点回折干渉計を用いたコンタクトレンズの波面測定について*

格内 敏** 高坂奈夫子***

Wavefront Measurement of Contact Lenses by Point Diffraction Interferometer

Satoshi KAKUNAI and Nahoko KOSAKA

Contact lens has much convenience unlike glasses lens. Therefore, it has been used a lot so far after the safety of the contact lens was secured. However, the standard of the contact lens is only geometric parameters of the lens shape. Recently, measurement of contact lens aberration has begun to improve the quality of vision. This report describes wavefront measurement of contact lenses by point diffraction interferometer (PDI). In the experiment, a PDI experimental device for wavefront measurement of contact lens is proposed and the method for alignment of the optical system is considered by error analysis. Next, wavefronts of hard contact lens and soft contact lens are measured. As a result, the contact lenses used for experiments are the same maker, but it is found that the wavefronts of lenses in the same diopter power are different.

Key words: point diffraction interferometer, contact lens, quality of vision, wave aberration, error analysis

1. 緒 言

コンタクトレンズ (CL: Contact lens) は眼の非焦点と乱視などを矯正する方法として、めがねレンズとは異なる多くの利便性があるために、その安全性が確保されるにともない広く普及した。また最近では安価で毎日使い捨てのソフトコンタクトレンズ (SCL: Soft contact lens) も多く販売されている。なお、これまでの CL の研究の多くは、レンズの設計と光学的性能および涙膜の影響等に向けられており、CL の規格は幾何学的パラメーターの値のみが記された¹⁾。その結果、CL 使用者の多くは詳細な違いがわからないまま、広告のキャッチフレーズ等で商品を購入する場合が多い。

一方、近年は眼の矯正効果について、見え方の質 (QOV: Quality of vision) の改善が求められるようになり、CL 装用時における眼の収差測定がおこなわれるようになった^{2)~6)}。その結果、SCL 装用では非装用時より高次収差 (コマ収差、球面収差など) が増加することが報告された。そのため、このような収差を補正した特注コンタクトレンズの設計・製造も新たに始まっている。コンタクトレンズの QOV を考慮する場合、従来の度数のみを決定するレンズ測定器では、波面収差による光学的性能を正確には測定できない。軟らかい SCL の波面収差を高精度で測定するには、溶液中での測定が必要である。波面収差の測定器として、現在は網膜からの反射光を二次元的に並べた小型レンズのハルトマン板を通して CCD 素子で受光して測定する Shack-Hartmann の波面センサーを用いた方法が開発されているが⁷⁾、いくぶん高価な計測システム装置からなる。CL 装用時の QOV の評価は重要であるが、CL 製造時の誤差や水和物などによる収差量を、簡単で安価に検査・管理するための方法が開発されれば、CL の製作技術の改善が多いに期待できる。

本報告では、点回折干渉計 (PDI: Point diffraction interferometer)^{8)~10)}による CL の波面測定について述べる。実験では、生理食塩水の中に置かれた CL を、PDI で測定するた

Fig.1 Schematic diagram of the human eye

めの装置を構築した。はじめに、提案した光学系における測定時のアライメント誤差のシミュレーション解析をおこない、アライメントの方法について考察した。実験では、ある製造メーカーのハードコンタクトレンズ (HCL: Hard contact lens) と SCL の波面測定をおこなった。その結果、同じ度数の HCL と 2 種類の SCL の測定では、波面情報を現す干渉縞に相違が現れた。

2. 視力補正用コンタクトレンズ

図 1 にコンタクトレンズを装着した眼球の水平断面図を示すが、HCL は角膜 (Cornea) より少し小さめで、瞬きのたびに角膜上を移動するが、長時間の装用が可能である。一方、SCL は角膜よりも大きく白目の部分まで覆うが、軟らかくて装用感が良く、激しい運動にも使用できる。外界からの光は角膜を通して屈折して瞳孔 (Pupil) を通過し、さらに水晶体 (Lens) で屈折して網膜 (Retina) に投射される。ここで光は神経信号となり、視神経 (Optic nerve) を通して脳への情報伝達をおこなう。しかし、眼のこのような光学系の調整が不十分な場合、光は網膜上に焦点が合わなくなる屈折異常が生じる。焦点が網膜より手前を近視、網膜より後ろを遠視、さらに、外界からの光の方向によって光の集束が異なる場合を乱視と言う。CL はこのような屈折異常を矯正するために、角膜表面の涙液による表面張力で角膜上に接着する。一方、CL は角膜との距離がほぼゼロに近いことから、めがねに比べて裸眼と変わらない広範囲の視界が得られ、

