

内発的な視覚的注意による定常的視覚誘発電位の変調効果

柏瀬 啓起*・松宮 一道***・栗木 一郎***・塩入 諭***

* 東北大学大学院情報科学研究科, ** 東北大学電気通信研究所

〒 980-8577 宮城県仙台市青葉区片平 2 丁目 1-1

1. 背景

視覚的注意とは、人間に必要な視覚情報を選択し、重点的に処理するための機能である。周辺に突然光る刺激などがあると、自分の意志とは関係なく注意がそちらに向く。そのような注意を外発的注意と呼ぶ。それに対し、観察者の意志によって制御される注意は内発的注意と呼ばれている。実験的に内発的注意の移動を制御する場合は、矢印刺激などを用いて注意を向けるべき位置や物体を指示する。外発的注意と内発的注意は、その移動の時間特性を含めて異なる特性を示すことが心理物理学的に示されてきた^{1,2)}。しかし、心理物理学的に測定された時間特性は、観察者の最終的な出力を反映した間接的なものであるため、注意による信号変調の変化を直接観察することができない。そこで、注意の移動を連続的かつ直接的に測定することができる指標が望まれる。本研究では、定常的視覚誘発電位 (Steady-State Visual Evoked Potential: SSVEP) と呼ばれる生理指標を用いて、内発的注意の移動の時間特性を測定することを試みる。

SSVEP とは周期的に点滅する刺激 (フリッカ刺激) に誘発される脳波成分のことであり、フリッカ刺激と同じ周波数を持つ電位が誘発される³⁾。フリッカ刺激に注意を向けたときはそうでない時と比べて SSVEP の振幅量が增大することを利用して⁴⁾、Müller ら (1998) は、手がかり刺激呈示後の時間の関数として SSVEP 成分

の振幅量変化を解析した⁵⁾。その結果から、彼らは視野の中心から偏心度 5.0° のフリッカ刺激へ内発的注意が移動する時間をおよそ 450-650 ms と推定した。一方で、Kim ら (2007) は注意を向けたフリッカ刺激に誘発される SSVEP の位相が試行間で同期することを報告した⁶⁾。Kim ら (2007) は、注意を向けることでフリッカに応答する細胞の同期発火が誘発され、SSVEP の位相がフリッカ刺激にロックすることにより位相同期が生じると考察しており、SSVEP における位相同期情報が注意の重要な指標となることを示唆している。

Kim ら (2007) の研究は、注意の神経生理学的なメカニズムを考える上で重要な点を指摘するが、注意の移動の時間特性については検討されていない。また、振幅量の増大を報告した先行研究^{4,5)} で解析対象とされていたのは条件ごとに加算平均された波形データであったため、振幅量変化と位相同期度変化が混在していたと考えられる。本研究では、振幅量と位相同期度を区別し、位相同期度の変調がどのような時間特性を示し、それが振幅量の時間特性とどのように対応するかについて検討することを目的とする。

本研究では、内発的注意の移動に伴う、SSVEP の振幅量と位相同期度、および行動課題の遂行率の時間変化を測定し、脳内における神経活動の変調と行動指標で得られる注意の効果の時間的関係について検討した。

2. 実験

2.1. 被験者

正常な視力もしくは矯正視力を持つ成人5名(著者1名含む)が実験に参加した。

2.2. 実験装置

刺激は Matlab7.3.0 および ViSaGe (Cambridge Research Systems, U.K.) によって作成・制御され, CRT モニタ (SONY GDM-F520, frame rate: 120 Hz) に呈示された。脳波計測に日本光電製 Neurofax EEG-9000 (Ver. 05-71) が用いられ, 脳波データは 1000 Hz でサンプリングされた(高域遮断フィルタ: 120 Hz, 時定数: 0.3 s)。電極は国際 10-20 法に従って配置され(19 電極; 図 1), 参照電極は両耳朶からとった。観察距離は 50 cm であった。

