融合性バーゼンスのヒステリシスと両眼の感覚運動的結合

福岡教育大学 中 溝 幸 夫
九州大学 近 藤 倫 明

Fusional vergence hysteresis and sensory-motor connection of the two eyes

Sachio Nakamizo (*Laboratory of Psychology, Faculty of Education, Fukuoka University of Education, Munakata, Fukuoka 811-41*) and Michiaki Kondo (*Department of Psychology, Faculty of Literature, Kyushu University, Higashi-ku, Fukuoka 812*)

Three experiments were conducted to replicate and extend Helmholtz's observation indicating vergence hysteresis. The two stimuli were presented dichoptically to the eyes in the mirror stereoscope and moved temporalward or nasalward. Helmholtz's finding was confirmed in Experiment 1, in which the critical separations were measured for the stimuli divergently moving temporalward when fusion of their images was abruptly broken (breakaway point) and when fusion was re-established (refusion point) for the stimuli moving nasalward. In Experiment 2, in which only the stimulus for one eye moved temporalward while the stimulus for the other eye was stationary, the breakaway point of the moving stimulus was found to be linearly dependent on the position of the stationary stimulus. Experiment 3 showed that, in the asymmetric divergent tracking as in Experiment 2, the change of the perceived visual direction of the fused image was smaller than the angular magnitude of the movement of the tracking eye. These results were discussed as evidence indicating the sensory and motor connection of the two eyes.

Key words: fusional vergence, hysteresis, divergence limit, binocular connection, vergence eye movement.

ダイオプティックな刺激法によって提示された両眼網膜視差の連続的な変化に対するバーゼンス・システム (vergence system) の応答を利用して、両眼の視軸をそれぞれの眼が外転あるいは内転する方向に“ひっぱる”ことができる。いわゆる、融合性バーゼンス・トラッキング (fusional vergence tracking) である。この刺激条件は、奥行方向に運動する対象をシミュレートしたものであるが、実際の対象を用いた場合とは次の点で異なっている。ある対象を実際空間の中で奥行方向に動かし、それを両眼でトラッキングした場合、幾何光学的には対象までの距離が無限大になったとき、両眼視軸は平行となり、平行を更に越えた視軸の開散 (divergence)¹ はあり得ない。しかし、上で述べたシミュレーションを用いると、対象の単一視を保持しながら、両眼視軸を平行位を越えて開散させることができる。Helmholtz (1962) は、両眼イメージが容易に融合する刺激位置にひと組のステレオグラムを提示し、融合が達成された後に、ステレオグラムの間隔を連続的にゆっくり広げていき、融合が保

持できる限界の刺激位置を調べることによって、眼球の開散限界 (divergence limit——両眼イメージの融合を媒介にして達成される、両眼視軸が開散できる限界の眼球位置) を推定した。その結果、Helmholtz の眼は、突然の融合崩壊が起こるまで、約 8° 開散することができた (Helmholtz, 1962, p. 58—59)。

Helmholtz の観察は、両眼融合メカニズム (binocular fusional mechanism) がもつ 2 つの感覚運動的特性を示唆している。その 1 つは、融合性バーゼンスのヒステリシス (hysteresis) である。すなわち、彼の眼は、いったん両眼イメージの融合が達成された後にステレオグラムをゆっくり動かすことによって、両眼をそれぞれ外転方向にひっぱると融合を保持しながら約 8° 開散することができたが、最初から 8° の開散位置に刺激を提示しても両眼イメージを融合させることはできなかった。このことは、両眼イメージの融合に必要なバーゼンスが刺激作用の経過によって異なることを意味しており、その意味でこの現象は融合性バーゼンスのヒステリシス、つまり、経路依存性 (path dependence) を表わしている (Julesz, 1971, 1978; 近藤・中溝, 1982; 中溝・近藤, 1982; Sperling, 1970, 1981)。

