

平成 23 年度（2011 年度）新学術領域研究（研究領域提案型）領域計画書

H22. 11. 11

領域名：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

Elucidation of neural computation for prediction and decision making: toward better human understanding and application

領域略称：予測と意思決定

領域代表者：銅谷賢治

所属：沖縄科学技術研究基盤整備機構 神経計算ユニット 代表研究者

研究概要：

本領域の目的は、人の意思決定の原理と脳機構を、論理学や統計推論の理論、人の行動解析と脳活動計測、実験動物での神経活動の計測と操作、計算機シミュレーションとロボットによる再構成を通じて解明することである。意思決定には、直感的、習慣的なモデルフリーの機構と、計画的、適応的なモデルベースの機構が考えられるが、これらがいかに選択されとうごうされるのか、後者で必要な「脳内シミュレーション」による行動結果の予測がどのような神経回路の働きにより実現されているのか、またそれらが分子や遺伝子によりいかに制御されているのかを、最新の実験技術と数理手法を駆使して明らかにする。これによる思考、意識、意欲など心のしくみの新たな理解により、意思決定の障害をともしなう精神疾患の解明と処方の導出、人の意思決定の特性にねざした教育プログラムの提案、人に親しみやすいロボットや情報技術の開発などの応用をめざす。

1 領域の目的等

(1) 目的

<領域の意義>

日々の行動から人生の選択にいたるまで、人がどのような原理とメカニズムにより意思決定を行っているのかは、哲学から心理学、経済学、政治学、脳科学、精神医学にわたる大きな問題である。人の意思決定への科学的アプローチは、長らく哲学的考察と行動学的記述に限られて来たが、近年のfMRIなど非侵襲脳活動計測技術と行動学習の計算理論を統合した研究により、意思決定に必要な計算処理に関わる脳部位が具体的に明らかになりつつある。さらに各種の実験動物でそれらに相当する脳部位での神経活動を詳細に記録し操作する技術により、意思決定の過程を神経細胞のなす回路の機能として解明することが現実的な可能性となりつつある。

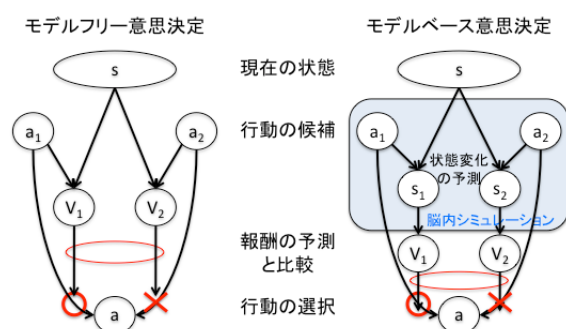
そこで、人の意思決定の原理と脳機構の解明という学問の古くからの大問題に今日的な解を与えるため、論理学や統計推論の理論、人の行動解析と脳活動計測、実験動物での神経活動の計測と操作技術を統合し、意思決定の過程を計算機シミュレーションやロボット実験で再現し予測できるまで深く解明する新たな学術領域を提案する。この新学術領域による意思決定の脳機構の解明は、思考、意識、意欲など人の心の基盤となる物理機構により深い理解を与えることにより、意思決定の障害をとまなう精神疾患の解明と処方への導出、より良い教育手法や社会経済制度の策定、さらに人の意思決定の特性にねざした親しみやすいソフトウェアや情報技術の開発を可能にするものである。

<学術的背景>

人の意思決定と行動には、直感的、習慣的な要素と、予測的、計画的な要素があることが知られているが、近年それらを「モデルフリー」、「モデルベース」の計算方式として捉える可能性が試みられている(Doya, 1999; Daw et al., 2005)。ここで「モデル」とは、現在の状況である行動を取ったときに、その結果状況がどう変化するかを予測する機能を意味する。意思決定の理論では、行動の各選択肢の与える価値をそれぞれ評価し、最大の価値が期待される行動を選択するというのが基本である。モデルフリーの手法では、各行動に対する価値は単純に過去にその行動を取った時に経験した報酬や罰の平均として記憶、更新される。一方モデルベースの手法では、ある行動を取った場合に何が起るかを短期的、長期的に予測し、その予測された状況で得られる報酬や罰をもとに行動の価値を評価し選択する。

例えば駅で、いまずぐ発車する各駅停車に乗るか、5分後に発車する快速電車に乗るか、という問題を考えよう。ある日は各駅、別の日は快速を試してみても早かった方を選ぶというのはモデルフリーの意思決定である。しかしもし各駅、快速での目的地までの所要時間を知っていれば、それぞれの到着時間を予測してより早く着く方を選ぶことができ、これはモデルベースの意思決定である。また、いつもは快速に乗るけれども、到着が遅くて良い日は各駅で座って行くといった柔軟な対応が可能になる。このようにモデルベースの意思決定は、新たな状況で取るべき行動を試行錯誤に頼らず計画したり、行動の目標や制約条件の変化にすみやかに対応することを可能にするものであり、人間の知的行動の根幹をなすものと考えられる。

モデルベースの意思決定では、候補となる行動を取った場合の状況の変化を予測する「脳内シミュレーション」の機能が決定的に重要であり、これが脳のどのような仕組みにより可能になっているかは脳科学の重要な問題である。これまでの研究により、行動の結果を予測する脳内モデルが、前頭前野や、そこと相互連絡を持つ小脳の一部に存在することが示唆されているが (Doya, 1999, 2007)、それがどのような神経回路や物質の働きにより可能になっているかはいまだ明らかでない。



＜くなにをどこまで明らかにするか＞

本領域では、特にモデルベースの予測的な意思決定を可能にする脳機構に注目し、それが脳の進化や発達のような過程で可能になるのか、より単純なモデルフリーの意思決定とどう使い分け統合されているのか、脳内シミュレーションを実現する脳の神経回路と分子機構は何かを、断片的な知見の集合ではなく階層システムとして統合した形で明らかにすることを目標とする。さらにそれによる人間の思考や情動のはたらきの新たな理解を、予測と意思決定にゆがみを伴う精神疾患の理解と対策、より効果的な教育やリハビリテーション手法の開発、より人間的なロボットや人にやさしい機器の設計、経済や政治、社会規範のあり方の提言につなげることをめざす。

具体的に3つの主要課題を設定し、それぞれ以下の作業仮説と手法により解明に取り組む：

1) 動物や人間は、モデルフリー、モデルベースの意思決定と行動学習を、どのように使い分け、組み合わせているのか？

モデルフリーの意思決定は処理は単純であるが融通がきかない。一方モデルベースの意思決定では経験から得た知識をより柔軟に活用することができるが、その処理は複雑になるという得失を持つ。そこでヒトや動物は、脳の進化と発達段階、各個体の経験、また意思決定の実時間的拘束のもとで、それぞれの方式による価値評価の確実性に応じた選択と組み合わせを行うという作業仮説をかげ、論理学や機械学習の理論をもとに選択と組合せのアルゴリズムを導出し、その予測とヒトや動物の行動実験を照らし合わせることにより仮説の検証を行う。

