

視覚誘発電位による二重光弁別閾の推定¹

筑波大学大学院(博)心理学研究科 吉田 倫 幸

筑波大学心理学系 吉田 茂

Estimation of double-flash threshold by visual evoked potentials

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

Temporal resolution of a double-flash was investigated by recording visual evoked potentials (VEP) under two luminance levels. At first, a hypothesis that the resolution would correlate to the appearance of a response to the second flash was examined by the subtraction method of VEP. It was found that the double-flash threshold could not be estimated by this method, because the second-response appeared at 50 ms SOA which was below the threshold. Next, the negative-positive sequence of VEP to a single-flash was investigated by means of the multiple regression analysis in view of perceptual inhibitory processes. Consequently, we could obtain a well-estimated value of the threshold from a linear equation of luminance and duration between two positive peaks of a single-VEP (P 1, P 2).

Key words: double-flash threshold, luminance, visual evoked potential, perceptual inhibitory process.

継続的に与えられる光刺激が視覚的にいかに体験されるかについては、間欠刺激の知覚融合、あるいは二重光の融合現象として精神物理学的に検討されている (Ganz, 1975)。

間欠刺激の臨界融合頻度 (CFF) は刺激継続状態下の、また二重刺激の融合は刺激開始直後における、それぞれの時間分解能の限界を示すものと考えられる。我々はこれまで、こうした知覚的な時間分解能を視覚誘発電位 (visual evoked potential: VEP) を用いて検討してきた。その結果、間欠刺激の知覚的融合には VEP の刺激同期成分の消失が対応し (Yoshida, 1983)、一方、二重刺激の完全な知覚的融合には第 2 刺激の反応の消失が対応すること (吉田・中西, 1981) が示唆された。これは Musselwhite & Jeffreys (1983) の結果と一致している。

本研究では、二重刺激についての吉田・中西 (1981) の結果を参考にして、二重刺激の第 2 刺激に対する反応の出現と弁別閾の関係を刺激の輝度を変えることによって詳しく検討し、視覚誘発電位による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 5 名 (年齢 20~26 歳)。

刺激および刺激装置 刺激の呈示は CRT (Sony Tektronix, 624 monitor) を使用し、ファンクション・ジェネレータ (NF Circuit Design Block, FG-143) からの 3 M Hz の三角波で CRT 管面上にラストを作る (掃引速度 10 μ s/div)。さらに視角 2° の円を切り抜き、注視点として中央に視角 0.5° の小円をつけた黒色のマスクを管面に装着し、円環刺激とした。刺激は単発および二重刺激からなり、個々の刺激は矩形波で持続時間は 10 ms である。また、二重刺激の刺激開始間隔 (SOA) は 50 ms から 5 ms ごとに 110 ms までの計 13 種とした。刺激強度は 12 ft-L (約 40 cd/m²) と 3 ft-L (約 10 cd/m²) の 2 種類である。強度および二重刺激の SOA の設定は電気刺激装置 (日本光電 SEN-7113) によって行った。

脳波記録 脳波は Ag-AgCl 不動態電極を用い、後頭部 (O_z) から両耳朶連結を不動態電極として単極導出し、脳波計 (日本電気三栄, 1 A 57) にて時定数 0.3 s で記録した。同時に脳波と刺激呈示マークをデータレコーダ (Sony Magnescale, NFR-3515) にて磁気記録した。また、眼球運動や瞬目の脳波上混入のチェックも行った。

1 本研究の一部は、昭和 57 年度筑波大学プロジェクト研究費 (代表者: 金子隆芳) の補助を受けた。本研究にあたり、貴重な御助言をいただきました金子隆芳教授、臨床医学系・中西孝雄教授に感謝致します。

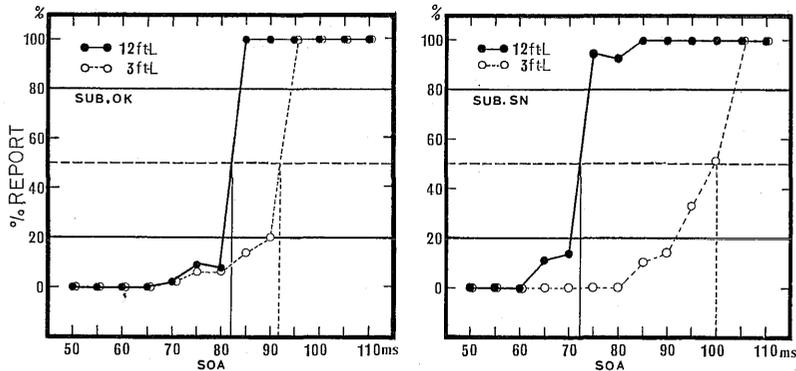


Fig. 1 Percentage reported as two flashes at each SOA. Vertical lines indicate double-flash thresholds at two luminance levels.

