

## 目次

巻頭言 大塚 稔久 (山梨大学).....	3
特集 1 リレー対談.....	4
第 7 回 モデルベース推論を巡る哲学者と脳科学者の対話 坂上 雅道 × 岡田 光弘	
特集 2 論文紹介.....	12
手綱核 - 縫線核経路における予測価値表現による能動的な回避行動獲得の制御機構 (天羽 龍之介)	
Distinct Neural Representation in the Dorsolateral, Dorsomedial, and Ventral Parts of the Striatum during Fixed- and Free-Choice Tasks (伊藤 真)	
特集 3 大会参加記.....	14
第 8 回領域会議参加記 (成本 迅)	
包括型脳科学研究推進支援ネットワーク「冬のシンポジウム」参加記 (樋口 さとみ)	
第 15 回脳と心のメカニズム 冬のワークショップに参加して (北城 圭一)	
特集 4 アウトリーチ活動.....	17
玉川大学 脳科学トレーニングコース体験記 霊長類動物の行動・神経計測技術に参加して (加藤郁佳)	
イベント情報.....	18

### 表紙図 出典

Makoto Ito and Kenji Doya.  
Distinct Neural Representation in the Dorsolateral, Dorsomedial, and Ventral Parts of the Striatum during Fixed- and Free- Choice Tasks.  
The Journal of Neuroscience, 35(8):3499-3514, 2015.



大塚 稔久

山梨大学大学院総合研究部医学域  
生化学講座第一教室 教授  
文部科学省・研究振興局・学術調査官

本ニュースレターを目にする頃には領域も最終年度に突入する時期ではないかと思えます。“光陰矢のごとし”と感じておられる先生方も多いのではないのでしょうか。私は平成25年の8月から、文科省・学術調査官としてこの領域を担当させて頂いています。その1か月後に中間評価のためのヒアリングがあり、本領域が大変高い評価を得て、私事のように嬉しかったのをよく覚えております。本領域を担当することになり、すぐに当初の研究計画書に目を通しました。その際に、正直に感じたことは、このように多岐にわたる研究分野、研究者がうまくまとまるのだろうか、というものでした。しかし、中間評価での領域代表のプレゼンでその杞憂は消失し、その後の領域会議においても、予測と意思決定のメカニズムを解明しようとする先生方の熱意と取り組みを十分に感じてきました。

意思決定の問題は、私達の日常生活でも常に経験するもので、身近であるがゆえにその神経基盤の解明は大きなインパクトを与えるものです。“僕は焼肉”、“いや、私はラーメンがいい”と週末我が家では、小学生の子供達が自分自身の意思決定を行い議論(?)を戦わせています。子どもたちはほぼ同じような環境で育っていますが、こと意思決定に関しては全くバラバラで、意思決定を行う神経回路がまったく違うのかなと感じています。意思決定は、情動、記憶、言語、意識など様々な高次機能と関連し、脳内の責任領域も大脳皮質のみならず、小脳や基底核、脳幹など多くの領域が相互作用することによって発揮されることが本領域の成果からも明らかになってきていると感じます。特にモデルや計算論的神経科学と従来分子・回路神経科学がうまく融合した本領域の推進によって、予測と意思決定に関わる新学術が芽生えつつあるのではないかと期待しています。

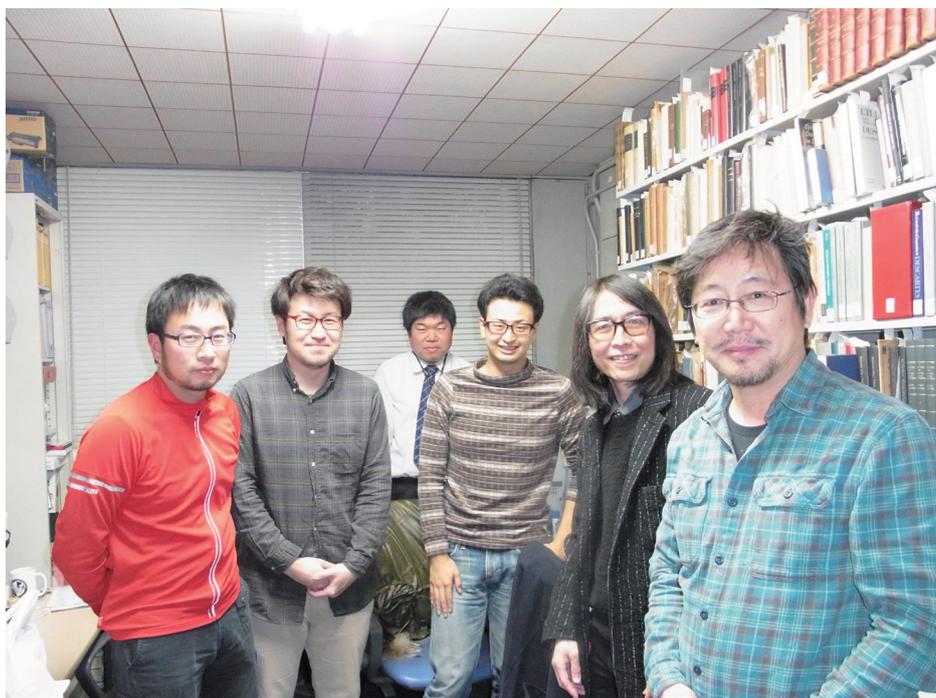
最終年度は、次のステップを見据えた大変大事な年度になります。異なる分野の研究者が結集しボトムアップ型の研究領域を推進されてきたことで、予測と意思決定に関する新たな視点や問題点も炙りだされてきたのではないのでしょうか。

私の学術調査官としての任期はこの7月末までですが、本領域の発展のために裏方から尽力させていただければと思います。本領域のますますの発展を心より祈念しております。

# 「予測と意思決定」リレー対談：第7回

玉川大学 脳科学研究所 教授

● 坂上 雅道



した推論の仕組みが明らかにされるかもしれないわけですね。そういう推論と命題的な推論がどう接続するのか。どうして人間は言語を獲得し、どこが人間に固有の部分なのか。人間が動物から飛躍している部分はどこなのか。二つの推論の仕組みが解明される可能性があるし、両方とも意義深い。

■坂上 二つの推論は、連続的、量的に違うのか、それとも離散的、質的に違うのか。そこが面白いところですよ。ただし、我々は、連続的にしか変わらない、量的な違いしかないという前提に立っています。そうでなければサルを調べる意味があまりありませんから（笑）。また、サルに対して行っているレベルの脳の実験を人間にできるのか。たとえばウイルスを使った実験で、そうい

う機能の神経メカニズムが解明される可能性がありますが、人間にそういう実験はできない。そうすると、しばらく人間の研究はできない。

▼岡田 だからサルの研究の意義が大きいわけですね。

■坂上 そういう意味でも、人間の脳の機能とサル脳の機能は連続的につながっているという仮説を持っておいの方が私達には都合がいい（笑）。それで両者の基本的なメカニズムは共通であるという話になれば、うれしいですね。

▼岡田 ただし哲学の立場では、両者の違いを強調するのが一般的ですね。

■坂上 でも、直観的には、人間だけが特別で、サルと違うとは信じられないんですよ。サルまではプロペラ飛行機だけれども、人間はジェットエンジンとは信じられない。

▼岡田 ある程度複雑な推論は言語的に表象したり、言語的に内的なモデルを形成したりしているという気がします。その土台を、人間はサルと共有しているのではないかと。

■坂上 我々の推論能力あるいは思考能力は言語によるの

## ● 環境世界の状態変化を前提にした推論と命題的な推論

▼岡田 論理や論理推論は命題的であるという偏見があります。しかし、推論の構造は命題的である必要はないかもしれない。同じ推論の構造が状態変化のレベルですでに存在する。そういうことが部分構造論理とか線形論理のレベルで見ると、接続がわかる。状態変化を予測する推論が命題的な論理と同じ構造を持っていても決して不思議ではない。そういう観点で、坂上先生の仕事は示唆に富んでいますね。

