

視対象の大きさ変化が両眼視差による 輻輳・開散眼球運動に及ぼす影響

小澤 良***・氏家 弘裕*・斎田 真也***

* 産業技術総合研究所 人間福祉医工学研究部門

〒 305-8566 つくば市東 1-1-1 中央第 6

** 中京大学 文学研究科

〒 466-8666 名古屋市昭和区八事本町 101-2

*** 防衛大学校 応用物理学科

〒 239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20

(受付：2005 年 6 月 17 日；改訂稿受付：2005 年 10 月 20 日；受理：2005 年 11 月 15 日)

Effects of Changing-Size on Vergence Eye Movements Elicited by Binocular Parallax

Ryo KOZAWA***, Hiroyasu UJIKE** and Shinya SAIDA***

* Institute for Human Science and Biomedical Engineering,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki 305-8566

** Chukyo University

101-2 Yagotohonmachi, Showa-ku, Nagoya, Aichi 466-8666

*** National Defense Academy

1-10-20 Hashirimizu, Yokosuka, Kanagawa 239-8686

(Received 17 June 2005; Received in revised form 20 October 2005; Accepted 15 November 2005)

A visual target distance changes with the target's retinal size as well as its binocular parallax, which induce vergence eye movements. In the study, we investigated the effects of retinal size changes of stimulus image on vergence eye movements induced by binocular parallax change. To do this, we used stereoscopic stimulus that changes retinal size and binocular parallax independently both modulated in a single cycle of sinusoidal at four different maximum speeds (as binocular parallax: 9.6, 4.8, 2.4, 1.2 deg/s; or those corresponding in size, 2.4, 1.2, 0.60, 0.30 deg/s, respectively). The results showed that when the stimulus changes were the faster two speeds, velocity of vergence eye movements was higher for in-phase condition, in which both the retinal size and parallax changes provided corresponding information of distance changes, than for reversed-phase condition, in which they provided 180 deg out of phase distance information. When the stimulus changes were slow, however, the differences between the two conditions were diminished. Moreover, size changes without parallax changes did not elicit corresponding vergence eye movements regardless of the size-change velocity. These results suggest that changes in retinal size have the effects on fast mechanism of vergence eye movements but not on slow mechanism, both mechanisms that were reported by Semmlow et al. (1986)¹⁾ based on measuring vergence eye movements.

1. はじめに

視対象への右眼、および左眼からの方位は異

なる。この方位の違いを角度で表したものを両眼視差 (binocular parallax) と呼ぶ。視対象が奥行き方向に移動する際、左右眼の網膜像は互

いに逆方向へとその水平位置が変化する。すなわち、視対象が接近する場合には両眼いずれの網膜像とも耳側へとその位置が移動するため、両眼視差は交差方向に変化し、後退する場合には両眼いずれの網膜像とも鼻側へと移動するため、両眼視差は非交差方向へ変化する。眼球が空間上の一点を注視する場合、その輻輳角と視対象の両眼視差との間の角度差を絶対網膜像差 (absolute disparity) と称する²⁾。視対象の網膜像を常に両眼融合域内にとどめておくためには、輻輳眼球運動と呼ばれる両眼の内転運動、または開散眼球運動と呼ばれる外転運動を駆動させて、絶対網膜像差を最小にする必要がある²⁻⁵⁾。このような輻輳・開散眼球運動は、負のフィードバック機構により制御されていると言われる²⁾。

輻輳・開散眼球運動は両眼視差の変化だけでなく、視対象の大きさ変化によっても生起することが知られている^{6,7)}。Erkelens and Regan⁶⁾は、両眼視差を一定に維持した状態で、三角波状に拡大・縮小を繰り返す刺激を提示し、輻輳・開散眼球運動を測定した。その結果、周波数が0.4~0.7 Hzの拡大・縮小変化(刺激対角線の長さの変化範囲は0.78~1.56 deg)のとき最も明確に反応し、その輻輳角は10 arc min程度の過渡的な変化を示した。また、正弦波状に両眼視差のみを変化させた場合に比べ(両眼視差変化の最大速度は4.1~5.7 deg/s; Erkelens and Regan (1986)⁶⁾より筆者らが算出)、刺激の大きさと両眼視差を同時に変化させた場合、輻輳・開散眼球運動の刺激の運動に対する位相遅れは小さくなった。このことから、Erkelens and Regan⁶⁾は視対象の大きさ変化は輻輳・開散眼球運動の速度を増加させる効果があるとしている。また、このときの輻輳・開散眼球運動の反応量は大きさと両眼視差がそれぞれ単独に変化した場合の反応量を足し合わせたものとはほぼ同じだった。

しかし、Erkelens and Regan⁶⁾の刺激は大きさ、ならびに両眼視差が周期的に連続して変化しているため、予測による眼球運動を含む可能性がある。事実、彼らは、大きさのみが拡大・

縮小する場合その変化の周期が1.0 Hz以下と短い場合、輻輳・開散眼球運動の位相が先行することを報告している。また、両眼視差のステップ変化に比べ、矩形波状に周期的変化をした刺激では、輻輳・開散眼球運動の潜時が短縮され、反応量が増加することを報告している⁸⁾。これらは、いずれも刺激の周期性により予測の効果がもたらされたことによるものと考えられる。そこで本研究では刺激の周期的変化による観察者の刺激変化に対する予測を排除した状況で、視対象の大きさ変化が輻輳・開散眼球運動の速度に与える影響を調べる。

