

単発視覚誘発電位による二重光弁別閾の推定¹

筑波大学心理学系 吉田 倫幸

Estimation of double-flash threshold by single-visual evoked potentials.

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

The difference threshold of double-flashes was estimated by means of multiple regression analysis from components of single-visual evoked potentials and stimulus intensity. Double and single flashes were presented to six subjects. SOA values of a double-flash was changed from 50ms to 110ms in 5 ms steps. Subjects were required to report the stimulus as a double or single presentation. VEPs were recorded at the occipital area (Oz). The results revealed adequate correlation between double-flash threshold and the latencies of two negative peaks (C2 and C4) of a single-VEP and suggest that the threshold is properly estimated from a linear equation of the stimulus intensity and the latency of both C2 and C4.

Key words : double-flash threshold, stimulus intensity, evoked potential, multiple regression analysis

これまで、継時的に与えられた光刺激の視覚的体験と後頭部から導出された視覚誘発電位 (Visual evoked potential : VEP) の関係について、知覚的時間分解能の生理学的対件という側面から検討してきた。

二重刺激の視覚弁別と VEP の関係を調べた研究では、二刺激の弁別と第 2 刺激の後頭部反応出現の間には密接な関係があることが指摘されている (Musselwhite & Jeffreys, 1983; 吉田・中西, 1981)。これらの研究では、第 2 刺激に対する反応が、二刺激を明確に弁別しうる間隔と相前後して生じることが確認されている。しかし、弁別閾を基準に考えると、完全な知覚的融合時は別として、二刺激が 2 つに見える確率が 50% 以下の刺激間隔でも、被験者によって第 2 刺激に対する反応が見られる場合があることも確認された (吉田ら, 1982; 吉田・吉田 1984)。このことは、生理レベルの時間分解能が知覚レベルの時間分解能より良いことを示唆するが、VEP を指標として二刺激の弁別閾を推定する場合には、第 2 刺激に対する VEP の消長だけではその推定が困難であることが指摘された (吉田・吉田,

1984)。また、二刺激の刺激間隔を小刻みに変えてその都度 VEP を測定するために、被験者は長時間拘束され、疲労等の問題も生じてくる。そこで、吉田・吉田 (1984) は VEP 波形の相と知覚の抑制過程の関連を指摘した Harter & White (1967) の観点から、単発光刺激に対する VEP の P1-N1-P2 の時間幅と刺激輝度を説明変数として重回帰分析を行い、弁別閾の推定を試みた。その結果、式の上では誤差も少なく、両変数からの推定が可能なが示唆された。しかし、得られた推定式では、当初の仮説 (吉田・吉田, 1984, p13-14 参照) とは逆に、「P1-P2 の時間幅が長い被験者ほど弁別閾が低い」と結論され、仮説・指標を含めて再検討の必要性を感じた。従って、本研究では、弁別閾を含む二重光弁別過程全体の確認、および振幅が小さいために前回取り上げなかった 100ms 以前の初期成分を含め VEP 各成分の再チェックを行い、改めて二重光弁別閾の推定を試みた。

方 法

被験者 正常視力を有する男子学生 6 名。

刺激 視角 2° (中央に視角 0.5° の注視点) の円環刺激を用い、CRT 画面上に単発刺激・二重刺激を呈示した。個々の刺激は矩形波で持続時間は 10ms。二重刺激の刺激開始間隔 (SOA) は 50ms から 5 ms 刻みで 110ms まで 13 種類とした。刺激輝度は 12ft-L (約 40cd/m²) と 3 ft-L (約 10cd/m²) を用

脚 注

- 1 本研究の一部は、昭和 60 年度、筑波大学プロジェクト研究費、および文部省科学研究費総合 (A) (代表者：金子隆芳) の補助を受けた。本研究にあたり、御助言をいただきました体育科学系・吉田茂先生に感謝致します。

