

異なる輝度の点滅刺激による定常視覚誘発電位の 符号化に関する基礎的検討

泉岡 太輔[†] 川口 浩和[†] 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

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

あらまし 本研究では定常視覚誘発電位に基づく BMI (brain-machine interface) への実用化に向けた SSVEP の符号化に関する基礎的検討を点滅刺激の輝度変調に着目して行った。輝度に応じて SSVEP 振幅に符号を割り当てれば、同一の周波数で区別できる点滅刺激のパターン数が増えると考え、異なる輝度の点滅刺激に注意を向けた際の SSVEP から、注意を向けた輝度の点滅刺激を判定できるか否かの検討を行なった。実験は2種類行った。まず、輝度の異なる4つの12Hzの点滅刺激を被験者に呈示し、12Hz帯の振幅が最大となる輝度と最小となる輝度を選択した。その後、選択した2つの輝度の刺激を12Hzで交互に被験者に呈示し、取得した脳波を全試行間で平均して時間領域と周波数領域において解析した。個人毎に SSVEP の振幅が最大となる輝度が存在することや、異なる輝度の組み合わせにより実際に用いた点滅周波数以外の周波数成分が SSVEP スペクトルに現れること等が判明し、BMI への有用な知見が得られた。

キーワード ブレインマシンインタフェース, SSVEP, 符号化, 輝度変調

A fundamental study on coding of steady-state visually evoked potentials by stimuli with different luminance

Daisuke IZUOKA[†] Hirokazu KAWAGUCHI[†] and Tetsuo KOBAYASHI[†]

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

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

Abstract In this study, we investigated amplitude modulations of SSVEP elicited by flickering visual stimulus with different luminance towards BMI (brain-machine interface) based on SSVEP. It is possible to increase the number of discriminable stimuli in the same frequency with different luminance. Then, we investigated whether amplitudes of SSVEPs were changed by flickering stimuli with different luminance. We carried out two experiments. First, we presented four flickering visual stimuli with different luminance at random and selected two stimuli which elicited the largest and the smallest amplitudes of SSVEPs. Subsequently, we presented the two stimuli which selected in the first experiment alternatively at 12Hz. The measured EEGs were averaged among all trials and analyzed in time and frequency domains. We showed that there was individual difference luminance for obtaining the maximum amplitude of SSVEP. In addition, different frequency components which was not used as flickering frequency, was observed by a combination of different luminance stimuli. These results may provide useful knowledge to construct a practical BMI.

Keyword BMI, SSVEP, coding, luminance modulation

1. はじめに

BMI は脳波 (electroencephalogram: EEG) を始めとする脳機能計測手法より抽出された脳内情報を用いて機械を制御するシステムで、身体障害者だけでなく健常者の生活の質を向上させることが期待される[1].

一定周波数を有する点滅刺激を被験者に与えることで、主に後頭部に位置する視覚野で刺激と同一の周波数成分及びその高調波成分を有する定常視覚誘発電位(steady-state visually evoked potential: SSVEP)が発生

することが知られている。さらに、被験者が点滅刺激に注意を向けることで、SSVEP は変調することが報告されており[1-3], SSVEP の変調に基づく BMI が注目を集めている。他の BMI と比較して、SSVEP の変調に基づく BMI は被験者に対する訓練が少なく済む、情報転送率(Information Transfer Rate: ITR)が高いことといった長所がある[2,3]. SSVEP の変調に基づく BMI の多くは点滅刺激の周波数のみをパラメータとして用いているが、SSVEP を誘発するために用いる周波数に

は限りがある．位相情報を用いることで多くの刺激の識別を試みた報告も存在するが[4,5]，用いることが可能な位相情報にも限界があり，より多くの刺激の識別という BMI の実用に向けた課題が残る[5]．

