

2024年2月29日発行
九州産業大学『基礎教育センター研究紀要』第14号 別刷

視覚的認知に伴うヒト脳波の局所結合性と時空間変動

基礎教育センター准教授
猪本 修

【研究ノート】

視覚的認知に伴うヒト脳波の局所結合性と時空間変動

猪 本 修

I. はじめに

哺乳動物の皮質機能、とりわけ知覚と認知に関連する神経活動の同期性が近年着目されている。皮質ニューロン群の集団的挙動は、脳波あるいは局所場電位の位相同期によって特徴づけられる。本研究で著者は、ヒト視覚認知プロセスに付随する頭皮上脳波の位相ダイナミクスに関して、その時空間的な揺らぎを定量化する新たな指標を提案した。すなわち、ヒト視覚処理系に図形刺激を与えると過渡的な位相引き込みが広汎な皮質領野にわたって現れるが、特にアルファ帯域律動に着目して、非局所的な皮質領野の位相同期率の時空間分布を用いて引き込みパターン相似度を定義し、その時間変動を解析した。その結果、脳波の引き込みには顕著な空間特異性があり、前頭葉に局在するアルファ律動の皮質間位相同期が特徴づけられた。これにより、従来の事象関連電位等の局所同期ではわからなかった認知機能と皮質同期の関連性をより明確に示すことができた。

II. 皮質活動の局所結合性

ヒトをはじめとする哺乳動物の知覚や認知に関わる機能発現には、皮質領野間の協調的な神経活動が重要である。これは認知課題を遂行する過程で、関連するニューロン群が一過的にリンクして広汎な神経集合体を形成し、同期的に活動することで、認知機能を統合的に発現するためであると考えられている¹⁻⁴⁾。

こうした皮質の同期的活動は頭皮上脳波により観察することができ、シータからガンマに至る広い周波数帯域での事象関連変動がこれまでに検討されてきた⁵⁻¹⁰⁾。

脳波の位相同期の様態は、着目する皮質領野によって次の3つに分類される。すなわち、(1)一つの皮質領野内でのニューロン群の局所的な同期¹¹⁻¹⁴⁾、(2)異なるいくつかの皮質領野間での非局所的な同期^{15,16)}、そして(3)半球を超えた皮質領野間での同期である⁵⁾。ここで第1の局所的な同期については、事象関連電位あるいは特定周波数成分のパワーの増減によりその部位のニューロン群の同期が推定されるもので、事象関連同期（あるいは脱同期）と呼ばれている

る¹⁷⁻¹⁹⁾。一方で第2と第3の空間的に離れた部位間の非局所同期については、事象関連コヒーレンス解析法によるコヒーレンス値や^{6,20,21)}、位相同期率 (phase-locking value または PLV) が同期性の指標としてよく用いられる²²⁻²⁴⁾。

いずれにしても、これまで一般的な研究手法であった、局所同期に関する事象関連電位や事象関連同期は、限られた皮質部位のニューロン群の時間的挙動しか分からず、離れた皮質領野にわたる空間的関連性については知ることができない。しかしながら脳波と認知機能の関連性を明らかにするためには、いずれの皮質領野間でいかなる情報伝達が行われているのかを定量的に明らかにすることが重要である。

脳波と認知機能の関連性を心理物理学的に調べるためには非線形動力学、とりわけ位相ダイナミクスの手法が有効である。その典型例として光駆動反応におけるアルファ帯域律動の引き込みがある。すなわち周期変動する光源を外部刺激として照射すると脳波が影響を受けるが、その刺激が特にアルファ帯域律動の周波数と調和関係にあるときは、本来の律動が抑制されて光刺激に引き込まれる。この現象を光駆動反応と呼ぶが、これは後頭葉の視覚領野を構成するニューロン集団すなわち結合振動子の引き込み現象として理解できることが明らかになった²⁵⁻³⁰⁾。位相ダイナミクスはこうした比較的単純な刺激に対する応答ばかりでなく、空間認知や動体認知といったより複雑な系にも適用されつつある。

そこで著者は、脳波の位相引き込みの局所性だけでなく空間的な偏りとその時間発展に着目し、引き込みパターン相似度という新しい尺度を定義することによって全頭皮上の引き込みダイナミクスの空間的特異性を指標化し、認知を引き込みパターンとして捉えることが有効であることを報告する。

