

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

筑波大学心理学系 吉田 倫幸

Visually evoked potential by sinusoidally modulated light and flicker-fusion phenomenon.

Tomoyuki Yoshida (Institute of Psychology, University of Tsukuba, Ibaraki 305)

Steady-state scalp potentials were evoked at the occipital area (Oz) in human by sinusoidally modulated light, using different stimulus frequency (5-50Hz) under three light adaptation levels (4, 5, 8ft-L) and seven modulation depths (10, 20, 30, 40, 50, 75, 100%). The amplitude of the component synchronized with stimulus frequency decreased with increasing stimulus frequency, disappearing at the near flicker-fusion frequency, which was independent of the light adaptation level. The graph of the amplitude of the synchronized component in the flicker-perception frequency range versus the stimulus modulation depth had a peak near 30-50% at all light adaptation levels. These results suggest that the synchronized component is a good index of flicker perception.

Key words: scalp potential, occipital, sinusoidally modulated light, flicker, fusion.

筆者はこれまで様々な周波数領域で矩形波をトレイン呈示して VEP の波形変化とそれに随伴する知覚変化(断続感・チラツキ感・融合感)との対応関係を検討してきた。矩形波刺激を10Hz以上の頻度で連続呈示すると、刺激周波数に同期した正弦波状の視覚誘発電位(visually evoked potential: VEP)が得られる。この同期波の存在はチラツキ感に対応し、臨界融合頻度(critical flicker-fusion frequency: CFF)近くまで出現する(Yoshida, 1983)。波形それ自体は、単発刺激に対する一過性の電位波形と異なり、個人差があまり認められない(Kinney, et al., 1973; Yoshida 1983)。一方、様々な周波数の正弦波で輝度変調させた刺激の場合にも、相当する周波数で刺激位相にタイムロックされた反応が生じる(Regan, 1972; Başar, 1980)。また、同一周波数下で平均輝度レベルを一定にして輝度変調率(Modulation depth)を変化させると、適度な変調時に最大の振幅を示す非線形的な現象も認められる(Regan, 1972)。

矩形波刺激の場合は個々のパルスに対する on-off 反応の検討が容易であるが、得られた同期波の周波数分析を行う場合は、刺激波形の周波数構造が

複雑で、反応の周波数成分の対応づけに難がある。一方、正弦波による輝度変調では、平均輝度レベルを一定に保ちながら刺激の強度を変化させることができ、刺激の周波数構造も矩形波に比べて単純であるという利点がある。しかし、刺激に対する on-off 反応を分離することは難しい。両刺激とも一長一短であるが、連続刺激状態下における刺激同期反応の有無を調べるには正弦波による刺激がよいと思われる。そこで今回、正弦波を用いて刺激輝度および刺激周波数を変化させ、その際の VEP の応答性を検討するとともに知覚レベルでのチラツキ感・融合感との対応を検討する。

方 法

被 験 者 正常視力を有する男子2名(年齢21歳)。
光 刺 激 光刺激の呈示には、CRT (Sony Tectronix, 624 monitor)を用いた。ファンクション・ジェネレータ(NF Circuit Design Block FG-143)により発生させた3 MHzの三角波でCRT管面上にラスタを作り(掃引速度10 μ s/div)、管面全体を視覚2°の円環状に切り抜いた黒色マスク(中心部の黒円は視角0.5°でこれを注視点とする)で覆い、刺激パ

タンとした。また、円環光の正弦波による輝度変調および周波数の制御はもう1台のファンクション・ジェネレータにより行った。

脳波記録 脳波はAg-AgCl不関電極を用い、後頭部(Oz)から両耳朶連結を不関電極として単極導出し、脳波計(日本電気三栄, 1A57)によって時定数0.3sで記録した。

