

第 108 回 日本眼科学会総会 宿題報告 I

眼科検査診断法

視覚の質 quality of vision を測る

大鹿 哲郎

筑波大学大学院人間総合科学研究科機能制御医学専攻眼科学

共同研究者

岡本 周子, 園尾純一郎, 平塚健太郎, 川名 啓介, 坂田 典繁, 坂下 千穂

山根奈世理 (筑波大学大学院人間総合科学研究科機能制御医学専攻眼科学)

富所 敦男, 天野 史郎, 田邊 樹郎, 濱田 直紀, 宮井 尊史, 鈴木真理子

天野 由紀 (東京大学大学院医学系研究科外科学専攻眼科学)

宮田 和典, 子島 良平, 鮫島 智一, 徳永 忠俊 (宮田眼科), 杉田元太郎

吉崎真由美, 長谷川祐子 (眼科杉田病院), 不二門 尚 (大阪大学大学院感覚機能形成学)

前田 直之 (大阪大学大学院視覚情報制御学), 三橋 俊文, 広原 陽子 (トプコン研究所)

福山 誠 (福山眼科), 福原 俊一, 鈴鴨よしみ (京都大学大学院医学研究科医療疫学分野)

大沼 一彦 (千葉大学工学部メディカルシステム工学科), 小沢 忠彦 (小沢眼科内科)

大木孝太郎 (大木眼科), 江口秀一郎 (江口眼科), 林 研 (林眼科)

Steve D. Klyce (LSU Health Sciences Center, LSU Eye Center)

Raymond A. Applegate (College of Optometry, University of Houston)

Howard C. Howland (Section of Neurobiology and Behavior, Cornell University)

要 約

Quality of life (QOL) を重要視する考え方が臨床的に一般化するとともに, quality of vision (QOV) の重要性も広く認識されつつある。我々は QOV を規定する要因を定量的に解析する試みを行ってきた。

不正乱視は QOV 障害の大きな原因となる。我々は角膜形状解析の投影リング上の屈折力分布関数をフーリエ変換することにより, 屈折力列を球面成分 (0 次), 正乱視成分 (2 次), 非対称成分 (1 次), 高次不正乱視成分 (3 次以上) に分離定量する方法を確立した。本法で得られた不正乱視成分が眼鏡矯正視力と良く相関することを証明した。各フーリエ成分をカラーコードマップで表示する方法を開発するとともに, 各フーリエ成分の正常域を決定し, 各種疾患でフーリエ成分がどのように変化する

か検討した。フーリエ法を用いて, 円錐角膜における角膜形状の経年変化を定量的に明らかにした。角膜移植において, 抜糸による形状変化を解析し, また不正乱視の強い症例における視力検査にフーリエ解析の応用が有用であることを示した。

波面解析理論を眼光学に応用することによって眼の高次波面収差を算出し, コマ収差と球面収差を定量化した。角膜の場合は角膜形状解析データの高さ情報を, 眼球の場合は Hartmann-Shack センサーで得られた情報を, Zernike coefficient に展開して計算した。

角膜のコマ様収差は年齢とともに増加したが, 球面様収差は年齢変化を示さなかった。屈折矯正手術のうち photorefractive keratectomy と laser *in situ* ker-

別刷請求先: 305-8575 つくば市天王台 1-1-1 筑波大学大学院人間総合科学研究科機能制御医学専攻眼科学 大鹿 哲郎
(平成 16 年 8 月 23 日受付, 平成 16 年 10 月 4 日改訂受理)

Reprint requests to: Tetsuro Oshika, M.D. Department of Ophthalmology, Doctoral Program in Functional and Regulatory Medical Sciences, Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba. 1-1-1 Tennoudai, Tsukuba 305-8575, Japan

(Received August 23, 2004 and accepted in revised form October 4, 2004)

atomileusis (LASIK) 術後の角膜波面収差の経時変化を報告した。眼球の収差については、縫着眼内レンズの傾斜と眼球のコマ収差が相関した。角膜と眼球の関係では、コマ収差は角膜の年齢変化のために、眼球全体のコマ収差も年齢とともに増加すること、球面収差は水晶体が年齢変化を示すため、眼球全体の球面収差も年齢とともに増加することがわかった。LASIK によって眼球の高次波面収差が増加し、それと比例してコントラスト感度および低コントラスト視力が低下していた。

白内障眼、眼内レンズ挿入眼、無水晶体眼における高次波面収差を、角膜と眼球について解析し、球面収差の平衡について検討した。また、偽調節について、角膜の多焦点性との関係、角膜のコマ収差との関係について報告した。また、収差が全くない眼は defocus に弱い、すなわちコマ収差の存在が生理的視機能にとって重要である可能性をシミュレーションによって示した。非球面眼内レンズの臨床成績について、波面解析の結果とコントラスト感度の測定結果を示し、網膜像シミュレーションの結果を報告した。

視覚関連 QOL を定量化するための National Eye In-

stitute Visual Functioning Questionnaire 25 (NEI-VFQ 25) を日本語化し、validation study を行った上で、白内障手術による QOL の変化を解析した。両眼白内障罹患によって患者の QOL は著しく障害されるが、白内障手術によって有意かつ大幅に改善することが定量的に示された。また、水晶体の加齢変化に伴う前方散乱、後方散乱、波面収差を定量的に測定し、白内障による視機能障害との関係を、白内障タイプ別に検討した。これらの因子と手術による QOL 改善の程度との関連を検討することによって、将来、白内障の進行や手術適応を定量的指標によって評価できる可能性が示された。(日眼会誌 108: 770-808, 2004)

キーワード：視覚の質、生活の質、不正乱視、フーリエ解析、角膜形状解析、波面解析、Hartmann-Shack センサー、高次波面収差、コマ収差、球面収差、白内障、眼内レンズ、偽調節、視覚関連 QOL、前方散乱、後方散乱

A Review

Quantitative Assessment of Quality of Vision

Tetsuro Oshika

*Department of Ophthalmology, Doctoral Program in Functional and Regulatory Medical Sciences,
Graduate School of Comprehensive Human Sciences, University of Tsukuba*

Abstract

The importance of quality of vision (QOV) along with quality of life (QOL) in medicine has been recently widely recognized. We have conducted studies to quantitatively analyze factors related to QOV.

Irregular astigmatism can be a significant obstacle for achieving satisfactory QOV. Videokeratography data were broken down using Fourier harmonic series analysis into spherical power, regular astigmatism (second harmonic component, $n=2$), asymmetry ($n=1$), and higher order irregularity ($n \geq 3$). The irregular astigmatism component calculated by the Fourier analysis significantly correlated with best spectacle-corrected visual acuity. Software was developed to display color-coded maps for the four Fourier indices. The normal range was defined for each Fourier index, and eyes with pathologic and postsurgical conditions were evaluated using the normal range. Progression of keratoconus over time was quantitatively described by Fourier analysis of the videokeratography data. Using the Fourier method, changes in corneal topography following suture removal after penetrating kerato-

plasty were evaluated. Fourier analysis of videokeratography data significantly facilitated determination of refraction and measurement of best spectacle-corrected visual acuity in eyes with corneal irregular astigmatism such as post-penetrating keratoplasty eyes.

Higher-order wavefront aberrations of the cornea were calculated by expanding videokeratography elevation data into Zernike polynomials, and coma and spherical aberrations were computed. For ocular aberrations, the data obtained with the Hartmann-Shack sensor were decomposed into Zernike polynomials.

Coma aberrations of the cornea significantly correlated with age, while corneal spherical aberrations showed no age-related changes. The time-course of changes in corneal higher-order aberrations was reported for photorefractive keratectomy and laser *in situ* keratomileusis (LASIK). For ocular aberrations, the degree of tilting of the suture-fixed intraocular lens significantly correlated with the amount of coma aberration of the eye. In normal

eyes, the ocular coma increased with age mainly because of the increase in the corneal coma, and the ocular spherical aberration increased with age because of the increase in spherical aberration in the internal optics including the crystalline lens. The conventional LASIK significantly increased ocular higher-order aberrations, which compromised postoperative contrast sensitivity and low contrast visual acuity.

Both corneal and ocular wavefront aberrations were analyzed in cataract, pseudophakic and aphakic eyes, and the equilibrium of spherical aberrations between the cornea and the eye in those conditions was investigated. In pseudophakic eyes, coma aberrations of the cornea, along with the corneal multifocality, significantly contributed to apparent accommodation. Computer simulation indicated that a focus shift of 0.5 diopters deteriorated the retinal image significantly more in eyes without higher-order aberrations than in eyes having a moderate amount of coma aberrations. Clinical results of aspherical intraocular lens were reported for wavefront analysis and contrast sensitivity measurements, and retinal images were analyzed by simulation. For the assessment of vision-related QOL, National Eye Institute Visual Functioning Questionnaire 25 (NEI-VFQ 25) was translated into Japanese. After the validation study, the influence of cataract surgery on QOL was investigated. The

QOL score was severely impaired in patients with bilateral cataract, which was significantly and dramatically improved by surgery. Forward scattering, backward scattering, and wavefront aberration induced by the crystalline lens were quantified, and the impact of these factors on visual function was analyzed according to the type of cataract. The degree of QOL improvement by surgery was assessed in relation to the type of cataract and intensity of scattering and aberration. By comprehensively analyzing these factors, quantitative parameters could be developed in the near future to describe progression of cataract and determine the indication for cataract surgery.

