

目 次

卷頭言 丹治 順 (東北大学 包括的脳科学研究・教育推進センター)	4
特集 1 リレー対談.....	6
第4回 精神疾患トランスレーショナルリサーチにおける 意思決定機構研究	
高橋 英彦 × 斎田 貴俊	
特集 2 論文紹介.....	10
Aoki et al. "Imaging of neural ensemble for the retrieval of a learned behavioral program"	
Okamoto et al. "Honesty mediates the relationship between serotonin and reaction to unfairness"	
柴田 智広	
特集 3 書籍紹介	11
「ことばの発達の謎を解く」(ちくまプリマー新書)	
今井 むつみ	
特集 4 大会参加記.....	12
チュートリアル「ヒトの予測と意思決定の脳内ネットワーク 解明のための測定法と解析法」	
佐久間 壮	
新学術領域研究「予測と意思決定」第5回領域会議	
松山 圭	
特集 5 アウトリーチ活動報告	14
「脳が行う意思決定の不思議」世界脳週間 SSH 講座	
柴田 智広	
ニュース・イベント	15



丹治 順

東北大学 包括的脳科学研究・教育推進センター

予測と意思決定は、高等動物の脳機能の根幹をなす過程である。この領域の研究プロジェクトはそれを可能にする脳のメカニズムを、脳内計算機構を中心に据えて解明することをめざし、それによって人間理解とその応用につなげようという意図のもとに発足した。このような取り組みにおいては、①まず脳の働きを説明するための理論的枠組みとその内容を特徴づける理論体系を設定し、②実際の脳の働きにおいて、理論が予測し特徴づける過程が実際の脳で行われているかを実証的に検索し、③それらの理論および脳の生物学的機能の実態がヒトの行動や精神活動をどこまで、どのように説明できるかを検証することが必要となる。

上記のような高度な要求にこたえるためには、多面的なアプローチによる学際的な研究の統合が必然となる。したがってこの領域研究グループは脳の計算論、システム脳科学、分子脳科学の立場から脳の機構と原理を探り、そしてヒトの行動および意思決定機構の原理的解明を進め、さらに精神機能の計測・解析によって意思決定の脳内機構に迫る試みを展開している。

領域の研究は全般に順調にスタートを切ったように見受けられる。当初の理論的枠組みとして、モデルベース・モデルフリーの意思決定機構を突破口として設定したことは、領域の方向付けに有用であった。意思決定の脳内機構を具体的に説明できる知見のいくつかが、すでに靈長類動物とヒトの両方において得られ始めている。さらに、動物行動の基本パターンを形成する分子基盤を提示する研究にも進展がみられる。ヒトの行動における意思決定メカニズムの理論的特徴づけに関しても、興味深い知見が出ている。このように順調な出だしを見ると、今後の領域の発展に期待が高まってくる。その期待のもとに、以下にいくつかの感想を記させていただくが、その幾分かが領域の今後の発展への提案となれば幸甚の極みである。

1. 意思決定の過程を原理的に追及・理解するために、げっ歯類は言うに及ばず、lower vertebrate も含めた動物実験による意思決定過程の生物学的基盤を追及する研究が拡大されることを期待したい。‘model-free’decision making というのであれば、reward-seeking behavior は invertebrates においてさえ立派に可能であり、その進化レベルですでに Pavlovian のみならず instrumental conditioning も見事にやってのける。S-R association などは朝飯まえ、second-order conditioning も可能である。instrumental conditioning においては、自己の動作と reward outcome を結びつける R-O association もできるし、extinction も成立するのである。ましてや vertebrates に至っては、Dopamine neuron system の登場とともに、reward-seeking behavior はそのレパートリーが格段に広がった。reward-seeking mechanism の分子基盤を解明するのであれば、魚類をはじめ lower vertebrate を使うのが早道であろう。それを行う研究者をもっとリクルートすることが望まれる。あるいはその方向への研究の大幅な拡大をめざし

て、他領域の研究グループへ働きかけ、提携と共同研究を求める事も有用であろう。

2. 新学術領域研究の大切な目的の一つは、次世代の新しい研究の創生・開発である。この領域研究から、革新的な研究の芽が育つことを大いに期待したい。そのためには、しっかりとした学門的基盤に立ちながらも、従来の概念の殻を打ち破る新しい発想と研究方向の誕生が望まれる。reward-based behavior の研究の重要性は明らかであるが、言うまでもなく Schultz, Hikosaka らによる innovative research の開発と、Doya, Kawato らの理論的体系づけによって、興味深い研究世界への道筋が見えてきた。しかしその後に、眼を瞠るほど大きな革新的発展はあったのであろうか。寡聞にして聞かずというのが正直な感想である。ここにおいて、今こそ新たな切り口、研究のパラダイムシフトが望まれる。bandwagon follower という表現がある。今はやりの研究テーマやトピックスに飛びつき、流行を追いかける研究者を意味するのは衆知のことであろう。その好例は、reward を追いかけている研究者の中にあまた見られるといったら、言い過ぎであろうか。脳科学の世界に reward 関連の研究がこれほど多いのは、その重要性を勘案してもなお異様な感すら覚えるほどであるが、その大多数においては、bandwagon を follow し、点数を稼いでいる域を出ないような気がする。新学術領域研究に欲しいのは、高得点もさることながら、なによりも innovative な研究の開発である。

