

寄	贈
吉 田 茂 氏	平 成 年 月 日

DB
722
1991
(H)

視覚誘発電位の二元過程モデル と視覚特性

1991

吉 田 茂

95004025

はじめに

本論文は、視覚誘発電位を数式表現してモデル化を行ない、視覚特性との関連を検討したものである。

視覚誘発電位は、現在、さまざまな方面から研究されてきており、臨床診断等にも応用されつつある。生理心理学でも、感覚、知覚、認知等の心理現象との関連で研究が続けられている。本研究では、その中のとくに感覚レベルの現象に絞って検討した。すなわち、生理学的にも基本とされている興奮・抑制過程を重視して、視覚誘発電位を表式化した。これを二元過程モデルとして提出し、視覚の基本特性との関連を議論した。

人間の視覚誘発電位は頭皮上から間接的に記録しなければならず、これまで研究を進めながらもどこか霧の晴れない感じを抱いてきた。しかし、仮説的ではあるが、この波形のモデル化という眼鏡を通して見たときに、眼前の視界がすっと開けてきたという印象を強くしている。

論文の作成にあたっては、できるかぎりコンパクトになるように心掛けた。内容的には素描の段階にとどまり、やや強引なところもあるが、多少なりともインパクトがみられれば幸いである。

1991年5月8日

目 次

第1章 序 論

1. 1	視覚誘発電位研究の系譜	1
1. 2	視覚系の時空間特性	3
1. 3	二元過程モデルの源流	5
1. 4	本論文の研究目的と構成	14

第2章 オン・オフ光刺激に対する視覚誘発電位の二元過程モデル

2. 1	目 的	20
2. 2	実 験	22
2. 3	モデル構成	26
2. 4	全体的考察	34
2. 5	ま と め	38

第3章 パルス光刺激に対する視覚誘発電位の二元過程モデル

3. 1	目 的	39
3. 2	方 法	40
3. 3	結 果	45
3. 4	考 察	49
3. 5	ま と め	52

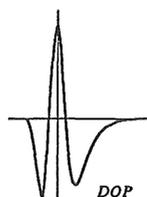
第4章 ダブル光刺激に対する視覚誘発電位の二元過程モデル

4. 1	目 的	53
4. 2	方 法	54
4. 3	結 果	61
4. 4	考 察	64
4. 5	ま と め	66

第5章 トレイン光刺激に対する視覚誘発電位の二元過程モデル

5. 1	目 的	67
5. 2	方 法	68

5.3	結果	74
5.4	考察	79
5.5	まとめ	83
第6章 視覚誘発電位二元過程モデルの動的シミュレーション		
6.1	目的	85
6.2	方法	87
6.3	結果	92
6.4	考察	97
6.5	まとめ	99
第7章 結論		
7.1	全体のまとめと結論	101
7.2	今後の展望	103
文献		105
本研究に関する発表状況		112
謝辞		114



第1章 序 論

1. 1 視覚誘発電位研究の系譜

視覚誘発電位 (VEP: visual evoked potential) は脳波活動のひとつで、心理学の分野でもさまざまな観点から盛んに研究されてきている。はじめに、いくつかの文献 (Desmedt, 1977, 1990; 岩原, 1981; 黒岩・Celesia, 1989) を参考にしながら概観していく。

視覚誘発電位は、眼の網膜に光刺激を与えたときに大脳皮質視覚領野に生じる、発生潜時がほぼ固定された一過性の電気活動である。動物では直接脳に電極を刺入して記録されている。しかし、人間の大脳誘発電位は頭皮上から記録せねばならず、大振幅の自発脳波等に埋もれてしまう。今から約 40 年前に、Dawson (1947) は、重ね書きの手法によりこれを初めて解決した。その後のコンピュータのめざましい発達により加算法が開発され、急速に発展して現在に至っている。このように、大脳誘発電位研究は、マイクロボルト単位の微弱な電気信号をいかに抽出するかの歴史でもあった。一方、刺激法については、初期には閃光刺激が主流であったが、1960 年代後半には、安定した波形が得られることからパターンリバーサル刺激法へと移行し、臨床診断への道も開かれてきた。1984 年以後、視覚誘発電位の国際的な測定基準が設定され、詳細な点が整備されつつある。しかし、視覚誘発電位の発生起源については、動物では多く研究されているが、人間ではまだ確立されていないのが現状である。今

後求められるものは、この生理学的な発生機序の解明であり、また心理学的現象との密接な対応関係の研究であろう。そして、心理現象からの接近法としては、ピークの潜時、振幅等の測定のみでなく、視覚誘発電位をモデル化し心理学的意義づけを行なっていくことが必要である。

ここで人間のフラッシュ視覚誘発電位の典型例を示す (Fig.1.1)。これは、Cigánek (1961) が、Dawson (1947) の重ね書き法を用いて、手書きで平均化して求めた VEP であり、研究当初の貴重なデータである。VEP 波形は、100 ms 以前の初期成分、それ以後の約 240 ms までの後期成分に分けられ、そして後半の律動性後発射へと続く。いくつかのピークには番号が付けられ、途中不安定な部分は点線となっている。フラッシュ光なので波形が複雑になっており、また律動性後発射もやや大きくなっている。しかし、一過性の脳波活動としては、基本的な波形パターンであるとみなされる。

視覚誘発電位を検討するうえで刺激特性はとりわけ重要である。一般に空間的な分類では、全視野フラッシュ法と、チェッカーボードや格子縞などのパタ

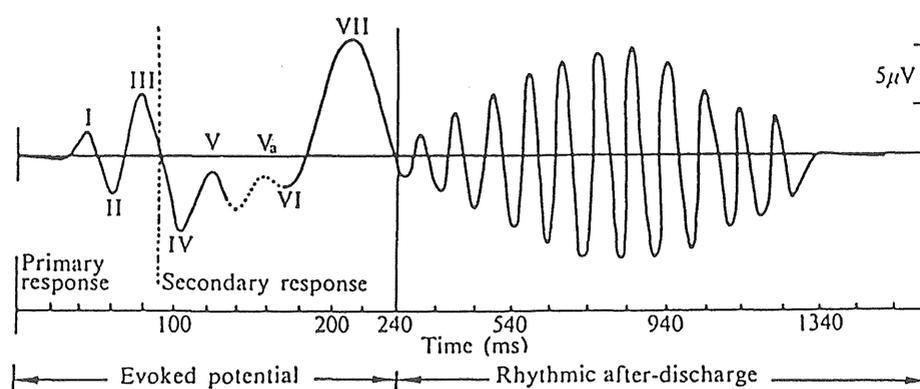


Fig.1.1. ヒトのフラッシュ VEP の模式図

初期成分、後期成分、律動性後発射の3成分が認められる。時間軸目盛は、240 ms を境にして異なるので注意。I-VII の数字は、VEP のピーク成分の番号である。(Cigánek, 1961)

ーン刺激法がある。全視野刺激法では刺激光が眼球内で乱反射を起こし、波形が複雑になる。チェッカーボードなどのパターン刺激では、空間的なエッジの検出ユニットが数多く活性化され、これも複雑な波形になる。時間変調では、単発のフラッシュ、二重フラッシュ、多重フラッシュおよび正弦波状の変調などがある。現在主流のパターンリバーサル法は、刺激面全体の平均輝度を一定に保つようにしてチェッカーボードなどの白黒反転をする方法であり、時空間特性を合わせもつ。正弦波法あるいはパターンリバーサル法では、刺激交代の間隔自体が一種のフィルターとなり、それに同期した波形のみが抽出されることになる。また、単発刺激の場合は過渡型 VEP、周期刺激の場合は定常型 VEP として区別されている。

視覚誘発電位は、感覚ばかりでなく、注意、判断、運動反応といった高次の精神活動との関連についても検討されている。感覚系は約 300 ms 以内の初期成分が関与しているとされ、その後の後期成分は認知的な関連が示唆されている。とくに後期成分については、最近、事象関連電位 (ERP: event related potential) として心理学の分野で盛んに研究されてきている。

1. 2 視覚系の時空間特性

つぎに、視覚特性について考える。我々は、いかなるときにも時間の船に乗って活動している。しかし、全ての情報を処理しなければならないとすると過負荷が生じ、システムは破綻をきたすことになる。そこで、時間的・空間的な間引きをし、記憶などでそれを補完しながら効率よく情報処理して適応してい

る。情報処理の一段階である知覚機構には、基本的に微分積分作用があり、分解能や統合能として特徴づけられている。また、神経系では、伝送系での情報欠落防止策として、パルス変調が行なわれている。その後、復調がなされて信号の復元が行なわれる。この過程に生じる副産物も、いろいろな知覚現象を生じさせている。これらは、一種の錯覚として取り扱われるが、けっして誤りではなく、知覚情報処理の必要不可欠な機構の過補償現象であると考えられる。そして、このような現象を手掛かりに視覚機構を探っていくことができる。

ここでは、視覚系の時空間特性のうち本論文に関連するもののみ、いくつかの文献（和田・大山・今井，1969；田崎・大山・樋渡，1979；Boff, Kaufman, & Thomas, 1986）を参考にしながら簡単に概観する。詳細な関係については、各章で論議する。

ブロック(Bloch)の法則： 100 ms 以内で、明るさ知覚（光覚閾）が輝度と時間の積として表現できる時間加重効果である。ただし、閾上の光刺激に対しては近似的にしか成立しない。臨界時間は順応光の増大により短縮する。

ブローカ・スルツァー(Broca-Sulzer)効果： 50-100 ms の光刺激持続時間では、ブロックの法則で予測される以上の明るさが知覚される。これは、輝度が高いほど効果が大きく、明るさのピークが短くなる。周辺視でも 50 ms 付近では明瞭な効果が認められている。刺激のオフ効果がコントラストを高めた結果と考えられる。

ブリュッケ・バートレー(Brücke-Bartley)効果： フリッカー光の平均輝度よりも明るく感じられる現象で、とくに 10Hz 近傍で明るさのピークがみられる。ブローカ・スルツァー効果の集合とも考えられている。また、自発脳波のアルファ波の周波数との関連でも検討されている。

リッコ(Ricco)の法則： 光覚閾を決定するのは輝度のみではなく、刺激面積が寄与するという空間加重効果である。面積の開平に比例するとするパイパー(Piper)の法則もある。しかし、ブロックの法則ほど完全には成立しない。空間的な興奮・抑制過程のコントラスト効果が効いていると考えられる。

視覚的持続時間： 約 100 ms 以内では実際の刺激持続時間よりも長く感じられる現象である。刺激時間が長くなればその効果は少なくなり、刺激消失直後に終了感が生じる。順応によるオフ反応が大きくなり、明刺激終了感の切れがよくなったものと考えられる。

マスキング： 2つの刺激が相互に干渉してそれらの弁別力を低下させる現象である。第1刺激が第2刺激のマスクとして働く場合を順向マスキング、反対を逆向マスキングという。時間的な抑制帯の及ぼす相互効果であると考えられる。

以上、主なものを取りあげたが、これらにはいずれも視覚のオフセット・オンセットが大きく関与している。この観点からオン・オフの視覚誘発電位を分析することにより、視覚現象を統一的に説明できると考えられる。

1. 3 二元過程モデルの源流

これまで、視覚誘発電位と視覚特性について概観してきた。ここでは、本論文で展開する二元過程モデルを考えるに至った経緯について述べる。基礎となる研究は、年代順に、Bidwell (1899), Ratliff (1961), Rodieck (1965), Roufs & Blommaert (1981) のものである。以下、この順に従って研究を引用していく。

(1) 光と見えの不思議

英国の物理学者 Bidwell (1848-1909) は、約 100 年前の著書 "Curiosities of Light and Sight" (1899) で、光と見えについてさまざまな不思議な現象を解説している。光のエーテル説から説き起こし往時を偲ばせるところもあるが、視覚の現象学的内容については現代にも生き続けている。その中で、彼は、光の明滅刺激に対する見えの不思議についてふれている (Fig.1.2)。

この図を、彼自身の記述によって説明する。「網膜に一定時間の光刺激が与えられたときに観察される視覚現象を、詳細に順を追って記述すると次のようになる。(1) 光刺激の照射と同時に明感覚が生じる。感覚の強度は 1/60 秒間で増大し、増大の仕方は始めより後半で急峻になる。(2) 引き続いて、急激な反作用(減少)が起こり、これも 1/60 秒間続く。このことによって、網膜は、再度与えられるあるいは持続する光刺激に対して不感応状態になる。この2つの効果の弱いものが3, 4回繰り返される。(3) このゆらぎの状態が

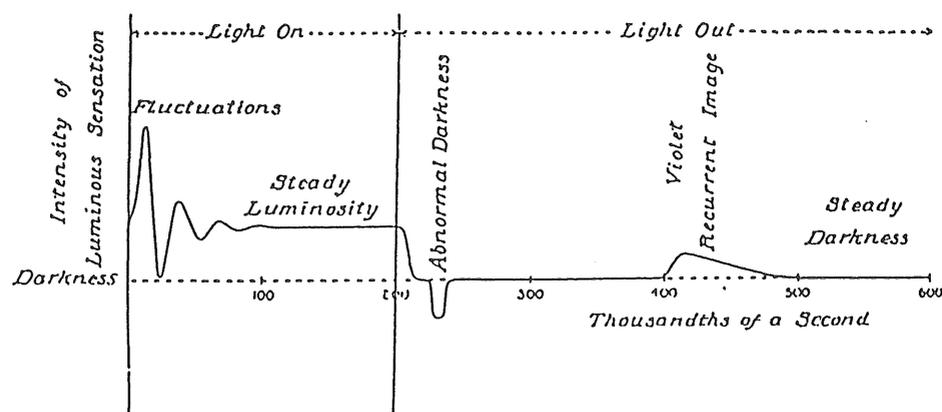


Fig.1.2. 短時間の光刺激に対する人間の明暗感覚の変化
光刺激の持続時間は 200 ms. 基線は基準暗感覚(順応状態)のレベルを示す。(Bidwell, 1899)

一定の明るさの感覚になるまで続く。しかし、その一定の感覚強度は最初の 1/60 秒間に知覚される強さの平均よりもかなり低い。(4) 外部光刺激が消失したあとは、明るさの弱まる感覚が短時間続き、ついでごく僅かの間、基準の暗感覚が生じる。(5) 次に、急にそしてはっきりした異常暗感覚(基準暗感覚より暗い感覚)と呼ばれる感覚が起こる。これは、約 1/60 秒間続き、また次の状態の基準暗感覚が起こる。(6) 最後に、外部光刺激の消失後、約 1/50 秒間に一過性の明感覚が起こる。これは一般に堇色をしている。その後、一定の基準暗感覚が持続する。」

(2) カブトガニの側抑制効果

Ratliff(1961)は、カブトガニを用いた興奮・抑制過程の研究をした(Fig.1.3)。記録期間中、一つの受容ユニット(黒丸)を定常順応光で照射しておく。もう

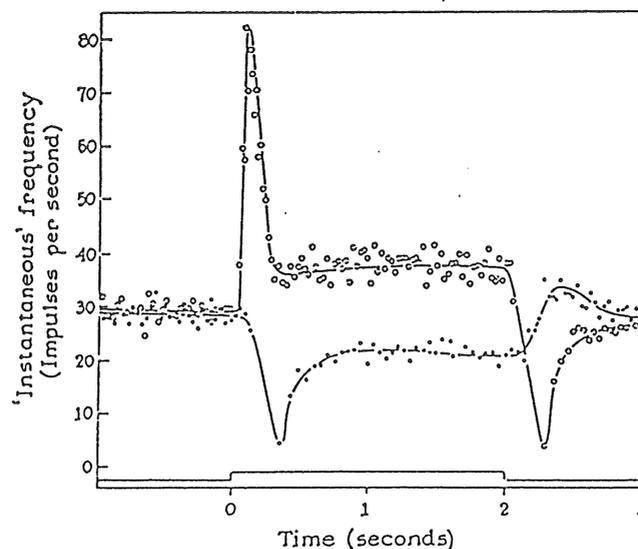


Fig.1.3. 隣接する2つの受容ユニットにおける興奮・抑制の発火頻度の同時記録
カブトガニ (*Limulus*) の側眼からの記録。白丸で表されるユニット(上側)の発火頻度が、隣接する黒丸ユニット(下側)に抑制効果を与える。(Ratliff, 1961)

一つのユニット（白丸）は、時間ゼロ以前は定常順応光で照射し、次に2秒間輝度レベルをあげ（刺激光）、その後また順応光のレベルにもどす。刺激光照射により、この白丸ユニットの発火頻度は一過性に大きく増加し、またすぐに順応光の頻度レベルに落ち着いた。次に、刺激光の消失によって、一過性の減少が起こり、その後また順応光のレベルにもどった。隣接する順応光照射を受けていた黒丸ユニットは、これら興奮反応に付随して一過性の抑制効果がみられた。この頻度減少は、白丸ユニットの興奮反応による抑制効果である。刺激期間も、依然この抑制効果がみられるが弱くなっている。最後に、白丸ユニットの反応の頻度減少に伴って、黒丸ユニットの抑制の解除がはっきりとみられる。

その後、Ratliff, Hartline, & Miller (1963) は、Bidwell (1899) の図 (Fig.1.2) を引用してコメントしている。「この減衰振動（これは相互作用をもつネットワークの遅延時間に由来する）は、よく知られた視覚現象と類似している。高輝度のブローカ・スルツァー効果のゆらぎ、シャルパンティエ帯 (Charpentier's band)、および同様のゴーストなどは、視覚経路の遅延抑制効果に由来することが多い。実際、（前述した）抑制ネットワークの時間特性と、視覚現象の時間特性との類似性には目を見張るものがある。たとえば、Bidwell (1899) の報告で、光刺激の見かけの明るさの変化（シャルパンティエ帯に基づくもの）は、我々が報告してきたシステムと非常によく似た減衰振動の波形を示している。一つの抑制ネットワークがこのような現象を引き起こすことを、ここで直接観察できたということは、人間の視覚系でも同様の抑制機構が働いているという考え方を支持するものである。」

(3) ネコの受容野特性

Rodieck (1965) は、ネコの網膜神経節細胞の受容野特性を研究しモデル化した (Fig.1.4) . 受容野上を動く幅の広い刺激バーによって、右側の「反応曲線」と命名した連続曲線が得られる。これは、中心活性型 (CA) 反応と中心抑制型 (CS) 反応から合成できると考えた。すなわち、CS を極性反転して CA に加算 (つまりは減算) したものが反応曲線である。この反応曲線は、一つのニューロンの無刺激状態の静止発火レベルを基準とした、視覚刺激に対する反応を表していることになる。

彼は、この反応曲線の生成過程を説明するために、8つの成分に分解した (Fig.1.5) . 左側の持続成分は、刺激バーの動きに対して受容野の前部・後部の

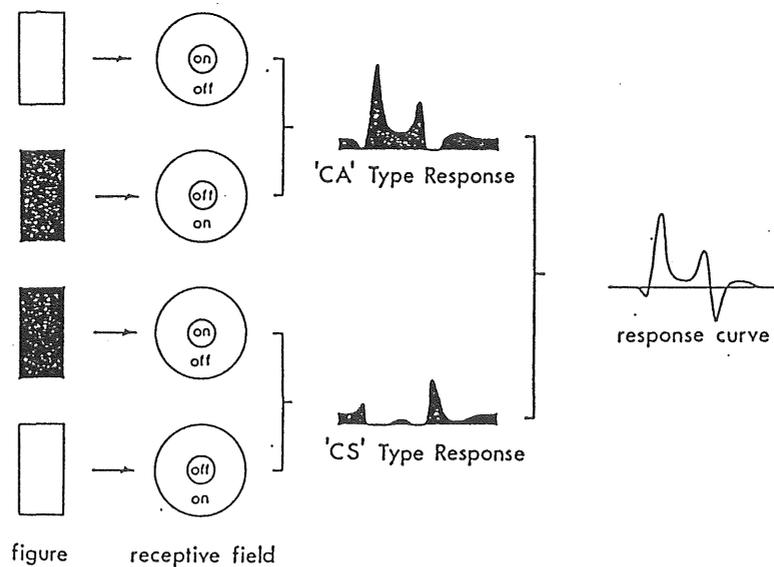


Fig.1.4. 受容野上を動く明暗刺激バーに対する網膜神経節細胞の特徴的反應
 左図は受容野集合を刺激する幅広の刺激バー (白：明刺激, 黒：暗刺激) . 中央の同心円は、オン中心型, オフ中心型の受容野. 黒の波形は中心活性型 (CA) 反応と中心抑制型 (CS) 反応. 右側の波形は、CA, CS を合成した反応曲線. (Rodieck, 1965)

ステップ状の波形が合成されたものである。右側の過渡成分は、受容野前部（Leading Edge）においては、中心の細い上向きの反応と、周辺のそれより広い下向きの反応とが発生し、受容野後部（Trailing Edge）においてはその極性が反転した波形が発生して、両者が合成される。さらに、これら持続成分と過渡成分とが合成されて、反応曲線が得られると考えた。

（4）光覚閾の応答関数

Roufs & Blommaert (1981) は、光覚の絶対閾を基礎に、光感応の時間特性を心理物理学的に詳細に研究した (Fig.1.6, Fig.1.7) 。両図とも、インパルス応答 (a) はステップ応答 (b) を微分したものとして正確に得られる。視覚直径

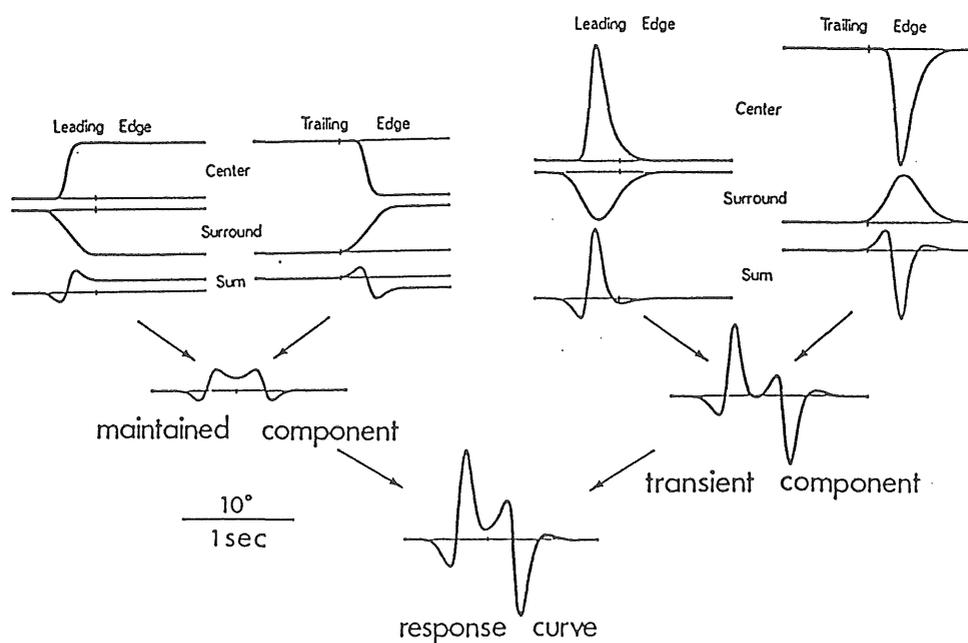


Fig.1.5. 反応曲線を形成する8つの成分

反応曲線は、持続成分と過渡成分を合成として得られる。(Rodieck, 1965)

1° の刺激では抑制帯がはっきりみられるが、点スポット光としての小さな 0.8' (= 0.013°) の場合には抑制帯がみられない。彼は、1° の場合はバンドパス・フィルター、0.8' の場合は純粋のローパス・フィルターの特性をもつとし

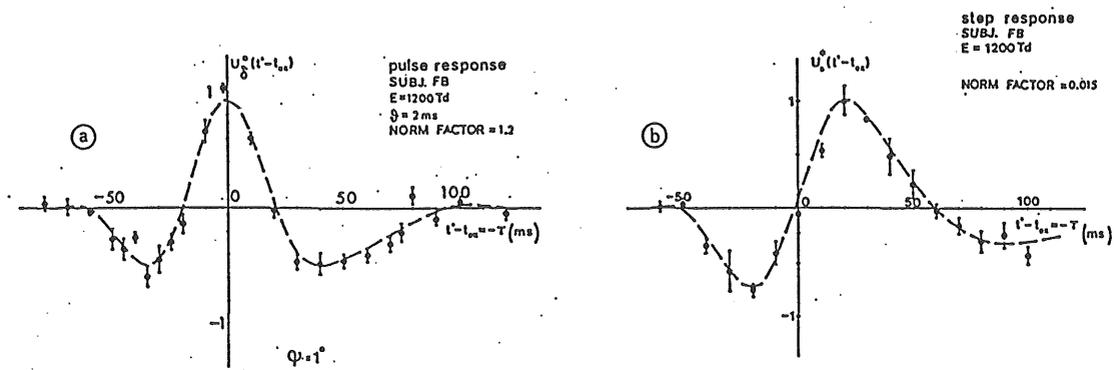


Fig.1.6. 直径 1° の光刺激に対する応答
2 ms の矩形パルスに対するインパルス応答 (a) とステップ応答 (b) . (Roufs & Blommaert, 1981)

