

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：13904

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K21079

研究課題名(和文) 高度なデータ駆動型手法を用いた脳の予測メカニズムのモデリング

研究課題名(英文) Modeling of brain prediction mechanisms by advanced data-driven methods

研究代表者

東 広志 (Higashi, Hiroshi)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：70734474

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ヒトは過去の経験から未来に起こることを予測する。本研究では、そのような経験から予測する機能に関連する脳波成分を特定した。ヒトを実験対象とした脳波計測の結果、予測を行う脳内処理はP3aと呼ばれる脳波成分に反映されることが分かった。その一方、脳波成分の一つであるP3bは、予測と関連しない処理が反映されることが示された。この結果は経験を処理するために複数の脳内処理が存在することを示唆し、これはヒト学習機能の深い理解への手がかりになる。

研究成果の概要(英文)：Human predict future events from past experienced events. This study identified electroencephalography (EEG) components that contribute this human prediction function. The results of human EEG experiment, we found that the process associated with the prediction affects P3a, one of the EEG components. On the other hand, the other component, P3b, reflected the other process not associated with the prediction. The results suggest that the multiple brain processes exist for processing our experiment. This suggestion will contribute deep understanding of human learning function.

研究分野：認知科学

キーワード：脳波 予測 学習

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの脳は、意識的・無意識的に関わらず、常にあらゆる事象を予測している [Bubic+, *Front. Hum. Neurosci.*, 2010]. 例えば、図書館などで突発的な大きな音が鳴れば大きく驚くが、工事現場などで同様の音が鳴っても、大して驚かない。なぜなら、「工事現場は大きな音が鳴る」という経験があり、それをもとに起こり得る事象を予測しているからである。予測は経験に依存する。本課題では、「どのように経験が予測に反映されるのか」を神経反応の観測によって明らかにすることを目的とする。

ヒトの予測メカニズムを観測する手段として、反応時間などの行動データ計測や、脳波を始めとする神経活動計測は有望な手段である。例えば、複数の単純な刺激（短い音や図形）を、2秒程度おきに次々とランダムに提示する課題（オドボール課題）を行うと、刺激の発生頻度によって異なる脳波特徴が発生する。これは、脳が刺激発生履歴（経験）から次の刺激を予測しており、予測と現実（実際に起こった刺激）との誤差が、脳活動に影響を与えていると考えられる。

刺激脳発生履歴から刺激を観測するごとに発生する脳活動パターンをモデル化し、予測メカニズムを解析する方法を、モデルベース解析と呼ぶ [Lieder+, *PLoS Comput. Biol.*, 2013]. この解析では、様々な神経モデル（例えば、適応モデル [Schroger, *Neurosci. Lett.*, 1995]）や学習理論（例えば、Free energy principal [Friston, *Nature Reviews Neurosci.*, 2010]）を基にモデルを設計する。その中で、推定誤差が小さいモデルが、予測メカニズムをよく近似しているとされる。

このモデルベース解析を用いて、Mars et al. (2010) と Kolossa et al. (2011) は、刺激履歴と脳波成分のひとつである P3 との関連を調査した。P3 は、刺激を観測してから約 300 ミリ秒から 400 ミリ秒で発生する正方向への電位の揺れであり、刺激の発生頻度によってその揺れの大きさ（振幅）が変化することが知られている。これらの先行研究は、脳が刺激の発生頻度をどのように計算しているのかをモデルを用いて説明し、それが P3 の振幅に反映されることを明らかにした。これらの成果は、人がどのように外部環境を脳内の内部モデルとして理解し保持しようとするのかを説明するための手がかりとなった。

## 2. 研究の目的

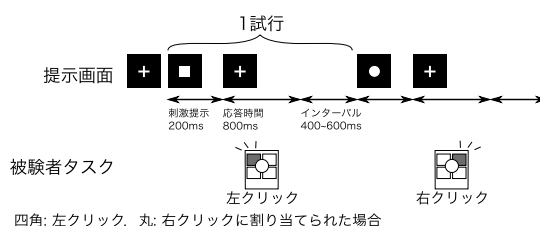
先行研究では、刺激発生頻度どのように計算するかを明らかにしたが、人を取り囲む環境はより複雑で高度である。したがって、人の予測能力をモデル化するには、どの程度複雑な外部環境を内部モデル化できるかを明らかにする必要がある。そこで、本研究では、複雑な外部環境の一つとして、マルコフ連鎖で

