

コンタクトレンズの光学特性と Quality of Vision

洲崎朝樹*, 前田直之**, 不二門 尚***

*株式会社メニコン臨床研究所

**大阪大学大学院医学系研究科視覚情報制御学教室

***大阪大学大学院医学系研究科感覚機能形成学教室

Contact Lens Optical Characteristics and Quality of Vision

Asaki Suzaki*, Naoyuki Maeda** and Takashi Fujikado***

*Clinical Laboratory, Menicon Co., Ltd.

**Department of Ophthalmology, Osaka University Graduate School of Medicine

***Department of Visual Science, Osaka University Graduate School of Medicine

コンタクトレンズ (CL) の光学特性は、一般的に眼鏡と比べると、視野が広い、プリズム作用や網膜像の倍率・不等像の影響が少ないなど、より自然な見え方を提供できる。しかし、CL は眼にとっては異物であるため、良好な涙液交換により代謝が促されるよう瞬目によって CL を常に動かし、角膜に対する生理的な影響を最小限に保つ必要がある。そのため、CL 装用時の見え方の質 (quality of vision, QOV) はフィッティングの影響を受けることが考えられる。本稿では、各種 CL 装用時の光学特性の違いとフィッティングによる視機能への影響を客観的に明らかにするとともに、QOV を向上させる最新の研究について解説する。

(視覚の科学 27: 2-10, 2006)

キーワード: 非球面コンタクトレンズ, 高次収差, フィッティング, 光学シミュレーション

The optical characteristics of the contact lens (CL) provide more natural vision than glasses: large visual field, less prismatic effect, less aniseikonia etc. However, because the CL is a foreign body to the eye. The corneal physiological effects of good tear exchange and good lens movement during blinking must be considered. Therefore, quality of vision (QOV) with CLs is therefore influenced by lens fitting. This report examines the effects upon visual performance of optical characteristics and lens fitting with several CLs. An ongoing study regarding improvement of QOV by CLs is also reported.

(Jpn J Vis Sci 27: 2-10, 2006)

Key Words: Aspheric contact lens, Higher-order aberration, Fitting (stability and movement), Optical simulation

1. 緒 言

コンタクトレンズ (以下 CL) は、角膜上に装用して屈折異常を矯正する。そのため、一般的に眼鏡と比べ視野が広い、プリズム作用や湾曲収差などが少

ない、像倍率の影響を受けにくく不等像を起こすことが少ないなど、より自然な見え方を提供できる。近年の設計・製造および評価技術の進歩に伴い、複雑な非球面や度数分布をもった CL も登場し、近視または遠視の矯正はもちろんのこと、乱視や円錐角膜

別刷請求先: 460-0006 名古屋市中区葵3-21-19 株式会社メニコン臨床研究所 洲崎朝樹
(2006年2月16日受理)

Reprint requests to: Asaki Suzaki Clinical Laboratory, Menicon Co., Ltd.
3-21-19 Aoi, Naka-ku, Nagoya 460-0006, Japan
(Received and accepted February 16, 2006)

などの角膜に由来する不正乱視の矯正, 更には老視の矯正も可能となった¹⁾。これに伴い, 患者の視機能への要望度も確実に高まっており, CLの開発は, 安全性の向上や簡便性の追求ばかりではなく, 装用中の見え方の質 (quality of vision 以下 QOV) に重点がおかれるようになってきた。

CL装用時のQOVに影響を与える因子としては, CLの光学特性, 涙液動態などが挙げられるが, 最も影響度が高いのは角膜上での静止位置や動きなどのフィッティング状態であろう。CLは眼にとっては異物であるため, 良好な涙液交換により代謝が促されるよう瞬目によってCLを常に動かし, 角膜に対する生理的な影響を最小限に保つ必要がある。そのため, CL装用時の視機能は角膜上での静止位置や動きなどのフィッティング状態に大きく影響を受けることが考えられるが, その詳細は明らかではない。

一方, 人眼用の波面収差測定器が登場して以来, CL装用時のQOVを厳密に評価できるようになり, 一部では, 個人の高次収差をも補正する収差コントロールCLの研究が進んでいる²⁾。本稿では, 各種CL装用時の光学特性の違いとフィッティングによるQOVへの影響を客観的に明らかにするとともに, QOVを向上させる最新の研究について解説する。

2. 各種CL装用時の高次収差とQOV

ハードタイプのCL (以下 HCL) とソフトタイプのCL (以下 SCL) は, 角膜不正乱視や眼球内部の不正乱視が極端に多い患者を除き, 一般的にSCLよりもHCLの方が光学的に有利である。HCLの光学的な優位性については, 高次収差が関与していることが過去に報告されており, HCL装用時の高次収差はSCL装用時に比べて有意に少ない³⁾。この理由は, HCLは素材の硬さからHCL後面と角膜表面との間に涙液レンズが形成されることで, 角膜に由来する不正乱視を矯正することが可能であるのに対し, SCLは含水性素材の軟らかさによって角膜表面形状に沿ってしまい, 涙液レンズの効果があまり望めないからである。そのため, SCL適応患者には乱視用SCL (以下 toric SCL) が処方されるが, 角膜乱視眼に対するHCLとtoric SCLのQOVについては十分に検討されていない。そこで我々は, 角膜乱視が1D未満とそれ以上の群に分けて詳しく調べた。

1) 対象および方法

対象は, 角膜乱視が1D以下の健常眼を近視群

表1 試験レンズの詳細

	HCL	SCL	toric SCL
デザイン	内外面球面	内外面球面	後面トーリック
Dk値 ^{*1}	163	28	32
含水率(%)	-	58	66
USAN ^{*2}	tisilfocon A	etafilcon A	alafilcon A
FDA ^{*3} 分類	-	グループIV	グループII
その他特徴	-	-	プリズムバラスト

*1: 酸素透過係数 (ISO法), 単位: $\times 10^{-11}$ (cm²/sec) · (m μ O₂/m μ × mmHg)

*2: United States Adopted Names (材料名)

*3: Food and Drug Administration (アメリカ食品医薬品局)

{10例18眼 (男性: 3例5眼, 女性: 7例13眼), 年齢: 34.8 \pm 6.4歳 (平均値 \pm 標準偏差 以下同様), 球面度数: -4.09 \pm 2.70D, 円柱度数: -0.23 \pm 0.21D}, 1D以上の健常眼を乱視群 {9例15眼 (男性: 5例8眼, 女性: 4例7眼), 年齢: 32.1 \pm 3.7歳, 球面度数: -3.39 \pm 1.70D, 円柱度数: -1.60 \pm 0.75D} とした。試験レンズには, 単焦点のHCLとSCL系2種 (SCLとtoric SCL) を用い (表1), 前者にはHCLとSCLを, 後者にはHCLとtoric SCLを対象眼に合わせた度数で装用させた。そのときの視力検査と見え方に関するアンケートおよび波面収差測定を行い, HCLとSCLおよびtoric SCLのQOVの違いを評価した。視力検査には視標コントラスト100%, 10%のlogMAR (CSV-1000[®], Vector Vision) を, 波面収差測定にはHartmann-Shack波面センサー (KR-9000PW[®], Topcon) を用いた⁴⁾。波面収差解析は, 屈折全体の光学特性を示すハルトマン像から, 瞳径4mmにおける高次収差をZernike多項式で4次まで展開し, 古典的な収差に対応する各Zernike項のroot mean square (RMS) (μ m) を算出した⁵⁾。主に3次の非対称収差成分をまとめた3次収差と4次の対称収差成分をまとめた4次収差, および高次収差の総和について評価した。また, 今回用いた波面センサーがマイヤー像を同時に撮影できることを利用し, 各試験レンズ装用中のCL表面形状解析からHCLとSCLの角膜乱視矯正能力を比較した。