2) 脳内シミュレーション、価値評価、行動選択は、ニューロン回路のどのようなダイナミクスにより実現されているのか？

脳内シミュレーションには小脳の予測モデル、大脳皮質の確率推論機構が関与し、線条体、扁桃体、手綱核による報酬と罰の評価機構をもとに行動選択が行われるという作業仮説をとる。これを、脳の各部位での神経活動記録による状態予測や報酬評価に応じた信号の検出、刺激と破壊実験による機能の検証を行い、さらに多数の神経細胞の光学記録によりそれらの計算過程を計算機上で再現できる程度に具体的な形で明らかにする。

3) 先読みの深さ、報酬と罰の重みづけなどのパラメタはいかに制御されているのか？

大脳基底核の腹側／背側経路による短期／長期の報酬予測がセロトニン系により制御される (Tanaka et al., 2007)、大脳基底核の直接路／間接路の異なるドーパミン受容体が報酬による行動強化と罰による抑制 (Hikida et al., 2010) やリスク回避 (Takahashi et al., in press) に関与するなどの知見が得られているが、これら意思決定の特性は、環境条件や個体の経験に依存して調節されるべきであることが理論的に予測される (Doya, 2008)。この予測を、環境条件をもとでの行動解析と薬理、遺伝子操作により検証する。

＜新学術領域としての性格と発展＞

予測と意思決定の脳計算機構の解明には、脳活動計測や神経細胞イメージング、分子マーカーによる特定細胞の機能抑制や光刺激など最新の実験技術が不可欠であるが、単に計測操作技術の高度化だけでは膨大な数の神経細胞の活動の意味を読み取ることは困難である。意思決定の脳計算機構の解明には、心理学、脳科学から統計理論、情報科学まで既存の学問分野の枠を超えて幅広い知識と技術を集結することが必要であり、「予測と意思決定の科学」というべき新たな学問分野の創設と発展が求められる。

＜学術水準の向上・強化への貢献＞

今日の生命科学においては、数理情報技術の応用が新たなブレークスルーのもととなっている。また脳科学の発展は、これまで人文社会科学の領域であった人の思考や行動の理解に、生物学的な手法と発想から迫ることを可能にしつつある。本学術領域研究の発展は、実験生命科学、数理情報科学、人文社会科学の複数の言葉を理解し、新たな融合的な研究を企画し実行できる人材の育成をうながし、これは日本の学術水準の向上・強化に大きく貢献するものである。

＜系横断的な審査希望区分の理由＞

予測と意思決定の脳計算機構の解明は、生物系の知識と技術だけでなく、情報工学系の統計推定と強化学習の理論の知見を総合することで可能になるため、工学系での審査も希望する。

(2) 応募領域に関連する国内・国外の研究動向等

1) 予測と意思決定の計算理論

意思決定の脳機構に関する研究は、強化学習の理論と大脳基底核・ドーパミン系の神経活動に関する知見の統合から新たな展開を見せている (Doya, 2007)。強化学習は、ある行動の結果として報酬が得られるとその行動が強化されるという“law of effect”を数学的に抽象化した行動学習の理論である。学習者は、ある状態である行動を取った後、どれだけの報酬が得られたという経験から、その状態と行動の価値（期待累積報酬）を学習し、それをもとに最適な行動則を学習する。学習は予測された報酬と実際に得られた報酬の誤差をもとに行われるが、中脳のドーパミン性ニューロンの発火がこの報酬予測誤差情報を表しているという Wolfram Schultz の発見を契機に、ドーパミンの投射と最も強く受ける線条体を中心とした大脳基底核の神経回路が、報酬をもとにした行動学習と意思決定に重要な役割を果たすことが次々と明らかになってきた。

強化学習の基本的な方法は、ある状態や行動から得られた報酬の平均値を「価値関数」として記憶し更新するものだが、より高度な方法として、ある行動を取った結果行き着く将来の状態を予測し、その予測された状態から得られる報酬の比較によって行動を選択するという方法が考えられる。前者はモデルフリー、後者はモデルベースの行動戦略と呼ばれ、後者の方が少ない経験を有効に使いすみやか行動学習が可能なが示されており、これが前頭前野と小脳、大脳基底核をつなぐ神経回路により実現されるという仮説を領域代表者は提唱している (Doya, 1999)。

2) 予測と意思決定の神経回路機構

上記の大脳基底核の強化学習モデルにもとづき、領域代表者らは大脳基底核の線条体のニューロンが行動の結果得られる報酬価値の学習に関わることを実験的に示した (Samejima et al., 2005)。これはモデルフリーの強化学習を想定したものであるが、近年の fMRI 実験により、前頭前野がモデルベースの強化学習に関わることを示唆されている (Glascher et al., 2010)。

さらにニューロン活動のレベルでは、Wilson, Buzsaki らが、睡眠中のラットの海馬のニューロンの活動の解析により、行動中の経験のプレイバックが行われていることを示唆している。さらに近年、Redish らは T 字迷路課題を学習中のラットの海馬ニューロン活動の解析により、分岐点での経路選択に際して、左右の道の先の状態表現が一時的に現れることを示した (Johnson & Redish, 2007)。これらは多電極記録による数十個のニューロン活動の同時記録によるものであるが、近年、ラットやマウスを顕微鏡下の筒の中やトラックボールの上に固定し、電位感受性色素やカルシウム感受性色素を使った光学計測により、細胞の種類を特定した上で数百個のニューロンの活動を同時記録することが可能になりつつある (Dombeck et al., 2010)。これらの技術的進展は、動物が行動結果の予測と意思決定を行う際の神経回路のニューロン活動を丸見えにして解析するという、かつてない可能性を現実的なものとしている。

3) 予測と意思決定の制御の分子機構

領域代表者は、行動学習と意思決定の特性を左右するパラメタ、例えば探索の広さや評価の時間スケールが、ノルアドレナリン、セロトニンなどの脳内物質系により制御されているという仮説を提唱している (Doya, 2002, 2008)。近年、薬理的操作や遺伝子多型データを脳活動計測と組み合わせることにより、これらの物質系が意思決定において果たす影響がしだいに明らかになりつつある。

領域代表者らはラットの神経活動記録と化学計測により、遅れて得られる報酬を待っている最中にセロトニンの活動が高まっていることを明らかにした (Miyazaki et al., in press)。また計画研究代表者の疋田らは、報酬からの行動獲得には線条体のドーパミン D1 レセプタを持つ経路が、罰からの回避行動にはドーパミン D2 レセプタを持つ経路が関わることを明らかにした (Hikida et al., 2010)。

4) 意思決定の脳機構理解の応用

近年、脳科学の知見を精神疾患など医学分野に限らず社会に応用しようという試みは、神経経済学、ニューロマーケティング、神経倫理学などのキーワードのもと、世界的に関心を呼んでいる。日本でも「応用脳科学コンソーシアム」が設立されるなど、脳科学の産業応用が具現化しつつある。予測と意思決定の脳計算機構の理解は、統合失調症、うつ病、依存症など精神疾患の理解に貢献するとともに、教育、スポーツトレーニング、リハビリテーションのプログラムや、人になじみやすい情報機器やソフトウェアの設計など、広範な貢献が期待されている。

