

光刺激への意識による脳波の変化を用いた意思の計測

SSVEP-based BCI in Terms of EEG Change Associated with Mental Focusing to Photic Stimuli

○ 西藤聖二 (山口大) 黒田隆彦 (山口大) 田中正吾 (山口大)

Seiji NISHIFUJI, Takahiko KURODA, Shogo TANAKA, Yamaguchi University

Abstract: Thousands of laboratories are developing a brain computer interface, but each study has some issues to solve due to weakness of EEG signal. The present study takes notice of an interesting phenomenon that EEG synchronized with repetitive frequency of flicker stimuli, namely, SSVEP (steady-state visually evoked potential), with eyes closed, is affected by mental focusing to the stimuli. The SSVEP with eyes closed not only has an advantage in signal-to-noise ratio but also may allow disabilities who cannot control (open/close) their eyes to use the BCI system. The amplitude of the occipital SSVEP in 10 out of 11 healthy adults was found to be reduced by more than 20 % in the mental concentration to the flicker stimuli under the conditions of flicker frequency of 10 Hz and stimulus intensity of 5 lx. This result suggests the possibility of SSVEP with eyes closed in terms of the mental focus.

Key Words: Electroencephalogram, Steady State Visually Evoked Potential, Brain Computer Interface, Mental Concentration, Wellbeing Science, Life Support, Welfare Engineering

1. はじめに

近年、脳波を用いたブレイン・コンピュータ・インターフェース(brain computer interface; BCI)の研究が、筋萎縮性側索硬化症(amyotrophic lateral sclerosis; ALS)や脊髄損傷による重度身障者のコミュニケーションツールのみならず、ゲームやサービスロボット・家電の遠隔操作等への広範な応用を念頭に、盛んに行われている。BCIに用いる脳波の成分としては、運動および運動イメージや運動準備に伴い中心溝付近に出現する μ リズム⁽¹⁾、オドボール課題で対象刺激への認知に伴って現れるP300等の事象関連電位⁽²⁾や、運動や認知活動に伴って中心部から観測されるslow cortical potentialと呼ばれる数秒のスケールで緩やかに変化する成分⁽³⁾⁽⁴⁾などがあるが、信号レベルが低いことや定常性に欠けるという問題点のために加算平均等の雑音処理が必須であり、BCIの精度や速度の面で大きな課題が残されている。

一方、脳波には、周期的に点滅する光刺激(閃光刺激)に周波数同調する性質がある。この同調脳波は、閃光刺激の周波数と同一およびその高調波成分として定義されており、SSVEP(steady-state visually evoked potential)と呼ばれている⁽⁵⁾。SSVEPは、刺激周波数が1~80Hzの広い範囲で観測されるが、10Hzと20Hz付近で大きな振幅応答を示すような刺激周波数特性が知られている。これらの刺激条件では、SSVEPの振幅は安静閉眼時の α 波と同レベル以上になることもあり、信号対雑音比の点で他の脳波成分よりもBCIに有利であると言える。さらに、SSVEPは数秒以上安定して出現するため、定常性の点でも優れている。

このため、SSVEPを用いたBCIについても様々な研究が進められており⁽⁶⁾⁽⁷⁾、研究用の製品も市販されている。SSVEPベースのBCIのほとんどが、空間的に配置された複数の点滅周波数の異なるアイコン(チェッカーボックス、画像や文字など)一つを注視することにより、注視したアイコンの点滅周波数に同調するSSVEPの振幅が大きくなることを利用している。当然ながら、この種のシステムは開眼でかつ視線が光源に移動することが前提である。視線の移動が困難な障がい者でも使用できるように、2種類の異なるパターンや色のチェッカーボックスを重ねて提示する方法も検討されているが⁽⁸⁾⁽⁹⁾、少なくとも開眼は必須で

あり、目の開閉に難がある場合は使用できない。さらに、目の開閉が可能であっても、開眼状態で点滅するアイコンを見つめると不快になることがあり、光過敏性てんかんを誘発する危険もある。これらのことから、閉眼状態で、かつ比較的弱い光でも使用可能なBCIの開発が意思を推定できるシステムが求められている。

我々は、これまでSSVEPの基礎特性について明らかにしてきた⁽¹⁰⁾が、最近、周期閃光刺激に同調する閉眼脳波が、刺激への意識の持ち方によって変化する現象を見出し、閉眼で視線移動が不要なBCIの候補になり得ると考えた今回は、単一の点滅光源を閉眼状態の被験者に提示したときに、刺激に対する意識の集中の有無がSSVEPの振幅に与える影響について実験・解析を行ったので、報告する。

