

## 視差刺激に対する網膜重複部からの視覚誘発電位

中島 理子<sup>1)</sup>, 二唐 東朔<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>岩手医科大学眼科学教室, <sup>2)</sup>弘前大学医療短期大学部作業療法学科生理学研究室

### 要 約

同側の大脳半球と対側の半球に投射する網膜の神経節細胞が混在する部位(網膜重複部, **nasotemporal overlap**)に短冊状 **random dot** の有視差刺激と無視差刺激を与えたとき, 両半球に誘発される視覚誘発電位を比較し, 重複部の深径知覚への役割を検討した. 短冊は, 右眼の中心窩の中心とその両側に3°あるいは6°偏位した部位に与えられた. 有視差短冊 (**stereogram**) に対する陰性波は  $O_1$  (左後頭葉) と  $O_2$  (右後頭葉) に局在し, その振幅は無視差短冊 (**correlogram**) のそれより大きかった. 右眼の鼻側重複部に与えた有視差刺激に対する  $O_1$  の視覚誘発電位の振幅は  $O_2$  のそれより高値であり, この関係

は耳側重複部では逆転した. この  $O_1$  と  $O_2$  での振幅差は, 網膜偏位3°では統計学的に有意であった. 以上の結果は, 視覚誘発電位を指標としたヒトの網膜重複部の幅は視角4°まで広がっており, 重複部からの神経活動は視野内の視差抽出細胞を興奮させることを証明するものであり, 重複部は固視点の前後面の深径知覚成立を担っていることを示唆した. (日眼会誌 98:298-305, 1994)

キーワード: 網膜重複部, 視差刺激, 視覚誘発電位, **Random dot**, 深径知覚

## VEPs Induced by Binocular Disparity Stimulus of the Retinal Nasotemporal Overlap

Satoko Nakajima<sup>1)</sup> and Tosaku Nikara<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Iwate Medical University School of Medicine

<sup>2)</sup>Laboratory of Physiology, Department of Occupational Therapeutics, School of Allied Medical Sciences, Hirosaki University

### Abstract

The human visual evoked potentials (VEPs) elicited by retinal disparity stimulation of the nasotemporal overlap area of the fundus, where ipsilaterally and contralaterally projecting retinal ganglion cells intermingle, were recorded bilaterally at the cortical hemispheres, and the contribution of the nasotemporal overlap to the mechanism of stereopsis was studied. The stimulus was a slit of a stereogram or correlogram applied to the center of the fovea of the right eye, or 3° or 6° nasal or temporal to the fovea. The negative waves of the VEPs evoked by the stereogram were located at  $O_1$  and  $O_2$ . The VEP amplitudes evoked by the stereogram markedly exceeded those by the correlogram. In comparing the VEP amplitude of  $O_1$  with that of  $O_2$ , when the slit of the stereogram hit the nasal

side of the nasotemporal overlap  $O_1$  exceeded  $O_2$ , and on the temporal side, this was reversed. The difference between the amplitudes at  $O_1$  and  $O_2$  was significant at 3° from the fovea. These results showed electrophysiologically that the width of the nasotemporal overlap in the human retina is more or less 4° and that the activity from the overlap area converges to disparity selective neurons in the visual cortex, suggesting that the overlap area is the region where cues to depth perception are obtained in the front-posterior plane of the fixation point. (J Jpn Ophthalmol Soc 98: 298-305, 1994)

Key words: Nasotemporal overlap, Disparity, VEP, Random dots, Depth perception

別刷請求先: 020 岩手県盛岡市内丸 19-1 岩手医科大学眼科学教室 中島 理子  
(平成5年6月14日受付, 平成5年9月25日改訂受理)

Reprint requests to: Satoko Nakajima, M.D. Department of Ophthalmology, Iwate Medical University School of Medicine, 19-1 Uchimaru, Morioka-shi, Iwate-ken 020, Japan

(Received June 14, 1993 and accepted in revised form September 25, 1993)

## I 緒 言

霊長類において耳側網膜の神経節細胞は同側の視索へ、鼻側網膜の神経節細胞は対側の視索へその軸索を送っている。しかし、1973年 Stone ら<sup>1)</sup>はサル網膜の中心窩の中心を通る経線 (vertical midline) を境界として、これら耳側と鼻側の網膜線維が完全に分離されていないことを指摘し、同側へ投射している神経節細胞と対側に投射しているそれとが混在している網膜重複部 (nasotemporal overlap) の存在を示し、その重複部の幅は  $1 \sim 1.5^\circ$  であると報告した。その後、1977年に Bunt ら<sup>2)</sup>はサルの中心窩の神経節細胞の分布を検討し、混在領域は中心窩からさらに両側へ  $0.5^\circ$  の範囲まで広がっており、重複部の幅は  $3^\circ$  であると記載している。一方、1989年に Fukuda ら<sup>3)</sup>は同じくサルの網膜の組織学的な重複部の幅は  $1 \sim 1.5^\circ$  であるが、外側膝状体の電気刺激による逆行性の網膜応答の結果から、機能的な重複部の幅は組織学的な重複部の幅の  $2 \sim 3$  倍であると報告している。ヒトの網膜重複部の存在は、組織学的には未だ確認されていないが、心理物理学の実験から左右眼の中心窩の像を脳内で1つに融合するための両眼単一視、および深径感や立体視の成立機序を考える上で網膜重複部の存在が示唆されている<sup>4)</sup>。また、Blakemore<sup>5)</sup>は耳側と鼻側の網膜が完全に分離されているとすれば、固視点の前後にある像は左右半球に分離されて投射され、両眼単一視の成立機構が複雑になるのみならず、視差抽出機構が両半球の交連線維を介してのみ行われることになるが、交連線維切断症例でも立体視が可能であることから、ヒトにも網膜重複部が存在することを示唆している。