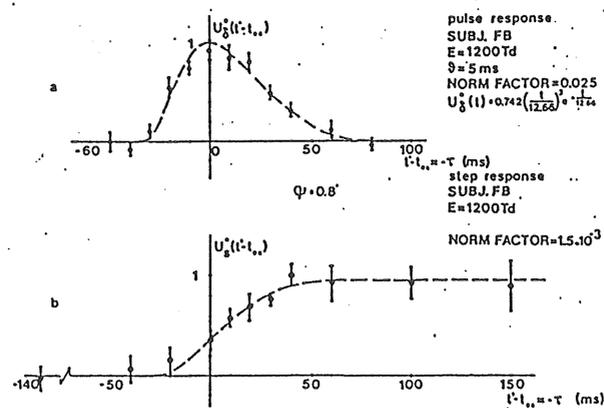


Fig.1.7. 直径 0.8' の光刺激に対する応答
5 ms の矩形パルスに対するインパルス応答 (a) とステップ応答 (b) . (Roufs & Blommaert, 1981)

ている。これは空間的には側抑制が大きく関与していることを示している。

(5) 二元過程モデル

これまで、4つの研究を順に紹介してきた。本論文の視覚誘発電位二元過程モデルは、これらの諸特性のアナロジーとして発想したものである。ここでオン・オフ VEP (Fig.1.8) を参照しながら、その関連性について述べる。

まず、Bidwell (1899) の人間の視覚現象では、オンによる明るさ感覚の増大がオン VEP の負（上向き）のピークに対応し、次の急激な減少が正のピークに対応する。VEP の始めの正のピークに対する視覚現象が図示されていないが、このピークを初期抑制とすれば感受されないものと考えられる。後期の律動的なゆらぎは、VEP の律動性後発射にも関連するであろう。つぎに、オフによる異常暗感覚はオフ VEP の正のピークに対応する。あとのゴースト的なシャルバンティエ帯は負のピークに対応づけられる。しかし、このように相互の順序的対応がつけられたとしても、時間的な対応は弱い。これは、感覚化時間などの情報遅延の問題が大きく関与していることによると考えられる。

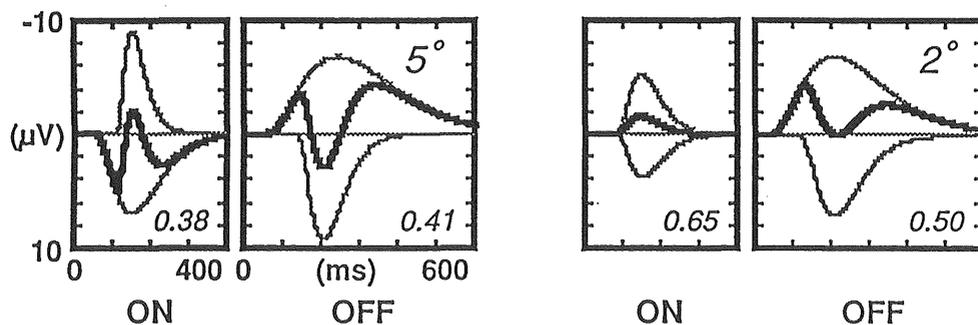


Fig.1.8. オン・オフ VEP のカーブフィット波形
視覚直径 5° と 2° の円形光に対する VEP. それぞれ興奮・抑制成分を添えてある。(吉田, 1990a の一部)

Ratliff (1961) の側抑制のデータでは、光刺激のオン・オフによって極性が反転した反応がみられ、隣接ユニットに随伴的な抑制効果を与えている。この興奮反応を少し遅らせ、さらに抑制効果の時間幅を広くとって重ね合わせてみると、オン・オフ VEP の波形に近づいてくる。

Rodieck (1965) のネコの受容野の反応曲線は、VEP 波形との類似性がより高くなっている。受容野の反応曲線は、あくまで、光刺激のバーが受容野上を空間的に動いたときの反応を示すものである。しかし、光バーが移動することは、時間的に光を走査することであり、見方を変えれば、光の時間的変調、時間的展開ととらえることができる。つまり、受容野のある集団に短時間光照射があったことと、同義であると考えてもよい。この観点から、振幅等勘案のうえ波形を見直すと、本論文で取り上げるオン・オフ VEP とよく対応するようにみえる。つまり、反応曲線の形成過程において、過渡成分の前部がオン VEP、後部がオフ VEP に対応しているとみてよいであろう。

Roufs & Blommaert (1981) では、視覚直径 1° のインパルス応答が 5° のオン VEP に、また $0.8'$ のインパルス応答が 2° のオン VEP に類似している。刺激面積が大きくなると側抑制効果が大きくなり、両者に同様の効果がみられると考えられる。ただし、オン・オフ VEP はステップ状刺激に対する反応であり、本来ステップ反応とすべきであろうが、神経系内でランジェント型細胞の一過性の発火によってトリガーされるとすれば、インパルス応答とも考えられる。また、応答の時間経過は、オン VEP の時間経過とほぼ対応しているようである。ただし、彼のインパルス応答はステップ応答から微分して得られるが、この VEP 波形には適用できない。

以上、直接的な証拠とするには弱いところもあるが、視覚系の基本的な性質

として興奮・抑制の2つの拮抗的な性質を考え、これをもとに人間の VEP を分解・再構成したモデルをたてて視覚特性を検討することとした。

1. 4 本論文の研究目的と構成

(1) 研究目的

本論文は、これまで述べてきたように、視覚誘発電位 (VEP: visual evoked potential) の波形特性を数学的にモデル化する接近方法により、視知覚の特性を検討することを目的としている。とくに、視覚系の時間特性を中心にとりあげる。視覚誘発電位では、時間的な特性として DOP (difference of Poisson processes) 関数を提出し、モデル化を行なう。この DOP 関数は、受容野の空間構造を興奮・抑制過程で表現する DOG (difference of Gaussians) 関数を時間領域に援用したもので、詳しくはのちに触れることにする。この DOP 関数を基礎とした興奮・抑制の二元過程モデルをたて、時間分解能、視覚的持続時間などの視覚特性との関連を検討する。また、順応過程による刺激価の導入とオン・オフ相互トリガー機構の導入を行ない、この二元過程モデルを、ひとつの動的システムとして提出する。

(2) 論文の構成

ここでは、合成による分析 (analysis by synthesis) というシステム分析的手法を重視し、できるだけ単純な入出力関係を積み重ねてモデルを構築していくことに主眼をおいた。システム分析では、ステップ応答やインパルス応答をも

とに系の線形構造を探っていく方法がとられる。視覚誘発電位では、波形を単純な線形結合で表現しにくいものであるが、基本姿勢としてこの方法をとるよう努めた。そのために用いる刺激条件も系統的に複雑化していくこととした。

つまり、刺激パターンとして、オン・オフのステップ状刺激の刺激変化に対する応答（第2章）をとらえ、次に、オン・オフの組み合わせとして、ある持続時間を持ったパルス状の刺激応答（第3章）を検討する。短時間（10 ms）のパルス刺激の間隔を変化させた二重刺激に対する応答（第4章）、および多重刺激に対するトレイン応答（第5章）を検討していく。まず、これらの応答については、原 VEP への波形適合性を第一義に考え、DOP 関数のパラメータ推定を行なって視覚系の特性との対応関係を議論する。最後に、これまで得られた知見をもとに、全刺激パターンに対して、動的システムとしての二元過程モデル（第6章）を考えるとという順に進めていく。

本実験で用いた視覚刺激は、Fig.1.9 に示したように、（1）円形の光刺激で、大きさが視角直径で 2° と 5° であり、（2） 50 cd/m^2 を基準（順応光）としてコントラストが1.0, 2.2, 3.4のものである。これを、（3）時間的に輝度変調をかけて、ステップ状のオン・オフ、時間幅を変えたパルス、刺激間隔を変えたダブルパルス、刺激間隔（周期）を変えたトレイン、の4種類の刺激パターンを設定した。また、同図には、（4）DOG 関数とDOP 関数の基本形を、興奮・抑制成分とともに示した。

（3）研究方法

ここで、DOG と DOP について簡単にふれる。現在、空間的な側抑制を基本としたフィルターとして、ガウス関数の差であらわされるDOGが盛んに用い

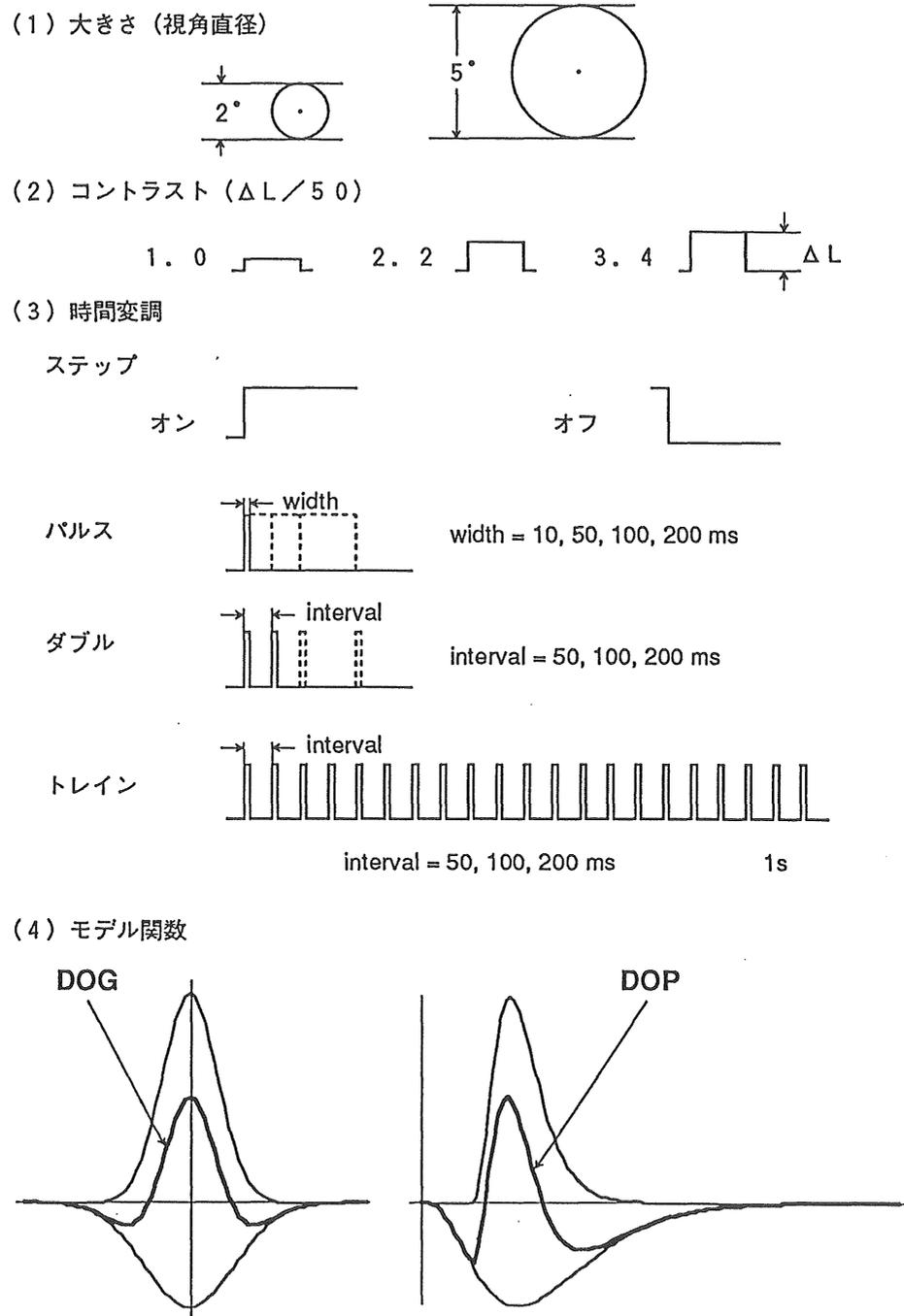


Fig.1.9. 本実験で用いた視覚刺激とモデル関数
 実験の刺激条件は、大きさ、コントラスト、輝度の時間変調の組み合わせで決定される。
 DOGは空間的な特徴表現関数であり、DOPは本論文で用いた時間的なポアソン型の関数である。
 それぞれ、興奮・抑制過程の合成波形である。

られている (乾, 1990) . 一般に誤差関数ともよばれるガウス関数 $g(x)$ は, 中心 (平均) 位置をゼロ, 分散を σ^2 としたとき, 次の式で表される.

$$g(x) = (2\pi\sigma)^{-1/2} \exp(-x^2/2\sigma^2) \quad (1-1)$$

受容野の中心からの距離を r とし, 興奮領域, 抑制領域の分散を σ_e^2, σ_i^2 , 興奮のピーク値を A , 抑制率を Q すると, DOG は,

$$\text{DOG}(r) = A [\exp(-r^2/\sigma_e^2) - Q \exp(-r^2/\sigma_i^2)] \quad (1-2)$$

と表される.

一方, ポアソン過程は, ポアソン分布に由来する (近藤, 1976) . ポアソン分布は, 個々の事象が生じる確率 p がきわめて小さく, 平均が λ の場合, つまり $np = \lambda$ で n が十分に大きいときに, 事象が X 回生起する確率として,

$$P = (\lambda^X / X!) \exp(-\lambda) \quad (1-3)$$

と表される. ここでは, 平均値, 分散ともに λ である.

これを, 時間領域で考えたのがポアソン過程である. つまり, λ を λt として,

$$P_N(t) = (\lambda^N t^N / N!) \exp(-\lambda t) \quad (1-4)$$

と表す. 平均は λt である. 出生死滅率や事故, 故障率などが時間の関数とし

て表現される。また、ポアソン分布は λ が大きいときガウス分布に近づくという性質をもつ。

本研究では、脳波という神経系の集合電位とされる波形を扱うので、活動電位を表現するのに広く用いられているポアソン分布（過程）の形状を利用する。受容野を表現するDOGにならって、2つの興奮・抑制の差の関数として、第2章の式(2-3)(2-4)で表されるDOPを採用した。まず、その形状を基準化して、3つのパラメータで表したので、DOPとしては6つのパラメータをもつことになる。

一般にモデル化の場合、少数の意味のあるパラメータで表現することが理想である。しかし、ここでは、まず、VEPの波形を数式で表現することを第一に考えた。極端に言えば、まずは、波形を表現できればどのような関数形でもよいわけである。そしてその波形・形状表式に、生理学的、心理学的意義づけができれば、さまざまな利用価値を生み出せることになる。その後の段階として、関数形について、パラメータの集約化、演算の容易性などを考慮して再検討することになる。たとえば、DOGに時定数などの時間的な要素を加えてDOP形に変換するといった一般化も試みることができる。このように、本研究では、「形から入る」という接近方法をとった。

次に実験条件について述べる。本論文では、主に感覚レベルでの検討を行なったので、以下のように実験条件を限定した。まず、脳波誘導部位は、視野の中心部に対応する後頭中心部とし、耳垂を基準とした単極導出法を用いる。視覚刺激は、空間的には全視野法とパターン法の間にあたる、一様な明るさをもつ円形のパターン刺激である。これは刺激の範囲を中心窩から等距離の範囲にするためと、チェッカーボードなどの模様による検出ユニットの活動を抑え

るためである。輝度の時間的変調については基本的に要素合成法の手法をとるため、段階を追って複雑化していく刺激パターンを採用した。つまり、周期刺激に対する応答も単発の重ね合わせにより発生すると考えるからである。さらにいえば、ここでは、人間の視知覚の心理物理学的知見と視覚誘発電位との関連を追究するうえで、単純な一過性の特性を基礎としてそれを積み重ねていく方法を重視する立場をとった。

さらに、本論文で取り扱ったデータは、1名の同一被験者のものである。これは、(1) 安定した質のよいデータを得ること、(2) データの相互比較を可能にすること、という2つの要件を満たすためである。VEPの波形は比較的安定しているとはいうものの、被験者の瞬目、眼輪筋の緊張、眼球運動、頭部のゆらぎ、頸部の緊張、体動、さらに実験に対する動機づけなど、さまざまな要因で微妙に変化しやすい。したがって、VEP被験者としての訓練を十分積んだ者でないと、安定したデータとはなりえないのが現実である。また、まず、個人内での整合性を重視したことも、その理由のひとつである。時系列データのやみくもな平均化は、データそのものをゆがめてしまう恐れがある。個人内での構造を探り、次に集団としての構造を検討するという段階を踏むべきであると考えている。

第2章 オン・オフ光刺激に対する視覚誘発電位の二元過程モデル

2.1 目的

第1章の序論で述べたように、英国の物理学者 Bidwell (1899) は、光と見えの不思議さを説いた本の中で、光の明暗に対する知覚の促進・抑制過程を示している。のちに、Ratliff, Hartline & Miller (1963) は、カブトガニの時空間的な抑制過程に関する研究の中で、光の明暗に対する神経活動の変化が、Bidwell の説いた知覚過程ときわめて類似していることに驚嘆している。このことは、視覚系には、種を越えた共通の機構が底在することをうかがわせるものである。この観点からみれば、人間の視覚誘発電位 (VEP: visual evoked potential) も基本的な波形は類似しており、同様の過程を示すものであると考えられる。

この VEP は、心理学においては多方面から研究されてきている。しかし、VEP の波形解析法は、おもに周波数分析、主成分分析、ピークの潜時や振幅を中心にしたものであり、波形のパターンをモデル化して扱ったものは少ない。その第一の理由は、VEP の発生機序が特定されていないということである (Desmedt, 1977)。したがって、モデルをたてるには、ある仮定を導入する必要があるが、問題も伴ってくる。たとえば、西田・中村・柴崎 (1986) は、VEP をいくつかの減衰振動の組合せとしてモデル化を試みている。しかし、個

々の波形のパラメータが多すぎることに、単峰性の波形として順次切り出して接続していく方法は、成分の意味づけなどに難点があると思われる。

ここで、時空間的な抑制の考え方に立ち返ってみると、次のような生理学的知見が重要となる。Ratliff et al. (1963) は、逆向側抑制のデータから、興奮と抑制の時定数の違いによる2峰性の過程を考えている。一方、Rodieck (1965) は、網膜の神経節細胞にみられる受容野の時空間的な特徴を見事にモデル化してみせ、3峰性の過程を与えている。さらに、受容野の範囲が狭ければ、空間的な変化も時間的な変化も同等に処理されて、区別できなくなることを指摘している。この点は、視覚系の時空間相互特性に深く関わる重要な洞察である。

視知覚研究の分野においては、Kelly (1961) がフリッカーの知覚閾を詳細に検討して、これを2峰性の単位インパルス応答で説明し、網膜電図との対応を検討している。フリッカー研究によって導き出されたモデルは、一般に興奮・抑制の2峰性のインパルス応答である (Roufs, 1972; Sperling & Sondhi, 1968)。その後、Roufs (1974a) は、暗刺激に対するモデルを明刺激のモデルの極性を反転したものとしてとらえ、その交互作用を検討している。さらに、Roufs (1974b) は、単一フラッシュについて検討し、初めて3峰性のモデルを提出した。また、Roufs & Blommaert (1981) は、刺激の大きさが小さいと抑制は弱く、その応答は単峰性になり、大きいと抑制が発達して3峰性になることを見いだした。これは、空間的な受容野と同様な性質である。また、この波形はVEPの波形と時間的にもほぼ対応している。

このように、生理、心理学的なモデルは、興奮・抑制の2峰性の過程から、抑制・興奮・抑制という3峰性の過程へと移行してきた。光刺激のオン・オフに対する典型的なVEPは3峰性の波形を示しており、このモデルを援用でき

ると考えられる。つまり、ここで心理生理同型説の立場をとるのであるが、現在、これを直接証明する生理学的な証拠はみあたらない。しかし、ヒトの場合、時間差の大きな順向抑制経路が存在すれば、本モデルの生理学的な妥当性が裏付けられる。外側膝状体をはじめ中枢神経系では抑制系がきわめて発達しており、その可能性は十分考えられる。また、情報論的にも、この抑制・興奮・抑制の系列は、通信系の時間的エッジを強調する基本的な手続きとみなされる。

本章では、光刺激のオン・オフに対する VEP は、それぞれオンとオフの独立したシステムの興奮・抑制の過程が重畳したものであり、抑制は興奮よりも早く発生し長く持続するという仮定を導入し、数式モデルを構成する。この興奮と抑制の二元過程をもとに VEP の最適パラメータを求め、さらにパラメータを刺激条件から全体的に構造化することによって波形の再現性を検討する。そして、このモデルから導きだされる性質を脳波の特性および知覚現象との関係から考察し、その妥当性を検討していく。

2. 2 実 験

光刺激のオン・オフに対する典型的な VEP を記録する。脳波誘導は、視覚に優位な後頭中心部に限定する。実験要因としては、時間的な興奮・抑制過程をみるためにコントラスト条件を設け、また、空間的な興奮・抑制過程をみるために大きさの条件を設定した。

2. 2. 1 方 法

(1) 被験者

VEPの実験によく慣れた健常な成人男子1名。この被験者は、瞬目、眼球運動、体動などを統制でき、VEPの波形も安定している。

(2) 視覚刺激

刺激光の形は円形であり、その中心部には黒い固視点がつけてある。刺激条件は、コントラスト3条件×大きさ2条件で、計6条件を設定した。コントラストは、順応光 (50 cd/m^2) に対する輝度増分の比 ($(\text{刺激輝度} - \text{順応輝度}) / \text{順応輝度}$) として表わし、L条件 (Low: 比率 = 1.0), M条件 (Medium: 2.2), H条件 (High: 3.4) である。大きさの条件は、直径が視角で 2° と 5° である。光刺激の時間波形はパルス (矩形) 状であり、持続時間は 1s である。刺激提示法は、まず、CRT モニター (SONY-TEKTRONIX, 608 MONITOR, P31) の X, Y 軸に、2台のファンクション・ジェネレータ (NF 回路設計ブロック, FG143) から 3 MHz の三角波を入力し、モニター管面上にラスターを作った。次に、Z 軸にファンクション・シンセサイザー (NF 回路設計ブロック, 1732) から信号を送り、輝度変調と提示時間調節を行なった。

(3) VEP 記録

脳波は、銀-塩化銀皿電極を用いて、右耳垂を不関電極として後頭中心部 (Oz) から単極導出した。これを、高感度生体アンプ (日本電気三栄, 直流ヘッドアンプ 1804, 生体電気直流増幅ユニット 1169) を通し、時定数 0.3 s で増幅した。この電位をマイクロ・コンピュータ (日本電気, PC9801VM21) に組み

込んだAD変換ボード（カノーパス，ADX-98E）により，サンプリング・タイム2msで1024点(2048ms)をデジタル記録した。

（4）手続き

基本的なVEPの波形を得るために，あらかじめ視覚刺激の中心部とOz付近の電極の対応位置を調整した。電極の位置がずれると単峰性波形となる場合があるからである。被験者は，シールド暗室の椅子に座り，順応光のもとで約15分間の順応を行なった。次に，CRT管面から57cmの位置にある顔面固定器に頭部を固定し，両眼視によって刺激光を凝視した（人工瞳孔は用いていない）。被験者が固視点を凝視しスイッチを押すと，その200ms後に刺激が開始される。刺激間隔は，およそ10-15sであった。1日1回のセッションで，各条件について，それぞれ50回のデータを記録し，日を変えて6回繰り返して，条件ごとに総計300回の記録を行なった。刺激提示順序は，セッションごとに変えた。

（5）VEPの算出

各条件について300個の原脳波を加算平均し，ピークの歪みを抑えて平滑化する15ポイントの重みづけ移動平均（南，1986）をかけた。これをもとに，オン刺激から400msまでをON-VEP，オフ刺激から600msまでをOFF-VEPとして切り出し，それぞれ刺激による波形変化開始点をベースラインとして調整した（以下，それぞれのVEPをON，OFFと表わす）。

2. 2. 2 結果と考察

実験で得られた ON と OFF の原 VEP は、Fig.2.1 の左列に示されている (RAW VEP)。左側の英数字は、刺激の大きさ (2° , 5°) と、コントラスト (L, M, H) の条件を示している。中央と右側の波形は、カーブフィットとモデル VEP であり、これについてはのちに結果と考察で述べる。このデータは、予備実験等で得られた他の被験者の波形と類似しており、典型例とみなされる。

まず、ON についてみると、 2° では、約 150 ms の負のピーク (Fig.2.2 の最下段のように N150 とする) と、約 200 ms の正のピーク (P200) が顕著にみられる。一方、 5° では、P100 が大きな電位を示しており、これが空間的な効果と考えられる。この P100 は、 2° でもわずかにみられ、コントラストが高くなると顕著になる。コントラストの効果は、 5° でも同様である。ここで、P100 と P200 とを接続して、1つの大きな正の電位変化とみなす。この正の電位に N150 の電位が重なり、P100, N150, P200 という 3 峰性の波形が出現したと考える。これは、興奮・抑制過程の重ね合わせとみる空間的な受容野の考え方 (Rodieck, 1965) を、時間的な領域で考えたものである。

同様に、OFF についても、およそ N120, P200, N300 のピークをもち、3 峰性の波形としてとらえることができる。これは、Roufs (1974a) のように極性を反転して考えれば、ON と同様に、N120 と N300 を接続して 1つの大きな負の電位とみなし、そこに P200 が重畳したものとみることができる。また、ピーク潜時が ON よりも長くなっている点は、視覚系のオン・オフシステムの時定数の差によるものであろう。

2. 3 モデル構成

前述した興奮・抑制過程を導入し、これを実験データと比較するためにカーブ・フィットを行ない、そのパラメータを推定する。次に、これらのパラメータの関係を刺激条件のみによる予測式で求めて構造化する。

