

# 研究終了報告書

## 「人工神経回路フィードバックによる主観的時間の制御」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：林正道

### 1. 研究のねらい

これまでの研究では、我々が主観的に感じる時の流れは非常に不安定であり、様々な条件で早くなったり、遅くなったりすることが分かってきた。例えば、視界に動きが多く含まれる場合（人混みなど）には、主観的時間が長く感じられる。また、最近の研究では、画像弁別に用いられる多層人工神経回路に画像（視線情報を使って入力画像の空間的範囲を制限した動画）を入力すると、ヒトが感じる主観的時間の流れの速さの時系列変化を高精度で追跡することができることが示されている。さらに別の研究では、瞳孔径が主観的時間を反映していることも示されている。このことから、例えばヒトが見ている視覚的情報や、視線・瞳孔径の情報を組み合わせ、多層人工神経回路を用いて分析することで、主観的時間の流れをリアルタイムに高精度で推定できる可能性がある。

そこで本研究では、ヒトの時間認知に関する最新の知見を基に、腕時計型ウェアラブルデバイスによる触覚刺激および非侵襲的な脳刺激による時間感覚の変調と、メガネ型ウェアラブルデバイスと人工神経回路による主観的時間の流れのリアルタイム推定法を組み合わせ、ヒトの「主観的な時間の流れ」を制御する技術を確立することを目的とする。つまり、これまでただただ身を任せるしかなかった「時間の流れ」を、早くしたり、ゆっくりにしたり、あるいは（本来ある主観的時間のゆらぎを）安定化することができる技術的基盤を確立するのが、本研究のねらいである。

本提案で開発する主観的時間制御システムは、さまざまな場面での利用が想定される。このシステムを身につけ主観的時間の流れを高速化することで、手術の際に患者が感じる時間や、行列の待ち時間、長距離ドライブの時間を主観的に短縮することができるかもしれない。また、主観的時間の流れを低速化することでスポーツや音楽の演奏におけるフォーム獲得の促進や、ドライブ中の速度超過の抑制などが可能になるかもしれない。また、高速道路のように速い速度で移動する場合に、主観的な速度感を低下させることで重要な標識を読みやすくすることもできるかもしれない。このように、これまで制御不可能であった「主観的時間」を制御可能にすることで、これまで解決が難しかった時間にまつわる諸問題を解決できる可能性がある。

### 2. 研究成果

#### (1) 概要

本さがけ提案課題のねらいである主観的時間制御を実現にむけて研究を行い、主に3つの研究テーマにおいて重要な研究成果が得られた。本研究提案課題の実現にあたって、まずは基礎的知見として、主観的時間を司る神経基盤を同定することが重要である。そこで研究テーマAでは、時間残効と呼ばれる錯覚現象が起きている際のヒトの脳活動を脳機能イメージングの手法を用いて計測することにより、主観的時間の神経基盤の同定をおこなった。その結果、右下頭頂小葉と呼ばれる脳領域の活動強度が、時間残効と呼ばれる時間の錯覚現象の

強度と相関していることを突き止めた。

研究テーマ A で得られた知見は、特に脳刺激による主観的時間の制御を行うにあたり、その標的を決定するという意味でも重要な知見である。一方、この研究成果は数百ミリ秒の時間の長さ(時間長)という極めて限定された条件下における検証であり、どの程度一般性があるのかは不明である。そこで研究テーマ B では、研究テーマ A で得られた知見がどの程度一般化可能であるかを調べるため、時間長の表現として典型的な間隔時間(短い二つのイベント間の時間間隔)と、これまでの研究で用いてきた継続時間(一つのイベントの持続時間)の知覚に関連する神経基盤の異同を明らかにするための心理物理実験をおこなった(内容一部非公開)。

研究テーマ C では、非侵襲脳刺激を用いた主観的時間制御の可能性を探るため、経頭蓋静磁場刺激(tSMS)および4連発磁気刺激(QPS)を用いた検討を行った。これらの手法は近年開発された新規な手法であるため、まずはその有効性を検証するため、第一次運動野への刺激の効果を運動誘発電位の振幅の変化を評価することで検証した。その結果、どちらの手法でも有効性が示されたため、次に tSMS を使って主観的時間への効果を検証した。その結果、予備的な実験結果ではあるが、右下頭頂小葉及び補足運動野への刺激によって時間弁別精度への影響が現れることが確認された。

