今後の機械学習の研究についてどういう展望を持っていらっしゃいますか。

■杉山 これまで数学的な機械学習の研究と、脳科学から学ぶ、いわば Biologically inspired な研究のどちらかが主流になったり傍流になったりしていました。しかし、これからは両方を押さえて研究していくことが必要でしょ。この10年、15年で数学的な理解はかなり進みました。そこで、現在の強力な数学的な道具を使ってニューラルネットワークの研究に取り組めば、新しいレベルに達することができるだろうと考えています。これまで私は主として、外から答えを与える

て学習させる「教師付き学習」の研究をしてきました。教師付き学習は、データを大量に取れる画像や音声の認識には非常に効果的で、今やその認識能力は人間の能力も超えつつある。しかし大量のデータがとれないこともある。そういう場面では、「教師なし学習」が重要な役割を果たします。ところが教師なし学習はなかなかうまくいかない。最近では、教師付き学習と教師なし学習の真ん中ぐらいを狙った研究が盛んです。単純な例ですが、半教師付き学習では、一部だけ教師情報を与えて学習させ、残りは教師情報のない状況で学習させる。我々もいくつか新しい枠組みを考えています。まだはじまったばかりの研究なので、明日すぐに応用できるようなものではありませんが、より現実的な状況でうまく学習ができるアルゴリズムを作りたいと考えています。

▼岡田 神経科学系の先生たちとお話しする際、私がいつも取り上げたくなる話題があります。それが、言語的な環境、あるいは言語的な相互作用があるかないかによって、機械学習の数学モデルは大きく変わるのが、変わらないのかという問題です。言語的な相互作用のない機械学習、たとえばそういう形の学習が脳の中で見つかったときに、我々の言語的なコミュニケーション社会でも通用するのか。それとも言語的なものは大きく違うのか。

■杉山 その問題は、予測を当てたいか解釈したいかという先ほどの問題と関わっている気がしますね。言語的な状況というのはシンボル化されている状況で、人間にわかるようにシンボル化されているわけですね。一方、予測を当てるためにはシンボル化されている必要はない、最終結果さえ正しければいい。予測を当てたい場合は言語は気にせずに、途中経過でどういう表現されていようとブラックボックスのままでも当たればいいわけです。

▼岡田 インプットが言語的で、アウトプットも言語的かもしれないですよね。アウトプットが報酬に誘導されているとしても、インプットは言語的ですね。教師は言語で指令を与えますから。

■杉山 教師がシンボルを与えて、出力がシンボルであっても、同じアプローチで学習できると思います。問題は、中間的なレイヤーで、シンボルのまま表現するのか、内部表現がわからない形でブラックボックスになってしまふか。そこに違いが出てくるでしょうね。

# 機械学習と脳科学

東京大学 大学院新領域創成科学研究科 槍理工学専攻 教授

杉山 将



▼岡田 なるほど。

■杉山 人工知能の研究者はシンボルのまま処理していくことを好んでいるように見受けられます。一方、機械学習の研究者は、中間的なレイヤーはブラックボックスにして、出力だけを当てようとする。コミュニティーが違えば、アプローチの仕方にも違いがある。

▼岡田 シンボル化されたインプットを処理するレイヤーの中には、解釈するかしないかの問題がありますが、シンボルに対応するような表象が実は存在するかもしれないですね。

■杉山 そうですね。それを明示的に解釈しやすいような学習をするかしないかも選択肢の一つです。予測を当てたいと思っている機械学習の研究者は、そこを無理してわかりやすい表現を作る必要はないと考える。一方、人工知能のコミュニティーでは内部表現がどうか確かめることを重視しています。

▼岡田 外的な世界を把握するとき、言語的なコミュニケーションを介して、人は他者の心を読み取っています。言語的な環境は、単に状態変移だけでは説明できない気がします。

■杉山 現状ではモデル化できていない部分がある？

▼岡田 現状のモデルが確率的な状態変移では捉えられないような状態があるかもしれません。人が他者の心をどう読み取っているかというレベルまでモデルに取り入れるはどうなるのか。状態変移で充分なのか。

■杉山 モデル化するとき、判断したいと思っている事柄を識別できるだけの情報が入っているかどうかをあらかじめ考えなければなりませんね。そのモデルからは絶対わからないものもありますから。そこは常に悩ましいところですね。