Nippon Ganka Gakkai Zasshi (J Jpn Ophthalmol Soc 108 : 770—808, 2004)

Key words : Quality of vision, Quality of life, Irregular astigmatism, Fourier harmonic series analysis, Videokeratography, Corneal topography, Wavefront analysis, Hartmann-Shack sensor, Higher-order wavefront aberration, Coma aberration, Spherical aberration, Cataract, Intraocular lens, Apparent accommodation, Vision-related quality of life, Forward scattering, Backward scattering

I 緒 言

医療のアウトカムメジャーとして健康関連 quality of life (QOL) が重要視されるようになったのと同様に、眼科においても quality of vision (QOV) が議論される機会が増えている。疾患が QOV にどのように影響し、治療によってどのように変化するのか、重要な問題である。検査室で測定される高コントラスト視力は、QOV を表す指標の一つではあるが、しかし実はほんの一部でしかない。QOV を規定する要因は数多くあり、我々はそれらを定量的に解析する試みを行ってきた。

II 角膜不正乱視の定量化

1. 角膜形状解析データのフーリエ解析

不正乱視は QOV 障害の大きな原因となる。しかし、これまでに不正乱視そのものを直接的に定量化して解析する方法は確立されていなかった。

眼球光学系における不正乱視は、トーリックレンズで矯正できない屈折成分であり、すなわち球面と円柱以外の成分である^{1)~4)}。であれば、何らかの数学的手法に

よって屈折値を球面成分、円柱成分、それ以外の 3 つに分離することができれば、不正乱視を定量的に評価できることになる。我々は角膜形状解析装置で得られたデータをフーリエ解析することによって、角膜の不正乱視を分離定量する方法を試みた⁵⁾。

フーリエ解析とは、フランス人の数学者 Jean-Baptiste-Joseph Fourier (1768~1830 年) が 1811 年に熱伝導の解析のために考案した周期関数の解析方法である。Fourier の理論は、周期性のある関数は、どのようなものでも正弦関数 sine function と余弦関数 cosine function の和で表現することができるというものである (図 1)。これで表したものをフーリエ級数展開 (Fourier series expansion) と呼ぶ。

角膜形状解析は、多数のマイヤーリングを角膜上に投影している。そのうちの一本のリング上の屈折力分布を取り出し (図 2)、軸角度 (一周の測定ポイント) を横軸、屈折力を縦軸としてプロットすると、360° 中に 2 つの山と 2 つの谷を持った曲線が得られる (図 3)。これを i 番目のリングにおける屈折力関数 $F_i(\sigma)$ として、フーリエ解析することにより、

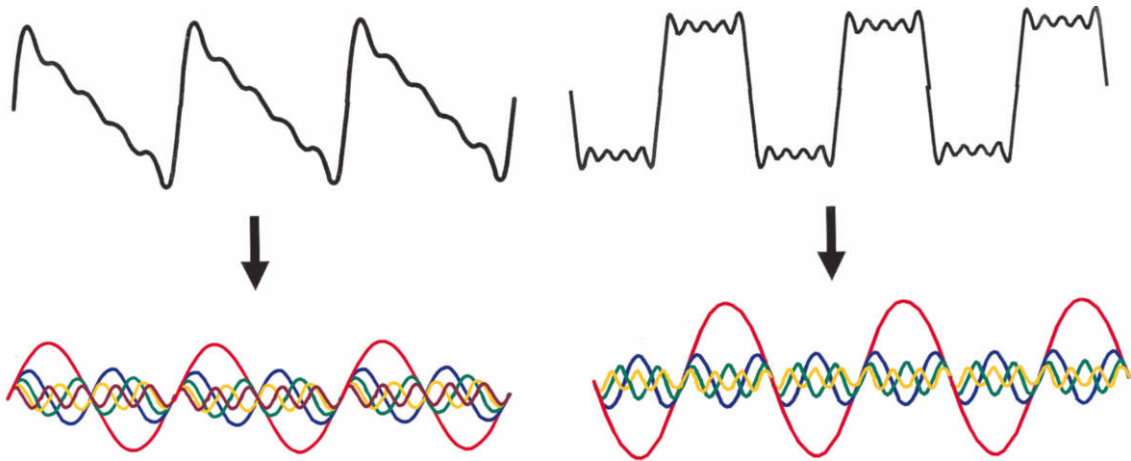


図 1 フーリエ解析。
周期性のある関数を正弦曲線の和に分解している。

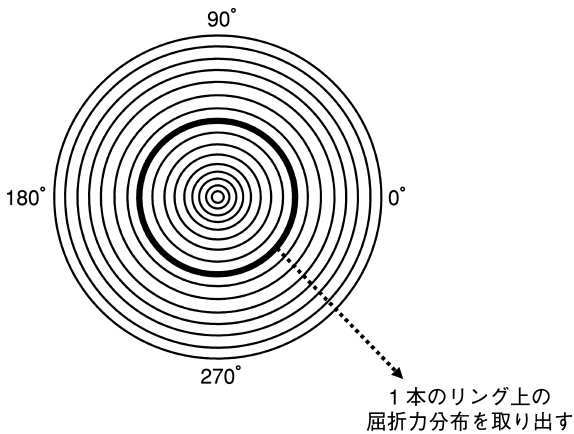


図 2 角膜形状解析データの取り出し。
角膜形状解析のマイヤーリングのうち、一本のリング上の屈折力分布を取り出す。

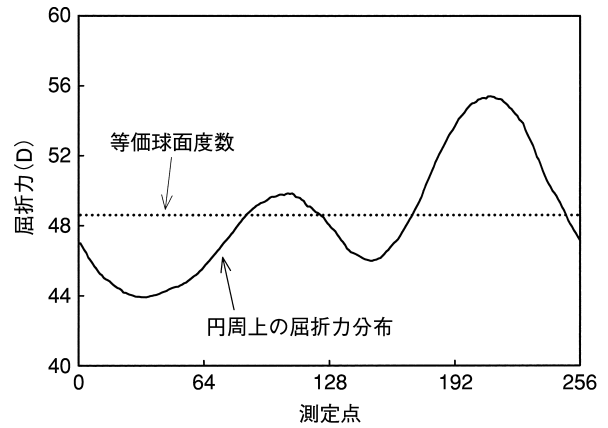


図 3 屈折力分布のプロット。
横軸に測定点(この場合は360°で256ポイント)、屈折力を縦軸としてプロットすると、360°中に2つの山と2つの谷を持った曲線が得られる。

$$F_i(\sigma) = a_0 + \sum [a_n \cos(n\sigma) + b_n \sin(n\sigma)] \dots\dots\dots (1)$$

を得る^{5)~8)}。本式を展開すると、

$$F_i(\sigma) = a_0 + c_1 \cos(\sigma - \alpha_1) + c_2 \cos 2(\sigma - \alpha_2) + c_3 \cos 3(\sigma - \alpha_3) + \dots + c_n \cos n(\sigma - \alpha_n) \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで a_0 はリング i の等価球面度数、すなわち球面成分である(図3)。残りの成分は図4に示した通りで、1次成分は最大屈折力と最小屈折力のポイントが180°離れて位置する波形を示しており、非対称成分(偏位)と呼ばれ、式(2)の c_1 がそれにあたる。2次成分は360°中に2周期を有する正弦曲線であり、強主経線と弱主経線が90°離れて位置することから、正乱視成分に相当する。式(2)で c_2 が正乱視の大きさ、 α_2 が乱視軸である。3次以上の成分はまとめて高次成分とされるが、これは2次までの正弦曲線で近似されない部分であり、高次不正乱視と呼ばれる。式(2)で c_3 以上の項である。

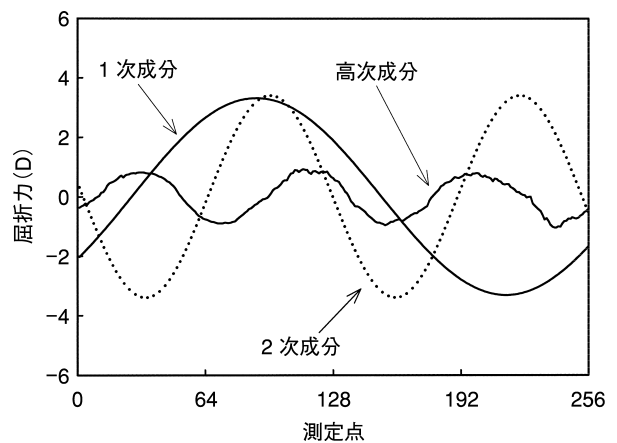


図 4 屈折力分布のフーリエ解析。
フーリエ解析によって得られた1次、2次、高次(3次以上)の成分。1次が非対称成分、2次が正乱視成分、3次以上が高次不正乱視成分に相当する。

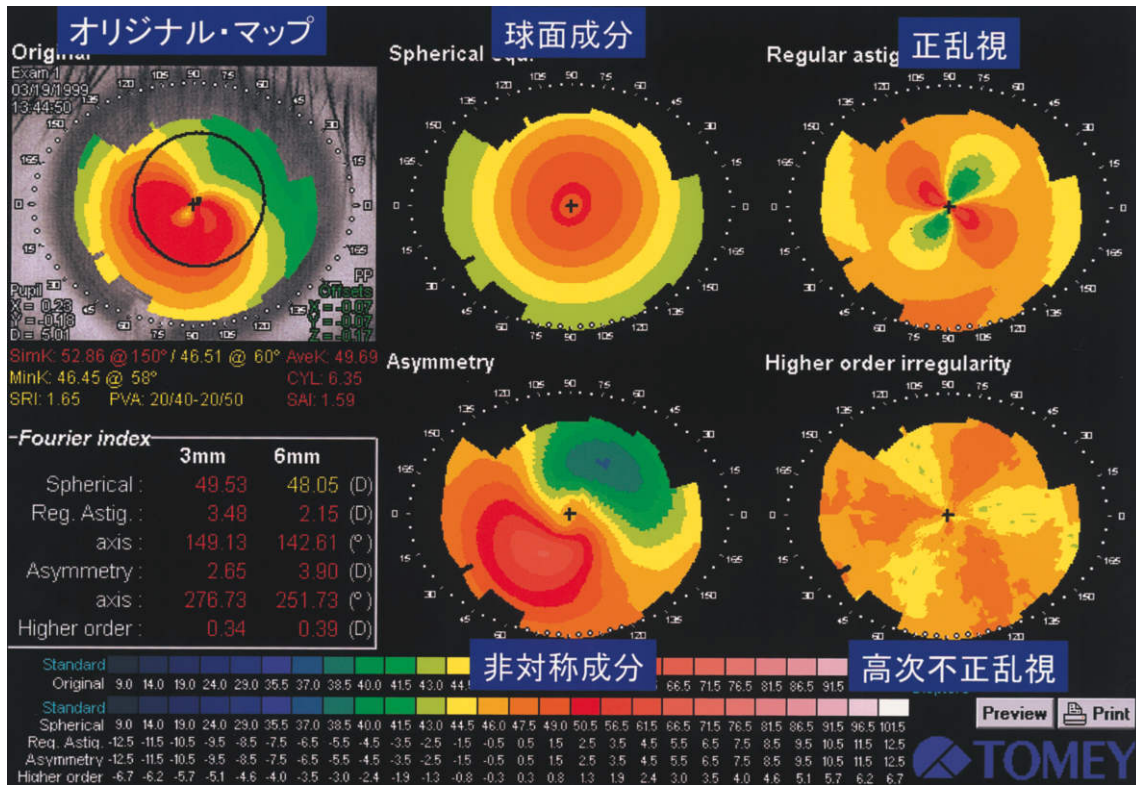


図 5 フーリエ解析の結果を表すカラーコードマップ。

この計算を各リングに対して行い、各成分をカラーコードマップとして再構築すると、図5のようになる。左上がオリジナルの角膜形状解析マップ、右側に球面成分、正乱視成分、非対称成分、高次不正乱視成分が表示されている⁹⁾。左下には、3 mm 領域、6 mm 領域における各フーリエ成分が表示され、正常値は緑色で、異常値はその程度に応じて黄色、赤色で表示されるようになってい。このマップは角膜形状解析装置 TMS-2 N および TMS-4(トーマー)に標準搭載されている。

