

両眼独立呈示されたランダムドットの 競合・融合運動観察時における脳波と視運動性眼球運動

藤原 悠平[†] 夏川 浩明^{†‡} 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町 6 番地

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

あらまし 両眼視野闘争とは「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に、交互に見える」という現象である。両眼視野闘争の研究は古くからなされているが、両眼視野闘争が脳内のどこで、いつ、どのように処理されるのかというメカニズムは現在もはっきりとは分かっていない。本研究ではランダムドットの競合運動により両眼視野闘争を引き起こす競合運動刺激と対照となる融合運動刺激を用いて、競合・融合運動刺激の違いによって視運動性眼球運動や脳波への影響が現れる潜時について調べた。視運動性眼球運動と脳波は同時計測し、視運動性眼球運動についてはその速度を、脳波については事象関連電位と事象関連同期・脱同期を求め、条件間の差を検定した。その結果、眼球運動において約 270 ms 以降に、また事象関連同期・脱同期において約 830 ms 以降に 8–13 Hz 帯域で競合・融合運動刺激間の有意な差が見られた。

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

EEGs and optokinetic eye-movements during observations of competitive and cooperative movements of binocularly presented random dot stimuli

Yuhei FUJIWARA[†] Hiroaki NATSUKAWA^{†‡} 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: [†] fujiwara@bfe.kuee.kyoto-u.ac.jp

Abstract Binocular rivalry is a phenomenon in which the perception alters when different images are presented to two eyes. Despite this phenomenon has been investigated for a long time, we have not resolved the issue of when and where in the brain rivalry occurs. In this study, we used competitive moving stimuli in which two random dot patterns drifted to opposite directions to investigate when the difference between competitive and its control cooperative stimuli affects both optokinetic eye-movements and electroencephalograms. We analyzed optokinetic eye-movements, event-related potentials and event-related synchronizations (ERSs) / desynchronizations (ERDs) for comparing the difference for competitive and cooperative stimuli. It was found that significant differences in optokinetic eye-movements were observed after 270 ms. In addition, significant differences in ERSs / ERDs at 8–13 Hz band were observed after 830 ms.

Keyword binocular rivalry(BR), optokinetic nystagmus(OKN), event-related potential(ERP), event-related synchronization / desynchronization(ERS / ERD)

1. はじめに

両眼視野闘争(BR: binocular rivalry)とは「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に交互に知覚される」という現象であり[1], BRは視覚的アウェアネスや意識がどのような脳の仕組みによるもの

なのかを知る上で重要であると考えられている。BRに関する研究は今から約 170 年前に始まり[2], 心理物理学的性質は良く研究されてきたが, BRがどの潜時で生じ, 脳内のどこで, いかに処理されるのかという問題はまだ解決されていない。

ここで、視野全体の動きに対して視線を保持し、網膜像のぶれを防ぐために起こる眼球運動は視運動性眼振 (OKN : optokinetic nystagmus) と呼ばれ [3], この OKN を観察することで BR において知覚している眼を客観的に知ることができる [4]. サルを用いた OKN 研究において, Logothetis らは BR を引き起こす刺激の呈示は BR を引き起こさない刺激の呈示に比べて眼球追従速度を有意に遅くすると報告している [5]. また, 静止刺激を用いた脳波計測に基づく BR 研究には幾つかの報告があるが [6][7][8], 運動刺激を用いた眼球運動と脳波の同時計測に基づく BR 研究の報告は知る限りでは無い.

視覚刺激に運動刺激を用いる事によって刺激の違いによる影響を眼球運動から観察する事ができ, この眼球運動が BR に関係する処理の潜時を知るための有効な手段になると考え, 本研究では眼球運動および脳波の同時計測によって得られる結果を比較した. 両眼視野闘争を引き起こすような競合運動刺激とその対照となる融合運動刺激を用いて, 競合・融合運動刺激の呈示に由来する眼球追従速度に差が現れる潜時を調べ, また同時計測された脳波の解析による事象関連電位 (ERP : event-related potential) や事象関連同期・脱同期 (ERS / ERD : event-related synchronization / desynchronization) に差が現れる潜時との比較を行った.

2. 方法

2.1. 被験者

実験に参加した被験者は正常な視力を有する 21 歳から 26 歳までの健康成人男性 7 名である. 被験者には事前に実験内容についての説明を行い, 実験に参加する同意を得た.

