生理研研究会「視覚・認知脳機能研究の先端」

提案代表者：西本 伸志（情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター）
所内対応者：磯田昌岐（生理学研究所）
世話人：二宮太平（生理学研究所）

2019 年 9 月 26 日（木）～27 日（金）
生理学研究所明大寺地区 1F　大会議室・セミナー室

＜開催概要＞
ヒトを含む霊長類で特に発達した高次認知機能の神経基盤の解明を目指す研究では、神経生理学、脳機能イメージング、計算論的神経科学など様々な実験手法が用いられている。また自然画像などを用いた、より自然な知覚・認知条件の設定や、複数の個体を用いた社会的条件の設定など、実験パラダイムについても多岐にわたる。しかしながら学会などにおいては、発表するセッションが実験手法によって分類されることも少なくないため、異なる手法を用いた研究に触れる機会は必ずしも多くない。本研究会では、視覚系の研究を主な対象として、様々な手法で実際に実験をおこなっている研究者を中心に発表者の人選をおこない、研究紹介をしてもらう。それぞれのアプローチによる研究内容について情報交換をおこなうことで、研究の発展や共同研究の可能性を探る機会を提供することを目的とする。

プログラム

Day 1　(9 月 26 日)

12：30　受付開始

13:10～13:20　　開催の挨拶　　西本 伸志（情報通信研究機構・CiNet）

13:20～15:20　　セッション 1　認知機能情報の解読と制御へのアプローチ

講演 1：西本伸志（情報通信研究機構・CiNet）
講演 2：柳澤琢史（大阪大学・高等共創研究院）
講演 3：小泉愛（ソニー・コンピュータサイエンス研究所）
講演 4：松本信圭（東京大学・大学院薬学系研究科）

15:20～15:50　　休憩

15:50～17:50　　セッション 2　視覚・認知機能理解への理論的・実験的アプローチ

講演 5：天野薫（情報通信研究機構・CiNet）
講演 6：吉田正俊（生理学研究所・認知行動発達機構研究部門）
講演 7：岡谷貴之（東北大学・大学院情報科学研究科）
講演 8：四本裕子（東京大学・大学院総合文化研究科）

18:00～20:00　　ポスターセッション・懇親会

Day 2　(9 月 27 日)

9:15～9:30　　受付（2 日目からの参加者のみ）

9:30～11:30　　セッション３　社会的認知機能理解への理論的・実験的アプローチ

講演 9：二宮太平（生理学研究所・認知行動発達機構研究部門）
講演 10：大泉匡史（東京大学・大学院総合文化研究科）
講演 11：横山ちひろ（理化学研究所・生命機能科学研究センター）
講演 12：小村豊（京都大学・こころの未来研究センター）

11:30～11:40　　閉会の挨拶　二宮太平

抄録集

講演

情報表現モデルを用いた定量的脳機能研究
Quantitative and functional studies of the brain using representational models

西本伸志

情報通信研究機構　脳情報通信融合研究センター
大阪大学　大学院医学系研究科
大阪大学　大学院生命機能研究科

私達の日常は、視聴覚を代表とする膨大な感覚入力を処理し、合目的な行動を生み出す複雑な脳機能によって支えられている。標準的な神経科学の方法論においては、これら複雑多様な入力、あるいはそれを契機に生成される内発的な情報の一部に着目し、それらを表現する神経基盤に関する仮説検証に特化した実験を行うことで研究が進められてきた。このような仮説特化型の実験は、特定仮説を定性的に検証する強力な手法である一方、そこで得られた知見がより複雑な状況である日常生活にどの程度一般化できるのか、またある特定部位の神経活動について仮説が説明する成分はどの程度の割合なのか、等を定量的に検討することが困難である。

より直接的に日常的条件下における脳機能を研究するための枠組みとして、モデリングアプローチが挙げられる。この枠組では、たとえば視聴覚においては動画等を含む複雑な入力条件下における脳活動を予測する定量的モデルを構築する。様々な脳機能に関する仮説は、モデルが内包する特徴空間として実装され、その妥当性はモデル構築には用いられない新規の条件下における脳活動の予測能力として定量的に検証される。私達の研究グループでは、この方法論によって視聴覚から認知機能を含む様々な脳機能に関する研究を進めてきた。本講演においては、これらモデリングアプローチを用いた研究について紹介を行う。またこれまで用いられてきた個々のモデルについては、情報表現レベルやアルゴリズムレベル等、いくつかの記述段階のものが存在する。講演においては、これらについて具体例を挙げながら、それぞれ予測性、解釈可能性、生物学的妥当性の観点から議論を行う。

皮質脳波による視覚情報の decoding と BCI への応用
Neural decoding of visual information and application for BMI using ECoG signals

柳澤琢史[1,2,3]、福間良平[2,3]、西本伸志[4]、押野悟[2]、神谷之康[3,5]、貴島晴彦[2]

