

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：82636

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2020

課題番号：17K20006

研究課題名（和文）脳情報デコーディングによる主観的時間の解読

研究課題名（英文）Neural decoding of the subjective time

研究代表者

林 正道（Hayashi, Masamichi）

国立研究開発法人情報通信研究機構・脳情報通信融合研究センター脳情報通信融合研究室・研究員

研究者番号：50746469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、右下頭頂小葉（rIPL）と呼ばれる脳領域が、特定の時間長の刺激に選択的に応答することを示した研究代表者の研究をベースとして、脳情報デコーディングの技術を利用して脳活動からヒトの時間経験を解読することを目的として研究を行った。その成果として、rIPLを含む複数の脳領域の脳活動パターンから時間長の情報を解読することに成功した。さらにrIPLの活動が実験参加者の時間長推定能力や、主観的時間のバイアスを反映することを発見した。また、補足運動野においては前方が短い時間長、後方が長い時間長に対して選択的応答を示す脳領域が空間的に配置された「時間地図」が存在することも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、近年急速に発展した脳情報デコーディングの手法を時間知覚研究に適用することによって、これまでの変量の解析手法では難しかった、脳内における時間情報表現が存在する領域を世界で初めて明らかにしたものである。本成果は、時間情報処理のモデル構築に貢献するだけでなく、時間感覚に障がいのある患者における病態理解や、脳情報デコーディングの手法を用いた時間感覚のバイアスの補正や脳刺激による時間推定精度の向上といった応用研究への道を拓くものである。

研究成果の概要（英文）：In this project, we aimed to decode human temporal experience from brain activity patterns using the multivariate pattern analysis method, based on our previous finding that a brain region called the right inferior parietal lobule (rIPL) responds selectively to stimulus durations. This project ended with success and provided a couple of major findings. First, we successfully decoded duration information of stimuli from the brain activity patterns in several brain regions including the rIPL. Secondly, we found that the activity of the rIPL reflected the participants' ability to estimate durations of stimuli and the bias in their time experience. Finally, we also showed that time intervals are topographically represented in the supplementary motor area.

研究分野：認知神経科学

キーワード：時間知覚 機能的MRI

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまでの神経科学研究において、線分の傾き、運動方向、数量などの基本的な刺激の特徴は、それぞれの特定のパラメータ（例：30度の線分の傾き）に対して選択的に発火するニューロン群によって表象されていることが示されているが、一方、時間については、ヒトの脳に特定の時間長に選択的な応答を示す「時間ニューロン」が存在するのかが不明であった。そこで研究代表者らは、ヒトの脳にそのような時間長に対して選択的に応答する脳領域が存在するのかを明らかにするため、「反復抑制法」という方法を用いて脳機能イメージング (fMRI) 実験を行い、右下頭頂小葉 (rIPL) に数百ミリ秒の時間長に選択性をもつ「時間ニューロン」が存在することを示唆する結果を得た。これは時間長が、傾きや運動方向、数量などと同様の、特徴選択性を持つニューロン群による「集団コーディング」として脳内に表現されている可能性を示している (Hayashi et al., 2015 *PLoS Biology*)。

2. 研究の目的

本研究では上記の知見をベースとし、脳活動のパターンから情報を読み取る「脳情報デコーディング」等の技術を利用することで、脳活動とヒトの時間経験の関係を明らかにすることを主な目的として実験を行った。

3. 研究の方法

<研究1>

まず最初に行った研究では、rIPL を含むいくつかの脳領域の活動パターンから復号器を作成し、(同一被験者の) 別の脳活動データから、各試行で呈示された視覚刺激の時間長を解読できるかを調べた。実験では、一試行につき2枚の縞模様の刺激 (ガボールパッチ) を順番に呈示し、その後、被験者に「二つ目の刺激は一つ目の刺激に比べて長い時間画面に呈示されたか、短い時間呈示されたか」をボタン押しで答えてもらった。この実験課題遂行中の脳活動を fMRI により計測した。

解析は「関心脳領域の決定」、「復号器の作成」、「復号器による時間長の判定」の3つのステップでおこなった。これらのステップでは、全て各試行の一つ目の刺激のオフセットに関連して変化する fMRI 信号を用いた。関心脳領域の決定のため、まず上記の実験課題を遂行中に撮像した fMRI データのうちの一部を用いて一般化線形モデルによる解析を行い、各試行の一つ目の刺激に関連して活動する脳領域を特定した。この解析で特定した脳領域を、後の多変量パターン解析の関心脳領域とした。そして残りのデータを用い、機械学習アルゴリズムによって復号器を作成し、この復号器を用いて、さらに別の実験データにおける各試行で被験者がどの刺激の時間長を観察していたかを判定させた。また、これらの解析の後、時間長を復号可能であった領域が、「脳活動のパターンの違いにより時間長が解読された」のか、それとも「関心領域の全体の活動強度の違いから解読されたのか」を区別するため、一般化線形モデルによる解析も行い、検証した。

