

珠算熟達者の記憶課題における 全脳の神経ネットワークの解明

江部 正周

慶應義塾大学大学院 政策・メディア研究科

青山 敦

慶應義塾大学 環境情報学部

今井 むつみ

慶應義塾大学 環境情報学部

珠算(そろばん)の熟達者は、10桁以上もの数の正確な記憶や暗算など、数的処理に特異的な能力を持つ。fMRIでの研究では珠算熟達者は上頭頂小葉など空間系の脳領域に特異的な活動が見られることが示されたが、それらの領域間の神経ネットワークについては明らかにされていない。本研究では、珠算熟達群(珠算の有段者13名)、対照群(珠算未経験者13名)を対象として、数字と文字と空間配置の記憶課題時の脳波を計測した。その結果、珠算熟達群の数字の記憶の条件での記憶できた桁数が有意に多く、その際の1秒未満の潜時の全脳における位相同期による神経ネットワークで、前頭領域から後頭領域にかけてのグローバルな神経ネットワークが見られた。これらの結果より、珠算熟達者の数字における特異的な記憶力は、早い潜時におけるグローバルな神経ネットワークが基盤になっていることが明らかになった。

Keywords: 珠算, 熟達化, 位相同期, 脳波

問題・目的

珠算(そろばん)の熟達者は、そろばんを物理的に操作することに熟達しているだけでなく、「心的そろばん(mental abacus)」と呼ばれるそろばんのイメージを操作することによって、10桁以上の数字を記憶し、逆からも変わらない速度で読み上げられるなど、数的処理に特異的な能力を持つことが知られている(Hatano and Osawa, 1983)。この「心的そろばん」を支持するようにfMRIでの脳機能計測の研究では、そろばんの未経験は数を記憶する際にブローカ野など言語系の脳領域が活動するのに対し、珠算熟達者は上頭頂小葉などの空間系の脳領域が活動することが明らかにされた(Hanakawa et al., 2003)。しかしながら、これらの研究は珠算熟達者に特異的な脳活動部位を明らかにしたものの、それらの領域間の神経ネットワークは明らかにされていない。

本研究では、ワーキングメモリや脳の領域間の神経ネットワークの基盤となることが示されている θ 波帯域(4-7Hz)の位相同期(phase synchronization)を指標に、珠算熟達者と対照者の数の記憶の神経基盤について明らかにすることを目的とした。

方法

実験協力者

珠算熟達者群13名(男性10名, 平均年齢 24.1 ± 7.3 歳)、対照群13名(男性10名, 平均年齢 21.1 ± 1.7 歳)が本研究に参加した。熟達者群は全国珠算教育連盟の暗算の段位が平均8段(10段6名, 9段3名)である。全員右利き, 色

覚特性などなく健康で, SFC実験・調査倫理委員会の定めた手順に従い参加の同意を得た。

刺激と手順

実験刺激は数字(1-9のアラビア数字)・文字(アルファベットの大文字)・空間配置(Xをランダムに配置)の3種類からなり, すべての課題を同一視野角度の格子状の四角形内に配置し, 視覚的に均一になるようにした。

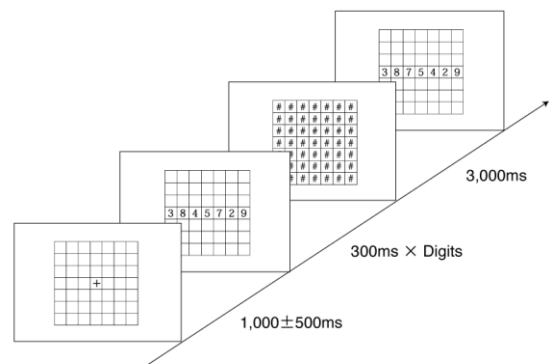


図1. 数字条件の実験刺激. 実験環境では黒背景に灰色字。

手順は図1に示した通り, 注視点の後, 桁数 $\times 300$ msのターゲット刺激を呈示し, $3,000$ msすべてのマス目を#で塗りつぶしマスクしている間, ターゲット刺激を覚えてもらい, 最後に同じ桁数の刺激が始めに呈示されたターゲット刺激と同一であるかをマウスのボタン押しで回答してもらった。なお, ボタン押しに速度は求めず, なるべく正確に回答してもらった。

これらの課題を1ブロック10回として、数・文字・空間配置の課題をランダムな順番に1ブロックずつ計30回呈示した。そして短い休憩をはさみ、これを合計3回行い、数・文字・空間配置の課題をそれぞれ10×3回行った。また、桁数は事前に記憶できる最大桁数を調べた。