最後に研究テーマ D では、ウェアラブル触覚刺激デバイスによる主観的時間の変調効果を検討した(内容非公開)。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A「主観的時間の神経基盤の同定」

本さきがけ提案課題ではヒトの主観的時間の制御を行うため、まずは脳における時間情報の表現を明らかにした上で、それを変調できる脳刺激あるいは感覚刺激を検討する必要がある。我々の先行研究では、右下頭頂小葉(IPL)と呼ばれる脳領域に、数百ミリ秒の時間長に対して感度をもつニューロン群が存在する可能性が示されている。しかしながら、その IPL の活動が、単純に刺激の物理的入力

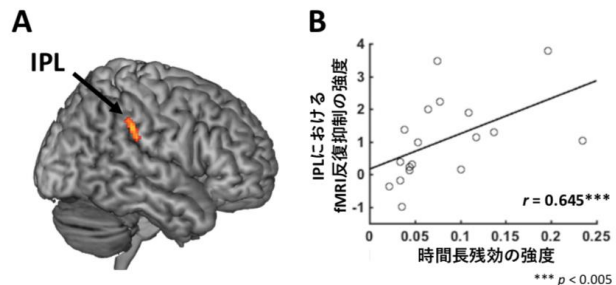


図1. IPLの反復抑制と主観的時間の関係。(A)IPLは、順応時間長を操作すると、それに応じて活動(反復抑制のパターン)を変化させる。(B)主観的時間の変化とIPLの反復抑制効果の相関。時間長残効による主観的時間の変化が大きい被験者ほど、IPLの反復抑制の強度が強いことが示された。

ながら、そのIPLの活動が、単純に刺激の物理的入力のみを表現しているのか、それとも、ヒトが感じる主観的な時間長を反映しているのかは不明であった。そこで本実験では、IPLが物理的時間長を表現しているのか、主観的時間を反映しているのかを明らかにするため、時間残効と呼ばれる時間の錯覚現象を用いて実験を行った。時間残効とは、数百ミリ秒の同じ時間長の視覚刺激を繰り返し被験者に呈示して順応を行うと、順応後に呈示される視覚刺激の主観的時間長が伸縮する現象である。実験の結果、IPLでは、特定の時間長への順応により応答が減弱する「反復抑制」とよばれる現象が起こっており、さらにこの反復抑制の強度が、時間残効の強度を予測することが示された(図1)。この結果は、IPLが主観的時間の神経基盤であ

ることを強く示唆する結果である。この研究成果は The Journal of Neuroscience 誌に出版された(主な研究成果リスト、(1)代表的な論文発表参照)。

### 研究テーマ B「時間情報処理メカニズムの汎用性の検討」

本さがけ提案課題では、脳刺激あるいは触覚刺激を与えることで、主観的時間に関連する脳領域の活動を変調させ、主観的時間感覚を制御することを目指している。我々の最新の研究成果では、IPL の活動が主観的時間と関連することが示されたことから(図1)、この領域の活動を脳刺激あるいは感覚刺激入力によって変調することで主観的時間を制御できる可能性がある。しかしながら、上記の研究成果は、数百ミリ秒の時間、継続して呈示される単一の視覚刺激の時間長(継続時間)という極めて限定された刺激条件下で得られたものであり、その結果がどの程度一般化できるかは不明である。例えば日常生活のなかで扱う時間の情報の中には、ドラムのリズムのように、「短い時間呈示される複数の刺激の時間間隔(間隔時間)」といった形で時間情報が与えられる場合もあり、継続時間と同様に脳内で表現されているかは自明ではない。

そこで本研究では、まず継続時間と間隔時間が同様の表現様式によって脳内に表現されているかを調べた(内容非公開)。この研究では、継続時間と間隔時間が脳内では別々のニューロン群によって表現されていることが示されたため、これらの異なる刺激フォーマットの間では脳における「学習の効率」も異なる可能性があると考え、それを検証する実験も実施することとした。この実験では被験者を2群