手続き 被験者は電極装着後、電磁シールド防音室内の椅子に腰掛け、目の高さが注視点に一致するよう、頭部を顔面固定器で固定した。その後、約10分間の暗順応を行い、実験を開始した。実験者と被験者のやりとりはインターホンで行われた。脳波に筋電などのアーチファクトが混入するのを防ぐために安静にして刺激光を見るよう、実験に先立って被験者に教示した。実験はまず、周波数5, 10, 15, 20, 30, 40, 50Hzそれぞれについて、順応輝度4, 5, 8 ft-Lをベースにして輝度変調をかけた。また、輝度変調率は各順応輝度に対して10, 30, 40, 50, 75, 100%とした(Fig. 1)。

VEPの分析 脳波計により増幅された後頭部脳波は、シグナルプロセッサ(日本電気三栄, 7T07A)によりデジタル処理し、512ms(標本化時間: 1ms×256 points×2ch=512ms)内の誘発電位を分析した。脳波の加算回数は、アーチファクトの混入していないものを選び200回とした。得られたVEP波形は、X-Yレコーダ(渡辺測器, WX442)によりグラフ用紙に書き出された。

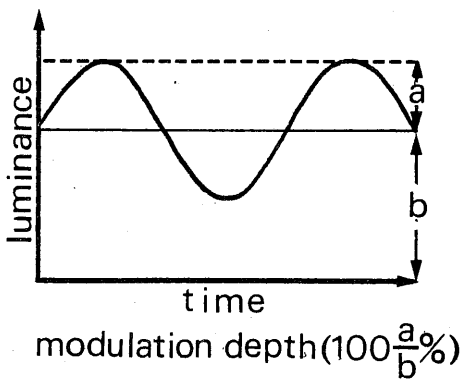


Fig. 1 Stimulus wave-form and luminance modulation depth (%).

結果と考察

同期反応の特徴

Fig. 2・Fig. 3は、被験者O.S. および被験者T.N.の正弦波刺激に対するVEPの一部を例示したものである。

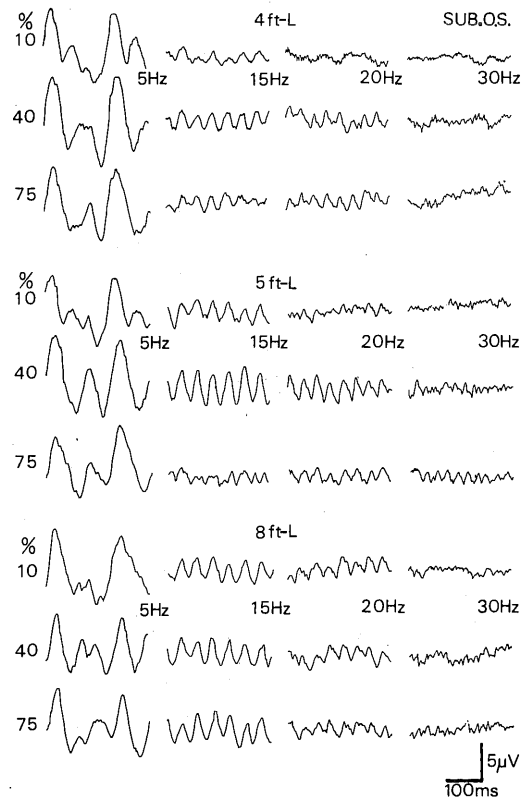


Fig. 2 Averaged potentials evoked by sinusoidally modulated stimulus at three adaptation levels. (average: N=200). A numeral of the left side indicates modulation depth. Negative-up. Subject O.S.

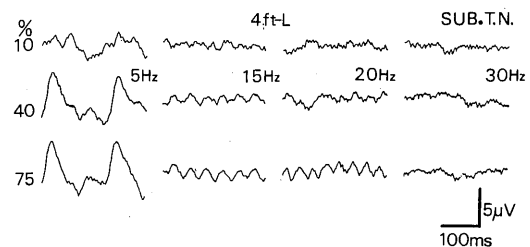


Fig. 3 The other example of averaged potentials. Subject T.N.