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に、頭部を顔面固定器で固定する。その後、注視点を見たまま、15分間の暗順応を行う。この間、インタホンを通じて教示が与えられる。

実験は二重刺激と単発刺激を1組にして1試行とし、計13回試行を行う。各試行内での刺激呈示では二重刺激を100回以上反復した後、単発刺激を同回数くり返す。毎回の刺激のトリガは被験者が右手のボタンを押す「被験者ペース」でなされ、アーチファクト除去のため、ボタン押し後、700 msの遅れで刺激が呈示される。また被験者は呈示されるすべての刺激に対して、その刺激が2つに見えたか1つに見えたかを、見えた数だけ左手のボタンを押して毎回応答する。応答ボタンを押す時期は刺激呈示から約1 s以上経過した後とし、それまでは瞬目や眼球運動をしないよう、また、次の刺激のトリガは応答後2~3 s経てから行うよう、予め十分練習しておく。

分析 磁気テープに記録された脳波はシグナルプロセッサ(日本電気三栄, 7 T 07 A)にて、50回の加算平均がなされ、各刺激に対するVEPが記録された(サンプルは1 ms間隔で512ポイント、分析時間は刺激前64 ms, 刺激後448 msの計512 ms)。また、二重刺激の第2刺激に対するVEPの抽出には、Donchin & Lindsley (1965)を参考にして、二重刺激の反応を差引く方法(サブトラクト法)を用いた。すなわち、試行ごとに二重刺激に対する脳波を50回加算した後、プロセッサの入力極性を反転させ、単発刺激に対する脳波をさらに50回加算した。分析時間等は前に述べた通りである。得られたVEP波形は、XYレコーダ(渡辺測器, WX 442)によりグラフ用紙に出力された。

さらに、二重刺激に対する詳細な波形分析は、脳波データ分析処理システム(EDAS: TEAC PS-85)(吉田, 1983)を用い、A/D変換した後、加算平均した波形を基にその形状をグラフィックで確認しながら行った。結果はビデオプリンタ(SEIKO, VP-55)にて出力した。統計演算は、TSSにより本学学術情報処理センター(FACOM M-200)でSASを利用して行った。

また、弁別閾については、各試行ごとに100回の二重刺激に対して、2発に見えた回数をパーセントで示した後、50%見えると推測されるSOAを補間法で求めた。

結果と考察

(1) **刺激輝度と弁別閾** 従来から刺激輝度の上昇に伴い、弁別閾が下がることが知られている。そこで、我々は弁別閾の変化と二重刺激の第2刺激に対する反応出現が対応するとの仮説のもとに、輝度を変えて弁別閾の操作を行った。Fig. 1にその結果を例示する。弁別閾には個人差があったが、輝度の効果が見られた。すなわち、両被験者とも、輝度の増加に伴い弁別閾が下がる。この傾向は他の3名にも共通し、対応のあるt検定の結果、両輝度条件には有意差がみられた($t=3.4$, $df=4$, $P<.05$)。

(2) **単発および二重刺激に対するVEP** Fig. 2はFig. 1の両被験者のVEPの結果である。単発刺激に対する反応(図中最上のS)では、P1(潜時約110-120 ms), N1(約150-170 ms), P2(約210-250 ms)の各成分が両輝度条件で著明である。また、各SOAの二重刺激に対するVEPは、SOAの増加に伴い、第2刺激によると考えられる波形変化がみられた。図中の点線は、単発刺激のN1潜時をSOA分ずらし