そこで今回、ヒトに static random dot stereogram による両眼視差刺激を与え、網膜重複部由来の応答を後頭部の視覚誘発電位 (visual evoked potential: VEP) で捕えることが可能か否か、また両眼視差応答に関与する重複部の広さはどの程度であるかについて検討した。その結果、VEP 上から網膜重複部の存在と、この網膜重複部が深径知覚に重要な視差抽出を担っていることが示唆されたので報告する。

## II 実験方法

### 1. 対 象

被験者は矯正視力 0.9 以上、Titmus stereotest で 40 s 以下、TNO で 120 s 以下の正常な立体視機能を有する 18~31 歳 (平均 20.6 歳) の健康成人 12 名 (男女各 6 名) である。

### 2. 装置および刺激方法

#### 1) VEP の記録装置 (図 1)

左右眼を独立して刺激するために、2 台の TV の刺激画面をそれぞれ左右眼に投影して、単一融像に見えるようにした。被験者は TV 画面から 80 cm の距離のシール

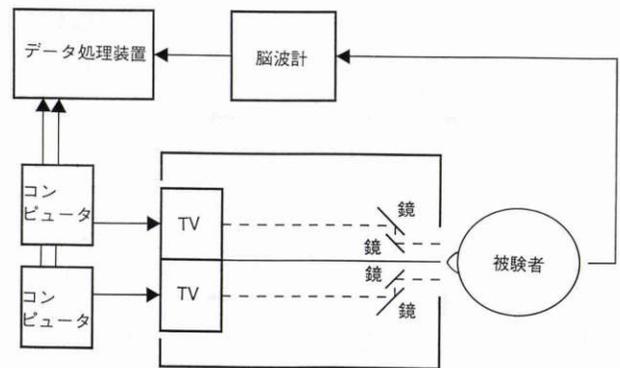


図 1 実験装置の模式図。

被験者は TV 画面から光路 1 m の距離に座している。2 つの TV 画面は各眼に独立して提示される。2 つの TV 画面とデータ処理装置は 2 台のパーソナルコンピュータで制御される。

ド椅子 (EEG 用椅子, 日本光電) に座り、2 画面の各々の中央の固視標を注視した。

脳波は国際 10-20 法に従って 14 か所の頭皮から多用途脳波計 (5214, 日本光電) によって導出した。脳波記録用電極として銀-塩化銀電極を頭皮上にゴムバンド (KM 式脳波記録装置, ユニークメデカル) で固定して用い、不関電極は両耳朶に、接地電極はおとがいの中央部に置いた。不関電極を陽性とした。導出された VEP の波形とその等振幅分布図 (トポグラム) は医用データ処理装置 (Brain Atlas, Biologic) によって表示した。加算回数は 64 回、記録装置の総合周波数帯域は  $3 \sim 60$  Hz とした。

#### 2) 刺激画面

刺激画面の作成にはパーソナルコンピュータ (PC 9801 RA, 日本電気) と 14 インチテレビ (KX 14 HD 14, ソニー) を組み合わせて用いた。被験者とテレビ画面の間の光路に鏡が挿入されて光が屈折されるために光路の距離は 1 m ある。TV 画面の大きさは視角にして  $11.1^\circ \times 14.3^\circ$  である。

刺激に用いた TV 画面を図 2 に示した。左右の TV 画面に白黒の random dot pattern を提示したが、左眼には交代しない静止した random dot pattern を継続して提示した。右眼に提示する画面は 3 種あり、その 1 は左眼と同じ画面で、両眼視下には視差のない画面 (無視差画面) となり、dots が散在して平坦に見える。これを correlationogram (CRG) とした (図 2 の上段)。その 2 は右眼用の TV 画面の中央部 ( $2^\circ \times 8^\circ$  の短冊型) に含まれるすべての点を水平方向に 8 arc min 移動させたものであり、両眼視下には均一の視差が与えられ、短冊部が浮き出て見える。これを stereogram (STG) とした (図 2 の中段)。その 3 は画面中央部の短冊型の部分の dot の配列を不規則に変えたもので、両眼視下には種々の大きさの視差が与えられ、短冊部が“毛羽立って”見える。これを uncorrelationogram (UCG) とした (図 2 の下段)。STG と UCG と

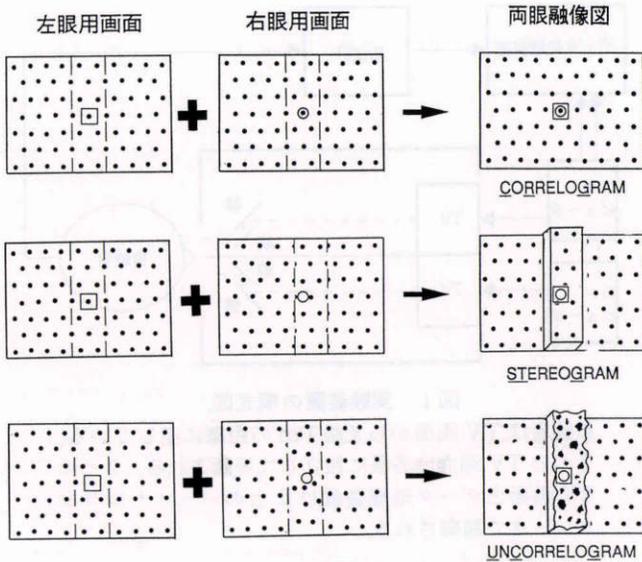


図2 提示される刺激画面とその融像知覚。

上段は correlogram 刺激で、右眼用画面は左眼用画面と同一の dot pattern である。その両眼融像によって dots が平坦に散在して見える。中段は stereogram 刺激で、右眼用の画面だけは中央部破線内に含まれる dots を水平方向に 8 arc min 移動させている。両眼融像によって、中央部が短冊状に浮き出て見える。下段は uncorrelogram 刺激で、右眼用画面は短冊部の dots の位置を不規則に変えてある。融像によって短冊部が“毛羽立って”見える。

