

研究報告書

「社会ダイナミクスの多様性を脳活動から読む進化型強化学習」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成 22 年 10 月～平成 28 年 3 月

研究者: 春野 雅彦

1. 研究のねらい

ヒトは、学校、職場、国家などからなる巨大社会を作り上げ、その中でお金や労働といったリソースを分けながら生きている。また、現代社会では、“Diversity”が1つのキーワードとなっており、構成員に見られる個人差、多様性をうまく取り込み協力行動を積極的に引き出す必要がある。近年、意思決定の神経メカニズムの研究が進展したことで、複数の人の間での分配に関する研究も始まっている。しかし、分配に見られる個人差や、役割分担の分化といった社会のダイナミクスの背後に存在する神経メカニズムには殆ど手がついていない。

ヒトは長い進化の過程を経て社会的な存在へと変化してきた。分配行動における意思決定には各人のデフォルトと言っても良い直感的な好み(social value orientation)で決まる部分と戦略的思考で決まる部分があり、その両者は学習と遺伝的要因により決定されると考えられる。本研究では社会における分配行動の進化型強化学習モデルを構築しその脳内メカニズムを明らかにする。具体的には、脳内の原始的な構造で表現されると考えられる被験者が持つデフォルトの好みと、高度に発達した認知メカニズムを必要とする戦略的意思決定の神経メカニズムを明らかにし、これら複数のタイプの社会性が社会と個人の双方にどう影響するのかを個人差の観点から考察する。さらに、これらの脳活動の遺伝子背景を明らかにし、最終的には脳活動を操作することで“協力行動の頻度を増やす”行動制御の実現を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

上記の研究のねらいに基づき、本研究ではヒトの分配行動の効用関数が不平等回避、罪悪感回避から構成されることを仮説とした。不平等回避は自分と相手の取り分(報酬)の差を出来るだけ小さくすることであるのに対し、罪悪感回避とは、相手の期待と相手の実際の取り分の差をできるだけ小さくすることである。両者は一見似ているように見えるが、前者が自己と他者の取り分の差に対する静的なプロセスであるのに対し、後者は相手の期待を毎回推定し実際の取り分との差を計算する動的なプロセスである。従って、私は前者が主に皮質下脳領域に依存する直感的なプロセスであり、後者が主に前頭葉皮質に依存する熟慮のプロセスであると考えた。つまり、従来は一括りにされてきた分配における協力行動が、脳の中では進化的に異なる複数のプロセスで実現され、そしてそれぞれのプロセスが我々の社会に対し大きな意味を持つと考えた。より具体的には、本研究で以下の2つの研究テーマを設定した。

研究テーマ A 進化型強化学習モデルの構築と実験的証明

研究テーマ B 行動制御への応用

(2) 詳細

研究テーマ A 進化型強化学習モデルの構築と実験的証明

(a) Social value orientation が皮質下領域に依存する直感であることの証明

分配行動において長く研究されてきた個人差である social value orientation は直感であり、皮質下領域に依存することを証明する。Social value orientation は匿名の他者との報酬分配行動に応じて人を prosocial(向社会的)、individualistic(個人的)、competitive(競争的)の 3 タイプに分類する。向社会的な人は自分と他者の報酬の和を最大にして差を最小にする。一方、個人的な人は他者の報酬に関係なく、自分の報酬を最大化し、競争的な人は他者に対する自分のアドバンテージを最大化する選択をする。

向社会的な被験者と個人的な被験者に公平性に基づき意思決定を行うゲームを fMRI 計測時に行ってもらった。この課題には、ゲームと同時に乱数を記憶させ背外側前頭前野を使用、及びそのような要求がない 2 条件がある。この課題により、社会性の個人差における背外側前頭前野の機能を調べることが出来る。具体的には、報酬の差に対する両者の行動差を背外側前頭前野が作り出しているのであれば、乱数の記憶により両者の行動差が小さくなることが予測され、逆に皮質下の領域が主要な働きをしているのであれば、乱数の記憶により背外側前頭前野の干渉を排除することで、両者の行動差がより顕著になるものと予想される。さらに、この行動変化とそれに付随する fMRI 信号の変化を見ることで、社会性の個人差における大脳皮質領域と皮質下領域の役割が明らかになる。