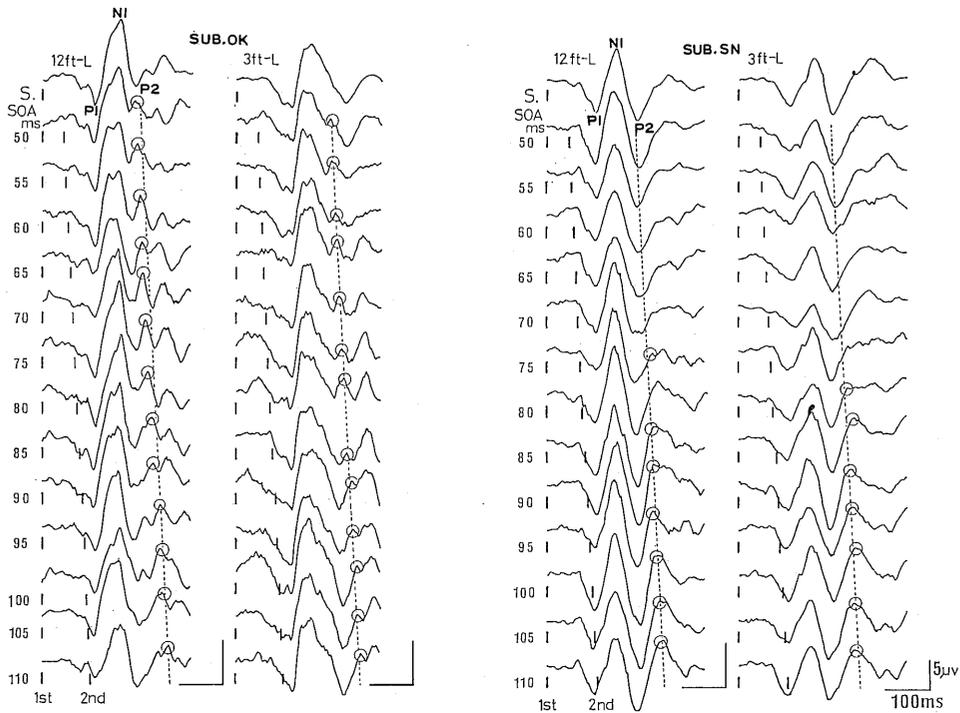


Fig. 2 VEPs elicited by single- and double-flash in two subjects. VEP is averaged from 50 responses and negativity is upward in this Fig. and other Figs. Dot lines indicate the theoretical N1 latencies to the second flash, which are calculated with SOA and N1 latency of a single-VEP. Peaks in circles are N1 peaks of the second-responses estimated from the lines.

た理論潜時である。特に円で囲んだ成分はこの潜時に近く、第2刺激のN1成分と考えられる。この観点から両被験者の第2刺激の反応をみると、被験者OKでは両輝度条件ともSOA 50 msからこの反応の出現が推定された。一方、被験者SNでは、12 ft-L条件でSOA 75 ms、3 ft-L条件でSOA 80 msから出現すると推定された。

これらの推定結果をFig. 1の弁別閾と比較してみると、弁別閾以前でも第2刺激に対する反応があるという可能性が出てきた。そこで第2刺激に対するVEPのみを、サブトラクト法を用いて抽出し、さらに弁別閾との対応を検討した。

(3) 弁別閾と第2刺激に対するVEP Fig. 3は、被験者SNの第2刺激に対する反応をサブトラクト法で抽出した結果である。この反応を単発刺激の反応と比較すると、反応それ自体は小さいが、両輝度条件ともSOA 60 msから単発反応の基本成分であるP1, N1, P2の存在が認められる(ただし、N1の

潜時は若干短い)。こうして第2刺激に対しては、Fig. 1に示した弁別閾下でも反応があることが確認された。また、この被験者の場合、SOAの増加とともに第2刺激に対する反応が増大している。

Fig. 4は、被験者OKの12 ft-L条件での第2刺激に対する反応を弁別閾の前と後で平均した結果である。この例でも第2刺激に対する反応が弁別閾前にも明確に生じていることがわかる(図中B)。反応の大きさは、被験者SNとは逆に、弁別閾後の方が小さい(図中C)。

そこで5名の被験者について、第2刺激に対するピーク間の平均振幅を各SOAで比較したのがFig. 5である。3 ft-L条件ではSOAの増加に対して振幅値も多少増加傾向がみられるが、12 ft-Lでは減少傾向を示した。このように、弁別閾との関連で、その前と後では振幅値には著明な変化は見い出せなかった。