2.2. 視覚刺激

輝度 1 cd/m^2 の黒の背景において, 直径 5.4 deg の円形領域内に大きさ 2×2 ピクセルの正方形のドットを密度 7.8 個/deg^2 でランダムに配置した. ドットの輝度は 40 cd/m^2 とした. ドットは各々が直線運動をし, その移動速度は 10 deg/s とした. 視覚刺激のイメージを図 1 に示す. 円形領域内で作られるランダムドットの視覚刺激を左右眼それぞれに呈示するために 2 つに複製した.

刺激には大きく分けて 2 種類の運動をさせた. 1 つ目の運動は各ドットがランダムな方向に 10 deg/s で直線運動をする「ランダム運動」であり, このとき左右眼のドットの運動は全く同じで, 左右眼には全く同じ像を呈示した. もう 1 つの運動では, 円形領域内の全ドットが右または左のどちらか一方に 10 deg/s で直線運動する. このときに左眼に呈示される円形領域内のド

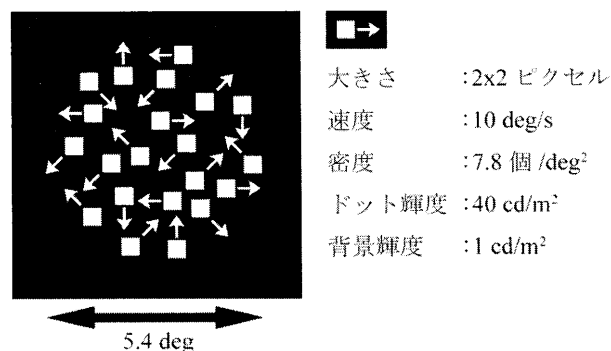


図 1. 実験に使用した視覚刺激. 矢印はドットの運動方向を示す.

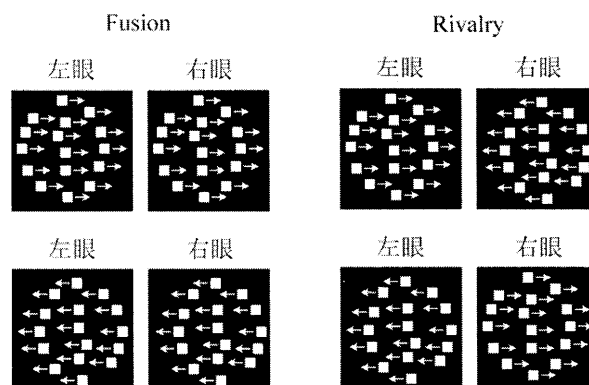


図 2. Fusion 運動と Rivalry 運動の視覚刺激の組み合わせ (左 : Fusion 運動の刺激の組み合わせ, 右 : Rivalry 運動の刺激の組み合わせ)

ットの移動方向と右眼に呈示されるそれとが同じ場合を「Fusion 運動」, 異なる場合を「Rivalry 運動」と呼ぶ. Fusion 運動や Rivalry 運動となる左右眼のドットの運動方向の組み合わせを図 2 に示す.

視覚刺激を 15 型メガネなし 3D ディスプレイ (SANYO, THD15DX1) を用いて, 両眼分離して被験者に呈示した. 被験者には暗室で視覚刺激を呈示し, 暗順応後に実験を開始した.

2.3. 実験パラダイム

実験パラダイムを図 3 に示す. 被験者には 1–2 s のランダムな時間でランダム運動を呈示した. その後, Fusion 運動または Rivalry 運動を 5 s 間呈示し, 最後に黒の背景のみを 2 s 間呈示した. 1 試行に要する時間は 8–9 s で, これを各被験者に Fusion 運動と Rivalry 運動についてそれぞれ 140 試行呈示した.