■坂上 そう言っていただけるとありがたいです。（哲学者の）岡田先生には、我々脳科学研究者に対して、脳の活動が、どのように思考や、ある種の推論を生み出すのかに関する研究の可能性を示唆していただくと嬉しく思います。最終的に解明したいことは人間が言語を使って実行する論理的な思考ですが、それ以前に、人間の思考と、動物の思考にはどういう共通点があるのか、さらに人間の脳活動と、動物で調べられる脳活動にはどういう関係があるのか知りたい。

▼岡田 脳科学研究によって、環境世界の状態変化を前提に

# モデルベース推論を巡る哲学者と脳科学者の対話

慶應義塾大学 文学部 教授

## 岡田 光弘



か。それとも言語は、いろいろなプロセスをポストホックに説明し、自分で理解するための道具に過ぎないのか。ポストホックに説明し、文章化することで（推論や思考を）発展させられるということは間違いない。

▼岡田 なるほど。

■坂上 サルと人間で、思考機能は量的な違いはあるけれども、基本的なメカニズムは同じ。でも、どう理解するかという点に関しては人間は言語を持っているために、両者の思考機能に大きな隔たりがあるように見える。そういう仮説を私は持っています。

▼岡田 我々の生活上の行為のうち意思決定という行為には、かなり制約があると思うんですね。自分の人生について「考える」というような場面の「考える」と違って、ある状況下で意思決定をしなければならぬときには、あまり言語に頼らずに意思決定をして、後で理由付けに言語を使う。

■坂上 その通りだと思います。実験室で、ヒストリーとかコンテキストを遮断して実験すると、サルと人間に違いがあるように見えなくなってくるんです。でも、実験室の外に出ると、人間は言語を使って、とてつもないことをやる。それも真実。先ほどサルと人間の思考機能に本質的な違いはないと言いましたが、一見、サルと人間が変わらないのは、実験がよくないだけで、適切な実験環境を設定できれば、サルと人間の本質的な違いが見えてくるのかもしれないとも考えています。

▼岡田 意思決定に学習が大事な役割を果たしていることははっきりしていますが、学習について人間固有の点は、言語を使っていることです。その辺で、サルと人間に違いが出てくるのかもしれないですね。

■坂上 そのポイントは、抽象化とか記号化の問題ですよ。今回のフロンティア（岡田先生が editor をしている *Frontiers in Psychology* の特集号での論文のこと）では、意思決定に関して、前頭前野と大脳基底核の機能の違いに焦点を当てています。結局、前頭前野と大脳基底核の機能のどこが違うかというと、抽象化。ある対象にどのくらいの報酬値があるか予測するという点では同じ。しかし、大脳基底核、特にその中の線条体は、個別の対象を分離して処理している。一方、サルでも前頭前野は対象をカテゴライズしている。カ

テゴライズしたものに対してどのくらい報酬があるか学習する。このコップに報酬値があるなら、あのコップにも報酬値があるということと同時に学習しているんですよ。線条体では、一つの対象の価値が特定のニューロンにしかつながらっていない。

▼岡田 カテゴリー化というのは、一種の概念化？

■坂上 そうですね。前頭前野で概念化がなぜ起こるかという、刺激のインプットに対してアウトプットは運動ですが、ニューラルネットワークに何層かの階層があって、中間層で抽象化が結果的に起こる。コップがいくつかあるというインプットに対して、アウトプットはほとんどの場合、「飲む」です。それが教師になるわけです。複数のインプットに対して一つのアウトプットですから、学習が進むうちに自ずからカテゴリー化が起こってしまう。これが抽象化の起源ではないか。もちろんインプット側の similarity（類似）によるカテゴリー化は当然ありますが。

▼岡田 坂上先生は、disjunctive inference（選言型推論）と transitive inference（推移的推論）について、推論機能の違いについて研究成果を報告されていました。選言型推論は個々のケースの処理に関わり、推移的推論は抽象的なレベルの処理に関わっているということでしょうか。

■坂上 そうなんです。きちんと推移的推論の構造を捉える実験をしているのではなく、結果の解釈として我々は推移的推論と言っているわけです。抽象化が起こるような状況を作って実験をして、その結果は、たしかに推移的推論によって説明できる。しかし、もしかしたら、それが本筋ではないかもしれない。今回、論文をまとめていて、そういう気がしてきました。ルールは意外に、皮質下でも学習できる。しかし抽象化ができない。宣言型推論は、抽象化と関係なく調べられるから、今回の実験でわかったけれども、推移的推論については、今回の実験でサルに与えた課題がそういう構造を持っていなかったからテストできなかった。

▼岡田 推移的推論の推論機能に対応することそのものも、カテゴリー化と呼べるのでしょうか。関連づけていること自体、カテゴリー化なのか。

■坂上 少なくともカテゴリー化によって関連づけの仕方が変わってきます。

# 「予測と意思決定」リレー対談：第7回

玉川大学 脳科学研究所 教授

 坂上 雅道

▼岡田 たしかに、そうですね。私自身の分野に引きつけて考えると、ぴったり当てはまるかわかりませんが、20世紀の論理学の論争では、シンタックスとって形式的ルールを基本にした推論と、セマンティクスとって具体的なモデルベースの推論が問題にされていました。1970年代以降、推論の心理学では、BraineとRipsのFormal rule theoryとかMental logic theoryと呼ばれている立場が出てきました。ある種の抽象的な報酬の推論——それがどう獲得されたかは別として——を重視する立場です。もう一つが、Johnson-LairdのMental model theory。Aの場合はどうなのか、Bの場合はどうなのか具体的なケースに即して考える立場です。その二つの立場の対立は、脳科学的にどう説明できるのか。

## サルは抽象化を伴うモデル推論を行っているか？

▼岡田 (ホワイトボード？に書きこみながら) AのモデルとBのモデルを作って、Bの場合にはNot Bもあるから矛盾である。これは環境世界の反例であるというような形になる。そういう消去法で議論を進めるのがJohnson-Laird的なモデル推論です。

■坂上 ある状況に対して生得的に出てくる反応がありますよね。たとえば報酬に対してアプローチする、嫌悪刺激に対してはエスケープするというのが無条件反射に近い。そういう意味で、プリミティブなレベルで説明できる法則性である気がします。報酬が少ないとアプローチの勢いも弱まる。

▼岡田 ある種の快樂への行為と考えられるわけですね。

■坂上 こちらとそちらのどちらかに報酬があって、どちらに行くかを学習しているだけの様な気がするんですよ。こちらへ行ってみたら報酬があった。だからそちらへはもう行きたくない。それだけのことではないか。インプット層とアウトプット層があって、その間に中間層がある。前頭前野の場合、サルでも中間層のカテゴリー情報を取り出せるという話を先ほどしましたが、今の例、選言型推論の話では、アウトプット層に近いところを取り出しているだけかもしれないと思うんです。抽象化されたレベルの話ではなく。

▼岡田 抽象的なルールとしては捉えることはできないようだ、と？

■坂上 そんなレベルで説明する必要がないかもしれない、

ということです。未経験の刺激に対して、どのくらい反応の仕方がわかるかということから抽象化がはじまると考えられるわけですが、抽象化はそもそも必要ではないのではないかな。アウトプット層に近づいて、投射されてしまっている気がするんです。

▼岡田 サルの実験では、ジュースの量が多いか少ないか、ですね。私の個人的な興味でおたずねしたいんですけども、最初の試行では、選言型推論のときには、2番目でしたっけ？

