

脳波と視運動性眼振の同時計測に基づく両眼視野闘争 における内因的知覚交替に関する研究

赤松 功一郎[†] 夏川 浩明^{†‡} 藤原 悠平[†] 小林 哲生[†]

[†] 京都大学大学院工学研究科 〒615-8510 京都府京都市西京区京都大学桂

[‡] 日本学術振興会 〒102-8471 東京都千代田区一番六番地

E-mail: [†] akamatsu@bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 左右の眼に異なる競合する視覚刺激が独立に呈示されたとき、自らの意志に関わりなく交互に知覚される現象を両眼視野闘争という。この現象に対して数多くの研究がなされてきたが、脳内においていつ、どこで、どのような処理が行われているかは現在でも解明されていない。本研究では、両眼視野闘争を引き起こすため左右眼に対してそれぞれ独立に反対方向にドリフト運動する6本の縦縞刺激を呈示した場合と、左右眼に対して融合して知覚される同方向にドリフト運動する縦縞刺激を呈示した場合の脳波を視運動性眼振と同時計測し、視運動性眼振から競合・融合刺激観察時の緩徐相における眼球運動方向の切り替わり時刻を決定し、その時刻を基準に事象関連電位と事象関連同期・脱同期の解析を行った。その結果、 α 波帯(8—13Hz)の事象関連同期・脱同期において、知覚交替前-500—-300msにかけて前頭、頭頂の主に右半球で競合刺激観察時と融合刺激観察時で特に大きな減衰が見られた。

キーワード 両眼視野闘争, 知覚交替, 視運動性眼振, 事象関連電位, 事象関連同期・脱同期

A study on intrinsic perceptual alternation during binocular rivalry by simultaneous measurements of EEG and optokinetic nystagmus

Koichiro AKAMATSU[†] Hiroaki NATSUKAWA^{†‡} Yuhei FUJIWARA[†] and Tetsuo KOBAYASHI[†]

[†] Graduate School of Engineering, Kyoto University Kyoto-Daigaku-Katsura, Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8510 Japan

[‡] Japan Society for the Promotion of Science, 1-6 Chiyoda-ku, Tokyo, 102-8471 Japan

E-mail: [†] akamatsu@bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Binocular rivalry is a phenomenon in which the perception alternates when two dissimilar images are independently presented to two eyes. Although a lot of previous studies on this phenomenon have done, it is still not revealed on the issue of when and where rivalry occurs in the brain. In this study, we used competitive moving stimuli in which six stripes drifting to opposite or the same directions in order to investigate the brain activities when subjects observed the competitive or its control cooperative stimuli drifting same direction. We measured EEGs and analyzed event-related potentials (ERPs) and event-related synchronizations (ERSs) / desynchronizations (ERDs) for competitive and cooperative stimuli triggered by the change of the direction of optokinetic nystagmus. As a result, significant differences in ERSs/ERDs at alpha band (8-13Hz) were observed in the frontal and parietal regions, particularly in the right hemisphere, at 500 ~ 300ms before perceptual alternation.

Keyword binocular rivalry (BR), perceptual alternation, optokinetic nystagmus (OKN), event-related potentials(ERPs), event-related synchronizations / desynchronizations (ERSs / ERDs)

1. はじめに

左右の眼に異なる競合する視覚刺激が独立に呈示された場合、交互に知覚されるという現象が起きる。

これを両眼視野闘争(binocular rivalry, 以下BR)という。BRでは、両眼の網膜に対して視覚刺激を与え続けているにも拘らず、どちらか一方の刺激しか知覚されず、

もう一方の刺激は意識される段階に登らない。この現象を明らかにすることは、視覚的アウェアネスや意識の脳内機構を解明するにあたって有用であると考えられており、これまで BR に関する多くの研究が行われてきた。

