

脳科学から人工知能へ

理化学研究所脳神経科学研究センター チームリーダー 田中 啓治

深層学習を中心とした最近の人工知能の発展は、脳科学の影響で始まったものの、その後は専らコンピューターの計算容量の爆発的な増加によって脳科学とは関係ないところで進んでいるとの評をよく聞きます。しかし、私は認知制御に関する脳科学がさらに進むにつれて人工知能へ大きな影響を与える可能性があると思っています。

その根拠は、最近の前頭前野（前頭連合野）機能研究の爆発的な展開にあります。前頭前野は感覚入力と運動出力から遠く、行動の認知制御（高次レベルでの制御）にとって重要な働きをすることを考えられている前頭葉前部に位置する領域の総称です。1970年代から前頭前野の研究はあったのですが、主溝を中心とする背外側部の研究に集中していました。この領域を破壊したサルがワーキングメモリを必要とするいろいろな遅延課題の成績を低下させることと、ワーキングメモリに対応する神経細胞活動が記録されたことが、その後の研究を引きつけたのだと思います。

しかし、その後の前頭前野研究における新しい展開は背外側部以外の領域でありました。ヒトでのイメージング研究が盛んになると、背側前帯状皮質などの前頭前野内側部に大きな関心が集まりました。認知的に困難な課題を遂行すると、課題の詳細によらずに、この領域には強い活動が引き起こされたからです。多くの仮説が提唱され、それを検証する多くの実験が行われました。中でも、背側前帯状皮質が異なる反応セットの間のコンフリクトを検出し、これを受けた前頭前野背外側部が認知制御のレベルを上げて次の試行におけるコンフリクトを減少させ課題遂行をスムーズにするというコンフリクトモニター仮説が一世を風靡しました。しかし、背側前帯状皮質は認知制御を

実装する制御面でも働くという証拠や、探索的行為選択に本質的な働きをするなどの証拠が出てきて、現在は混沌とした状況にあります。

前頭葉の腹側部にある前頭眼窩野についても目まぐるしい展開がありました。古くは、この領域を破壊したサルの遅延反応課題における成績が障害されることから、前頭眼窩野の機能は一度学習した行動を抑制することであると議論されました。しかし、前頭眼窩野破壊サルでも状況によっては反応の抑制が正常に働くことが示され、柔軟な刺激—結果連合がこの領域の基本機能であると修正されました。また神経経済学に基づいて設計された行動課題を用いた実験の結果から、事柄の主観的価値の共通表現がこの領域にあるとする考え方が提案されました。一方では、行為の予測結果のその時々における価値が表されるとの考え方を経て、最近では内的な情報による課題遂行上の内的状態が表現されるとの考え方が提案されています。

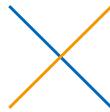
これらの一見混沌とした議論と実験の積み重ねの中で、行為選択に関わる意思決定の過程にこれまで想定されてこなかった多くの要素過程が見つかりました。心理学的研究では解きほぐすことができなかった意思決定の過程が、脳の部位ごとの活動を取り扱う脳科学的研究によって解きほぐされつつあります。人工知能の大きな目的は、問題解決を含んだヒトの意思決定過程の自動化にあるのでしょうか。人工知能が問題解決・意思決定の中で何をすればよいかについて、認知脳科学の展開が大きなヒントを与えるときが近づいていると感じています。





谷口 忠大

立命館大学 情報理工学部 教授



高橋 英彦

東京医科歯科大学大学院 医歯学総合研究科 教授



谷口 よろしくお願ひします。わざわざ平日の朝にありがとうございます。私、前回まで二回やったので、本当はタッチ交代で、今日は坂上先生がホストの筈だったんですけど、ご病気ということで急遽三連続登板の谷口です。よろしくおねがいします。

高橋 坂上先生、大丈夫ですかね？

谷口 きっと、大丈夫でしょう！ あ、次回か、次々回にこの穴は埋めていていただくということで、今日の対談は進めていきたいと思ひます。よろしくおねがいします。

高橋 よろしくおねがいします。

谷口 さて、今回、僕がホストということなので、リードさせてもらえば良いんですかね？

高橋 では、それで。

谷口 まずですね、やっぱり新学術領域の対談ということで、僕たちのコラボレーションの話をしなないとイケないですよね？ 実ひ、高橋先生とは今回の新学術領域で初めてご一緒させていただいてるんですが、その中で統合失調症の人工知能モデルができないかという話をさせてもらっています。そういう背景もありつつ、共同研究の日常議論の中ではなかなか聞くこともできない先生のライフヒストリー—とか、根本のモチベーションみたいなものを聞けたらなあと思ひます。まず、始めになんですけど、先生はどういう風にして統合失調症の研究にまでたどり着かれたんですか？

高橋 そうですね、どこまで遡れば良いのやら。

谷口 では、まず大学の学部を選ぶ辺りから……行きますか？

高橋 学部ですか？ そうですね、もともと生物とかそういうのに関心がありました。親族に体が弱い子供がいて—そういう意味で、最初は小児科に関心があったんです。でも、そういうしてるうちに、臓器だけではなく循環系というシステムとして理解したいという風に発展していったんですね。その子は

心臓が弱い子供だったんですけど。やっぱり、人間を理解するには一つの臓器だけみては駄目だと思ひ始めました。まあ、循環系に留まったら良かったのかもしれないですけど、免疫系とか、中枢神経系とか……そういうシステムとしてヒトを理解したいという風に変わって行きました。

谷口 システム論的ですね。広がりますね。

高橋 ええ。それで、最後には、脳が面白いかなという風になったんですね。脳の分野ですと脳外科、神経内科、精神科とあるわけなんですけど、当時私が医者になった二十数年前だと、脳っていうところで、まだよく分かってない部分が多いのは精神科でした。まあ、今でもそうかもしれませんが。神経内科と最後には迷ったんですけどね、精神科の先生が「これからずいぶん脳でいろいろなことが分かってくるんじゃないかな」というようなことをおっしゃっていたので、精神科を志したという感じですかね。私自身も「あんまり分かってないところ」とか若干「胡散臭いところ」をしっかり科学をしたいというようなモチベーションがあったので。

谷口 胡散臭いものを科学したいというのはすごく共感しますね！ 僕自身メチャメチャそれが好きなんですけど。目に見えないものを科学するっていうのが大事だと思うんです。ちなみに、それを選ばれたのは二〇年前ぐらいなんですか？

高橋 はい。

谷口 脳科学を学ぼうとして精神科っていう選択には今でさえなかなか行かないように思ひますが？ 僕の偏見かもしれませんが、脳科学ってもっと計測可能なものに向かう傾向がある気がするんです。何だろう？ 客観的に定義可能—とか—。

高橋 精神科の学位論文はなんか文学部の論文ですかみたいなことを言われることもありましたがね。まあ、分野的にはそういう時代もありましたので。どうしても心とか主観的な体験である

し、今おっしゃったように目に見えないものを対象にするので、難しい面もあるんです。でも私自身は、目に見えないものをどう科学の上に乗せていくか、どう見える化していくかというところに一番関心がありましたね。

谷口 特に精神科って、一般の人が精神と肉体の対比っていうのをよく言うように、器質的なものよりも、やっぱり霊魂的であったり精神的であったりするようなイメージがあるじゃないですか。アプローチとしても、フロイトからユングとかフランス思想のラカンの流れとか、要はある種精神分析的な流れってあったじゃないですか。実はそのあたりは僕のルーツとも関係しているんですが。

高橋 はあ。

谷口 母親が河合隼雄に学生時代に師事していて、小さい頃から家の中にユング心理学の本とかあって、親しんでいました。僕自身が中学生や高校生の時にそういう本を読んでいたりで、心や精神に興味を持っていたというのがありました。でも、僕自身が「ど理系」だったので工学部に進学したんですが。まあ、工学部の中でギリギリで心を研究するところっていうところで、人工知能や創発システムの方に来たということがありますね。——あ、自分のことを喋りすぎました。

高橋 (苦笑)

谷口 話を戻しまして、そういう風な精神分析的なアプローチだと医学——いわゆる今の医学の流れとは違う気がするんですね。その辺からかなりの誤解も多くあったりするような気がするんですけど？

高橋 そうですね。未だに医学部の学生ですら最初精神科の授業とか実習回ってきて、「精神科ってどんなイメージ？」って聞くと「いつも本読んでるイメージ」とかそんな感じで、なかなか実際の身体とはかけ離れた科みたいなイメージを持っている人もいます。ただ今はもう脳科学が占める割合が多くなっているし、あとはやっぱり体ともいろいろ繋がっているんで、身体化、フィジカルな側面も多くなっているよという話は学生さんにもよくしてますけどね。

谷口 我々が議論しているものは、精神と言っても上位の統合するレベルの話であって、なかなか視覚の情報処理、一次視覚野の処理みたいに、要素の情報処理に還元しにくいところじゃないですか。さっきシステムって言葉がでてきたと思うんですけど、それって精神のシステムみたいな目に見えないシステムのことですよね？ いわゆる「システム論」で言われるような。1990年代～2000年代の前半あたりに自己組織化だとか免疫系のハイパーシステム、オートポイエーシスといった新しいシステム論のブームのようなものがあって、すごく憧れました。人間の精神のシステムとかロボットの学習とかロボットを人間的にしていくところでそういう風なシステム観が非常に大事

だと思って、今も記号創発システムっていう言葉でその思いは大切にしているんです。僕の研究がただの「ロボットの学習」の研究にならないようにと。高橋先生は当時のそういうシステム論的なシステム観から影響を受けたとか、好きだったとか、そういう話ってあるでしょうか？



高橋 そこまで明示的なものがあつたかと言われるとあれですけどね。単純に見えていて複雑なパーツがあるとか、その中でその背景にあるメカニズムがどうなっているんだろうとか、そういうことに関して漠然とした関心は持っていましたね。システム論みたいなものを僕ら医学部が体系的に習うわけでもないの、谷口さんほど問題意識があつてやっていたわけではないですけどね。

谷口 お世辞じゃなくてある種の哲学を持って研究に取り組まれている気がするんです。易きに流れないというか。影響を受けた思想家とか学者とかつておられたりするんですか？

高橋 そうですね、もともと人と同じことはやりたくないって天邪鬼なところがあると思います。一つ挙げるなら、今もご存命で著名な先生のおっしゃっていた言葉ですね。お目にかかる機会があつて、懇親する場でおっしゃったのが、「研究者には大きく分けて二通りいる」と。一つは、一つのテーマを掘り下げていくタイプでどちらかというとオーセンティックなやり方。もう一方が、水平方向にあれもこれも食い散らかすタイプだと。多くは食い散らかして最後まとめられなくなって収集つかなくなつて終わりつてなっちゃう人も多いんだけど、一見繋がっていないものを最後繋げてくるそういうビッグピクチャーを描ける研究者がいるので、どっちがいいとか悪いとかじゃなくて、自分がどちらのスタイルかつてことを踏まえて研究しなさいよつて言われました。まあ、僕は圧倒的に食い散らかしてる自覚があつたので(笑)。

谷口 そうなんですか (笑)。

高橋 周り見てると遺伝子とか分子とか細かい話に収束した話をしている研究者が多かつた中で、自分は随分と食い散らかしてるという自覚はあつたんです。でも、「これでいいんだ」という風に偉い先生から言っていたら、そこで一皮剥きましたね。「よし、もうこれでやっついこう」と。

谷口 それはおいつつぐらいの時ですか？

高橋 それはですね、36歳か37歳くらいの時ですね。

谷口 なるほど。多分、僕も食い散らかす方ですね。ピブリオバトルの話から人工知能、ロボティクスとかいろいろあるわけなんですけど、本質的にはさっき言っていたシステム論に興味があるんです。それぞれの現象の裏に隠れてる共通な何か引き寄せられる関心事があって、そうなるとある種水平的にならざるを得ないのかなという。

高橋 そうそう、そうなんですよ。

谷口 要するに還元してその要素だけに行っちゃうとシステムの部分を捨てないといけなくなるんですが、それにはどうしても葛藤があって。

高橋 そうですよ。だからそういう意味では食い散らかすスタイルに、それ自体がシステムというところにもなりますよね。

谷口 「食い散らかす」って、……もうちょっといい表現がないですかね（笑）？ 食うのアナロジーがいいのかどうかというのも分からないんですけど、何なんですかね？ バランスよく食べてる——みたいな（笑）？

高橋 そうですね、それを最後ちゃんと繋いでそれぞれの要素が実はこういうところで繋がってましたよ。

谷口 多分ジャン・ピアジェについて論評した本だったと思うんですけど、そこに「ジャン・ピアジェは学問体系を志し、体系を作り上げることを目標にした学者だった」みたいな記述があって、僕は「それを目指したいな」と思いました。日本人は個別の研究成果は持っていても圧倒的に体系を作ろうという人が少ない気がします。

高橋 そうですね確かにそういうところは、精神科なんかも医学全体が欧米科学を輸入されて翻訳ってところからなので、そこから日本発の新たな学問の流れみたいなのができるというと思いますね。

谷口 どうしても一般的な学生や生徒……大人でもですけど、僕らってセットされたゲームの中で優秀であろうとする傾向があるじゃないですか？ そのゲーム自体を作るっていうのがなかなか難しいですよ。結構それが、天邪鬼っておっしゃってたところが僕のキーというか、天邪鬼じゃないときちっと行儀よく従ってしまうから——。

(しばらく脱線)

谷口 ——えっと、そろそろ戻しましょう。水平で食い散らかしてきたっておっしゃったんですけど、先生は統合失調症というテーマの「中」で食い散らかしてきたのか、統合失調症というテーマの「外」でもいっぱい食い散らかされてきたのかと

いうところですよ。

高橋 ああそれは「外」ですね。統合失調症というのはいろんな精神機能が障害されてくるので、いろんな精神機能をそれぞれまずは基本的なところを、そこすら分かってないので、病気の機能というよりか正常の機能から調べようという話でやってみましたけど。



谷口 なるほど。じゃあ、特に外から見たら統合失調症の研究と距離があるんだけど繋がってるぞ！ みたいな研究で、先生のお気に入りのものがあれば教えていただけないでしょうか？ 「谷口、これは知らんやろ？」みたいな。

高橋 そうですね、精神医学って偏見とか差別の歴史があってですね、ややもするとそれに携わっている医療側への偏見もあったりするんですけど。統合失調症って、その昔、精神分裂病と言われていたものを統合失調症っていう風に変えたわけなんですけれど、そこで名前（ワーディング）だけを表面的に変えても意味がないだろうと思いました。そこで、一般の方とか、かつそれを今度は医学部生に実際に患者さんを見る前と見たあとでどう変わるかみたいなことを心理物理学みたいな一部の脳波とかリアクションタイムとかそういうのを使いながらやったりしました。名前が統合失調症になってネガティブなイメージが緩和されたっていうのは、確かにあったんですよ。加えて、学部生が短期間だけ患者と回ってきてもむしろネガティブなイメージが強まってしまうという皮肉な結果もでたりしました。