Ⅲ. 解析方法

本研究では主としてアルファ帯域振動の位相ダイナミクスに着目した。疑似周波数9.67 (Hz) に対する電極部位間の位相差を求めた。刺激時刻を基準 ($t=0$) としたとき、時刻 t における k 回目の試行に対する部位 m, n 間の位相差 $\Delta \theta_{m,n}^k(t)$ を偏角としノルム 1 の単位ベクトル $\exp(i\Delta \theta_{m,n}^k(t))$ を考える。総試行回数 K に対するベクトルの平均を求めると、そのノルムは、時刻 t における位相同期率 $PLV_{m,n}(t)$ と定義される。すなわち、

$$PLV_{m,n}(t) = \frac{1}{K} \left| \sum_{k=1}^K \exp(i\Delta \theta_{m,n}^k(t)) \right| \quad \dots \dots (1)$$

と書くことができる。次にこの位相同期率に対して、引き込み指標 $E_{m,n}(t)$ を

$$E_{m,n}(t) = \sigma(\text{PLV}_{m,n}(t) - \text{PLV}_{\text{th}}) \quad \dots \dots (2)$$

とする。ここで $\sigma(a)$ は、

$$\sigma(a) = \begin{cases} 0, & a < 0 \\ 1, & a \geq 0 \end{cases}$$

となるステップ関数であり、 PLV_{th} は引き込みの閾値である。さらにこのインデックス $E_{m,n}(t)$ を用いて、対象とするチャンネル数 N に対して、引き込みパターン相類似度 $S(t)$ を

$$S(t) \equiv 1 - \frac{1}{N \binom{N-1}{2}} \sum_{m=1}^{N-1} \sum_{n>m}^N |E_{m,n}(t) - E_{m,n}(t_0)| \quad \dots \dots (3)$$

と定義する。これは初期状態 ($t=t_0$) を 1 とし、引き込みパターンの揺らぎによって $[0, 1]$ のあいだの値をとる変数である。この足し合わせを全チャンネルまたは前頭野、後頭野内のチャンネルに対して実行し、引き込みパターンの相類似度を計算した。

IV. 実験方法

健康かつ神経性疾患の既往歴が無いペイドボランティア 25 名（男性 10 名、女性 15 名、ただし全員が日本人）が被験者として実験に参加した。被験者の年齢層は 20～36 歳であった。被験者の視力は裸眼または矯正により 1.0～1.5 とした。なお本研究はヘルシンキ宣言に則り、研究を実施した九州大学の倫理規定に基づいて、各被験者のインフォームド・コンセントを文書で得た上で行われた。

被験者は磁気シールドルーム内に設置したリクライニングシートにリラックスした状態で液晶ディスプレイに面して着座して表示される図形刺激をみつめた。ディスプレイの特性はサイズ 17 インチ、最大輝度 400 cd/m^2 、応答速度 5ms であった。被験者とモニタとの距離は約 80 cm で、図形の方角は約 10 度であった。市販のソフトウェア SuperLab Pro 4.0 (Cedrus Inc., U.S.) により提示される図形は正面の人物顔写真をグレースケールに変換した画像であり、被験者にとって身近でない日本人男女各 50 名の写真をランダムな順序でそれぞれ 3 回ずつ提示した。ただし図形の提示時間は 1.0s で、刺激間隔を 0.5s とした。

刺激に対する生理的応答は頭皮上脳波により計測された。脳波プローブは国際 10-20 電極法に従って頭皮上の 19 点に均等間隔で取り付け、左右の耳朶をそれぞれ左右半球上の各部位に対する基準電極とした。また中心線上の電極 Fz, Cz, Pz については左耳朶を基準電極とした。プローブからの信号は分解能 16 ビットの A/D コンバータ EEG-1000 Neurofax (Nihon Kohden,

Japan) によってサンプリングレート 500 Hz で標本化され、記録された。

時系列データはオフラインで解析した。すなわち、1.6 (Hz) のローカットフィルタと 60 (Hz) のノッチフィルタをかけてから複素ウェーブレット変換を施し、4 (Hz) から 50 (Hz) までの疑似周波数に対する複素振幅を計算した。これらの信号処理は EEG Focus 2.0 (MEGIS Software GmbH, Germany) および MATLAB 7.0 (The MathWorks, Inc., U.S.) を用いて行った。なお瞬目に伴うアーティファクトは除外した。