¹ 開散 (divergence) という用語は、ここでは、両眼視軸が平行を越えて眼球の後方で交差する場合の眼球位置を意味する。

もう1つは、Helmholtz の観察した現象が、パーゼンス・システムに課せられた神経支配上の (innervational) 拘束条件の存在を意味しているということである。彼が観察した開散限界は、明らかに、“眼球装置”に課せられた外転 (abduction) のメカニカルな限界を表わすわけではない。なぜならば、同じ刺激法を用いてバージョン (version——眼球の回転方向と回転角が両眼でともに等しい同側性共同運動) を起こした場合、バージョンの運動方向と一致する側の眼は、その眼の開散限界をはるかに越えて外転しうるからである²。つまり、両眼イメージの融合によって達成される開散限界の存在は、両眼イメージの感覚運動的融合と密接に結合した神経支配上の制約がパーゼンス・システムに課せられていることを示唆している。

本研究の目的は、Helmholtz が観察した現象を、さらに定量的に測定することによって両眼融合メカニズムの感覚運動的特性を調べることである。実験1では、刺激図形を定速度で連続的に動かすことのできるミラーステレオスコープを用いて、両眼にダイオプティックに提示される刺激が両方とも運動する両眼条件と、一方の眼に提示される刺激の位置は固定され、他方の眼に提示される刺激だけが運動する単眼条件で、Helmholtz の観察の追試をおこない、それぞれの条件下で融合が崩壊する限界の刺激位置 (融合崩壊点 breakaway point of fusion) と、再び融合が起こる限界の刺激位置 (再融合点 refusion point) を測定した。実験2では、実験1と同様の単眼条件において、一方の眼に提示される固定刺激の位置と融合崩壊点との関係を調べた。実験3では、シミュレートした刺激条件下で、融合している刺激イメージの見かけの視方向変化をバージョンと非対称パーゼンスの眼球運動条件間で比較した。

実験 1

実験1の目的は、Helmholtz (1962) が観察した現象を、ナイブな被験者を含む複数の被験者について定量的に測定することによって、融合性パーゼンスのヒステリシスを確認することであった。

方法

刺激と装置 刺激を提示する装置は、ミラーステレオスコープを改作したもので (Fig.1 参照)、刺激の運動速度を統制するために2台の X-Y レコーダ (理研電子, Model F-35) と1台のファンクション・ジェネレータ (NF Model FG-122) を用いた。それぞれの眼に1つずつ提示された刺激は、Fig.1 に示されているように、直径 3.2cm (視角 3.2°) の円形パターンで、中央に幅 0.9

mm, 長さ 3.0 cm の垂直線分が描かれており、円の内側で線分以外のところは、1辺が 2.5 mm の正六角形を要素とする網状パターンでうめられていた。これらの刺激は、X-Y レコーダのペンホルダー部に垂直に装着された透明アクリル板の刺激挿入枠 (縦 10.0 cm × 横 8.0 cm) にさし込まれ、観察者の頭の正中面から左右それぞれ 33.0 cm の距離の矢状面上の軌道を約 20°/s の定速度で移動した。観察者の真正面には、互いに 90° の角度をなす2枚の鏡が垂直に置かれ、この鏡に映った刺激図形が観察された (Fig.1 参照)。角膜表面から刺激までの距離は 56.0 cm で、観察者の頭はバイトボードによって固定され、刺激図形の中心と眼の高さが一致するようにバイトボードの高さが調節された。

手続き Fig.1 に描かれているように、それぞれの眼が第1眼位で視軸が互いに平行であるとき、刺激図形の中心と視軸とが一致するように刺激図形の位置が X-Y レコーダ上で決定された。(この位置を第1眼位の刺激位置とよび、眼球間距離にもとづいて被験者ごとに決定された。両刺激がこの位置に置かれ、被験者がそれぞれの眼の刺激イメージを融合したとき、両眼の視軸は平行となる。)

2つの実験条件が設けられた。右眼、左眼刺激が両方とも運動する両眼条件と、一方の眼の刺激だけが運動する単眼条件であった。それぞれの条件下で、融合崩壊点と再融合点が測定された。融合崩壊点は、運動の途中で刺激イメージが単一視から複視へ変化したときの刺激位置で、再融合点は複視から単一視に変化したときの刺激位置である。

両眼条件における1試行は、次のとおりである。両眼の刺激イメージが融合したとき、輻輳角が 4° になるような位置 (輻輳距離は、約 93 cm でどの被験者も容易に単一視できる刺激位置である。以下、初期刺激位置とよぶ) に静止した刺激が提示された。被験者は、バイトボ

Fig. 1. Method of stimulus presentation and the stimuli used in the present experiment. The two mirrors were arranged to reflect the images of the stimuli, moving on the sagittal planes, to the left and the right eye.