谷口 え、どういうことですか？

高橋 僕らが教科書を使って、精神分裂であるか分裂でないかもとてもこうおどろおどろしい病気みたいなものじゃないよ。ちゃんと実際に患者さんもそんな攻撃的だったりとか暴力的だったりということではなくて実際には穏やかな人が多いですよと言って教えた上で、実習で回っもらっても、回ったあとの方がネガティブなイメージが強まってしまっているということがありました。それはまあいろんな要因があるんですけど、短期間だけの入院の一番具合の悪いところしか見てないし、退院して自宅で社会生活を営んでるところを見てもらっていないので……。まあ、その辺は医学教育とか医学実習の在り方みたい

なものを考えたいなと思っているんですけどね。

谷口 精神分裂病と統合失調症のエフェクトというか言葉のエフェクトを調べられたのは、それによる偏見というかそれを客観的に知るため？

高橋 そうですね。

谷口 私の共同研究とか新学術グループの中にいる千葉大の松香先生って認知科学の先生がカテゴリーの典型性や表象の動的特性に関する研究をやっておられます。例えば、漢字で長崎と見せるかカタカナでナガサキと見せるかで随分と受ける印象が変わってくる。カタカナのナガサキは同じ長崎でも原爆をイメージさせるわけです。それっていわゆる古典的な認知科学のカテゴリー論では扱いにくいところがあって、そういう風なものが扱えるカテゴリー論みたいなものにしていかないといけないみたいな議論が背景にあるわけなんです。

高橋 言語理解とか、今まさに統合失調症が新学術で時々うちの松本先生に発表してもらってる脳内意味表象の意味のネットワークですよ、脳内の。それにはずっと関心があります。統合失調症の「統合」という言葉の由来そのものかなと思いますし、連合弛緩っていう症状があって要するに英語でいうとloosening of associationで、カタカナのヒロシマだと普通原爆と連想するところがそうじゃないとかね。

谷口 CiNetの西本先生との共同研究ですよ。

高橋 そうです、そうです。

谷口 さてさて、伝統的にはこの対談シリーズって、結構プライベートの話とかもバランス良く入れるのが定番なのですが、僕自身が結構真面目というか不器用なので、つつい研究の話しか振れないんですけど……（笑）、すみません。ちょっと強引に話題変えちゃいますが、先生はサークルとか趣味とか、サークルとかって何されてました？

高橋 あー。学生時代テニスとかやりましたが、医者になってからは勤めた先が海沿いの病院が多かったせいもあり、先輩が釣りキチだったりしたのもあって、海釣りなんかは未だにやっていますね。この間まで京都に居たんですが、『京大精神科釣り部』ってのを作って月に2回くらいは海釣りに行ってましたね。

谷口 お、それは医者になってからですか？

高橋 そうそう。月に1回くらいは船に乗って宮津の方に行ったり和歌山の方に行ったり。たまに遠征で九州とか四国とか。ちょっと最近できてなかったんですけど、ちょっと東京に引っ越して来たので、今度は東京でメンツ集めていこうかと思っていますよ。

谷口 お忙しいのに。

高橋（笑）。まあまあ月に1回くらいですけどね。



谷口 完全に個人的な話なんですけど、今年、僕「厄年」なんです。絶賛厄年中で。厄年って人生の転機だとか、体調の変化が起きやすい時期だって言われますけど、本当に去年から今年くらい体がガッコーンと悪くなってきて。

高橋 ああ、それはありますねえ。

谷口 これまで比較的ワーカホリック気味でやってきたと思うんですけど、土日は最近もう出来るだけ休養するようにしているんです。メールチェックもサボリ気味。

高橋 そうですか。

谷口 先生はお医者さんだったら絶対無理かもしれないですけど、最近、そんなこともあって、研究者の先生方皆さんのくわいワークライフバランスを保ってらっしゃるのかなあというのが、ちょっと関心事だったりします。というか悩んでいます。

高橋 まあ人それぞれですよ。正直、精神科って例えば循環器の外科とか循環器の内科でやっぱり目の前の患者が死んじゃうみたいな状況で今手が離せないみたいな状況はそんなにはないので、他のお医者さんに比べると多少は時間的な余裕はあるかなと思うんですが、一方で精神科に求められる仕事がどんどん増えていっているんで、やっぱり油断すると本当に帰れなくなってしまいますね。だからこそ、「釣り」なら「釣り」、まあ、何でもいいんですけど、ここは私は空いてるって決めて行くってしてますけどね。メールとかはやっぱり恐ろしいですね。

谷口（笑）。

高橋 気付いたら、一日見てないと何百通と（笑）。スパムも入ってますけど、ちゃんと答えなきゃいけないのが百通近く入っているともうウンザリですよ。ワーカホリックだった自覚があったのがちょっと最近変わってきてるんですか？

谷口 そうですね、休まないといけないというのと。研究の大きな方針の意味でも。四十歳って「不惑」って言うじゃないですか？ でも、どうも最近、四十歳で「惑いまくり」なんですよ。むしろ三十代の方が「惑い」無く、猪突猛進でやっていた気がします。僕、もともと、あんまり体力ないんで、80歳以上生きているイメージがほとんどなくて、大体80歳ぐらいでおしまいになるとしたらちょうど折り返し地点じゃないですか？ だったら、あと死ぬまでに何をやるか？ っていう選択の問題

を考えるんです。

高橋 そうですよ、僕も今もう47歳ですけど人生半分過ぎて、且つやっぱり若い時のようにパフォーマンスが出せるわけじゃないので。

谷口 若手の時ってそんな注目してもらえないしお金もないし、なんだか自分でいろいろ立てていかないといけなかったんだけど、いろいろ立てた後の今になると、ありがたい話で他からお声を掛けて頂くことも増えています。この人工知能でこういうのを見て欲しいとか、ビブリオバトルの話で講演に来て欲しいとか。それは物凄くありがたい話だし、その全てに対してもちろん貢献意欲はあるんです。でも、他の人のドライブ（動機）で時間が取られることが増えてくると、かなり強く意識して選り分けていかないと、簡単に流されてしまうし、時間が消えていってしまう。自分が本当に自分として貢献すべきことが何かということを見失ってしまう。

高橋 それはそうですね。僕も今、大学で分野長の役職についていて圧倒的に人のために時間を割くことが多いので、自分のために割ける時間なんてどんどんどんどん無くなってきますね。まあそれはしょうがないかなとは思いますが。

谷口 自分のための時間というか自分の企画のための時間というか……。

高橋 そうなんですよ、研究の構想なんかも自分でゆっくり考える時間を持ちたいとは思いますが、人のお世話に時間を取られているというのが最近ですね。

谷口 そろそろ締めめのパートに入らないといけないですね。

高橋 やっぱ、共同研究の話ですか？

谷口 どうでしょう（笑）。まあ、新学術領域に関しては、その……こう……中間評価が――

高橋 ちょっとね。芳しくなかったですね。

谷口 芳しくなかったですね（苦笑）。後半はちゃんと「目に物見せて」いけないといけないなど。

高橋 最低限の仕事としてはちゃんと論文はださないとはいえませんが、プラスでやっぱり「この異分野の人が集まってこういうことが初めてできるんだよ！」っていうのを出さないといけないと思うんですよ。

谷口 やっぱ共同研究としては人工知能の精神医学への貢献？

高橋 今、やらせてもらっていることは方向性としては割と良いのではないかとと思っています。このプロジェクトは成功させたいですよ。

谷口 人工知能と脳科学というとニューラルネットワークを連想しますが、やっぱりBrain-inspired、Neuro-inspiredは、

ディーラーニング自体がある種Neuro-inspiredと、Brain-inspiredだったのは確かだと思うんですよ。まあ、ディーラーニングはブラックボックスだとか、実際の脳とは全然違うとか、なんだかんだ言われますけど。でも、それはそれとして、じゃあ、ディーラーニングの意味でのBrain-inspired、Neuro-inspiredの次に「何ができるの?」というのが、今、我々が問われていることなんだと思いますよね。そこはきちんとディーラーニングの成果を踏まえつつやっていけないと思われ、何か示していかないといけないと思います。まあ、ディーラーニングの濁流はまだ終わってないので、それと違う何かという話にはなかなかないんですけどね。まだまだ、人工知能業界も動き続けているので。そもそも学問というのはコツコツ進むものなので。とはいえ、谷口としての腹案はあるので、それはキッチリやっていきたいなと思っています。

高橋 それは楽しみですね。私自身もこの領域が高い評価を得られるためにも、成果を上げていきたいですね。

谷口 では、まあ、今日のところはこんなところですかね。本日はわざわざありがとうございました。

高橋 ありがとうございました。

（2019年7月24日 朝一番にJST東京の会議室にて）

AO1: 知覚と予測

自己シミュレーションとホメオスタシスを基底とする脳のモデル研究

研究代表者：池上 高志（東京大学 大学院総合文化研究科 広域システム科学系 教授）

脳のモデルに自己シミュレーションを導入することは、現在、脳モデルのひとつのプロトタイプとなっています。かつて心理・物理学者の Helmholtz の考えた脳のモデルは、内部で生成される「世界モデル」と現実世界からのインプットとの差異を解消しようと学習するシステムでした。一方で、自己のシミュレーションは、自己のシステム修復と維持（これをホメオスタシスと呼びます）に不可欠です。本課題では、自己シミュレーションの新しい実装を試み、ホメオスタシスな自己の維持を議論します。以前から注目しているラットの VTE (vicarious trial and error) 現象や、ラットの意思決定 と不確定性の実験結果 (Philippe Faureらの実験) をシミュレーションで再現し、ホメオスタシスな脳という観点から予測コーディングを議論することを目的とします。



AO1: 知覚と予測

超大規模電気生理学を用いた睡眠中のオフライン学習アルゴリズムの解析

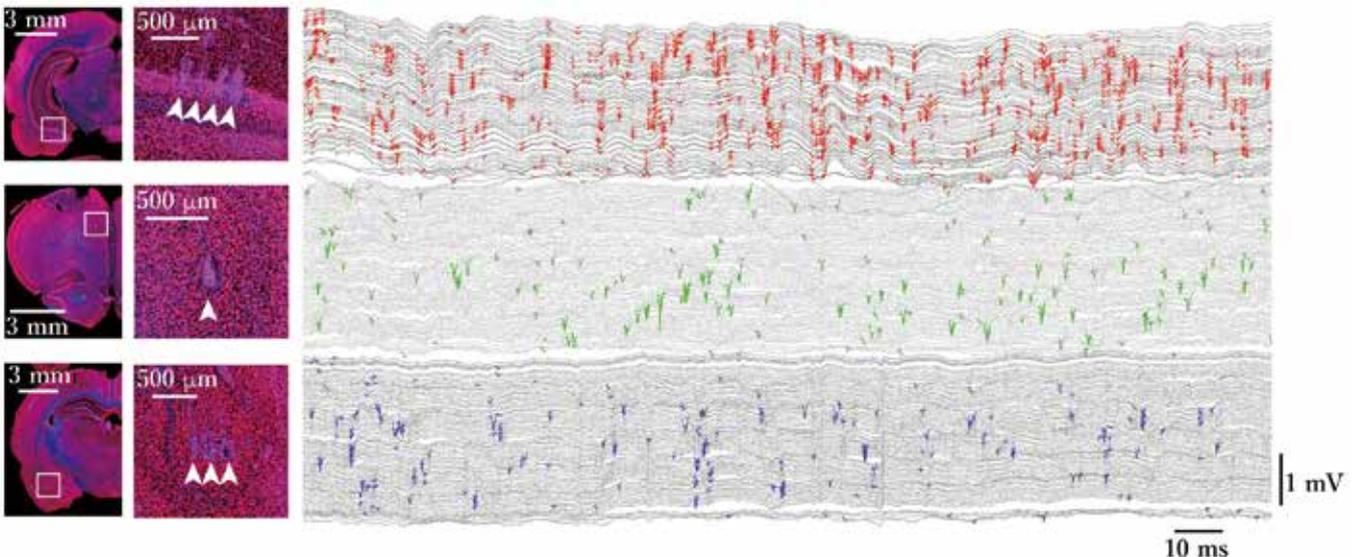
研究代表者：宮脇 寛行（大阪市立大学 大学院医学研究科 助教）

脳にとって睡眠は外界からの感覚入力から切り離されたオフラインの状態です。しかし、脳は睡眠中も休むことなく活動しており、とくに記憶の獲得に重要な海馬では覚醒時の活動パターンが再現されていることが知られています。このような活動の「リプレイ」は獲得した記憶を安定な形に定着させる「オフライン学習」に関わっていると考えられています。また、脳は経験した事柄をすべて記憶するわけではなく、生体にとって重要な意味を持つ情報をより効率よく記憶します。オフライン学習はこのような記憶の選別にも関わっている可能性があります。



このように海馬を含む神経回路でのオフライン学習は記憶機能において重要な役割を担っていると考えられていますが、海馬で用いられている学習則については未だに定説を見ません。これは海馬の出力は他の脳領域での情報処理を経て行動や記憶に反映されるため、海馬単体での学習則を構築することが難しいことが原因としてあります。

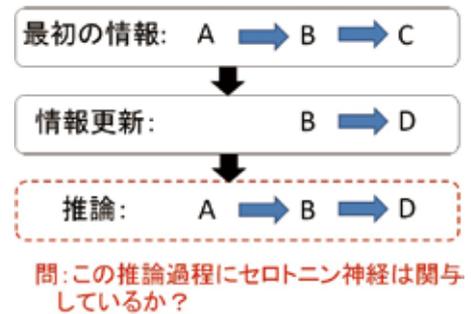
そこで本研究では超大規模電気生理学と呼ばれる手法を用いることで海馬を含む複数の脳領域の活動を単一細胞レベルの解像度で同時に計測し、海馬とその周辺領域で睡眠中に行われているオフライン学習の実態を明らかにします。これにより、生体にとって重要な事柄をより効率よく学習するアルゴリズムを解明し、人工知能アルゴリズムのさらなる進化へとつなげます。



セロトニン神経系の光操作・観察によるモデルベース的意思決定の脳内機構解明

研究代表者：大村 優（北海道大学 講師）

既知の限られた情報から推測することは複雑な環境に適応するために重要な精神機能だと考えられます。例えば、以下の図に示したような状況を考えてみましょう。A → B → Cという情報を最初に得ていますが、後に情報が更新されて、B → Dという情報を得ました。しかし、一度もA → B → Dという一連の情報は得ていません。この場合、通常ヒトはA → B → Dという一連の情報を直接得なくても、そうだと推測します。このような推測に基づいた意思決定を、モデルベース的意思決定と言います。本研究では、このモデルベース的意思決定の神経基盤を解明しようとしています。従来の研究では、前脳のセロトニン遊離がモデルベース的意思決定に関与することが推測されてきましたが、直接的な証拠はまだ得られていません。これは、セロトニン神経選択的に神経活動を操作したり観察したりする技術が最近まで存在しなかったことに主に起因すると考えられます。そこで本研究では、近年発展著しい光遺伝学的手法とイメージング手法（カルシウムイメージング）を用い、セロトニン神経活動がモデルベース的意思決定に果たす役割について直接的な証拠を得ることを目的とします。