[1]大阪大学　高等共創研究院
[2]大阪大学大学院医学系研究科　脳神経外科
[3]ATR 脳情報研究所
[4]情報通信研究機構　脳情報通信融合研究センター
[5]京都大学　大学院　情報学研究科　知能情報学専攻

Brain-Computer Interface (BCI)は、人の運動意図などを脳信号から読み解き、機械を制御する技術として開発され、重度麻痺患者の意思伝達装置などへの医療応用が期待されている。近年は、多チャンネルの体内埋め込み型の脳信号計測装置が開発され、BCI の医療応用が現実的な課題となっている。我々は、人の脳表面に電極を留置して脳波を計測する皮質脳波を用いた BCI を開発してきた。皮質脳波は刺入電極などと比較して脳への侵襲が低く、安定した信号を得られることから臨床応用に適していると考えられている。しかし、刺入電極によるスパイク計測と比べると、得られる情報が少ない。特に運動情報の推定では、運動野の population coding を基にした BCI と比較すると、ロボット制御や PC への文字入力において精度と速度に大きな差がある。実際、我々が治療対象と考える重症の筋萎縮性側索硬化症患者に対して、皮質脳波を用いた BCI では 10 秒に１文字程度の文字入力を実現したが、刺入電極を用いた BCI では 1 分に 30 文字以上の入力が報告されている。

皮質脳波は刺入電極と比較して脳の広い領域から信号を計測できる。そこで我々は、皮質脳波を後頭・側頭葉の広い領域で計測し、分散的に表現されている視覚情報を得ることで、新たなBCIの開発を目指している。特に、多様な視覚的意味情報を皮質脳波から推定することで、３次元の位置や速度の情報に限られる運動情報を基にしたBCIよりも、高次元の視覚情報を基にしたBCIを目指している。このために、人が様々な意味内容の動画を知覚する際の皮質脳波を計測した。動画を１秒毎の静止画に変換し、その意味を文章で記述し、その中の単語をWord2Vecにより意味空間のベクトルに変換することで、動画を１秒毎の意味ベクトルで表現した。この意味ベクトルを皮質脳波から推定することで、被験者が見ている画像の意味を推定した。視覚情報を用いた皮質脳波BCIの可能性について議論する。

ニューロフィードバックを用いた恐怖記憶の解読と制御
Decoding and regulation of fear memory through neurofeedback

小泉愛[1]

[1] ソニーコンピュータサイエンス研究所

本講演では、ニューロフィードバック技術（Decoded Neurofeedback, DecNef）を用いて、恐怖記憶に関わる脳活動パターンを解読し制御する研究を紹介します。

心的外傷後ストレス障がい（PTSD）患者の恐怖記憶を和らげるためには、恐怖の対象（例えば、自動車事故に関連する赤い車）を繰り返し見せたり、あるいはイメージさせる手法が効果的です。しかし、そうした手法自体がストレスになり、PTSD の治療を断念するケースも少なくありません。もし、ニューロフィードバック技術を用いて、被験者が無自覚のうちに恐怖記憶を緩和できる手法を開発することができれば、ストレスの少ない新たな PTSD の治療法としての応用可能性が期待できます。

そうしたニューロフィードバック手法の開発を目指し、本研究では、一つ目のステップとして、健常な被験者におけるシンプルな恐怖記憶の緩和に取り組みました。この基礎研究では、視覚野に恐怖記憶の対象を表す空間的脳活動パターンを検出する毎に、被験者に報酬を与える訓練により、恐怖記憶の対象への恐怖反応を緩和できることが確認できました。さらに二つ目ステップとして、現在は、実際の PTSD 患者におけるより複雑な恐怖記憶を緩和する試みに取り組んでいます。本講演では、これらの研究を紹介し、今後の課題について議論します。

視覚皮質と海馬の細胞外電位に含まれる情報の解読への試み
Approach to decoding neural information included in extracellular potentials of the rodent visual cortex and hippocampus

松本信圭、池谷裕二

東京大学 大学院薬学系研究科 薬品作用学教室

視覚皮質および海馬では、感覚刺激や、抽象概念、動物の状態に対応した神経活動が観察される。例えば、一次視覚皮質のニューロンは特定の方向に動く縞模様に対して選択的に発火する「方位選択性」を持つ。また、海馬のニューロンは、動物が特定の位置を通過した時に発火する「場所選択性」を持つ。視覚皮質や海馬における、個々のニューロンの発火の選択性は広く知られている一方で、それらの脳領域における細胞外電位（特に局所場電位）にはどのような情報が含まれるのかは詳細に調べられていない。さらに、局所場電位が個々のニューロンによるどのような神経活動によって生み出されているかもほとんど明らかにはなっていない。

当研究室では、麻酔下および課題遂行中の動物から、様々な電極を用いて細胞外電位および細胞内電位を計測し、特定の神経活動にはどのような情報が内包されているかを検討している。

