

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

平成28年度科学研究費補助金「新学術領域研究  
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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28年6月

領域代表者 沖縄科学技術大学院大学・教授・銅谷賢治

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	8
2. 研究領域の設定目的の達成度	10
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	13
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	14
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	18
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	23
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	24
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	28
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	29
11. 総括班評価者による評価	30
別添：研究領域全体に係るデータ	32

## 〈事後評価報告書の公開について〉

科学研究費助成事業「新学術領域研究（研究領域提案型）」の評価要綱に基づき、本報告書（領域代表者が作成した評価資料）は、原則として一般に公開されます。ただし、発表前のデータ等、事後評価のために記載はするものの、一般への公開は避けたい部分については、各事項の【以下、非公開部分】の欄に記述することができます。

なお、評価者は事後評価に当たり、非公開部分も含めた本報告書全体を参照しますが、評価者には守秘義務が課されています。

**研究組織** （総括：総括班，計画：総括班以外の計画研究，公募：公募研究）

研究 項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	23120001 予測と意思決定の脳内計算機構の研究推進	平成 23 年度～ 平成 27 年度	銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授	4
A01 計画	23120002 予測・判断・意思決定の論理と計算	平成 23 年度～ 平成 27 年度	岡田 光弘	慶應義塾大学・文学部・教授	5
A01 計画	23120003 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	平成 23 年度～ 平成 27 年度	今井 むつみ	慶應義塾大学・環境情報学部・教授	5
A01 計画	23120004 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	平成 23 年度～ 平成 27 年度	杉山 将	東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授	2
A01 計画	23120005 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	平成 23 年度～ 平成 27 年度	柴田 智広	九州工業大学・生命工学研究科・教授	3
A02 計画	23120006 モデルベース的意思決定を可能にする神経回路	平成 23 年度～ 平成 27 年度	坂上 雅道	玉川大学・脳科学研究所・教授	2
A02 計画	23120007 予測と意思決定の神経回路ダイナミクスの解明	平成 23 年度～ 平成 27 年度	銅谷 賢治	沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授	1
A02 計画	23120008 意思決定神経回路の可視化と操作	平成 23 年度～ 平成 27 年度	岡本 仁	国立研究開発法人理化学研究所・脳科学総合研究センター・チームリーダー	1
A03 計画	23120009 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	平成 23 年度～ 平成 27 年度	高橋 英彦	京都大学・医学研究科・准教授	3
A03 計画	23120010 予測と意思決定の大脳基底核と扁桃体の神経回路基盤	平成 23 年度～ 平成 27 年度	木村 實	玉川大学・脳科学研究所・教授	4
A03 計画	23120011 報酬・忌避の意志決定の機構解析	平成 23 年度～ 平成 27 年度	疋田 貴俊	京都大学・医学研究科・特定准教授	2

計画研究 計 11 件					
A01 公募	24120507 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	峯松 信明	東京大学・情報理工・准教授	1
A01 公募	24120512 散策行動における意思決定アフレクタの可視化に関する研究	平成 24 年度～ 平成 25 年度	島田 敬士	九州大学・基幹教育院・准教授	1
A01 公募	24120516 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	石渕 久生	大阪府立大学・工学系研・教授	1
A01 公募	24120518 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	梅田 聡	慶應義塾大学・文学部・准教授	1
A01 公募	24120526 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	岩橋 直人	京都大学・情報学研究科・研究員	2
A01 公募	24120527 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	内部 英治	沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・研究員	1
A01 公募	26120708 対戦相手の行動予測に基づくゲームロボットの意思決定アルゴリズムの研究	平成 26 年度～ 平成 27 年度	並木 明夫	千葉大学・工学研究科・准教授	1
A01 公募	26120711 時間差分学習と期待効用による遅延報酬強化と異時的選択の脳計算モデル	平成 26 年度～ 平成 27 年度	地村 弘二	慶應義塾大学・理工学部・准教授	1
A01 公募	26120712 目的指向性行動から習慣への安定的移行を制御する側坐核可塑性の役割	平成 26 年度～ 平成 27 年度	戸田 重誠	金沢大学・大学病院・講師	1
A01 公募	26120715 サル皮質DCSによる意思決定に関わる中脳、脳幹－大脳皮質ネットワーク動態の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	小林 康	大阪大学・生命機能研究科・准教授	1

A01 公募	26120722 自律神経システムと脳機能の統合的連関からみた予測と意思決定メカニズムの解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	梅田 聡	慶應義塾大学・文学部・教授	1
A01 公募	26120723 意思決定・運動学習の共通原理・関係性の解明：統一理論モデルの構築を通じて	平成 26 年度～ 平成 27 年度	瀧山 健	玉川大学・脳科学研究所・研究員	1
A01 公募	26120727 部分観測環境下におけるモデルベース・モデルフリー強化学習の役割分担	平成 26 年度～ 平成 27 年度	内部 英治	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報研究所・主幹研究員	1
A02 公募	24120501 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	大村 優	北海道大学・医学研究科・助教	3
A02 公募	24120502 昆虫の刺激方向予測に基づく運動意思決定に関する神経回路機構の解明	平成 24 年度～ 平成 25 年度	小川 宏人	北海道大学・理学部・准教授	1
A02 公募	24120503 タイミング予測と意思決定に関わる皮質下信号の解析	平成 24 年度～ 平成 25 年度 (25 年 7 月辞退)	田中 真樹	北海道大学・医学研究科・教授	1
A02 公募	24120504 柔軟な行動選択を可能にする神経機構の解明	平成 24 年度～ 平成 25 年度	筒井 健一郎	東北大学・生命科学研究科・准教授	1
A02 公募	24120508 意思決定に関わる神経回路のコンネクトーム的解析	平成 24 年度～ 平成 25 年度	岩崎 広英	東京大学・医学系研・助教	1
A02 公募	24120509 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	田中 暢明	北海道大学・創成研究機構・特任助教	1
A02 公募	24120510 報酬予測をつくるネットワークの解明	平成 24 年度～ 平成 25 年度	藤山 文乃	同志社大学・脳科学研究科・教授	3
A02 公募	24120511 中脳神経回路ダイナミクスによる行動予測形成機構	平成 24 年度～ 平成 25 年度	小林 康	大阪大学・生命機能研究科・准教授	1
A02 公募	24120513 前頭前野皮質一線条体を介する行動柔軟性の制御機構	平成 24 年度～ 平成 25 年度	小林 和人	福島県立医科大学・医学部・教授	1

A02 公募	24120521 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	武藤 彩	国立遺伝学研究所・助教	1
A02 公募	24120523 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	中原 裕之	独立行政法人理化学研究所・チームリーダー	1
A02 公募	24120524 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	寺前 順之介	独立行政法人理化学研究所・研究員	1
A02 公募	24120525 意思決定における「迷い」の検 知・制御メカニズム	平成 24 年度～ 平成 25 年度	小村 豊	国立研究開発法人 産業 技術総合研究所・研究員	1
A02 公募	26120701 光遺伝学による「モデルベース」 の意思決定とセロトニン神経系 の関心の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	大村 優	北海道大学・医学研究科・ 助教	3
A02 公募	26120703 領野間・層間情報流の解析によ る前頭葉の予測・意思決定神経 回路機構の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	坂本 一寛	東北大学・電気通信研究 所・助教	3
A02 公募	26120703 柔軟な行動制御を司る前頭連合 野神経機構の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度 (26 年 7 月辞退)	筒井 健一郎	東北大学・生命科学研究 科・准教授	1
A02 公募	26120705 異なる感覚様式の記憶による行 動制御と神経回路	平成 26 年度～ 平成 27 年度	谷本 拓	東北大学・生命科学研究 科・教授	1
A02 公募	26120709 眼窩前頭皮質－嗅結節経路を介 した摂食行動の意思決定メカニ ズムの解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	村田 航志	福井大学・医学部・助教	1
A02 公募	26120710 報酬予測誤差計算と強化学習の 神経回路機構：皮質線条体時間 誤差仮説の理論的検討	平成 26 年度～ 平成 27 年度 (27 年 7 月辞退)	森田 賢治	東京大学・教育学研究科・ 講師	1
A02 公募	26120713 DREADDシステムと計算論 的手法を用いた近視眼的意思決 定の追究	平成 26 年度～ 平成 27 年度	溝口 博之	名古屋大学・環境医学研究 所・助教	3

A02 公募	26120719 線虫の意思決定を担う神経回路 の立体ライブイメージングによる 動作原理の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	寺本 孝行	九州大学・理学研究員・准 教授	3
A02 公募	26120720 線条体コリン作動性介在ニュー ロンを介する行動柔軟性の制御 機構	平成 26 年度～ 平成 27 年度 (26 年 7 月辞退)	小林 和人	福島県立医科大学・医学 部・教授	1
A02 公募	26120725 ドーパミン放出を抑制する新し い経路の同定	平成 26 年度～ 平成 27 年度 (26 年 7 月辞退)	藤山 文乃	同志社大学・脳科学研究 科・教授	3
A02 公募	26120728 報酬予測に基づく待機行動を制 御する神経機構の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	宮崎 勝彦	沖縄科学技術大学院大 学・神経計算ユニット・研 究員	1
A02 公募	26120729 脳内シミュレーションの海馬表 現検証	平成 26 年度～ 平成 27 年度	伊藤 真	沖縄科学技術大学院大 学・神経計算ユニット・研 究員	1
A02 公募	26120730 前頭皮質・基底核における時間 差情報保持回路の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	川口 泰雄	生理学研究所・教授	1
A02 公募	26120731 報酬に基づく意思決定を司る神 経機構の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	小川 正晃	生理学研究所・特任助教	1
A02 公募	26120732 意思決定のための価値の生成と 統合の脳機能：数理モデルの提 案とその実験検証	平成 26 年度～ 平成 27 年度	中原 裕之	独立行政法人理化学研究 所・チームリーダー	1
A02 公募	26120735 意思決定の基準をセット・利用 する脳内機構	平成 26 年度～ 平成 27 年度	小村 豊	国立研究開発法人 産業 技術総合研究所・研究員	1
A03 公募	24120514 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	成本 迅	京都府立医科大学・医学研 究科・講師	5
A03 公募	24120515 自発行動発現の意思決定機構と セロトニン系の役割	平成 24 年度～ 平成 25 年度	井之川 仁	京都府立医科大学・医学研 究科・助教	1
A03 公募	24120517 オキシトシンによる行動選択修 飾作用の解明	平成 24 年度～ 平成 25 年度 (25 年 7 月辞退)	尾仲 達史	自治医科大学・医学部・教 授	1