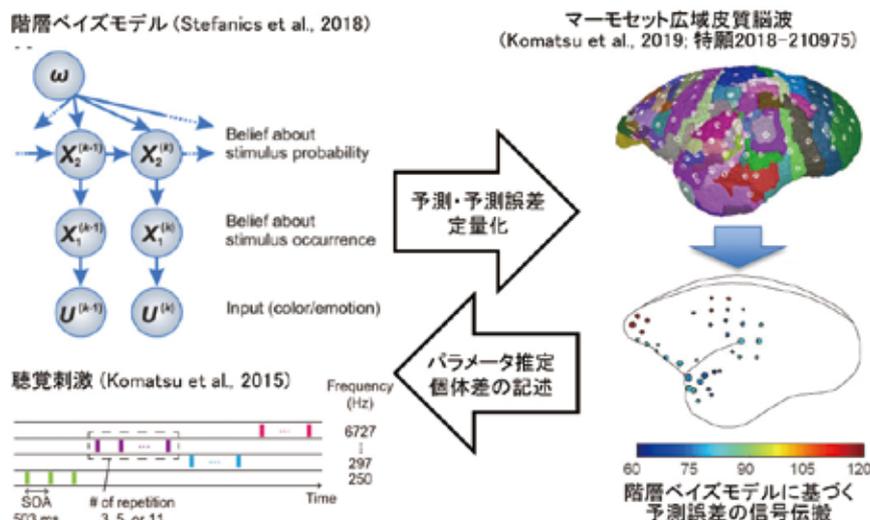
予測の神経基盤：広域皮質脳波における時空間構造

研究代表者：小松 三佐子（理化学研究所 脳神経科学研究センター 研究員）

本研究では、聴覚刺激提示中にサルの皮質全域から記録された皮質脳波（全脳皮質脳波）を用いて予測にかかわる脳内情報処理の時空間構造を明らかにします。

脳は、時々刻々と入力される刺激に対し、絶え間なく般化と予測（予測符号化）を行っています。予測符号化に関する数学的モデルは皮質の層構造や神経細胞レベルの役割を考慮したものまで様々提案されています。近年ではこのようなモデルを機械学習に適用したディープラーニング（深層学習）により大規模データ解析に大きな進展がみられています。

しかし、脳内での実装についてはまだ不明な点が多く、とくに全脳レベルでの動力的性質についてはまったくわかっていないのが現状です。本研究では、時間及び空間解像度に優れた皮質脳波を皮質全域から計測し、予測符号化に関する全脳レベルでの動力的性質を検証します。



多次元の状態・行動空間における意思決定と大脳基底核の情報表現

研究代表者：鮫島 和行（玉川大学 脳科学研究所 教授）

強化学習において状態空間や行動空間をどのように学習するかは、人工知能の根幹問題ともいえます。外界の状態から行動を決める意思決定には、大脳基底核が関与することが示唆されています。大脳皮質から大脳基底核への入力である線条体の神経細胞活動はこれまで、意欲、行動、習慣行動のトリガー、行動価値、刺激価値、文脈を含んだ価値、柔軟な価値や固定化された価値など、様々な情報表現が報告されてきています。情報表現に様々な議論があり、いまだにその情報処理過程は謎のままです。

本研究では、これらの様々な情報表現を統一する見方を提供する新しい仮説「線条体は、強化学習で必要となる価値関数や方策関数の中間層表現であり、価値や方策の基底関数をTD 誤差と salience 情報から学習する」を提案します。その上で、

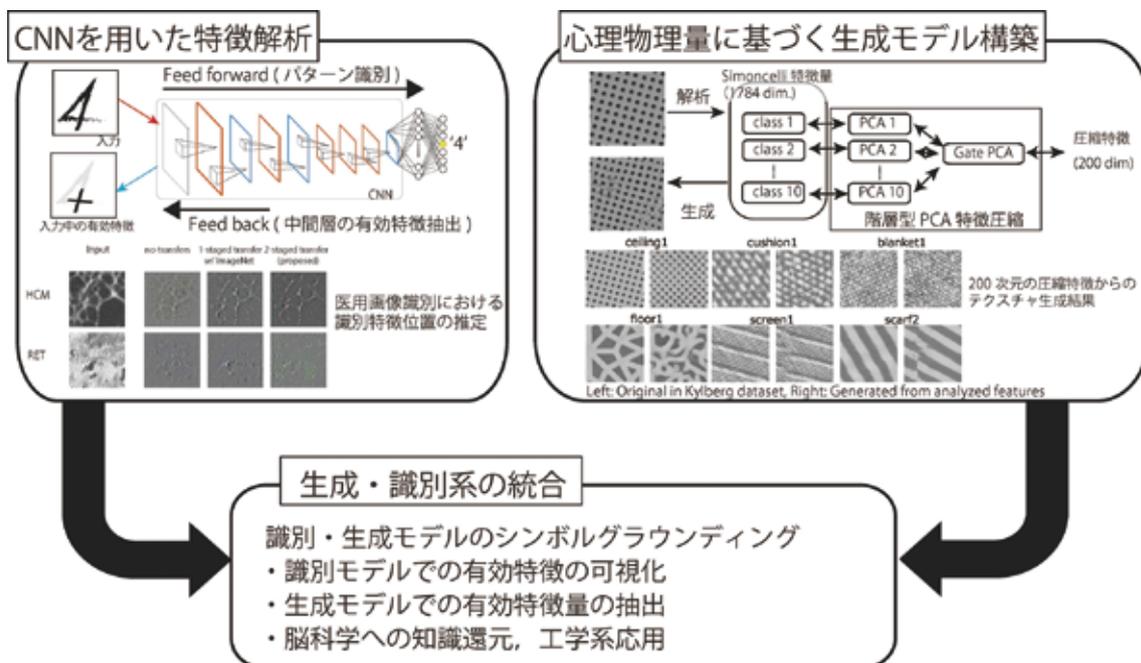
- I) どのようなネットワークモデルのどのようなアルゴリズムで学習可能なのか、
- II) そのアルゴリズムで学習されたとすると、どのような情報表現が獲得されるのか、を推定・予測します。さらに、
- III) ニホンザルに多次元の状態空間から意思決定を行う課題を訓練し、大脳基底核と大脳皮質の神経活動記録を行います。それらの情報表現が価値情報や方策などの基底関数になり得るのかどうかを検証します。



視覚心理に基づくテクスチャ特徴表現と深層特徴表現のマッピング

研究代表者：庄野 逸（電気通信大学 教授）

コンピュータビジョンの領域において画像認識やセグメンテーションといったタスクに関して、多階層の畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いることは性能向上の為の必須条件と考えられていますが、“どのような特徴を抽出しているのか?”、“人間の知覚とどのように関係しているのか?”といった問いに対する議論は未だ不十分です。本研究では、テクスチャ質感画像を題材として CNN モデルを導入し、この内部特徴が、それがテクスチャを表現するとされている、心理物理量と、どのように対応しているのかを比較するというアプローチで、脳における質感認知に対する知見を深めることを目的としています。

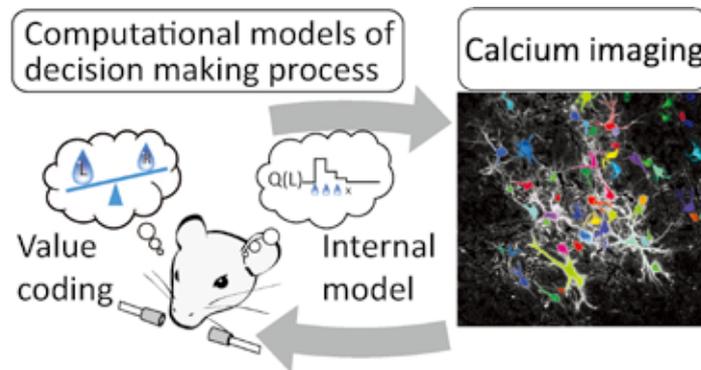


意思決定過程と内部モデルの相互作用

研究代表者：濱口 航介（京都大学 医学研究科 生体情報科学講座 講師）

異なる場所や環境では、異なる行動規則を学ぶ必要があります。しかし、まったく新奇な環境におかれた時、どのようにして私たちは適切な行動を選択できるようになるのでしょうか。強化学習の理論に従えば、2つの主要な方法、モデルフリーとモデルベースの方法があります。新奇の環境に置かれた動物は、環境に対する知識を持たないため、報酬期待（行動価値関数）を報酬期待誤差から直接学習するモデルフリーの強化学習をします。一方で、環境の内部モデルを学習した個体は、行動とその結果起こる状態変化の予測を用いて行動価値関数を構築し、適切な行動をモデルベースで選択することが可能になります。

移動や時間の経過によって環境が変化する実世界では、脳にとって、そして人工知能にとっても、モデルフリーの行動選択と、モデルベースの行動選択の回路を適切に組み合わせる必要があります。我々は先の公募研究において有限の報酬（エサ）といった物理的制約であれば、げっ歯類が獲得しうる事を明らかにしました。本研究では、内部モデルを学習するマウスの前頭皮質を2光子カルシウムイメージング法によって観察し、内部モデルを用いて意思決定を行う神経メカニズムを明らかにします。



高次視覚野の計算理論に基づくワンショット学習モデル

研究代表者：細谷 晴夫（ATR 主任研究員）

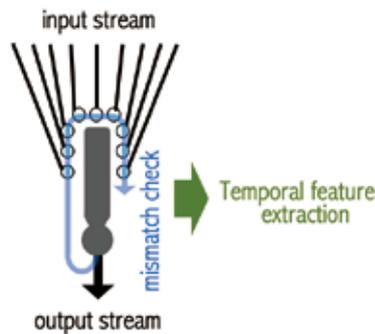
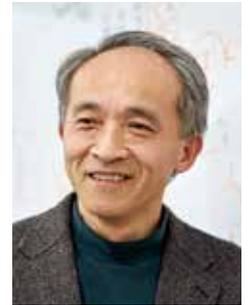
ワンショット学習は、脳の最も驚くべき汎化能力の一つです。例えば、顔画像を一例だけ覚えておくだけで、どの方向を向いた顔を見せられても認識できます。ワンショット学習は、人工知能分野でも時折取り上げられる難問ですが、決定的なアルゴリズムはまだありません。本研究では、神経科学における高次視覚野の理論的・実験的知見と、深層生成学習という近年の機械学習技術を融合することにより、高性能なワンショット学習の人工実現を目指します。



樹状突起計算を統合する新しい回路学習パラダイムの創出

研究代表者：深井 朋樹（沖縄科学技術大学院大学 教授）

本研究では、脳研究の最新の知見から明らかになってきた脳情報処理のメカニズム、とくに樹状突起を介するボトムアップとトップダウン信号の相互作用の仕組みを取り入れ、これまでにない人工知能のための回路アーキテクチャと、それに適した学習理論を創出します。具体的には、樹状突起が単一細胞のスパイク入力と出力間のミスマッチ検出を行うことで入力の時間的特徴を検出するという新しい学習原理（自己無撞着サプライズ最小化）を数学的、生物学的にさらに深化させ、非独立な音源からの信号分離、大規模神経活動データの解析、階層ベイズ計算のための大脳皮質回路モデルの構築などに応用します。それにより、多様な目的をもつ人工知能の開発に対して新しい学習原理と回路計算の理論を与えます。



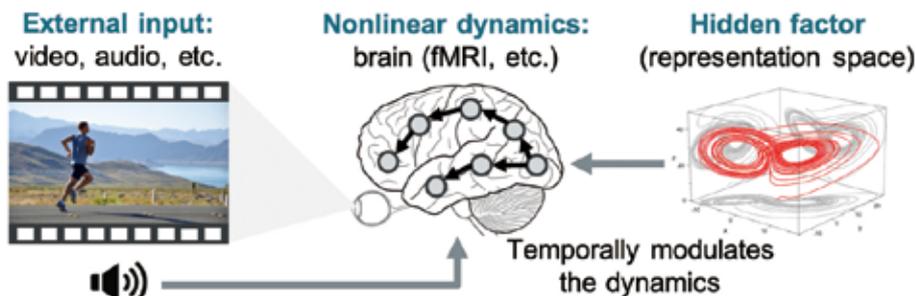
非線形ダイナミカル表現学習法の開発による脳の理解と予測

研究代表者：森岡 博史（理化学研究所 革新知能統合研究センター 特別研究員）

脳のダイナミクスの解析は、脳の計算機構の解明や、そこで得られた知見をもとにした新たな脳型情報処理アルゴリズムの実現など、幅広い応用可能性があります。これまでにネットワークモデルや、脳大域回路モデルをはじめ、様々なダイナミクス解析法やモデル化の試みが行われてきましたが、脳の複雑な非線形性、観測できない潜在因子、ラベル情報の欠如など、その解明にはいくつかのハードルがあります。

そこで本研究は、新たな非線形ダイナミクス解析法の開発を通し、そのような複雑・非線形な脳のダイナミクスのさらなる理解を目的とします。特に、近年応募者らが深層学習の新たな理論的解釈として一石を投じた非線形独立成分分析（ICA）手法をさらに発展させることで、新たに、脳の非線形ダイナミクスとその背後にある潜在成分を推定する、深層学習に基づく教師なし非線形ダイナミカル表現学習法を開発します。そして提案法を実際の脳計測データに適用し、その表現空間を学習することで、脳ダイナミクスの理解とその予測への展開を目指します。

提案法で学習された脳内表現やダイナミカルモデルは、脳の計算機構の解明に向けた貢献のほか、将来的には新たな人工知能システムの開発に向けた知見の獲得も見込まれるなど、大きなインパクトが期待できます。



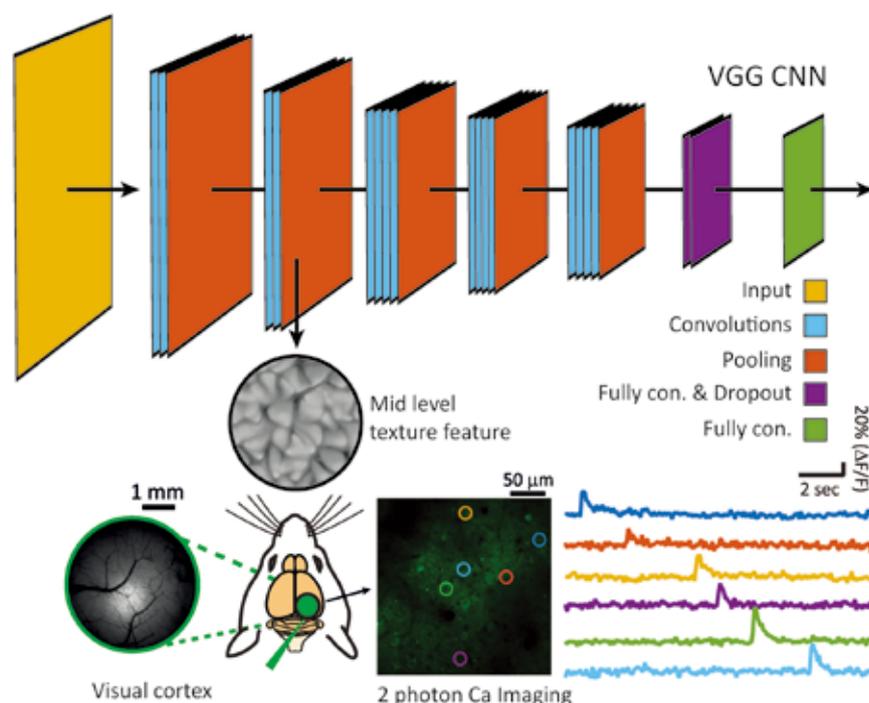
Learning perceptual representations in biological and artificial neural networks

研究代表者：Andrea Benucci (RIKEN Center for Brain Science, Team Leader)

Recent developments in Machine Learning with deep learning and convolutional neural networks have drawn striking parallels between the architecture of these networks trained for image classification and the vertebrate visual system. Artificial neural networks learn to encode mid and high level visual features in deep layers, resembling the function of our higher visual cortices. However, in the vertebrate brain, it is still not known whether the cortical representations of these features are innate or learned by experience, and in the latter case, how biological neural networks can learn these internal representations.