* 原稿受付 平成 22 年 6 月 2 日

** 正 会 員 兵庫県立大学大学院工学研究科 (姫路市書写 2167)

*** 学生会員 兵庫県立大学大学院 (現、高菱エンジニアリング (株) 兵庫県高砂市荒井町新浜 2-8-19)

Fig.2 Shape of the contact lens

Table 1 Material properties of contact lens

	Diameter mm	Base curve mm	Center thickness mm	Water content %
HCL	8.8	7.5	0.15	
SCL group I	14.0	8.6	0.08	40
SCL group IV	14.0	8.6	0.1	55

網膜上の像にひずみや大きさの変化が無いなど矯正効果に優れている。さらにファッション的には、装用していることがわかりにくいなどの利点がある。その結果、CLの光学特性や診療のための基礎的知識等に関する技術情報や研究・開発が進むに連れて¹⁰⁾¹²⁾、広く普及するようになった。しかし、めがねに比べて装用に伴う眼への負担が大きく、洗浄消毒、装用時間・期間などの制限がある。

従来はCLと言えばHCLであった。HCLはポリメチルメタクリレート (PMMA: Polymethyl methacrylate) を素材として開発されたが、非酸素透過性のために使われなくなり、現在は酸素透過性レンズ (RGPCCL: Rigid gas permeable contact lens) が使われている。HCLは装用中の瞬きによりレンズが動き、涙が入れ替わることで、涙液に含まれる酸素を取り入れることができるため、角膜に多くの酸素を供給することができる。一方、角膜に異常が起これば痛みにより装用できなくなるため、角膜障害が重度になることが少ない。さらに、めがねやSCLでは矯正しにくい角膜の変形による不正乱視への矯正効果も期待できる。

しかし、現在はCLの利便性や装用感の改善が追求された結果、SCLの需要が高まり、使い捨てや頻回交換型のディスポーサブルタイプ (DSCL: Disposable soft contact lens) が登場した。SCLは水溶性高分子から構成され、高分子間を架橋することによって水に膨潤はするが溶けないゲル状態を保つポリヒドロキシエチルメタクリレート (PHEMA: Polyhydroxyethyl methacrylate) や、ポリビニルピロリドン (PVP: Polyvinylpyrrolidone) を主体としたものからなる。SCLの酸素透過性はHCLの場合と異なってレンズの含水率に依存するが、細菌が繁殖しやすく、含水率が高いほど脂質やたんぱく質がレンズに沈着して衛生面での問題が発生するリスクが高い。ただ

Fig.3 Principle of point diffraction interferometer

し、最近は含水率に依存せずに高い酸素透過性が得られるシリコーンハイドロゲル (SH: Silicone hydrogel) を用いたSCLが開発・販売されている。

図2にCLの断面形状を示す。HCLとSCLには大きな形状差はないが、HCLの直径は約9mm、SCLの直径は約14mmと互いに異なる。CLの規格はベースカーブ (B.C.)、直径 (D)、およびレンズの屈折力を示す度数 (P) の3つと、これらの値から決定される中心厚み (C.T.) があり、これらの規格検査には専用の機器が用いられている。CLの設計では、角膜形状との整合上、まずレンズ後面の曲率であるベースカーブを決め、視力矯正のためのフロントカーブが決定される。ただし、フロントカーブの詳細については、レンズ素材、レンズ剛性との関連等もあり公表はされていない。表1に同じ企業の同じレンズ度数 (-3.00D) のCLの物性値の公表値を示すが、いくぶん異なる。HCLとSCLではベースカーブが異なり、SCL同士では含水率に差があり、これにともなって中心厚も変化している。なお、SCLはHCLに比べて柔らかいためにHCLと同じ接触式検査が難しく、さらに乾燥による変形が発生しやすいため、QOVを視野に入れた精密な検査測定器の開発が望まれている。

3. 実験装置

一般に干渉計を用いて測定物の波面 (物体波) を測定するには、基準となる参照波面と干渉させてその違いを干渉縞として観察する。図3に点回折干渉計の原理図を示す。本干渉計では、この参照波を物体波の一部に小さな開口を設けて取り出す。そのため、基準となる参照面を製作する必要がない。図中で左からコンタクトレンズの収差を含む物体波が薄膜を持つ基板を通過するとき、その一部を小さなピンホールで回折すると、回折光は理想的な球面波となる。この球面波を基準参照波面とし、通過した物体波と干渉させることにより、収差成分が干渉縞として測定できる。薄膜の透過光量は、物体波と参照波がコントラスト良く干渉するように決定する。また、本光学系は物体波と参照波が同じ光路を通るコンパクトなコモンパスの干渉計であり、周囲の外乱による影響は受けにくく、安定した計測が可能である。これまで、本干渉計は理想的な参照球面波を利用できる絶対測定法として、極端紫外線 (EUV: Extreme Ultraviolet) を用いた次世代露光技術における光学素子形状等の超精密測定として、研究・開発がなされてきた⁸⁹⁾。