<研究2>

研究代表者の先行研究 (Hayashi et al., 2015 *PLoS Biology*) および研究1では、rIPL が単に刺激の物理的な時間長を反映しているのか、あるいは被験者が実際に感じている主観的時間長を反映しているのかが明らかにすることができない。そこで研究2では、同一時間長の刺激を

繰り返し呈示することによって、その後に呈示される刺激の時間長が伸縮して感じられる「時間長順応」(Heron et al., 2012 *Proc Roy Soci B*) と呼ばれる現象を用い、rIPL の活動が物理的時間を反映しているのか、それとも主観的時間を反映しているのかを明らかにするために実験を行った。

実験ではまず、同一時間長の視覚刺激(順応刺激)を30回繰り返し呈示し、続いて各試行で3回のトップアップ刺激を順応刺激と同じ時間長で呈示した。被験者はその後、視覚刺激として様々な時間長で呈示される視覚刺激と、その後に呈示される聴覚刺激(ホワイトノイズ)のどちらの方が時間長が長かったかをボタン押しによって回答した。被験者がこの課題を遂行している最中の脳活動を fMRI で撮像し、一般化線形モデルによるデータ解析を行った。

4. 研究成果

研究1のデータ解析の結果、rIPLをはじめ、右下前頭回、および左半球頭頂葉領域から、被験者が見ていた刺激の時間長を解読可能であることがわかった。また、補足運動野(SMA)においても、同様の傾向が見られた。この中でも特にrIPLにおいては、復号器による復号成績が、実験参加者の時間推定課題の成績と相関することが明らかとなった。この結果は、rIPLの活動が実験参加者の時間長推定能力と関連していることを示している。また、時間長を解読できた脳領域について一般化線形モデルによる解析を行ったところ、各時間に対する活動強度が同程度であったことから、時間長が解読できた理由は活動強度の違いによるものではなく、脳活動のパターンの違いによるものである可能性が示唆された。これらの結果は論文としてまとめ、2018年に *Communications Biology* 誌に発表した(Hayashi et al., 2018 *Commun Biol*)。

研究2では、行動データ解析の結果、テスト刺激の時間長が特定の時間長への順応によって伸縮する時間長残効が起きていることが示された。また、時間長への順応の結果、rIPL領域においては、時間長への順応によって脳活動が減弱する「反復抑制効果」が起きていることが明らかとなった。さらに時間長残効と反復抑制効果の関係を調べたところ、時間長残効が強い被験者ほど、反復抑制効果が大きいことがわかった。この結果は、rIPLの活動が刺激の物理的時間長ではなく、主観的時間を反映していることを示している。また、rIPL以外にも反復抑制効果が起きている脳領域があるかを調べたところ、左右半球の中後頭回においても反復抑制効果が起きていることを認めた。しかしながら、中後頭回の反復抑制効果に関しては、時間長残効の強度との間に相関関係が認められなかったことから、主観的時間とは直接関連していない可能性が示唆された。これらの結果は論文としてまとめ、2020年に、*Journal of Neuroscience* 誌に発表した(Hayashi and Ivry, 2020 *J Neurosci*)。

この他にも、研究代表者らはイタリアの研究グループと共同研究を行い、その一環として研究1のデータを提供した。一般化線形モデルと pRF 解析の結果、短い時間長から長い時間長に対して強く応答する領域が SMA の前方から後方にかけて空間的に配置されていることを発見し、この成果を論文として発表した(Protopapa, Hayashi, et al., 2019 *PLoS Biol*)。