2. フーリエ係数と矯正視力の関係

上記で得られたフーリエ係数が、実際に不正乱視成分を正しく表現しているか否かを確認する目的で、正常人および角膜疾患を有する症例において、眼鏡矯正視力とフーリエ係数との関係を検討した⁹⁾。対象は72例108眼で、内訳は正常群27例53眼、円錐角膜群24例34眼、角膜移植後群21例21眼である。角膜移植後の症例は、全例とも円錐角膜に対して全層移植術が行われたものである。

正常群は軽度の屈折異常以外に眼疾患を有しないもので、乱視は1.5ジオプリー(D)以下であった。眼鏡での矯正視力は1.0以上で、コンタクトレンズを装着しているものはなかった。年齢は9~66歳で、平均値±標準偏差は27.5±12.9歳であった。

円錐角膜群は臨床所見および角膜形状解析所見によって診断された¹⁰⁾。視力に影響する角膜混濁を有する症例

は除外されている。全例ともハードコンタクトレンズ装用によって矯正視力1.0以上であった。年齢は13~37歳(平均21.7±6.1歳)であった。

角膜移植後群は、全例とも抜糸から6か月以上経過しており、透明角膜を有する症例である。緑内障、ぶどう膜炎、網膜疾患、白内障など、視力に影響を与える疾患を有するものは含まれていない。全例ともハードコンタクトレンズ装用によって矯正視力1.0以上であった。年齢は17~57歳(平均31.1±9.4歳)であった。

式(2)のうち、球面成分(0次)と正乱視成分(2次)は眼鏡で矯正可能であるが、1次および高次成分は矯正できない。すなわち、屈折力分布から球面成分(a₀)と正乱視成分(c₂)を差し引くことにより、残った部分を不正乱視成分とすることができる。リングiにおける屈折力関数F_i(σ)を、a₀とc₂ cos 2(σ-α₂)からなる正弦曲線に最小二乗法を用いて近似し、その残差を計算することによって不正乱視成分L_iを計算した⁹⁾。

$$L_i = \sqrt{\frac{\sum [F_i(\sigma) - \{a_0 + c_2 \cos 2(\sigma - \alpha_2)\}]^2}{n}} \dots\dots (3)$$

ここで、nはリング上の有効測定ポイントである。

これらの計算を、角膜中央3mmに相当するリング2~9について行った(表1)。そこで、各リングのL_i値をStiles-Crawford効果に従って加重平均するために、各眼の各マイヤーリングごとに平均半径r_iを計算した。

表 1 正常人眼における各マイヤーリングの半径

リングナンバー	半径(mm)
1	0.221±0.006
2	0.398±0.058
3	0.560±0.027
4	0.728±0.043
5	0.903±0.030
6	1.068±0.036
7	1.241±0.041
8	1.411±0.046
9	1.580±0.051
10	1.748±0.056
11	1.918±0.061
12	2.089±0.066
13	2.257±0.072
14	2.429±0.077
15	2.601±0.083
16	2.774±0.089
17	2.949±0.095
18	3.125±0.100
19	3.304±0.107
20	3.486±0.114
21	3.670±0.120
22	3.857±0.127
23	4.045±0.137
24	4.236±0.146
25	4.433±0.157

111 眼における平均値±標準偏差。
角膜形状解析装置 TMS-1 で測定。

$$r_i = \sum_j d_i(j) / n \dots\dots\dots (4)$$

ここで $d_i(j)$ はリング i 上の測定ポイント j ($1 \leq j \leq 256$) の中心からの距離である。次に、Stiles-Crawford 効果 ($e^{-0.105r_i^2}$)^{11)~14)} に従い、8 本のリング ($2 \leq i \leq 9$) について L_i を加重平均し、不正乱視係数 IR を算出した。

$$IR = \sum_i e^{-0.105r_i^2} \times L_i / 8 \dots\dots\dots (5)$$

式(4)は各眼の各リングごとに個別に計算し、その値を式(5)に使用した。当時の角膜形状解析装置はリング 1 のデータ信頼性がやや低かったため¹⁵⁾、その値は除外し、リング 2~9 について解析を行った。

各群の不正乱視係数を図 6 に示す。円錐角膜群と角膜移植後群の不正乱視係数 IR は、正常群より有意に高い値であった ($p < 0.001$, Student t-test)。

眼鏡矯正視力の対数値を目的変数とした多変量解析を行った。説明変数として解析に組み入れたのは、屈折乱視、年齢、疾患の種類、surface regularity index (SR-I)¹⁶⁾、surface asymmetry index (SAI)¹⁷⁾、不正乱視係数 IR である。疾患の種類は、正常眼を (0, 0)、円錐角膜眼を (0, 1)、角膜移植後眼を (1, 0) とコード化した。変数減少法 (backward-elimination method) で眼鏡矯正視力対数値と有意に関連する変数を選択した。

多変量解析の結果、眼鏡矯正視力対数値と不正乱視係

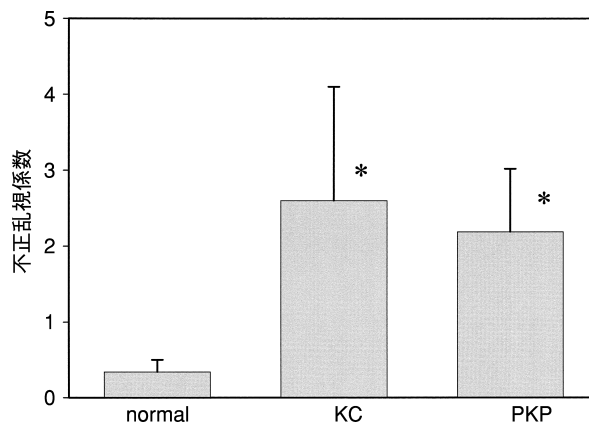


図 6 フーリエ解析による不正乱視係数の比較。
円錐角膜群と角膜移植後群の不正乱視係数 IR は、正常群より有意に高い値であった ($p < 0.001$, Student t-test)。

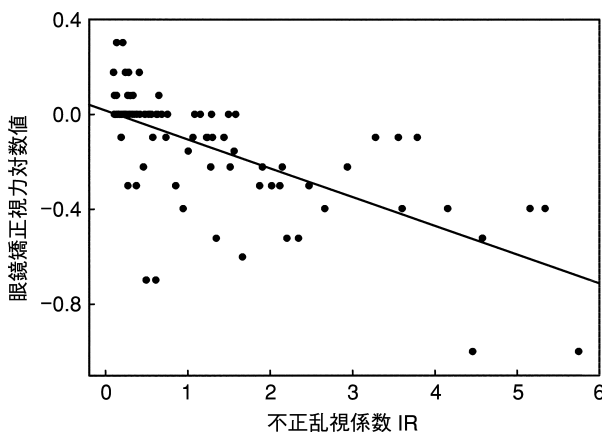


図 7 眼鏡矯正視力(対数変換値)と不正乱視係数 IR。
両者に有意の相関がみられた (Pearson $r = -0.744$, $p < 0.001$)。

数 IR の間に有意の相関がみられた ($r = -0.744$, $p < 0.001$, 図 7)。その他の変数は、眼鏡矯正視力対数値と有意な関連を示さなかった(表 2)。眼鏡矯正視力の対数値は、 $-0.122 \times$ 不正乱視係数 IR $+ 0.0163$, 調整済み $R^2 = 0.549$ で与えられた。

以上のように、式(5)で得られる IR は眼鏡矯正視力と有意に相関することから、フーリエ解析で算出される不正乱視係数は、トーリックレンズで矯正されない不正乱視成分を正しく分離定量していると結論された。

3. 円錐角膜の進行と角膜形状の変化

円錐角膜が進行性の疾患であることは広く知られている¹⁸⁾¹⁹⁾。しかし、進行を定量的な指標で評価した報告はこれまでになく、従来はコンタクトレンズが装着できなくなる、急性水腫の発症、角膜移植が必要になることなど、非常に大まかな定義によって進行と判断されていた^{20)~24)}。角膜形状の経時的変化を示した報告^{25)~27)}もあるが、マップの見かけが変化したというような定性的な症例報告に過ぎない。一方で、円錐角膜の検出、診断の

表 2 変数減少法による多変量解析の結果

ステップ	変数	決定係数 R ²	調整済み R ²	F 値	p 値
1	コード 2	0.568	0.558	26.650	0.909
2	年齢	0.568	0.560	31.406	0.903
3	屈折乱視	0.568	0.562	38.063	0.588
4	コード 1	0.567	0.561	47.805	0.307
5	SAI	0.566	0.561	63.356	0.151
6	SRI	0.559	0.553	92.993	0.152
7	不正乱視係数 IR	0.554	0.549	181.990	<0.001

眼鏡矯正視力対数値を目的変数としている。

SAI : surface asymmetry index

SRI : surface regularity index

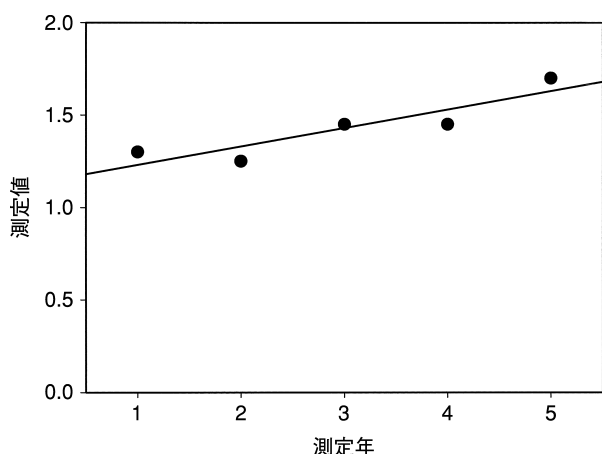


図 8 フーリエ成分の年変化率の計算。

円錐角膜におけるフーリエ成分を測定年ごとにプロットし、最小二乗法で傾きを計算することによって、年変化率を求めた。

ための定量的ツールは過去にいくつか作成されている^{28)~35)}。しかし、これらが円錐角膜の進行を反映しているという報告はなく、また実際に経時的な変化を検討したものはない。我々はフーリエ解析を用いて、円錐角膜の経年変化を解析した³⁶⁾。

対象は、1年間隔で少なくとも2回以上の角膜形状解析検査を受けた円錐角膜症例 64 例 85 眼である。眼手術の既往のあるものは対象に含まれていない。年齢は 14~65 歳(平均 28.3±8.4 歳)であった。前述の方法で角膜形状解析データをフーリエ解析し、球面成分(0 次)、正乱視成分(2 次)、非対称成分(1 次)、高次不正乱視成分(3 次以上)を算出した。それぞれの成分に対し、最小二乗法で年変化率を計算した(図 8)。これとは別に、角膜形状解析のカラーコードマップ上で経年変化が表れているか否かを、3 人の検者が別々に判定した。2 人以上が一致した判断を採用した。眼疾患を有しない 20 例 40 眼(27.4±5.4 歳)を正常対照群とした。