▼岡田 本日はお時間を持っていただきありがとうございました。先ほど、杉山先生が仰っていたように今こそ、脳科学と計算機科学、その他の社会科学あるいは哲学が組んで研究をしていかなければならない段階に入っていると思います。

■杉山 この新領域プロジェクトがはじまるとき、銅谷先生に声をかけていただいたんですが、私は脳科学とは直接関連のないことを研究していたので、正直、ちょっと戸惑ったんです。しかし、皆さんと一緒に何年も共同研究をさせていただく中で、刺激を受けることがたくさんありました。まったくがう分野の概念に、我々の分野の概念と似た部分があることを知るのは非常にエキサイティングです。これをきっかけに脳科学の専門家の皆さんと交流を深めていければいいと考えています。

▼岡田 どうもありがとうございました。





## ● Rhythmic Firing of Pedunculopontine Tegmental Nucleus Neurons in Monkeys during Eye Movement Task.

Okada KI, Kobayashi Y.

PLoS One. 2015 Jun 1;10(6):e0128147 PMID: 26030664

### ・研究の概要

大阪大学大学院生命機能研究科脳神経工学講座・視覚神経科学研究室の小林康准教授、岡田研一兼任研究員の研究グループは、サル脳幹脚橋被蓋核で行動状況依存的なニューロン活動ダイナミクスの変化をとらえた。

### ・研究の背景

パーキンソン病などでは随意運動異常などの意思決定異常とともに、脳幹中脳のドバミン、アセチルコリン系のモジュレーションによる大脳の集団的な神経活動ダイナミクスに異常が見られる。非侵襲で大脳、脳幹活動を操作し、随意運動を改善させるような効果的な脳刺激法を開発するうえで、ヒトに近いサルで脳幹アセチルコリン系のニューロン集団の単一細胞レベルで、随意運動遂行、意思決定と神経活動のダイナミクスの関係を明らかにする必要がある。

### ・研究の成果

サル脳幹のアセチルコリン性の脚橋被蓋核（図1参照）において、特に随意眼球運動（図1参照）遂行中に、 $\alpha - \beta$ レンジ (8-30Hz) で規則的な単一ニューロン活動（図2参照）が生じることを発見した。

### ・本研究成果の意義

経頭蓋直流電流刺激(tDCS)は、非観血的に大脳皮質を刺激して、神経活動を促進あるいは抑制する方法で、すでに臨床の場で試用されているが、その作用機序については不明な点が多い。わたしたちはサルを用いて、異なる方法（部位、強さ）のtDCSによる脳の活動の変化と、その結果引き起こされる行動・自律神経反応の変化を特定することにより、tDCSによる脳機能操作法の確立を目指しています。具体的には認知行動課題を遂行しているサルを用いて、tDCSが中脳ドバミン・脳幹アセチルコリン系の変化を介して注意、意欲・覚醒レベル・学習・意思決定の変容をもたらすメカニズムの解明研究をめざしています。今回得られたサル脳幹アセチルコリン系の単一細胞レベルでの随意運動遂行と神経活動のダイナミクスの変化を、今後適切なtDCSパターンの開発につなげたいと思います。

