

領域略称名：予測と意思決定 領域番号：4303
----------------------------

平成25年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「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」

(領域設定期間)

平成23年度～平成27年度

平成25年6月28日

領域代表者 沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授・銅谷賢治

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	3
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究の進展状況	7
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	11
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	12
6. 総括班評価者による評価	13
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）	19
9. 今後の研究領域の推進方策	27
10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画	28

## 1. 研究領域の目的及び概要（2ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を発展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

### <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もし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こるかを短期的、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、います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。

### <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

ど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かげ、論理学や機械学習の理論をもとに選択と組み合わ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し合わせることで仮説の検証を行う。

### **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、扁桃核、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。

## 2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

### <研究項目と計画研究代表者、テーマ>（太字は計画研究）

#### A01 行動と意思決定の計算理論

岡田光弘	予測・判断・意思決定の論理と計算
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
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
柴田智広	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
峯松信明	音声の構造的表象に基づく幼児の単語獲得過程の構成論的シミュレーション
島田敬士	散策行動における意思決定アフェクタの可視化に関する研究
石渕久生	複雑性の異なる多数の意思決定戦略が混在する状況でのゲーム戦略の進化
梅田聡	予測と意思決定に及ぼす自律神経活動の役割: 認知神経科学と心身医学の融合
内部英治	モデルベース予測状態フィードバックを組み込んだ強化学習
岩橋直人	意思決定理論に基づくロボットの言語と動作によるコミュニケーションの能動的学習

#### A02 意思決定の神経回路機構

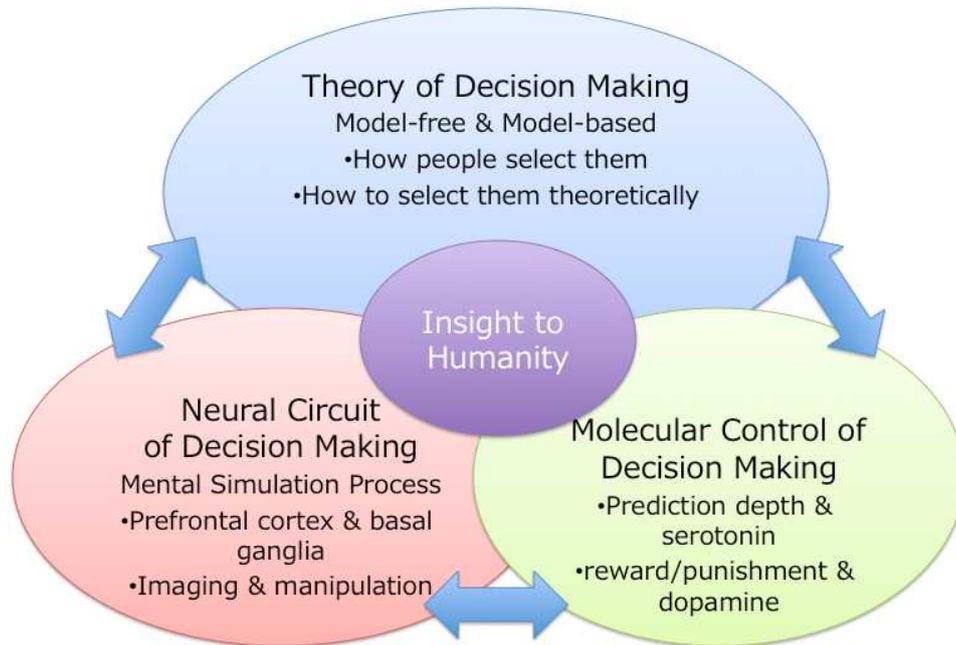
坂上雅道	モデルベース的意思決定を可能にする神経回路
銅谷賢治	予測と意思決定の神経回路ダイナミクスの解明
岡本仁	意思決定神経回路の可視化と操作
大村優	オプトジェネティクスによる正中縫線核セロトニン神経と衝動性の関係の解明
小川宏人	昆虫の刺激方向予測に基づく運動意思決定に関与する神経回路機構の解明
田中真樹	タイミング予測と意思決定に関わる皮質下信号の解析
筒井健一郎	柔軟な行動選択を可能にする神経機構の解明
岩崎広英	意思決定に関わる神経回路のコネクトーム的解析
田中暢明	嗅覚系をモデルにした行動選択時の感覚情報処理機構の研究
藤山文乃	報酬予測をつくるネットワークの解明
小林康	中脳神経回路ダイナミクスによる行動予測形成機構
小林和人	前頭前野皮質一線条体を介する行動柔軟性の制御機構
武藤彩	ゼブラフィッシュ捕食行動をモデルとした視覚認知と意思決定の神経メカニズムの解析
中原裕之	意思決定のための価値の生成と統合の脳機能: 数理モデル提案と実証検証
寺前順之介	確率脳内シミュレータとしての大脳皮質自発発火活動と学習の解明
小村豊	意思決定における「迷い」の検知・制御メカニズム

#### A03 意思決定を制御する分子・遺伝子

高橋英彦	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
木村實	予測と意思決定の大脳基底核と扁桃体の神経回路基盤
疋田貴俊	報酬・忌避の意志決定の機構解析
成本迅	セロトニン神経系の障害をともなう精神疾患における意思決定神経基盤の解明
井之川仁	自発行動発現の意思決定機構とセロトニン系の役割
尾仲達史	オキシトシンによる行動選択修飾作用の解明
橘吉寿	ハイリスク・ハイリターン、ローリスク・ローリターンを選択する神経基盤と調節因子

本領域の大きな特徴は、論理学、発達心理学、精神医学、統計推定、機械学習、ロボット工学や、昆虫、魚類

からげっ歯類、霊長類までの脳研究といった幅広い分野の研究者が、「予測と意思決定」という共通のテーマのもとに同じ土俵で議論し研究を進めている点にある。研究項目は「計算理論」「神経回路」「分子・遺伝子」の3つに分けてはいるが、実際には多くのメンバーが複数のレベルのテーマに取り組み、協力して研究を進めている。



公募研究の多くは、例えば以下のように計画研究のテーマを補完し、相乗的な効果が期待できる：

A01石渕：進化ゲームシミュレーション – A01岡田：ゲーム理論

A01峯松：言語獲得の理論 – A01今井：言語獲得の乳幼児実験

A02武藤：ゼブラフィッシュ補食行動 – A02岡本：ゼブラフィッシュ罰回避行動

A02小川：コオロギの刺激方向予測 – A02銅谷：マウスでの刺激方向予測

A02岩崎・藤山：意思決定の神経回路の解剖学 – A02の多数の研究者：意思決定の神経活動記録

A02成木・尾仲：セロトニン機能 – A03木村・疋田：ドーパミン機能

また、以下のように具体的な共同研究も進んでいる：

- A0 杉山は、A02 岩崎とコネクトーム画像解析に関する共同研究を行ない、情報理論に基づく新しい画像適応アルゴリズムを開発した。
- A01 杉山は、A01 岩橋と言語・動作によるコミュニケーションのための能動学習技術に関して、機械学習の立場から検討を行なった。
- A01 杉山は、A03 高橋のグループにて機械学習に関するチュートリアル講演を行い、精神・神経疾患患者のデータ解析に関する技術的な検討を行なった。
- A02 坂上らによる推移的推論と意思決定の脳神経科学的成果を基に、坂上と A01 岡田は、現代論理の推論理論の観点から意思決定と推論の脳内シミュレーションに関する共同研究を開始している。
- A02 小林らが開発した回路選択的な細胞操作とイメージングのためのウイルスベクターは、A02 坂上、銅谷ら複数のグループで新たな実験のための活用が進行中である。

### 3. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように進展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

「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を明らかにする」という高い目標に向け、各項目において以下のとおり予想以上の進展が見られた。

#### 研究項目 A01 行動と意思決定の計算理論

**目標：**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を明らかにする。

**進展状況：**領域の立上げにあたって、モデルとは何か、モデルベースとは何かという基本的な点から、異なる分野での言葉の違いを乗り越え共通理解を生むところからスタートした。哲学、心理学、工学それぞれの強みを生かした研究が進展している。

岡田らは、行動経済学の分野の Alais パラドクスなどの意思決定課題を用いた行動遺伝学—論理学融合研究手法を、双生児被験者（約500組1000人）に対して適用し調査を行った。その結果、これらの課題の意思決定には遺伝要因の関連性が高いことが明らかになり、特に Alais パラドクスで期待効用モデル通りの意思決定を行うかどうかと、論理推論能力、空間処理 IQ との間に高い遺伝的相関があることを明らかにした。この結果は、編集集中の国際ジャーナルの「意思決定」特集号で発表予定である。

言語はヒトのモデルベース意思決定において決定的に重要な役割を果たしている。今井らは言語獲得において、知覚経験を概念化し音声と対応づけるという多くの動物では不可能な学習が、なぜヒト乳児には可能なのか、という基本的な問題に対して、音の象徴性がその誘導に重要な役割を果たすという仮説のもとに乳児の脳波計測実験を行った。その結果、言語獲得前の乳児でも視覚パターンと音声の特徴が一致する場合と相反する場合には、誘発脳波に違いがあることを見だし、それが脳各部の間の情報伝達の違いとして現れるのかについて解析を進めている。また、事物から音声への写像を学習すると、音声から事物への写像も学習してしまうという「対称性推論」の特性を、ヒト乳児とチンパンジーに対して同一の刺激を用いた比較行動実験を行い、ヒト乳児に見られる対称性バイアスがチンパンジーでは見られないという画期的な結果を得ている。

杉山らは、予測と意思決定における特徴選択の問題に対して、その規模に応じて異なるアルゴリズムを開発し、それらの有効性を実証している。さらに、モデルベース意思決定におけるモデル学習のために、LSCDE という条件付き確率の効率良い推定手法を強化学習と組み合わせる手法の開発している。また研究分担者の森本らは実世界における高次元での時系列的な意思決定課題においてもロバストな学習を可能にするため、単純な行動系列をベースに効率良く学習を行う枠組みを定式化し、ヒューマノイドロボット制御においてその実用性を検証している。

