

研究終了報告書

「脳状態を考慮した低負荷かつ効率的な情報提示デバイスの開発」

研究期間：2017年10月～2021年3月

(新型コロナウイルス感染症の影響を受け2021年9月まで延長)

研究者：天野 薫

1. 研究のねらい

バーチャル／オーグメンティッドリアリティ、ウェアラブルデバイスなど様々な情報インターフェイス技術が進展しているが、これらの情報を受け取るのはヒトの脳であり、脳の状態に合わせた情報インターフェイスを開発することでより効率的かつ負担の少ない情報提示が可能になると考えられる。研究代表者の研究から、従来積極的な機能を担っていないと考えられてきたアルファ波が視覚情報処理のタイミングを決める脳内クロックのような機能を果たしていることが明らかになってきた。この神経科学的知見に基づき、アルファ波の状態(周波数、位相、強度)を考慮して情報提示を行うことで、より効率的な情報伝達が可能になると考えられる。さらに研究代表者が世界に先駆けて開発したアルファ波の周波数を操作する技術を応用することで、情報を受け取るのに適切な脳の状態を導ける可能性も広がっている。

そこで本提案では、情報提示を脳状態に合わせるとともに、脳状態を情報提示に合わせることで、脳と情報デバイスが相互に寄り添い、低負荷かつ効率的な情報提示が可能なシステムの開発を目指す。システム構築のためまず初めに心理実験を行い、どのような脳活動が効率的な情報提示に最適であるかを解明する。ここでは、心理物理計測、脳機能計測と脳構造計測を結びつけ多角的な検討を行う。

情報提示をユーザーの脳状態に合わせるだけでなく、脳の状態をその時々で求められる状態に誘導することも有意義である。そこで脳の状態を変調することによって認知課題成績がどのように変化するかを明らかにする。例えば、集中力を高めて情報を記憶したい時、リラックスしたい時に、それぞれに適した脳の状態を導くことが考えられる。つまり情報端末が人の脳に合わせ、人の脳も必要に応じて情報端末に合わせる、という双方向的なシステムの開発を目指す。脳の状態を表す指標として、計測が容易でかつ、重要な機能を持っていると考えられるアルファ波を用いる。

最終的に、一連の実験によって得られた知見に基づき効率的かつ負担の少ない情報提示を行うためのシステムのプロトタイプ作成を目指す。特に脳波計や経頭蓋電流刺激装置は装着の手間等から日常的な利用には向かないと考えられるため、タブレットやスマホなどのスマート端末のみを使って脳の状態を計測したり変調したりする技術の検討を行う。

2. 研究成果

(1) 概要

脳と情報デバイスが相互に寄り添い、低負荷かつ効率的な情報提示が可能なシステムの開発の基盤となる脳科学の知見を得るため、ヒトの「知覚」を心理物理実験で、脳活動を MEG で、脳構造を MRI で計測し、知覚・認知機能と脳の間を多面的に検討した。「知覚」と「脳活動」、特に周期的な脳活動である脳律動の関係として、時間的に近接した二つのターゲット刺激(文字)を検出する課題を用いた行動実験および MEG 実験の結果から妨害刺激抑制の有無によって関与する脳律動の周波数がアルファ波からシータ波へ変化することが示された。また、視覚性短期記憶(visual short term memory or VSTM)課題の成績が、記憶対象の刺激が提示されるタイミングでの、ベータ波(15 Hz 程度)の位相に応じて大きく変化することを見いだした。この結果は、脳波をモニターしながら、ベータ波の適切な位相で画像を提示することで短期記憶成績を向上させられる可能性を示唆している。「脳活動」と「脳構造」の関係に関しては、アルファ波の周波数や視覚誘発反応潜時の個人差が視放線と呼ばれる白質線維の特性と関連することを示した。また、「知覚」と「脳構造」の関係に関して、立体視力の個人差が背側-腹側視覚領域間を白質線維の特性と関連することを見出した。