3. この領域の目標の到達点は、領域の研究テーマに明示されているように、人間理解である。予測と意思決定の機構解明の研究が、人間理解につながることを意図していることが、領域全体の存在意義を高めていることは間違いなかろう。その観点から、ヒトの精神機能の多面性と奥の深さを見据えた、新たな研究の展開も欲しいところではある。Reward-seeking behavior とはいっても、プラスまたはマイナスの reward が一つ、どのくらいの確率で、どの程度のコストで得られるかという問題は、ヒトの motivation のごく一部を扱うに過ぎない。人間を動かすものは、reward を得るということ自体よりも、むしろそれを凌駕する精神機能のウエイトが高いのではなかろうか。戦争や極端な逆境に追いまくられているのでなければ、水や食物に行動が支配される程度も軽いものであろうし、世の中には金銭欲から遠い人も少なくない。むしろ好奇心や達成感、うまく行った時の感動に、私たちは強く惹かれて行動するのではなかろうか。衣食足りれば、reward を求めないことを是とする人も少なくなかろう。そのような行動の中に、個性や創造性がいかに生まれてくるのかという疑問も発してみたい。この観点からすると、モデルフリー・モデルベースという問題提起は、領域の発足当初における出発点ないしは共通了解事項の提起として意義は多とされるにしても、いつまでもその段階にとどまっているほどの価値はあるだろうか。今後はむしろそれを超えた理論的枠組みが欲しいし、人の精神機能の複雑性をふまえつつ、そこに存在する普遍的な原理をえぐり出す理論の提起、そしてそれをもたらす脳のメカニズムの提案の登場を期待したい。

「予測と意思決定」リレー対談：第4回

京都大学大学院医学研究科 准教授

高橋 英彦



▼**高橋** リレー対談の4回目になりますかね。京都大学精神科の高橋から京都大学大学院医学研究科メディカルイノベーションセンターの疋田さんに引き継ぐ形で対談をしていきたいと思います。いまこの、非常にきれいなできたばかりのメディカルイノベーションセンターにお邪魔させていただいていますけれども、疋田さんがこちらに来られた経緯、ここでどういうことをやっていくのかをお聞かせいただければと思います。

■**疋田** そうですね。今回来ていただいたこの新しい建物自体は、2013年4月からはじまったところですが、私自身は2011年10月から京都大学大学院医学研究科メディカルイノベーションセンターの特定准教授で、TKプロジェクトという武田薬品と京都大学の協働によるオープンイノベーション創薬拠点「中枢神経制御薬の基礎・臨床研究プロジェクト」(web page: <http://www.tk.med.kyoto-u.ac.jp/>)の中の統合失調症領域グ

ループのPIとして仕事をしています。引き続いで「予測と意思決定」の新学術領域の計画研究「報酬・忌避の意志決定の機構解析」もつづけているところです。

▼**高橋** ありがとうございます。ここで少しメディカルイノベーションセンターの紹介もしなければと思います。ここはすごく立派な建物で何フロアもあるんですが、ここでは先生以外にはどんな研究者がおられて、主にどういったところを重点的に研究をされておられるのでしょうか。

■**疋田** メディカルイノベーションセンターは、いくつかの製薬会社と京都大学で各疾患を標的とした協働プロジェクトが行われています。メディカルイノベーションセンターの5階にはTKプロジェクトが入っていまして、そこでは肥満と統合失調症をターゲットとした中枢神経に関する創薬研究が行われています。私自身は統合失調症を標的とした創薬の基礎研究を行っているところです。

▼**高橋** 建物がわれわれの精神科のすぐ隣でして、今後もいろいろと共同で研究を進める機会があるかと思います。疋田さんは、精神科医でもあり、基礎医学研究者として研究をされてますが、現在にいたるキャリアを少しお聞かせ下さい。

■**疋田** はい、わたしは1997年に京都大学医学部を卒業して、それから京都大学医学部附属病院精神科で研修医をしておりました。その後、京都大学大学院医学研究科博士課程に入学し、生体情報科学講座（中西重忠研究室）で基礎研究を行い、学位を取得しました。その後に2003年から2005年にジョンズホプキンス大学医学部神経科学部門にポストドクトラルフェローとして留学して、精神疾患の遺伝因子を有するモデルマウスの作成と解析を行っていました。日本に帰国後は大阪バイ

精神疾患トランスレーショナルリサーチにおける 意思決定機構研究

京都大学大学院医学研究科 メディカルイノベーションセンター 特定准教授

正田 貴俊



オサイエンス研究所で中西所長のもとで主に意思決定に関わる基礎研究、とくに大脳基底核に関わる神経回路を標的とした研究を進めておりました。今回京都大学に移るにあたって、統合失調症をターゲットにしつつ、その中で神経回路を中心を見ていくたいという形でプロジェクトを進めています。

▼高橋 ありがとうございます。

精神科研修と基礎研究

▼高橋 正田さんと私は同世代になりますね。最初に精神科の研修も受けられたとのことですが、そのときゆくゆくは精神科医としてやっていこうと思っておられたのか、あるいは最後は基礎研究に進もうと思っておられたのか、当時はどのようなお考えでしたか。

■正田 医学部学生のころから精神疾患を標的とした研究をしたいと考えていましたけれども、精神科研修を通じて、基礎的な脳神経科学をバックグラウンドにした研究を進めなければいけないと考えまして、基礎医学の領域に飛びこむ形になりました。