Semmlow et al.¹⁾は0.7~36 deg/sまでの速度でランプ状に変化する両眼視差に対する輻輳・開散眼球運動を測定した。その結果、低速(1.4 deg/s以下)な変化に対してはスムーズな輻輳・開散眼球運動が生起したが、高速(2.7 deg/s以上)な変化に対してはスムーズな輻輳・開散眼球運動の生起に加え、ステップ状の反応が生起することを示した。これをもとにHung et al.⁹⁾は、両眼視差変化に基づく輻輳・開散眼球運動を制御するメカニズムを、低速(約2.0 deg/s以下)な変化に持続的に応答する「低速メカニズム (slow mechanism)」と、高速(約2.0 deg/s以上)な変化に過渡的に応答する「高速メカニズム (fast mechanism)」に分類した。この考え方では低速メカニズムは絶対網膜像差からのフィードバックにより制御されるが、高速メカニズムは視対象の両眼視差変化の速度や量を推定して輻輳・開散眼球運動を生起させることを特徴としている^{9,10)}。

両眼視差による高速メカニズムは、刺激の高速な変化に応答するが、大きさ変化に対する輻輳・開散眼球運動も、0.4~0.7 Hzの範囲で(刺激対角線の長さの変化速度0.49~1.7 deg/s; Erkelens and Regan⁶⁾より筆者らが算出)最も明確に反応し、変化速度がそれより低下(刺激対角線の長さの変化速度0.25 deg/s; Erkelens and Regan⁶⁾より筆者らが算出)すると反応が減衰する⁶⁾ことが報告されている。そこで、本研究では、刺激に対する観察者の予測が関与し

にくい状況で、さまざまな両眼視差の変化速度に応じて、視対象の大きさ変化を加えることによる輻輳・開散眼球運動への影響を検討する。

2. 実験方法

2.1 方法

2.1.1 観察者

正常な視力、立体視能力をもつ成人4名(20歳代3名, 30歳代1名)が観察者として参加した。いずれの観察者にもインフォームド・コンセントを得たが、1名の観察者(RK)以外は、実験の目的を知らなかった。

2.1.2 刺激

刺激として背景(0.01 cd/m²)に囲まれた菱形領域(グレー領域: 0.36 cd/m²)内に提示されたマルタ十字(白色領域: 1.4 cd/m²)が用いられた。この刺激は両眼視差を生じさせるために左右眼に独立に提示された。観察者から刺激までの視距離は40 cmだった。刺激の両眼視差と大きさは、視距離40 cmを開始位置として30から59 cmの間で、正弦波状に1周期分の変化を模擬するように変化させた。刺激の両眼視差は交差、または非交差方向へそれぞれ3.1 deg(64 pixel)変化し、また刺激の大きさは対角線方向で、提示開始時が2.3×2.3 deg(48×48 pixel)で、最大3.1×3.1 degから、最小1.5×1.5 degまで変化した。刺激変化の最大速度を4種類用意し、両眼視差では9.6, 4.8, 2.4, 1.2 deg/s、これに対応する大きさは2.4, 1.2, 0.60, 0.30 deg/sとした。また、刺激の運動方向に対する観察者の予測を排除するため、刺激変化の開始が輻輳運動を駆動する刺激と、開散運動を駆動する刺激との2種類がランダムな順序で等しい試行数だけ用いられた。

刺激の両眼視差と大きさを独立に変化させるための刺激を用意した。そのために、まず刺激の大きさを最大から最小まで0.048 degごと(提示画面の1 pixelに相当)に31段階で変化させるため、合計32種類の大きさの異なる刺激を用意した。また、両眼視差の変化は、刺激提示位置の1 pixel以下の滑らかな移動を実現するた

めに、刺激を構成する画素の輝度分布を変化させる方法をとった¹⁰⁾。今回は1 pixelの1/33、つまり0.0015 degに相当する水平移動を実現するために、刺激を33倍に拡大し1 pixel水平方向に移動した後、1/33に縮小して、画素間のRGBの各値を平均化することで、1/33 pixelの移動に相当する刺激画面を作成した。この操作を1つの大きさの刺激に対し、移動量を1 pixelずつ増やして33回行った。32種類の異なる大きさの刺激にこの操作を行ったので、あらかじめ用意した画像は33×32=1056枚であった。

2.1.3 実験装置

図1に実験装置を示す。刺激はコンピュータ(Apple: PowerMac 9600/300)によって制御されたCRT(Sony: FD Trinitron GDM-F400)上に右眼用の刺激と左眼用のそれとが分離して提示された。CRTの手前には4枚の平面鏡が設置されており、この配置により、観察者は左右眼の刺激を融像して観察した。CRTの描画領域は縦×横が768×1024 pixelであり、左右眼の刺激は各々86×162 pixel(4.1×7.8 deg)の範囲内に提示された。描画のフレーム周波数は75 Hzであった。観察者には刺激のみが観察されるよう、実験は暗室で行われた。

観察者の水平方向の眼球運動が第一プルキンエ像検出法(浜松ホトニクス: 高精度両眼眼球・瞳孔運動計測装置)¹¹⁾により測定され、アナログ・レコーダー(Sony: KS-606)に記録された。この装置は赤外光を光源としたプルキンエ像を、ハーフミラーを通して、水平と垂直成分に分解し、各々の運動をスリットスキャンカメラ(浜松ホトニクス: C-1000 67ER, サンプル周波数180 Hz)にて検出するもので、測定範囲は左右20 deg、分解能は6 arc min(バンド幅360 Hz)である。

2.1.4 刺激条件

(1) 同相条件: 2つの手がかりが同じ奥行き変化の方向を模擬した。つまり、刺激の大きさが拡大するとともに両眼視差が交差方向に変化、もしくは刺激の大きさが縮小するとともに非交差方向に変化した。(2) 逆相条件: 2つの手が