を有視差画面と呼称した。一画面全体の dot 数は 4,000 個、短冊部分は平均 565 個である。

被験者への画面提示は 2 系列とし、まず CRG を提示した後 STG、次いで再び CRG に変換する組み合わせ (S-C) の系列と、CRG の後に UCG、次いで CRG を表示する組み合わせ (U-C) の系列である。CRG 後の STG とその後の CRG、あるいは CRG 後の UCG とその後の CRG が刺激となって生じる VEP 波形を既に報告した手順<sup>6)</sup>に従って、医用データ処理装置の 2 つのメモリーに並行してそれぞれ加算し保存した (図 3)。なお、STG 後の CRG を CRG (S)、UCG 後の CRG を CRG (U) と表記した。刺激提示時間は STG と UCG は 700 ms、CRG は 600 ms として有視差下の応答と無視差下の応答の干渉を避けるように配慮した。記録装置の制約から VEP の解析時間を 1,024 ms とした。

今回の刺激方法は上述のように、左眼の画面は静止画像で、右眼の画面が変化する刺激であるので、一眼的両眼性刺激 (両眼性刺激) と称した。一方、左眼の静止画面の dot pattern を消去して TV 画面には固視標のみを提示し、右眼の画面には両眼性刺激と同一の STG と CRG または UCG と CRG の 2 系列を表示して両眼視下には視差がない刺激を作り、これを二眼的単眼性刺激 (単眼性刺激) と称した。

両眼の固視を確実にするために固視標の形状を工夫

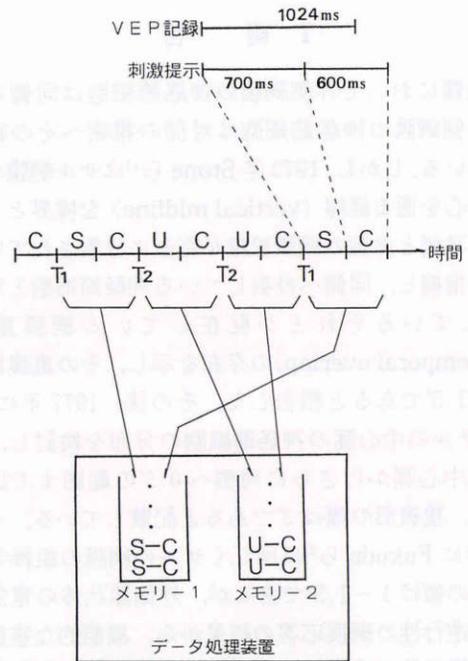


図3 刺激画面の提示、視覚誘発電位の記録および保存の方法。

Correlogram (C) のあとに stereogram (S) と C が提示される組み合わせ (S-C) と、C のあとに uncorrelogram (U) と C が提示される組み合わせ (U-C) の 2 系列がある。この 2 系列は T1 あるいは T2 の trigger pulse によって random に提示される。S-C 系列と U-C 系列の刺激による視覚誘発電位の応答はそれぞれデータ処理装置のメモリー 1 とメモリー 2 で加算され、保存される。上段に刺激画面の提示時間、視覚誘発電位の記録時間を示した。

し、左眼用は視角  $1^\circ \times 1^\circ$  の四角形、右眼用は直径視角  $0.6^\circ$  の円形を用い、両眼視下では四角形のなかに丸が入るように頭位と眼位を調節して注視させた。この場合、両眼視野闘争が生じて両眼固視の維持が難しくなることがあったが、そのときには瞬目によって解消できた。左眼の四角形の大きさは視野闘争が頻発して両眼固視の維持が難しくなることのない最小限の大きさである。

3) 鼻側あるいは耳側網膜の刺激

右眼用の TV 画面の中央部の短冊を中央 ( $0^\circ$ ) から左右方向へ視角  $3^\circ$  あるいは  $6^\circ$  の位置に偏位させて、鼻側あるいは耳側網膜の刺激を行った (図 4)。12 名のうち 10 名の被験者については、右眼鼻側網膜の偏位度  $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ$  の位置での両眼性および単眼性の刺激に対する記録を、また 12 名のうち 5 名の被験者は右眼の鼻側および耳側網膜のそれぞれの位置での両眼性刺激に対する記録を行った。

記録中の単調さによる被験者の疲労の軽減および注意の喚起のために、STG 提示を認識したときにカウンターボタンを押させた。

データの統計学的検討には Student's paired t-test を用い、有意水準を 10% とした。

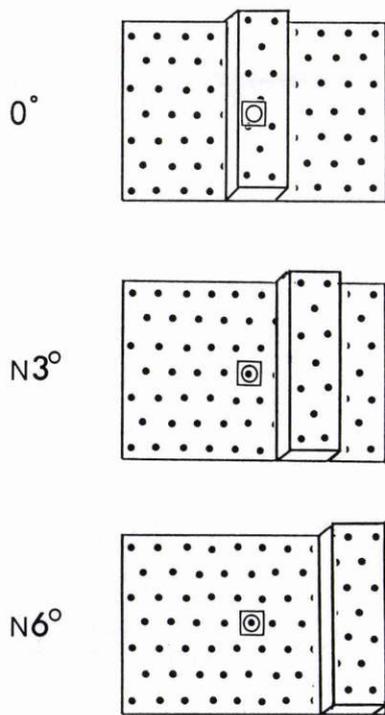


図4 網膜中心窩の中心および鼻側3°あるいは6°を stereogram で刺激したときの両眼融像知覚の模式図。

0°: 画面の短冊が右眼の中心窩の中心を刺激したときの知覚像, N 3° (N 6°); 画面の短冊を右側へ3° (6°) 偏位させて鼻側3° (6°) の網膜を刺激した時の知覚像。