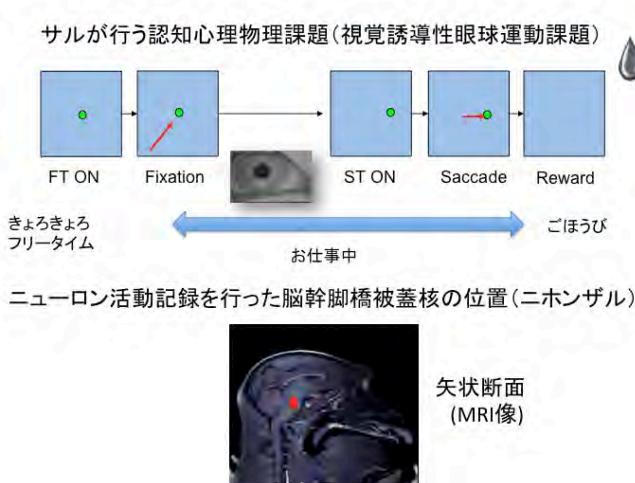


図1. サル眼球運動課題の様子。課題中に脳幹脚橋被蓋核から単一神経細胞の活動を記録。

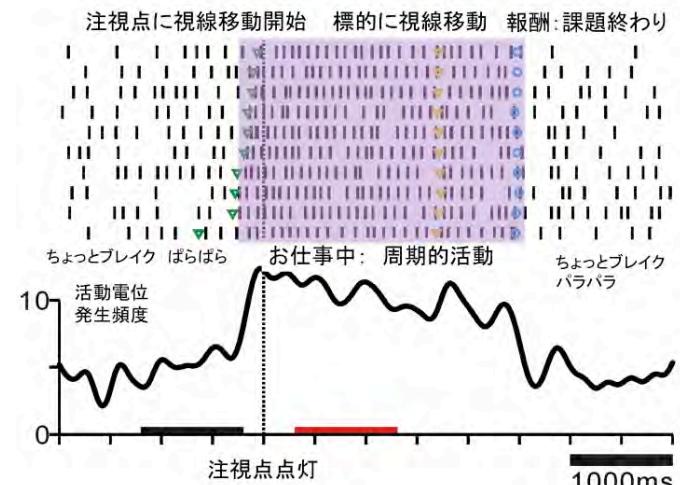


図2. 眼球運動課題中のサル脳幹脚橋被蓋核の単一神経細胞の活動の様子。課題遂行中は活動が規則的になる。



## 背側縫線核による報酬・嫌悪情報処理 Appetitive and aversive information coding in the primate dorsal raphé nucleus

Hayashi and Nakamura, J. Neuroscience

我々の意思決定や行動は、期待や経験によって変化する。この過程の神経メカニズムにおいて、モノアミン系神経伝達物質であるドパミンとセロトニンの関与が指摘されてきた。ドパミンについては、報酬予測誤差信号など、具体的な機能が明らかにされているのに対して、セロトニンの機能は未だ不明であり、特に、報酬・嫌悪情報処理のいずれに関与しているのか矛盾する結果が得られていた。この疑問に答えるため、我々はサルに視覚刺激と、報酬か嫌悪刺激を関連付ける古典的条件付け課題を行わせ、セロトニン細胞を多く含む背側縫線核 (dorsal raphé nucleus, DRN) から単一神経活動記録を行った。課題では、試行の開始予告刺激 (timing cue, TC) の後、視覚条件刺激、遅延期間、無条件刺激の順に呈示される。ここで、報酬が異なる確率で与えられる試行ブロックと、

図1

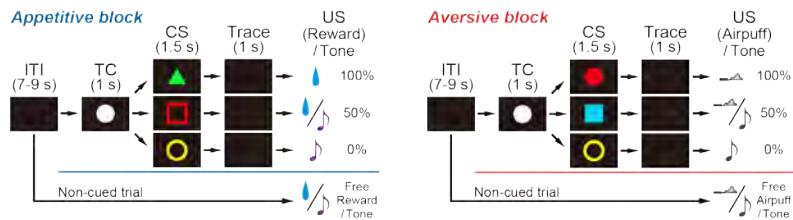
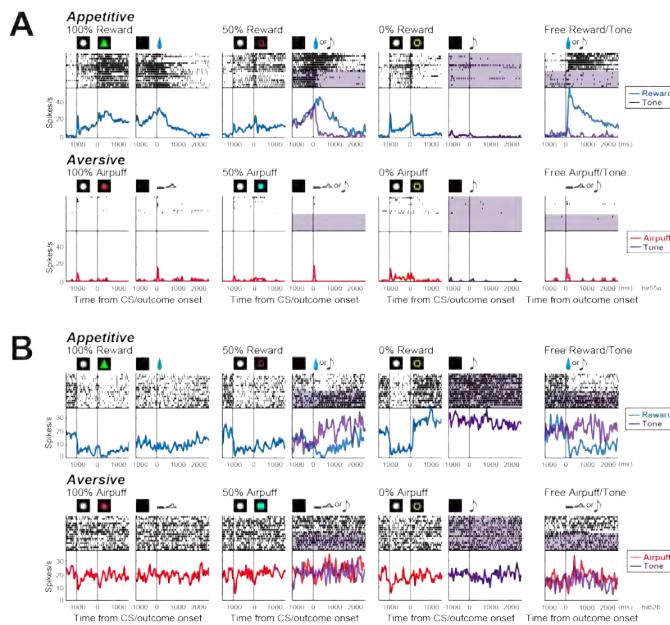