A03 公募	24120522 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	平成 24 年度～ 平成 25 年度	橘 吉寿	生理学研究所・助教	1
A03 公募	26120702 ストレスによる意思決定変容の神経機構の解明：薬物探索行動を指標として	平成 26 年度～ 平成 27 年度	金田 勝幸	金沢大学・医薬保健研究域薬学系・教授	2
A03 公募	26120707 2 つのドーパミン神経系が支える報酬と罰に基づく学習の神経基盤	平成 26 年度～ 平成 27 年度	松本 正幸	筑波大学・医学医療系・教授	1
A03 公募	26120714 細胞特異的逆行性ウイルスベクターを用いた衝動性セロトニン神経回路網の解析	平成 26 年度～ 平成 27 年度	金子 周司	京都大学・薬学研究科・教授	3
A03 公募	26120721 セロトニン神経系の障害をとともなう精神疾患における意思決定神経基盤の解明	平成 26 年度～ 平成 27 年度	成本 迅	京都府立医科大学・医学研究科・准教授	7
A03 公募	26120726 ストレスによる報酬・遅延情報処理の変化のメカニズム：セロトニン系の役割	平成 26 年度～ 平成 27 年度	中村 加枝	関西医科大学・医学部・教授	2
A03 公募	26120733 セロトニンによる意思決定への介入と制御	平成 26 年度～ 平成 27 年度 (27 年 7 月辞退)	南本 敬史	国立研究開発法人 放射線医学総合研究所・分子イメージング研究センター・チームリーダー	3
公募研究 計 52 件					



## 1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ以内）

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、応募時までの研究成果を進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。

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しようとするのか>

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. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

当研究領域は「脳内シミュレーションによるモデルベース意思決定のメカニズムを、計算理論、神経回路、分子機構のレベルで明らかにする」という目標を掲げスタートした。

モデルベース意思決定の計算理論に関して、人は限られた感覚行動経験のなかで有用な内部モデルを獲得し利用できるのはなぜか、という疑問に対応して、高次元の入力信号から重要なものを選び、条件付き確率分布を効率良く推定する新たな手法の開発が実現した(Shiga et al., 2015)。これらの手法は、人型ロボットのような高次元システムの学習制御や、今後の人工知能の基本要素として活用が期待できるものである。

脳内シミュレーションの神経回路に関して、行動に応じた身体や外界の状態変化の予測と、感覚入力にもとづく予測の修正という動的ベイズ推定のメカニズムが、大脳新皮質回路により実現されているという仮説(船水, 銅谷, 2015)を検証するため、マウスの二光子イメージング実験系を立ち上げ、後部頭頂葉(PPC)のニューロン集団が動的ベイズ推定に特徴的な予測と修正に応じた神経活動を示すことを明らかにした。また、サルの前頭前野と線条体のニューロン活動の解析から、モデルベースの推移的推論による報酬予測には前頭前野が強く関わることを明らかになった(Pan et al., 2014)。

モデルベース意思決定を制御する分子機構に関して、光遺伝学技術によるセロトニンニューロンの選択的な刺激が、まだ得られていない報酬を待機する行動を促進すること(Miyazaki et al., 2014)、PETによるヒト脳画像計測でノルアドレナリン系が損失忌避に関与することが明らかになり(Takahashi et al., 2013)、さらにこれらの知見をもとにギャンブル依存のような社会的な問題にも目を向けた研究が展開している。

このように多分野の研究者の連携協力による5年間の研究で、主題である脳内シミュレーションとモデルベース意思決定のメカニズムの理解を新たなレベルに引き上げるとともに、人間や動物の意思決定のメカニズムに関して、各項目において以下のような幅広い研究の展開と成果が見られた。

### 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。

**成果：**哲学や心理学の視点からは、内部モデルの獲得において視覚や音声などの感覚情報形態がどのような役割を果たすかについて、音声の与える生得的なイメージが言語獲得において果たす役割、図式やテーブルなど情報表現が意思決定において果たす役割を明らかにした。それらに関連して工学、機械学習の立場からは、内部モデルの効率良い獲得を可能にする情報選択のアルゴリズムの開発を行い、それを用いて人型ロボットによる少ない試行数での行動学習を可能にした。また、実店舗において人の行動をモニタリングしながらロボットが情報提供を行うことにより、購買意思決定を誘導することが可能なことを示した。

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 600 組 1200 人）に対して適用し調査を行った。その結果、これらの課題について、意思決定の個人差には遺伝要因の影響が高いことが示された。また、Alais パラドクスで期待効用モデル(規範的意思決定モデル)通りの意思決定を行うかどうかと、論理推論、IQ（特に空間的 IQ）との間に高い遺伝的相関があることを明らかにした(Shikishima et al., 2015)。

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、音の象徴性と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では、誘発脳波に違いがあることを見いだした(Imai et al., 2015)。

杉山らは、モデルベース意思決定におけるモデル学習のために、LS-CDE 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、さらに入力冗長な次元を含む場合に必要な成分を抽出する SA-CDE (Shiga et al., 2015)を開発した。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(Sugimoto et al., 2016)。

柴田らは、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。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を逆転できた。また、仮想店舗での実

験で、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 (Funaya & Shibata, 2015), 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 (Funaya et al., 2014)。

## 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。

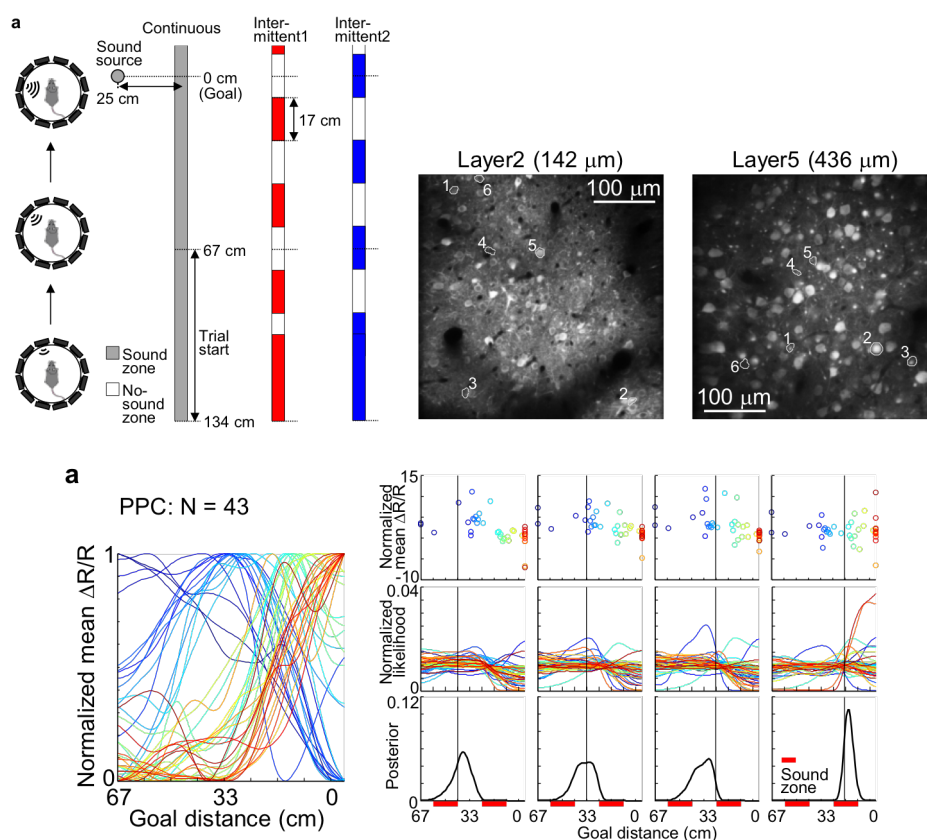
**成果：**サルの行動学習とニューロン活動の解析により、視覚刺激の状態遷移の内部モデルを使った行動で、前頭前野ニューロンが推移的推論による報酬予測に関わることを明らかにした。また、不確実な感覚情報のもとでの状態推定課題によって、マウスの神経活動の二光子顕微鏡による記録とデコーディングにより、頭頂葉のニューロンが行動に応じた状態予測と、感覚情報に応じた予測の修正という、動的ベイズ推定に特徴的な振る舞いを示すことを明らかにした。一方で、ゼブラフィッシュの神経活動の計測と制御の光技術の開発により、手綱核ニューロンが罰の回避課題だけでなく社会的ランクの決定にも重要な役割を示すことを明らかにした。

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 (Pan et al., 2014)。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重要な知見である。

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。

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。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リ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  $500\mu\text{m}$  までの深さのニューロン活動を安定して記録し、それによりゴールへの距離をデコーディングする手法を確立した。その解析の結果、頭頂葉のニューロンは音刺激がない時には自己の運動情報にもとづくゴール距離の予測を、音刺激がある時には予測の不確かさの削減に関わることを明らかに



した(Funamizu et al., in revision)。

岡本らは、これまで神経発生学の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技術を開発し、能動的回避学習、社会的優位性などの行動課題を確立した。特になわばり争い行動では、手綱核-脚間核の回路のなかの特定の経路が、攻撃を続けるか勝負を早く諦めるかを制御し、勝ち組、負け組を決めるという興味深い結果を得ている(Chou et al., 2016)。

### 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。

成果：PET によるヒトの脳分子イメージングにより、セロトニンが不公平の回避に、ノルエピネフリンが損失回避に関わることを明らかにし、さらに損失回避が病的なギャンブル行動の要因となることを明らかにした。また、個人の向社会性傾向に応じた行動と脳活動の解析により、従来は本能的、短絡的な行動に関わると考えられてきた扁桃体が公平で社会性の高い行動に関与し、理性的な行動に関わると考えられていた前頭前野が戦略的な利己的行動に関わるという新たな知見を得た。また、ドーパミン D2 受容体により制御される大脳基底核の間接経路は、これまで知られていた罰からの学習だけでなく、行動の柔軟な切り替えにも関与することを明らかにした。

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回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回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回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. 2013)。さらにギャンブル依存患者を集めその報酬と損失の評価特性を解析した結果、ギャンブル依存患者群には損失回避の特性を強く持つグループと弱いグループの二極性があることを明らかにした(Takeuchi et al., 2015)。

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つの選択肢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(Yamada et al., 2013)。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る(Haruno et al., 2014)。

疋田らは、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(Macpherson et al., 2016)。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。

公募研究の宮崎らは、光遺伝学技術による背側縫線核のセロトニンニューロンの選択的な刺激によって、まだ得られていない報酬を待機する行動が促進されることを明らかにした(Miyazaki et al., 2014)。