2.4. 視運動性眼球運動

OKN の計測には強膜反射法を用いた眼球運動検出器 (竹井機器工業, TTK2901) を使用した. この装置は近赤外光 (940 nm , 12 mW/sterad) を眼球に照射し, 角膜と

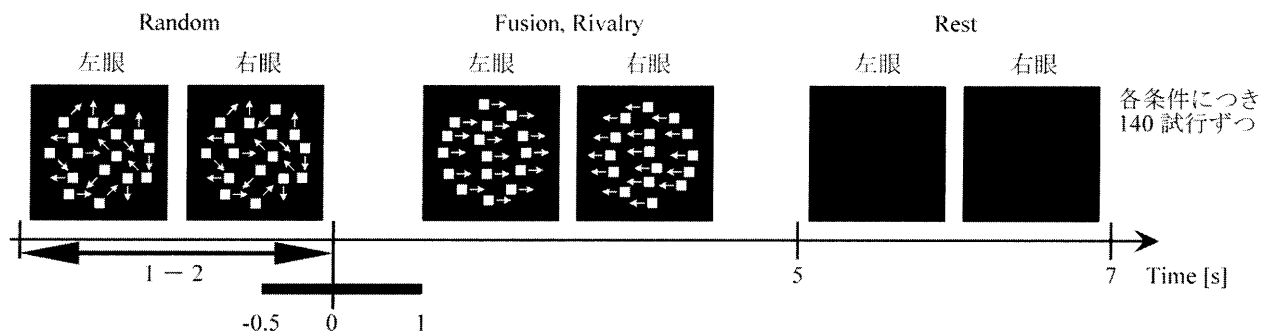


図 3. 実験パラダイム. 太線部分は解析に用いた区間を示す.

強膜の反射率の違いによって眼球変位を計測する. 本実験では右眼の眼球運動のみ計測し, サンプル周波数は 1000 Hz とした.

解析には MATLAB(MathWorks, R2009a)を用いた. OKNは視界の動きを追従する緩徐相と, 追従により端へいった眼位を引き戻す急速相からなり[3], 眼球の追従運動を調べるために本研究では急速相における眼球運動データを除去し, その前後を補完する処理を行った. 計測データに 32 Hz の低域通過フィルタを適用した. また, 瞬目などのアーチファクトの混入した試行は取り除いた. 10 ms の時間幅で速度を算出した後に, ノイズを軽減するために 50 ms の時間幅で移動平均を行った. -300-0 ms の期間をベースラインと設定し, Fusion 運動, Rivalry 運動のそれぞれ 2 種類ずつの刺激(図 2)をまとめて Fusion 運動と Rivalry 運動として比較するために, 400 ms での速度を基準として左への眼球運動データは正負を反転させて右への眼球運動とした.

2.5. 事象関連電位

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 256 Hz とし, 左の乳様突起をリファレンス電極として使用した.

解析には MATLAB(MathWorks, R2009a)を用いた. 計測データに 0.5-55 Hz の帯域通過フィルタを適用した. 瞬目などのアーチファクトの混入した試行および電極を取り除いた. -500-0 ms の期間をベースラインと設定し, 図 2 で示される Fusion 運動と Rivalry 運動について, 試行に関する加算平均から事象関連電位を得た.

2.6. 事象関連同期・脱同期

2.5. で得られた Fusion 運動, Rivalry 運動の各試行についてウェーブレット解析を行った後, 全試行について加算平均された時間一周波数マップを得た. -500-0 ms の期間をベースラインとして設定し, 時間一周波数マップはベースラインの標準偏差で規格化して表示

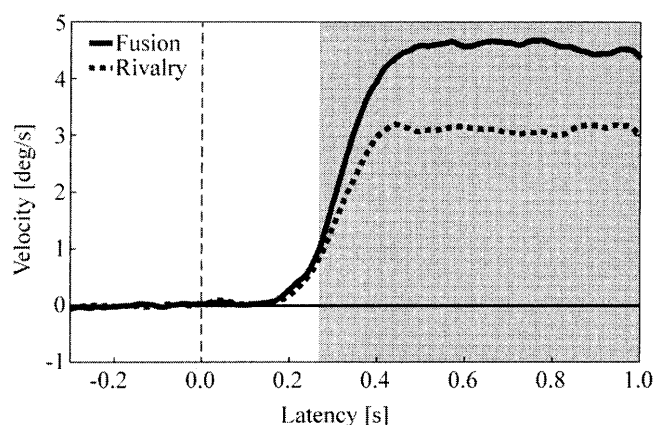


図 4. Fusion 運動と Rivalry 運動の総平均の眼球速度(灰色部分(270 ms 以降)が有意差の見られた潜時)

した.