以上(1)–(3)の結果は、我々の当初の仮説とは異なる

るものであった。すなわち、我々は、弁別閾と二重刺激の第2刺激の反応出現が対応するものと考えていたが、以上の結果からは、第2刺激に対する反応の有無では弁別閾の推定は困難であることがわかった。もちろん先行研究(吉田・中西, 1981)と本研究では用いた刺激が異なり(先行研究では閃光, 本研究では矩形波), 直接比較することはできない。し

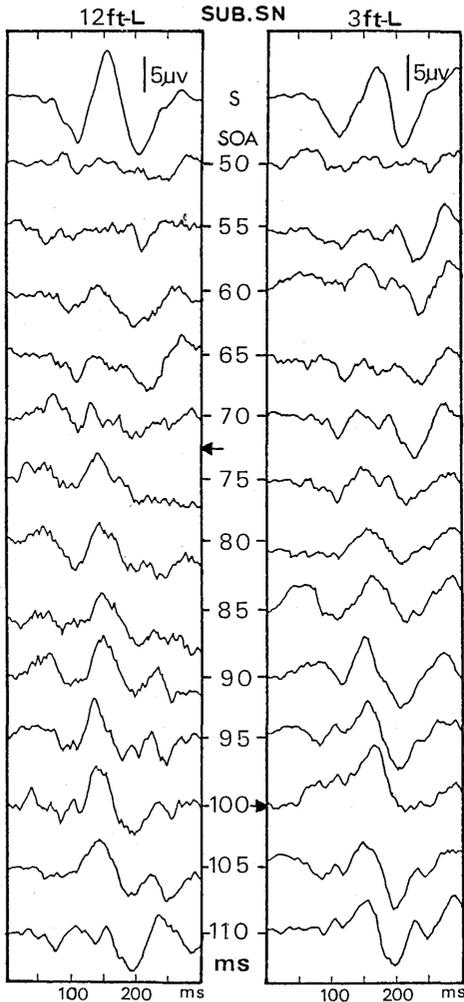


Fig. 3 The response to the second-flash extracted by means of subtraction method at each SOA. The waves begin at second flash onset. Arrows indicate the double-flash thresholds at two luminance levels.

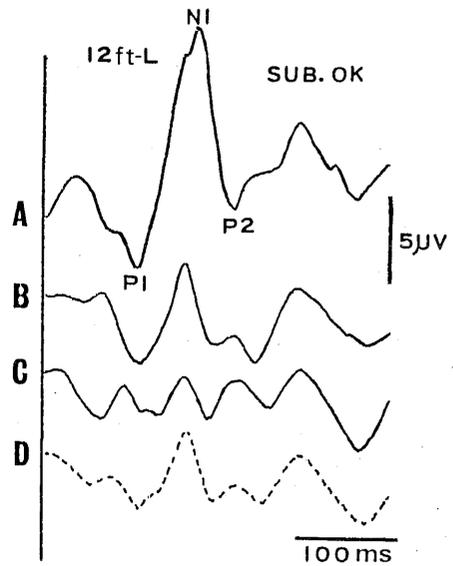


Fig. 4 Averaged second-responses to SOA stimuli shorter or longer than the double-flash threshold. A: a single-VEP. B: averaged second-response to shorter SOA stimuli than the threshold. C: the averaged second-response to longer SOA stimuli than the threshold. D: average response of B and C.

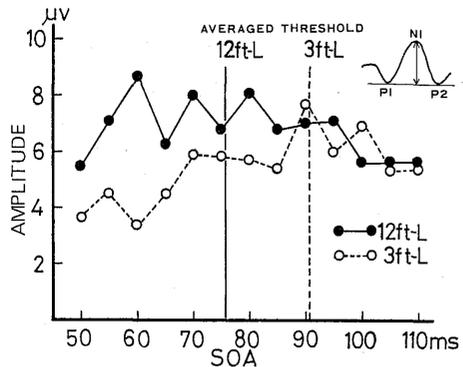


Fig. 5 Average amplitudes of the second-responses of five subjects, which are measured as illustrated on the right upper side of this figure. Vertical lines indicate average of double-flash thresholds of five subjects.