2) 結果

logMARは, 視標コントラストや対象群の違いにかかわらず, HCLおよびSCLとtoric SCLとの間に有意な差は認められなかった (表2)。アンケートでは, 近視群で60%の被験者が同等と回答したものの,

34%の被験者がSCLよりもHCLの方がよいと回答した(図1a)。乱視群では、47%の被験者がtoric SCLよりもHCLの方がよいと回答し、同等と回答した被験者はわずか20%であった(図1b)。高次収差解析では、近視群でHCLとSCLの間に有意な差は認められなかった(図2a)が、乱視群では3次収差と高次収差の総和においてtoric SCLよりもHCLの方

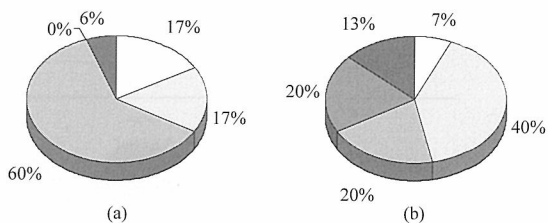


図1 見え方のアンケート結果

- (a) 近視群
 □: HCLの方が明らかによい, □: HCLの方がややよい, □: 同等, ■: SCLの方がややよい, ■: SCLの方が明らかによい
- (b) 乱視群
 □: HCLの方が明らかによい, □: HCLの方がややよい, □: 同等, ■: toric SCLの方がややよい, ■: toric SCLの方が明らかによい

表2 logMARの結果

コントラスト	近視群		乱視群	
	HCL	SCL	HCL	toric SCL
100%	-0.26 ± 0.08	-0.27 ± 0.08	-0.18 ± 0.10	-0.16 ± 0.07
10%	-0.07 ± 0.08	-0.02 ± 0.08	0.09 ± 0.16	0.09 ± 0.12

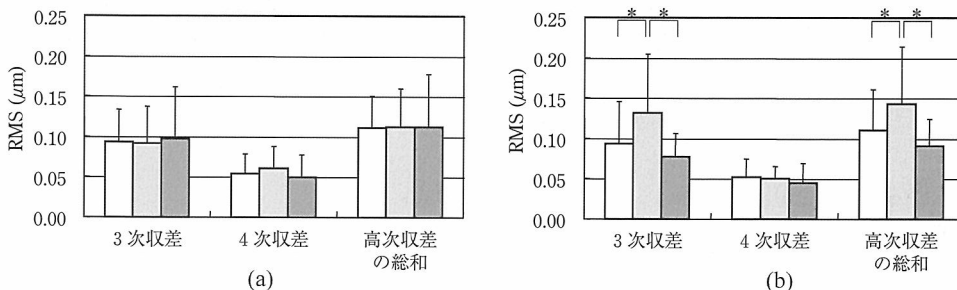


図2 高次収差の結果

- (a) 近視群 □: 裸眼, □: SCL, ■: HCL
- (b) 乱視群 □: 裸眼, □: toric SCL, ■: HCL

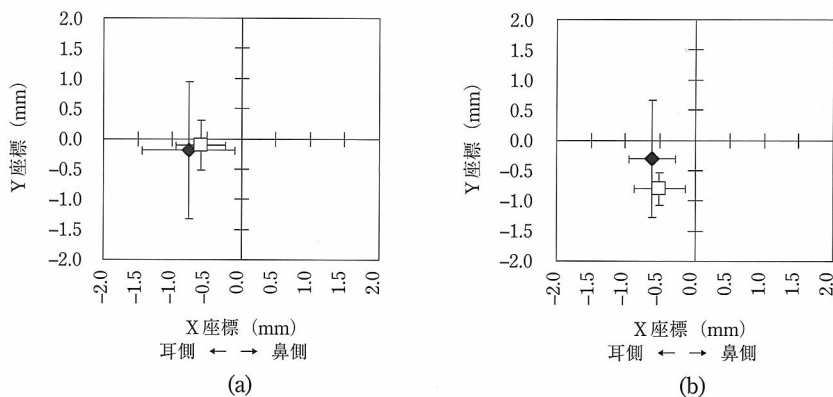


図3 CL安定位置の結果

各CL装用中の安定位置を細隙灯顕微鏡下で撮影し、瞳孔中心に対する各CL幾何中心の相対位置をコンピュータ上で解析した。

- (a) 近視群 ◆: HCLの平均安定位置, □: SCLの平均安定位置
- (b) 乱視群 ◆: HCLの平均安定位置, □: toric SCLの平均安定位置

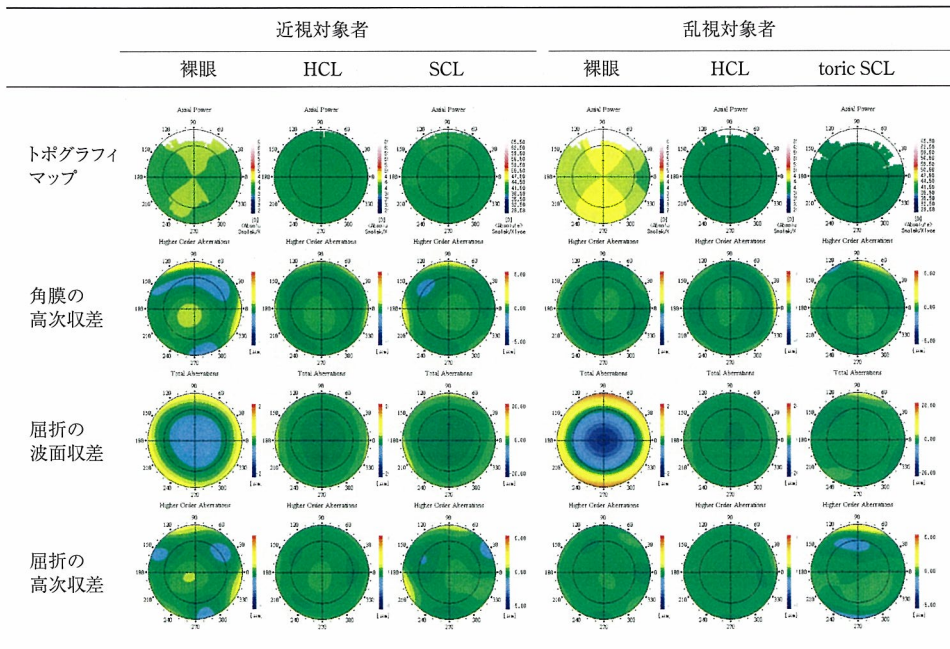


図4 波面収差解析結果の症例

が有意に少なかった (図2b)。

3) 小 括

CL間の見え方の違いは、角膜乱視が1D以上の乱視群のみで認められた。これらの群では、toric SCLの主に3次収差がHCLと比較して有意に増加していた。今回用いたtoric SCLは、プリズムバラストによって軸の回転を防止するデザインを有しているためレンズ下方部が重い。そのため、SCLの安定位置 (図3a) よりも下方への位置ズレによってコマ収差が増加したと推測される (図3b)。また、SCLとtoric SCLでは裸眼の角膜形状に類似したマップがみられるのに対し、HCLでは裸眼と異なり、ほぼ均等なマップが得られていることから、角膜乱視の矯正能力の違いによって屈折の高次収差に影響を及ぼしたと推測される (図4)。これらのことから、CL装用中のQOVはSCLやtoric SCLよりもHCLの方がよいことが示された。一方、自覚的な見え方のアンケート結果は、高次収差解析の結果と同様にHCLの方が明らかによかったにもかかわらず、logMARによる視力検査ではその差を検出できなかった。このことから、波面収差測定は、通常の視力検査では評価しきれない微妙なQOVの違いを他覚的かつ定量的に評価でき、CL装用中の視機能評価に有効であることが示唆