▼高橋 わたしも研修を受けていた当時、あるいは現在でもそうですが、精神医療、とくに統合失調症は大変な病気で、診断、治療、それまだまだ十分満足のいくものじゃないかなと思いますので、研究をしていかなければならぬと思いました。わたし自身臨床を離れて研究所の生活に回ったのですが、いろいろなご縁で臨床の方に戻っておりますが、やはり基礎的な研究なくしてこうした大変な病気のブレイクスルーはないとわたしも思っているところです。正田さんの研究のアプローチは主にモデル動物を使って病態を理解していくことですけれども、一方で統合失調症

のモデル動物は存在しないという専門家の意見があります。また、もう少し一般の素人的な考え方からいうと、いわゆる幻聴とか妄想とか、言葉を介するような症状が存在している中で、果たして動物のモデルで統合失調症という人間の病気にどこまでアプローチできるのかという議論は常にあります。先生はその限界も当然わかっておられてのことだと思いますが、精神疾患研究で動物を用いた研究の限界と可能性をどのようにお考えでしょうか。

■正田 高橋さんのおっしゃるとおり、統合失調症を発症するようなマウスは存在しません。さらにサルをはじめとした霊長類であっても幻覚妄想状態は確認されておりません。ただ、統合失調症などの重篤な精神疾患では、それらの精神症状以前に、脳の発達的な障害の結果として認知障害や行動障害を伴うという病態生理が明らかにされつつあります。この点にとくに注目していまして、この新学術領域のテーマでもあります予測や意思決定などといった高次認知機能に統合失調症において特徴的な障害が見られるのではないかということにとても興味をもっています。統合失調症で幻覚妄想といった精神症状があらわれる以前から、一定の認知障害が根底にあるという議論もあります。もしかしたら、認知障害をおこすような神経回路異常や分子病態が前提にあってはじめて、幻覚妄想が生じているのかもしれません。わたしはモデル動物などを用いて認知機能やその障害に関わる神経回路や分子の状態を明らかにすることで、統合失調症をはじめとする精神疾患の基本病態に迫っていきたいと考えています。また逆に、いろいろな実験動物によって認知障害の状態、病理を明らかにし、さらに治療へのアプローチを実験的

「予測と意思決定」リレー対談：第4回

京都大学大学院医学研究科 准教授

 高橋 英彦

にすることによって、それが統合失調症の患者さんの認知障害の改善へとつながっていけたらいいなというのが現在考えているところです。

● 精神科のトランスレーショナルリサーチに必要なものは？

▼高橋 そういう基礎研究から臨床へ、というトランスレーショナルリサーチの重要性が強調されて久しいわけですけれども、なかなかそうはいっても難しい面もあるとわたし自身は感じています。とくに精神科領域では難しいと感じてもいるところですけれども、疋田さんとして、真の意味でのトランスレーショナルリサーチを進めていくためには、いま欠けているもの、こういうことがあれば進むのではないかとか、お考えがあればお聞かせください。

■疋田 やはり精神機能を生み出す脳の理解が進まないと、その障害である精神疾患の理解も進まないのでないかと考えています。その上で、予測と意思決定をターゲットとしたこの新学術領域のように、いろいろな学問分野や、いろいろな実験動物を用いた手法によって高次の脳機能を解析するようなアプローチをすすめていくことで、脳機能への理解が進み、翻って脳障害としての精神疾患も分かってくるのではないかと思っています。わたし自身このメディカルイノベーションセンターのTKプロジェクトでは創薬という観点で研究を推進していますけれども、薬だけに限らず、認知行動療法やリハビリテーションが精神疾患のバックグラウンドにある脳機能障害に対してどのような影響を与えているかを調べていくことなど、さまざまな視点から脳の研究を進めていくことで、精神疾患に対するさまざまな治療法や脳障害の克

服のヒントが見つかってくると考えています、それには実験動物を用いた研究や脳神経回路制御の分子メカニズムの研究が助けになると確信しています。

▼高橋 そういう意味でも、もちろん言葉は動物を介してはアセスメントできませんけれども、いろいろな行動を通して動物の認知機能などを測っていくことは可能かなと思います。ある程度動物と人間とで共通の似たタスクを行うとか、そういう必要性があるのではと思いますし、実際に疋田さんはそういうことを進めておられると思います。最近の、いまとり組んでおられる研究、あるいは最近公表された研究も含めて結構ですが、そのあたりの進捗状況等を簡潔にお伝えいただければと思います。

● 報酬行動と忌避行動を通した動物実験と精神科臨床の接点

■疋田 現在はマウスを対象としてとくに認知機能を見る試みをしています。マウスは遺伝子を改变する技術や神経回路を制御する技術が他の実験動物に比べて確立しているという利点があります。そこで、マウスでも観察できる認知機能として、報酬を求める報酬行動、あるいはいやなことを避ける忌避行動に着目して、それをさまざまなモデル動物や、大脳基底核の神経回路を改変したマウスを用いて意思決定行動の神経回路を同定する試みを続けています。今までに報酬行動と忌避行動をそれぞれ司る経路が大脳基底核神経回路の中で分離されていて、それぞれの経路の働きをドーパミンなどの神経伝達物質がうまくコントロールしていることを見出しています。具体的には、報酬行動と忌避行動のスイッチングメカニズムとし

精神疾患トランスレーショナルリサーチにおける 意思決定機構研究

京都大学大学院医学研究科 メディカルイノベーションセンター 特定准教授

正田 貴俊



て、報酬の場合は大脳基底核の中でも腹側線条体にあたる側坐核でドーパミン濃度が上昇し、ドーパミンD1受容体を介して、大脳基底核神経回路のうち直接路が活性化されることによって報酬行動あるいは、その病的状態である薬物依存症が形成され、一方、嫌悪刺激は側坐核のドーパミン濃度を下げ、ドーパミンD2受容体やさまざまな神経伝達物質受容体群を介して、大脳基底核神経回路のうち間接路を活性化させ忌避行動を形成することを見いだしました。このような動物を用いた報酬・忌避行動の神経回路機構の研究に関しまして、高橋さんのヒトを用いた研究との接点はございますでしょうか。