図4にCLの波面測定のためのPDI実験光学系を示す。レーザ光 (波長 $\lambda=632.8\text{nm}$) は、コア径 $3.5\mu\text{m}$ のシングルモード光ファイバーを通り光学系に入る。出射光はレンズにより平行光となり、一定高さの生理食塩水で満たした円筒容器に沈められたCLを透過し、その波面情報を得る。一方、2枚目のレンズ

Fig.4 Experimental setup

Fig.5 Relation between film thickness and transmittance

の焦点近傍に直径約 $10\mu\text{m}$ のピンホールを持つ PDI ディスクを置く。試料の波面情報を持った光波の一部は、ピンホールで回折して球面波（参照波面）となり CCD カメラへ進む。一方、PDI ディスクを透過した光波（物体波面）は、そのまま CCD カメラに進み、2つの光波が干渉する。なお、真球面を得るには PDI のピンホール径は PDI に向う集光ビームのエアリーディスク径 d の $1/2$ 倍以下が良いとされるが、本光学系では少し大きめの $10\mu\text{m}$ (d の 0.65 倍) のため、PDI 本来の精度⁸⁹⁾は少し犠

Fig.6 Making a pinhole

牲になる。しかし、干渉縞が明るく測定は容易である。なお、本報告での干渉縞挙動測定による CL の評価実験結果への影響は、少ないものと思われる。

PDI ディスクは、平行円板（材質 BK7、直径 22.4mm 、厚さ 3mm ）に Cr 薄膜を施して製作する。薄膜の厚さは、物体光の透過光量とピンホールからの出射光によって、コントラストの良い干渉縞が CCD カメラ上で得られるように決定した。この薄膜厚さと透過率の関係は、PDI ディスクに光が垂直入射した場合について、特性マトリックスによる透過率計算方法^{13)~15)}から算出した。なお、Cr 薄膜の光学定数には、使用波長 $\lambda=0.6328\mu\text{m}$ に対して屈折率 $n=3.735$ 、消衰係数 $k=4.464$ を用いた。計算結果を図 5 に示す。

一方、PDI ディスクに向う物体光の集光ビームが、ディスク通過後に発散して観察面に達したときの観察面中央部の強度、および集光ビーム内の直径 $10\mu\text{m}$ のピンホールを通過して生成された参照光が観察面に達したときの中央部の強度について、光学設計評価ソフト（CODE V）を用いて解析した。そこで、観察面中央部の参照光の強度と、PDI ディスクの薄膜により減衰して、発散した物体光の強度比を $1:1$ にするために、物体光の透過率が 0.3% に相当する Cr 薄膜の厚さ 58nm を持つ PDI ディスクの製作をおこなった。この条件を持つピンホールと薄膜を有する PDI ディスクは、図 6 のフォトリソグラフィー法によって製作した。製作手順は、①：BK7 のガラス基板に Cr を真空蒸着し、②：その上にポジ型フォトレジスト（TSMR）を塗布した。③：これを露光して、④：現像（NMD）後、⑤：Cr 膜をエッチングし、⑥：その後にアセトン洗浄によってフォトレジストを除去した。図 7 に製作した直径 $10\mu\text{m}$ のピンホールの顕微鏡写真を示す。

4. 光学系のアライメント誤差

本実験光学系において、CL 測定時の PDI ディスクのアライメント不足が、測定結果に及ぼす影響について解析した。図 8 において、光ファイバーからの出射光は 2 枚のレンズ（有効径 24mm 、中心部厚さ 7.2mm 、焦点距離 100.89mm の BK7 材）と、生理食塩水で満たされた試料容器を通過して、収差を含んだ光波となり、PDI ディスク上で参照光と物体光に分かれて観

Fig.7 Microscope image of the pinhole

Fig.8 Schematic of optical scheme for simulating the alignment error

Fig.9 Simulated interferograms (a) and bird eye's view (b) of inherent wave aberration which the optical system possesses