＜他の研究プログラムとの関連＞

新学術領域研究では、津田代表の「ヘテロ複雑システムによるコミュニケーション理解」、能瀬代表による「メゾスコピック神経回路」の各領域と、相補的な関係にある。津田領域は複数個体の社会行動に着目し、複雑系としての数理的抽象化を主な手法とするのに対し、本領域は予測と意思決定の脳機構の細胞レベルでの実体の解明までをターゲットとしている。能瀬領域は主に脳から切り出した局所回路の構造と特性の同定にフォーカスしているのに対し、本領域は実際に行動中の脳の活動を計測しその意味を解明することをめざしている。

JST, CREST では小澤統括の「脳神経回路の形成・動作原理」があるが、これは能瀬領域に近く、脳の局所回路の機能にフォーカスし、本領域のように行動のメカニズムを探るものではない。

特定領域研究の西條代表の「神経経済学」も意思決定に関連する研究があるが、これは主に行動と脳画像計測によるマクロ的な脳活動を見るものであり、本領域のようにその細胞レベルでの具体的な実体に迫るものではない。脳科学戦略推進プログラム課題 D の「社会脳」でも意思決定に関連する研究があるが、これは精神疾患など応用志向が非常に強い委託研究である。

本領域の研究戦略は、これら既存の研究プログラムとは異なり、予測と意思決定の脳機構を、理論モデルと行動実験、ヒトからサル、ラット・マウス、ゼブラフィッシュまで複数種での全脳の活動から神経細胞レベルの活動、さらに分子機構まで掘り下げる形で明らかにしようとする点で、きわめて独自性が高い。

＜参考文献＞（業績リストに含まれるものを除く）

Daw ND, et al. (2005). Nat Neurosci, 8, 1704-11.

Dombeck DA, et al. (2010). Nat Neurosci, 13, 1433-30.

Glascher J, et al. (2010). Neuron, 66, 585-95.

Johnson A & Redish AD (2007). J Neurosci, 27, 12176-89.

（３）準備状況等

本領域の計画研究のメンバーは、予測と意思決定の脳計算機構の解明という目標のために必要な研究は何か、という観点から全く新たに集めたものである。10名全員でのチーム作業の経験はないものの、銅谷・柴田、銅谷・木村、木村・坂上、坂上・今井、坂上・高橋など、各メンバー間では共同研究の実績があり、この提案をまとめる中で、分野の壁を超えた議論をすでにさかんに行っている。

坂上と銅谷は、2005年の沖縄計算神経科学コースをコオーガナイズして以来、John O'Doherty, Bernard Balleine らとほぼ隔年で意思決定の脳科学の国際ワークショップを開催しており、この分野で世界をリードする研究者と強力なネットワークを持つ。またこのワークショップをベースに、Journal of Neuroscience, Annals of New York Academy of Science の特集号を編集するなど、その活動を国際的に認知されている。

また銅谷は、脳の確率的な推論機構に関する書籍“Bayesian Brain”を編集し MIT Press から出版することで、予測の脳内機構に関する研究のリーダーとして認知されている。

2 領域推進の計画・方法

(1) 領域推進の計画の概要

本領域では論理学、発達心理学、精神医学、統計推定、機械学習、ロボット工学の専門家と、魚類からげっ歯類、霊長類までの脳研究の専門家を計画研究メンバーとして集め、緊密な共同研究体制のもとで、予測と意思決定の脳内計算機構の解明を進める。

<研究項目と計画研究代表者、テーマ>

A01 行動と意思決定の計算理論

A01-1 岡田光弘：予測・判断・意思決定の論理と計算

A01-2 今井むつみ：ヒト乳児の言語学習を可能にするモデルフリー・モデルベースの学習機構

A01-3 杉山将：予測と意思決定のための機械学習理論の構築とその神経回路での実現

A01-4 柴田智広：実店舗での購買意思決定過程

A02 意思決定の神経回路機構

A02-1 坂上雅道：モデルベース的意思決定を可能にする神経回路

A02-2 銅谷賢治：予測と意思決定の神経回路ダイナミクスの解明

A02-3 岡本仁：意思決定神経回路の可視化と操作

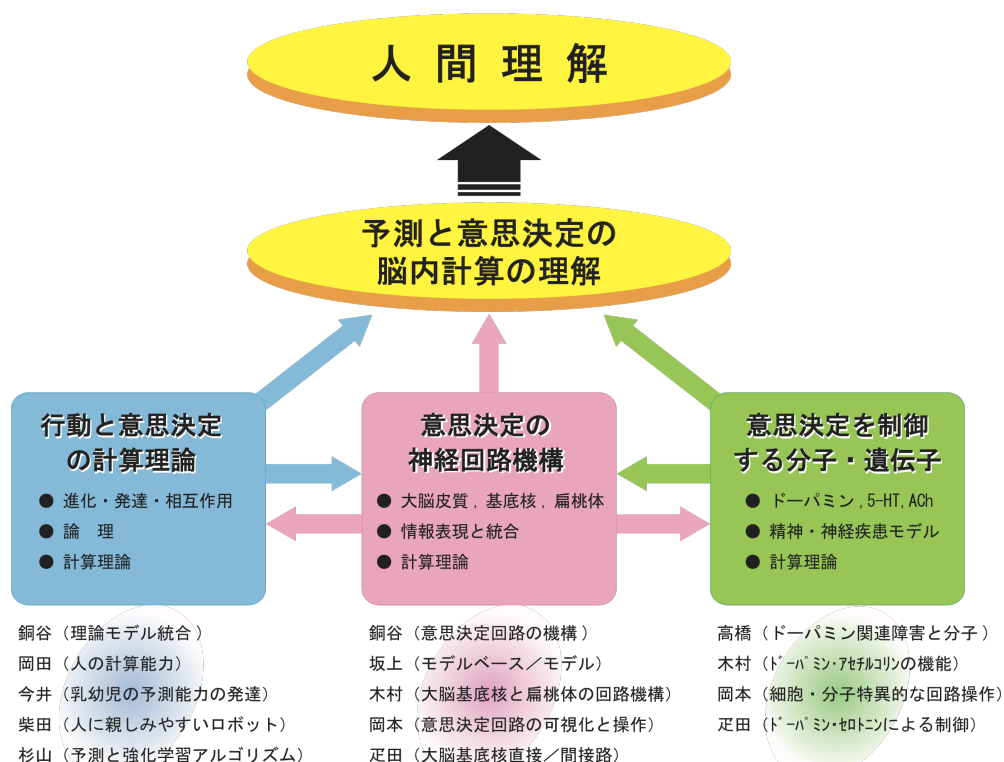
A03 意思決定を制御する分子・遺伝子

A03-1 高橋英彦：精神・神経疾患における熟慮および直感的意思決定障害の脳内基盤の解明

A03-2 木村 實：予測と意思決定の脳基底核と扁桃体の神経回路基盤

A03-3 疋田貴俊：報酬・忌避の意志決定の機構解析

3つの研究項目は、前述の3つの研究課題と対応しているが、実際の研究では多くのメンバーが複数のレベルのテーマに取り組む。各メンバーによる異なる動物種の異なる脳部位や物質にフォーカスした実験結果の統合を可能にするため、種ごとにカスタマイズの上で適用可能な共通の行動課題を策定し、データ共有と公開のためのデータベースを構築し、またその結果を分子から神経回路、行動をつなぐ階層的モデル統合することにより、予測と意思決定の脳内計算の全体像を明らかにする。



