

奥行き知覚時の視覚誘発電位の評価と検討

宮脇 陽一、前田太郎、舘 暉

東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻

〒113東京都文京区本郷7-3-1

Tel : 03-3812-2111 (ext.6917)

Fax : 03-5800-5188

E-mail : miyawaki@star.t.u-tokyo.ac.jp

あらまし

人工現実感等の感覚提示システムにおける臨場感評価の基礎的検証実験として立体視時の視覚誘発電位に着目した。従来までの研究で視差刺激を提示した際に後頭葉に潜時約200msecの陰性波が発生することが確認されてはいたが、比較的狭い視野での実験がほとんどであった。そこで今回我々は約40°の広視野角での視差刺激提示実験および誘発電位の測定を行ったところ、従来には見られなかった潜時180msec及び280msecの2峰性の陰性波を確認した。この成分の意味を検討するため2、3の検証実験を行ったところ後期成分のほうが認知に関係した成分であることが示唆された。またその渡形を解析した結果、視差抽出に対する中心視の優位性が示唆された。

キーワード 視覚誘発電位、立体視、広視野、2峰性陰性電位、人工現実感

Study of Visual Evoked Potentials with Depth Perception

Yoichi Miyawaki, Taro Maeda, Susumu Tachi

Department of Mathematical Engineering and Information Physics,

Faculty of Engineering, University of Tokyo

Hongo 7-3-1, Bunkyo-ku, Tokyo, 113, Japan

Tel : 03-3812-2111 (ext.6917)

Fax : 03-5800-5188

E-mail : miyawaki@star.t.u-tokyo.ac.jp

Abstract

We regard measurement of visual evoked potentials with depth perception as a fundamental experiment to estimate reality on a visual display of a virtual reality system. It has been known that the peak latency of the negative potentials in occipital region of human scalp evoked by stimuli including disparity was 200msec or so. Generally these experiments were carried out on the condition that stimuli were displayed in small visual field. Then we made the visual field wide as much as 40 degree and found out the two negative peaks which latency was 180msec and 280msec or so. We made some experiments to identify the main factor of these peaks, so it was estimated that the latter peak was mainly related to depth and shape perception. According to our analyses of the latter one, it resulted that foveal vision is superior to peripheral on detecting binocular disparity.

key words Visual evoked potential, Stereopsis, Wide visual field, Two negative peaks, Virtual Reality

1 はじめに

人工現実感等の感覚提示システムにおいてはそのシステムが実世界とみまがうばかりの臨場感を生成している必要があり、そのような意味において立体3次元情報の提示及び認知が不可欠である。しかしその臨場感（立体情報の認知度）といったものを評価する手法としては体験者の内観評価にたよる面が多く、そのような評価法は必ずしも客観的とはいえない。

そのような内観評価、すなわち知覚状態や思考・感情といったものを、その現象に特徴的な生理学的反応を計測することにより推定しようとする試みがいくつか行なわれてきているが、我々もこのような知覚状態の定量評価の基礎的検証実験として Random-dot Stereogram（以下 RDS）を用いた立体図形知覚時の視覚誘発電位（VEP）計測に着目した。

RDSを用いた誘発電位計測の結果についてはここ数年多数報告されており [2][3][4][5][6]、いずれも潜伏約 200msec 前後の 1 峰性の後頭葉陰性波を対象に解析されている。しかし CRT を用いた比較的狭い視野での提示実験が多く、またその発生要因の同定については詳細な議論はなされておらず立体情報の認知過程自身を反映しているかどうかはあいまいであった。

ところで我々のグループで以前行なわれた HMD（Head-Mounted Display）による指標追従実験によると、Display の視野を大きくとることにより追従特性の Gain は増加するが Delay も同時に増加するという結果が得られており、これは情報量の増加に伴う視覚処理過程での Delay の増加が原因なのではないかと考えられている [7]。このアナロジーで考えるならば広視野条件では知覚過程に対する高次レベルでの誘発反応のみに Delay を生じさせ波形上での分離を実現できる可能性がある。また両眼視差の弁別能力は視野が 45° より小さくなると低下することが知られており、立体提示においては広視野角を確保するのが望ましい [8]。

そこで今回視角にして 40° 付近まで提示視野を拡大した上で RDS 刺激による誘発電位計測実験を行ないその成分同定を試みたところ、従来には見られなかった 2 峰性の反応が確認されたのでここに報告する。

2 実験 A 立体矩形提示実験

2.1 刺激と提示方法

赤緑のアナグリフ法により作製した Static RDS を使用した。最初に視差図形のないもの（Correlogram、以下 crg と呼ぶ）を 100msec 提示し、次に視角にして正中面上から偏位 0（以下 rect_0）、右 3°（rect_r3）、右 6°（rect_r6）、左 3°（rect_l3）、左 6°（rect_l6）の位置に視差をつけた矩形刺激があるものと比較のため矩形刺激のないものの合計 6 種類の中からランダムに 1 種