時間一周波数マップにおいて Fusion 運動と Rivalry 運動の間に特徴的な差が見られた α 波帯(8-13 Hz)については, 計測データに対してその周波数帯の帯域通過フィルタをかけた後にアーチファクトの混入した電極・試行を取り除き, 自乗してパワーに変換した. 最後にノイズを軽減するために 50 ms の時間幅で移動平均を行った. 各試行について加算平均し, Fusion 運動, Rivalry 運動の事象関連同期・脱同期を得た.

3. 結果

3.1. 視運動性眼球運動

OKN の被験者 7 名の総平均について, Fusion 運動と Rivalry 運動は 270 ms 以降に有意な差が見られた ($p < 0.05$).

Fusion 運動と Rivalry 運動について, 被験者 7 名の眼球速度の総平均と, 有意な差の見られた潜時を図 4 に示す.

3.2. 事象関連電位

Fusion 運動と Rivalry 運動について, 総平均における

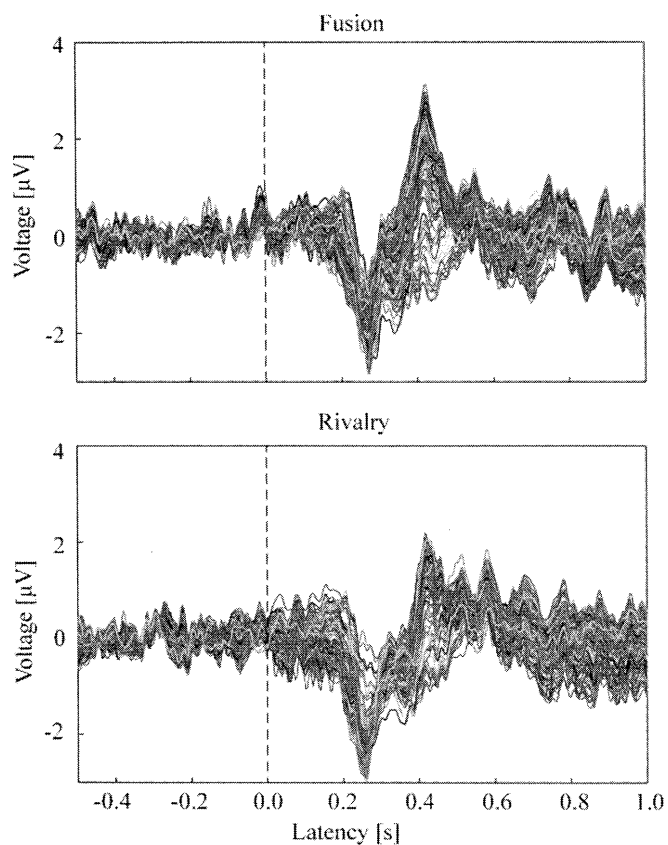


図 5. Fusion 運動と Rivalry 運動の ERP の時間変化. 全電極の重畳波形.

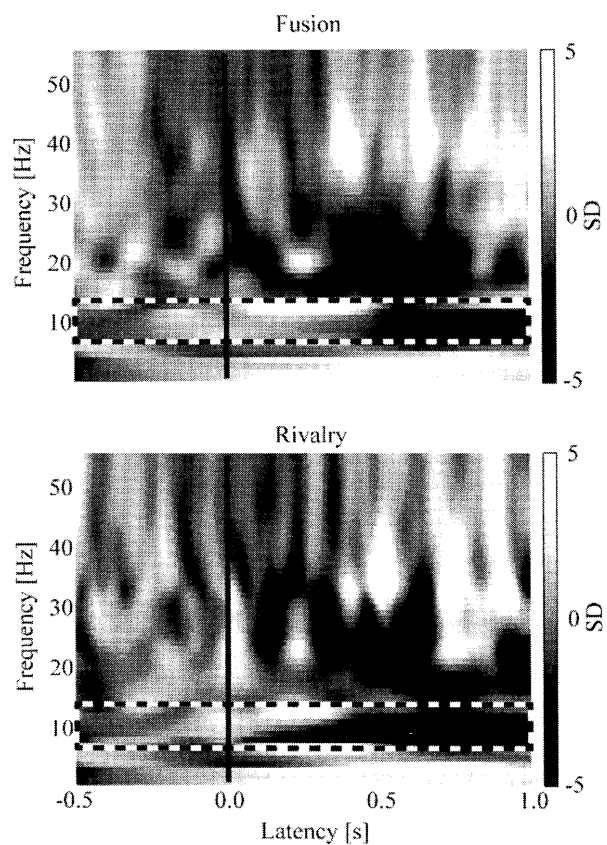


図 7. Fusion 運動と Rivalry 運動における Cz でのパワーの時間一周波数マップ. 破線内は注目する周波数帯 (8-13 Hz).