## II 結 果

### 1. VEP およびトポグラフ

今回得られた VEP 波形の頂点潜時は 144~276 ms であったが、今回の解析には 164~268 ms の範囲内にある陰性波を対象とした。その振幅の測定には trough to peak を採用し、先行する波の trough と対象とする波の peak の電位差を振幅とした。

図5には網膜偏位度 0° (vertical midline), 耳側 (T) の 3° と 6°, 鼻側 (N) の 3° と 6° の 5 か所に両眼性 S-C 系列刺激を与えたときの O<sub>1</sub> (左側後頭部) と O<sub>2</sub> (右側後頭部) で記録された VEP と、その頂点時 (図5の点線) の振幅のトポグラフの典型例を示した。VEP 波形の極性は上向きの電位変動が陰性である。VEP に関しては、この例では各偏位度での STG に対する応答の波形の頂点潜時は 192~232 ms の範囲にあった。振幅は T, N のいずれでも偏位度が増すほど小さくなる傾向を示した。右眼耳側網膜刺激時には右半球 (O<sub>2</sub>) の振幅が左半球 (O<sub>1</sub>) よりも大きく、鼻側網膜刺激時には左半球 (O<sub>1</sub>) のそれが右半球 (O<sub>2</sub>) よりも大きかった。他の被験者においても偏位度と電位変動の関係、刺激部位と電位振幅の関係は同様の傾向を示した。

頂点時のトポグラフでは STG による刺激に対する応

答の範囲は後頭部を中心に頭頂部へ広がることが判明した。この傾向は他の被験者においても同様であり、個人差は認め難かった。

### 2. 右眼鼻側網膜が刺激されたときの網膜偏位度と VEP 振幅の関係

両眼刺激下での O<sub>1</sub> および O<sub>2</sub> における鼻側網膜偏位度による VEP 振幅の変化をそれぞれ図 6 A および B に被験者 10 名の平均振幅値および標準偏差で示した。

1) 網膜偏位度と VEP 振幅; O<sub>1</sub> (図 6 A) において、STG による網膜偏位度 0°, N 3°, N 6°, に対する VEP 振幅値の平均値はそれぞれ 7.51  $\mu$ V, 6.24  $\mu$ V, 3.64  $\mu$ V, UCG に対しては 7.96  $\mu$ V, 5.11  $\mu$ V, 2.73  $\mu$ V, CRG (S) では 4.16  $\mu$ V, 2.73  $\mu$ V, 2.32  $\mu$ V, CRG (U) では 5.0  $\mu$ V, 3.24  $\mu$ V, 2.50  $\mu$ V となり、いずれの刺激画面に対しても VEP 振幅値は網膜偏位度が 0° で最も高値を示し、N 3°, N 6° と中心から離れるに従って直線的に有意に減少した。一方、O<sub>2</sub> (図 6 B) の STG では 9.75  $\mu$ V, 4.95  $\mu$ V, 2.85  $\mu$ V, UCG は 9.61  $\mu$ V, 4.29  $\mu$ V, 2.15  $\mu$ V であり、CRG (S) では 6.30  $\mu$ V, 2.71  $\mu$ V, 2.48  $\mu$ V, CRG (U) は 6.18  $\mu$ V, 2.90  $\mu$ V, 1.85  $\mu$ V であって、O<sub>1</sub> で得られた結果と同様にいずれの刺激画面に対しても中心から離れるに従って VEP 振幅値は直線的に有意に減少した。

2) 刺激の種類と VEP 振幅との関係; O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> のいずれにおいても有視差刺激の画面である STG と UCG とに対する VEP 振幅はほぼ同等で、統計学的に有意差はなかった。また、無視差刺激画面である CRG (S) と CRG (U) による両者の振幅の間についても統計学的な有意差はなかった。これらの刺激画面で得られる VEP 振幅の大きさは先行して提示される刺激画面によって影響されることはなかった。しかし、有視差 (STG と UCG) と無視差 (CRG) の画面の振幅を比較すると、前者が後者よりも高値を示し、特に O<sub>1</sub>, O<sub>2</sub> のいずれでも網膜偏位 0° および N 3° で著明であり、かつ有意であった。

### 3. O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> で得られる有視差刺激に対する VEP の偏位度による相対振幅

図 6 A および B を基にして、O<sub>1</sub> および O<sub>2</sub> での偏位 0° で記録される VEP 振幅値を基準にしたときの N 3°, N 6° の相対振幅値を図 7 に示した。STG に対する相対振幅は、N 3° では O<sub>1</sub> は 89.3%, O<sub>2</sub> は 66.4%, N 6° では O<sub>1</sub> は 52.4%, O<sub>2</sub> は 38.7% であり、各偏位部での VEP 相対振幅は O<sub>1</sub> が O<sub>2</sub> よりも大きかった。UCG の相対振幅は、N 3° では O<sub>1</sub> は 65.9%, O<sub>2</sub> は 46.9% であり、N 6° は、O<sub>1</sub> は 33.1%, O<sub>2</sub> は 27.6% となり、STG のそれと同様に各偏位部の VEP 相対振幅は O<sub>1</sub> が O<sub>2</sub> よりも大きかった。STG および UCG に対する相対振幅は偏位 N 3° で O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> との間で統計学的に有意差を示したが、N 6° では有意差はなかった。

右眼の鼻側および耳側網膜を STG で刺激したときの O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> で得られた VEP の相対振幅の変動を図 8 に示