V. 結果および考察

まず図形提示による脳波の応答を、各周波数成分に対する振幅と位相により調べた。図形刺激を提示すると、約 110ms を頂点潜時とする特徴的な事象関連電位成分 (N100) が中心溝から後頭葉および側頭葉にかけて現れた (図 1)。刺激提示後には直ぐにアルファからガンマ帯域にわたる周波数成分のパワーが増大した。この傾向はすべての被験者が示したが、これらのうち一人の被験者に対してそのアルファ帯域成分に着目すると、この位相引き込みは前頭葉の皮質領野間で顕著であった。

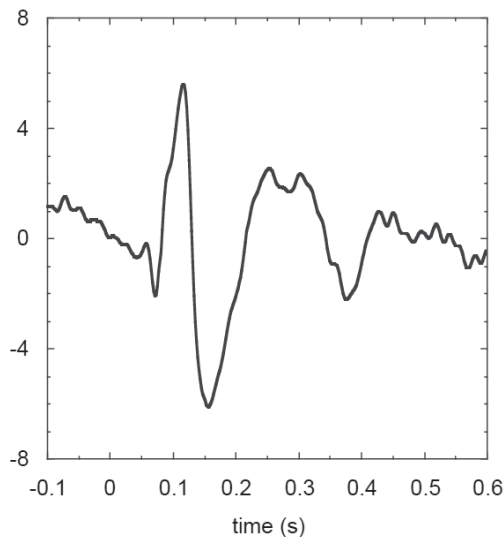


図 1 視覚刺激に対する事象関連電位 (部位 Cz)。100 回の測定に対する平均値を示す。110ms における陰性電位成分 (N100) が反応の主要成分として特徴づけられる。

次に、アルファ帯域律動に限定して、前頭葉のチャンネル間位相差に着目し、その統計的振舞いを調べた。同一の被験者に対して、試行回数 300 回分に対する部位 F3-F4 間の位相同期率の時間発展を図 2 に示す。基礎律動 (無刺激時) に対する平均的な PLV は常に 0.5 に満たない

が、図形刺激の提示直後からPLVが上昇し、110ms後に0.8程度となり最大となった。その後ただちにPLVが減少し、初めの状態に戻った。こうしたPLVの一過的上昇は前頭葉で顕著であった。これらの特徴はすべての被験者に同様に観察された。

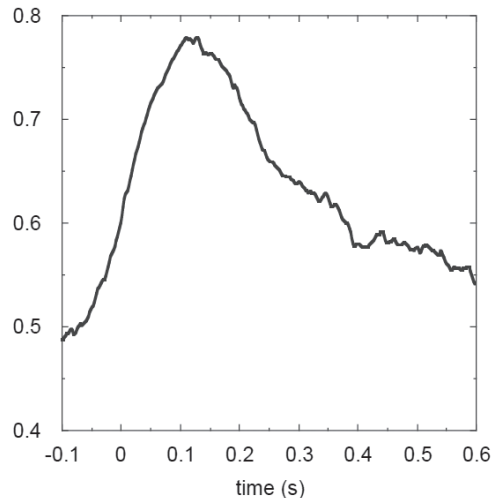


図2 部位F3/F4のPLVの時間変化。刺激に応じてPLVが一過的に上昇する。

そこで位相引き込みの時空間的な偏りを明らかにするために、位相同期率0.55を引き込みの閾値 PLV_{th} として、 $PLV_{m,n}(t) > PLV_{th}$ となる部位間に線分を与え、位相引き込みの空間的な偏りを可視化した。典型的な挙動を図3に示す。この図に示すマップは頭部を模したもので、図の上方が前頭部、左が左半球にあたる。19点のドットは測定チャンネルを表す。この表示法により、刺激提示時刻の200ms前から、刺激後800msまでの引き込みパターンを20ms毎に表示している。この図から、引き込みパターンは刺激提示の直後から徐々に脳波の位相引き込みを示すチャンネルの組み合わせ数が増加し、刺激提示後200msまで続き、その後徐々に脱引き込みが起こって300ms程度で初めの状態に戻った。引き込みは特に前頭葉で顕著であり、引き込みの変化は中心溝より前方に属するチャンネル間に集中して現れた。後頭葉ではPLVがほとんど変化しなかった。