＜具体的な研究内容＞

A01：行動と意思決定の計算理論：岡田、今井、杉山、柴田、（銅谷）

強化学習の理論的枠組みをベースとして、様々な状況により柔軟に効率良く対応する行動学習のアルゴリズムの開発と検証を行うとともに、それらのどれが、あるいはこういった設定や組み合わせが実際の人間や動物の行動学習と意思決定の特性を良く近似するのかを明らかにする。

杉山は新たな強化学習アルゴリズムの導出に主導的な役割を果たすと同時に、統計推定と機械学習の知識をもとに領域内の各チームで得られた実験データの統計解析手法の開発を担当する。**岡田**は直感的なモデルフリーの意思決定と、熟慮的なモデルベースの意思決定を実際人がどのような状況でどう使い分け組み合わせているのか、遺伝子多型データや双生児の被験者集団を活用しつつ解明にあたる。**今井**はさらにモデルベースの予測能力が乳幼児の発達過程においていかに獲得され、言語獲得を可能にしているのかを明らかにする。**柴田**はロボット工学とユビキタス IT 技術を活用し、統制された実験室内ではなく、日常生活の自然な場面で人の行動データを収集し、物理的、実時間的な条件下での意思決定の実体を明らかにする。

平成 23 年度は強化学習の理論的枠組みを、理工系の研究者だけでなく領域全体の共通言語として共有するとともに、各実験課題の設計、その解析手法に関して密な議論と予備実験を進める。これに基づき平成 24 年度以降の実験経過も年 2 回の領域会議などを通じて交換し合い、異なる種や脳部位から得られた知見を統合した理解をはかる。

A02：意思決定の神経回路機構：坂上、銅谷、岡本、（木村、疋田）

モデルベース、モデルフリーの意思決定が実際にニューロン回路のどのようなダイナミクスにより実現されているのかを、ニューロンの応答特性と相互結合をもとにしたネットワークの計算機シミュレーションで再現できる程度に具体的に明らかにする。

坂上、木村はサル、**銅谷、疋田**はラットおよびマウス、**岡本**はゼブラフィッシュを対象として、それぞれの動物種の学習能力と脳の計測と操作技術を最大限生かす形で研究を組み立てる。ゼブラフィッシュの脳は、脳幹や大脳基底核の回路構造はほ乳類と相同な構造を持ち、幼弱期の身体の透明さと脳の小ささにより、脳全体の活動を光学計測することが可能であり、さらに遺伝子操作技術により脳の特定の部位の特定の種類の細胞の活動を選択的に記録し操作することが可能である。ラット・マウスにおいては、大脳皮質、海馬、線条体など場所を限った上で、局所回路の大多数のニューロンの活動を網羅的に光学計測、光学刺激し、また特定種の細胞活動を可逆的にブロックすることが可能になりつつある。サルにおいても百チャンネル近くの電極を用いて、ヒトにより近い高度な予測推論を可能にしている回路機構に迫る。これらの実験では、確率的報酬課題、多ステップ行動選択課題など、行動結果の予測と報酬評価に関わる共通課題を選び、それぞれの動物種向けのバージョンでの実験結果を総合することにより、種の壁を超えた理解をはかる。

平成 23 年度はこの共通課題の基本構造の策定と各種に応じた最適化と予備実験を行い、平成 24 年度以降も相互に得られた知見をつねに共有しつつ研究を深化させる。

A03：意思決定を制御する分子・遺伝子：高橋、木村、疋田、（岡本）

意思決定においては、報酬とコスト、即時の結果と長期的な結果、探索の幅広さと集中、経験の保持と新たな状況への対応など様々なトレードオフが存在し、それらを解決することは人間や動物の情動系の基本的な役割である。これらのトレードオフは強化学習理論においてはいくつかの「メタパラメタ」により制御され(Doya, 2002)、これが脳内ではセロトニンなどの物質系とその信号伝達に関与する遺伝子により制御されていることが示唆されており(Doya, 2008)、その実体を明らかにする。

高橋は fMRI に加えて PET によりドーパミン、セロトニンの特定種類のレセプタの発現と活性を可視化する技術を用いて予測と意思決定におけるこれら物質系の制御機構を探る。**木村**はサルの大脳基底核と扁桃体におけるドーパミンの役割をニューロン記録と薬理操作により明らかにする。**疋田**はマウス、**岡本**はゼブラフィッシュにおいて、脳部位や細胞種を特定した分子レベルでの操作が予測と意思決定に及ぼす影響を明らかにする。

平成 23 年度は異なる種で得られる情報を最大限生かすための新たな実験課題の開発と調整を行い、平成 24 年度以降それらを具体化していく

（2）各計画研究（総括班を除く）の研究組織及び研究内容の概要

A01-1 予測・判断・意思決定の論理と計算

研究代表者：岡田光弘（慶応義塾大学文学部哲学専攻教授）論理学、論理哲学、認知論理、情報論理

研究分担者：山田友幸（北海道大学文学部思想文化学専攻哲学講教授）哲学、行為論、心の哲学

金子守（筑波大システム情報工学科教授）ゲーム理論、共通知、社会システムマネジメント

下嶋篤（同志社大学文化情報学部教授）認知情報科学

敷島千鶴（慶応義塾大学先端研究センター常勤研究員）行動遺伝学、教育学

1. 判断・意思決定論理の統合：合理的推論、言語行為論、共通知、条件文の意味論などの推論プロセス理論、ゲーム理論・期待効用論、価値評価理論などの計算理論、功利主義・行為論哲学など哲学理論など、異なる分野で議論されてきた意思決定の理論を、線形論理、矛盾許容論理などの新しい手法も導入し統合的に捉え直す。ここで得られる統合的論理モデルを実時間制約・実現可能計算量の観点から分析し、理想的意思決定の論理と現実的意思決定の計算の相違も明らかにする。

2. モデルベースとモデルフリーの判断・意思決定：推論と直観、合理的判断と信念、思考と習慣知、モデル検査と直観主義推論などの論理的デュアルシステムを、モデルベースとモデルフリーの相互関係という立場から捉え直す。また、行為論、心の哲学、功利主義、意識の哲学など、意思決定理論の関連哲学分野の近年の議論を取り入れる。言語的判断と空間表象による非言語的判断の相違が意思決定に与える影響を明らかにする。

3. 理論の検証と改良のための行動学的・認知情報科学的・行動遺伝学的実験：理論の検証のための被験者実験を行う。また、言語的モデルベース判断と空間表象的判断の違いや関連の行動実験、脳活動計測を通じて、人間の判断・意思決定プロセスにおける言語の役割の特徴を考察する。双生児法を用いて予測・判断・意思決定における社会・環境要因と遺伝要因の関係を明らかにする。