今回の発表では、視覚皮質と海馬の細胞外電位に関連し、次の二つの内容を発表する。(1) ラットの頭部を固定し、視覚刺激（縞模様）を提示した際の一次視覚皮質の細胞外電位を記録した。一次視覚皮質の細胞外電位から視覚情報のデコードをおこなうことができるか検討した。(2) げっ歯目の海馬の局所場電位においては、シータ波やリップル波が観察され、前者は動物の探索行動時、REM 睡眠時に、後者は無動覚醒時や non-REM 睡眠時に頻繁に観察される。海馬の局所場電位は、動物の場所を符号化していることが示されているが（Agarwal et al., 2014）、局所場電位が個々のニューロンのどのような神経活動から生み出されているかは明らかではない。そこで、局所場電位の中でもシータ波に着目し、パッチクランプ法を用いて、個々のニューロンの膜電位を最大 4 細胞から同時に記録することで、シータ波発生時の膜電位の集合ダイナミクスに迫った。

視覚情報処理のクロックとしてのアルファ波
Alpha oscillation as a clock for visual processing

天野薫 [1,2,]

[1] 情報通信研究機構　脳情報通信融合研究センター
[2] さきがけ　「人とインタラクションの未来」

我々は，非侵襲的な脳活動操作手法を用いてヒトの視知覚や行動を生み出す脳活動を調べている．本講演では，経頭蓋交流電気刺激（tACS）法を用いてアルファ波の機能を調べた研究，拡散強調 MRI(dMRI)を用いてアルファ波の神経解剖学的基盤を調べた研究を紹介する．

近年の研究から，10 Hz 程度の神経律動であるアルファ波が視知覚と密接に関連していることが示されているが，因果関係については明らかでない．一つ目の研究[1]では，視覚情報処理におけるアルファ波の機能を検討するためジター錯視と呼ばれる現象を利用した[2]．まず始めに，アルファ波の周波数が個人によって 8-13 Hz の範囲で異なることに着目し，その個人差に対応してジター錯視の見えの周波数も変化することを示した，さらに，強度変調交流電気刺激を用いることで，後頭－頭頂部への電気刺激中のアルファ波計測を実現し，アルファ周波数の増減に対応したジター錯視の周波数変化を観察したことから，ジター錯視の知覚にアルファ波が因果的に寄与していることが示された．最後に，ジター錯視を知覚している際の MEG 信号に対する活動源推定から，アルファ帯域における背側視覚領域と腹側視覚領域の間での情報のやり取りが増大している可能性が示唆された．二つ目の研究では，アルファ波周波数の個人差の神経解剖学的基盤を明らかにするため，MEG を用いた安静時のアルファ波計測と拡散強調 MRI の計測を行った．アルファ波の生成には視床と視覚皮質からなるネットワークが関与しているとする仮説に基づき，外側膝状体（LGN）と第一次視覚野を結ぶ白質線維である視放線に着目しこの線維の特性を分析した．その結果，線維束内での軸索の構造特性を反映していると考えられる Orientation Dispersion Index (ODI)と呼ばれる指標とアルファ波周波数の間に負の相関が観察された．

二つの実験の結果を合わせて考えると，LGN と V1 のループで生成されたアルファ波のリズムが，他の視覚領域においても共有され，視覚領域間での情報のやり取りのタイミング信号として機能している可能性が示唆される．白質線維構造の違いからアルファ周波数の違いが生じるメカニズムや，電気刺激によってアルファ波の周波数が変化するメカニズムについては今後の検討が必要である．

[1] Minami, S., Amano, K. (2017) Illusory jitter perceived at the frequency of alpha oscillations, *Current Biology* 27 (15), 2344–2351.

[2] Arnold, D.H. & Johnston, A. (2003) Motion induced spatial conflict. *Nature*, 425, 181-184.

Eye movements and visual salience in schizophrenia

Masatoshi Yoshida[1]

[1]Laboratory of Behavioral Development, The National Institute for Physiological Sciences, Okazaki, Japan

Abnormality in eye movements during free-viewing is potentially an efficient biomarker for schizophrenia (Miura et.al. 2014; Morita et.al. 2016). We examined whether aberrant salience hypothesis (Kapur 2003) explains the abnormalities in eye movements during free-viewing in schizophrenic subjects. We analyzed eye movement data obtained from 87 schizophrenic subjects and 252 healthy control subjects who viewed natural and/or complex images (n=56) for 8 seconds. We calculated the saliency map of the images (Yoshida et.al. 2012) and evaluated the time course of the salience value at the position of the gaze. We obtained evidence supporting aberrant visual salience during free-viewing in the schizophrenic subjects.