いた(詳細は吉田・吉田, 1984を参照のこと)。

手続き 被験者は電極装着後, 電磁シールド室内の椅子に座り, 顔面固定器により目の高さを刺激の注視点に一致させる。注視点を見たま, 15分間暗順応を行った後, 測定を開始する。また, 順応期間中に実験に関する教示を与える。実験は二重刺激と単発刺激を組にして1試行とし, 13試行繰り返す。試行内での二重刺激は1種類で, その反復回数は単発刺激とも100回以上, 二重刺激から先に行う。反復間隔は被験者ペースとするが, 右手によるボタン押しから700ms後に刺激が呈示される。被験者は毎回呈示される刺激が1つに見えたか, 2つに見えたかを見えた数だけ左手の応答ボタンを押して答える。その時期は刺激後約1秒経過した後とする。刺激開始から応答するまでは瞬目・眼球運動をしないよう, 予め練習させておく。

脳波記録 脳波はAg-AgCl不極電極を用い, 後頭部(Oz)より両耳朶連結を基準電極として単極導出し, 脳波計(日本電気三栄, 1A57)により時定数0.3秒で増幅, 紙記録すると同時にデータレコーダ(Sony Magnescale, NFR-3515)に磁気記録した。

視覚誘発電位の測定・分析 視覚誘発電位の測定区間は, 各刺激呈示前64msから呈示後448msの計512ms(データ分析精度は, 1ポイントの標準化時間1msで総計512ポイント)とし, その間の磁気記録された原脳波をシグナルプロセッサ(日本電気三栄, 7T07A)にて50回加算平均し, VEP波形を得た。

二重刺激弁別過程の分析 二重刺激の弁別過程を検討するために, 個人ごとに100回の二重刺激に対して2発に見えた回数を各試行ごとに百分率に換算し, 次の3つの時点について分析した。

- (1) 5%弁別可能時点…5%以下で2つに見えた最初の二刺激のONSET間隔。
- (2) 50%弁別可能時点(弁別閾)…補間法によ

り50%見えると推測された二刺激のONEST間隔。

- (3) 70%弁別可能時点…70%以上弁別可能な最初の二刺激のONSET間隔

結果と考察

(1) 二重刺激の弁別過程

Table 1は, 二重刺激の弁別過程の結果を示したものである。両輝度条件とも弁別過程には個人差が認められるが, 平均値で見ると, 高輝度(12ft-L)の方が各時点で約10msほど値が小さい。両輝度条件間でt検定を行った結果, 3つの時点においてそれぞれ有意差が見られた(5%時点… $t=3.05$, $df=5$, $p<.05$; 50%時点… $t=3.36$, $df=5$, $p<.025$; 70%時点… $t=2.48$, $df=5$, $p<.05$)。この結果は, 先の論文でも指摘した通り, 刺激輝度が高くなると相対的に二刺激の弁別力(時間分解能)が増すことを示唆している。また, 3つの時点は高輝度条件で互いに有意な正の相関を示し, 一方, 低輝度条件では50%(弁別閾)と70%時点の間でのみ有意な正の相関を示した(Table 2)。低輝度の場合, 二重刺激の弁別力低下とともに, 判断が多少不安定になっている可能性もある。

(2) 単発刺激に対するVEP

Fig. 1は, 試行ごとに得られた単発刺激に対するVEP波形を例示したものである。両輝度条件とも刺激後約230msまでに5つの正・負の成分が認められる(図中最上参照)。また, Table 3は被験者ごとに全試行におけるこれらの成分の平均潜時と標準偏差を示したものである(被験者OKについては, C1成分の同定が困難であったので, この成分の測定は行わなかった)。個人間で平均潜時は異なるが, 個人内では, 試行間のばらつきも小さく安定していた。一方, 振幅については, Fig. 1に例示したように, 刺激後100ms以内のC1・C2の成分の振幅は小

Table 1 SOAs at different percent of correct discriminations.
Double flash threshold is SOA at 50% correct.