本研究では，SSVEP に基づく BMI の点滅刺激の種類を増やすことを目的とし，新たに点滅刺激の輝度情報を用いることを提案した．異なる輝度を組み合わせで符号化された点滅刺激により誘発される SSVEP から，輝度の違いにより符号化された情報の抽出を試みた．輝度情報を用いることが可能であれば，例えば同一周波数を有しながらも輝度が異なる刺激を識別できるようになることが考えられ，刺激の種類の増加が期待される．輝度の異なる点滅刺激による SSVEP の変化について調査した先行研究はいくつか存在するが[6,7]，異なる輝度を組み合わせた点滅刺激により符号化された SSVEP の変化について言及した報告はない．そこで

SSVEP の符号化に向けた基礎的検討として，異なる輝度を組み合わせた点滅刺激を与えることで SSVEP の応答がどのように変化するか調査した．実験は，予備実験とメイン実験の 2 つに分けて行い，予備実験では，輝度の異なる 4 種類の点滅刺激を液晶画面中央に無作為な順番で呈示し，被験者にはその点滅刺激に注意を向けてもらった．予備実験で計測された EEG に対して周波数解析を施し，点滅刺激周波数の振幅が最大の輝度と最小の輝度を選択した．メイン実験では，予備実験で選択した 2 つの輝度を点滅周波数に従って交互に呈示して，被験者に点滅刺激に注意を向けてもらった．メイン実験で得られた EEG に対して，刺激呈示区間の全試行間で加算平均し，さらに平均したデータに対して時間領域と周波数領域での解析を行った．

2. 実験

2.1. 被験者

22～27 歳の健常者 6 名（男性 6 名）を被験者として実験を行った．被験者には実験の目的と手順を説明し，同意を得た．実験は暗室で行い，被験者には快適な椅子に座り，液晶画面（リフレッシュレート 120 Hz）に呈示される点滅刺激に注意を向けるように指示した．

2.2. EEG 計測

EEG 計測は 128ch のデジタル EEG システム (ActiveTwoSystem, BioSemi, Inc.) を用い，拡張 10-20 法に基づく全頭を覆うヘッドキャップを用いて合計 128 箇所計測を行い，サンプリング周波数 1024 Hz でコンピュータに取り込んだ．図 1 に使用した電極配置図を示す．CMS はリファレンス電極，DRL はグラウンド電極である．液晶画面と被験者との距離は 50 cm と設定した．液晶画面に呈示している点滅刺激に注意を向

けている時の EEG の計測を行った．実験は予備実験とメイン実験を行った．双方の実験共に，点滅刺激の点滅周波数は 12 Hz，スクリーン背景の輝度を 0.02cd/m^2 とそれぞれ設定した．以下予備実験，メイン実験の概要を記述する．

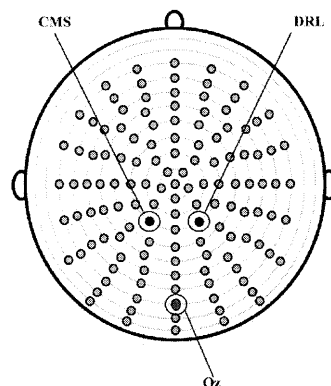


図 1 電極配置図

2.2.1 予備実験

予備実験は以下の手順で行い，そのプロトコルを図 2 に示した．

- I：液晶画面中央に点滅刺激を 6 s 間呈示した（図 2: ①）．被験者には呈示されている 12Hz の点滅刺激 [5] に注意を向けてもらった．[5] では 10Hz と 12Hz を点滅周波数として使用していたが α 波のピークである 10Hz は採用しなかった．点滅刺激には視野角 3° の円を用いた．
- II：点滅刺激を 6s 呈示後，液晶画面に何も表示しない期間を 4 s 間設けた（図 2: ②）．

輝度は 6cd/m^2 , 18cd/m^2 , 68cd/m^2 , 244cd/m^2 の 4 つを使用し，I ～ II を 20 試行繰り返すことで 1 セットとした．輝度は目視により明らかに輝度変化が識別可能な 4 つを選択した．1 セットあたり各輝度の点滅刺激を 5 回ずつ無作為に呈示し，実験は全部で 10 セット行った．