被験者 O.S. の場合 (Fig. 2), 刺激周波数 15Hz までは何れの順応輝度・変調率に対しても刺激周波数の位相に同期した応答が認められるが, 20Hz・30Hz では順応輝度・変調率によって応答性が異なる。すなわち, 刺激周波数 20Hz では, 変調率 10% に対する同期反応は順応輝度 4ft-L 時には認められないが, 順応輝度が高くなるにつれて明確になってくる。変調率 40・75% では, すべての順応輝度で同期反応が顕著である。一方, 30Hz では, 順応輝度 4ft-L 時には何れの変調率に対しても同期反応は認められず, 順応輝度 5ft-L および 8ft-L で若干認められるようになる。また, 図には示していないが, 40Hz 以降の刺激周波数に対しては何れの順応輝度・変調率でも同期反応は見られなかった。この被験者の知覚的融合閾値 (CFF) は 40.5Hz (順応輝度 5ft-L で測定) であった。

被験者 T.N. の場合は, 15Hz (順応輝度 4ft-L・変調率 10% 時) においてすでに同期反応の消失が認められた (Fig. 3)。さらに 30Hz 以上の刺激周波数に対しては, すべての順応輝度・輝度変調率で同期反応は認められなかった。この被験者の CFF は 30.2Hz で被験者 O.S. より低かった。

両被験者の結果を合わせて考えると, CFF 値の低い被験者ほど同期反応の消失も低い周波数で生じることから, 刺激周波数を軸として VEP の応答性 (同期反応の有無) とチラツキ感・融合感の対応づけが可能であることが示唆される。また, 同期反応が存在する段階では, その振幅は刺激周波数, 輝度変調率によって異なる。刺激周波数が高まると振幅が低下する。一方, 輝度変調率に対しては, 例えば被験者 O.S. では変調率 40% 時の振幅が 10%・75% に比べて大きい傾向が見られる (Fig. 2)。そこで, 次に刺激周波数・輝度変調率と同期反応の振幅の関係について検討する。

刺激周波数・輝度変調率と振幅の関係

Fig. 4・Fig. 5 は輝度変調率を変化させた際の各刺激周波数に対する VEP の平均振幅を例示したものである (振幅は同期反応の陽性ピークと陰性ピーク間の電位)。変調率と振幅との関係では, 変調率の上昇に伴って振幅が大きくなるというような線形的関係は見られず, 順応輝度に対して, 特定の変調率の時に最大の振幅値を有するような曲線を描く。変調率の効果は周波数 5 Hz 時が最も顕著で, 両被験者とも変調率 50% で振幅が最大となっている。それ以上に変調率を高めても振幅値の増加はなく, 逆に下降傾向を示す。10Hz 以上では最大振幅を示す変調率に個人差が見られる。被験者 O.S. の場合, 最大振幅が変調率 30~40% 時にシフトしている。一

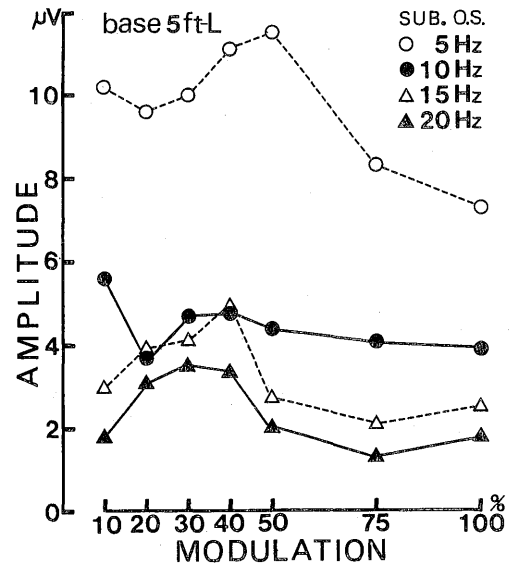


Fig. 4 Amplitude (in microvolts peak to peak) versus luminance modulation depth (%) in flicker-perceived stimulus frequency range at 5 ft-L adaptation-level. Subject O.S.