かし、これらの研究結果を総合すると、二重刺激の第2刺激に対するVEPは、ごく短いSOAではみられないが、少なくともSOA 50ms以上では常に出現するといえるだろう。

単発反応による弁別閾の推定

二重刺激の第2刺激に対する反応の有無からは、弁別閾を推定できないことがわかった。そこで改めて単発刺激から弁別閾を推定できないかと考えた。

Fig. 4に示したように、持続時間の短い単発刺激に対する反応は、P1-N1-P2の反応経過をたどって刺激前の水準にもどる。もちろん、刺激強度、背景輝度に応じて各成分の潜時は異なるが、基本的な相は変化しない。これは、ユニット・インパルス応答(UIR)とよばれている(Ganz, 1975)。二重刺激の第2刺激の反応が、このUIRのP1-N1-P2の時間に入った場合、第2刺激は知覚されないと仮定する。この仮説を実証する研究はいくつか提出されている(White, 1963; Harter & White, 1967)。我々はこの考え方を基に、弁別閾とVEPの関係を検討した。

方法と結果 VEPのon, off反応の検討(吉田・吉田, 1983)から、VEPのP1成分はon反応成分と考えられる。そこで各被験者の単発反応のP1から弁別閾分だけ時間ずらしを行って、第2刺激によるon反応の理論的時間点を単発反応上に縦線で示した(Fig. 6)。図から分かるように、この時点はN1からP2へ移行する相に存在する。このことは、二重刺激の第2刺激に対するP1成分が単発反応のP2潜時を越えれば、第2刺激は十分知覚されうることを示す。逆に、N1以前の相では第2刺激のVEPが出現したとしても第2刺激は弁別できないことを示す。

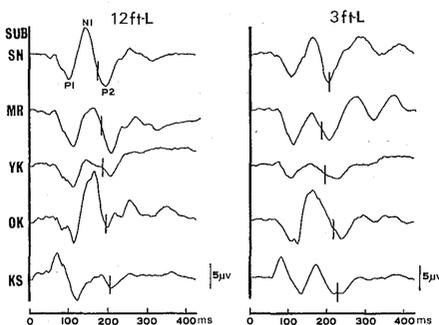


Fig. 6 The relation between the double-flash threshold and P1-N1-P2 phase of a single-VEP in five subjects. The vertical line indicates the threshold of each subject.

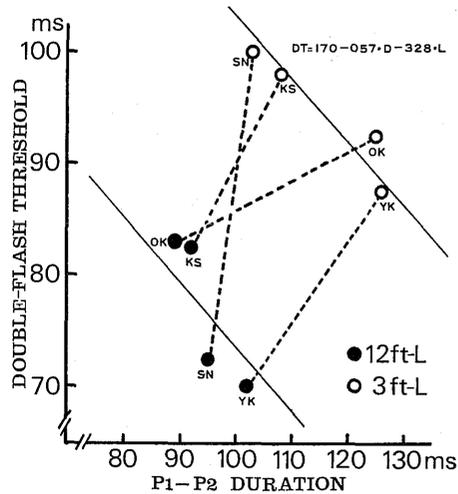


Fig. 7 The relation between the double-flash threshold and the duration between two positive peaks (P1, P2) of a single-VEP. Regression lines are drawn with the linear equation that estimates the threshold (DT) from luminance (L) and duration between P1 and P2 (D).

そこで我々は、P1-N1-P2の相と弁別閾の関連から、各被験者の弁別閾の推定を試みた。弁別閾(DT)を推定するパラメータは、P1-N1の時間幅(D1)、N1-P2の時間幅(D2)および輝度(L: ft·L)とした。重回帰分析を行った結果、寄与率は0.64であった。この中で、輝度による弁別閾の移動が顕著でなかった被験者MRのデータを除いて、改めて分析を行った。その結果、寄与率は0.95と向上し、次の推定式が得られた。

$$DT = 151 - 0.3 * D1 - 0.5 * D2 - 3.0 * L \quad (1)$$

またP1とP2の時間幅(D=D1+D2)と輝度を説明変数として分析した結果は、寄与率0.92となり、次式で表わされた。

$$DT = 170 - 0.57 * D - 3.28 * L \quad (2)$$

この場合、誤差は最大4msであり、Fig. 7にみられるようにDは構造的にも安定しているのほぼ満足できる推定式であると考えられる。

考察 以上から、単発刺激に対するVEPのP1-N1-P2の相の時間幅(D)が二重刺激の知覚上の時間分解能と深く関与していることが確認され、少数データではあるが一つの式で弁別閾を推定できることがわかった。しかし、Fig. 7に示した結果をみると一つの疑問がわく、仮にDの時幅を、次に入力され