図2



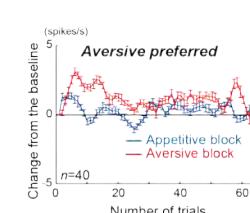
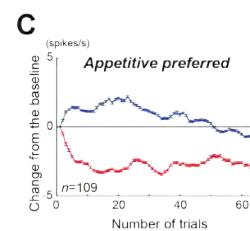
嫌悪刺激であるエアパフが異なる確率で与えられる試行ブロックを別々に行なった (図1)。

実験の結果、CSへの反応は報酬 CSへのものが主であることがわかった。記録した細胞のうち、半数近くは報酬 CSのみ、15%近くは報酬・嫌悪両方の CS、嫌悪 CSにのみ反応するのは 4%に過ぎなかった。また、報酬 CSへ反応するもののうち、半数は報酬確率によって反応強度が段階的に変化することがわかった。一方 USへの反応は 80%近くの細胞が報酬または嫌悪刺激に反応していたが、確率による変化はやはり報酬に対する変化が主であった。

このように CS, USへの反応は、報酬情報処理が主であるが、TC期間や試行間の持続的な発火の頻度は嫌悪情報により強く変化することが分かった。解析した細胞の半数以上が報酬 > 嫌悪 (図2A) または報酬 < 嫌悪 (図2B) ブロックという、一つ一つの試行ではなく、報酬か嫌悪のコンテキストに特異的な発火パターンを示した。興味深いことに、いずれの場合も、課題外で測定したその細胞の生来の発火頻度から大きく変化を示すのは嫌悪ブロックにおいてであった (図2C)。すなわち、DRNには異なる時間スケールの報酬・嫌悪情報処理機

構が働いている。持続的なコンテキストの情報においては嫌悪情報、一時的な刺激への反応は報酬刺激による変化が強い。

このことは何を意味しているのだろうか。報酬の対象は突然出現し、短期間の量の分析が有効であろう。一方、嫌悪情報は一つ一つの事項の細かい分析より、嫌悪刺激の有無の判断と、それが起きうるコンテキストの認識のほうが重要であろう。DRNニューロンは、この正反対の情報を異なる時間発火パターンで、一つの細胞で体現していた。異なるストレスレベル下において行う報酬獲得行動の変化など、異なる時間スケールの報酬・嫌悪情報処理の統合のモデルを明らかにすることは、より現実的な意思決定理論の確立や、ストレスにより表面化する精神疾患の発症機序の理解にも寄与すると考えられる。



## ● 脳科学若手の会 春合宿開催記

### 脳科学若手の会第7回合宿運営スタッフ

村井祐基・池田宗樹・磯村拓哉・川端政則・杉浦綾香・長野祥大・渡邊真弓

2015年3月28、29日（土、日曜日）の日程で、脳科学若手の会第7回合宿を、「新学術領域研究：予測と意思決定の脳内計算機構の解明による人間理解と応用」共催のもと、ホテルウイングインターナショナル相模原にて開催致しました。この合宿は「脳科学・神経科学領域の学生と若手研究者が、互いの分野の壁を超えて共に学び合い、交流するための場を提供する」という目的のもと、脳科学若手の会が毎年春に開催している合宿形式の研究会です。

本年度は、領域代表である沖縄科学技術大学院大学の銅谷賢治先生と、理化学研究所脳科学総合研究センターの風間北斗先生にご講演いただき、学部1年生からポストドク・教員まで、全国各地から35名の参加者を集めて開催致しました。なお本合宿は、小原医科産業株式会社様にご協賛頂いております。