さらに、PLVの空間パターンの時間発展を定量的に評価するために、式(3)に従って刺激提示時刻を基準としたときの引き込みパターン相似度 S の時間変化を解析した。全部位にわたって引き込みパターン相似度を評価すると、刺激直後から低下し、刺激後200msで極小値となり、その後緩やかに回復した(図4(a))。また、図4(b)のように引き込み相似度を前部(f/c)と後部(p/o)に分けて計算すると、相似度の低下はf/cのみに現れ、p/oでは殆んど変化しなかった。すなわち、位相引き込みパターンの特徴は前頭葉に偏在することが分かった。

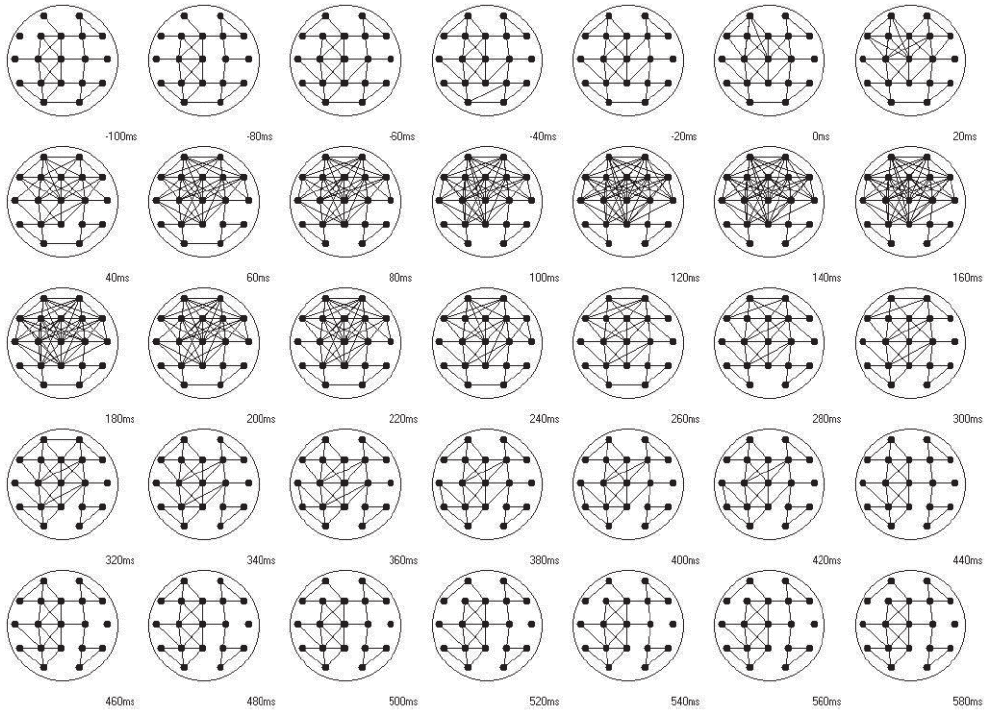


図3 引き込みパターンの時間変化。刺激の100ms前から580ms後まで20ms間隔でパターンの変動を示す。PLVが0.55を超えた部位間に線分を与えている。

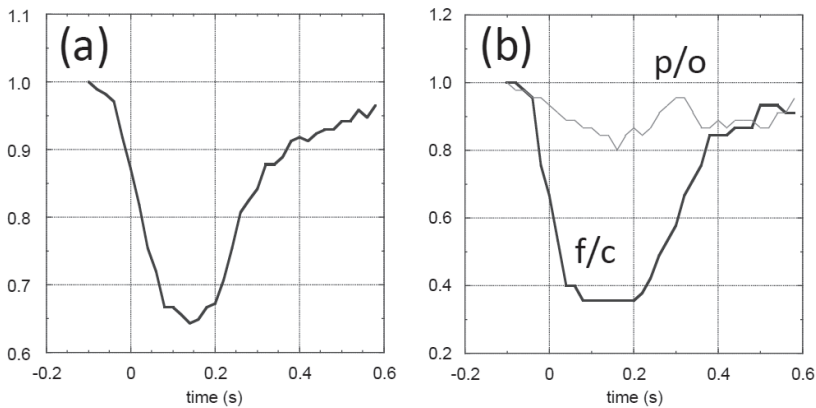


図4 引き込みパターン相似度の時間変化。(a) 全部位にわたって計算した相似度。(b) 前部 (f/c) と後部 (p/o) に分けて求めた相似度。

このように、今回新たに提案した引き込みパターン相似度の採用によって、脳波の位同期の時空間特性を数値化して特徴づけることができた。引き込みパターン相似度が最も低下するのは刺激提示後100から200msのあいだであり、この反応時間は局所同期の指標である事象関連電位の頂点潜時とほぼ一致する。したがって事象関連電位によって示される特定の皮質領野の同期は、広い領野にまたがっており、中心溝より前方の皮質で広く同期が生じていたことが