**A01-2 ヒト乳児の言語学習を可能にするモデルフリー・モデルベースの学習機構**

研究代表者：今井むつみ（慶応義塾大学環境情報学部教授）認知発達心理学

研究分担者：松井智子（京都大学霊長類研究所准教授）言語学、発達心理学

連携研究者：岡田浩之（玉川大学工学部教授）認知数理科学

友永雅己（京都大学霊長類研究所准教授）比較認知科学、比較認知発達論

北城圭一（理研脳科学総合研究センター副チームリーダー）認知神経科学

ヒトは言語を有し、言語を用いて抽象的な概念を得ることができ、言語を介した思考によって意思決定をする点で決定的に他の動物と異なっている。しかし、なぜヒトのみが進化のプロセスにおいて言語を獲得したのか、言語学習はヒト乳児においてどのように始まるのかは未だ謎である。本計画研究では、生得的な神経回路によって実現される認知能力とヒト特有の**推論学習能力**を軸に、それらがどのように相互に働くのかを明らかにすることによって、ヒト乳児における**言語学習の起源と発生メカニズム**の解明に迫る。前者の代表として視覚と聴覚の**多感覚統合**による**音象徴**（対象と音の自然な対応関係）を検知する能力、後者の代表として**対称性推論**と**他者の意図の推論**の能力を考える。進化的に言語は音による環境の模倣から始まったと指摘されているが、意味を含有した音声を「ことば」として理解し、言語理解、使用に発展させるためには、音声と対象の間に双方向的な関係があることを理解する必要がある。この理解を得るための基盤となるのが、A ならば B という関係を学習すると、B ならば A という逆の関係を自発的に推論し、学習してしまう、という対称性推論の能力であり、これはヒトの柔軟な思考の基盤でもあると考えられている。さらにことばを言語として運用していくためには、他者の意図の理解も不可欠である。これらの推論能力はヒト特有のもので、ヒト以外の動物は、訓練をしても非常に困難であるとされている。

本研究では（1）同じ刺激、実験パラダイムを用いたヒト乳幼児・成人、サル、チンパンジーによる**種間比較**研究により、二つの能力の起源が進化的に共有されているのかヒト固有のものなのかを改めて検討する。（今井、松井、友永）（2）ヒト乳児、成人を対象にした**行動実験**と**脳計測**（特に脳波の位相同期解析を中心とした時間周波数解析）により、行動発達の詳細とその背後の脳内神経メカニズムを探る。（北城）（3）実験結果をもとにヒト乳児におけるモデルフリー・モデルベース学習の相互作用モデルを構築し、**ロボット学習**によるシミュレーションにより、**モデルの構成論的検討**を行う（岡田）。

A01-3 予測と意思決定のための機械学習理論の構築とその神経回路での実現

研究代表者：杉山将（東京工業大学）

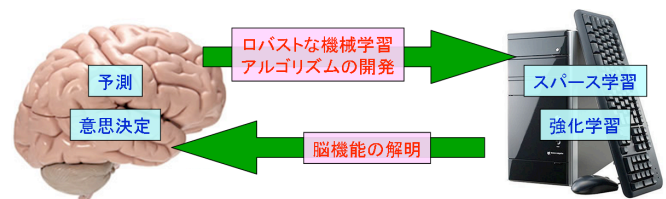
研究分担者：森本淳（国際電気通信基礎技術研究所）

連携研究者：富岡亮太（東京大学）

本計画研究では、予測と意思決定のためのロバストな機械学習理論を構築するとともに、それを神経回路で実現するためにはどのような制御機構が必要となるかを理論的に明らかにし、その実現可能性を探る。具体的な研究計画は以下の二つの研究課題を遂行する。

（１）**予測のための特徴選択**：ヒトの脳のようにロバストな予測を実現するためには、冗長な情報源から予測に必要な特徴を正確かつロバストに選択する必要がある。研究代表者の杉山は特徴選択の基礎をなす相互情報量推定の研究を行ってきており、また連携研究者の富岡は大規模特徴選択のためのスパース推定アルゴリズムで顕著な成果をあげている。本研究では、特に人の意思決定で重要と考えられる規模の予測問題に対して、相互情報量推定とスパース推定の長所を組み合わせた高精度かつ高速な次世代特徴選択アルゴリズムを開発する。そして、同研究領域の神経科学チームと連携して、これらのアルゴリズムを神経回路に近似的に実装することを目指す。

（２）**ロバスト強化学習**：意思決定の数理モデルとして標準的な強化学習の枠組みでは報酬の期待値を最大にするように行動則を最適化するが、神経回路のように非定常かつノイズの影響が深刻な系においてはロバスト性が非常に重要である。研究分担者の森本は複数の学習機構を組み合わせることによって不確かな環境に対応できるロバスト強化学習法を開発しており、また研究代表者の杉山は報酬の期待値だけでなく確率分布そのものを厳密に推定する新しい枠組みを提唱している。本研究では、強化学習分野の新たな研究パラダイムをなると期待される、報酬の確率分布を考慮したロバスト強化学習アルゴリズムを開発する。そして、同研究領域の神経科学チームと綿密に情報交換を行いながら、工学的な強化学習アルゴリズムの神経回路での実現可能性を探る。

**A01-4 実店舗におけるヒトの購買意思決定過程のモデル化と操作**

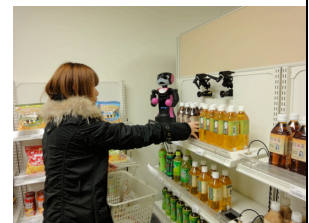
研究代表者：柴田智広（奈良先端大情報科学研究科准教授）

連携研究者：宮下敬宏（ATR 知能ロボティクス研究所）

これまでの認知神経科学や神経経済学では、意思決定の要因を可能な限り減らし、統制の取れた実験環境下で実験を行うことが一般的であったため、それら実験から得られた知見が実環境にもそのまま適用可能である保証は無い。そこで本研究では、実店舗において（１）ヒトの購買意思決定過程を記録し、（２）その過程をモデル化し、モデルに基づいて（３）その過程を操作することを目的とする。（１）**購買意思決定過程の多次元計測**：企業との連携により実店舗の一部を使い、長期間、複数人数の購買行動（位置、視線、商品選択）を同時記録可能なシステムを構築する。実験参加者は、連携企業の会員の中から任意で応募することにより、事前に各参加者の商品選好情報を得る。

（２）**購買意思決定過程のモデル化**：神経経済学における既存の意思決定（離散選択）モデルや、本領域の他チームから提案される、あるいは連携して提案するモデルを、（１）から得られる大規模なデータに当てはめ、モデルの選択を行う。

（３）**購買意思決定過程の操作**：（２）のモデル化・モデル選択をより正確に行うためには、リッチな環境変動が必要である。また、購買意思決定過程を消費者の購買行動を助ける方向、あるいは販売側の意図に従う方向に操作できれば、ニューロマーケティングに大きく寄与する。そこでロボットによる介入、音楽や音声放送、店舗内の商品構成や配置の変更などによってリッチな環境変動を実現し、購買意思決定過程モデルの検証と応用を試みる。



