

研究報告書

「MEGを用いた知覚における時間情報のデコーディング」

研究タイプ: 通常型

研究期間: 平成22年10月～平成26年3月

研究者: 天野 薫

1. 研究のねらい

人間は、視覚、聴覚、触覚など複数のモダリティから得られた情報を並列的に処理した後、同一のイベントに帰属する情報を感覚間で統合しているが、これは計算論的に容易な問題でない(バインディング問題)。異なる感覚に由来する信号の生じた時間を正確に推定し、同時か否かを判断することは、同一イベント内の情報統合において極めて重要となる。本研究提案では知覚における時間情報に着目し、MEG計測と計算モデルを組み合わせ、知覚に関わる時間の神経表現を解明する。

知覚に関わる時間には大きく分けて反応時間(reaction time: RT)に代表される「知覚に要する時間」と同時性知覚に代表される「時間に関する知覚」の2種類がある。前者は、被験者に刺激の出現に対してできるだけ早く反応するよう教示した際の、刺激が提示されてからボタンが押されるまでの時間として定義される。一方同時性知覚は、視覚刺激と聴覚刺激など二つのイベントを様々な時間差(Stimulus Onset Asynchrony: SOA)で提示し、被験者にこれらの刺激が同時と感じられたか否かを回答させることで計測する。コヒーレント運動刺激の開始に対する反応時間はコヒーレンスの低下に伴い増大する一方で、聴覚刺激と同時に感じるのに必要なSOAはコヒーレンスに依存しないことから、同時性知覚には知覚に要する時間とは異なる時間表象が用いられていることが示唆されるが、それらの神経機構についてはよく分かっていない。

そこで本研究ではまず各試行におけるRTあるいは同時性知覚を単一試行データから正確に推定するモデルを構築し、同時性比較のためのタイムマーカの神経機序を解明する。さらに、モデルの妥当性を検証するため、モデルの内部変数と同一のタイムコースを示す脳部位を探索する。また、複数の感覚入力のタイムマーカを比較している部位が、モダリティの組み合わせに関わらず一定であるかどうかを検討し、同時性知覚精度のモダリティ組み合わせ依存性の神経機序を明らかにする。単一試行MEGデータの解析にはノイズ低減が不可欠であるため、そのための手法も併せて開発する。

本研究ではこのように各感覚信号から時間情報(タイムマーカ)がどのように取り出されるか、またそのタイムマーカがどのように比較されるのかを検討することで、情報統合のための時間知覚メカニズムの包括的理解を目指す。

2. 研究成果

(1) 概要

視覚と聴覚など複数の感覚入力間のタイミングの知覚は、感覚情報の統合において最も重要な手がかりの一つであるが、その神経メカニズムはよく分かっていない。本研究では、脳磁計(MEG)を用いてタイムマーカがどのような神経信号に基づいているかを検討した。イベントの

タイミングの知覚は、刺激強度に対する依存性が小さいことが知られているため、刺激強度が徐々に変化する刺激を用いて、タイミング知覚の変動を確保した上で、それと 관련된脳活動を調べた。その結果、イベントの内容の知覚が生じるタイミング(検出潜時)、イベントのタイミング知覚のための時間信号(タイムマーカー)いずれも、感覚野における信号の時間積分に対する閾値検出機構によって説明出来、タイムマーカーの閾値は、検出潜時の閾値に比べて低いことが明らかになった。この結果は、刺激が知覚に上るより前の段階で、時間知覚のためのタイムマーカーが抽出されていることを示唆するものである。

感覚入力間のタイミング知覚の精度は、複数の周期的な感覚入力同期しているか否かの判断が可能な時間周波数限界によって定義できる。この周波数限界は、視覚-聴覚、視覚-触覚に比べて聴覚-触覚の組み合わせにおいて高いことが知られている。このメカニズムを探るため、同期、非同期刺激間の活動差を刺激の周波数を変えながら検討したところ、視覚を含むタイムマーカー比較には STS 野が関与している一方、聴覚-触覚の比較には hMT+野が関与しており、その時間周波数限界が高いことが示唆された。

MEG で計測した単一試行データに基づくデコーディングを行うには、ノイズ低減が必須となる。我々は、tSSS と呼ばれる方法を改良した cSSS 法を提案し、センサの種類や配置によらず高精度なノイズ低減が可能となることを明らかにした。