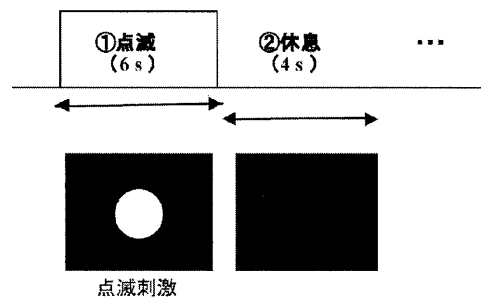


図 2. 予備実験プロトコル（1 試行）
（輝度 6cd/m^2 , 18cd/m^2 , 68cd/m^2 , 244cd/m^2 を使用）

2.2.2 メイン実験

メイン実験は以下の手順で行い、そのプロトコールを図3に示した。

- I：液晶画面中央に固視点を呈示し、そこに視野角約 2.5° の点滅視覚刺激（12Hz）を6.25s間呈示した（図3:①）。被験者には呈示されている点滅刺激に注意を向けてもらった。
- II：画面中央に固視点のみを呈示する期間を $2 \text{ s} \pm 0.5 \text{ s}$ 間設けた（図3:②）。

I～IIを12試行繰り返すことで1セットとした。予備実験で計測されたEEGを解析した際にSSVEPの振幅が最大・最小であった2種類の輝度を図3のように組み合わせ、12Hzとした点滅刺激を用いた。実験は全部で6セット行った。

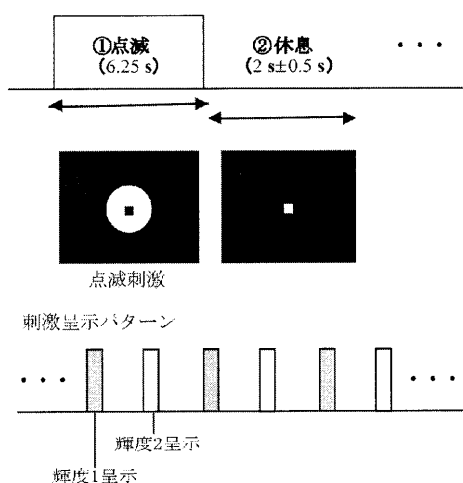


図3 メイン実験プロトコール&刺激パターン（1試行）

3. 解析

解析はMATLAB2010aを用いて行った。

3.1. 予備実験

予備実験データの解析では図3のOz電極での計測データを使用した。解析フローチャートを図4に示す。

計測されたEEGに対して、刺激呈示から1～5sの4s間を解析区間とした。次に、電源周波数成分（60Hz）などの高周波成分や直流成分（0Hz近傍）を落とすために4～40Hzのバンドパスフィルタ（BPF）を適用した。BPFは常に安定であるという長所を持つ有限インパルス応答フィルタ（FIRフィルタ）を使用した。

BPFを適用した後、4つの輝度の点滅刺激それぞれを呈示した際の時系列データにクラス分けした。そして、クラス分け後の時系列データに対して高速フーリエ変換（FFT）を適用し、周波数スペクトルを各輝度

で算出した。算出された周波数スペクトルを全試行間で平均した。点滅刺激の周波数帯である12Hzの振幅値の比較を輝度間で行い、振幅が最大の輝度、最小の輝度を選択した。

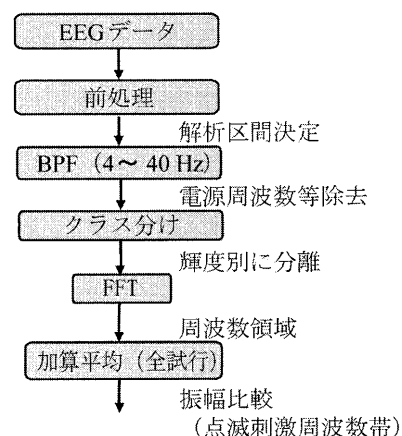


図4 予備実験データ解析のフローチャート

3.2. メイン実験

予備実験と同様に、Oz電極での計測データを解析で使った。メイン実験の解析フローチャートを図5に示す。

まず、サンプリング周波数1024Hzで取り込んだ時系列データを3072Hzにリサンプリングした。サンプリング周波数変換後、通過域1～55HzのBPFを施し、刺激呈示から0.5～5.75sの5.25s間を解析区間とした。そして、各解析区間に対してFFTを適用することで周波数スペクトルを算出し、算出された周波数スペクトルを全試行間で平均した。