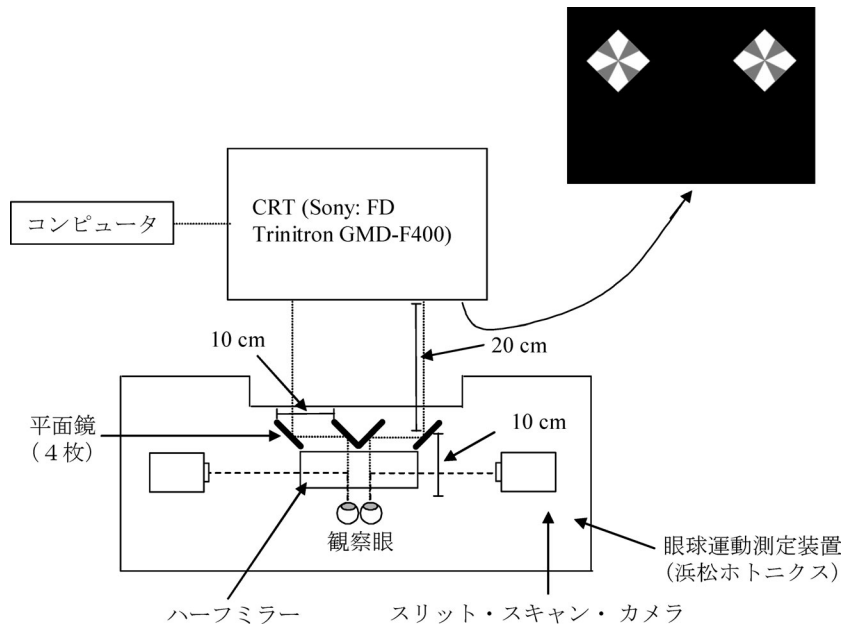


図1 実験装置の概略図. CRT上に提示した刺激の水平位置をそれぞれ反対方向に移動させる, もしくは大きさを変化させることで輻輳・開散眼球運動を駆動する. この眼球運動をスリットスキャンカメラを利用した眼球運動測定装置で計測する.

かりが逆の奥行き変化の方向を模擬した. つまり, 刺激の大きさが拡大するとともに両眼視差が非交差方向に変化, もしくは刺激の大きさが縮小するとともに交差方向に変化した. (3) 両眼視差条件: 刺激の大きさは変化せず, 両眼視差のみが変化した. (4) 大きさ条件: 刺激の両眼視差は変化せず, 大きさのみが変化した. 図2に先に輻輳眼球運動が駆動される場合を例として各条件での大きさ, 両眼視差変化の時間経過を示す.

2.1.5 手続き

毎試行の開始前に眼球運動測定値の較正が行われた. まず, 較正視標として, 両眼各々の刺激提示領域中央とその左右に0.75 degの間隔で2つずつ合わせて5つの光点が水平に整列して提示された. 観察者は指示された順に較正指標を1つずつおよそ2s間注視し, その間の眼球運動が記録された. 次に, 刺激が提示され, さらに観察者自らの合図により試行が開始された. 刺激変化終了後, 刺激は変化開始直前の状態に戻り5s間提示され続けた. 各試行において観

察者の課題は刺激の中心を注視することであり, 刺激提示の間はできるだけ瞬目をしないように指示された. 観察者1名につき30回のセッションが繰り返された. すべての刺激の組み合わせ(4 [刺激条件] × 4 [刺激の最大速度] × 2 [方向])が1回のセッションで1度ずつランダムな順序で行われた.

2.1.6 眼球運動データ分析

記録された両眼の水平位置信号は, 計測装置のノイズを除去するため, カットオフ周波数60 Hzの低周波帯域通過型フィルター(NF Circuit Design Block: FV-625A)を通した後, A/D変換器(ADInstruments: MacLab/8s)によりサンプリング周波数200 Hzでデジタル化され, その後の分析が行われた. ただし, 瞬目, もしくはサッケードが混入した場合は, 眼球運動データは破棄された. 輻輳角は両眼位置の差分から求められた. また輻輳・開散眼球運動の開始速度が1.0 deg/sに達するまでの時間を, その眼球運動の潜時とした. さらに, 輻輳・開散眼球運動の開始時の速度を条件間で比較した. 輻輳・開

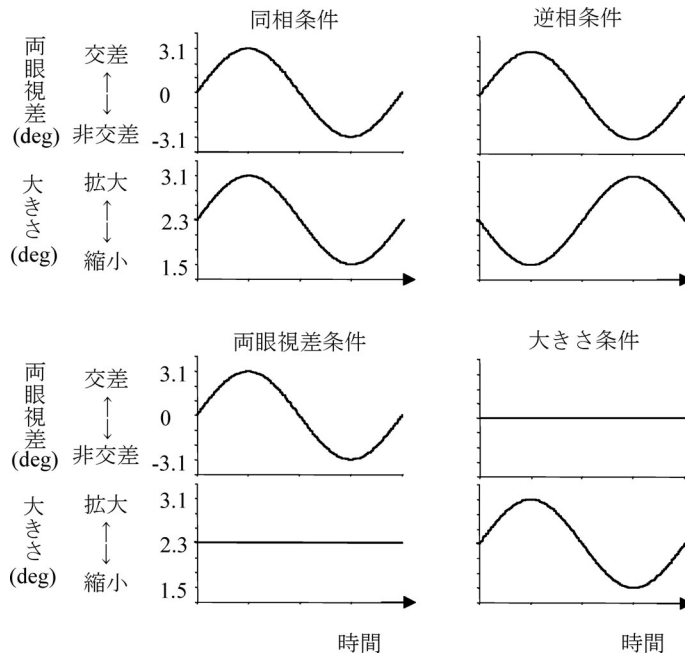


図2 各条件での大きさ、両眼視差変化の時間経過。両眼視差が先に交差方向へと変化する場合、もしくは大きさのみが拡大する場合を例とする。縦軸は大きさ、両眼視差変化、横軸は時間である。縦軸の上方に向かっては大きさの拡大、または両眼視差の交差方向への変化、下方へは縮小、または非交差方向への変化を示す。