柴田らは、世界でも稀な実証実験用民間経営店舗（大阪市の委託事業）において、顧客行動データ収集と解析、さらにロボットによる購買意思決定介入実験を行った。前者については例えばレーザーレンジファインダにより得られる客の動線データから、客の店内滞在時間がコンビニエンスストアに比べて非常に長いことや、ロボットを設置すると客の動線がロボットに偏ることが確認された。後者について土産屋という特性を生かしたロボットと一般客とのコミュニケーションにより、ロボットによる購買意思決定過程への介入効果を示した。具体的には、ロボットの前に売上ランキング1位と2位の商品を並べ、客が寄ってきた時に、「誰のために買うか」を質問し改めて客に土産対象者を意識させ、客の回答に関わらず売上2位の商品を音声と身振りで推薦することにより売上が逆転できた。大阪市の方針転換により実証実験店舗が閉店してしまった後も仮想店舗を構築し実験を続け、客の眼球運動や頭部運動から購買意思決定予測をオンライン予測できること、またロボットの介入のタイミングによりその効果が大きく変わるという結果を得ている。また島津製作所と協力して、実店舗における近赤外線脳活動計測（NIRS）と眼球運動計測を可能にする実験方法の開発を進めた。

公募研究で島田らは画像共有サイトに掲載されている撮影位置と時間のタグ付きの大量の写真のデータマイニングにより、観光客の散策行動のモデル化を行い、それをもとにスマートフォン用の観光案内アプリを作成した。今後長崎市と行う実証実験により新たなデータを収集し、観光における人の散策意思決定メカニズムの解明を進めるとともにアプリ使用満足度の向上を図る。また、柴田らと共同して、観光客の購買行動のデータ収集やモデル化も行い、観光における人の散策・購買意思決定メカニズムの解明を進めるとともにアプリ使用満足度の向上を図る。

ここまでの研究の展開は、実際の人間の意思決定のデータを集め解析するというボトムアップな手法が主要な部分をしめて来たが、今後、これまで得られたデータをもとにモデルフリー、モデルベースの意思決定の使い分け、組合わせに関する仮説を構築し、それを検証する研究へと繋げて行く予定である。

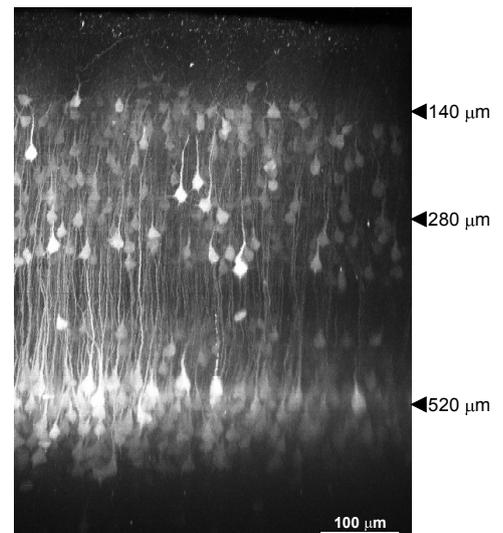
### 研究項目 A02 意思決定の神経回路機構

目標：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を明らかにする。

進展状況：サル、ネズミ、魚、昆虫まで、様々なモデル動物における神経回路の解剖学、活動記録と操作技術により、脳内シミュレーションとモデルベース意思決定に関わるニューロンとその回路機構の同定が進んでいる。

坂上らは、ニホンザルに6つの視覚刺激をA1、B1、CとA2、B2、C2の2つのグループ分けを学習させ、次に、C1はジュース報酬、C2は無報酬と連合させることにより、A1、A2と報酬、B1、B2と無報酬という関係を推論できるかを調べ、ニホンザルは推移的推論が可能であることを示した。さらに前頭前野外側部と大脳基底核線条体のニューロン活動を記録・解析した結果、前頭前野のニューロンは報酬とは直接連合されていない刺激に対しても推移的推論による報酬予測応答を示すのに対し、線条体ニューロンは刺激と報酬との連合を一度実際に経験した後でないと報酬予測応答を示さないことを発見した。これは、モデルベースの予測と意思決定に外側前頭前野が関与することを、単一ニューロン活動のレベルで明らかにした画期的な発見である。

銅谷と連携研究者の Kuhn らは、脳内シミュレーションの神経回路としての実体を明らかにするという目標に向け、二光子顕微鏡下のマウスの新たな行動実験パラダイムを開発し、その頭頂葉と運動前野から数十から百個以上のニューロンの活動を同時記録する実験系を新たに立ち上げた。マウスは頭部を固定したまま、空気圧により浮上するボールの上で自由に歩行運動ができ、その速度を計測することができる。マウスの周囲には12個のスピーカーが円形に配置され、仮想的な音源の方向と距離をコントロールすることができる。



二光子顕微鏡化での仮想音空間呈示装置

記録した頭頂葉ニューロンの3次元再構成

課題1では、音源は一定角速度でマウスのまわりを周回し、音源が正面に到達した時に水報酬が与えられる。

課題2では、マウスの前方への歩行運動に応じて仮想音源が近接し、最近接点で水報酬が得られる。それぞれの課題で、音は連続的に呈示する条件と間欠的に呈示する条件があり、間欠的な場合でもマウスは予測的なりッキング行動を行うことから、マウスは音源位置変化のモデルを学習し、それによる予測により早く確実に報酬を得る行動を行っていると考えられる。二光子イメージングでは、最新の光学系とカルシウム感受性蛍光タンパクを発現させるウイルスを用いて、約 500  $\mu$  m の深層のニューロン活動まで安定して記録できることを確認した。頭頂葉からの記録では、音源方向に選択的なニューロン活動が見つかっており、そのボトムアップの感覚入力と、内部モデルによる予測に応じた活動を解析中である。

岡本らは、これまで神経発生学分野で主に用いられて来たゼブラフィッシュをモデル動物として、独自の遺伝子改変技術を用いた神経活動のイメージングと制御の実験を展開している。2区画に仕切られた水槽において、赤色ランプが点灯してから15秒以内に別区画に移動すれば電気ショックを避けられるという能動的回避学習課題を確立した。さらに青色ランプに対しては同じ区画に留まるという応答を学習させ、それらにともなう神経活動を二光子顕微鏡により観察したところ、同じ区画に留まるという条件で、終脳のより広い範囲のニューロンが活動することを明らかにした。

公募研究の筒井は、坂上と同様な視覚カテゴリー弁別課題をサルに学習させ、報酬ありと報酬なしのカテゴリーを反転させた場合、たった1つの図形-報酬の関係の経験から、同カテゴリーと反対カテゴリーのすべての図形の報酬あり、なしを予測することが可能なことを示した。さらにこのモデルベースの推論にもとづく意思決定が、背外側前頭前野の反復磁気刺激 (rTMS) により阻害され、実際の報酬あり、なしの経験によるモデルフリー型の意思決定に変化することを示した。

これらの研究により、サルでは外側前頭前野がモデルベース意思決定に深く関わることが明らかになり、今後、大脳皮質の内部モデルとそれによる予測の神経回路機構を、ネズミや魚でのニューロンイメージングとも合わせて解明する予定である。

### 研究項目 A03 意思決定を制御する分子・遺伝子

**目標：**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を明らかにする。

**進展状況：**PETによるヒトの脳分子イメージング、サルにおける大脳基底核-ドーパミン系の神経活動記録、ネズミによる分子操作手法により、報酬と罰、強化と忌避、直感的判断と戦略的思考など、意思決定の計算要素とパラメタの制御の回路と物質機構の解明が進んでいる。

高橋らは、世界の先端を行く脳分子イメージング技術を行動経済学のパラダイムと統合することによりめざましい成果を上げている。利益と損失の双方の可能性がある判断をする場合に、多くの被験者は損失により大きな比重を置いて判断する損失忌避と呼ばれる傾向を示す。PETで脳内ノルアドレナリントランスポーターを定量し、行動実験で得られる損失忌避の程度との関連を調べたところ、視床のノルアドレナリントランスポーターの密度の低い人ほど損失忌避の程度が強くギャンブルに慎重であることを見出した (Takahashi et al *Mol Psychiatry* 2013)。また、不公平な分配に対して報復行為に出る行為は、これまで衝動的で攻撃的な人物が取るものと考えられていたが、行動経済学実験と心理指標の解析から、正直で他人を信頼しやすい人物ほど、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実証し、さらに、実直に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 (Takahashi et al *Proc Natl Acad Sci USA* 2012)。これは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。

高度な目標の達成に向けた意思決定においては長期的な報酬予測が重要であり、中脳ドーパミン細胞は複数ステップにわたる長期的な報酬予測を表現することを木村らは明らかにしているが、この長期的な報酬予測情報は線条体に投射され、長期的な価値判断と行動選択に利用されると考えられる。そこで3つの選択枝空の報酬探索課題中の線条体のニューロン活動を記録し解析した結果、行動選択の結果の長期的な良し悪しを表現す

るニューロンが全体の 1/3 と多数を占めることを明らかにした。

また研究分担者の春野らは、資源の分配行動における直観的な好みを反映するとされる **Social Value Orientation(SVO)**が、トップダウンな戦略的思考とどのように統合されるかを、記憶負荷を課したもとの資源分配課題の fMRI 実験により検討した。分配の公平性を考慮する **prosocial** グループは記憶負荷条件で拒否率がより高く、自らの報酬のみを気にする **individualist** グループは拒否率がより低かった。分の報酬と他者の報酬の差に対する脳活動は、記憶負荷条件では両被験者グループ間に有意な差が扁桃体と腹側線条体で見られたのに対し、記憶無負荷条件ではこの差が減少した。これらの観察は **SVO** を反映するボトムアップな社会的意思決定において腹側線条体が重要な役割を果たすことを示唆するものであり、今後サルを対象とする神経回路基盤研究との連携によって、扁桃体、腹側線条体、中脳ドーパミン系の回路機構を明らかにする。

足田らは、報酬学習とその柔軟性における大脳基底核の直接路、間接路の回路と物質機構を、可逆的神経伝達阻止(RNB)法により調べた(Yawata et al., PNAS 2012)。十字迷路での報酬到達学習で、第一課題では間接路遮断マウスは野生型マウスと同様に学習したが、直接路遮断は学習遅延を引き起こした。第一課題で報酬学習が成立した後に、第二課題として反転課題を行うと、野生型マウスと直接路遮断マウスは数回で反対側の B のアームへ進入を試みる柔軟性が見られたが、間接路遮断マウスは前課題のゴールへの固執による学習遅延が観察された。さらに、直接路遮断と **D1** アンタゴニストの組み合わせでは特異的に十字迷路課題の学習遅延が見られ、間接路遮断と **D2** アゴニストの組み合わせでは特異的に逆転学習課題における柔軟性の低下を認めた。これらの結果は、意思決定行動における報酬からの学習と無報酬に対する柔軟な対応においてもドーパミンによる直接路と間接路のスイッチング機構に支配されていることを示している。

今後、項目 A02 でセロトニンニューロン選択的光刺激実験を行う大村、銅谷らとも連携し、ドーパミン、セロトニン等が意思決定のパラメタと戦略にいかに関わるかをより具体的に明らかにしていく予定である。