川人研究総括との共同研究により、fMRI decoded neurofeedback (DecNef) 法を用いて、V1/V2 の脳活動操作によって色知覚を作り出せることを明らかにした。本実験では、白黒の縦縞を提示している際の低次視覚野の脳活動を、赤と緑を区別する色デコーダーへ入力し、被験者に脳活動の赤らしさ(赤尤度)を丸のサイズでフィードバックした。被験者は丸のサイズを出来るだけ大きくするよう教示されたが、それがどのように計算されているかについては一切知らされておらず、丸のサイズのみを手がかりに探索的に脳活動操作法を見いだした。その結果被験者は、白黒縦縞に対する脳活動の赤らしさを増加させることが出来、その後の心理実験によって、縦縞は赤っぽく、横縞は緑っぽく知覚されるように変化したことが明らかになった。この結果から DecNef 法による低次視覚野の操作によって色知覚を生み出せることが明らかになった。

(2) 詳細

研究テーマ A「タイムマーカーの神経機構解明」

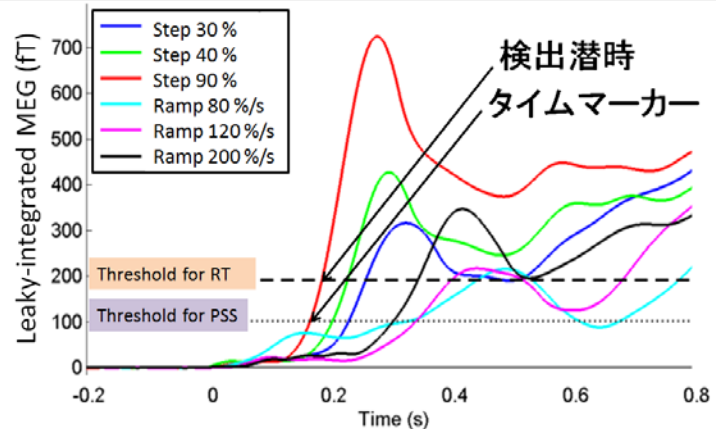
視覚と聴覚など複数の感覚入力間のタイミングの知覚は、感覚情報の統合において最も重要な手がかりの一つであるが、その神経メカニズムはよく分かっていない。本研究では、脳磁計(MEG)を用いてタイムマーカーがどのような神経信号に基づいているかを検討した。イベントのタイミングの知覚は、刺激強度に対する依存性が小さいことが知られているため、刺激強度が急激に変化する刺激(Step 刺激)と徐々に変化する刺激(Ramp 刺激)の双方を用いて、タイミング知覚の変動を確保した上で、反応時間および同時性知覚の変動と 관련된脳活動を調べた。その結果、イベントの内容の知覚が生じる時間(検出潜時)、同時性知覚のためのタイムマーカーいずれも、感覚野における信号の時間積分に対する閾値検出機構によって説明出来ることを明らかにした。また、同時性知覚のためのタイムマーカーの閾値は、検出潜時の閾値に

比べて低いことが明らかになった(右図)。この結果は、刺激が知覚に上るより前の段階で、時間知覚のためのタイムマーカーが抽出されていることを示唆するものである(論文4)。

研究テーマ B「タイムマーカーを比較する神経機構解明」

感覚入力間のタイミング比較の精度は、周期的な感覚入力同期しているか否かの判断が可能な時間周波数限界によって定義できる。この周波数限界は、視覚-聴覚、視覚-触覚に比べて聴覚-触覚の組み

合わせにおいて高いことが知られている。このメカニズムを探るため、同期、非同期刺激間の活動差を刺激の周波数を変えながら検討した。その結果、聴覚-触覚の組み合わせでは hMT+野が関与しており、その時間周波数限界が高いことが示唆された。