### 3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

本領域の中心テーマである「モデルベース」意思決定に関して、初期の領域会議などで議論を進める中で「モデルとは何か」という基本的な疑問が提示され、研究分野によって「モデル」という言葉の意味するものがまちまちであることが認識された。

それに関して領域代表者は、一般に「モデル」はいろいろなものを意味し得るが、本領域でモデルベース意思決定という場合には、モデルとは「行動に依存した状態の変化を予測するもの」、数学的には条件付き遷移確率  $P(\text{next state} | \text{current state}, \text{action})$  として定義することにより、誤解や混乱を最小限に抑えることとした。

#### 4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

##### ＜審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況＞

『意図するテーマとアプローチは意欲的であるが、人やサル・魚類など種々の生物を用いた研究から、人の意思決定プロセスをどこまで明らかにし、さらにそれを脳活動計測でどの程度明らかにできるのか、具体的な工夫や到達点が明確でないとの意見があった。』

意思決定の脳機構を探るにあたって、ヒト、サル、マウス、魚、昆虫など、動物種によって行える学習行動の複雑度や、神経活動の計測と操作の自由度はそれぞれ異なり、どれかひとつで完結することはありません。そこで、領域会議の初日には計算理論、神経活動記録、データ解析などのチュートリアルを開催し、多様なモデル動物を扱う研究者間の共通の知識基盤を築くことをめざした。

『また、教育プログラムやロボットにどのように展開するか具体性が不明であるとの意見があった。』

脳科学、認知科学の知見を教育に展開することをめざし、アウトリーチ企画 ABLE を共催し、小中高校の教師ら多数を含む参加者と研究者との対話の場を積極的に提供した。ロボットに関しては、モデルベース強化学習の人型ロボットへの応用を ATR で、ロボットを使った人とのコミュニケーション応用を奈良先端大学で展開した。

『さらには、問題設定ごとの個別研究の集合の印象が強く、領域としてまとまりのある学問研究ができるか不明であり、1/3 規模の公募が加わるとさらに分散する恐れがある、理論研究と実験研究の融合の具体的なあり方や融合の手法が明確でない、などの意見があった。』

テーマの具体化のために3つの研究項目を設けたが、実際には各研究者が理論、回路、分子の複数のレベルをまたぐ研究計画をたて実行した。また、領域会議ではチュートリアルに加え、小グループでのブレインストーミングなども取り入れ、理論研究と実験研究の融合の具体化をはかった。

##### ＜中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況＞

評価結果：A（研究領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる）

総合所見：『本研究領域は、人の意思決定の原理とその脳機能のメカニズムを、心理学、計算論、ロボット工学、精神医学、分子イメージング等の多彩なアプローチによって解明しようとする意欲的な領域である。異なる分野の専門家がうまく配置され、研究項目ごとに成果をあげつつある。様々な実験系で、モデルフリーとモデルベースの意思決定を比較対比させながら、脳内シミュレーションの神経回路網や分子レベルの実体と理論モデルが構築されており、研究の方向性は領域内において十分共有されていると思われる。領域の設定目的に照らして、期待どおりの進展が認められる。各研究項目内での成果は特筆すべきものが複数あがっている一方で、研究項目間・異分野間の連携が不十分な部分も見受けられる。今後の領域代表者のリーダーシップによる異分野間の連携の強化に期待する。』

領域会議の場での交流にとどまらず異分野間の連携を強化するために、異なるラボの間での研究者の派遣を奨励し、強化学習やベイズ推定の理論にもとづく実験データの解析とモデリング手法の普及をはかった。



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

（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

### 研究項目 A01 行動と意思決定の計算理論

<計画研究>

▲\*Shikishima C, Hiraishi K, Yamagata S, Ando J, Okada M (2015). Genetic factors of individual differences in decision making in economic behavior: A Japanese twin study using the Allais problem. *Frontiers in Psychology*, 6(1712).

Allaisのパラドクスは、右図のように期待値では等価なA-B, C-Dの選択で、最適期待効用に従えばBとDを選ぶべき(合理的規範的意思決定モデル)にも関わらず、多くの人はAとDを選ぶという現象である。この意思決定課題を双生児被験者(約600組1200人)に対して行い行動遺伝学—論理学融合研究を行った。その結果、この課題で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し、また、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、IQ(特に空間処理的IQ)との間に高い遺伝的相関があることを明らかにした。

▲Shiga M, Tangkaratt V, Sugiyama M (2015). Direct conditional probability density estimation with sparse feature selection. *Machine Learning*, 100, 161-182.

入出力関係の予測には回帰モデルが多く用いられるが、Sugiyama et al. (2010)は、より一般的な入力による条件付き確率分布を効率良く学習するLS-CDE法を提案している。LS-CDEには入力が冗長な場合に効率が落ちるという弱点があったが、本論文は入力の自動選択を行うSA-CDE法を提案し、人型ロボットのダイナミクス予測でその有用性を実証した。

<公募研究>

\*Igeta K, Namiki A (2015). A decision-making algorithm for an air-hockey robot that decides actions depending on its opponent player's motions, *IEEE Conference on Robotics and Biomimetics*, 1840-1845.

高速カメラにより相手の手とパックの位置を捉え、どのタイミングで、どの方向にパックを打つべきかを実時間で学習するエアホッケーロボットを実現した。パックの軌道を物理的に予測するとともに、打つタイミング(打点の前後位置)と狙う方向のどの組み合わせが有効かを評価するAttack Valueを、相手と自分の現在の手の位置をもとに瞬時に予測し打撃制御を行う。人との対戦でロボットは状況に応じて防御的あるいは攻撃的な打撃を使い分けるようになった。

特許出願：Uchibe E, Doya K (2015). Inverse reinforcement learning by density ratio estimation. PCT/JP2015/004001.

観測した状態と行動の系列から、それにより最適化される報酬関数を推定する「逆強化学習」の問題に関して、杉山らが開発した確率密度比の高速学習法を状態遷移の行動による条件付き確率の学習に取り入れることにより、行動者のめざす目標を効率良く推定する手法を発明した。これは、人間が無意識に行う行動のコツやこだわりを抽出する手法とし、例えば自動車の自動運転などへの応用が期待される。

### 研究項目 A02 意思決定の神経回路機構

<計画研究>

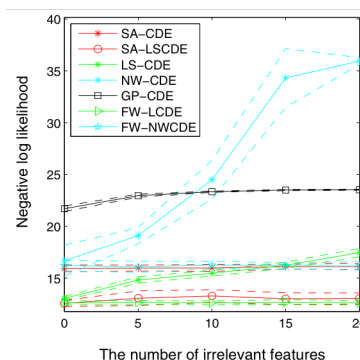
▲Chou MY, Amo R, Kinoshita M, Cherng BW, Shimazaki H, Agetsuma M, Shiraki T, Aoki T, Takahoko M, Yamazaki M, Higashijima S, \*Okamoto H (2016). Social conflict resolution regulated by two dorsal

Option A: One million dollars for sure  
Option B: 89% probability of 1 million dollars  
10% probability of 5 million dollars  
1% probability of nothing.

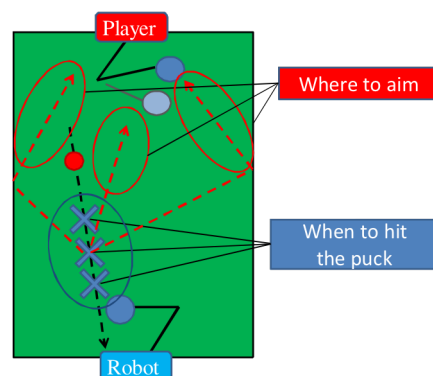
Option C: 11% probability of 1 million dollars  
89% probability of nothing

Option D: 10% probability of 5 million dollars  
90% probability of nothing.

A, B から“89%で100万ドル”を引くと C, D になる



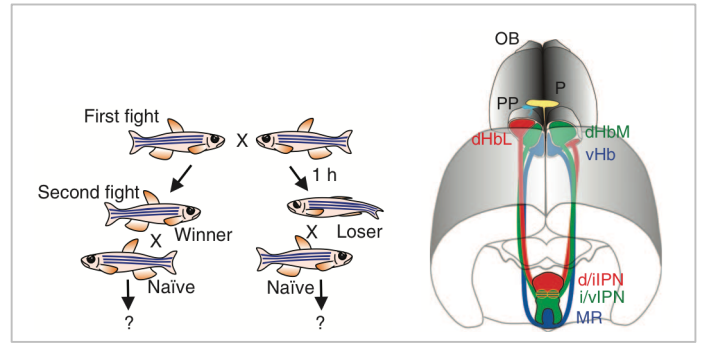
LS-CDE(赤)は入力次元が増えても高い性能を示す。





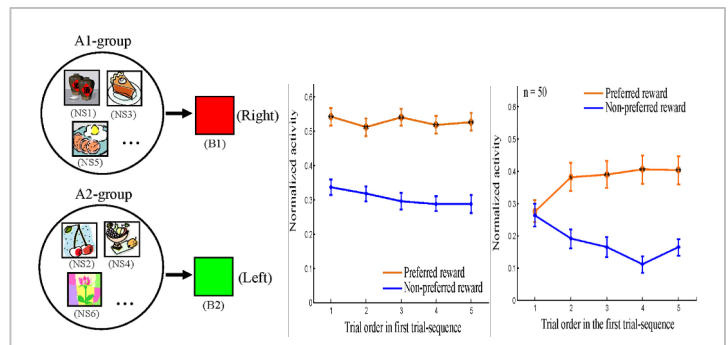
habenular subregions in zebrafish. *Science*, 352:87-90.

ゼブラフィッシュの縄張り争いでは、一度勝った魚は勝ち続け、負けた魚は勝負を諦めやすくなる傾向がある。その神経回路機構をカルシウムイメージングにより探った結果、背側手綱核外側部 (dHbL) から脚間核背側/中間部 (d/iIPN) への結合が敗者では弱まっていることを発見した。さらに光遺伝学手法により dHbL を抑制すると魚は負けやすくなり、逆に背側手綱核内側部 (dHbM) を抑制すると勝ちやすくなることを明らかにした。dHbM は脚間核中間/腹側部 (i/vIPN) を経て中心縫線核を抑制することから、dHbM の抑制はセロトニン系を脱抑制することにより侵害刺激への耐性を高めて勝負を諦めなくする可能性が示唆される。



▲Pan X, Fan H, Sawa K, Tsuda I, Tsukada M, \*Sakagami M (2014). Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons. *Journal of Neuroscience*. 34 1380-1396.