■坂上 そうなんですよ。A、B、Cとあって、報酬が来るんです。普通はA、B、Cとあって報酬が来るか来ないかなんですけれども、私たちの場合、Cを最初に持ってきて、報酬があるかないか教えておく。そうするとAが来て、最後にCが来るわけですが、Aで報酬が予測できるか、という実験です。Cで報酬があるかないかというのと、A、B、Cの関係を別に表象しておいて、それにCを使って、Aで報酬予測ができるか。A、B、Cの関係の変化をstateと呼んで、そのtransitionを前頭前野はrepresentしている。その状態をフレキシブルにCの状態と結び付けられる。だから、線條体でもモデルベースの意思決定ができるんじゃないかという議論をしたわけです。新しい刺激を持ってくるという実験については、新しい刺激とBとの関係を教えておいて、Aの代わりにいきなり新しい刺激を使う。そのときCを出して報酬を予測できるか。それが私たちの実験で、推移的推論を調べる課題です。この実験では、新しい刺激を必ずペアで入れています。N1とN2です。N1が先に与えられる刺激で、N1が出てきたときには線條体は反応しない。おそらくN1が、B1、C1のカテゴリーの中に入っているという情報が使えないから線條体は反応できないのだろうと考えられます。でも、N2も新しい刺激ですが、N2については線條体が反応する。なぜか。私たちはそれを選言型推論が働いたためだと考えたわけです。N1で報酬があった、つまりN1はアプローチすべき刺激であったことになる。サルが実際にそう考えているかわかりませんが、N1とN2をある空間に置いて、たとえばN1は左、N2は右とすると、報酬があるのはN1だったらとにかく左に行くことが重要で、そのとき右に報酬はないということを学習しているだけじゃないか。そうするとN1、N2はセッションごとに新しい情報がどんどん入ってくるから、個別の刺激に反応することはできないようになって

# モデルベース推論を巡る哲学者と脳科学者の対話

慶應義塾大学 文学部 教授

## 岡田 光弘



いるけれども、空間に置きかえてしまうと、ペアということ  
はわかっているから、この部屋のこちらに報酬があるのか、  
そちらに報酬があるのかを学習しているだけじゃないか。

▼岡田 どちらかにあるということは十分に学習している  
ということですね。

■坂上 N1の経験をすることによってわかってしまいます。  
そしたら、こちらにあるとわかれば、そちらには興味がなくな  
ってしまふ。

▼岡田 世の中の環境では、とにかくジュースが多いか少な  
いかなんだということはわかっているわけですね。

■坂上 そうです。

▼岡田 右に行くとか左に行くであっても、選言型推論のと  
きには要素が残っている気がします。

■坂上 非常にナチュラルな、生得的に持っている刺激一  
反応のくせみたいなものが利用しやすい刺激環境だから、  
うまく推論できるんじゃないか。一見ルールのように見え  
るけれども、そのルールは元々頭に埋めこまれているの  
かもしれない。

▼岡田 少なくとも、自分が置かれた環境ではジュースが多  
いか少ないかであるということは学習しているわけですよ  
ね。生得的には知らないわけですよね。

■坂上 生得的にはもちろん知りません。生得的に知ってい  
ることは何かというと、ひよっとすると、報酬が多いところ  
は2箇所ない、ということかもしれません(笑)。

▼岡田 それは生得的に知っているのではなくて、学習に  
よってわかることじゃないですか？

■坂上 食べ物、つまり動物にとっての報酬は、2箇所にあ  
ることはほとんどない。

▼岡田 よいと思われる場所は唯一である、と。

■坂上 食べ物の多い場所が広く分散していることはなく、  
ものすごく偏りがある。それがこの世の中である。そうい  
う状況に適応している動物が生き残っているから、生得的  
に、ある場所に基準以上の報酬があるのであれば、そこが  
一番いい場所であると決めてしまうメカニズムがあると思  
えられる。

▼岡田 面白いですね。

■坂上 わかりませんよ。かなりいい加減なことを言っ  
ています(笑)。言語的に、抽象化できるようなものではな

い気がするんですよ。だから線條体にもできる。ちょっと  
気になるのは、ネズミとかハトにはできないらしいとい  
うことです。

▼岡田 逆に、どうしてサルと人間ができるのか不思議で  
すね。言語を使った選言型推論は、それとは別の話であるか  
もしれないですね。

■坂上 そこが難しいところで、言語化すると定式化でき  
てしまふ。ナチュラルにはサルと同じことを人間もやって  
いるのかもしれない。極端に言えば、そもそも言語の役割  
はモニターすることだけで、ポストホックに説明すること  
だけではないか。暗黙のうちに意思決定はなされている  
という立場に立てば、人間もサルも同じ。でも、言語が  
あるために、説明の仕方が、サルと人間で異なる。

## 最近分かってきた人間の社会的行動の意外な特徴

▼岡田 意思決定をすぐにしなければならない場面では、  
そういうことが言えると思うんです。しかし、よく考  
えて決断する場合、Johnson-Liard的にメンタルモデル  
を使って、AまたはBというモデルに対して、Aの世界  
を思い浮かべ、シミュレートして、そこに矛盾があると  
推論する。それは言語に固有なケースという気も  
します。

■坂上 そういうケースももちろんあるでしょうね。逆  
に、それがないと、こんなにすごい文明は生まれ  
ないと思うんですよ。周囲の環境と隔絶して、  
実験室の中で意思決定するのと、実験室の外で  
意思決定することとは違う。

▼岡田 後付けで合理的説明をする場合と、時間  
に余裕があって、合理的に考えて行動する場  
合がありますよね。もちろん限定合理性を  
伴いますけれども、世界を場合分けして考  
えることもあるのではないですか。

■坂上 それは間違いのないのではないしょうか。話  
が飛ぶかもしれませんが、最近、山岸(俊男)先生  
と社会心理実験に取り組んでいます。人間の  
社会的行動とは、相手の意思決定とか行動を  
自分の脳にシミュレートしながら自分の意思  
決定をしたり行動をすることであると考  
えられています。社会的な場面では自  
分の欲求を、社会行動のシミュレーション  
によって、ある場合には抑制したり、抑  
制を外したりして、適切に社会の中  
で行動するわけです。前頭前野や頭頂葉  
のような高次機能を発揮する、大脳皮質  
の部位で、他人の心理状態、

# 「予測と意思決定」リレー対談：第7回

玉川大学 脳科学研究所 教授

坂上 雅道

行動をシミュレートしている。一方、自分の欲求に基づく行動は、大脳基底核とか扁桃体などの報酬系が reactive に反応していて、その reactive な反応を抑えることによって相手に迷惑をかけないような社会行動をする。そういう考え方が、社会的行動の脳科学的説明として一般に受け入れられています。しかし本当にそうか。最近、Martin Nowak というハーバード大学の数理生物学者が興味深い研究成果を発表しました。囚人のジレンマのようなゲームを用いて人間の社会的行動を測る実験がよくなされていますが、彼らによると、どうも協力的な判断をするときのほうが、相手を裏切って自分の金儲けをするような判断をするときよりも反応時間が早い、と。逆に、判断する前に十分な時間を与えると、裏切る判断をすることが多くなるそうです。時間を与えずに判断までの時間を急かすと、協力する、と。どうも人間は考えない方が、社会的行動をより多く見られるみたいなんです。人間は考える時間が十分あると、金儲けとか、社会的ではない行動をはじめめるんじゃないかと彼らは主張しています。NICT（情報通信研究機構）の春野（雅彦）さんによると、扁桃体には、不公平を直観的に検出する機能がある。不公平な状況を設定すると、前頭前野が働かなくても扁桃体が自動的に不公平を検出する。そして、不公平を解決する反応を促進させているんじゃないか、と春野さんたちは言っています。私たちも、囚人のジレンマゲームの実験をすると、お金儲けをするために相手を裏切るときには前頭前野が働くんです。一方、何も考えずに協力するときは扁桃体が働く。どうもこれまで考えられてきたことと逆のようなんです。

▼岡田 協力することが進化的に有利な戦略だったということでしょうか。

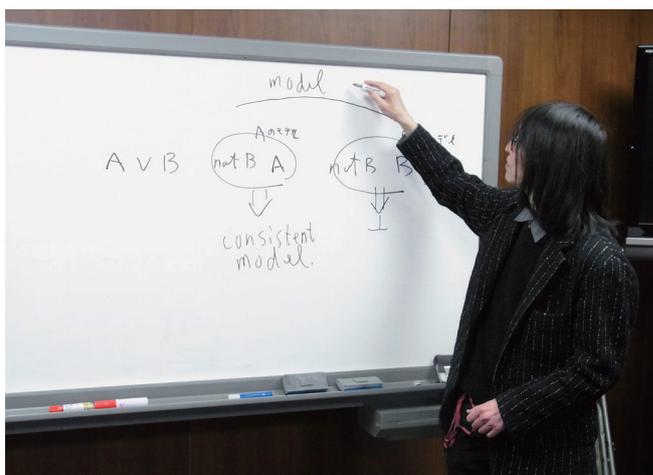
■坂上 そうですね。そもそも協力的な人のほうが扁桃体が大きいんですよ。そして協力しない人のほうが前頭前野が大きい。ピアニストの運動野で、指の動きを担う部分は、そうでない人のものより体積が増大していることが知られていますが、これは学習による結果と考えられます。したがって、脳のある部位が大きいからといって、必ずしも先天的に大きかったとはいえない。ひょっとしたら、あまり考える時間を与えられず、さっさと判断して社会的行動をする機会の多かった人は、結果的に扁桃体が大きくなって、さらに社会的行動を見せるようになったのかもしれない。そのあたりについて（慶應大学の）安藤（寿康）先生と研究する予定です。先天的に扁桃体や前頭前野が大きい人と社会的行動の現れ方を調べようとしているところです。