対象のうち、17 眼(20%)が 1 年間隔の角膜形状解析検査を 2 回、36 眼(42%)が 3 回、16 眼(19%)が 4 回、16 眼(19%)が 5 回以上受けた。初回検査時のフーリエ

表 3 円錐角膜群と正常対照群でのフーリエ解析の結果

	円錐角膜群* (85 眼)	正常対照群 (40 眼)
球面成分	48.8±4.6**	43.5±1.3
正乱視成分	2.5±2.2**	0.39±0.29
非対称成分	3.5±2.5**	0.25±0.69
高次不正乱視成分	1.3±1.2**	0.11±0.06

ジオプトリー。* : 初回検査時の値。** : 正常対照群の値より有意に大きい(p<0.001, Student t-test)。

表 4 円錐角膜眼におけるフーリエ成分の年変化率

	年変化率 (ジオプトリー/年)	p 値
球面成分	0.41±1.39	0.008*
正乱視成分	0.022±0.74	0.785
非対称成分	-0.079±0.98	0.460
高次不正乱視成分	0.068±0.25	0.015*

*有意に正である(ゼロより大)(Student t-test)。N=85 眼。

解析結果を表 3 に示す。どのフーリエ成分も、正常対照群より有意に大きな値となった(p<0.001, Student t-test)。これらは円錐角膜眼の角膜形状の定性的解析により報告されている特徴、すなわち円錐角膜では角膜が突出し(球面成分が大)、乱視が大きく、非対称な形状となり、不整が強い、といった点とよく一致する^{37)~39)}。

円錐角膜群におけるフーリエ成分の年変化率を表 4 に示す。球面成分と高次不正乱視成分の年変化率は、有意に正(ゼロより大きい)となった。

カラーコードマップ上で、24 眼が経年変化あり、61 眼が経年変化なしと判定された。この判定に従ってフーリエ成分を解析したところ、表 5 のごとくで、カラーコードマップ上で経年変化があると判定された群では球面成分の年変化率が有意に正となり、カラーコードマップ上で変化がなかった群では高次不正乱視成分の年変化率が有意にゼロより大きかった。

さらに各成分と眼鏡矯正視力の関連を検討したところ高次不正乱視成分の年変化率と矯正視力の logarithmic minimum angle of resolution(log MAR) 値の年変化率

表 5 円錐角膜眼におけるカラーコードマップ上での経年変化の有無とフーリエ成分の年変化率

	カラーコードマップ上で 変化あり (24 眼)		カラーコードマップ上で 変化なし (61 眼)	
	年変化率 (ジオプトリー/年)	p-value	年変化率 (ジオプトリー/年)	p-value
球面成分	1.01±1.51	0.002*	0.20±0.73	0.226
正乱視成分	0.030±0.96	0.111	-0.021±0.38	0.087
非対称成分	-0.093±1.09	0.813	-0.035±0.88	0.700
高次不正乱視成分	0.063±0.32	0.092	0.070±0.23	0.049*

*有意に正である(ゼロより大)(Student t-test).

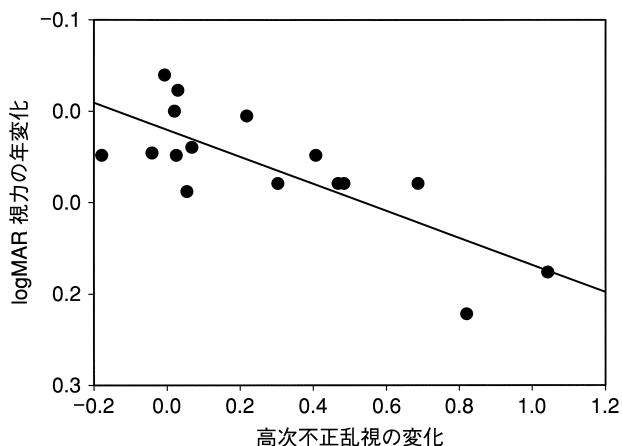


図 9 円錐角膜眼における高次不正乱視成分と矯正視力 logarithmic minimum angle of resolution (log MAR) 値。

各々の年変化率に有意の相関がみられた($p=0.002$).

との間に有意の相関がみられた(図 9)。

今回の我々の検討は、円錐角膜眼の経年変化を初めて定量的にとらえたものである。その結果、円錐角膜の明らかな進行は球面成分の増大、すなわち角膜の突出に反映され、一方で明らかな進行はなくても、円錐角膜の自然経過に伴う高次不正乱視の増大およびそれに相関する眼鏡矯正視力の低下が生じることがわかった。

4. 角膜移植後の抜糸と角膜形状

角膜移植後の抜糸により、角膜の形状は変化する。図 10 に 1 例を示すが、抜糸前後で角膜形状が大きく変化したことはわかる。しかし、どのように変化したのかこの 2 枚のカラーコードマップだけから説明するのは困難である。フーリエ解析によってカラーコードマップを分解すると(図 11)、フーリエ成分ごとの変化がよくわかる。この症例の場合、球面度数は増加し(角膜のステープ化)、正乱視は軸が回転、非対称成分は減少し、高次不正乱視成分は大きく改善している。

角膜移植後の抜糸による球面值や正乱視の変化はこれまでにも検討されているが^{40)~47)}、不正乱視の変化については報告がない。我々は角膜抜糸を受けた 39 例 42 眼において、抜糸前後の不正乱視の変化を検討した⁴⁸⁾。対

象者の年齢は 14~73 歳(44.7±16.5 歳)であった。

抜糸によって、角膜の球面值は 5.1 ± 3.8 D 増加したが($p < 0.0001$, paired t-test, 図 12)、正乱視は有意な変化を示さなかった($p=0.247$, 図 13)。非対称成分($p < 0.0001$, 図 14)と高次不正乱視成分($p < 0.0001$, 図 15)はともに有意に減少した。

5. 視力検査とフーリエ解析

不正乱視の強い症例における視力検査は容易ではない。オートレフラクトメータやケラトメータの精度は低く、測定不能になってしまう場合も少なくない。自覚的な屈折検査もエンドポイントが明確でないだけに困難である。我々はフーリエ解析によって正乱視成分を取り出すことによって、視力検査がより精密に行えるのではないかと考え、角膜移植後眼を対象に検討を行った。

対象は角膜移植後 6 か月以上経過し、透明な移植片を有する 56 例 66 眼である。年齢は 19~85 歳(66.2±13.4 歳)であった。縫合は 10-0 ナイロン糸による 16 針の連続縫合で、36 眼は抜糸を受けていた。

視力検査は、従来法とフーリエ法の 2 通りで行った。従来法では、オートレフラクトメータとオートケラトの値を参考に、クロスシリンドラ法で視力を検査した。フーリエ法では、フーリエマップにおける 3 mm 領域の正乱視量およびその軸を取り出し(図 16)、その値を乱視矯正レンズとして使用。球面レンズのみを入れ替えることによって、自覚的に最良の視力を決定した。図 16 の症例では、従来法による矯正視力 $0.3 \times -0.5 = \text{cyl} - 5.0 \times 130^\circ$ に対して、フーリエ法では $0.6 \times -1.0 = \text{cyl} - 3.0 \times 105^\circ$ となった。

全例での結果を表 6 に示す。フーリエ法で得られた矯正視力は、従来法での矯正視力より有意に良好であった($p < 0.001$, paired t-test, 図 17)。また、矯正に使用した円柱度数は、従来法よりフーリエ法が有意に小さい値であった($p < 0.001$, 図 18)。等価球面度数には有意差はなかった($p=0.207$)。