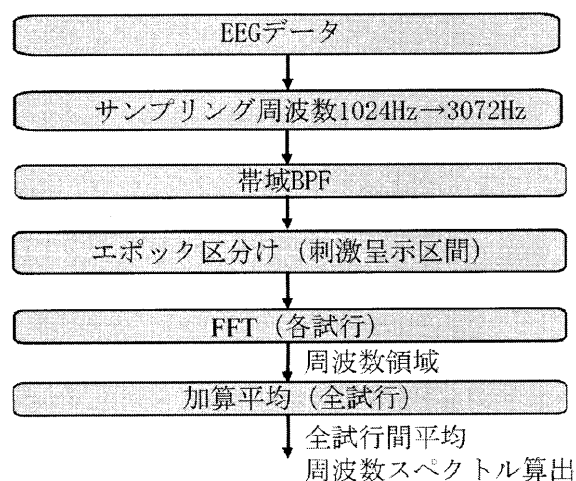


図5 メイン実験データ解析のフローチャート1

4. 結果

4.1. 予備実験

予備実験の結果の一部を図 6 に示した。

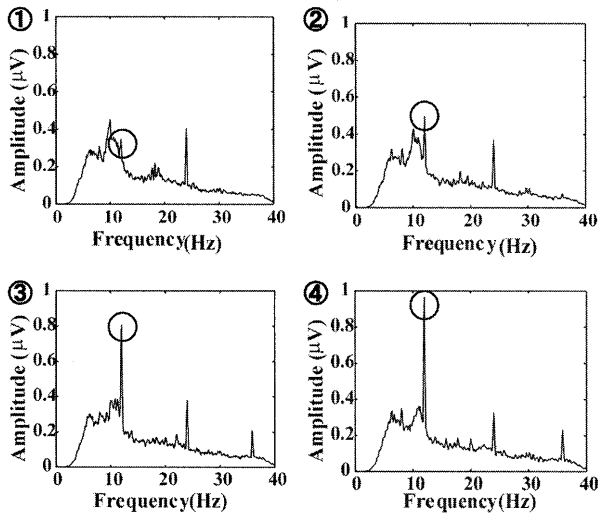


図 6 全試行間で平均した周波数スペクトル(被験者 1)

(① 6cd/m^2 , ② 18cd/m^2 , ③ 68cd/m^2 , ④ 244cd/m^2)

図 6 は被験者 1 の解析結果である。全試行間で平均した周波数スペクトルを各輝度別に示したものである。点滅周波数である 12Hz の振幅を輝度別に調査すると(各グラフの○印)、輝度が一番大きい場合(244cd/m^2)の振幅が最大で、輝度が一番小さい場合(6cd/m^2)の振幅が最小であった。被験者 1 の場合は、メイン実験では 6cd/m^2 と 244cd/m^2 の輝度を使用して実験を行った。表 1 に各被験者において振幅が最大・最小となった輝度を載せた。

表 1 被験者毎の選択輝度

	最小振幅値の輝度 (cd/m^2)	最大振幅値の輝度 (cd/m^2)
被験者1	6	244
被験者2	6	18
被験者3	244	18
被験者4	6	244
被験者5	6	244
被験者6	6	244

表 1 より、輝度が最大の点滅刺激により誘発される SSVEP の振幅が必ずしも最大になるとは限らないことが判明した。最も SSVEP の振幅が大きくなる輝度が被験者毎に存在することが分かった。又、被験者 1～3

については予備実験を 2 日行った(2 日とも同じ実験である)が、得られた結果が両日ともに同じ傾向、つまり、SSVEP の振幅が最大の輝度と最小の輝度は同じであった。この結果から、輝度の異なる点滅刺激を与えた際の SSVEP の振幅には日を跨ぐ再現性が存在すると考えられた。仮に BMI で輝度情報を用いる際、予め最適な輝度を取得しておけば常にその輝度を用いても問題ないと考えられる。