2. 方法

2-1 測定

21~24歳の男性健常者11名を対象として、電磁シールドルーム内で測定を行った。脳波は、国際10-20電極配置法に従って、頭部全体の13部位から両耳朶を連結して基準電極とした単極導出法により導出した(Fig.1)。また、眼球運動を測定するために、両眼横(外側)に電極を1つ設置して基準電極との電位差を測定した。導出した信号は脳波計(日本光電製EEG-5532、ゲイン86dB)で増幅後、PCで200 Hz/ch、12ビットの分解能で離散値化した。実験に際しては、ヘルシンキ宣言の主旨に則ってあらかじめ被験者に文書による説明を行い、署名による実験の同意を得た。閃光刺激の照射に際しては被験者の状態に十分配慮し、点滅によりわずかな不快感を訴えた場合でも、即座に測定を中止した。

閃光刺激には赤色LED(OptoSpplly, OSHR516A-QR、半値角30度、波長625nm)2個を用いて、被験者の左右眼正面8cmの位置に1個ずつ配置した。刺激照度は、被験者の眼前の位置で照度計(トプコン、IM-5)により測定した。

実験は各試行20sで、Table 1に示す順序で行った。最初の2回は安静閉眼時脳波を測定し、No.3から刺激を与えた状態での閉眼脳波の測定を行っている。各刺激周波数および刺激照度の条件の下で、“Non-focus”(刺激を過度に意識せず、受け止める)と“Focus”(刺激に意識を集中させる)

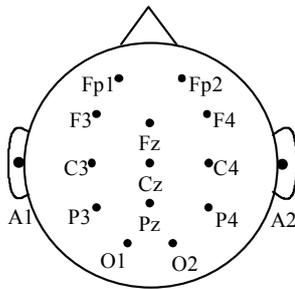


Fig.1 Electrode arrangement (10-20 system)

Table 1 Experimental conditions

No.	Frequency [Hz]	Intensity [lx]	Request
1,2	N/A	N/A	Rest
3,4	10	3	Non-focus
5,6	10	3	Focus
7,8	14	3	Non-focus
9,10	14	3	Focus
11,12	10	5	Non-focus
13,14	10	5	Focus
15,16	14	5	Non-focus
17,18	14	5	Focus

を交互に被験者に指示した。この際、”Focus”の意識集中時には眼球が LED の位置を追って動くことがないか、眼振図を調べ、視線の移動がほとんどないことを確認した。

なお、刺激周波数 3 lx の条件では、被験者によっては閉眼状態で点滅を確認できない場合があり、被験者全体の応答も弱かった。また、刺激周波数が 14 Hz の場合も、前述した SSVEP の周波数応答特性を反映して小さな振幅の SSVEP しか賦活されなかった。そこで、以下、本稿では刺激周波数 10 Hz、刺激照度 5 lx の条件で得られた結果 (Table 1 の No.11-14) について述べ、安静時 (同 No.1,2) との関係について検討する。

2-2 解析

離散フーリエ変換 (Discrete Fourier Transform; DFT) を用いて振幅スペクトルを推定し、刺激周波数 10 Hz に同調する SSVEP の振幅を求めた。このとき、解析対象とする脳波記録は、各試行で得られた 20 s の脳波記録の内、刺激に対する過渡応答が含まれている恐れのある最初の 3 s 間と、刺激応答が鈍化する可能性のある最後の 7 s 間を除いた、3-13s の 10 s 間とした。本来、SSVEP には刺激周波数の整数倍に当たる高調波も含まれるが、被験者によっては高調波がかなり小さい場合もあるため、今回は基本周波数である刺激周波数と一致する SSVEP の振幅を評価した。

Fig. 2 には刺激周波数 10 Hz、刺激照度 5 lx の条件における左後頭部 (O₁) 脳波の振幅スペクトルの例が示されている。(a) の刺激に意識集中しない場合では、刺激周波数の 10 Hz で鋭いピークが表れており、SSVEP によるものと推定される (この被験者の安静時脳波の 10 Hz の振幅は、遥かに小さい)。特に、刺激周波数両脇のスペクトル成分はくぼみが生じており、脳波が刺激に引き込まれる「引き込み」現象が観測されている。一方、(b) の意識集中時では刺激周波数で他の周波数よりも大きなピークは見られるものの、ピーク値自体は (a) よりも大幅に減少しており、刺激に意識を集中させることにより、むしろ SSVEP が抑制される結果になっている。そこで、本研究では、刺激に対する意識集中