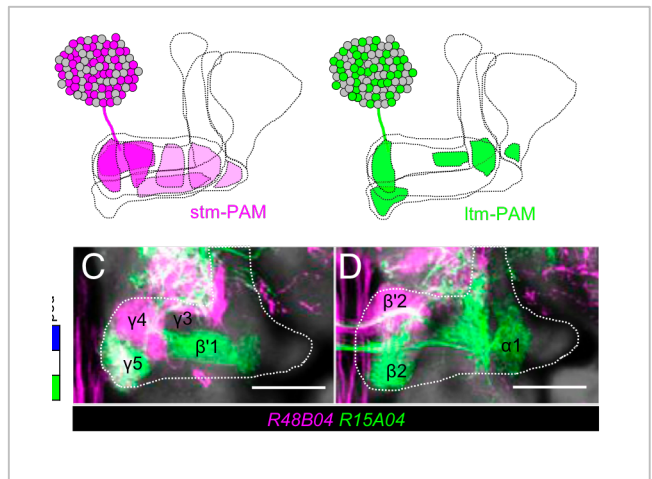
サルは次の刺激を予測させる視覚刺激の任意なグループ構造を学習し、さらに刺激から報酬への関係を学習することができる。外側前頭前野のニューロンは、新たな視覚刺激がどのグループに属するかを学習したのち、どのグループが多く報酬を与えるかを学習すると、報酬課題の最初の試行から報酬の予測に応じた活動を示す。それに対して線条体ニューロンは、一度は報酬の大小を実体験した後でないと報酬予測的な応答を示さない。この結果は、推移律に相当するモデルベースの報酬予測には外側前頭前野が強く関わることを示している。



<公募研究>

◎▲\*Yamagata N, Ichinose T, Aso Y, Plaçais PY, Friedrich AB, Sima R, Preat T, \*Rubin GM, \*Tanimoto H (2015). Distinct dopamine neurons mediate reward signals for short- and long-term memories. *Proc Natl Acad Sci USA*. 112(2): 578-83.

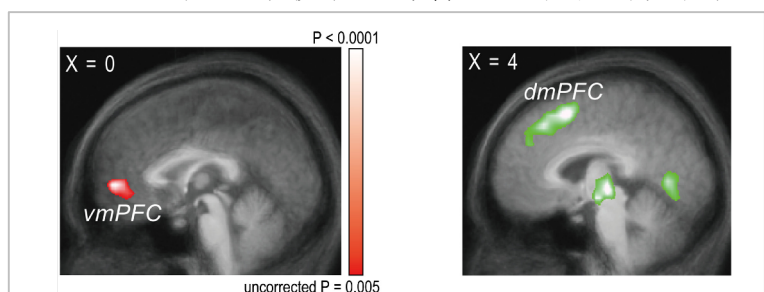
ショウジョウバエは匂いと糖報酬の関係を1回の経験から学習できる。遺伝子発現により区別される異なるドーパミンニューロンのグループを熱遺伝学技術により選択的に刺激することにより、異なるドーパミンニューロンが短期と長期の記憶を独立に誘導する報酬情報を伝達することを明らかにした。さらにそれらのニューロンのイメージングにより、短期と長期の記憶を誘導するドーパミンニューロンはキノコ体の異なる部位に投射することを明らかにした。



なかでも PAM-α1 と呼ばれる約 5 個のドーパミンニューロンが、長期記憶形成に必要な十分な報酬情報を伝達していることを選択的な抑制と刺激実験により明らかにした。

Suzuki S, Harasawa H, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, Haruno M, Cheng K, Nakahara H (2012). Learning to simulate others' decisions. *Neuron*. 74,1125-1137.

ギャンブル課題を行っている他者の行動系列を観察し、その次の選択を予測するという課題を行っている被験者の行動と脳活動の解析を行った。被験者の行動は、これまでの報酬経験から自分ならこれを選ぶという強化学習と、他者の過去の行動傾向からこれを選ぶはずという教師あり学習による行動予測の両者を混合したモデルで最もよく説明できた。それらのモデルによる fMRI データ解析により、強化学習の報酬予測誤差信号は腹内側前頭前野、他者の行動の予測誤差は背内側および背外側前頭前野によりコードされて



い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>

▲Takeuchi H, Kawada R, Tsurumi K, Yokoyama N, Takemura A, Murao T, Murai T, Takahashi H (2015). Heterogeneity of loss aversion in pathological gambling. *Journal of Gambling Studies*, DOI:10.1007/s10899-015-9587-1.

ギャンブル依存には「負けを取り返す」という損失回避行動が関与するという仮説を検証するため、ギャンブル依存患者 31 名に「50%の確率で X 円失い 50%の確率で Y 円得る」か「損も得もしない」という選択課題を行った。Y=λX というモデルで各被験者の損失回避傾向を調べたところ、ギャンブル依存患者は損失回避が強い (λ が大きい) グループと弱いグループの 2 群に分かれることが明らかになった。これはギャンブル依存の治療と予防には人により異なる戦略が必要だという臨床的に重要な知見であるとともに、その脳機構に今後踏み込んで行くための基礎となる発見である。

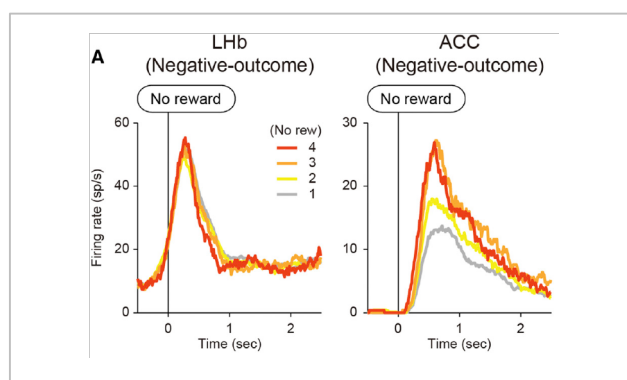
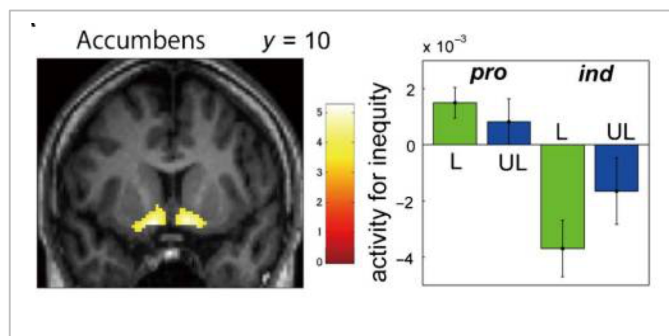
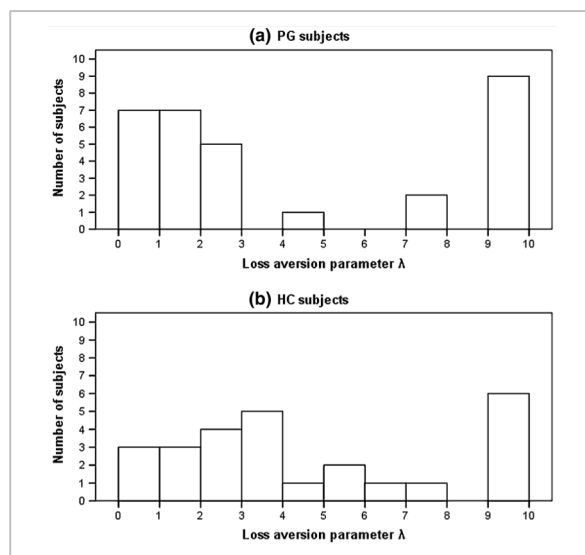
◎Haruno M, Kimura M, Frith CD (2014). Activity in the nucleus accumbens and amygdala underlies individual differences in prosocial and individualistic economic choices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(8), 1861-1870.

公平性をどれだけ好むか(prosocial)、自己の利益を優先するか(individualist)を特徴づけた被験者群に Ultimatum 課題を行わせ、その脳活動を解析した。Prosocial な被験者は不公平なオファーを退ける傾向が強く、その際に側坐核と扁桃体の活動が上昇するのに対し、individualist では活動が低下した。さらにこれらの傾向は、作業記憶の負荷をかけた状況で強まった。これまで公平性を求めるような社会行動は前頭前野の高次の認知機能をともなうものと考えられてきたが、この実験は、側坐核と扁桃体のような情動系が強く関与することを新たに示すものである。

### <公募研究>

▲Kawai T, Yamada H, Sato N, Takada M, \*Matsumoto M (2015). Roles of the lateral habenula and anterior cingulate cortex in negative outcome monitoring and behavioral adjustment in nonhuman primates. *Neuron*, 88, 792-804.

外側手綱核(LHb)のニューロンは罰や無報酬とそれらを予測する刺激に応答し、ドーパミンニューロンを抑制する(Matsumoto & Hikosaka, 2009)。前帯状皮質(ACC)はドーパミンの投射を受け LHb に投射し、行動のモニタリングに関与する。報酬予測課題中の LHb と ACC のニューロン活動を解析した結果、LHb ニューロンはその試行での報酬の有無にすばやく応答するのに対し、ACC ニューロンは無報酬試行が続くと次第に応答を強めるという違いが明らかになった



## 6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）（5 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

### <論文>

#### A01 計画研究（岡田光弘）

- ▲\*Shikishima C, Hiraishi K, Yamagata S, Ando J, Okada M (2015). Genetic factors of individual differences in decision making in economic behavior: A Japanese twin study using the Allais problem. *Frontiers in Psychology*, 6(1712).
- ▲\*Kaneko M, Liu S (2015). Elimination of Dominated Strategies and Inessential Players, *Operations Research and Decisions* 25, 35-56. DOI: 10.5277/ord150153.
- ▲\*Mineshima K, Sato Y, Takemura R, Okada M (2014). Towards explaining the cognitive efficacy of Euler diagrams in syllogistic reasoning: A relational perspective. *Journal of Visual Languages and Computing*, 25(3):pp.156-169.
- \*Takemura R, Shimajima A, Katagiri Y (2014). Logical investigation of reasoning with tables. In *Diagrammatic Representation and Inference* (pp. 261-276). Springer Berlin Heidelberg.

#### A01 計画研究（今井むつみ）

- ▲\*Imai M, Kanero J, Masuda T (2016). The Relation between Language, Culture and Thought. *Current Opinion in Psychology*, 8, 70-77
- ▲\*Imai M, Miyazaki M, Yeung H, Hidaka S, Kantartzis K, Okada H, Kita S (2015). Sound symbolism facilitates word learning in 14-month-olds. *PLOS ONE*.
- ◎▲\*Asano M, Imai M, Kita S, Kitajo K, Okada H, Thierry G (2015). Sound Symbolism Scaffolds Language Development in Preverbal Infants. *Cortex*, 63, 196-205.
- ▲\*Imai M, Kita, S (2014). The sound symbolism bootstrapping hypothesis for language acquisition and language evolution. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 369(1651), pii: 20130298.
- ◎▲\*Kanero J, Imai M, Okuda J, Okada H, Matsuda T (2014). How sound symbolism is processed in the brain: A study on Japanese mimetic words. *PLoS ONE* 9(5):e97905.