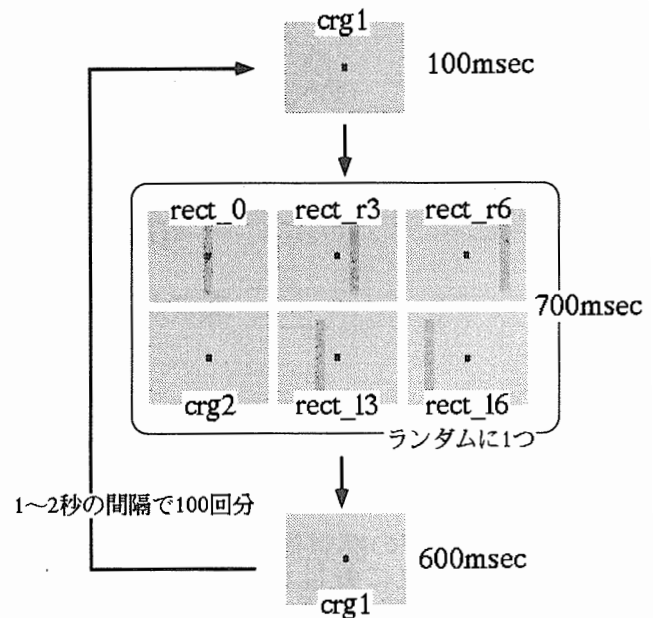


図 1: 刺激提示方法概念図

類を選び 700msec 提示し、もう一度 crg を 600msec 提示した。画面中心には正方形の注視点を設け、各刺激の背景パターンは全て変えておいた（ただし最初と最後の crg は同じパターン）。これを 1 セットとし 1~2 秒のランダムインターバルにおいて各刺激に対して 25 セット連続に提示した。3 分程度の休憩をはさみこれを 4 回行ない、各刺激に対して合計 100 セットの提示を行なった（図 1）。

画面は 37° × 30°、矩形刺激の大きさは 2.4° × 25°、視差量は約 30arcmin、注視点の大きさは 1.2° × 1.2°、打点密度は約 50% である。

2.2 実験環境

被験者

両眼視機能正常な視力矯正後の成人男子 4 名、成人女子 2 名の計 6 名にて測定し、さらにそのうち顕著な反応がみられた被験者（男子 1 名、女子 1 名）に対してはさらにもう 1 回ずつ測定した。

実験装置

実験装置の概略図を図 2 に示す。被験者にはシールドルームの中に入って椅子に座り約 100cm の高さから手前 100cm の距離におかれたスクリーンに提示される画像を赤緑メガネをかけて見てもらった。頭部は顎台を用いて固定した。シールドルームの外に床面より約 160cm の高さにおかれた液晶プロジェクタ（SHARP XV-E500）で金網格子つきガラス窓をとおして画像を映

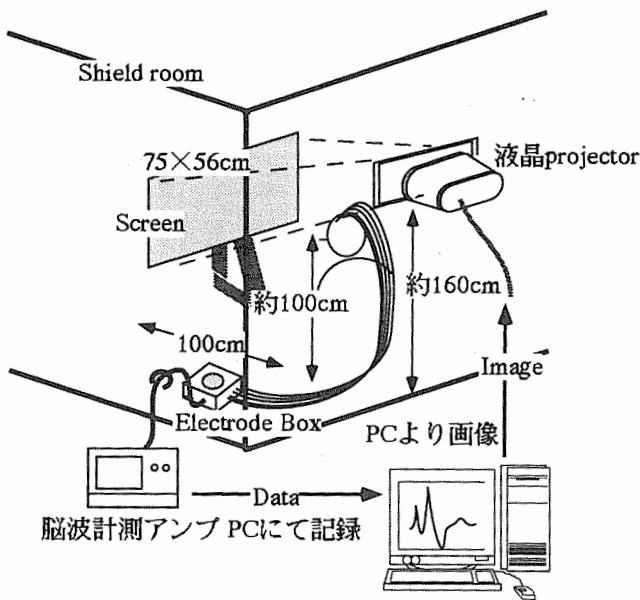


図 2: 実験装置概略図

し出した。

計測及び記録方法

電極は国際 10-20 法に従って頭皮上に 19ch、及び眼球運動モニタとして両下まぶたに各 1ch ずつ装着した。頭皮前処理としてアルコールで拭いた後、角質除去用クリームでこすり専用ペーストをつけインピーダンスを 7 ~ 20kΩ になるようにした。不関電極は両耳たぶ、接地電極は鼻がしらとし単極誘導法を用いた。

計測には多チャンネル生体アンプ (日本光電 MME-3132) を使い、増幅率を 5μV/V、総合周波数帯は 0.53-100Hz にとった。脳波計からのアナログ出力を一旦サンプル・ホールドボードにいれ A/D ボードによりサンプリング周波数 1kHz で同時サンプリングした。ランダムに選ばれた各刺激に対してそれぞれ系列別にハードディスクに保存し、実験後に 100 回分のデータで加算平均を行なった。計測及び画像提示は IBM PC/AT 互換機 (Micron) 1 台で行った。