以上のように、フーリエ解析を利用した矯正視力の測定法は、角膜不正乱視の強い症例において極めて有用であった。

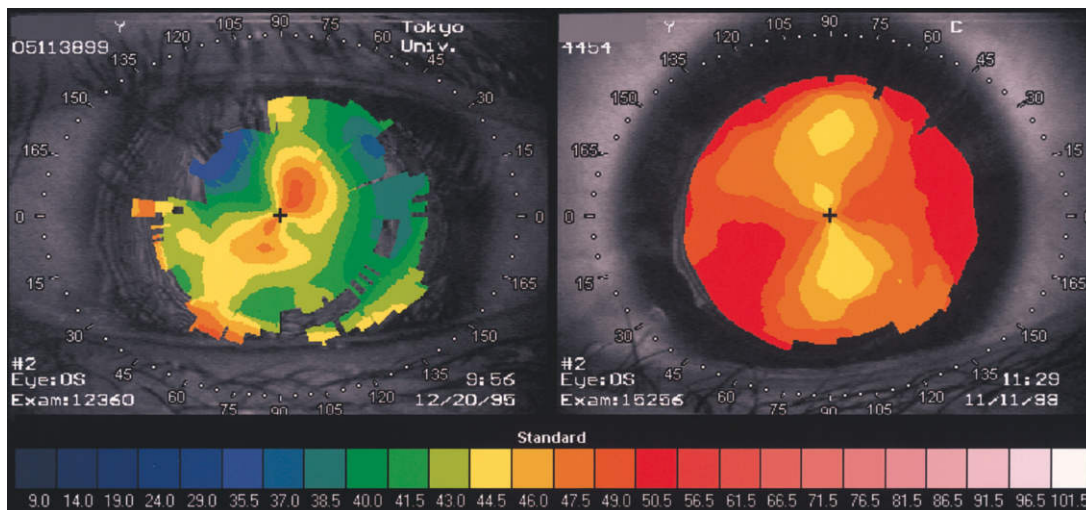


図 10 角膜移植後の抜糸による角膜形状の変化。

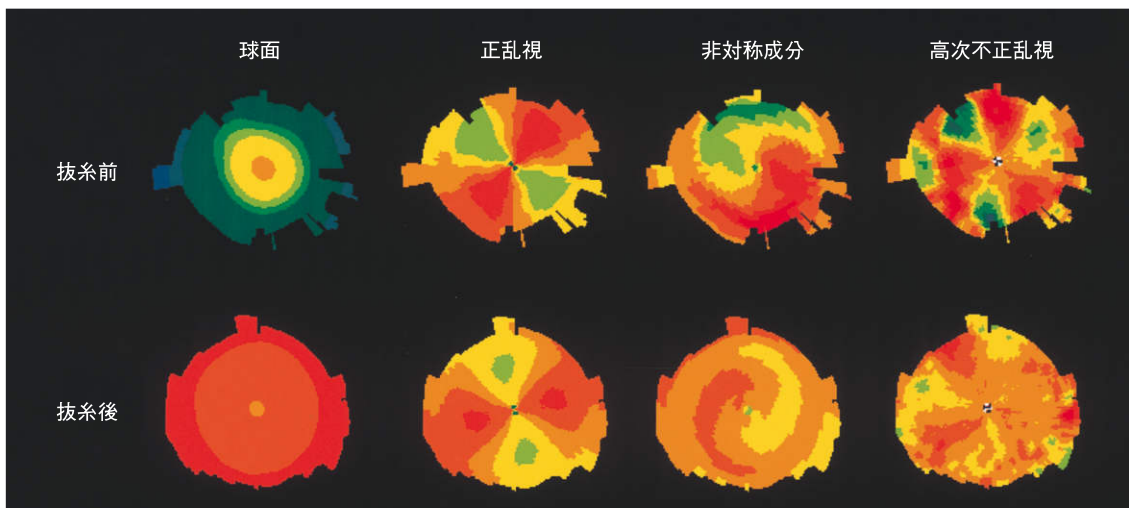


図 11 角膜抜糸前後(図 10 の症例)のフーリエマップ。
成分ごとの詳細な変化が判る。

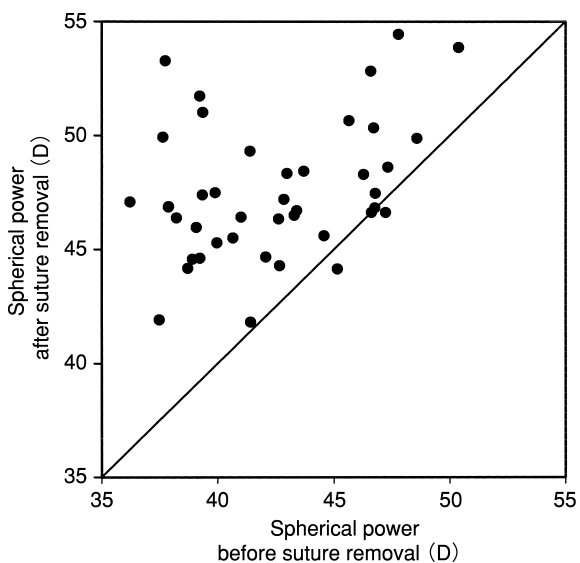


図 12 角膜抜糸前後の球面值。
有意に増加した ($p < 0.0001$, paired t-test)。

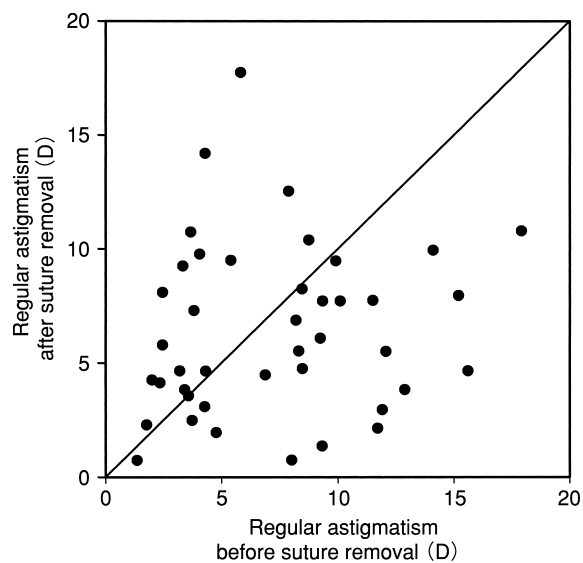


図 13 角膜抜糸前後の正乱視。
変化なし ($p = 0.247$, paired t-test)。

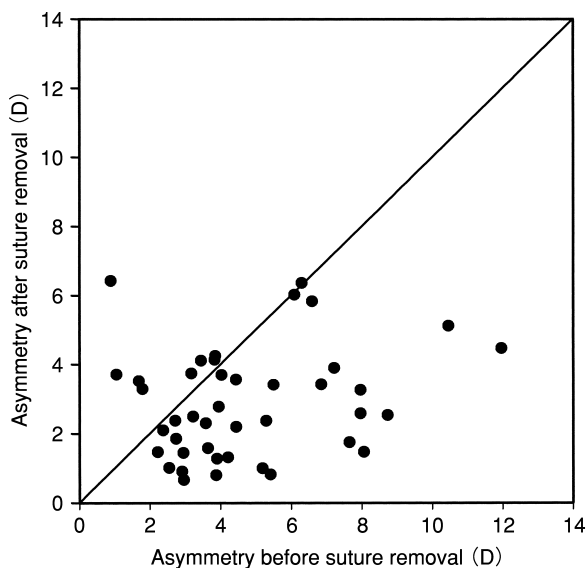


図 14 角膜抜糸前後の非対称成分。
有意に減少した ($p < 0.0001$, paired t-test)。

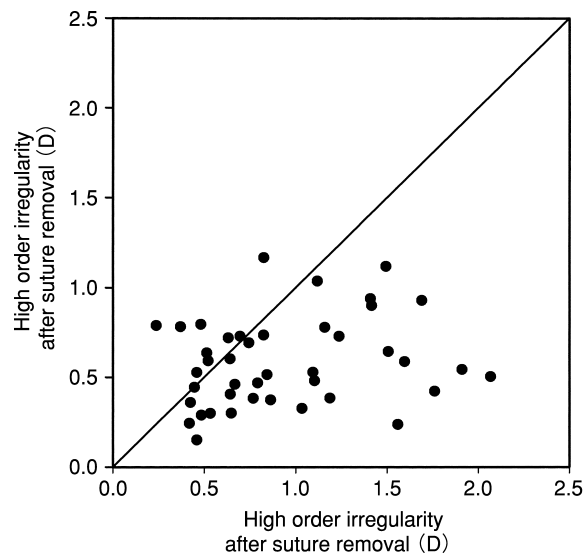


図 15 角膜抜糸前後の高次不正乱視。
有意に減少した ($p < 0.0001$, paired t-test)。

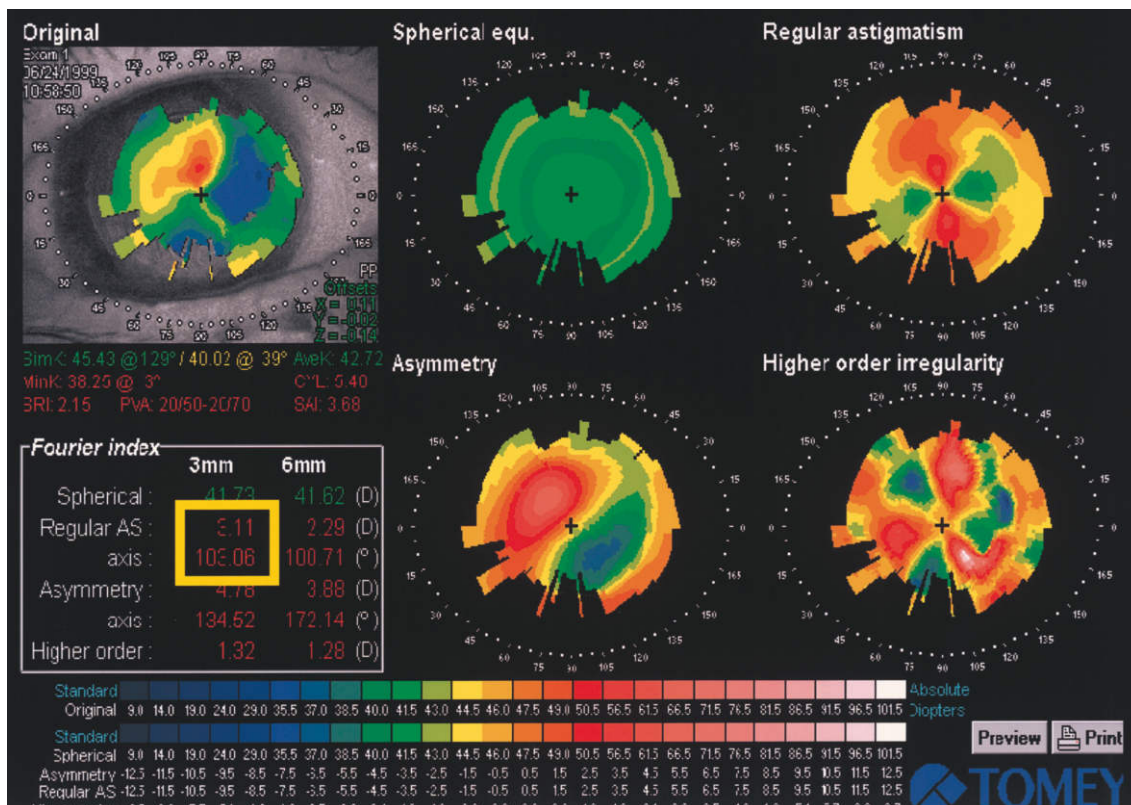


図 16 フーリエ解析を使用した矯正視力測定法。

3 mm 領域の正乱視量およびその軸(左下の黄色枠)を乱視矯正レンズとして使用。球面レンズのみ入れ替えることによって、自覚的に最良の視力を決定する。

表 6 角膜移植後眼における従来法とフーリエ法による矯正視力測定結果

	従来法	フーリエ法	p 値*
LogMAR 値 (小数視力換算)	0.31±0.29 (0.49)	0.23±0.32 (0.59)	P<0.001
乱視レンズ(D)	-3.53±1.64	-2.41±1.26	P<0.001
等価球面度数(D)	-2.47±3.63	-2.25±3.45	P=0.207

* : paired t-test, D : ジョプトリー。

6. その他の応用

我々は本法をその他種々の疾患・手術の評価に応用し、QOV に影響を与える不正乱視の変化を検討してきた。まず、種々の疾患においてフーリエ解析を行い、各成分の正常域を決定するとともに、各種疾患でフーリエ成分がどのように変化するか検討した(図 19~22)⁹⁾。ま

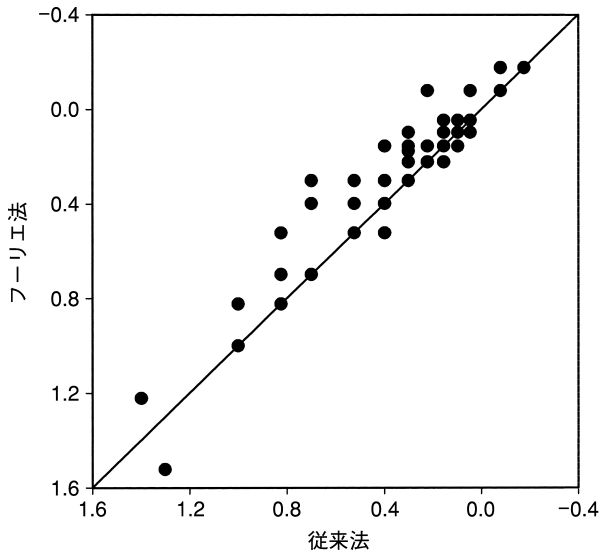


図 17 角膜移植後眼における矯正視力測定結果。
フーリエ法で得られた矯正視力は、従来法での矯正視力より有意に良好であった ($p < 0.001$, paired t-test)。