4.2. メイン実験

メイン実験の結果の一部を図 7 に示した。図 7 は被験者 2 の全試行間で平均した周波数スペクトルを示す。

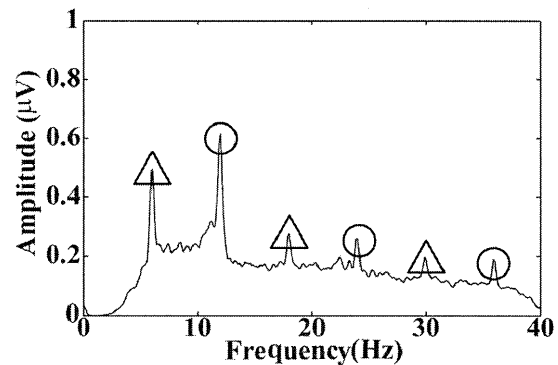


図 7 全試行間で平均した周波数スペクトル(被験者 2)

図 7 より、点滅周波数成分の基本波や高調波(図 7○印)にスペクトルのピークが確認されただけでなく、点滅周波数(12Hz)の半分の 6Hz の周波数成分の基本波や高調波(図 7△印)でもスペクトルのピークが確認された。この傾向は他の被験者でも振幅の大小には個人差はあるが、全被験者で同じ傾向が見られた。

5. 検討

メイン実験の全試行間で平均した周波数スペクトルは、点滅周波数成分の基本波や高調波の他にも、点滅周波数(12Hz)の半分の値(6Hz)の周波数成分の基本波や高調波のスペクトルのピークも確認される結果となった。この解析結果に対する検討を行った。

まず、全試行間で平均した周波数スペクトルにて得られた 6Hz とその高調波のピークについて検討するため、全被験者において、2 つの輝度をランダムに呈示(図 8、試行間での輝度の呈示順序は一定)した際の EEG の計測を行い、解析した。実験プロトコルとセット数は全てメイン実験と同様に設定した。被験者 2 における、全試行間で平均した周波数スペクトルを図 9 に載せた。

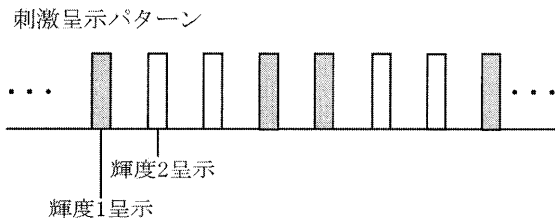


図 8 点滅パターン (ランダム輝度呈示)

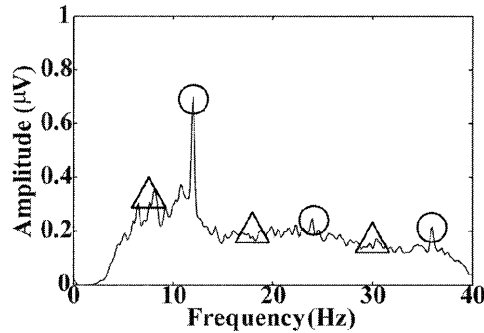
図 9 試行間で加算平均した周波数スペクトル
(ランダム点滅, 被験者 2)

図 9 より, 点滅周波数成分の基本波と高調波に (図 9○印) スペクトルのピークが確認されたが点滅周波数の半分の 6Hz の周波数成分の基本波や高調波 (図 7△印) ではスペクトルのピークが確認されなかった. この結果は, 全被験者で同様であった. メイン刺激で得られた 6Hz とその高調波のピークは, 2 つ輝度を交互に呈示したことにより片方の輝度が点灯, もう片方の輝度が消灯として捉えられ, 擬似的に誘発されたと考えられる (図 10). 図 10 の t は実際の 12Hz の点滅周期を, T は擬似的な 6Hz の点滅周期をそれぞれ示す. 次に, 時間領域における検討を行った. 図 11 に解析フローチャートを載せた. サンプル周波数変換後, 点滅刺激周波数の半分の 6Hz とその高調波の 6 つの狭帯域の BPF を施した. それぞれの中心周波数は 6, 12, 18, 24, 30, 36 Hz で, 帯域幅は 1Hz とした. 刺激呈示から 0.5~5.75s の 5.25s 間を解析区間とし, 解析区間を全試行間で加算平均した.