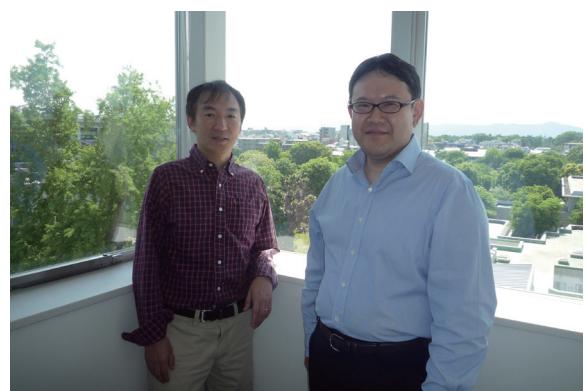
▼高橋 あると思いますね。というかあると思うように研究を進めていきたいですね。報酬を求める報酬行動、あるいはいやなことを避ける忌避行動に異常があると想定される病気はちょっと考えただけでもうつ病、強迫性障害、依存症などが挙げられます。こういった疾患は、正田さんが現在、進めておられるマウスの研究と接点が持ちやすいところですので、わたし達もこのような疾患を対象にした臨床研究も行っています。最終的には精神科医なら誰でもかかわり、精神医学のメジャーな疾患である統合失調症との接点が見出されていけばいいと思うのですが、ご存知のようにドーパミンD2受容体が統合失調症の幻覚や妄想に有効です。最近、報酬系の異常として幻覚や妄想をとらえることが出来ないかと“妄想”することがあります。今後、その妄想を検証する方法が具体化してきましたまたお話したいと思います。

■正田 とても楽しみしております。それでは、われわれ精神科医として、新学術領域のアウトプットをどのように臨床の場へ持って行ける

か、臨床精神医学の立場からアイデアはありますでしょうか。

▼高橋 精神疾患は、行動の異常があり、社会生活に支障を来している状態あります。その行動の一歩手前のプロセスが意思決定であるわけなので、精神疾患は多かれ少なかれ、意思決定の障害を有していると言えます。精神疾患の診断基準は生物学的な知見に必ずしも裏打ちされたものではなく、またいろんなフェノタイプ（症候）の集まり（症候群）であります。意思決定という観点から様々な行動異常のフェノタイプを定量的に記述し、その脳内メカニズム、特に計算論に基づくメカニズムの理解を経て、有効な治療法の予測、創出につなげて行けたらと考えています。その為にも、新学術領域の代表の銅谷先生をはじめとする計算論的神経科学の専門家や情報学、工学の専門家との共同研究は不可欠と思っていますので、本領域のなかでの共同研究をさらに進めていきたいと考えています。

■正田 本日は隣の建物からですが、メディカルイノベーションセンターまで来て頂き有り難うございました。今までに領域会議や京都大学で議論をさせていただいていますが、本日の対談はとても刺激的でした。今後ともよろしくお願いします。



論文紹介

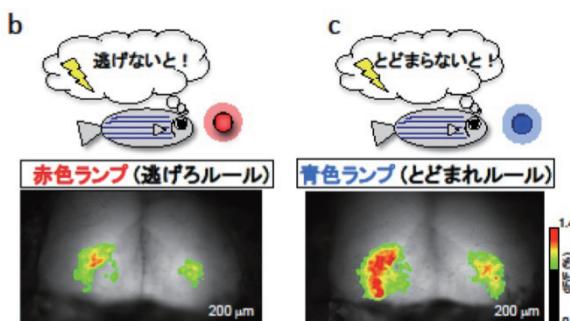
紹介文：柴田 智広（奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科）

● Imaging of neural ensemble for the retrieval of a learned behavioral program

Aoki T, Kinoshita M, Aoki R, Agetsuma M, Aizawa H, Yamazaki M, Takahoko M, Amo R, Arata A, Higashijima SI, Tsuboi T, Okamoto H, *Neuron*, 78, 881-894, 2013

動物は、行動のルールを学習した後、ルールに関する記憶を長期に保持しておく必要がある。しかし、脊椎動物において、行動のルールに関する記憶が、脳の神経細胞集団によってどのように蓄えられ、必要なときに読み取られるかは、よくわかつていなかった。

そこで筆者らはゼブラフィッシュに対し嫌悪強化学習を課し、学習行動をとりだす際の脳全体の活動のカルシウム信号を観測した。ゼブラフィッシュに、赤、青の2色のランプを条件刺激として示し、2つの正反対のルールを学習させることを試みた（図2A）。すなわち、ゼブラフィッシュに、赤色ランプが点灯してから15秒間のうちに反対側の部屋に逃げないと電気ショックを与える「逃げろルール」と、青色ランプが点灯している15秒間は同じ部屋に居続けないと電気ショックが与えられる「とどまれルール」、の2つのルールを同時に学習するような訓練を行った。このように2色で異なるルールを学習すると、それぞれのルールにおいて最適な行動のプログラムは、2つの異なる



神経細胞群の活動により別々に読み出されることが分かった（図）。特に「とどまれルール」で学習した行動プログラムを読み出している時の脳の神経活動パターンは、「逃げろルール」で学習した行動プログラムを読み出している時より広がっていた。