輝度(ft-L)	5%時点		50%		70%	
	12	3	12	3	12	3
被験者 YK	60.0	70.0	69.5	87.5	85.0	90.0 ms
MR	60.0	75.0	72.9	77.5	75.0	80.0
SH	65.0	85.0	71.5	100.0	75.0	105.0
OK	75.0	75.0	82.3	92.3	85.0	95.0
KS	75.0	80.0	82.6	98.5	85.0	100.0
TN	90.0	95.0	94.0	96.4	100.0	100.0
平均	70.8	80.0	78.8	92.0	84.2	95.0 ms

Table 2 Correlation matrix of the SOAs of discriminations.

輝度	12ft-L			3ft-L		
	5%	50%	70%	5%	50%	70%
5%	1.000					
12ft-L 50%	0.982**	1.000				
70%	0.855*	0.844*	1.000			
5%	0.772	0.713	0.548	1.000		
3ft-L 50%	0.556	0.412	0.339	0.588	1.000	
70%	0.531	0.378	0.305	0.625	0.992**	1.000

* $p < .05$, ** $p < .01$

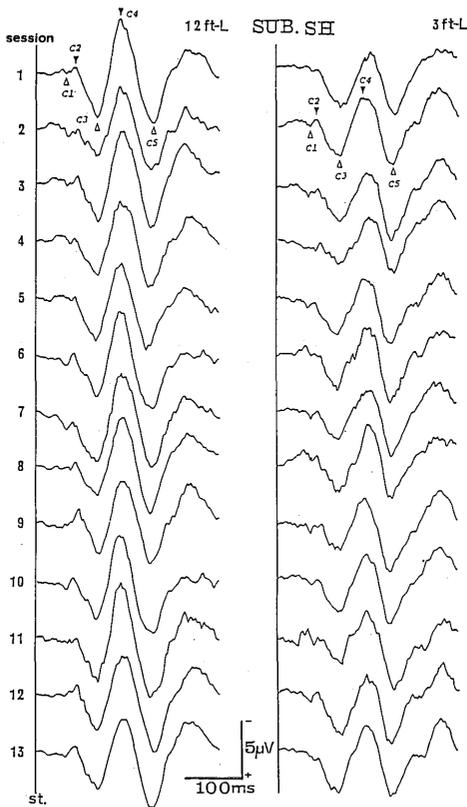


Fig. 1 Averaged VEPs to single light flash. C1, C2, C3: positive components. C2, C4: negative components. Trial numbers are depicted at left side. Average: N=50.

さく、100ms 以降の C3・C4・C5 の振幅は大きいが、どの被験者においても試行間で振幅の低下など慣れの現象は見られなかった。

また、輝度条件間で各成分の潜時・振幅を比較すると、潜時に関して各人とも高輝度では潜時が短縮する傾向を示し、統計的には C1・C2・C5 の潜時に

有意差が見られた (C1... $t=2.86$, $df=4$, $p < .05$; C2... $t=2.15$, $df=5$, $p < .05$; C5... $t=2.51$, $df=5$, $p < .05$)。一方、ピーク間電位は C2-C3・C3-C4 で高輝度の方が 5% 水準で有意に大きかったが、C1-C2・C4-C5 では差は見られなかった (Fig. 2)。刺激強度と VEP の関係において、ある限界まではその反応潜時が強度の増加とともに短縮され、振幅の増加も見られることが過去の研究でも確認されている (Connolly & Gruzelier, 1982; Donchin & Lindley, 1965; Vaughan, Costa & Gilden, 1966)。本研究で得られたデータもこれらの結果と一致するものであった。

以上、単発刺激に対する VEP は刺激輝度により各成分の潜時・振幅は異なるものの、個人内・試行間で基本的波形は一定で、各成分の振幅・潜時に変化は見られなかった。そこで、輝度条件別に全試行