された。

3. CLのフィッティングとQOV

1) 従来型非球面CLの光学特性

CLのフィッティングは、デザインや材料特性によって異なるが、瞬目とともに良好な涙液交換が得られることが重要である⁶⁾。そのため、CLは瞬目によって常に眼の表面で動く環境にあり、CLの幾何中心と瞳孔中心とのズレがQOVに影響を及ぼす可能性がある。一方、CLのQOVを向上させる試みは古くから行われており、非球面化によるCL単体の球面収差補正はもとより⁷⁾、装用眼を含めた「CL+眼球光学系」での球面収差補正を謳った非球面CLがすでに登場している。更に近年では、個々のCL装用眼に合わせ高次収差をカスタムメイドで補正する研究が進んでいる⁸⁾。しかし、いずれも光学設計思想が光学機器と同様で、CLと眼球光学系が軸上で一致していることが前提になっていることから、臨床においてどこまで効果があるのかは疑問が残る。そこで我々は、非球面CL (以下 従来型非球面CL) のフィッティングが装用中のQOVに及ぼす影響を検討した。

(1) 方法

光学設計ソフト (ZEMAX® Engineering Edition,

ZEMAX Dev. Corp., WA, USA) を使用し、コンピュータ上に従来型非球面 CL のフィッティング条件を含む CL/涙液/眼球光学系の装用モデルを構築し、光学シミュレーションでの光学特性を評価した。光学特性は、各試験条件下の CL 装用状態において模型眼の網膜面を正視化し、最良像面位置での波面収差解析を行った。眼球光学系には、瞳孔径を 3.5 mm とした Gullstrand 模型眼 (体調状態)⁹ を用い、0.05 mm の涙液層⁹ を介して非球面 CL が装用されている状態を構築した。フィッティング条件は、CL のなかで最もダイナミックなフィッティングを示す HCL を想定し、模型眼の瞳孔中心と CL 幾何中心が一致した状態 (以下 中央安定時) と、CL 幾何中心が模型眼の角膜表面に沿って上方へ 5° および、10° 偏心した状態 (偏心

時) の 3 条件とした。従来型非球面 CL は、図 5 であらわされる回転対称な非球面形状であり、中央安定時での高次収差が最小となるよう CL 外面形状を最適化した。なお、対照を球面 CL としたが、通常、球面 CL では球面収差が存在し、また、その量は度数によって異なることが予想されるため¹⁰、ここでは低度のマイナズレンズ (-3.00 D) と高度のマイナズレンズ (-10.00 D) での評価を行った。

(2) 結果

従来型非球面 CL は、球面 CL に比べ明らかに球面収差が減少し、レンズ度数にかかわらず CL 装用モデルの光学特性は向上した。しかし、中央安定時に比べ偏心時ではコマ収差の増加が顕著であり、偏心量が大きいほど光学特性は低下した (図 6、表 3)。

(3) 小括

中央安定時における従来型非球面 CL の装用モデルは、球面 CL の装用モデルに比べ球面収差の減少により光学特性が向上したが、偏心時では偏心量が大きいほどコマ収差が増加し、光学特性は低下した。ここで用いた従来型非球面 CL は、中央安定時において球面収差を補正するよう前面光学部を最適化した設計であった。しかし、CL は瞬目によって常に眼の表

$$Y = \frac{C \cdot X^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K) \cdot C^2 \cdot X^2}}$$

図 5 コーニック係数の関係式
 C: レンズ曲率半径の逆数, Y: レンズ原点から光軸方向の距離, X: レンズ原点から半径方向の距離, K: コーニック係数 (K = -(離心率)²)

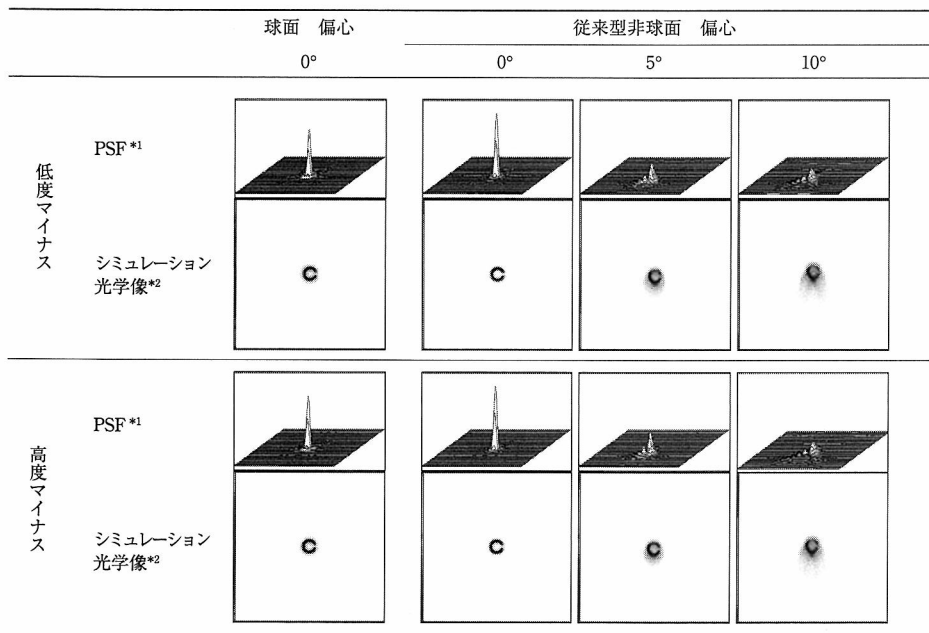


図 6 従来型非球面 CL の光学特性結果

*1: Point spread function (点像強度分布)

*2: 視力 1.0 相当のランドルト環を用いたシミュレーション光学像

面で動く環境にあり、CLの幾何中心と瞳孔中心との軸ズレによってコマ収差が増加したため、CLには光学機器と同様に、レンズ群が同軸上にあることを前提とした非球面化の手法は、必ずしも適切ではないと思われる。よって、軸ズレが発生する実際のCL装着条件下では、フィッティングを考慮した新たな非球面化の設計手法を考える余地があると思われる。

2) 新型非球面 CL の光学特性

CLにとって非球面の設計は、光学的な収差補正の用途とは別に採用する目的がある。一般的にCLは、内面側を非球面で角膜形状に近似することで、角膜への圧迫が均一化されて中央安定しやすいフィッティングが得られる。高度なパワーを有するCLほど、CL外面側の非球面化と合わせてレンズ周辺厚が薄く

表3 従来型非球面 CL の波面収差解析

		μm			
	球面 偏心	従来型非球面 偏心			
		0°	0°	5°	10°
低度 マイナ ナス	球面収差 C_4^0	0.09	0.00	0.00	0.01
	コマ収差 C_3^{-1}	0.00	0.00	0.24	0.45
高度 マイナ ナス	球面収差 C_4^0	0.07	0.00	0.00	0.01
	コマ収差 C_3^{-1}	0.00	0.00	0.21	0.40

表4 新型非球面 CL の波面収差解析

		μm		
	球面 偏心	新型非球面 偏心		
		0°	5°	10°
低度 マイナ ナス	球面収差 C_4^0	0.09	0.09	0.09
	コマ収差 C_3^{-1}	0.00	0.01	0.02
高度 マイナ ナス	球面収差 C_4^0	0.08	0.08	0.08
	コマ収差 C_3^{-1}	0.00	0.02	0.04