散眼球運動の速度は位置の情報をもとに以下の式より求められた。

$$V_{\theta}(nT) = \frac{1}{2T} \{X_{\theta}((n+1)T) - X_{\theta}((n-1)T)\}$$

ここで、 T はサンプリング周期（ここでは 5ms）、 n は整数、 nT はサンプリング時刻、 $X_{\theta}(nT)$ はサンプリング時刻 nT における輻輳眼球位置、 $V_{\theta}(nT)$ は同じく輻輳・開散眼球運動速度を表す。

3. 結 果

図 3a, b に得られた輻輳・開散眼球運動による輻輳角の時間変化を、図 4a, b にその速度の時間変化を示す。これは観察者 1 名のもので図 3a と図 4a は、刺激変化開始時に両眼視差が交差方向に変化する条件、もしくは大きさのみが拡大方向に変化する条件についての平均を示したものである。図 3b と図 4b は、刺激変化開始時に両眼視差が非交差方向に変化する条件、もしくは大きさのみが縮小方向に変化する条件に

ついての平均を示したものである。図 3 のグラフの縦軸は輻輳角 (deg)、図 4 のグラフの縦軸は輻輳・開散眼球運動の速度 (deg/s) を示す。いずれのグラフとも横軸は時間 (s) を示す。

同相、逆相、両眼視差の各条件において、輻輳・開散眼球運動は、すべての刺激の最大速度で、両眼視差の変化に対応した明らかな応答を示した。大きさ条件では輻輳角変化は非常にわずかであり、大きさ変化に応じた特定の傾向の応答は見られなかった。これらの結果はすべての観察者に共通していた。

刺激の最大速度が最も大きい場合（最大速度：両眼視差 9.6 deg/s、大きさ 2.4 deg/s）、輻輳・開散眼球運動の最初に現れるピーク速度は、同相条件の場合が最も大きく、次いで両眼視差条件、逆相条件の順となる傾向が図 4 からわかる。しかし、刺激の最大速度が低下するにつれ、輻輳・開散眼球運動の最初のピーク速度も低下し、また、刺激条件間での最初のピーク速度の差も減少する傾向が見られた。