² 更に、単眼だけの運動の場合、第1眼位から左方向、右方向、下方向へは 45°—50°、上方向には 40°—45°まで回転することができる (Howard, 1982)。

ードをかみ、刺激を観察した。両眼の刺激イメージが単一視できたなら、実験者に合図した。実験者がファンクション・ジェネレータのトリガーボタンを押すと、2つの刺激はそれぞれ矢状面上の軌道を被験者から遠ざかる方向（刺激の網膜像は網膜上を鼻側方向）に運動を開始した。被験者には、刺激図形の垂直線分の中央を凝視して、できるだけ単一視を保持するように“努力する”ことがあらかじめ教示されていた。被験者は、垂直線分が1本から2本に分離して見えたとき、右手のボタンスイッチを押す、その信号がX-Yレコーダ上に記録された（融合崩壊点の記録）。その後、刺激は初期凝視位置から20 cmの距離まで運動したあと、反転して同じ軌道上を被験者に近づく方向（網膜上をこめかみ方向）に運動した。被験者は、垂直線分が2本から1本に合わさるように見えたとき、再びボタンスイッチを押す、その信号がX-Yレコーダ上に記録された（再融合点の記録）。刺激は、初期凝視位置までもどって、停止し、被験者は眼を閉じて1試行が終了した。単眼条件では、一方の眼に提示される刺激が常に第1眼位の刺激位置に固定され、他方の眼に提示される刺激だけが運動した。その初期刺激位置は、両眼のイメージが融合したとき、輻輳角が 2° になる刺激位置（輻輳距離は、約186 cm）であった。1試行は、一方の眼の刺激だけが運動することを除くと、両眼条件とほぼ同じ経過をたどった。各条件で10試行（単眼条件では右眼刺激が運動するR条件と左眼刺激が運動するL条件でそれぞれ5試行ずつ）が連続しておこなわれた。条件の提示順序は、被験者ごとに変えられた。

実験試行の終了後、2種類の補足的観察がおこなわれた。1つは、静止刺激を提示して、単一視できる限界の刺激位置が被験者ごとに測定された。初期凝視位置から 0.5° ステップで左右の刺激を開散方向に位置移動させて提示し、そのつど被験者は2つの刺激イメージを融合させる努力をして、単一視できるかどうかを実験者に報告した。（刺激位置を変えるとき、被験者は閉眼したので常に静止刺激を観察した。）以上の方法で測定された、単一視が可能な限界の刺激位置のことを随意性融合限界点（spontaneous fusion limit, S.F.L.）とよぶ。第2の補足的観察では、眼球運動の測定に習熟した2名の被験者について、試行中の眼球運動をフォトエレクトリック法を用いてモニタした。この記録は暗室条件下でおこなわれた。そのために刺激として発光ダイオード（東芝TLR 102, 赤色主波長700 nm, 3 mm ϕ ）を用いた。実験条件および手続きは、実験試行とほぼ同じであった。

被験者 年齢22歳から37歳までの5名の成人（男性3名、女性2名）が参加した。どの被験者も斜視の経歴はなく、視力（矯正を含む）は、1.0以上で、両眼視機能に異常はないことがトブコン・スクリーンスコープⅡ型（東京光学）によって実験前に確認されていた。

結果と考察

融合崩壊点と再融合点は、それぞれ、融合が壊れた、もしくは、再融合が起こったときの刺激位置と第1眼位の刺激位置との角度的距離で表わされた。Fig. 2に示すように、両眼条件の場合は、左眼刺激の位置と右眼のそれとは正中面に対して常に対称であったので、右眼刺激について得られたそれぞれの点の角度的距離（ α° ）の2倍がもとめられた。単眼条件の場合は、一方の眼の刺激は常に第1眼位の刺激位置に固定されていたので、他方の眼の刺激について得られたそれぞれの点の角度的距離（ β° ）がもとめられた。（開散側をプラス、輻輳側をマイナスで表わす。）以上の方法で表わされた融合崩壊点、再融合点は、それぞれの眼の刺激位置と眼球位置とがほぼ対応しているならば、眼球の開散量（それぞれの眼が第1眼位から外転した角度の和）を表わすことになる。