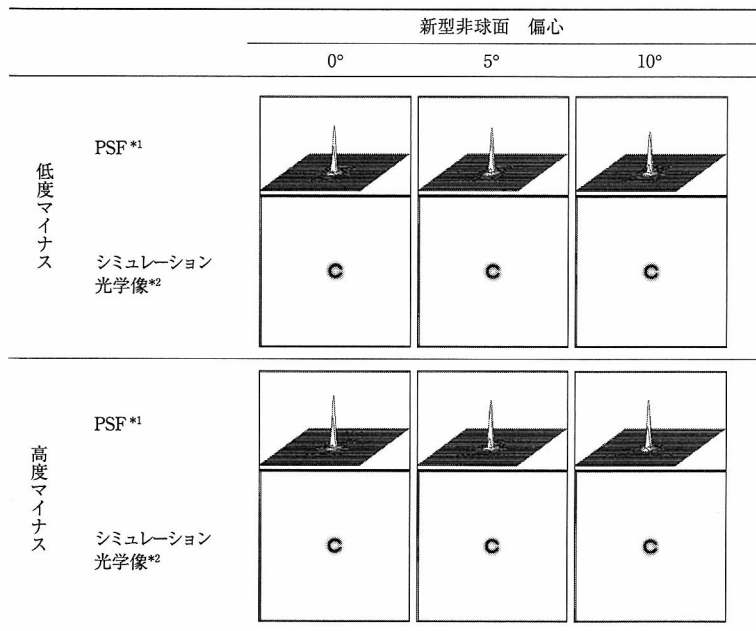


図7 新型非球面 CL の光学特性結果

*1 : Point spread function (点像強度分布)

*2 : 視力 1.0 相当のランドルト環を用いたシミュレーション光学像

なり、装用感が向上するなどの患者への利点がある。また、1規格のベースカーブで対応できるフィッティング適応範囲が広がり、CL規格数を削減できるため、処方方法の簡便化や製造コスト軽減につながるなどの処方者側や製造側への利点もある。そのため、CLにおいて最適な非球面デザインを検討することは、よりよいCLを提供していく上で大変重要である。しかし、これまでフィッティングと光学特性の両者を同時に考慮した非球面化の条件については十分に検討されてこなかった。そこで我々は、CLのフィッティングを考慮した収差補正CLの非球面化の条件を検討した。

(1) 方法

前述で用いた従来型非球面CLは、CLの幾何中心と眼球光学系の瞳孔中心が一致した中央安定時でのみ、球面収差を矯正する設計であったことが、偏心時の光学特性低下に影響を及ぼしたものと思われる。そこで、今回新たに検討した非球面CLは（以下 新型非球面CL）、中央安定時および偏心時の両条件において、高次収差が同等かつ最小となるようCL外面形状を最適化することで、フィッティングによるQOVへの影響を軽減させることを試みた。最適化には光学設計ソフトZEMAXを使用し、新型非球面CLのフィッティング条件を含むCL/涙液/眼球光学系の装用モデルにおける波面収差を評価した。フィッティング条件は、前述と同様に眼球光学系の瞳孔中心とCL幾何中心が一致した中央安定時と、CL幾何中心が模型眼の角膜表面に沿って、上方へ5°および10°偏心時の3条件とし、レンズ度数は低度マイナスレンズ（-3.00D）と高度マイナスレンズ（-10.00D）で検討した。

(2) 結果

新型非球面CLは、従来型非球面CLに比べ中央安定時では球面収差が残存することで光学特性がやや低下するものの、ランドルト環のシミュレーション光学像で視認できるほどの違いは認められなかった。偏心時では、新型非球面CLの方が従来型非球面CLに比べ明らかにコマ収差が減少し、従来型非球面CLに比べ偏心量が大きいほど光学特性は向上した（図6, 7, 表3, 4）。また、新型非球面CLの中央安定時と偏心時の光学特性は同等であった（図7, 表4）。

(3) 小括

フィッティングによるQOVへの影響を軽減する新たな手法として、新型非球面CLの効果を光学シミュ

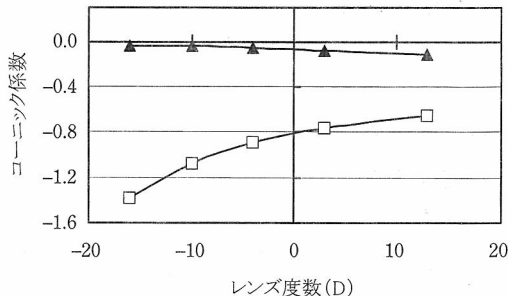


図8 CL外面非球面形状の比較
□：従来型非球面，▲：新型非球面

レーションにて評価した。その結果、新型非球面CLは、従来型非球面CLの偏心時にみられたコマ収差が大幅に減少、かつ新型非球面CLの中央安定時と偏心時では同等の光学特性が得られていた。このことから、新型非球面CLは人によって異なる安定位置や瞬目時の動きなどのフィッティング状態にかかわらず、実装用でも安定したQOVを提供できる可能性が示唆された。

なお、度数違いによる光学特性への影響において顕著な差は認められなかった。しかし、従来型非球面CLと新型非球面CLの外面形状の差を度数ごとにコーニック係数で比較すると、高度マイナスレンズほど顕著な差があり、設計思想の違いが大きくあらわれていることがわかる（図8）。また、光学シミュレーションにおける眼球光学系には度数別の適切なモデルが存在しないことから、ここでは簡易的に網膜面に相当する像面位置のみを正視化させて評価したため、実装用における光学特性との差は高度マイナスレンズほど大きいものと推測される。これらのことから、光学シミュレーションでの検討に加え、臨床評価による詳細な検証が重要であると考えられた。

3) 新型非球面CLの臨床評価

先の光学シミュレーションによる結果を受け、新たな収差補正CLとしての新型非球面CLが、どの程度臨床的に有効なのかを確かめる必要がある。そこで、実際に従来型非球面CLと新型非球面CLを製作して評価した。

(1) 対象および方法

光学シミュレーション時の想定と同様に、フィッティングの影響が最も大きいと考えられるHCLにお

ける従来型非球面 CL と、新型非球面 CL を低度マイ
ナスレンズ (-3.00 D) と高度マイナスレンズ (-10.00 D)

表5 試験 CL の詳細

仕様	
Dk 値 ^{*1}	163
USAN ^{*2}	tisilfocon A
基材	Fluoro-methacrylate, Siloanylstyrene
屈折率	n_d^{20} 1.44
中心厚み	0.13mm (-3.00D)

*1: 酸素透過係数 (ISO 法), 単位: $\times 10^{-11}$ (cm²/sec) · (m μ O₂/m μ × mmHg)

*2: United States Adopted Names (材料名)

で製作した。HCL は、表5に示したハイパークラスの酸素透過性 HCL (rigid gas-permeable, RGPCl) を用いた。対象は、健常な HCL 装用経験者の20例40眼 (男性12例24眼, 女性8例16眼) とした。年齢は31.4 ± 3.9 歳 (平均値 ± 標準偏差, 以下同様), 球面度数 -4.28 ± 2.76 D (範囲 +0.50 ~ -9.50 D), 乱視度数 -0.71 ± 0.28 D (範囲 -0.50 ~ -1.50 D) であった。従来型非球面 CL と新型非球面 CL を両眼同種でランダムに装用させ, 両眼球面矯正時の logMAR (コントラスト100%, 10%) 検査による自覚的 QOV 評価と, 高次収差測定による他覚的 QOV 評価を行った。logMAR には CSV-1000[®] を, 高次収差測定には