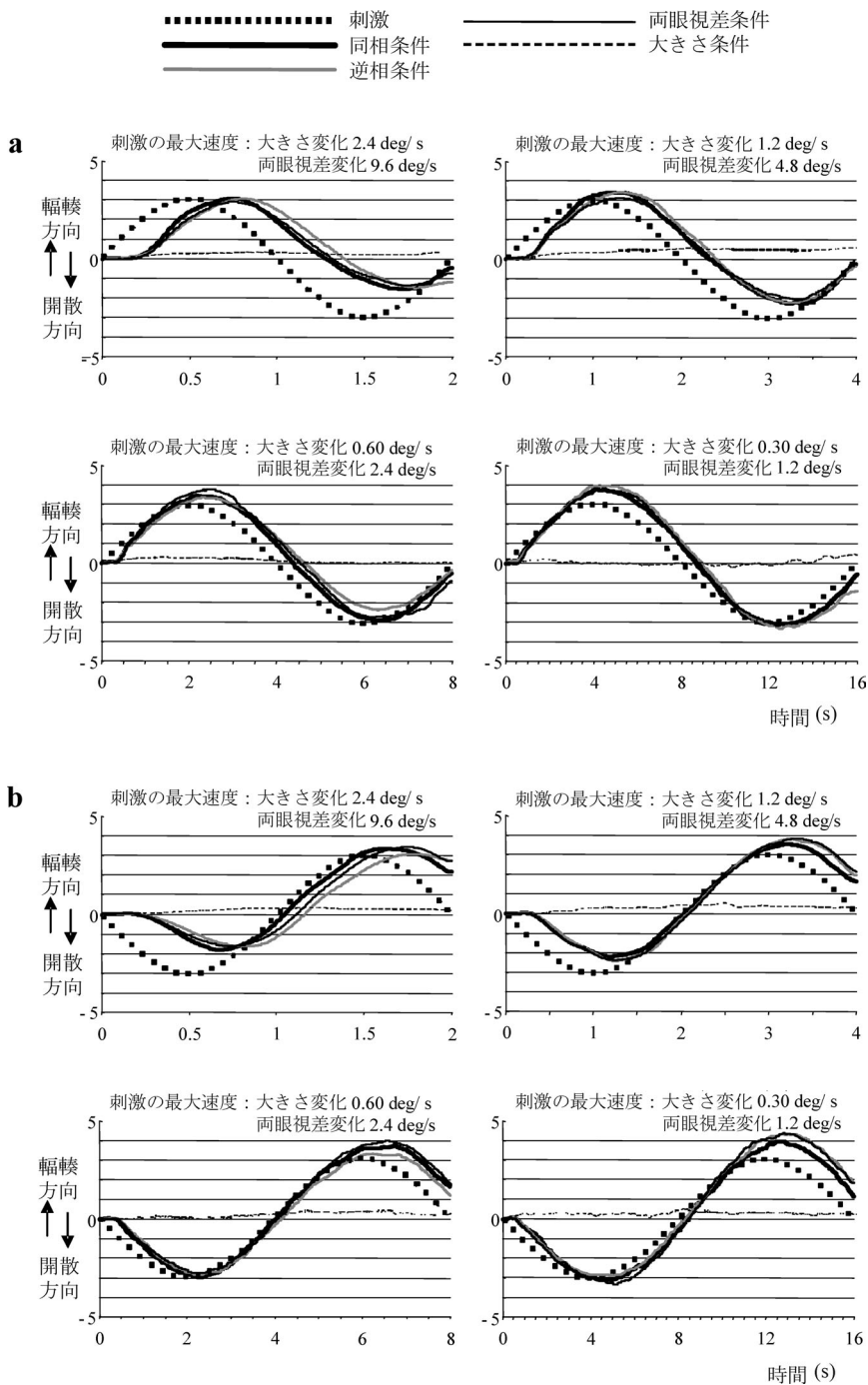


図3 各条件における輻輳角の変化。aの場合、両眼視差が先に交差方向へと変化する場合、もしくは大きさのみが拡大する場合、bの場合、両眼視差が先に非交差方向へと変化する場合、もしくは大きさのみが縮小する場合を例とする。グラフは左列上段より時計回りに、両眼視差変化の最大速度が9.6, 4.8, 1.2, 2.4 deg/s, 対応する大きさ変化の最大速度が2.4, 1.2, 0.30, 0.60 deg/sの場合を示す。縦軸は輻輳角、横軸は時間である。上方に向かっては輻輳眼球運動、下方へは開散眼球運動を示す。縦軸の値は平均値である(観察者AN)。

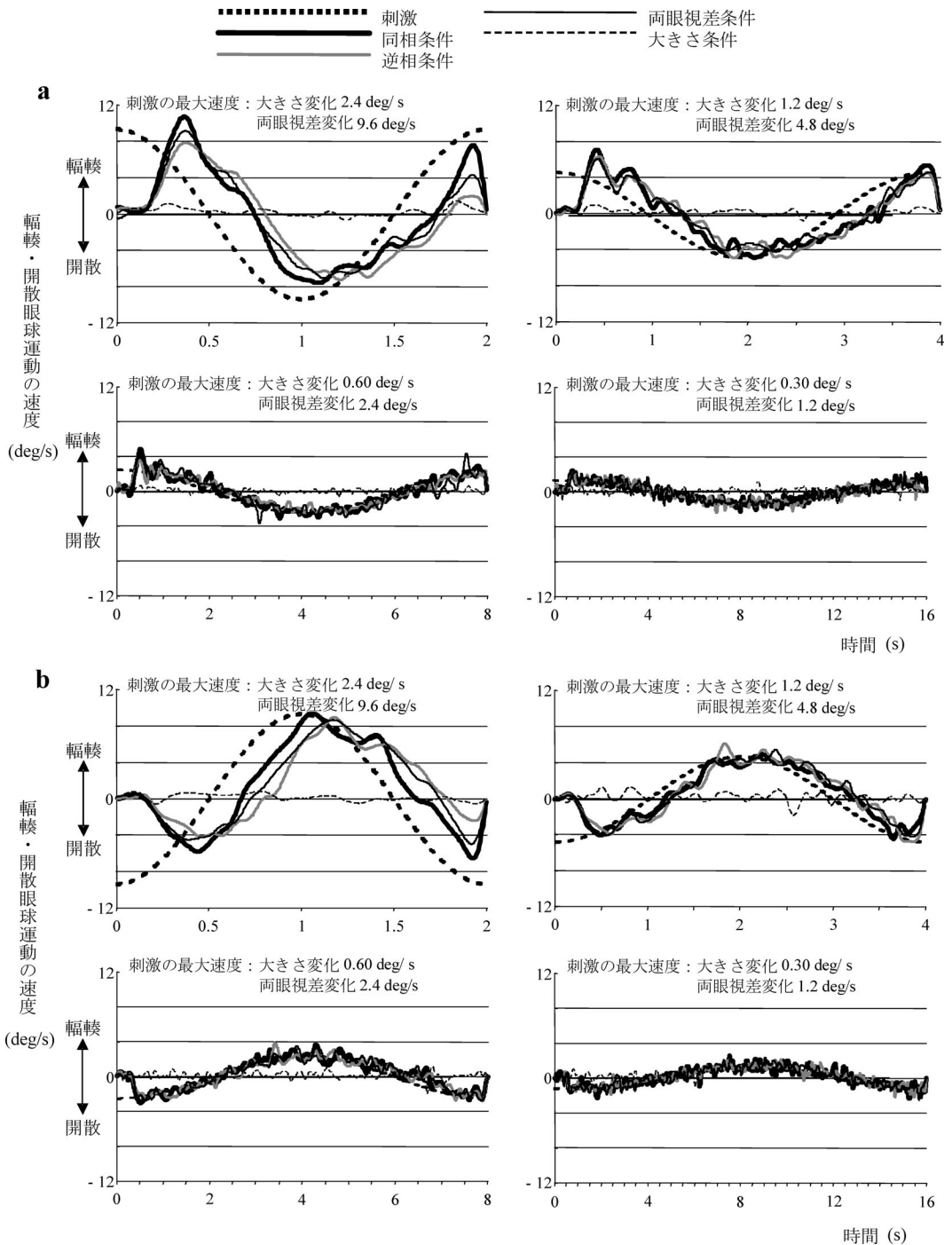


図4 各条件における速度の変化。aの場合、両眼視差が先に交差方向へと変化する場合、もしくは大きさ変化のみが拡大する場合、bの場合、両眼視差が先に非交差方向へと変化する場合、もしくは大きさが縮小する場合を例とする。グラフは左列上段より時計回りに、両眼視差変化の最大速度が9.6, 4.8, 1.2, 2.4 deg/s, 対応する大きさ変化の最大速度が2.4, 1.2, 0.30, 0.60 deg/sの場合を示す。縦軸は輻輳角、横軸は時間である。縦軸0より上方に向かっては輻輳眼球運動、下方へは開散眼球運動を示す。縦軸の値は平均値である（観察者AN）。

