

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：82636

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01101

研究課題名（和文）時間情報読み出し機構の脳局在性の検証

研究課題名（英文）Localization of the neural representation of temporal information in humans

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・未来ICT研究所脳情報通信融合研究センター・研究員

研究者番号：50746469

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、時間長情報の脳内表現の局在性に焦点を当てて一連の研究を行った。その結果、頭頂葉と前頭葉に時間長情報を表現する神経細胞群の存在が示唆され、特に右下頭頂小葉の活動が時間長の推定精度と関連していることが示された。さらに、継続時間と間隔時間の脳内表現は同一ではなく、異なる神経細胞群によって表現されている可能性が心理物理実験によって示された。最後に、聴覚刺激によって与えられる時間情報の脳内表現の研究にも着手し、今後も引き続き研究を進める予定である。これらの成果は、時間長情報の脳内表現は脳領域や刺激の様式によって異なっている可能性を示唆している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、時間長の集団コーディングの文脈依存性を明らかにしたものであり、時間知覚の脳内メカニズムの理論を確立する上で重要な知見となる。また、これまで時間長の知覚研究とは独立に研究が進んできたリズム知覚のメカニズムの研究との橋渡しや、時間知覚の障がいに伴う疾患群の病態理解につながることを期待できる。さらには、ヒトの脳がいかに適応的なシステムを実現しているかについての認知神経科学一般における問題に、重要な示唆を与えるものである。

研究成果の概要（英文）：In this study, we conducted a series of investigations focusing on the localization of the neural representation of duration information in the brain. As a result, we suggested the existence of neural populations in the parietal and frontal lobes that represent duration information, particularly highlighting that the activity in the right inferior parietal lobule is associated with the estimation accuracy of duration. Furthermore, our psychophysical experiments suggested that the neural representations of filled and empty intervals are not identical and could be represented by different neural populations. We have also initiated studies on the neural representation of temporal information given by auditory stimuli and plan to continue this research. These findings imply the possibility that the neural representation of duration information may vary depending on the brain region and the type of stimuli.

研究分野：認知神経科学

キーワード：時間知覚 順応 心理物理 脳機能イメージング

## 1. 研究開始当初の背景

認知神経科学における重要な問いの一つは、特定の機能は特定の脳領域に局在しているのか、あるいは各所に分散しているのかという問題である。時間知覚の研究においても、時間情報の脳内表現が一箇所に集約されているのか、あるいは刺激の種類等に依存して別々の脳領域に表現されているのかが議論されてきた。しかしながらこれまでは、「時間」がそもそもヒトの脳内でどのような形で表現されているのか (how) が明らかではなかった。そのため、従来の研究では、どのような時間情報処理課題を行った際にどの脳領域が賦活するか (where) という議論に終始しており、時間の脳内表現の異同を厳密に区別して脳局在性を議論することはできなかった。

近年の研究代表者らが行った研究により、右下頭頂小葉 (rIPL) と呼ばれる脳領域が、数百ミリ秒の特定の時間の長さ (時間長) に対して選択的に応答することが示された (Hayashi et al., 2015 PLoS Biology)。この発見は、線分の傾きや運動方向、数量といった他の視覚的特徴にも使われている「集団コーディング」と呼ばれる脳内表現の様式が、時間長に対しても用いられていることを意味する。この発見により、「時間長情報は、時間情報の呈示様式等に依存しない形で同一の脳領域で表現されるのか、あるいは呈示様式等に依存して別々の脳領域に表現されているのか」といった具体的な問いを立て、時間情報の脳内表現の局在性の問題にアクセスできるようになった。

## 2. 研究の目的

時間長情報は、時間情報の呈示様式等に依らず同じ脳領域で同様に表現されているのか、あるいは呈示様式等に依存して別々の脳領域に表現されているのかは、よく分かっていない。本研究では、時間長の集団コーディングに焦点をあて、その脳局在性を検証する。