表6 logMAR の結果

コントラスト		低度マイナス		高度マイナス	
		中央安定	中央以外	中央安定	中央以外
100%	従来型	-0.03 ± 0.06	-0.06 ± 0.09	-0.09 ± 0.02	-0.05 ± 0.07
	新型	-0.04 ± 0.07	-0.06 ± 0.07	-0.06 ± 0.04	-0.06 ± 0.05
10%	従来型	0.10 ± 0.09	0.08 ± 0.09	0.08 ± 0.08	0.09 ± 0.08
	新型	0.09 ± 0.06	-0.05 ± 0.43	0.05 ± 0.04	0.06 ± 0.07

* p<0.05, paired t-test

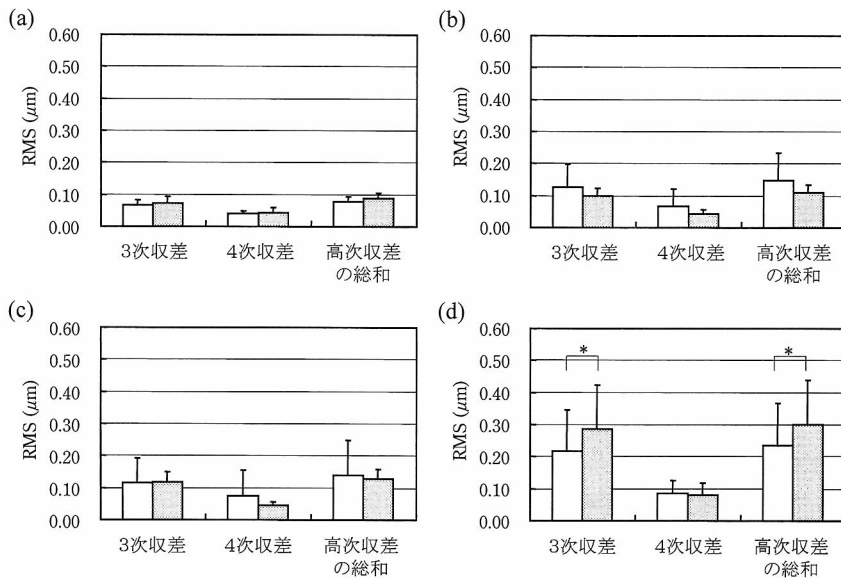


図9 高次波面収差の結果

低度マイナス: (a) 中央安定, (b) 中央以外

高度マイナス: (c) 中央安定, (d) 中央以外

□: 新型非球面, ■: 従来型非球面

* p<0.05, paired t-test

Hartmann-Shack 波面センサー (KR-9000PW®) を用いた。今回用いた logMAR 検査や高次収差測定では、瞬目による動きの影響は評価できないが、波面センサーで得られるマイヤー像から HCL の瞬目後の静的安定位置を解析できる。ここでは、全結果を中央安定と中央以外の 2 種に分類して解析を行った。

(2) 結果

低度マイナスレンズ装用時において、新型非球面 CL の logMAR と高次収差は、安定位置にかかわらず、従来型非球面 CL と比較して有意差は認められなかった (表 6)。高度マイナスレンズ装用時において、中央安定の群では両者に有意な差は認められなかったが、中央以外の群では logMAR のコントラスト 10% および 3 次収差、高次収差の総和で新型非球面 CL の方が有意に低かった (図 9)。

(3) 小括

新型非球面 CL は、高度マイナスレンズおよび中央以外の安定位置において、従来型非球面 CL に比べ自他覚ともに良好な成績が得られた。これは、光学シミュレーションによる理論的検討と一致した結果であり、新型非球面 CL に施した偏心時のコマ収差軽減デザインが有効であったと思われる。したがって、従来型非球面 CL ではフィッティング状態によっては QOV 低下を招く恐れがあるが、新型非球面 CL では人によって異なる安定位置や瞬目時の動きに影響されにくく、CL 矯正における QOV 向上に有用であることが臨床的にも示唆された。

4. 総括

本稿では、CL の光学特性と QOV について、とくにフィッティングの影響を中心にまとめた。現在、様々な種類が存在する CL は見え方の訴えもまた様々である。これまで、自覚的に微妙な QOV の違いを定量的に評価することは困難であったが、高次収差と自覚的訴えとは相関があり、波面収差解析が CL 装用中の客観的な QOV 評価に有効であることを示した。更に、フィッティングの影響について実装用モデルでの光学シミュレーションにて検討を行った結果、偏心時におけるコマ収差の増加をいかに押さえるかが、QOV 向上にとって重要であることを示した。眼のなかで常に CL の位置関係が変化する状況下において、理想的な CL の光学特性とは、光学機器のようにある一定条件 (ここでは、中央安定時) でのみ高い

光学特性を示すのではなく、新型非球面 CL として示したように、中央安定時と偏心時の両条件で同等な光学特性を示すことが重要であり、それが理論的にも臨床的にも QOV 向上につながることを示した。

このように、フィッティングを含めた実装用での高次収差を補正する技術が進めば、CL 装用中の QOV は更に向上できる可能性がある。しかし、本稿で紹介した評価方法は、自他覚ともにある一瞬の静的な QOV の評価に過ぎない。更なる QOV 向上を追求するためには、CL の動きや CL 表面の涙液動態が QOV に及ぼす影響などの動的な QOV を評価する研究が必要であると思われる。

謝辞

稿を終えるにあたり、いつも生理光学の面から温かくご指導をいただいております東京工芸大学工学部視覚工学研究室 畑田豊彦教授、臨床試験をご協力いただきました大阪大学大学院眼科学教室の高 静花先生、波面収差測定にご協力いただきました(株)トプコン研究所の三橋俊文氏ならびに広原陽子氏、コンタクトレンズの光学設計や光学シミュレーションに関してご教授いただきました(株)メニコン総合研究所の小林 敦氏に深謝いたします。

文献

- 1) Barr JT: The contact lens spectrum millennium report. *CL Spectrum* 14: 24-30, 2000.
- 2) Thibos LN, Cheng X et al: Design principles and limitations of wave-front guided contact lenses. *Eye & Contact Lens* 29(1S): S167-S170, 2003.
- 3) Hong X, Himebaugh N et al: On-eye evaluation of optical performance of rigid and soft contact lenses. *Optom Vis Sci* 78: 872-880, 2001.
- 4) 広原陽子, 中澤直樹他: <解説>人眼の波面収差測定. *Vision* 13: 99-105, 2001.
- 5) Thibos LN, Applegate RA et al: Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *J Refract Surg* 18: S652-660, 2002.
- 6) 丸山邦夫, 横井則彦: コンタクトレンズ装用時のティアドायナミクス. *日コレ誌* 45: 60-65, 2003.
- 7) Hammer RM & Holden BA: Spherical aberration of aspheric contact lenses on eye. *Optom Vis Sci* 71: 522-528, 1994.
- 8) 魚里 博: 模型眼. 新臨床眼科全書, 3A: 46, 金原出版, 東京, 1989.
- 9) Nichols JJ & King-Smith PE: Thickness of the pre- and post-contact lens tear film measured in vivo by interferometry. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44: 68-77, 2003.
- 10) Dietze HH & Cox MJ: On- and off-eye spherical aberration of soft contact lenses and consequent changes of effective lens power. *Optom Vis Sci* 80: 126-134, 2003.