上記の研究では知覚と脳活動・脳構造の相関関係を検討したが、因果関係を調べるためには介入が必要となり、経頭蓋電気刺激が一つの有力な手法となるが効果の個人差が非常に大きい。この問題を解決すべく、電流刺激が脳内に作る電場の個人差を考慮したテーラーメイドの電気刺激法を開発し、効果のばらつきを軽減した。

続いて経頭蓋交流電気刺激を与えてアルファ波の周波数を変調させながら有効視野課題の課題成績を測定したところ、アルファ波の周波数を早くすると有効視野が広がり、周波数を遅くすると狭まる傾向が見いだされた。

最後に脳科学の知見を社会実装するため、ジター錯視と呼ばれる錯覚現象の見え方を計測することでアルファ波の周波数を計測するアプリを開発し検証実験を行った。その結果脳波計など専門的な装置を一切使うことなく、スマート端末だけを使ってアルファ波の周波数が測定できることを実証した。今後企業と連携しながら、日常的な脳の健康管理による QOL 向上等の社会実装を進めていく予定である。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け 6 ヶ月間研究期間を延長し、アプリのアップデートを行った。具体的には、ジター周波数の計測をスマートウォッチと連携させ、アルファ波と活動量、睡眠などとの関係を分析できるよう準備を整えた。さらに 20 名程度の被験者からデータを取得し、改善点の洗い出しを行った。

(2) 詳細

研究テーマ A「認知機能と脳活動の関係」

脳と情報デバイスが相互に寄り添い、低負荷かつ効率的な情報提示が可能なシステムの開発のための基礎的な知見を得るため、ヒトの「知覚」を心理実験で、「脳活動」を MEG で、「脳構造」を MRI で計測し、知覚・認知機能と脳の間を多面的に検討した。

まず「知覚」と「脳活動」の関係を検討した。一般に視覚情報処理には、シータ波(4-7 Hz)とアルファ波(8-13 Hz)という複数の帯域における神経律動が関与していることが知られてい

る。しかしこれらの律動周波数が何によって規定されているのかは明確になっていない。これらのリズムの機能の違いを検証するため、時間的に近接した二つのターゲット刺激(文字)を検出する課題の正答率の振動的な変化を検討した。実験1では2つの標的文字刺激のみを呈示し、実験2では2つの標的刺激の前後に妨害刺激を連続呈示することで、妨害刺激による干渉を生じさせた(図1)。両実験とも第1標的と第2標的の間隔を100ミリ秒から1000ミリ秒までの20ミリ秒刻みで設定し、実験参加者は両方の標的刺激を回答した。第2標的に対する正答率の標的間隔依存性を周波数分析した結果、実験1ではシータ波(3.6-4.7 Hz)での変動が観察された

一方、実験2では視覚情報の抑制に関わるとされるアルファ波に近い7.2-9.1 Hzでの変動が観察された。これらの結果から妨害刺激抑制の有無によって注意のサンプリング周波数が変化することが示された。時間的にビジーな画像とそうでない画像で注意のサンプリング周波数が変化するという本知見は、情報端末での情報提示頻度のデザインに応用可能である。

「知覚」と「脳活動」の関係の二つ目の検討として、視覚性短期記憶 (visual short term memory or VSTM) 課題の成績と神経律動の位相との関係を検討した。VSTM 課題では、まず画面のランダムな位置にランダムな色の正方形が1-8個提示される(サンプル刺激)。サンプル刺激が消えた後、サンプル刺激のいずれかの位置に正方形が提示されその色がサンプル刺激と一致しているかを回答する課題であり、短期記憶の容量を計測することが可能な課題である。この課題を行っている際の脳活動をMEGによって計測し、サンプル刺激が提示されるタイミングと記憶成績の関連を調べた。その結果、15Hz程度の神経律動であるベータ波の位相とサンプル刺激が提示されるタイミングの関係によって、正答率が大きく変化することを見いだした。この結果は、脳波をモニターしながら、ベータ波の適切な位相で画像を提示してやることで短期記憶成績が向上する可能性を示唆している。