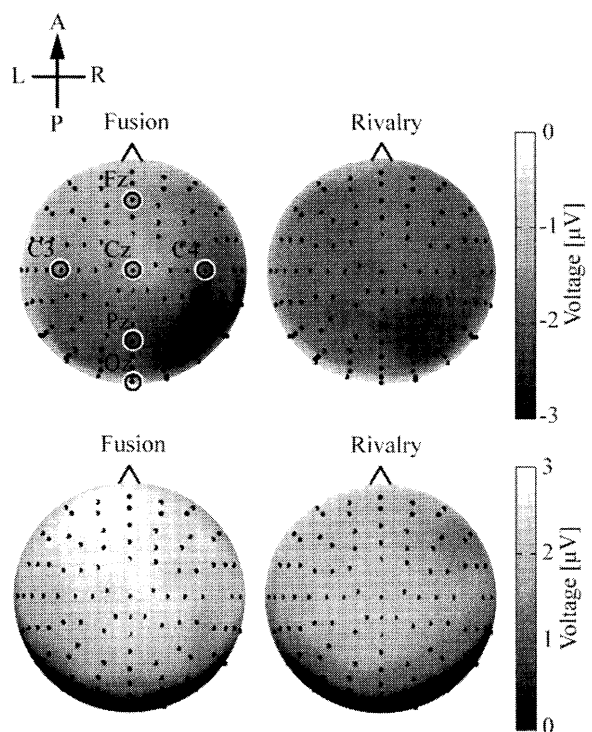


図 6. Fusion 運動と Rivalry 運動におけるピーク潜時での ERP の頭皮上分布(上 : 270 ms での分布, 下 : 420 ms での分布)

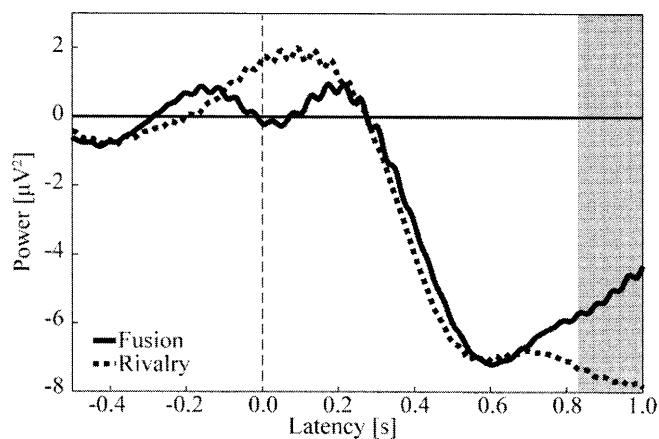


図 8. Pz における α 波帯 (8-13 Hz) のパワーの時間変化 (灰色部分 (830 ms 以降) が有意差の見られた潜時)

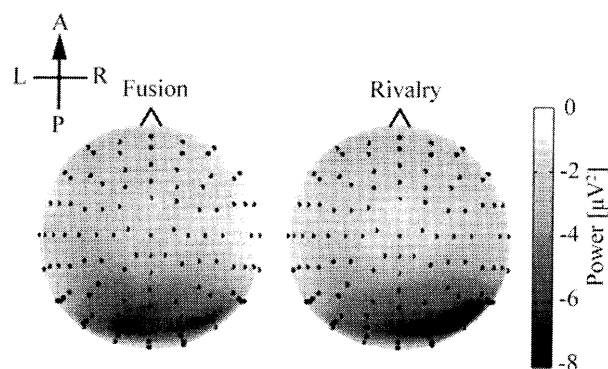


図 9. 830 ms での α 波帯(8-13 Hz)の頭皮上パワー分布
(上 : Fusion 運動, 下 : Rivalry 運動)