#### A01 計画研究（杉山将）

- ▲Ma Y, Zhao T, Hatano K, Sugiyama M (2016). An online policy gradient algorithm for Markov decision processes with continuous states and actions. *Neural Computation*, vol.28, no.3, pp.563-593.
- ▲Sugimoto N, Tangkaratt V, Wensveen T, Zhao T, Sugiyama M, Morimoto J (2016). Trial and error: using previous experiences as simulation models in humanoid motor learning. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol.23, Issue 1, pp.96-105.
- ▲Shiga M, Tangkaratt V, Sugiyama M (2015). Direct conditional probability density estimation with sparse feature selection. *Machine Learning*, 100, 161-182.
- ▲Tangkaratt V, Mori S, Zhao T, Morimoto J, Sugiyama M (2014). Model-based policy gradients with parameter-based exploration by least-squares conditional density estimation. *Neural Networks*, 57, 128-140.

#### A01 計画研究（柴田智広）

- Nakamura A, Funaya H, Uezono N, Nakashima K, Ishida Y, Suzuki T, Wakana S, Shibata T (2015). Low-cost three-dimensional gait analysis system for mice with an infrared depth sensor, *Neuroscience Research*, 100, 55-62.
- Funaya H, Shibata T (2015). Preference bias of head orientation in choosing between two non-durables, *Frontiers in Psychology*, 6, 849.
- Funaya H, Wu J, Kawamura Y, Shibata T (2014). Real-time intervention on the shopper's decision process by autonomous agents. *Proc of 19th Robotics Symposia*, 559-564.

#### A01 公募研究（平成 26～27 年度）

- \*Igeta K, Namiki A (2015). A decision-making algorithm for an air-hockey robot that decides actions depending on its opponent player's motions, *IEEE Conference on Robotics and Biomimetics*, 1840-1845.
- ▲Iguchi Y, Kosugi S, Lin Z, Nishikawa H, Minabe Y, \*Toda S (2015). Pre-stress performance in an instrumental training predicts post-stress behavioral alterations in chronically stressed rats. *Frontiers in Behave Neurosci*, 2015, 9, 119.

- ▲Okada K, \*Kobayashi Y (2014). Fixational saccade-related activity of pedunclopontine tegmental nucleus neurons in behaving monkeys. *Eur J Neurosci.* 40(4), 2641-51.
- \*Terasawa Y, Kurosaki Y, Ibata Y, Moriguchi Y, Umeda, S. (2015). Attenuated sensitivity to the emotions of others by insular lesion. *Frontiers in Psychology*, 6, 1314.
- Takiyama K (2016). Bayesian estimation inherent in a Mexican-hat type neural network. *Physical Review E*, 93(5), 052303.
- ▲\*内部英治 (2016). 線形可解マルコフ決定過程を用いた順・逆強化学習. 日本神経回路学会誌, 23, 2-13.
- A01 公募研究 (平成 24~25 年度)**
- Qiao Y, uo D, Minematsu N (2013). Unsupervised optimal phoneme segmentation: theory and experimental evaluation. *IEEE Trans. Systems, Man & Cybernetics*, 7(7), 577-586.
- Shimada A, Charvillat V, Nagahara H, Taniguchi R (2013). Geolocation based landmark detection and annotation -Towards clickable real world-, *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 133, 142-149.
- ▲Sudo T, Nojima Y, \*Ishibuchi H, (2014). Effects of ensemble action selection on the evolution of iterated prisoner's dilemma game strategies. *Proc. of 2014 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, 1195-1201. Beijing, China.
- \*Terasawa Y, Fukushima H, Umeda S (2013). How does interoceptive awareness interact with the subjective experience of emotion? An fMRI study. *Human Brain Mapping*, 34, 598-612.
- ▲\*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, 7.
- A02 計画研究 (坂上雅道)**
- Fermin A, Sakagami M, Kiyonari T, Li Y, Matsumoto Y, \*Yamagishi T (2016). Representation of economic preferences in the structure and function of the amygdala and prefrontal cortex. *Scientific Reports*, 6, 20982.
- ▲Oguchi M, Okajima M, Tanaka S, Koizumi M, Kikusui T, Ichihara N, Kato S, Kobayashi K, \*Sakagami M (2015). Double virus vector infection to the prefrontal network of the macaque brain. *PLoS One*. 10(7): e0132825.
- ▲Tanaka S, \*Pan X, Oguchi M, Taylor J, Sakagami M (2015). Dissociable functions of reward inference in the lateral prefrontal cortex and the striatum. *Front. Psychol.* 6 (996).
- ▲Pan X, Fan H, Sawa K, Tsuda I, Tsukada M, \*Sakagami M (2014). Reward inference by primate prefrontal and striatal neurons. *J Neurosci.* 34 1380-1396.
- ▲Pan X, \*Sakagami M (2012). Category representation and generalization in the prefrontal cortex. *Eur. J. Neurosci.* 35 1083-91
- A02 計画研究 (銅谷賢治)**
- \*Caligiore D, Pezzulo G, Baldassarre G, Bostan, AC, Strick PL, Doya K, Helmich R.C, Dirks M, Houk J, Jörntell H, Lago-Rodriguez A, Galea JM., Miall RC, Popa T, Kishore A, Verschure PFMJ, Zucca R, Herreros I (2016). Consensus paper: towards a systems-level view of cerebellar function: The interplay between cerebellum, basal ganglia, and cortex. *The Cerebellum*, 15, 1-27.
- ◎▲\*Balleine B, Dezfouli A, Ito M, Doya K (2015). Hierarchical control of goal-directed action in the cortical-basal ganglia network. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 5, 1-7.
- ◎▲Ito M, Doya K (2015). Distinct neural representation in the dorsolateral, dorsomedial, and ventral parts of the striatum during fixed- and free-choice tasks. *Journal of Neuroscience*, 35, 3499-3514.
- ◎\*船水草大, 銅谷賢治 (2015). 予測 大脳新皮質のベイジアンフィルタ仮説. 生体の科学, 66, 33-37.
- ◎\*銅谷賢治 (2013). 脳内シミュレーションと意思決定の神経回路. 生体の科学, 64, 297-300.
- \*Doya K, Shadlen MN (2012). Decision making. *Current Opinion in Neurobiology*, 22, 911-913.
- ◎▲\*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. *European Journal of Neuroscience*, 35, 1180-1189.
- A02 計画研究 (岡本仁)**
- ▲Chou MY, Amo R, Kinoshita M, Chong BW, Shimazaki H, Agetsuma M, Shiraki T, Aoki T, Takahoko M, Yamazaki M, Higashijima S, \*Okamoto H (2016). Social conflict resolution regulated by two dorsal habenular subregions in zebrafish. *Science*, 352:87-90.
- Aoki R, Tsuboi T, Okamoto H (2014). Y-maze avoidance: an automated and rapid associative learning paradigm in zebrafish. *Neuroscience Research*, 91, 69-72.

Amo R, Fredes F, Kinoshita M, Aoki R, Aizawa H, Agetsuma M, Aoki T, Shiraki T, Kakinuma H, Matsuda, M, Yamazaki M, Takahoko M, Tsuboi T, Higashijima S, Miyasaka N, Koide T, Yabuki Y, Yoshihara Y, Fukai T, Okamoto H (2014). The habenulo-raphe habenulo-raphe serotonergic circuit encodes an aversive expectation value essential for adaptive active avoidance of danger. *Neuron*, 8(5), 1034-1048

Okamoto H, Aizawa H (2013). Fear and anxiety regulation by conserved affective circuits. *Neuron* 78(3), 411-413.

Aoki T, Kinoshita M, Aoki R, Agetsuma M, Aizawa H, Yamazaki M, Takahoko M, Amo R, Arata A, Higashijima S, Tsuboi T, Okamoto H (2013), Imaging of neural ensemble for the retrieval of a learned behavioral program. *Neuron*, 78 (5) , 881-894.

## A02 公募研究 (平成 26~27 年度)

▲Lyttle K, \*Ohmura Y, Konno K, Yoshida T, Izumi T, Watanabe M, Yoshioka M (2015). Repeated fluvoxamine treatment recovers juvenile stress-induced morphological changes and depressive-like behavior in rats. *Brain Research*, 1616, 88-100.

▲\*Sakamoto K, Kawaguchi N, Yagi K, Mushiake H (2015). Spatiotemporal patterns of current source density in the prefrontal cortex of a behaving monkey. *Neural Networks*, 62, 67-73.

▲Tsutsui KI\*†, Hosokawa T†, Yamada M, Iijima T (2016) Representation of functional category in the monkey prefrontal cortex and its rule-dependent use for behavioral selection. *Journal of Neuroscience* 36: 3038-3048. († equally contributed)

◎▲\*Yamagata N, Ichinose T, Aso Y, Plaça PY, Friedrich AB, Sima R, Preat T, \*Rubin GM, \*Tanimoto H (2015). Distinct dopamine neurons mediate reward signals for short- and long-term memories. *Proc Natl Acad Sci USA*. 112(2): 578-83.

▲Murata K., Kanno M., Ieki N., \*Mori K., and \*Yamaguchi M (2015). Mapping of learned odor-induced motivated behaviors in the mouse olfactory tubercle. *Journal of Neuroscience*, 35, 10581-10599.

▲\*Morita K, Kawaguchi Y (2015). Computing reward-prediction error: an integrated account of cortical timing and basal-ganglia pathways for appetitive and aversive learning. *European Journal of Neuroscience*, 42, 2003-2021.

◎▲Mizoguchi H, Katahira K, Inutsuka A, Fukumoto K, Wang T, Nagai T, Sato J, Sawada M, Ohira H, \*Yamanaka A, Yamada K (2015). The insular GABAergic system controls decision-making in healthy and drug-dependent rats. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.*, 112, E3930-3939.

Okada, K., Nishizawa, K., Fukabori, R., Kai, N., Shiota, A., Ueda, S., Tsutsui, Y., Sakata, S., Matsushita, N., and \*Kobayashi, K. (2014) Enhanced flexibility of place discrimination learning by targeting of striatal cholinergic interneurons. *Nat. Commun.* 5: 3778.

▲Fujiyama F, Karube F, Takahashi S (2015). Morphological elucidation of basal ganglia circuits contributing reward prediction. *Frontiers in Neuroscience*, 9, 6.