原 著

比較的小さな視対象の両眼視差変化が奥行き運動知覚に及ぼす影響

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マルチモダリティ研究グループ^{**}中京大学文学研究科, ^{***}防衛大学校応用物理学科

Effects of Changes in Binocular (Horizontal) Disparity of Relatively Small Target on Perception of Motion in Depth

Ryo Kozawa^{*,**}, Hiroyasu Ujike^{*} and Shinya Saida^{***}^{*} Multi Modal Integration Group, Institute for Human Science and Biomedical Engineering, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology^{**} Chukyo University, ^{***} National Defense Academy

比較的大きな視標 (30×30°) で両眼視差のみが変化する場合、視標の奥行き運動は知覚されない。本実験では、比較的小さな視標 (0.24°, 0.48°, 0.96°) の両眼視差変化が単独で奥行き運動知覚に与える影響を調べた。視標の大きさを一定に保ったまま両眼視差を正弦波状に変化させ、同時に観察者の輻湊・開散眼球運動を測定した。観察者は視標を注視し、知覚された奥行き運動の方向と振幅とを報告した。その結果、視標の両眼視差変化に伴う奥行き運動が知覚されたが、視標の大きさが増加するにつれて、知覚される奥行き運動の振幅は有意に減少した。一方、輻湊・開散眼球運動の振幅は視標の大きさの影響を受けなかった。このことから、比較的大きな視標で両眼視差のみが変化する場合、大きさ変化の欠如が奥行き運動に関する情報の非整合性を生じ、奥行き運動知覚が抑制されると考えられる。 (視覚の科学 27: 11-16, 2006)

キーワード：両眼視差変化, 奥行き運動知覚, 輻湊・開散眼球運動

Changes in the binocular disparity of a relatively large target (30 x 30 degree) alone do not produce perception of motion in depth. In this study, we examined the effects of binocular disparity of relatively small targets (0.24, 0.48 or 0.96 degree) on perception of motion in depth. While changing the binocular disparity of the target sinusoidally without changing its size, vergence eye movements were measured. The task for observers was to look at the target and estimate perceived motion in depth. Motion in depth was perceived only from changes in binocular disparity; as the target became larger, however, perceived extent of motion in depth decreased significantly. Moreover, target size had no effect on the amplitude of vergence eye movements. These results suggest that inconsistent information on size and binocular disparity inhibit perception of motion in depth, when using a relatively large target whose binocular disparity alone is changed. (Jpn J Vis Sci 27: 11-16, 2006)

Key Words: Changes in binocular disparity, Perception of motion in depth, Vergence eye movements

別刷請求先：466-8666 名古屋市昭和区八事本町 101-2 中京大学心理学部 小澤 良
(2006年3月2日受理)

Reprint requests to: Ryo Kozawa School of Psychology, Chukyo Univ
101-2 Yagoto Honmachi, Showa-ku, Nagoya 466-8666, Japan
(Received and accepted March 2, 2006)

1. 緒 言

3次元空間において視対象の奥行き運動を知覚する際、両眼視差、網膜像差、網膜像の大きさ変化、輻湊・開散眼球運動、網膜像のぼけ、陰影の変化など様々な手掛かりが利用されると考えられる。とくに、両眼視差 (binocular disparity) 変化が奥行き運動知覚に与える影響に関しては多くの焦点があてられてきた¹⁻⁴⁾。ただし、両眼視差変化のみによって奥行き運動知覚が生じるかどうかについてはいまだ検討の余地がある。まず、両眼視差変化のみでは奥行き運動知覚が生じないとする報告がある^{1, 2)}。Erkelens と Collewijn³⁾は、観察者の視野内に視標 (30×30°のランダムドット) のみを提示し、その両眼視差を三角波状に変化させたところ、視標の奥行き運動は知覚されず、静止して見えることを報告した。しかし、視野内に視標以外の注視点や参照物が提示されている場合、視標の両眼視差変化により奥行き運動が知覚された。これらのことから、彼らは両眼視差の変化は奥行き運動知覚に寄与せず、奥行き運動知覚を生み出すのは、距離が異なる二つ以上の視対象に対する両眼視差の差 (相対網膜像差: relative disparity²⁾) の変化であるとしている^{1, 3)}。これに対し、Brenner⁴⁾は両眼視差と大きさを同時に、または一方のみを変化させることで、両眼視差が奥行き運動の速度知覚に影響を与えることを示した (大きさの変化の範囲は1.4 ~ 5.7°: Brenner⁴⁾より筆者らが算出)。彼らの結果は、両眼視差のみの変化では奥行き運動が全く知覚されなかったのに対し、両眼視差と大きさを奥行き変化の情報として整合するように同時に変化させた場合、奥行き運動の知覚速度は、大きさをのみを変化させた場合よりも大きくなることを示した。

Erkelens と Collewijn³⁾の条件下では、両眼視差変化による奥行き運動の情報が、視標の大きさ不変による情報と整合しないことにより減衰した可能性がある³⁾。この考え方に従えば、Brenner⁴⁾が報告した両眼視差変化による奥行き運動知覚の増大の効果はよく説明される。ただし、この効果は大きさ変化を伴うことでみられたものであり、両眼視差変化が単独で奥行き運動知覚をもたらすか否かに関しては明らかではない。

網膜像の大きさ変化が両眼視差変化による奥行き運動知覚に影響を与えているのであれば、視対象の

大きさが小さく、奥行き運動に伴う大きさ変化の量も小さい状況では、網膜像の大きさが不変であることによる情報の整合性の欠如は緩和されて、両眼視差変化のみでも奥行き運動が知覚されることが考えられる。Regan と Beverley⁵⁾は、正弦波状 (2 Hz) に拡大・縮小を繰り返す様々な大きさの視標を提示し、その大きさ変化に対する閾値を測定した。その結果、視標の初期の大きさが増加するにつれ、拡大・縮小の振幅を検出できる感度が上昇した。つまり、大きさ変化の閾値は視標の大きさに依存し、視標が小さくなるにつれて閾値は上昇し、小さな変化が検出しにくくなる。このため、視標の大きさが比較的小さい場合、奥行き運動に伴う網膜像の大きさ変化も小さくなるため、実際には大きさ変化が存在しなくとも、視覚系にとって両眼視差変化と大きさ変化の情報の整合性の欠如の問題が緩和され、奥行き運動が知覚される可能性がある。また、両眼視差変化のみによる奥行き運動知覚が視標の大きさに依存するのであれば、両眼視差変化量が同一であっても、視標が大きくなるにつれ、知覚される奥行き運動が小さくなることが考えられる。

これらのことから、本研究では以下の二つを目的とし、比較的小さな視標を用いて、その大きさを一定に保ったまま、両眼視差を変化させた場合の奥行き運動知覚を測定した。すなわち、1) 両眼視差のみが変化する場合でも、奥行き運動知覚が生じるか否かを明らかにする。2) 奥行き運動知覚が生じる場合、視標の大きさが両眼視差変化による奥行き運動知覚に与える影響を明らかにする。

2. 対象ならびに方法

1) 観察者

晴眼者 (視力 1.0 以上) で、立体視能力 (両眼視差 40" 以下の奥行きを識別) をもった成人 3 名 (MM: 20歳; NM: 21歳; RK: 35歳) が観察者として参加した。立体視能力の検査は両眼立体視検査表 (Randot stereotest: Stereo Optical Co., Inc) を用いた。いずれの観察者からもインフォームド・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) 実験装置

図 1 に実験装置を示す。視標はコンピュータ (Apple: PowerMac 9600/300) によって制御された CRT (Sony: FD Trinitron GDM-F400) 上に、右眼用

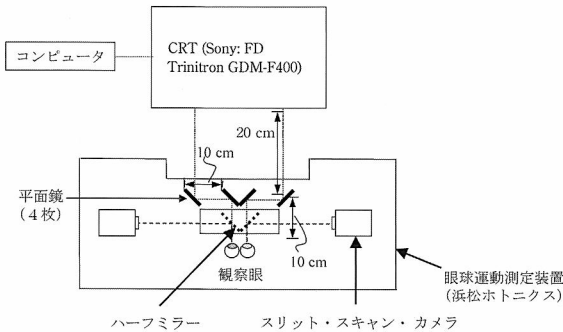


図1 実験装置の図

CRT上に提示した視標の水平位置をそれぞれ反対方向に移動させることで輻湊・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。