続いて、「脳活動」と、それを生み出すハードウェアである「脳構造」の関係を検討した。アルファ波の周波数には8-13Hzの間で個人差があるが、網膜と視覚皮質の中間に位置する外側膝状体と視覚皮質を結ぶ、視放線と呼ばれる白質線維の特性がこの個人差と関連することを示した。また、チェッカーボードなどの単純な視覚刺激を与えた際の視覚誘発反応潜時の個

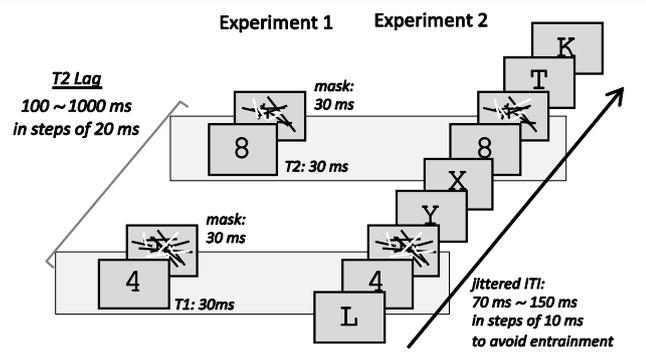


図1: 時間的に近接した二つのターゲットを検出する課題。ターゲットと無関係な妨害刺激がない条件(左)とある条件(右)を検討。

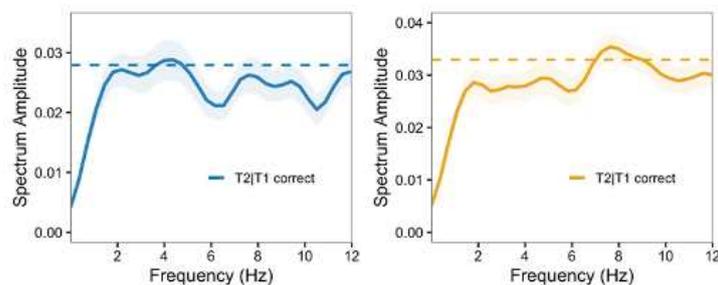


図2: 妨害刺激がない場合には(左)シータのリズムで、ある場合には(右)アルファのリズムで二つ目のターゲット刺激の検出成績が振動

人差の一部も視放線の特性によって説明できることが示された。また、「知覚」と「脳構造」の関係に関して、立体視力の個人差と対応した白質線維の解析から、奥行き知覚に背側-腹側視覚領域間の解剖学的結合が関連することを示した。これらの研究から一貫して、背側-腹側視覚領域間の情報伝達が、視知覚において重要な働きを果たしている可能性が示唆された。「脳活動」あるいは「知覚」と「脳構造」の関係に関するこれら一連の結果に基づき、将来的には脳構造の個人差を考慮した上で各人に最適な情報提示が実現されることが期待される。

研究テーマ B「脳活動変調技術の開発」

経頭蓋電気刺激(transcranial current stimulation or tACS)は効果的な非侵襲介入手法であり多くの基礎研究で利用されているが、効果の個人差が非常に大きいという問題がある。特に脳の解剖学的な構造の個人差(例えば頭蓋骨の厚み)などが個人差の大きな要因の一つと考えられる。この問題を解決すべく、テーラーメイドの電気刺激法を開発した。具体的には、SimNIBS と呼ばれるソフトを使って、経頭蓋電流刺激が作り出す脳内での電流分布を計算し、脳内での電流強度分布が等しくなるよう、流す電流強度を被験者によって調整した。その結果、頭皮電極から流す電流量を被験者間で一定にする従来手法に比べて、電流刺激の効果のばらつきが減少することが示された。経頭蓋電流刺激の社会実装には、効果のばらつき軽減が極めて重要であり、本技術によって応用展開の可能性が広がると考えられる。