▼岡田 面白いですね。

■坂上 前頭前野の使い方については、もう少し考えてみる必要がありそうです。たとえば論理的な思考にしても、前頭前野がどう関わっているのか、考え直してみる必要がある。

▼岡田 論理的な思考と合理的な思考にはギャップがあるという見方もありますね。しかも、合理的な思考と記述的な意思決定とのギャップも報告されています。その辺のギャップを神経科学的に調べていくことには意義があると思いますね。

■坂上 昔、東大の信原先生と、尤度は脳のどこで計算しているのかという話になったことがあるんですよ。皮質じゃないですかと言ったら、「それはへんじゃないですか」と言われた（笑）。たしかに強化学習を考えると、そのときに最もいいものをどんどんその場で選んでいくような学習の仕方をするのなら、たしかに皮質下かなと思いました。しかし、たとえば囚人のジレンマゲームで、金儲けを狙う選択をすることはそんなにおかしいことではない。そういうことを考えるのはやっぱり前頭前野なんですよ。そうすると、適応的に何か儲けるということを合理的と呼んでいいのかわからないけれども、そういう思考と論理的な思考を一緒くたにはしてはまずいという気がします。ますます何のことやらわからなくなってきました（笑）。



## 神経科学は機能主義を超えられるか？

■坂上 岡田先生のことを私は哲学者だと思っているんですが、論理学者という方が正しいんですか？

▼岡田 論理的な哲学に興味を持っていますし、論理を知りたいと思っています。いろんな方向から論理を追究していま

# モデルベース推論を巡る哲学者と脳科学者の対話

慶應義塾大学 文学部 教授

## 岡田 光弘



すが、まだ全然わかっていませんが（笑）。

■坂上 論理を知りたい場合、論理の積み重ねによって論理を思弁的に説明する。そういうやり方で哲学者は論理を追究しているように私には見えますが、岡田先生のアプローチはどうでしょうか。

▼岡田 私たちが影響を受けている論理哲学者の中にヴィトゲンシュタインという人がいます。彼は『論理哲学論考』の最後で、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」と記した。言語で表現できない論理的な世界の構造を1冊で説明しようとしたわけですが、説明しようとしたものは本来言語化できないものであって、言語化するとメタ言語になってしまう。逆にメタ言語を積極的に使っている哲学者もいますが、ヴィトゲンシュタインはメタ言語について語ってはならないという立場です。

■坂上 そういう話と自然科学的な記述との関係は？

▼岡田 ヴィトゲンシュタインの場合には、事実を世界の側に置いて、事実と命題が、論理的な形式を共有しているという前提で、世界を論理的な言語で説明します。論理実証主義者が物理的な世界について語るときも同じ前提に立って語っています。論理的な言語によって物理的な世界が記述できるという前提に立っているわけです。哲学の中には、言語よりも前のものを対象にしている立場もあります。現象学はその一例で、意識の外的世界との志向的関係性を先行させています。主観主義的な認識論も、言語より前の主観的な認識がいかに客観性を持つのかという観点から議論を展開する立場もあります。必ずしも言語を重視するのが哲学の立場とは言えません。

■坂上 昔、銅谷（賢治）さんが、サル二頭を向かい合わせ、それぞれのサルに、脳の活動、つまりどこのニューロンがどう活動しているかをオンラインで表示するLEDパネルを見せあうという実験を考えました。そのまま生活させると、それまで自然にサル同士がやってきた以上のコミュニケーションができるようになるのかどうか調べるというアイデアです。もし、人間で同じことをした場合、ひょっとすると言語を超えたコミュニケーションが出てくるのかもしれないという気がします。私たちは実験で、脳活動をモニターしているわけですが、モニターするときにうまく切り口で表現できれば、そこには言語化できていない何かがあるかもしれません。しかし、私たちは論文に書くとき、必ず言語に変換して、すべての現象を説明せざるを得ない。ヴィトゲンシュタインが言ったのと同じような問題に直面する気がするんで

す。これまで私たちは、脳活動を記録することによって、脳のどこが障害を負ったからどう行動が変化したかといった形で脳活動を言語的に記述してきました。将来、そういう言語的な記述を超えた形でニューロン活動をモニターすることができるようになるんじゃないかと期待しているわけですが、今は、私たちはあらゆる現象を言語を使って記述せざるを得ない。ある現象を記述するとき、言語的に記述可能な表現に投影される結果、本質的な部分が抜け落ちる、フィルターアウトされてしまうのではないかと。これはヴィトゲンシュタインの言っていることと同じことなんじゃないかと。

▼岡田 今、おっしゃったのは、神経科学者が実験の成果を言語的に報告するとき、言語の制約を受けてしまっているということですか？

■坂上 そういことですね。それが、先ほど先生がおっしゃった、ヴィトゲンシュタインの「沈黙しなければならぬ」、つまり、結局、言語的に表現し得ないということ同じなんじゃないかと。

▼岡田 神経科学者はいつも十分に沈黙していると思います（笑）。その先に、たとえば機能主義的な立場で、神経科学的な成果を語る以上に何が語り得るかを、逆に坂上先生に訊いてみたい。価値駆動型（value-driven）の意思決定について、神経科学はいろんな種類の機能的な脳活動を記述できるわけですが、その先、私欲（selfinterest）、効用（utility）、カーネマンらが言っているような徳とかハピネスまで踏み込んで語り得る可能性があるのか。それとも機能主義では語りすぎになってしまうのか。神経科学は機能主義を超えられるのか。

■坂上 機能主義をもう少し具体的に説明していただけますか。

▼岡田 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、坂上先生のカテゴリズとか。機能の説明以上のことが言えるのか、ということです。

■坂上 機能を分解するだけで、総合することができるのかということですか。

▼岡田 それはいい表現ですね。

■坂上 我々は計画的に研究をやっているわけではなくて、脳科学者はみな行き当たりばったりで研究していると思うんですよ。誰かが、たとえば予測誤差で説明できるようなニューロン活動を見つかったと報告すると、みんながわーっとその関連現象を調べはじめる。そもそも脳はこういうことをしていて、こういうメカニズムがあるに違いないという仮説を立てて研究しているなんてことはないと思うんですよ。

# 「予測と意思決定」リレー対談：第7回

玉川大学 脳科学研究所 教授

 坂上 雅道

▼岡田 極端な場合、還元主義の立場もあります。すべてが物理的レベルとか分子レベルに還元できるとする立場です。

■坂上 たとえば錯視。人間にどんな錯視があるかを見つけて出すための理屈はあるかもしれないけれども、今のところは行き当たりばったりで見つけている状態。こんな錯視があった、あんな錯視があった、と。そういう例がたくさん集まったところではじめてそれぞれの錯視に共通する機能が考えられ始める。その機能を抽出することが次の課題になります。機能が抽出できる。そこから人間の知覚に関する機能全般に対する説明をしようという流れができてくる。神経科学も同じ。いろんな人が、いろいろなニューロンを見つけ、経験的な知見が溜まっていくうちに、脳の機能の共通性が見出され、抽象化が起こる。機能が抽出され、抽象化され、ある場合には数式で記述されるという形で、たとえば強化学習などはできてきた。脳科学はそういう研究の仕方なんですよ。