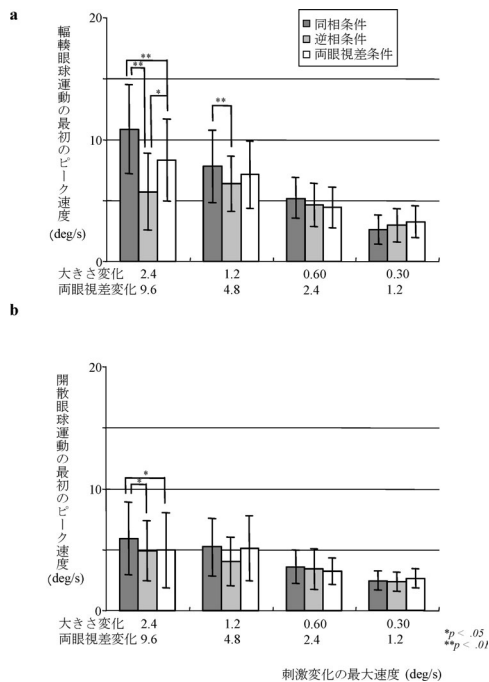


図5 輻輳，開散眼球運動の最初のピーク速度。値は全観察者の平均を示す。縦軸は速度，横軸は刺激変化の最大速度を表す。aは輻輳眼球運動，bは開散眼球運動の結果である。

同相，逆相，両眼視差条件下での輻輳，および開散眼球運動の最初のピーク速度と潜時について，観察者間で平均した。それぞれを図5と図6に示す。速度についてはt検定を行ったところ，刺激の最大速度が最も大きい場合，最初のピーク速度は輻輳，開散時とも同相条件が，逆相条件に比べて（輻輳： $df=158$ ， $t=6.65$ ， $p<.01$ ，開散： $df=156$ ， $t=2.23$ ， $p<.05$ ），また両眼視差条件に比べて（輻輳： $df=158$ ， $t=4.62$ ， $p<.01$ ，開散： $df=156$ ， $t=2.00$ ， $p<.05$ ），各々有意に速く，さらに，輻輳時には逆相条件が両眼視差条件に比べ有意に遅かった（輻輳： $df=158$ ， $t=2.06$ ， $p<.05$ ）。また，刺激変化の速度が小さくなるにつれ，輻輳，開散とも各条件間での差は見られなくなった。潜時に関してはt検定を行ったところ輻輳，開散とも各条件間で差はなかった（ $p>.076$ ）。

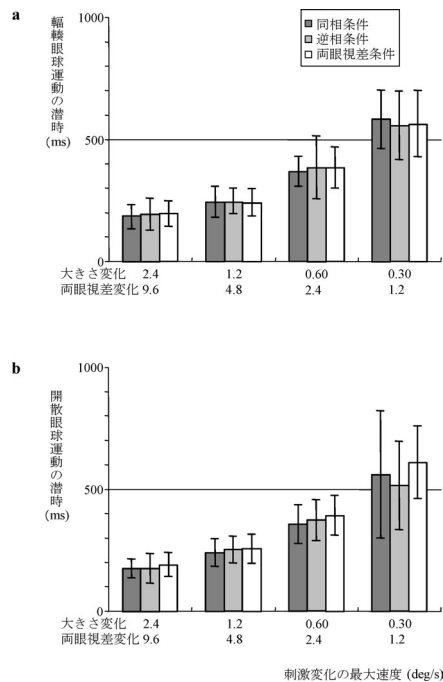


図6 輻輳，開散眼球運動の開始時の潜時。値は全観察者の平均を示す。縦軸は潜時，横軸は刺激変化の最大速度を表す。aは輻輳眼球運動，bは開散眼球運動の結果である。

4. 考 察

本研究では，刺激変化の周期性による予測が起きにくい状況下で，両眼視差の変化による輻輳・開散眼球運動に視対象の大きさ変化が与える影響を調べた。結果は以下のとおりとなった。（1）両眼視差変化の速度が大きい場合には，それを追従する眼球運動の速度に視標の大きさ変化が影響を与えることが明らかになった。刺激の最大速度が最も大きい場合（最大速度：両眼視差 9.6 deg/s，大きさ 2.4 deg/s），これを与える情報が両眼視差と大きさ変化で方向が一致する条件で，輻輳・開散眼球運動の最初のピーク速度が最も大きく，次に両眼視差のみが変化する条件，さらに両眼視差と大きさが逆方向の変化となる条件と続いた。ただし，両眼視差変化の最大速度が小さい場合，上述のような条件間の相違は見られなかった。（2）両眼視差が一定で大きさの変化のみが提示された場合は，これ

に対応した明らかな輻輳・開散眼球運動の変化は見られず、またその変化量も微小なものであった。(3) 輻輳・開散眼球運動が生起するまでの潜時には大きさの影響は見られなかった。

視対象の両眼視差変化が高速になるにつれ、輻輳・開散眼球運動の追従は困難となる。Erkelens and Collewijn¹²⁾は、正弦波状の視差変化に対する輻輳・開散眼球運動のゲインが、周波数と振幅に依存することを示しており、このデータをもとにすると、本実験で最も高速な両眼視差変化速度の場合には、ゲインは0.6程度となる。また、本実験で対象とする予測の効果が見込めない刺激変化開始時の輻輳・開散眼球運動は、さらに追従性が低下していたと理解できる。