2.3 実験結果

図 3 に rect_0 と crg の代表的トポグラフィを示す。図 3 から分かるように視差刺激のある rect_0 では crg に比べて後頭葉に有意な陰性帯電が見られる。この時の代表的波形が図 4 である。ここでは rect_0、rect_r3、crg における左右後頭葉 O1、O2 のみの信号をここでは示す。縦軸は振幅で base to base は 8μV で上が陰性となっている。

これを見ると分かるように O1、O2 において刺激

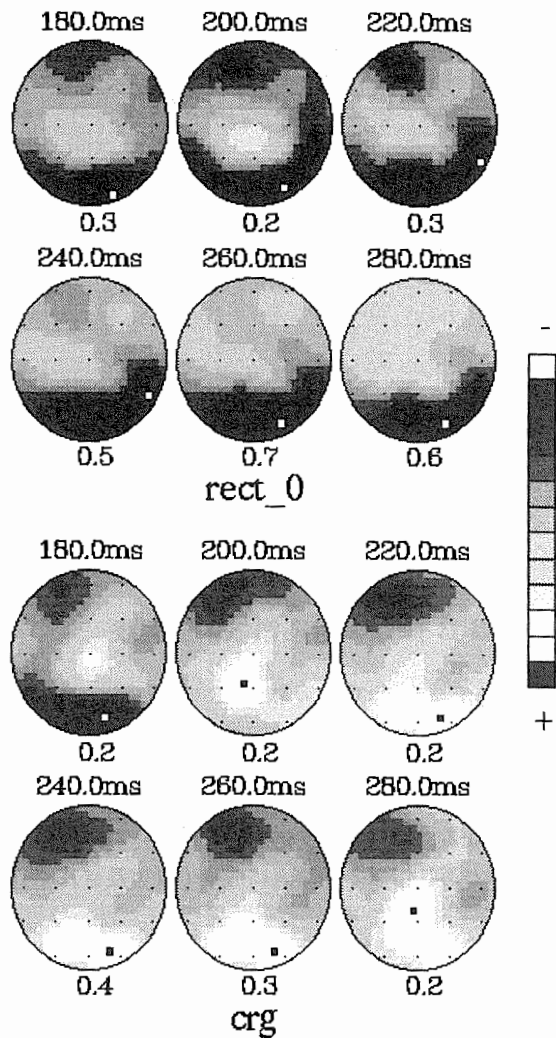


図 3: 代表的トポグラフィ

後潜時約 180msec (以下 N180) と約 280msec (以下 N280) に 2 つの陰性ピークが現れている。先行成分である N180 は立体矩形の提示されていない crg にも矩形刺激と同じように現れているが、それにつづく N280 は偏位に反比例して振幅が小さくなり矩形刺激のない crg で最も小さくなるという傾向を示した。つまり N180 はすべての刺激に対して共通的に誘発される成分であり、N280 は刺激に依存して (特に立体情報の性質に依存して) 誘発される成分ではないかということが推測される。

しかし従来視差刺激を与えることによって変化するとされていた反応は刺激後潜時約 200msec 前後のものであり、今回の反応はその潜時帯より数 10msec 遅い。そこでこの N180 と N280 の誘発原因を同定するために次の 2 つの実験を行なった。

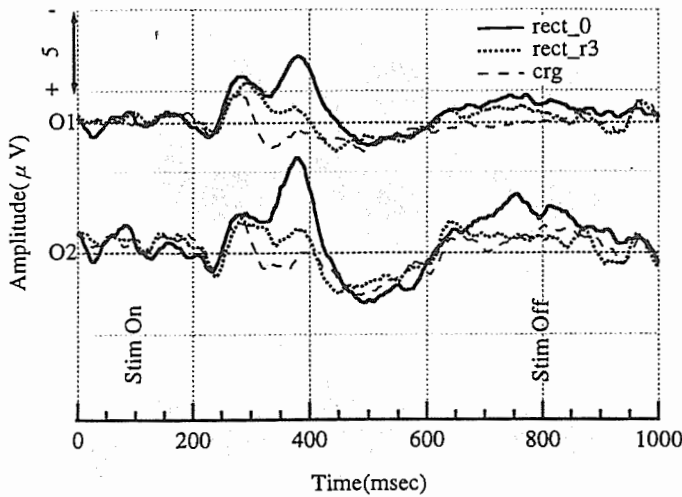


図 4: 代表的波形例

3 実験 B 両眼非対応領域刺激実験

実験 A や従来までの実験方法 [2][3][4][5] では RDS による刺激を提示することで両眼視差情報のみ与えるという過程のもとでの実験であったが、融合後の段階も考慮に入れるならある種の形状情報も同時に提示されることになる。数種類の図形が提示された実験もあるが波形自身と形状情報との関連については言及されていない [6]。

そこで RDS の特性を活かしつつこの形状情報のみを提示可能な刺激を今回開発しその誘発反応より形状に関する影響を見積り、実験 A の結果と比較してみることにした。