#### 4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

1. 第3回の領域会議から、その初日に公開チュートリアルを開催した：

第3回領域会議：モデルベースとモデルフリーの意思決定（2012.6.16玉川大学）

第4回領域会議：脳画像研究の基礎から先端まで（2012.11.16 京都大学）

第5回領域会議：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（2013.6.7 慶應大）

これらの公開チュートリアルには、領域内のメンバーだけでなく、予測と意思決定に関連する研究に興味を持つ幅広い若手研究者が参加した。

2. 第4回領域会議では、半日をテーマ別の分科会として、以下のテーマで若手もシニアな研究者も入り交じって忌憚のない議論と質疑応答の機会を持った：1) 報酬とは、モデルベースとは。2) モデル化と統計解析手法。3) 神経回路の可視化と操作。

3. 各分野のチュートリアルコースを後援、協賛、領域メンバーがオーガナイズを行った：

Machine Learning Summer School（2012.8.27-9.7 京都大学）オーガナイザー：杉山。講師：杉山，銅谷。

Autumn School for Computational Neuroscience (ASCONE, 2012)：報酬とは（2012.11.23-26 諏訪）：オーガナイザー：鮫島。講師：高橋，銅谷。

認知科学会サマースクール：知識の表象（2012.9.4-6 箱根湯本）オーガナイザー：今井。講師：安西，銅谷。

4. 領域の研究者は国内外のチュートリアルコースや集中講義に積極的に講師として出向き、若手の育成にとめた：

Doya K (2012) Reinforcement learning in robots and the brain. IEEE Computational Intelligence Society Chapter Hyderabad Section, Hyderabad, India, 2012.12.21.

Doya K (2012) Reinforcement learning and science of mind. Tamagawa University Global COE Program Open Symposium, Tamagawa University, Tokyo, 2012.12.16.

Doya K (2012) Neural networks for reinforcement learning. Graduate School of Biostudies, Kyoto University Advanced Course in Multicellular Network, 2012.10.30.

Doya K (2012) Neural computation of reinforcement learning. 名古屋大学グローバルCOE第7回ベーシックサイエンスコース, 2012年11月8日.

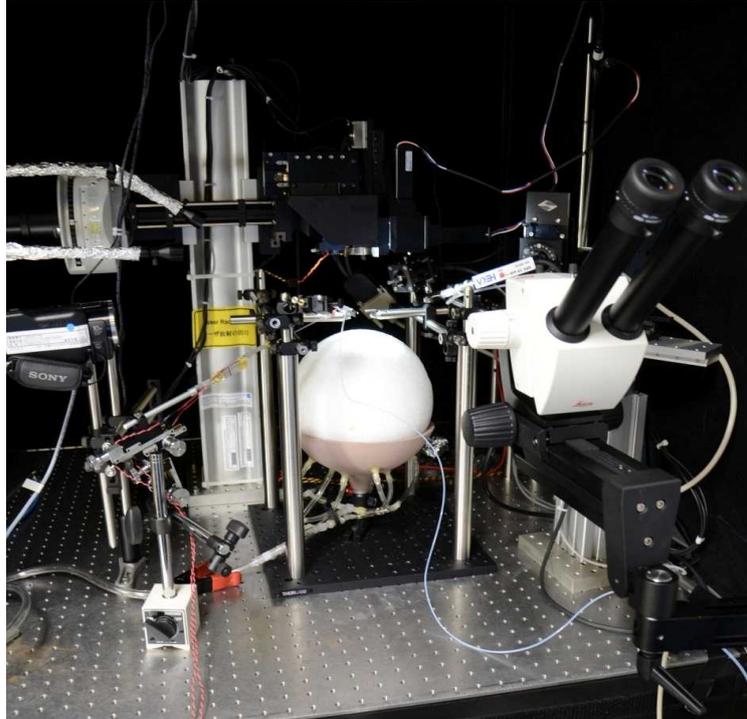
Doya K (2012) Neural mechanisms of reinforcement learning. McGovern Institute of Brain Research, Peking University, Beijing China, 2012.7.19-25.

Doya K (2013) Reinforcement learning algorithm and its neural mechanism. 多次元共同脳科学推進センタートレーニング&レクチャー, NIPS, Okazaki, Aichi, 2013.3.14. (Invited, Lecture, NIPS Center for Multidisciplinary Brain Research Training and Lecture: Doya2013NIPS)

## 5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

初年度の計画研究では、先端的な研究装置の導入に予算を活用することができた。特に銅谷のグループでは、連携研究者の Kuhn の持つ技術により新たな二光子顕微鏡をカスタムに組み上げ、既製品に比べればはるかに少ない費用で、高性能かつ行動中のマウスのニューロン活動記録に最適なシステムを構築することができた。



新たに構築した行動中のマウスのための二光子顕微鏡システム

総括班では、主催、後援する企画に予測と意思決定の分野で世界の先端を行く研究者を招聘し、この領域の研究の引き上げと世界的なネットワーク作りに貢献している：

日本神経回路学会第21 回全国大会（2011. 12. 15-17 沖縄科学技術大学院大学）

Dr. Peter Dayan 招待講演

脳と心のメカニズム第12 回冬のワークショップ（2012. 1. 16-18 ルスツリゾート）

Dr. Rajesh Rao 招待講演

合同シンポジウム：意思決定とコミュニケーションの脳ダイナミクスと相互作用（2012. 7. 27 仙台国際センター）

Dr. Nathaniel Daw 招待講演

脳と心のメカニズム第13 回冬のワークショップ（2013. 1. 9-11 ルスツリゾート）

Dr. Kent Berridge 招待講演

## 6. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班アドバイザー委員3名に当報告書のドラフトを査読いただき、以下のコメントを頂いた。これらの貴重なコメントをもとに、今後さらに領域研究者の間の連携を強化し、予測と意思決定の神経回路としての実体を明らかにするという目標の達成に力を入れて行く予定である。

### 丹治順（東北大学包括的脳科学研究・教育推進センター センター顧問）

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。この領域において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するものである。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に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、この領域研究グループは計算論、システム脳科学、分子脳科学およびヒトの精神機能解析の側面から統合的にアプローチをし、それぞれの切り口からすでに見るべき研究成果を挙げつつある。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霊長類動物とヒトの両方において得られている。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、領域研究は当初の目標に向け適切な研究プロジェクトの総合体としてスタートを切り、順調に進捗し始めている。また、若手研究者の育成に注力するなど、将来を見据えた研究基盤の形成にも努力がみられる。

今後は、異分野の研究者間の共同研究をもっと促進し、新たな次元の研究創生に向けて多面的なアプローチの有機的な統合の具体例を増やすことが望ましい。他方、予測と意思決定の両方に関し、従来の発想を超えた新たな理論的モデルの提唱とその検証方向を探求することが望まれる。また、人の精神機能の多面性と奥の深さを考慮し、人間理解への挑戦をより進めるための意欲的取り組みを望みたい。

### 津本忠治（理化学研究所脳科学総合研究センター・副センター長）

ヒトの意志決定メカニズム、特にその脳内メカニズム、は近年まで科学的に解明しがたい研究対象とわかってきた。ところが最近の脳科学、行動科学や数理科学の発展によって科学的にアプローチできる対象となってきた。このような認識のもとに本研究領域が発足したと思われるが、その特徴は、精神医学、発達心理学などのヒトにおける研究、ロボット工学、機械学習などの工学的研究、論理学などの理論的研究、昆虫、魚類、齧歯類から非ヒト霊長類における動物実験的研究までの幅広い研究者が、「予測と意志決定」という共通のテーマのもとにアイデアや意見を密接に交換しながら研究を進めている点にある。

研究の中核を担う研究計画班員はそれぞれ独自の背景と方法論を持っており、発足当初は計画班員間の連携は必ずしも容易ではなかったが、この問題と思われた点を克服するため適切な公募班員を加入させることによって共同研究を発展させることに成功しているようにみえる。例えば、A01 計画研究の杉山将班員は公募研究の岩崎広英班員とコネクトーム画像解析に関する共同研究を実施し、情報理論に基づく新しい画像適合アルゴリズムの開発に成功した。また、坂上雅道計画班員や銅谷賢治計画班員のサルやマウスを使った研究に小林和人公募班員が開発した分子生物学的方法の適用が試みられている。その他にも公募研究と計画研究の連

携によって共同研究が成功しつつある例が多数みられる。

本研究領域は未だ発足2年であるが、極めて多数の論文や学会発表がなされており、十分な成果があたりつつあるように思われる。今後は、多様な計画研究班員間の連携や共同研究を一層促進するための工夫と新たな公募にあたって計画研究班員間の連携をさらに強化できる公募班員や手薄な部分を補強できる公募班員の採択が望まれる。

#### 川人光男（ATR 脳情報通信総合研究所・所長）

本領域は、代表者の計算理論（モデルフリー対モデルベース強化学習）にガイドされたいくつかの重要で困難な研究課題を、工学、心理学、神経科学さらには臨床精神医学の研究者の総力をあわせて解決しようとする、挑戦的な試みが中心と言える。モデルフリー対モデルベースの使い分けを主な課題とする A01 研究項目ではないが、A02 中での Pan & Sakagami(2012) Eur. J Neurosci が、前頭前野外側部が推移的推論に対応した報酬予測ができるのに対して、大脳基底核線条体にはそのような能力がないことを示しているのは、大きな発見と言える。また研究項目 A03 中で、Takahashi H et al. (2012) PNAS が、不公平、正直、義憤とセロトニントランスポーターの密度の関係を明らかにし、意志決定を制御する分子・遺伝子について、大きな成果を挙げている。研究開始から3年目に入ったところで、特に動物実験に関しては時間がかかることは理解しているが、A02 の目的であるニューロン回路のどのようなダイナミクスによって脳内シミュレーション、価値評価、行動選択が実現されるのかを明らかにするのは、極めて困難と思われる。1点の光でも差せば、大成功と言えるだろう。それに向けての準備は十分なされているとは評価できるが、最後の天才的な1滴のアイデアを必要とする予感がする。

## 7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

### 研究項目 A01 行動と意思決定の計算理論

#### <計画研究>

Mineshima K, Okada M, Takemura R (2012) A diagrammatic inference system with Euler circles. *Journal of Logic, Language and Information*, 21, 3, 365-391.