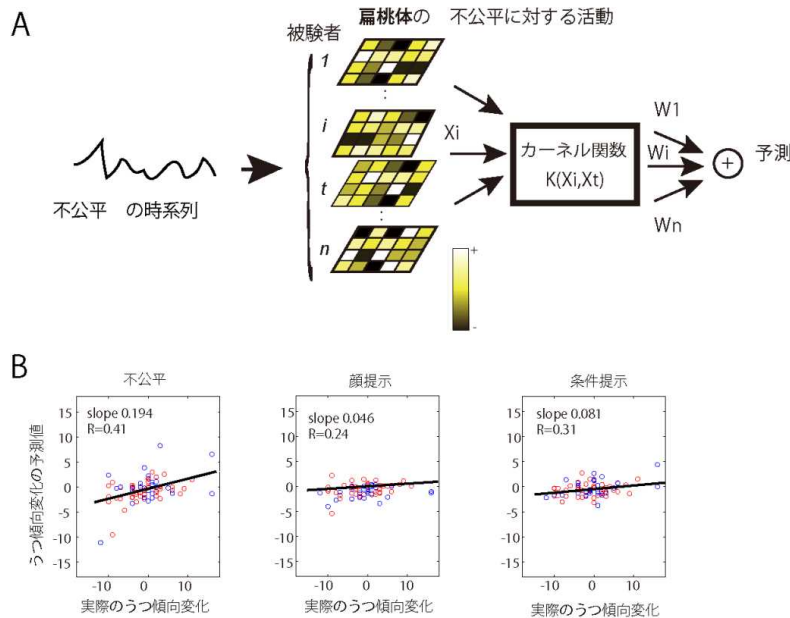
実験の結果、背外側前頭前野を乱数記憶に使用すると、向社会的な人はより向社会的、個人的な人はより個人的な行動を示した。この時の fMRI データを解析した結果、両者の差は扁桃体と側坐核の活動に現れることが明らかとなった。これらの結果は社会的な人が行う不平等回避は直感的プロセスであり、その神経基盤が扁桃体と側坐核であることを示唆している(Haruno et al., 2014)。なお、本研究が発表される前に Rand 等によって時間的に早い行動は必ずより社会的になる(直感は社会的)との結果が報告され注目されたが、後にこれは誤りであることが明らかとなった。今回の研究により、social value orientation は直感であり、認知負荷を掛けると社会的な人はより社会的になり、個人的な人はより個人的になることが世界で初めて示された。

(b) 格差に対する扁桃体の活動パターンから将来のうつ傾向を予測

直感的・無意識的な不平等回避が扁桃体に依存することにどのような意味があるであろうか？一つの可能性は不平等が無意識的にストレスと働くことである。過去 30 年の疫学研究により社会格差と精神疾患、中でもうつ病との関係が明らかにされている(例えば White Hall study)。また、近年の画像研究によりうつ病患者において扁桃体の fMRI 活動、および構造 MRI の体積が変化することが報告されている。そこで、社会格差とうつ病に見られる強い関係性に着目し、扁桃体の不平等に対する活動パターンから将来のうつ傾向の変化を予測できるのではないかと仮説を立てた。

実際、social value orientation と関係する扁桃体の不平等に対する脳活動パターンにカー

ネルを用いたスパースベイズ回帰法(下図 A)を適用することで、各人の一年後のうつ傾向変化を予測することに成功した(下図 B 左, Tanaka, Yamamoto & Haruno 投稿中、顔提示(中)や条件提示(右)など不平等以外に対する脳活動パターンからは予測できないことに注意)。



(c) 向社会性の遺伝子基盤

向社会性の遺伝子基盤についても検討を行い、自分と他者の報酬の絶対値に不平等回避に関与し、扁桃体の活動を変える遺伝子を、向社会的な人の中で自分の報酬が他者より多い場合に不平等を回避することに関わり、同じく扁桃体の活動を変える遺伝子等を発見している。