As a first step toward establishing "translatable" markers for schizophrenia, we measured eye movements from normal marmosets with the EyeLink 1000 Plus eye-tracker. The natural and/or complex images identical to those used for the human subjects were randomly presented for 8 seconds. In four marmosets, saccades were reliably detected and characterized as the mean saccade frequency and the main sequence relationship. Then we evaluated a pharmacological model of schizophrenia in marmosets using intramuscular injection of ketamine at a sub-anesthetic dose. Since mismatch negativity (MMN) is a well-established brain marker for schizophrenia, we developed an experimental setup for simultaneous recording of eye movements and the MMN. For this purpose, silver-ball electrodes were epidurally implanted on the auditory cortices. Then eye movements and LFPs were recorded during free-viewing of the identical images with tone stimuli (10% deviants and 90% standards). Ketamine (0.5 mg/kg) reduced the median amplitude of saccades and attenuated the MMN with a similar time course. These results suggest that free-viewing is a promising experimental paradigm for establishing "translatable markers" for schizophrenia in humans and in marmosets.

MY was funded by the program for Brain Mapping by Integrated Neurotechnologies for Disease Studies (Brain/MINDS) from Ministry of Education, Culture, Sports Science, MEXT and the Japan Agency for Medical Research and Development (AMED).

生物視覚のモデルとしてコンピュータビジョンの可能性と, 問題解決の新たな方法論としての深層学習について

On the Possibility of Using Computer Vision as a Model of Biological Vision and an Introduction to Deep Learning as a New Problem Solving Methodology

岡谷貴之 [1]

[1] 東北大学 大学院情報科学研究科 / 理化学研究所 革新知能統合研究センター

コンピュータビジョンは, 人の視覚の機能を計算機上で実現することを主要な目標として, 今から 40 年ほど前に始まった分野である. 7–8 年前の深層学習の登場によって, コンピュータビジョンは劇的に発展し, 今の AI ブームの中核を担ってきた. 本講演では, コンピュータビジョンおよび深層学習と神経科学との, 今後のつながりを考えるための材料を提供できればと思う. 具体的なつながりとして, コンピュータビジョン＋深層学習には生物の視覚情報処理のモデルとしての価値が考えられ, 深層学習には神経科学に役立つツールとしての価値が考えられる.

まずモデルとしての価値を考える. 深層学習の登場により, 深層ニューラルネットワークの性能は, 個別のタスクで人と比較できるレベルに到達しているとされ, その中身（情報処理）を生物のそれと比較する必然性は十分にある. ただし, 深層ニューラルネットワークは, 外から見るとブラックボックスでしかなく, （生物の神経回路網と同じように）計算アルゴリズムがすぐにはわからないという問題がある. これは, 実世界応用において深層学習に現在, 強く求められている「説明性」や「信頼性」といったこととも重なり合う. そこで, これらに関する研究の状況を説明する. 関連して, コンピュータビジョンや深層学習で何が出来て, 何が出来ないかを概観する.

これと独立に, そもそも深層ニューラルネットワークがデータの学習を通じて獲得した情報処理の方法が, そもそも生物のそれと近いのだろうか, という疑問がある. 現時点では講演者は, そこにはかなりな違いがあるのではないかと見ている. 少なくとも違うと考える蓋然性があり, その辺りを議論したい.

次に, ツールとしての側面について考える. 今や深層学習は, コンピュータビジョン, 自然言語処理, 音声情報処理などのいわゆる AI の関連分野を大きく超え, 多様な工学・サイエンスにおける新しい問題解決の方法として, 広がりつつある. そこでは, 数学や物理に基づく従来のモデリングの代わりに, データを通じた学習が中心的な役割を果たす. 見落としてはいけないのは, それに加え, 個々の問題解決のためにネットワークの構造をどのように設計するかが大きなウェイトを占めることである. 新たな応用の開拓とともに, ネットワークの新しい構造要素が盛んに生み出されてきており, これについても説明する.

ヒトの時間知覚における周期的神経活動の役割　800 words
Roles of oscillatory neural activities in human time perception.

四本裕子[1]

[1]東京大学　大学院総合文化研究科

数百ミリ秒から数秒の間隔時間の知覚には、複数の皮質領域が関与する。そして、時間情報のエンコーディングには、アルファ波などの周期的神経活動が関与する。講演では、以下の 3 つのリサーチクエスチョンを取り上げる。

（1）同期的神経活動はいかにして時間をコーディングするのか？
（2）周期的神経活動の効果はモダリティによって異なるのか？
（3）時間知覚における高次認知の役割は？

明滅（フリッカ）する視覚刺激が知覚時間の過大視をもたらすことが広く知られている。一方で、その背景にある神経相関ははっきりわかっていない。我々の研究では、任意の周波数で時間変調する刺激を用いて神経引き込みを誘発し、それに伴う時間知覚を測定することで、時間知覚における周期的神経活動の役割を検証した。その結果、時間の過大視量が周波数に依存すること、視覚皮質におけるアルファ周波数帯域の神経活動が知覚される時間長と相関すること、引き込みの効果は大脳における皮質間距離に依存することなどを見出した。また、視覚と聴覚では、時間のコーディングに関わる神経活動の周波数が異なることや、触覚でも周期的刺激が時間知覚に影響することを示唆する結果を得た。さらに、予測や期待という高次の認知が時間知覚に及ぼす効果や、時間の記憶表象の特性についても議論する。