Table 1には、各被験者について、これら2つの測定の平均値と標準偏差が条件別に示されている（単眼条件の値は、L条件、R条件の測定値を合わせたものである）。両眼条件について、5名の被験者の平均融合崩壊点は 3.85° 、平均再融合点は 2.37° であり、この差は統計的に有意であった（ $t_{(4)}=4.265$, $p<.02$ ）。また、単眼条件について、平均融合崩壊点は 4.20° 、平均再融合点は 2.99° であり、この差も統計的に有意であった（ $t_{(4)}=4.458$, $p<.02$ ）。また、各被験者の融合崩壊点と再融合点の平均値の差も、統計的に有意であった。Table 1に

Fig. 2. Measurements of the breakaway point (BP). In the binocular condition (a), each stimulus moved temporalward. The angular magnitude (α°) from the primary position of the stimulus to the stimulus position at which fusion of the stimulus images was broken was measured and doubled. In the monocular condition (b), the stimulus presented to one eye moved temporalward while the stimulus presented to the other eye was stationary in the primary position. The angular magnitude (β°) from the primary position of the stimulus to the stimulus position at which fusion of the images was broken was calculated.

Table 1
Means and standard deviations (in parentheses) of the target
separation at the breakaway and refusion points in the
binocular and monocular conditions

Subjects	Conditions						S. F. L. ^{b)}
	Binocular			Monocular			
	Breakaway	Refusion	<i>t</i> ^{a)}	Breakaway	Refusion	<i>t</i>	
S. N.	6. 30° (. 58°)	5. 33° (. 79°)	2. 943**	6. 44° (. 37°)	5. 37° (. 27°)	7. 019**	5. 0°
K. W.	4. 54 (. 46)	1. 98 (. 34)	8. 886**	5. 11 (. 46)	2. 94 (. 55)	9. 099**	2. 0
K. K.	4. 02 (. 27)	3. 11 (. 21)	7. 989**	4. 09 (. 50)	3. 59 (. 49)	2. 160*	3. 0
H. T.	2. 70 (. 31)	1. 56 (. 43)	6. 460**	3. 02 (. 29)	2. 10 (. 23)	7. 559**	2. 0
M. K.	1. 68 (. 11)	— . 14 (. 33)	9. 735**	2. 34 (. 51)	. 97 (. 42)	6. 218**	1. 0

^{a)} $df=18$

^{b)} spontaneous fusion limit

* $p < .05$ ** $p < .01$

示された数値、および統計的分析結果は、どちらの条件でも融合崩壊点のほうが再融合点より大きいことを示しており、これらの差は、融合性パーゼンスのヒステリシスを表わすものである。この結果は、Helmholtz の観察を確認するとともに、実験 1 と類似の方法を用いて刺激の図形的特性とヒステリシスとの関係を調べた中溝・近藤 (1982) の結果をも確認した。また、融合崩壊点が常に再融合点より大きいという点では、静止網膜像法を用いて Panum 融合域の大きさを調べた Fender & Julesz (1967) の結果とも一致している。

次に、それぞれの測度について両眼条件と単眼条件を比較した。どちらの測度についても 2 つの条件間で 5 人の被験者の平均値の差は、統計的に有意であった (融合崩壊点 $t_{(4)}=3.831$, $p < .02$; 再融合点 $t_{(4)}=3.129$, $p < .05$) が、各個人内では一貫した結果ではなかった。(融

合崩壊点については、5 名のうち 3 名の被験者で、再融合点については 4 名の被験者で条件間の平均値の差が統計的に有意であった。)

Table 1 には、静止刺激を用いて測定した随意性融合限界点 (S. F. L.) についての観察結果が示されている。どの被験者の場合もスタティックな方法による融合限界点は、ダイナミックな方法による融合崩壊点より小さく ($t_{(4)}=3.646$, $p < .05$)、Helmholtz (1962) の観察結果とも一致している。Table 1 の数値から、随意性融合限界点は、むしろ、ダイナミックな方法で測定された再融合点に近いことがわかる ($t_{(4)}=.794$)。

