

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¹

筑波大学心理学系 吉田 茂

筑波大学大学院(博)心理学研究科 吉田 倫幸

A simulation of visual evoked potentials to light and dark stimuli by their on and off components

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

Abstract

Visual evoked potentials to light and dark stimuli (5 ft-L) with the durations of 10-1000ms were extracranially obtained from occipital cortex in human subjects. VEPs were simulated by two kinds of components, the one was on or off component which was unconditionally discharged by onset or offset of light stimulus, and the other was light or dark adapted component which was discharged by stimulus offset or onset under light or dark adaptation. A physiological model of VEP components, which was composed of B and D neuron as differential components and glial cells with adaptive threshold as integral components, was proposed as a basic model for the facts of VEPs by various temporal patterns of stimulation.

Key words : visual evoked potential, light stimulation, dark stimulation, on component, off component, simulation, physiological model.

視覚系の生理機構に関しては、動物を用いた細胞レベルでの研究が行われ、多くの発見がなされてきた。しかし、ヒトの知覚現象レベルの解明までには至っていない。そこで、ヒトの場合には、頭皮上から得られる視覚誘発電位 (VEP : visual evoked potential) が用いられ、言語報告等により明らかにされる知覚現象との対応づけがなされてきた (Regan 1972, Desmedt 1977)。

しかし、従来の潜時、振幅、周波数などの表面的波形分析法では、さまざまな電位が混入した VEP と、特定の脳機能とを対応づけることは難しい。

本研究では、刺激の on, off に対する VEP の基本モデルをたてることによって、脳機能と VEP との対応づけを試み、これをヒトの知覚現象の生理的機能を解明するための手がかりとしたい。

VEP の記録

被験者 健康男子 3 名

刺激装置 CRT (SONY TEKTRONIX 624)

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、および文部省科学研究費総合(A)(代表者：藤沢 清)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金子隆芳教授に感謝致します。

MONITOR) を用い、ファンクション・ジェネレータ (NF CIRCUIT DESIGN BLOCK FG-143) からの 3 MHz の三角波で、管面上に 5 ft-L (17 cd/m²) のラスタをつくる (掃引速度は 10 μs/div)。さらに、管面上に 5°×5°(1°×1°ユニット) のチェッカーボード・パタンのマスクを装着し、Z軸輝度変調によって明、暗の刺激をつくる。変調は電気刺激装置 (日本光電 SEN-7103) により、10, 50, 100, 150, 200, 1000 ms の矩形波を与えて行う。

脳波記録 脳波は、Ag-AgCl 不飽和電極を用い、後頭部 (Oz) から左耳朶を不飽和電極として単極導出し、脳波計 (三栄 1A57) で記録した (時定数 0.3 s)。同時に脳波と刺激呈示マークをデータレコーダ (SONY NFR-3515) にて磁気記録した。

手続き 被験者は電極装着後、電磁シールド防音室内に腰かけ、頭部を顔面固定器に固定する。明刺激の場合は全視野の暗順応、暗刺激の場合は先に述べた 5 ft-L のチェッカー・パタンによる中心視野の明順応を、それぞれ 10 min 行う。その後、被験者は CRT を固視し、瞬目をしないようにして刺激トリガボタンを押す。アーチファクト除去のため 700 ms の遅れで刺激が呈示される。ボタンを押して約 2s 間は瞬目や眼球運動をしないよう、また次のボタン押

しまでは約4~6sの間隔をおくよう、予め被験者ベースの方法を練習しておく。刺激呈示は、脳波をモニタしながらアーチファクトのないデータが60サンプルとれるまで繰り返す。

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(三栄7T07A)にて、50回の加算平均によりVEPが求められ、グラフ用紙上に描き出された。サンプルは、2ms間隔で512ポイント、分析時間は1022msである(刺激前62msを含む)。

結果と考察 加算平均されたVEPの1例をFig. 1に示す。

明(light)刺激に対するVEPを $Lr(t)$ 、暗(dark)刺激に対するVEPを $Dr(t)$ と略記する。ここに t は分析対象時間(0-630ms)を示し、 r は刺激呈示時間(10-200ms)を示す。また、 $r=1000$ msの場合は、省略して $L(t)$ 、 $D(t)$ と表記する。