発生する刺激系列を用いる。マルコフ連鎖とは、次に発生する刺激の発生確率が、前の刺激に依存する確率過程である。例えば、丸と四角の図形のいずれかが、一つずつ発生する環境を考える。このとき、「丸の次は四角が発生しやすい」や「四角の次は四角が発生しやすい」という確率的なルールのことを、マルコフ連鎖と呼ぶ。

マルコフ連鎖は、「ある事象から、ある事象への状態遷移」を繰り返すが、このような状態遷移を含む外部環境を、脳がどのように処理しているかは明らかではない。本研究では、人がこのような外部環境に直面したときに、どのような内部モデルを構築するのか、どのように構築するのか、を脳波計測を用いて調査した。

## 3. 研究の方法

マルコフ連鎖で発生する刺激系列を 11 名の実験参加者に呈示し、そのときの行動と脳波を計測した。参加者は、次々に表示される 2 つの刺激に対して、Two-choice response time (TCRT) タスクを行った [Mars+, 2010]. TCRT タスクでは全ての刺激に対して、刺激の種類に応じた応答を参加者に課す。下図に本実験で行ったタスクの流れを示す。被験者は顎台で顔の位置を固定した状態で LCD ディスプレイの前に座る。ディスプレイと椅子の間に設置された机の上の 4 ボタントラックボールの左側のボタンに左手、右側のボタンに右手を触れておく。ディスプレイに表示される固視点を見る。その後、固視点が表示されていた位置に、丸か四角の図形が表示される。図形の種類に応じて、刺激提示後 1 秒以内に右か左のボタンをクリックする。応答の有無に関わらず、刺激提示から 1.4-1.6 秒以内に次の刺激が提示される。どちらのボタンをクリックするかは、前もって指示されている。例えば、「丸が右クリック、四角が左クリック」のように対応付けされる。



図形刺激（被験者に表示される丸・四角の図形）は、あるマルコフ連鎖にしたがって発生する。マルコフ連鎖における条件付き確率の状態は 2 種類あり、それぞれ状態 1、状態 2 とする。2 つの図形刺激を刺激 a と刺激 b とすると、状態 1 の場合、刺激 a のあとに刺激 a が発生する確率は 0.3、刺激 a のあとに刺激 b が発生する確率は 0.7、刺激 b のあとに刺激 b が発生する確率は 0.3、刺激 b のあとに刺激 a が発生する確率は 0.7 と設定した。前回の刺激

$S_{n-1}$ を観測したあとに現在の刺激 $S_n$ が発生する確率を $P(S_n|S_{n-1})$ と表すと、それぞれの刺激の条件付き発生確率は、 $P(a|a) = P(b|b) = 0.3$ ,  $P(b|a) = P(a|b) = 0.7$ と表すことができる。状態2の場合は、 $P(a|a) = 0.3$ ,  $P(b|a) = 0.7$ ,  $P(a|b) = P(b|b) = 0.5$ と設定した。これらの状態を下図にまとめる。



被験者は、310 試行からなる 1 セッションを 4 回行う。状態 1 と状態 2 の設定で、それぞれ 2 セッションずつ行うが、その順番はランダムである。どちらの図形が刺激 $a$ 、刺激 $b$ に対応するかは、セッションごとにランダムである。1 セッションにおける刺激 $a$ と刺激 $b$ の 310 回分の出現順序は、状態毎に異なる。しかし、同じ状態における 2 セッションにおいて、出現順序は同じである。セッション間には、最低 2 分の休憩を取った。被験者は、セッション毎に刺激の発生確率が異なることは知らされていない。また、実験後のアンケートの結果、状態が 2 つあることに気づいた被験者はいなかった。