これらの実験結果により、学習した行動に対する長

期記憶の読み出しは、ゼブラフィッシュにおいては脳全体のスケールで行われており、異なる行動のプログラムは異なる神経細胞群の活動パターンによって読みだされることが明らかになった。さらに本論文では、競合する記憶痕跡は強化学習過程に置いて急速に修整されることも示されている。

● Honesty mediates the relationship between serotonin and reaction to unfairness

Takahashi H, Takano H, Camerer C, Ideno T, Okubo S, Matsui H, Tamari Y, Takemura K, Arakawa R, Kodaka F, Yamada M, Eguchi Y, Murai T, Okubo Y, Kato M, Ito H, and Suhara T, *PNAS*, 109(11), 4281-4284, 2012

ヒトは公平でない振る舞いにどう対処するのか？この問題は長きにわたり、哲学、心理学、経済学や生物学など多様な分野で取り組まれてきた。しかし不公平に対する人々の反応は様々だ。実験経済学では最後通牒ゲーム(ultimatum game; UG)がよく用いられる。UGでは、プレイヤは、他のプレイヤの公平もしくは不公平な分配の申し出に対して、採択か拒絶を意思決定しなくてはならない。これまでの研究により、不公平な分配に対する人々の反応も様々であることが知られている。しかしながら、これについて心理学的あるいは神経生物学的機構はほとんど知られていなかった。そこで筆者らは分子画像技術、経済ゲーム、人格目録を組み合わせて、不公平な分配に対する多様な応答の神経生物学的機構の解明を行った。

攻撃的（衝動的もしくは反抗的）な個性を持つ人はUGにおいて不公正に対してよく報復行為に出るというこれまでの常識に反して、明らかに一見平和的な（正直で信頼の高い）個性を持つ人が、不公平に対して義憤に駆られ、個人的なコストを払ってまで報復行為に出るということが実証された。そして、実直で報復行為に出やすい人ほど中脳のセロトニントランスポーターの密度が低いことを明らかにした。セロトニンが単に衝動性などと関与しているだけでなく、長期的な戦略的思考に関与することを示唆する成果である。



「ことばの発達の謎を解く」(ちくまプリマー新書) 紹介

今井 むつみ (慶應義塾大学)

本書の執筆はちくまプリマーの編集者の方からお手紙をいただいたことから始まりました。東北大震災の直後でした。ちくまプリマーは中学・高校生をターゲットした新書シリーズです。高校生に向けて書くことに魅力を感じ、執筆を承諾しました。

ことば（言語）を学ぶ、というのは一大偉業です。成人の場合には外国語を学ぶ時に、言語全般について実際に多くのことを所与の知識として知っており、その知識に基づいて外国語を学習しています。例えば文は単語から成り立っていること、それぞれの単語には意味があること、単語は規則、つまり文法によってつなげられていること。しかし、乳児が母語を学びはじめるとき、彼らはそういうことすら最初は知りません。

子どもは言語をすべて自分の力で学習します。音韻の特徴も、文法も、ことばの意味も、乳幼児に直接教えることはできません。大人のできることは子どもの発達段階に合わせてインプットを調節し、よいインプットを与えることだけです。例えば語意の学習では、子どもが限られた事例から単語の意味をひとつひとつ推論していかなければなりません。ことばが発せられた環境を分析し、自分の持っている（少ない）知識を総動員して、事例から帰納的に推論します。語彙がある程度蓄積すると、ことばと意味の間の規則性を発見し、その規則性をバイアスとして使って新しいことばを学習する。新しいことばを学習すると、そのことばと関連する他のことばとの関係を整理し、時にはすでに知っていた単語の意味を修正して、その単語が属する概念分野の語彙全体を再編成します。言いたいことを表現できるぴったりしたことばがないと、新しいことばを創造することもします。一言でいえば子どもは発見、創造、修正の過程を繰り返すことにより、ことばの巨大なネットワークシステムを自分で学習によって作り上げていきます。知識が何もないところから出発して、自分の力で語彙という巨大な記号システムを自力で学習していく子どもの姿は、ヒトという種の学習能力の高さを私たちに教えてくれます。

ことばの意味や学習の問題は外国語を学習する際にも大事な問題です。言語をすでに身につけた私たちは毎日言語を使いながらもことばを「使うことができる」ためにどのような知識が必要なのかをあらためて考え

ることはできません。しかし子どもが言語を学習する発達の過程は、言語が何からできているか、どのような仕組みで私たちの語彙は成り立っているのか、ことばの意味を知っているということはそもそもどういうことなのか、ことばを得ることでヒトの思考はどういうふうに変わっていくのかなど、人間の知性に深く関わる諸問題について私たちに考える糸口を与えてくれます。

高校生が知っている基本的なことばだけを使い、平易な文体で実験の方法と論理を高校生が理解できるように書くよう心がけました。人にとってことばとは何か、ことばの意味とは何か、学習とは何かなどという、古くから哲学者が問うてきた問題に対して、実験を積み重ねて科学的に答えを探していく。このような認知科学のアプローチを高校生が理解し、興味を持ってくれるように書くということを目標にしました。執筆はたいへんでしたが、これまでの自分の研究、現在行っている研究をあらためて俯瞰的に考え直す貴重な機会が得られ、自分の仕事を一般の人に伝える楽しさを味わうことができました。



チュートリアル 「ヒトの予測と意思決定の脳内ネットワーク解明のための測定法と解析法」

(慶應義塾大学「思考と行動判断」の研究拠点との共同企画)