Mineshima K, Sato Y, Takemura R, Okada M (2012) On the cognitive efficacy of Euler diagrams in syllogistic reasoning: A relational perspective. *Proceedings of the 3rd international workshop on Euler diagrams (Euler diagrams 2012)*, CEUR Workshop Proceedings, 854, 17-31. (Best Paper Award)

グラフィック論理推論の理論モデルを構築し、これを認知実験および fMRI 脳画像研究を通じて検証した。成人と小学生児童を被験者として、それぞれの Euler 図型グラフィック推論の認知プロセス的特徴を明らかにした。さらにこの論文の成果に基づいて、グラフィックな表現のデザインの違いが意思決定及び意味把握に与える影響をアイトラッカーを用いて調査し、多属性マトリクス（商品の仕様比較カタログ）を用いて、文字テキスト表と、表現方法の異なるシンボリックな絵的表示の場合で（論理的には同値であるにも関わらず）意思決定が異なること、およびその特徴を明らかにした。

Jitkrittum W, Hachiya H, Sugiyama M (2013) Feature selection via L1-penalized squared-loss mutual information. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E95-D, 7. (reviewed)

比較的小規模のデータからの予測・意思決定問題に対して効率良い RSMI (Relative Squared-loss Mutual Information) の情報量概念による特徴選択法と、大規模の予測・意思決定に対してヒルベルト・シュミット独立性規準 (Hilbert-Schmidt Independence Criterion; HSIC) の意味で最も重要な特徴を選択する特徴重みのスパース学習アルゴリズムである HSIC-LASSO を開発している。これら二つの手法を統合し、二乗損失相互情報量 SMI と特徴重みスパース学習を組み合わせた新しいタイプの特徴選択アルゴリズム L1-LSMI を開発した。計算機実験によりデータ数が限られた状況でも精度良く特徴選択を行うことができることを確認した。

#### <公募研究>

Ishibuchi H, Hoshino K, Nojima Y (2012) Evolution of strategies in a spatial IPD game with a number of different representation schemes. *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. Brisbane Convention Centre, Brisbane, Australia. (June, 10-15, 2012)

繰り返し四人のジレンマゲーム (IPD) を行う進化エージェントの集団において、対戦と交配の局所性と大域性が、行動選択の誤りが確率的に発生する状況での協力的な戦略の安定性にどのような影響を及ぼすかを大規模シミュレーションにより解析した。その結果、スモールワールド的な制限された相互作用のもとで協力的な戦略が安定に進化するという新たな知見を得た。

Terasawa Y, Fukushima H, Umeda S (2013) How does interoceptive awareness interact with the subjective experience of emotion? An fMRI study. *Hum Brain Mapp*, 34, 3, 598-612.

Terasawa Y, Shibata M, Moriguchi Y, Umeda S (2013) Anterior insular cortex mediates bodily sensibility and social anxiety. *Soc Cogn Affect Neurosci*, 8, 3, 259-266.

意思決定において身体感覚と感情がどのような役割を果たすかという問題設定で心理、生理、fMRI 実験を行った。その結果、身体感覚と感情認知の両課題に共通して、島皮質前部と腹内側前頭前野が強く関与することを明らかにした。また、島皮質前部の活動は社会的不安の指標とも有意に相関しており、身体感覚に強く関与する左

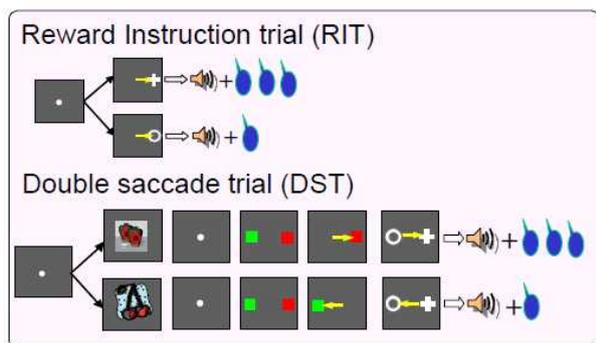
視床の活動が原因となり、島皮質の活動を仲介して、不安のレベルに影響することが示された。

## 研究項目 A02 意思決定の神経回路機構

<計画研究>

Pan X, Sakagami M (2012) Category representation and generalization in the prefrontal cortex. *Eur J Neurosci*, 35, 7, 1083-1091.

推論課題を訓練したニホンザルの前頭前野側部と大脳基底核線条体にそれぞれ単一ニューロン記録用電極を刺入し、課題遂行中の神経活動を記録・解析した。この課題では、6つの視覚刺激を2つのグループに分け、まず、それぞれの関係を学習させる（A1、B1、C1によるグループとA2、B2、C2のグループ）。次に、C1とC2を使ってグループとジュース報酬の関係を教え、A1、A2、B1、B2と報酬との関係を推測させる。さらに、新たな刺激（たとえばN1とN2）を導入し、B1とB2を使って新しい刺激がどちらのグループに属するかを教える。上述のようにC1とC2の報酬情報から、新しい刺激による報酬予測ができるかどうかを調べた（新しい刺激は毎日新たに導入される）（図1）。



Example of new stimulus pair used in a block

Trial order	T1	T2	T3	T4	T5	...
New stimuli						...
	N1	N1	N2	N1	N2	

図1. 推論課題

2-3の報酬インストラクション（RIT）試行の後、8-10のダブルサッケード（DST）試行が続く。セッションごとに新しい刺激ペアが導入され、DSTではじめて導入される前は、新しい刺激は色の刺激との関係だけを、あらかじめ教えられている。

新しい刺激を使った実験でも、サルの行動にも前頭前野側部（PFC）のニューロンの活動にも、直接経験なしに報酬を予測していることが確認された。しかし、大脳基底核線条体（STR）のニューロンは、報酬との関係を直接経験した刺激については報酬予測活動を示すが、新たに導入した刺激がはじめて使われた時は、その時に限り報酬予測活動は示さなかった。このことから、前頭前野側部は、直接経験がなくても、経験した刺激と刺激、刺激と報酬の関係から報酬を予測することができる（推移的推論）が、大脳基底核線条体には、このような報酬予測能力はないということがわかった。

Aoki T, Kinoshita M, Aoki R, Agetsuma M, Aizawa H, Yamazaki M, Takahoko M, Amo R, Arata A, Higashijima SI, Tsuboi T, Okamoto H (2013) Imaging of neural ensemble for the retrieval of a learned behavioral program. *Neuron*, 78, 881-894. (reviewed)

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2）。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。この実験結果により、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。

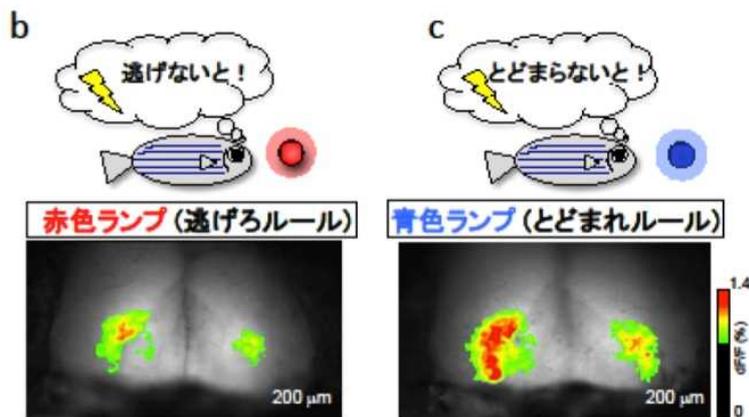


図2 2つのルールの学習に応じた神経活動の可視化

<公募研究>

Komura Y, Nikkuni A, Hirashima N, Uetake T, Miyamoto A (2013) Responses of pulvinar neurons reflect a subject's confidence in visual categorization. *Nat Neurosci*, 16, 6, 749-755.

(News & Views で紹介, F1000 prime に指定) 赤と緑のランダムドットのどちらかの色に着目し、その運動方向に応じてバーを押すという課題を実行中のサル視床枕(pulvinar)のニューロンの活動を記録した。刺激が曖昧な条件では、刺激から約 160ms 以降のニューロン活動が低く、判断に自信のない時には3つ目のレバーを押し少ないが確実な報酬を得る「判断回避」オプションを与えた場合、物理的刺激は同じでも、判断回避を選んだ試行では視床枕ニューロンの活動は有意に低かった。さらにこの部位の神経活動を薬理的にブロックしたところ、判断回避の選択が増加した。以上から、視床枕の活動が視覚刺激識別の確信度に影響することが明らかになった。

研究項目 A03 意思決定を制御する分子・遺伝

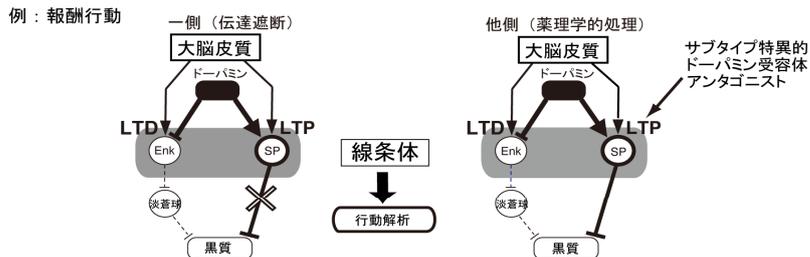
<計画研究>

Takahashi H, Takano H, Camerer CF, 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, Suhara T (2012) Honesty mediates the relationship between serotonin and reaction to unfairness. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109, 11, 4281-4284.