ある程度高速の輻輳・開散眼球運動において追従が困難になると、両眼視差変化以外の手がかりの利用が考えられる。実際に、Erkelens and Regan⁶⁾は刺激の変化速度が大きい場合、大きさと両眼視差の連続的な同時変化が輻輳・開散眼球運動の追従速度を増加させることを報告しており、視対象の大きさ変化が輻輳・開散眼球運動の速度に寄与する点で、本実験の結果と一致する。しかしErkelens and Regan⁶⁾は、大きさ変化単独でも輻輳・開散眼球運動が生じることを報告している。この相違は、彼らの実験では、刺激変化の予測が可能であり、本実験では不可能であったことによると思われる。これに対し、生理学的研究においても大きさのみの変化に反応する細胞の存在が報告されている。Toyama et al.¹³⁾は、刺激(円形：対角線の長さは4cm)の大きさと両眼視差を単独、もしくは同時に変化させ、一定速度での接近・後退を模擬した際のネコのClare-Bishop野の反応を調べた。その結果、視差の交差方向、非交差方向への変化それぞれに対し選択的に応答する細胞が、同時にそれぞれ刺激の拡大、縮小に対しても応答することが示された。ただし、彼らは眼球運動を測定していないため、眼球運動との関係については、明確なことは分からない。

本実験での両眼視差の刺激変化の最大速度に

応じて、輻輳・開散眼球運動の低速メカニズムと高速メカニズム^{1,10)}のどちらがより優位に活動していたかを推定することができる。Semmlow et al.¹⁾は低速メカニズムのみで視対象の両眼視差変化を追従する場合、輻輳眼球運動の速度の限界を4~5 deg/sとしている。一方、開散眼球運動に関しては、特に速度の限界を明記していないが、輻輳眼球運動のそれより遅くなることを記している。今回の実験では、両眼視差条件における輻輳眼球運動の最初のピーク速度は刺激変化が2.4、もしくは1.2 deg/sの場合は、5.0 deg/s以下であったが、9.6、4.8 deg/sの場合は、5.0 deg/sを上回る区間が存在した。このことから両眼視差の刺激変化の最大速度が9.6、4.8 deg/sの場合は、輻輳・開散眼球運動の立ち上がりで高速メカニズムが、2.4、1.2 deg/sでは低速メカニズムがそれぞれ優位に活動していると考えられる。前者の2つの最大速度の場合、輻輳・開散眼球運動に高速メカニズムが関与することは、潜時についての生理学的データとの対応からも裏づけられる。Toda et al.¹⁴⁾はネコのClare-Bishop野のうちPLLS (Postero-lateral LS cortex)とPMLS (Postero-medial LS cortex)に電気刺激を与えた際に生じる輻輳眼球運動の潜時は177msおよび372msで、このことから、前者を高速メカニズム、後者は低速メカニズムと関連するとしている。本実験では、最大速度が9.6 deg/sと4.8 deg/sの場合には、潜時は190~250msであり、Toda et al.¹⁴⁾の高速メカニズムでの潜時と対応する(図6)。そして、最大速度が9.6 deg/sと4.8 deg/sの場合には、大きさ変化の効果が認められ、それよりも遅い後者の2つの速度ではその効果はなかったという結果を考慮すると、輻輳・開散眼球運動に影響を与える大きさ変化は、高速メカニズムと関連することが示唆される。

本実験の結果では、両眼視差変化の最大速度が大きい2つの場合(9.6 deg/s, 4.8 deg/s)の間では、両眼視差条件での輻輳・開散眼球運動の最初のピーク速度はあまり違いがなく、飽和傾向が見られたが、大きさ変化が加わる同相条

件では速度の増加が見られた。この2つの両眼視差変化の最大速度は、先述のとおり Semmlow et al.¹⁾の報告に基づいて、高速メカニズムの駆動される範囲と考えられるため、観察された飽和傾向は、高速メカニズムの特性を反映していると推測される。すなわち、今回の両眼変化の速い2つの場合に対して、両眼変化条件では高速メカニズムが十分活性化できず、刺激速度に対してやや飽和傾向が見られたが、大きさ刺激を付加することでこの高速メカニズムの活性化が促され、結果としてより高速の眼球運動が駆動されたと考えられる。

大きさ変化が輻輳眼球運動に与える影響に比べ、開散眼球運動に与える影響は弱い。本実験では、輻輳眼球運動の最初のピーク速度は、同相条件で、両眼視差条件に比べて増加し、逆相条件で減少した。一方、開散眼球運動の最初のピーク速度は、同相条件で、両眼視差条件に比べ増加したが、逆相条件では両眼視差条件と比べて速度の違いは見られなかった。このことは、輻輳眼球運動は開散眼球運動に比べて、速度が大きい¹⁵⁾と報告されていることと関連すると思われる。実験結果では両眼視差の刺激変化速度が最も速い場合、輻輳眼球運動の最初のピーク速度は同相条件で約10 deg/sであったのに対し、開散眼球運動のそれは約6 deg/sと比較的低速だった。視対象変化の検出が両眼視差変化や大きさ変化など、情報ごとに異なる機構で行われたとしても、最終的にはそれらの情報で輻輳または開散眼球運動が駆動されることになるので、元来、両眼視差変化のみによる開散眼球運動が輻輳眼球運動に比べ、大きな速度が出にくいとすれば、大きさ変化の有無による影響の差が現れにくくなっていたと考えられる。開散眼球運動の速度が遅いことは生理学的研究からも推測できる。Mays et al.¹⁶⁾は、輻輳眼球運動に比べ開散眼球運動について、速度に関連するセルの数が大幅に少ないことを指摘している。さらに、両目視差の交差方向への変化に選択的に反応するセルは刺激の拡大に対しても反応するが、非交差方向への変化に反応するセルの縮

小に対する反応は非常に弱く、セルの数も少ないことが報告されている¹³⁾。よって、開散眼球運動の速度は輻輳眼球運動に比べ小さく、大きさの影響が現れにくかったと考えられる。