全電極の ERP の時間変化を図 5 に示す。

図 5 において Fusion 運動と Rivalry 運動の両方に共通して 270 ms および 420 ms にピーク電位が見られ、270 ms および 420 ms における頭皮上電位分布を図 6 に示す。図 6 に見られるように、270 ms においては Fusion 運動と Rivalry 運動で共通して頭頂付近に右半球優位な負のピークが見られた。420 ms においては Fusion 運動と Rivalry 運動で共通して全頭にわたって賦活しているが、後頭では活動が見られなかった。

ERP の結果について Fusion 運動と Rivalry 運動の差を代表的な 6 つの電極(Fz, Cz, Pz, Oz, C3, C4)で検定したが、どの電極においても Fusion 運動と Rivalry 運動の間に有意な差は見られなかった。

3.3. 事象関連同期・脱同期

ウェーブレット変換によって得られた Cz における被験者 7 名の総平均をベースラインで規格化した時間一周波数マップを Fusion 運動と Rivalry 運動のそれぞれについて図 7 に示す。

図 7 の時間一周波数マップから α 波帯(8-13 Hz)のパワーの時間変化に着目し、計測データにそれぞれの周波数帯の帯域通過フィルタを適用し、この帯域のパワーの時間変化を観察した。代表的な 6 つの電極(Fz, Cz, Pz, Oz, C3, C4)において、Fusion 運動と Rivalry 運動では、Pz で 830 ms 以降に有意な差が見られた。Pz におけるパワーの時間変化と、有意な差の見られた潜時を図 8 に示す。また、Fusion 運動と Rivalry 運動の 830 ms での頭皮上パワー分布を図 9 に示す。図 9 において、Fusion 運動と Rivalry 運動に共通して頭頂付近での α 波帯(8-13 Hz)のパワーの減衰が見られた。

4. 検討

視運動性眼球運動の被験者 7 名の総平均について、Fusion 運動と Rivalry 運動には 270 ms 以降に有意な差が見られた。この結果から運動する視覚刺激を処理し

て眼球運動を起こすシステムにおいて、競合・融合運動刺激の差が 270 ms もしくはそれ以前の潜時で生じたと考えられる。ヒトに近い霊長類のサルを用いた動物実験の結果であるが、外側膝状体から MT 野、MST 野、橋核、小脳を経て脳幹に至る経路と、副視索系、視索核、橋被蓋網様核、前庭神経核などを経由する経路の 2 種類の経路が視運動性眼球運動に関わる処理経路として考えられている[3]。またヒトやサルを対象とした両眼視野闘争研究の結果、両眼視野闘争に関連する脳部位として外側膝状体から下側頭皮質や上側頭溝までの幅広い範囲が報告されている[9][10]。本研究における Fusion 運動と Rivalry 運動の眼球速度の差には、視運動性眼球運動や両眼視野闘争に関連すると言われる上述の脳部位のヒトに対応する部分での処理が関係している可能性が高い。

そこで、視運動性眼球運動に有意な差が見られる潜時(270 ms)と同じ潜時を事象関連電位や事象関連同期・脱同期で見たが、この潜時近傍では共に有意な差は見られなかった。特に、事象関連電位の時間波形における最も大きな特徴が 270-420 ms に見られることから眼球運動と何らかの関係があると予想されるが、この期間の事象関連電位では Fusion 運動と Rivalry 運動の有意な差を観測できなかった。この理由としては、競合・融合運動刺激の差となる処理が時間的に同期した活動では無い可能性や、時間的に同期していても小さな活動である可能性が考えられる。

事象関連同期・脱同期においては 830 ms 以降に Fusion 運動と Rivalry 運動の間に有意な差が見られた。この潜時(830 ms)は視運動性眼球運動における有意差の現れた潜時(270 ms)と比較すると非常に遅い潜時であった。しかしながら、事象関連同期・脱同期における 830 ms でのパワーの頭皮上分布は頭頂付近での活動を捉えており、両眼視野闘争には頭頂連合野と前頭連合野が共に関与しているという報告[11][12]と一致するので、本研究で捉えた活動は両眼視野闘争に関連する可能性が示唆される。また事象関連同期・脱同期で有意差が見られた理由については、時間一周波数解析では両眼視野闘争に関わるような内因的な処理を含む非同期的な活動を検出しやすい事が考えられる。また観測された活動が視覚認知に関わる高次の処理であるために、遅い潜時で有意な差が観測されたと考えられる。