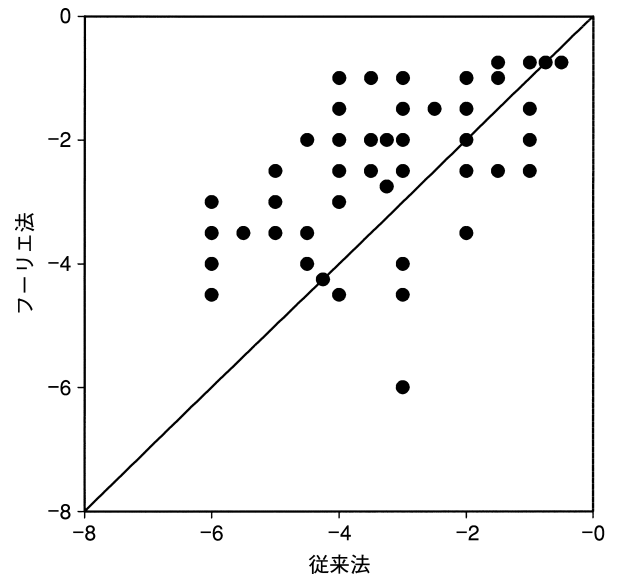


図 18 角膜移植後眼における円柱度数。
フーリエ法で使用した円柱度数は、従来法より有意に小さい値であった ($p < 0.001$, paired t-test)。単位 D。

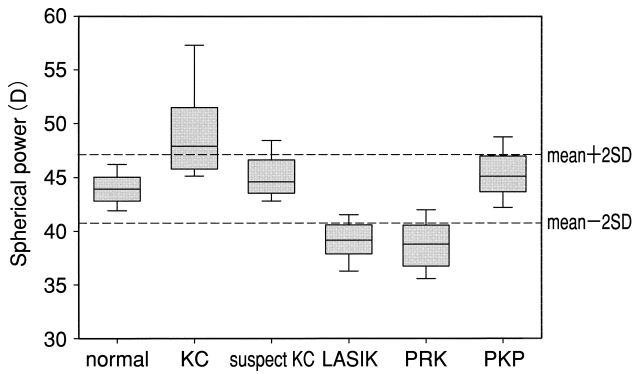


図 19 フーリエ解析による球面值の正常範囲と各種疾患での値。
正常範囲は平均 ± 2 ×標準偏差とした。KC：円錐角膜，suspect KC：円錐角膜疑い，PKP：全層角膜移植後。

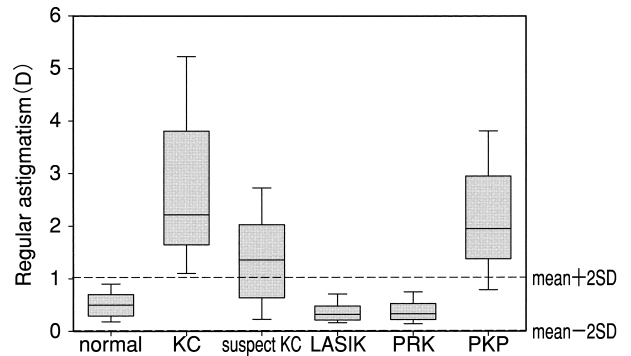


図 20 フーリエ解析による正乱視の正常範囲と各種疾患での値。
正常範囲は平均 ± 2 ×標準偏差とした。

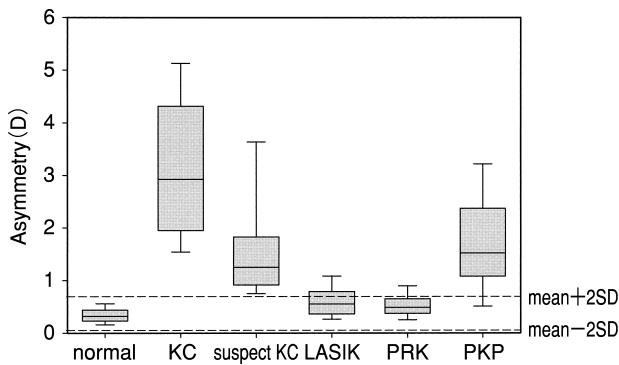


図 21 フーリエ解析による非対称成分の正常範囲と各種疾患での値。
正常範囲は平均 ± 2 ×標準偏差とした。

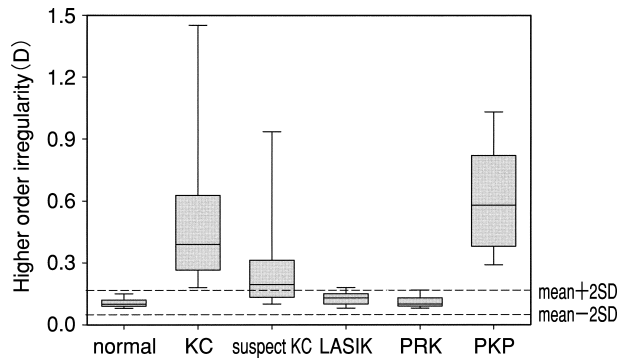


図 22 フーリエ解析による高次不正乱視の正常範囲と各種疾患での値。
正常範囲は平均 ± 2 ×標準偏差とした。

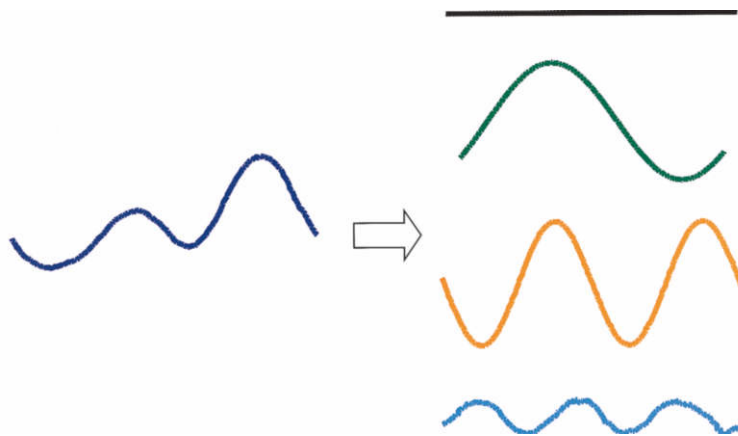


図 23 フーリエ解析の概念図。
線を線として展開している。

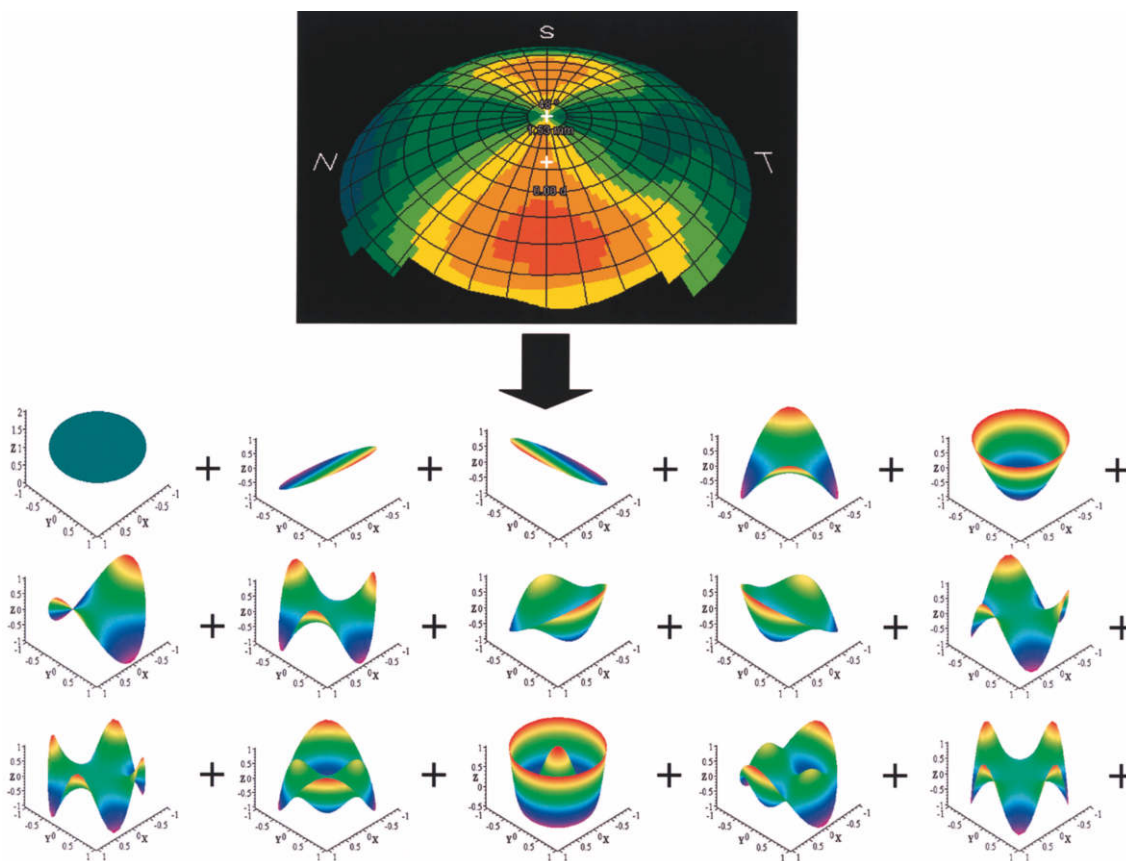


図 24 波面収差解析の概念図。
面を面として展開している。

た、白内障手術⁴⁹⁾⁵⁰⁾、緑内障手術⁵¹⁾、屈折矯正手術^{52)~54)}、翼状片⁵⁵⁾、網膜剝離手術⁵⁶⁾、オルソケラトロジー⁵⁷⁾などの手術や処置による変化を報告した。さらに、不正乱視とコントラスト感度の関係も定量的に検討した⁵⁴⁾。フーリエ解析は角膜後面の情報に対しても応用可能である。正常人眼の角膜後面において、正乱視のみならず不正乱視も存在すること⁵⁸⁾、円錐角膜眼の角膜後面の形状異常についても報告⁵⁹⁾した。

III 波面収差の定量的測定

屈折矯正手術や眼内レンズなど、手術的な操作によって眼光学系に変化を加える方法が急速に広まっている。従来、これらの手術による屈折状態の変化は、主に defocus 成分を指標として評価されてきた。しかし、手術の質が飛躍的に高まった現在、QOV の観点からは defocus のみでなく、aberration(収差)も考慮すべき重要