BR に関連する脳神経活動部位に関しては、サルに対して侵襲的に行われた研究がある[1]。しかし、近年では非侵襲的に脳活動を計測する技術が進歩し、fMRI を用いて BR に関わる脳活動部位を特定する研究[2][3]や、脳波を用いた研究が行われてきた[4][5]。しかし、これらの研究で用いられる視覚刺激は左右眼に対して色の異なる刺激を与えるものや、競合刺激が現れた直後の潜時を検討しているものが多く、同じ刺激を用いて知覚交替前後の脳神経活動を捉えることに着目した研究は少ない。

ここで、知覚交替前後の脳神経活動を捉えるには知覚交替潜時を抽出する必要がある。従来の研究においては、被験者自身に知覚交替をボタン押しによって報告してもらい、知覚交替潜時を取得するというものが主であった[4]。しかし、BR において知覚交替が不随意的に起きることや、ボタン押しが被験者の主観的な報告であることを考慮に入れると、より客観的に知覚交替を抽出することが望ましい。一つの方法として運動刺激を用いて眼球運動の変化を計測することにより、左右眼からの刺激のどちらを知覚しているかを客観的に判定することが可能であることが報告されている[6][7]。

本研究では、左右眼に呈示する視覚刺激として互いに反対方向にドリフト運動する刺激を用いることで、視運動性眼振(optokinetic nystagmus, 以下 OKN)を引き起こし、BR における内因的知覚交替に関わる脳神経活動について調べた。このような BR を引き起こす競合運動刺激観察時における内因的知覚交替に対して、両眼に同方向にドリフト運動する融合刺激を用いて外因的知覚交替を発生させるという実験も行い、両者の事象関連電位(event-related potentials, 以下 ERP)及び事象関連同期・脱同期(event-related synchronizations / desynchronizations, 以下 ERS / ERD)解析の結果を比較検討した。

2. 方法

2.1. 被験者

実験には、正常な視力を有する 21 歳から 26 歳までの健常成人男性 5 名が参加した。被験者には事前に実験内容についての説明を行い、参加する同意を得た。

2.2. 視覚刺激

画面解像度 1440×900 pixel のディスプレイの黒の

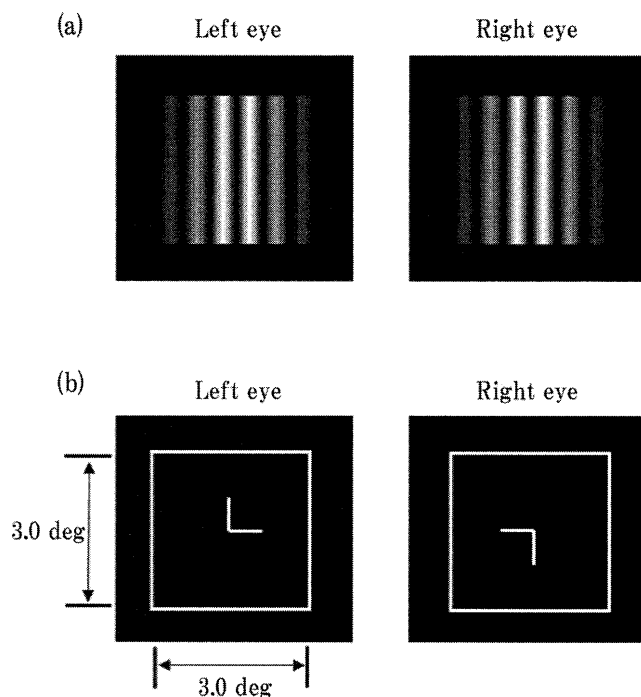


図 1 (a)実験に使用した視覚刺激. (b)視覚刺激の位置合わせに用いた輪郭。

背景に、大きさ 3.0 deg×3.0 deg、空間周波数 2 cpd の 6 本の縦縞図形を左右に作成し、水平方向に 3.1 deg/s の速さでドリフト運動させた。図 1(a)に実験で用いた視覚刺激図形を示す。本実験ではミラーステレオスコープを用いて左右眼に独立に刺激を呈示したため、左右の運動図形を物理的に同位置に重ねる必要がある。そこで事前に視覚刺激と同じ大きさの輪郭と、両眼の図形を重ねると十字線になる図形(図 1(b))を用いて、被験者ごとに垂直方向と水平方向の調節を行ってもらった。その後、実験を開始した。