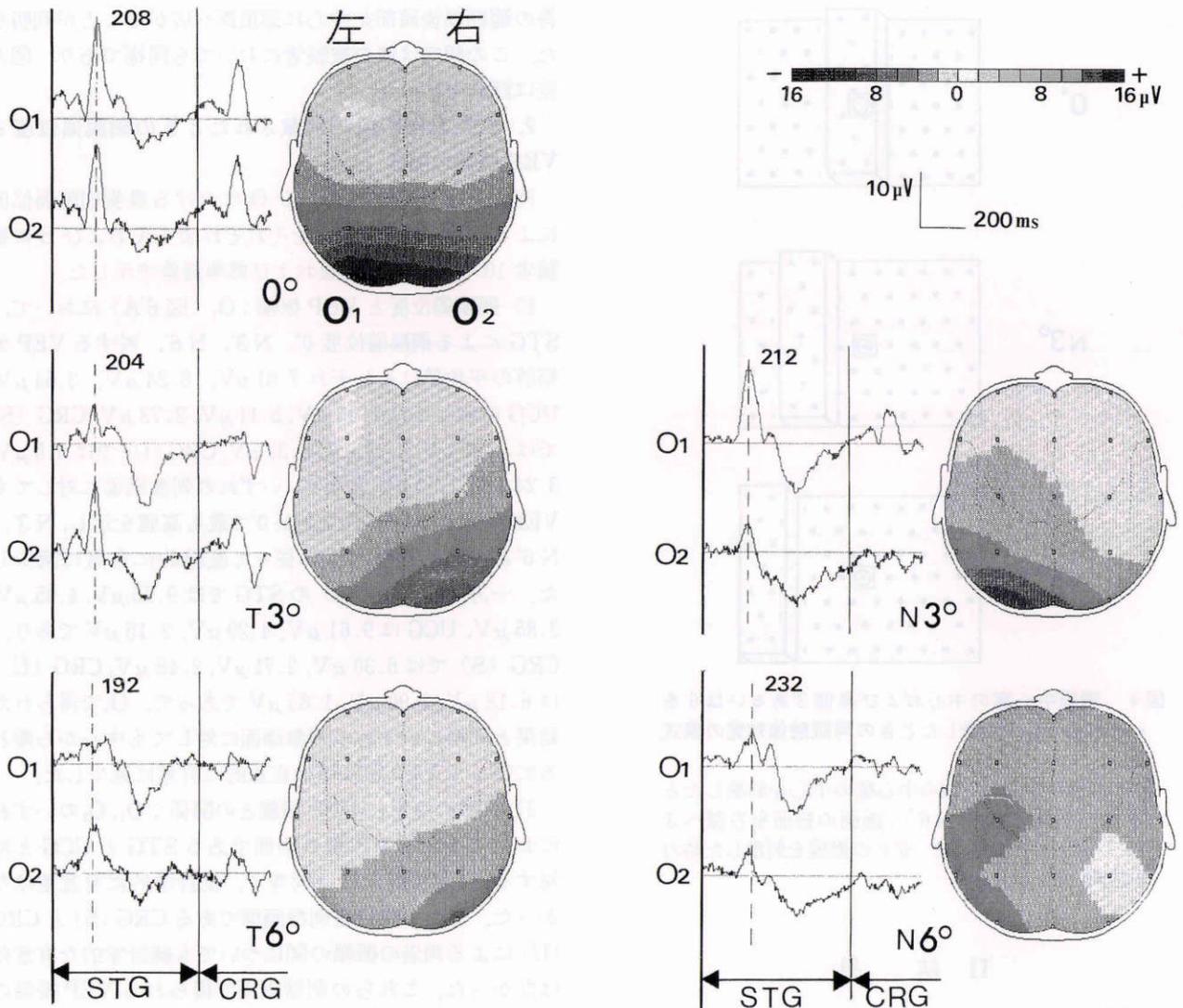


図5 網膜の各部位をS-C系列で刺激したときの視覚誘発電位波形と stereogram で誘発された陰性波の頂点時における両半球の振幅トポグラム。

Correlogramのあとに、stereogram (STG)、次いで correlogram (CRG) が提示されたときのO<sub>1</sub> (左側後頭部) とO<sub>2</sub> (右側後頭部) から得られた視覚誘発電位の波形。T; 耳側網膜を刺激; N; 鼻側網膜を刺激。視覚誘発電位曲線の左半分はSTGに対する応答を、右半分はCRGに対する応答を示す。波形の電位極性は上方への電位変動が陰性である。波形上の数字はSTGに対する陰性波の頂点潜時 (ms)。各トポグラムはその頂点時における頭皮上の等電位振幅の分布を示す。

した。鼻側網膜の結果は10名から、耳側網膜のそれは5名から得られた値の平均値である。鼻側網膜が刺激された場合には前述のごとく各偏位部でO<sub>1</sub>の相対振幅がO<sub>2</sub>のそれより大きかったが、耳側網膜の刺激の場合には相対振幅がT 3°ではO<sub>1</sub>が47.6%、O<sub>2</sub>が81.4%であり、T 6°ではO<sub>1</sub>が44.8%、O<sub>2</sub>が55.6%となり、O<sub>1</sub>とO<sub>2</sub>の相対振幅の大小関係は逆転した。なお、O<sub>1</sub>とO<sub>2</sub>の相対振幅の間に有意差を示したのはT 3°だけであった。

4. 単眼性刺激時のO<sub>1</sub>とO<sub>2</sub>におけるVEPの偏位度による相対振幅

右眼鼻側網膜を単眼性刺激で刺激した場合のO<sub>1</sub>とO<sub>2</sub>で得られるVEP応答の偏位度による変化を図9に示した。N 3°におけるSTGに対する相対振幅はO<sub>1</sub>が

