

論文の内容の要旨

論文題目	脳磁場信号源推定を用いた高時空間分解能神経電流解析による脳内情報表現の研究
学位申請者	佐藤 匡

ヒトの脳は高速な視覚情報処理能力を持つ。これによって我々は時々刻々と変化する外界を認識し、状況に応じて適切に行動できる。ヒトの脳における高速な視覚情報処理のメカニズムには未だ不明な点が多く、神経科学の分野における重要な問いの一つである。ヒト脳における情報表現には脳活動のパターンが重要な役割を果たすことが知られており、その高速な情報処理のメカニズムを明らかにするためには、ヒト脳活動の詳細な空間パターンを高い時間分解能で解析することが重要である。しかし、現在の代表的な非侵襲的脳活動計測手法には、高時間分解能と高空間分解能を両立できるものは存在しない。こうした非侵襲的脳活動計測における技術的な限界の下で、高時間分解能と高空間分解能を両立して脳活動を解析する手法の一つが脳磁場信号に対応する皮質電流の推定（信号源推定）である。信号源推定によって得られた脳活動の空間パターンに対して脳情報デコーディングやrepresentational similarity analysis (RSA)に代表されるような多変量解析を適用することにより、高時空間分解能で脳活動に表現される情報を抽出することが可能となる。

しかし、脳磁場信号の信号源推定は原則として不良設定問題であり、皮質電流の空間パターンを完璧に復元することはできない。そのため、脳磁場信号の信号源推定は、その限界を熟知した上で用いる必要がある。先行研究における脳磁場信号の信号源推定の精度評価は、推定された信号源と原信号の信号源の位置ずれや、推定された電流値の信号源からの空間的な漏れに基づいて行われてきた。そのため、信号源推定を介しても信号源の空間的なパターンに表現されている情報が保存されるのかについては不明な点が多い。

こうした背景をもとに、本論文ではまず、ヒト脳における高速な視覚情報処理のメカニズムの一端を明らかにするべく、MEG信号の信号源推定結果に対して脳情報デコーディングを適用することによって物体カテゴリがヒト高次視覚野に表現される時刻を推定した。その結果、物体カテゴリがヒト高次視覚野に表現さ

れる時刻には物体カテゴリの抽象度間で有意差は無く、複数の抽象度の物体カテゴリが同時並列的に表現される可能性が示唆された。

次に、信号源推定と脳情報デコーディングを組み合わせた時に、信号源の空間的なパターンによって表現される情報が信号源推定を介しても保存されるのかを検証した。その結果、推定された皮質電流の空間パターンから実験条件を予測できたことから、信号源の空間的なパターンに表現されていた情報が信号源推定を介しても保存されることが確認できた。一方で、情報が定義されていなかった脳部位でも、実験条件の予測が可能であった。これは、MEG信号源推定によって情報を持っていた脳部位からそうでない脳部位へと情報が漏れ広がっていることを示しており、本論文ではこの現象を情報拡散と呼ぶこととした。

続けて、RSAを用いたシミュレーションによる検証を行った。その結果、脳情報デコーディングの時と同様に信号源の空間的なパターンに表現されていた情報の幾何学的関係性（表現幾何）は信号源推定を介しても保存されることが確認されたものの、その表現幾何は大脳皮質上の広い範囲へと漏れ広がってしまうことがわかった。脳情報デコーディングと同様に、本研究ではこれを表現幾何拡散と名付けた。

以上から、MEG信号源推定と多変量解析の組み合わせは、高時空間分解能で脳活動から情報を抽出するのに有効である一方、得られた結果を鵜呑みにしてしまうと、間違った科学的知見の主張につながる危険性があることが示された。MEG信号源推定と多変量解析による偽陽性的解釈を避け、より信頼度の高い知見が今後の脳機能研究において得られるよう、情報拡散の影響下における結果の解釈の注意点や、情報拡散の影響を抑制する方法について議論した。

これらの研究成果をまとめた博士論文の構成は、以下の通りである。

第1章では、本論文全体に関わる研究の背景、目的について述べた。

第2章では、ヒト視覚野における物体カテゴリ表現の時間特性について述べた。

第3章では、脳磁場信号源推定と脳情報デコーディングを組み合わせ、パターン判別分析の観点から脳磁場信号源推定を評価した。

第4章では、脳磁場信号源推定とRSAを組み合わせ、表現幾何の観点から脳磁場信号源推定を評価した。

第5章では、第2章から第4章で得られた結果についてまとめ、考察した。また、今後の脳機能研究の発展のため、情報拡散の影響下における脳活動解析の注意点、情報拡散の回避策について議論した。