図形の運動方向は図 2 に示すように、BR の実験において、左側の図形は左方向、右側の図形は右方向とした。これによって被験者の知覚する図形は左運動のものと右運動のものとで内因的に交替する。

また、対照実験として外因的に知覚交替を引き起こす実験を行った。この実験では左右の図形の運動は同一方向とし、その運動方向をあらかじめ設定した間隔(平均 2700ms, 標準偏差 600ms)で交替させた。これによって被験者が知覚する図形の運動方向は刺激自体の運動方向の交替によって外因的に交替する。

2.3. 実験パラダイム

図 1(a)の視覚刺激を用いた二種類の実験を図 2 のパラダイムで行った。黒の背景を 6 s 間呈示し、実験で用いる運動刺激を停止させた停止刺激を 3 s 間呈示した。

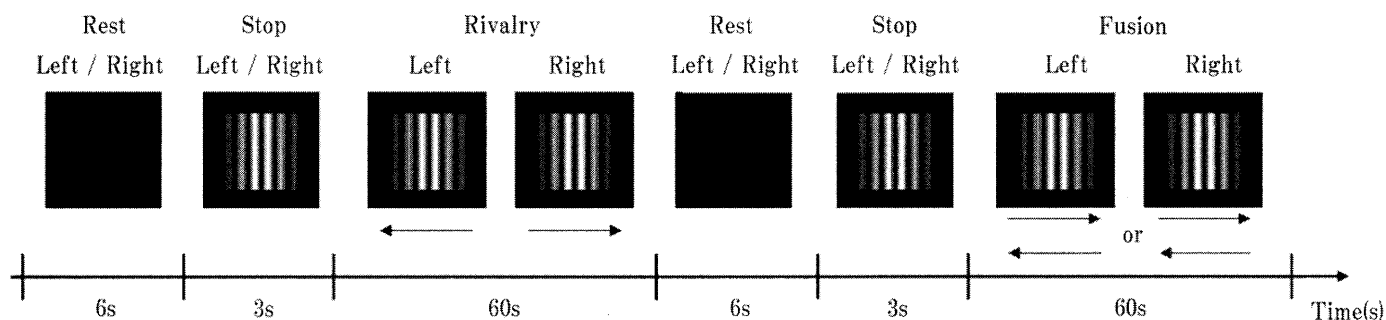


図2 実験パラダイム.

次に反対方向にドリフト運動する競合刺激を左右眼に対して独立に 60 s 間呈示した(以下 Rivalry). その後再度 6 s の黒の背景と 3 s の停止刺激を挟み, 同方向にドリフト運動する融合刺激を左右眼に独立に 60 s 間呈示した(以下 Fusion). 以上の 138 s を 1 セットとして, 全 12 セットの実験を行った. なお, 被験者が知覚する視覚刺激にズレを感じたら適宜図 1(b)の輪郭を用いて, 再調整を行ってもらった.

2.4. 視運動性眼振(OKN)

OKN 計測には強膜反射法による眼球運動検出器(竹井機器工業, TKK2901)を使用した. この装置は近赤外光を眼球に照射し, 角膜と強膜の反射率の違いによる反射光量の変化を利用し眼球運動を計測する装置である. OKN 計測前に被験者の頭部を顎台で固定し, 眼球運動の較正を行った. 左右眼の動きは同一とみなし, 本実験では右眼の眼球運動のみを計測した. サンプル周波数は 1000 Hz とした.

計測データに対して 1—36Hz のバンドパスフィルタをかけた. OKN には運動物体を追従する緩徐相と追従により端に行った眼位を元に戻す急速相が含まれる. 知覚交替は緩徐相の傾きが正から負, あるいは負から正と替わる点で識別し, ひとつの知覚交替潜時の前後 -1000—600ms に瞬目等のアーティファクトや, そのひとつ前の知覚交替が含まれないもののみを選択した. これを脳波解析における基準として ERP や ERS/ERD の解析に用いた.