▼岡田 少なくとも研究の目標は機能を解明することではない、ということですね。

■坂上 我々が行っているタイプの脳科学は、1950年代、60年代のヒューベルとウィーゼルによるネコの視覚野の研究からはじまっています。初期の段階では全体の法則性まで捉えることはできず、見つかった面白そうな現象の周辺に焦点を当てて調べるという形で研究が進められてきました。そしてデータの蓄積が進み、2000年代に入ってようやく数式でシミュレーションできるようになった。今は、機能の法則性を抽象化して、どれだけ幅広い機能を説明できる数式を作れるかという研究が大流行している状況です。機能の法則性を導き出すような実験をするためには、経験的なエビデンスをもっとたくさん集める必要がある。

▼岡田 たとえばチューリングは、我々は状態遷移系を心を持っていると考えました。チューリング自身も、心的な状態遷移からチューリングマシンを作りだしたわけです。それが心の哲学の機能主義の源流の一つです。一方、還元主義の立場もある。しかし多くの哲学者は機能主義と還元主義の境界線の議論に関心がある。心と機能主義的な神経科学との境界線あるいは連続性はどこにあるのか。機能の説明と意識がどう関わっているのか。意識を機能とか、心も機能とすると、本当に意識があるとか心があるとか言えるのか。

■坂上 高次機能の研究は特に行き当たりばったりなんです。高次になればなるほどその傾向が強い。

▼岡田 哲学として考えると、高次とされているものが本当に高次かどうかは面白い問題ですね。先ほども動物と人

間の脳機能の差について、量的な違いや複雑さの違いがあっても本質的には同じメカニズムを持っているという立場からのお話がありました。現場で研究に携わっている人の立場としてはごく自然な立場だと思います。しかし、段階的に研究を進めれば、心も含めて、いつか高次の機能も明らかにされるのか。

■坂上 残念ながら、そう考えている人がまだ多いと思います。今は脳について鳥瞰的な見方、大局的な見方がまったくできていません。たとえば前頭葉、後頭葉、脳幹があってという脳の構造、そしてどの部分がどこにつながっているのか、ニューロンに電気がなぜ流れているのかについてはある程度わかっています。そういう意味では大局的な見方がないわけではない。ある種の設計図にしたがって、まだわかっていない部分を埋めていこうという形のアプローチもある。ただしそれは高次ではない機能に関する研究なんです。ところが、心とか意識がからむ話になると、鳥瞰的な設計図がどこにもない。だからみんな手当たり次第に新奇な現象を探している。そういう中で、クリストフ・コッホやジュリオ・トノーニみたいな人たちが、意識という現象をある程度客観的に記述する方法を提案しはじめている。意識とはそもそもどういう現象なのか。どういう機能の集合体なのかが何とか明らかにされようとしている。思考についても、意識よりもはるかに研究が進んでいる気がしていましたけれども、全然そんなことはない。思考の問題は簡単だと思っていましたが、よく考えてみると、全然わかっていない。

▼岡田 意識や思考の問題に共通しているのは、いったいどこから意識と言えるのか、どこから思考と言えるのかといった問題ですね。言語的な意識や思考は人間固有に限定されてしましますが、どの動物が意識や思考を持っているのか。前判断的なレベルで意識の構造から、期待とか意図を取りだそうとしている哲学の立場もあります。そういう意味では、意識を前提とした哲学の分野もあれば、意識を捉えようとしている神経科学の分野もある。また、論理を前提とした論理哲学・言語哲学もあれば、論理を捉えようとしている神経科学の分野もある。それぞれの交流には意義があると思いますね。

## 人間やサルに関する内的モデルの存在証明

■坂上 その点、いつも哲学に期待しています。鳥瞰図を与えてくれることを哲学に期待するんです。神経科学の研究には時間がかかるし、広い範囲を同時にカバーすることもできない。全体として意識とは何なのか、意識の個々の要素と

# モデルベース推論を巡る哲学者と脳科学者の対話

慶應義塾大学 文学部 教授

## 岡田 光弘



全体の関係は？といった問題を、哲学者なら一人で扱うことができます。神経科学の研究には、個々の要素を明らかにするだけで10年かかってしまうことも珍しくないから、どうしても我々には全体像が見えにくい。私の理想としては、個々の要素を神経科学者が明らかにして、哲学者が鳥瞰的な見方を提示してくれること。そうすれば神経科学者として私が掘っていた穴はここだったのかとわかる。

▼岡田 哲学系の研究者でも、神経科学の動向に気を配ったり、勉強会に参加したりする人が増えてきました。私も神経科学の知見を無視しては、哲学を語れなくなっていると思っています。銅谷先生を中心とする新学術領域研究で、こういう交流の場を設けてくれたことに感謝しています。今は、論理的な判断、行動経済学的な意思決定がどういう関係にあるのか調べているところです。同じ課題であっても、被験者に図的あるいは表的に表現して提示することと、言語的に表現して提示することで、被験者の意思決定がどう変わるか。伝統的な内観法による研究では、3段階法のベンチマークの推論など論理的な推論も、図的に表象して内的なモデルを作って推論をしていることを明らかにした研究成果があります。Johnson-Lairdの推論も、図的に内的な表象して、モデルベースで推論していることがわかってきました。

■坂上 そこは重要ですね。

▼岡田 行動経済学の実験でも、被験者に、同じ課題を図的に表現して提示するのと、言語的に表現して提示するのでは、図的に表現して提示した方が被験者は合理的に判断できることがわかってきています。図的といっているのは、具体的にはオイラー図です。内観法の先行研究に、人はオイラー図みたいなものを使ってモデルを構成して推論していることを示した成果があります。実際にそれを外的に表象して計算を助けてやると、効率がどう上がるか。私たちはアイトラッカーを使って、その効率性を調べています。論理と意思決定の課題を結び付けて、合理性や論理性について研究しています。

■坂上 Nathaniel Daw たちがモデルベース、モデルフリーを分ける実験課題について提案をしていますが、モデルベースとモデルフリーの一番の違いは、内的モデルを使うかどうかですね。彼らの実験で、内的モデルを作って、それを本当に使っているという証明があるのかどうか。関連論文をいくつか読んでてもそこがわからないんですよ。内的モデルが本当であって、それを実際に使っているということを何らかの形で証明することは非常に重要だと思います。今、岡田先生

がおっしゃったように、ある種の内的モデルを使うことを促進するような状況と、それを抑制する状況を設定すれば、内的モデルを使っているのかどうか議論できますね。さらに、MRIでもいいんですが、内的モデルを使っているときに特有の脳活動が記録できて、これまでの議論との整合性がとれればいいですね。

▼岡田 内的モデルが意識と関わりあるのか。モデルフリー、モデルベースに対応する概念は哲学の世界に昔からいくらかもあるわけですね。反射的な行動と熟慮的、意識的な行動と言われましたが、モデルという言葉は使われていなかった。一方、Dawや銅谷先生を含めて、モデルフリー、モデルベースという言葉を使いはじめた。哲学で伝統的に扱われていた問題と、モデルフリー、モデルベースという新しい問題を重ねてみたとき、内的モデルを構成すること自体を内的にみている、そういう意識に関わっているのか。そうじゃないのか。

■坂上 そこがまさに意識のあやですね。意識をモニタリングできるから、まるで自分たちがシミュレーションしているように感じて、ひょっとしたらポストホックにすぎないもので、ある種の行動の因果として内的モデルがあるのか、それを本当に使っているのか。

▼岡田 アイトラッキングを通じたアイムーブメントと内的プロセスが同じかわかりませんが、プロセスのパターンの違いは問題によっては捉えられることもある。同じ3段階法でも存在とか否定がからむと別の戦略をとることもある。人による違いもある。いくつかのパターンの違いをカテゴリーライズして、その違いが学習によるのか、遺伝によるのか、安藤先生たちと双子の研究で明らかにしようとしています。その先、MRIを使った研究などで坂上先生と協力していただければありがたいです。

■坂上 是非お願いします。これまで神経科学者が考えてこなかった問題だと思います。

## The habenulo-raphé serotonergic circuit encodes an aversive expectation value essential for adaptive active avoidance of danger

Amo R, Fredes F, Kinoshita M, Aoki R, Aizawa H, Agetsuma M, Aoki T, Shiraki T, Kakinuma H, Matsuda M, Yamazaki M, Takahoko M, Tsuboi T, Higashijima S, Miyasaka N, Koide T, Yabuki Y, Yoshihara Y, Fukai T, Okamoto H. *Neuron* 84(5), 1034-1048, 2014.