不公平に対して私たちはどういう行動をとるかという古くから哲学、心理学、経済学、法学、政治学、生物学など多くの学問領域で扱われてきた問題に対して、健常者を対象にお金を分配する経済ゲームと PET と性格検査を用いた研究を行った。従来、不公平な分配に対して衝動的で攻撃的な人物が報復行為に出ると考えられていたが、正直で他人を信頼しやすい一見、平和的な人物が、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を経済実験で実証した。正直に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に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。

Hikida T, Yawata S, Danjo T, Sasaoka T, Wang Y, Nakanishi S (2013) Pathway-specific modulation of nucleus accumbens in reward and aversive behavior via selective transmitter receptors. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, 5. 図3 生体薬理工学による神経回路の伝達機構の解析

一側の側坐核に可逆的神経伝達法を導入し、直接路あるいは間接路の神経伝達を遮断したマウスの他側の側坐核に神経伝達物質受容体アゴニスト、アンタゴニストを注入し、報酬行動及び忌避行動を観察した(図3)。報酬行動試験である条件付け場所嗜好性試



研究方法

1. 一側の直接路或は間接路の伝達遮断
2. 他側の基底核、大脳皮質、海馬体或いは扁桃体に伝達物質のアゴニスト、アンタゴニストの注入
3. 行動学的解析(報酬、忌避、選択等)

↓  
神経回路間の結合と伝達機構の解明

験において、3日間のチョコレートによる場所条件付けの際に予めカニューラから薬物投与を行うと、片側直接路遮断(D-aRNB)とドーパミン D1 アンタゴニストである SCH23390 の投与の組み合わせでのみ、両側直接路遮断と同等の場所嗜好性の抑制が見られた。この結果から、報酬行動において直接路の D1 受容体の活性化が必須であることを示した。次に、忌避行動を一試行による抑制性回避試験で測定した。電気ショックによる条件付けの直前に薬剤投与を行うと、片側間接路遮断(I-aRNB)と D2 アゴニストである quinpirole あるいは aripiprazole の組み合わせでのみ、両側間接路遮断と同等の忌避行動の抑制が観測された。この結果は忌避行動において間接路の D2 受容体の不活性化が重要であることを示す。抑制性 D2 受容体の不活性化は間接路細胞のグルタミン酸伝達において長期増強(LTP)を誘導することが知られている。そこで、間接路の神経可塑性に重要な受容体群である NMDA 受容体、アデノシン A2a 受容体、カンナビノイド CB1 受容体の関与を調べたところ、間接路細胞の長期増強を引き起こす NMDA 受容体と A2a 受容体の活性化および CB1 受容体の不活性化が、忌避行動に必須であることが分かった。以上の結果から、一連の神経伝達物質による直接路あるいは間接路に特異的な可塑性の変化が報酬・忌避行動の成立に関与していることを示した。

#### <公募研究>

Yamashita M, Takayanagi Y, Yoshida M, Nishimori K, Kusama M, Onaka T (2013) Involvement of prolactin-releasing peptide in the activation of oxytocin neurones in response to food intake. *J Neuroendocrinol*, 25, 5, 455-465.

オキシトシンは社会的な信頼を促進し、不安や摂食行動を抑える働きがあり、その賦活と作用の神経回路の同定は重要である。本研究は、摂食により活性化されるプロラクチン放出ペプチド (PrRP) ニューロンがオキシトシンニューロンの活性化に関わるかを検証した。まず解剖学的研究により、視床下部のオキシトシンニューロンに PrRP レセプターが発現していることを明らかにし、そこでは PrRP の投与によりオキシトシンの放出が高まることを明らかにした。さらに PrRP 欠損マウスでは摂食によるオキシトシンニューロンの活性化が阻害され、オキシトシン受容体欠損マウスでは PrRP 欠損マウスと同様に一回の摂食量の増加することを明らかにした。この結果は、PrRP-オキシトシンの経路が、いつ食餌をやめるかという意思決定に関わっていることを示唆している。

## 8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に\*印を付してください。また、一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

### 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

<論文>

- \*Kaneko M, Mitra A (2011) Discrimination in festival games with limited observability and accessibility. *Mathematical Social Sciences*, 62, 1, 34-45.
- \*Shikishima C, Yamagata S, Hiraishi K, Sugimoto Y, Murayama K, Ando J (2011) A simple syllogism-solving test: Empirical findings and implications for g research. *Intelligence*, 39, 2, 89-99.
- \*Yamada T (2011) Austin and the logical dynamics of illocutionary acts".
- \*敷島千鶴, 平石界, 山形伸二, 安藤寿康 (2011) 共感性形成要因の検討：遺伝・環境交互作用モデルを用いて. *社会心理学研究*, 26, 3, 188-201. (第13回日本社会心理学会奨励論文賞受賞)
- \*Mineshima K, Okada M, Takemura R (2012) A diagrammatic inference system with Euler circles. *Journal of Logic, Language and Information*, 21, 3, 365-391.
- Yu CC, Furukawa M, Kobayashi K, \*Shikishima C, Cha PC, Sese J, Sugawara H, Iwamoto K, Kato T, Ando J, Toda T (2012) Genome-wide DNA methylation and gene expression analyses of monozygotic twins discordant for intelligence levels. *PLoS One*, 7, 10, e47081.
- \*Kaneko M, Kline JJ (2013) Partial memories, inductively derived views, and their interactions with behavior. *Economic Theory*, 53, 27-59.
- \*Shimajima A, Katagiri Y (2013) An eye-tracking study of exploitations of spatial constraints in diagrammatic reasoning. *Cognitive Science*, 37, 2, 211-254.

<学会発表>

- Mineshima K, Sato Y, Takemura R, Okada M (2012) On the cognitive efficacy of Euler diagrams in syllogistic reasoning: A relational perspective. *Proceedings of the 3rd international workshop on Euler diagrams (Euler diagrams 2012), CEUR Workshop Proceedings*, 854, 17-31.

#### 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

<論文>

- \*Kantartzis K, Imai M, Kita S (2011) Japanese sound symbolism facilitates word learning in English speaking children. *Cognitive Science*, 35, 575-586.
- \*Nakamura T, Sugiura K, Nagai T, Iwahashi N, Toda T, Okada H, Omori T (2011) Learning novel objects for extended mobile manipulation. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 66, 1-2, 18. (reviewed)
- \*Saalbach H, Imai M, Shalk L (2012) Grammatical gender and inferences about biological properties in German-speaking children. *Cognitive Science*, 36, 1251-1267.

<学会発表>

- Imai M, Asano M, Miyazaki M, Okada H, Yeung H, Kitajo K, Thierry G, Kita S (2012) Sound symbolism helps infants' word learning. the 9th International Conference on the Evolution of Language (EVOLANG). Kyoto, Japan. (oral)
- Kitajo K, Asano M, Thierry G, Kita S, Okada H, Imai M (2012) Large-scale phase synchrony of brain activity in preverbal infants detecting sound symbolism. the 19th Annual Cognitive Neuroscience Society (CNS) Meeting. Chicago, USA. (Poster)
- Miyazaki M, Imai M, Kita S, Yeung H, Okada H (2012) Sound symbolism scaffolds word-objects mapping in 14-month-olds. 2012 International Conference on Infant Studies (ICIS). Minneapolis, USA. (poster)
- 今井むつみ (2012) 音象徴の心と脳のメカニズム. 日本言語科学会. 名古屋. (招待講演)

<書籍>

- 今井むつみ (2013) ことばの発達の謎を解く. 筑摩書房, 東京.
- 松井智子 (2013) 子どものうそ 大人の皮肉—ことばのおモテとウラがわかるには. 岩波書店, 東京.

#### 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

<論文>

- Kurihara N, \*Sugiyama M (2012) Improving importance estimation in pool-based batch active learning for approximate linear regression. *Neural Networks*, 36, 73-82. (reviewed)
- Sugimoto N, \*Morimoto J, Hyon SH, Kawato M (2012) The eMOSAIC model for humanoid robot control.

- Neural Networks, 29-30, 8-19. (reviewed)
- Jitkrittum W, Hachiya H, \*Sugiyama M (2013) Feature selection via L1-penalized squared-loss mutual information. IEICE Transactions on Information and Systems, E95-D, 7. (reviewed)
- Nakajima S, \*Sugiyama M, Babacan D, Tomioaka R (2013) Global analytic solution of fully-observed variational bayesian matrix factorization. Journal of Machine Learning Research, 14, Jan., 1-37. (reviewed)
- Xie N, Hachiya H, \*Sugiyama M (2013) Artist agent: A reinforcement learning approach to automatic stroke generation in oriental ink painting. IEICE Transactions on Information and Systems, E95-D, 5, 1134-1144. (reviewed)
- Zhao T, Hachiya H, Tangkaratt V, Morimoto J, \*Sugiyama M (2013) Efficient sample reuse in policy gradients with parameter-based exploration. Neural Computation, 25, 6, 1512-1547. (reviewed)
- <学会発表>
- Takeuchi I, Sugiyama M (2011) Target neighbor consistent feature weighting for nearest neighbor classification. Neural Information Processing Systems, 576-584. Granada, Spain. (poster)
- Zhao T, Hachiya H, Niu G, Sugiyama M (2011) Analysis and improvement of policy gradient estimation. Neural Information Processing Systems, 262-270. Granada, Spain. (poster)
- A01-4 柴田智広：実店舗での購買意思決定過程
- <特許>
- 船谷浩之, 中村彰宏, 柴田智広 (2012) 動体の3次元運動測定装置及び測定方法. 特願 2012-203488 14/9/2012.
- <論文>
- 柴田智広, 船谷浩之, 中村彰宏, 大林千尋 (2012) Kinect とフリーなライブラリによるルンバの制御と2Dゲームの製作. インターフェース, 2012年1月号, 5.
- 船谷浩之, 中村彰宏, 柴田智広 (2012) 赤外線パターン投射式深度センサの光学系調整. 映像情報 Industrial, 2012年12月号, 7.
- 柴田智広 (in press) 購買意思決定過程の測る化 —ニューロエコノミクスからニューロマーケティングへ—. 電子情報学会通信学会誌.
- <学会発表>
- Funaya H, Shibata T, Wada Y, Yamanaka T (2013) Accuracy assessment of kinect body tracker in instant posturography for balance disorders. 2013 7th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT), 214-218.
- 中村彰宏, 船谷浩之, 柴田智広 (2013) 赤外線深度センサを用いたマウスの自然な歩行解析システムの開発. 第60回日本実験動物学会総会, 121.
- 公募研究 A01 峯松信明: 音声の構造的表象に基づく幼児の単語獲得過程の構成論的シミュレーション
- <論文>
- Shimizu S, Suzuki M, \*Minematsu N, Hirose K (2012) An experimental study on dynamic features of speech structure. Journal of Signal Processing, 16, 4, 319-322. (学生論文賞受賞)
- <学会発表>
- Suzuki M, Kurata G, Nishimura M, Minematsu N (2012) Discriminative reranking for lvcsr leveraging invariant structure. Interspeech 2012. Portland, Oregon, USA, Sep. 2012.
- 鈴木雅之, 倉田岳人, 西村雅史, 峯松信明, 広瀬啓吉 (2012) 音声の構造的表象を用いた大語彙音声認識の識別的リランキング. 日本音響学会秋季講演, 63-66. Nagano, Japan, Sep. 2012. (栗屋潔学術奨励賞)
- 公募研究 A01 島田敬士: 散策行動における意思決定アフェクタの可視化に関する研究
- <論文>
- \*Atsushi S, Vincent C, Hajime N, Rin-ichiro T (2013) Geolocation based landmark detection and annotation -towards clickable real world-. IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, 133, 1, 142-149. (reviewed)
- <学会発表>
- 田代浩平, 島田敬士, 長原一, 谷口倫一郎 (2012) 位置情報画像を利用した観光スポット間のリンク解析. 電気関係学会九州支部連合大会, 09-02P-14. 長崎市.
- 公募研究 A01 石淵久生: 複雑性の異なる多数の意思決定戦略が混在する状況でのゲーム戦略の進化
- <論文>
- \*Fazzolari M, Alcalá R, Nojima Y, Ishibuchi H, Herrera F (2013) A review of the application of multiobjective evolutionary fuzzy systems: Current status and further directions. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 21, 1, 45-65.
- \*Ishibuchi H, Mihara S, Nojima Y (2013) Parallel distributed hybrid fuzzy GBML models with rule set migration and training data rotation. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 21, 2, 355-368.