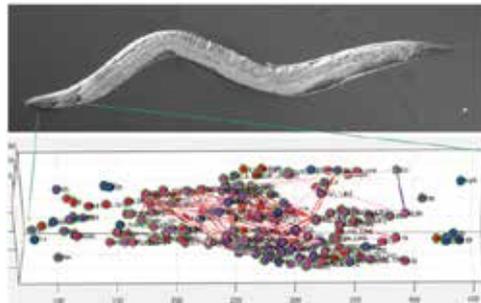
In our laboratory for Neural Circuits and Behavior at RIKEN CBS we are addressing this issue by imaging the neural activity of the mouse visual cortex while the visual experience of the developing animal is restricted to only mid-level visual representations, i.e. texture stimuli. Textures have ecological relevance for this species, as they are actively used for foraging and nesting, and stand as the best perceptual representation to answer the dichotomy between learned and innate representations of mid and high level visual features. By monitoring the functional connectivity of neurons in cortical visual areas at different developmental stages during critical periods of visual plasticity, we can decipher the learning paradigms underlying the development of texture-selectivity. Specifically, we will examine whether learning of textures occurs via unsupervised learning rules relying on the unique statistical properties of the textures, or through reinforcement-learning in the ecological context of fitness and survival. By implementing artificial neural networks inspired by these experiments, we will be able to distinguish which of these learning strategies best account for the biological data, and whether we can gain novel insights from the animal world to foster research in artificial intelligence.



ニューラルネットワークによる神経ネットワークの動作原理の解明

研究代表者：飯野 雄一（東京大学大学院 理学系研究科 生物科学専攻 教授）

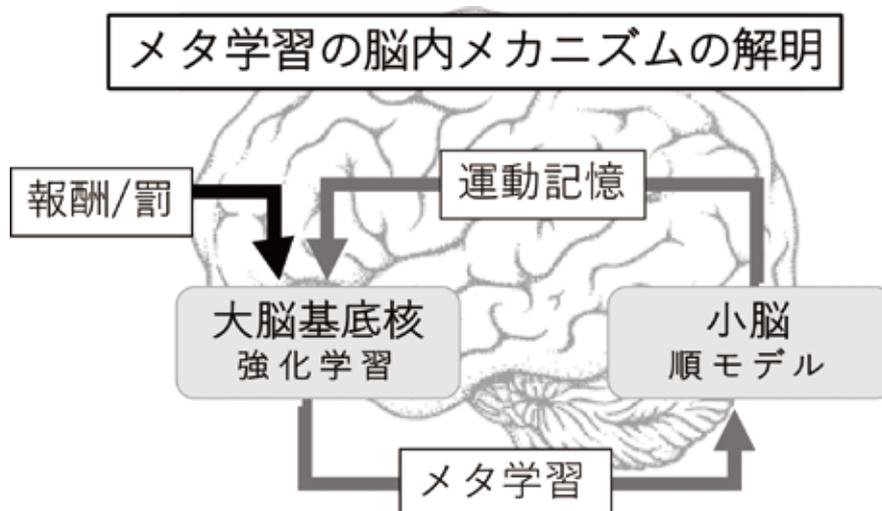
本研究では、神経結合ネットワークが解明されている線虫 *C.エレガンス* を用い、立体観測用の顕微鏡で頭部の全神経細胞の活動を、時間を追って測定します（4Dイメージング）。測定した結果を計算機上のニューラルネットワークモデルで学習させることにより、神経活動を予測するモデルを作製します。ニューラルネットワークの構造と予測性能の関係をさまざまな側面から検討します。さらに、実際の神経結合ネットワークを模したニューラルネットワークを作製することにより、実際の生物が持つ神経回路の構造がいかに最適化されているかを理解します。



感覚予測と報酬予測を統合するメタ学習機構：計算論的理解と脳内基盤の解明

研究代表者：井澤 淳（筑波大学 准教授）

ヒトが環境やタスクに応じて適応的に学習パラメータ（学習スピードや探索ノイズ）を調整する脳内メカニズムを、人工知能分野で開発が進んでいるメタ学習機構との対照を通じて、数理モデルの構築、行動実験、脳機能イメージングの3点から多角的に解明することを目的とします。我々が運動スキルを学習する際の学習スピードは、過去のトレーニング経験などによって変化することが知られています。例えば、特定の運動スキルを2日間連続で訓練する場合、2日目の学習スピードは1日目の学習スピードよりも速いことが知られています。このような学習パラメータの調整はどのような脳内メカニズムによって実現されているのでしょうか？我々は人工知能分野で提案されたメタ学習機構からヒントを得て、「脳は長期的な学習パフォーマンスを最大化するように学習パラメータを調整する」、具体的には『強化学習によってメタ学習が行われる』という仮説を立てるに至りました。本研究では、記憶の更新量に応じて報酬を制御する新しい運動メタ学習実験パラダイムを開発し、行動データと脳機能イメージングデータの解析や計算論的モデルとの比較を通じて、脳における運動メタ学習機構の統一的理解を行います。これにより、運動学習に関わる各脳基質の役割を学習機構の階層性の観点から明確化するとともに、この理解に基づいた新しいメタ学習アルゴリズムの開発に資します。

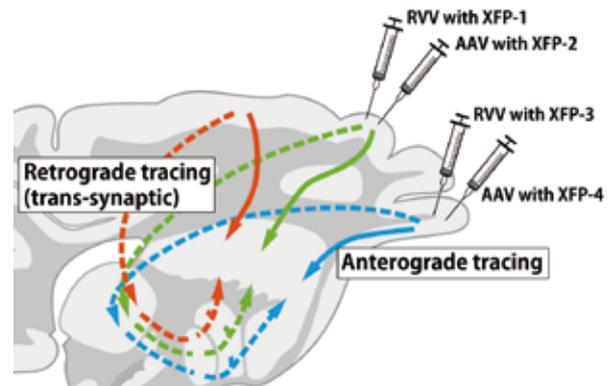


霊長類の前頭前野を巡る「行動選択」神経ネットワークの構築様式

研究代表者：井上 謙一（京都大学 霊長類研究所 助教）

典型的な反応では対応できないような状況に対し、外的・内的情報を統合して、適切な判断に基づき行動を組織化する脳機能には、大脳皮質前頭前野が重要な役割を果たします。前頭前野は前頭極、眼窩前頭皮質、腹内側部、背外側部、前部帯状皮質など複数の領域に分かれており、これらの領域は大脳基底核などの皮質下領域や小脳と密接に連絡しています。このことから、脳の柔軟な行動選択のメカニズムを理解するためには、前頭前野の各領域が皮質下領域や、小脳と形成するループ回路の構造を解明することが必要と考えられます。

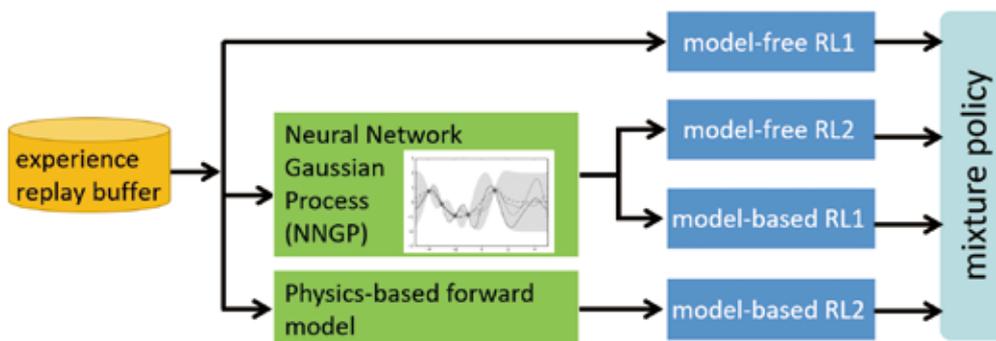
本研究は、独自に開発したウイルスベクターを用いた逆行性越シナプスの多重トレーシング法と、同法に順行性トレーシングを併用する入出力解析法などの先端的回路解析法により、前頭前野が皮質下領域や小脳と形成する行動選択ネットワークの構築様式を明らかにすることを目的とします。具体的には、上記解析法により前頭前野の各領域が皮質下領域や小脳と形成するループ状の回路間における相違と重複のパターンを解析します。また、機械学習を利用して多重ラベル解析を自動化する手法や、多重ラベルデータを標準化する手法などを領域内連携により開発し、全ての脳領域のラベルを短時間で解析し、汎用的な形で保管するための解析パイプラインを確立することを目指します。



モデルフリーモデルベースの協同による深層並列強化学習

研究代表者：内部 英治（国際電気通信基礎技術研究所 主幹研究員）

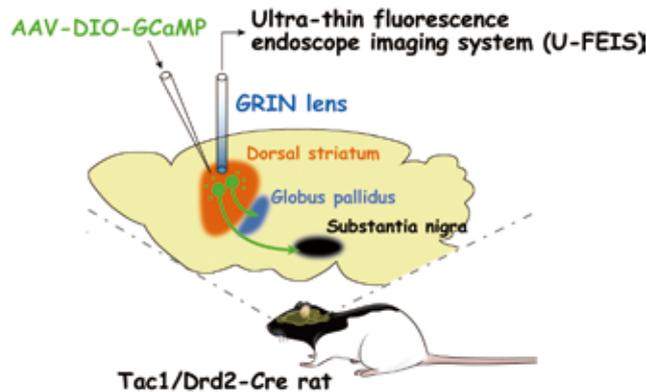
行動学習モデルの一つである強化学習は環境のモデルを必要としないモデルフリー法、環境のモデルを推定して活用するモデルベース法に大別できます。人の意思決定の直感的・習慣的な要素がモデルフリー強化学習、予測的・計画的な要素がモデルベース強化学習に対応し、ヒトや動物は状況に応じてモデルフリーとモデルベースを協同させて行動学習していることが知られています。我々はこれまでに複数のモデルフリー強化学習を並列に学習させる方式 CRAIL を開発しました。本研究は CRAIL を拡張し、モデルベース強化学習を考慮した性質の異なる複数の強化学習モジュールを動的に切り替えて学習効率を改善する並列深層強化学習法を開発します。



刺激弁別の学習フェーズにおける線条体細胞タイプ特異的な神経活動の可視化

研究代表者：小林 和人（福島県立医科大学 生体機能研究部門 教授）

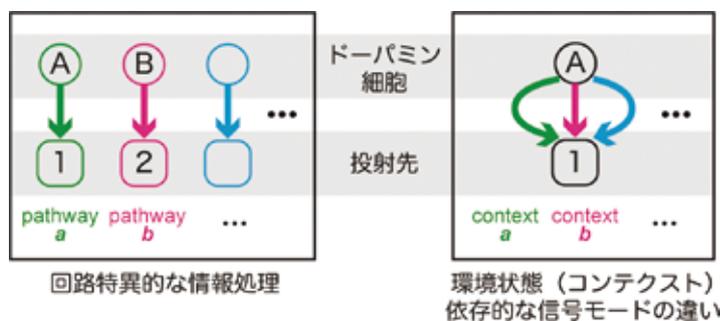
環境内の刺激条件に対応した目標指向行動の試行錯誤的な学習（刺激弁別学習）において、線条体を中心とした神経回路が重要な役割を果たします。我々の研究グループは、独自に開発した細胞標的法や遺伝子改変動物を用いて、刺激弁別の制御や、ルール変更に伴う行動スイッチにおける線条体投射ニューロンおよび求心性回路の機能的役割を明らかにしてきました。しかし、刺激弁別の獲得フェーズにおける2タイプの線条体投射ニューロン（直接路ニューロンと間接路ニューロン）の詳細な機能については、不明な点が多いです。我々は最近、この2タイプの線条体投射ニューロンのそれぞれに対して特異的に遺伝子組み換え酵素Creを発現するラット（Tac1-CreラットとDrd2-Creラット）を開発しました。本研究は、これらの動物を活用し、刺激弁別の各学習フェーズ（獲得・実行・消去・ルール変更）における線条体投射ニューロンの活動をカルシウムイメージングにより可視化し、その機能解明に挑みます。