2. 3. 1 方法

(1) モデル式

まず、ニューロン活動の基本過程をポアソン過程とみなし（八木, 1974; 島山, 1989）,

$$P_N(t) = (\lambda^N t^N / N!) \exp(-\lambda t) \quad (2-1)$$

とする。ここで、 $\lambda=1$ とし、振幅項の $(1/N!)$ を省き、整数 N を実数 X とおいたものをポアソン型として、

$$V(t) = t^X \exp(-t) \quad (v(t)=0, t \leq 0) \quad (2-2)$$

と表現する。ここに、 V は電位変動、 t は時間、 X は形状を決定するパラメータである（以下、パラメータは英大文字で表わす）。

ここで、さらに3個のパラメータを導入する。つまり、Fig.2.2に示すように、ピークの振幅（amplitude）を A (μV)、オン・オフ刺激後から電位発生まで

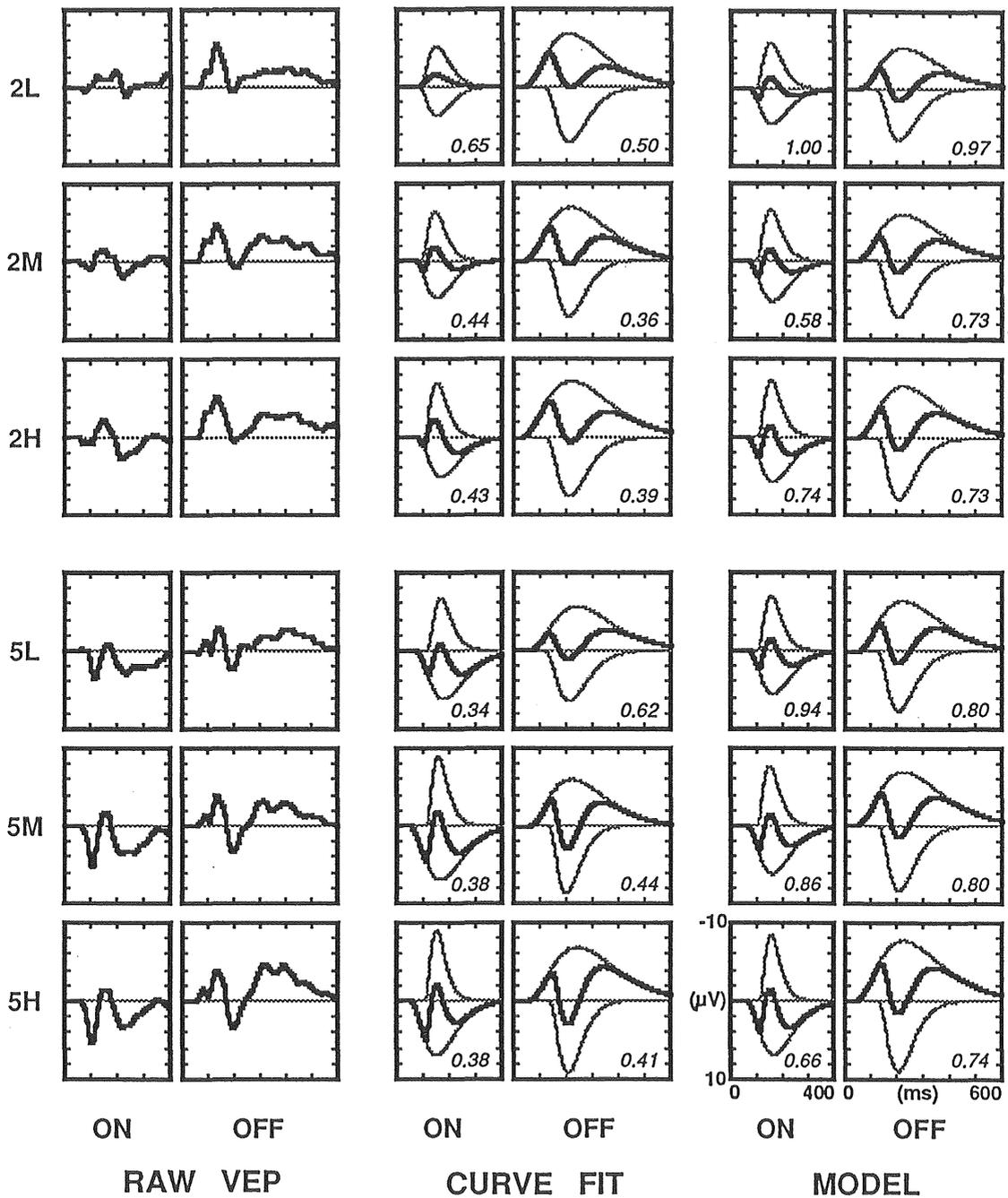


Fig.2.1. オン・オフ刺激に対する原 VEP とモデル VEP
 左側に示した数字は刺激の大きさ, 英字はコントラスト・レベルを表す. 上下の細線の波形は, 興奮・抑制過程を表す. 枠内の数字はRMSである.

の遅延時間 (delay) を D (ms), 電位発生からのピーク潜時 (peak latency) を P (ms) とする. 振幅 A は, 正負の符号をもつ. 式(2-2)を, これらのパラメータで表現するため, $t = (X/P)(t-D)$ とおき, 振幅を $(e/X)^X A$ とすると,

$$V(t) = [(e/X)^X A][(X/P)(t-D)]^X \exp[-(X/P)(t-D)] \quad (V(t)=0, t \leq D) \quad (2-3)$$

となる. 式(2-3)について, 興奮には e , 抑制には i のサフィックスをつけたものを用いて, ON と OFF とを,

$$\text{ON}(t) \text{ or } \text{OFF}(t) = V_e(t) + V_i(t) \quad (2-4)$$

と表わす. 極性は, ON の場合は $V_e < 0$, $V_i > 0$, OFF の場合は $V_e > 0$, $V_i < 0$ である. 式(2-4)をポアソン過程の差として, DOP(difference of Poisson processes)関数と命名する. これは, 空間処理におけるガウス型のDOG(difference of Gaussians)関数に対応するものである.

こうして, Fig.2.2 に示すように, それぞれ, ON, OFF の興奮 (EXCIT) と抑制 (INHIB) が重畳して, モデル波形 (MODEL) が形成され, 他の要因やノイズが加わって, 原 VEP (RAW VEP) が発生するものと考えられる.

(2) カーブ・フィット

まず, 実験で得られた原 VEP について, 式(2-4)の当てはめを行なった. 形状 (X), 振幅 (A), 遅延 (D), 潜時 (P) のパラメータについて, 原波形からのおよその値を初期値として与え, 非線形最適化法の一つであるフレッチ

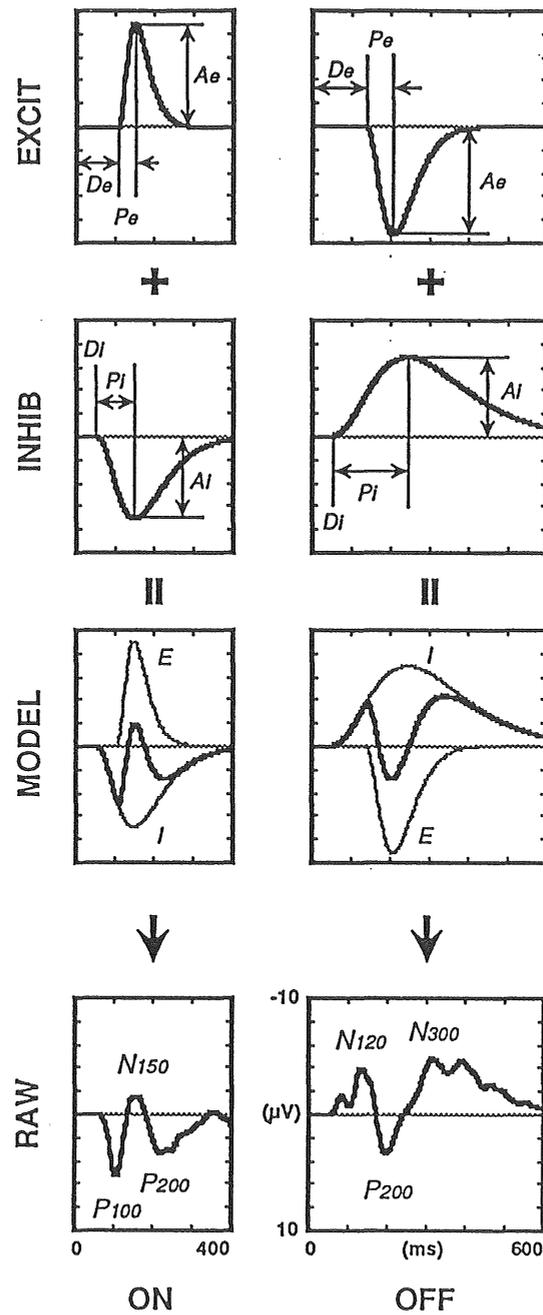


Fig.2.2. オン・オフ VEP の興奮・抑制過程

それぞれのモデル VEP は、興奮・抑制成分より合成される。オン・オフで極性の反転がある。

A: 振幅, D: 遅延, P: ピーク潜時, e: 興奮過程, i: 抑制過程。

ャー・パウエル法（南，1986）を用いてパラメータ推定した（なお， X_e ， X_i などを一括して扱う場合には，サフィックスをつけないで X と表わす）。解析にはパーソナル・コンピュータ（NEC，PC9801VM2，8087付，Turbo C）を用い， $RMS < 0.3$ ，または誤差比 > 0.99 のどちらかの収束条件で打ち切った。

（3）モデル化

まず，形状（ X ）については次の重回帰式，

$$X = x_0 + x_1 \text{CONT} + x_2 \text{SIZE} + x_3 \text{PROC} + x_4 \text{STIM} \quad (2-5)$$

で推定値を求めた。さらに，適合度を示す RMS（root mean square）が最小となるように推定値を求めた。ここで，式(2-5)の4個の独立した説明変数のとる値は，それぞれ，コントラスト（CONT: 1.0, 2.2, 3.4），大きさ（SIZE: 2° , 5° ），興奮・抑制過程（PROC: 1, -1），オン・オフ刺激（STIM: 1, -1）である。こうして，ON, OFF について形状（ X ）パラメータを固定した後，あらためて，他の6個のパラメータを推定した。

つぎに，振幅の絶対値（ $|A|$ ）について，次式，

$$|A| = a_0 + a_1 \text{CONT} + a_2 \text{SIZE} + a_3 \text{PROC} + a_4 \text{STIM} \quad (2-6)$$

で推定した。遅延（ D ）とピーク潜時（ P ）については，振幅（ A ）の極性を考慮して，絶対振幅の推定値（ $|A|$ ） \times 興奮・抑制過程（PROC），および極性（POLA: 1, -1）とオン・オフ刺激（STIM）の説明変数を用いて，次式，

$$D = d_0 + d_1|A|PROC + d_2POLA + d_3STIM \quad (2-7)$$

$$P = p_0 + p_1|A|PROC + p_2POLA + p_3STIM \quad (2-8)$$

で推定した。これらの構造化したパラメータを式(2-4)にあてはめたものをモデル波形とした。

2. 3. 2 結果と考察

(1) カーブ・フィット波形

形状パラメータ X は収束推定値 2.9 に固定した。こうして、再度カーブ・フィットして得られた 6 個のパラメータによって再現した VEP 波形が、Fig.2.1 の中央列 (CURVE FIT) である。興奮、抑制、およびその合成として再現された波形が重ね書きされている。カーブ・フィット波形からみると、波形の変動の少ない 2° の ON も N150 の興奮のみでなく、背後に抑制過程が寄与していることがうかがえる。

(2) モデル波形

振幅の絶対値 (|A|) を前述の 4 個の説明変数から式(2-6)で予測した。また、この推定した振幅と極性およびオン・オフ刺激条件を用いて、遅延 (D) とピーク潜時 (P) を、式(2-7)(2-8)で予測した。その結果、Table 2.1 に示すような係数が得られた。この予測式から得られたパラメータによって再現した波形が、Fig.2.1 の右列の波形である (MODEL)。これらの波形は、視察レベルにおい

ても原波形とほぼ適合している。モデル波形の ON では、P100 が強調されているが、条件 2L の ON の原データにもわずかにその傾向がみられるので、その特徴を再現できたと考えられる。

(3) 周波数ゲイン特性

本モデルの特性を探るために、式(2-2)をラプラス変換すると、

Table 2.1

モデルパラメータの重回帰係数

Parameter	Coefficient	Variable	SRC ^{a)}	R ² ^{b)}
A	= 4.286 ** ^{c)}			0.618
	+ 0.677 **	PROC	0.513	
	+ 0.565 **	CONT	0.420	
	+ 0.358 **	SIZE	0.407	
	- 0.372 *	STIM	-0.282	
D	= 75.285 **		0.909	
	+ 4.685 **	A PROC	0.884	
	+ 11.901 **	POLA	0.329	
	- 0.667	STIM	-0.018	
P	= 111.583 **			0.963
	- 5.618 **	A PROC	-0.724	
	- 13.807 **	POLA	-0.260	
	+ 31.638 **	STIM	0.596	

a) 標準化偏回帰係数

b) 自由度調整済み決定係数

c) * $p < .05$, ** $p < .01$ (t-test).

$$V(s) = [(e/X)^X A][6(P/X)/(1+(P/X)s^4)] \exp(-Ds) \quad (2-9)$$

となる (s は複素数. また, 周波数を扱うため P の単位は秒を用いる). ここでは特にゲイン特性をみるために, 振幅の定係数部と遅延部を除いたものの絶対値をとると,

$$|T(\omega)| = 1/[1 + ((P/X)\omega)^2]^2 \quad (2-10)$$

となる. この遮断周波数 (ω_c) は,

$$\omega_c = (10^{0.3} - 1)^{0.5} (X/P) \quad (2-11)$$

となり, 本実験の場合は, $X=2.9$ としたので, 近似的に,

$$f_c = 0.159(X/P) = 0.461/P \text{ (Hz)} \quad (2-12)$$

となる ($\omega = 2\pi f$ より).

式(2-12)によって, ON と OFF の興奮 (E) ・抑制 (I) 過程の, 遮断周波数 (およびその周期) を算出すると,

ON -E : 7.6—9.8 (Hz) : (102—132 ms)

ON -I : 4.4—5.0 (Hz) : (200—227 ms)

OFF-E : 5.0–5.8 (Hz) : (172–200 ms)

OFF-I : 2.3–2.5 (Hz) : (400–434 ms)

となる。これを、昇べきに並べると、

$$\text{OFF-I} < \text{ON-I} < \text{OFF-E} < \text{ON-E} \quad (2-13)$$

となり、フリッカー刺激に対しては左から順に減衰していくと考えられる。当然ながら、この順序は、Fig.2.2の興奮・抑制成分の時間幅に対応している。

2. 4 全体的考察

(1) 波形の適合度

はじめに述べたように、原 VEP は空間的な受容野の反応曲線の成立過程を思わせるような時間的波形変化がみられ、カーブ・フィットした波形ともよく適合していた。また、ON, OFF の関係については、極性を反転した形として認められる。さらに、モデル波形も、実験条件によって同一の式で近似できるので、これを基本的な構造式とみなすことができる。このように、3峰性とみられた過程が、興奮と抑制という2つのポアソン型の過程として表現できたことは、まず形状の面から、モデルの妥当性が示唆されたと考えられる。このモデルが妥当であるとすれば、その波形を用いて他の波形についても演繹的に検討できる。なお、以下の考察においては、本モデルのインパルス応答は、近似

的に Fig.2.2 の ON-E, ON-I, OFF-E が重畳したものと考えられる。

(2) パルス刺激

吉田・吉田 (1983) は、明暗 VEP は オン・オフの成分に分解でき、また順応過程を考慮すれば、パルス刺激に対する VEP を再現できることを示した。しかし、興奮・抑制の考えは入っておらず、今後、本モデルを導入していく必要がある。また、Ito, Sugishita, Ito, Miyake & Tsuji (1981) は、パルス刺激に対する明るさの促進現象としてブローカ効果を取りあげ、VEP のゆらぎの面積で検討しているが、その面積の意味づけが難しい。本モデルでは、第3章で述べるように、ON, OFF の興奮が最大振幅を与えるような時間幅として説明できると考えられる。

(3) トレイン刺激

光のトレイン刺激に対する VEP は、一般に、初期過程で単発刺激に対するような波形がみられ、そののち定常波形に移行する。本モデルでいえば、定常 VEP は抑制過程の振幅が減衰した反応であり、ON, OFF の興奮のみが優勢になったものといえる。Yoshida (1983) は、刺激の周波数に対応した見えの様相と VEP の変化を、3 相に分けて検討した。本モデルの興奮過程のゲイン特性によれば、可算期は ON, OFF が、ちらつき期は ON のみが優勢となり、融合期は両者とも減衰した過程であると説明できる。Sato, Kitajima, Mimura, Hirota, Tagawa & Ochi (1971) は、閃光に対する VEP のデータを重ね合わせて、脳波、特にアルファ波のモデルを提出した。これも、本モデルを適用すれば、ずらしながら加算したことにより、抑制性の緩徐成分が除去されたものと考えられる。

脳波の光駆動現象も同様に考えられる。また、バートレイ効果もこの線上にあり、ON, OFFの興奮過程が相互にトリガーしあって反響回路をつくと仮定すると、この回路は律動波を形成し、知覚的にはON, OFFのコントラストが極大となる時間間隔で促進効果が生まれる。特定の時間幅をもつパルス刺激に対しては、後期律動波を伴うVEPが観察されることから、その可能性は高いと考えられる。

(4) マスキング

マスキング現象の生理学的なモデルを提唱しているBreitmeyer & Ganz (1976)は、基本的には2峰性で、抑制と促進という順の過程を考えている。甘利(1978)も、抑制、興奮の順序の2峰性の過程で逆向性のマスキングを説明している。両者とも、抑制が先行するという点で、フリッカーのモデルとは順序が異なっている。この点、本モデルは波形的に3峰性で、抑制・興奮・抑制という順序になっており、これまでの考え方を包含したものといえる。吉田・吉田(1984)は、二重光の弁別は、VEP波形の位相に関係することを報告した。このデータを本モデルで見直すと、第2刺激のONの興奮のピークが第1刺激のVEPのゆらぎを越えれば、つまりマスキング帯である抑制過程を越えれば、弁別可能となると考えられる。知覚研究において、Sperling (1965)は、マスキング刺激前にも抑制効果がみられることを報告している。これは、本モデルでは、大きなマスク刺激は興奮に先行して抑制過程が発生し、小さなテスト刺激を抑えたと考えられる。彼の示したマスキング曲線は、VEPの抑制時間とほぼ等しく、マスク刺激の輝度の増加によりその効果も増大している。したがって、このマスキング曲線は、本モデルにおける抑制過程を、知覚過程の面から示し

たものに他ならないと考えられる。

(5) 時空間特性

Rodieck (1965) の空間的な受容野の過渡成分でいえば、本モデルの ON は前方エッジに、OFF は後方エッジに対応するものである。また、彼の持続成分は VEP の直流成分として緩徐な変動となる。Kelly (1971) も、空間的に側抑制を抑えた場合、そのインパルス応答は単峰性となり、側抑制があると 2 峰性になると報告している。このことは、空間的な抑制機構が時間的な抑制を生みだしていることを示している。つまり、視覚系の空間と時間の処理特性は、類似した処理機構をもつと考えられる。また、視覚系は、定常系と過渡系として、空間的・時間的特性が密接に関与しあっていることも知られている (佐藤, 1986)。本モデルは、空間特性と同様な形式で扱うことができ、仮現運動など、運動視の知覚研究にも適用できると考えられる。

安田・樋渡 (1968) は時空間特性を同時に扱い、見通しのよいモデルを提出した。ただし、順向抑制の時間差が小さいために、時間的には 2 峰性のモデルとなっている。また、Kaneko & Obonai (1959) は、視覚系の興奮・抑制過程を網膜・皮質場の時空間特性として、感応理論によって説明している。このときも、時間的には 2 峰性であり、また抑制の持続は 10 s 程度におよんでいる。過渡過程を扱った本モデルでは、この抑制の持続を説明できず、より緩徐な過程を考慮していかなければならない。これに関して、吉田・篠田 (1988) は VEP の直流成分を検討し、短期順応過程に対応した電位変化をとらえている。その緩徐な興奮・抑制過程はまだ不明であるが、このような時定数の長い過程も考慮していく必要がある。さらに、上述の 2 峰性、3 峰性の波形の違いにつ

いても、新しい生理学的知見をふまえながら検討を加えていく必要がある。

2. 5 まとめ

後頭中心部 (Oz) より得られた視覚誘発電位 (VEP) の、興奮・抑制過程による二元過程モデルを提出した。視角で直径 2° , 5° の円形光のオン・オフ刺激を、コントラスト 1.0, 2.2, 3.4 で与えた。実験によく慣れた1名の男子被験者の典型的な3峰性のデータを分析し、最適のモデル・パラメータ (振幅, 遅延, ピーク潜時) によって2つの過程に分解し、DOP関数で表現した。このパラメータを、実験条件を説明変数とする重回帰分析によって予測した。このモデルの波形は原データの波形とよく適合していた。本モデルを、知覚現象、特にフリッカー、順向・逆向マスクング、時空間特性との関連で議論し、生理学的観点からも考察した。視覚誘発電位のこの二元過程モデルは、人間の視覚系の時空間特性を検討し説明するのに有効であることが示唆された。

第3章 パルス光刺激に対する視覚誘発電位の 二元過程モデル

3.1 目的

視覚誘発電位 (VEP) は、視知覚との関係で、多くの研究者によって研究が進められてきた。矩形状のパルス光刺激に関しては、電気生理学的証拠がいくつか報告されている。たとえば、光刺激の瞬時感や持続感 (Servière, Miceli, & Galifret, 1977)、視覚系の時間加重 (Cornu & Blanc-Garin, 1980)、ブローカ・スルツァー効果 (Ito, Sugishita, Ito, Miyake, & Tsuji, 1981)、ブロックの法則 (Musselwhite & Jeffreys, 1982) などである。

しかし、これらの心理学的・生理学的問題を、さらにモデル化やシミュレーションの立場から説明していくことが求められている。モデル参照型の波形分析 (O'Connor, Tasman, Simon, & Hale, 1983) や、波形の部分分解法 (Shibasaki, Nakamura, & Nishida, 1987) によって、VEP がよく記述されるのではあるが、その波形成分に明確な意味づけをすることは困難である。一方、VEP のオン・オフ成分の加算モデル (吉田・吉田, 1983; Kaneko, Yoshida, & Yoshida, 1984) は、計算論的立場よりは心理学的な接近法をとっている。この加算モデルでは、明暗刺激は、2つの独立したシステム、つまり Jung (1972) のいう明暗システムへ入力されると考えている。このシステムは、光刺激によって無条件にオンセットとオフセットの初期成分を発生し、つぎに、順応に依存した緩徐な後期

成分をトリガーするものと考えている。

近年、この加算モデルを発展させたものとして、第2章で述べたように、吉田(1990a)はオン・オフ刺激に対する VEP の二元過程モデルを提出した。このモデルは、一般に DOG 関数で表現される受容野の空間的な概念を時間的な概念に援用したものである。二元過程モデルでは、オンセット VEP・オフセット VEP とも興奮成分と抑制成分とからなっており、時間軸に沿って DOP 関数で表現される。このモデルによって、ブローカ・スルツァー効果などのいくつかの視覚現象を説明することができると考えられている。

本章では、この二元過程モデルを拡張し、矩形波光刺激の大きさ、コントラスト、持続時間などの条件のもとでの VEP について検討をすすめる。最終的に、本モデルを基礎とした「コントラスト・ポテンシャル」を提出し、視知覚の時空間的な加重効果やその他の心理学的現象についての説明を試みる。

3. 2 方 法

3. 2. 1 データ収集

(1) 刺 激

視覚刺激として中心部に小さな固視点をもつ円形光を用いた。この円形光は次の3つの刺激条件によって提示される。コントラスト・レベルつまり順応光 (50 cd/m^2) に対する輝度比は、1.0 (Low [100 cd/m^2]), 2.2 (Middle [160 cd/m^2]), 3.4 (High [220 cd/m^2]) であった。刺激の大きさは、視角直径で 2° と 5° であ

る。時間軸に沿って矩形に変調する刺激の持続時間は、それぞれ 10, 50, 100, 200 ms である。刺激光は、3 台のファンクション・ジェネレータ (NF Circuit Design Block) のコントロールにより、モニタースコープ (SONY-TEKTRONIX, 608, P31) の管面上に提示した。

(2) VEP データ

実験によく慣れた男性被験者 1 名からの典型的な VEP を分析した。この被験者は、第 2 章の実験と同一人物である。このデータは、同様の実験で他の被験者の VEP 波形と基本的に類似しており、典型的であるとみなされる。被験者は、データ記録中に固視点を凝視し、その間、瞬き、眼球運動、体動をしないように訓練してある。脳波は、後頭中心部 (Oz) と右耳垂から銀-塩化銀皿電極を用いて単極導出し、時定数 0.3 s でバイオフィジオグラフ (NEC San'ei, 1804, 1109) で増幅した。このアナログ・データは、マイクロコンピュータ (NEC, PC9801VM21) と A/D 変換ボード (CANOPUS, ADX-98E) によって、2 ms ごとに 2048 ms の期間をデジタル変換した。デジタル・データは 100 回の加算平均ののち、フィルターをかけて平滑化した VEP を得た。このデータをもとに、刺激開始から 600 ms までを切り出して原 VEP データとした。

(3) 手続き

被験者はシールドルーム内で順応光刺激に対して約 10 分間の順応を行なった。その後、頭部を固定して両眼視によって刺激光を凝視した。人工瞳孔は用いていない。準備が整ったのち右手のスイッチを押すと、コンピュータ制御によって自動的に 200 ms 後に光刺激が提示される。1 回のセッションでは、ひと

