

# 作業記憶を実現する脳内メカニズムに関する研究

Brain mechanisms for working memory using electroencephalogram cortical currents



森重 健一 (Ken-ichi Morishige, Ph. D.)  
富山県立大学 工学部 知能ロボット工学科 講師  
(Associate Professor, Department of Intelligent Robotics,  
Toyama Prefectural University)  
電子情報通信学会 日本神経科学学会 日本神経回路学会 Society for  
Neuroscience

受賞：3rd Japan-China-Korea Joint Workshop on Robotics Best presentation award (2008年) 日本神経回路学会 最優秀研究賞(2018年)

研究専門分野：計算論的神経科学 生体情報工学

## あらまし

我々は数字や記号などを一時的に記憶することができるが、記憶した情報が脳内でどのように符号化され、そして保持されているか、未だ十分に明らかになっていない。本研究では脳波・脳磁図逆問題解法を用いて、作業記憶課題遂行中の脳波データから大脳皮質表面とアーチファクト源の電流を同時に推定し、アーチファクトの影響を分離した脳電流を得た。電流レベルでの解析を行ったところ、作業記憶の負荷に応じて、脳電流の振幅、ベータ帯域、およびガンマ帯域で有意差がみられた。さらに、スパース性に基づく推定方法を用いることで、作業記憶の実現に関係のある皮質領域に絞り込んでその関係を調べたところ、推定電流の振幅、ベータ帯域、およびガンマ帯域のパワーに関するダイポールが特徴量として選ばれた。これらの結果から、記憶の符号化や保持に関する表現はベータおよびガンマ帯域のスペクトル特徴および持続的なニューロン活動の両方が寄与している可能性を示す。

## 1. 研究の目的

脳波\*1に含まれる脳活動を反映した信号はノイズに比べて極めて小さく、計測したデータから精度よく脳

情報を解読することは困難だった。近年私たちは、脳波および脳磁図逆問題解法を用いることで計測データを大脳皮質と複数のノイズ源の電流に同時に変換し、ノイズによる歪みのない脳電流を抽出する方法を見出した [1]。この結果をもとに、ノイズに乱されたデータであっても、高い推定精度で脳情報を解読できることを示した [2]。本研究では、ノイズに乱された脳波データから、作業記憶の内容や負荷によって変化する脳内電流や複数の周期的な脳活動パターンを調べ、作業記憶に関する脳内表現を明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究の背景

ヒトは数字や記号などを一時的に記憶する（作業記憶）ことができるが、記憶した情報が脳内でどのように符号化され、そして保持されているか、いまだ明らかではない。

作業記憶を実現する具体的な脳領域として、前頭前野 (prefrontal cortex) と前部帯状回皮質 (anterior cingulate cortex) が主な役割を果たしていることが、機能的磁気共鳴画像 (fMRI) を用いたヒトの研究で示されてきた。fMRI を用いることで、作業記憶に関係のある複数の脳領域を特定したり、領域と領域の機能的なつながり方を空間的に詳しく調べたりできるが、測定原理のせいで時間解像度が低く (2.5 秒に 1 回程度の撮像)、時々刻々と変化する脳活動を十分に調べることはできなかった。

時間解像度の高い測定方法の一つとして脳波と脳磁図が挙げられる。大脳皮質の錐体細胞の活動に伴って電場に変化が生じ、それが脳脊髄液、頭蓋骨を介して、頭皮表面で電位の変化が生じる。このような多数の錐体細胞が同期して生じる電場変化の総和が、脳活動を反映した脳波の主な成分として観測される。また、錐体細胞が活動する際に頭部周辺で微弱な磁場が生じるが、それを記録したものが脳磁図である。脳波および脳磁図を用いた研究から、保持している記憶内容や負荷によって周期的な脳活動の成分が変化することが知られている (6 Hz や 10 Hz、25 Hz、40 Hz の周期的な脳活動成分)。しかし脳波は、頭皮表面に取り付けた電極間の距離が 3 cm 程度と大きく、空間解像度が低

# 作業記憶を実現する脳内メカニズムに関する研究

## Brain mechanisms for working memory using electroencephalogram cortical currents

くることが避けられない。また、脳の神経細胞の活動に伴って生じる電場の変化は、脳脊髄液、頭蓋骨、頭皮と伝わり、頭皮表面で計測されるが、それぞれの層で導電率が異なっているため、脳活動に伴って生じる電場は頭皮表面で計測される際に大きく減衰している。そのため、空間解像度が低く、これまでは脳領域ごとに高い解像度で調べることが困難だった。脳磁図は、電場と異なり、脳脊髄液や頭蓋骨、頭皮での減衰がないため、脳波に比べて有利で正確な計測方法である。しかし、より高い空間解像度での計測が望まれている。

実際に観測される脳波データには脳活動に起因する信号だけでなく、眼球運動や心拍といった複数のアーチファクト源に起因する電場や磁場も含まれている。また、作業記憶課題の場合、記憶すべき数字や記号を実験参加者の目の前に配置したモニタに呈示するため、その呈示の毎に目がキョロキョロ動いてしまうため、脳波・脳磁図データに含まれる脳活動成分と相関のある眼球ノイズが発生する。主成分分析や独立成分分析といった既存のノイズ除去手法の場合、それらを統計的に同一の成分とみなしてしまうため、両者をうまく分離できなかった。