2.5. 事象関連電位(ERP)

脳波計測には高密度脳波計測装置(BioSemi, Active Two System)を使用した. 計測には国際式 10—20 法に準ずる 128 個の電極を使用し, サンプル周波数を 1024 Hz とし, 左の乳様突起に取り付けた電極をリファレンス電極とした.

解析には MATLAB(MathWorks, 2008a)を用いた. 計測データに 1—36Hz のバンドパスフィルタを適用した. 本実験で呈示する視覚刺激は常に運動するため, 計測

した脳波に眼電の影響が現れることが懸念される. そこで眼電のアーティファクトを除去するため, Schlögl らによる除去法を採用した[8]. 2.4 節の方法で OKN から得られる知覚交替潜時をトリガとして, 前後 -1000—600ms のデータを抽出した. この際, アーティファクトの混入した電極や試行は取り除いた. 試行ごとのデータを加算平均することで Rivalry 実験と Fusion 実験における ERP を得た.

2.6. 事象関連同期・脱同期(ERS/ERD)

ERS/ERD は情報処理などの精神活動に伴う覚醒や皮質活性を反映して, 脳波基礎律動の α 波帯(8—13Hz)のパワーが減少する事象関連脱同期(ERD)が観測され, ERD の後に活性状態から静的状態への変化に伴い, α 波帯のパワーが増大する事象関連同期(ERS)が観測されることが知られている.

計測データに対して通過帯域が α 波帯(8—13Hz)のバンドパスフィルタを適用し, 2.5 節と同様に OKN から得られる知覚交替潜時をトリガとして, 前後 -1000—600ms のデータを抽出した. これを二乗してパワーに変換し, 加算平均を行った. 最後に試行における α 波帯の変化を抽出するため, 遮断周波数が 7Hz のローパスフィルタをかけた. 以上から, Rivalry 実験と Fusion 実験における ERS/ERD を得た.

2.7. 眼電アーティファクト除去

本実験で用いた視覚刺激は常に運動しており, 眼球の追従運動が起こっている. そのため, 計測した脳波に眼電の影響が現れることが考えられる. そこで本研究では, Schlögl らによる眼電アーティファクト除去法を採用し, 図 3 に示すように鼻根点の上と両外眼角の下に 3 箇所 EOG の電極を取り付け, 眼電の各電極における寄与を計算し減ずることで, 眼球運動による脳波への影響の削減を行った[8].

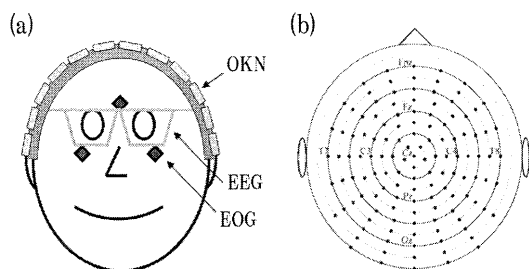


図3 本実験で用いた各種計測器の模式図[8].

3. 結果

3.1. 視運動性眼振(OKN)

左右眼に異なる刺激を与えたとしてもBRが必ずしも起きるわけではない. 左右眼に呈示する刺激の輝度, コントラスト, 空間周波数などの違いによっては, どちらか一方の刺激を知覚している片側知覚優位の期間に差が生じる[9]. しかし, 左右眼に呈示する刺激強度が同一であれば, 片側知覚優位の期間は γ 分布によく一致することが知られている[6][10].

被験者5名のOKNについてRivalry実験から得られた知覚交替時間をヒストグラムに示し, γ 分布のフィッティングを行い, カイ2乗検定を用いて適合度検定を行った. 有意水準1%として検定したところ, 2名の被験者について適合していた. 図4にはこの2名の被験者のヒストグラムと γ 分布を示す. カイ2乗検定の結果, 被験者1は $\chi^2=33.05$, 被験者2は $\chi^2=17.70$ であった. ただし有意水準5%のとき, χ_0^2 は36.42である. 同図中の被験者1,2以外については有意に適合してはいなかったが, γ 分布に近い分布が得られ, 全被験者のヒストグラムの総計については有意水準0.1%で有意に適合していた. 以上より, 今回の視覚刺激の設定で実験条件に問題はないと考えられる. 以降の解析には, 片側知覚優位の期間が1600ms以上のものとした.