つの大きさとコントラスト条件のもとに、同じ刺激が約 10 s 間隔で 50 回繰り返される。小休止をいれて約 60-70 分の時間である。この実験のセッションは、刺激持続時間の条件ごとに日を変えてランダムな順序で繰り返した。こうして得られたデジタル・データは、大きなノイズを含んでいなかったなので全てのデータを分析に用いた。

3. 2. 2 モデル表式

(1) 二元過程モデル

モデル VEP が、ON・OFF VEP の二元過程、つまり興奮・抑制成分からどのように生成されるかについては、Fig.3.1 に示した。ここでは、モデル電位やパラメータを表すのに英大文字を用いる。光刺激の開始が負の興奮成分と正の抑制成分を発生させ、次の光刺激終了が正の興奮成分と負の抑制成分とを発生させる。その後、ON・OFF VEP は、刺激の持続時間分の遅れを伴って加算され、パルス光モデル VEP (PULSE) を得る。この例の場合には、刺激条件は 5H100 と表され、大きさ 5° 、高コントラスト、持続時間 100 ms であることを意味している。このモデル波形は、約 200 ms あたりの小さなノッチも再現しており、原 VEP によく適合しているといえる (RMS = 0.848)。

(2) PULSE表式

興奮成分と抑制成分は、基本的には次のように書かれる。

$$V(t) = t^X \exp(-t) \quad (V(t)=0, t \leq 0) \quad (3-1)$$

ここで、Vは電位、Xは形状パラメータ（吉田（1990a）に従い、 $X=2.9$ と固定してある）、tは時間である。この電位の形状は基本的な神経活動電位を記述するポアソン過程から援用したものである。ここで、さらに、3つのパラメータ（正符号）を付け加える。刺激開始から電位発生までの遅延時間（D ms）、振幅（A mV）、そしてピーク潜時（P ms）である。これらのパラメータを用いて次の新しい式(3-2)を得る。

$$V(t) = [(e/X)^X A] [(X/P)(t-D)]^X \exp[-(X/P)(t-D)] \quad (V(t)=0, t \leq D) \quad (3-2)$$

興奮成分と抑制成分を表すには、式(3-2)に、eとiの添字をつけて用いる。また、ONとOFF VEPには、それぞれ、nとfをつけて表す。こうして、ON VEPとOFF VEPともに、6つずつのパラメータをもつ（ONでは、Den, Pen, Aen, Din, Pin, Ainで、OFFでは、Def, Pef, Aef, Dif, Pif, Aifである）。この書式を用いて、ON VEPとOFF VEPは、DOP関数として、次のように書ける。

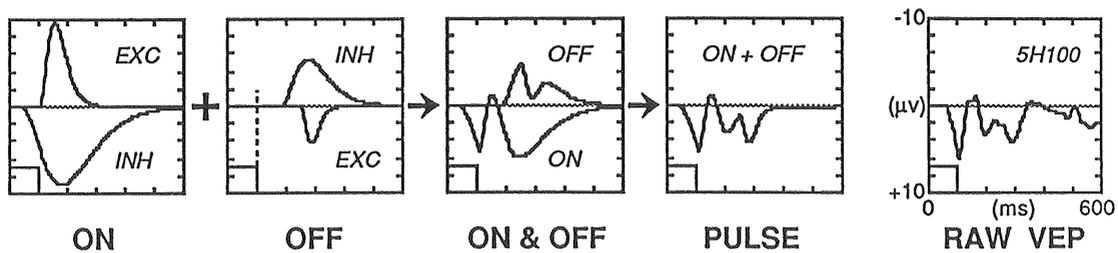


Fig.3.1. パルス VEP の生成過程

興奮・抑制成分から合成されたオン・オフ VEP は、重ね合わせがおこり、パルス VEP を形成する。（例は5H100の場合）

$$\text{ON}(t) = -\text{Ven}(t) + \text{Vin}(t) \quad (3-3)$$

$$\text{OFF}(t) = \text{Vef}(t) - \text{Vif}(t) \quad (3-4)$$

式(3-3)(3-4)を用いてモデル VEP (PULSE) は, 12 個のパラメータと持続時間 (τ) によって,

$$\text{PULSE}(t, \tau) = \text{ON}(t) + \text{OFF}(t - \tau). \quad (3-5)$$

という簡単な式で表現できる。

(3) 予測のための手続き

これらモデルパラメータは非線形最適化法であるフレッチャー・パウエル法によって, マイクロコンピュータ (NEC, PC9801 VM2) を用いて決定した。この方法は, モデルの RMS(root mean square) を最小化する方法である。しかしながら, このパラメータ (特に振幅に関して) は, 刺激の持続時間が短く, ON VEP と OFF VEP が重なった場合には平均値に収束してしまう傾向がある。

この平均化傾向を避けるため, 次のような 6 段階の手続きを踏んだ。(1) 始めに, ON VEP の 6 つのパラメータは, 吉田 (1990a) のものと同じ値を用い, これを固定して, 6 つの OFF VEP を決定する。(2) 3 つの刺激条件を説明変数として重回帰法により推定する。(3) この OFF パラメータを固定して, ON パラメータを決定する。(4) 同様に重回帰法により, ON パラメータを推定する。(5) この ON パラメータを固定して, 再び OFF パラメータを決定す

る。(6)最後に、OFFパラメータを重回帰法により推定する。

3.3 結果

(1) モデル VEP

モデル VEP の 12 個のパラメータの重回帰係数は、Table 3.1 に示してある。このパラメータは、次の刺激条件変数の線形結合として推定した。変数は、大きさ (SIZE: 2° , 5°) , コントラスト (CONT: 1.0, 2.2, 3.4) , 持続時間 (DURA: 10, 50, 100, 200 ms) である。ON パラメータは刺激の持続時間よりも大きさとコントラストに依存しており、OFF パラメータは持続時間のみに依存していた。自由度調整済みの決定係数 (R^2) は、波形が複雑であるゆえにそれほど高くはならなかった。

原 VEP の波形と、Table 3.1 の係数から求められたモデル VEP の波形が、Fig. 3.2 に示されている。これらの構造化されたモデル VEP は、VEP の後期成分つまり後期律動波の部分を除いてはよく適合していた。RMS の範囲は、0.77 から 2.13 であった。

(2) コントラスト・ポテンシャル

Fig. 3.3 は、コントラスト・ポテンシャルの特長を示したものである。この電位振幅 (CONTRAST) は、その中の小さな図に示されるように、ON VEP の興奮成分 (ON-E) と、OFF VEP の興奮成分 (OFF-E) によって構成される。持続時間 1000 ms の振幅値は、吉田 (1990a) の ON-E のみの値を参考として引用した

ものである。OFF-Eを含めなかったのは、ONとOFFの興奮成分を結合するには離れ過ぎていたからである。コントラスト・ポテンシャルは、前に示した式(3-3)(3-4)に示した表記法によって次のように書かれる。

$$\text{CONTRAST}(t, \tau) = \text{Ven}(t) + \text{Vef}(t - \tau). \quad (3-6)$$

持続時間 (τ) に対する振幅の変化は、刺激の大きさとコントラストの2つの条件のもとで、100 msで極大値をもつ上に凸の曲線を描いている。持続時間

Table 3.1
モデルパラメータの重回帰係数

PARAM	a_0	SIZE	CONT	DURA	R^{*2} ^{a)}
Den	98.88** ^{b)}	1.86	-2.13	0.01	0.088
Pen	76.66**	-4.19**	-4.76	0.02	0.346
Aen	2.36*	0.83**	1.67**	-0.00	0.554
Din	113.11**	-7.56**	-12.61**	-0.02	0.687
Pin	99.74**	-0.17	1.65	0.00	0.145
Ain	1.53	0.91**	1.12*	-0.00	0.522
Def	115.58**	2.48	12.67	-0.15**	0.338
Pef	74.27**	-4.62	-6.88	0.09	0.089
Aef	6.06**	-0.34	0.13	-0.01*	0.132
Dif	60.42**	-3.30	25.80*	-0.13	0.262
Pif	132.19**	-2.58	-10.21	-0.19	0.065
Aif	5.51**	-0.44	0.44	-0.01*	0.160

a) 自由度調整済決定係数

b) * $p < .05$, ** $p < .01$ (t-test).

10-100 ms では、コントラスト・ポテンシャルの振幅 (A_{ep}) は、次式で推定できる。

$$A_{ep} = 2.61 + 1.15 \text{ SIZE} + 0.58 \text{ CONT} + 2.01 \log(\text{DURA}) \quad (3-7)$$

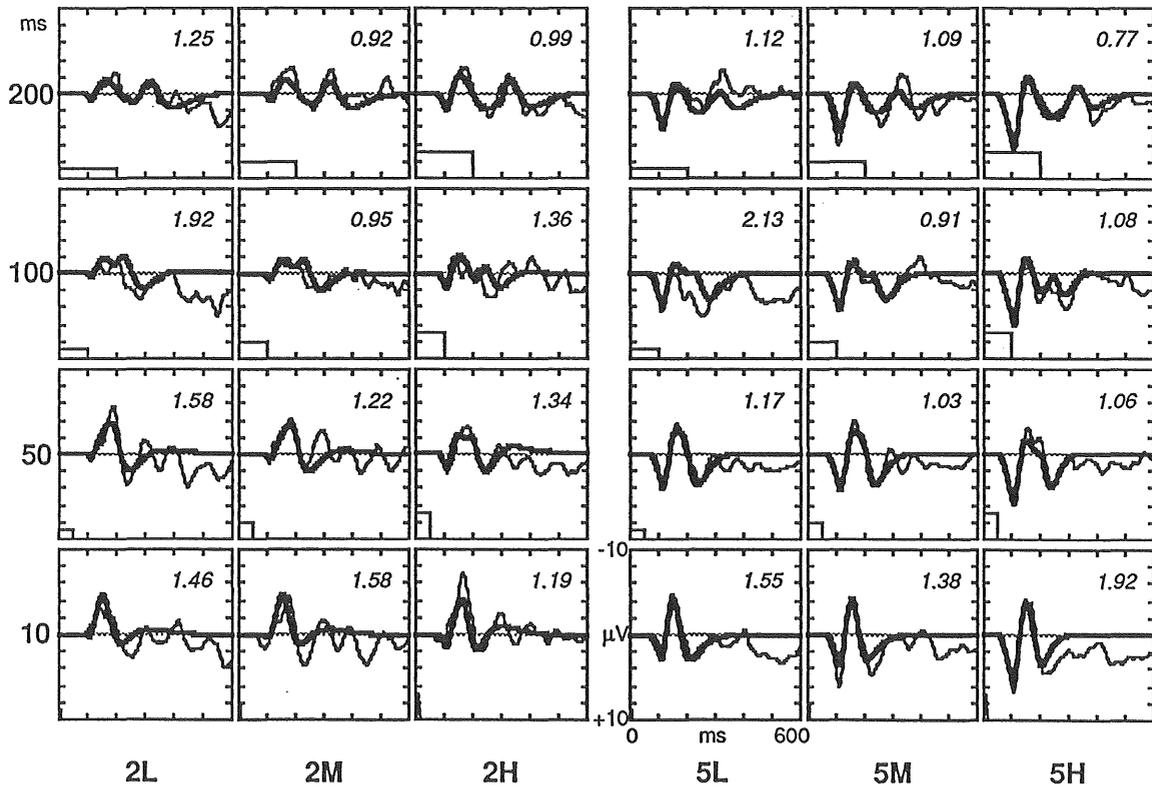


Fig.3.2. パルス VEP と原 VEP

左側の数字は刺激持続時間，下側の記号は刺激条件．枠内の数字はRMS，下の矩形は刺激マーク．太線：パルス VEP，細線：原 VEP．

ここに、すべての係数は有意であった (t -test: $p < 0.01$)。この振幅は、刺激の大きさ、コントラストと持続時間 (の対数) の増加によって増加した ($R^2 = 0.910$)。

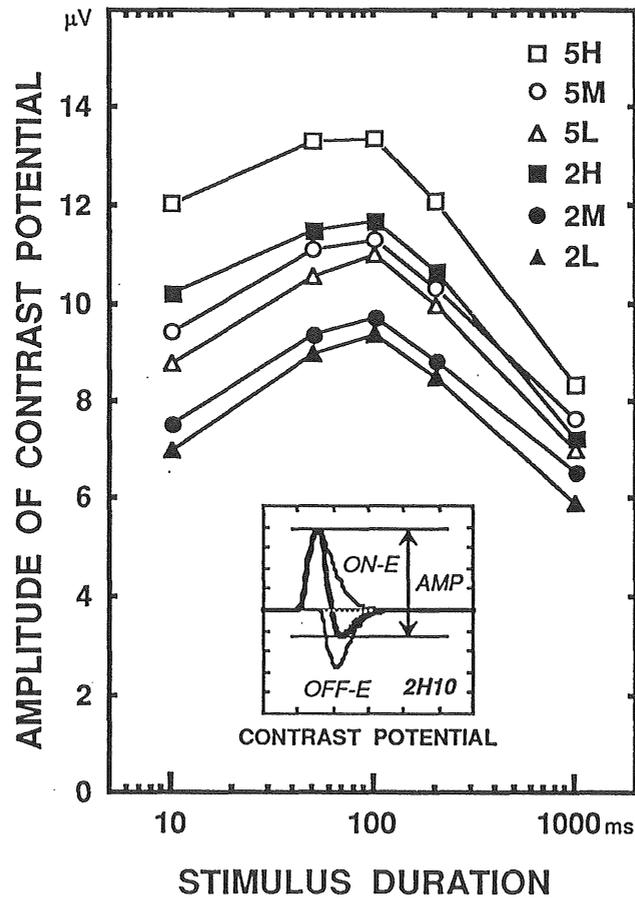


Fig.3.3. 光刺激の持続時間に対するコントラスト・ポテンシャル
 横軸は対数表示. 小枠内の太線がコントラスト・ポテンシャルを表す (例は2H10の場合)。

3.4 考察

(1) モデル波形

提出したモデル (PULSE) は、全体としてモデル VEP 波形が原 VEP によく適合しているという意味で、形状のうえから支持されたといえる。このモデルは、刺激条件から重回帰法によって推定されたパラメータによって構造化されている。このことは合成による分析というシミュレーション法の観点から、我々の視覚系にはこのような線形構造が存在するという可能性を示唆している。本モデルは、オン・オフ VEP の興奮と抑制成分を基礎としており、したがって、我々の明るさ知覚の現象を生理学的に記述できるのではないかと考えられる。

波形分解モデル (O'Connor et al., 1983; Shibasaki et al., 1987) は、確かに、モデル波形を原 VEP に適合させることができる。しかし、特に我々の二元過程モデルは、基本的なオン・オフ VEP から、刺激条件変数を用いて、演繹的に導き出すことができた。したがって、ここで提出したモデルは、VEP を波形的に記述できるのみでなく、以下に論議するように、心理学的な現象についても説明力をもつと考えられる。つまり、この VEP は我々の初期視覚の役割を担う脳の視覚領野から記録されたものだからである。

(2) コントラスト・ポテンシャル

コントラスト・ポテンシャル (CONTRAST) は、Fig.3.3 に見るように、2

峰性の揺らぎをもっている。これは、Kelly (1971) の、明るさの絶対閾の心理学的研究におけるユニット・インパルス応答の形と類似している。我々のコントラスト・ポテンシャルでの閾値上の関数と、このインパルス応答の閾値下の関数が酷似していることは驚くべきことではない。というのは、我々の知覚機構は絶対閾の上下にかかわらず、同一の生理学的なシステムを基礎としておりと考えられるからである。

コントラスト・ポテンシャルの振幅の特性は、持続時間 100 ms 以下で時間的加重効果を示した。Cornu & Blanc-Garin (1980) は、刺激持続時間 (80 ms 以下) が増加すれば、明るさ強度と輪郭の明瞭性が増加し、VEP の N2 潜時が減少すると報告している。彼らの N2 成分は、コントラスト・ポテンシャルでは負のピーク (ON-E) に対応している。コントラスト・ポテンシャルの振幅は、N2 潜時よりも、明るさ強度のより直接的な指標となると考えられる。ブロックの法則については、Musselwhite & Jeffreys (1982) が、VEP の振幅 (C1 と C2 成分) は、刺激の臨界持続時間 50 ms 以下であれば、コントラスト・持続時間の積の対数と線形関係にあると報告している。コントラスト・ポテンシャルの振幅も、コントラストと持続時間の対数値がそれぞれ増加したときに、線形に増加した。しかし、本研究の結果では、コントラスト・持続時間の関数関係はそれほど明瞭ではなかった。これは、我々のデータは、臨界持続時間以下では、10 ms と 50 ms の 2 つの条件のみであったためである、

本研究では、Fig.3.3 に示すように、コントラスト・ポテンシャルの振幅増加現象がみられた。Ito et al. (1981) は、明るさの見える促進効果と VEP の反応の間には対応関係が見られたと報告している。彼らの指標は、VEP の正-負-正の主要なピーク成分に囲まれた面積であった。この面積の大きさが、ある意味

で神経活動のエネルギーを表していると思なされるが、我々のコントラスト・ポテンシャルの振幅は、明るさの感覚をもたらす神経エネルギーをより直接的に示すものであろうと考えられる。

さらに、このコントラスト・ポテンシャルの振幅には、刺激の大きさの条件で空間的な加重が見られた。このことは、いわゆるリッコの法則やパイパーの法則との関連を示唆するものであろう。

他の心理学的な現象についてみると、Servière et al.(1977)は、オン・オフ成分の明瞭な分離（刺激持続時間が、500, 320, 200 ms の場合）が刺激持続感の確信度と対応しており、125 ms 以下で重なってくると瞬時感へと移行していくと報告している。コントラスト・ポテンシャルは、200 ms 以下では連続あるいは重なり合っているが、200 ms ではオン・オフの興奮成分はやや分離している。このことは、この電位の連続性が瞬時感をもたらし、一方、両者の分離が持続感をもたらすのではないかと考えられる。

以上のように、コントラスト・ポテンシャルは、これまで検討してきたいくつかの研究によって心理学的にも支持されたと考えられる。ここでは、オンの興奮成分とオフの興奮成分は、それぞれ、Jung (1972) が記述した、明システムと暗システムに対応すると考えている。コントラスト・ポテンシャルは、オン・オフ VEP の興奮成分の組み合わせとしているので、この基本的な明暗システムよりももっと高次の感覚に密接に関連しているのではないかと考えられる。また、ここで展開された二元過程モデルとコントラスト・ポテンシャルは、我々の視覚系を心理学的および生理学的に探究するための意義のある概念となるであろう。

3.5 まとめ

矩形波パルス光に対する視覚誘発電位 (VEP) について二元過程モデルを適用し、心理学的対件の説明のためにこのモデルに基づく「コントラスト・ポテンシャル」を提出した。視角で 2° と 5° の円形の刺激光を用い、コントラスト3水準 (1.0, 2.2, 3.4) および提示時間, 10, 50, 100, 200 ms の条件設定をした。後頭中心部 (Oz) からの典型的な VEP を, オン・オフ VEP のそれぞれの興奮・抑制成分とに分解し, その12のパラメータをフレッチャー・パウエル法で決定した。そののち, これらのモデル・パラメータを刺激条件を説明変数とした重回帰分析により予測推定した。

その結果, モデル波形は原波形によく適合しており, このパルス VEP は基本的なオン・オフ VEP を線形に重畳したものとして表現できることが示された。コントラスト・ポテンシャルは, オン・オフ VEP の興奮性成分を合成した波形である。この電位の振幅は, 10 から 100 ms の提示時間で時空間的な加重効果を示し, また 100 ms の提示時間で最大値をとる促進効果がみられた。これらの時間的・空間的加重効果など基礎的な心理学的特性と視覚誘発電位との密接な関係が示唆された。

第4章 ダブル光刺激に対する視覚誘発電位の 二元過程モデル

4.1 目的

人間の視覚系の時間分解能は、聴覚と比較して劣るとされているが、光点滅による注意喚起や、空間移動が加わった運動視などが関与してくると、生態学的にも重要な知覚能力となってくる。これらについては、古くから心理物理的に研究がなされてきているが、最近、視覚誘発電位 (VEP) を用いて二重光刺激の弁別閾を推定しようとする研究がなされている。

その一つに、パターン刺激を用いた Musselwhite & Jeffreys (1983) の研究があり、第2刺激に対する VEP の反応の出現と知覚弁別閾とがほぼ対応していることを報告している。しかし、円形刺激を用いた吉田・吉田 (1984) は、閾値下でも第2刺激に対する反応の出現がみられることを報告し、VEP の主要なピーク潜時をもとに弁別閾の推定式を提出した。その後、吉田 (1986) は、初期成分を考慮した適合度の高い推定式を求めた。篠田・吉田 (1988) は、単一パルス VEP をもとに波形合成し、より簡便に推定する方法を提出している。

一方、吉田 (1990a) は、VEP の波形の意味づけに関して、オン・オフ VEP の基本的な二元過程モデルを提出し、パルス VEP (Yoshida, in press) , トレイン VEP (吉田, 1990b) についても展開している。そしてこれらのモデルが、時間的空間的な知覚現象をある程度説明できることを示してきた。

本章では、二重光刺激に対する VEP (ダブル VEP) にこの二元過程モデルを適用し、その妥当性を検討する。さらに、ここで特に重要となる二重光弁別閾の問題をとりあげ、弁別曲線を連続関数の形で導出し考察する。

4. 2 方法

4. 2. 1 データ収集

(1) 二重光刺激

モニタースコープに提示される円形の刺激光を用いた。実験条件は、刺激の大きさとコントラストと刺激間隔の、3条件である。大きさの条件は視角直径で、 2° と 5° である。コントラスト条件は、順応光の輝度 (50 cd/m^2) を基準として、それからの輝度増分比をそれぞれ、1.0, 2.2, 3.4 (実際の輝度は 100, 160, 220 cd/m^2) としたものを扱い、順に、L, M, H と表す。刺激間隔 (τ) は 50, 100, 200 ms の 3条件である。単発刺激光はパルス (矩形) 状で、その時間幅は 10 ms である。刺激条件の表記方法は、たとえば、刺激の大きさが 5° , コントラストが H, 刺激間隔が 200 ms の条件では、5H200 とする。ただし、単一パルス VEP は、5H とのみ表記する。刺激の装置や提示方法は、第2章の場合と同様である。

(2) VEP 記録

VEP の実験によく慣れた健常な成人男子 1 名の典型的な脳波データを分析し

た。被験者は、一連の実験で比較可能なように同一人を用いている。脳波は、銀-塩化銀電極を用い、右耳垂を基準として後頭中心部 (Oz) から時定数 0.3 s で単極導出した。データは、マイクロ・コンピュータで、サンプル間隔 2 ms ごとに 1024 ポイントを直接デジタル変換して記録した。それぞれの刺激条件について、100 回分のデジタル・データを加算平均したものに、15 ポイントの重みづけ移動平均をかけ、ダブル光 VEP の原データとした。なお、単一パルスデータは、第3章で用いたものを利用した。

(3) 実験手続き

被験者は、シールド暗室内の椅子に腰かけて、順応光のもとで約 10 分間の順応を行なった。その後、顔面固定器で頭部を固定したまま円形光の中心にある凝視点を見つめ、準備が整った時点で手元のスタートスイッチを押す。A/D 変換が開始されてから 200 ms 後に二重光刺激が提示される。刺激条件の順序をランダムにして、日を変えて繰り返し、1 条件につき 100 回分のデータを収集した。Fig.4.2 において細線で示した波形が原 VEP である。

4. 2. 2 モデル表式

(1) パルス・モデル

光刺激のオン・オフに対する VEP の二元過程モデルでは、基本となる興奮・抑制過程は、それぞれポアソン型の DOP 関数として表現される (吉田, 1990a)。ここで基本成分の 3 つの正符号パラメータは、電位発生潜時 (D ms), ピーク潜時 (P ms), 振幅 (A μ V) である。

さて、第2章では、単発パルス光（10 ms 幅）に対するVEPの基本モデルを、

$$\text{PULSE}(t) = \text{ON}(t) + \text{OFF}(t - 10) \quad (4-1)$$

としたが、ここでは簡便的に、

$$\text{PLS}(t) = \text{ON}(t) = -\text{Ven}(t) + \text{Vin}(t) \quad (4-2)$$

とする。添字 en はオンの興奮，in はオンの抑制を示す。パルス幅が小さいと、OFF が小さくなり、近似的に式(4-2)が成立すると考える。このPLSのパラメータは式(4-1)の場合の半分で6個となる。

さらに、式(4-2)の PLS に後期律動波の電位 (R) を加える (吉田, 1990b) .
ただし、簡略化した式(4-2)を用いたので、ここでもPLSRを次のように表現する。

$$\begin{aligned} \text{PLSR}(t) = & \text{PLS}(t) \\ & - R(t - \text{Den} - 150) + R(t - \text{Den} - 200) \\ & - R(t - \text{Den} - 250) + R(t - \text{Den} - 300) \end{aligned} \quad (4-3)$$

ここに、R は正の電位で、その振幅は単発パルスのデータから回帰式で求めたものを用い、予め固定した (5H から 2L まで順に、1.3, 1.6, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7 μV) .