危険を察知した際にとる行動は、動物が生存するために最も重要な行動の一つです。このような時には多くの動物に共通して、すくむ等のパニック様行動が見られます。しかしながら、危険から身を守るという点でこの行動の効果は限定的であり、生存確率を上げるためには、能動的な対応行動を学習していく必要があります。

この学習は、能動的回避学習課題 (図左) を用いて模倣する事ができ、その学習機構は強化学習理論で説明されます。動物は危険を経験した際には、観察された特定の環境因子に対して負の予測価値 (将来の危険の予測値) を割り当てていきます。偶然危険が回避される行動をとった場合、(将来の危険に対する) 負の予測価値に反して実際には危険は存在しないため、正の予測誤差が生じ、この正の予測誤差が直前の行動 (回避行動) の強化を引き起こすと考えられます。正の予測誤差は中脳のドーパミン神経細胞によって担われますが、予測価値の信号はその重要性にも関わらずどこで表現されどのように伝達されるのか不明な点が多いままでした。

本研究では、複雑な亜核構造と多様な投射先のため解析が困難であった外側手綱核によるセロトニン制御について、ゼブラフィッシュをモデルとする事で経路特異的な解析を実現し、手綱核-縫線核経路が負の予測価値を表現し、能動的な回避行動の獲得を可能としている事を見出しました。

初めに手綱核-縫線核経路の適応的、能動的な行動学習への関与を調べるため、GFP で標識した腹側手綱核 (外側手綱核相同領域) の細胞から古典的恐怖条件づけの間の神経活動を記録しました。学習依存的に条件刺激 (赤色ランプ) に対する反応を変化させる神経細胞の一部では、条件刺激の間、持続的な神経活動の上昇が観察されました (図右)。この手綱核の活動パターンは過去に報告がなく、条件刺激に対する負の予測価値を表現している事が示唆されます。

能動的回避学習課題において学習初期 (条件刺激と非条件刺激の連合学習) では、条件刺激に対する負の予測価値は上昇し、学習後期 (回避行動の学習) では、回避行動の会得に伴って条件刺激に対する負の予測価値が減衰する事が強化学習理論から予想されます。能動的回避学習の各段階で課題を止め、条件刺激に対する腹側手綱核の神経活動を観察すると、理論的予測と一致

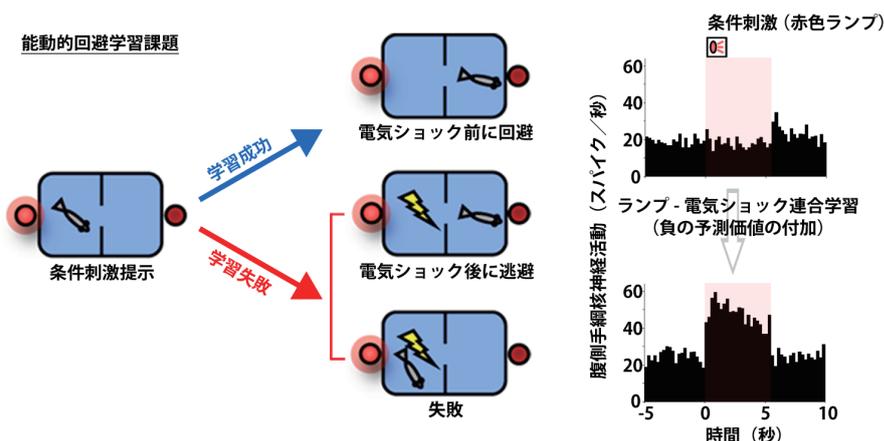
して学習初期の魚は条件刺激提示中の活動が高く、学習後期では学習前と同程度に戻っていました。この事からも条件刺激に対する持続的な活動上昇は、負の予測価値を表現していることが支持されます。

それでは、予測価値情報はどこに伝達されるのでしょうか。腹側手綱核のグルタミン酸作動性神経細胞を選択的に標識すると、ほぼ全ての腹側手綱核神経細胞がグルタミン酸作動性であり、投射先は縫線核に局限することがわかりました。手綱核-縫線核経路の生理学的結合を調べるため、縫線核のセロトニン神経細胞に GFP を、腹側手綱核に Channelrhodopsin-2 (ChR2) を発現させました。手綱核軸索末端の光刺激に対するセロトニン神経細胞の反応を急性スライスで記録すると、一部の神経細胞から興奮性の反応が観察されました。これらの結果より、負の予測価値は腹側手綱核から縫線核セロトニン神経細胞へと伝達されることが示唆されます。

この負の予測価値の伝達を阻害すれば、能動的回避学習課題が学習できなくなると予測されます。実際に腹側手綱核に特異的に破傷風毒素を発現させ神経伝達を阻害した魚において能動的回避学習課題を行うと、予測と一致して、能動的回避行動の学習ができなくなりました。古典的恐怖条件づけでは正常な個体と同程度の学習反応 (ターン頻度の上昇) が観察されることから、経験依存的なパニック反応の誘起に腹側手綱核は必須ではなく、より適応的な強化学習とは異なった回路が使われることが予想されます。

腹側手綱核が負の予測価値を表現しているのであれば、その神経活動を人為的に操作する事で、特定の環境に負の予測価値を植え付ける事ができるはずです。自由遊泳下で ChR2 を発現する腹側手綱核の活性化を行うため、光ファイバーを介した光刺激法を開発しました。水槽の底面を二色に分け、一方の色の領域に滞在する間のみ光刺激を行うと、魚はこの領域から逃避し避けるようになりました。

これらの結果より、腹側手綱核-縫線核経路が負の予測価値を表現し、セロトニン神経細胞へと伝達する事で能動的な回避行動の獲得を可能としていることが明らかになりました。この知見を基に、どのようにして予測価値が生成されるのか、どこで予測誤差が計算されるのかを調べる事で脊椎動物の根幹を成す学習神経回路の作動原理に迫りたいと考えています。



## Distinct Neural Representation in the Dorsolateral, Dorsomedial, and Ventral Parts of the Striatum during Fixed- and Free-Choice Tasks

Makoto Ito and Kenji Doya,  
The Journal of Neuroscience, 35(8):3499–3514, 2015

大脳基底核は、意思決定や運動調節を担っている皮質下の核の集合体ですが、その入力部にあたる線条体は、その部位の違いによって、外背側線条体 (dorsolateral striatum; DLS)、内背側線条体 (dorsomedial striatum; DMS)、内側線条体 (ventral striatum; VS) に区別され、それぞれが、習慣的行動、適応的な意思決定、モチベーションに関係していると考えられてきました。しかしながら、同一の意思決定行動において、これらの3つの領域が、どのように協調して働いているのかはほとんど分かっていませんでした。

本研究では、ラットに二種類の選択課題（報酬固定課題、自由選択課題）を行わせ、その間の神経活動を DLS, DMS, VS から同時に記録しました。報酬固定課題では、ラットが中央の穴に鼻を入れた時に音Lか音Rを呈示し、音Lに対してラットが左の穴を選んだとき、または、音Rに対して右を選んだときに、50%の確率でペレットを出しました。この課題を何度も繰り返すことで、音に反応する選択行動が習慣化し、行動の情報が DLS で強くコードされる（左を選んだ時と右を選んだ時で神経活動が変化する）と考えました。一方、自由報酬課題では、常に音Fを提示し、右と左でペレットの出る確率は数十試行ごとに変化させました。この課題では、どちらでペレットが多くもらえるかを常に考えることが要求されますので、行動の情報は DMS で強くコードされると考えました。