<学会発表>

Ishibuchi H, Hoshino K, Nojima Y (2012) Evolution of strategies in a spatial IPD game with a number of different representation schemes. 2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC). Brisbane Convention Centre, Brisbane, Australia. (June, 10-15, 2012)

公募研究 A01 梅田聡：予測と意思決定に及ぼす自律神経活動の役割：認知神経科学と心身医学の融合

<論文>

Takahata K, \*Takahashi H, Maeda T, Umeda S, Suhara T, Mimura M, Kato M (2012) It's not my fault:

Postdictive modulation of intentional binding by monetary gains and losses. PLoS One, 7, 12, e53421.

\*Terasawa Y, Fukushima H, Umeda S (2013) How does interoceptive awareness interact with the subjective experience of emotion? An fMRI study. Hum Brain Mapp, 34, 3, 598-612.

\*Terasawa Y, Shibata M, Moriguchi Y, Umeda S (2013) Anterior insular cortex mediates bodily sensibility and social anxiety. Soc Cogn Affect Neurosci, 8, 3, 259-266.

公募研究 A01 内部英治：モデルベース予測状態フィードバックを組み込んだ強化学習

<論文>

\*Kinjo K, Uchibe E, Doya K (2013) Evaluation of linearly solvable markov decision process with dynamic model learning in a mobile robot navigation task. Frontiers in Neurorobotics, 7. (reviewed)

**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

<論文>

Takemura H, Samejima K, Vogels R, Sakagami M, \*Okuda J (2011) Stimulus-dependent adjustment of reward prediction error in the midbrain. PLoS One, 6, 12, e28337. (reviewed)

Pan X, \*Sakagami M (2012) Category representation and generalization in the prefrontal cortex. Eur J Neurosci, 35, 7, 1083-1091. (reviewed)

Yotsumoto Y, Seitz AR, Shimojo S, Sakagami M, Watanabe T, \*Sasaki Y (2012) Performance dip in motor response induced by task-irrelevant weaker coherent visual motion signals. Cereb Cortex, 22, 8, 1887-1893. (reviewed)

<書籍>

Yamamoto M, Pan X, Nomoto K, Sakagami M (2011) Multiple neural circuits in value-based decision-making. Attention and Performance, XXII.

<学会発表>

Sakagami M, Fan H, Pan X (2012) Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons. Carmona, Sevilla, Spain, Sep. 3-6, 2012. (oral Dynamic Brain Forum 2012)

坂上雅道 (2012) 予測と創造—モデルベース的意思決定プロセスの基礎—. 第76回日本心理学会大会, 専修大学, 川崎市, 2012.9.11-13.

Sakagami M (2012) Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons, Annual Conference on Neuroeconomics: Decision Making and the Brain, Ritz-Carlton Key Biscayne, Florida, Miami, 2012.9.29.

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

<論文>

Funamizu A, Ito M, Doya K, Kanzaki R, \*Takahashi H (2012) Uncertainty in action-value estimation affects both action choice and learning rate of the choice behaviors of rats (English). European Journal of Neuroscience, 35, 1180-1189.

\*Miyazaki K, Miyazaki KW, Doya K (2012) The Role of Serotonin in the Regulation of Patience and Impulsivity. Molecular Neurobiology, 45, 213-224.

\*Miyazaki KW, Miyazaki K, \*Doya K (2012) Activation of Dorsal Raphe Serotonin Neurons Is Necessary for Waiting for Delayed Rewards (English). The Journal of Neuroscience, 32, 10451-10457.

Sugimoto N, Haruno M, Doya K, Kawato M (2012) MOSAIC for Multiple-Reward Environments. Neural Comput., 24, 29. (reviewed)

<学会発表>

Doya K (2012) モデルフリーとモデルベースの強化学習. 第76回日本心理学会大会, 専修大学, 川崎市, 2012.9.11-13.

Doya K (2012) Multiple strategies for decision making. SBDM 2012: Second Symposium on Biology of Decision Making. Paris, France, 2012.5.10. (Invited lecture)

Funamizu A, Kuhn B, Doya K (2013) Investigation of neuronal activity in secondary motor cortex by two-photon microscopy. 脳と心のメカニズム第13回冬のワークショップ. ルスツ, 2013.01.09-11. (Poster)

A02-3 岡本仁：意思決定神経回路の可視化と操作

<論文>

- Aizawa H, Kobayashi M, Tanaka S, Fukai T, \*Okamoto H (2012) Molecular characterization of the subnuclei in rat habenula. *J Comp Neurol*, 520, 18, 4051-4066. (reviewed)
- \*Okamoto H, Agetsuma M, Aizawa H (2012) Genetic dissection of the zebrafish habenula, a possible switching board for selection of behavioral strategy to cope with fear and anxiety. *Dev Neurobiol*, 72, 3, 386-394. (reviewed)
- Aizawa H, Yanagihara S, Kobayashi M, Niisato K, Takekawa T, Harukuni R, McHugh TJ, Fukai T, Isomura Y, \*Okamoto H (2013) The synchronous activity of lateral habenular neurons is essential for regulating hippocampal theta oscillation. *J Neurosci*, 33, 20, 8909-8921. (reviewed)
- Aoki T, Kinoshita M, Aoki R, Agetsuma M, Aizawa H, Yamazaki M, Takahoko M, Amo R, Arata A, Higashijima SI, Tsuboi T, \*Okamoto H (2013) Imaging of neural ensemble for the retrieval of a learned behavioral program. *Neuron*. (reviewed)
- \*Okamoto H, Aizawa H (2013) Fear and anxiety regulation by conserved affective circuits. *Neuron*, 78, 3, 411-413. (reviewed)
- <学会発表>
- Okamoto H (2011) Habenula as the multimodal switching board for controlling behaviours. 8th International Congress of Comparative Physiology and Biochemistry (ICCPB2011). Nagoya, Japan. (Invited Lecture)
- Okamoto H (2013) Habenula as a gate switch of emotion. Francis Crick symposium on Neuroscience : The changing brain. Suzhou, China. (Invited lecture)
- 公募研究 A02 大村優: オプトジェネティクスによる正中縫線核セロトニン神経と衝動性の関係の解明  
<論文>
- \*Ohmura Y, Kumamoto H, Tsutsui-Kimura I, Minami M, Izumi T, Yoshida T, Yoshioka M (2013) Tansospirone suppresses impulsive action by possible blockade of the 5-HT1A receptor. *J Pharmacol Sci*. (Reviewed)
- Tsutsui-Kimura I, \*Ohmura Y, Izumi T, Kumamoto H, Yamaguchi T, Yoshida T, Yoshioka M (2013) Milnacipran enhances the control of impulsive action by activating D1-like receptors in the infralimbic cortex. *Psychopharmacology (Berl)*, 225, 2, 495-504.
- <学会発表>
- Ohmura Y (2013) Optogenetic control of serotonergic neurons and anxiety-related behavior. The 90th Annual Meeting of the Physiological Society of Japan. Tokyo, Japan. (Oral (symposium))
- <表彰・受賞>
- 大村優, 田中謙二, 山中章弘, 吉岡充弘 (2013) 光遺伝学によるセロトニン神経活動の操作と不安関連行動. Fukuoka, Japan, Mar. 21-22, 2013. (第 86 回日本薬理学会 年会優秀発表賞 第 86 回日本薬理学会)
- 公募研究 A02 小川宏人: 昆虫の刺激方向予測に基づく運動意思決定に関与する神経回路機構の解明  
<学会発表>
- Ogawa H, Oe M (2012) Distinct role of identified giant interneurons in directional control of wind-evoked walking behavior in the cricket. 42th Annual Meeting of Society for Neuroscience, Program No. 501.06. New Orleans, USA. (poster)
- 小川宏人(2012) 球形トレッドミルシステムを用いた刺激方向依存的運動制御機構の解析. 計測自動制御学会システム・情報部門学術講演会, 112. 名古屋. (invited lecture)
- 公募研究 A02 田中真樹: タイミング予測と意思決定に関わる皮質下信号の解析  
<論文>
- Kunimatsu J, \*Tanaka M (2012) Alteration of the timing of self-initiated but not reactive saccades by electrical stimulation in the supplementary eye field. *Eur J Neurosci*, 36, 9, 3258-3268.
- Matsushima A, \*Tanaka M (2012) Neuronal correlates of multiple top-down signals during covert tracking of moving objects in macaque prefrontal cortex. *J Cogn Neurosci*, 24, 10, 2043-2056.
- Matsushima A, \*Tanaka M (2013) Retrospective and prospective information coding by different neurons in the prefrontal cortex. *Neuroreport*, 24, 2, 73-78.
- Matsushima A, \*Tanaka M (2013) Manipulation of object choice by electrical microstimulation in macaque frontal eye fields. *Cereb Cortex*.
- <学会発表>
- Tanaka M (2012) Multiple components of prefrontal signals for covert tracking of moving object. The 3rd International Symposium on Prefrontal Cortex — Searching for Mechanism of Mind. Kyoto, Japan, Nov. 29-30, 2012.
- 公募研究 A02 筒井健一郎: 柔軟な行動選択を可能にする神経機構の解明  
<論文>
- Ishii H, Ohara S, Tobler PN, Tsutsui K-I, \*Iijima T (2012) Inactivating anterior insular cortex reduces risk