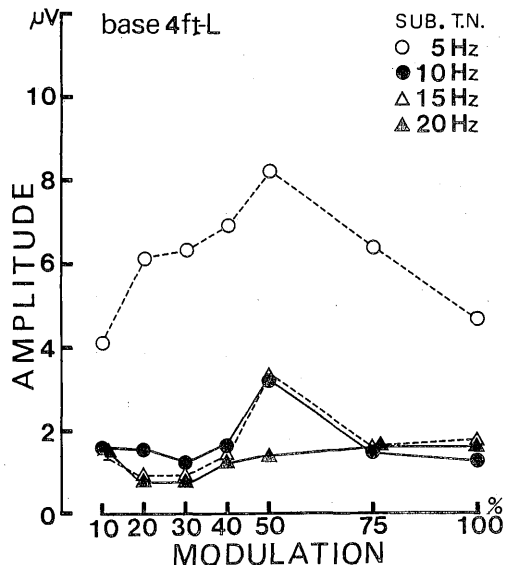


Fig. 5 The other example of amplitude versus luminance modulation depth. Subject T.N.

方, 被験者 T.N. では 5 Hz 同様, 変調率 50% で最大となっている。また, 被験者 O.S. では 20Hz 時

にも変調率の変化に応じて最大振幅が認められるのに対して、被験者 T.N. ではこうした傾向は認められなくなっている。図には示さなかったが、他の順応輝度の場合も Fig. 4・Fig. 5 と同様の傾向を示した。

以上の結果から、仮に正弦波で輝度変調した際の同期反応の振幅の大きさが被験者のチラツキ感度に対応しているとするならば、順応輝度をベースにして最も感度の良い特定の輝度変調率が存在することが示唆される。

Fig. 6 は各周波数に対する同期反応の振幅変化を順応輝度別に示したものである。振幅値は両被験者とも 5 Hz 時が最も大きく、10 Hz では1/2以下に低下する。その後の振幅変化は緩徐であるが、周波数が融合閾値に近づくにつれて振幅低下が見られる。Regan (1972) の知見では10 Hz 時に振幅のピークが見られるが、本実験ではそうした結果は得られなかった。また、5 Hz 時では順応輝度が低いほど振幅が大きい、10 Hz 以降では逆に順応輝度が高い方が若干振幅が大きくなっている。逆転の理由は不明であるが、10 Hz 以上に関しては、順応輝度が高くなると変調率との関係から刺激強度が相対的に大きくなるために振幅も大きくなったと解釈できる。しかし、順応輝度による振幅差はわずかであり、順応輝度の効果は顕著でないといえる。むしろ、刺激周波数を軸として 5 Hz と 10 Hz 以上では反応波形が異なること (Fig. 2・Fig. 3 参照) や振幅の違い (Fig. 6)

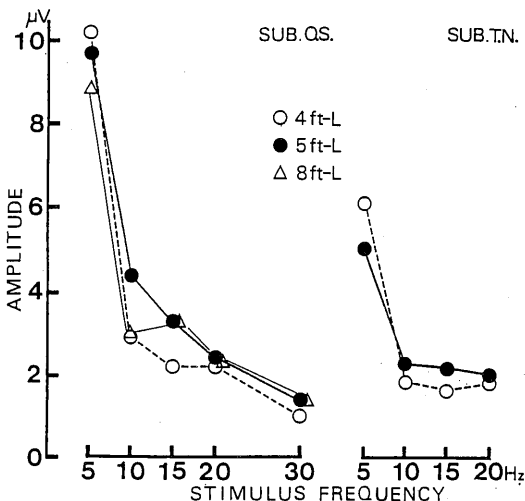


Fig. 6 Mean amplitude of all modulation depths versus stimulus frequency.