の視標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、観察者は左右眼の視標を融像して観察した。CRTの描画領域は縦×横が768×1,024 pixelであり、左右眼の視標はいずれも4.1×7.8° (86×162 pixel)の大きさで、描画のフレーム周波数は75 Hzであった。観察者には視標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⁷⁾)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°, 分解能は0~360 Hzの帯域で、6'である。

3) 視標

視標は背景(0.01 cd/m²)上に提示された一様に白色の正方形(1.4 cd/m²)で、左右眼に独立に提示された。観察者から視標までの視距離は40 cmとし、視標の両眼視差は、正弦波状に1周期分の距離変化(0.0625 Hz)を模擬するように交差、または非交差方向へそれぞれ3.1° (64 pixel)変化させた。これは視距離40 cmの位置にある視標が観察者に対し30 cmまで接近し、または59 cmまで後退する運動を模擬

していた。また視標の大きさは3種類(一辺の長さが0.24°, 0.48°, 0.96°。それぞれ5, 10, 20 pixel)が設けられた。視標の運動方向に対する観察者の予測を排除するため、視標の両眼視差変化が交差方向に開始される場合と非交差方向に開始される場合との2種類が用いられた。

4) 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、両眼各々の視標提示領域中央とその左右に0.75°の間隔で二つずつ、合わせて五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視標を一つずつおよそ2秒間注視し、その間の眼球運動が記録された。次に、視標が提示され、更に観察者自らの合図により試行が開始された。視標変化終了後、視標は変化開始直前の状態に戻り、5秒間提示され続けた。各試行において、観察者の課題は視標の中心を注視し、視標提示の間はできるだけ瞬目をしないようにすることだった。また、1試行終了ごとに試行中視標の両眼単一視が維持されていたかが確認され、維持されていた場合には、更に知覚された視標の奥行き運動の方向と、その振幅値をcm単位で答えるよう指示された。観察者1名につき、視標の両眼視差変化が、交差方向へ開始される場合と、非交差方向へ開始される場合と、それぞれ40回ずつランダムに行われた。10回程程度の試行が行われる30分間のセッションごとに、10分の休息をとった。

5) 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(AD Instruments: 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。また、視標変化開始前にどちらか一方の眼が0.5°以上動いた場合もそのデータは破棄された。輻湊角は両眼位置の差分から求められた。

3. 結 果

図2に得られた輻湊・開散眼球運動による輻湊角の時間変化を示す。これは観察者1名のもので、視標変化開始時に、両眼視差が交差方向に変化する場

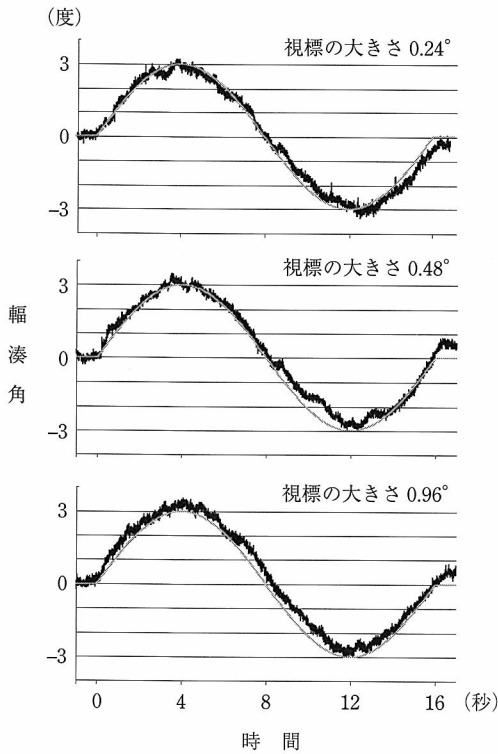


図2 両眼視差変化に対する輻湊角の変化
縦軸の上方は輻湊眼球運動方向を、下方は開散眼球運動の方向を示す。

合についての例を視標の大きさごとに示したものである。この図では、輻湊・開散眼球運動は両眼視差の変化によく対応した応答を示しているが、すべての観察者に対してすべての試行で同様の応答がみられた。また、全試行で視標が二重に見えることはなかった。

視標の両眼視差変化に伴う輻湊・開散眼球運動の振幅値を観察者ごとに、視標の大きさ別に平均値を求めたものを図3に示す。輻湊眼球運動と開散眼球運動のそれぞれの最大値の差分を輻湊・開散眼球運動の振幅値とした。先に輻湊眼球運動を開始した場合と開散眼球運動を開始した場合とで振幅値に差はみられなかった (t検定: 最も高いt値が得られた場合でも $p>0.8$) ため、図3では両者を合わせた結果を表示している。結果から、いずれの観察者とも異なる視標の大きさで振幅値はほぼ同一であり、5%の有意水準でも差のないことが確認された (分散分析: 最も大きなF値が得られた場合でも $F(2, 115)=2.47$)。

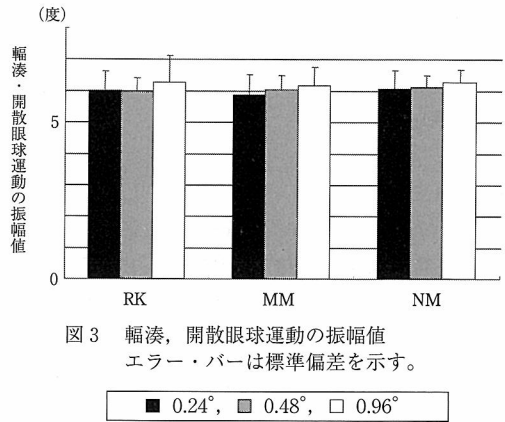


図3 輻湊, 開散眼球運動の振幅値
エラー・バーは標準偏差を示す。

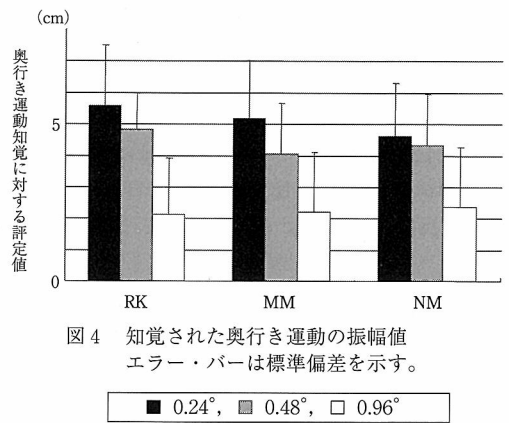


図4 知覚された奥行き運動の振幅値
エラー・バーは標準偏差を示す。

次に、視標の両眼視差変化に伴って知覚された奥行き運動の振幅値を観察者ごとに、視標の大きさ別に平均値を求めたものを図4に示す。先に輻湊眼球運動を開始した場合と開散眼球運動を開始した場合とで、振幅値に差はみられなかった (t検定: 最も高いt値が得られた場合でも $p>0.07$) ため、図4では両者を合わせた結果を表示している。結果から、いずれの観察者とも異なる視標の大きさで振幅は1%の有意水準で異なっている (分散分析: 観察者 RK : $F(2, 115)=47.07$; 観察者 MM : $F(2, 99)=23.86$; 観察者 NM : $F(2, 92)=20.50$)。更に、下位検定の結果、すべての観察者で視標の大きさが0.24°の場合、0.48°の場合に比べて知覚された奥行き運動量は有意に大きく (観察者 RK : $df=115, t=2.03, p<0.05$; MM : $df=99, t=2.70, p<0.01$; NM : $df=92, t=2.19, p<0.05$)、0.96°の場合に比べても有意に大きかった (観察者 RK : $df=115, t=9.25, p<0.01$; MM : $df=99, t=6.90, p<0.01$; NM : $df=92, t=6.35, p<0.01$)。更に、