明刺激下では、図中最下の $L(t)$ に示したような4つのピーク、LP1(潜時約100ms)、LN1(約180ms)、LP2(約210ms)、LN2(約280ms)が著明である。各刺激条件に対するVEPを比較してみると、LP1、LN1は安定し、LP2、LN2が変動していた。

暗刺激下では、 $D(t)$ に示したDN1(約130ms)、DP1(約180ms)、DN2(約340ms)がみとめられる。この中で安定しているものはDN1であり、DP1、DN2は変動していた。

従来のVEPの分析方法は、共通ピークの潜時とピーク間振幅、あるいは変動の面積等の測定が主であり、この方法では現象記述の域を出ない。

そこで我々は、明暗刺激のon, offの時間のずれから一つのモデルを考えた。つまりVEPの安定したピークは刺激開始のみによる成分であり、変動するピークは刺激終了による成分を含むと考えた。従ってVEP出現中に刺激終了を含まない $L(t)$ 、 $D(t)$ は、刺激開始のモデルデータとみなせる。また次に詳しく述べるが、単純に $L(t)$ 、 $D(t)$ の成分の合成をしてみると、刺激終了の成分は $L(t)$ 、 $D(t)$ の後期成分(150ms以後)を含まず、 $Lr(t)$ にはDN1ピークが、 $Dr(t)$ にはLP1ピークのみが関与しているようである。それぞれのピークを図中に矢印で示した。

シミュレーション

目的 目的は、VEP(Oz)のon成分(ON(t))、off成分(OFF(t))の推定、およびこの2成分と刺激時間(r)によって $Lr(t)$ 、 $Dr(t)$ を再現することにある。ここでは、主要成分の再現を主眼とし、波形全体の類似度は第二義とする。

方法 演算は、計測処理システム(TEAC PS-85)を用い、グラフィックで波形を確認しながら

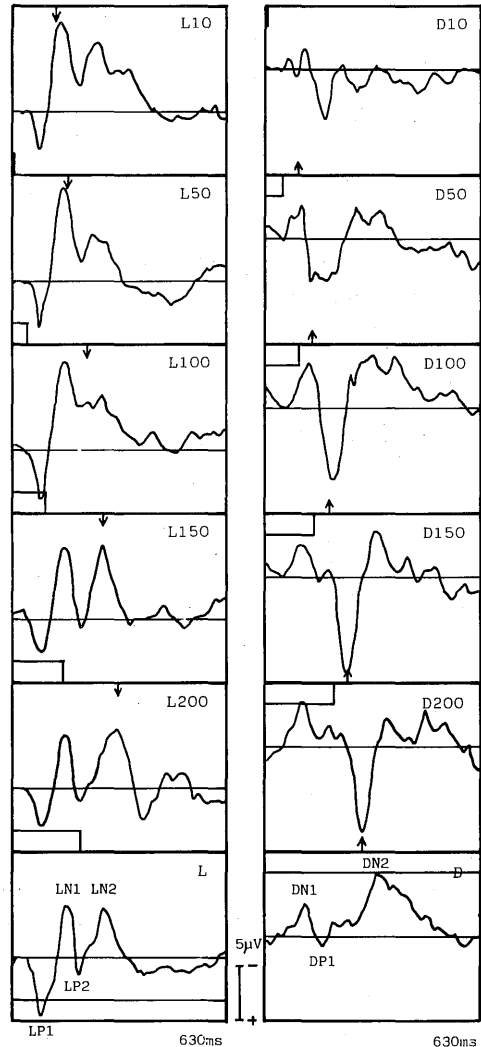


Fig.1 VEPs to light stimulus (left column) and to dark stimulus (right column). The numbers and rectangular marks indicate the durations of light or dark stimulations. Arrows in the left column show theoretical peak latencies of DN1 and ones in the right column those of LP1. (Subject: S. Y.)

行い、結果はビデオプリンター(SEIKO VP-55)に出力した。相関マトリックス等の演算は、TSSにより本学学術情報処理センター(FACOM M-200)へデータ・ファイルを転送し、SASにより行った。

手続き on, off成分の推定と、再現手続きを順を追って説明する。

(1) 実験データは、分析時間内に次の刺激特性を含むと考える。

- $L\tau(t)$: onset, 明期, offset, 暗期
- $L(t)$: onset, 明期(明刺激開始のモデルデータ)
- $D\tau(t)$: offset, 暗期, onset, 明期
- $D(t)$: offset, 暗期(暗刺激開始のモデルデータ)