脳波は、BioSemi ActiveTwo を使用し測定された。このとき、リファレンス電極として common mode sense (CMS) を用いて、64 個の電極で信号を記録した。サンプリング周波数は 512 Hz で記録した。脳波と同時に、左・右耳朶、右目の右側、左目の左・上・下側に電極を設置し、電位を記録した。また、行動データとして、被験者のボタン応答における応答ボタンと反応速度を、Psychtoolbox によって計測した。

脳波データを次のように処理した。まず、両耳朶に観測された平均信号を参照信号とした。そして、眼電位が  $80 \mu\text{V}$  を超える電位が観測された試行を解析から取り除いた。前処理として 0.3—30 Hz のバンドパスフィルタを適用した。さらに、刺激呈示 100 ms 前から刺激呈示までの脳波電位の平均が 0 になるようにベースライン補正を行った。

前処理後の電位を刺激履歴から Trial-by-Trial に予測する回帰分析を行なった。回帰分析における説明変数として、刺激履歴から発生頻度 (定常頻度) と遷移頻度を計算した。定常頻度は刺激 $a$ 、もしくは刺激 $b$ が発生する頻度である。遷移頻度は、ある刺激のあとにある刺激が発生する頻度であり、例えば、刺激 $a$ から刺激 $b$ に遷移する頻度である。その頻度から、ある電極・ある潜時 (刺激呈示からの時間) に観測される電位を一般化線形回帰モデルを用いて予測した。これにより、刺激の持つ定常頻度と遷移頻度がどの脳波成分に影響を与えるかを調べる。

#### 4. 研究成果

応答速度の結果を図 1 に示す。状態 1 においては、 $ab$ と $ba$ において応答精度が高くなっている。また、図 2 に示した応答精度においても、これらについては、精度が高い。つまり、遷移確率が高い両者について、実験参加者は速く正確に応答できた。これは、次に起こる刺激を予測して、応答の準備をしていることを示唆している。この傾向は、状態 2 においても観測できる。

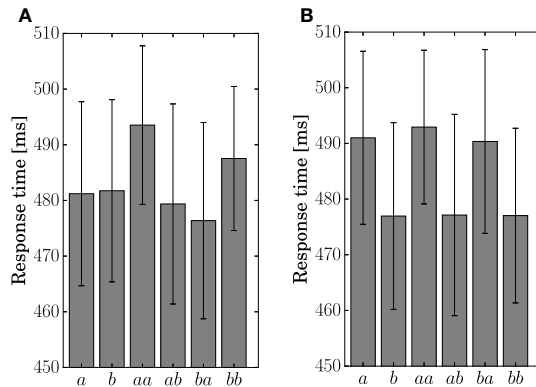


図 1 応答速度

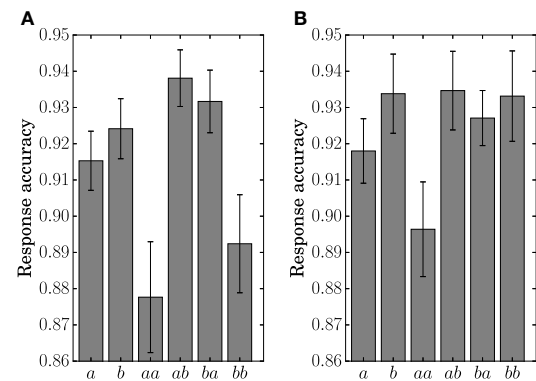


図 2 応答精度

図 3 に回帰分析における予測精度を示す。定常頻度と遷移頻度の両方の効果が確認された。これらの効果が観測される潜時や電極位置が異なる。先行研究 [Polich, Clin. Neurophysiol., 2007] と照らし合わせると、定常頻度は P3 の中でも遅い成分である P3b に、遷移頻度は早い成分である P3a に反映されることが分かった。さらに、タスク開始からの応答数という観点で観測すると、遷移頻度はタスク開始当初 (応答数が少ないとき) に P3a に反映されて、応答数が多くなるとその効果はだんだんと弱くなった。逆に、定常頻度における P3b の効果は、応答数が多くなるほど大きくなる。これらの結果より、2 つの P3 の成分である P3a と P3b は 2 つの異なるプロセスを反映していることが示唆される。一つは、P3a に反映される内部モデルの更新プロセスである。もう一つは定常状態におけるグローバル効果を反映する P3a である。