▲†Miyazaki KW, \*†Miyazaki K, Tanaka KF, Yamanaka A, Takahashi A, Tabuchi S, Doya K (2014). Optogenetic activation of dorsal raphe serotonin neurons enhances patience for future rewards. *Current Biology*, 24, 2033-2040. †These authors contributed equally to this work.

▲\*Ito M, Doya K (2015). Parallel representation of value-based and finite state-based strategies in the ventral and dorsal striatum. *PLOS Computational Biology*, 11(11), e1004540.

◎▲\*Morita K, Kawaguchi Y (2015). Computing reward prediction error: an integrated account of cortical timing and basal-ganglia pathways for appetitive and aversive learning. *Eur J Neurosci*, 42, 2003-2021.

Chuong A, Miri M, Busskamp V, Matthews G, Acker L, Sorensen A, Young A, Klapoetke N, Henninger M, Kodandaramaiah S, Ogawa M, Ramanlal S, Bandler R, Allen B, Forest C, Chow B, Han X, Lin Y, Tye K, Roska B, Cardin J, \*Boyden E. (2014). Noninvasive optical inhibition with a red-shifted microbial rhodopsin. *Nature Neuroscience*, 85: 942-958.

Nakahara H. (2014) Multiplexing signals in reinforcement learning with internal models and dopamine. *Current Opinion in Neurobiology*, 25, 123-129.

◎ Kanai R, Komura, Y., Shipp S, \*Friston K (2015). Cerebral hierarchies: predictive processing, precision and the pulvinar. *Phil Trans Roy Soc B*, 370 (1668) 69-81.

## A02 公募研究 (平成 24~25 年度)

▲\*Ohmura Y, Tanaka F K, Tsunematsu T, \*Yamanaka A, Yoshioka M (2014). Optogenetic activation of serotonergic neurons enhances anxiety-like behavior in mice. *International Journal of Neuropsychopharmacology*, 17, 1777-1783.

- ▲Ogawa H, Oka K (2015). Direction-specific adaptation in neuronal and behavioral responses of an insect mechanosensory system. *Journal of Neuroscience*, 35, 11644–11655.
- Ohmae S, Uematsu A, \*Tanaka M (2013). Temporally specific sensory signals for the detection of stimulus omission in the primate deep cerebellar nuclei. *Journal of Neuroscience*, 33, 15432–15441.
- Fujiwara J, Usui N, Park SQ, Williams T, Iijima T, Taira M, Tsutsui KI, Tobler PN\* (2013) Value of freedom to choose encoded by the human brain. *Journal of Neurophysiology* 110: 1915–1929.
- Hioki H, Okamoto S, Konno M, Kameda H, Sohn J, Kuramoto E, Fujiyama F, Kaneko T. Cell type-specific inhibitory inputs to dendritic and somatic compartments of parvalbumin-expressing neocortical interneuron. *J Neurosci*, 33:544–555, 2013
- ▲Okada K, \*Kobayashi Y (2013). Reward prediction-related increases and decreases in tonic neuronal activity of the pedunculopontine tegmental nucleus. *Front Integr Neurosci*, 14:7:36.
- Hirano M, Kato S, Kobayashi K, Okada T, Yaginuma H, \*Kobayashi K (2013). Highly efficient retrograde gene transfer into motor neurons by lentiviral vector pseudotyped with fusion glycoprotein. *PLoS One* 8, e75896
- Muto A, Ohkura M, Abe G, Nakai J, Kawakami K (2013). Real-Time Visualization of Neuronal Activity during Perception. *Current Biology* 23(4):307–11.
- Suzuki S, Harasawa H, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, Haruno M, Cheng K, Nakahara H (2012). Learning to simulate others' decisions. *Neuron*. 74, 1125–1137.
- ◎Teramae J \*Fukai T (2014). Computational implementations of lognormally distributed synaptic weights. *Proceedings of the IEEE*, 102, 4, 1–13.
- ▲\*Komura Y, Nikkuni A, Hirashima N, Uetake T, Miyamoto A (2013). Responses of pulvinar neurons reflect a subject's confidence in visual categorization. *Nature Neuroscience* 16(6), 749–755.

#### A03 計画研究 (高橋英彦)

- ▲Takeuchi H, Kawada R, Tsurumi K, Yokoyama N, Takemura A, Murao T, Murai T, Takahashi H (2016). Heterogeneity of loss aversion in pathological gambling. *J Gambling Studies*, in press.
- ▲Son S, Kubota M, Miyata J, Fukuyama H, Aso T, Urayama S, Murai T, Takahashi H (2015). Creativity and positive symptoms in schizophrenia revisited: Structural connectivity analysis with diffusion tensor imaging. *Schizophr Res*, 164:221–226.
- ▲Jankowski KF, Takahashi H (2014). Cognitive neuroscience of social emotions and implications for psychopathology: examining embarrassment, guilt, envy, and schadenfreude. *Psychiatry Clin Neurosci*, 68:319–336.
- ◎▲Takahashi H, Fujie S, Camerer CF, Arakawa R, Takano H, Kodaka F, Matsui H, Ideno T, Okubo S, Takemura K, Yamada M, Eguchi Y, Murai T, Okubo Y, Kato M, Ito H, Suhara T (2013). Norepinephrine in the brain is associated with aversion to financial loss. *Mol Psychiatry*, 18:3–4.
- ◎▲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, 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 USA*, 109:4281–4284.

#### A03 計画研究 (木村寛)

- ◎Minamimoto T, Hori Y, Yamanaka K, Kimura M (2014). Neural signal for counteracting pre-action bias in the centromedian thalamic nucleus. *Frontiers in Systems Neuroscience*, 8(3).
- ◎Haruno M, Kimura M, Frith CD (2014). Activity in the nucleus accumbens and amygdala underlies individual differences in prosocial and individualistic economic choices. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(8), 1861–1870.
- ◎▲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 Neurophysiology*, 109, 1140–1151.
- ◎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.

#### A03 計画研究 (疋田貴俊)

- ▲Macpherson T, Morita M, Wang Y, Sasaoka T, Sawa A, \*Hikida T (2016). Nucleus accumbens dopamine D2-receptor expressing neurons control behavioral flexibility in a place discrimination task in



the IntelliCage. Learning & Memory, in press.

- ◎▲Hayashi Y, Sawa A, \*Hikida T (2016). Impaired hippocampal activity at the goal zone on the place preference task in a DISC mouse model. Neuroscience Research, 106, 70-73.
- ◎▲Yamaguchi T, Goto A, Nakahara I, Yawata S, Hikida T, Matsuda M, \*Funabiki K, \*Nakanishi S (2015). Role of PKA signaling in D2 receptor-expressing neurons in the core of the nucleus accumbens in aversive learning. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112, 11383-11388.
- ▲\*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. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 110, 342-347.
- ▲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, 537-544.

#### A03 公募研究（平成 26～27 年度）

- ▲Kamii H, Kurosawa R, Taoka N, Shinohara F, Minami M, \*Kaneda K (2015). Intrinsic membrane plasticity via increased persistent sodium conductance of cholinergic neurons in the rat laterodorsal tegmental nucleus contributes to cocaine-induced addictive behavior. European Journal of Neuroscience, 41, 1126-1138.
- ▲Kawai T, Yamada H, Sato N, Takada M, \*Matsumoto M (2015). Roles of the lateral habenula and anterior cingulate cortex in negative outcome monitoring and behavioral adjustment in nonhuman primates. Neuron, 88, 792-804.
- ▲Asaoka N, Nagayasu K (co-first author), Nishitani N, Yamashiro M, Shirakawa H, \*Nakagawa T, Kaneko S (2015). Olanzapine augments the effect of selective serotonin reuptake inhibitors by suppressing GABAergic inhibition via antagonism of 5-HT6 receptors in the dorsal raphe nucleus. Neuropharmacology, 95, 261-268.
- ▲Abe Y, Sakai Y, Nishida S, Nakamae T, Yamada K, Fukui K, Narumoto J (2015). Hyper-influence of the orbitofrontal cortex over the ventral striatum in obsessive-compulsive disorder. European Neuropsychopharmacology, 25, 1898-1905.
- Hayashi K, Nakao K, Nakamura K (2015). Appetitive and aversive information coding in the primate dorsal raphe nucleus. [Journal of Neuroscience](#). 35:6195-6208.

#### A03 公募研究（平成 24～25 年度）

- ▲Takayanagi Y, Yoshida M, Takashima A, Takanami K, Yoshida S, Nishimori K, Nishijima I, Sakamoto H, Yamagata T, \*Onaka T (2016). Activation of Supraoptic Oxytocin Neurons by Secretin Facilitates Social Recognition. Biological Psychiatry, in press.
- \*Tachibana Y, Hikosaka O (2012). The primate ventral pallidum encodes expected reward value and regulates motor action. Neuron, 76, 826-837.

#### <書籍>

今井むつみ (2016). 学びとは何か——〈探究人〉になるために. 岩波新書.

▲Sugiyama M. (2015). Introduction to Statistical Machine Learning. 534 pages, Morgan Kaufmann.

▲Sugiyama M, Suzuki T, Kanamori T. (2012). Density Ratio Estimation in Machine Learning. 344 pages, Cambridge University Press.

Doya K, Kimura M (2013). The basal ganglia, reinforcement learning, and the encoding of value. In Glimcher PW, Fehr E (eds.) Neuroeconomics: Decision Making and the Brain, 321-333. Academic Press.

#### <ホームページ>

新学術領域研究「予測と意思決定」ホームページ: <http://www.decisions.jp>

#### <主催シンポジウム等>

2nd International Symposium on Prediction and Decision Making. 2015.10.31～11.1, 東京大学.

1st International Symposium on Prediction and Decision Making. 2013.10.13～14, 京都大学.

#### <その他アウトリーチ活動>

ABLE (Agents for Bridging Learning research and Educational practice) 2012～2015, 東京.