## 3. 研究の方法

- (1) 研究代表者らの先行研究では、rIPL と呼ばれる脳領域に時間の長さに対して感度をもつ神経細胞群が存在する可能性が示された (Hayashi et al., 2015 PLoS Biology)。そこで研究代表者らは、脳情報デコーディングという方法を用い、fMRI により計測される脳活動パターンから実験参加者の見ていた刺激の時間長が予測できるか、検証をおこなった。また、イタリア・オランダ・スイスの研究グループと共同で、短い時間長から長い時間長に選択性をもつ領域が大脳皮質上で空間的に配置されるような「時間マップ」が存在しているかを、同じデータセットの一部を利用して検証を行った。
- (2) 時間長の情報は、信号機のように点灯している時間長 (継続時間) によって表現される場合もあれば、ドラムのビートのように複数の短い刺激の時間間隔 (間隔時間) によって表現される場合もある。しかしながら、継続時間と間隔時間が脳内で同様に表現されているかは分かっていない。そこで、継続時間と間隔時間のメカニズムの異同を明らかにするため、心理物理実験を行った。

これまでの継続時間を用いた実験では、ある特定の時間長の刺激を繰り返し被験者に呈示して順応すると、その後呈示される刺激の時間長が伸縮する錯覚 (時間残効) が生じることが知られている。このような錯覚現象は、特定の時間長に特異的な応答を示す神経細胞群によって時間長が表現されている証拠の一つであると考えられており、本研究ではこの実験手法を一貫して用いた。

本研究では、まず、①時間残効が継続時間の刺激を用いた場合だけでなく、間隔時間を用いた場合にも同様に起こるかを検討し、継続時間と間隔時間が同様の様式によって脳内に表現されているかを調べた。また、②継続時間で順応することにより間隔時間の知覚が変化するか (残効が転移するか)、また、その逆が起こるかを調べることで、継続時間と間隔時間が同じ神経細胞群によって脳内に表現されているかを調べた。また、これらの結果を踏まえ、③持続時間および間隔時間の情報が呈

示される刺激の空間的位置特異的に脳内で表現されているのかを調べた。

- (3) 研究代表者の研究を含む従来の時間知覚の脳機能研究では、主に視覚刺激が用いられてきた。しかしながら、我々が日常生活で時間情報を用いる場合、その情報は聴覚から得られることが多い（例：音楽、ダンス）。また先行研究では視覚と聴覚における時間知覚のメカニズムは独立であるとする証拠が示されている一方で、これらが同一であるとする証拠も存在する。本研究では聴覚刺激により呈示される時間情報の脳内表現を明らかにするため、ビートの知覚の錯覚を用いた研究を行った。まず行動実験において、特定の速さの「ビート」（一定の時間間隔で繰り返し呈示される聴覚刺激）に順応することにより、その後に呈示されるビートの主観的な速さが変化するかを確かめる行動実験を行った。さらに脳機能イメージングを用いて、その主観的なビート知覚に関わる神経基盤を同定するための予備実験を行った。

#### 4. 研究成果（冒頭の番号は、前項の「研究の方法」に付された番号に対応）

- (1) 機械学習の手法を脳活動データに対して用いて解析を行った結果、時間長の情報が頭頂葉と前頭葉の複数の領域の活動パターンから復号可能であることが明らかとなった。また、時間長弁別成績が良い人ほど、rIPLの時間長に対する応答パターンが（異なる時間長の間で）明瞭に区別されている可能性が示され、個人の時間長の推定精度が、rIPLの時間長表現と関連していることが示唆された。この研究成果は、Communications Biology 誌に採択・出版された（Hayashi et al., 2018 Communications Biology）。

さらに同データを異なる手法で再解析した結果から、補足運動野の前部から後部にかけて、短い時間長から長い時間長に選択性をもつ領域が空間的に配置される「時間マップ」が存在していることが示された。この成果は PLoS Biology 誌に採択・出版された（Protopapa et al., 2019 PLoS Biology）。