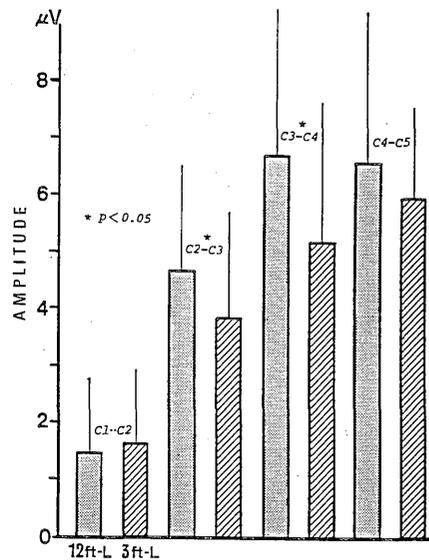


Fig. 2 Peak-to-peak amplitudes and S. D. of VEP under each luminance condition.

Table 3 Averaged latencies of components of VEP.

C1, C3, C5: positive component. C2, C4: negative component.

輝度		12ft-L				
VEP成分	C1	C2	C3	C4	C5	
被験者 YK	51.5 (2.54)	66.3 (2.24)	117.3 (2.56)	148.9 (3.13)	218.5 (2.78)	
MR	54.5 (3.56)	66.6 (2.37)	119.7 (1.48)	172.2 (1.48)	216.6 (3.52)	
SH	52.5 (1.52)	68.8 (3.20)	107.5 (1.72)	151.0 (2.26)	205.0 (3.61)	
OK		72.5 (1.84)	116.8 (1.88)	170.4 (3.31)	207.4 (2.77)	
KS	50.7 (1.30)	73.1 (2.47)	127.0 (1.41)	185.3 (4.36)	218.4 (2.50)	
TN	76.8 (2.43)	93.4 (4.36)	126.4 (1.92)	174.4 (2.21)	209.2 (2.84)	
平均	57.2 (9.88)	73.5 (9.30)	119.1 (6.57)	167.0 (13.0)	212.5 (5.49)	

輝度		3 ft-L				
VEP成分	C1	C2	C3	C4	C5	
被験者 YK	54.4 (2.59)	68.6 (2.23)	102.6 (4.29)	153.9 (3.80)	228.7 (4.93)	
MR	64.4 (1.91)	76.4 (2.94)	120.7 (2.31)	172.8 (4.11)	227.4 (5.68)	
SH	60.4 (2.93)	76.8 (3.43)	112.2 (1.90)	163.6 (3.89)	209.9 (3.24)	
OH		75.9 (3.73)	125.8 (2.63)	166.2 (2.10)	247.1 (3.11)	
KS	53.5 (1.95)	77.2 (1.57)	132.9 (1.77)	170.7 (3.07)	236.4 (12.2)	
TN	95.9 (2.91)	126.0 (2.60)	136.2 (3.88)	152.9 (1.52)	210.4 (2.60)	
平均	65.7 (15.6)	83.5 (19.2)	121.7 (11.6)	163.4 (7.64)	226.7 (13.3)	

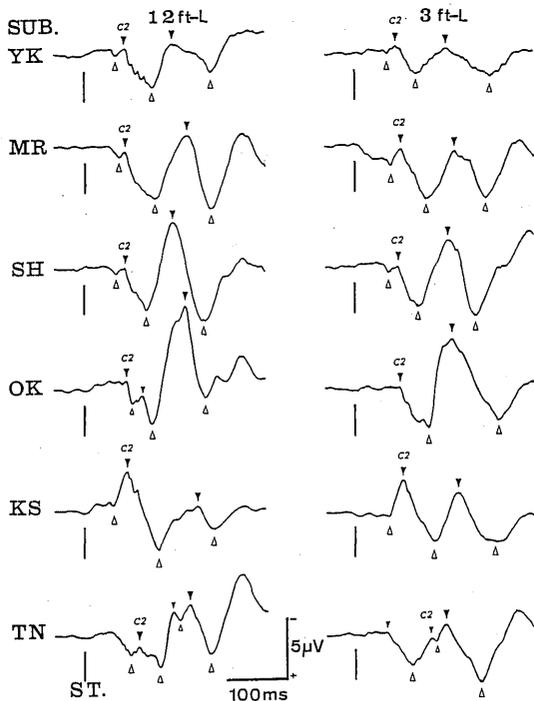


Fig. 3 Averaged VEP of all trials in each subject. Δ : positive component. \blacktriangledown : negative component. Average: N=650.