3.1 刺激と提示方法

RDS においては視差情報による対応点問題を解くことによって初めて形状が知覚されるため原理的に先の要請は矛盾しているのであるが、形状情報 \approx エッジ情報と解釈することにし、このエッジすなわち両眼視における非対応領域のみを表した図形を用いることにした。Nakayama らは両眼非対応領域のみでも occlusion の制約を満たすように奥行き知覚がなされる現象を報告しており [9]、今回のような非対応領域のみの提示により実際には視差はないが仮想的な奥行きで矩形領域があるといった知覚がなされる可能性がある。実際には実験 A の矩形刺激の両眼非対応部分のみを残し単眼手がかりが全くない視差のない形状を RDS で作成したのだが、見えてはあたかもスライドガラスのようなものがスクリーンにはりついているように知覚された。

このような刺激に実験 A と同様に 5 種類の偏位をつけたものを新たに用意し、実験 A と同様の手法で提示した (図 5)。

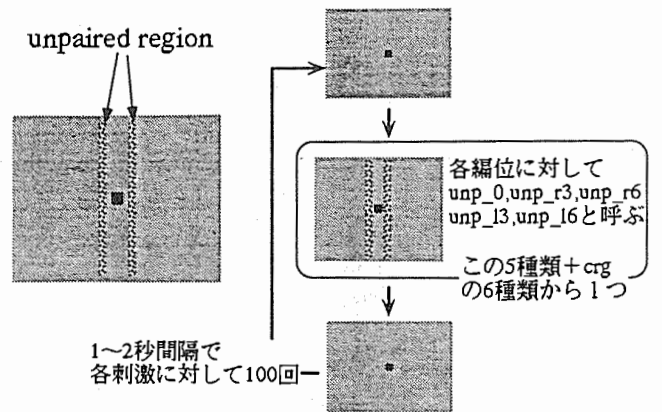


図 5: 非対応領域の提示

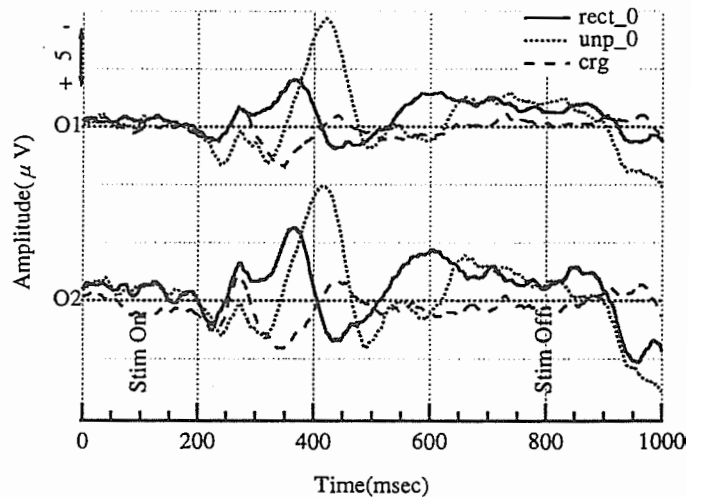


図 6: 代表的波形例 (非対応と矩形刺激の比較)

3.2 実験環境

実験 A と同様。ただし被験者は成人男子 2 名、成人女子 1 名の計 3 名で、そのうち 2 名に対してはさらに 1 回ずつ実験を行なった。

3.3 実験結果

図 6 に代表例を示す。基線間隔は $15\mu V$ 、その他は図 4 と同様である。この図では同一被験者の $rect_0$ 、 unp_0 、 crg の O1、O2 についてのみを比較する。図 6 より非対応刺激の場合も $rect_0$ の場合と同様に 2 峰性反応が確認された。先行成分はほぼ $rect_0$ の N180 と同じであるが、後ろの成分は $rect_0$ の N280 より数 10 msec おくれてピークをむかえている。

その O1、O2 における N180 と N280 の頂点潜時を非対応刺激と矩形刺激の各偏位についてプロットしたものを図 7 に示す。白ぬきは被験者ごとの値で黒ぬりは