3.2. 事象関連電位(ERP)

Rivalry実験とFusion実験において, OKNで得た眼球運動切り替わり潜時をトリガとして前後-1000—600msを切り出した. これについて全被験者の総平均をとり, 全電極128chを前頭, 頭頂, 右側側頭, 左側側頭, 後頭の領域に5分割し, それぞれで平均をとった結果を図5に示す.

図5においてRivalry実験とFusion実験ともにERPの特徴的な波形は見いだせなかった. Fusionにおいて, 0ms以降に見られる負のピークは, 眼球運動の変化に伴う脳神経活動が現れているものと考えられる.

知覚交替前においてRivalryとFusionで脳神経活動に違いが見られるか否かを検討するため, 次節で α 波の律動に注目したERS/ERDの解析を行った.

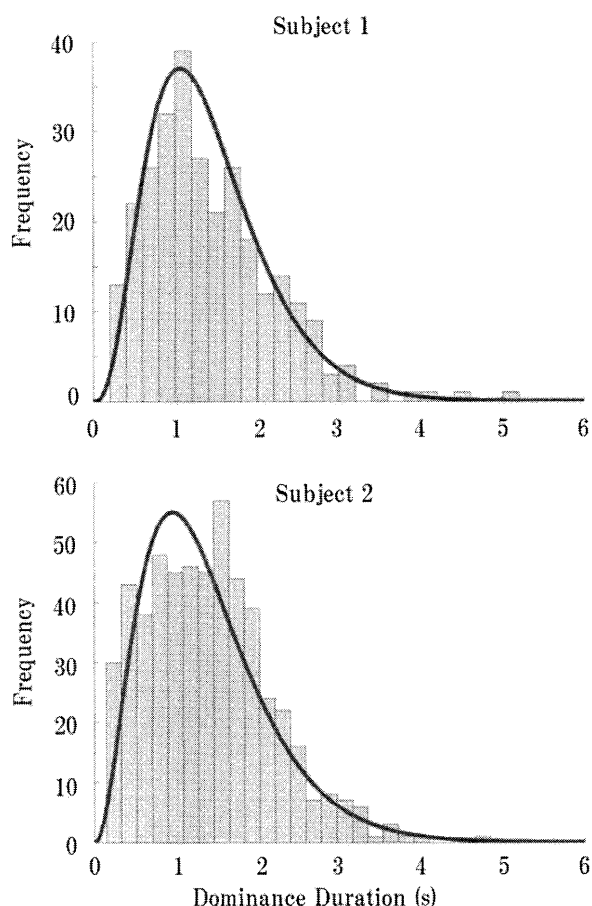


図4 代表的な被験者2名における優位期間のヒストグラムと γ 分布によるフィッティング.