最後に、2 名の被験者について観察した眼球運動記録について質的な分析をおこなった。Fig. 3 には、それぞれの条件下で得られた被験者 S. N. の典型的な眼球運動記録が示されている。刺激が運動を開始してから融合

Fig. 3. Typical recordings of eye movement obtained in the binocular condition (a) and in the monocular condition (b). The top tracing indicates the position of the moving stimulus (only one was shown in both figures). The second tracing and the vertical dotted lines indicate the breakaway point of fusion and the refusion point. The bottom tracings indicate the right and the left eye position.

崩壊点に至るまでと、再融合点から刺激が止まるまでの間、刺激位置と眼球位置とはほぼ正確に対応していることがわかる。この対応は、単眼条件 (Fig. 3b) において刺激位置が固定されているほうの眼についても保たれており、その眼は、融合が崩壊するまではほとんど動いていない。Fig. 3 で、2 本の点線ではさまれた個所は、融合が壊れて、それぞれの眼に提示されている刺激が互いに異なる視方向に知覚されているときの眼球位置を表わしている。その間、両眼条件では小さなパーゼンスとサッケード (saccade) が起こっている。また、単眼条件では、運動する刺激が提示されているほうの眼は、刺激を追視しており、その眼の動きに“ひっぱられる”かのように静止刺激が提示されているほうの眼も同方向に動いていることがわかる。それは、融合が壊れたとたん、あたかもバージョンのスイッチが入るかのようである。被験者 M. K. の眼球運動についても基本的特徴は、被験者 S. N. のものと同じであった。眼球運動の記録は、融合崩壊点が融合を媒介にした開散限界を表わす 1 つの指標であることを示している。この開散限界には、他のパーゼンス特性と同様に個人差が存在する (例えば、von Noorden, 1980) が、個人内ではコンスタントであると思われる。Table 1 に示された両眼条件の融合崩壊点と単眼条件のそれとの相関は有意であった ($r = .990$, $p < .01$)。また、両眼条件の融合崩壊点と随意性融合限界点との相関は、.895 であった ($p < .05$)。これらの結果から、両眼条件において開散限界の大きな個人は、単眼条件や随意的融合条件でも一貫して大きな開散限界を示すことができる。

実 験 2

実験 1 の単眼条件のように、一方の眼に提示する刺激の位置を固定し、他方の眼の刺激だけを動かした場合の融合崩壊点は、固定されたほうの刺激位置とシステムティックな関係をもつことが予備観察の結果から示唆された。すなわち、固定刺激が第 1 眼位の刺激位置から鼻側に偏位したとき、融合崩壊点は大きくなり、こめかみ側に偏位したとき、融合崩壊点は小さくなる傾向がみられた。実験 1 で示されたように、単眼条件において固定刺激が提示されるほうの眼は、融合が崩壊するまではほとんど動かない。つまり、上で述べた予備観察の結果は、刺激位置が固定されたほうの眼の視軸がどの方向を向いているかによって融合崩壊点がシステムティックに変化する可能性を示唆している。実験 2 の目的は、このことを調べることであった。

方 法

実験 1 と同じ刺激と装置を用いた。手続きは、基本的に実験 1 の単眼条件と同じであった。以下、実験 1 の方法と異なる個所についてのみ述べる。左眼に提示される

刺激の位置が常に固定され、右眼の刺激が運動した。左眼刺激の位置が独立変数で、第 1 眼位の刺激位置とその両側 (こめかみ側と鼻側) 1.6° と 3.2° の合計 5 か所 (-3.2° , -1.6° , 0° , 1.6° , 3.2°) であり、従属変数は融合崩壊点であった。右眼刺激のスタート位置は、両眼の刺激イメージが融合したときの輻輳角が約 1° になるような刺激位置で、どの被験者も容易に融合できることがあらかじめ調べられていた。実験 1 に参加した被験者のうち 4 名が実験 2 に参加した。左眼の刺激位置のそれぞれについて 5 試行が連続しておこなわれた。左眼の刺激位置の提示順序は、被験者ごとにランダムに選ばれた。