脳波計測

脳波計測には64チャンネルの独Brain Products社製 actiCHamp(アクティブチャンネルアンプ)を使用した。

解析

下処理として1Hzのハイパスフィルターと、眼電に相関する独立成分のみを除外した。Vinck et al. (2011) によって示された位相同期の指標である Weighted Phase Lag Index によって、領域間のネットワークを形成すると言われる θ 波(4-7Hz)帯域のベースラインと比較して有意な神経ネットワークを見た。

結果

行動実験

事前に行った各実験協力者の記憶課題における最高桁数の条件ごとの成績を図2に示す。記憶課題時の最高桁数を数字、文字、空間の3条件について、それぞれ熟達者と対照者の2群でウィルコクソンの順位和検定をかけ、FDR で多重比較補正した。その結果、数字条件では熟達者の最高桁数が有意に高く ($p < .01$)、文字条件、空間条件については有意ではなかった ($p > .05$)。

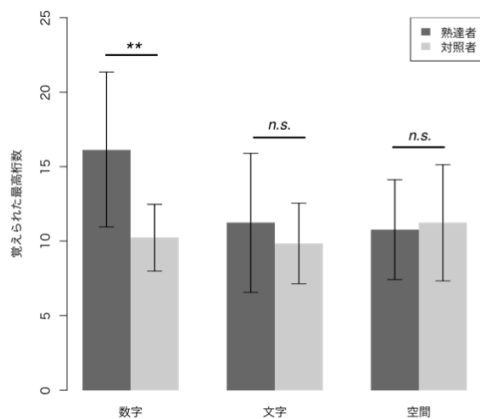


図2. 数字・文字・空間条件での覚えられた群ごとの最高桁数。

位相同期による神経ネットワーク

行動実験で有意な差が見られた数字条件において、ベースラインと有意な位相同期による神経ネットワークを図3に示す。珠算熟達者は200-400msの潜時で前頭領域から後頭領域における位相同期による神経ネットワークが見られるのに対して、対照者はこのような広範な位相同期による神経ネットワークは見られない。

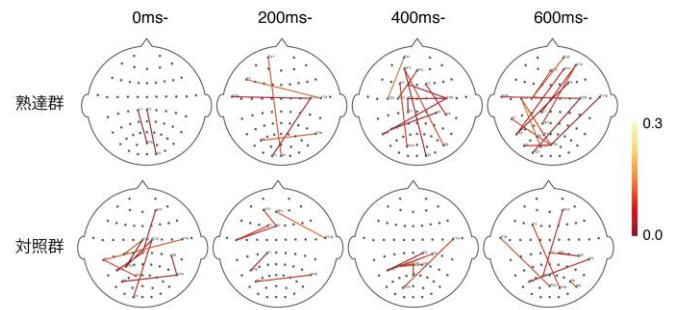


図3. 数字条件における200msごとの位相同期ネットワーク

考察

Hatano and Osawa (1983) の先行研究と一致して、本研究においても数字条件のみで特異な行動実験の結果が見られたことは、本研究の実験手順の妥当性を示している。

位相同期による神経ネットワークでは、ワーキングメモリの中央実行系を担う前頭領域と、低次の情報を処理する後頭領域とのグローバルな位相同期による神経ネットワークが見られることは、大きな桁数を記憶する際に、入力された情報を効率的に処理する神経ネットワークが形成されていると考えられる。

結論

これらの結果により、珠算熟達者の数的処理における特異的な記憶・操作能力は、中央実行系を司る前頭から、低次の情報を処理する後頭領域への神経ネットワークが形成されていることによるものであることが明らかになった。

本研究は、珠算熟達者における神経ネットワークを明らかにした初めての研究である。

引用文献

- Freunberger, R., Werkle-Bergner, M., Griesmayr, B., Lindenberger, U., and Klimesch, W. (2011). Brain oscillatory correlates of working memory constraints. *Brain research*, 1375:93–102.
- Hanakawa, T., Honda, M., Okada, T., Fukuyama, H., and Shibasaki, H. (2003). Neural correlates underlying mental calculation in abacus experts: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage*, 19(2):296–307.
- Hatano, G. and Osawa, K. (1983). Digit memory of grand experts in abacus-derived mental calculation. *Cognition*, 15(1-3):95–110.
- Vinck, M., Oostenveld, R., van Wingerden, M., Battaglia, F., and Pennartz, C. M. (2011). An improved index of phase-synchronization for electrophysiological data in the presence of volume-conduction, noise and sample-size bias. *Neuroimage*, 55(4):1548–1565.