

<p>【領域番号】 4303</p>	<p>【領域略称名】 予測と意思決定</p>
<p>【領域代表者（所属）】 沖縄科学技術大学院大学・神経計算ユニット・教授</p>	
<p>「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。</p> <p>研究項目 A01 行動と意思決定の計算理論</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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では、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。</p> <p>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。</p> <p>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推薦することにより売上を逆転できた。大阪市の方針転換により実証実験店舗</p>	

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、組み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。

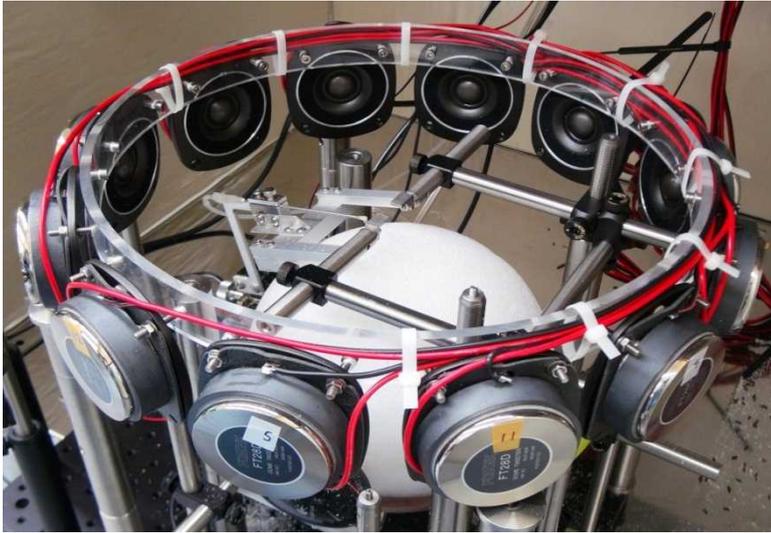
研究項目 A02 意思決定の神経回路機構

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。

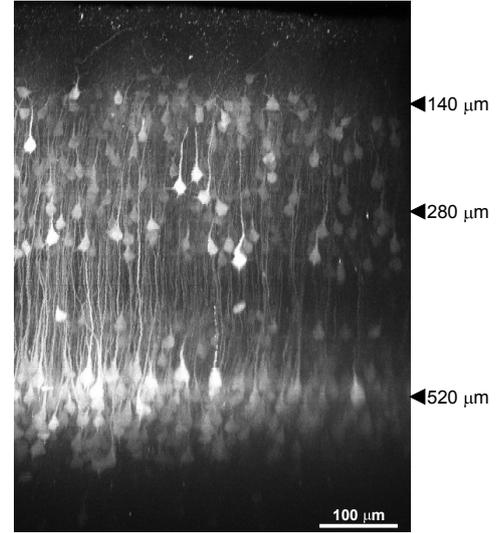
進展状況：サル、ネズミ、魚、昆虫まで、様々なモデル動物における神経回路の解剖学、活動記録と操作技術により、脳内シミュレーションとモデルベース意思決定に関わるニューロンとその回路機構の同定が進んでいる。

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 $500\mu\text{m}$ 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与す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 U S A* 2012)。これは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。

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。

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。