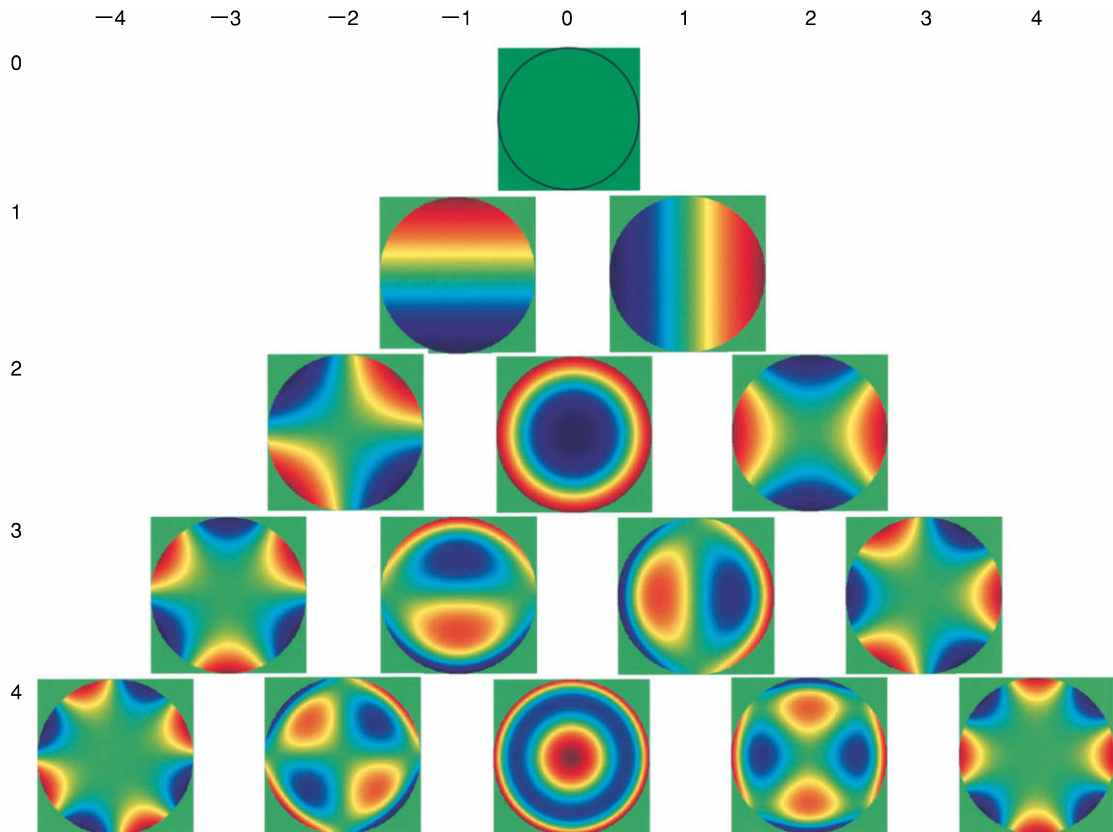


図 25 Zernike 多項式のカラーコードマップ。
上列から 0 次, 1 次, 2 次, 3 次, 4 次と並んでいる。5 次以降は省略。

な要素となる。

適応光学(adaptive optics)は天体望遠鏡レンズの最適化など、光学科学やエンジニアリングの領域で広く用いられてきた概念であるが、近年、眼球光学系の解析にも応用されるようになった。波面解析(wavefront analysis)の適用により、角膜のみならず眼球全体の波面収差(wavefront aberration)を測定することができる。これらは診断に利用できるだけでなく、治療にフィードバックすることにより眼の収差の矯正に結びつくという可能性を秘めている。我々は眼球屈折系の単色収差(monochromatic aberration)を解析する方法を研究してきた。以下に、角膜の収差、眼球全体の収差の順に述べる。

1. 角膜前面に起因する波面収差

フーリエ解析では、角膜屈折力分布を二次元的に展開したが(図 23)、収差解析では角膜の形状情報を面に展開することを基本とする(図 24)。光学的に意味を持つ展開として、幾何光学で広く用いられている Seidel 収差と低次の項が似ている直交多項式 Zernike polynomial が良く用いられる(図 25)。

我々は、角膜の高さ情報(height map)から角膜前面の波面収差を算出する方法を行った⁶⁰⁾。まず、最小二乗法によって 3mm 径での best-fit sphere を計算し、角膜高さデータから差し引く。残りの値に角膜と空気の屈

折率の差 0.3375 を乗じた後、Taylor 多項式に当てはめる^{60)~62)}。

$$\begin{aligned}
 W(x, y) = & A + Bx + Cy + Dx^2 + Exy + Fy^2 + Gx^3 \\
 & + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 + Kx^4 + Lx^3y \\
 & + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 + Px^5 + Qx^4y \\
 & + Rx^3y^2 + Sx^2y^3 + Txy^4 + Uy^5 + Vx^6 \\
 & + Wx^5y + Xx^4y^2 + Yx^3y^3 + Zx^2y^4 \\
 & + A_2xy^5 + A_3y^6 \dots\dots\dots (6)
 \end{aligned}$$

ここで(x, y)は瞳孔中心を原点としたデカルト座標上の角膜を表し、網膜から離れる方向を正とする。続いて Taylor 多項式を Zernike 多項式に展開し、直交係数を得る⁶⁰⁾⁶³⁾。

$$Z_n^{\pm m}(\rho, \theta) = \begin{cases} \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \cos m\theta & m > 0 \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) \sin m\theta & m < 0 \\ \sqrt{2(n+1)} R_n^m(\rho) & m = 0 \end{cases} \dots\dots\dots (7)$$

$$R_n^m(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{(n+m)-s}{2} \right]! \left[\frac{(n-m)-s}{2} \right]!} \rho^{n-2s} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、最初の 6 つの Zernike 係数(Z₀⁰~Z₂^m)は、ペー

スカーブ(0次), 面傾斜(1次), 球面と正乱視(2次)といった基本的な屈折成分を表現している。2次のうち Z_2^0 が球面值, Z_2^{-2} と Z_2^2 が乱視値に相当する。これらの基本成分を測定されたもとの波面から差し引き, 残りの高次成分を解析する。通常は, 7番~28番目の Zernike 係数($Z_3^m \sim Z_6^m$)を算出することにより, 3次の Zernike 係数($Z_3^{-3} \sim Z_3^3$), 4次の Zernike 係数($Z_4^{-4} \sim Z_4^4$), 5次の Zernike 係数($Z_5^{-5} \sim Z_5^5$), 6次の Zernike 係数($Z_6^{-6} \sim Z_6^6$)を分離する。3次のうち Z_3^{-1} と Z_3^1 がコマ収差, Z_3^{-3} と Z_3^3 が矢状収差であり, 4次のうち Z_4^0 が球面収差, Z_4^{-2} と Z_4^2 が非点収差である。一般に, Zernike 多項式の上付き添え字の絶対値によって高次波面収差は幾何光学的に分類される。 Z_{2n}^0 は球面収差, Z_{2n+1}^{-1} と Z_{2n+1}^1 はコマ収差, Z_{2n}^{-2} と Z_{2n}^2 は非点収差, Z_{2n+1}^{-3} と Z_{2n+1}^3 は矢状収差である。1次以上のすべての収差を全波面収差, 3次以上の収差を高次波面収差と呼ぶ。

Zernike 多項式によって高次波面収差の詳細な情報が得られるが, 係数が非常に多いため, すべてを解析に用いるのは実際的ではない。そこで, 奇数次の係数をコマ様収差, 偶数次の係数を球面様収差という名称でまとめる方法が行われている。具体的には, 3~6次係数をそれぞれの次数で二乗平均(root mean square, RMS)してまとめ, 3次の RMS あるいは3次+5次の RMS がコマ様収差を, 4次の RMS あるいは4次+6次の RMS が球面様収差を表す指標としている。通常の瞳孔径(3 mm)と暗所での拡大瞳孔径(6 あるいは 7 mm)の2つのケースを想定して計算した。

2. 角膜収差の年齢変化

正常人眼の屈折の年齢変化については, 角膜も全屈折も, 直乱視から倒乱視へ移行することが知られている^{64)~73)}。また, 色収差の年齢変化についても報告がある^{74)~76)}。しかし, 単色収差, 特に高次波面収差の年齢変化を解析した報告はそれまでなかった。我々は角膜前面の高次波面収差の年齢変化を検討した⁷⁷⁾。

対象は軽度の屈折異常以外に疾患を有しない正常人 102 例 102 眼である。年齢は 9~85 歳, 平均 49.4 ± 23.1 であった。前述の方法で角膜形状解析データの高さ情報から Zernike 係数を計算し, 3次と5次の RMS をコマ様収差, 4次と6次の RMS を球面様収差とした。

3 mm での解析では, コマ様収差は年齢と有意に相関したが(Spearman rank correlation coefficient $r_s = 0.256$, $p = 0.004$, 図 26), 球面様収差は相関しなかった($r_s = -0.068$, $p = 0.448$, 図 27)。7 mm の解析では, コマ様収差はさらに強い正の相関を示したが($r_s = 0.561$, $p < 0.001$, 図 28), 球面様収差は年齢と相関しなかった($r_s = 0.124$, $p = 0.166$, 図 29)。

瞳孔径を 3 mm から 7 mm に散大した際の収差の増大は, コマ様収差で 55.2 ± 56.2 倍とシミュレーション

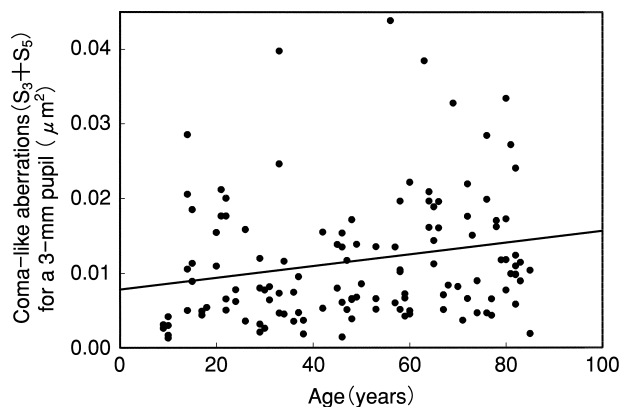


図 26 角膜のコマ様収差(3 mm)の年齢変化。

コマ様収差は年齢と有意に相関した(Spearman rank correlation coefficient $r_s = 0.256$, $p = 0.004$)。

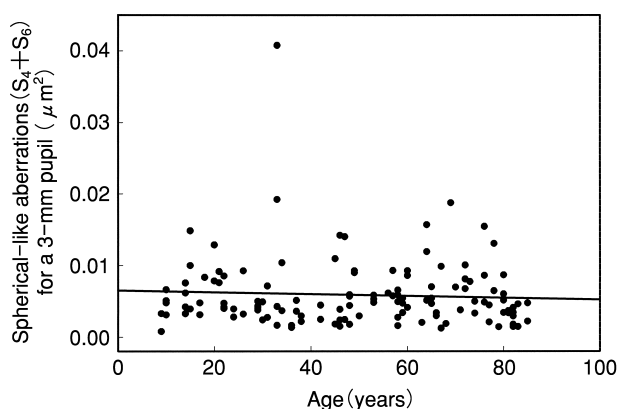


図 27 角膜の球面様収差(3 mm)の年齢変化。

球面様収差は年齢と相関しなかった(Spearman rank correlation coefficient $r_s = -0.068$, $p = 0.448$)。