行動選択におけるドーパミン神経回路の並列情報処理機構の解明

研究代表者：松本 英之（大阪市立大学 助教）

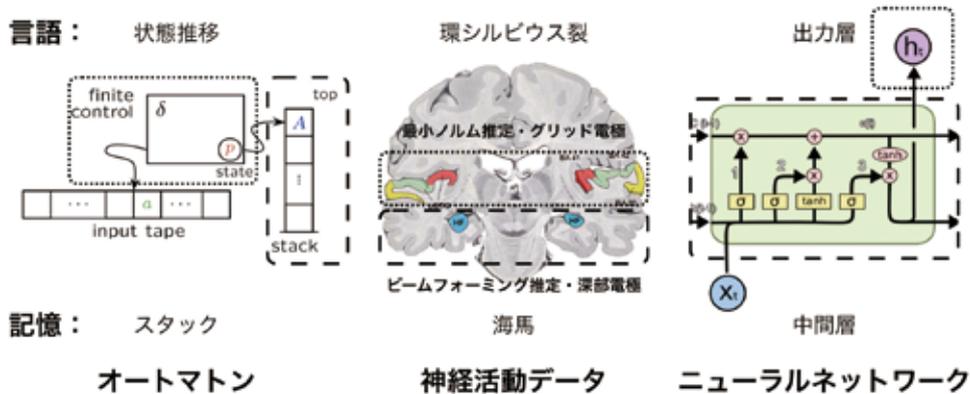
未来を予測して行動し、その行動の結果と予測の誤差からより良い予測を学ぶ能力は、環境に応じた適切な行動を選ぶ際にとても役に立ちます。中脳ドーパミン細胞は、報酬に基づく予測誤差からの学習に重要な役割を果たすことが知られています。一方で近年の研究から、ドーパミン細胞にはさまざまな多様性があることが明らかになってきました。このことから、ドーパミン細胞はこれまで考えられていた以上に多様で広範な学習に関与していることが予想されます。本研究では、ドーパミン細胞にみられる多様性のうち、投射神経回路の違いと環境依存的な信号モードの違いに着目し、これらの多様性が価値に基づく行動選択、意思決定の実現にどのように関わっているのかを明らかにすることを目的とします。大規模な単一細胞活動記録法と光遺伝学を組み合わせ、高い時間解像度から個々のドーパミン細胞の活動を計測します。自由行動下の動物にこの計測技術を適用し、環境の状態が動的に変化する行動課題を行わせることで、外部からの入力や環境構造の内部モデルをドーパミン系がコードする仕組みを検証します。環境に応じた最適な行動選択を可能にするドーパミン系の情報処理機構を理解することによって、幅広い問題を柔軟にかつ適切に処理できる汎用的な人工知能システムの実現に貢献することを目指します。



自然言語処理と神経生理計測を融合した言語の神経計算モデルの構築と検証

研究代表者：大関 洋平（早稲田大学 講師）

言語を対象とする人工知能研究である自然言語処理と言語を対象とする脳科学研究である言語神経生物学の間には乖離が指摘されてきました。自然言語処理では、ディープラーニング技術の恩恵を受けて、言語の計算基盤が開発されてきましたが、「その計算基盤が、どのように脳内で実現されているのか」という観点が見過ごされてきました。一方、言語神経生物学では、イメージング技術の恩恵を受けて、言語の神経基盤が解明されてきましたが、「その神経基盤が、どのような計算過程によって支えられているのか」という視点が見落とされてきました。しかしながら、これら計算・神経基盤は独立して発展してきたにも関わらず、モジュールから成るネットワークを形成しているという点で酷似しており、両者の融合が望まれます。そこで、本研究では、オートマトンおよびニューラルネットワークに基づく神経計算モデルを構築し、「脳磁図」(magnetoencephalography, MEG)および「皮質脳波」(electrocorticography, ECoG)を組み合わせた神経活動データで検証することで、言語の計算・神経基盤を解明することを目的とします。



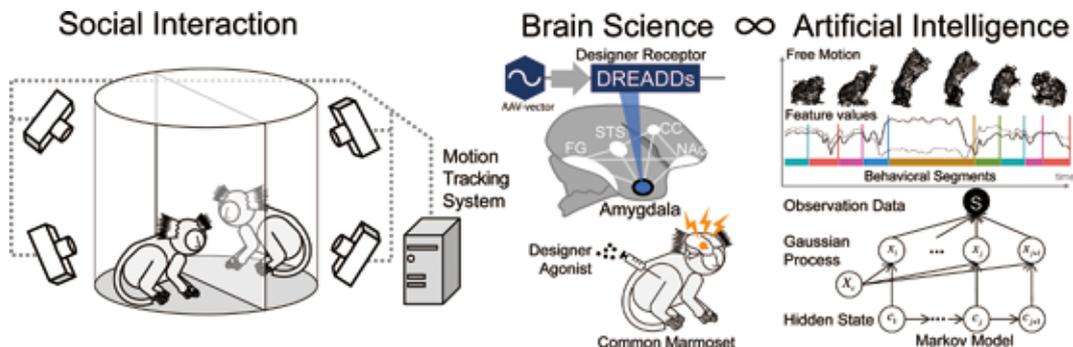
社会的身体表現による個体間相互作用の生成モデル開発

研究代表者：三村 喬生（量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 研究員）

「目は口ほどに物を言う」という慣用句がありますが、視線・表情・姿勢・動作などの非言語の身体表現は、意図や感情などヒトの内部の状態の社会的な伝達手段として機能しています。これらは霊長類など社会集団を形成する動物種においても広く観察され、社会的コミュニケーションの本質的要素をなしていると考えられます。しかし手話やジェスチャーなど言語的に解釈される例外を除き、社会的身体表現を定量的に解析する有効な手段は知られていず、コミュニケーションダイナミクスの包括的な記述には至っていません。



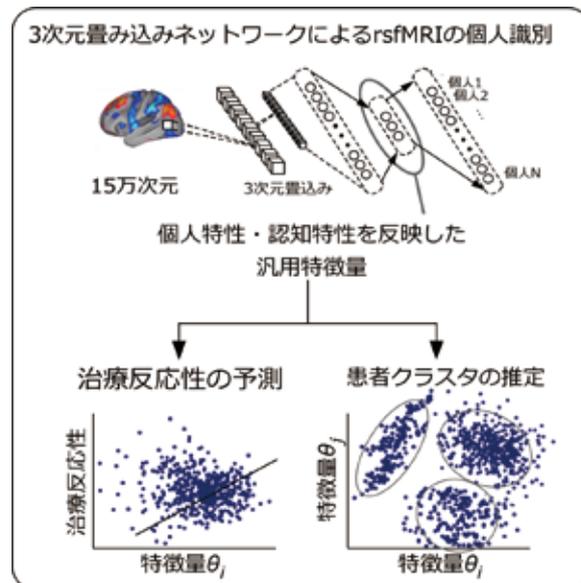
小型霊長類のコモン・マーマセットは、他の個体に対する協力性や公平性を認識するなど豊かな社会性行動を示しますが、自由な運動を妨げずに視線や身体運動を詳細に測定することはこれまで困難でした。本研究では、新規のモーショントラッキング技術を用い、社会的身体表現を高解像度に測定します。測定された行動データに対し、自然言語処理分野で発展してきた文脈の分節化アルゴリズムを対照・応用することで、個体間の相互作用や時間発展を教師なし機械学習の枠組みで計算機的に記述する事を目指します。更に、遺伝子工学技術を用い、特殊な神経受容体(DREADDs)を脳の特定脳領域に導入することで、自由行動中の動物に対して一過的・局所的な脳活動制御を施す試みを行います。制御による影響を詳細に解析する事で、脳の局所活動が社会的身体表現に与える影響をデータ駆動アプローチから明らかにする事を目指します。



深層学習を用いた安静時機能的MRIからの汎用特徴量抽出

研究代表者：山下 祐一（国立研究開発法人 国立精神・神経医療研究センター 室長）

本研究は、安静時機能的磁気共鳴画像（rsfMRI）データを高解像度（voxel-based）・階層性・非線形性を伴いながら、深層ニューラルネットワーク（deep neural networks: DNN）を用いて解析し、脳活動の個人特徴や認知的特性を反映しうる汎用特徴量抽出技術を開発することを目的とします。rsfMRIは、安静状態でMRI撮像を繰り返し、自発的脳活動の時間的変化を捉える脳画像検査法で、脳領域間の機能的結合が個人の脳状態を反映した有益な情報源であると考えられ、精神疾患の病態把握を含む医療応用も見据えた研究が活発に行われています。しかし、rsfMRIデータに豊富に含まれる時間的な脳活動のダイナミクスから有益な情報を取り出す技術は未だ十分に確立できていません。そこで、本研究では、高解像度rsfMRIデータから階層性・非線形性を伴いながら、自己組織的特徴量抽出が可能なDNNを用いて、脳活動の個人特徴や認知的特性を反映しうる汎用特徴量を抽出する方法の確立を目指します。さらに、開発した汎用特徴量抽出技術を統合失調症、発達障害を含む精神疾患を対象として適用し、rsfMRIデータから患者個々人の診断・疾患予後・治療反応性予測などを総合的に評価する、精神疾患の評価法開発の基盤となる技術の確立を目指します。



努力をして得た報酬の方が何もしないで得た報酬よりも主観的価値が大きくなる脳メカニズムを解明

坂上 雅道（玉川大学 脳科学研究所 教授）

田中慎吾（新潟大学）、John P. O’Doherty（カリフォルニア工科大学）、坂上雅道（玉川大学脳科学研究所）は、努力をして（コストを払って）得た報酬の方が、何もしないで得た報酬よりも主観的価値が大きくなる脳メカニズムを明らかにしました。本研究成果は、科学雑誌“Nature communications”に掲載されました。

論文タイトル：The cost of obtaining rewards enhances the reward prediction error signal of midbrain dopamine neurons

著者：Shingo Tanaka, John P. O’Doherty & Masamichi Sakagami

Nature Communications volume 10, Article number: 3674 (2019)

DOI：https://doi.org/10.1038/s41467-019-11334-2

本研究は、ニホンザルを使って、報酬を得るためのコストがその報酬の価値を高めることを行動実験で示すと同時にその時のドーパミンニューロンの活動を測定し、価値が高まる脳メカニズムを明らかにしました。

<この研究のポイント>

- ・ニホンザルを使った実験により、コストを払って得た報酬の方が何もしないで得た報酬よりも主観的価値が大きくなることを示しました。
- ・中脳ドーパミンニューロンが、このような主観的価値を作り出すために重要な働きをしていることを解明しました。
- ・視覚刺激と報酬確率の関係を学習するのに、コストがあった方が学習は早くなることを世界で初めて発見しました。

【研究の背景】

物の価値とは、その物によって予測される報酬の量のことです（実験的には、刺激の呈示によって予測される報酬の量や確率のことです）。大脳皮質の下側に位置する大脳基底核のニューロンが、この報酬予測に関わっていると考えられています。中脳ドーパミンニューロンは、実際に与えられた報酬が、予測していた報酬とどのくらい違っているかをシグナルしていることが知られています。このドーパミンニューロンの報酬予測誤差情報が大脳基底核に伝えられ、大脳基底核ニューロンは報酬予測（価値）を現実的なものに修正します。

また、価値は相対的です。同じ報酬でも、文脈によって価値

は大きく異なります。そのような例に、「働いた後のビールはうまい」効果があります。多くの人が似たような経験があると思いますが、ヒト以外の動物でも、そのような効果は実験的に示されています。

我々は、ドーパミンニューロンの報酬予測誤差が、価値の相対化に重要な役割を果たしていることを以前報告しましたが、このメカニズムが「働いた後のビールはうまい」効果を作り出しているのではないかと考え、ハイコスト vs. ローコスト課題遂行中のサルの中脳ドーパミンニューロンの活動を解析しました。

さらに、コストにより報酬の価値が高まれば、その報酬を学習に使った時、学習は促進されるはずですが、そのことも調べてみました。

【実験方法】

ニホンザル2頭にハイコスト vs. ローコスト課題を訓練しました（図1）。この課題は、2種類の試行からなり、ハイコスト試行では、最初にハイコスト試行であることが刺激（ハイコスト刺激）により示された後、報酬であるジュースを得るために、目の前の画面に呈示される点を1秒以上見つめ続けなければなりません。ローコスト試行では、ローコストを示す刺激（ローコスト刺激）の呈示後、ジュースが与えられるまで、画面のどこを見ても構いません（フリービュー）。どちらの試行でも、与えられるジュースの量は同じでした。これまでの行動実験から、動物は好きなものには早く反応することがわかっていますが、この課題でもハイコストあるいはローコストを示す刺激や、

報酬が来ることを示す刺激（報酬刺激）に反応させて、その反応時間を調べました（実験1）。

また、この課題遂行中のサルの中脳ドーパミンニューロンから電気信号を記録・解析しました（実験2）。

さらに、ハイコストとローコストの設定は同じままにして、2つの刺激の中から報酬刺激を選ぶことを学習する課題（1つを選べば報酬、もう1つを選べば無報酬、図3）を導入し、サルが報酬刺激を学習することとコストの有無しの関係を調べました（実験3）。

【実験結果】

（実験1） 試行の最初に提示されるハイコストあるいはローコスト刺激に対する反応時間とそれぞれの試行でのエラー率から、サルは明らかにハイコスト試行を嫌っていることがわかりました。しかし、コストの後の報酬刺激に対する反応時間は、ハイコスト試行の方がローコスト試行より有意に早く、報酬量は同じであるにもかかわらず、サルはハイコスト試行の報酬の方を好んでいることがわかりました。

（実験2） ドーパミンニューロンのコスト刺激に対する応答は、ローコスト刺激の方が大きく、ハイコスト刺激の方が小さくなりました。ドーパミンニューロンは、報酬には正の反応（活動量を上げる）を、罰には負の反応（活動量を下げる）を示すことが知られていますが、上の結果は、ドーパミンニューロンが試行でのコストの情報と報酬の情報を統合した反応をコスト刺激に対して行っていることを示しています（報酬を予期して活

動を上げ、コストを予期して活動を下げます。その合計です）。さらに、報酬刺激に対しては、ハイコスト試行での応答の方がローコスト試行での応答より大きくなりました（図2）。つまり、ドーパミンニューロンの報酬予測誤差応答は、ハイコスト試行での報酬の方が価値は大きいという反応を示していました。

（実験3） 報酬刺激と無報酬刺激の2種類から、1つを選ぶ選択課題（試行錯誤で報酬刺激を探します、図3）で、コストがある方が有意にこの学習を促進することがわかりました（図4）。

【実験の成果】

これまでなんとなく、「働いた後のビールはうまい」と言われていた現象がなぜ起こるのかという脳メカニズムを明らかにしました。ドーパミンニューロンが、報酬予測学習に関与する際に、まず報酬とコストの情報を統合することで、ハイコスト試行その物の価値（報酬予測）を下げます。その状態で報酬が与えられると、コストがあったために報酬予測が小さかったハイコスト試行では、ローコスト試行に比べて相対的に報酬予測誤差情報（報酬予測と実際に与えられた報酬の差分）が大きくなり、結果的に報酬価値が大きくなると考えられます。このことは、我々の価値が相対的なことの基本的な脳メカニズムであり、価値や意思決定に関わる多くの現象を説明できる原理であると考えられます。また、コストがある方が学習は進むという現象の発見は、社会や家庭、学校での教育のあり方を再考する契機となりうるものと思われれます。