にわけ、一方では 200 ミリ秒の継続時間、もう一方では 200 ミリ秒の間隔時間の弁別についてそれぞれ4日間の訓練を行い、その前後で時間長の弁別閾値に変化が起こるかを調べた。その結果、継続時間では学習による弁別閾値の変化がほとんど生じないのに対して、間隔時間の学習においては有意な閾値の低下が見られた(図2)。この結果は異なる刺激フォーマットによって示される時間長の学習効率に違いがあることを示唆している。また、興味深いことに、学習が効率的に進んだ間隔時間を訓練した被験者については、その学習効果が同一の時間長の継続時間の弁別にも転移することが示された。この研究成果は Scientific Reports 誌に出版された(主な研究成果リスト、(1)代表的な論文発表参照)。

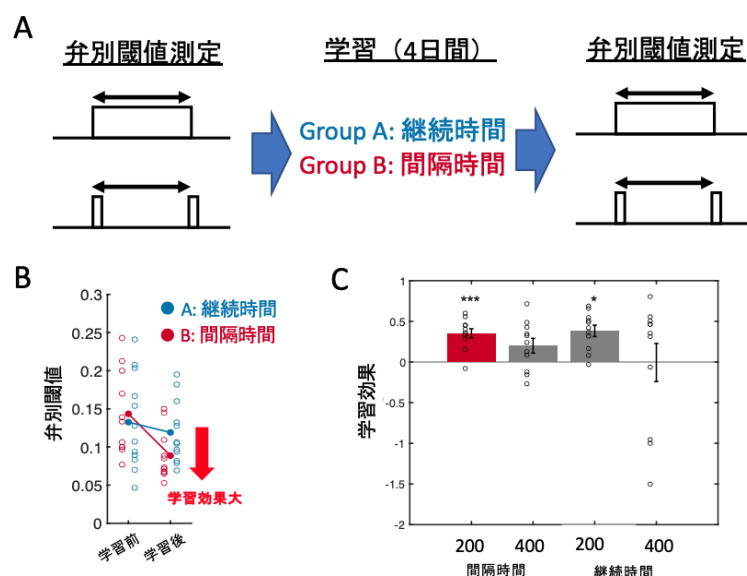


図2. 継続時間と間隔時間の学習実験。(A) 実験パラダイム。4日間の弁別学習の前後で継続時間および間隔時間の弁別閾値を測定した。(B) 継続時間の訓練を行った被験者は同刺激に対する学習効果が現れた一方、継続時間では学習効果が見られなかった。(C) 200ms の間隔時間の学習効果は同時間長の継続時間にも転移した。

### 研究テーマ C「非侵襲的脳刺激による主観的時間制御法の確立」

本研究提案では、時間情報処理に関連する脳領域に対して脳刺激を与え、脳活動を一時的に干渉することで主観的時間を操作することを目的としている。また、研究テーマ A では、主観的時間を反映する神経基盤を特定したが、これはあくまで相関関係を示したにすぎず、脳領域と主観的時間の因果関係は明らかでないため、脳刺激によって主観的時間を制御するための標的とするにあたり最適な脳領域かは定かではない。そこで研究テーマ C では、主観的時間の推定精度を変化させることができる脳領域・刺激法を明らかにするため、経頭蓋静磁場刺激 (tSMS) および 4 連発磁気刺激 (QPS) を用いて実験を行

った。これらの刺激法はどちらも近年になって開発された脳刺激法であること、また、当研究グループで購入した4連発磁気刺激装置については比較的最近開発されたものであり、QPS の効果の再現性に関する知見が不足していたことから、まずはこれらの手法の効果についての基礎的な検証をおこなった。この検証実験では、QPS 用の磁気刺激コイルおよび tSMS 用のネオジウム磁石を第一次運動野の直上に置き、刺激前後の運動誘発電位 (MEP) の変化を検証した。QPS による実験の結果、先行研究で示された促進・抑制の効果が想定通りに再現されることが確認され、この成果を論文として Brain Stimulation 誌に発表した (主な研究成果リスト、(1) 代表的な論文発表参照)。tSMS についても同様に実験を行い、刺激中に直下の脳領域で活動の抑制が起きている可能性が示唆された。