- taking. *Journal of Neuroscience*, 32, 45, 16031-16039.
- \*Seya Y, Tsutsui K-I, Watanabe K, Kimura K (2012) Attentional capture without awareness in complex visual tasks. *Perception*, 41, 5, 517-531.
- Oyama K, Sato S, Karube F, Fujiyama F, Isomura Y, Iijima T, \*Tsutsui K (2013) Long-lasting single-neuron labeling by in vivo electroporation without microscopic guidance. *Journal of Neuroscience Methods*, in press.
- 公募研究 A02 岩崎広英: 意思決定に関わる神経回路のコネクトーム的解析  
<論文>
- Shin E, Kashiwagi Y, Kuriu T, Iwasaki H, Tanaka T, Koizumi H, Gleeson JG, \*Okabe S (2013) Doublecortin-like kinase enhances dendritic remodelling and negatively regulates synapse maturation. *Nat Commun*, 4, 1440.
- <学会発表>
- 岩崎広英, 岡部繁男 (2012) コネクトミクスのための電子顕微鏡法と光学顕微鏡法の融合による高解像度イメージング. 日本顕微鏡学会第68回学術講演会. つくば国際会議場 (茨城県つくば市). (invited lecture)
- 公募研究 A02 田中暢明: 嗅覚系をモデルにした行動選択時の感覚情報処理機構の研究  
<論文>
- Tanaka NK, Endo K, \*Ito K. (2012) Organization of antennal lobe-associated neurons in adult *Drosophila melanogaster* brain. *J Comp Neurol*, 520, 18, 4067-4130. (reviewed)
- Tanaka NK, Suzuki E, Dye L, Ejima A, \*Stopfer M. (2012) Dye fills reveal additional olfactory tracts in the protocerebrum of wild-type *Drosophila*. *J Comp Neurol*, 520, 18, 4131-4140. (reviewed)
- <学会発表>
- Tanaka NK, Ejima A. (2013) Pheromone processing pathways in *Drosophila*. Asia Pacific *Drosophila Research Conference*. Seoul, Korea. (oral)
- 公募研究 A02 藤山文乃: 報酬予測をつくるネットワークの解明  
<論文>
- Ohno S, Kuramoto E, Furuta T, Hioki H, Tanaka YR, Fujiyama F, Sonomura T, Uemura M, Sugiyama K, \*Kaneko T (2012) A morphological analysis of thalamocortical axon fibers of rat posterior thalamic nuclei: A single neuron tracing study with viral vectors. *Cereb Cortex*, 22, 12, 2840-2857.
- Hioki H, Okamoto S, Konno M, Kameda H, Sohn J, Kuramoto E, Fujiyama F, \*Kaneko T (2013) Cell type-specific inhibitory inputs to dendritic and somatic compartments of parvalbumin-expressing neocortical interneuron. *J Neurosci*, 33, 2, 544-555.
- Koshimizu Y, Fujiyama F, Nakamura KC, Furuta T, \*Kaneko T (2013) Quantitative analysis of axon bouton distribution of subthalamic nucleus neurons in the rat by single neuron visualization with a viral vector. *Journal of Comparative Neurology*, 521, 9, 2125-2146.
- \*藤山文乃 (2013) 報酬予測をつくるネットワークの解明. *生体の科学*, 64, 4.
- 公募研究 A02 小林康: 中脳神経回路ダイナミクスによる行動予測形成機構  
<論文>
- Okada K, \*Kobayashi Y (2013) Reward prediction-related increases and decreases in tonic neuronal activity of the pedunculopontine tegmental nucleus. *Front Integr Neurosci*, 7, 36.
- \*Watanabe M, Matsuo Y, Zha L, Munoz DP, Kobayashi Y (2013) Fixational saccades reflect volitional action preparation. *J Neurophysiol*.
- \*小林康, 岡田研一 (2013) 中脳における報酬予測誤差計算機構. *生体の科学*.  
<学会発表>
- Kobayashi Y (2012), Neuronal recording from cholinergic nucleus in the brainstem of awake monkeys in relation to arousal, motivation, motor control, visual information processing and reinforcement learning, Bio-X 2012 International Symposium on Molecular Cognition and Translational Research of Neuropsychiatric Disorders, April 28-30, 2012 in Shanghai Jiao Tong University, China (Invited lecture)
- 公募研究 A02 小林和人: 前頭前野皮質—線条体を介する行動柔軟性の制御機構  
<論文>
- Fukabori R, Nishizawa, K., Okada, K., Kai, N., Kobayashi, K., Uchigashima, M., Watanabe, M., Tsutsui, Y., and \*Kobayashi, K. (2012) Striatal direct pathway modulates response time in execution of visual discrimination. *Eur. J. Neurosci.*, 35, 5, 784-797.
- Kinoshita M, Matsui, R., Kato, S., Hasegawa, T., Kasahara, H., Isa, K., Watakabe, A., Yamamori, T., Nishimura, Y., Alstermark, B., Watanabe, D., Kobayashi, K., and \*Isa, T. (2012) Genetic dissection of the circuit for hand dexterity in primates. *Nature*, 487, 7406, 235-238.
- Nishizawa K, Fukabori, R., Okada, K., Kai, N., Uchigashima, M., Watanabe, M., Shiota, A., Ueda, S., Tsutsui, Y., and \*Kobayashi, K. (2012) Striatal indirect pathway contributes to selection accuracy of

learned motor actions. *J. Neurosci.*, 32, 39, 13421-13432.  
Sano H, Chiken, S., Hikida, T., Kobayashi, K., and \*Nambu, A. (2013) Signals through the striatopallidal indirect pathway stop movements by phasic excitation in the substantia nigra. *J. Neurosci.*, 33, 17, 7583-7594.

<学会発表>

Kobayashi K (2013) Behavioral roles of thalamostriatal pathway in sensory discrimination learning. Dopamine 2013. Alghero, Italy.

<書籍>

Kobayashi K, Okada, K., and Kai, N. (2013) Functional circuitry analysis in rodents using neurotoxins/immunotoxins. Humana Press Inc., New York.

公募研究 A02 武藤彩：ゼブラフィッシュ捕食行動をモデルとした視覚認知と意思決定の神経メカニズムの解析

<論文>

\*Muto A, \*Kawakami K (2013) Prey capture in zebrafish larvae serves as a model to study cognitive functions. *Frontiers in neural Circuits*, 7, 110.

Muto A, Ohkura M, Abe G, \*Nakai J, \*Kawakami K (2013) Real-time visualization of neuronal activity during perception. *Curr Biol*, 23, 4, 307-311.

公募研究 A02 中原裕之：意思決定のための価値の生成と統合の脳機能：数理モデル提案と実証検証

<論文>

\*Nakahara H, Hikosaka O (2012) Learning to represent reward structure: A key to adapting to complex environments. *Neurosci Res*, 74, 3-4, 177-183.

\*Nakamura K, Santos GS, Matsuzaki R, Nakahara H (2012) Differential reward coding in the subdivisions of the primate caudate during an oculomotor task. *J Neurosci*, 32, 45, 15963-15982.

Suzuki S, Harasawa N, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, Haruno M, Cheng K, \*Nakahara H (2012)

Learning to simulate others' decisions. *Neuron*, 74, 6, 12. (reviewed)

<学会発表>

Kaveri S, Koene A, Laquitaine S, Nakahara H (2012) Sign-tracking and goal-tracking by a reinforcement learning model. The 42nd Annual Meeting of the Society for Neuroscience New Orleans, LA, USA, October 13-17, 2012.

公募研究 A02 寺前順之介：確率脳内シミュレータとしての大脳皮質自発発火活動と学習の解明

<論文>

Hiratani N, Teramae JN, \*Fukai T (2012) Associative memory model with long-tail-distributed Hebbian synaptic connections. *Front Comput Neurosci*, 6, 102. (Reviewed)

\*Teramae JN, Tsubo Y, Fukai T (2012) Optimal spike-based communication in excitable networks with strong-sparse and weak-dense links. *Sci Rep*, 2, 485. (Reviewed)

公募研究 A02 小村豊：意思決定における「迷い」の検知・制御メカニズム

<論文>

\*Komura Y, Nikkuni A, Hirashima N, Uetake T, Miyamoto A (2013) Responses of pulvinar neurons reflect a subject's confidence in visual categorization. *Nat Neurosci*, 16, 6, 749-755. (News & Views 掲載)

<学会発表>

Komura Y, Nikkuni A, Hirashima N (2012) Neural correlates and causes of perceptual confidence in the primate pulvinar. *Neuroscience 2012*. New Orleans, USA, Oct. 13-17, 2012. (Invited lecture)

### 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的および直感的意思決定障害の脳内基盤の解明

<論文>

Kodaka F, \*Takahashi H, Yamada M, Takano H, Nakayama K, Ito H, Suhara T (2012) Effect of cooperation level of group on punishment for non-cooperators: A functional magnetic resonance imaging study. *PLoS One*, 7, 7, e41338.

\*Takahashi H (2012) Monoamines and assessment of risks. *Curr Opin Neurobiol*, 22, 6, 1062-1067.

\*Takahashi H, Takano H, Camerer CF, 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, Suhara T (2012) Honesty mediates the relationship between serotonin and reaction to unfairness. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 109, 11, 4281-4284.

Yamada M, Camerer CF, Fujie S, Kato M, Matsuda T, Takano H, Ito H, Suhara T, \*Takahashi H (2012) Neural circuits in the brain that are activated when mitigating criminal sentences. *Nat Commun*, 3, 759.

\*Takahashi H (2013) Molecular neuroimaging of emotional decision-making. *Neurosci Res*, 75, 4, 269-274.

\*Yamada M, Uddin LQ, Takahashi H, Kimura Y, Takahata K, Kousa R, Ikoma Y, Eguchi Y, Takano H, Ito H, Higuchi M, Sahara T (2013) Superiority illusion arises from resting-state brain networks modulated by dopamine. Proc Natl Acad Sci U S A, 110, 11, 4363-4367.

<表彰・受賞>

高橋英彦 (2013) 情動的意思決定の神経機構に関する学際的研究. Tokyo. (第9回日本学術振興会賞)

A03-2 木村 實 : 予測と意思決定の大脳基底核と扁桃体の神経回路基盤

<論文>

Enomoto K, Matsumoto N, Nakai S, Satoh T, Sato TK, Ueda Y, Inokawa H, Haruno M, \*Kimura M (2011) Dopamine neurons learn to encode the long-term value of multiple future rewards. Proc Natl Acad Sci USA, 108, 37, 15462-15467. (reviewed)

Smith Y, Surmeier D, Redgrave P, \*Kimura M (2011) Thalamic contributions to basal ganglia-related behavioral switching and reinforcement. J Neurosci., 31, 45, 16102-16106. (reviewed)

Yamada H, Inokawa H, Matsumoto N, Ueda Y, \*Kimura M (2011) Neuronal basis for evaluating selected action in the primate striatum. Eur. J. Neurosci., 34, 3, 489-506. (reviewed)

Yamada H, Inokawa H, Matsumoto N, Ueda Y, Enomoto K, \*Kimura M (2013) Coding of the long-term value of multiple future rewards in the primate striatum. J Neurophysiol, 109, 4, 1140-1151. (reviewed)

<学会発表>

Haruno M (2012) Decoding unconscious social decision making. ISM workshop on physical measurement and Bayesian statistics. Tokyo, Japan, Jan. 26, 2012. (invited talk)

<書籍>

Doya K, Kimura M (in press) The basal ganglia, reinforcement learning and the encoding of value in: Neuroeconomics: Decision-making and the brain. Academic Press.