察面上で干渉する。解析には光学評価ソフト(CODEV)を用いた。なお、CLの詳細(形状、屈折率等)は公表されていないために、今回のアライメント誤差解析ではCLのモデル化ができなく、食塩水で満たされた試料容器のみを解析に使用した。

PDI ディスクのアライメント誤差について、ピンホール位置が焦点面に対して、Z軸方向とX,Y軸方向に変位している場合を調べた。図9(a)にPDIディスクのピンホールが焦点面上に設置された場合の観察面上の干渉縞を示し、図9(b)にその強度分布の鳥瞰図を示す。図の円形の干渉縞は、本実験光学系(レンズ、生理食塩水に満たされた試料容器、ピンホールディスクなど)に元来含まれる波面収差の干渉縞と考えられる。ここでは、この干渉縞の状態を本光学系での基準とした。図10(a)にピンホール位置が図9の状態から光軸上で左右に変位した場合の干渉縞を示し、図10(b)にその強度分布の鳥瞰図を示す。図10(a)の(+)方向への変位では、中央部の強度が高くなって中心が明縞となり、(-)方向への変位では、逆に中央部の強度が低くなって中心が暗縞となった。

次に、図9の状態から、ピンホール位置が焦点面上で変位した場合の観察面上の干渉縞を図11に示す。図11(a)はピンホールの中心が光軸からX方向に1μmと5μm変位した場合の干

Fig.10 Simulated interferograms (a) and bird eye's view (b) of the wave aberration by the alignment error of the optical axis direction

Fig.11 Simulated interferograms (a) and bird eye's view (b) of the wave aberration by the alignment error of the x axis direction

渉縞を示し、図11(b)にその強度分布の鳥瞰図を示す。図よりピンホール位置が1μmの変位を持つ場合、干渉縞の左半分の強度変化が大きくなり、変位5μmでは、その影響は明らかに大きく現れた。また、Y軸方向への変位についても、同様な結果が得られた。

PDI ディスクのアライメント誤差に対する干渉縞挙動の解析結果を目安に、CCDカメラ上の干渉縞を観察しながら、光学系のアライメントをおこなう。はじめに、PDIディスクのZ軸上について、図10に示されている干渉縞中央部の明暗により、レンズ焦点面に対して前後方向を考慮してアライメントをおこなう。次に、PDIディスクの焦点面でのX,Y軸方向を、図11に示すような干渉縞の強度分布の偏りがなくなるように、X,Y方向に対して、交互に慎重にアライメントをおこなう。なお、ア

SCL Group IV

HCL

Fig.12 Interferograms obtained for a contact lens with the ideal spherical wavefront

ライメント誤差（干渉縞）は、Z 軸上の変位に比べて X, Y 軸方向への変位には特に敏感であり、注意が必要である。

5. 実験結果と考察

本実験装置の有用性を調べるために、ある製造メーカーのレンズ度数 -3.00D の 2 週間交換型 SCL と HCL について、波面測定をおこなった。SCL では、酸素透過性がレンズの含水率に依存するが、含水率が高過ぎると、脂質やたんぱく質がレンズに沈着して衛生面で問題が生じる。今回の SCL の実験では、米国食品医薬局(FDA: Food and drug administration) 分類におけるグループ I（含水率が 50%未満で非イオン性材料）、グループ II（含水率が 50%未満でイオン性材料）、グループ III（含水率が 50%以上で非イオン性材料）およびグループ IV（含水率が 50%以上でイオン性材料）の内、グループ I と IV に属する SCL を選んだ。なお、非イオン性とはイオン性成分の含有量が 1mol% 未満の材料を言う。前述の表 1 に、使用した 2 つの SCL と HCL の物性値を示す。CL はそれぞれの直径よりわずかに大きな内径を持ち、生理食塩水で満たされた試料容器に入れて実験をおこなった。

図 12 に SCL（グループ IV）と HCL の実験で得られた干渉縞を示す。実験はそれぞれ 5 回実施したが、同じような結果となり、図のようにほぼ同心円状の干渉縞が得られた。干渉縞の間には波長 λ の位相差がある。図中の全体的に明るい部分は、物

Fig.13 Comparison of the density (incline) of the interference fringes

体光と参照光が干渉した領域で、SCL は $\phi 10\text{mm}$ 、HCL は $\phi 7\text{mm}$ を照射する平行光束に相当する。SCL は HCL の干渉縞に比べて、縞の密度分布にいくぶんの乱れが現れた。HCL は直径が角膜より小さく、レンズのほぼ全面が屈折異常の矯正に直接影響を及ぼすために、干渉縞分布はほぼ同心円となり、全体にわたって光学的に精密に製作されていることがわかる。なお、透過光の周辺部のコントラストの低い縞は、回折光や試料容器側壁からの反射光などの影響で生じたものと考えられる。