論文審査の結果の要旨

学位申請者氏名	佐藤 匡
審査委員主査	宮脇 陽一
委員	横井 浩史
委員	長井 隆行
委員	阪口 豊
委員	佐藤 俊治
委員	庄野 逸
委員	

ヒトの脳は高速な視覚情報処理能力を持つ。これによって我々は時々刻々と変化する外界を認識し、状況に応じて適切に行動できる。ヒトの脳における高速な視覚情報処理のメカニズムには未だ不明な点が多く、神経科学の分野における重要な問いの一つである。ヒト脳における情報表現には脳活動のパターンが重要な役割を果たすことが知られており、その高速な情報処理のメカニズムを明らかにするためには、ヒト脳活動の詳細な空間パターンを高い時間分解能で解析することが重要である。しかし、現在の代表的な非侵襲的脳活動計測手法には、高時間分解能と高空間分解能を両立できるものは存在しない。こうした非侵襲的脳活動計測における技術的な限界の下で、高時間分解能と高空間分解能を両立して脳活動を解析する手法の一つが脳磁場信号に対応する皮質電流の推定（信号源推定）である。信号源推定によって得られた脳活動の空間パターンに対して脳情報デコーディングやrepresentational similarity analysis (RSA)に代表されるような多変量解析を適用することにより、高時空間分解能で脳活動に表現される情報を抽出することが可能となる。

しかし、脳磁場信号の信号源推定は原則として不良設定問題であり、皮質電流の空間パターンを完璧に復元することはできない。そのため、脳磁場信号の信号源推定は、その限界を熟知した上で用いる必要がある。先行研究における脳磁場信号の信号源推定の精度評価は、推定された信号源と原信号の信号源の位置ずれや、推定された電流値の信号源からの空間的な漏れに基づいて行われてきた。そのため、信号源推定を介しても信号源の空間的なパターンに表現されている情報が保存されるのかについては不明な点が多い。

こうした背景をもとに、本論文ではまず、ヒト脳における高速な視覚情報処理のメカニズムの一端を明らかにするべく、MEG信号の信号源推定結果に対して脳情報

デコーディングを適用することによって物体カテゴリがヒト高次視覚野に表現される時刻を推定した。その結果、物体カテゴリがヒト高次視覚野に表現される時刻には物体カテゴリの抽象度間で有意差は無く、複数の抽象度の物体カテゴリが同時並列的に表現される可能性が示唆された。

次に、信号源推定と脳情報デコーディングを組み合わせた時に、信号源の空間的なパターンによって表現される情報が信号源推定を介しても保存されるのかを検証した。その結果、推定された皮質電流の空間パターンから実験条件を予測できたことから、信号源の空間的なパターンに表現されていた情報が信号源推定を介しても保存されることが確認できた。一方で、情報が定義されていなかった脳部位でも、実験条件の予測が可能であった。これは、MEG信号源推定によって情報を持っていた脳部位からそうでない脳部位へと情報が漏れ広がっていることを示しており、本論文ではこの現象を情報拡散と呼ぶこととした。

続けて、RSAを用いたシミュレーションによる検証を行った。その結果、脳情報デコーディングの時と同様に信号源の空間的なパターンに表現されていた情報の幾何学的関係性（表現幾何）は信号源推定を介しても保存されることが確認されたものの、その表現幾何は大脳皮質上の広い範囲へと漏れ広がってしまうことがわかった。脳情報デコーディングと同様に、本研究ではこれを表現幾何拡散と名付けた。

以上から、MEG信号源推定と多変量解析の組み合わせは、高時空間分解能で脳活動から情報を抽出するのに有効である一方、得られた結果を鵜呑みにしてしまうと、間違った科学的知見の主張につながる危険性があることが示された。MEG信号源推定と多変量解析による偽陽性的解釈を避け、より信頼度の高い知見が今後の脳機能研究において得られるよう、情報拡散の影響下における結果の解釈の注意点や、情報拡散の影響を抑制する方法について議論した。

これらの研究成果をまとめた博士論文の構成は、以下の通りである。

第1章では、本論文全体に関わる研究の背景、目的について述べた。

第2章では、ヒト視覚野における物体カテゴリ表現の時間特性について述べた。

第3章では、脳磁場信号源推定と脳情報デコーディングを組み合わせ、パターン判別分析の観点から脳磁場信号源推定を評価した。

第4章では、脳磁場信号源推定とRSAを組み合わせ、表現幾何の観点から脳磁場信号源推定を評価した。

第5章では、第2章から第4章で得られた結果についてまとめ、考察した。また、今後の脳機能研究の発展のため、情報拡散の影響下における脳活動解析の注意点、情報拡散の回避策について議論した。

以上のように、本論文は、ヒト脳の高速な情報処理メカニズムの解明にむけ、その実データ解析から新しい仮説を導くとともに、その手法的限界を決めるうえで極めて重要な情報拡散現象を発見し、その普遍性を示すに至った。これらの結果は、近年注目を集めているMEG信号源解析と多変量解析の適用可能範囲を明確にすることにより、ヒト脳の高速な情報処理メカニズムの解明研究を促進する大きな一歩となるものである。その新規性、独創性、有用性は、神経科学分野のみならず、計測工学、統計的信号処理、画像処理、生体工学などの多岐の分野において大なる学際的貢献を与えるものと期待される。

よって、本論文は博士（学術）の学位論文として十分な価値を有するものと認める。