ところが、神経活動を解析してみると、DLS でも DMS でも、自由報酬課題よりも報酬固定課題で行動情報が強くコードされており、予想とは異なっていました。領野間の違いは、むしろ、活動パターンで明確でした (図1)。両方の課題において、VS では、ラットが課題を開始しようと中央の穴に向かって進んでいるとき (phase 1) に多くの細胞が活動しました。DMS では、ラットが左や右を選んでいるとき (phase 5) に多くの細胞が活動しました。一方、DLS では、特定のフェイズの好みはなく、それぞれの細胞が様々なタイミングで、そして比較的短い時間間隔で活動をしていました。また、興味深いことに、ロボットの行動選択学習などに利用されるアルゴリズム (強化学習) の変数 (行動価値: 各選択肢に対

する報酬期待) が、線条体全域で (例: 図2)、特に行動選択時には DMS で強くコードされていたことも分かりました。

得られた結果は複雑なものでしたが、習慣的行動では DLS、適応的な意思決定では DMS しか働かないという考えは間違いであり、同一の選択行動においても、全ての部位が異なる役割をもって働いていることが分かりました。私達は、階層的な意思決定の役割を各部位が担当しているのではないかと考えています。VS は最も上位の意思決定を担っており、課題を開始するかどうかを決定し、DMS は、行動価値を計算して左右のどちらが良いかを決定する中位の意思決定を担当し、DLS は様々な実際の行動をコントロールする下位の意思決定に関わっていると考えると、解析結果を自然に解釈することができます。

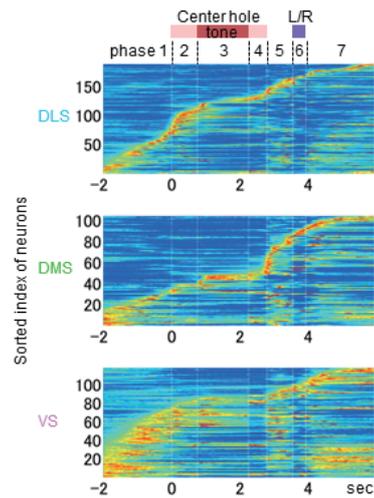


図1 線条体の各部位における個々の神経細胞の活動パターン。縦軸は各神経細胞の ID 番号を表し、各神経細胞が課題遂行中のどのフェイズで活動したかをヒートマップで表している。

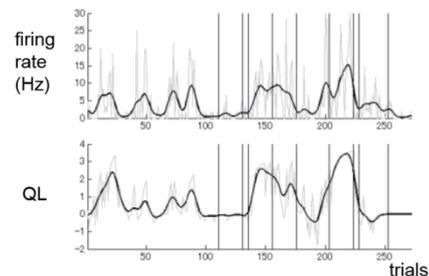


図2 行動価値をコードしていた神経細胞の例 (DLS)。行動選択直前の発火頻度の各試行における変化が (上パネル)、左の行動価値の変化 (下パネル: ラットの行動から強化学習モデルを使って推定された) に同調していた。

第 8 回領域会議参加記

成本 迅 (京都府立医科大学大学院医学研究科)



第 8 回領域会議は包括脳の開催期間中に同じ東京医科歯科大学において平成 26 年 12 月 11 日に開催されました。御茶ノ水駅徒歩すぐの御濠端という好立地で、京都からの参加でしたがあつという間に到着しました。包括脳からの参加者で会場は空いている席を探すのが難しいほどいっぱいでした。今回は計画班の口頭発表ということで、いずれも高いレベルの発表が行われましたが、臨床研究を専門としていることから普段聞く機会が少ない基礎研究の発表を特に興味深く聞かせていただきました。トランスレーショナルな研究を頭の中で構想することはとても楽しい作業で、今はまだ頭の中にしかありませんが、本領域の基礎研究者の方とは是非実現させたいという思いを新たにしました。このようなことが可能になるのが本領域の優れた点だと思います。領域会議でよく実際の臨床症例の症状などについて御質問いただきますが、今後是非いろいろと議論させていただけたらと願っております。

ポスター発表は、連携研究者の ATR 所属の田中沙織先生から強迫性障害の病態を計算論モデルで説明する試みを発表していただきました。近年強迫性障害のモデルは、model based vs model free 学習の枠組みで model free の意思決定に傾いている（強迫症状をいわゆる 'habit' として捉える）学説が一世を風靡しております (Voon et al. 2014)。これは two-stage Markov decision task (Daw et al, 2011) を実施してこういった結果が得られたことから提唱されているモデルですが、強迫性障害にはいわゆる 'habit' に必要なオーバートレーニングの段階がない点や、臨床症状である「不安」の介在を無視している点などから、実際の症状とはかなり乖離のあるモデルと考えております。そこで、私達はセロトニン機能障害と関連した衝動性・学習障害といった観点から、臨床に則したモデル構築とその実証を行っていま

す。玉川大学脳科学研究所の酒井裕先生にもディスカッションに加わっていただくことができ、熱い意見交換を行うことができました。これまで精神疾患の計算モデルはいくつか提唱されていますが、実際に「臨床で役立つ」モデルは皆無です。私達は実臨床に携わっている精神科医と計算論的神経科学の研究者が密に連携することを通して、「臨床で役立つ」モデルの構築を目指しています。

また、前回の本領域で知り合いになり、今回はこちらの申請で連携研究者に入っていたいただいた慶應義塾大学の梅田聡先生のポスター発表をおききするとともに、共同研究についての打ち合わせを行うことができました。お互いの研究室を訪問しあって、双方の研究の理解を深めています。今後、私たちの研究室の強みである精神疾患患者を対象とした臨床研究に、梅田先生がよく設計された認知課題と自律神経測定を組み合わせることで意思決定メカニズムの障害に迫ることができると期待しております。次回の領域会議では共同研究の計画をポスターで発表できればと考えております。領域の皆様の御意見もお待ちしております。

今回、若手の研究者が多くポスターセッションにも参加してすごい熱気でした。おかげで自分が大学院生だった頃の気持ちを思い出し、研究への情熱を補充することができました。次回は沖縄ということで、ゆったりとした雰囲気の中で放電しないよう気をつけながら引き続き次年度の研究に臨みたいと思います。



包括型脳科学研究推進支援ネットワーク「冬のシンポジウム」として、平成26年12月11日から13日まで3日間、東京医科歯科大学とホテル東京ガーデンパレスの2会場で、新学術領域研究の様々な領域間による合同シンポジウムが開催されました。私自身は、新学術領域の「予測と意思決定」「こころの時間学」のメンバーではありませんが、「共感性の進化・神経基盤」領域のメンバーとしてこの冬のシンポジウムに参加させていただきました。

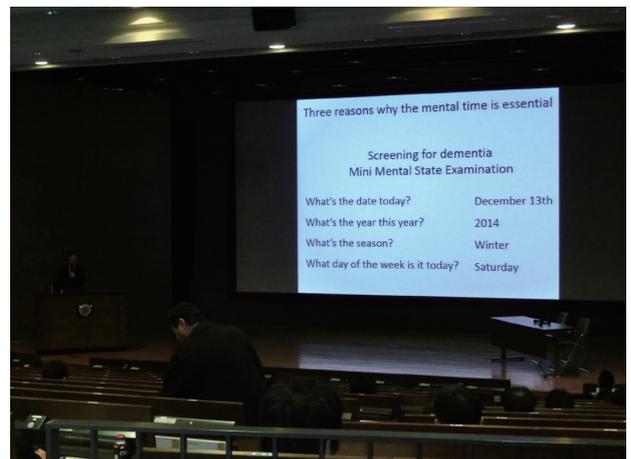


「新学術」という名前からも推察できますが、新しい学問領域を切り開くことを目指しており、そのために様々な領域の研究者が集まることで、新しい学問を確立しようという壮大な試みの元に行われたシンポジウムになっており、全15領域が参加する領域横断的なものとなっていました。新学術の領域会議においても、普段私が行っているMRIを用いたヒトの脳機能研究だけではなく、遺伝子レベル、分子レベル、ニューロンレベルといった様々なアプローチから共感性についての研究を知る機会となっており、毎回とても良い刺激を受けることができる有意義な会議となっているのです。今回のこの冬のシンポジウムにおいては、共感性という枠を超えて、時間割引、予測と意思決定の研究領域の諸先生方の発表を拝聴させていただき、また違う側面から現在行っている共感性の研究に立ち返ることができたように感じています。