次に得られた干渉縞を同心円状の縞と仮定して、その中心から縞が局在する位置までの距離を上下左右の 4 方向で測定し（図 12 の SCL グループ IV に破線で示す）、同じ度数に対する干渉縞の密度勾配（波面収差の程度）を比較した。図 13 に SCL のグループ I, IV と HCL の測定結果を示す。HCL は、含水率の小さなグループ I の SCL に近い密度勾配となった。SCL のグループ I, IV で密度勾配が異なるのは、レンズの含水率の異なる分が、レンズ形状差等で補正されていないためと思われる。なお、干渉縞に実際に含まれている収差成分の詳細な解析には、Zernike 多項式を用いた解析を必要とする。また、実験光学系での波面収差分を測定値より差し引くことも必要である。さらに、CL の種々の波面収差の解析で、高精度な分解能を必要とする場合には、PDI に縞走査を併用することが必要となる。

今回の PDI による CL 波面測定の結果より、同じ度数でも種類により、その見え方が僅かに異なることが推察される。今後、QOV を考慮して CL の品質向上を目指すには、CL 装用前の製品開発の段階での検査方法を確立し、レンズ波面収差の要因を十分に検討することが望まれる。

6. 結 言

PDI を応用した CL の波面測定について検討した。CL 測定用の PDI 実験装置を提案し、HCL と 2 週間交換型 SCL の 2 種類の波面測定の実験をおこなった。光学系のアライメント誤差解析から、アライメントの方法について提案した。また、実験に用いた同じ度数の HCL と SCL においては、波面情報が異なる結果が得られた。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、PDI ディスク製作にご協力頂いた大阪府立大学工学研究科機械系専攻の菊田久雄 教授、および研究室の関係各位に感謝申し上げます。さらに、本実験を遂行するにあたり、助言と試料の提供を頂きました（株）三城 光学研究所の金子 弘 所長に感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 厚生労働省医薬品局 薬食発第 0428008 号: コンタクトレンズ承認基準の改正について, (2009).
- 2) 前田直之: 眼の収差を理解するコンタクトレンズと高次収差, あたらしい眼科, **24**,11(2007)1467.
- 3) Hong X, Himebaugh N, Thibos LN: On-eye Evaluation of Optical Performance of Rigid and Soft Contact Lenses, *Optom Vis Sci*, **78**(2001) 872.
- 4) 洲崎朝樹, 前田直之, 不二門 尚: コンタクトレンズの光学特性と Quality of Vision, 視覚の科学, **27**(2006) 3.
- 5) Roberts B, Athappilly G, Tinio B et al: Higher Order Aberrations Induced by Soft Contact Lenses in Normal Eyes with Myopia, *Eye Contact Lens*, **32** (2006)138.
- 6) J.Liang, B. Grimme, S.Goelz and J. Bille: Objective Measurement of Wave Aberrations of the Human Eye with the Use of a Hartmann-Shack Wave-front Sensor, *J.Opt. Soc. Am., A* **11**(1994)1949.
- 7) T. Moon, M.Manoj, Y.Geunyoung: Measurement of Wave-front Aberration in Soft Contact Lenses by Use of a Shack-Hartmann Wave-front Sensor, *Appl Opt.*, **44**,21(2005)4523.
- 8) 格内 敏, 木下博雄, 渡邊健夫, 坂本 亨: 光ファイバーを用いた点回折干渉計に関する研究, 精密工学会誌, **69**, 8 (2003)1170.
- 9) G.E.Sommargren: Phase Shifting Diffraction Interferometry for Measuring Extreme Ultraviolet Optics, *OSA*, **4** (1996)108.
- 10) R. N. Smartt, W. H. Steel : Theory and Application of Point-Diffraction Interferometers, *Japan. J. appl. Phys., Suppl.* **14**,1(1975)351.
- 11) 魚里 博: コンタクトレンズにおける眼光学, 臨眼, **58**, 13 (2004)2211.
- 12) 湖崎克, 西信元嗣, 加藤桂一郎: コンタクトレンズ診療最前線 [改訂第2版], 金原出版, (2000)168.
- 13) 岡本勝就: 光導波路の基礎, コロナ社, (1992)48.
- 14) Edward D, Palik: Handbook of Optical Constants of Solids □, Academic Press, San Diego (1991)
- 15) 小檜山光信: 光学薄膜の基礎理論, オプトロニクス社, (2003)65.