2.3. 刺激

本実験で行われた試行の例を図 2a に示す。本研究では, 視野の中心に呈示される高速逐次視覚呈示 (Rapid Serial Visual Presentation: RSVP) 刺激および異なる時間周波数で点滅する 2 つのフリッカ刺激が用いられた。画面中央の RSVP 刺激を挟んで左右各視野に 1 つずつ同心円が呈示され(直径 5.2 deg, 偏心度 5.5 deg), 各々が異なる時間周波数で正弦波状に輝度変調された(21.0 または 28.0 Hz)。注意課題のために, 各々の同心円を構成する 4 つの円のうちランダムに選ばれた 1 つが 143 ms ごと(7.0 Hz)に黄色に変化した。

本研究では, 内発的注意を誘導するために矢印型の手がかり刺激を用いた。Müller らの研究(1998)や従来の心理物理学実験では突発的に呈示される手がかり刺激が用いられてきたが, 突発的に呈示される刺激の利用は, 外発的注意システムの駆動⁷⁾や刺激の突発的な呈示に応答する脳波への影響を考慮すると不適切であると考えられる。そこで, 本研究では矢印(手がかり)刺激を図 2b のような RSVP 系列の中に組み込んだ。図 2c の物体を構成する 9 本の線分のうち, ランダムに選択された 3 本が一定の更新頻度(5.0 Hz)で呈示され, 一試行の間に一度だけ

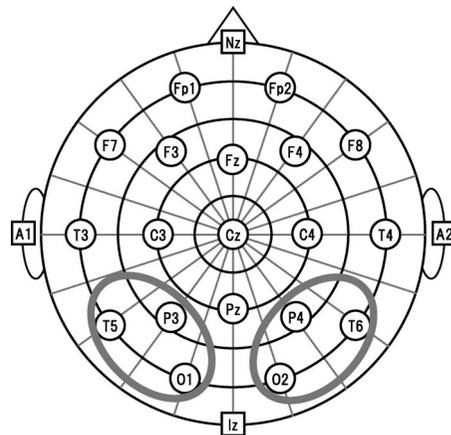


図 1 国際 10-20 法に基づく電極配置。円で囲まれた後頭部電極から得られた脳波データが解析された。

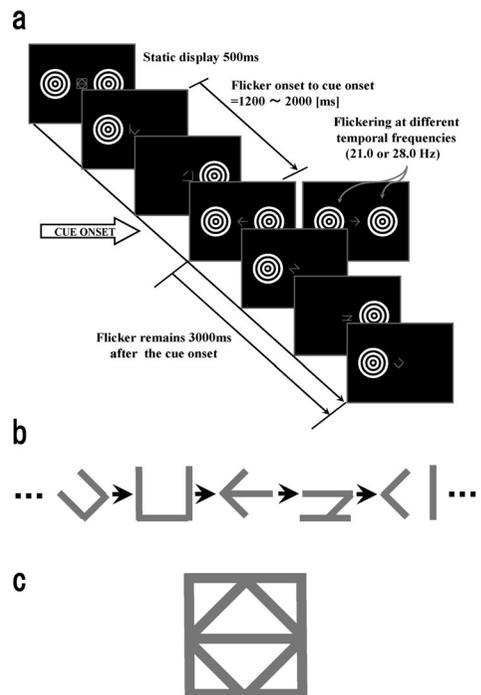


図 2 (a) 試行の流れの一例。(b) 本実験で用いた手がかり刺激の呈示方法。手がかり刺激(矢印)は RSVP 系列の中に組み込まれた。(c) RSVP 刺激の元となる刺激。

左右どちらかを指示する矢印に変化するように操作した(一辺 0.6 deg, 斜辺 0.4 deg)。このように一定周期で更新する図形を用いることによって, 手がかり刺激の突発的な呈示に伴う一