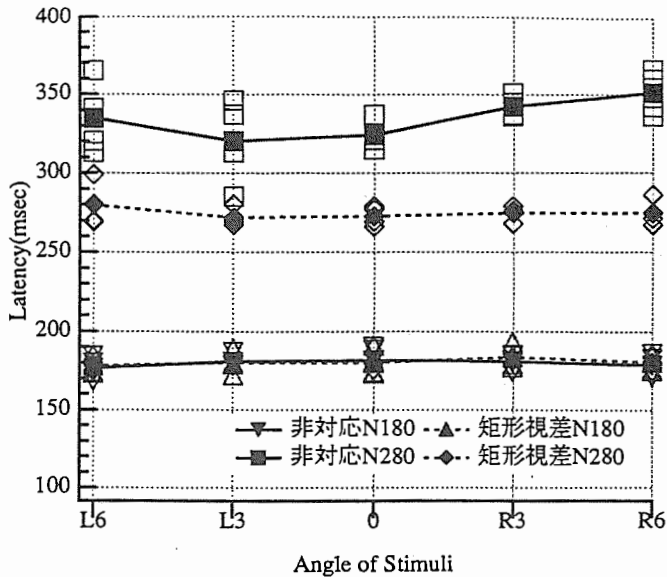


図 7: 刺激種と 2 峰性波の頂点潜時

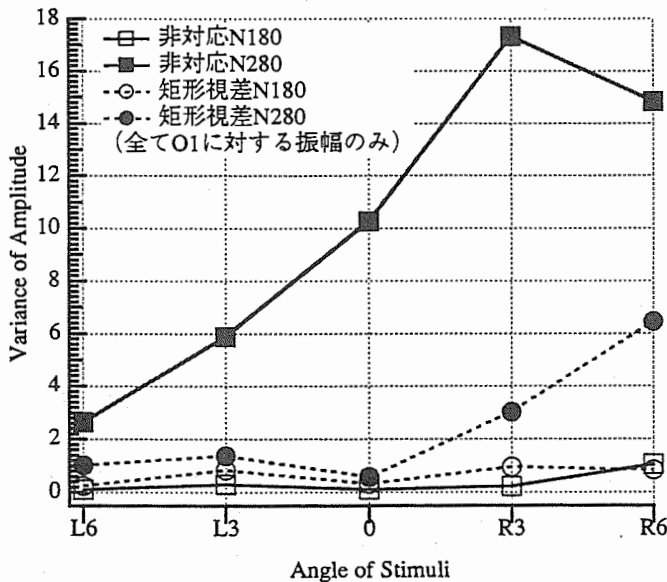


図 8: 刺激種と 2 峰性波の頂点振幅の分散

その平均値である。図 7 から明らかなように N180 は矩形、非対応に関わらず刺激後潜時はほぼ一定であるが、N280 は非対応の方が一律に数 10msec 遅れている。次に O1 (左後頭葉) での N180 と N280 の頂点振幅の分散を非対応刺激と矩形刺激の各偏位についてプロットしたものを図 8 に示す。図 8 をみると N180 の振幅分散は矩形、非対応ともにほぼ 0 で一定している。しかし N280 の方はともに右視野刺激の場合に分散が上昇する傾向があり、かつ常に非対応刺激の場合の方が大きい。

矩形刺激の場合は立体図形として確実に認識されたのであるが、この非対応刺激の場合は刺激が出たことを認識できない場合がまれにあることが予備実験で確認されており知覚度に個人差が認められた。またこの刺激図形は実世界にはあり得ない幾何的構造であり被験者の視覚

体験に対し矛盾を起こしている可能性が否めない。したがってこの刺激により純粋に形状情報のみの要素を定量的に見積もることは難しい。

しかし N180 はこの場合でも潜時は一定しており振幅の分散も少ない。つまり形状等の比較的高次レベルからの影響はなく、初期視覚過程での反応である可能性が示唆される。逆に N280 は刺激種によって有意な差が見られた。潜時の遅れ、刺激対側後頭葉での振幅分散の大きさ等から考えても前述のような幾何的矛盾の影響があるならば比較的高次レベルでの反応が少なからず関与している可能性があると言えよう。

4 実験 C 広視野視差刺激実験

実験 A の刺激は視差と形状の要素から構成されていると考えられるため、今度は実験 B とは逆に形状情報は与えず視差のみが提示される条件すなわち視野内全てにわたって視差をつけた刺激を用いて実験をおこなった。

4.1 刺激と提示方法

矩形刺激と同じだけの視差 30arcmin を画面全体に一樣につけた画面 (以下 srg)、及び視差量 0、12、30、36arcmin を画面全体にランダムにつけいくつかの面が重なったように見える画面 (以下 ucg) を 2 つ新たに作成し、この 3 つと rect.0、crg の合計 5 つを実験 A と同様な手法で提示した (図 9)。

4.2 実験環境

実験 A と同様。ただし被験者数成人男子 1 名、成人女子 1 名の計 2 名に 1 回ずつ行なった。

4.3 実験結果

図 10 に代表的な波形例を示す。基線間隔は $12\mu\text{V}$ でその他は実験 A、B と同様。ここでも O1、O2 にのみ

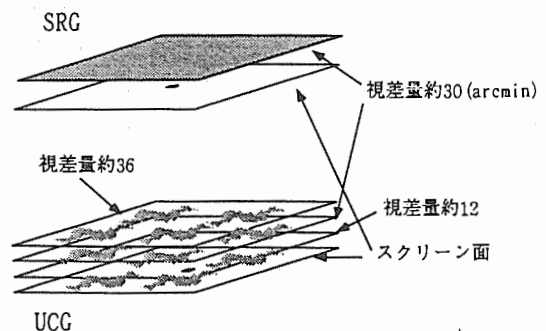


図 9: 広視野刺激提示

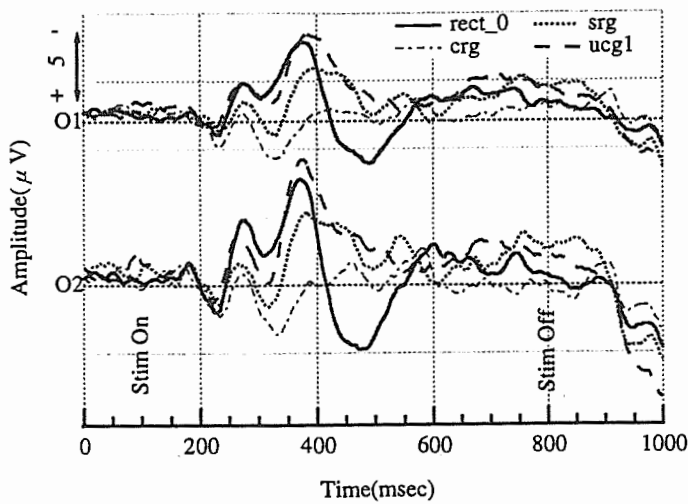


図 10: 代表的波形例 (広視野刺激)