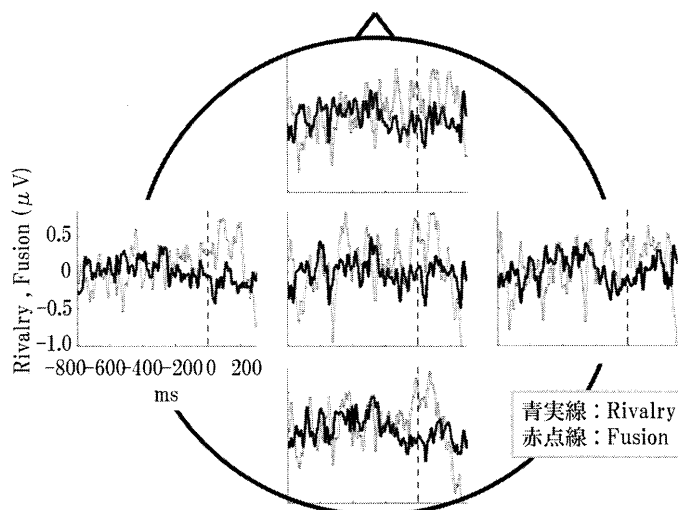


図5 ERPの全被験者の総平均の各脳部位の時間的变化. 青実線はRivalryを, 赤点線はFusionの電位(μV)を表しており, 横軸は知覚交替前後-800—300msである. 縦軸, 横軸ともに左端のグラフを参照する.

3.3. 事象関連同期・脱同期(ERS/ERD)

ERP では特徴を見いだせなかったため、 α 波帯の律動に注目し、ERS/ERDを検討した。また、電極 128chを前頭、頭頂、右側側頭、左側側頭、後頭の領域に 5 分割し、それぞれで平均をとった結果を図 6 に示す。図 6 より、Rivalry 実験と Fusion 実験から得られる α 波帯の律動より、抽出期間を通して Rivalry の方が明らかに α 波のパワーの大きさに違いがあることがわかる。そこで Rivalry と Fusion の波形の差を比較するため、Fusion の大きさでそれらの差を規格化したものを同図上破線で示す。

さらに、各潜時における脳神経活動部位を検討するため、図 6 中に示したそれぞれの波形を図 7 にトポグラフィで示した。その結果、Rivalry の方が Fusion と比べて、知覚交替前-800—500ms にかけて後頭の主に右半球で、-500—300ms において頭頂から前頭の主に右半球で、 α 波の減衰が特に大きいことがわかった。

4. 検討

OKN の計測結果から、全 5 名の被験者について γ 分布のフィッティングを行った。カイ 2 乗検定の結果、2 名の被験者に関して適合していた。しかし、検定の結果、有意に適合していなかった被験者についても γ 分布に近い分布が得られたため、今回用いた視覚刺激と設定に問題はないと言える。

次に OKN から得られた眼球運動の切り替わりから、客観的に被験者が知覚している視覚刺激を判別し、ERP と ERS/ERD の解析を行った。しかし、ERP からは知覚交替前の潜時において Rivalry と Fusion で明確な違いや特徴は見られなかった。この理由としては知覚交替に追従する眼球運動が瞬時に起きるものではなく、少なからず誤差が含まれることや、脳内において知覚交替が起こったときに眼球運動の方向が交替するまでの時間も個人差や各個人においても誤差があるものと考えられる。そのため、OKN の切り替わり潜時を基準とする加算平均では、Rivalry と Fusion の ERP に観察されうる特徴を捉えることができなかった。また、今回採用した Schlögl らの眼電アーティファクト除去の方法では、眼電の影響を減少できることは確認したが、脳波の情報まで削られている可能性があること、逆に眼電の影響が未だに残っている可能性があることが考えられ、今後検討して行くべき課題の一つと考えている。

ERS/ERD からは、知覚交替の前後にわたって Fusion に比べて Rivalry の方が α 波帯の律動に大きな違いが見られた。中でも知覚交替前-800—500ms において後頭の主に右半球と、-500—300ms において前頭から頭頂の主に右半球にかけて α 波の減衰が特に大きいこ