これらの考察から、次の 3 つの仮説を提案

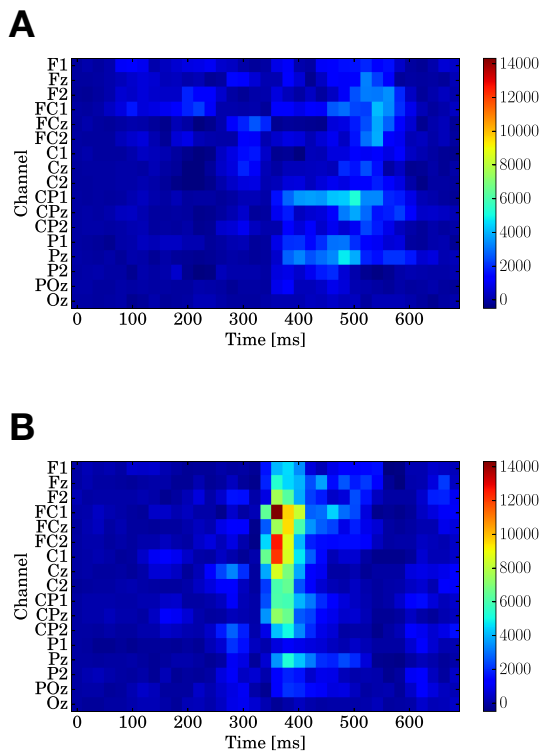


図 3 回帰分析結果

することができる。

- (1) 外部環境が状態遷移を持つとき、脳は状態遷移を含む内部モデルを表現することができる。
- (2) 外部環境の状態遷移確率が変化しない場合、内部モデルの更新はある時点で停止する。
- (3) P3b は内部モデルとは関連しない誤差を反映している。

本研究において、内部モデル構築プロセスの一端を明らかにした。今後、信号源解析などによってプロセスを担う部位、もしくは部位ネットワークを特定することで、よりヒトの予測機能の理解が深まることが期待される。また、内部モデルを構築し予測を立てることは、ヒトが未来の行動をどのように決定するかという意思決定に関連する。したがって、本研究で特定した脳波成分は、強化学習といった意思決定、および学習における脳内プロセスを明らかにするための手がかりになる。また、本研究によって、学習における誤差信号が、高い時間分解能を持つ脳波で観測可能であることが示された。これにより、ヒトがどのように内部モデルを更新するのか、その順序や時間ダイナミクスを明らかにすることが可能である。

##### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

1. 田中聡久, 東広志, “非侵襲生体信号の処理と解析 -II- ブレイン・コンピュータ・インタフェース,” システム／制御／情報, vol. 62, no. 4, pp. 159-165, 2018. (査読無)
2. H. Higashi, T. Minami, and S. Nakauchi, “Variation in event-related potentials by state transitions,” *Frontiers in Human Neuroscience*, vol. 11, p. 75 (11 pages), 2017. (査読有)  
DOI: 10.3389/fnhum.2017.00075
3. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, “Multilinear discriminant analysis with subspace constraints for single-trial classification of event-related potentials,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 10, no. 7, pp. 1295–1305, 2016. (査読有)  
DOI: 10.1109/JSTSP.2016.2599297
4. H. Higashi, G. M. ElMasry, and S. Nakauchi, “Sparse regression for selecting fluorescence wavelengths for accurate prediction of food properties,” *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, vol. 154, pp. 29–37, 2016. (査読有)  
DOI: 10.1016/j.chemolab.2016.03.008
5. 東広志, 田中聡久, “信号構造を利用する脳波処理,” *計測と制御*, vol. 55, no. 11, pp. 960-965, 2016. (査読無)  
DOI: 10.11499/sicejl.55.960

[学会発表] (計 14 件)