佐久間 壮 (早稲田大学)

6月7日から9日の日程で、科学研究費補助金 新学術領域研究「予測と意思決定」の第5回領域会議が、慶應義塾大学日吉キャンパス来往舎において開催されました。1日目は「ヒトの予測と意思決定の脳内ネットワーク解明のための測定法と解析法」と題したチュートリアルがあり、聴講させていただきました。

今回のチュートリアルでは、3人の先生からそれぞれ違ったアプローチでの脳研究のお話を聞くことができ、とてもよい勉強になりました。

一つ目の講演は慶應義塾大学の梅田聰先生で、「脳と身体の活動からみる精神機能のダイナミクス」というタイトルで、脳内における「不安感」などの感情と身体の状態に起きる様々な変化に関するお話をされました。私自身も研究で様々な生体計測を行い、人の不安感や疲労度、集中度などを図る実験をしてきましたが、これまでにはただ教科書や文献に従って計測していただけでした。この講演を通して脳の中で起きていることと身体に起きる現象のメカニズムについて、新たに勉強させていただきました。特に、計測手法として興味深かったのは、心拍を基準信号として脳波を加算平均する心拍誘導電位という考え方でした。

今回梅田先生がお話になったのは、主に自身の身体状態をモニターする内受容感覚 (Interoception) と不安感の関係についてでした。内受容感覚が強い人ほど不安を感じやすく、不安障害と島皮質 (Insula) の活動に相関がみられ、最終的に視床 (Thalamus) から島皮質、そして不安感という順で相関関係がみられるということです。

また、これまで扁桃体に障害を負うと不安感を感じにくいと言われていましたが、酸素濃度の低下など身体的に負担をかけると扁桃体に障害があっても不安を感じることがわかっているというお話もありました。これは、生命維持に関わる身体的負担がかかると、それによる身体状態変化が起き内受容感覚によって知覚されることで不安感が発生していると考えられ、身体状態を制御することで不安感をコントロールできる可能性が示されています。

二つ目の講演は、ATR 脳情報通信総合研究所の吉田和



子先生が、「予測と測定による意思決定」と題して意思決定のモデル化についてお話しされました。

これまで使われてきた意思決定のモデルとして、Rescorla-Wagner モデルを始めとして、様々な課題に対応したモデルについてお話しいただきました。現在私も TD 学習を用いたモデルを研究に応用していますが、その予測誤差と実際の脳の腹側線条体の活動に相関があるというお話がとても興味深かったです。

また、モデルフリー学習系とモデル同定学習系の結果を合成すると、実際の人の行動に近づくというお話をされていて、人間の脳を表すには MOSAIC のような複数のモデルを合成する手法が適しているように感じました。

社会的意意思決定モデルのお話では、強化学習系における報酬の考え方を拡張し、不確実な思い込みや他者の意見によって報酬量が左右されることを表式を提案されていました。また、自分の行動が他者に影響することを考慮して、相対的な行動学習を行うモデルについてご説明いただきました。こういった相対的な行動学習になると、その学習過程を想像するのが難しくすぐには理解できませんでしたが、実際の人や生物の行動に近づくモデルとして、大変興味深いです。

3つ目の講演は、理化学研究所の北城圭一先生より「ヒトの脳の大域的ネットワークと情報流」と題して脳のネットワーク構造の解明に関するお話でした。先生は、脳のネットワーク上の同期現象を定量化し、ネットワークの伝達の方向を明らかにするための研究をされているそうです。

とても興味深かったのは、脳内ではネットワークとして接続して処理を行う別々の部位で脳波の同期がみられ、同期状態が処理内容に応じて変化するというお話でした。例えば、顔画像認識課題を行う際に、顔に認識できているときは前頭葉と後頭葉で γ 波の同期がみられるが、認識できていないときは同期が起きないなど、視覚課題では視覚野と、聴覚課題では聴覚野と前頭葉が同期を見せるという現象が解っているそうです。

また、先生自身を被験者として TMS を用いて積極的に脳に刺激を与え、その信号の伝搬を観測する実験も行われていて、非常に面白い研究をされていると思いました。

私自身は自動車を運転する際のヒトのモデル構築を研究課題としており、運転者や同乗者の不安感をどのように取り除くかは常に課題になっています。先生方の講演を通して、不安感の発生する仕組みや、その計測手法、ヒトのモデルの元になる脳の構造や働きについて、また実際の脳活動とその結果である生体信号の計測など、様々な研究や最新技術についてお話しいただき、とても充実した内容でした。



「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」の第5回領域会議は、6月7日から9日にかけて、慶應義塾大学日吉キャンパスの来往舎で開催されました。初夏の神奈川のさわやかな暑さの中、全国から集まった高名な先生方が外の熱気にも負けない白熱したトークを繰り広げていらっしゃいました。7日には最新の研究結果を交えた三人の先生によるチュートリアルが行われ、8、9日が現在の研究状況を紹介する領域会議でした。また、7、8日の夜には懇親会が開催されました。私はチュートリアル、領域会議、8日の懇親会に参加させていただきました。第一線で活躍されている先生方がご報告される会議に参加させていただき、大変勉強になりました。会議に参加した感想を書かせて頂きます。