A02-1 モデルベース的意思決定を可能にする神経回路

研究代表者：坂上雅道（玉川大学脳科学研究所教授）

研究分担者：Xiaochuan Pan（玉川大学脳科学研究所）

連携研究者：田中慎吾（玉川大学脳科学研究所）

横山修（玉川大学脳科学研究所）

これまでの研究で、意思決定にかかわるモデルフリー的処理は脳基底核と中脳ドーパミン領域を中心とする神経ネットワーク、モデルベース的処理は脳皮質、特に前頭前野内の異なる領域間のネットワークの処理で実現されていることを示唆してきた（総説として、Yamamoto et al. in press）。本計画研究では以下の実験によりその処理の実体を明らかにする。

①電気生理学的手法（LFPと単一ニューロン活動記録）とイメージング（fMRI）を使って、モデルベース的処理を実現する前頭前野内の異なる部位（背外側部、腹内側部、眼窩部、内側部、前部帯状回）の処理の特異性と相互作用を調べる。

②推論課題遂行中のサルの前頭前野（モデルベース）と脳基底核（モデルフリー）からLFPの同時記録を行い、相関解析・因果性解析を行うことにより、モデルベース的処理がどのようにモデルフリー的情報を利用しているかという観点から、それらの間の処理の相互作用を調べる。

③モデルベース的処理の特徴である目的志向性が脳内のどの部位どのように表現され処理されているか、サルを用いた電気生理学的記録実験により調べる。

モデルフリーシステム
自働(潜在的)

モデルベースシステム
目標志向(顕在的)

脳基底核-ドーパミン
ネットワーク

前頭前野ネットワーク

線条体

外側部

黒質緻密部
腹側被蓋

内側部 眼窩部

A02-2 予測と意思決定の神経回路ダイナミクスの解明

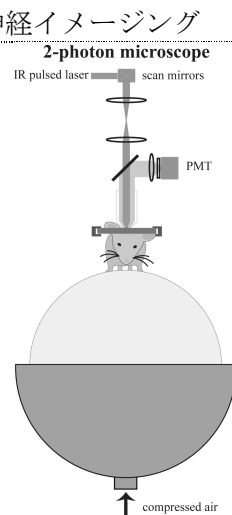
研究代表者：銅谷賢治（沖縄科学技術研究基盤整備機構代表研究者）計算神経科学

連携研究者：Bernd Kuhn（沖縄科学技術研究基盤整備機構代表研究者）光学神経イメージング

予測と意思決定の神経回路における実体を明らかにするため、意思決定課題を実行中のラット、マウスの脳基底核と脳皮質の神経活動を、多電極および二光子顕微鏡により計測し、強化学習モデルに基づく解析によりその役割と計算機構を調べる。

銅谷は行動中のラットの脳基底核ニューロンの多電極記録研究の実績を持ち、Kuhnは目的に応じた二光子顕微鏡を独自に設計し作製する実績を持つ。そこで本研究では頭部を固定したマウスがトラックボール上で歩行運動が可能装置を作製し、意思決定課題を実行中の脳内の特定部位の多数のニューロンの活動を二光子顕微鏡により同時計測し、感覚情報の識別、仮想的な行動の結果の予測、その報酬価値の評価の動的なプロセスを明らかにする。行動課題としては多重T字迷路課題など、行動結果のモデルベースの予測が有効なものと、単純な行動-報酬のモデルフリーの連合が有効なものを選ぶ。記録部位としては、当初は運動野など脳表面に位置し計測の容易な部位からスタートし、後に海馬、線条体など脳深部の神経活動を捉えるための手術法と光学系を開発する。

また項目A01の研究メンバーと共同し、多数のニューロン活動の時系列データの解析とモデリングの手法の開発を進め、「脳のどの部位が」という従来の知見を、「どのようなアルゴリズムで」というより深い理解につなげて行く。さらに、脳皮質や基底核など局所回路での予測と意思決定の神経回路モデルを、人間や動物の意思決定の過程を捉える行動と脳全体レベルのモデル、ドーパミン、セロトニンなどによる制御機構と連結した階層モデルを構築し、分子レベルの変化が神経回路の動作変化を通じて意思決定に及ぼす影響の予測を可能にすることをめざす。



A02-3 意思決定神経回路の可視化と操作

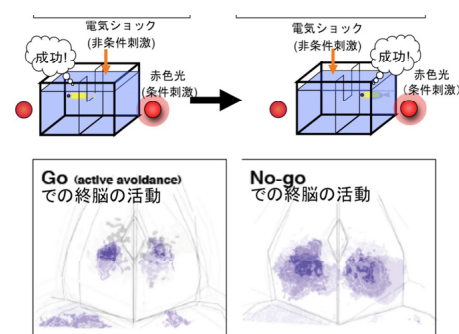
研究代表者：岡本仁（理研脳科学総合研究センターチームリーダー）

哺乳類の脳では、扁桃体、大脳基底核、中脳や後脳のモノアミン細胞などが行動制御プログラムの成立に関与することが示されているが、これらの領域が行動制御プログラムの成立や選択においてどのように相互作用するのかは、いまだ不明な点が多い。最近の研究から、硬骨魚類の終脳も、哺乳類の終脳の基本構造に相当する構造をもっていることが示された。本研究では、神経回路が簡略化されているゼブラフィッシュを実験材料として、遺伝子操作技術を駆使して神経活動の可視化や人為的操作を行うことで、行動プログラムの形成と読み出しに関わる神経回路の動作様式を基底核を中心として細胞レベルで可視化し、その動作特性を明らかにする。

1) 現在の高速高感度カメラを用いた観察システムでは、行動制御に関わる神経回路の、個々の神経細胞の振る舞いを観察することができない。高速スキャン型共焦点レーザー顕微鏡、2光子レーザー顕微鏡を用いることによって、この問題を克服する。

2) 行動プログラムの形成と選択に関わる神経回路を、脳の部位ごとに操作するために、終脳の異なる部位ごとに遺伝子操作を可能とするトランスジェニック・ゼブラフィッシュを、組み換えBACクローンを使って作成する。

3) 上記観察システムと遺伝子発現制御システムを使うことによって、行動プログラムの形成と選択に関わる神経回路の動作特性を明らかにする。特に、行動ルールの変更の後でどのような異なる細胞集団が興奮するようになるのかや、行動ルールの変化に応じて細胞集団のスイッチングを引き起こす神経回路機構を明らかにする。