結果と考察

Fig. 4 は、実験 2 で得られた融合崩壊点の平均値を左眼刺激の位置の関数としてプロットしたものである。図には平均値の他に標準偏差と最小二乗法によって平均値にあてはめた直線の一次式も示されている。4 名の被験者について、あてはめた直線の平均勾配は、.84 でその標準偏差は .05 であった。実験 2 の結果から、一方の眼に提示する刺激を一定の位置に固定し、他方の眼に提示する刺激を運動させたときの融合崩壊点は、固定されたほうの刺激位置の線型関数であることがわかった。実験 1 の眼球運動記録が示すように、刺激が運動し始めてから融合が壊れるまでの間、それぞれの眼の位置と刺激位置とはほぼ正確に対応しているの、融合を保持しながら一方の眼が第 1 眼位を越えて外転しうる限界は、他方の眼の位置に依存すると結論することができる。また、あてはめた直線の平均勾配が .84 であるということは、この実験で用いた非対称パーゼンス・トラッキング事態において、眼球の開散量がすべての視軸の向きにお

Fig. 4. Means and standard deviations of the breakaway point of fusion plotted as a function of the position of the stationary stimulus presented to the left eye. The straight line represents the linear regression to the means obtained for each subject.

いて一定ではないことを示唆している。

実 験 3

実験1の両眼条件では、融合が崩壊するまで両眼対称性のパーゼンスが起こっており、このとき刺激対象はほぼ真正面に見え、両眼視軸が平行位を越えて開散しても、その視方向は変化しない。ところが、実験1や2の単眼条件では、融合が崩壊するまで一方の眼だけに外転運動³が起こっており、そのとき刺激対象の知覚された視方向は、右眼あるいは左眼のどちらが外転運動しているかによってそれぞれ右、あるいは、左に連続的に変化する。この見かけの視方向変化は、網膜像の移動によるのではなく、眼球位置情報によってもたらされたと考えることができる。なぜなら、一方の刺激が運動し他方の刺激が静止している単眼条件においても融合が崩壊するまでは、両眼の視軸は、どちらもほぼ正しく刺激に向けられているからである。

実験3の目的は、実験1や2と同じダイオプティックな刺激条件下で、バージョン、パーゼンスを起こし、その時の刺激対象の視方向変化をこれら2つのタイプの眼球運動間で比較することであった。

方 法

実験1と同じ刺激と装置を用いた。以下、実験1の方法と異なる箇所についてのみ述べる。刺激対象の知覚された方向の変化を測定するために、刺激の見かけの方向変化に一致させて手を動かすというトラッキング法(visually guided hand tracking)を用いた。最初、被験者は、静止した刺激のイメージを融合し、その見かけの位置の真下に人差し指を置き、刺激が運動し始めたら、その見かけの位置変化にできるだけ正確に対応させて、指の位置を変えるように教示された。手の動きを目から遮蔽するためにトラッキングはステレオスコープが置かれた実験台の下で行われた。被験者の手の動きに連動したペンの動きがレコーダ上に記録された。

2つの実験条件が設けられた。a) 非対称パーゼンス条件(以下、パーゼンス条件)と b) バージョン条件である。パーゼンス条件では、一方の眼に運動する刺激が、他方の眼には静止刺激が提示され、バージョン条件では両眼ともに同方向に運動する刺激が提示された。パーゼンス条件には、運動する刺激が提示される眼に関してR条件とL条件があり、バージョン条件では、それぞれの眼に提示される刺激が第1眼位の刺激位置から右方向に運動し始めるR条件と、左方向に運動し始めるL条件があった。すべての条件で試行開始時の初期刺激位置は、第1眼位の刺激位置で、被験者が両眼イメージの融合を口答で報告した後、刺激の運動が開始された。刺激

³ 両眼非対称性パーゼンス・トラッキングの特殊例である。

Table 2
Slope of the regression line

Subjects	Condition	
	Version	Vergence
K. W.	1.250	.585
H. T.	.851	.573
S. N.	1.315	.858