(2) (1)より次式を仮定する。

$$\begin{cases} L\tau^*(t) = L(t) + D(t - \tau) & \text{①} \\ D\tau^*(t) = D(t) + L(t - \tau) & \text{②} \end{cases}$$

以下、処理対象時間は $0 \leq t \leq 630(\text{ms})$, $\tau \geq 0$, の波形とし定義域外の振幅値は全て 0 とする。*印は推定を表わす。実際にこれを再現すると、後期成分の一致度が悪かった。

(3) そこで、 $D\tau(t)$ から on のみの成分を、 $L\tau(t)$ から off のみの成分を次式で推定する²。

$$\begin{cases} ON^*(t) = \overline{D\tau(t + \tau)} & \text{③} \\ OFF^*(t) = \overline{L\tau(t - \tau)} & \text{④} \end{cases}$$

Fig. 2 の ON^* , OFF^* の実線がこれである。点線は $D(t)$ の刺激終了時 ($\tau = 1000 \text{ ms}$) の on 成分 ($ON(D)$), $L(t)$ の刺激終了時の off 成分 ($OFF(L)$) である。両者が共に後期成分を含まないことから、 $ON(t)$ は $L(t)$ の $LP1$, $OFF(t)$ は $D(t)$ の $DN1$ としてよいと考える。

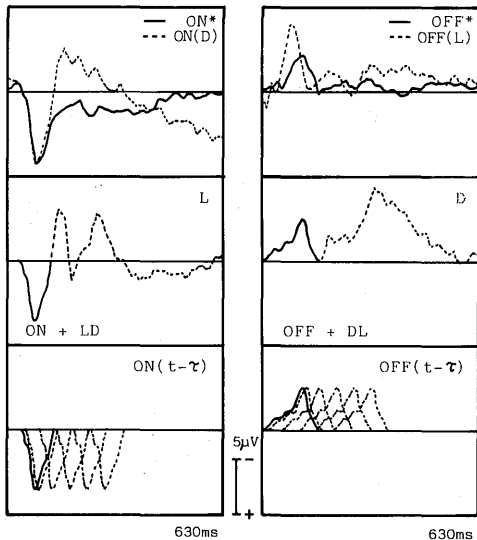


Fig. 2 Process for defining on and off components. See text in detail.

2 (1)(2)から $D\tau^*(t) = D(t) + ON(t - \tau)$ において、 $ON(t) = D\tau^*(t + \tau) - D(t + \tau)$, 推定値は、 $ON^*(t) = \overline{D\tau(t + \tau)} - D(t + \tau)$, ここで $0 < \tau \leq 1$, 加算数 N は十分大きいとして $\overline{D(t + \tau)} = K$ (直流成分) とみなし、DC カットして③を得る。

(4) 実際には、 $ON(t)$, $OFF(t)$ はそれぞれ $LP1$, $DN1$ の変化開始時点から、ピークを経て復帰する点までとして定義する。復帰時点はそれぞれ、 150 ms , 180 ms である。すなわち、

$$ON(t) = L(t) \quad (0 \leq t \leq 150) \quad \text{⑤}$$

$$OFF(t) = D(t) \quad (0 \leq t \leq 180) \quad \text{⑥}$$

Fig. 2 の L , D の実線部が、それぞれ $ON(t)$, $OFF(t)$ を表わす。

(5) 次に $L\tau(t)$, $D\tau(t)$ のモデルを $SL\tau(t)$, $SD\tau(t)$ として次式で表わす (S は simulated)。

$$SL\tau(t) = L(t) + OFF(t - \tau) \quad \text{⑦}$$

$$SD\tau(t) = D(t) + ON(t - \tau) \quad \text{⑧}$$

Fig. 2 に実験で $ON(t)$, $OFF(t)$ を、点線で $ON(t - \tau)$, $OFF(t - \tau)$ の様子を示した。

結果と考察 以上の手続きで得られた結果を Fig. 3 に実線で示した。点線は実験データである (Fig. 1 と同じ)。両者の Pearson の相関係数を右肩に示した ($N = 64$)。

(1) **ON, OFF 成分** $SL\tau(t)$ では $DN1$ ピーク, $SD\tau(t)$ では $LP1$ ピークの理論潜時を矢印で示した。 $SL_{100}(t)$ では $LN1$, $LN2$ 間に $OFF(t)$ の小さなピークがみられ、 $SD_{10}(t)$ には $ON(t)$ の小さなピークがみられる。シミュレーションの結果は、このような小さなピークでも、ノイズとして無視してしまうことはできないことを示している。