ミラーシステムおよびメンタライジングシステムの神経活動およびその機能連関

二宮太平[1,2]
[1]生理研・認知行動発達、[2]総研大院・生理科学

我々は日常的に、他者の行動とその結果について観察し、自らの行動を決める手がかりとしている。多くの研究で、このような社会的認知機能の神経基盤として、霊長類の脳には 2 つのシステムが存在することが指摘されている。1 つは腹側運動前野（PMv）を中心とするミラーシステムであり、もう 1 つは内側前頭皮質（MFC）を中心とするメンタライジングシステムである。これら 2 つのシステムは、いずれも社会的情報処理に関与しているにも関わらず、その機能的役割の違いや機能連関の有無についてはいまだに議論の対象となっている。これらの問題について検討するために、マカクザルに対して実在の他個体、ビデオ上の他個体、ビデオ上の棒状の物体の 3 種類のパートナーを相手に行動観察と行動実行を繰り返す役割交替課題をトレーニングし、課題遂行中の PMv および MFC から神経活動の同時記録をおこなった。単一神経細胞活動を解析した結果、PMv と MFC には、自己の行動、他者の行動、またはそのどちらにも応答する神経細胞が、異なる割合で存在した。またパートナーによって応答の強さが変化する細胞が多く観察された。次に、PMv と MFC から同時記録した局所電場電位にグレンジャー因果解析を適用することで、2 領野間の機能連関について検討した。その結果、実在の相手と課題をおこなっている際は、PMv から MFC への情報流が増加しているのに対し、ビデオ上の相手と課題をおこなっている際は、MFC から PMv への情報流が増加していることが明らかになった。最後に、経路選択的かつ可逆的に神経活動を制御できる、ウイルスベクターの 2 重感染法を用いて、PMv から MFC への入力を遮断する実験をおこなった。PMv→MFC 神経路の活動を遮断中、サルはパートナーの行動エラー情報を、次に自らがおこなう選択に利用することができなくなった。以上の結果は、ミラーシステムとメンタライジングシステムが相補的に機能することで、様々な「他者」から行動とその結果に関する情報を抽出し、自らの行動選択に役立てていることを示唆する。

意識の場所と境界
Places and Boundaries of Consciousness

大泉匡史[1]
[1] 東京大学大学院総合文化研究科

我々の脳の中にある多数の神経細胞が、外界の刺激に対して活動することにより、我々の主観的な体験（意識）が生みだされている。ただし、脳の中で生じる神経活動の全てが意識に直接的な関連があるわけではないことが、これまでの神経科学の知見から分かっている。従って、意識経験を担うのに必要十分な最小の脳活動とは何かを同定することは重要な問題である。この問題は、1990 年代頃より Crick と Koch によって、Neural Correlate of Consciousness(NCC, 意識の神経相関)を実験的に探す問題として提唱され、意識の科学的研究の端緒となった。NCC の探求によって、様々な知見が得られ、意識研究は大きく前進することとなったが、脳の中で意識を担う場所はどこかという根本的な問題は現状でも全く明らかになっていない。

意識の場所を同定するという問題は、別の言い方をすれば意識の「境界」を定める問題である。すなわち、脳は多数の神経細胞がつながったネットワークと考えることができるが、このネットワークの中で意識の場所を定める境界を引く問題である。意識の境界の問題は特に、分離脳と呼ばれる、左脳と右脳をつなぐ脳梁が切断された状態の脳に生じる意識を考える際に重要となる。通常の脳では、左脳と右脳が脳梁によって強くつながれることにより、左脳と右脳で処理された情報の両方が統一された意識が生じていると考えられる。しかしながら、脳梁が切断されることにより、左脳と右脳の間のつながりが弱くなると、左脳と右脳のそれぞれに独立した意識が生じる可能性が示唆されている。境界という言葉を使ってこの現象を説明すると、通常の脳は左脳と右脳の間に意識の境界がなく、分離脳は左脳と右脳の間に意識の境界がある状態である。それでは一体、どれくらい左脳と右脳のつながりが弱くなると意識が分離し、あるいはどれくらいつながりが強くなれば意識が統合されるのだろうか？この問題もまた、現状の神経科学の知見からは全く明らかになっていない。

本講演では、脳の中における意識の場所あるいは境界を同定するための、理論的なアプローチを紹介する。これまで様々な理論が意識の場所を予測するための仮説を提唱してきたが、本講演では特に、Integrated Information Theory(IIT, 統合情報理論)の仮説を紹介し、その仮説を実験的に検証する試みについても紹介する。

脳機能イメージングから社会的認知機能の起源を探る
Neuroimaging and tracing social cognitive functions in non-human primates