A03-1 精神・神経疾患における熟慮的および直感的意思決定障害の脳内基盤の解明

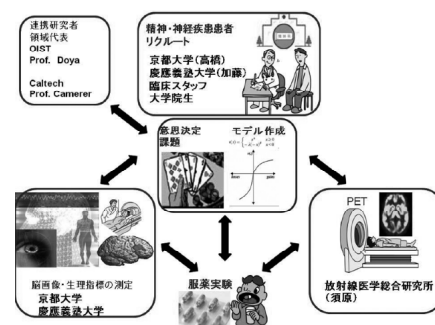
研究代表者：高橋英彦（京都大学大学院医学研究科講師）

研究分担者：須原哲也（放射線医学総合研究所グループリーダー）

加藤元一郎（慶應義塾大学医学部准教授）

高次な意思決定には、結果を先読みする熟慮的なモデルベースの意思決定に加えて直感的な意思決定も重要で、特に後者には情動が深く関与していることが分かってきたが、これまではfMRIを中心にした脳イメージングでマクロな脳活動を検討するにとどまっていた。申請者はこれまで分子イメージングの技術で熟慮的意思決定を支える基本的な認知機能とドーパミンとの関係を分子神経イメージングの技術で、また直観的意思決定に情動が重要であることもfMRI等を用いて明らかにしてきた。本提案では脳内分子（ドーパミン・セロトニン等）が熟慮的意思決定および直感的な意思決定の脳内機構をどのように制御しているかを明らかにすることを第一の目的とする。さらに、精神・神経疾患の患者で、広く認められる複雑な意思決定障害や精神症状を、行動の帰結を予測し、熟慮的意思決定に関わるシステムと情動・動機づけなど直感的な意思決定システムの両者の破たんとして理解し、各々の過程を行動レベルで評価するモデルおよびそれを説明する脳内モデルを用いて精神・神経疾患の意思決定障害定量的・客観的に評価する。

京都大学医学部には3T MRI等多様な脳画像研究設備を有し精神疾患を対象とした脳画像研究の実績があり、放射線医学総合研究所においては世界最高峰レベルの分子イメージング技術が集約されている。慶應大学とはこれまでも精神疾患を対象とした脳画像研究や認知神経科学的研究を実施しており、同科の臨床スタッフおよび、京都大学医学部附属病院精神科の臨床スタッフからも研究協力を得られる体制にある。意思決定の理論的サポートにはカリフォルニア工科大学Colin Camerer教授を研究協力者とする事で内諾を得ている。



A03-2 予測と意思決定の大脳基底核と扁桃体の神経回路基盤

研究代表者：木村 實（玉川大学教授）

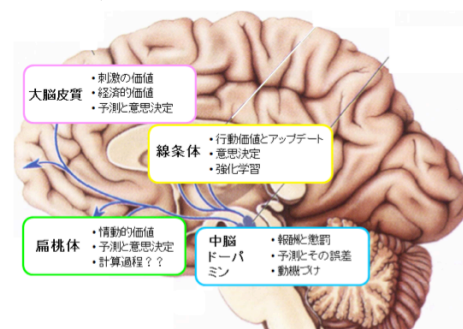
研究分担者：春野雅彦（玉川大学准教授）

連携研究者：鮫島和行（玉川大学准教授）、榎本一紀（博士研究員）、山中航（博士研究員）

これまでの動物の脳の神経生理学研究やヒトの脳機能イメージング研究によって、予測と意思決定には大脳前頭葉皮質による様々な認知的な機能、大脳基底核による強化学習機能と扁桃体による情動的な価値と判断が必須で固有の役割を担うことが明らかになってきた。大脳皮質や基底核の予測と意思決定の機能はモデルフリー、モデルベースの計算方式として理解する試みが有力である。また強化学習では中脳ドーパミン細胞が主要な役割を果たすと考えられるが、その活動は報酬だけでなく懲罰や動機づけ情報を担うことが判明している。そこで以下のサブテーマに沿って研究を行う。

1. サルを対象とする神経生理学によって、線条体の神経細胞とドーパミン細胞の放電とシナプス入力を反映するフィールド電位(LFP)を記録し、線条体細胞による行動価値表現と意思決定プロセス、行動価値のアップデートとドーパミン細胞の活動を調べる。そして、大脳基底核の機能は報酬価値に基づく確率的行動選択という強化学習の定式化の枠組みでどこまで理解可能であるのか、どのような拡張が必要であるかを明らかにする。

2. サルの神経生理学により、情動的価値の表現、予測と意思決定に関与すると考えられている扁桃体細胞の神経発火とシナプス入力を表現する LFP と、ドーパミン細胞の担う報酬と懲罰の予測と誤差信号を比較検討し、ドーパミン- 扁桃体系の予測と意思決定の神経回路基盤を調べる。これと相補的にヒトの脳機能イメージングと計算論的神経科学研究を行うことによって、予測と意思決定に関与する大脳基底核と扁桃体系の計算過程を明らかにすることを目指す。



A03-3 報酬・忌避の意志決定の機構解析

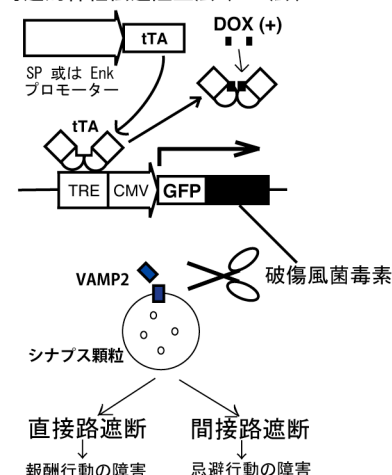
研究代表者：疋田貴俊（大阪バイオサイエンス研究所研究員）神経科学・精神医学

研究分担者：中西重忠（大阪バイオサイエンス研究所所長）分子神経科学

大脳基底核は報酬と忌避行動を支配し、内的脳内情報によって意志決定を制御する中心的な脳部位である。当研究組織は伝達物質の分泌を阻止する破傷風毒素を特定の神経経路に発現し、特定の神経伝達を選択的かつ可逆的に阻止出来る「可逆的神経伝達阻止法（RNB法）」を開発した(Hikida et al., Neuron, 2010)。RNB法を用いて基底核の線条体から黒質への2つの伝達経路、即ち直接路と間接路の伝達を特異的に遮断し、1) 直接路が報酬行動、間接路が忌避行動を支配すること、2) この制御にはドーパミンの動的な変動が必須であること、3) 報酬記憶の獲得・発現・維持の各プロセスのうち基底核は記憶の発現を支配しているという全く新しい事実を明らかにした。

基底核は両側の障害によって始めて機能を喪失し、かつ同側の脳部位から基底核への情報が入力として働くため、本研究においては一側基底核の特定部位（線条体の腹側部、背内側部、背外側部など）の直接路或いは間接路を遮断し、他側の脳部位に種々の操作（例えばドーパミンやセロトニンなど伝達物質拮抗薬の投与）を行うことによって、意志決定に関与する報酬と忌避行動のスイッチ機構を解明する。さらに情動、自発性、意欲、衝動性、習慣性がいかなる分子機構によって意志決定を支配しているのかを明らかにする。本研究は種々の脳内情報が基底核の2つの伝達経路を介していかに処理・統合されるのか、さらにこの分子機構を解析することによって意志決定の脳内情報のメカニズムを明らかにする。

可逆的神経伝達阻止法（RNB法）



（３）公募研究の役割

本領域では、平成 24 年度以降の予算の約 1／3 を公募研究にあてる。これは、計画研究に揃えたメンバーに留まらず人文社会、生物、医学、工学などより幅広い分野の研究者の参画を促すことと、若手研究者の活動を支援するためである。

人間の予測と意思決定のしくみは、脳科学だけでなく経済学、政治学、社会学、教育学、精神医学、製品デザイン、マーケティングなど幅広い分野で様々な形で研究されて来っており、異なる分野での知見と手法を統合することが重要であり、それにより深い人間理解が可能になれば、また幅広い分野への波及効果を持つ。