刺激種	rect_0	srg	ucg	crg
視差分布	○	○	△	×
知覚度	○	○	△	○
形状情報	○	×	△	×

表 1: 各刺激の特征的性質

限定して解析する。図 10よりこの場合においてもやはり 2 峰性波が観測されており、N280 では rect_0、ucg、srg、crg の順で振幅が小さくなるという現象がみられた。次にこの各刺激の頂点振幅とその分散を N180 と N280 に対してとったものを図 11 に示す。ここでの ucg1 はつけた視差量 0、12、30 arcmin のもの、ucg2 は 0、12、30、36 arcmin のものである。また表 1 に各図形の特征的性質を示す。

図 11、及び表 1 より N280 の振幅には形状情報が、その分散には知覚度が影響しているように推測される。逆に N180 の振幅の分布は N280 の半分程度の範囲にしか拡がっておらず分散も全てにわたってほぼ一定で小さい。つまり N180 は見え方等に依存しない成分であり N280 は形状、立体感等に大きく影響されている成分だと考える。

5 考察

5.1 N180 及び N280 について

今回の実験では N180 は (少なくとも RDS を用いた刺激においては) 刺激の種類によらず一定の潜時であらわれ、また振幅についても刺激間において絶対値の多少の傾向は認められるが頂点振幅の分散はどの刺激においても小さい。対して N280 は刺激の種類によっては潜時

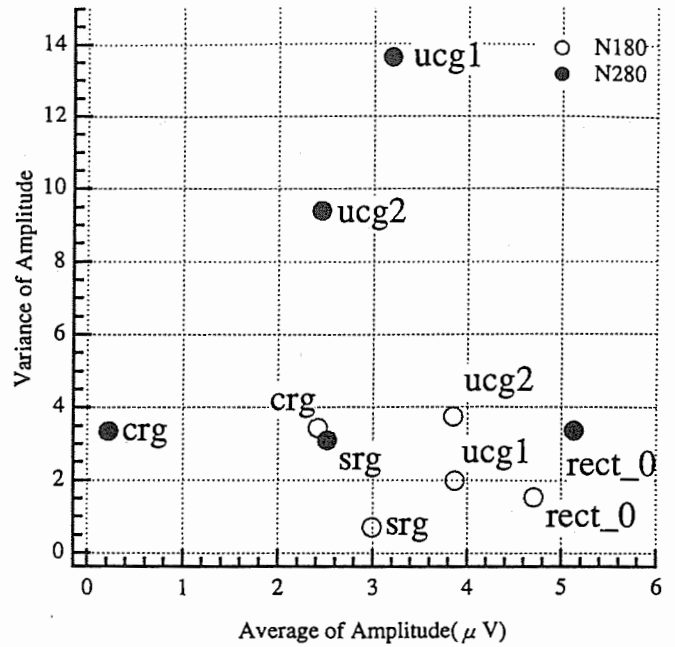


図 11: 2 峰性波の頂点振幅平均とその分散

に変化が見られ、振幅も絶対値、分散ともに刺激種に大きく影響されていた。

これらの結果より N180 は全ての刺激の変化における共通的な要素に対する反応、つまり認知等には関係ない初期段階での刺激の特徴抽出過程における成分であり、N280 は刺激の性質 (視差・形状の有無) に対する反応、つまり形状認知といったような高次レベルでの反応に関与しているように思われる。

しかし誘発電位の発生機序や視覚野の生理学的構造等から考えると、今回主に解析の対象とした O1、O2 で得られる陰性電位は認知等に関係している高次レベルの複雑細胞の発火をとらえているとは考えにくく、むしろ V1 等の初期視覚野 (例えば両眼視差抽出細胞等) における反応が原因と考えた方が妥当であり、N280 が直接高次の反応をとらえているとはいえない。

ここで実験 C における srg 刺激と rect_0 に対する反応の類似性に注目してみる。srg 刺激の視差は均一に 30 arcmin であり rect_0 の場合と同じであり、また見えの安定度に関しても両方とも安定に知覚されるにもかかわらず、その誘発電位の振幅は srg の方が小さい。つまりここで関係しているのは視差刺激の絶対量や立体感の安定度ではなく視差刺激の背景に対する相対的占有率、つまり背景に対する特徴的刺激性の問題であり、このような観点でみると両刺激は特徴的な領域のない全体的刺激ということになる。このような「図」と「地」の分離や形状情報の処理といったようなマクロなスケールでの刺激間での違いは V4 等の高次視覚野で処理されているといわれている。

つまり N280 の立体情報、形状情報に依存した変化はダイレクトに高次レベルから信号をとらえているというより、高次反応が何らかの形で O1、O2 の VEP でと