写真1 銅谷賢治先生

合宿初日には、参加者によるフラッシュトーク形式の自己紹介のあと、銅谷先生に「強化学習の計算理論と神経機構」と題してご講演いただきました（写真1）。まず強化学習の基本的なアルゴリズムを学び、行動価値観数、遅延報酬割引、モデルベース行動評価といった基礎的な概念について学習した後、これらのアルゴリズムが大脳基底核や大脳皮質の神経回路、ドーパミンやセロトニンなどの物質系によって脳内でいかに実現されているかについて、銅谷先生ご自身のご研究をもとに紹介が行われました。特に、先生の修士時代の研究発表である歩行運動学習ロボットや、生存・配偶戦略を模した行動を学習し進化するサイバーロボットなど、様々な具体例を用いた強化学習の説明に、フロアからは盛んに質問・議論の声が上がり活発なやり取りが行われました。

初日後半からは、風間先生による「神経集団活動から匂いの快楽情報を解読する」と題したワークショップが行われました（写真2）。講義部分では、神経科学におけるモデル動物としてのショウジョウバエの利点や、実際にショウジョウバエ成虫の嗅覚回路を対象に二光子イメージングで嗅覚細胞から匂い応答をとった研究についてご紹介いただきました。また若手を対象にした講演ということで、研究室選びのあり方や研究者としてのキャリアの積み重ね方、脳科学全体の見取り図の中でご自分の研究内容がどのように変遷してきたかなどについてもお話しいただきました。ワークショップでは参加者が6つの班に分かれ、匂い情報に基づいて仮想空間を飛行するハエの行動データと、同時に計測したハエ嗅覚系のカルシウムイメージングのデータを組み合わせて、報酬に基づく知覚的意志決定の背後にある神経集団活動を解析する実習が行われました。参加者が発表する機会が多く、様々な分野の参加者によるそれぞれ異なる観点からの意見が提案され、盛んな意見交換が行われました。

初日の夜には懇親会が開かれ、先生がたが現在の研究テーマに至った経緯や、論文が出版されるまでの苦労、研究や研究業界に関する裏話などを交え、フランクにお話しいただきました。また、懇親会会場では参加者によるポスター発表も行われ、銅谷先生、風間先生を交えて活発な議論が行われました。

今回の一連の合宿を通じて、それぞれの参加者が脳科学研究における自身の研究分野の位置づけについて再認識し、理論研究者と実験研究者が相互に協力していく必要性を体感する良い機会になったのではないかと思います。末筆ながら、新学術領域「予測と意思決定」からのご支援に心から感謝申し上げますとともに、今回参加した学部生・大学院生・若手研究者が、こうした分野に参入し、活躍する一助となれますとしたら幸いです。



写真2 風間北斗先生



## 新学術領域研究「予測と意思決定」第9回領域会議 参加記

市之瀬 敏晴（東北大学大学院 生命機能科学専攻）



今回私は新学術領域研究「予測と意思決定」の第9回領域会議に参加した。この研究会は、線虫からヒトまで、学習や意思決定の研究を行っている研究者が一堂に会して情報交換を行うものである。私は普段自分の専門以外の研究者と接する機会があまり多くないこと、この領域会議に参加するのが初めてだったこともあり、非常に刺激的でありかつ勉強になった。

特に印象に残っているのは、線虫でも spaced conditioning 依存的に長期記憶が形成されるという研究や、モデルベース記憶とモデルフリー記憶についての研究などである。以下にそれぞれのトピックについての私の感想を述べる。spaced conditioning とは、動物に対して複数回の学習を行う際、学習間に一定の休憩時間を挟むことである。対照的な実験として休憩時間を持まない massed conditioning がある。本研究会で拝聴した線虫を使った連合学習は、学習回数は同じであるにも関わらず、休憩を挟んだ spaced training においてのみ、転写因子 CREB 依存的な長期記憶が形成されるということであった。ショウジョウバエや齧歯類を使って、学習間の休憩が長期記憶形成を実現する分子・神経回路メカニズムの研究が盛んに行われているが、線虫でも同様な現象が見られるということは驚きであり、また、非常にシンプルかつ神経回路構造が電子顕微鏡レベルで解明されている線虫を使って spaced conditioning 依存的な長期記憶形成の研究ができるとの強みを感じた。