#### <特許等>

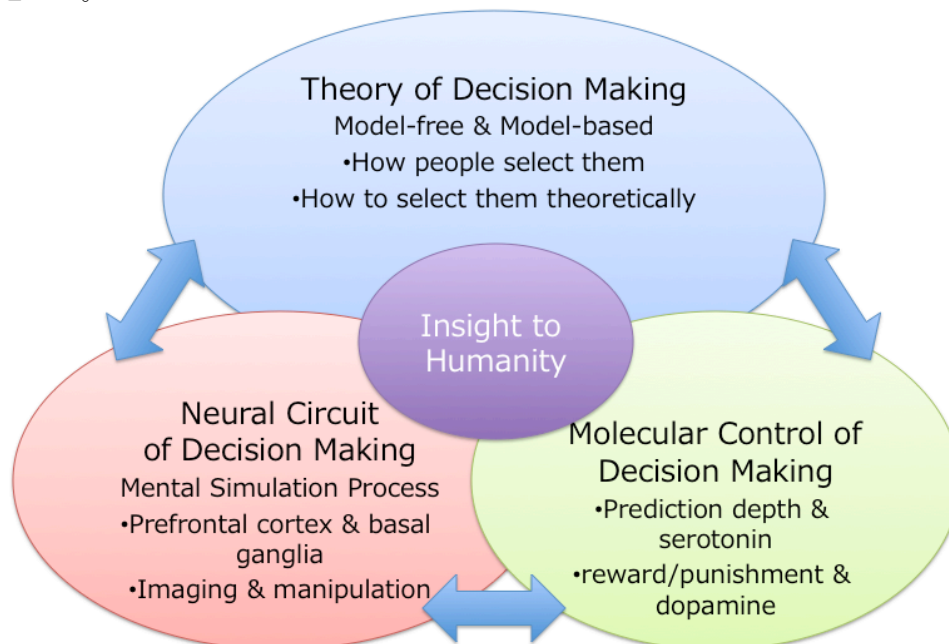
Uchibe E, Doya K (2015). Inverse reinforcement learning by density ratio estimation. PCT/JP2015/004001.

Chib V, Yun K, Takahashi H, Shimojo S (2014). Remote Activation of the Midbrain by Transcranial Direct Current Stimulation of Prefrontal Cortex. US Patent CIT 6596, File No. 065471-000042US00.

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

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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

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た。



具体的に以下のような共同研究も進展した。

- ・ 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合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。
- ・ A01 杉山らによる条件付き確率の効率良い計算手法にヒントを得て、A01 内部は逆強化学習の新たな方式を導出した。
- ・ 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。



## 8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

<岡田>

これまでの意思決定および論理推論の研究手法を超える決定プロセスや判断プロセスを解明する目的で、眼球運動計測装置 Tobii（Tobii X2-60 TSPA）を 2013 年度に購入した。既存の Eyelink などの計測とともに本研究課題の実験デザイン設定上、重要な役割を果たしてきた。

<今井>

平成 24 年 1 月に購入した Tobii 製視線計測装置 Tobii300 は玉川大学内の赤ちゃんラボに設置され、対称性推論における乳幼児調査にて用いられた。この装置は乳児を対象とした対称性推論の調査の中核として活用された。

<杉山>

多数の計算サーバーを導入することにより、開発した機械学習アルゴリズムの大規模性能評価を網羅的かつ効率よく行うことができ、説得力のある実験結果を得たことが競争率の高い国際会議への多数の論文採択につながった。

また、高性能の実ヒューマノイドロボットシステム（ロボット・油圧源ユニット）とその実験環境の構築ツール（高精度 3D プリンタ）を導入することで実環境でのアルゴリズムの検証を可能とした。

<柴田>

モバイル型眼球運動計測装置（ナックイメージテクノロジー EMR-9）を用いて、実店舗での fNIRS 計測と眼球運動計測に先進的に取り組み、その成果を電子情報通信学会に公表した。また、低付加価値商品の強制二択課題において、本装置を用いた眼球運動計測に加え、他のデバイスを用いた顔向き、側圧中心情報の同時計測を行ったところ、選択される商品を事前に最も良く予測できるのは顔向き情報であることが分かり、ジャーナル論文出版を行った。

小型コミュニケーションロボット（ATR Robovie-mR2）を用いた実店舗実験により、ロボットがその店舗で長らく売り上げ第 1 位と第 2 位であった商品（低付加価値商品である土産）を発話・身振りにより売り上げを逆転させることができた。また、ラボでの基礎実験では、低付加価値商品の強制二択課題において、デジタルサイネージとの推薦効果の比較を行い、ロボット推薦は選択期間終了間際には相対的に効果が薄い可能性があることが分かった。

<銅谷>

連携研究者の Bernd Kuhn が仮想音空間での自由行動マウスの神経活動記録のための二光子顕微鏡システムを独自に設計しパーツから組み上げたため、実験に最適な高性能のシステムが安価に導入できた。

<坂上>

U プローブを使って、前頭前野の神経活動がどのように大脳基底核に伝わるかについての研究を行った。これまで、行動課題遂行中のサル複数の領域のニューロン活動を同時記録し、その相互作用について調べることは極めて難しかった。本領域研究では、その研究費によって購入した U プローブ電極と神経活動処理システムを使って、前頭前野から大脳基底核線条体に送られる神経信号の流れを解析した。その解析は、transfer entropy を指標として行われたが、それによって前頭前野から線条体に送られる情報が、衝動性の制御に関わることが明かになった。その成果は、Ma et al., 2013 に発表した。

<高橋>

アイトラッカーは京都大学・慶應義塾大学で購入したが、同じメーカーのものを購入し、データを共有できるように活用している。

<木村>

研究代表者の所属する研究機関の研究室では、日本ザルの飼育施設、モンキーチェア、微小電極記録装置、増幅器、組織検索機器などのシステム神経科学の施設及び機器が整っており、本研究課題でも活用した。整備されていなかった、眼球運動計測機器、頭部手術関連機器、行動実験制御プログラム開発などに研究費を充てた。その上で、実験及びデータ解析を推進する博士研究員 2 名を雇用し、研究費の効果的な活用に努力した。

<疋田>

公募研究の溝口博之、村田航志へウイルスベクターの提供を行い、共同研究を進めた。

公募研究の伊藤真を研究分担者・大学院生が訪問し、脳内視鏡装置の活用について議論した。

# ・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細 (計画研究において購入した主要な物品 (設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。) について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価 (円)	金額 (円)	設置(使用)研究機関
23	走査型多光子顕微鏡用 波長可変超短パルス秒 レーザ	コヒーレントジャパン 社製 Chameleon Vision II-MP	1	18,375,000	18,375,000	OIST (銅谷)
	可動式顕微鏡システム	米国 Sutter 社製	1	16,653,000	16,653,000	OIST (銅谷)
	マルチチャンネル神経デ ータ収集システム	OmniPlex/64 OmniPlex	1 1	7,770,000 3,874,500	11,644,500	玉川大学 (坂上)
	急速眼球運動解析装置	SR リサーチ・EyeLinkII	1	6,906,000	6,906,000	玉川大学 (木村)
	モバイル型眼球運動計 測装置	ナック・EMR-9-Glite	1	2,643,375	5,286,750	奈良先端大 (柴田)
	視線計測装置	Tobii TX300	1	4,996,540	4,996,540	京都大学 (高橋)
		Tobii 300	1	4,734,660	4,734,660	玉川大学 (今井)
	多光子専用対物レンズ	XLPLN25XWMP	2	2,060,520	4,121,040	OIST (銅谷)
	マルチチャンネル電極	U-Probe16	8	496,125	3,969,000	玉川大学 (坂上)
	高精度 3D プリンタ	Agilista-3000	1	3,360,000	3,360,000	ATR (杉山)
	8 方向放射状迷路	小原医科産業・マウス用	1	3,208,200	3,208,200	OBI (疋田)
	視線計測装置	Tobii T60	1	2,968,350	2,968,350	慶應義塾大学 (高橋)
	CMOS カメラ	PCO AG・pco.edge	1	2,895,984	2,895,984	OIST (銅谷)
	小型コミュニケーション ンロボット	ATR・Robovie0mR2	2	1,417,500	2,835,000	奈良先端大 (柴田)
	光刺激用レーザー	ルシール・ COME2-LB473/593/200	1	2,689,260	2,689,260	理化学研究所 (岡本)
	計算サーバ	HPC5000-XS216R1S	1	2,662,497	2,662,497	東京工業大学 (杉山)
24	携帯型光トポグラフィ	日立製作所・WOT-100-10	2	2,992,500	5,985,000	九州工業大学 (柴田)
	計算サーバ	HPC5000-XS216R1S-wa	1	3,549,996	3,549,996	東京工業大学 (杉山)
	高速スキャンミラー	Sutter・MOM Rescanner	1	2,999,850	2,999,850	OIST (銅谷)
	データ解析システム	モンテ・バイオパック	1	2,759,400	2,759,400	京都大学 (高橋)
	モーショントラッカー	Radish RD60G-3D	1	2,094,750	2,094,750	OIST (銅谷)
25	超小型内視鏡顕微鏡	Inscopix Inc.	1	7,711,500	7,711,500	OIST (銅谷)
	双腕ロボットシステム	Rethink Robotics Baxter	1	4,704,000	4,704,000	九州工業大学 (柴田)
	計算サーバ	DELL PowerEdge R420	5	699,300	3,496,500	東京工業大学 (杉山)
	高性能人型ロボット	SARCOS	1	2,784,887	2,784,887	ATR (杉山)
	頭部穿孔装置	ナカニシ Primado2	1	2,771,712	2,771,712	玉川大学 (木村)
	視線計測装置	Tobii X2-60 TSPA	1	2,130,400	2,130,400	慶應義塾大学 (岡田)
26	オペラント実験装置	小原医科産業株式会社	1	5,571,720	5,571,720	OIST (銅谷)
	油圧源ユニット	α ユニット 40	1	3,348,000	3,348,000	ATR (杉山)
	sCMOS カメラ	オリンパス ZY1a4.2	1	2,154,600	2,154,600	OBI (疋田)
27	該当なし					