(d) 罪悪感の神経基盤

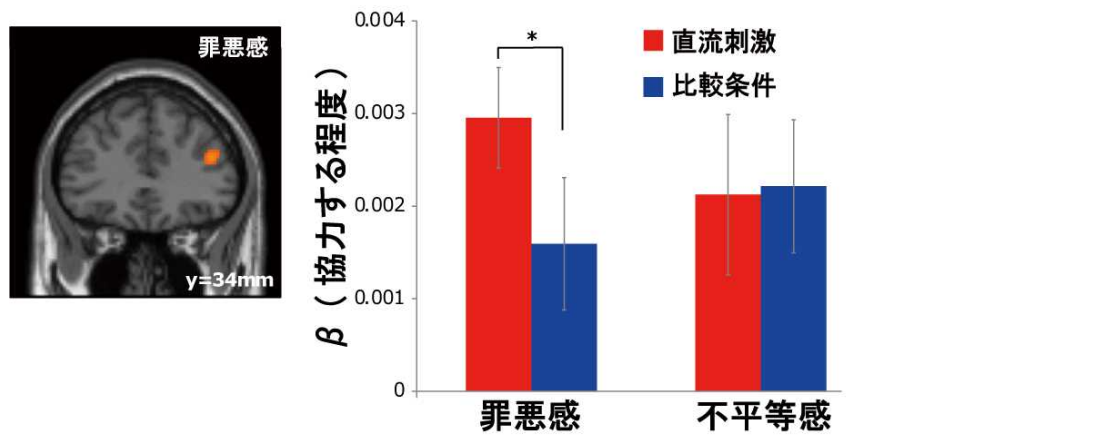
ここまで扁桃体や側坐核といった皮質下領域が向社会性に対してもつ重要性を示してきた。それではヒトの認知機能の中核である前頭前野は何もしていないのだろうか？ 不平等と同様に、ヒトの社会行動に大きな影響を与えている罪悪感が背外側前頭前野に表現されるのではないかとの仮説を立てた。罪悪感とは、相手の期待と、仮に自分がある行動をした場合に相手を得る実際の値との差で申し訳なさを表すことができる。計算理論に基づき不平等と罪悪感を独立に設定できる課題を新たに考案し、fMRI実験を行った。その結果、不平等との相関はこれまでの研究と同様に扁桃体、側坐核に見られたのに対し、罪悪感との相関は右の背外側前頭前野に見られた(Nihonsugi, Ihara & Haruno 2015, 下図左)。

研究テーマB 行動制御への応用

そこで一歩進めて、本当に罪悪感が背外側前頭前野に表現されるなら、頸頭外直流電流で前頭前野を刺激することでこの場所の脳活動を上昇させ、不平等の処理に影響を与えずに罪悪感のみを増やせるのではないかと考えた。頸頭外直流電流刺激を行う場合と行わない

場合のそれぞれに、計算モデルを用いて不平等回避、罪悪感回避の係数が変化するかどうかを確認した。

実験の結果、頸頭外直流電流刺激により罪悪感のみを増加させ（下図右）、前頭前野の脳活動と罪悪感の間の因果関係を示すことが出来た。これらの結果は進化的に古い扁桃体と、進化的に新しい前頭前野は社会行動において異なる機能を果たすことを示しており、精神疾患や社会行動の理解に役立つと考えられる。加えて、本結果は脳内の別々の計算プロセスを選択的に操作できたことを示しており、将来的な応用が期待される。



3. 今後の展開

本研究では、計算モデルを用いた定量的な解析と選択的操作を用いることで、従来は単体の協力行動(向社会行動)として扱われてきたものが、実際には皮質下領域と前頭葉皮質の進化的に異なる複数プロセスにより実現されることを示した。 今後は、超高磁場 MRI によるミリ以下の空間解像度と、皮質下領域の内部構造、皮質の層内・層間情報処理を考慮した計算モデルの融合により扁桃体、大脳皮質で行われる情報処理を明確化することが神経科学的な第一の課題である。 同時にこれら複数の神経メカニズムが精神疾患、SNSなどの実社会行動に対して意味するところを定量的に評価することも必要である。

4. 評価

(1) 自己評価

(研究者)

本研究では、計算モデルを用いた定量的な解析と選択的操作を用いることで、従来は単体とみなされてきた協力行動、向社会行動が、進化的に異なる皮質下領域と前頭葉皮質における複雑性の異なるプロセス(不平等回避と罪悪感回避)により実現されることを示した。 扁桃体の活動がボトムアップに向社会性の向上をもたらすという考え方に当初は懐疑的な見方もあったが、薬理的な手法を用いたヒトの研究、サルを用いたオキシトシン吸引の研究などによって扁桃体と向社会性の関係が示され、我々の考え方が次第に定着してきている。 一方、

背外側前頭前野と罪悪感回避の関係、および計算モデルを用いた因果性の証明についても社会神経科学に重要な貢献が出来たと考えている。このように計算モデルを用いた定量的手法を用い、社会ダイナミクスにおいて進化的に異なる脳領域が担う異なる複雑性のプロセスの存在を証明し、選択的操作ができた点で当初の目標はほぼ達成できたと考える。一方で、進化のプロセスを直接モデル化することは自由パラメータ数が多くなり過ぎる等の問題で必ずしも成功していない。今後は、より抽象的なモデルを検討するなどの方法で検討を行いたい。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

(研究総括)