間で VEP を加算平均し、それを最終的に個人の基本波形とした (Fig. 3).

(3) VEP 成分潜時による弁別閾の推定

Vaughan ら (1966) は VEP と単純反応時間 (RT) の関係を検討し、刺激の強度変化に伴う RT の変動は網膜上に生じる生理過程と VEP の初期成分に代表される視覚野における活動およびその後の生理学的メカニズムによると述べている。(2) で述べたように、VEP の各成分は被験者により異なる。仮に個人の VEP の初期成分潜時の違いがその個人の視覚野の応答能力の差を表すとすれば、潜時の速い個人ほど二重視覚の弁別能力も良いであろう。先の論文 (吉田・吉田, 1984) では、P1-N1-P2 の時間幅 (本研究の C3-C4-C5 に対応する) が知覚上の時間分解能と関連することが示唆されたが、初期成分を含めた検討を行っていなかった。また、先の推定式では時間幅と輝度を説明変数としたが、時間幅だけでは各成分の潜時の差異が十分に反映されないことも問題であった。今回はこれらの点を考慮して、単発刺激に対する VEP から二重刺激の弁別閾の推定を試みた。基にしたデータは Table 1 および Table 3 に示した個人の平均値である。

Table 4 は、輝度条件別に弁別過程と VEP の 5 つの成分潜時との相関を示したものである。5 つの成分のうち、弁別過程と対応関係が見られたのは C2 であった。低輝度条件では C2 は 5% 時点とのみ

Table 4 Correlation matrix between SOAs of different discriminations and latencies of components.

輝度 弁別過程	12ft-L			3ft-L		
	5%	50%	70%	5%	50%	70%
成分 C1	0.829	0.843	0.813	0.813	0.123	0.162
C2	0.942**	0.928**	0.887*	0.877*	0.293	0.313
C3	0.585	0.690	0.665	0.608	0.302	0.253
C4	0.565	0.678	0.336	-0.327	-0.254	-0.287
C5	-0.361	-0.253	-0.056	-0.696	-0.254	-0.340

*p<.05 **p<.01

有意な相関を示したが、高輝度条件ではC2と弁別過程の各時点の間に有意な相関が認められ、輝度別にC2の潜時を用いて各時点との間で回帰分析を試みた。その結果、高輝度条件では、各時点とも直線の傾きは0.8~1.0で、C2の潜時から弁別過程の推移を推定することができた（各時点推定の分散中、C2に依存する変動はそれぞれ、88.7、86.1、78.7%で、かなり適合度が高い）。特に弁別閾（50%時点）の推定誤差が一番小さく、この潜時が弁別閾の推定に適することが示唆された。一方、低輝度条件では、5%時点以外、標準誤差も大きく、C2だけによる弁別閾の推定には難があった。

そこで、輝度条件（L：ft-L）を説明変数に加えて、重回帰分析により弁別閾（DT）の推定を試み、次の推定式を得た。

$$DT=74.27+0.26 \cdot C2-1.19 \cdot L \quad \textcircled{1}$$

この場合、標準誤差は8.23、重相関係数（R）は0.732で、説明率（R²）は、1%水準で有意であり（F=11.54、df=1,10）、C2の潜時と輝度から弁別閾を推定することが可能であることが示唆された。

次に吉田・吉田（1984）が行ったように、各成分からその時間幅を考慮して弁別閾の推定も試みた。その結果、次式が得られた。

$$DT=132.1+0.01 \cdot D1-2.17 \cdot D2-0.40 \cdot D3-2.12 \cdot L \quad \textcircled{2}$$