### 3. 研究の方法

我々は観測した脳波データから、その逆順をたどり、その主な源である大脳皮質表面とアーチファクト源の電流を同時に推定し、実際に計測した脳波データからアーチファクトの影響を分離することで脳活動由来の信号を抽出する手法を開発した(図1) [1,4-5]。階層ベイズ推定<sup>\*2</sup>で適切な事前情報を設定することで、大脳皮質表面の電流とアーチファクト成分をより良く推定できるようになった。

大脳皮質の錐体細胞の活動を表現するために、大脳皮質表面に格子点状に電流源を配置し、モデル化している。その数は約 10,000 点であり、膨大な数である(図2)。その中から、作業記憶を実現することに関わりの強い電流源のみを抽出するために、スパース性に基づく推定を行なった。大量のデータの中から、作業記憶課題に関連の強いものだけを残し、他は回帰係数をスパース化して推定する方法である。このことで、

推定した様々な脳領域の脳電流の中から、作業記憶にとって真に重要な脳電流だけに絞り込み、電流強度のパターンやスペクトル特徴のパターンを識別できるようになった [6]。

これら2つの手法を組み合わせることで、アーチファクトの影響を分離して、作業記憶に関係のある脳領域から作業記憶内容を予測できるため、それらの脳領域がどんな脳内表現を行なっているかを客観的に調べることができる。

記憶内容を符号化し、一時的に保持する機能を実現する脳内メカニズムを説明する仮説として、単純な持続的なニューロンの発火パターンなのか、周期的パターンなのか、という2種類がある [7-8]。仮にニューロンの持続的な発火パターンで記憶保持が実現されているならば、大脳皮質表面に配置した電流源ごとの推定電流の強度に違いがあるはずである。仮に周期的パターンで実現されているならば、推定電流のスペクトル特徴を用いることで予測できるはずである。

そこで、作業記憶課題の違いに応じて、推定電流の大きさに違いがあるか調べてみたところ、違いがみられ、その差は作業記憶の負荷が高いほど大きかった。また、スペクトル特徴を用いたところ、ベータ波 (13~30 Hz の成分) およびガンマ波 (30 Hz 以上の成分) の周波数帯域において、作業記憶に関係のある複数の皮質領域で変動がみられた。

試行データを学習とテストに分け、推定された脳電流およびスペクトル特徴を用いて、スパース性に基づく推定法を用いて作業記憶課題の識別を行なったところ、推定電流の大きさとスペクトルの両方が識別のための特徴量として選ばれていた。