ヒトが協力して物事を成し遂げるときにおいて、どのような脳機能が使われているのだろうかと考えたときに、共感性領域のグループでは、ヒトの協力行動や対人関係に関する脳の機能といった側面や、共有された情動がその協力や対人関係とどのように関わってくるかなどといった視点で考えているのではないかと思います。ここには、協力行動をすることで得られるかもしれないといった結果の確率が曖昧なものや、協力

をしないことで他者からどう見られるだろうかという不確定要素、より良い社会を築いていくためにヒトはどのような物事に重きをおいて意思決定を行っているのだろうかということが含まれていると思います。これらの処理に含まれる事はまさに、「予測と意思決定」で取り上げる脳内シミュレーションとモデルベースの意思決定の脳機構の解明や、「こころの時間学」で取り扱うヒト特有の現在・過去・未来にわたる時間の意識の成り立ちの解明が密接に関わっている研究課題となっています。ヒトがうまく協力するためには、他者がどのように行動するだろうかというある程度正確な予測が必要になりますし、協力行動を起こすためにどのような意思決定の過程を経て決断しているのか、他者からすぐに見返りを得られないような協力行動をする際に、どのような時間軸で考えるのかなどは、密接に関係があるのではないかと常々考えていましたので、今回の「予測と意思決定」と「こころの時間学」の合同公開シンポジウムに参加することで、諸先生方の講演を通じて共感性領域のグループとどのようにつながっていけるのか考える良い機会となりました。

今回の合同公開シンポジウムでは、研究者相互のインタラクションに基づき、新たな学問領域の開拓と若手研究者の育成に重きを置いて行われたのですが、「こころの起源にせまる」という壮大なテーマの下で取り組んでいる様々な領域の最新研究を知ることができ、大変貴重な日々となりました。今回のスケジュールでは、並行して多くの会議が行われていたため、どの会議に参加するか葛藤したのですが、次回は並行開催を減らして頂けるとより領域間のインタラクションが進むと思いますので、是非ご検討頂けると幸いです。



● 第15回脳と心のメカニズム 冬のワークショップに参加して

北城 圭一 (理化学研究所 脳科学総合研究センター)

2015年1月7日から9日にかけて北海道ルスツリゾートホテルで行われた「脳と心のメカニズム 冬のワークショップ」に参加した。今回は「心の統合 Integration of mind」とのテーマでの開催であった。初日千歳空港近辺で大雪となり飛行機の欠航が相次いで参加できなかった人がいたのは残念であったがそれでも数多くの参加者による非常に熱気のある会となった。



György Buzsáki 先生 (New York Univ) の講演

1日目のスペシャルセッションは György Buzsáki 先生 (New York Univ) の海馬のシータ波での情報コーディングの話から始まった。脳の内部ダイナミクスが過去、現在、未来の情報をコーディングをする仕組みを提唱した。続いて Giulio Tononi 先生 (Univ of Wisconsin) の情報理論的枠組みでの意識の理論、定量化手法についての講演が行われた。Tononi 先生は2日目の夜に Integrated Information Theory of Consciousness と題したチュートリアルも行った。これは参加者とのインタラクティブなチュートリアルで Tononi 先生は質疑応答をととても丁寧にしており、意識研究の「伝道師」という印象を私は持った。また今回のワークショップはこのチュートリアルを目当てに参加した若い研究者が数多く見受けられた。初日スペシャルセッションの最後は Etienne Koechlin 先生 (École normale supérieure) で意思決定の前頭葉機能の fMRI 実験, 計算論モデルを組み合わせた研究についての講演を行った。

2日目のトピックセッションでは土谷尚嗣先生 (Monash Univ) が Tononi 先生の話と関連するヒト、動物の意識の定量化に関する講演を行った。続いて小村豊先生 (産総研) がサル視床枕のニューロン活動と confidence の関連、水原啓暁先生 (京大) が脳波の位相ダイナミクスがヒトの音声コミュニケーションにおいて果たす機能的役割についての講演をそれぞれ行った。3日目のトピックセッションは西田真也先生 (NTT) が質感知覚の心理物理学的アプローチの研究、森島陽介先生 (ベルン大学) が tACS (経頭蓋交流電気刺激) による脳波位相の制御データに基づいて脳波振動同期ダイナミクスの機能的役割の検証について、樋口真人先生 (放医研) がアルツハイマー病のアミロイド、タウタンパクの PET によるヒト、動物でのイメージング研究の講演を行った。トピックセッションの講演はさまざまなアプローチで対象とする機能は全く違うが、どれも各研究者の独特な色、迫力を感じ、とても興味深いものであった。

ポスターセッションもとても活気にあふれてあちこちで議論が行われていた。またログハウスコテージではセッション講演者を含んだ若手、中堅の夜通しの議論が続き、私も参加し非常に楽しむことができた。



ルスツの夜

## 玉川大学 脳科学トレーニングコース体験記 霊長類動物の行動・神経計測技術に参加して

加藤 郁佳（東京大学）

私は今回、霊長類動物の行動・神経計測・解析技術コースに参加し、霊長類研究の現場を勉強させていただきました。

一日目は講義を受け、筋電位測定を体験しました。まず鮫島先生に霊長類を研究する意義と霊長類研究者の暗黙知について講義していただき、論文には細かく載っていないような頭部固定法・電気生理計測法の基礎について学ぶことが出来ました。その後木村先生に霊長類を研究するときの倫理的配慮や筋電位と脳活動の両方を記録して行動と脳を統合的に研究した成果を紹介していただきました。実際自分たちの筋電位を測定する実習では霊長類班のメンバーの個性が発揮され笑顔の筋電位を測ってみよう！とテーマを設定して盛り上がりました。その後、坂上先生に眼球運動の神経回路と測定方法、それを用いた報酬とサッケードの実験について詳しくお話いただきました。

二日目は実際に霊長類を訓練する様子の見学と、組織染色の実習を行いました。まず、鮫島先生から霊長類の訓練について講義していただき、報酬のジュースを飲むことから少しずつ訓練していくことで、人間でも少し難しいと感じるようなかなり高度なタスクをこなせるようになって聞いて驚きました。訓練の過程で時間をかけて少しずつ霊長類が学習していく様子を実際に見ることで、知性とは何かという問いに霊長類研究が大きな役割を果たしてきたことを感じました。また、組織染色を体験したことや最新の神経回路標識法を学んだことで化学物質や遺伝子レベルの脳研究にも触れることが出来ました。二日目の夜には Jam Session という他の班の参加者との交流会がありました。わたしの班のメンバーには臨床に関わっている方が多く、基礎と臨床のつながりについて考える貴重な時間を過ごせました。



三日目は実際の神経活動のデータを使って Matlab で解析する演習を行いました。丁寧に解説していただいたおかげで、神経活動のデータ処理手法についてイメージをつかむことが出来ました。また、鮫島先生自身の研究もご紹介いただき、今までの実習内容を経て論文の内容を聞くと理解の深さが全然違うことを実感できました。

トレーニングコースは三日間とは思えないほど濃密な学びの場でした。ここで学んだことを今後の研究に生かしたいと思います。最後にお忙しい中丁寧な講義をしてくださった先生方、実験の様子を見せてくださった研究員の方々、食事や交流会を企画運営してくださったみなさま誠にありがとうございました。

平成 27 年度の主なイベント

- 第 7 回脳科学若手の会合宿 講師：銅谷賢治、風間北斗  
(2015. 3.28 ~ 29 ホテルウイングインターナショナル相模原) <http://brainsci.jp/event/camp2015>
- 第 9 回領域会議 (2015. 4.25 ~ 27 沖縄科学技術大学院大学 シーサイドハウス)
- Fifth International Symposium on Biology of Decision Making  
(2015. 5.11 ~ 13 Paris, France) <http://sbdm2015.isir.upmc.fr>
- International Symposium on Prediction and Decision Making  
(2015.10.31 ~ 11. 1 University of Tokyo)
- 第 10 回領域会議 (2015.12.17 ~ 19 東京・学術情報センター, 包括脳シンポジウム期間中)
- 脳と心のメカニズム 第 16 回冬のワークショップ  
(2016. 1. 6 ~ 8 招待講演：Prof. Bill Newsome, Prof. Matthew Rushworth)