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成23年度】

・旅費

国際共同研究打ち合わせ（岡田：パリ、柴田：オクスフォード、他）438万円

研究初年度にあたり、国際的な連携のベースを築くため多数の海外出張を行った。

脳と心のメカニズム冬のワークショップ（講師招聘：Rao Rajesh）80万円

JNNS2011（協賛）特別講演（講師招聘：Peter Dayan）55万円

予測と意思決定の分野で先進的な研究を行う研究者を招き新たなアプローチを学ぶ機会を設けた。

・人件費・謝金

ポスドク研究員7名（今井、柴田、坂上、岡本、高橋、疋田）1,445万円

研究補助員9名（岡田、今井、高橋、木村、杉山）487万円

総括班事務局員（松尾）1名 122万円

・その他

心理実験のための調査発送業務委託（岡田）163万円

SPF環境下での動物飼育委託（7ヶ月）（疋田）509万円

遺伝子組換えマウスのSPF化作業委託2件（疋田）105万円

【平成24年度】

・旅費

国際共同研究打ち合わせ（今井：招聘2件、高橋：ニューオリンズ）98万円

研究成果発表（岡田：パリ他、今井：国内、柴田：テジョン他、銅谷：ハワイ、高橋：サンクトペテルブルク他）397万円

初期の研究成果を国内外の学会等で発表し、フィードバックを得ることをめざした。

津田領域合同シンポジウム（講師招聘：Nathaniel Daw）50万円

脳と心のメカニズム冬のワークショップ、（講師招聘：Kent Charles Berridge）79万円

予測と意思決定の分野で先進的な研究を行う研究者を招き新たなアプローチを学ぶ機会を設けた。

・人件費・謝金

ポスドク研究員7名（杉山、柴田、坂上、岡本、高橋、木村）1,562万円

研究補助員19名（岡田、今井、杉山、柴田、高橋、木村）1,200万円

総括班事務局員（松尾）1名 173万円

・その他

SPF環境下での動物飼育委託（6ヶ月）（疋田）252万円

映像データコーパス内の発話書き起し（今井）99万円

バイオリソース費（NBRP ニホンザル5頭）（木村）92万円

【平成25年度】

・旅費

研究成果発表（岡田：ローマ他、今井：国内、柴田：国内、坂上：アメリカ他、銅谷：パリ、高橋：ベルリン他、疋田：アメリカ）674万円

1st International Symposium on Prediction and Decision Making（講師招聘7名：Daeyeol Lee、Daphna Shohamy、Paul Philips、Karl Sigmund、Masaki Isoda、Adam Kepecs、Fatuel Tecuapetla）347万円

研究成果の中間発表と国際的なネットワーク形成のため、領域主催の国際シンポジウムを開催した。

・人件費・謝金

ポスドク研究員14名（今井、杉山、柴田、坂上、銅谷、岡本、高橋、疋田）4,143万円

研究補助員12名（岡田、杉山、柴田、高橋、木村）4,982万円

総括班事務局員（松尾）1名 179万円

・その他

京都大学動物飼育施設利用負担金（11ヶ月）（疋田）132万円

実験スペース使用料（岡田）115万円

【平成26年度】

・旅費

研究成果発表（岡田：アメリカ他、今井：国内、柴田：国内、坂上：アメリカ、銅谷：パリ、高橋：フィレンツェ他、疋田：ワシントンDC）467万円

脳と心のメカニズム冬のワークショップ（講師招聘：Etienne Koechlin、森島陽介）101万円

IBRO サマースクール協賛（講師招聘：Michael Platt）30万円

神経科学をめざす国内外の若手に、意思決定の先端的な研究を学ぶ機会を提供した

・人件費・謝金

ポスドク研究員13名（今井、杉山、柴田、坂上、銅谷、岡本、高橋、木村、疋田）5,376万円

研究補助員14名（岡田、今井、柴田、坂上、高橋、木村）1,046万円

総括班事務局員（松尾）1名 182万円

・その他

実験スペース使用料（岡田） 115万円

【平成27年度】

・旅費

研究成果発表（岡田：ヘルシンキ他、今井：国内、坂上：アメリカ他、銅谷：パリ、疋田：アメリカ）554万円

2nd International Symposium on Prediction and Decision Making（講師招聘 16名：Robert Malenka、Anatol Kreitzer、Bernard Balleine、Catharine Winstanley、Toshio Yamagishi、John O' Doherty、Wolfram Schultz、Nathaniel Daw、A. David Redish、David Foster、Sophie Deneve、Read Montague、Mitsuo Kawato、Mathias Pessiglione、Michael J. Frank、Takafumi Minamimoto）836万円

領域の最終年度にあたり、その成果報告とプロモーションのため国際シンポジウムを開催した。

脳と心のメカニズム冬のワークショップ（講師招聘：柳下翔、Matthew Rushworth、William Newsome）205万円

スペシャルセッション “Dynamics of Decision Making” を企画し先端的な研究者を招聘した。

・人件費・謝金

ポスドク研究員 10名（今井、杉山、坂上、銅谷、岡本、高橋、木村、疋田）3,696万円

研究補助員 90名（岡田、今井、坂上、高橋、木村）848万円

総括班事務局員（松尾）1名 180円

・その他

実験スペース使用料（岡田） 96万円

（3）最終年度（平成27年度）の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

A01 岡田光弘

パリ大学、リヨン大学、ENS、INRIA との論理判断理論およびその計算論に関する連携研究の成果を2016年2月に発表する予定であったが、フランス側の都合で日仏シンポジウムの開催が延期となり、次年度繰越をおこなった。8～9月に計算論的成果についての連携成果の発表を行い、11月に論理判断についての連携成果の発表を行う予定である。これらの日仏成果公開のための旅費と関連する成果公表費、合計180万円を繰り越し額として計上している。

## 9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

この5年間のとりくみにより、「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た。総括班を中心とした領域内での研究連携のサポートや、領域外他分野へのアウトリーチ活動により、「意思決定の脳科学」は幅広いインパクトを与えている。

2回の国際シンポジウムなどを契機に、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」に関する研究への世界的な注目を高めることができ、今後そのネットワークを活用した新たな研究の展開が期待できる。

## 10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1 ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

領域内外の若手研究者の育成に向け、総括班を中心に積極的な取り組みを行った。

### 1) 公開チュートリアル

領域会議の初日を領域外のメンバーにも公開したチュートリアルにあて、特に若手研究者が自分の専門分野以外のアプローチや手法を学ぶ機会を提供した。

2012 年 6 月：モデルベースとモデルフリーの意思決定

2012 年 11 月：脳画像研究の基礎から先端まで

2013 年 6 月：脳内ネットワーク解明のための測定法と解析法

2013 年 11 月：機械学習とモデルベース神経活動解析法

2014 年 6 月：ヒトの意思決定過程の測定とモデル化

2015 年 4 月：光学イメージングと操作の拓く可能性

チュートリアルの後には必ず懇親会を開き、専門外の問題について気軽に質問ができるような人間関係を築けるよう配慮した。

2) スクール・トレーニングコース：認知科学会サマースクール、Autumn School for Computational Neuroscience (ASCONE)、玉川大学脳科学トレーニングコース、IBRO トレーニングコースなどに共催、後援、講師の派遣招聘などを行い、若手研究者が新たな手法を習得する機会を提供した。

計画研究、公募研究に参加した若手研究者の多くは、そこでの研究経験を成果を生かし、研究者としてのステップアップを実現した（助教 12 名、講師 4 名、准教授 3 名、公的研究機関研究職 5 名、民間研究職 5 名）。

また、研究代表者の多くもその業績を認められ、昇進あるいは新たな独立したポジションを獲得した。

助教：田中暢明、村田

准教授：疋田、島田、瀧山、坂本、森田、寺本、

教授：杉山、柴田

さらに計画研究代表者の杉山は、NIPS2015 のプログラムチェアを務めたのち、文科省 AIP プロジェクトのディクターに抜擢された。

## 11. 総括班評価者による評価（2 ページ以内）

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。

### 川人光男（ATR 脳情報通信総合研究所）

本新学術領域研究では、以下の様に、三つの主要課題のすべてについて、画期的な成果が達成された。

第1の主要課題【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？】については、機械学習の立場から、高次元の入力信号から重要な物を選び、条件付き確率分布を効率よく推定する新たな手法を実現した。

第2の主要課題【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？】については、計算論的神経科学の立場から、船水、銅谷の2015の仮説を検証するための実験パラダイムを実装し、後部頭頂葉の深層ニューロン集団が動的ベイズ推定に特徴的な予測と修正に応じた神経活動を示すことを明らかにした。

第3の主要課題【先読みの深さ、報酬と罰の重み付けなどのパラメータはいかに制御されているのか？】については、実験神経科学の立場から、光遺伝学技術を用いることにより、セロトニンニューロンの選択的な刺激が、パラメータを変化させると言うよりも、いつでもどれくらいの確率で報酬が得られるのかと言う予測に依存する物であることを明らかにした。

さらに、実験と計算論神経科学、機械学習、ロボット工学、心理学、認知科学、経済学、精神医学などの異なる背景の研究者が研究総括の強力な理論的指導の下に、異分野融合を達成し、新たな領域を作り出したことは、まさに新学術領域研究の趣旨に合致した物であると言える。

### 丹治順（東北大学）

この領域は予測と意思決定という脳機能の根幹をなす過程を実現する脳内計算機構の解明を目指し、それによって人間理解につなげようとの目的で発足した。計算論的脳科学の立場から理論的枠組みを設定し、生体の脳機能によって予測と意思決定が実現される過程において、理論の予測する脳の作動原理がどのように具現されているかを動物実験によって解析し、更にそれが人間の意思決定機構を表現する理論にどのように結びつくかを具体的に検証しようとした。この領域で展開された多面的アプローチによる研究は多岐にわたるが、意思決定の理論の発展、分子レベルから霊長類の脳までを包含する生体の意思決定機構に関する実験研究、そしてヒトの言語獲得や推論機構の研究に関し、おおむねそれぞれの研究目的を達成したとみなされる。このような多彩な学際的研究の統合は本来的に困難を伴うものではあったが、分野をまたぐ統合的研究計画に基づく研究成果も認められる一方で、学際的な研究者の交流と研究推進のための国際シンポジウムを開催し、異分野理解と研究提携を目指すチュートリアルやブレインストーミングを精力的に行った事は評価され、今後の学際的研究の更なる発展に貢献したと言って良からう。

### 津本忠治（理化学研究所脳科学総合研究センター）

ヒトの意志決定メカニズムは、かつてはヒト脳波における運動準備電位の発見を機に自由意思の存在やその脳内における発現部位などが活発に議論されたことがあったが、粗い脳波しか記録できない方法論的な制約と他の分野との連携を欠く研究のため大きく展開することはなかった。ところが最近の脳科学、行動科学や計算科学、数理科学の発展によって多分野横断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、脳機能イメージング、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、数学、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、「予測と意思決定」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た点にあり、その結果、多くの優れた成果がえられた。

例えば、A02「意志決定の神経回路機構」班の坂上雅道班員と銅谷賢治班員の連携によって、サルの手動学習とニューロン活動の解析により、視覚刺激の状態遷移の内部モデルを使った行動で、前頭前野ニューロンが推移的推論による報酬予測にかかわることを発見した成果が良い例である。これは一例であるが、その他にも実験研究者と理論研究者の連携によって共同研究が成功した例が多くみられる。また、銅谷班員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て二光子顕微鏡下で行動中のマウスに種々の方向から聴覚刺激を与えた時の頭頂葉や前頭前野のニューロン活動を多数同時記録するという新しい行動実験パラダイムを開発しつつあり、当研究成果の新しい展開がみられる。

本研究領域は5年間のあいだに極めて多数の論文や学会発表がなされており、新学術領域研究として十分な成果があがったように思われる。