(2) ダブル・モデル

二重光に対する VEP のモデル (DBL) は、この式(4-3)に第1, 第2の番号をつけ、 τ だけずらして加算したものとして、

$$\text{DBL}(t, \tau) = \text{PLSR1}(t) + \text{PLSR2}(t - \tau) \quad (4-4)$$

と表現する。この過程は、Fig.4.1 に図示してある。ここで τ (ms) は刺激間隔である。ただし、第1 VEP (PLSR1) は予め単発のパラメータを用いて固定するので、推定すべきパラメータの数は第2 VEP (PLSR2) の6個のみである。また、 $\tau = 50$ (ms) のときの PLSR2 では、後期律動波は発生しないものとした。

(3) カーブフィット

モデル式 (PLSR, DBL) のパラメータは、パーソナル・コンピュータを用いて、非線形最適化法 (フレッチャー・パウエル法) で求め、これを刺激条件による重回帰式で推定する。最適化の場合、パラメータの初期値によって収束値に差異が見られるので、挟み打ち的に求めていく。収束の基準は、 $\text{RMS} < 0.4$ 、または誤差比 > 0.99 とした。

4. 2. 3 二重光弁別曲線

こうして求めた PLSR2 の興奮成分の振幅は、PLSR1 の振幅より多少減衰するが (減衰比, 0.7-1.0) , 刺激の大きさ, コントラストが同一の場合には、ほぼ同じであった。したがって、PLSR1 の興奮成分 (V_{en}) を τ だけずらしたもの

をもとにした弁別指標を考えた (Fig.4.3) .

以下, 計算を簡単にするため次のように考える. これまでは DOP の形状パラメータ X を, $X=2.9$ としてきたが, ここでは $X=3$ とする (形状はほとんど変わらない). 次に各成分は, $A=1, D=0$ として基準化した場合,

$$V(t) = (\exp(1 - t/P) t/P)^3 \quad (4-5)$$

と表せる. さて, 刺激間隔 τ だけ離れた 2 つの興奮成分 (V_{en}) の交点を ($t_0, V_{en}(t_0)$) とすると, t_0 は τ とピーク潜時 P を用いて,

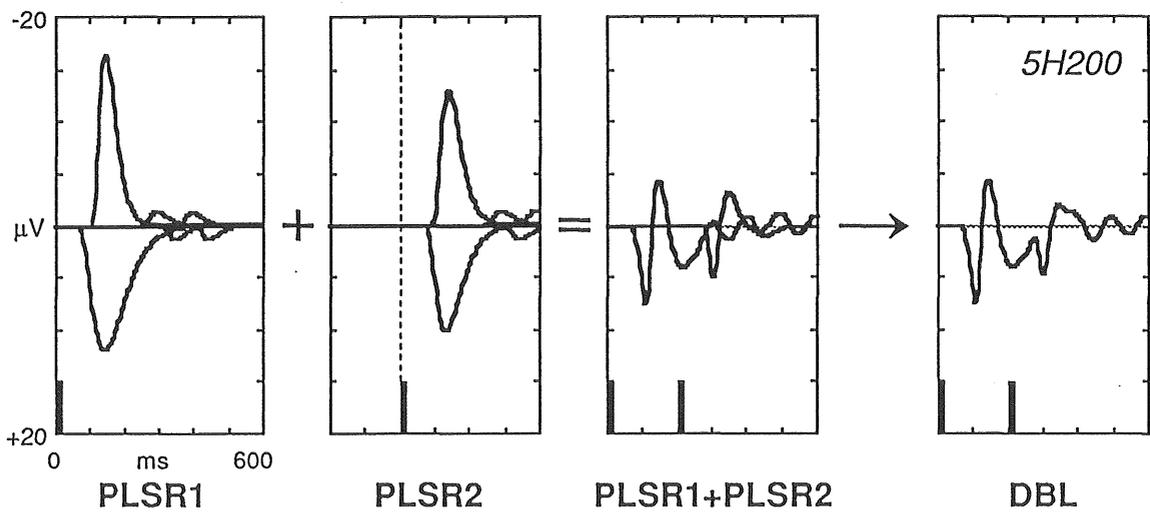


Fig.4.1. ダブル VEP の生成過程

2 つのパルス VEP (PLSR1, PLSR2) からダブル VEP (DBL) が形成される (5H200 の場合). PLSR は PLS に小さな後期律動波 (R) が加えられている.

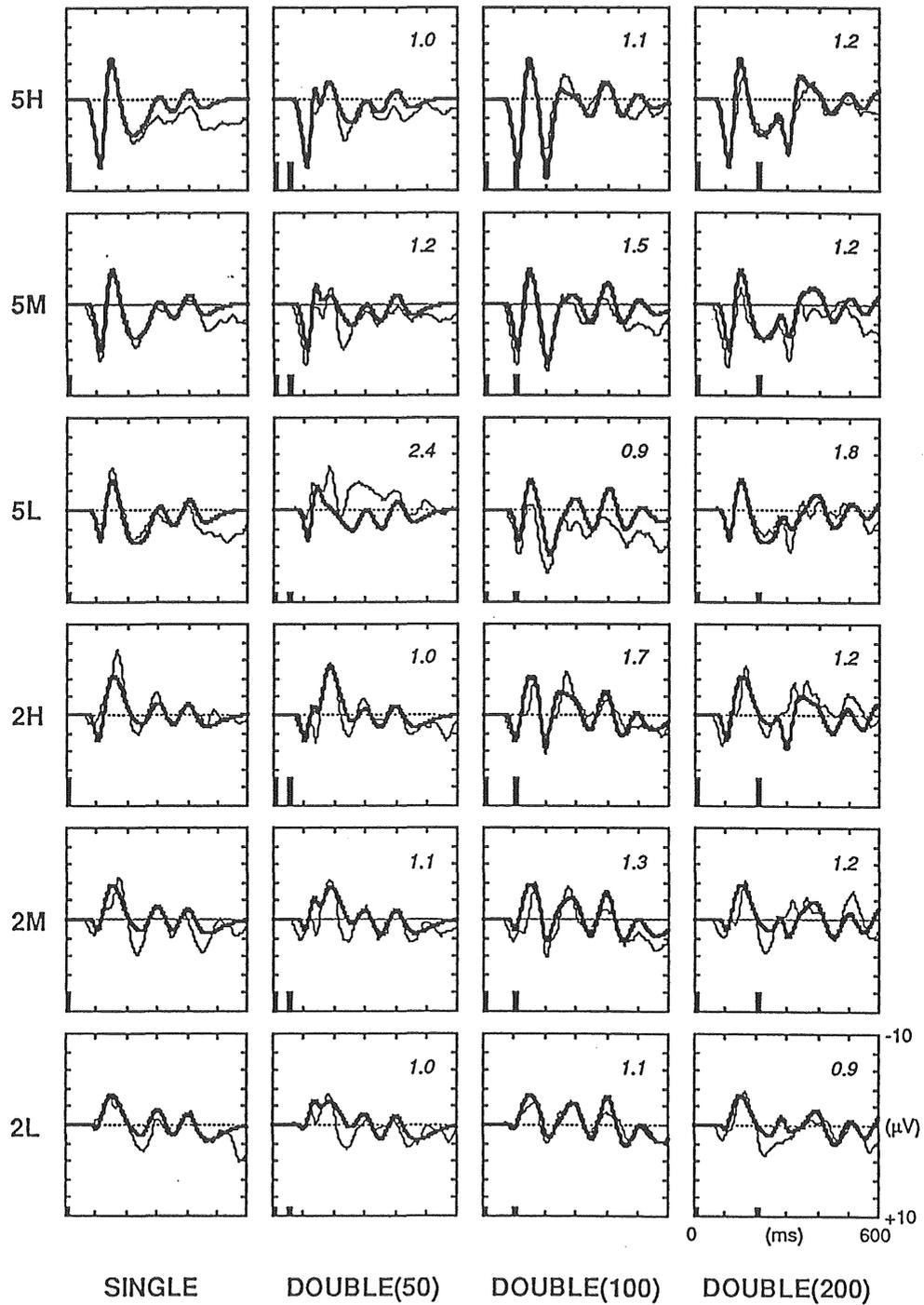


Fig.4.2. ダブル VEP と原 VEP

左側の記号は刺激条件. SINGLE:単発のパルス VEP, DOUBLE(τ):刺激間隔(τ)をもったダブル VEP, 細線:原 VEP, 太線:モデル VEP, 数字:RMS, 縦線:刺激マーク.

$$t_0 = t \exp(t/P) / (\exp(t/P) - 1) \quad (4-6)$$

と表される。このとき、

$$q(t_0) = 1 - Ven(t_0) \quad (4-7)$$

は、経験的に2つの成分間の分離度を示しており、 $\tau \rightarrow 0$ のとき $q(t_0) \rightarrow 0$ 、 $\tau \rightarrow \infty$ のとき $q(t_0) \rightarrow 1$ となる。また、確率であることの要件をみたしており、2成分間の分離度の累積分布関数とみなせる。

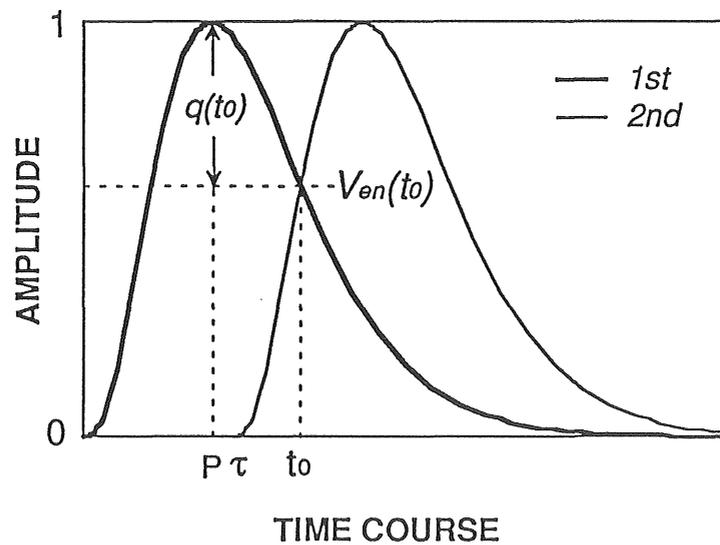


Fig.4.3. ダブル VEP の2つの興奮成分

第1刺激, 第2刺激の興奮成分を重ね合わせ. P:ピーク潜時, τ :2刺激の時間間隔, t_0 :2成分の交点の時間座標, q:2成分の分離度, 太線:第1興奮成分, 細線:第2興奮成分.

次に、式(4-7)に「判断」の要因を加える。心理物理の弁別閾測定法では、二重光刺激の見えを1つか2つかとしてカテゴリー判断させる場合が多い。その際の確率は、 $q(t_0) = 0.5$ を中心として「反中心化傾向」(柿崎, 1974)があると考えられる。したがって、判断確率がn乗で0または1に近づくとすると、

$$p(t_0) = (2q(t_0))^n / 2 \quad (q(t_0) < 0.5) \quad (4-8)$$

$$p(t_0) = 0.5 \quad (q(t_0) = 0.5) \quad (4-9)$$

$$p(t_0) = 1 - \{2(1-q(t_0))\}^n / 2 \quad (q(t_0) > 0.5) \quad (4-10)$$

と書ける。ここでは、経験的に $n=2$ と仮定した。新しく規定した $p(t_0)$ は同様に確率の要件をみたしており、また、式(4-6)を代入することによって、 τ と P の関数として表現できる。

4.3 結果

(1) 波形の適合性

得られたモデル波形は Fig.4.2 に示してある。ここでは、刺激開始から 600 ms までの波形を示した。左下の縦線は刺激マークで、細線が原データ、太線がモデル VEP である。波形の右上に示した適合度を示すための RMS は、ほぼ、0.9-1.8 の範囲内にある。ただし、ダブルの 5L50 の適合度は 2.4 と低くなっており、これは原データの負のシフトが大きいためである。 $\tau = 200$ ms では、多少振幅が減少するが、独立した単発パルス VEP が連続したものとみられる波

形が得られた。 $\tau = 100 \text{ ms}$ では、PLSR1 と PLSR2 が同期し、主要振幅が大きくなっているのが表現できた。 $\tau = 50 \text{ ms}$ では、2 反応が融合しているのが分かり、小さなノッチもみられる。

(2) パラメータ

各パラメータは、Table 4.1 に示すように、最終的に重回帰式の係数として求められた。ただし、今回はパラメータ間の関係からさらに要約することは行な

Table 4.1
モデルパラメータの重回帰係数

Param	a_0	SIZE	CONT	INTVL	(R^2) ^{a)}
First VEP(PLSR1)					
Den	= 82.1** ^{b)}	4.6**	0.2		(0.98)
Pen	= 82.5**	-6.2**	-2.3**		(0.99)
Aen	= 7.25**	0.64*	1.71**		(0.90)
Din	= 93.4**	-2.9*	-5.0*		(0.89)
Pin	= 93.8**	-0.3	-1.88		(0.35)
Ain	= 4.67*	0.70*	1.17*		(0.83)
Second VEP(PLSR2)					
Den	= 90.5**	2.1*	-2.9*	0.0	(0.38)
Pen	= 84.4**	-3.9*	-3.6	-0.0	(0.20)
Aen	= 8.90**	0.17	1.14**	-0.0	(0.41)
Din	= 76.8**	1.4	-6.4*	0.0	(0.20)
Pin	= 101.0**	-4.0**	-2.6	-0.0	(0.44)
Ain	= 7.00**	-0.01	0.68*	0.0	(0.13)

a) 自由度調整済決定係数

b) *: $p < .05$, **: $p < .01$ (t-test).

わなかった。第1 VEP (PLSR1) のパラメータに関して、二重光弁別閾モデルで重要となる興奮ピーク潜時(Pen)は、大きさ(SIZE)、コントラスト(CONT)の減少関数であった。また、興奮振幅(Aen)は、両条件の増加関数であった。つまりこのことは、興奮成分は両条件が大きくなると、鋭く高い波形になることを示している。第2 VEP (PLSR2) のパラメータの刺激間隔(INTVL)については、全てのパラメータの重回帰係数がゼロに近く、ほとんど関与していないことを示している。

(3) 弁別曲線

Fig.4.4 が、理論弁別曲線である。曲線は左から順に、5H, 5M, 5L, 2H, 2N, 2M, 2Lを表す。横破線は、 $p = 0.5$ を表し、縦破線は5Hと2Lの50%弁

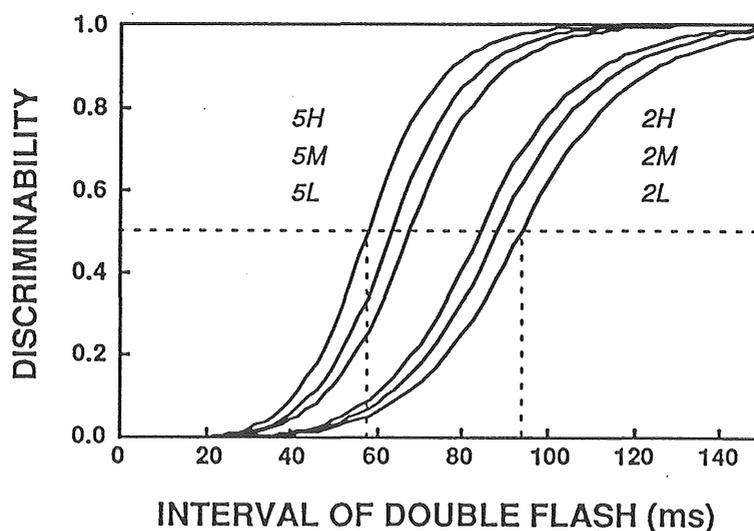


Fig.4.4. 二重刺激閾の理論曲線

左側から順に、5H→2Lの弁別曲線。横破線：50%弁別閾，縦破線：5Hおよび2Lの弁別閾。

別閾値を表しており、およそ 50-100 ms の範囲内におさまっている。刺激の大きさ、コントラストの強さによって、閾値が左に移動するという系統的特徴がみられる。判断の要因を入れない場合には、 $p = 0.5$ を中心にもう少しなだらかな曲線となる。

4. 4 考 察

(1) ダブル VEP モデル

本研究では、パラメータを半減して簡略化し、さらに刺激条件で重回帰した線形構造を導入してモデルを構築した。刺激間隔が大きい場合には分離した主要ピークが観察され、小さい場合には融合過程がみられ、全体的によく適合しているといえる。

また、Table 4.1 に示すように、パラメータは刺激間隔に依存しないことが明らかになった。これは、第 2 刺激にはほぼ同じ VEP が発生し、重ね合わせの原理によってダブル VEP が発生していることを示す証拠である。特に、興奮振幅(A_{en})を考えると、 $t = 50$ ms でも、200 ms のときと同様な反応が存在することを意味する。これを踏まえて、弁別曲線のモデルを考えたわけである。これは、吉田・吉田 (1984) で、弁別閾値以下でも第 2 刺激に対する反応が発生していることと合致している。この点に関しては、Musselwhite & Jeffreys(1983) が示した、閾値から反応の発生がみられるという報告とは異なっている。彼らの用いた刺激がパターン刺激であったことと脳波誘導法の違いによるものと考えられる。

後期律動波についても，相互干渉の結果得られる波形の位相がほぼ適合している。50msの場合には，後期律動波は第1 VEP (PLSR1)のみ発生するとしたが，この場合にもよく適合している。第2 VEP (PLSR2)でも発生するとした場合には，抑制されて平坦になってしまう。これは，50 msでは2つの波形はほぼ融合する，つまり単発に近い状態であることを示す証拠であろう。ここでも，やはり，パルス状のオン・オフの相互トリガーの可能性があることが示された。

また，Fig.4.2のSINGLEの波形は，Yoshida(in press)のパルスVEP(10 ms幅)に後期律動波を加えたモデルであるといえる。これは，簡略化したインパルス応答として今後利用価値があると考えられる。

(2) 理論弁別曲線

得られた理論弁別曲線 (Fig.4.4) は，心理物理で用いられるロジスティック関数に近い。50%閾値の範囲も，50-100msの間であり，円形刺激を用いた関連する他のデータ (吉田・吉田，1984；吉田，1986；篠田・吉田，1989)ともほぼ合致している。また，刺激が大きくなると弁別閾値が低くなることは，Lewis (1968)の心理物理的研究と対応している。さらに，コントラストが大きくなると閾値が低くなることは，Purcell & Stewart (1971)の輝度を変化させた報告と合致している。したがって，この理論弁別曲線は心理物理弁別曲線と対応づけることができると考えられる。

ここでは，2つの興奮成分の間の谷の深さを指標とした。このことは，「暗が見える」程度が2刺激を弁別する度合いであると規定することであり，簡便でまた自然な方法であると考えられる。簡略化したインパルスVEPから，このような「連続した」弁別曲線を導きだすことができたことは意義深い。つま

り知覚現象に底在する心理的連続体を検討するうえで重要となるであろう。本研究では VEP 波形を式で表現することができ、しかも主要波形を興奮過程として意味づけることができた。信号検出理論のアプローチも検討したが、VEP の電位変化を確率分布関数として直接利用できないこと、および式が複雑になることから、今回は採用しなかった。

4. 4 まとめ

本研究は二重光刺激に対する視覚誘発電位(ダブルVEP)に対して、二元過程モデルを適用したものである。視角で 2° と 5° の小円形の光刺激を、3つのコントラスト・レベル (1.0, 2.2, 3.4) で提示した。10 ms 幅のパルス光を、50, 100, 200 ms の刺激間隔で2回与えて二重光刺激とした。後頭中心部 (Oz) からの典型的な VEP を分析した。簡略化した単一パルス VEP モデルは、興奮・抑制過程のみからなると仮定した。VEP モデルのパラメータは、フレッチャー・パウエル法と重回帰法によって決定した。合成されたモデル波形は原ダブル VEP とよく適合しており、第2 VEP の振幅は全刺激間隔条件でほぼ同じであった。単発 VEP の興奮成分にもとづいた二重光の理論弁別曲線は、心理物理的弁別曲線と同様な、刺激の大きさ、コントラストの効果を示した。また、ここで用いたパルス VEP モデルは人間の視覚系の解析に有用であると考えられる。

第5章 トレイン光刺激に対する視覚誘発電位の 二元過程モデル

5.1 目的

人間の視覚誘発電位 (VEP) は、心理学において知覚や注意などの情報処理過程を反映するものとして研究されてきている。特に、本章で扱う系列光刺激に対する VEP (トレイン VEP) は、一部、定常 VEP (steady-state VEP) として知覚過程と密接に関連することが示され、臨床的にも応用されつつある。ところが、その多くは、実験課題との関連で内的過程を推測する方法をとっている。これは、心理現象の側からのアプローチとしては有効であるが、しかし、知覚の機構を考えていく際にはギャップが大きく困難が生じる場合がある。この要求に応えるためのひとつの方法は、モデル化あるいはシミュレーションを行なうことである。モデル化は、ある程度仮説に基づかざるをえないが、心理学と生理学の知見の橋渡しの役割をもつ方法であると期待される。

VEP のモデル化は、これまでそれほど進んでいるとはいえない。とくに、トレイン光刺激に対する VEP については、Sato, Kitajima, Mimura, Hirota, Tagawa, & Ochi (1971) の重ね合わせ法の検討以来、近年はあまりなされていない。つまり、トレイン光刺激に対する VEP を、単発の過渡 VEP (transient VEP) から予測していこうとするアプローチ、すなわち、合成による分析というシミュレーション技法を用いた研究は少ない。

最近、吉田 (1990a) は、空間的な受容野の性質を時間領域に適用することにより、光刺激のオン・オフに対する VEP をその興奮・抑制過程で説明し、知覚現象との対応関係を示した。ここでは、ポアソン過程の差で表現する DOP 関数を用いて二元過程モデルを提出した。次に、Yoshida (in press) は、パルス光刺激の持続時間に対してこの二元過程モデルを適用した。そこで、オン・オフの興奮過程からなるコントラスト・ポテンシャルを提唱し、これが時間的・空間的な知覚現象と対応づけられる可能性を示した。

本章では、さらに、光刺激系列に対する トレイン VEP に対して、この二元過程モデルを適用し、時間軸上でのシミュレーションを試みることによって、知覚現象との関連を考察する。つまり、トレイン VEP を光刺激条件のパラメータから再現できるような表式を求め、そこから、心理学および生理学的知見との関連を考察していく。

5. 2 方法

5. 2. 1 データ収集

(1) 視覚刺激

モニタースコープに提示される円形の刺激光を用いた。実験条件は、刺激の大きさとコントラストと刺激間隔の、3つの条件を設定した。大きさの条件は、刺激円の直径が視角で 2° と 5° である。コントラスト条件は、順応光の輝度 (50 cd/m^2) を 1 とし、順応レベルからの輝度増分比をそれぞれ、1.0,

2.2, 3.4 としたものをを用い, それぞれ順に, L, M, H と表す. 実際の輝度は 100, 160, 220 cd/m^2 である. 刺激間隔は 50, 100, 200 ms の 3 条件である. 刺激個数は, 50 ms のとき 21 個, 100 ms のとき 11 個, 200 ms のとき 6 個で, 3 条件とも 1000 ms の刺激時間となる. 刺激光のパルス幅は 10 ms である. 刺激条件の表記方法は, たとえば, 刺激の大きさ 2° , コントラストが L, 刺激間隔が 50 ms の条件では, 2L50 とする. 刺激の装置や提示方法は, 第 2 章のものと同様である.

(2) VEP 記録

VEP の実験によく慣れた健常な成人男子 1 名の典型的な脳波データを分析した. 被験者は, 一連の実験で比較できるように同一人を用いている. 脳波は, 銀-塩化銀電極を用い, 右耳垂を基準として後頭中心部 (Oz) から時定数 0.3 s で単極導出した. データは, サンプル間隔 2 ms, 1024 ポイントを, マイクロ・コンピュータで直接デジタル変換して記録した. それぞれの刺激条件について, 100 回分のデジタル・データを加算平均したものに, 15 ポイントの重みづけ移動平均をかけ, さらに FFT 法による 3 Hz 以上のハイパス・フィルターをかけ低域のドリフトを除去してトレイン VEP の原データとした.