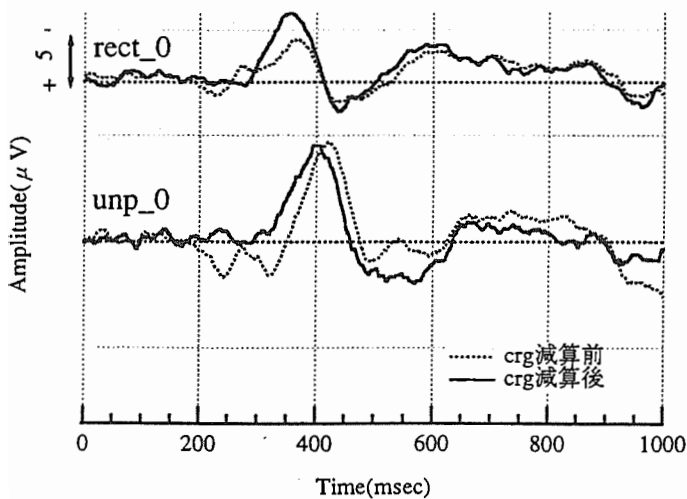


図 12: crg 減算後の波形例

らえることが可能なほどの低次レベルまでフィードバックされ影響を及ぼしていると考えらるべきであろう。

ではなぜこのような2峰性への分離が起こったのであろうか。RDS 視差刺激に対し1峰性反応が得られた従来の実験条件と今回の我々の実験条件で大きく異なるパラメータは視野の大きさのみである。また冒頭でも述べたが我々のグループで以前行なわれたHMDによる指標追従実験で視覚的提示情報量の増加が追従特性のDelayを生じさせていると報告されている[7]。つまり今回の広視野の場合は従来の狭い視野の場合より処理すべき領域が大きいため図形認識に際してより広い受容野をもった細胞が必要になりさらに高次レベルでの処理が必要とされた、もしくは広視野、狭視野とも同程度の視覚野レベルで全体的図形認識の処理は行なわれているが処理すべき情報量が多く処理に時間がかかる、などの理由により広視野では高次レベルの反応にはDelayが生じ2峰性分離が起こったが従来の狭視野ではこの差が顕著でなく見かけ上1峰性になっていたという仮説があげられる。しかし现阶段では広視野の1条件でしか実験していないため2峰性波と視野の関係について断定はできない。

5.2 奥行き知覚に対する反応の抽出

前述のように我々の目的は立体知覚の定量的指標を得ることであるので刺激パラメータによって変化をうける成分の同定及び解析が必要とされる。そこで今回の一連の実験において刺激に大きく影響されたN280のみを抽出し解析するためにcrg→crgの反応を視差刺激から減算しN280以外の影響を除去することを試みた。図12にrect_0とunp_0の代表例を示す。基線間隔は15μVである。図12から分かるようにN180のピークが減算によって除去されN280だけが残っている。他

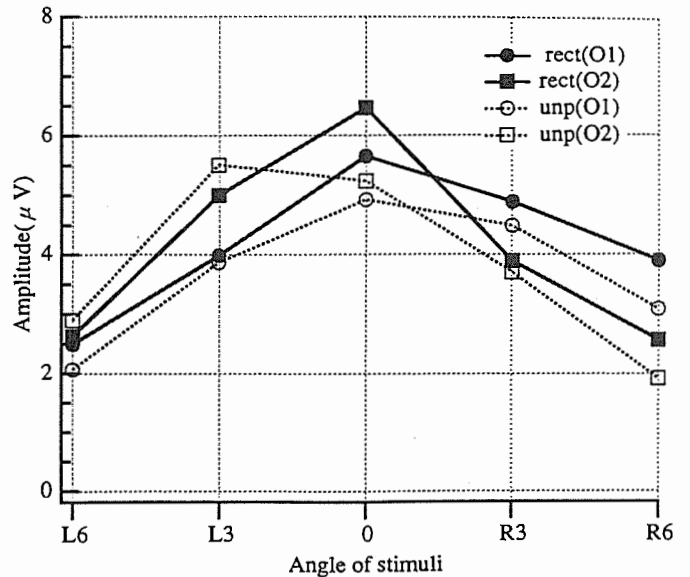


図 13: N280 の振幅値の偏位依存性

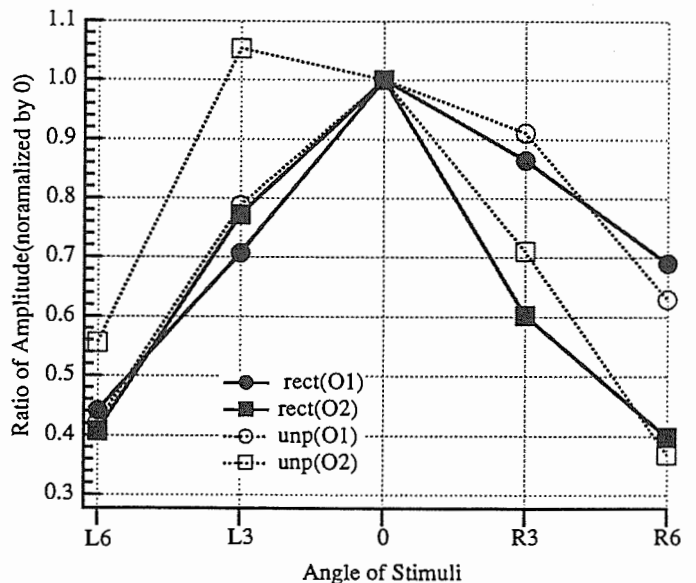


図 14: N280 の振幅値の偏位依存性 (規格化後)