<表彰・受賞>

Enomoto K, Matsumoto N, Nakai S, Satoh T, Sato TK, Ueda Y, Inokawa H, Haruno M, Kimura M (2011) Dopamine neurons learn to encode the long-term value of multiple future rewards. Proc Natl Acad Sci USA, 108, 37, 15462-15467. (reviewed) (平成24年日本神経回路学会論文賞)

A03-3 疋田貴俊 : 報酬・忌避の意志決定の機構解析

<特許>

疋田貴俊, 中西重忠 (2012) 大脳基底核神経回路の神経伝達を解析する方法. OBI, Japan, Oct. 2012.

<論文>

Yawata S, Yamaguchi T, Danjo T, Hikida T, \*Nakanishi S (2012) Pathway-specific control of reward learning and its flexibility via selective dopamine receptors in the nucleus accumbens. Proc Natl Acad Sci U S A, 109, 31, 12764-12769. (reviewed)

\*Hikida T, Yawata S, Yamaguchi T, Danjo T, Sasaoka T, Wang Y, \*Nakanishi S (2013) Pathway-specific modulation of nucleus accumbens in reward and aversive behavior via selective transmitter receptors. Proc Natl Acad Sci U S A, 110, 1, 342-347. (reviewed)

Yamaguchi T, Danjo T, Pastan I, Hikida T, \*Nakanishi S (2013) Distinct roles of segregated transmission of the septo-habenular pathway in anxiety and fear. Neuron, 78, 3, 537-544. (reviewed)

<学会発表>

Hikida T (2013) Dopaminergic regulation of basal ganglia circuit in learning behavior and drug addiction. 11th World Congress of Biological Psychiatry. Kyoto, Japan, Jun. 2013. (invited lecture)

<表彰・受賞>

疋田貴俊 (2011) 大脳基底核神経回路の制御機構. 日本神経科学学会, Yokohama, Japan, Sep. 2011. (平成23年度日本神経科学学会奨励賞)

疋田貴俊 (2012) 意思決定と薬物依存における大脳基底核神経回路機構. 日本生物学的精神医学会, Kobe, Japan, Sep. 2012. (若手研究者育成プログラム奨励賞)

公募研究 A03 成本迅 : セロトニン神経系の障害をともなう精神疾患における意思決定神経基盤の解明

<論文>

\*Yamamoto H, Tsuchida H, Nakamae T, Nishida S, Sakai Y, Fujimori A, Narumoto J, Wada Y, Yoshida T, Taga C, Fukui K (2012) Relationship between severity of obsessive-compulsive symptoms and schizotypy in obsessive-compulsive disorder. Neuropsychiatr Dis Treat, 8, 579-583.

\*酒井 雄 (2013) セロトニン神経系の障害をともなう精神疾患における意思決定神経基盤. 日本生物学的精神医学会誌, 24, 2, in press.

公募研究 A03 尾仲達史 : オキシトシンによる行動選択修飾作用の解明

<論文>

Yamashita M, Takayanagi Y, Yoshida M, Nishimori K, Kusama M, \*Onaka T (2013) Involvement of prolactin-releasing peptide in the activation of oxytocin neurons in response to food intake. J

Neuroendocrinol, 25, 5, 455-465. (reviewed)

公募研究 A03 橘吉寿：ハイリスク・ハイリターン、ローリスク・ローリターンを選択する神経基盤と調節因子  
<論文>

\*Tachibana Y, Hikosaka O (2012) The primate ventral pallidum encodes expected reward value and regulates motor action. Neuron, 76, 4, 826-837. (reviewed)

Hasegawa Y, Tachibana Y, Sakagami J, Zhang M, Urade M, \*Ono T (2013) Flavor-enhanced modulation of cerebral blood flow during gum chewing. PLoS One. e66313. (reviewed)

橘吉寿, 彦坂興秀 (2013) 腹側淡蒼球と報酬予測. 生体の科学, 64, 4.

<表彰・受賞>

橘吉寿 (2013) 大脳基底核による運動制御機構の解明. Tokyo, Japan. (第 14 回日本生理学会奨励賞 第 90 回日本生理学会大会)

**総括班 X00 銅谷賢治：予測と意思決定の脳内計算機構の研究推進**

<論文誌特集号>

Doya K, Shadlen MN (2012) Decision making. Curr Opin Neurobiol, 22, 6, 911-913.

<講演・チュートリアル>

Doya K (2012) 1. Reinforcement learning and the basal ganglia 2. Bayesian inference and model-based decision making. IBRO-UNESCO School on Computational and Theoretical Neuroscience. Hyderabad, India, 2012.12.5 - 21. (Lecture, Invited)

Doya K (2012) 1. Motor control: Basal ganglia and motor control 2. Basal ganglia, serotonin, and reward expectation. Computational and Cognitive Neurobiology Summer School. Beijing, China, 2012.7.23. (Invited lectures)

Doya K (2012) Reinforcement learning and the basal ganglia. CogSci2012: Neural Computations Supporting Cognition: Rumelhart Prize Symposium in Honor of Peter Dayan. Sapporo, 2012.8.2.

<Web ページ>

「予測と意思決定」領域 web ページ：<http://www.decisions.jp>

<主催・協賛シンポジウム等>

日本神経回路学会第21 回全国大会 後援 (2011. 12. 15-17 沖縄科学技術大学院大学) Dr. Peter Dayan 招待講演  
脳と心のメカニズム第12 回冬のワークショップ (2012. 1. 16-18 ルスツリゾート) Dr. Rajesh Rao 招待講演  
ABLE2012 後援 (2012. 1. 28 玉川大学)

社会的能力発達シンポジウム 協賛 (2012. 3. 18 東京学芸大学)

2012 年度包括脳ネットワーク 夏のワークショップ (2012. 7. 24-27 仙台国際センター)

脳と心のメカニズム第13回夏のワークショップ (2012. 7. 26 仙台国際センター)

新学術領域合同シンポジウム：意思決定とコミュニケーションの脳ダイナミクスと相互作用 (2012. 7. 27 仙台国際センター) Dr. Nathaniel Daw 招待講演

ABLE2012 Summer：科学的発見はどう生まれるか (2012. 8. 5 玉川大学)

Analogical Mind 講演会 (2012. 8. 6 慶応大学) Dr. Dedre Gentner, Dr. Kenneth Forbus 招待講演

21st Machine Learning Summer School (2012. 8. 27-9. 7 京都大学)

認知科学会サマースクール 後援 (2012. 9. 4-6 箱根湯本)

日本心理学会第76 回大会シンポジウム (2012. 9. 13 専修大学)

日本科学哲学会第 45 回大会シンポジウム「意思決定・学習・合理性」(2012.11.10-11 宮崎大学)

脳と心のメカニズム第13 回冬のワークショップ (2013. 1. 9-11 ルスツリゾート) Dr. Kent Berridge 招待講演  
Joint Tamagawa-Caltech Lecture Course 2013 & Reward and Decision-making on Risk and Aversion  
(2013. 3. 5-8, Kona, Hawaii)

<アウトリーチ活動>

玉川大学脳科学研究所 高校生体験理科教室 主催 (2012. 3. 27 玉川大学)

SSH サイエンス先端講座 2 (脳週間関連行事) (2013. 2. 2 奈良女子大学附属中等教育学校)

## 9. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募班での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

以上報告したように、これまでの約2年間で、「予測と意思決定の脳内機構」に関する新たな研究がスタートし、予想以上に多くの質の高い論文や学会発表につながっている。しかし当領域の目指す「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を、階層システムとして統合し明らかにする」という高い目標を達成するには、今後一層その目標を見据えた各チームの研究の加速・深化と、そのための組織的な支援と連携が必要である。そのため以下の方策を取る。

### 1. 具体的な共同研究のサポート

これまでチュートリアルなど幅広い知識と技術の交流のための企画を行って来たが、今後は、これらを具体的な共同研究として新たな成果につなげることを促進するため、技術研修や共同実験のための研究室間のメンバーの行き来のための旅費を総括予算からサポートする。

### 2. 公募研究での重点テーマの設定と宣伝

現行の計画研究、公募研究で比較的手薄な以下のテーマについて、新たな公募研究の提案を重点的に呼びかける。

項目 A01: モデルベース、モデルフリーの意思決定がいかに使い分けられるかについて、理論モデルと行動実験を統合した研究

項目 A02: ベイズ推定、動的計画法など脳内シミュレーションのための計算が、大脳皮質をはじめとした神経回路で以下に実現可能かに関する理論モデルと、それを検証する実験的研究。

項目 A03: ドーパミン、セロトニン等による意思決定の方式選択とパラメタ制御を、それら物質の細胞レベルでの作用から、神経回路の動作を経て行動レベルにつなぐ研究。

### 3. 国際ネットワークの構築と、次のステップの計画

この10月に開催する国際ワークショップなどを契機に、領域の研究者と世界の先端的な研究者らとのネットワークを広げ、当領域が推進する「モデルベース意思決定」「脳内シミュレーション」に関する研究を世界的に活性化する。その中で、次なる新学術領域、あるいは他の国内または国際的な枠組みでの研究プロジェクトとしてこの研究を進化させる方向を検討する。

**10. 組織変更等の大幅な計画変更がある場合は当該計画（研究代表者の変更は真にやむを得ない場合に限る）（2～5ページ程度）【非公開】※本欄に記載の計画研究については、全て3年度目の審査の対象となります。**

領域内の計画研究の研究代表者の交替や組織体制に大幅な変更がある場合（新しく計画研究を追加する場合や既存の計画研究を廃止する場合、領域全体の交付予定額の範囲内で各計画研究の研究経費を変更する場合（計画研究に係る経費を減額し、公募研究に係る経費を増額する場合等））には必ず記入してください。その際、以下の点を含めてください。

- ・計画研究を追加する場合は、追加の必要性、その計画研究が領域内で果たす役割、他の計画研究への影響等
- ・計画研究を廃止する場合は、廃止の理由、当該計画研究を廃止しても領域として支障がないことの説明等
- ・研究代表者の交替の場合は、交替の必要性、新旧の研究組織の異なる点（組織構成、領域内で果たす役割等）、新たに研究代表者になろうとする者が、旧研究代表者に替わって研究を実施できることの根拠、妥当性及びその者の研究業績等
- ・計画研究に係る経費と公募研究に係る経費の額の変更については、その必要性、1回目の公募研究の応募・採択状況等（公募研究に係る経費を減額して計画研究に係る経費を増額する変更は真にやむを得ない場合に限る。また、公募研究の規模に係る最低基準を下回らないこと。）
- ・以上の各変更に伴う他の計画研究の研究経費の変更及びその妥当性等

該当なし。