の運動距離は、最小1°から1°刻みで最大5°までであった。刺激はそれぞれの距離を運動した後、方向を転じて第1眼位の刺激位置にもどった。その間、被験者は連続してトラッキング課題を実行した。各R、L条件でそれぞれの運動距離につき5回の試行が連続して実施された。条件と運動距離の提示順序は、被験者ごとに変えられた。

実験1と2に参加した被験者のうち、3名(S.N., K.W., H.T.)が実験3に参加した。(H.T.については、実験1の単眼条件の結果にもとづいて、パーゼンス条件の最大運動距離を3°にした。)

結果と考察

分析のねらいは、知覚された視方向の変化量をバージョン条件とパーゼンス条件の間で比較することであった。そのために、手のトラッキング記録⁴から、手が水平方向に移動した距離を試行ごとに測定し、それを角度に変換したものを分析の基本単位にした。Fig.5には、被験者K.W.の、知覚された視方向の平均変化量と標準偏差が刺激の運動距離の関数としてバージョン、パーゼンス条件別にプロットされている。どちらの条件でも知覚された視方向の変化量は、運動距離の増加に伴ってほぼ直線的に増加しており、パーゼンス条件の増加率

Fig. 5. Means and standard deviations of the magnitude of the perceived directional change plotted as a function of the magnitude of the stimulus motion.

は、バージョン条件のその約半分であることがわかる。最小二乗法を用いて、視方向変化量の平均値にあてはめた直線の勾配が、被験者別、条件別に Table 2 に示されている。これらの勾配には個人差が認められるが、バージョン条件の勾配がパーゼンス条件のそれより大きいという点ではどの被験者も一致している。

実験 3 においても実験 1 と同じように、それぞれの眼の視軸がそれぞれの刺激にほぼ正しく向けられていたとすると、実験 3 で示された刺激の知覚された視方向変化は、眼球位置の変化によって生み出されていると思われる。この解釈が正しいならば、バージョン条件においては、運動する対象をトラッキングして両眼がともに α° 回転すると、対象の見かけの視方向は、眼球的回転方向と同方向に約 $1.14\alpha^\circ$ 変化する。(1.14 の数値は、バージョン条件における 3 名の被験者の平均勾配である。)一方、パーゼンス条件においては、一方の眼は第 1 眼位を保ちながら、他方の眼が運動する対象をトラッキングして α° 開散方向に回転すると、対象の見かけの視方向は、眼球的回転方向と同じ方向に $0.67\alpha^\circ$ 変化する。(0.67 の数値は、パーゼンス条件における 3 名の被験者の平均勾配である。)このことは、両眼球の位置情報がなんらかの形で“変換”されて、知覚された視方向の変化に反映されていることを示唆している。その変換のプロセスには、両眼球位置情報の平均化が含まれていると思われる。

結 論

3 つの実験の結果は、Helmholtz (1962) の観察を基本的に確認するとともに、彼の観察を拡張して、両眼融合メカニズムのもつ感覚運動的特性を定量的に示している。

実験 1 では、融合性パーゼンスのヒステリシス、経路依存性が示された。両眼イメージの融合を媒介にして両

眼あるいは単眼をそれぞれの眼が外転する方向に‘ひっぱる’と、両眼視軸は平行を越えて一定限度まで開散することができる。このダイナミックな方法で得られた開散限界は、静止した刺激を随意的に融合するという方法で得られたスタティックな開散限界よりも常に大きい。2 種類のパナム融合域——随意性融合 (spontaneous fusion) によるものと拡張性融合 (extended fusion) によるもの——を区別した Nelson (1975) の用語法をパーゼンスにも適用すると、スタティックな方法で達成された開散限界を随意性開散限界 (spontaneous divergence limit)、ダイナミックな方法で達成された開散限界を拡張性開散限界 (extended divergence limit) とよぶことができる。この 2 つの開散限界の差が、融合性パーゼンスのヒステリシスを表わしている。

実験 2 では、両眼イメージの融合を媒介にして一方の眼だけを外転方向に‘ひっぱる’と、その眼の外転の限界は、他方の眼の位置に依存することがわかった。実験 1 の眼球運動記録が示すように、両眼イメージの融合が保持されている限り、それぞれの眼球位置は、その眼に提示された刺激の位置に規定されており、その意味ではあたかも両眼が独立に動くかのである⁵。しかし、融合を保持しつつ、一方の眼が外転する限界位置が、静止刺激を‘見ている’他方の眼の位置によって決定されているという事実は、両眼イメージの融合と機能的にリンクした両眼の運動性結合 (motor connection) を表わしており、この種の運動性両眼結合は、眼球運動システムに課せられた基本的な、神経支配上の拘束条件の存在を示唆するものである。