公募研究は年間 1 億円の規模とし、年間 500 万円規模の若手向けの枠を 1 4 件用意し、斬新な発想での試みを奨励する。また、年間 1,000 万円規模で新たな技術の導入や専任スタッフの雇用が可能な枠を 3 件用意する。

（４）研究支援活動の必要性

本領域の最大の特色は、人文、理工、生物の幅広い分野の研究者の連携により成り立つことである。これを実質的なものにするには、機械学習と意思決定の理論とアルゴリズム、光学計測、光学刺激、細胞選択的抑制法など最新の分子生物学技術の原理と実際など、互いの知識基盤と実験技術、実験データの共有をはかることが必須である。

そのため、理論、実験技術の両面で、チュートリアル企画を毎年実施する。これは計画研究、公募研究のメンバーだけでなく一般にも参加をつのり、計算理論に基づいた実験計画とデータ解析・モデリングのできる若手の育成をはかる。

また、研究室の壁を超えた大規模計測データの解析とモデリングを可能にするため、データベースを立ち上げる。本研究の実験で得られたデータは、被験者のプライバシーへの配慮を行った上で原則として一定の期間の後には公開し、幅広い活用をうながす。

3 領域マネジメント

(1) 総括班の役割、研究組織及び活動内容

総括班の役割は、メンバー間の知識と情報の共有をはかり実のある共同研究を実現すること、新領域の研究を担う若手の育成をはかること、そして生まれた研究成果を広く社会に広め応用につなげていくことである。そのため以下の組織構成で活動を展開する。

<組織構成>

研究代表者 銅谷賢治（計算神経科学）全体統括

企画実行委員会

研究分担者 坂上雅道（脳科学）企画実行委員長

連携研究者 岡田光弘（論理学・哲学）

連携研究者 疋田貴俊（神経科学・精神医学）

研究支援委員会

研究分担者 岡本仁（脳科学）研究支援委員長

連携研究者 杉山将（機械学習）

連携研究者 木村實（神経生理学）

広報連携委員会

研究分担者 柴田智広（計算神経科学・ロボティクス）広報連携委員長

連携研究者 今井むつみ（認知発達心理学）

連携研究者 高橋英彦（精神医学）

アドバイザー委員会

連携研究者 川人光男（計算神経科学）

連携研究者 丹治順（脳科学）

連携研究者 津本忠治（神経生理学）

<活動内容>

1) 企画実行委員会

年に2度の領域会議を開催し、計画研究、公募研究のメンバー間の知識共有をはかり、共同研究をうながす。また平成 25, 27 年度には国際ワークショップを企画し、研究成果を世界に発信するとともに、海外の先進的な研究者とのネットワークの構築をはかる。

2) 研究支援委員会

平成 24 年度以降、計算理論とアルゴリズム、神経回路の可視化と操作のそれぞれのテーマでチュートリアルコースを開催し、メンバー内の知識と技術の向上をはかるとともに、メンバーに限らずより広く若手の育成をはかる。また、メンバー間のデータ解析とモデリングの共同研究の支援と、さらに実験で得られた貴重なデータやアルゴリズムをより良く活用するため、データベースを構築、運営する。

3) 広報連携委員会

新学術領域の研究活動と成果を幅広く広報するため、web サイトの立ち上げと更新、ニュースレターの発行、プレスリリース等を行う。また、意思決定の科学に多くの国民、特に子供たちの関心を喚起するためのアウトリーチ活動を企画実行する。さらに研究成果を社会応用につなげるため、医学、教育、産業界との連携をめざした懇談会などを企画する。

4) アドバイザー委員会

年に2度の領域会議などの機会に計画研究、公募研究の進捗を評価し、それぞれの専門知識と経験をもとにアドバイスを行う。

以上の活動を統括するため、研究内容の報告を主目的とする領域会議に加え、総括班会議を随時開催し各企画の構想の練り上げと進捗の把握をはかる。

（２）領域代表者の領域推進に当たってのビジョン及びマネジメント実績

＜ビジョン＞

領域代表者は工学系の出身であり、強化学習のアルゴリズムの開発とそのロボットへの応用で先端的な研究を行って来た。工学で学位を取ってからは UCSD の生物学科にポスドクとして移り、現実の神経回路の制御と学習機構について経験を積んで来た。代表者の脳研究の特色は、「うまく動くシステムを作るには何が必要か」という計算理論からスタートし、「それが脳の回路や物質でいかに実現できるのか」を探るトップダウン的なアプローチであり、細胞や分子の機能を考える時にもつねにそれが行動制御においてどう役立つのかを問い続けることにある。

脳研究における新しいブレークスルーは、計算理論とアルゴリズム研究の最前線と、脳の計測と操作技術の最前線が交わる場所から生まれる。そのため本領域の計画研究においても、理論研究でトップを走るメンバーと、実験技術でトップを走るメンバーの両者を引き込むことを狙い実現した。この類い稀な機会を大きく生かし新領域の形成につなげていくため、各研究者につねに挑戦的な問いを投げかけ、単に従来の研究の延長や足し合わせではなく新たな発想でのアプローチによる共同研究をともに考え、実現につなげていきたい。

＜マネジメント実績＞

領域代表者は、ATR 脳情報研究所の研究室長、OIST 先行研究の代表研究者として独自の研究チームをリードする経験を持つだけでなく、JST CREST 脳を創る領域で 6 研究室をたばねる研究代表者としての研究プロジェクトマネジメントの実績を持つ。

また、研究組織やコミュニティの活性化においても、日本神経回路学会副会長(1999-2002)、神経情報科学サマースクールディレクター(1999-2003)、OIST 代表研究者会議議長(2004-2007)、Okinawa Computational Neuroscience Course (OCNC) オーガナイザー(2004-)、脳と心のメカニズムワークショップ計画委員長(2005-2009)、日本神経科学学会大会プログラム委員長(2010)など、豊かな着想と実行の責任を求められる職を経験し成果を上げている。

4 研究経費

(1) 研究期間との関連性を含めた研究経費の必要性

計画研究での主要な設備は、銅谷による新たな二光子顕微鏡システムの開発費である。これは、実際に予測と意思決定を行っている脳の活動を個々の神経細胞のレベルで捉えるには不可欠な装置である。連携研究者の Bernd Kuhn は二光子顕微鏡の発明者である Denk ラボの出身であり、目的に応じたシステムを設計、作製する技術を持つため、既製品を購入するよりも安価で柔軟なシステムの構築が可能である。また、柴田らによる実店舗での人間行動計測システムは、実験室とは異なる現実環境での意思決定のプロセスをありのままに観測し定量化することで、これまでにない新たな切り口を開くことが期待できる。

研究経費の多くの部分は、ポスドク研究員の人件費に充てられる。これは新たな研究の具現化には必須のものであり、あわせて他分野をまたぐ研究のできる若手の育成にも貢献する。

総括予算として、毎年技術チュートリアル企画、3年目と5年目の国際ワークショップの経費を計上している。