92.9%、O<sub>2</sub>が69.5%、UCGに対するそれはO<sub>1</sub>が77.7%、O<sub>2</sub>が56.9%であり、N 6°の場合にはSTGではO<sub>1</sub>が65.4%、O<sub>2</sub>が55.3%、UCGではO<sub>1</sub>が55.6%、O<sub>2</sub>が62.2%となり、STG、UCGのいずれでも偏位3°でO<sub>1</sub>の相対振幅がO<sub>2</sub>のそれよりも高値を示し、その差は統計学的に有意差があった。しかし、6°では有意差がなかった。

III 考 按

1. 一眼的両眼刺激の意義

今回、一眼的両眼刺激を与えた理由は2点ある。その1はVEPの誘発には刺激画面を切り替えることが必要であるが、画面を切り替える際に光点の移動の運動要素

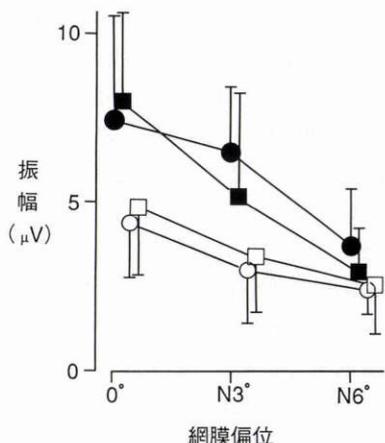


図 6 A 網膜偏位度と O<sub>1</sub>における各刺激による視覚誘発電位の振幅。

振幅は被験者 10 名の平均値とその標準偏差。黒丸：STG (stereogram に対する振幅)，黒四角：UCG (uncorrelogram に対する振幅)，白丸：CRG (S) (stereogram の後に提示された correlogram に対する振幅)，白四角：CRG (U) (uncorrelogram の後に提示された correlogram に対する振幅)。

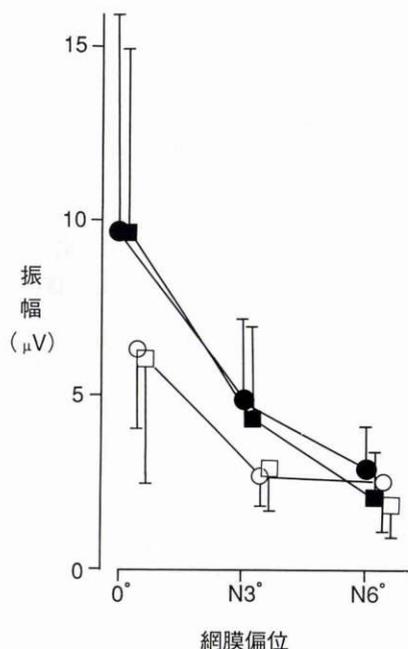


図 6 B 網膜偏位度と O<sub>2</sub>における各刺激による視覚誘発電位の振幅。

図の説明は図 6 A と同じ。

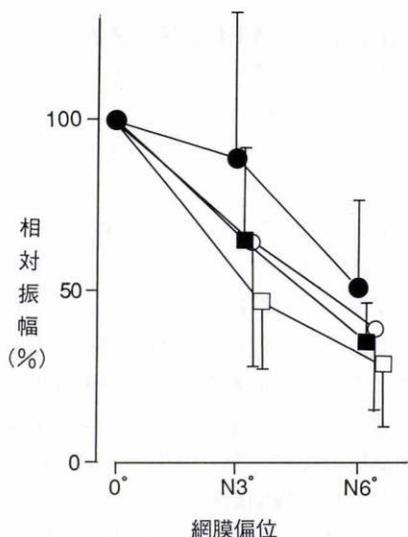


図 7 網膜偏位度と視覚誘発電位の相対振幅。

黒丸：STGO<sub>1</sub> (O<sub>1</sub>で stereogram によって記録された偏位 0°に対する相対振幅)，白丸：STGO<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>で stereogram によって記録された偏位 0°に対する相対振幅)，黒四角：UCGO<sub>1</sub> (O<sub>1</sub>で uncorrelogram によって記録された偏位 0°に対する相対振幅)，白四角：UCGO<sub>2</sub> (O<sub>2</sub>で uncorrelogram によって記録された偏位 0°に対する相対振幅)。図 8, 9 についても同じ。

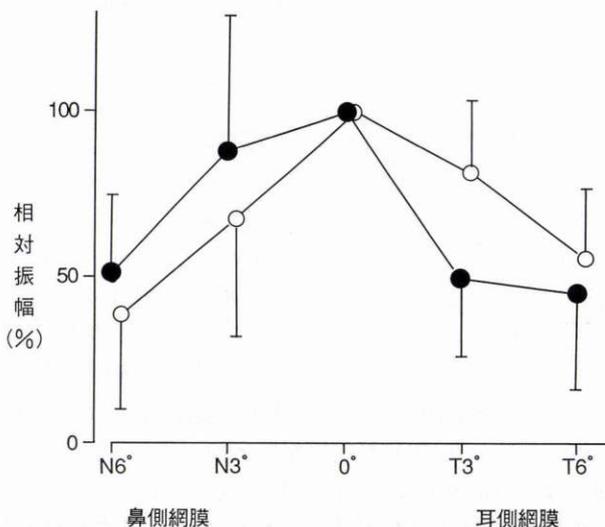


図 8 重複部刺激時の網膜偏位度と視覚誘発電位の相対振幅。

両眼性に stereogram で右眼の鼻側あるいは耳側網膜の各偏位度を刺激したときの O<sub>1</sub>と O<sub>2</sub>で得られた視覚誘発電位の相対振幅。その他の説明は図 7 と同じ。

黒丸：STG O<sub>1</sub>，白丸：STG O<sub>2</sub>

やフリッカー要素など他の刺激要因が生じる。一眼のみの切り替えによって、それらの影響を少なくした。その 2 は右眼への画面のみを切り替えることによって刺激される網膜の部位を特定し、網膜神経節細胞からの投射線維の分布の考察を容易にしたことである。