横山ちひろ
理化学研究所生命機能科学研究センター　脳コネクトミクスイメージング研究チーム

　脳機能イメージングとは、非侵襲的にヒトの脳機能を画像化し精神神経疾患の診断や治療に役立てようとする技術である。これによって、疾患特異的な、あるいは疾患の症状である社会的認知機能障害に関連した、脳ネットワークや神経伝達物質活動が同定されつつある。生物学的にヒトに最も近縁な非ヒト霊長類は、その社会構造もヒトと類似している。非ヒト霊長類を用いた脳神経活動の直接計測や介入実験は、ヒト研究では実施困難であり、これらの研究成果はヒト社会認知機能の詳細な神経科学的基盤解明に大きな役割を果たすことが期待される。では、非ヒト霊長類を用いた脳機能イメージング研究の意義とは何だろうか。そのメリットのひとつは、ヒトと同じ計測法を用いることで実現する、社会認知機能を支える脳ネットワークや神経伝達物質活動の種間比較である。本講演では、マーモセットの脳機能イメージングを通じて得られた、社会認知機能を支える神経基盤に関する知見をいくつか紹介し、非ヒト霊長類の脳機能イメージングを進化的な視点で活用する試みについて概説したい。

意思決定の「ゆらぎ」の生物基盤と計算機構
Mechanisms of fluctuations in decision

田中斉[1]、野口真生[1]、新國彰彦[2]、小村豊[1,2]

[1]京都大学　人間・環境学研究科
[2]京都大学　こころの未来研究センター

我々の日常生活は、意思決定の連続である。しかし、その意思決定は、様々な要因によって揺らぐ。本講演では、その様式と要因を、神経生理、行動心理、計算モデルの観点から、論じたい。

まず、マカクサルにおいて、意思決定のゆらぎに伴う迷いを、wagering paradigm という課題を用いて、行動学的に抽出することに成功した。その遂行中に、視床枕が、その確信度を表現することを見出し、その神経活動を、抑制すると、リスキーな選択を回避する、すなわち、確信度が低下するような適応行動を示した。

次に、ヒトにおいても、同様の心理物理実験をしたところ、視床枕の神経活動のチューニングカーブは、ヒトの主観的確信度のチューニングカーブと、一致していた。そのカーブ特性は、確率分布をベースにしたカテゴライズモデルから、説明できたので、霊長類の意思決定の確信度は、ヒト・サルにおいて、共通の計算機構が働いていることが示唆された。

最後に、確信度の揺らぎから、自己参照能力を評価する手法と、その適用例を紹介する。

ポスター

Semi-model free analysis of the whole brain activity captures temporal changes of cognitive processes

[1] Yutaro Koyama, [1] Junichi Chikazoe, [2] Koji Jimura, [1] Norihiro Sadato
[1] National Institute for Physiological Sciences [2] Department of Biosciences and Informatics, Keio University

Introduction: While a subject performs a psychological task, the neural networks which correspond to respective cognitive processes are sequentially recruited. Despite abundant knowledge of this activation mechanism in the spatial domain (i.e. functional localization in the brain), little is known about that mechanism in the time domain (i.e. the timings and order of cognitive processes). The present method explored the activation mechanism of neural networks in the time domain during a performance of complex tasks, by modeling the whole brain activity as the linear combination of parallel computation of multiple neural networks at a given time.

Methods: We analyzed the math task from task-fMRI 3T data of Human Connectome Project. This task presents trials by sound and requires a subject to complete addition or subtraction problems. We first created the 3 network templates (i.e. auditory, arithmetic, and finger-tapping) corresponding to the cognitive processes recruited in this task, by using an online meta-analysis software (NeuroSynth) [1]. Then, we modeled a whole brain activity at a given time as: $\mathbf{Y}=\beta_1\mathbf{X}_1+\beta_2\mathbf{X}_2+\beta_3\mathbf{X}_3+\boldsymbol{\beta}_0$ where $\mathbf{Y}$ is a vector of whole brain vertexs. $\mathbf{X}_1$, $\mathbf{X}_2$, and $\mathbf{X}_3$ are network templates formulated as each vector of activation likelihood values. β_1, β_2, and β_3 are scalar weights, and $\boldsymbol{\beta}_0$ is an intercept vector calculated by maximum likelihood estimation. By using this model, we computed the weight time courses which are the transitions of network contributions to the whole brain activity.

Results: Without explicitly using timing information (i.e. stimulus onsets, durations, and subject's responses) we decomposed the whole brain activity with the 3 functional network templates. As expected from the content of this task, in each trial, the auditory network was firstly activated, followed by the activation of the arithmetic network. Consistent with behavioral results, the estimated activation of the finger-tapping network was time-locked to response timing at each trial (Figure 1). Moreover, we could recover the order of these 3 cognitive processes without using timing information a priori.

Discussions and Conclusions: These results demonstrate that the proposed method can capture the temporal transitions of the cognitive processes which cannot be measured by conventional analysis [3].