これらの実験結果を踏まえ、tSMS を用いて時間知覚の推定精度への影響について予備的検討を行った。その結果、下頭頂小葉および補足運動野を刺激した際に時間長の推定精度に変化が見られたことから、これらの脳領域への刺激がどちらも時間感覚に影響する可能性が示唆された (図3)。本研究成果についてはより大規模なサンプル数で引き続き詳細な検証を行っており、結果の再現性が確認されれば、国際学術誌に論文として投稿する予定である。

### 研究テーマ D「ウェアラブル触覚刺激デバイスによる主観的時間制御法の確立」

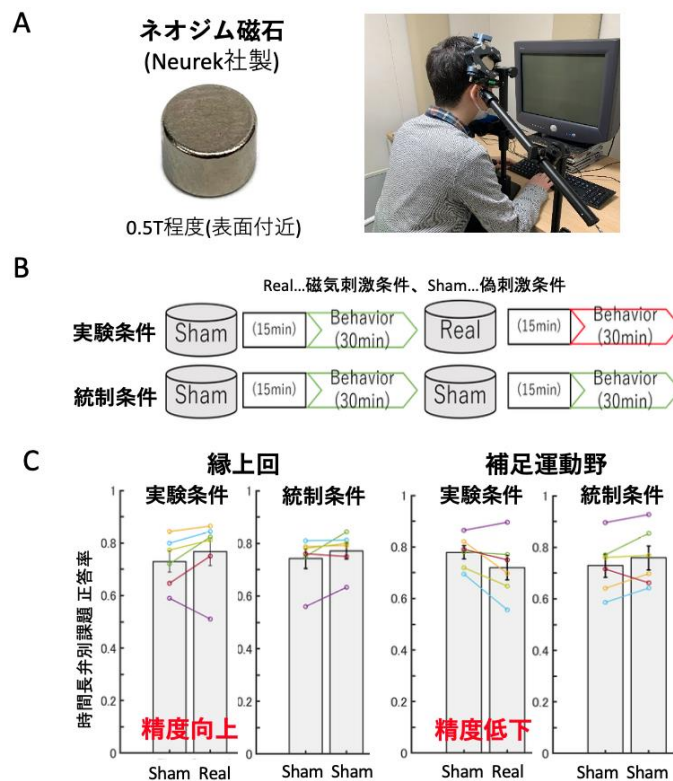


図3. tSMSによる時間感覚の変調。(A) 実験のセットアップ。(B) 実験は実験条件と統制条件を2日間に分けて実施された。(C) 線上回への tSMS 刺激は時間長の弁別成績を向上させた一方、補足運動野への刺激は弁別成績を低下させた。

ヒトの主観的時間経験は、様々な方法によって変化させることができる可能性があり、その有力な方法の一つが、刺激量による主観的時間の変調である。そこで我々は腕時計型ウェアラブルデバイスの触覚刺激を用いた主観的時間制御の変調効果を確認する実験を実施した(詳細非公開)。

### 3. 今後の展開

主観的時間制御の社会実装に向け、本研究成果を踏まえたさらなる研究の深堀りが必要である。研究テーマ A および B に関しては、主観的時間の神経メカニズムの一般性について、さらに異なる視点からの検証が必要である。特に、今回検証した主観的時間を司る神経メカニズムが、数百ミリ秒よりもより長い、数十分や数時間の主観的時間の神経メカニズムと同様であるのかを検証することは、主観的時間制御の適用範囲を広げるという意味でも非常に重要である。研究テーマ C については、現状では時間の弁別精度への影響を中心に研究が進められたが、これを主観的時間の短縮、伸長といったバイアスを変化させることも可能であるか、今後検討を重ねる必要がある。また、脳刺激の個人差も非常に大きいため、この問題を解決し個人ごとに刺激パラメータを最適化する手法の開発も重要である。研究テーマ D については、主観的時間を伸縮可能な刺激のさらなる探索が必要である。以上のように、本研究では多くの研究成果が得られたのと同時に、社会実装に向けたより多くの課題も見えてきたと言える。これらのハードルを克服し、可能などころから社会実装を進めるとしても、さらに 3~5年のスパンで研究の継続が必要であると考えられる。