(3) 実験手続き

被験者は, シールド暗室内の椅子に腰かけて, 順応光のもとで約 10 分間の順応を行なった. その後, 顔面固定器で頭部を固定したまま円形光の中心にある凝視点を見つめ, 準備が整った時点で手元のスタートスイッチを押す. A/D 変換が開始されてから 200 ms 後に刺激光の系列が提示される. 刺激間隔は

およそ 10-20 s であり，刺激の 1 条件につき 50 回の脳波記録を行なった．刺激条件の順序をランダムとして，日を変えて繰り返し，1 条件につき 100 回の記録となるようにした．データは致命的なノイズが含まれていなかったため，全データを分析対象とした．Fig.5.2, Fig.5.3, Fig.5.4 において細線で表した波形が原 VEP である．

5. 2. 2 モデル表式

(1) 基本モデル

光刺激のオン・オフに対する VEP の二元過程モデル (吉田, 1990a) は，次のように表現される．まず，基本となる興奮・抑制過程は，ポアソン型として，

$$V(t) = t^X \exp(-t) \quad (V(t)=0, t \leq 0) \quad (5-1)$$

と表す． V は電位， t は時間， X は形状を表すパラメータである．ここでは第 2 章と同じく， $X=2.9$ に固定してある．これを，さらに，電位発生潜時 (D ms)，ピーク潜時 (P ms)，振幅 ($A \mu V$) の 3 つの正符号パラメータで表すと，

$$V(t) = [(e/X)^X A] [(X/P)(t-D)]^X \exp[-(X/P)(t-D)] \quad (V(t)=0, t \leq D) \quad (5-2)$$

となる．光のオンとオフに対する VEP は，

$$ON(t) = -Ven(t) + Vin(t) \quad (5-3)$$

$$\text{OFF}(t) = \text{Vef}(t) - \text{Vif}(t) \quad (5-4)$$

と書ける。これらは、DOP関数とよぶ時間軸での特徴表現関数である。Vの添字の、eは興奮過程、iは抑制過程、nはオン、fはオフを表す。基本波形の3つのパラメータ(D, P, A)もこの添字を付して用いる。また、電位やパラメータは英大文字で表現する。

(2) パルス・モデル

まず単発パルス(10 ms幅)に対するVEPの基本波形(PULSE)は、パルス光に対するVEPの基本モデル(Yoshida, in press)を採用し、

$$\text{PULSE}(t) = \text{ON}(t) + \text{OFF}(t - 10) \quad (5-5)$$

とした。ここでは、パルス幅(τ)は一定なので省略して式には含めない。このPULSEのパラメータは12個である。

さて、トレインVEPの原波形(Fig.5.2, Fig.5.3, Fig5.4)には、200-400 msの範囲で振幅減衰がみられ、それ以後振幅増大がありほぼ一定値に収束するという2つの特性がみられる。この振幅の減少・増大を表現することを考える。Yoshida (in press)のデータでは、パルス幅10 msの単発VEPにはいくつかの後期律動波がみられる。その律動波の特に2個のみに注目すると、これは負のピークN150から約150 msと250 msのところに小さな負のピークと、200 msと350 msに小さな正のピークをもっており、この後期律動波の周期は約100 msとみなされる。今回のトレインVEPの最終刺激後(1000 ms後)での律動波は、

周期は約 100 ms と同じであるが、N150 ののち約 100 ms から始まり、律動波発生開始時間が約 50 ms 縮まる傾向がみられる。

そこで、式(5-5)の PULSE にこの位相シフト (S ms) を入れた後期律動波の電位 (R) を加えて、PULSER を次のように表現する。

$$\begin{aligned}
 \text{PULSER}(t) = & \text{PULSE}(t) \\
 & - \text{Ren1}(t-\text{Den}-100-S) + \text{Ref1}(t-\text{Def}-100-S) \\
 & - \text{Ren2}(t-\text{Den}-200-S) + \text{Ref2}(t-\text{Def}-200-S) \\
 & (S=50, t \leq 350; S=0, t > 350) \qquad (5-6)
 \end{aligned}$$

ここに、Den はオンの興奮過程の潜時パラメータ、Def はオフの興奮過程の潜時パラメータである。添字の数字は R の順序を示す。ここでは、経験的に、R の振幅を $1 \mu\text{V}$ とし、 $t = 350$ (ms) を位相シフトの臨界値とした。さらに、R におけるピーク潜時 (P) は、その刺激条件での ON, OFF と同じ値を用いた。したがって、PULSER のパラメータは PULSE と同じものであり、12 個である。

Fig.5.1 は、単発パルス光による PULSER-1 ($t \leq 350$ ms) と PULSER-2 ($t > 350$ ms) の合成過程を示している。光のオンによって ON の興奮・抑制成分が発生し、オフによって OFF の興奮・抑制成分が発生する。これらの成分の合成によって PULSER が生成されると考える。後期の小さな律動波は、後に考察でも触れるが ON, OFF とともに興奮過程と考える。PULSER-2 は、PULSER-1 の後期律動波の発生潜時を 50 ms だけ縮めた波形である。これらのモデル波形の位相シフトによって、トレイン波形の振幅の抑制、促進効果が生じると考える。

(3) トレイン・モデル

次に、トレイン VEP には時間的に振幅減衰が認められるので、これを指数関数の減衰係数(C)で表現する。

$$C(i,I,T,B) = (1-B) \cdot \exp(-i \cdot I/T) + B \quad (5-7)$$

ここに、 i は刺激回数、 I (ms) は刺激間隔、 T (ms) は時定数、 B は漸近値のバイアスであり初期振幅に対する比率で表わす (ただし、 $t = i \cdot I$ である)。ここでも、簡単のために経験的に $T = 100$ (ms) と固定した。式(5-6)の PULSER に式(5-7)の係数 R を乗じて、最終的にトレイン VEP のモデル式は、

$$\text{TRAIN}(t,I,N,B) = \sum_{i=1}^N \{ \text{PULSER}(t-i \cdot I) \cdot C(i,I,100,B) \} \quad (5-8)$$

とする。ここに N は提示個数で、 $N = [1000/I] + 1$ である。また、この式のパラ

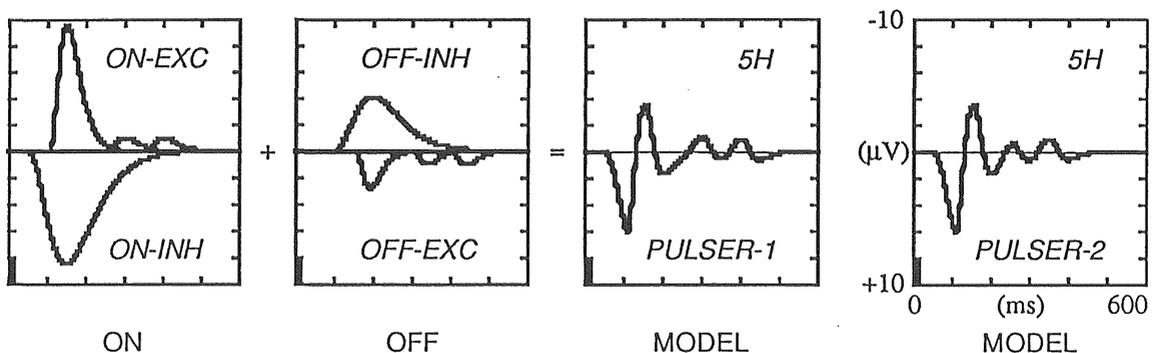


Fig.5.1. オン・オフ成分から生成されるパルス VEP
PULSER-1の後期律動波の発生潜時は、PULSER-2よりも約 50 ms 長い。

メータの数は13個で、その内訳は、Den, Pen, Aen, Din, Pin, Ain, Def, Pef, Aef, Dif, Pif, Aif, Bである。

(4) カーブフィット

モデル式 (TRAIN, 式(5-8)) の13個のパラメータは、パーソナル・コンピュータを用いて、次のような手順で決定する。まずPULSE (式(5-5)) の12個のパラメータを、非線形最適化法の一つであるフレッチャー・パウエル法で求め、これを刺激条件による重回帰式で推定する。この12個の推定値を固定してPULSER (式(5-6)) を作る。これをもとに、TRAINの式で減衰のバイアス(B)をフレッチャー・パウエル法で求め、これも刺激条件による重回帰式で推定する。いずれの最適化の場合も、パラメータの初期値によって収束値に大きな差異が見られる場合があるので、挟み打ち的に初期値を次々と変化させながら求めていく。収束の基準は、 $RMS < 0.4$ 、または誤差比 > 0.99 とした。

5.3 結果

(1) パラメータ評価

PULSEの12個のパラメータは、刺激条件を説明変数として推定した重回帰係数を用いて、Table 5.1の式で求めた。また、減衰係数Cの中のバイアス(B)は、

$$B = 0.59 - 0.03 \cdot \text{SIZE} + 0.03 \cdot \text{CONT} + 0.00035 \cdot \text{INTV} \quad (5-9)$$

により求めた。ここに、パラメータの各要素は、SIZE (大きさ: 2° , 5°), CONT (コントラスト: 1.0, 2.2, 3.4), INTV (刺激間隔: 50, 100, 200 ms) である。

刺激条件の大きさ, コントラストの効果は, 振幅について増加関数となり, 空間加重効果と光量加重効果が見られた。しかし, パラメータを全体的に集約できるほどの特性は見い出せず, パラメータ間の平均化の意味が強く出たのみで, これ以上構造化することは困難であった。

(2) 波形の適合性

Fig.5.2, Fig.5.3, Fig.5.4 は, それぞれ, 刺激間隔が 200, 100, 50 ms のトレイン光刺激に対する原波形 (細線) とモデル波形 (太線) とを重ね合わせたものである。ここでは, 刺激開始を 0 ms として 1400 ms (700 ポイント, 目盛間隔は 200 ms と $2\ \mu\text{V}$) の波形を示している。各トレースの右下の数字は, 波形の適合度を表すために平均 2 乗誤差の開平である RMS (root mean square) を表示してある。推定したパラメータを用いて合成したモデル波形は全体的に適合しており, 特に, 200-400 ms の振幅減少と, それ以降の増大効果, および全体の振幅減少も表現されている。また, 刺激の大きさによって, PULSER の振幅に違いがみられ, 大きさ 5° の方がその振幅が大きくなっている。

まず, 重なりが少ない刺激間隔 200 ms (Fig. 5.2) から検討する。ここでは, 明瞭な単発の PULSER が連続しているように見える。振幅減少は, 大きさ 2° の刺激でよく観察され, 位相のずれによる細かなゆらぎもよく表現されている。振幅増大効果は双方とも余り顕著ではない。刺激間隔 100 ms (Fig. 5.3) では,

その減少効果，増大効果ともに著しくなっている．大きさ 2° の場合の減少部分では細かな足踏み様のゆらぎがみられ，これもよく表現されている．大きさ 5° の場合には，増大効果が多少過剰みである．刺激間間隔 50 ms (Fig.5.4) の場合は，全体に細かなゆらぎの連続になっている．減少効果はそれほどみられず，位相の重なり具合からのゆらぎがよく表現されている．ここで用いたパラメータでは，増大効果は，刺激間間隔 100 ms のときとは反対に，大きさ 5° の場合にかなり小さくなっている．

Table 5.1

モデルパラメータの重回帰係数

Param	a_0	SIZE	CONT	(R^2) ^{a)}
Den	68.7** ^{b)}	8.0**	-1.67	(0.98)
Pen	53.6**	-2.0**	0.63	(0.90)
Aen	1.58	1.22**	0.52	(0.94)
Din	70.4**	-1.2	-5.4**	(0.92)
Pin	62.3**	5.7**	3.3*	(0.97)
Ain	1.74*	0.99**	0.52*	(0.98)
Def	186.4**	-6.0	-1.3	(0.17)
Pef	25.0**	2.9*	-0.2	(0.77)
Aef	2.14**	0.12	0.02	(0.25)
Dif	137.7**	-9.4*	2.5	(0.69)
Pif	20.3	13.6**	3.1	(0.89)
Aif	2.06**	0.29	0.17	(0.58)

a) 自由度調整済決定係数

b) *:p<.05, **:p<.01 (t-test)

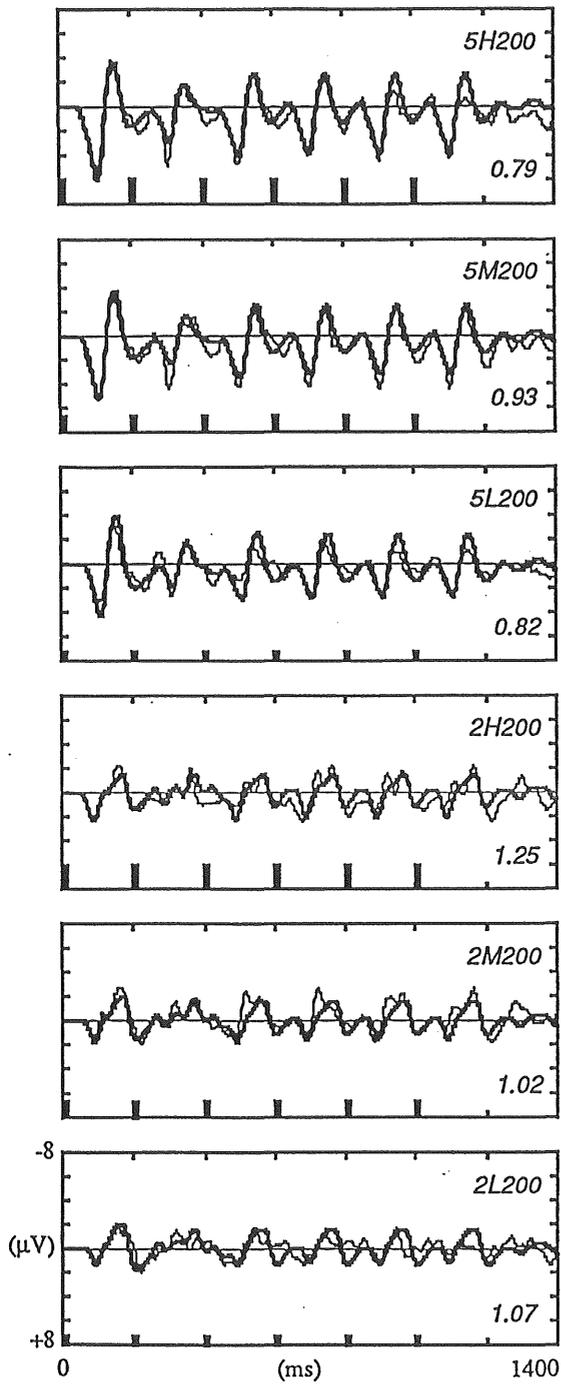


Fig.5.2. 刺激間隔200 ms のトレイン VEP と原 VEP
 太線：モデル VEP，細線：原 VEP，縦線：刺激マーク。枠内記号は刺激条件，数字は RMS.

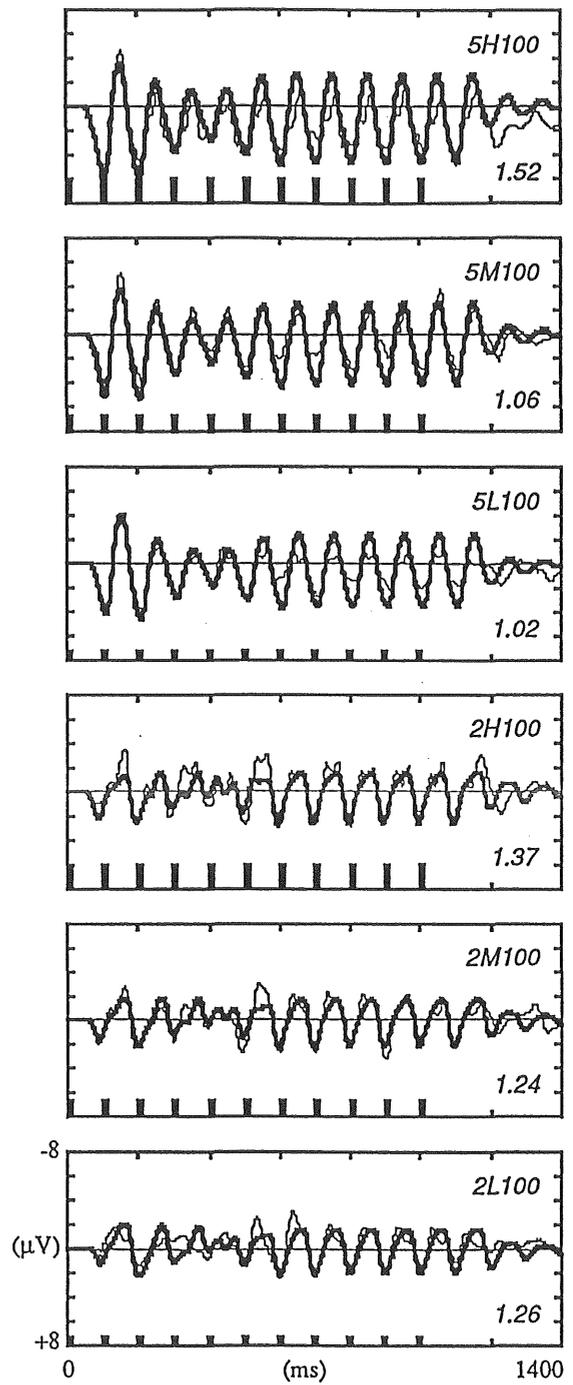


Fig.5.3. 刺激間隔100 ms のトレイン VEP と原 VEP
 太線：モデル VEP，細線：原 VEP，縦線：刺激マーク。枠内記号は刺激条件，数字は RMS.

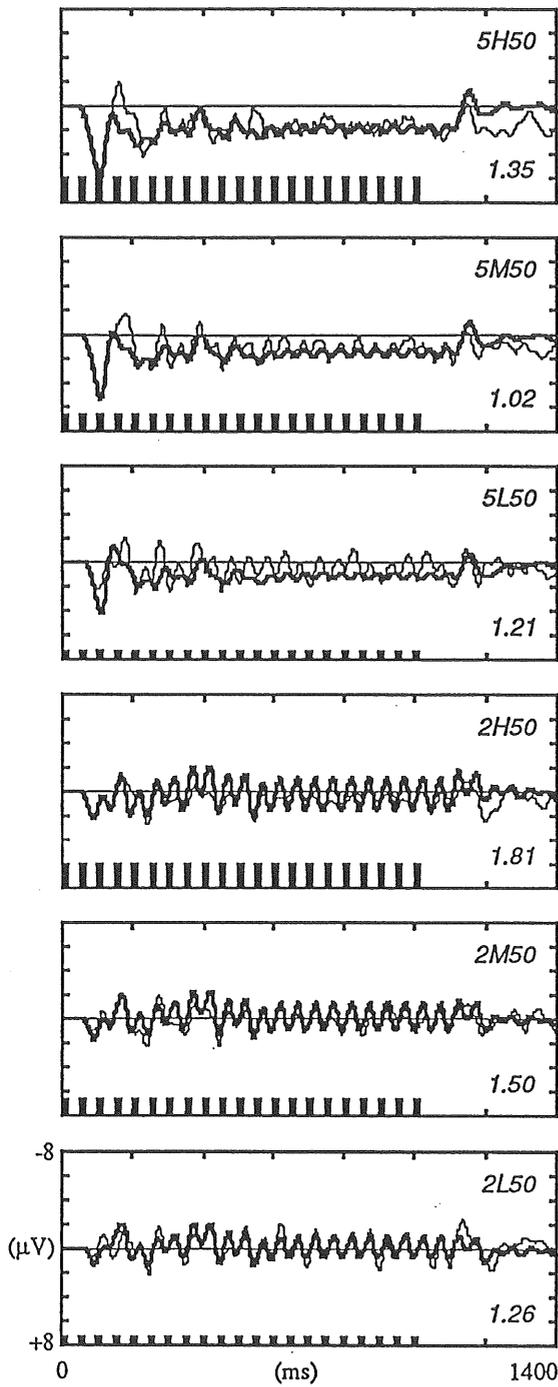


Fig.5.4. 刺激間隔50 msのトレインVEPと原VEP
太線：モデル VEP，細線：原 VEP，縦線：刺激マーク。枠内記号は刺激条件，数字はRMS.

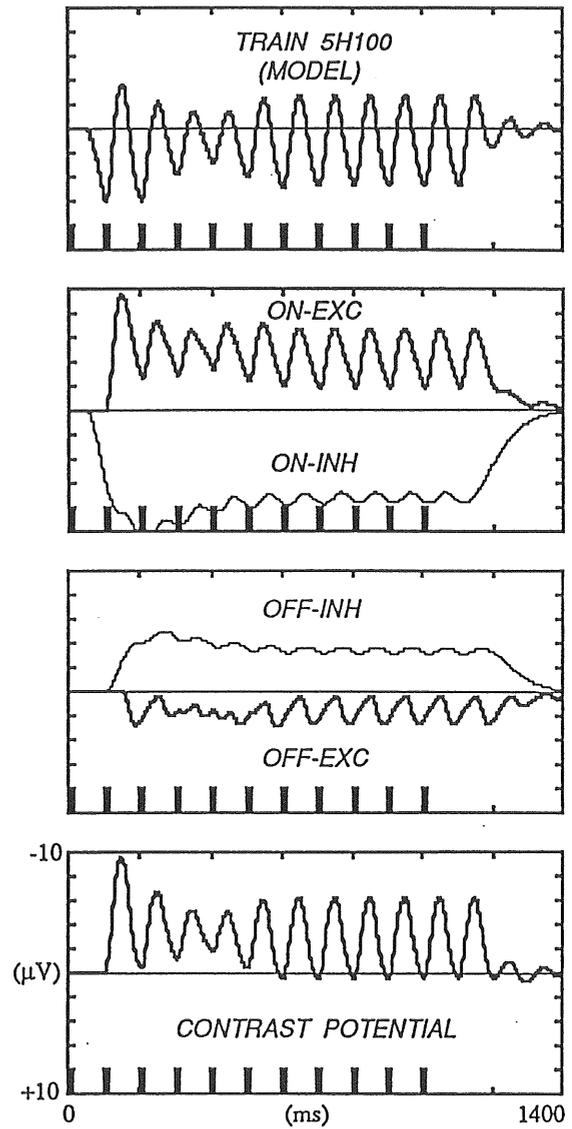


Fig.5.5. トレインVEPの各成分
上段から，トレイン・モデルVEP，ONの興奮・抑制成分，OFFの興奮・抑制成分，コントラスト・ポテンシャル。コントラスト・ポテンシャルはオン興奮とオフ興奮の成分から合成される。(例は5H100の場合)

(3) コントラスト・ポテンシャル

Fig.5.5 は、刺激条件が 5H100 の場合を例として、TRAIN の波形、その成分（オン、オフの興奮・抑制）の重ね合わせの様子、およびコントラスト・ポテンシャルを示したものである。最上段は、TRAIN のモデル波形を示している。2 段目のオンについては、興奮の ON-EXC が刺激周期に同期した顕著な律動波を示し、抑制の ON-INH の律動振幅は小さい。3 段目のオフについても同様で、興奮の OFF-EXC は律動的で、抑制の OFF-INH は平坦になっている。パルス光刺激に対するコントラスト・ポテンシャルは、ON-EXC と OFF-EXC の加算合成により得られるものである (Yoshida, in press)。トレイン刺激に対するコントラスト・ポテンシャルは、PULSER の興奮成分を刺激間隔ですらして重ね合わせて得られる。この場合は、式(5-3)から式(5-7)までを用い、パラメータを省略して簡略に示すと、

$$\text{CONTRAST} = \Sigma \{ \{-V_{en} + V_{ef} - R_{en1} + R_{ef1} - R_{en2} + R_{ef2}\} \cdot C \} \quad (5-10)$$

となる。この波形は、モデルである TRAIN 波形の主要成分となっているのが観察される。つまり、200-400 ms で振幅減少し、約 500 ms 以後は定常な律動波となり、TRAIN の波形を特徴づけている。

5. 4 考 察

(1) モデルの適合性と位相シフト

本モデル (TRAIN) は、基本的なオン・オフ興奮・抑制の過程に、位相シフトを伴う後期律動波を加えた二元過程モデルである。結果に見るように、いくつかのパラメータを経験的に固定したにもかかわらず、そのモデル波形は、全体的に原 VEP と適合していた。

まず、このモデルの主要な仮定、つまり明順応による後期律動波の位相シフトについて考察する。この位相シフトの存在は、次の点から支持される。方法ですでに触れたように、単発パルス光刺激による律動波の潜時は、Yoshida (in press) では、約 150 ms であり、本データのトレイン光刺激終了後では約 100 ms となっており、この間、短期明順応が進んだと考えられる。また、吉田・吉田・金子(1982) は、刺激間間隔が 200 ms 以下のトレイン VEP の同期化に及ぼす明暗順応の効果を検討して、明順応下の方が同期に要する時間が短いことを報告している。このことは、明順応が進めば、律動波の発生潜時が短くなり、同期しやすくなることを示している。本モデルでは、発生潜時を経験的に 100 ms に固定した場合でも、200-300 ms の振幅減少期およびそれ以降の増大期の表現が可能であった。このように、順応仮定を考慮することにより、時間軸での VEP の変化を捉えることができたといえる。

(2) コントラスト・ポテンシャル

系列的に加算して求めたコントラスト・ポテンシャルは、定常 VEP の主要成分とよく対応していた (Fig.5.5)。この点については、オン・オフの興奮成分が優勢になったものとする吉田 (1990a) の予測と一致している。吉田・篠田

(1988) の、短期明暗順応に関して視覚野の直流電位を用いた検討によると、明暗順応の量に応じて明順応時に陰性に、暗順応時に陽性に変位する直流電位が観察された。これは、オン・オフの興奮成分の極性と一致しており、明感覚が陰性の、暗感覚が陽性の電位変動とすることの一つの根拠を与えている。

一方、定常 VEP は心理物理データと一致度が高いことが報告され、パターンリバーサルなどの方法を用いて、臨床面でも実際応用されつつある（たとえば、Desmedt, 1977; 飛松・田島・広松・加藤, 1990）。知覚面では、Campbell & Maffei (1970) は、コントラスト閾値について、定常 VEP の振幅から外挿して求めた値は、心理物理的に求めた値と一致すると報告している。このことは、明暗の知覚が、オン・オフの興奮成分の集合であることの間接的証拠である。また、Cheatham & White (1952) によれば、光刺激系列の知覚個数でも時間経過により、約 200-350 ms の時間に知覚の抑制期が見られる。これは、本データでの初期の振幅減少期に対応するものであり、コントラスト・ポテンシャルの振幅が明るさ検出に関与することを示すものである。後期律動波が 10 Hz 近傍の刺激周波数には同期しやすく、振幅増大効果が認められたが、これがコントラスト・ポテンシャルの成分であるとするれば、見えの問題とも関連づけられ、知覚的にはバートレイ効果 (Bartley, 1951) に対応するものと考えられる。

また、フリッカー刺激と見えの問題を扱った Yoshida (1983) の VEP データをみると、低頻度刺激の可算相では抑制成分が明瞭に分離して大きなゆらぎが見え、フリッカー相ではそのゆらぎが小さくなっている。ここでの大きな抑制成分は明期の分離に対応し、情報論的にはストップ・ビットに相当するとみなされる。フリッカー相では、抑制成分の振幅が小さくなり興奮成分が優勢になっ