から、正弦波の場合にも矩形波で見られるように、10 Hz 以前と以後では視覚系の時間処理過程が異なることが示唆される。

矩形波では、8~10 Hz を境にして周波数が高い場合は正弦波状の同期波が生じ、チラツキ感が体験されるのに対して、周波数が低いほど個々のパルスに対する反応は過渡的波形となり、感覚体験として断続感が随伴する。正弦波の場合も、5 Hz 時の反応は10 Hz 以降の反応に比べて波形自体が複雑であり、過渡的反応に類似していること (Fig. 2・Fig. 3) から、矩形波同様、5 Hz 時には断続的・過渡的処理過程が作用しているものと考えられる。従って、正弦波では矩形波ほど明確な刺激の onset 感覚は生じないものの、断続感に似た感覚が生じるものと推測される。一方、10 Hz 以上では連続的・定常的処理過程が作用する。この過程では同期反応が生じ、刺激周波数が高くなるほど振幅は低下、融合感が生じる時点で消失する。本実験の結果によると、明順応下では同期反応に対する順応輝度の効果は顕著でないことから、チラツキ感から融合感への移行周波数は、明順応下では順応輝度に関わらず一定であることが示唆される。これらのことから、後頭部 VEP の同期化が消失し、平坦化するような周波数を見つけることによって、融合閾値が他覚的に測定可能なことが期待される。

これまで矩形波を用いてチラツキ感から融合感への移行と視覚誘発電位の同期成分の振幅低下・消失との対応を調べ、融合感と同期成分の消失がほぼ対応することが示唆されてきた (Yosida, 1983) が、正弦波においても同様の結果が得られた。正弦波は矩形波に比べて周波数成分が純粋に一つの成分のみから成り立っていることや平均輝度が一定であることなどの利点があり、同期成分の検討にはよいものと思われる。今回、順応輝度の違いにより同期反応の振幅は顕著な差を示さなかったが、実験を繰り返して再度確かめる必要がある。変調率との関係においては30~50%時に同期反応が顕著であり、チラツキ感覚の度合との対応も検討する必要がある。また、本実験においては、同期反応の周波数分析は行わなかったが、今後こうした分析も合わせて行う予定である。

要 約

これまで矩形波からなるトレイン刺激を用いて、チラツキ感や融合感と視覚誘発電位の刺激同期成分との対応を検討してきた。今回は正弦波による輝度変調を行って、刺激周波数の上昇に伴う同期成分の推移とチラツキ感から融合感への移行との対応を調

べた。被験者は2名。5～50Hzの正弦波によって輝度変調されたフリッカー刺激を視角2°の円環パターン(注視点0.5°)として被験者に呈示した。順応輝度(平均輝度)は4・5・8ft-Lとし、輝度変調率を10%から100%まで7段階に変化させた。視覚誘発電位は後頭部(Oz)から導出した原脳波を200回加算平均して算出し、陽性成分と陰性成分間のピーク間電位を指標に各刺激条件間で同期反応を比較した。その結果、同期反応の振幅は5Hz時が最も大きく、周波数が高くなるにつれて低下し、順応輝度による差異は見られなかった。また、被験者が融合感を感じる周波数では同期反応は消失し、同期反応の有無がチラツキ感から融合感への移行の生理的指標に成りうる可能性が示唆された。一方、輝度変調率と反応振幅との関係では、変調率が30～50%時に振幅が最大を示し、変調率がそれ以上では振幅が低下することから、被験者のチラツキ感度に対しても最適の輝度変調率が存在することが示唆された。

引用文献

- Başar, E. 1980 EEG-Brain Dynamics Relation Between EEG and Brain Evoked potentials. Amsterdam: Elsevier / North-Holland Biomedical Press
- Kinney, J.A.S., McKay, C.L., Mensch, A.J. and Luria, S.M. 1973 Visual evoked response elicited by rapid stimulation. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology* 34, 7-13.
- Ragan, D. 1972 Evoked potentials in Psychology, Sensory Physiology and Clinical Medicine. London: Chapman and Hall LTD
- Yoshida, T. 1983 Visually evoked potentials at different rates of flash stimulation and concomitant perceptual changes. *Japanese Psychological Research* 25, 2, 86-94.

-1986. 9.30 受稿-