過性信号による誘発脳波への影響を抑制することができる。刺激の色は実際には暗い青色が用いられた。矢印刺激の呈示時に両フリッカ刺激は輝度位相0で同期した。

2.4. 手続き

被験者は画面中央にランダムに呈示される RSVP 刺激の中から矢印（手がかり）刺激を検出し、矢印の指示する方向に従って注意を移動するように指示された。手がかり刺激はフリッカ開始後 1200ms から 2000ms の間のランダムなタイミングで呈示された。RSVP 刺激の呈示時間は1つあたり 200ms であった。両視野に呈示された同心円は手がかり刺激の呈示後 3000ms 間フリッカを続け、被験者はその間、画面中央を固視したまま指示された側の同心円に注意を向けることが求められた。また、注意を向けた同心円の一番外側の円における色変化（黄色）をターゲットとして、被験者はターゲットが呈示される度にボタン押しで応答するように教示された。同心円の色変化は手がかり刺激呈示後 21 回（3.0s×7.0Hz）生じ、ターゲットはその 21 区間の中からランダムに選択された区間に呈示された。ターゲットが再び呈示されるまでの間には、別の円の色変化が2回以上挟まれた。ターゲットの出現数は区間および条件間で同数になるように調整された。

2.5. 解析

2.5.1. ターゲット検出率

行動指標による注意の効果を検討するためにターゲット検出率を算出した。ターゲット呈示後一定時間内（100–529ms）に応答があったものを「検出（hit）」として定義した。ターゲット検出率は、手がかり刺激呈示後に同じ区間で出現したターゲットの呈示総数に対する検出（hit）数の割合とした。

2.5.2. 振幅量と位相同期度

手がかり刺激呈示時より -1000ms から 3000ms の間に主に後頭部の電極（左半球：P3, O1, T5；右半球：P4, O2, T6）から得られた脳波データを対象に解析した（図1参照）。脳波測定時に水平眼電図（EOG）も同時に記録

し、解析時間内に $\pm 40\mu\text{V}$ 以上の眼電位を記録した試行は視線移動があったものとして解析から除外した⁸⁾。

各フリッカ刺激の周波数に対応する振幅量および位相情報を時間ごとに抽出するために、得られたデータに対して窓関数（コサイン・テーパ窓、非ゼロ区間 500ms）を局所的に乗算する短時間フーリエ変換を施した。本研究では、振幅量が位相同期度と混在するのを防ぐために、試行ごとの波形から振幅量を算出する。試行 m 、時間 t 、周波数成分 n におけるフーリエ係数を $F_m(t, n)$ とした場合、SSVEP の振幅量をフーリエ係数の絶対値として定義する。

$$Amplitude(t, n) = \frac{1}{T} \sum_{m=1}^T |F_m(t, n)|$$

ただし、 T は条件ごとの試行数を表す。また、位相同期度の指標として試行間位相同期度（Inter-Trial Phase Coherence: ITPC）を算出した。ITPC はフーリエ係数の複素単位ベクトル（位相を表す）を試行間で平均化することによって得られるベクトルの大きさとして定義する。ITPC は定義上、試行間の位相が完全に同期した場合に 1 を、完全に非同期である場合に 0 をとる^{6,9)}。

$$ITPC(t, n) = \left| \frac{1}{T} \sum_{m=1}^T \frac{F_m(t, n)}{|F_m(t, n)|} \right|$$

3. 実験結果と考察

3.1. ターゲット検出率の時間的变化

図3は、手がかり刺激呈示後の時間の関数としてターゲット検出率の変化を示したものである。グラフの配置は注意を誘導した視野位置に対応している。時間とともにターゲット検出率が急激に上昇し、700ms 付近を境にターゲット検出率の上昇が終息する。このような課題遂行成績の持続的な時間変化は、内発的注意による効果の時間特性と一致するが、手がかり刺激がおおよそ 200–400ms 先行したときに内発的注意の効果が見られるとした従来の傾向よりも遅い