（D1はC2-C3、D2はC3-C4、D3はC4-C5の時間幅）
標準誤差は8.88、R=0.761

さらに、各成分の潜時を独立に用いた時の推定式は次のようになった。

$$DT=45.74-0.25 \cdot C2-0.03 \cdot C3+0.33 \cdot C4-0.08 \cdot C5-1.47 \cdot L \quad \textcircled{3}$$

標準誤差は8.59、R=0.779

②・③では標準誤差・重相関係数にほとんど差が見られない。②ではD1、③ではC3・C5の重みが小さく、弁別閾の推定には貢献度が低い。そこで、C2とC4だけを用いて改めて弁別閾の推定を行った結果、次式を得た。

$$DT=26.01+0.27 \cdot C2+0.29 \cdot C4-1.29 \cdot L \quad \textcircled{4}$$

標準誤差は7.87、R=0.789

④の場合、②・③よりも変数は少なく、しかも標準誤差・重相関係数とも改善されているので、推定式としてはこれが一番良いと思われる。両成分とも重みがほぼ等しいプラスの要因として、弁別閾推定に同等の影響を有すると考えられる。説明率（R²）は62.25%であり、統計的にも有意であった（F=7.418、df=2,9、p<.01）。

全体的考察

以上結果から、単発刺激に対するVEPのC2、C4潜時および輝度から弁別閾を推定できることが確認された。特に、C2潜時が弁別閾推定の主な手掛りになることも分かった。先の論文（吉田・吉田、1984）では、“P1からP2への過程（D）（本研究におけるC3-C5に一致）は次の刺激入力に対して抑制的に働く過程で、この時間が短いほど弁別閾も低い”と仮定し、Dと輝度から弁別閾の推定式を求めた。その結果、DT=151-0.3・D-3.28・Lを得たが、この式ではDの時間幅は抑制要因（Dの重み係数が負）であり、仮説に反する問題点として残った。しかし、今回、VEPの初期成分を含めて再検討した結果、C2とC4潜時を独立した指標として用いることにより、この問題は解決した。C2は振幅は小さいが、刺激が入力された後に最初に後頭部に生ずる負の成分である。また、C4成分は振幅も大きく、通常N100と呼ばれる負の成分で、両者とも潜時が安定している。光刺激に対するVEPの各成分の頭皮上分布を検討したAllisonら（1977）に従えば、

これらの成分は後頭部より導出される神経性の電位と考えられ、二重刺激の弁別力にはこの両者の成分が関与していると思われる。また、C2とC4の間には振幅の大きい正の成分(C3)が見られる(Fig. 3)が、吉田・吉田(1983)が指摘したように、C3はon反応の1つの頂点と考えられる。Fig. 4はon, off反応とこれらの反応から10msの矩形波刺激に対する反応を合成したものである。実線矢印の区間は今回検討した時相であり、点線矢印の区間は先の論文で検討した時相である。両者ともon反応過程の一部であるが、前者はC3を頂点とするon反応の前期の時相で、後者はC4を頂点とする後期の時相である。図から明らかなように、on反応のうち、C3とC4潜時はoff反応の影響を受け、合成波形では潜時がわずかに短くなるが、C5はoff反応とも潜時が一致し、off反応による影響はほとんど受けていない。それ故、単発反応はC5まで続くが、視覚野における矩形波刺激の主な処理はほぼC2からC4の過程で一区切されると考えてよく、この時期が主として次の刺激に対する抑制時期であろうと思われる。