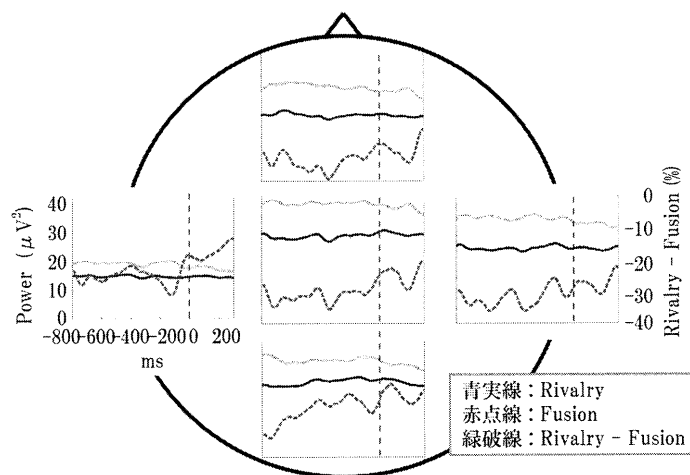


図 6 ERS/ERD の全被験者の総平均の各脳部位の時間的変化。青実線と赤点線はそれぞれ Rivalry と Fusion の α 波帯のパワー (μV^2) を表しており、縦軸は左端のグラフを参照する。緑破線は両者の差を百分率で表しており、縦軸は右端のグラフを参照する。横軸は知覚交替前後-800—300ms であり、値については左端のグラフを参照する。

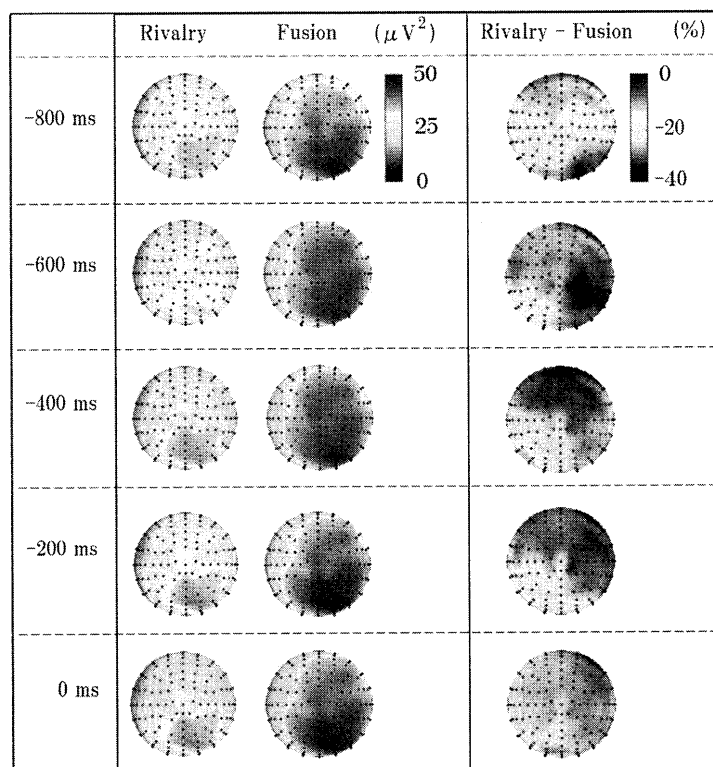


図 7 ERS/ERD の全被験者の総平均のトポグラフィの時間的変化。

とがわかった。

fMRIを用いてBRに関する研究を行ったLumerらの報告によると、頭頂と前頭連合野の活動がBRに関連があるとされており[2]、他にも後頭の背側経路(BA18やBA19)、V4、頭頂間溝近傍(BA7)、前頭前野(BA9,10,44,46)においてBOLD信号の有意な上昇を報告する研究もある[3]。また、これらの高次領域での活動を支持する見解がある一方で、TongやPolonskyらはV1の関与を示しており[11][12]、決まった見解がない。今回の結果では、後頭から頭頂、前頭に変化していく様子が観察されたため、上述の先行研究の結果の違いは、活動潜時に違いであったことが示唆された。

しかし今回の結果だけでは、BRに関わる脳神経活動の時間的な遷移や活動領域を特定することは困難であった。そこで脳活動領域をより明確に特定するため、本研究で用いた刺激、設定を考慮したfMRI実験を行い、今回の脳波解析より得られた結果と比較検討することや、統合的に解析することが必要であると考えられる。また、脳波は導電率の異なる脳、頭蓋骨、硬膜、脳脊髄液、皮膚などを通して計測を行うため、時間分解能は高いが、空間分解能が低く、信号源推定も困難であるという短所がある[13]。この導電率の違いの影響を受けない時間分解能が高い計測装置にMEGがあり、信号源推定も脳波よりも容易であることなどから、MEGを用いて計測をすればより正確に脳活動領域を特定し、時間的な変化を捉えることも可能であることが考えられる。