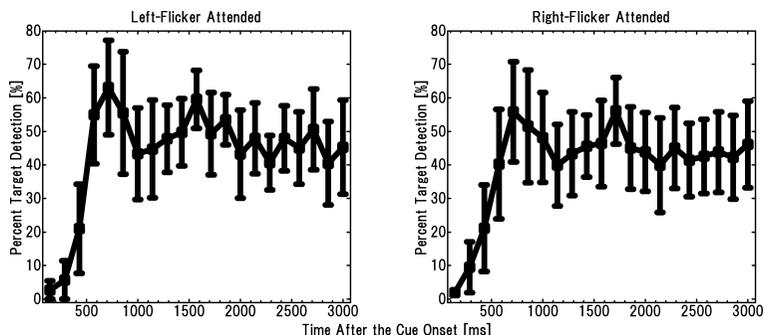


図3 ターゲット検出課題の遂行成績の時間的変化. 各データ点における時間はターゲットの呈示が終了した時間を示す. エラーバーは標準誤差を表す (N=5).

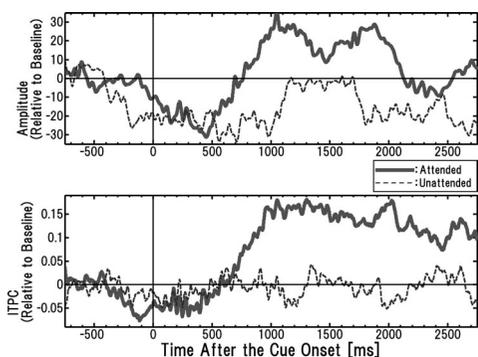


図4 振幅量 (上) および ITPC (下) の時間的変化. 左視野に配置された 21.0 Hz のフリッカ刺激に注意を向けた条件で得られた結果を示す.

特性を示す^{1,2)}. この理由は明らかではないが, 手がかり刺激の検出や処理の難易度などの影響が考えられる. 本研究で用いられた手がかり刺激は RSVP 刺激の中に組み込まれていたため, 手がかり刺激の検出および処理に伴う注意の停留時間 (Attentional Dwell Time)¹⁰⁾ が時間特性に反映された可能性が考えられる.

3.2. 振幅量および ITPC の時間的変化

脳波から得られた2つの指標 (振幅量と ITPC) の時間変化を図4に示す. 図4は, 注意を向けた刺激と対側の後頭部電極 (ここでは P4, O2, T6) を被験者ごとに平均化し, 被験者間で平均加算したものである. 縦線は手がかり刺激の呈示タイミング, 横線はベースラインを表す. ベースラインは手がかり刺激呈示前 750 ms から 250 ms の間の平均値とした.

振幅量と ITPC はともに, 手がかり刺激呈示後 500 ms 以降で注意の効果が見られ始め, 1000 ms 程度で注意の効果が最大となる. また, 注意の効果最大となる手がかり刺激呈示後 1000 ms 以降は注意の効果が持続する傾向が見られる. 振幅量と ITPC は独立した指標であるにもかかわらず, これらの変調効果の立ち上がりやピーク到達の時間特性が類似している. これは, 両指標が同一の神経基盤を反映している可能性が高いことを意味し, フリッカに応答する細胞群の同期発火によって ITPC が上昇し, SSVEP の振幅量が増大するという考えと一致する⁶⁾.

3.3. 生理指標と行動指標との比較

図3で示した課題遂行成績に基づく行動指標と図4で示した誘発脳波による生理指標がどの程度時間的に関連しているかを解析した. 手がかり刺激呈示後の振幅量および ITPC データを 143 ms ごとに平均化し, 各データの相対的な変化を見るため, 各データを最大値 1, 最小値 0 を取るように正規化した.

正規化した結果を重ねて示したのが図5である. グラフの配置は, 注意を向けた視野位置 (左右) とフリッカ刺激の周波数 (高低) によって分類されている. 図に示したとおり, 振幅量と ITPC はそれぞれターゲット検出率と互いに類似した時間特性を示しており, 脳波による生理指標が行動指標と対応関係にあることを示唆する. しかしながら, 生理指標と行動指標の間