研究テーマ C「MEG ノイズリダクション法の開発」

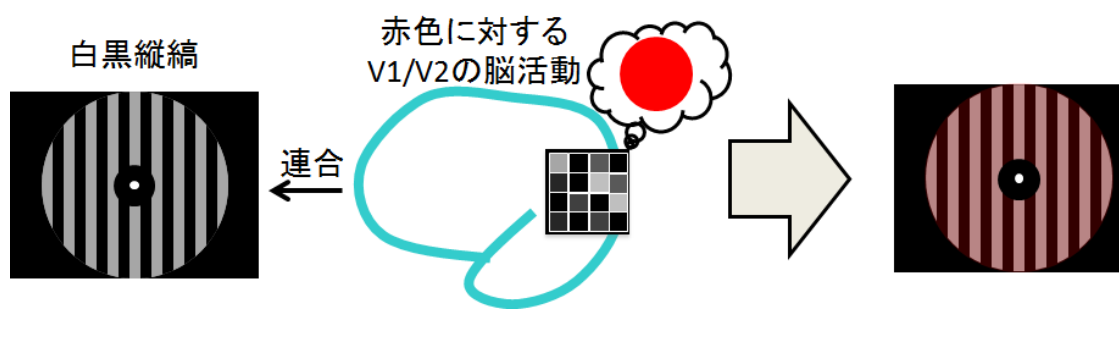
MEG 信号は S/N が低く、通常ノイズを減らすために100試行程度の加算が必要となる。しかしながら、デコーディングを行う場合には単一試行データに対する解析が必須であり、単一試行データから出来るだけノイズを減らすことが求められる。有力なノイズ低減法の一つに、Temporal Signal Space Separation(tSSS)と呼ばれる方法があるが、Neuromag 社の MEG データへの適用のみで、横河など他のシステムで計測したデータに対しても有効であるかは分かっていなかった。そこで、tSSS 法を横河社のセンサ配置を含むいくつかのセンサ配置に適用したところ、Neuromag 社のシステムが有する Magnetometer と呼ばれるセンサが存在しない場合には、tSSS 法がうまく動作しないことが明らかになった。その原因を理論的に考察した結果、信号とノイズを分離する際のクロストーク、すなわち信号の一部がノイズと判定されたり、ノイズの一部が信号と判定されたりすることが問題であることが明らかになった。この問題を解決するため、新たに Compensation Signal Space Separation (cSSS)という方法を提案し、Neuromag、横河を含む様々なシステムに対する有効性を示した(論文1, 2)。

研究テーマ D「DecNef 法を用いた色知覚の創成」

視覚的意識を生み出す神経基盤については数多くのイメージング研究、電気生理学的研究が行われているものの、相関関係を示すにとどまるものが多く、得られた活動が意識を生み出すための脳活動なのか、あるいは意識が生まれた結果生じる脳活動なのかはよく分かっていない。川人研究総括との共同研究により、fMRI decoded neurofeedback 法を用いて、V1/V2 の脳活動操作によって色知覚を作り出せることを明らかにした。

本実験では、V1/V2 の脳活動から、画像の色(赤か緑)を判別するデコーダーを作成した。続いて、白黒の縦縞を提示している際の脳活動を色デコーダーへ入力し、脳活動の赤らしさ(赤尤度)を丸のサイズで被験者にフィードバックした。被験者はフィードバックがどのように計算されているかについては一切知らされておらず、丸のサイズのみを手がかりに探索的に脳活動

操作法を見いだした。このニューロフィードバック実験を三日間行った結果、被験者は白黒縦縞に対する脳活動の赤らしさを増加させることが出来た。続いて、三日目のニューロフィードバックが終了した直後に二つの心理実験を行い色知覚の変化を検討した。一つ目の実験では白黒の縦縞、あるいは白黒の横縞を被験者に提示し、その縞が赤、緑、白黒のいずれに見えるかを三択で回答させた。その結果、インダクションを行っていない統制郡と比べて縦縞では赤の回答が横縞では緑の回答が有意に増大した。さらに色知覚の変化を定量化するため、二つ目の実験では縦縞、横縞に加えて斜め縞の色味を緑から赤まで徐々に変化させ、被験者にそれらの見えを赤、緑から二択で回答させることで、色の心理物理関数を各方位について測定した。その結果、縦縞は赤方向に、横縞は緑方向に心理物理関数がシフトしていることが明らかになった。これらの色知覚変化は3-5ヶ月後も持続することが明らかになった。これらの結果から、V1/V2の脳活動操作によって、色知覚を作りさせることを明らかにした。