結論としては、記憶の符号化や保持に関する表現はベータおよびガンマ帯域のスペクトル特徴および持続的なニューロン活動の両方が寄与している可能性が示唆される。

# 作業記憶を実現する脳内メカニズムに関する研究

Brain mechanisms for working memory using electroencephalogram cortical currents

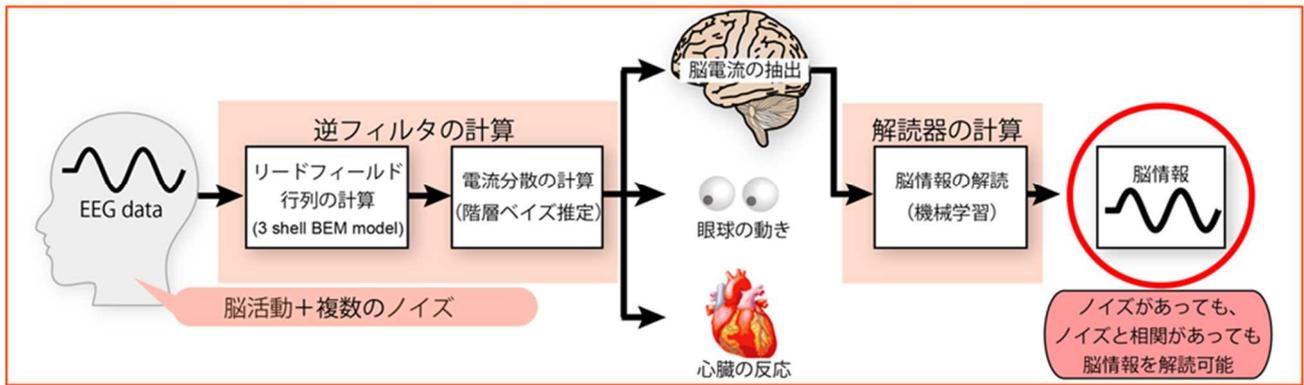


図1 本研究で用いた脳電流推定方法および脳情報解読方法の概略図

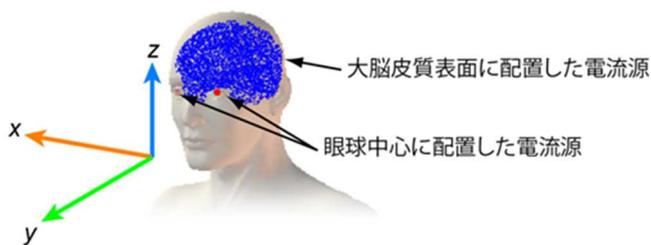


図2 大脳皮質表面およびアーチファクト源に配置した電流源の場所。青い点は大脳皮質表面、赤い点は眼球中心に配置した電流源を表す。

## 4. 将来展望

本研究では、ノイズに乱された脳波データから、のは逆問題解法を用いて、作業記憶課題遂行中の脳波データから大脳皮質表面とアーチファクト源の電流を同時に推定し、アーチファクトの影響を分離した脳電流を得た。さらに、電流レベルでの解析を行ったところ、作業記憶の負荷に応じて、脳電流の振幅、ベータ帯域、およびガンマ帯域で変動があることを示した。さらに、スパース性に基づく推定方法を用いることで、作業記憶の実現に関係のある皮質領域に絞り込んでその関係を調べたところ、推定電流の振幅、ベータ帯域、およびガンマ帯域のパワーに関する電流源が特徴量として選ばれた。これらの結果から、記憶の符号化や保持に

関する表現はベータおよびガンマ帯域のスペクトル特徴および持続的なニューロン活動の両方が寄与している可能性が示唆される。

今後は、我々が用いた研究手法をさらに発展させ、作業記憶課題遂行中の脳内電流と周期的な脳活動の成分を特徴量として記憶内容を識別することで、作業記憶を実現する脳内メカニズムを明らかにすることを考えている。また、作業記憶の内容を脳内電流から解読できるならば、実験参加者の脳活動を理想的な(実験課題を達成できるような)パターンに近づくように誘導することで、記憶に関する認知機能を向上させたり、その逆ができると期待される。トレーニングを通じて脳活動のパターンの操作を促すことで脳機能を向上させることにチャレンジしていきたい。

## 用語解説

- \*1 大脳皮質の錐体細胞の活動に伴って電場に変化が生じ、それが脳脊髄液、頭蓋骨を介して、頭皮表面で電位の変化が生じる。このような多数の錐体細胞が同期して生じる電場変化の総和のことを脳波といい、主に脳活動を反映した成分として観測される。
- \*2 脳波センサで観測された頭皮表面の電場から大脳皮質表面に配置したダイポールの電流強度を推定する問題は、観測変数に対して未知変数が多いため、

# 作業記憶を実現する脳内メカニズムに関する研究

## Brain mechanisms for working memory using electroencephalogram cortical currents

不良設定性を持つ。この不良設定問題である脳波逆問題を解くためには、電流強度に対する何らかの拘束条件が必要である。本研究では、ベイズ推定の枠組みに基づいて電流強度に対する事前分布として与える方法を用い、特に fMRI データを階層的な事前分布として緩やかな拘束条件として用いている。

### 参考文献

- [1] K-I. Morishige, T. Yoshioka, D. Kawawaki, N. Hiroe, MA. Sato, and M. Kawato, “Estimation of hyper-parameters for a hierarchical model of combined cortical and extra-brain current sources in the MEG inverse problem,” *Neuroimage*, 101, pp. 320–336, (2014).
- [2] K-I. Morishige, N. Hiroe, MA. Sato, and M. Kawato, “Common cortical areas have different neural mechanisms for covert and overt visual pursuits,” *Sci. Rep.* 11:13933, (2021).
- [3] S. Yoshiiwa, H. Takano, K. Ido, M. Kawato and K-I. Morishige, “Group analysis and classification of working memory task conditions using electroencephalogram cortical currents during an n-back task,” *Front. Neurosci.* 17:1222749, (2023).
- [4] MA. Sato, T. Yoshioka, S. Kajihara, K. Toyama, N. Goda, K. Doya and M. Kawato, “Hierarchical Bayesian estimation for MEG inverse problem,” *Neuroimage* 23, pp.806–826.
- [5] T. Yoshioka, K. Toyama, M. Kawato, O. Yamashita, S. Nishina, N. Yamagishi, MA. Sato, “Evaluation of hierarchical Bayesian method through Retinotopic brain activities reconstruction from fMRI and MEG signals,” *Neuroimage* 42, pp.1397–1413, (2008).
- [6] O. Yamashita, M. A. Sato, T. Yoshioka, F. Tong, and Y. Kamitani, “Sparse estimation automatically selects voxels relevant for the decoding of fMRI activity patterns,” *Neuroimage* 42, pp.1414–1429, (2008).
- [7] M. D’Esposito and B. R. Postle, “The cognitive

neuroscience of working memory,” *Annu. Rev. Psychol.* 66, pp.115–142, (2015).

- [8] C. Constantinidis and T. Klingberg, “The neuroscience of working memory capacity and training,” *Nature Review Neurosci.* 17(7), pp.438–49, (2016).

この研究は、令和30年度SCAT研究助成の対象として採用され、令和元～3年度に実施されたものです。