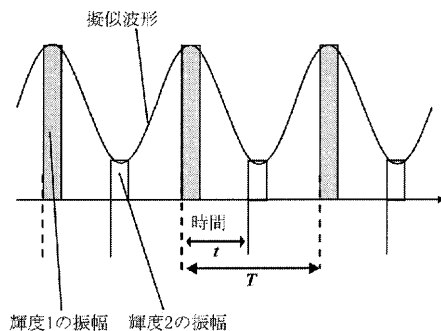


図 10 SSVEP の振幅と擬似波形の関係

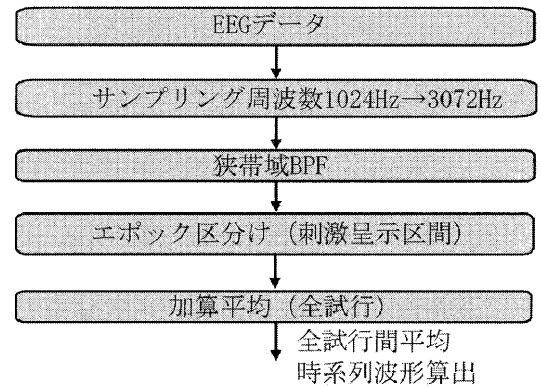


図 11 メイン実験データ解析のフローチャート 2

図 12 に, 1~55Hz の BPF を適用した EEG の全試行間の加算平均波形 (以下平均データ A) と 6Hz と 12Hz の狭帯域 BPF を適用した EEG の両周波数間・全試行間の加算平均波形 (以下平均データ B) と 6, 12, 18, 24, 30, 36Hz の狭帯域 BPF を適用した EEG の全周波数間・全試行間の加算平均波形 (以下平均データ C) との比較を示した. 図 12 の実線が平均データ A の, 鎖線が平均データ B の, 破線が平均データ C の結果をそれぞれ示す.

図 12 より, 平均データ B を用いることで, マクロな部分の平均データ A (SSVEP 波形) の構成が可能であることが判明した. さらにミクロな部分を構成するためには平均データ C のように, 12Hz 以上の高調波を用いることでそれが可能であることも判明した.

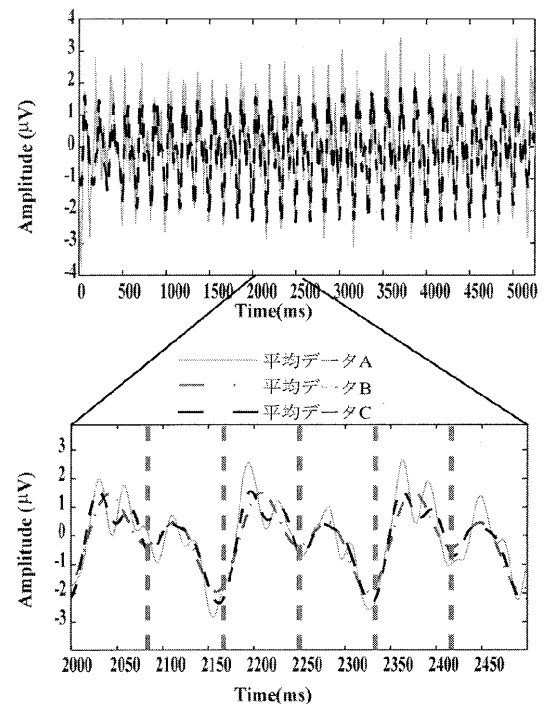


図 12 全試行間平均時系列波形

図 12 の 3 つの波形について、点滅 6 周期分（暗→明→暗→明→暗→明：暗…予備実験で SSVEP の振幅が最小の輝度、明…予備実験で SSVEP の振幅が最大の輝度）を順に切り出して加算平均した波形を図 13 に示す。図 13 より、暗の区間と明の区間で波形に違いが見られ、全試行間で平均したデータでは、注意を向けた輝度の違いによる EEG の違いが見られた。