ヒトの分配行動における意思決定には各人の「直感的好み」で決まる部分と「戦略的思考」で決まる部分があり、その両者は学習と遺伝的要因により決定される。本研究は「社会における分配行動の進化型強化学習モデル」を構築し、その脳内メカニズムを明らかにすることを目的としている。すなわち、脳内の古い構造で表現されると考えられる被験者の「直観的好み」と、高度に発達した認知メカニズムを必要とする「戦略的意思決定」との神経メカニズムを明らかにし、これらのタイプの社会性が社会と個人の双方にどう影響するのかを「個人差の観点」から考察した。さらに大きな戦略的目標としては、これらの脳活動の遺伝子背景を明らかにし、最終的には脳活動を操作することで「協力行動の頻度を増やす」行動制御の実現を目指している。

本研究では心理的・計算論的方法論、遺伝子多型の分析を用いることにより、当初の目的を達成し、将来への基礎を築いたことを高く評価したい。また、領域内の共同研究にも積極的に参加したことも評価したい。

本研究では、計算モデルを用いた定量的な解析と選択的操作を用いることで、従来は単体とみなされてきた協力行動、向社会行動が、進化的に異なる「皮質下領域」と「前頭葉皮質」における「複雑性の異なるプロセス(不平等回避／罪悪感回避)」により実現されることを示した。「扁桃体の活動がボトムアップに向社会性の向上をもたらす」という本研究者の考え方は、薬理学的手法を用いたヒト研究、サルを用いたオキシトシン吸引研究などによって「扁桃体と向社会性の関係」が示されたことにより次第に定着してきた。一方、背外側前頭前野と罪悪感回避の関係、および計算モデルを用いた因果性の証明についても社会神経科学に重要な貢献が出来た。このように計算モデルを用いた定量的手法を用い、社会ダイナミクスにおいて進化的に異なる脳領域が担う異なる複雑性のプロセスの存在を証明し、選択的操作ができた点で当初の目標はほぼ達成できたと考えられる。

これらの成果は今後の研究を通じて、脳活動の遺伝子背景を明らかにし、最終的には脳活動を生命倫理が許す範囲内で操作することで“協力行動の頻度を増やす”行動制御の実現を図る等、実社会において持つ意味が明らかにされることが期待される。なお、本研究者はCREST 事業(社会脳科学と自然言語処理による社会的態度とストレスの予測)において、さらに研究を発展させることが決まっている。

5. 主な研究成果リスト

(1)論文(原著論文)発表

1. Nihonsugi T, Ihara A, **Haruno M.** Selective increase of intention-based economic decisions by noninvasive brain stimulation to the dorsolateral prefrontal cortex. J Neurosci. 35:3412-3419. (2015)
2. **Haruno M,** Kimura M, Frith CD. Activity in the nucleus accumbens and amygdala underlies individual differences in prosocial and individualistic economic choices. J Cogn Neurosci. 26:1861-1870. (2014)
3. Watanabe N, Sakagami M, **Haruno M.** Reward prediction error signal enhanced by striatum-amygdala interaction explains the acceleration of probabilistic reward learning by emotion. J Neurosci. 33:4487-4493. (2013)
4. Suzuki S, Harasawa N, Ueno K, Gardner JL, Ichinohe N, **Haruno M,** Cheng K, Nakahara H. Learning to Simulate Others' Decisions. Neuron. 74: 1125-1137. (2012)
5. Enomoto K, Matsumoto N, Nakai S, Satoh T, Sato TK, Ueda Y, Inokawa H, **Haruno M,** Kimura M. Dopamine neurons learn to encode the long-term value of multiple future rewards. Proc Natl Acad Sci U S A. 108:15462-7. (2011)

(2)特許出願

研究期間累積件数:1件

発明者: 春野 雅彦
発明の名称: 推定方法および推定システム
出願人: 情報通信研究機構
出願日: 2015/7/24
出願番号: 特願 2015-146988

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

- ・Tanaka T, Yamamoto T, Haruno M. (2015) Amygdala activity induced by the inequity predicts long-term change of depression index (COSYNE 2015).
- ・Nihonsugi T & Haruno M. (2014) Computational model-based tDCS selectively enhances guilt-aversion based prosocial behavior. Annual Conference on Computational and Systems Neuroscience (COSYNE 2014).
- ・Watanabe N & **Haruno M.**, (2011) Enhanced reward prediction error explains the accelerated cue-reward association learning by emotional facial expressions. Annual Conference on Computational and Systems Neuroscience (COSYNE 2011).

テレビ報道

NHK スペシャル「病の起源」

NHK E テレ オイコノミア

新聞報道

「罪悪感 前頭前野が関与」 読売新聞 2015/3/9 2015/2/24 その他多数

雑誌

脳科学でみる税という制度 中央公論 April 2013 116-118

損得勘定の脳科学 ニュートン 2013 6 月号 88-93