図1 ハイコスト vs. ローコスト課題

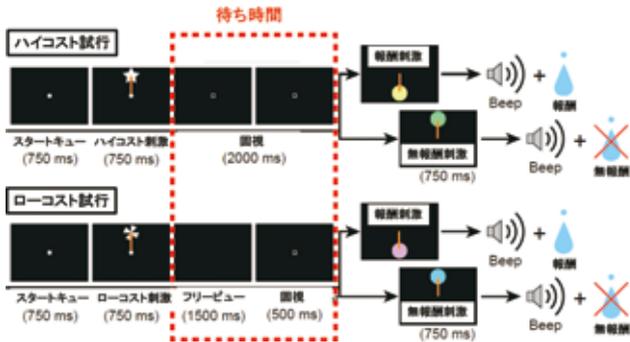


図2 ドーパミンニューロンの報酬刺激に対する応答
下図の点は、活動電位の発生時点。上図はその加算ヒストグラム。

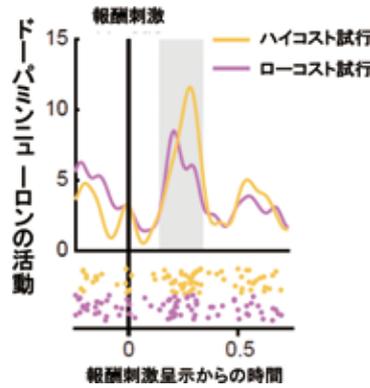


図3 報酬刺激学習課題

2つの刺激のうち報酬刺激（○の刺激）を選択すれば報酬が与えられる（実際には○はない）。

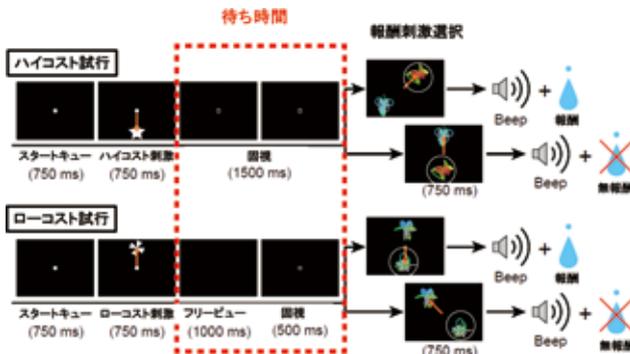
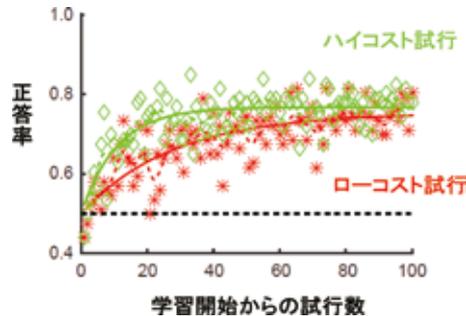


図4 報酬刺激の学習



意思決定の個体差に関わる神経動力学のノイズ感受性

深井 朋樹（沖縄科学技術大学院大学 教授）

論文タイトル: Neuronal stability in medial frontal cortex sets individual variability in decision-making

著者: Tomoki Kurikawa, Tatsuya Haga, Takashi Handa, Rie Harukuni & Tomoki Fukai

Nature Neuroscience volume 21, pages1764-1773 (2018)

DOI: <https://doi.org/10.1038/s41593-018-0263-5>

神経科学では個体差の問題が最近になって注目されてきました。そこで我々は、「聴覚刺激依存の意思決定課題」を学習したラットを用いて、行動選択の個体差と前頭葉皮質の神経活動の関係性について調べました。課題遂行中のラットからの他電極記録法を用いた神経集団活動の記録、実験データの機械学習の手法による解析、さらに回路モデル（リザーバ計算）による行動と神経活動のばらつきの再現など、異なる研究手法を組み合わせ、内側前頭皮質局所回路の神経ダイナミクスのノイズに対する感受性が、行動の個体差に強く影響することを明らかにしました。

はじめに

確率的意思決定には、動物種や個体によらない共通ルールが存在することが知られています。このようなルールの背景に働く神経メカニズムについては、報酬の最大化などの仮説に基づいてこれまでもよく調べられてきました。しかしその一方で、行動選択は個体によって大なり小なりのばらつきを示します。今まではこのような行動のばらつきは課題の学習が不十分なことによるものであるとされ、あまり顧みられることはありませんでした。そのため意思決定をする脳の仕組みは共通しているにもかかわらず、なぜ大きな個体差が出現するのかについて、そのメカニズムはほとんど調べられてきませんでした。

意思決定実験と回路モデルによる行動個体差の再現

我々が用いた実験課題は以下のようなものです。まずラットに二種類の刺激音を聞かせて、刺激音の周波数が高い場合（高音の場合）には左のノズルを、周波数が低い場合（低音の場合）には右のノズルをなめると報酬が得られるという意思決定課題を訓練しました。ラットがこの意思決定課題を一定以上の正解率（85%）でこなせるようになった後に、課題遂行中のラットの内側前頭皮質（MFC）から多電極記録実験を行い、複数の神経細胞の活動を同時記録しました。この領域がさまざまな意思決定に関与していることは、先行研究からも知られています。

この記録の際に、学習済みの高低2音の間に、ラットにとって新たな周波数の音をいくつか挿入すると、新奇音に対するラットの行動選択は確率的になります。さらに、行動選択確率と刺激音の周波数の関係を示す「心理測定曲線」は、個体ごとに傾向が大きく異なります（図1）。周波数に応じて行動の選択確率を敏感に変化させる個体（感受性が高い個体）もいれば、周波数に依らず左右どちらかの選択肢に偏る個体や、ほぼランダムな行動選択を示す個体（感受性が低い個体）もいます。心理測定曲線は「曲線」と呼んで良いのかさえわからないような大きな変動性を示し、課題を徹底的に学習した場合によく見られるシグモイド曲線とは様相がかなり異なります。一見すると、これらの観測値の背景に、系統的に説明可能なメカニズムが潜んでいるようには思えません。しかし、我々は神経回路モデルをラット同様に訓練することで、そのようなメカニズムが存在することを示しました。

先行研究の結果から、MFCには、音刺激により活性化される神経細胞、左右の行動選択に特異的に応答する神経細胞、音と行動の両方に応答する細胞が存在することがわかっています。さらに、これらの神経集団が時系列的に活性化される「神経軌道」が行動選択に直接関与していることもわかっていました。そこで神経軌道の何らかの性質が、個体間の行動のばらつきに関係していないか調べることにしました。具体的には、次のような作業仮説を検証しました。

ラットが右をなめるか左をなめるかがMFCの神経軌道によって決まるならば、力学的には神経軌道は引き込み状態になるはずで、あるならば、各試行におけるMFCの初期状態は、その後の神経軌道への引き込みに影響を持つはずで、もしも神経軌道の周辺で引き込み領域が浅く広い谷間を形成していれば、状態の引き込みは僅かな初期状態の違いを反映する可能性があります。初期状態を決めるのは音刺激であると考えられるため、このことは左右なめに対応する2つの神経軌道が活性化される相対確率が、刺激音の周波数に応じて緩やかに変わる（高感受性）ことを意味します。一方、神経軌道の引き込み領域が深く狭い谷間になっていれば、軌道

への引き込みは、上方の平坦部を通過する際に神経回路が受けるノイズに依って決まり、初期状態の違いはあまり反映しないはず。この場合、新奇音に対する選択はランダムになります（低感受性）。またどちらか一方の神経軌道の周辺が深く広い谷間になっていけば、選択はそちら側に偏り、心理測定曲線は強いバイアスを示すはず。このようにラットの感受性が高いか低いかは、神経軌道の谷間の形状で決まることになります。

そこで、神経回路モデルにおいて仮説の妥当性を検証し、次に似た感受性をもつモデルとラットに於いて、選択行動へのノイズの影響に共通する傾向が見られるかを検証することにしました。これは仮説の直接的検証にはなりません、目論見どおりの結果が得られれば、仮説はかなりの信憑性を持つことになります。結果は予想通りで、課題遂行中の回路モデルに外部から擾乱を与えると、選択行動の感受性が高いモデルでは擾乱により状態発展が軌道から大きく外れる傾向があり、一方行動感受性の低いモデルでは状態発展が擾乱の影響をあまり受けなかったことがわかりました。これは前者（後者）では神経軌道が浅い（深い）谷間を形成していることを示唆します。

まとめると、感受性の高いラットは、神経軌道が外的擾乱の影響を受けやすく不安定であるため、音の周波数に応じて行

動選択確率を滑らかに変化させますが、それに対して、感受性の低いラットの神経軌道は外的擾乱を受けにくく安定であるため、音の周波数に対して選択確率が敏感に反応しないと考えられます。つまり、神経軌道が外的擾乱の影響を受けやすいかどうかで、ラットの心理測定曲線の傾向が決まるということです（図1）。

まとめとAI研究における意義

一般的に、音の高さに応じて行動選択確率を変化させるラットは、「分析的」で、また今回の課題設定ではより多くの報酬が期待できることから“賢い”ラットと見なされるかもしれません。また賢いラットほどMFCの神経回路は安定した軌道を学習しそそうに感じます。しかし今回の研究結果から、私たちの直感に反して、賢いと見なされるラットほど神経活動は外的擾乱の影響を受けやすく不安定であり、逆にデタラメに行動しているように見えるラットほど、神経活動は外的擾乱の影響を受けにくく安定していることがわかりました。また本成果は、少数のデータ（少数の経験）に基づいて脳を模倣した学習をする場合、AIにおいてもヒトと同様の行動の個体差が生じ得ることを示唆しています。

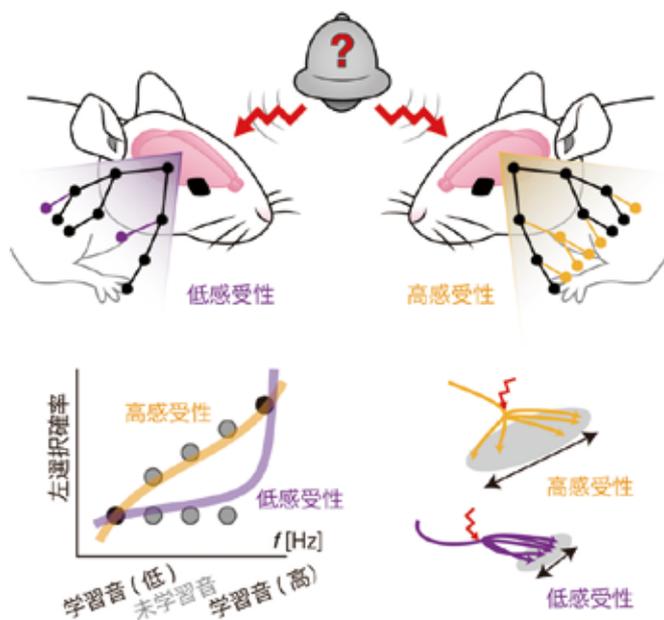


図1 意思決定行動の個体差と神経活動の個体差の関連

ラットに未学習の音を聞かせて、選択行動とMFCの神経集団活動を観察した（上）。左下の心理測定曲線が示すように、感受性の高いラットは新奇音に敏感に応じて行動選択確率を変え（黄）、感受性の低いラットは新奇音には敏感に反応しない（紫）。数理モデルは、高感受性のラットではMFCの神経軌道が外的擾乱（赤矢印）の影響を受けやすく不安定であり、低感受性のラットでは外的擾乱を受けにくく安定していることを示唆した（右下）。イラストは Milena Menezes Carvalho による。

ICLR 参加記

The International Conference on Learning Representations (ICLR)

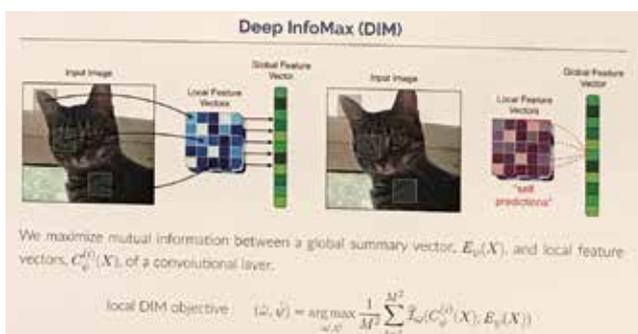
岡本 弘野 (東京大学 松尾研究室 博士2年)

2019年5月6日から5月9日にかけて、アメリカのニューオーリンズで行われたICLR (International Conference on Learning Representations) に参加しました。私は5月6日に行われたワークショップの発表のために参加しました。

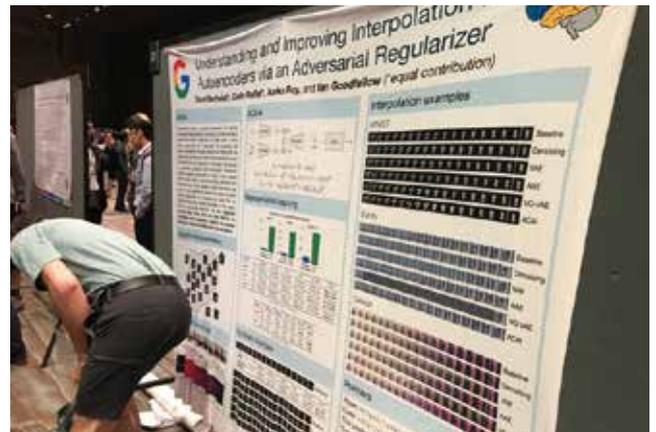


ICLRはICML、NeurIPSと並び、機械学習のトップカンファレンスの一つとして知られています。2019年のICLRの採択率は、31.4% (オーラル数: 24, ポスター数: 476)であり、NeurIPSやICMLよりも採択率は高いものの、レベルの高い学会となっています。ICLRはNeurIPSやICMLと比べると、基礎理論よりも応用研究寄りの論文が多く集まります。特に深層学習を使った研究が占める割合は多く、来年もこの傾向が続くと予測されます。ICLRの査読の特徴として、openreviewシステム (<https://openreview.net/group?id=ICLR.cc/2019/Conference>)を採用しており、誰もが査読者による査読コメントと点数を見ることができただけでなく、論文に対するコメントをつけることができます。そのため、特に注目されている論文において、議論が活発に行われています。今回はそのようなICLRの中でも私が興味を持った論文について具体的にいくつか紹介していきたいと思います。

最初に紹介するのは、Learning Deep Representations by Mutual Information Estimation and MaximizationというBengio研からの論文で、オーラルとして採択されています。