初日は、慶應義塾大学の梅田聰先生、ATR脳情報通信総合研究所の吉田和子先生、理化学研究所の北城圭一先生によるチュートリアルが行われました。このチュートリアルは領域メンバー以外にも公開で、多数の方が聴講に訪れていきました。部屋の後ろにまで椅子が並べられ、大変熱気に溢れていきました。梅田先生のチュートリアルでは、視床、島皮質が体性感覚や社会不安の情報処理に関わっているという研究について触れられていました。非言語的な感覚の検知における島皮質と視床を中心としたネットワークの意義を認識することは重要だと感じました。吉田先生のチュートリアルでは、最新の研究のお話に加え、fMRIの解析方法を詳しく解説していただいた部分も自分のような门外漢にとっては勉強になりました。北城先生のオフレーションの話は初めて聞くことが多く、興味深く思いました。質疑応答にありましたが、オフレーションを作り出しているのはどこかというの重要な問い合わせました。状況や周波数によって異なるのでしょうか、もし皮質下が起源である場合は、MEGやEEG以外の手法も必要となるのではないかと感じました。

8日の朝の銅谷先生のご挨拶から領域会議が始まりました。8日は、A02公募「意思決定の神経回路機構」の先生方のご報告を中心とし、9日はA01「行動と意思決定の計算理論」、A03「意思決定を制御する分子・遺伝子」の先生方が主にご発表されました。どの報告も最新の研究データに基づく興味深い話で、大変勉強になりました。二日間の領域会議の中で特に自分にとって印象に残った点について軽く触れて頂きます。

藤山文乃先生のご報告では、基底核における直接路と間接路間の相互連絡についての研究が紹介されました。以前からこの二つの近接した経路が干渉せずに下降していくという説明には、漠然とした疑問を抱いていましたが、今回その疑問に対する非常に有力な答えを聞くことができたと思います。今後、今回提示された経路間の調節の機能が詳細に解明されれば、運動制御の理論が大きく進歩すると思います。二日目の最後の総合討論の時間で示されてい

たパーキンソン病の病理を説明するモデルもとても美しいと感じました。

小林康先生のご報告では、マイクロサッケードが正確率の予測因子になるという説明に



驚きました。マイクロサッケードが、集中度合や注意といった内的な部分を測定する指標となる可能性を示唆されていると思います。今後、内的な状態に対する相関性の高い予測アルゴリズムの開発や、視線による制御の技術との組み合わせなど、様々な発展が考えられ、いろいろなことを考えながら面白く聞かせて頂きました。

小村豊先生のご報告では、視床枕の役割を明確に説明できるデータを示していただき、非常に勉強になりました。この視床枕の判断の確信度に関わる持続的な活動が始まるタイミングは早く、どうやってこの活動が作られているのか興味深く思いました。

A01領域の先生方のご報告を聞かせていただくことによって、計算理論の立場からの様々なご研究について勉強させていただくことができました。ただ、我々のような動物実験をしている者はデータを説明する理論を欲しいと思っていますが、計算理論を研究されている先生は今我々が持っているデータそのものよりも抽象度の高い次元で説明することを目的とされている気がしました。おそらく研究者によって、ゴールはバラバラで良いのでしょうか。ただ、それぞれの研究者が何をゴールとしているかということをお互いに伝えあわないといけないと感じました。平田オリザさんが著書「わかりあえないことから」の中で述べているように、我々も「わかりあえないことから、歩き出さなくてはならないのではないか」と思いました。

また、8日の夜の懇親会では、昼間とはまた別の自由な雰囲気で様々なやり取りが交わされました。こういった場で先生方と話をさせていただくことは自分のような学生にとってはたいへんめになる経験でした。この懇親会の始めのご挨拶で、木村實先生がお話をされていた、研究者もチームワークだけでなく個々の力を伸ばすことに務めなくてはならないというご発言は強く印象に残っています。

今回の領域会議を通して、予測と意思決定に関わる様々なご研究を拝聴することができ、非常に勉強になりました。この会議で得られた経験と知識は今後の研究を進めて行く上で大きな財産になると思われます。また、質疑応答の際には、学生からの質問にも懇切丁寧に答えていただき、先生方には心より感謝しております。末筆ながら、この場を借りて厚く御礼を申し上げます。



「脳が行う意思決定の不思議」世界脳週間 SSH 講座

広報委員長 柴田 智広 (奈良先端科学技術大学院大学)

2012年度の本領域のアウトリーチ活動は、2月2日に「脳が行う意思決定の不思議～行動や脳機能画像を解析してわかること～」として、奈良女子大学附属中等教育学校で開催された。この学校では毎年、SSH サイエンス先端講座として NPO 法人 脳の世紀推進会議の脳週間関連行事をこの時期に開催しており、この講座に大変力を入れているそうだ。今回は本領域および「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解のための神経機構の解明」領域も共催とさせていただき、本領域メンバから高橋英彦博士と伊藤真博士に講演を担当してもらった。司会は脳の世紀推進会議から神谷之康博士 (ATR 脳情報通信総合研究所)、主な参加者は奈良女子大学附属中等教育学校の中高校生とその保護者および教職員であった。



高橋氏は人の社会感情の脳科学および情動的的意思決定の脳科学について講演を行った。まず前者について、扁桃体損傷や前頭葉損傷、また前頭側頭型認知症が引き起こす社会的・感情や行動異常の実例を紹介し、続いて前頭葉が損傷されることによって、相手の能力を推し量る能力（心の理論）が失われることがあることを、サリー・アン課題とともに紹介した。さらに、道徳感情、罪責感、羞恥心といった感情は、相手の心を推し量る能力があるからこそ生じると考えられ、実際にそれが fMRI 研究でも確認されていることを紹介した。