### 4. 自己評価

本研究提案の達成状況として、まず学術的に重要な基礎的知見が多く得られたことについては想定以上の成果であったと考えている。特に研究テーマ A において発表した主観的時間の神経基盤の論文は、出版と同時に学術誌の広報からプレスリリースされ、研究内容が Nature 誌における Research Highlight として紹介された他、Reuters, Newsweek, Yahoo!news など、世界 17 カ国語、80 以上のメディアで広く報道され、注目を集めた(主な研究成果リスト(3)その他の成果参照)。また、学術論文の影響度を評価する指標である Altmetric では、注目スコア 500 を超えるスコアを獲得しており、過去に Altmetric で評価された 1600 万を超える論文のトップ 5%(99 パーセンタイル)の影響度と評価されており、本研究成果は学術的にも、社会的にも大きなインパクトがあったと言える。

最終的に社会実装を行うという目標には十分に届かなかったことは反省点であるが、野心的なテーマで取り組んだ結果として、社会実装に向けた多くの課題を発見できたことは収穫であったと考えている。研究の進め方としては、コロナ禍の影響が想像以上に大きく、十分に対応できなかったという点がやや悔やまれる。研究体制の構築としては、当初の予定では研究補助員を2名雇用する予定であったが、パンデミックにより人を対象とした実験をおこなうことが困難になることが多かったため、2人目の採用を長期間保留したことが結果的に研究の進捗にも影響を与えた点は否めない。また、予算の執行という点では、当初の想定よりも必要な研究機材の調達に時間がかかってしまった点も反省点である。これらの教訓は、今後の研究にも生かしていきたいと考えている。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:7件

1. Hayashi MJ, Ivry RB. Duration selectivity in right parietal cortex reflects the subjective experience of time. *Journal of Neuroscience*, 2020, 40(40): 7749-7758.

本研究では、下頭頂小葉が物理的時間長を表現しているのか、主観的時間を反映しているのかを明らかにするため、時間残効と呼ばれる時間の錯覚現象を用いて実験を行った。実験の結果、下頭頂小葉では、特定の時間長への順応により応答が減弱し、さらにこの抑制強度が、時間残効の強度を予測することが示された。この結果は、下頭頂小葉が主観的時間の神経基盤であることを強く示唆する結果である。

2. Kimura I, Ugawa Y, Hayashi MJ\*, Amano K\*. Quadripulse stimulation: A replication study with a newly developed stimulator. *Brain Stimulation*, 2022, 15(3): P579-581. \*Equal contribution.

本研究では近年開発された4連発磁気刺激(QPS)の効果を、第一次運動野へのQPS前後の運動誘発電位を計測することで検証した。その結果、QPS5と呼ばれるプロトコルを用いた場合は運動誘発電位の促進、QPS50を用いた場合は抑制が生じることが確認された。また、効果の大きさは古典的な刺激プロトコルに比べて個人差が小さく、効果の持続時間も従来の磁気刺激の手法よりも長いことが確認された。

3. Li L, Yotsumoto Y, Hayashi MJ. Temporal perceptual learning distinguishes between empty and filled intervals. *Scientific Reports*, 2022, 12, 9824.

本研究では継続時間と間隔時間では脳における「学習の効率」が異なる可能性があると考え、それを検証した。その結果、継続時間では学習による弁別閾値の変化がほぼ生じないのに対して、間隔時間の学習においては有意な閾値の低下が見られた。さらに間隔時間の学習効果は、持続時間の推定精度にも転移したことから、継続時間の学習には継続時間よりも間隔時間を用いる方が有効である可能性も示唆された。

### (2) 特許出願

研究期間全出願件数:0件(特許公開前のものも含む)

### (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)

#### 報道

Nature: Exhausted neurons help make time seem ... to ... drag

<https://www.nature.com/articles/d41586-020-02631-8>

Newsweek: Our Experience of Time Changes When Certain Brain Cells Get Tired, Scientists Believe

<https://www.newsweek.com/our-experience-time-changes-when-certain-brain-cells-get-tired-scientists-believe-1531743>

New Scientist: Our sense of time may be warped because parts of our brain get

tired

<https://www.newscientist.com/article/2254358-our-sense-of-time-may-be-warped-because-parts-of-our-brain-get-tired/>

日刊工業新聞：「心の時間」脳が錯覚

<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00596502>

Brain Facts.org: How the Brain Senses Time

<https://www.brainfacts.org/thinking-sensing-and-behaving/thinking-and-awareness/2022/how-the-brain-senses-time-032222>