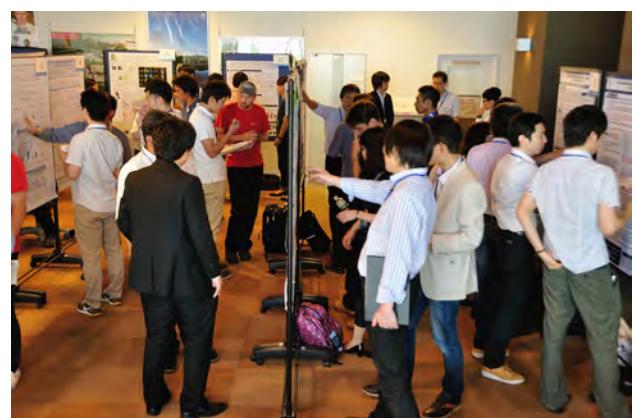
次にモデルベース記憶について述べる。モデルベース記憶とは、学習した個体が、獲得行動によって得られる結果の内容（食物報酬など）を理解していると認められるような記憶である。対照的な記憶として、個体が獲得行動のもたらす結果を理解しないモデルフリー記憶がある。これは獲得行動が習慣化されたものとみなすこともできる。今回の研究会では複数の先生がこのトピックについてお話しされており、最先端分野の一つであることが理解できた。しかし门外漢であり勉強不足である私にとっては、概念の理解がやや難しかった。つまり、どのような実験データが得られ

れば「モデルベース記憶である」と結論づけられるのか、やや曖昧であるように感じたということである。Bradley Doll らの総説 (Bradley Doll et al., 2012, Current Opinion in Neurobiology) においてモデルベース記憶の一例として挙げられていたのは、食物を報酬として用いたレバー押し学習で、空腹時にのみ獲得行動が観察される場合、というものである。この「空腹時特異的な食物報酬記憶の読み出し」は、私の専門であるショウジョウバエの嗅覚連合記憶でも観察される。しかしこの事実を持って、「ハエが獲得行動によって得られる結果を理解している」と結論付けて良いものか、やや曖昧な点が残ると感じた。別の見方として、満腹シグナルが記憶の読み出しを単純に阻害しているという説明も成り立つからである。モデルベースとモデルフリー記憶は、学習による獲得行動の発現が、周囲の環境や個体の状況により影響を受ける度合いの一つの



指標であると言えるかもしれない。

今回の研究会で、形成当初はモデルベース的だった記憶が、時間経過や学習の繰り返しによってモデルフリー化するというお話を拝聴した。モデルベース記憶とモデルフリー記憶は神経細胞レベルでどう区別されるのか、また、記憶の質的変化はどのようなメカニズムで引き起こされるのか、非常に興味深いと感じた。



## チュートリアル「光学イメージングと操作の拓く可能性」参加記

谷本 拓（東北大大学 生命科学研究科）

第9回領域会議が2015年4月25日から27日までの日程で、沖縄科学技術大学院大学、シーサイドハウスにて開催されました。会議の前日には「予測と意思決定」では恒例の、班員以外も参加できるチュートリアルが行われました。

今回のチュートリアルのテーマは「光学イメージングと操作の拓く可能性」です。これまで、「ヒトの意思決定過程の測定とモデル化」など、霊長類、特にヒト脳の予測や意思決定機構に関する話題を主に扱っていましたが、今回はモデル生物（マウス、ゼブラフィッシュ、線虫）を使った神経回路研究や、多くの生物で共通に用いられるようになってきた、神経活動の光学的記録法に関するものでした。

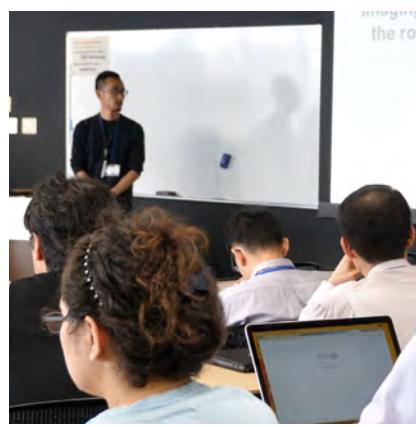
講演者は以下の三人です。

- ・Bernd Kuhn 博士（OIST）  
Two photon microscopy in mammals
- ・鳥越万紀夫博士（理研 BSI）  
Imaging/optogenetics in non-mammal vertebrates
- ・丸山一郎博士（OIST）  
Imaging/optogenetics in invertebrates