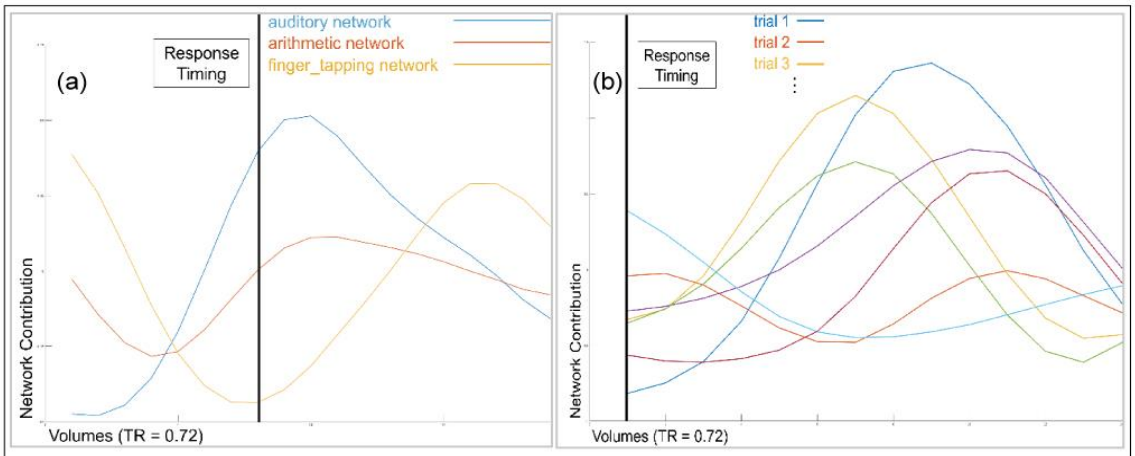

Figure 1: The time courses averaged across 20 subjects of 3 neural network activities (a), and The time courses of each trial from an individual subject of finger_tapping network (b), both aligned by response timing. (a) Before the response, auditory network was firstly activated, because a subject needed to listen to an instruction. Then, arithmetic network was activated, reflecting the demand to solve an addition or subtraction problem. Finally, finger tapping network was activated after the response timing, reflecting the button press. All these results were consistent with the content of math task and behavior timing. (b) Even in the same subject, large variability in magnitude and peak timing was observed, suggesting the large trial-by-trial fluctuation of BOLD responses [2].

[1] Yarkoni, T., Poldrack, R. A., Nichols, T. E., Van Essen, D. C., & Wager, T. D. (2011). Large-scale automated synthesis of human functional neuroimaging data. *Nature methods*, *8*(8), 665.
[2] Watanabe, M., Bartels, A., Macke, J. H., Murayama, Y., & Logothetis, N. K. (2013). Temporal jitter of the BOLD signal reveals a reliable initial dip and improved spatial resolution. Current Biology, 23(21), 2146-2150.
[3] Dale, A. M., & Buckner, R. L. (1997). Selective averaging of rapidly presented individual trials using fMRI. Human brain mapping, 5(5), 329-340.

P-2

霊長類の皮質―皮質下神経回路網における自己と他者の報酬信号

Social reward signals in cortico-subcortical networks of the macaque

則武厚[1]、二宮太平[1]、磯田昌岐[1]

[1]生理学研究所　認知行動発達機構研究部門

ヒトを含む霊長類は日常的に他者と接する機会が多いため、自分の得るもの（報酬）の価値は他者の得るものによって影響を受ける。我々は、このような他者の報酬に影響を受ける自己の報酬価値（主観的価値）に焦点を当て、サル 2 頭を同時に条件づけする社会的条件づけによってその神経基盤を探ってきた(Noritake et al., 2018)。

社会的条件づけでは、2 頭のサル（M1：自己サルと M2：他者サル）を向かい合わせに座らせ、視覚刺激を呈示した。視覚刺激ごとに各サルの報酬確率が関連づけられおり、1 試行においてはその報酬確率に従い、どちらかのサルに報酬が与えられた、もしくはどちらにも与えられなかった。M1 および M2 の報酬確率は 2 つの異なる文脈（Self-variable block および Partner-variable block）で操作され、交互に実施された。Self-variable block では M1 の報酬確率のみが変化（P = 0.25-0.75）し、M2 の報酬確率は一定（P = 0.2）であった。一方 Partner-variable block では、M2 の報酬確率が変化（P = 0.25-0.75）し、M1 の報酬確率は一定（P = 0.2）であった。

この社会的条件づけ下におけるサルの報酬への期待を定量化するため、刺激呈示中の M1 のリッキング頻度を測定したところ、Self-variable block においては M1 の報酬確率が高まるほど、M1 のリッキング頻度は高くなった。一方、Partner-variable block においては M2 の報酬確率が高くなるほど、M1 のリッキング頻度は低くなった。このことから、自己の報酬確率だけではなく、他者の報酬確率にも自己の報酬価値が影響されること、すなわち主観的報酬価値の表現が明らかとなった。