わかる。すなわち刺激提示後の知覚処理が前頭葉の広汎な領野の相互作用によって行われており、領野間の活動の時空間相関が一連の皮質機能に対して重要であると推測される。

VI. 結論

ヒトの知覚や認知において、皮質領野内および皮質領野間の機能的結びつきは重要である。今回著者は、頭皮上脳波によって広汎な領野における位相引き込みを調べた。その時空間特性を定量的に議論するために引き込みパターン相似度を定義した。その結果、脳波の引き込みには顕著な空間特異性があり、認知の際にはこの領野間の脳波の引き込み現象が定量的に計測され、機能的結合が重要であることが示された。すなわち、ここで提案した手法を使用することによって、従来の局所同期法（誘発電位や事象関連電位・事象関連同期）に比べ、皮質同期の時空間パターンの結合性が定量的に評価できることが分かった。今後は顔・図形以外のいくつかの異なる認知課題に対して引き込みパターン相似度を比較し、認知機能と脳波引き込みの時空間パターンとの関係をより定量的に結びつけることが必要である。

参考文献

- 1) P. M. Milner, *Psychol. Rev.* **81** (1974) 521-525.
- 2) S. L. Bressler, *Brain Res. Rev.* **20** (1995) 288-304.
- 3) S. Weiss and H. M. Mueller, *Brain Lang.* **85** (2003) 325-343.
- 4) J. L. Cantero and M. Atienza, *Rev. Neurosci.* **16** (2005) 69-83.
- 5) A. K. Engel *et al.*, *Science* **252** (1991) 1177-1179.
- 6) L. Leocani *et al.*, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* **104** (1997) 199-206.
- 7) C. M. Gray *et al.*, *Nature* **338** (1989) 334-337.
- 8) C. M. Gray and W. Singer, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **86** (1989) 1698-1702.
- 9) C. Babiloni *et al.*, *Behav. Neurosci.* **118** (2004) 687-697.
- 10) P. R. Roelfsema *et al.*, *Nature* **385** (1997) 157-161.
- 11) G. Pfurtscheller and A. Aranibar, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* **42** (1977) 817-826.
- 12) G. Pfurtscheller and C. Andrew, *J. Clin. Neurophysiol.* **16** (1999) 512-519.
- 13) C. M. Gomez *et al.*, *Acta Neurobiol. Exp.* **64** (2004) 143-151.
- 14) W. Klimesch *et al.*, *Int. J. Psychophysiol.* **24** (1996) 47-60.
- 15) R. Eckhorn *et al.*, *Soc. Neurosci. Abst.* **19** (1993) 1574.
- 16) V. N. Murthy and E. E. Fetz, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **89** (1992) 5670-5674.
- 17) J. B. Earle, *Neuropsychobiol.* **20** (1988) 95-112.
- 18) G. Pfurtscheller, *Brain Topograph.* **2** (1989) 3-8.
- 19) G. Pfurtscheller and F. H. Lopes da Silva, *Clin. Neurophysiol.* **110** (1999) 1842-1857.
- 20) C. Andrew and G. Pfurtscheller, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* **98** (1996) 144-148.
- 21) J. Classen *et al.*, *J. Neurophysiol.* **79** (1998) 1567-1573.

- ²²⁾ W. J. Freeman, *Chaos* **13** (2003) 1067-1077.
- ²³⁾ J. Lachaux *et al.*, *Hum. Brain Mapp.* **8** (1999) 194.
- ²⁴⁾ M. Le Van Quyen *et al.*, *J. Neurosci. Methods* **111** (2001) 83-98.
- ²⁵⁾ K. Fujii *et al.*, *Forma* **15** (2000) 219-225.
- ²⁶⁾ H. Fukuda *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **72** (2003) 487-490.
- ²⁷⁾ K. Harada *et al.*, *Sci. Form* **3** (1988) 113-120.
- ²⁸⁾ K. Harada *et al.*, *IEICE Trans. E* **74** (1991) 1486-1490.
- ²⁹⁾ T. Mori and S. Kai, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 218101.
- ³⁰⁾ T. Mori and S. Kai, *Int. J. Bifur. Chaos* **12** (2002) 2631-2639.