1. T. Kondo, N. Okada, K. Maruchi, Y. Misaki, H. Higashi, J. AR Monteiro, C. Montagner, J. MM Linhares, S. MC Nascimento, S. Nakauchi, “Chromatic composition and preferences of paintings — Comparative study for Japanese and Portuguese observers and paintings,” *The 24th symposium of the International Colour Vision Society, Berlin, Germany, Aug., 2017.*
2. H. Tamura, H. Higashi, and S. Nakauchi, “Multiple cues for visual perception of mirror and glass materials,” *The 17th Annual Meeting of the Vision Sciences, Florida, USA, May, 2017.*
3. S. Nakauchi, K. Shiromi, H. Higashi, M. Shehata, and S. Shimojo, “Luminance-contrast reversal disambiguates illumination interpretation in #TheDress,” *The*

- 17th Annual Meeting of the Vision Sciences, Florida, USA, May, 2017.
4. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Smoothing of xDAWN spatial filters for robust extraction of event-related potentials," in Proceedings of The 2016 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2016), pp. 1–5, Jeju, Korea, Dec. 2016.  
DOI:10.1109/APSIPA.2016.7820750
  5. T. Kondo, J. L. Nieves, E. M. Valero, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Functional illumination supporting the visual detection of plaques," in Proceedings of IS&T 24th Color Imaging Conference (CIC 24), pp. 219–224, San Diego, USA, Nov. 2016.  
DOI: 10.2352/ISSN.2169-2629.2017.32.219
  6. H. Tamura, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Kinetic cue perceptual discrimination between mirror and glass," European Conference on Visual Perception, Barcelona, Spain, Aug. 2016.
  7. K. Ito, H. Higashi, and S. Nakauchi, "A visualization method for hand cleanness using fluorescent spectrum," in Proceedings of The 2016 International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications, pp. 1–5, Penang, Malaysia, Aug. 2016.  
DOI: 10.1109/ICAICTA.2016.7803096
  8. T. Kondo, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Optimization of illuminant spectrum for visual detection of foreign substances in jams," in Proceedings of The 2016 International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications, pp. 1–4, Penang, Malaysia, Aug. 2016.  
DOI: 10.1109/ICAICTA.2016.7803123
  9. S. Ryu, H. Higashi, T. Tanaka, S. Nakauchi, and T. Minami, "Spatial smoothing of canonical correlation analysis for steady state evoked potential based brain computer interfaces," in Proceedings of 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2016), pp. 1516–1519, Florida, USA, Aug. 2016.
  10. Y. Suzuki, T. Shinkai, H. Higashi, T. Minami and S. Nakauchi, "Mismatch between perception and neural response in glare illusion," The 16th Annual Meeting of the Vision Sciences, Florida, USA, May, 2016.
  11. H. Tamura, M. Tsukuda, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Perceptual segregation between mirror and glass material under natural and unnatural illumination," The 16th Annual Meeting of the Vision Sciences, Florida, USA, May, 2016.
  12. H. Higashi, T. M. Rutkowski, T. Tanaka, and Y. Tanaka, "Subspace-constrained multilinear discriminant analysis for ERP-based brain computer interface classification," in Proceedings of The 2015 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC 2015), pp. 934–940, Hong Kong, China, Dec. 2015.  
DOI: 10.1109/APSIPA.2015.7415409
  13. K. Ito, Yuki Ota, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Spectral-difference enhancing illuminant for improving visual detection of blood vessels," in Proceedings of The 2015 International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications, Chonburi, Thailand, Aug. 2015.  
DOI: 10.1109/ICAICTA.2015.7335377
  14. Y. Ota, H. Higashi, and S. Nakauchi, "Objective assessment and qualification of pearl quality by spectral-spatial features," in Proceedings of The 2015 International Conference on Advanced Informatics: Concepts, Theory and Applications, Chonburi, Thailand, Aug. 2015.  
DOI: 10.1109/ICAICTA.2015.7335372
6. 研究組織  
 (1) 研究代表者  
 東 広志 (HIGASHI, Hiroshi)  
 豊橋技術科学大学・大学院工学研究科・助教  
 研究者番号 : 70734474