一眼的両眼刺激下の両眼融像が被験者に与える心理物理的イメージは左右の 2 画面に視差要素を与える従来の

提示法<sup>7)</sup>のそれと同質であった。今回の VEP 応答は後頭部を中心に得られており、また、頂点潜時は従来報告されたもの<sup>6)~10)</sup>と近似していた。有視差刺激に対する振幅は無視差刺激のそれに比べて統計的に有意に高値であった。このことは有視差刺激が両眼視差抽出細胞の活動を促して VEP 振幅を増大させたことを示しており、従来の報告<sup>6)~15)</sup>を支持している。

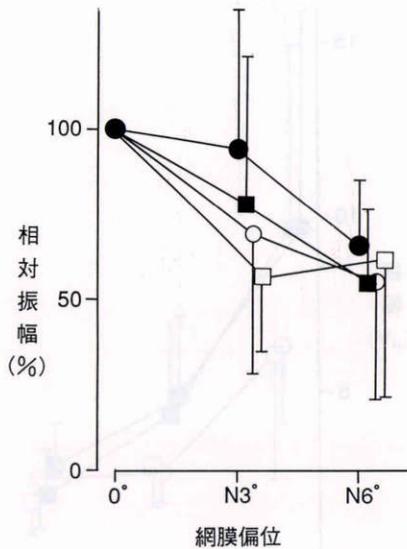


図9 単眼性刺激時の網膜偏位度と視覚誘発電位の相対振幅。

左眼用画面に dot pattern を表示せずに、固視点の四角形のみを表示し、右眼用には両眼刺激時と同じ画面を提示した時に得られた視覚誘発電位の振幅の偏位 0° に対する相対振幅。その他の説明は図 7 と同じ。

黒丸：STG O<sub>1</sub>，黒四角：UCG O<sub>1</sub>，白丸：STG O<sub>2</sub>，白四角：UCG O<sub>2</sub>

## 2. 網膜刺激の偏位度と VEP 振幅の関係

刺激スリットの位置が網膜の vertical midline から側方へ離れるに従って VEP 振幅は直線的に減少していた (図 6, 8)。これは赤緑の dot pattern を用いて両眼に視差要素を与える方法で得られた成績<sup>8)</sup>と同様であった。この偏位による VEP 振幅の減少は、以下に詳述するが、① 神経節細胞の網膜部位による分布密度の違い、② 各網膜部位とそれが投射される視覚野皮質部位における拡大因子の差、③ 視覚野皮質が脳表面に露出している範囲、などの諸因子の関与による<sup>8)</sup>と考えられる。

神経節細胞の分布密度は、サルにおいては vertical midline から 7° までは増加するが、さらに周辺網膜に移行すると徐々に減少する<sup>3)11)</sup>。中心窩ではそこに位置する視細胞と連なる神経節細胞はその近傍に押しやられているので、神経節細胞密度は非常に小さい。ヒトでのデータはまだ得られていないが、サルに類似しているものと推察される。本実験で用いられた刺激の範囲は 7° 以内にあるが、この範囲では神経節細胞の分布密度は vertical midline から偏位するに従って増加している。したがって、本実験での偏位による VEP 振幅の減少を神経節細胞の分布から説明することは困難である。

皮質拡大因子と VEP の振幅との対応を検討してみる。皮質拡大因子とは、視角 1° に当たる網膜の広さが、視覚野で占める皮質の大きさの割合のことである<sup>16)17)</sup>。拡大因子と神経節細胞の密度の平方根との間には、霊長

類では正比例の関係があり、ヒトの場合についても視野が 45° 以内の範囲ではこの関係が成立している。この割合は網膜の部位によって異なっている。ヒトの拡大因子は 0° の位置で 7.99 mm/°、鼻側偏位 3° および 6° では 4.01 および 2.67 mm/°、耳側の 3° および 6° では 4.27 および 2.91 mm/° と算出されている<sup>15)</sup>。偏位 3° での皮質拡大因子は 0° のそれより小さいので、偏位した網膜を刺激した場合の VEP 振幅は 0° を刺激した場合のそれよりも小さくなるのが考えられる。

脳表面に露出する視覚野皮質の広がりや視野の範囲との関係について、Spalding<sup>18)</sup>は頭部外傷患者の視野障害の結果から、8~10° の中心視野は線状野の後頭極および半球内側部に投射するとし、また、安達ら<sup>19)</sup>はヒトの視覚領で頭皮面に近く投射しているのは網膜中心部の約 2° までであり、その部位では VEP がよく記録されるが、周辺視野は半球内側に投射しているので、VEP 振幅は減衰すると述べている。

以上のことから、本実験で網膜偏位度が増すに従って VEP 応答が低下した主因は上記の②と③によるものと考えられる。

## 3. O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> における VEP 振幅の差異

刺激が右眼の鼻側網膜へ与えられたときには、O<sub>1</sub> (左半球) の VEP 振幅が O<sub>2</sub> (右半球) のそれより大きく、耳側網膜ではその逆であった。刺激される網膜部位の鼻側と耳側の違いによって VEP 振幅が異なるのは、網膜の鼻側と耳側とでは同側と対側の半球への投射線維数が異なるためと推察される。

Fukuda ら<sup>3)</sup>のサル網膜の中心窩の上方 8 mm の部位における同側性投射と対側性投射の神経節細胞の分布密度の解析によると、鼻側網膜の対側投射線維の数と同側投射線維の数との割合は 74.1 : 25.9、耳側網膜の対側投射線維と同側投射線維の割合は 12.5 : 87.5 である。すなわち、刺激が右眼の鼻側網膜に与えられたときに、O<sub>1</sub> で生じる電位に関与する線維は右眼の鼻側対側線維 (74.1%) であり、O<sub>2</sub> で生じる電位に関与する線維は右眼の鼻側同側線維 (25.9%) である。したがって、右眼鼻側網膜刺激が O<sub>2</sub> に情報を送る線維の数は O<sub>1</sub> に比べて約 1/3 であり、この違いが O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> における VEP 振幅に差を生じていると考えられる。