Kuhn博士の講演は、神経活動をモニターするための蛍光プローブの開発の歴史から、2光子励起顕微鏡の原理と応用を中心としたものでした。基礎的なことから、行動中のげっ歯類脳での神経活動イメージングの実例までを概観していただいたので、専門外の参加者から多くの質問が出ていたのが印象的でした。鳥越博士と丸山博士は、それぞれゼブラフィッシュと線虫というモデル生物を使った研究の特色と、実際の実験の例について解説されました。生きた個体でのイメージング、オプトジェネティクスのための実験系は、どの生物でも工学的技術を取り入れた工夫がなされており、実験系の確立という技術的な面も研究の進展を大きく左右することが伝わってきました。



Bernd Kuhn 博士



鳥越万紀夫博士



丸山一郎博士

光学（または工学）的な技術に加え、三人の先生の講演に共通していた特徴は、遺伝学的な手法による標的細胞種特異的な活動計測や操作があげられると思います。オプトジェネティクスなどは良い例ですが、遺伝学的細胞標識により、従来の電気生理学的計測法や薬理学的手法では追求することが困難だった問題にも挑戦できるようになりました。予測や意思決定に限らず脳機能の研究全般において、遺伝学的技術への貢献がより一層期待されるのではないかと感じました。

また、種を超えた脳機能の共通性に関しては、今回のチュートリアル、領域会議をとおして再三議論にのぼりました。例えば、線虫やゼブラフィッシュは二次条件付けができる「脳」を持つのか？光学イメージングと操作を使って、その神経回路モチーフの共通性に迫れるのか？今後は、CRISPR/Cas9などの汎用性の高い技術の拡充により、このような問い合わせに答えることができるようになってくるでしょう。そして、少数の「モデル生物」という枠を超えて、それぞれの動物の課題遂行能力に着目して対象にする生物を選ぶ時代が来るかもしれません。そうなると、やはり明確に定義された行動課題とその適正な解釈が、これまで以上に重要になってくるのでしょう。

「予測と意思決定」の領域会議の使用言語は毎回英語ですが、今回はチュートリアルも英語で行われたため、日本語を喋らない参加者も見受けられました。統計をとったわけではないので詳細は不明ですが、英語でのチュートリアルという理由で、日本人の参加者が減ったという印象は受けませんでした。英語での運営は、日本発の新学術領域を国際的なものとして推進するためにも非常に重要な取り組みですし、「予測と意思決定」に留まることなく、今後他の領域に受け継がれて行くことを願っています。



高岸 治人・坂上 雅道（玉川大学 脳科学研究所）

## 「社会科学実験入門」について

さる6月11-13日、東京都町田市の玉川大学脳科学研究所において、第5回玉川大学脳科学トレーニングコースが、「予測と意思決定」新学術共催で開催されました。約4倍の応募者の中から選ばれた30名弱の参加者が、6つのコースに分かれてトレーニングコースを受講しました。今回はその中の一つ「社会科学実験入門」コースの様子を紹介させていただきます。

「社会科学実験入門」コースは、玉川大学脳科学研究所トレーニングコースの一つとして2013年から始まり、これまで幅広いバックグラウンドを持つ学生・ポスドクの方が参加しました。本コースでは、社会科学実験が未経験の人を対象に、独立で経済ゲーム実験を行えるようになることを目的としており、実験実施のための方法（実験計画のつくりかた、実験課題の作成、実験の進め方）を3日間かけて一通り学びます。

本コースでは、まず始めに、玉川大学脳科学研究所で進めている「一般人サンプルを対象とした研究」の説明を行い、そこで実際に用いている実験課題を受講生に体験してもらいます。「一般人サンプルを対象とした研究」では、町田市周辺に住む20代から50代までの成人の方、約500名を対象に向社会的行動の心理的、神経基盤を明らかにする研究を進めており、2012年から現在まで8回実験が行われ、のべ3502名が実験に参加しています。受講生は、はじめにこの研究における参加者の立場として実験に参加します。それが一通り終わった後は、こんどは実験参加者としてではなく実験スタッフの役割を体験してもらいます。実験スタッフは、直接参加者と顔を合わせて実験を進めていく裏方役や、課題のプログラムをコンピュータで制御する役などを行います。このように参加者と実験スタッフの2つの役割を体験してもらうことで、課題の作成方法、実験の手順、実験を行う際の諸注意について学びます。一日目は、このように実験の体験を行うことで終わります。