研究テーマ C「脳活動の変調に伴う認知機能の変化」

視覚性短期記憶課題(visual short term memory or VSTM)や有効視野課題など認知課題の成績がアルファ波の周波数変調によりどのように変化するかを調べた。

有効視野とは画面の中央を中止して表示

される文字を検出しながら、周辺視野に提示されるフラッシュを検出する課題であり、運転中の視野の広さなどに対応する指標である。経頭蓋電流刺激を与えてアルファ波の周波数を変調させながら課題成績を測定したところ、アルファ波の周波数を早くすると有効視野が広がり、周波数を遅くすると狭まる傾向が見いだされた。

研究テーマ D「スマート端末への脳状態測定機能の実装」

ジター錯視と呼ばれる錯覚現象の見え方をスマートフォン、タブレット等で計測することで、アルファ波の周波数を求めるアプリを開発した。ジター錯視と呼ばれる錯覚は図3に示すように、黒色の背景を明るさの等しい赤と緑からなる図形が運動すると、実際には揺れていない赤と緑の

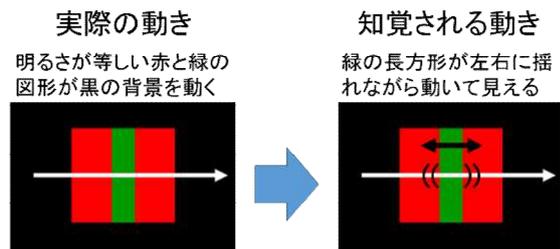


図 3:ジター錯視の刺激と知覚

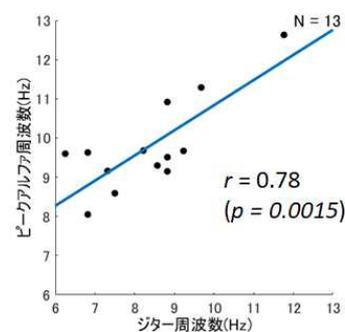


図 4:iPad で計測したジター錯視の周波数と脳波で計測したアルファ波の周波数が強く相関。

境界が揺れているように感じられるものである。このジター錯視が知覚される周波数がアルファ波の個人差および個人内変動と対応して変化することが示されているが(Minami & Amano 2017), この実験は統制された実験条件下での測定結果であり, 実世界でも同様の関係が成り立つかは自明でない。そこで, iOS/Android 用のジター周波数測定アプリを開発し, iPad を使って計測したジター周波数と, 実際に脳波計で同時計測したアルファ波の周波数の関係を調べる検証実験を行った。その結果, 両者は高い相関を示すことが示された(図4)。この結果から, スマホやタブレットのみを使って専門的な脳計測装置を一切使うことなく日常的にアルファ波の状態を計測できる可能性が示された。今後企業と連携しながら, 日常的な脳の健康管理による QOL 向上等の応用を進めていく予定である。

新型コロナウイルス感染症の影響を受け 6 ヶ月間研究期間を延長し, ジター周波数の計測をスマートウォッチと連携させ, アルファ波と活動量, 睡眠などの情報を取得するためのアップデートを行った。このアプリを使って 20 名程度の被験者からデータを取得し, 改善点の洗い出しを行った。その結果, ジター周波数の測定精度にばらつきが大きく, 活動量, 睡眠等他の指標との関係性を明らかにするには精度の向上が不可欠であることが明らかになった。このため, 測定の練習や, 測定前の輝度調整(輝度によって錯視がはっきり見えたり見えなかったりする)を行うことが必要と結論し, このためのアップデートを準備中である。

3. 今後の展開

経頭蓋電流刺激, 経頭蓋磁気刺激の与え方を被験者によって調整し, 刺激効果のばらつきを軽減するためのテーラーメイド刺激法を今後も引き続き検討していく。また, ジター錯視を使ったアルファ波計測技術の深化, 介入技術への応用を含む, 社会実装を進めていく。