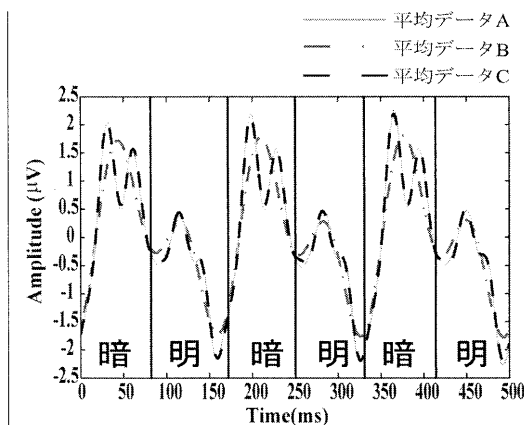


図 13 全試行間で平均した時系列波形
(点滅刺激 6 周期分)

6. むすび

本研究では SSVEP に基づく BMI への実用に向けた SSVEP の符号化に関する基礎的検討として、異なる輝度の点滅刺激に注意を向けた際の EEG から、注意を向けた輝度の点滅刺激を判定できるか否かを調べた。

予備実験の結果より、必ずしも輝度が最大の刺激による SSVEP の振幅が最大になるとは限らず、個人ごとに最適な輝度が存在することが判明した。メイン実験の結果より、異なる輝度を組み合わせることで実際に用いた点滅周波数以外の周波数帯の成分が SSVEP の振幅として生じるという新たな知見が得られた。さらに多くの輝度を用いることでより多くの周波数帯の成分が SSVEP として生じる可能性も考えられる。また、複数の狭帯域 BPF をかけたデータを重畳したデータを用いることによって SSVEP 波形の構成が可能であることが分かった。輝度による SSVEP の振幅の有意差が確認できたことから、BMI へ向けて輝度情報を用いた点滅刺激の符号化に今後取り組んでいく。

さらに、BMI での実用を考えると、単試行のデータに対して輝度毎に SSVEP の変化を識別できることが望ましい。本研究では、全試行間平均したデータで輝度別に EEG の有意差を確認することができたので、今後は、単試行での輝度による SSVEP の変化を識別することを目指す。今回、基礎的検討と位置づけて解析では Oz 電極のみを使用した。今後は解析で使用するチャ

ネル数を増やして検討を行なっていく。さらには、主成分分析 (PCA) や独立成分分析 (ICA) を用いた信号分離を用いた輝度毎に異なる SSVEP の識別にも焦点をあてて研究を進めていく。

文 献

- [1] J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, T. M. Vaughan, "Brain-computer interfaces for communication and control" *Clinical neurophysiology*, vol.113, no.6, pp.767-791 (2002)
- [2] M. Cheng, X. R. Gao, S.K. Gao, and D. Xu, "Design and implementation of a brain-computer interface with high transfer rates" *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.49, no.10, pp.1181-1186 (2002)
- [3] Y. J. Wang, R. P. Wang, X. R. Gao, B. Hong, and S. K. Gao, "A practical VEP-based brain-computer interface" *IEEE Trans. Neural Syst.Rehabil. Eng.*, vol.14, no.2, pp.234-239 (2006)
- [4] Y. Wang, X. Gao, B. Hong, C. Jia, and S. Gao, "Brain-computer interfaces based on visual evoked potentials: Feasibility of practical system designs," *IEEE Eng. Med. Biol. Mag.*, vol.27, no.5, pp.64-71 (2008)
- [5] C. Jia, X. Gao, B. Hong, S. Gao, "Frequency and phase mixed coding in SSVEP-Based Brain-Computer Interface" *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol.58, no.1, pp.200-206 (2011)
- [6] D.S. Nicol, R. Hamilton, U. Shahani, D.L. McCulloch, "Monocular and binocular steady-state flicker VEPs: frequency-response functions to sinusoidal and square-wave luminance modulation" *Documenta ophthalmologica*, vol.122, pp.63-70 (2011)
- [7] 吉田 倫幸, "正弦波輝度変調に対する視覚誘発電位とチラツキ・融合現象" 筑波大学心理学研究, vol.9, pp.15-19 (1987)