関連する神経基盤として、自己の報酬や学習に関与するとされるドパミン作動性中脳核、それと解剖学的結合を持ち社会的な情報処理の中枢の一つとされる内側前頭前野、さらにこれら 2 つの脳部位と解剖学的結合を持つ視床下部外側野の神経活動を、M1 から記録した。その結果、内側前頭前野においては、自己と他者の報酬確率情報が異なる神経細胞群で選択的に表現されていた。一方、中脳ドパミン細胞では、期待行動と同じように自己の報酬確率が高まるほど活動が上昇し、他者の報酬確率が高まるほど活動が減少した。すなわち主観的価値を表現することが明らかとなった。また視床下部外側野では、主観的価値、および自己と他者の報酬確率情報が異なる神経細胞群で選択的に表現されていた。さらに、内側前頭前野から視床下部外側野もしくは中脳へと向かう神経情報の流れが、逆方向に向かう流れより有意に多く認められた。

これらの結果は、内側前頭前野で処理された自己と他者の報酬情報が視床下部外側野、中脳のドパミン細胞へと送られて統合され、自己の報酬に対する主観的価値が計算されることを示唆している。

P-3

高次視覚領野 MT/FST 野における複雑運動刺激に対する反応特性
Response characteristics to complex motion in visual areas MT and FST

眞田尚久 [1]

[1] 関西医科大学　生理学講座

我々は運動情報の空間的なパターンから、動いているものが何かを推定したり、質感情報を得ることができる。液体粘性知覚では、運動ベクトルの連続的な変化が液体らしさの知覚判断に相関することが示されており（Kawabe et al., 2015)、運動ベクトルの空間配置が視覚運動による質感知覚に重要な要素である考えられる。しかしながら、これまでの視覚運動に関する神経科学研究ではランダムドットキネマトグラムのような空間的に一様な運動情報しか持たない視覚刺激が用いられてきたことから、視覚運動の空間情報関する脳内表現についてはよくわかっていない。

本研究では、空間的な配置を考慮した視覚刺激を用いることで、複雑運動が高次視覚領野（MT 野, FST 野）でどのように表現されているかを電気生理学的に明らかにする。視覚刺激には小さなパッチ状のランダムドットキネマトグラムを升目状に配置した複雑運動刺激を用いた。運動ベクトルの空間連続性が異なる刺激を 8 段階作成し、さらにそれらの刺激の運動方向を 8 段階用意することで、運動情報の空間連続性と運動方向の両パラメータを併せ持つ刺激を 64 種類(8 x 8)作成した。

MT 野細胞のように平均の運動エネルギーを符号化しているならば、運動ベクトルの空間連続性によらず最適な運動方向に応答するはずであるが、運動方向によらず空間連続性に選択的に応答する場合には、特定の空間連続性のみに選択的に応答するはずである。MT 野と FST 野細胞から神経応答を記録した結果、MT 野では運動方向依存的で空間連続性には非選択的な応答を示す細胞が観察されたのに対して、FST 野では運動方向に対する選択性が低く空間連続性が高い刺激のみに応答する神経細胞がいることが分かった。また、運動方向選択性を持ちつつ、空間連続性が高い刺激により強い応答を示す神経細胞が両領野で観察されたことから、MT 野から FST 野に情報処理が進むにつれて、運動情報の空間特徴を抽出するシステムが作られている可能性が示唆される。

This research is supported by JSPS (JP16H01681, JP16K00384, JP18H05016)

P-4

Presynaptic inhibition of muscle afferent in awake, behaving monkeys

Tomatsu Saeka

National Institute for Physiological Sciences

In the previous studies, we reported increasing presynaptic inhibition (PSI) on the input from cutaneous afferent in monkey spinal cord during voluntary movement. We developed the method to estimate the size of primary afferent depolarization by evoking antidromic volleys in the cutaneous nerve by applying the microstimulation (MS) to their intraspinal (IS) terminals.
In the present study, we applied the technique to a muscle afferent in two monkeys performing wrist flexion-extension task. We implanted a nerve cuff electrode to the deep radial nerve (DR) innervating wrist extensor muscles and attached a chamber to the cervical vertebrae (C4-T1) of the trained monkeys. Then we applied ISMS (10 Hz, 1-50 μA) to activate the terminal of DR afferents and recorded 64 volleys.
We observed growing PSI after the instruction of movement direction as the cutaneous nerve; however, it occurred only for flexion. Moreover, we found transient and non-directional specific decrease of PSI at wrist movements. In total, a significant decrease in PSI was observed only during the extension movement in the DR nerve ($p < 0.05$).
These results suggested the level of PSI on the peripheral nerve is modulated by at least two discrete modality-specific processes. Such modulations might allow the spinal cord to use the information from afferents in an efficient way for the control of ongoing movement. Therefore, we can conclude that task-relevant peripheral inputs are highlighted by the PSI in a highly selective way.