実験 3 では、同じく、両眼イメージの融合を媒介にして、一方の眼だけが第 1 眼位から外転する非対称パーゼンスと両眼が同距離、同方向に運動するバージョン事態で、単一視された刺激イメージの知覚された視方向変化が調べられた。その結果、一方の眼だけが運動する非対称パーゼンスの場合も知覚された視方向を決定するうえで両眼球の位置情報が利用されていることが示唆された。この結果は、両眼球の運動、静止如何にかかわらず、両眼の位置が知覚に反映されるという意味で、やはり両眼結合を表わすひとつの事実であると思われる。

引 用 文 献

- Fender, D., & Julesz, B. 1967 Extension of Panum's fusional area in binocular stabilized vision. *Journal of the Optical Society of America*, 57, 819-830.
- Helmholtz, H. von 1962 *Helmholtz's treatise on physiological optics*. Vol. 3. (Trs. & ed. by J. P. C. Southall) translated from the third German edition. New York: The Optical Society of America.

⁴ 本実験で、知覚された視方向を測定するために用いたトラッキング法の妥当性を調べるため、次の測定をおこなった。一方の眼に対しては第 1 眼位の刺激位置に、他方の眼に対しては第 1 眼位の刺激位置からこめかみ側に 1° から 1° 刻みで 5° までのそれぞれの位置に静止刺激を提示した。被験者は、両眼の刺激イメージを融合した後、単一視されている対象の見かけの位置をポインティング法によって、見えない手で指さした (visually guided pointing)。このスタティックな刺激提示下でのポインティング測度の結果は、実験 3 で用いたダイナミックな刺激提示下でのトラッキング測度の結果とよく一致した。

⁵ 一方の眼が第 1 眼位を保持し、他方の眼だけが第 1 眼位を越えて外転運動をおこなうという事実は、Hering の等神経支配法則に違反するわけではない。詳しくは、中溝・大野 (1978) と Ono (1984) 参照。

- Howard, I. P. 1982 *Human visual orientation*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Julesz, B. 1971 *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- Julesz, B. 1978 Global Stereopsis: Cooperative phenomena in stereoscopic depth perception. In R. Held, H. W. Leibowitz, & H. Teuber (Eds.), *Handbook of sensory physiology*. Vol. 8. *Perception*. Berlin: Springer-Verlag. Pp. 215-256.
- 近藤倫明・中溝幸夫 1982 ダイナミック・ウォールペーパー現象と融合性ヒステリシス 心理学研究, **53**, 288-295.
- 中溝幸夫・近藤倫明 1982 両眼融合とヒステリシス I ——基本概念と融合性ヒステリシス現象—— 福岡教育大学紀要第 31 号第 4 分冊, 171-180.
- 中溝幸夫・大野 圃 1978 凝視の移動と Hering 法則 心理学評論, **21**, 166-190.
- Nelson, J. I. 1975 Globality and stereoscopic fusion in binocular vision. *Journal of Theoretical Biology*, **49**, 1-88.
- Noorden, G. K. von 1980 *Binocular vision and ocular motility: Theory and management of strabismus*. London: C. V. Mosby Company.
- Ono, H. 1984 The combination of version and vergence. In C. M. Schor & K. J. Ciuffreda (Eds.), *Vergence eye movements: Basic and clinical aspects*. New York: Butterworths. Pp. 373-400.
- Sperling, G. 1970 Binocular vision: A physical and a neural theory. *American Journal of Psychology*, **83**, 461-534.
- Sperling, G. 1981 Mathematical models of binocular vision. In S. Grossberg (Ed.), *Mathematical psychology and psychophysiology*. SIA-MAMS Proceedings. Vol. 13. London: L. E. A. Pp. 281-300.
- 1985. 9. 17. 受稿, 1986. 5. 10. 受理——