て、定常 VEP の型に近づいたと考えられる。

以上、見えの現象とコントラスト・ポテンシャルの対応関係が密接であることが示された。このことから、逆に、後期律動波の成分をオン、オフの興奮成分とみなした仮定も妥当であると考えられる。

(3) パルスからトレインへ

Roufs (1972) は、光覚閾について理論的考察を加えた研究の中で、パルス応答からフリッカー応答への拡張を行なっている。また、Wasserman (1966) も、明るさの促進効果について、ブリュッケ・バートレー効果はブローカ・スルツァー効果の集合であり、これらは一つのブリュースター(Brewster)効果とよぶべきであると主張している。つまり、知覚研究の面から、パルス応答を基礎としてトレイン応答を導きだそうとしている。本研究の場合も、単発パルス・モデルからトレイン・モデルを導き出して、原 VEP とのよい適合性を得ている。ここには、視覚系の多様な特性に対しても、同一機構の存在が仮定できるといふ基礎的な考え方がある。

(4) 後期律動波

後期律動波の意義について、さらに広めて考える。Yoshida (in press) のデータでは、パルス幅が 50 ms か 10 ms のときのみ後期律動波が発生する。ステップ状のオンまたはオフのみでは発生しない。したがって、そこには吉田 (1990a) が指摘したように、オン・オフの相互トリガー機構の存在が示唆される。

本研究の基礎となった Sato et al. (1971) の基本波形には、後期律動波はみら

れなかった。ここに、オン・オフの相互トリガー機構を仮定すれば、律動波が出なかったことの説明がつく。その光刺激は高輝度のクセノン光であり、時間空間的に拡散したために、トリガー機構が働きにくく律動波が発生しなかったものと考えられる。本研究では、形状、コントラスト、大きさが、脳内の各検出ユニットを活性化するのに適切であり、オン・オフが相互にトリガーしやすかったために、明瞭な律動波が発生したと考えられる。

谷口 (1989) は、光駆動反応と後発射 (後期律動波) との関連を総括して、(1) 後発射は脳波のリズム特性の要素的側面をもつ、(2) 光駆動反応は後発射に外部同期入力と共振して生じる、(3) 安静時アルファ波は、基本リズム素子に同期したものである、としている。これらの考え方と本モデルでの後期律動波は、互いによく符合するところがある。オン・オフの相互トリガー機構により 10 Hz 近傍の周波数をもつこと、さらに明暗刺激により位相のずれが起こり脱同期化する、あるいは、逆に同期化して紡錘波が発生することなどの性質をもち、アルファ波等の自発脳波の説明も可能となるのではないかと考えられる。こうした別の観点からも、後期律動波の仮定が支持されるであろう。

5. 5 まとめ

本研究は、系列光刺激に対する視覚誘発電位(トレインVEP) に対して、二元過程モデルを適用したものである。視角で 2° と 5° の小円形の光刺激を、3つのコントラスト・レベル (1.0, 2.2, 3.4) で提示した。パルス光の幅は 10 ms で、1 s の間に、それぞれ、50, 100, 200 ms の刺激間隔で与えた。後頭中

心部 (Oz) からの典型的な VEP を分析した。本モデルは、明順応によって潜伏時間が減少する後期律動波を含んでいると仮定した。このモデルのパラメータは、フレッチャー・パウエル法と重回帰法によって決定した。こうして合成されたモデル波形は、原 VEP とよく適合しており、また、振幅の初期減少過程や後期増大過程も表現できた。トレイン VEP のコントラスト・ポテンシャルは、定常 VEP および心理事象と密接な関連をもつことが示された。

第6章 視覚誘発電位二元過程モデルの

動的シミュレーション

6.1 目的

最近では、パーソナル・コンピュータ上でもシミュレーションが可能となり、さまざまなシステムを解析するうえで有力な手段となっている。とくに、過去の状態に依存する動的システムの解析には不可欠とさえ言われている（松坂，1986）。また、視覚心理学的な現象についても、生理学、工学の領域からの接近と統合がはかられ、モデル化が促進されて大きな成果があげられている（田崎・大山・樋渡，1979）。本章では、二元過程モデルを動的システムとしてシミュレーションを行ない検討していく。

これまでの章では、刺激パターンに対する VEP 波形について波形への適合度を第一義に考えて、各論的に論議を進めてきた。オン・オフ条件（吉田，1990a）では、振幅のパラメータを刺激条件による回帰式をたて、その振幅をもとに遅延、潜時の2種類のパラメータを推定した。他のパルス条件（Yoshida, in press）、ダブル条件（吉田，印刷中）、トレイン条件（吉田，1990b）では、10数個のパラメータを刺激条件から直接求めた。これらのパラメータを比較してみると、係数の符号、大きさなど、共通した構造を有しているものではない。

そこに要求されるものは、知覚機構の基本ともされている順応の考え方を導

入して統一することである。つまり、まず順応過程を考慮して光刺激の刺激値を求め、それによって VEP のパラメータが時間的に変化するようなモデルをたてていくことが重要である。順応過程は、過去の状態に依存する機構であり、この意味で動的システムといえる。このような動的システムの場合、パラメータを推定する方法はかなり複雑である。したがって、ここでは、刺激の大きさ、コントラストを一定に固定して簡略化する。その上で、必要なパラメータについては、これまでの知見を踏まえて経験的に決定しシミュレーションを行ない、各刺激パターンに対する VEP 波形を検討する。

また、後期律動波の発生機構についての問題が残されてきた。これまでは、二元過程モデルの興奮・抑制過程を基礎にして考えた相互トリガー機構を概念的に述べてきたに過ぎず、実際にどのような条件下で発生するかについては論議してこなかった。与えられた制約条件を最大限に利用してモデルを考えていくことは、計算論的な手法の基本である。ここでは局所的な制約条件をもとにその発生機構を検討していく。

モデル化にはいくつかの方法があるが、各章で取り扱ったような、半ば強制出力させる波形生成のプログラムでは、どのようなものでも生成可能である。ここでは、コンピュータ上で稼働するシミュレーターを用い、入出力条件を整備したモジュール形式で、しかも連続処理の形で検討する。シミュレーションを行なうことによって概念モデルの落とし穴がよく分かり、それを次のステップに役立てることができる。

以上のように、本章では、順応過程、相互トリガー機構を加えた動的システムとしての二元過程モデルを導入し、各刺激パターンに対する原 VEP と比較する。今回は、カーブフィットまで行なうには困難があるので、これまでの

VEPデータの基本的な性質が再現できるかどうかについて検討していく。動的システムを構築することは、やや不安定となりがちで容易ではないが、ひとつの足掛かりを得ようとするものである。

6.2 方法

(1) VEPデータ

刺激パターンは、第2章から第5章まで述べてきた、オン・オフ、パルス、ダブル、トレインについて検討するが、簡単のため、大きさが 5° 、高コントラスト（H：輝度増分比3.4）のデータのみを扱う。今回は、波形の適合度まで検討しないので、原VEPの波形を重ね合わせて表示したり、その適合度を示すことはしないが、適宜ふりかえって参照することとする。

(2) シミュレータ

シミュレーションは、パーソナル・コンピュータ（Macintosh II, Apple Computer, Inc.）上で動くシミュレータ（Extend v1.1, Imagine That, Inc.）を用いて実現する。このシミュレータは、ModLというC言語に近い言語を用い、アイコンを1つのブロックとして入出力を結合して構成していくものである。このシミュレーションは、基本的には、クロック毎に入力、演算、出力を行なう連続系 (generic) 方式である。したがって、処理の記述は、ルンゲ-クッタ法などのインクリメンタルな方式で行なわれる。我々の生体情報処理過程は実時

間で動いており、シミュレーションもこのような連続系方式で行なうことが、より重要な接近法であると考えられる。

(3) 基本過程

それぞれの興奮・抑制の二元過程は、これまで通りポアソン型を基本とし、正のパラメータ A (振幅), P (ピーク潜時), D (遅延) を用いて、

$$V(t) = [(e/X)^X A] [(X/P)(t-D)]^X \exp[-(X/P)(t-D)] \quad (6-1)$$

とし、次式、

$$ON(t) = -Ven(t) + Vin(t) \quad (6-2)$$

$$OFF(t) = Vef(t) - Vif(t) \quad (6-3)$$

で表されるDOP関数を用いた。式(6-1)の不应期は、Pの5倍の期間とした。

これらのパラメータの基本式は、第5章のトレインVEPで用いた10msパルスの式(Table 5.1)を利用した。ただし、大きさ(SIZE)は5°に固定、コントラスト(CONT)には刺激価が入力される。また、DefとDifは、刺激価によってOFFの遅延が変化するように、下線の項を加えて次のように変更した。

$$Def = 186.4 - 6.0 \text{ SIZE} - 1.3 \text{ CONT} + \underline{30(1 - \text{CONT})} \quad (6-4)$$

$$Dif = 137.7 - 9.4 \text{ SIZE} + 2.5 \text{ CONT} + \underline{30(1 - \text{CONT})} \quad (6-5)$$

この項は順応過程と連動し、係数を直接計算するのは困難であるので、経験的に決定した。

VEP 発生の基本機構は、Fig.6.1 に示すような、ON と OFF の興奮・抑制の二元過程ユニットが一組となり、それが多チャンネル連なったものとした。実際のプログラムでは 50 チャンネル確保している。まず、コントラストの変化としての刺激 (STIM) が入ると、その時の順応水準に照らして刺激価 (STIM VAL) が決定される。それぞれの遅延 (D) を経たのち、刺激価の変化が正の場合はオン (ON) , 負の場合はオフ (OFF) の抑制過程 (INHIBIT) が発生する。さらに遅延ののち興奮過程 (EXCITE) が発生する。オン・オフの興奮過程の和がコントラスト・ポテンシャル (CONTRAST POT) に対応する。これに抑制過程が加わって、全体の視覚誘発電位 (VEP) の波形が形成されると考える。

(3) 順応過程と刺激価

順応過程 (ADAP) は、ステップ応答のときには指数関数的に漸近するとして、

$$\text{ADAP}(t) = (1 - \exp(-t/T)) \cdot \text{CONT}(t) \quad (6-6)$$

と表現する。ここで、T は時定数である。これは、一般の応答では一次遅れの式として微分方程式で表されるので、実際のプログラムではルンゲ-クッタ法で記述した (小池, 1988) 。順応過程は、記憶要素とフィードバック系をもつ動的システムとして表される。

Crawford (1947) は、明順応過程の研究で、約 100 ms で急激な光覚閾の変化を報告している。それを参考にして、ここでは明順応の時定数を 50 ms とした。また、暗順応の時定数は 200 ms とした。これは、Baker (1963) の初期順応のデータから、漸近までの約 1/3 に低下する時点をもとに求めた。短期明暗順応の時定数を推定するには、その相互作用があるので困難であるが、ここではトリン刺激で順応過程に変化がでるように微調整して決定したものである。

刺激値は、この順応水準をもとにして、

$$\text{VAL}(t) = \text{CONT}(t) - \text{ADAP}(t) \quad (6-7)$$

とした。Fig.6.1 では、順応過程は刺激値のブロックに含めてある。

(4) 相互トリガー機構

相互トリガー機構は、Fig.6.1 の中央部に示した結合で表される。その働きは、オンの興奮出力のピーク時にトリガー信号が出力し、オフの抑制過程が活性化していればゲートが開いて、オフの興奮過程を活性化する。オフの興奮出力も同様な条件のもとにオンの興奮過程を活性化するものである。ゲート開閉の条件を抑制過程の活性状態にした理由は、局所的な過程で発生または減衰することを要件にしたからである。つまり、オン・オフの間隔が近ければ律動波が発生し、離れれば発生しないという要請 (Yoshida, in press) による。個数で制約するにはカウンターを設定しなければならず、また、興奮過程を条件にすれば不应期の関係で減衰せず、無限に律動波が発生してしまい現実にそぐわないことになる。

このトリガー機構によって発生する興奮振幅は絶対値で $1.5 \mu\text{V}$ とした。律動波の振幅を $1.5 \mu\text{V}$ 以下にすると刺激価との関係で出現しなくなる。ダブル VEP の場合は、律動波の振幅は $1.3\text{--}2.7 \mu\text{V}$ の範囲であったので妥当な値であろう。また、ゲートの閾値は $\pm 0.2 \mu\text{V}$ とし、ゲートの不応期は、律動波の周期を約 100 ms にするため 50 ms とした。

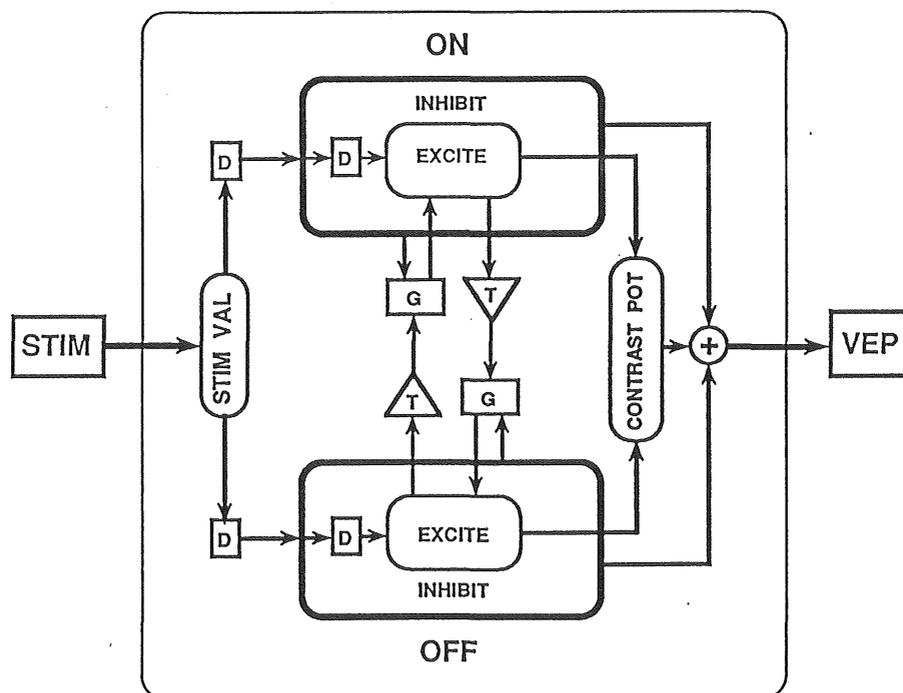


Fig.6.1. オン・オフ・システムと相互トリガー機構

STIM：光刺激，STIM VAL：刺激価，D：遅延，EXCITE：興奮，INHIBIT：抑制，CONTRAST POT：コントラスト・ポテンシャル，T：ピーク検出トリガー，G：トリガー・ゲート。ON，OFFはそれぞれ多チャンネル構造をもつ。

6.3 結果

シミュレーションの結果は、Fig.6.2, Fig.6.3, Fig.6.4 に示してある。それぞれの図中で、下段は刺激マーク、中段はモデル波形、上段は刺激値のマークである。刺激値は、基準線からの正負の変位分が対応している。

(1) モデル波形

まず、オン・オフ VEP (ON, OFF) およびパルス VEP (PLS+刺激持続時間) のモデル波形が、Fig.6.2 に示されている。対応する原波形は、第2章および第3章の Fig.2.1, Fig.3.2, Fig.3.3 に示されている。単発パルスのパラメータから得られた ON, OFF の波形はほぼ再現されているが、OFF の振幅が少し減少している。PLS10 では、後期律動波が少し強調されている。他の PLS50, PLS100, PLS200 も同様である。全体的には、主要なピークが再現され、後期律動波も出現しており、多少のずれ、強調がみられるが、特徴はほぼ表現されている。

ダブル VEP (DBL+刺激間隔) のモデル波形は、Fig.6.3 に示されている。対応する原波形は、第4章の Fig.4.2 である。DBL50 は、約150 ms に小さなノッチが再現されており、原波形の特徴が見られる。しかし、律動波は見られない。これは、第4章で述べたように、2つの刺激による律動波が位相が約50 ms ずれて、打ち消し合ったものと考えられる。Fig.4.2 の DBL50 の波形は、第2刺激のみで律動波が発生するとしてモデル波形を求めたものであった。

DBL100では、主要ピークおよび律動波がほぼ再現されているが、約250 msの負のピークが強調されている。DBL200でも同様にほぼ再現されているが、約350 msの負のピークが強調されている。これらは、相互トリガー機構の強調化によるものであろう。

トレイン VEP (TRN+刺激間隔) のモデル波形は、Fig.6.4 に示されている。左側の2つの図は、TRNの基本波形であり、PLS10は、Fig.6.2と同じもの、PLS10-Aは、明順応が進んでオフ刺激の刺激価が増加した場合の波形である。PLS10では負の主ピーク（約150 ms）と律動波の最初のピーク（約300 ms）の差は、約150 msであり、明順応が進んだPLS10-Aは約100 msと減少している。トレイン VEPに対応する原波形は、第5章のFig.5.2, Fig.5.3, Fig.5.4に示してある。TRN200は、PLS10波形の連なりとして再現されている。ただし、主要なピークが強調されている。5発目の負ピークが減少しているが理由は不明である。TRN100では、ほぼ10 Hzの正弦波状の波形である。約300-500 msの期間にわずかではあるが振幅減少がみられる。これは、律動波の位相の打ち消し現象に対応しており、原波形の特徴が表れている。TRN50では、初期の単発と後期の細かなリップル波形が見られる。ここでも約200-400 msの期間に振幅が減少しており、TRN100と同様な打ち消し現象であると考えられる。後半は全体に負の方向にシフトしている。これは、第5章のトレイン原波形は低域周波数をカットしたため平坦になっているが、フィルターをかける前のデータでは、ほぼ全条件で負の方向にシフトする傾向がみられている。いずれも原VEPと類似した特徴をもつ波形である。第5章のトレイン VEPでは減衰パラメータを入れたが、今回は刺激価との関連も出てきて複雑になるので除外した。むしろ、刺激価の変化によって動的に減少傾向がみられることを期待した。

(2) 刺激価

オン・オフ条件では、それぞれ以前の順応が十分に進んでおり、入力刺激のコントラスト値がそのまま刺激価の値になっている。パルス条件では、光刺激の持続時間が PLS10 の場合には順応が進まず、オフの刺激価が減少している。

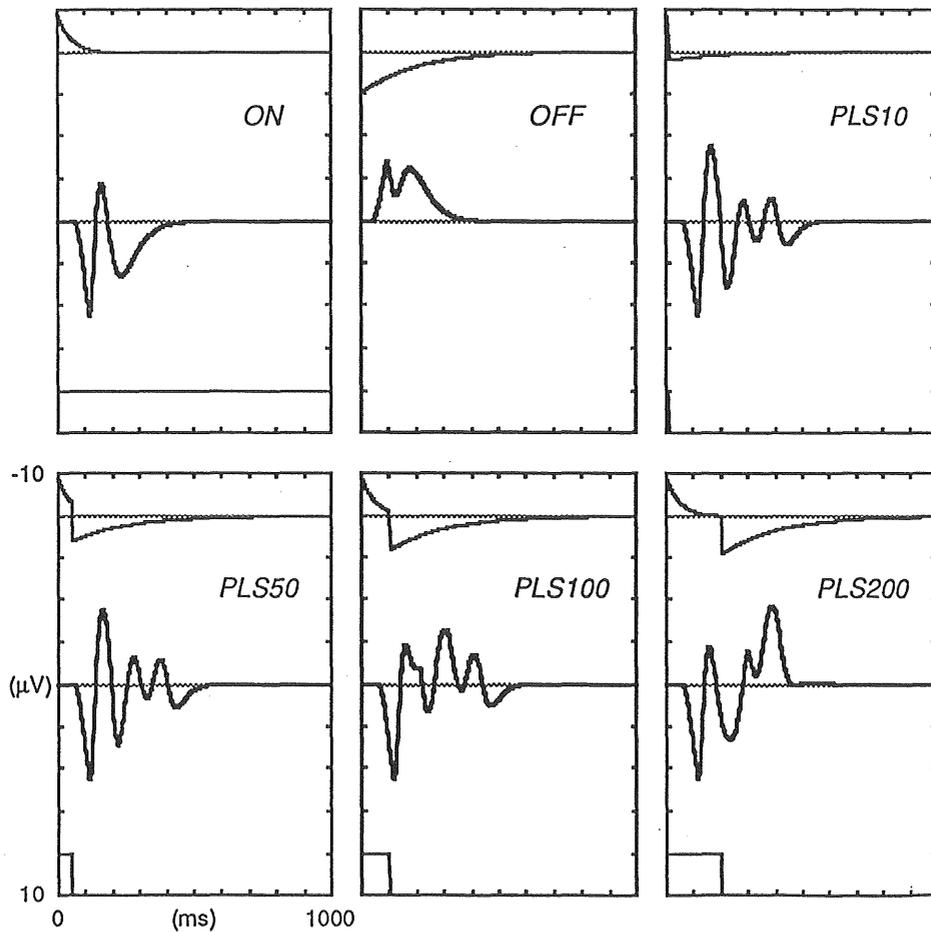


Fig.6.2. オン・オフおよびパルス刺激に対するモデル波形
 下段の矩形は刺激マーク（OFF の場合はゼロ時点で基線復帰している），中段はモデル波形，
 上段は刺激価のマーク（基線がゼロレベルであり，そこから正負の増分が刺激価となる）。

しかし、パラメータ推定の式から、CONTがゼロとなっても回帰式の切片分が残り、ある程度の振幅が発生するようになっているので、実際にはそれほどオフVEPが減少していない。PLS200では、ほぼ回復がみられる。これらは、明暗順応の時定数のとりかたに依存するものである。

ダブル条件では、1発目より2発目に明順応が進み、DBL50ではオフの刺激値が大きくなっている。DBL200では基線に戻り単発のPLS10に近くなっている。トレインでは、TRN200では、DBL200と同様に、1回ごとに単発様の変化がみられた。TRN50では、約400ms以降明順応と暗順応の時定数と刺激の比率とが釣り合って、包絡線はほぼ一定した直線となっている。

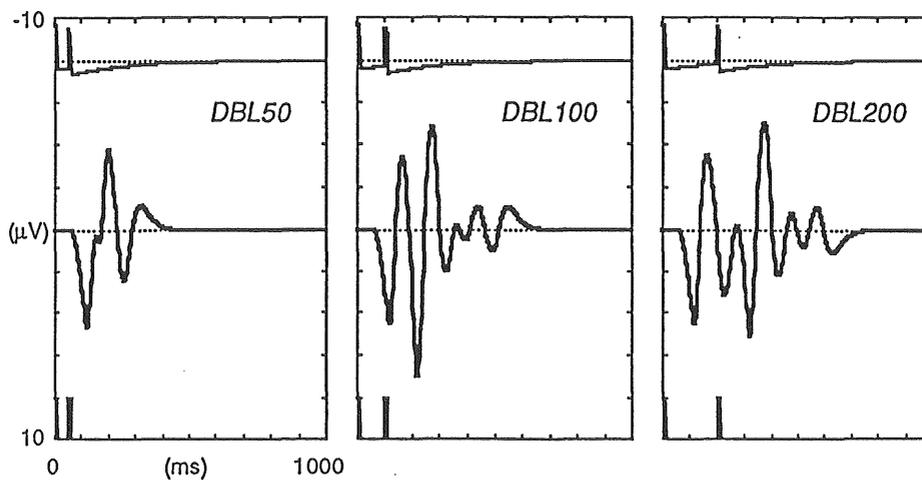


Fig.6.3. ダブル刺激に対するモデル波形

下段の矩形は刺激マーク、中段はモデル波形、上段は刺激値のマーク（基線がゼロレベルであり、そこからの正負の増分が刺激値となる）。

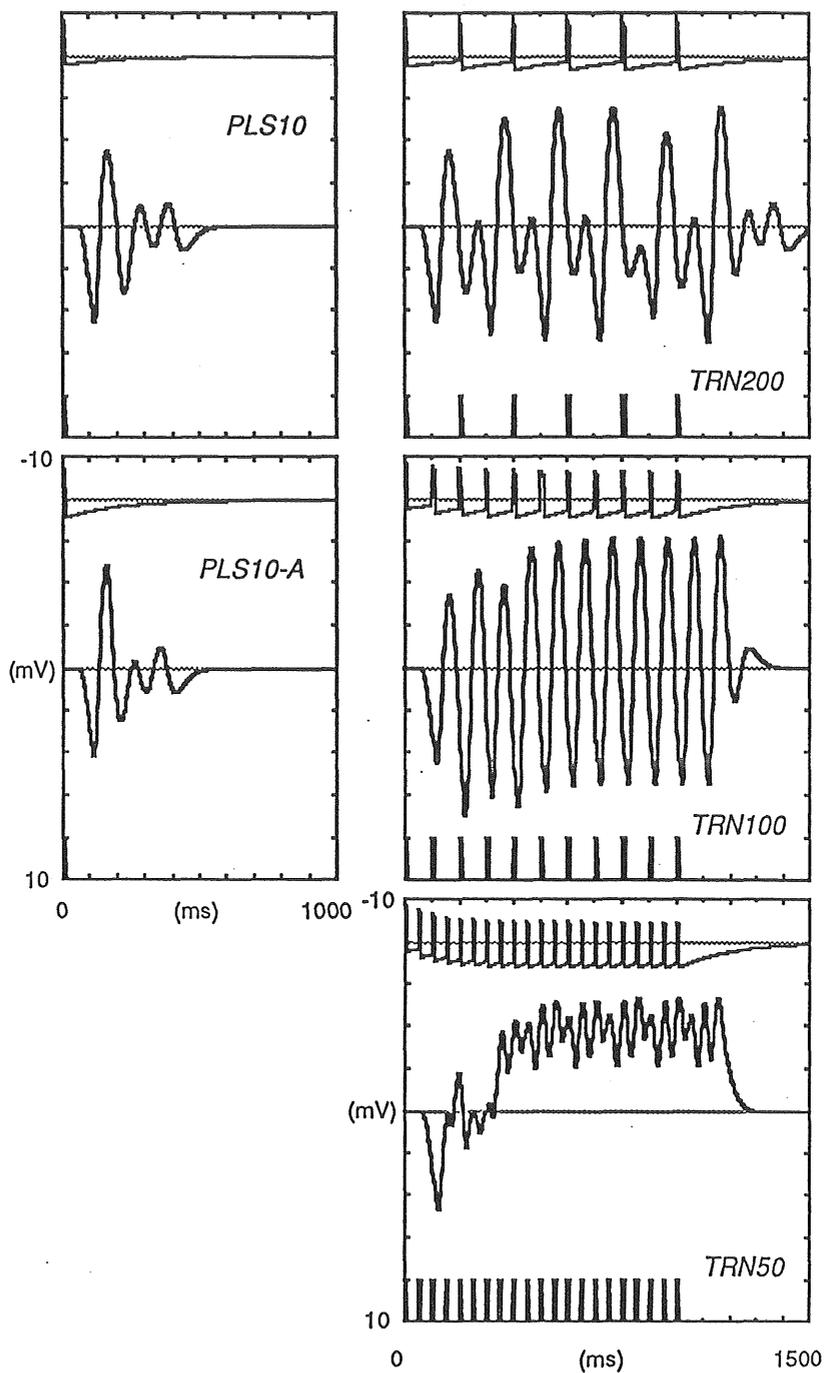


Fig.6.4. トレイン刺激に対するモデル波形

下段の矩形は刺激マーク，中段はモデル波形，上段は刺激値のマーク（基線がゼロレベルであり，そこからの正負の増分が刺激値となる）。PLS10 は10 ms パルス波形 (Fig.6.2 と同じ)，PLS10-A は，明順応が進み暗刺激値が増加した波形。