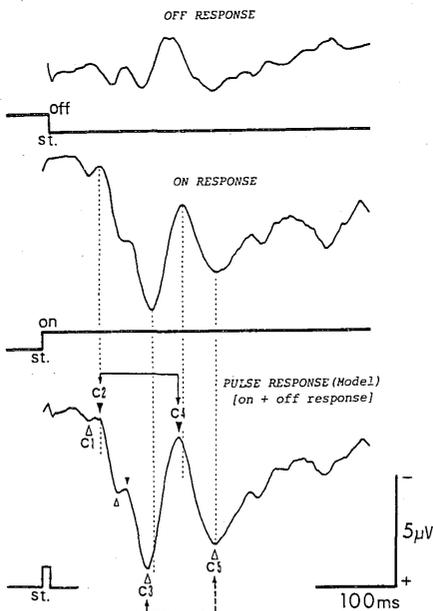


Fig. 4 Off- and on-responses and an impulse response synthesized with both responses. Solid line (C2-C4) : components examined in this paper. Dotted line (C3-C5) : components in Yoshida & Yoshida (1984).

要 約

先の論文で、単発刺激に対するVEPの波形の時相と知覚の抑制過程の関係から重回帰分析を試み、2つの正のピークの時間幅と輝度から弁別閾の推定が可能ことが示唆されたが、推定式には検討すべき点も残った。そこで、本研究では二重刺激弁別過程とVEPの成分を再検討し、改めて刺激輝度とVEPの各成分潜時を説明変数にして重回帰分析を行い、二重刺激の弁別閾の推定式を検討した。

被験者は6者。刺激は視角 2° (注視点 0.5°)の円環光。刺激輝度は3および12ft-Lとし、両条件で二重刺激・単発刺激として呈示した。二重刺激の刺激開始間隔(SOA)は50msから5ms刻みで110msまで13種類設定し、単発刺激と組み合わせて1試行とした。二重刺激の呈示順序は試行ごとにランダムとし、二重刺激・単発刺激とも被験者ペースで100回以上反復して与えた。被験者は刺激呈示ごとに見えた個数を報告した。同時に後頭部(Oz)からVEPを単極導出し、磁気記録後、個人ごとに平均波形を求めた。VEPの各成分潜時と輝度を説明変数として弁別閾の推定を行ったところ、VEPの5つの成分のうち、on反応過程を構成するC2(潜時約80ms)とC4(潜時約164ms)の2つの負のピーク潜時および輝度から弁別閾の推定が可能であることがわかった。また、今回の推定式は先の推定式より適切であることが示唆された。

引用文献

- Allison, T., Matusmiya, Y., Goff, G. D. & Goff, W. R. 1977 The scalp topography of human visual evoked potentials. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **42**, 158-197.
- Connolly, J. F. & Gruzelier, J. H. 1982 Amplitude and latency changes in the visual evoked potential to different stimulus intensities. *Psychophysiology*, **19**, 6, 599-608.
- Donchin, E. & Lindsley, D. B. 1965 Visually evoked response correlates of perceptual masking and enhancement. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **19**, 325-335.
- Harter, M. R. & White, C. T. 1967 Perceived number and evoked cortical potentials. *Science*, **156**, 406-408.
- Musselwhite, M. J. & Jeffreys, D. A. 1983 Visual evoked potentials to double-pulse pattern presentation. *Vision Research*, **23**, 2, 135-143.
- Vaughan, Jr., H. G., Costa, L. D. & Gilden, L. 1966 The functional relation of visual evoked response

and reaction time to stimulus intensity. *Vision Research*, **6**, 645—656.

吉田 茂・吉田倫幸 1983 明暗刺激に対する視覚誘発電位の on, off 成分によるシミュレーション
筑波大学心理学研究 **5**, 11—16.

吉田倫幸・中西孝雄 1981 二重刺激に対するヒトの視覚誘発電位の回復過程と知覚弁別との関係
脳波と筋電図 **9**, 1, 52.

吉田倫幸・吉田 茂・永村寧一 1982 二重刺激に対するヒトの視覚誘発電位と知覚弁別 脳波と筋電図 **10**, 1, 42—43.

吉田倫幸・吉田 茂 1984 視覚誘発電位による二重光弁別閾の推定 筑波大学心理学研究 **6**, 9—14.

—1985. 9. 30 受稿—