二日目・三日目は実験課題のプログラムを作成していきます。実験課題プログラムの作成方法は様々な種類がありますが、玉川大学脳科学研究所で行っている実験課題はすべてVisual Basicによって作られているため、Visual Basicの基礎的な知識と、直感的に分かりやすいインターフェイスの作成方法に

ついて学びます。本コースの受講生のほとんどはプログラム未経験の方ですが、そのような方でも実験課題が作成できるように基礎からプログラムの書き方を解説します。プログラムが完成した後は、正常に動くかどうかを確認します。人を対象に社会科学実験を行う場合は、参加者に対して本当に相手が存在することをしっかりと認識してもらう必要があります、特にコンピュータを介して実験を行う際には、その点に強く注意を払います。従って、課題を作成する際には、単に課題の説明を画面に並べるだけでは不十分である場合があります。本コースでは、そのような課題を作成する際に役に立つポイントを事細かく受講生のみなさんにお伝えします。プログラムが完成し、正常に動くことが確認することが出来た後は、山岸俊男教授を含めて、受講生がこれから行おうとする実験についての相談会が設けられます。

毎年、この相談会では受講生と山岸先生との間で時間を越えた議論が繰り広げられています。近年では、心理学や経済学以外の分野においても社会科学実験、特に経済ゲームを用いた実験を行う研究が爆発的に増えてきましたが、本コースでは、これまで社会科学とは接点がなかったけれども、今後、積極的に社会科学実験を行いたいと考えている学生やポスドクのみなさんに対して実験の場で役に立つ技術を学べるようにサポートします。

先のニュースレター Vol.7 「予測と意思決定」リレー対談において誤りがございましたので、お詫びを申し上げますとともに、謹んで下記の通り訂正いたします。

---

**4ページ**

左 2行目 推論の構造は命題的である必要はない  
→ 推論の構造は命題的である必要はないかもしれない

---

**9ページ**

左 8行目 私の言ったことすべては沈黙しなければいけないことだった  
→ 私の言ったことすべては「沈黙しなければいけないことだった」  
左 23行目 一例です。 → 一例で、意識の外的世界との志向的関係性を先行させています。  
チョイス論的な → 主観主義的な  
右 19行目 何がありえるかを → 何か語り得るかを  
右 23行目 ネマンが言っているような → ネマンらが言っているような  
右 28行目 たとえば  
→ 人の心を機能的レベルで捉える立場もこれにあたります。たとえば推論でも、

---

**10ページ**

左 35行目 機能主義の → 心の哲学の機能主義の

---

**11ページ**

左 14行目 銅谷さんを → 銅谷先生を  
右 24行目 アイトラッカー → アイトラッキングを通じたアイムーブメント  
右 25行目 問題による → 問題によっては捉えられる

## ● 平成 27 年度の主なイベント

- ABLE2015 Summer 2015 年 6 月 14 日（日） 内田洋行東京本社
- Initiative for a Synthesis in Studies of Awareness (ISSA) Summer School 2015.8.3-21, Kobe  
<http://issa.elsi.jp>
- International Symposium on Prediction and Decision Making 2015.10.31-11.1, University of Tokyo
  - ポスター発表申込締切 / Poster Abstract Deadline: 2015.9.30
  - 参加登録締切 / Registration Deadline: 2015.10.16

皆様ふるってご参加ください。申込は以下から。Please register now from the link below.

<https://groups.oist.jp/ncu/international-symposium-prediction-and-decision-making-2015>

- 第 10 回領域会議（包括脳シンポジウム期間中）

2015 年 12 月 17 日（木）～19 日（土）東京 学術情報センター

領域会議参加登録は包括脳ネットワークホームページからご登録下さい。

[https://www.hokatsu-nou.nips.ac.jp/index.php?action=pages\\_view\\_main&&block\\_id=5903#\\_5903](https://www.hokatsu-nou.nips.ac.jp/index.php?action=pages_view_main&&block_id=5903#_5903)

- 脳と心のメカニズム第 16 回冬のワークショップ

招待講演：Prof. Bill Newsome, Prof. Matthew Rushworth 2016.1.6-8