$SL_{10}(t)$, $SL_{200}(t)$ ではピークのずれで $LN1$, $LN2$ がブロードに、一方 $SL_{50}(t)$, $SL_{150}(t)$ ではピークの一致で振幅が大きくなっている。全体として $SD\tau(t)$ では $ON(t)$ の振幅が大きいのて明らかにそれと判別できる。

(2) **LD, DL 成分** $ON(t)$, $OFF(t)$ を分離推定した後の、 $L(t)$, $D(t)$ の残りの成分を考察する。関係は次式で表わされる。

$$L(t) = ON(t) + LD(t) \quad \text{⑨}$$

$$D(t) = OFF(t) + DL(t) \quad \text{⑩}$$

これらは Fig. 2 の中段の L , D における点線の部分である。 $LD(t)$ は、刺激前の状態 (実験では $4-6 \text{ s}$) 後の明刺激の onset でのみ発生し、暗刺激 (1 s 以下) 後の onset では発生しなかった。

同様に $DL(t)$ は、明状態後の offset のみで発生し、短時間の明刺激後の offset では発生しなかった。つまり、 $LD(t)$, $DL(t)$ の発生は、 $4-6 \text{ s}$ という短時間ではあるが明暗の状態に依存している。あるいは、刺激開始前の明暗順応 (約 10 min) の影響かもしれない。いずれにしても順応が関与するという意味で、 LD (light state after dark adaptation), DL (dark state after light adaptation) とした。

(3) **モデル** (1), (2)で考察したように、明暗刺激

に対する VEP は、それぞれ独立な ON, OFF, LD, DL で表現される。すなわち, ⑦, ⑧式に⑨, ⑩式を代入して次式を得る。

$$\begin{cases} SL\tau(t) = ON(t) + LD(t) + OFF(t - \tau) & \text{⑪} \\ SD\tau(t) = OFF(t) + DL(t) + ON(t - \tau) & \text{⑫} \end{cases}$$

これが今回の最終モデルであり, 単純だが対称な形で表現できた。

(4) 類似度 今回は振幅のパラメータを入れない

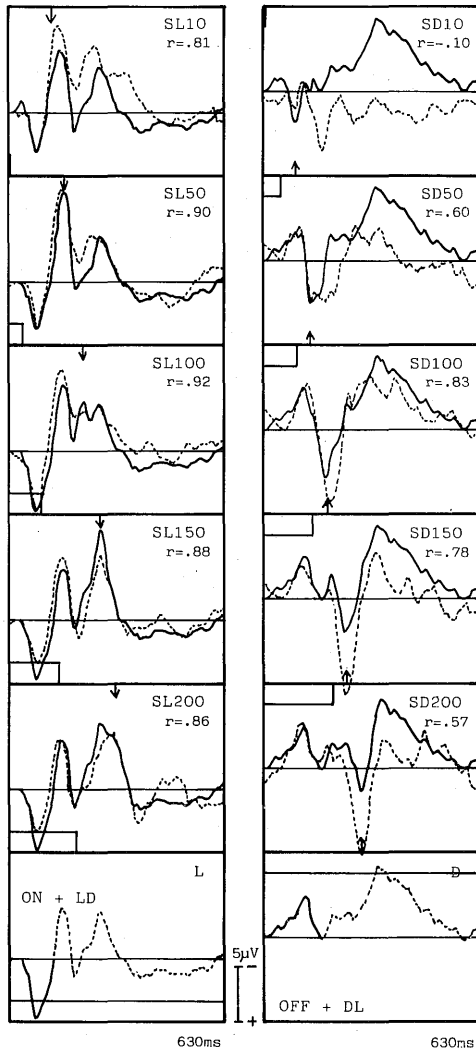


Fig. 3 Simulated VEPs (solid curve) and raw VEPs (dotted curve). Indications are as same as in Fig. 1. Pearson's coefficient of correlation (r) shows a degree of similarity between simulated VEPs and raw VEPs.