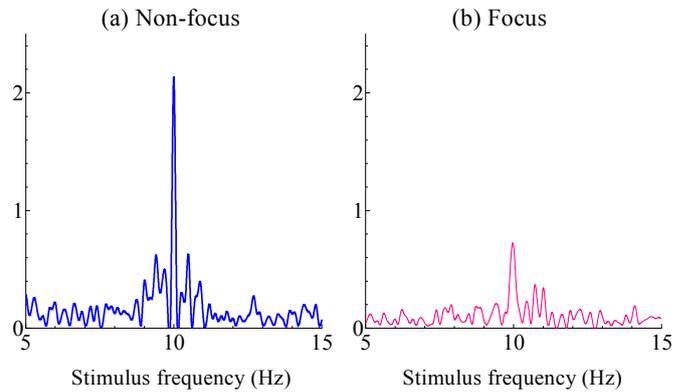


Fig.2 DFT Amplitude spectrum at O1

による SSVEP 振幅への影響を以下の振幅比 R で評価した。

$$R = \frac{A_{13} + A_{14}}{A_{11} + A_{12}}$$

ここで、 A_i は試行 No. i における SSVEP 振幅であり、No.11, 12 は刺激に意識集中しない試行、No.13, 14 は刺激に意識を集中する試行であるので、 R は (意識集中時振幅の和) / (意識非集中時振幅の和) を表す。

また、No.11-14 の 4 試行の SSVEP 振幅について、各試行の大きさをこの 4 試行の和で正規化したものも評価に用いた。

$$A_{ni} = \frac{A_i}{\sum_{j=11}^{14} A_j} \quad (i=11, \dots, 14)$$

3. 結果および検討

3-1 部位差

Fig. 3 に左頭部縦断線上における振幅比 R の 11 名の被験者平均を標準誤差と共に示す。すべての部位で被験者平均は 1 を下回り、特に C3~O2 の中心部~後頭部では、 R の平均が 0.7 を下回り、標準誤差も前頭領域より小さくなっていることが分かる。Table 2 には各被験者 (A~K) の振幅比 R を部位別に示している。ほとんどの被験者は多くの部位で意識集中による SSVEP の抑制を示しているが、被験者によっては部位差が大きな場合も見受けられる (例えば被験者 B, G, J)。また、被験者 J のように意識集中により SSVEP 振幅が多くの部位で増加する者もあり、BCI のシステムを開発する上で、留意すべき点と言える。ただし、後頭部 O₁ については、11 名中 10 名が R の値が 0.8 以下で 20% 以上の減少率を示しており、Fig. 2 の結果と対応する。

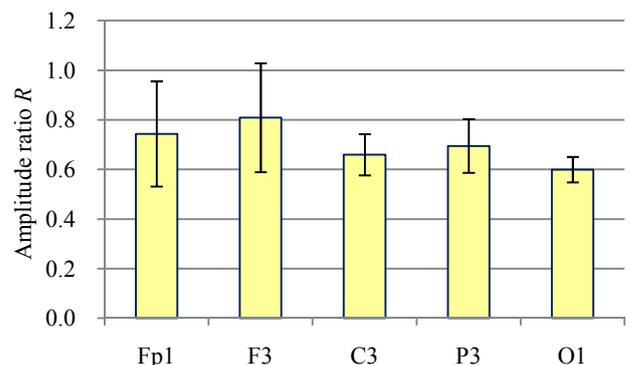


Fig. 3 Average amplitude ratio R across subjects

Table 2 Amplitude ratios for 11 subjects

	Fp1	F3	C3	P3	O1
A	0.55	0.62	0.46	0.32	0.61
B	0.83	0.84	0.54	1.16	0.94
C	0.73	0.70	0.68	0.53	0.52
D	0.38	0.39	0.43	0.34	0.48
E	0.49	0.57	0.58	0.39	0.72
F	0.90	0.72	0.92	0.73	0.58
G	0.37	0.76	0.67	1.33	0.57
H	0.29	0.33	0.37	0.45	0.26
I	0.38	0.43	0.44	0.45	0.57
J	2.77	2.95	1.29	0.96	0.73
K	0.49	0.58	0.88	0.98	0.62

SSVEP の発現機序は明らかになっていない部分も多いが、一般に視覚刺激によって誘発された網膜の興奮性活動は、視神経から外側膝状体を介して大脳皮質の視覚野に投射される。ここで、今回用いた空間パターンのない単純な点滅刺激を入力とする場合、比較的大きな網膜神経節細胞が関与する M 系の経路を通るため、外側膝状体以外にも視床枕核、上丘を介して視覚連合野や一次体性感覚野、前頭前野等の広い領域に投射され、SSVEP として頭皮上に現れるとの仮説が提案されている⁽⁴⁾。実際に、Fig. 3 でも広い領域で比較の明瞭な SSVEP の変化が観測されている。ただし、視覚野のある後頭部で最も明瞭な変化が現れているため、以下では、左後頭部(O₁) に焦点を当てて検討を進める。