5. まとめ

本研究では、両眼視野闘争における内因的知覚交替に関わる脳神経活動を解明することを目的として、競合刺激観察時の片側優位の知覚現象が内因的に入れ替わるときの脳波と、融合刺激の外因的な運動方向の交替を観察しているときの脳波を計測し、比較検討した。その結果、ERPからは特徴的な違いは見られなかったが、ERS/ERDからは、競合刺激観察時の内因的知覚交替発生時の脳波の方が融合刺激観察時の外因的知覚交替発生時の脳波よりも α 波帯の律動に大きな違いがあることがわかった。特に知覚交替前-800—-500msにおいて後頭の主に右半球及び、-500—-300msにかけて頭頂から前頭の主に右半球にかけて特に大きな α 波帯の減衰が見られた。以上より、内因的知覚交替が発生する前において後頭から、頭頂、前頭の主に右半球で両眼視野闘争に関わる脳神経活動が起きていることが示唆された。

今後の課題として、本研究で用いた視覚刺激や設定を踏まえたfMRI実験を行い、より厳密に脳活動領域を調べ、脳波との総合的な検討や統合的な解析を行う

ことが挙げられる。また、眼電アーティファクト除去の方法としてより有効なものを考案、選択して検討を行う必要がある。

文 献

- [1] D.A. Leopold, N.K. Logothetis, “Activity changes in early visual cortex reflect monkeys’ percepts during binocular rivalry.”, *Nature*, Vol.379, pp.549~553, 1996.
- [2] E.D. Lumer, K.J. FrisM. Rees, “Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain.”, *Science*, Vol.280(19), pp.1930~34, 1998.
- [3] 小林, 二川, 時田, 他, “脳機能画像に基づく視覚的気づきの脳内プロセスに関する検討.”, *Medical Imaging Technology*, 21, pp.277~280, 2003.
- [4] U. Roeber, A. Widmann, N.J. Trujillo-Barreto, et al, “Early Correlates of visual awareness in the human brain: Time and place from event-related brain potentials.”, *Jornal of Vision*, Vol.8(3), pp.1~12, 2008.
- [5] T. Kobayashi, K. Kato, S. Kuriki, “Difference of EEG spectral powers observed between binocular rivalry and binocular fusion.”, *Frontiers Med. Biol. Engng*, Vol.7(1), pp.11~19, 1995.
- [6] R. Fox, S. Todd, L.A. Bettinger, “Optokinetic nystagmus as an objective indicator of binocular rivalry.”, *Vision Res*, Vol.15, pp.849~853, 1974.
- [7] 丸山, 小林, 栗城, “眼球運動変化に基づく両眼視野闘争における知覚交替の定量的解析.”, *信学技報*, pp.47~54, 1999.
- [8] A. Schlögl, C. Keinrath, D. Zimmermann, et al, “A fully automated method of EOG artifacts in EEG recordings.”, *Clinical Neurophysiology*, Vol.118, pp.98~104, 2007.
- [9] 小林哲生, “両眼視野闘争.”, *Clinical Neuroscience*, Vol.28(10), pp.1161~1163, 2010.
- [10] P. Walker, “Stochastic properties of binocular rivalry alternations.”, *Perception & Psychophysics*, Vol.18(6), pp.467~473, 1975.
- [11] F. Tong, S.A. Engel, “Interocular rivalry reveals in the human cortical blind-spot representation.”, *Nature*, Vol.411, pp.195~199, 2001.
- [12] A. Polonsky, R. Blake, J. Broaun, et al, “Neuronal activity in human primary visual cortex correlates with perception during binocular rivalry.”, *Nature Neuroscience*, Vol.3, 1153~1159, 2000.
- [13] “視覚情報処理ハンドブック.”, 日本視覚学会(編), 朝倉書店, 2000.