しかしながら、視運動性眼球運動に有意差が見られた潜時付近で競合・融合運動刺激の処理に関わる脳活動の差はすでに生じている事が考えられ、脳波よりも頭骨等による影響が少なく信号源推定にも有利な MEG[13]を含め、他手法でより詳細に検討する事を現在検討中である。また、信号源がどこにあるのかを知

るために両眼視野闘争研究においてよく用いられる fMRI[11][12][14]を用いて, MEG と fMRI の統合解析[15]をする事も検討中である。

5. むすび

本研究では両眼視野闘争を起こすような競合・融合運動刺激の処理がどの潜時で生じるのかを知るために, 視運動性眼球運動と脳波の同時計測を行った。その結果 Fusion 運動と Rivalry 運動の視運動性眼球運動において 270 ms から有意な差が見られ, この差に関連する部位としては視運動性眼振や両眼視野闘争に関連があるとされる外側膝状体や MT 野, MST 野などが考えられる。しかし, この潜時の ERP および ERS / ERD については有意な差が見られなかった。また, α 波帯(8-13 Hz)についての ERS / ERD では頭頂の電極において 830 ms 以降に Fusion 運動と Rivalry 運動の有意な差が見られ, この差は両眼視野闘争に関連する脳活動を反映していると示唆される。

謝辞 本研究の一部は科研費(特別研究員奨励費: 22・1341)の補助を受けたものであり, 付記して謝意を表す。

文 献

- [1] R. Blake, N.K. Logothetis, "Visual competition.", *Nature Reviews, Neuroscience*, 3, pp.13-21, 2002.
- [2] C.Wheatstone, "On some remarkable, and hitherto unobserved, phenomena of binocular vision.", *Philosophical Transactions on Royal Society of London*, 128, pp.371-394, 1838.
- [3] "視覚情報処理ハンドブック", 日本視覚学会(編), (株)朝倉書店, 2000.
- [4] R.Fox, S.Todd, L.A. Bettenger, "Optokinetic nystagmus as an objective indicator of binocular rivalry.", *Vision Research*, 15, pp.849-853, 1975.
- [5] N.K. Logothetis, J.D. Schall, "Binocular motion rivalry in macaque monkeys: Eye dominance and tracking eye movements.", *Vision Research*, 30, pp.1409-1419, 1990.
- [6] R.W. Lansing, "Electroencephalographic correlates of binocular rivalry in man.", *Science*, 146, pp.1325-1327, 1964.
- [7] W.A. Cobb, H.B. Morton, G. Ettlinger, "Cerebral potentials evoked by pattern reversal and their suppression in visual rivalry.", *Nature*, 216, pp.1123-1125, 1967.
- [8] R.J. Brown, A.M. Norcia, "A method for investigating binocular rivalry in real-time with the steady-state VEP.", *Vision Research*, 37, pp.2401-2408, 1997.
- [9] K. Wunderlich, K.A. Schneider, S. Kastner, "Neural correlates of binocular rivalry in the human lateral geniculate nucleus.", *Nature Neuroscience*, 8, pp.1595-1602, 2005.
- [10] D.A. Leopold, N.K. Logothetis, "Activity changes in early visual cortex reflect monkeys' percepts during binocular rivalry.", *Nature*, 379, pp.549-553, 1996.
- [11] 小林哲生, 二川裕之, 時田祥子, 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.
- [12] E.D. Lumer, K.J. Friston, G. Rees, "Neural correlates of perceptual rivalry in the human brain.", *Science*, 280, pp.1930-1934, 1998.
- [13] 武田常広, "脳工学", 電子情報通信学会(編), pp.184, (株)コロナ社, 東京, 2003.
- [14] F. Tong, K. Nakayama, J.T. Vaughan, et al, "Binocular rivalry and visual awareness in human extrastriate cortex.", *Neuron*, 21, pp.753-759, 1998.
- [15] 岡田雄介, 大橋俊平, 鄭址旭, 濱田昌司, 小林哲生, "fMRI-MEG 統合解析法:fMRI 非捕捉信号源の干渉抑制による高精度・ロバスト化", *生体医工学*, 45, pp.275-284, 2007.