3-2 振幅変化

Fig. 4 には正規化した SSVEP 振幅 A_n の試行ごとの被験者平均が標準誤差と共に示されている。刺激集中時(Focus13, Focus14)の正規化振幅は、いずれも刺激非集中時(Non-focus11, Non-focus12)の正規化振幅を下回っており、刺激集中による SSVEP 振幅の抑制が再現されていることが分かる。参考のため、繰り返しのある一元配置分散分析の結果、 $F(3,10) = 6.5, p < 0.01$ で主効果が有意となった。引き続き対応のある t 検定を用いて条件群間の平均値の比較を行ったところ、Fig.4 に示すように非集中時 Non-focus11 と集中時 Focus13、で、また、非集中時 Non-focus12 と集中時 Focus13, 14 のそれぞれで $p < 0.01$ の有意差が観測された。また、正規化しない SSVEP 振幅を用いて Friedman の順位検定を行った場合でも $\chi^2_3 = 14.2, p < 0.01$ となり、Wilcoxon の符号付き順位和検定により、上記と同じ群の組

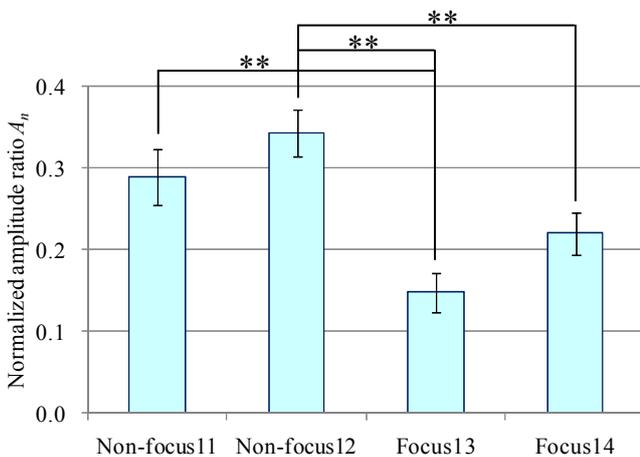


Fig. 4 Average of normalized SSVEP amplitude across subjects

み合わせで有意差を得た (ただし、Non-focus11-Focus13, Non-focus12-Focus14 で $p < 0.05$ 、Non-focus12-Focus13 で $p < 0.01$)。

ただし、非集中、集中のいずれの場合も、1 回目(Non-focus11, Focus13)よりも 2 回目(Non-focus12, Focus14)の振幅が大きくなっており、この刺激条件での最初の試行である 1 回目の非集中(Non-focus11)と最後の 2 回目の集中(Focus14)の 2 群の正規化振幅の平均値に有意差は見いだせなかった。従って、集中による SSVEP 振幅の抑制現象の再現性については、集中と非集中を多数回繰り返す実験を行い、さらに検証を進める必要がある。

3-3 安静時 α 波との関係

今回用いた閃光刺激の周波数は 10 Hz であり、安静閉眼時の脳波の主成分である α 波(8~13 Hz)のほぼ中央の値である。多くの被験者において、安静閉眼時の脳波スペクトルには 10 Hz 付近に比較的大きなピークが現れることが多いので、今回の刺激条件では、 α 波と SSVEP の関連も疑われる。そこで、Fig. 5 に安静時 α 波帯域の振幅の積算値と振幅比 R の関係を示す(被験者 1 名につき 1 点のプロット)。図より、両者の相関は不明瞭であるが、安静時 α 波の振幅積算値が比較的小さい(横軸の値が 13 以下)被験者の方が、振幅比 R が 0.6 以下の場合が多い。また、安静時 α 波の振幅積算値が極端に大きい被験者(Table 2 における被験者 B)で R が大きく、意識集中による振幅抑制効果が表れにくくなっている。

このように安静時 α 波が強く表れる被験者の場合、意識非集中時に α 波が残存して SSVEP が小さくなる一方で、意識集中時に比較的大きな SSVEP が現れていた。これまでの我々の経験では、 α 波の大きな被験者の場合、刺激に対して引き込みにくいことがある。したがって、本研究の手法で SSVEP ベースの BCI を開発する上で、 α 波の振幅特性が BCI の判定精度に与える可能性がある。