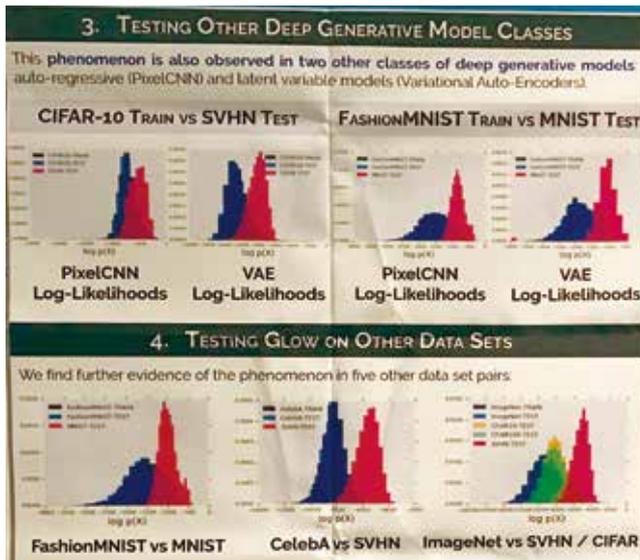


最近の研究により、深層学習を利用して、高次元のデータ同士の相互情報量を近似的に計算することが可能になりました。この論文では、畳み込みによる特徴ベクトルとその特徴をさらにエンコードすることによって求めたグローバルな特徴ベクトルの相互情報量が大きくなるようにしています。つまり、畳み込みの特徴ベクトルの中でも、有用な情報だけをグローバルな特徴ベクトルに含むようにしたい、というものです。これにより、教師なしで分類できるような表現を獲得することができました。実験では、得られた特徴から線形分類器を一層追加して分類したところ、75%もの精度がでており、これは、普通に教師ありで分類したものとほぼ同等の性能を持ち、驚くべき結果となっています。

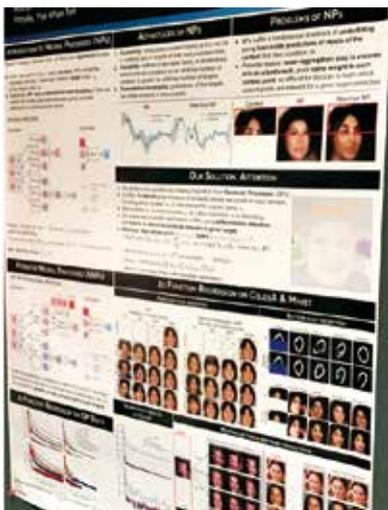


次に紹介するのは、Understanding and Improving Interpolation in Autoencoders via an Adversarial Regularizerという、Google Brainによる論文で、ラストオーサーはGANの論文でも有名なIan Goodfellowです。この論文では、GANの枠組みを利用し、画像補間したときに、それが本物と見分けられないように学習する識別器「Critic」を提案しています。

CriticはGANにおけるDiscriminatorに対応しており、画像補間する際の、潜在空間で混ぜ合わせた割合を当てるように学習する一方で、Decoder(Generator)はCriticに混ぜ合わせていないと思わせるような画像を出力するように学習します。これにより、より良い表現学習が可能になり、実験では、自然な補間が可能になっただけでなく、後続の識別タスクなどの性能があがることを示しています。

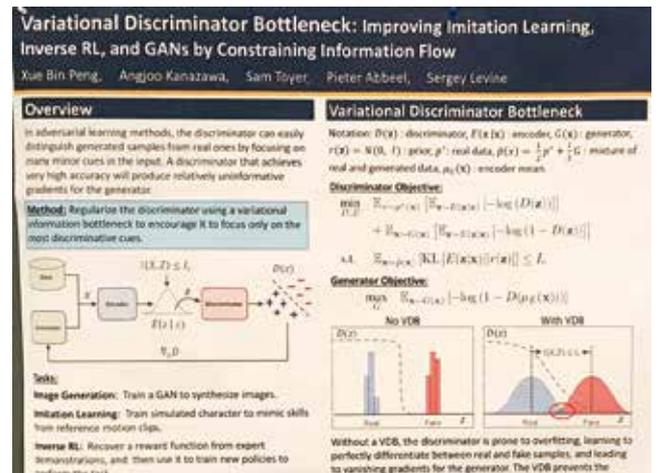


次に紹介するのは、Do Deep Generative Models Know What They Don't Know? というDeepMindからの論文です。生成モデルは識別モデルとは異なり、データの分布を学習しているため、テスト時に訓練データ以外の分布からのサンプルに対し、尤度を小さく推定することができるはずであるため、頑健であると考えられていました。しかし、CIFAR10(一般的な物の画像)で訓練したGlow、VAE、PixelCNNなどの生成モデルが、テスト時に、SVHN(番地などの数字の画像)のような全く異なるデータセットに対し、高い尤度を与えることが実験的に示されました。他のいくつかのデータセットに対しても同様の結果が示されています。すなわち、分布外検知として、生成モデルは必ずしも役に立つわけではないことを示した論文で、衝撃的な実験結果だと感じました。



次に紹介するのは Attentive Neural Process という論文であり、DeepMindからの論文です。まず、古くからある手法で、Gaussian process という不確実性をモデリングすることができるものがあります。この手法のデメリットは、訓練時と推論時にデータ数の累乗に比例する計算時間がかかってしまう

ことです。このモデルをニューラルネットワークで作ってしまおうとした論文が、Neural Process というICMLのワークショップに出た論文です。しかし、Neural Process は、データにアンダーフィッティングし、Gaussian Process ほどの表現能力が高くないという問題がありました。それを解決するために、Attention 機構を導入したのが Attentive Neural Process で、非線形回帰や画像補間のようなタスクで有効性を示しました。



最後に紹介する論文は、Variational Discriminator Bottleneck: Improving Imitation Learning, Inverse RL, and GANs by Constraining Information Flow という UC Berkeley からの論文です。GANにおいて、一般的に Discriminator は Generator よりも強くなってしまうため、Generator に勾配が伝わらず、Generator の学習が難しいという問題があります。この論文では、Discriminator にわたす情報を制限することによって、この問題を解決しました。実験では、逆強化学習や生成タスクにおいて、有効であることを示しています。

最後に ICLR 2019 全体を通しての印象を総括したいと思います。深層学習を利用した賢いアイデアで面白い結果ができました、というものが多く、説明を聞いていてわかりやすいものが沢山ありました。今回紹介した論文のトピック以外で活発だったのは、メタラーニング、不確実性を扱った手法で、これらの分野もさらに研究が進んでいくことが予想されます。毎年採択論文数が増えていく中で、核となるようなアイデアだけでも追っていくことが、研究を進める上で重要になっていくと考えられます。

NCM 2019 参加記

29th Annual Meeting of the Society for the Neural Control of Movement

Jack De Havas (Post-doctoral Researcher, NTT Communication Science Labs., Human & Information Science Lab.)



The 29th annual meeting of the society for the neural control of movement met from the 24th to the 27th of April 2019 in Toyama, Japan. It was the first time that NCM had been held in Asia, with members from around the world making their way to the coastal prefecture. Flanked by white-peaked mountains and crisscrossed by rivers, Toyama offered first-time visitors a picturesque – albeit rain soaked – introduction to Japanese culture. Adjacent to the modern glass of the international conference center stands the restored wood of Azumi castle. Attendees could therefore walk the castle gardens at their leisure, counting the last of the sakura, or lean across curved bridges long enough to watch the resident koi rise and tumble. But first the welcome dinner, which was held at a local Japanese restaurant. The atmosphere was convivial as old and new friends mingled amid sushi, tempura and free-flowing sake.

NCM is known for having carefully curated sessions and this year's meeting continued this tradition with a range of thought-provoking talks. It

began with a series on motor sequence preparation and control, featuring presentations by Katja Kornysheva, Mark Churchland, Bence Olveczky and Atsushi Yokoi, which was notable for including a lively discussion on recent findings regarding neural trajectories and population dynamics in the primary motor, and frontal cortex. Later, Gelsy Torres-Oviedo received the early career award and spoke engagingly about her research using split-belt treadmills and the generalization of sensorimotor adaptation. The morning concluded with a session on action during motion. Talks by Pieter Medendorp and others showcased the range of recent technical innovations and clever experimental design that are being implemented to study how, for example, people can reach for objects while their entire body is mechanically translated through space.

Poster sessions were extended this year to 2.5 hours, which by all accounts was a good idea given the breadth of material on offer. There were many presentations involving computational techniques. Modelling continues to diversify, moving beyond motor learning into many other realms such as synergy recovery after muscle damage. Meanwhile, the number of fMRI experiments also utilizing methods such as TMS to cross validate theories was a visible trend. There were, as usual, a wide range of new behavioral paradigms on display. For example, innovative approaches to movement timing and vigor were presented by members of Julie Duque's group. Brain computer interface and deep brain stimulation techniques were also well represented. Of note, Nathan Copeland, one of the few people with a cortical implant, presented his poster entitled "Insights from an intracortical brain computer interface user". There were several interesting studies of the cerebellum. Diedrichsen et al's work "A multi-domain task battery reveals functional boundaries in the human

cerebellum” garnered attention for its comprehensive approach, and contributed to the recent trend of acknowledging the cerebellum as having important functions beyond error-learning.

The cerebellum was also featured in several panel sessions. Mitsuo Kawato and others reflected on the progress that has been made in 50 years of studying cerebellar computation, while later in the conference Richard Ivry and others offered their perspectives on broader cerebellar learning mechanisms. Another series of talks was about the superior colliculus. In both cases the anatomical focus gave these sessions clarity and direction. A panel on the application of deep learning to motor neuroscience was similarly lucid and included a demonstration of DeepLabCut by Alexander Mathis. His presentation on marker-less movement tracking stimulated conversation, owing to the wide range of applications for such an approach. Discussion was a key feature of NCM, with chair people and panelists speculating feely and doing well to generate useful topics despite the inherent artificiality of such formats. Overall, attendees seemed to enjoy the Japanese setting and the chance to meet with many local researchers. The conference was highly productive and fittingly ended with John Francis Kalaska giving the distinguished career award talk.

Report for IRCN neuro-inspired computation course Dongqi Han, Cognitive Neurorobotics Research Unit, Okinawa Institute of Science and Technology

It was early Spring, 2019 that I attended the 1st neuro-inspired computation course (NICC) happened in University of Tokyo, Tokyo, Japan, held by the international research center for neurointelligence (IRCN). As an event indicating a rapid development of fusion of neuroscience, computation, and artificial intelligence (AI), NICC attracted numerous outstanding lecturers and attendees from all around the world.



The course covered a variety of research topics, including brain architecture, brain dynamics, machine learning, dynamical systems, reinforcement learning and brain development/disorders, and most of these lectures involved highly inter-disciplinary studies. From synaptic plasticity to fetal robot, NICC did not only provide a wonderful opportunity for attendees learn about the latest advances in computational modeling of the brain and its use in developing new AI strategies and applications, but also enabled researchers from divergent fields, genders and countries to discuss about their work and future possibility of inter-disciplinary collaborations.

Many interesting researches were presented in NICC. An interesting one, by Dr. Taro Toyozumi from RIKEN Center for Brain Science, explored the role of intrinsic spine dynamics in Hebbian learning

of recurrent networks. Their computational model showed that augmenting Hebbian plasticity with experimentally observed intrinsic spine dynamics can stabilize cell assemblies and reproduce the distribution of synaptic strengths, providing a deep look into how excessively strong spine dynamics, experimentally observed in several animal models of autism spectrum disorder, impair learning associations in the brain.

Another notable topic was presented by Dr. Yasuo Kuniyoshi. The study explored emergence and development of embodiment at fetal period using large-scale non-linear models with millions of neurons and billions of synapses. Driven by the complex dynamics, their model acquired cortical representations of self-body and multimodal sensory integration and exhibited similar behaviors to human fetus without explicit engineering. Their experiments also showed that sensorimotor experiences in the fetal period can be crucial to the formation of body representations and multi-modal sensory integration, which are significantly affected under "preterm birth" conditions, bringing new insights about developmental origins of social cognition and autism spectrum disorders.



In addition to the talks by world-class lecturers, there were also poster sections for the attendees to present their recent work on machine-learning, neuroscience, dynamic systems and combination of them. From many of the posters, it was exciting for me to see that machine learning methods were used to solve difficulties in neurobiology and neuro-inspired frameworks were investigated in machine learning. Both the lecturers and attendees joined discussion of posters, providing many useful feedbacks and inspirations to the authors. I presented a study on how laminar-specific neuronal types in a feedforward network improve stability and robustness of signal propagation, by using a novel computational model for feedforward pathways such as the antenna lobe of *Drosophila*. Dr. Surya Ganguli, one of the lecturers, discussed with me about the shared ideas of this model and the residual neural network. It could be felt that such kind of cross-field thinking between brain science and machine learning are rapidly growing, which may lead to the next generation of AI.