単眼刺激の場合でも鼻側網膜刺激時に VEP は左右両半球で得られ、O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> での相対振幅の関係は両眼刺激の場合と同じであり、このことも投射線維の分布の割合の違いから説明が可能である。

## 4. 網膜重複部の VEP 振幅

右眼の鼻側あるいは耳側の網膜を刺激した場合にいずれも O<sub>1</sub> と O<sub>2</sub> の両側から VEP 応答が得られたことは、刺激された網膜部位から線維が両側半球へ投射されていることを示しており、このことは同側投射線維と対側投射線維を有する神経節細胞が混在していることを示唆して

いる。また、 $O_1$ と $O_2$ の振幅(図8)の差異は、中心窩における網膜重複部の投射線維の分布の状態を反映していると考えられ、重複部由来の応答を捕えたといえる。

今回用いたスリットの長軸は $8^\circ$ であるので、網膜の中心の高さの上下 $4^\circ$ を刺激している。Fukudaら<sup>3)</sup>によれば、組織学的な重複部は中心から上下方向に向かって扇型に広がっており、上下 $4^\circ$ の部位の組織学的な重複部の幅は $2^\circ$ 以内と推定される。一方、スリット横幅は $2^\circ$ であるので、網膜偏位が $3^\circ$ のときには重複部を刺激していないことになる。しかし、機能的な重複部の幅は組織学的なそれより2~3倍大きい<sup>3)</sup>とされているので、偏位 $3^\circ$ において $O_1$ と $O_2$ のVEP振幅の間に有意差があったことは妥当と思われる。偏位 $6^\circ$ で有意差がなかったのは、皮質拡大因子と視覚野皮質の表面への露出割合の大きさととの相乗効果によって振幅が小さくなり、今回の測定精度からは信頼性のある値が得られなかったことによると考えられる。今回用いたスリット幅によるVEPの結果からは、重複部の幅は少なくとも $4^\circ$ であることが示唆される。

今回の結果は、vertical midlineから両側に偏位 $3^\circ$ 以内の両眼視差刺激の情報は両側半球の視差抽出細胞に収束されていることを示し、この範囲は網膜重複部に相当していることから、これらの情報は特に両眼固視点の前後にある像の深径知覚の情報を担っていることがVEP上から示唆された。

稿を終えるにあたり、この研究の機会を与えて下さり、御指導、御校閲下さいました岩手医科大学眼科学教室田澤 豊教授に心から深謝いたします。また、御協力、御助言をいただきました弘前大学医療短期大学部作業療法学科ならびに岩手医科大学眼科学教室の諸兄姉に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) Stone J, Leicester J, Sherman SM: The nasotemporal division of the monkey's retina. *J Comp Neur* 150: 333-348, 1973.
- 2) Bunt AH, Minckler DS, Johanson GW: Demonstration of bilateral projection of the central retina of the monkey with horseradish peroxidase neuronography. *J Comp Neur* 171: 619-630, 1977.
- 3) Fukuda Y, Sawa H, Watanabe M, Wakakuwa K, Morigiwa K: Nasotemporal overlap of crossed and uncrossed retinal ganglion cell projections in the Japanese monkey (*Macaca fuscata*). *J Neuroscience* 9: 2352-2373, 1989.
- 4) Ogle KN: The visual space sense. *Science* 135: 763-771, 1962.
- 5) Blakemore C: Binocular depth discrimination and the nasotemporal division. *J Physiol* 205: 471-497, 1969.
- 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* 96: 985-992, 1992.
- 7) 伊藤千春: 視差刺激に対する頭頂部と後頭部の VEP の差異. *日眼会誌* 90: 1565-1573, 1986.
- 8) 二唐東朝, 小山内隆生, 藤井浩美: VEP を指標にした網膜不一致と網膜偏位度との関連. *神経眼科* 7: 75-83, 1990.
- 9) 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—Static random dot stereogram 刺激装置の試作—. *日眼会誌* 89: 470-475, 1985.
- 10) 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* 89: 1059-1063, 1985.
- 11) 二唐東朝, 小山内隆生, 飯塚和彦, 中島理子: 両眼視差と VEP. *3D 映像* 5: 21-25, 1991.
- 12) Yanashima K, Miwa M, Akeo Y, Kawara T: Topographical study of stereo-related potentials. *Doc Ophthalmol* 65: 25-33, 1987.
- 13) Pettigrew JD, Nikara T, Bishop PO: Binocular interaction on single units in cat striate cortex: Simultaneous stimulation by single moving slit with receptive fields in correspondence. *Exp Brain Res* 6: 391-410, 1968.
- 14) Leval S, Voigt T: Ocular dominance and disparity coding in cat visual cortex. *Vis Neuroscience* 1: 395-414, 1988.
- 15) Wassle H, Grunert U, Rohrenbeck J, Boycott BB: Cortical magnification factor and ganglion cell density of the primate retina. *Nature* 341: 643-646, 1989.
- 16) Horton JC: The central visual pathway. Hart WM, et al: *Adler's Physiology of the Eye*. 9th. Edition. Mosby-Year Book, St. Louis, 729-736, 1992.
- 17) Rovamo J, Virsu V: An estimation and application of the human cortical magnification factor. *Exp Brain Res* 37: 495-510, 1979.
- 18) Spalding JMK: Wounds of the visual pathway. *J Neurol Neurosurg Psychiat* 15: 169-183, 1952.
- 19) 安達恵美子, 千葉次郎: 視野と VEP. 田沢 豊(編): *眼科 Mook*, 14, 眼と電気生理, 金原出版, 東京, 182-189, 1980.