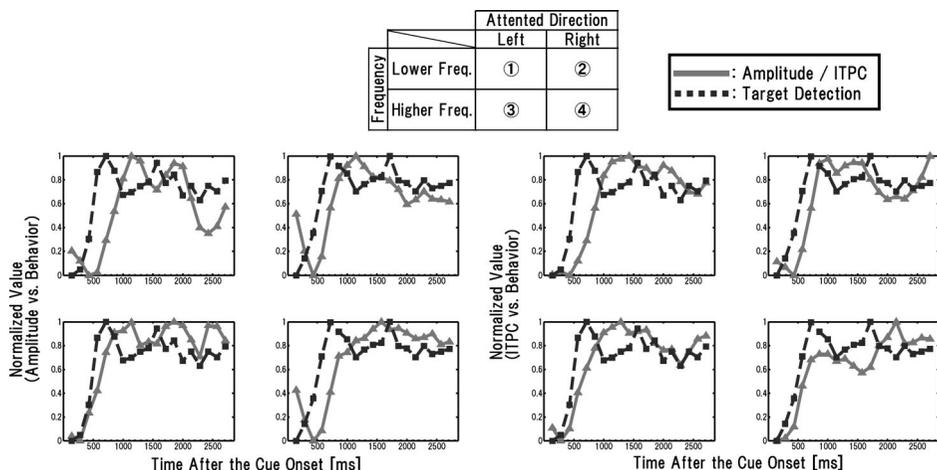


図5 生理指標（振幅量とITPC）とターゲット検出率との時間特性の比較。実線は生理指標、破線はターゲット検出率の時間特性を示す。

には立ち上がりおよびピークの潜時にずれが観察される。呈示された刺激が脳内で処理されるまでの潜時の影響や、窓フーリエ変換が時間情報を圧縮してしまうために時間ずれが生じた可能性が考えられるが、今後さらに解析や考察を進める必要がある。

4. 結 論

本研究では、SSVEPの振幅量、位相同期度(ITPC)に基づく生理指標ならびにターゲット検出率に基づく行動指標の比較を行い、内発的注意による変調効果の時間特性について検討した。その結果、SSVEPの振幅量および位相同期度は、いずれも行動指標と定性的に一致し、注意の移動を示す指標として有効であることが確認された。

謝辞：本研究は文部科学省科学研究費補助金（基盤 A18203036，基盤 B18330153）の補助を受けて行われた。

文 献

- 1) 日本視覚学会（編）：視覚情報処理ハンドブック。朝倉書店，2000。
- 2) H. E. Egeth and S. Yantis: Visual attention:

Control, representation, and time course. *Annual Review of Psychology*, **48**, 269–297, 1997.

- 3) F. Di Russo, A. Wolfgang, W. Teder-Sälejlvi and S. A. Hillyard: Steady-state VEP and attentional visual processing. *A. Zani, & A. M. Proverbio (eds.): The Cognitive Electrophysiology of Mind and Brain*. Academic Press: New York, 259–274, 2002.
- 4) S. T. Morgan, J. C. Hansen and S. A. Hillyard: Selective attention to stimulus location modulates the steady-state visual evoked potential. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, **93**, 4770–4774, 1996.
- 5) M. M. Müller, W. Teder-Sälejlvi and S. A. Hillyard: The time course of cortical facilitation during cued shifts of spatial attention. *Nature Neuroscience*, **1**, 631–634, 1998.
- 6) Y. J. Kim, M. Grabowecy, K. A. Paller, K. Muthu and S. Suzuki: Attention induces synchronization-based response gain in steady-state visual evoked potentials. *Nature Neuroscience*, **10**, 117–125, 2007.
- 7) S. Yantis: Stimulus-driven attentional capture. *Current Directions in Psychological*

- Sciences*, **29**, 156–161, 1993.
- 8) 入戸野宏：心理学のための事象関連電位ガイドブック．北大路書房，2005.
- 9) J. Ding, G. Sperling and R. Srinivasan: Attentional modulation of SSVEP power depends on the network tagged by the flicker frequency. *Cerebral Cortex*, **16**, 1016–1029, 2006.
- 10) J. Duncan, R. Ward and K. Shapiro: Direct measurement of attentional dwell time in human vision. *Nature*, **369**, 313–315, 1994.