6.4 考察

(1) モデル波形

オン・オフ、パルス、ダブル、トレイン条件とも原 VEP の基本的な特徴はほぼ再現されていた。このことは、トレイン条件で用いた 10 ms パルスのパラメータを基にしたものであるが、調整を加えれば、各刺激パターンに拡張可能であることを示唆している。全体的に、第 2 刺激以後の振幅が増大する特徴がみられた。この理由として考えられることは、明順応、暗順応の進行過程、つまりそれぞれの時定数の設定の問題、あるいは律動波の追加による強調化も考えられる。全データを一括処理してパラメータ推定することで解決できるであろう。別に、ステップ応答としてのオン・オフのパラメータを用いて検討した結果は、パルスの OFF 成分がかなり大きくなってしまい適合が悪くなる傾向がみられた。

(2) 順応と刺激価

明暗順応の時定数の変化によりその振る舞いが極端に変わるので、種々の試行ののち微調整して、今回は 50 ms と 200 ms とした。実際に閾上刺激で明暗順応の時定数を決定することは困難である。閾上刺激では順応状態がすぐに変化してしまうので、光覚閾（絶対閾）で測定した研究が多いのである（和田・大山・今井, 1969）。物理的に同一刺激であっても、そのシステムの履歴により状態が変化し、刺激価も当然ながら変化する。刺激価の考え方は心理学的に妥

当であり、当然モデルにも含めなければならないが、その組み込み方は今後の大きな課題である。また、今回はコントラストのみを刺激価としたが、面積効果も加えた形で検討する必要がある。

(3) 相互トリガー機構

この機構は、生理学的な根拠をあまり考慮せずに、波形生成の観点から推測的に作り上げたモデルである。しかし、知覚面と波形面からの要請に基づいており、ひとつの考え方として可能性はある。アルファ波などの律動波は、視床の働きが大きく関与している (Andersen & Andersson, 1968) とされているが、Lopes da Silva, van Lierop, Schuruer, & Storm van Leeuwen (1973) は、律動波の起源について検討し、そのコヒーレンスを求めた結果から、視床-皮質よりも皮質-皮質間の結合の強さを強調している。この点は、視覚皮質上の局所的オン・オフ・システムとして考えている相互トリガー機構の存在を支持するものである。加えて、Sato, Kitajima, Mimura, Hirota, Tagawa, & Ochi (1971) も、アルファ波には各所にノッチがみられ、外部刺激による VEP の関与が大きいとしている。したがって、本機構を組み込んだ構造で、全データに適合するパラメータを推定して検討する価値は十分にある。

(4) シミュレーション

これまでは、いわゆる形から入るという手法で、3種の波形パラメータを基本としたモデルであった。今回の検討でも、波形の再現性はほぼ良好であるので、次には、それらの統一と意味づけが重要な課題である。基本的にはポアソン過程を考えているので、多少付帯的調整は必要とするであろうが、刺激価の

みを入力情報として少ないパラメータで構造を考えることが可能であろう。今後、状態変数法などを取り入れて、この全データについて動的システムを構築していくことが課題である。そして、動的システムとしての二元過程モデルが、心理現象の説明と生理学的意味づけの基礎になるであろう。

近年、視覚系について多くのモデルが提出されているが、そのほとんどが空間分析に関するものであり (Rose & Dobson, 1985), 時間領域を取り扱ったものは少ない。また、VEPと脳波の関連性を論じた Başar (1980) の研究もあるが、周波数領域での考察が主であり、実時間的機構を考えたものではない。神経系モデルもかなり詳細なモデル化がなされてきているが (MacGregor, 1987), もう少しマクロな観点からなされたものは少ない。このように、本論文で提出した二元過程モデルのような、時間領域で実時間的にしかもマクロな視点からたてられたモデルはみあたらない。これまで行なってきた接近法は、無理な関連づけをしているとの批判もあろうが、視覚情報処理を単なるフィルター処理として考えるのではなく、能動的なジェネレータとしてとらえていく方向を大切にすべきである。

6.6 まとめ

コンピュータ上で稼働するシミュレータを用いて、オン・オフ、パルス、ダブル、トレインの各刺激パターンに対する二元過程モデルを、動的システムと

して連続系シミュレーションを行なった。基礎としたパラメータはトレインで推定したパルスの値であった。ただし、オフの遅延は順応による位相シフトするような項を加えた。また今回は、大きさを 5° 、コントラストをH(3.4)に固定した。モデルでは、順応過程を考慮した刺激価を導入した。また、オン・オフの相互トリガー機構も導入し、後期律動波の発生も再現した。明暗順応の時定数、律動波の振幅など経験的に決定したパラメータを用いたが、原 VEP 波形の特徴をほぼ再現でき、心理学的にも妥当なモデルであると考えられた。一括処理によるパラメータの再検討が次の課題である。

第7章 結 論

7. 1 全体のまとめと結論

本論文は、視覚誘発電位を表式化した、興奮・抑制過程の「二元過程モデル」を提出し、時間分解能、視覚的持続時間などの視覚特性との関連を検討した。ここでは、受容野の空間構造特性を表現するDOG関数を時間領域に援用した、時間的な特性を表すDOP関数を提案し、これをもとにシミュレーションを行なった。

第1章では、視覚誘発電位の系譜を概観し、本研究にかかわる視覚系の時空間特性、二元過程モデルの源流、および本研究の研究目的と構成について述べた。とくに、システム分析的手法を重視し、できるだけ単純な入出力関係から積み重ねてモデルを構築していくことを強調した。そのために、用いる刺激条件も系統的・段階的に複雑化することとした。

第2章では、光刺激のオン・オフに対する視覚誘発電位（オン・オフ VEP）は、それぞれオンとオフの独立したシステムの興奮・抑制の過程が重畳したものであるという二元過程を基礎とし、抑制は興奮よりも早く発生し長く持続するという仮定を導入してモデルを構成した。後頭中心部（Oz）より得られた視覚誘発電位の典型的な3峰性のデータを分析し、モデル・パラメータ（振幅、遅延、ピーク潜時）の最適値によって2つの過程に分解し、DOP関数で表現した。このモデルの波形は原データの波形とよく適合していた。本モデルを、知

覚現象，特にフリッカー，順向・逆向マスキング，時空間特性との関連で議論し，生理学的観点からも考察した．視覚誘発電位のこの二元過程モデルは，人間の視覚系の時空間特性を検討し説明するのに有効であることを示した．

第3章では，矩形波パルス光に対する視覚誘発電位（パルス VEP）について二元過程モデルを適用し，パルス VEP は基本的なオン・オフ VEP を線形に重畳したものとして表現できることを示した．また，視覚現象を説明するためにこのモデルに基づく「コントラスト・ポテンシャル」を提出した．コントラスト・ポテンシャルは，オン・オフ VEP の興奮性成分を合成した波形である．この電位の振幅は，10 から 100 ms の持続時間で時空間的な加重効果を示し，また 100 ms の提示時間で最大値をとる促進効果がみられた．これらの視覚誘発電位の特性と視覚現象が密接な関連があることを示した．

第4章では，二重光刺激に対する視覚誘発電位（ダブル VEP）に対して，二元過程モデルを適用した．ここでは，興奮・抑制過程のみからなると仮定した簡略化した単一パルス VEP モデルを提出した．合成したモデル波形は原ダブル VEP とよく適合しており，第2 VEP の振幅は刺激間隔にかかわらずほぼ同じであった．単発 VEP の興奮成分にもとづいた二重光の理論弁別曲線は，心理物理的弁別曲線と同様な，刺激の大きさ，コントラストの効果がみられ，ここで用いた簡略化したパルス VEP モデルも，視覚系の解析に有用であることを示した．

第5章では，系列光刺激に対する視覚誘発電位（トレイン VEP）に対して，二元過程モデルを適用した．本モデルでは，明順応によって潜時が減少する後期律動波を追加した．モデル波形は，原 VEP とよく適合しており，また，振幅の初期減少過程や後期増大過程も表現できた．トレイン VEP のコントラ

ト・ポテンシャルは定常 VEP の基本過程であることを示し、またフリッカー知覚などの心理事象と密接な関連をもつことを示した。

第6章では、これまでの知見をもとに、順応過程による刺激価とオン・オフの相互トリガー機構を導入し、二元過程モデルを動的システムとして、インクリメンタルな方法でシミュレーションした。全刺激パターンに対する VEP の特徴を表現することができ、刺激価、相互トリガー機構などの基本的な考え方が心理学的にも妥当であることを示した。また、視覚情報処理を単なるフィルター処理として考えるのではなく、能動的なジェネレーターとしてとらえるべきことを強調した。

以上、視覚誘発電位の二元過程モデルとして、興奮・抑制過程、DOP 関数、コントラスト・ポテンシャル、二重光弁別曲線、刺激価、相互トリガー機構、など、さまざまな概念を導入して論議を進めてきた。そしてこれらの論議の中で、興奮・抑制過程を含むオン・オフ機構がきわめて重要な働きをしているという観点を一貫して強調してきた。このように、本論文で提出した視覚誘発電位二元過程モデルは、視覚特性の基本単位と考えることができ、人間の視覚系のひとつの重要な機構として位置づけることができると考えられる。

7. 2 今後の展望

残された、あるいは意図的に残してきた課題は山積されている。

まず、一連の実験研究で共通に用いたデータは、1名の被験者のみのデータであった。これは、安定性や、比較可能性の上で非常に有用であった。しかし、

本モデルの一般化と精緻化にあたっては、複数の被験者のデータについて検討を加えなければならない。ただし、被験者間のデータを時間的に単純にグラウンド・アベレージする方法は大変危険であることは、時間系列データを扱う上での常識である。そこで、本モデルのようなパラメータを抽出した上で、つまり、個人内の整合性のある構造をとらえた上で、一般化していくことが必要である。

つぎに、本論文では質のよい VEP データを記録することに専念し、知覚実験は行なってこなかった。望まれることは、知覚実験と同時に VEP のデータを記録し、対応関係が緊密となる条件設定を行なうことである。こうした検討によって、興奮・抑制の意味づけをさらに深めることができる。ここでは、VEP の波形から知覚現象との対応を検討するという接近法をとってきた。しかし、人間の興奮・抑制の生理学的な基本性質が解明されることも重要な意義をもつことは明らかであり、今後大いに期待される。

これら残された問題を解決することが、そのまま今後の展望につながるわけであるが、さらに加えるとすれば、このモデルを空間的な機能にも拡張することである。仮現運動やスリット視にみられる空間情報の時間的影響も、DOG, DOPの相互変換過程の研究によって、よりダイナミックに説明できるのではないかと考えている。内的世界でも時空間は渾然一体である。

最後に、本論文で提出した視覚誘発電位二元過程モデルが、視覚研究の発展にわずかでも寄与できることを願うものである。

文 献

- 甘利俊一 1978 神経回路網の数理 産業図書
- Andersen, P. & Andersson, S.A. 1968 *Physiological bases of the alpha rhythm*.
New York: Appleton-Century-Crofts.
- Baker, H.D. 1963 Initial stages of dark and light adaptation. *Journal of the Optical Society of America*, 53, 98-103.
- Bartley, S.H. 1951 The psychophysiology of vision. In S.S.Stevens (Ed.),
Handbook of experimental psychology. New York: Willey, Pp.921-984.
- Başar, E. 1980 *EEG-brain dynamics: relation between EEG and brain evoked potentials*. Amsterdam: Elsevier / North-Holland biomedical press.
- Bidwell, S. 1899 *Curiosities of light and sight*. London: Swann Sonnenschein and Company.
- Boff, K.R., Kaufman, L., & Thomas, J.P. (Eds.) 1986 *Handbook of perception and human performance. Volume I, Sensory processes and perception*. New York: John Wiley and Sons.
- Breitmeyer, B.G., & Ganz, L. 1976 Implications of sustained and transient channels for theories of visual pattern masking, saccadic suppression, and information processing. *Psychological Review*, 83, 1-36.
- Campbell, F.W. & Maffei, L, 1970 Electrophysiological evidence for the existence of orientation and size detectors in the human visual system. *Journal of Physiology*, 207, 635-652.
- Cheatham, P.G., & White, C.T. 1952 Temporal numerosity I. Perceived number as a

- function of flash number and rates. *Journal of Experimental Psychology*, 44, 447-451.
- Cigánek, L. 1961 The EEG response (evoked potential) to light stimulus in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 13, 165-172.
- Cornu, L., & Blanc-Garin, J. 1980 Visual evoked potentials and sensory dimensions. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 48, 43-51.
- Crawford, B.H. 1947 Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. *Proceedings of the Royal Society (London)*, 134, 283-302.
- Dawson, G.D. 1947 Central responses to electrical stimulation of peripheral nerve in man. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 10, 137-140.
- Desmedt, J.E. (Ed.) 1977 *Visual evoked potentials in man: New developments*. Oxford: Clarendon Press.
- Desmedt, J.E. (Ed.) 1990 *Visual evoked potentials*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.
- 畠山一平 1989 生物サイバネティクス 朝倉書店
- 乾 敏郎 1990 視覚情報処理の基礎 サイエンス社
- Ito, M., Sugishita, M., Ito, H., Miyake, S., & Tsuji, K. 1981 A relationship between the Broca-Sulzer effect and visually evoked potentials. *Japanese Psychological Research*, 23, 140-148.
- 岩原信九郎 1981 生理心理学 星和書店
- Jung, R. 1972 Neurophysiological and psychological correlates in vision research. In A.G. Karczmer & J.C. Eccles (Eds.), *Brain and Human Behavior*. Berlin: Springer-Verlag. Pp.209-258.

- 柿崎祐一 1974 現代の心理学1 知覚判断 培風館
- Kaneko, T., & Obonai, T. 1959 Spatio-temporal characteristics of excitation and inhibition in the retino-cerebral field. *Japanese Psychological Research*, 7, 1-5.
- Kaneko, T., Yoshida, S., & Yoshida, T. 1984 Components of visual evoked potentials (VEPs) and simulation of VEP, photic driving and other visual correlates. XXIII International Congress of Psychology, Acapulco, Mexico. Abstracts Vol.2., p.125.
- Kelly, D.H. 1961 Visual responses to time-dependent stimuli. II. Single-channel model of the photic visual system. *Journal of the Optical Society of America*, 51, 747-754.
- Kelly, D.H. 1971 Theory of flicker and transient responses, I. Uniform fields. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 537-546.
- 小池慎一 1988 連続系シミュレーション CQ出版社
- 近藤次郎 1976 数学モデル：現象の数式化 丸善
- 黒岩義之・Celesia, G.G. 1989 視覚誘発電位：その正常波形と臨床応用 西村書店
- Lewis, M.F. 1968 Two-flash threshold as a function of flash luminance and area. *Perception & Psychophysics*, 4, 241-244.
- Lopes da Silva, F.H., van Lierop, T.H.M.T., Schuruer, C.F., & Storm van Leeuwen, W. 1973 Organization of thalamic and cortical alpha rhythms: spectra and coherences. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 35, 627-639.
- MacGregor, R.J. 1987 *Neural and brain modeling*. London: Academic Press.
- 松坂知行 1986 動的システムとシミュレーション 工学図書
- 南 茂夫 1986 科学計測のための波形データ処理 CQ出版社

- Musselwhite, M.J., & Jeffreys, D.A. 1982 Pattern-evoked potentials and Bloch's law. *Vision Research*, 22, 897-903.
- Musselwhite, M.J., & Jeffreys, D.A. 1983 Visual evoked potentials to double-pulse pattern presentation. *Vision Research*, 23, 135-143.
- 西田茂人・中村政俊・柴崎 浩 1986 むだ時間を含む二次要素による閃光誘発電位モデル 医用電子と生体工学, 24, 517-523.
- O'Connor, S.J., Tasman, A., Simon, R.H., & Hale, M.S. 1983 A model referenced method for the identification of evoked potential component wave forms. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 55, 233-237.
- Purcell, D.G., & Stewart, A.L., 1971 The two-flash threshold: An evaluation of critical and visual-persistence hypothesis. *Perception & Psychophysics*, 9, 61-64.
- Ratlif, F. 1961 Inhibitory interaction and the detection and enhancement of contours. In Rosenblith, W.A. (Ed.) *Sensory communication*. Cambridge: MIT Press.
- Ratliff, F., Hartline, H.K., & Miller, W.H. 1963 Spatial and temporal aspects of retinal inhibitory interaction. *Journal of the Optical Society of America*, 53, 110-120.
- Rodieck, R.W. 1965 Quantitative analysis of cat retinal ganglion cell response to visual stimuli. *Vision Research*, 5, 583-601.
- Rose, D., & Dobson, V.G. (Eds.) 1985 *Models of the visual Cortex*. London: John Wiley & Sons.
- Roufs, J.A.J. 1972 Dynamic properties of vision-II. Theoretical relationships between flicker and flash thresholds. *Vision Research*, 12, 279-292.
- Roufs, J.A.J. 1974a Dynamic properties of vision-IV. Thresholds of decremental flashes, incremental flashes and doublets in relation to flicker fusion. *Vision Research*,

14, 831-851.

- Roufs, J.A.J. 1974b Dynamic properties of vision-VI. Stochastic threshold fluctuations and their effect on flash-to-flicker sensitivity ratio. *Vision Research*, 14, 871-888.
- Roufs, J.A.J., & Blommaert, F.J.J. 1981 Temporal impulse and step responses of the human eye obtained psychophysically by means of a drift-correcting perturbation technique. *Vision Research*, 21, 1203-1221.
- Sato, K., Kitajima, H., Mimura, K., Hirota, H., Tagawa, Y., & Ochi, N. 1971 Cerebral visual evoked potentials in relation to EEG. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 30, 123-138.
- 佐藤隆夫 1986 時・空間視の平行モデルと X, Y細胞 心理学評論 29, 312-322.
- Scheerer, E. 1973 Integration, interruption and processing rate in backward masking. I. Review. *Psychologische Forschung*, 36, 71-93.
- Servière, J. Miceli, D., & Galifret, Y. 1977 Electrophysiological correlates of the visual perception of "instantaneous" and "durable". *Vision Research*, 17, 65-69.
- Shibasaki, H., Nakamura, M., & Nishida, S. 1987 Scalp topography of photic evoked potentials. Application of wave form decomposition technique. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 66, 200-204.
- 篠田晴男・吉田倫幸 1989 二重光識別閾の視覚誘発電位による測定 生理心理学と精神生理学 7, 63-71.
- Sperling, G. 1965 Temporal and spatial visual masking: I. Masking by impulse flashes. *Journal of the Optical Society of America*, 55, 541-559.

- Sperling, G., & Sondhi, M.M. 1968 Model for visualluminance discrimination and flicker detection. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1133-1145.
- 田崎京二・大山正・樋渡涓二（編） 1979 視覚情報処理 朝倉書店
- 飛松省三・田島 静・広松 章・加藤元博 1990 多種類パターン刺激による steady-state 型視覚誘発電位の有用性 脳波と筋電図 18, 10-16.
- 和田陽平・大山正・今井省吾（編） 1969 感覚知覚心理学ハンドブック 誠信書房
- Wasserman, G.S. 1966 Brightness enhancement in intermittent light: Variation of luminance and light-dark ratio. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 242-250.
- 八木 寛 1974 神経情報工学 電気書院
- 谷口 清 1989 脳波発生機構と光駆動反応：非線形振動子説を中心に 秋田大学教育学部研究紀要教育科学第40集, 1-17.
- 安田 稔・樋渡涓二 1968 網膜神経回路のモデルと時空間特性 医用電子と生体工学 6, 53-62.
- 吉田 茂 1990a オン・オフ視覚誘発電位の二元過程モデル 心理学研究 61, 322-328.
- 吉田 茂 1990b トレイン光視覚誘発電位の二元過程モデル 生理心理学と精神生理学 8, 71-80.
- 吉田 茂（印刷中）ダブル光視覚誘発電位の二元過程モデル 生理心理学と精神生理学
- Yoshida, S (in press) Dual process model for pulse-light visual evoked potentials. *Japanese Psychological Research*.

- 吉田 茂・篠田伸夫 1988 視覚野直流電位による短期明暗順応の検討 生理心理学と精神生理学 6, 108.
- 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.
- Yoshida, T. 1983 Visually evoked potentials at different rates of flash stimulation and concomitant perceptual changes. *Japanese Psychological Research*, 25, 86-94.
- 吉田倫幸 1986 単発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 8, 9-16.
- 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.
- 吉田倫幸・吉田 茂・金子隆芳 1982 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会大会論文集 p.28.

本研究に関する発表状況

本論文の各章は、準備中のものを含め、以下の5編の学術論文として発表しており、また、それぞれ学術大会で口頭発表を行なっている。

学術論文

- (1) 吉田 茂 1990a オン・オフ視覚誘発電位の二元過程モデル 心理学研究 61, 322-328. (第2章)
- (2) 吉田 茂 1990b トレイン光視覚誘発電位の二元過程モデル 生理心理学と精神心理学 8, 71-80. (第5章)
- (3) Yoshida, S. (in press) Dual process model for pulse-light visual evoked potentials. *Japanese Psychological Research*. (第3章)
- (4) 吉田 茂 (印刷中) ダブル光視覚誘発電位の二元過程モデル 生理心理学と精神心理学 (第4章)
- (5) Yoshida, S. (in preparation) Dual process model of visual evoked potentials : a dynamic system. *Japanese Psychological Research*. (第6章)

口頭発表

- (1) 吉田 茂・篠田伸夫 1989 興奮・抑制過程による視覚誘発電位のモデル化 日本心理学会第53回大会(筑波大学) (第2章)
- (2) 吉田 茂 1990 ステップ VEP の二元過程モデル 日本心理学会第54回大会(東京都立大学) (第3章)
- (3) 吉田 茂 1990 周期光刺激に対する VEP のモデル化 日本生理心理学

会第 8 回大会（愛知学院大学） （第 5 章）

(4) 吉田 茂 1991 VEP 二元過程モデルによる二重光弁別曲線の導出 日本生理心理学会第 9 回大会（筑波大学） （第 4 章）

(5) 吉田 茂 1991 視覚誘発電位の動的シミュレーション 日本心理学会第 54 回大会（東北大学） （第 6 章）

謝 辞

本論文をまとめるにあたりまして、皆様方から多大なる御指導・御援助をいただきました。心より感謝いたします。振り返れば、幾度かの実験室作りに明け暮れた歳月でもありました。ここに、ようやくにして、その果実を出荷できる運びとなりましたことに、深い感慨を覚えます。

心理学系教授・金子隆芳先生には、学生時代から現在にいたるまで親身の御指導をいただき、さらに日本心理学会会長の要職・御多忙の中、本論文の主査として格段の御高配をいただきました。本論文のモデルは、先生の感応理論に原型をみるものであります。故・岩原信九郎先生（梅香院信譽育成居士）には、学生時代に生理心理学の道へ導いていただき、エネルギッシュな御指導のもとに研究を進めることができました。製品科学研究所部長・永村寧一先生には、大陸的人間味あふれる辛抱強い御指導をいただきました。心理学研究科長・岩崎庸男先生には、多方面にわたる温かい御配慮と御指導をいただきました。

心理学系の諸先生方また諸先輩方からも多くの御指導をいただき、体育科学系におきましても諸先生方の温かい御理解をいただきました。とくに市村操一教授には論文をまとめるための環境と激励とをいただきました。同僚・後輩諸君との切磋琢磨も大きな力となっております。

あらためて、皆様方から賜りました学恩、御芳情に厚く御礼申し上げます。

御名をいただきて

梅が香をたづね四十路を永らへば

けふつねならぬ風の芳し