の偏位においても同様の効果がみられ、N280成分のみを抽出できたといえよう。

5.3 偏位度と振幅の関係

この減算波形をもとにしてO1、O2の誘発電位振幅を偏位度についてプロットしたものを図13に示す。図中の値は被験者全員の平均値である。

図13をみると振幅は視野中心で最大になり、同偏位では対側刺激の方が同側刺激よりも大きく、また同チャンネルでは対側刺激の方が同側刺激よりも大きい。これは中島らの結果[2]を支持するものであり矩形刺激、非対応刺激の両方で同様に見られた。

ところで視野の構造は視野垂直正中線が脳半球外

側表面の月状溝に近い部分に投射され後頭部さらに半球内側面によるほど側頭側の視野の受容野となるといわれている。また網膜上の単位視角あたりの視覚皮質表面での長さを表す皮質拡大率も中心窩からはなれるに従って減少するといわれている。今回解析の対象としたO1、O2電極の位置は月状溝にほど近い部位であるため、このような大脳皮質の構造的影響により視野中心でVEP振幅が大きく周辺にいくにしたがって小さくなるというのはある意味当然であり、この結果からだけでは視差刺激の位置とVEP振幅の関係について説明しきれない。

ここでこの振幅値をrect_0もしくはunp_0の値で規格化した図14を見てみる。振幅値の傾向としては図13と大差ないのであるがその減少率はrect_0のほうがunp_0より大きい。この事実においては前述のような大脳皮質の構造的影響は全く同じはずなので、皮質構造以上に中心視で優位に反応するファクターがrect_0の方には存在しているはずと考えられる。この両刺激間での違いは前述のとおり矩形領域内に一定の視差が含まれているかどうかだけである。つまり矩形領域内に一定の視差がrichに含まれている場合にその視差領域が中心から偏位する方が矩形領域のみで内部に実際に検知可能な視差刺激を持たないものが偏位するより影響が大きいということである。確かにunp_0に対するN280の振幅はrect_0より個人差による分散が大きいため現段階では一概にはいえないが、VEP反応にあらわれうるような形で中心視の視差抽出に対する優位性をとらえることができたと考えられることができるだろう。

6 まとめ

今回は40°程度の大きな視野角でRDSを提示することにより従来には報告されてなかったN180及びN280という2峰性の陰性波を確認し、その2峰性波を比較的初期の反応成分と立体・形状認知に関わる成分という観点から切り分けた。さらにN180成分を原波形から除去した減算処理後のN280の偏位依存性より視差抽出における中心視の優位性について示した。

今後はこの2峰性波の発生機序についての確たる議論を進める上でいくつかの視野条件のもとでN280の時間軸上の挙動を調べ、この発生機序のモデル化を進める必要がある。

参考文献

- [1] 奥村 政彦、小林 和恵、鈴木 隆文、前田 太郎、館 暲、視差刺激に関するVEPの計測並びに考察、第11回生体・生理工学シンポジウム論文集
- [2] 中島 理子、二唐 東朔、視差刺激に対する網膜重複部からの視覚誘発電位、日眼会誌、Vol.98、No.3、pp298-305(1994)
- [3] 小口 芳久、濱田 恒一、河原 哲夫、視覚誘発電位による立体視の研究、日眼会誌、Vol.89、No.3、pp470-475(1985)
- [4] 濱田 恒一、小口 芳久、河原 哲夫、Static random-dot stereogramによる立体視刺激VEPの研究 - 刺激条件に関する検討 -、日眼会誌、Vol.89、No.4、pp582-588
- [5] 濱田 恒一、小口 芳久、河原 哲夫、各種刺激条件による立体視VEPの反応性に関する研究 - 刺激提示方式、刺激変換時間、刺激提示時間に関する検討 -、日眼会誌、Vol.89、No.9、pp1059-1063
- [6] 飯塚 和彦、静的random dot stereogramの打点密度の増減に対するVEP振幅と深径知覚、日眼会誌、Vol.96、No.8、pp985-992
- [7] 前田 太郎、荒井 裕彦、館 暲、頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価、日本ロボット学会誌、Vol.10、No.5、pp655-665
- [8] 畑田 豊彦、両眼視機能と眼鏡、眼鏡の科学、Vol.1、No.1、pp27-65(1977)
- [9] Nakayama,K. and Shimojo,S. Da Vinci Stereopsis: Depth and Subjective Occluding Contours from Unpaired Image Points, Vision Res.,Vol.30,pp1811-1825
- [10] 安達 恵美子、千葉 次郎、視野とVEP、眼科Mook、14、眼と電気生理、金原出版、東京、pp182-189、1980