続いて、嫉妬と妬みという社会的に悪い感情の代表例の話題を取り上げ、fMRI 実験により、個人が強く妬みを感じる時ほど前部帯状回の活動が強いこと、他人の不幸を喜ぶ程度の強い人はほど線条体の活動が高いことを発見した自身の研究を紹介した。アウトリーチ活動らしく、では「なぜ嫉妬や妬みという感情があるのだろう？」と聴衆に聞いかけた。そして、他人との相対的なレベルの差を認識し自分自身のレベルを上げるように努力するため、また比較の対象から距離を置く新しい領域を探し自分の可能性を広げるよう努力するため、といった良い作用もあるから存在するのであろうという自身の考えを披露した。

次に、情動的的意思決定の脳科学の話題に移り、意志決定における情動の重要性の理解を、道徳的ジレンマ課題をいくつか提示し、聴衆にじっくり考えてもらうことによって、促進した。

最後に、聴衆に 1 から 100 までうち好きな数を紙に書いてもらい、全員の平均の 2/3 に一番近かった人が勝ちという "p-beauty contest" 課題をしてもらった結果を回収し、その意義の説明と、今回の実験結果について議論を行った。前者については、p-beauty contest で勝つためには、相手の戦略を読む必要があり、fMRI 実験によってそのためには mPFC や vmPFC が重要であることが知られていることを紹介した。後者については、予想に反して勝者が 4 名も出て驚いたこと、大きく外した人たちも、過去の研究例では社長クラスでも外した人も多かったので心配しなく

て良いと話して、会場の笑いを誘っていた。

伊藤真氏は、意思決定と学習の関係について講演した。コンピュータによる意思決定ゲームやロボットによる強化学習の実演を多用し、聴衆の興味を引き付け理解の促進に努めた。

まず、同じ選択課題であっても、どれを選ぶかは経験で変わる（学習する）ことを、沖縄科学技術大学院大学所属らしく、恩納村名物激辛バーガー（辛いので一度経験すると次は選ばない）の例で聴衆の笑いを誘いながら説明した。続いて、学生一名を登壇させ、二択課題（但し、報酬確率はゆっくりと変動する）である魚とりゲームをさせることによって、自身のラットの研究を説明する導入とした。



続いてラットの選択課題を実験動画も用いながら丁寧に説明し、報酬確率が変わった時、ラットはどうするだろうか、聴衆に考えさせながら、自身の発見の説明に続けた。その後、ラットの脳構造や、神経細胞、スパイク、線条体の簡単な説明をした上で、選択課題中の線条体神経細胞のスパイクが選択の良さをコードしていると考えられることを説明した。

では「線条体がうまく働かないと魚取りゲームはできないのだろうか？」と聴衆に問い合わせながら、健常者とパーキンソン病患者の課題遂行能力を比較してその傍証を示した研究を、実際に研究で用いられた天気予報ゲーム (Knowlton, et al, Science, 1996) に聴衆に参加してもらしながら、紹介した。このゲームではランダムに提示される複数のカードのパターンと天気の関係を見抜くことが目的である。この研究では、健常者なら自然と（試行錯誤によって）カードと天気の関係が分かるようになるが、線条体がうまく働かないパーキンソン病患者ではそうならないことが示されている。

続いて、このような意思決定に必要な学習過程をうまく説明できる学習モデルとして強化学習を紹介した。そして、自分が趣味で作った（レゴマインドストームを用いた）実ロボットによる強化学習の実演を行うことによって、強化学習における報酬、価値関数、方策といった主要概念の理解の促進を試みた。

最後に、神谷氏と両講演者が改めて登壇し、質疑応答を行った。講演についての基礎的な質問から、基礎から臨床へどう展開するのか、理学と工学が今後どう融合発展してゆくのかといった展望に関する質疑応答が活発になされた。





ニュース

- ・本領域のアドバイザーである川人光男先生が、脳神経科学研究への貢献により、紫綬褒章を受章されました。

平成 25 年度の主なイベント

- ・2013 年度 包括脳ネットワーク 夏のワークショップ (2013.8.29-9.1 名古屋国際会議場)
- ・International symposium on "Prediction and Decision Making" (2013.10.13-14 京都大学 芝蘭会館)
- ・第 6 回領域会議 (2013.11.22-24 沖縄科学技術大学院大学 シーサイドハウス)

開催案内

International Symposium on "Prediction and Decision Making" 2013

Date: October 13-14, 2013

Venue: Shiran Kaikan, Faculty of Medicine Campus, Kyoto University

October 13, 2013	
The morning session	"Model-based decision making and its neuronal mechanisms" Masamichi Sakagami : Tamagawa University Brain Science Institute Daeyeol Lee : Yale University Geoffrey Schoenbaum : NIDA-Intramural Research Program Daphna Shohamy : Columbia University
	Poster presentation
The afternoon session	"Nigro-striatal circuit for decision making" Hitoshi Okamoto : Riken Brain Science Institute Fumino Fujiyama : Doshisha University Graduate School of Brain Science Takatoshi Hikida : Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University Paul Phillips : University of Washington
	Reception
October 14, 2013	
The morning session	"Social decision making" Hidehiko Takahashi : Graduate School of Medicine and Faculty of Medicine, Kyoto University Hiroyuki Nakahara : Riken Brain Science Institute Karl Sigmund : Faculty of Mathematics University of Vienna Masaki Isoda: Kansai Medical University
	Poster presentation
The afternoon session	"Uncertainty and anxiety" Kenji Doya : Okinawa Institute of Science and Technology Adam Kepcs : Cold Spring Harbor Laboratory Yutaka Komura : National Institute of Advanced Industrial Science and Technology