かったので, あてはまりは悪かった。Pearson の相関係数を類似度の目安とすると, $SL\tau(t)$ では $r = .81 \sim .92$ ($P < .0001$), $SD\tau(t)$ では $r = .57 \sim .83$ ($P < .0001$), ただし $SD_{10}(t)$ は $r = -.10$ であった。これは手続き(2)の方法での相関より高く, 改善されている。しかし $SL\tau(t)$ と $L\tau(t)$ の相関が $SL\tau(t)$ と $L(t)$ の相関より高いことをシミュレーションの一つの基準とすると, この場合満足していない。

また, 次式

$$\begin{cases} L^*(t) = \overline{L\tau(t)} & \text{⑬} \\ D^*(t) = \overline{D\tau(t)} & \text{⑭} \end{cases}$$

で再現した場合, 相関はより高くなり, 上の基準も満たしていた。さらにあてはめのよいシミュレーションをするには, SALS 等の最小二乗法によればよいだろう(中川, 小柳 1982)。しかし, 今回は目的上, 単純な方法にとどめた。

生理学的モデル

上述の非常に単純なシミュレーションでも, ピークの再現には頑健であることがわかった。次にこのモデルを生理学的に意味づける(Fig. 4)。

例として, 明刺激 (100 ms) が入力された場合を考える。網膜, 外側膝状体での処理を経た情報は視覚領へ流れ, Jung(1972)のいう B(bright), D(dark) システムへ分岐すると仮定する。

Bシステムでは, 刺激 onset より Bニューロンが放電し, 無条件に ON(t) が発生する。同時に, 暗順応状態から明順応状態への移行に伴い, 緩電位が上昇する, つまりBシステムが活性化すると仮定する。この緩電位は, グリア細胞によると考えられる (Cohen 1972, Kuffler & Nicholls 1976)。また, この緩電位は短期記憶的に働く順応状態を表わすと同時に, LD(t) の閾値 ($L\theta$) を設定するものと考ええる。例では, 暗順応で閾値が低いことから LD(t) が発生する。

Dシステムでは, 刺激の onset と同時に, 暗順応から明順応過程へ移り, Dシステムは不活性化し緩電位は下降する。ここに暗刺激がくると Dニューロンが放電し, OFF(t) が発生する。しかし, 100 ms の短時間では十分な明順応状態に至らず, 緩電位の閾値 ($D\theta$) は高く, DL(t) を発生しないことになる。

暗刺激の場合にも, モデルの対称性から同様の考え方で説明できる。

こうして, ON(t), OFF(t) は一過性の変化のみの微分情報もち, LD(t), DL(t) は状態を含んだ相対的明暗積分情報をもつと考えられる。細かなネットワークは不明であるが, 両システム内で, パ

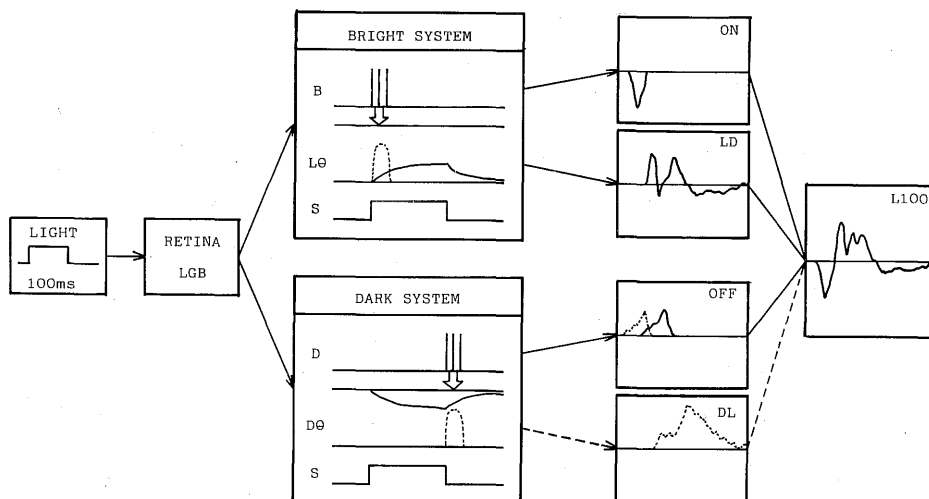


Fig. 4 A physiological model of VEP components (in case of 100ms light stimulation). B: B neuron, D: D neuron, L θ : light adapted threshold, D θ : dark adapted threshold, S: stimulus mark.