0.48°の場合は0.96°に比べ知覚された奥行き運動量は有意に大きかった(観察者 RK: $df=115$, $t=7.25$, $p<0.01$; MM: $df=99$, $t=4.04$, $p<0.01$; NM: $df=92$, $t=4.15$, $p<0.01$)。

4. 考 按

本実験では, Erkelens と Collewijn⁹⁾が用いたよりも小さな視標 (0.24°, 0.48°, 0.96°) を用いて, 両眼視差のみを変化させた場合に生じる奥行き運動知覚を測定した。その結果, 以下のことが示された。1) 比較的小さな視標では, 視標の両眼視差のみの変化でも, 奥行き運動が知覚される。2) 視標の大きさの増加とともに, 知覚される奥行き運動は減衰する。3) 視標の大きさは, それを追従する輻湊・開散眼球運動に影響を与えない。

本実験では, 視標の両眼視差変化のみで輻湊・開散眼球運動が生じ, 奥行き運動が知覚されたが, 両眼視差変化に伴う輻湊・開散眼球運動が奥行き運動知覚と関連している可能性が生理学的に報告されている。前頭眼野 (frontal eye fields 以下 FEF) 後部には輻湊・開散眼球運動に関連して反応する細胞があることが知られている⁸⁾。Akao ら⁹⁾は, 正弦波状に両眼視差変化する点領域 (直径0.2°) に対するサルの輻湊・開散眼球運動と FEF 後部の細胞の反応を調べた。それによれば, FEF 後部の細胞は両眼視差変化に伴う輻湊・開散眼球運動の位置や速度に関連して反応を示した。また, サルに静止した点領域を注視させ, 別の点領域 (直径0.6°) の両眼視差を正弦波状に変化させた。この場合, 相対網膜像差変化による奥行き運動知覚が生じると思われるが, 輻湊・開散眼球運動に関連して反応する細胞のうち約半数は, 視標の両眼視差変化に対しても反応した。このことから, 両眼視差変化に伴う輻湊・開散眼球運動が奥行き運動知覚と関連することが考えられる。ただし, 本実験では輻湊・開散眼球運動の振幅値は, 視標の大きさによらず一定であったのに対し, 知覚された奥行き運動量は, 視標の大きさとともに減少しており, 両者の間に量的な関連性が見い出せなかった。これは, 視標が大きくなるほど視標の大きさの変化が検出しやすくなる⁹⁾ため, 両眼視差変化と大きさの変化との視覚処理系での情報としての整合性が維持されにくくなる。このことは輻湊・開散眼球運動による情報が大きさの情報により, 抑制されることを示唆していると思われる。

本実験のように視標をモニター上に提示した場合, 調節必要量は一定であり, 両眼視差変化との間の整合性が維持されない。視標が小さい場合には, 調節変化が生じやすくなるためこの整合性が維持されやすくなり, 奥行き運動が知覚されたことも考えられる。しかし, 調節が奥行き知覚に影響を与えるか否かに関しては諸説があり¹⁰⁻¹²⁾, 明確ではない。

両眼視差変化による輻湊・開散眼球運動と奥行き運動知覚との関連については, 両者に対する機能不全を示す症例からも推察できる。下野・中溝¹³⁾は, 両眼視差の交差変化による奥行き運動を知覚しない患者に対し, 両眼視差のパルス変化に対する輻湊・開散眼球運動を調べた。その結果, 両眼視差の非交差変化に対し開散眼球運動が生じたが, 交差変化に対し輻湊眼球運動は生じなかった。また, 交差・非交差いずれの両眼視差変化に対しても奥行き運動知覚を生じない患者では, 両眼視差変化に対し輻湊・開散眼球運動ともに生じなかった。このことは, 輻湊・開散眼球運動と奥行き運動知覚との間に共通する処理機構が存在することを示唆する。

本実験から, 大きさの変化は両眼視差変化よりも奥行き運動知覚に対して優位に影響を与えることが示された。同様のことは, 小澤ら¹⁴⁾によっても示されている。彼らは, 視標の大きさと両眼視差の変化がそれぞれ逆の奥行き運動情報をもつ場合, 大きさ変化に対応した奥行き運動が知覚されることを報告している。更に, 両眼視差変化がなく, 大きさ変化のみによっても奥行き運動が知覚されることが報告されている⁹⁾。一方で, 両眼視差は大きさと同時に変化することで, 知覚される奥行き運動の速度は, 大きさのみが変化する場合より速くなり⁹⁾, 大きさ変化のみが奥行き運動知覚を生じさせているのではなく, 両眼視差変化も影響を与えていることが示唆される。

両眼視差と大きさのそれぞれの変化に関する情報が, どのような相互作用によって奥行き運動知覚に寄与しているかは, いまだ明らかではない。その一つの原因として, これまでの報告^{1, 2)}では, 一方の情報の変化を提示したとしても, 他方の情報が存在しないのではなく, 変化しない情報として存在しており, 情報による効果が比較しにくいということが挙げられる。しかし, 本実験では視標を小さくすることによって, 大きさが変化しないことによる影響を知覚的にはある程度排除できたと考えられる。したがって, 両眼視差と大きさのそれぞれの変化に関す

る情報が、どのような相互作用によって奥行き運動知覚に寄与しているのかについて、更なる定量的な検討が必要である。

文 献

- 1) Erkelens CJ & Collewijn H: Motion perception during dichoptic viewing of moving random-dot stereograms. *Vision Res* 25: 583-588, 1985.
- 2) Collewijn H & Erkelens CJ: Binocular eye movements and perception of depth. In: Kowler E ed, *Eye Movements and Their Role in Visual and Cognitive Process*, 213-261, Elsevier, Amsterdam, 1990.
- 3) Brenner E, Van Berg D et al: Perceived motion in depth. *Vision Res* 36: 699-706, 1996.
- 4) Regan D, Beverly KI et al: The visual perception of motion in depth. *Sci Am* 241: 136-151, 1979.
- 5) Brenner E & Smeets JB: Comparing extra-retinal information about distance and direction. *Vision Res* 40: 1649-1651, 2000.
- 6) Regan D & Beverley KI: Visual fields for frontal plane motion and for changing size. *Vision Res* 23: 673-676, 1983.
- 7) Saida S, Ono H et al: Closed-loop and open-loop accommodative vergence eye movements. *Vision Res* 41: 77-86, 2001.
- 8) Fukushima K, Yamanobe T et al: Coding of smooth eye movements in three-dimensional space by frontal cortex. *Nature* 419: 157-162, 2002.
- 9) Akao T, Kurkin SA et al: Visual and vergence eye movement-related responses of pursuit neuron in the caudal frontal eye fields to motion-in-depth stimuli. *Exp Brain Res* 164: 92-108, 2005.
- 10) Grant V: Accommodation and convergence in visual space perception. *J Exp Psychol* 31: 89-104, 1942.
- 11) Foley JM: Effect of distance information and range on two indices of visually perceived distance. *Perception* 6: 449-460, 1977.
- 12) Fischer SK & Ciuffreda KJ: Accommodation and apparent distance. *Perception* 17: 609-621, 1988.
- 13) 下野孝一, 中溝幸夫: 両眼網膜視差にもとづく奥行き判断とパーゼンス反応. *テレビジョン学会技術報告* 13: 1-6, 1989.
- 14) 小澤 良, 氏家弘裕^註: 視対象の大きさ変化が両眼視差による輻湊・開散眼球運動に及ぼす影響. *Vision* 18: 11-21, 2006.