Apart from academic activities, it would definitely be a pity if not enjoying the Tokyo city. IRCN also kindly arranged a ship tour for us to experience a night of this charming city. Since it was early Spring, the cherry blossoms were mostly at budding stage and waiting for blooming. Just like the buds will soon become gorgeous flowers, I believe that the seed planted by NICC will eventually lead to a bright future of the brain-inspired inter-disciplinary researches from Tokyo to all around the world.

https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/en/articles/z0404_00020.html



新学術領域研究「人工知能と脳科学」第6回領域会議参加記

惺 夢曦（筑波大学 人間総合科学研究科 生命システム医学専攻 博士課程4年）

2019年5月14日から15日にかけて、玉川大学にて、新学術領域研究「人工知能と脳科学」第6回領域全体会議が開催され、私は今回初めてこの会議に参加させて頂きました。驚くことに、同じ会議だと思えないほど、多岐にわたる研究が発表されていました。まるで違う楽器が演奏されているように、質感の違う音が調和して重なり、実に味わいの尽きない交響曲になりました。



初日14日のワークショップは領域代表の銅谷賢治先生からのご挨拶から始まりました。「この新学術では人工知能と脳科学の研究者が対話と共同作業を重ね、人工知能に脳科学で得られた知見を取り入れる、逆に脳科学に人工知能で得られた知見を取り入れ、新たな研究を展開する」と目標を熱く語られました。まさにこの目標を達成させようとするように、その後続く先生方の研究発表はいずれも神経活動の記録や操作、行動の計算シミュレーションなど、多様な方法を用いた興味深い研究でした。このように、異なる切り口から一つの問題を解決する姿勢が心の中で強く印象に残り、これから自分自身の研究を行う時、常にopen-mindedであるべきだと感銘しました。

14日の夜に、ポスター発表と懇親会が朔風という素敵なレストランで開催されました。私もポスター発表を行う予定でしたので、最初はとても緊張しました。しかし、実際に発表してみると、今まで参加した学会や研究会のポスター発表の場とは違い、懇親会のカジュアルな雰囲気の中で、多くの方が気軽に発表を聞いてくださりました。自分もいつの間にか緊張感が消え、純粋に活発な議論を楽しみ、1日目はあっという間に終了しました。

15日のワークショップはミニシンポジウムから始まりました。最初に、私の指導教官である松本正幸先生が「人工知能と脳科学のコラボレーション」を題に講演されました。私と松本先生

は、動物が価値に基づいて意思決定を行う時、脳がどのように価値情報を決定意思に変換するのかというテーマを研究しています。そして、サルが価値に基づいて意思決定を行う時、これまで注目されてきた眼窩前頭皮質だけでなく、ドーパミンニューロンにおいても価値情報から決定意思への信号変換ダイナミクスが見られることを報告しました。その後、共同研究者である井澤淳先生が、我々の意思決定課題中、サルがどのような戦略を用いて意思決定を行ったのかについて、モデル解析で得られた結果を発表されました。この結果から、電気生理データの解析に新しい指針を与え、価値に基づく意思決定における脳の情報変換メカニズムの理解を更に深める可能性が見えてきました。このように、一つの小さなシンポジウムの中でも、異なる背景の研究者の対話や融合が実現しつつあることを実感しました。

その後、特に印象に残ったのは、井上謙一先生と三村喬生先生のご発表でした。井上先生からは、前頭皮質と線条体とのネットワークの構築様式をご紹介頂き、解剖学的データの解析に対する人工知能の有用性について理解することができました。三村先生からは、マーモセットの社会性行動を、動きのパターンを解析することによって同定できる人工知能をご紹介頂き、さらに自閉症だと推定できる社会性行動の異常を検出できる可能性についても教えて頂きました。どちらも日頃の書籍や論文での勉強ではなかなか触れることのできない研究内容のお話で、視野が広まり、自身の研究にどう結び付くのかのアイデアを考えると、とても楽しく感じました。

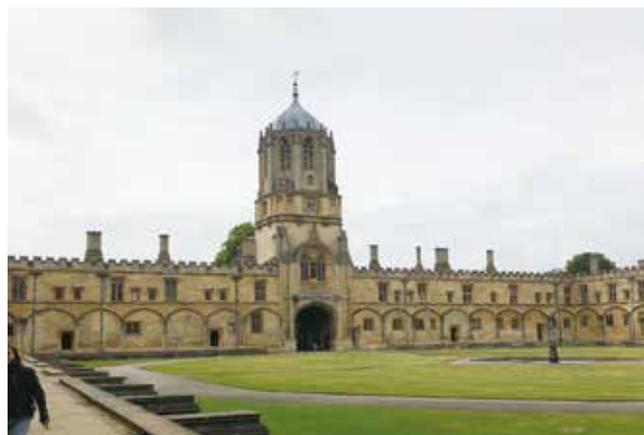
今回の領域全体会議の初参加は、私にとって大変貴重な機会であり、今後の自身の研究の方向性を深く考える良い機会となりました。この場所を借りて、本会議の開催や運営を支えて下さった方々に心を込めて感謝を伝えたいと思います。どうもありがとうございました。



SBDM2019 (Ninth International Symposium on Biology of Decision Making) 参加記

平良 正和 (沖縄科学技術大学院大学 神経計算ユニット 博士課程学生)

2019年5月27日から29日の3日間にわたり、イギリスのオックスフォード大学のMathematical Instituteで開催されたSBDM2019に参加いたしました。シンポジウムでは、意思決定を制御する脳のメカニズムについて、多角的な視点から論じられていました。



1日目は、まず、"Neural circuits for decisions about if and when to act"と題したセッションが行われました。このセッションではヒト、サル、マウスでの選択課題や報酬獲得課題において、行動の開始や継続にかかわるメカニズムについての発表がありました。次に"Social decision-making"のセッションがありました。ここでは、利他的行動などの社会性に関わる意思決定のメカニズムについての研究発表が行われました。オックスフォード大学のPatricia Lockwood先生からはヒトが他人に利益をもたらす行動を学習する際の仕組みを強化学習のモデルを用いて明らかにするという研究が発表され、強化学習モデルを神経行動学の研究に用いるひとつの形として興味深いものでした。

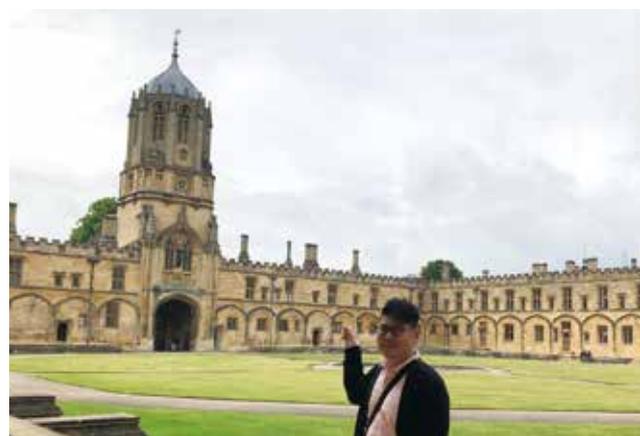
2日目ははじめのセッションでは、"Exploration and information-seeking"と題し、特に探索行動やそれらの行動をとる意思決定のメカニズムについての発表がありました。Janelia Research CampusのAlla Karpova先生からは複雑な環境を探索行動を通してどのように理解するのかについて、ラットの行動実験を用いた研究が発表されました。次のセッションでは"Optimizing information processing for the decision context"と題して主に前頭前野や感覚野を用いて周囲の環境をどのように理解し意思決定へとつなげるかについての発表がされました。

3日目は、はじめに" Mood, emotion and decision-making"と題したセッションが行われました。このセッションで

は、ムードや感情がどのように意思決定に影響するかだけでなく、嫌悪情報の処理に関わる扁桃体の意思決定における役割なども紹介されました。最後のセッションは"Memory and inference"と題して主に、海馬と前頭前野などの部位が意思決定に関わる複雑な認知機能にどのように関わっているかが論じられました。UCLのKevin Miller先生はモデルベース意思決定における背側海馬と眼窩前頭皮質の役割についての研究を紹介していました。

各日のシンポジウムの後には会場の向かいにあるバーに参加者が自然と流れていき、お酒を交わしながら、活発な議論が行われていた様子がとても印象的でした。

SBDMには初めて参加させていただきましたが、意思決定のメカニズムについて、心理学、生理学、ロボット工学等さまざまなアプローチからの研究を見ることができました。それぞれのアプローチがそれぞれの強みを活かし、また補完し合う形で意思決定の仕組みにより深く迫ることができることを実感しました。



新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」 若手サマースクール参加記(1)

松嶋 達也 (東京大学大学院 工学系研究科 修士課程2年)



2019年7月31日から8月2日にかけて、理化学研究所和光キャンパスで実施された新学術領域「人工知能と脳科学の対照と融合」若手サマースクールに参加しました。

本サマースクールでは、「脳」「人工知能」「深層学習」「強化学習」「ベイズ」を組み合わせたテーマで講義が実施され、各領域融合が意識された内容となっていました。私のように機械学習やロボティクスに関する研究を行なっている学生だけではなく、神経科学に携わる学生、医師まで含め、30名ほどの参加者のバックグラウンドは多様で、普段の研究室ではできないような広い視座からのディスカッションを行うことができました。

本稿では、サマースクールの中で、特に印象的だったトピックに関して紹介します。

初日、田中啓治先生からは、「脳科学最前線入門」というテーマで講義をしていただきました。2光子顕微鏡やfMRIなどの神経回路の活動を記録する手法が、どのような発見をもたらしたのかに関する説明がありました。特にfMRIを用いたイメージングでは、近年空間解像度の高い機器の開発と並行して、機械学習の手法によってより大規模なデータの解析が可能になっていることを知り、神経科学における実験データの解析の分野は、人工知能技術を脳科学に応用することができる大きなテーマになると感じました。

3日目の銅谷賢治先生の講義では、神経科学におけるベイズ推論に関する解説がありました。神経科学の実験データがベイズ推定の実現例として解釈できる研究の紹介のほか、神経科学における学習基盤の例として、強化学習に関する説明も行われました。強化学習は、学習を支える神経活動として実験的に興味深いだけでなく、工学的なモデルはロボットの運動学習など機械学習分野においてもアルゴリズムの研究が行

われており、人工知能と脳科学の共進化が可能な一分野であると感じました。

また、2日目、3日目は講義のほかに、参加者が小グループに分かれて、各講義で与えられたテーマに関するディスカッションを行う時間が設けられました。その中で、松尾豊先生が講義中で紹介した「高次元の科学」に関する話題が多くのグループから言及されていました。深層学習を始めとする機械学習手法によって、高次元のデータを予測する技術が生まれている一方で、神経科学も含む科学的手法では、出来るだけ幅広い現象を出来るだけ少数の変数で説明しようとしています。人工知能技術によって高次元の予測が可能であるという前提が置かれた場合に科学がどのように発展していくのか、科学における「『理解』とは何なのか」を問われている時代であると感じました。

本サマースクールを通じて、イメージングを始めとして実験データの解析という側面では、人工知能技術が脳科学に及ぼす影響は大きいと感じた一方で、私自身が研究を行なっている人工知能分野では、神経科学的な知見は十分に取込まれていないように感じました。脳科学と人工知能の両領域は、アプローチは違っても「知能」を理解するという目的を共有しており、本サマースクールのような両者の積極的な対話の機会を通じて、人工知能におけるアプローチのさらなる深化が図られることを望みます。

最後に、本サマースクールを企画してくださった先生方、講師の皆様、運営スタッフの皆様、貴重な機会を用意していただき、大変ありがとうございました。



新学術領域研究「人工知能と脳科学の対象と融合」 若手サマースクール参加記(2)

栗原 勇人（早稲田大学大学院 人間科学研究科 健康・生命医科学研究領域 修士課程1年）



私は、2019年7月31日から2日にかけて理化学研究所で開催された新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」若手サマースクール2019に参加しました。このサマースクールは、人工知能と脳科学に関連する研究分野に携わる若手研究者の育成・交流を目的としています。参加者の研究分野は、脳科学の理論系および実験系、機械学習、精神医学、ロボット、哲学など多岐に渡っていました。このサマースクールは、自身の研究視野を広げることができる学際的な交流でした。

講義は、人工知能と脳科学の第一線で活躍する研究者10名の方から、深層学習、強化学習、ベイズ、さらには人工知能と脳科学に関する応用事例について解説していただきました。私自身は、人の脳活動と社会性について研究しています。深層学習や強化学習、ベイズといったアルゴリズムを適用することで、人の脳活動と社会性との関係を紐解くヒントになると思い、本サマースクールに参加しました。ここでは特に自身の勉強になった、「ベイズ」について紹介します。

まず、「人工知能×ベイズ」の組み合わせで、谷口忠大先生が講義されました。谷口先生は、約1時間という短い時間にも関わらず、確率分布やベイズの基礎から、グラフィカルモデル、ベイズ推論までわかりやすく解説していただきました。特に、自学での理解が難しい、変分ベイズなどといった確率的生成モデルの近似推論を理解することができました。ベイズを用いたロボットや自然言語処理の応用事例の紹介もあり、ベイズの活用法についても学ぶことができました。

次に、「脳×ベイズ」の組み合わせで、銅谷賢治先生が講義されました。ベイズ推定は、脳が有する不良設定問題を乗り越える重要な考え方であることがよくわかりました。ベイズ推定を用いることで、限られたデータや感覚情報から脳の働きや

外界の状態の推定を行っているという考え方に興味を持ちました。自分自身の研究にも活かしていこうと思います。

本サマースクールでは、講義だけでなく、人工知能と脳科学に関連したデモも実施され、非常に勉強になりました。私は、深層学習、fMRIの二つのデモに参加しました。深層学習のデモでは、深層生成モデルを用いた2次元画像から3Dモデルの生成を行いました。講義で学んだことをデモに取り組みしたので、より一層理解が進みました。fMRIのデモでは、実際に脳画像を撮像する場に立ち会いました。fMRIを使った実験の様子を一通り見る事ができました。fMRIと人工知能との組み合わせについても解説していただき、脳計測の新たな可能性があると感じました。

さらに、サマースクールでは、参加者同士でのディスカッションをする機会もありました。ディスカッションのテーマは、講義ごとに毎回テーマが出されました。複数あるテーマの中から幾つかを選び、グループ単位で話し合いをしました。テーマとして、例えば、「ある脳機能（計測データ）を表現するための確率的生成モデルは、どのように構築できるか」がありました。参加者の研究分野が様々であることから、自分自身だけでは発想することができない多様な意見が出ました。このような、学際的なディスカッションをすることは、「人工知能×脳科学」などといった複合領域を扱う科学研究には不可欠なことだと感じました。

私にとって、このサマースクールは、最新の研究や解析手法を学ぶことができたのと同時に、自身の研究を見つめ直す大変良い機会でした。講義やデモをした下さった先生の皆様、運営して下さったスタッフの方々、共にディスカッションすることができた参加者の皆様に対し、ここで感謝をしたいと思いません。ありがとうございました。



イベント情報

主催イベント

第7回領域会議（次世代脳プロジェクト2019年度冬のシンポジウム期間中）

日程：2019.12.20-21

場所：東京都、学術総合センター内特別会議室

「人工知能と脳科学」「脳情報動態」「オシロロジー」合同シンポジウム「脳型計算アーキテクチャ」

日程：2019.12.20

場所：東京都、学術総合センター内一橋講堂

<http://www.nips.ac.jp/brain-commu/2019/outline2019.html>

脳と心のメカニズム第20回冬のワークショップ

日程：2020.1.8-10

場所：北海道、ルスツリゾートホテル

<http://brainmind.umin.jp/index.html>（準備中）

International Symposium on Artificial Intelligence and Brain Science

日程：October 10-12 (Sat-Mon), 2020

場所：Ito Hall, The University of Tokyo

<https://www.u-tokyo.ac.jp/adm/iirc/en>

Invited Speakers:

Matthew Botvnick (DeepMind)

Jim DiCarlo (MIT)

Karl Friston (UCL)

Jessica Hamrick (DeepMind)

Yann LeCun (NYU, Facebook)

Rosalyn Moran (King's College London)

Terry Sejnowski (Salk Institute)

Josh Tenenbaum (MIT)

XiaoJing Wang (NYU)

共催、協賛、後援、関連イベント

第27回脳の世紀シンポジウム「運動/スポーツと脳」

日程：2019.9.11

場所：東京都、有楽町マリオン1F、有楽町朝日ホール

https://www.braincentury.org/index.php?page=brainsympo_index

大阪大学蛋白質研究所セミナー

「精神疾患の分子・回路病態研究の最前線」

日程：2019.11.5-6

場所：大阪府、大阪大学蛋白質研究所 本館 1階講堂



AI
AND
BRAIN

発行／編集 新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」
お問い合わせ 新学術領域研究「人工知能と脳科学の対照と融合」事務局
Mail ncus@oist.jp

2019年10月発行

www.brain-ai.jp