意識集中による SSVEP 振幅抑制の原因は不明であるが、刺激周波数が α 波帯域内にあることや、上記の結果をあわせると、 α 波が暗算や精神活動等で抑制されるのと同様な現象が SSVEP でも生じていることが考えられる。すなわち、刺激へ意識を集中させることにより一種の精神的緊張(ストレス)が生まれ、SSVEP の発現を阻害する結果につながっていることが推測される。例えば、Fig. 2 に示した被験者の場合、安静時の DFT 振幅スペクトルは 11 Hz 付近に大きなピークを示すが、刺激照射(意識非集中)に伴い、Fig. 2(a)のように 10 Hz への引き込みが起こって周波数シフト

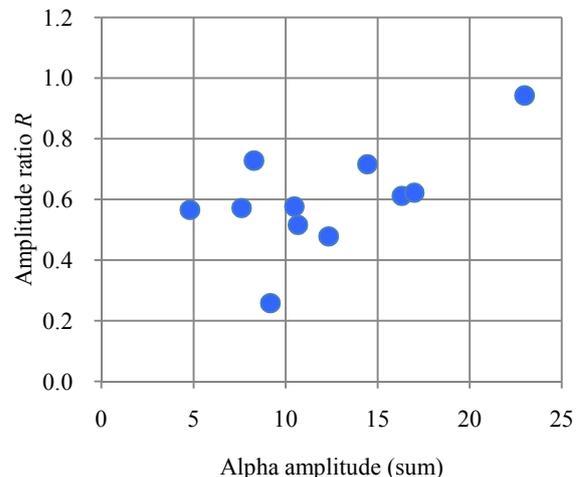


Fig. 5 Alpha amplitude accumulated and amplitude ratio R

が生じ、さらに刺激を意識することによって、本来 α 波の減衰が起こるところが SSVEP の減衰にとって代わられていることも考えられる。SSVEP の周波数特性において、刺激周波数 10 Hz 付近で SSVEP の振幅が最大になることから、 α 波の SSVEP への寄与の大きさが窺われる。

4. おわりに

本研究では、閉眼状態で眼球を動かさずに使用できる SSVEP-BCI の可能性を探るために、意識集中による SSVEP の振幅変化を調べた。その結果、SSVEP の振幅は意識を集中させると、非集中時に比べて多くの部位で平均 20% 以上減少し、特に後頭部では 11 名中 10 名で 20% 以上減少すると共に被験者平均で約 40% の振幅低下がみられた。この現象の再現性については早急に確認する必要があるが、閉眼状態でも意思を表示するシステムの可能性があることが分かった。今後は、意思の判定方法の検討および判定に要する脳波データの時間長（今回は 10 s）の短縮化を試みる予定である。

参考文献

- (1) J. R. Wolpaw, D. J. McFarland, G. W. Neat and C. A. Forneris, An EEG-based brain-computer interface for cursor control, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol. 78, pp. 252-259, 1991.
- (2) L. A. Farewell and E. Donchin, Taking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials, *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.*, vol. 70, pp. 512-523, 1988.
- (3) A. Kubler, et al., The thought translation device: a neurophysiological approach to communication in total motor paralysis, *Exp. Brain Res.*, vol. 124, pp. 223-232, 1999.
- (4) A. Kubler and N. Birbaumer, Brain-computer interfaces and communication in paralysis: Extinction of goal directed thinking in completely paralysed patients?, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 119, pp. 2658-2666, 2008.
- (5) R. B. Silberstein, Steady-state visually evoked potentials, brain resonance, and cognitive processes”, in P. L. Nunez (ed.), *Neocortical Dynamics and EEG Rhythms*, Oxford University Press, New York, pp. 272-303, 1995.
- (6) E. Sutter, The brain response interface: communication through visually-induced electrical brain responses, *J. Microcomput. Appl.*, vol. 15, pp. 31-45, 1992.
- (7) M. Middendorf, G. McMillan, G. Calhoun and K. S. Jones, Brain-computer interfaces based on the steady-state visual-evoked response, *IEEE Trans. Rehabil. Eng.*, vol. 8, no.2, pp. 211-214, 2000.
- (8) B. Z. Allison, et. al., Towards an independent brain-computer interface using steady state visual evoked potentials, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 119, p. 399-408, 2008.
- (9) M. A. Lopez-Gordo, A. Prieto, F. Pelayo and C. Morillas, Customized stimulation enhances performances of independent binary SSVEP-BCIs, *Clin. Neurophysiol.*, vol. 122, p. 128-133, 2011.
- (10) S. Nishifuji, Stimulus frequency dependence of phase structure of steady-state visually evoked potential, *Int. J. Psychophysiol.*, vol. 69, no. 3, p. 233, 2008.