本実験では大きさ変化が輻輳・開散眼球運動の最初のピーク速度に影響を与えることを示した。しかし、大きさ変化が輻輳・開散眼球運動の開始の初期の段階で影響を与えているのかは定かではない。図6の結果では、両眼視差変化の与えられた3つの条件(同相, 両眼視差, 逆相)の間で、潜時に対して大きさの効果が見られないため、ごく初期の段階では、大きさの効果が無いことも考えられる。そこで、輻輳・開散眼球運動の開始から150msの間のフィードバック制御の行われないとされる開ループ期¹⁷⁾での大きさの効果を調べた。そのために、開ループ期の眼球運動のピーク速度を分析し、刺激条件間で t 検定による比較を行った。その結果、刺激最大速度が最も大きい場合(9.6 deg/s)、開ループ期のピーク速度は輻輳、開散時とも同相条件が逆相条件に比べて(輻輳: $df=158, t=5.17, p<.05$, 開散: $df=156, t=3.24, p<.05$)、また同相条件が両眼視差条件に比べて(輻輳: $df=158, t=3.39, p<.05$, 開散: $df=156, t=2.07, p<.05$)、各々有意に速く、さらに、輻輳時には逆相条件が両眼視差条件に比べ有意に遅かった(輻輳: $df=158, t=1.82, p<.05$)。また、刺激変化が遅くなるにつれ、輻輳、開散とも各条件間での差は見られなくなった。このことは、輻輳・開散眼球運動の開始直後の段階ですでに、大きさ変化が効果をもつことを示している。しかし、図6のように潜時に関しては差が見られなかったため、輻輳・開散眼球運動の駆動には両眼視差情報が強くかかっていると考えられるが、大きさ変化などその他の情報がどのように関与するかに関しては、さらに検討が必要である。

5. 結 論

両眼視差の変化速度に応じて、視対象の大きさ変化を加えることによる輻輳・開散眼球運動

への影響を調べた。刺激に対する予測が起きにくい場合でも、大きさと両眼視差が同時に変化し、かつそれが高速な場合、大きさ変化は輻輳・開散眼球運動の速度に影響を与えた。また、大きさが単独で変化した場合、これに対応した明らかな輻輳・開散眼球運動の変化は見られず、またその変化量も微小なものであった。このことから、Semmlow et al.¹⁾ が眼球運動計測によってとらえた輻輳・開散眼球運動の高速メカニズム (fast mechanism) に大きさ変化の情報が関与していることが示唆される。

文 献

- 1) J. L. Semmlow, G. K. Hung and K. J. Ciuffreda: Quantitative assessment of disparity vergence components. *Investigative Ophthalmology and Visual Sciences*, **27**, 558–565, 1986.
- 2) H. Collewijn and C. J. Erkelens: Binocular eye movements and the perception of depth. *E. Kowler (ed.): Eye movements and their role in vision and cognitive processes*, 213–261, Amsterdam: Elsevier, 1990.
- 3) G. Westheimer and D. E. Mitchell: Eye movement responses to convergent stimuli. *Archives of Ophthalmology*, **55**, 843–856, 1956.
- 4) C. Rashbass and G. Westheimer: Disjunctive eye movements. *Journal of Physiology*, **159**, 339–360, 1961.
- 5) L. Stark, R. V. Kenyon, V. V. Krishnan and K. Ciuffreda: Disparity vergence eye movements. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, **57**, 606–609, 1980.
- 6) C. J. Erkelens and D. Regan: Human ocular vergence movements induced by changing size and disparity. *Journal of Physiology*, **379**, 145–169, 1986.
- 7) L. N. McLin Jr., C. M. Schor and P. B. Kruger: Changing size (looming) as a stimulus to accommodation and vergence. *Vision Research*, **28**, 8, 883–898, 1988.
- 8) W. Yuan, J. L. Semmlow and P. Munoz: Effects of prediction on timing and dynamics of vergence eye movements. *Ophthalmic and Physiological Optics*, **20**, 298–305, 2000.
- 9) G. K. Hung, J. L. Semmlow and K. J. Ciuffreda: A dual mode dynamics model of the vergence eye movement system. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **33**, 10211–1028, 1986.
- 10) H. Ujike and H. Ono: Depth thresholds of motion parallax as a function of head movement velocity. *Vision Research*, **41**, 2835–2843, 2001.
- 11) S. Saida, H. Ono and A. Mapp: Closed-loop and open-loop accommodative vergence eye movements. *Vision Research*, **41**, 77–86, 2001.
- 12) C. J. Erkelens and H. Collewijn: Eye movements and stereopsis during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Research*, **25**, 1689–1700, 1985.
- 13) K. Toyama, Y. Komatsu, H. Kasai, K. Fujii and K. Umetani: Responsiveness of Clare-Bishop neurons to visual cues associated with motion of a visual stimulus in three-dimensional space. *Vision Research*, **25**, 407–414, 1985.
- 14) H. Toda, T. Yoshizawa, M. Takagi, and T. Bando: The properties of convergence eye movements evoked from the rostral and caudal lateral suprasylvian cortex in the cat. *Neuroscience Research*, **39**, 359–367, 2001.
- 15) G. K. Hung, H. Zhu and K. Ciuffreda: Convergence and divergence exhibit different response characteristics to symmetric stimuli. *Vision Research*, **37**, 1197–1205, 1997.
- 16) L. E. Mays, J. D. Porter, P. D. Gamlin and C. A. Tello: Neural control of vergence eye movements. Neural encoding vergence velocity. *Journal of Neurophysiology*, **56**, 1007–1021, 1986.
- 17) M. Takagi, H. Oyamada, H. Abe, D. S. Zee, H. Hasebe, A. Miki, T. Usui and T. Bando: Adaptive changes in dynamics properties of human disparity-induced vergence. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **42**, 1479–1486, 2001.