る刺激に対して抑制的に働く時間とすれば、Dの幅が短いほど抑制解除が早く、時間的分解能が改善され、弁別閾が低くなるはずである。Fig. 7でも個人内では確かにその傾向がみられる。しかしデータ数は少ないが、個人間で見た場合、逆にDの幅が長い人ほど両輝度条件とも弁別閾が低い。この点について我々は現在解答をもっていない。ただし、まったく逆の関係が見い出されたことは、生理的に何らかの機構が存在することを示唆するものと考えたい。

また、「Dの時間幅は次の入力に対して抑制的に働く時間である」との仮説を個人内に適用すれば、二重刺激の第2刺激に対する反応は興味深いものとなる。Fig. 3, Fig. 4で示したように、第2刺激に対する反応は単発刺激に対する反応に比べて振幅は小さく、Dの幅も多少短い。仮説に従えば、Dの幅が短くなった分だけ、次に入力される刺激の弁別閾はさらに低くなるはずである。いくつか連続して呈示された刺激が、呈示初期よりも一定時間経た時点により多く見えるようになるという報告(Cheatham & White, 1952)は、こうした機構によるものかも知れない。

要 約

これまで我々は、継時的に与えられた二重光刺激の、融合期から、個別に知覚されるまでの過程を視覚誘発電位(VEP)を用いて検討してきた。先の研究では、第2刺激の知覚はその刺激に対するVEPの出現と対応することが示唆された。本研究では、この点をさらに詳細に検討するために、刺激輝度を条件に加えた。

実験は以下のように行われた。刺激は視角 2° (注視点 0.5°)の円環光とし、2つの輝度条件(3, 12 ft-L)の下に、二重刺激、単発刺激として呈示した。二重刺激の場合、刺激開始間隔(SOA)を50 msから5 msごとに110 msまで、13種類の刺激を設け、それぞれ単発刺激と組合せて1試行とした。また、二重刺激の呈示順序は試行ごとにランダムとし、連続100回刺激を2~5 s間隔の被験者ペースで与えた。単発刺激も同様にして与えた。被験者は刺激呈示ごとに、見えた刺激光の個数を報告した。同時にVEPが後頭部(O₂)から単極導出され、磁気記録後、加算平均化および波形分析が行われた。

結果は次のようであった。

(1) 刺激輝度と弁別閾：二重刺激の弁別には個人差がみられたが、従来の知見通り、輝度の上昇に伴い、弁別閾が低くなった。

(2) 弁別閾と第2刺激に対するVEPの反応：第2刺激に対する反応は、二重刺激の反応から単発刺

激の反応を差引くサブトラクト法により抽出された。その結果、両輝度条件とも弁別閾下でも第2刺激の反応が認められた。このことは、単に第2刺激の反応の有無では弁別閾を推定できないことを示している。

(3) 弁別閾と単発刺激：VEPの波形の相と知覚の抑制過程との関係から、弁別閾を2つの正のピークの時間幅と輝度とを説明変数として重回帰分析を行った。その結果、弁別閾を高い寄与率で推定できることがわかった。

引用文献

- Cheatham, P. G. & White, C. T. 1952 Temporal numerosity: I. Perceived number as a function of flash number and rate. *Journal of Experimental Psychology*, **44**, 447-451.
- Donchin, E. & Lindsley, D. B. 1965 Visually evoked response correlates of perceptual masking and enhancement. *Electroencephalography and clinical Neurophysiology*, **19**, 325-335.
- Ganz, L. 1975 Temporal factors in visual perception. In E. C. Carterette & M. P. Friedman (Eds), *Handbook of perception*. vol. 5, New York: Academic Press. Pp. 169-231.
- 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.
- 吉田 茂 1983 PS-85による脳波データ処理——EDASの紹介——TEAC Technical Report, **9**, 7-16.
- 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 **19**, 1, 52.
- Yoshida, T. 1983 Visually evoked potentials at different rates of flash stimulation and concomitant perceptual changes. *Japanese Psychological Research*, **25**, 2, 86-94.
- White, C. T. 1963 Temporal numerosity and the psychological unit of duration. *Psychological Monographs*, whole No. 575.