4. 自己評価

脳科学の基礎研究として非常に大きな成果が得られたと考えられる。特にシータ波とアルファ波の機能差に関する研究は長年の論争に決着をつけるものである。それ以外にも立体視力と関連した白質線維に関する研究がPNAS誌に掲載されるなど, 神経科学系の論文を数多く出版することができた。技術の応用に関しては, ジター錯視を使ったアルファ波の測定に関する開発を最終年度に進め, パートナーとなる企業も見つかったところであるため, さきがけ研究終了後に飛躍的に発展していくことが期待される。スマート端末のみで脳の状態を計測できるという手軽さから社会実装の段階に入った際の爆発的な普及も見込める。

私自身は元々工学系出身ではあるが, 専門が脳科学であるため, 近年は脳科学, 心理学のコミュニティでの活動が中心となっていた。本領域において工学系の皆さんと交流できたのは非常に有意義であり, 数々の刺激やアイデアを得ることができた。具体的な共同研究も複数進めており, 領域メンバーとの今後の継続的な交流を期待している。

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. Oishi, H., Takemura, H., Aoki, C, S., Fujita, I., Amano, K. (2018): Microstructural properties of the vertical occipital fasciculus explain the variability in human stereoacuity, Proceedings of the National Academy of Sciences 115(48), 12289–12294.

立体視力, すなわちぎりぎり知覚することのできる奥行き大きさには, 大きな個人差があることが知られている. そのような個人差と対応した脳構造を明らかにするため, 心理実験によって立体視力を計測すると共に拡散強調 MRI および定量的 MRI を用いた脳構造の計測を行った. その結果, 腹側と背側の視覚経路を結ぶ白質線維 (VOF) の特性が立体視力と関連することが示され, これらの経路間での情報統合の重要性が示唆された.

2. Minami, S., Oishi, H., Takemura, H., Amano, K. : Inter-individual differences in occipital alpha oscillations correlate with white matter tissue properties of the optic radiation, eNeuro, 2020, 7(2).

多くの認知機能と関連するアルファ波の周波数には大きな個人差があることが知られている. そのような個人差と対応した脳構造の違いを明らかにするため, 脳磁計 (MEG) を用いたアルファ波周波数の計測と拡散強調 MRI を用いた脳構造の計測を行った. その結果外側膝状体 (LGN) と呼ばれる中継核と視覚皮質を結ぶ白質線維 (視放線) の構造特性がアルファ波の周波数と関連することを見いだした.

3. Takemura, H., Yuasa, K., Amano, K.: Predicting neural response latency of the human early visual cortex from MRI-Based tissue measurements of the optic radiation, 2020, eNeuro 7(4).

チェッカーボードなど単純な視覚刺激を提示した際の視覚誘発反応の潜時 (刺激を提示してから反応が生じるまでの時間) には個人差がある. そのような個人差と対応した脳構造の違いを明らかにするため, 脳磁計 (MEG) を用いた視覚誘発磁場の計測と拡散強調 MRI を用いた脳構造の計測を行った. その結果, 視放線の構造特性から視覚誘発反応の潜時の個人差の一部を予測できることを発見した.

(2) 特許出願

研究期間累積件数:0件

(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)

Amano, K. (2019): Non-invasive manipulation of human brain activities and its application, Applying Neuroscience to Business. (招待講演)

Amano, K. (2019): Illusory jitter perceived at the frequency of alpha oscillations, APCV2019 Symposium "Neural oscillations and behavioral oscillations". (招待講演)

大石浩輝, 竹村浩昌, 天野薫 (2020). 定量的 MRI を用いたヒト外側膝状体の大細胞層と小細胞層の同定, 日本視覚学会 2020 年冬季大会 (ベストプレゼンテーション賞)

川島朋也, 天野薫 (2019). 注意の瞬きに見られるリズム特性, 日本基礎心理学会第 38 回大会 (優秀発表賞.)

<https://www.nict.go.jp/press/2018/11/19-1.html> (プレスリリース)