- (2) これまでは継続時間により呈示される刺激を順応刺激およびテスト刺激として用いた場合に陰性残効が見られることが知られていたが、今回の実験によって間隔時間刺激を順応刺激およびテスト刺激とした際にも陰性残効が現れることが明らかになった。このことから、継続時間の場合と同様に間隔時間についても集団コーディングによる時間情報の脳内表現が存在する可能性が示された。一方、順応刺激とテスト刺激を異なるフォーマットの刺激（継続時間および間隔時間）で与えた場合には時間残効が現れなかったことから、継続時間と間隔時間を表現する神経細胞群は独立である可能性が示唆された。また、継続時間および間隔時間のどちらにおいても、順応刺激とテスト刺激が左右の別々の視野に与えられた場合にも残効が現れる（順応効果が視野間で転移する）ことから、これらの時間情報表現はいずれも、低次の感覚野ではなく比較的高次な脳領域において表現されている可能性が示された。
- (3) まず特定のテンポのビートへの順応によるビート知覚の変容が起きるかを先行研究と同様のパラダイムによって検証し、想定された錯覚現象が起きることが確かめられた。この結果をベースとして、実験パラダイムを脳機能イメージング実験用に改変して予備実験を行ったところ、錯覚の効果が減弱した。これは当初予想していなかった結果であったため、実験パラダイムをさらに改良して行動実験を実施し、原因の特定を進めた。今後実験デザインを脳機能イメージング実験用に最適化し、再度予備実験を実施する予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sugiyama Shogo, Gallego Hiroyasu Elisa M., Nomura Keishi, Hayashi Masamichi J., Yotsumoto Yuko	4. 巻 92
2. 論文標題 Longitudinal evaluation of the impact of the COVID-19-associated confinement on loneliness, anxiety, and sleep in a Japanese population	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Japanese journal of psychology	6. 最初と最後の頁 397 ~ 407
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4992/jjpsy.92.20081	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 -
1. 著者名 Kimura Ikko, Oishi Hiroki, Hayashi Masamichi J, Amano Kaoru	4. 巻 3
2. 論文標題 Microstructural Properties of Human Brain Revealed by Fractional Anisotropy Can Predict the After-Effect of Intermittent Theta Burst Stimulation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cerebral Cortex Communications	6. 最初と最後の頁 1 ~ 11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/texcom/tgab065	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 -
1. 著者名 Kimura Ikko, Ugawa Yoshikazu, Hayashi Masamichi J., Amano Kaoru	4. 巻 15
2. 論文標題 Quadripulse stimulation: A replication study with a newly developed stimulator	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Brain Stimulation	6. 最初と最後の頁 579 ~ 581
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.brs.2022.03.006	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 -
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 Kanaya Shoko, Hayashi Masamichi J., Whitney David	4. 巻 285
2. 論文標題 Exaggerated groups: amplification in ensemble coding of temporal and spatial features	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences	6. 最初と最後の頁 20172770
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rspb.2017.2770	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., 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 233
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

[学会発表] 計19件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 17件)

1. 発表者名 Hayashi MJ, Amano K
2. 発表標題 Format-dependent representations of time intervals
3. 学会等名 43rd European Conference on Visual Perception (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kawashima T, Hayashi MJ, Amano K
2. 発表標題 Distractor suppression modulates perceptual rhythms in sequential sampling
3. 学会等名 The 43rd Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kimura I, Oishi H, Hayashi MJ, Amano K
2. 発表標題 Predicting the efficacy of intermittent theta burst stimulation (iTBS) from the microstructural properties of the white matter
3. 学会等名 CNS2021 virtual (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimura I, Oishi H, Hayashi MJ, Amano K
2. 発表標題 The microstructure changes in human brain induced by intermittent theta burst stimulation
3. 学会等名 Brainbox Initiative Conference 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林正道
2. 発表標題 主観的時間の神経メカニズム
3. 学会等名 第45回日本神経心理学会学術集会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 林正道
2. 発表標題 磁気刺激による主観的時間の操作
3. 学会等名 日本認知心理学会第19回大会 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

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, Bueti 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 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

〔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
連携研究者	北澤 茂  (Kitazawa Shigeru)  (00251231)	大阪大学・生命機能研究科・教授    (14401)	

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			
米国	University of California, Berkeley			
イタリア	SISSA			
米国	University of California Berkeley			
英国	University of Sussex			
オランダ	Spinoza Centre for Neuroimaging			
スイス	EPFL			
イタリア	SISSA			
米国	University of California Berkeley			