ルスと緩電位とが協応したハイブリッドの論理回路が働いて情報処理される二元過程機構 (Pribram 1971) は、生体情報処理過程の経済性、対称性からも十分に考えられることである。

全体的考察

以上のように、VEP 成分をシミュレートし、その発生の生理学的モデルを提出したが、1名のデータで、Ozのみの分析であること、そして輝度、刺激勾配等のパラメータを入れていないことなどが不十分な点である。

しかし、少なくとも onset, offset のみの成分が分離推定でき、しかも状態に依存する LD, DL 成分の意味もある程度つかめたことは、今後のモデル構築に役立つものである。

瞬目、開閉眼の VEP (吉田ら 1982 a) では、このモデルで逆に安定した眼瞼反射電位を推定することにより、暗闇時間の正確な測定が可能となるであろう。時間加重効果の VEP (吉田ら 1982 b) では、状態の LD, DL を詳しく解析することにより説明が可能となると考えられる。二重刺激の VEP (吉田ら 1982 c) では、今回のモデルを適用すれば第 2 刺激のマスキングの有無が VEP で十分に評価できるだろう。周期光の VEP (吉田ら 1982 d) では、同期過程における on, off 成分のみのシミュレーションが有効となるであろう。

今後、中心部 (C₂) との関係、および他の被験者のデータについても分析し、モデルを一般化してい

く必要がある。

要約

視角 5°×5°のチェッカーボード・パタンで、10, 50, 100, 150, 200, 1000 ms の明、暗刺激 (5 ft-L) を、被験者ベース (4~6 s 間隔) で与えた。脳波は後頭部 (Oz) より単極導出し、50 回の加算平均により、明、暗視覚誘発電位 (VEP) を求めた。デジタルサンプルは 64 ポイント、10 ms 間隔、時間は 630 ms であった。

VEP のシミュレーション波形は、次の成分で構成され、ピークの推移が確認された。この意味で頑健なモデルとみられた。成分は、刺激の onset, offset の一過性の変化のみによる、on 成分、off 成分と、刺激前の順応状態によってその発生が決定される、明順応成分、暗順応成分である。

また視覚系の生理学的モデルが次のようにたてられた。B(bright)システムと D(dark)システムにおいて、順応状態が緩電位で表わされている。明、暗刺激により B, D システムの on, off 成分が無条件に発生し、順応状態により順応成分の発生が制御される。つまり、暗順応状態で明刺激が開始されると、on 成分と暗順応成分が発生する。明順応にいたる前に明刺激が終了すると、off 成分のみが発生し明順応成分は発生しない。on, off 成分は変化のみの微分情報を持ち、順応成分は状態と関連する明暗積分情報をもつと考えられた。

引用文献

- Cohen, M. W. 1970 The contributions by glial cells to surface recordings from the optic nerve of an amphibian. *Journal of physiology*, **210**, 565-580.
- Desmedt, J. E. 1977 *Visual evoked potentials in man: new developments*. Oxford: Clarendon Press.
- Jung, R. 1972 Neurophysiological and psychophysical correlates in vision research. In A. G. Karczmar & J. C. Eccles (Eds.), *Brain and human behavior*. Berlin: Springer Verlag. Pp. 209-258.
- Kuffler, S. W. & Nichols, J. G. 1976 *From neuron to brain: a cellular approach to the function of the nervous system*. Massachusetts: Sinauar Associates. Pp. 255-288.
- 中川 徹・小柳 義夫 1982 最小二乗法による実験データ解析—プログラム SALS UP応用数学選書7 東京大学出版会
- Pribram, K. H. 1971 *Languages of the brain: experimental paradoxes and principles in neuropsychology*. New Jersey: Prentice-Hall. Pp. 3-25.
- Regan, D. 1972 *Evoked potentials in psychology, sensory physiology and clinical medicine*. London: Chapman and Hall.
- 吉田 茂・吉田 倫幸・永村 寧一 1982 a 瞬目および開閉眼でトリガされる視覚誘発電位脳波と筋電図, **10**, 43.
- 吉田 茂・吉田 倫幸・金子 隆芳 1982 b 視覚の時間加重効果と視覚誘発電位—刺激周波数と明暗比—日本心理学会第46回大会発表論文集, 28.
- 吉田 倫幸・吉田 茂・永村 寧一 1982 c 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**, 42-43.
- 吉田 倫幸・吉田 茂・金子 隆芳 1982 d 周期光に対する見えの変化と視覚誘発電位(2)—明・暗順応の効果—日本心理学会第46回大会発表論文集, 28.

— 1982. 9. 30. 受稿 —