これらの成果は、脳内における時間情報の存在領域を明らかにし、さらにそれらの領域と主観的時間の関係を明らかにしたものである。本成果は時間情報処理のモデル構築に貢献するだけでなく、時間感覚に障がいのある患者の病態理解を促進し、さらに時間感覚のバイアスの補正や脳刺激による時間推定精度の向上といった応用研究への道を拓くものであると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Hayashi Masamichi J., van der Zwaag Wietske, Bueti Domenica, Kanai Ryota	4. 巻 1
2. 論文標題 Representations of time in human frontoparietal cortex	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Communications Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s42003-018-0243-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Hayashi Masamichi J., Ivry Richard B.	4. 巻 40
2. 論文標題 Duration Selectivity in Right Parietal Cortex Reflects the Subjective Experience of Time	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Journal of Neuroscience	6. 最初と最後の頁 7749 ~ 7758
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1523/JNEUROSCI.0078-20.2020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Protopapa Foteini, Hayashi Masamichi J., Kulashekhar Shrikanth, van der Zwaag Wietske, Battistella Giovanni, Murray Micah M., Kanai Ryota, Bueti Domenica	4. 巻 17
2. 論文標題 Chronotopic maps in human supplementary motor area	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS Biology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pbio.3000026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計20件（うち招待講演 5件/うち国際学会 17件）

1. 発表者名 Protopapa F, Hayashi MJ, Kanai R, Bueti D
2. 発表標題 The Network Architecture of "Duration Selective" Brain Regions
3. 学会等名 2nd Annual Conference of the Timing Research Forum（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Protopapa F, Hayashi MJ, Kanai R, Bueti D
2. 発表標題 Effective connectivity in a "duration selective" cortical network
3. 学会等名 25th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kawashima T, Hayashi MJ, Amano K
2. 発表標題 Behavioral oscillations in temporal attention
3. 学会等名 Neural Oscillation Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayashi MJ, van der Zwaag W, Bueti D, Kanai R
2. 発表標題 Decoding temporal information in human parietal cortex
3. 学会等名 The 6th CiNet Conference: Brain-Machine Interface Medical Engineering based on Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 川島朋也、林正道、天野薫
2. 発表標題 トップダウン注意の時間特性
3. 学会等名 日本視覚学会2020年冬季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hayashi MJ
2. 発表標題 Decoding time in human frontoparietal cortex
3. 学会等名 2nd Annual Conference of the Timing Research Forum (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayashi MJ
2. 発表標題 Neural basis of the subjective time experience
3. 学会等名 Tokyo NTBS Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayashi MJ, van der Zwaag W, Buetti D, Kanai R
2. 発表標題 Decoding time in the human frontal and parietal cortices
3. 学会等名 24th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayashi MJ, Ivry RB
2. 発表標題 Repetition suppression in the right parietal cortex mediates psychophysical duration aftereffects
3. 学会等名 The 48th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Bueti D, Protopapa F, Hayashi MJ, Kanai R
2. 発表標題 Effective connectivity in a duration selective cortical network
3. 学会等名 The 48th Annual Meeting of the Society for Neuroscience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Protopapa F, Hayashi MJ, van der Zwaag W, Battistella G, Murray MM, Kanai R, Bueti D
2. 発表標題 Chronotopic maps in human premotor cortex
3. 学会等名 Annual Meeting of the Vision Science Society 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Protopapa F, Hayashi MJ, Bueti D
2. 発表標題 How do “duration selective” brain regions communicate?
3. 学会等名 41st European Conference on Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayashi MJ, Ivry RB
2. 発表標題 Neural adaptation in the right parietal cortex mediates psychophysical duration aftereffects
3. 学会等名 平成30年度生理学研究所研究会「認知神経科学の先端 知覚学習と運動学習」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayashi MJ
2. 発表標題 Neural population code in the raight parietal cortex mediates subjective experience of time
3. 学会等名 The 41st European Conference on Visual Perception (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hayashi MJ, Levine DM, and Ivry RB
2. 発表標題 Neural correlates of aftereffects observed following duration adaptation
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on the Science of Mental Time (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kanaya S, Hayashi MJ, and Whitney D
2. 発表標題 Exaggerated groups: Amplification in temporal and spatial ensemble features
3. 学会等名 The 2nd International Symposium on the Science of Mental Time (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hayashi MJ
2. 発表標題 Time in the Brain: Neuronal Coding of Duration
3. 学会等名 The 33rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 金谷翔子、林正道、and David Whitney
2. 発表標題 知覚される平均値はセットサイズに応じて拡大する
3. 学会等名 第36回日本基礎心理学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hayashi MJ
2. 発表標題 Population coding of time in the human brain
3. 学会等名 Post-Symposium of the 33rd Annual Meeting of the International Society for Psychophysics: Perception and the Brain (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kanaya S, Hayashi MJ, and Whitney D
2. 発表標題 Summary statistic representation of temporal frequency
3. 学会等名 Annual Meeting of the Vision Science Society 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
イタリア	SISSA			
米国	University of California Berkeley			
英国	University of Sussex			
スイス	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne			
オランダ	Spinoza Centre for Neuroimaging			