3. 今後の展開

DecNef 法により色知覚を作り出すことに成功した。この方法をさらに発展させ、視覚的意識を生み出すのに必要十分な脳活動を明らかにしていく予定である。

4. 評価

(1) 自己評価

当初の計画とほぼ合致した研究成果が得られた。積分モデルの検証のための、積分信号と同一のタイムコースを示す部位の探索については、予備的なデータが得られているが、現在被験者を増やした検討を行っているところである。一方、川人研究総括との共同研究により、研究計画に含まれない DecNef 法を用いた研究でも成果を上げることが出来た。

(2) 研究総括評価(本研究課題について、研究期間中に実施された、年2回の領域会議での評価フィードバックを踏まえつつ、以下の通り、事後評価を行った)。

本研究課題では提案された研究課題は下記の通り、ほぼ完遂され、BMI の実用化の重要な基礎を与える成果が得られた。さらに、本研究提案を踏まえ、BMI の実用化についての見通しを得るための実験を行った。すなわち、fMRI decoded neurofeedback(DecNef) 法を用い、大脳視覚領(V1/V2)の活動を操作することによって色知覚を作り出せることを示した。これは、今後の非侵襲型 BMI の発展の核の1つとなる DecNef 技術の実用化に向けた成果の1つといえる。

研究内容は MEG 計測と計算モデルを組み合わせ、知覚に関わる神経表現を解明し、複数モデルから得られた感覚間の脳内統合機構を明らかにすることを試みた。脳のバインディング

問題の理解にもつながる重要な課題である。知覚に関わる時間要素、すなわち、反応時間／同時性知覚を推定するモデルを構築し、脳磁計(MEG)を用いて、同時性比較のためのタイムマーカーが基く神経信号を検討した。その結果、①イベント知覚が生じるタイミング(検出潜時)、およびイベントのタイミング知覚のための時間信号(タイムマーカー)が、ともに、脳の感覚野における信号の時間積分に対する閾値検出機構によって説明できること、②タイムマーカーの閾値は、検出潜時の閾値に比べて低いこと、すなわち、刺激が知覚に上るより前の段階で、時間知覚のためのタイムマーカーが抽出されていることを明らかにした。MEGによる検証では、①視覚を含むタイムマーカー比較には脳の STS 野が関与し、一方、②聴覚-触覚の比較には hMT+野が関与しており、その時間周波数限界が高いことを見出した。

これらの研究成果は本研究領域の一流国際誌 Journal of Neuroscience などに発表、積極的に国際学会で活躍し、情報統合のための時間知覚メカニズムの包括的理解に大きく寄与した。

5. 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|--|
| 1. Takemura, H., Ashida, H., Amano, K., Kitaoka, A., Murakami, I. (2012): Neural correlates of induced motion perception in the human brain, The Journal of Neuroscience 32(41), 14344-14354.1. |
| 2. Uno, Y., Amano, K., Takeda T. (2013): Development of a generative model of magnetoencephalography noise that enables brain signal extraction from single-epoch data, Medical & Biological Engineering & Computing 51(8):937-951. |
| 3. 栗木一郎, 天野薫 (2013). 脳活動計測を用いた視覚科学研究の動向, VISION, Vol. 25, No. 2, pp. 85-94. |
| 4. Amano, K., Qi, L. Takeda, T., Nishida S. (2013): Journal of Vision vol. 13 no. 9 article 620 |
| 5. Qi, L., Uno, Y. Takeda, T., Amano, K. (in press) Evaluation of spatio-temporal signal space separation of different magnetoencephalography systems and development of a compensation signal space separation, Journal of Neuroscience Methods |

(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)

1. 天野薫 (2013). 視知覚の神経相関から因果へ -MEG と fMRI を用いた検討-, 東京大学文学部心理学研究室セミナー(招待講演).
2. 天野薫 (2013). Decoded neurofeedback 法を用いた低次視覚野における連合学習-人工的な色と方位の共感覚-, 日本神経科学会ランチョンセミナー ニューロフィードバックの最先端(招待講演).
3. 天野薫 (2013). 脳活動イメージングによる視覚研究の基礎と最新の研究動向 -アルファ波の機能的意義- 日本視覚学会 2013 年冬季大会(招待講演)