され, その増大の程度は年齢と相関した($r_s = 0.243$, $p = 0.006$)。球面様収差も同様に 35.5 ± 58.1 倍に増加するが, 増加の程度は年齢と無関係であった($r_s = 0.141$, $p = 0.115$)。

3. 屈折矯正手術と角膜収差

正常人眼は生来, 相当量の高次波面収差を有しているが⁶⁰⁾⁶¹⁾⁷⁸⁾, 屈折矯正手術によって角膜形状が prolate 型から oblate 型に変化すれば, さらに高次波面収差が増大することが予想される。これまでに放射状角膜切開^{79)~81)}および photorefractive keratectomy (PRK)^{82)~84)}で手術によって高次収差が増えることが報告されていたが, laser *in situ* keratomileusis (LASIK)についてはそれまで報告がなかったため, 我々は経時的な解析を行った⁸⁵⁾。

対象は両眼近視の 22 例で, 年齢は 19~45 歳(平均 26.7 ± 5.9 歳)である。一眼に PRK, 他眼に LASIK を行った。術前の屈折は PRK 眼が $-2.50 \sim -5.00$ D(平均 -3.23 ± 0.63 D), LASIK 眼が $-2.25 \sim -5.50$ D(平均 -3.44 ± 0.72 D)であった。レーザーはニデック EC-5000

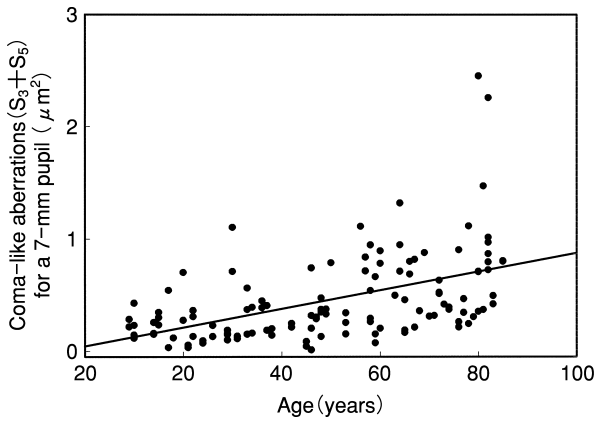


図 28 角膜のコマ様収差 (7 mm) の年齢変化。
 コマ様収差は年齢と有意に相関した (Spearman rank correlation coefficient $r_s=0.561$, $p<0.001$)。

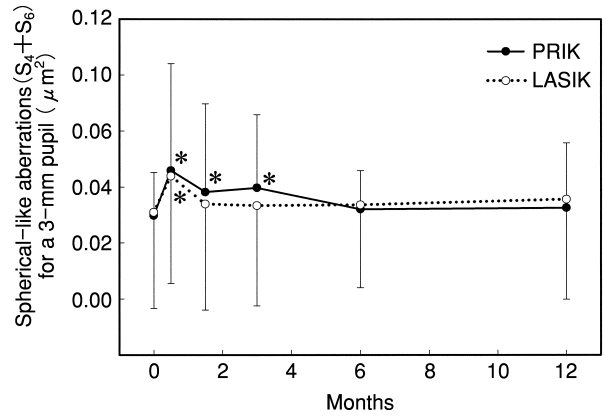


図 31 角膜の球面様収差 (3 mm) の経時変化。
 * $p<0.05$, 術前値と有意差あり (Wilcoxon signed rank test)。

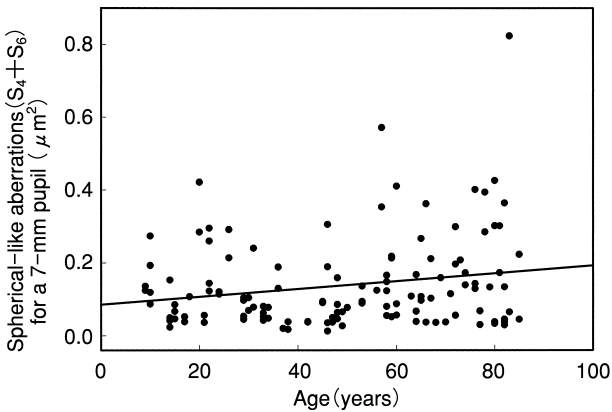


図 29 角膜の球面様収差 (7 mm) の年齢変化。
 球面様収差は年齢と相関しなかった (Spearman rank correlation coefficient $r_s=0.124$, $p=0.166$)。

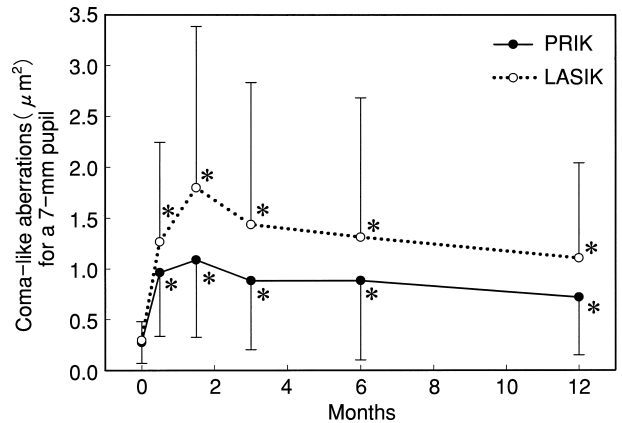


図 32 角膜のコマ様収差 (7 mm) の経時変化。
 * $p<0.05$, 術前値と有意差あり (Wilcoxon signed rank test)。

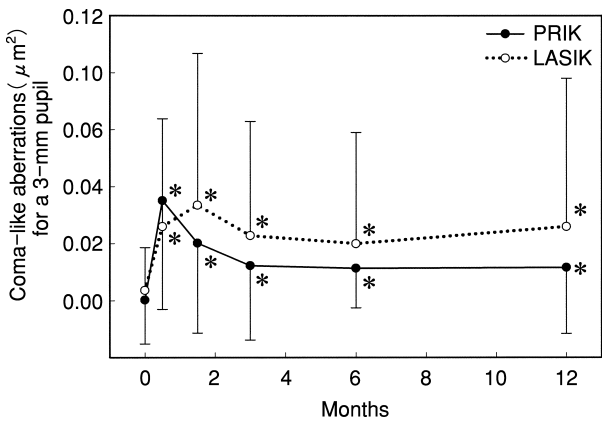


図 30 角膜のコマ様収差 (3 mm) の経時変化。
 * $p<0.05$, 術前値と有意差あり (Wilcoxon signed rank test)。

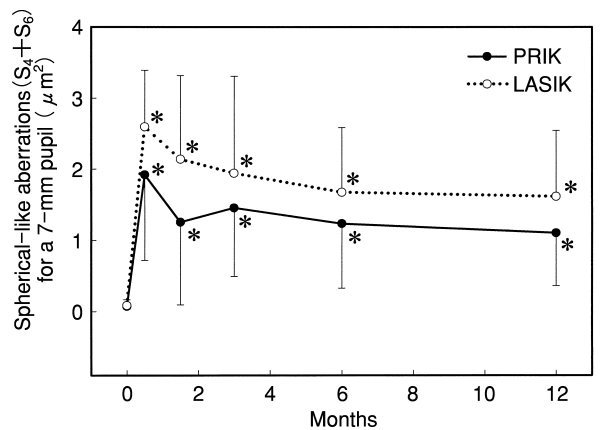


図 33 角膜の球面様収差 (7 mm) の経時変化。
 * $p<0.05$, 術前値と有意差あり (Wilcoxon signed rank test)。

を, ケラトームは Chiron ALK を用いた。術後 1 年まで経時的に角膜形状解析検査を行い, 前述の方法に従って高次波面収差を計算した。

瞳孔径 3 mm のコマ様収差 (図 30), 球面様収差 (図

31), 瞳孔径 7 mm のコマ様収差 (図 32), 球面様収差 (図 33) の経時変化を示す。PRK, LASIK とも, 術前より相当に収差が増大している。PRK と LASIK の間に有意差があったのは 7 mm 径の球面様収差のみで,

収差がない場合の波面

収差がある場合の波面

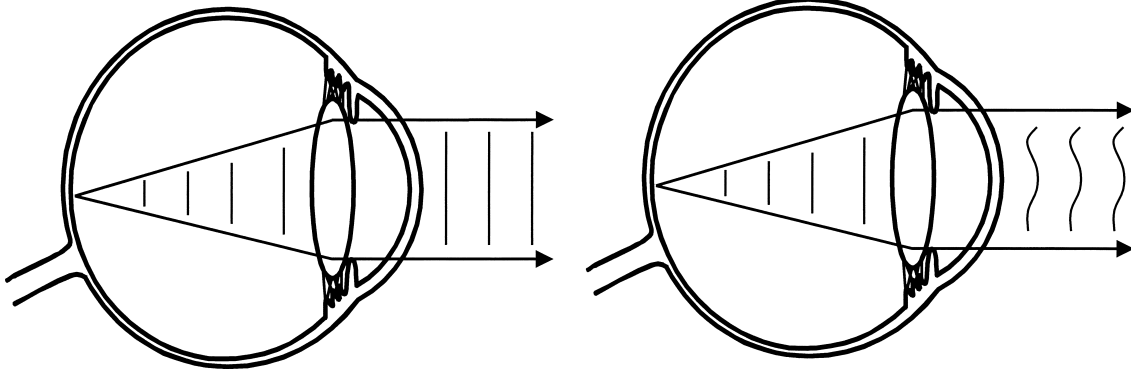


図 34 眼底からの反射光と収差.

左：眼球に収差がなければ，眼底で反射した射出光の位相は揃い，理想の波面と一致する．右：水晶体や角膜によって収差成分が持ち込まれると，射出光の位相はずれて波面に不揃いが生じる．

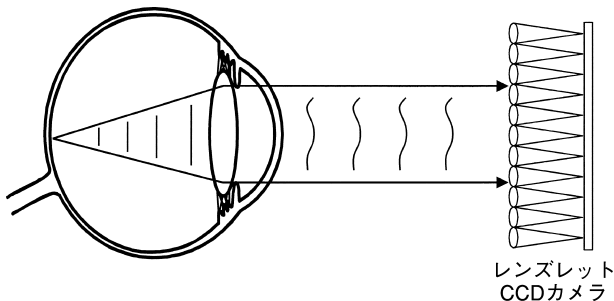


図 35 Hartmann-Shack センサーによる収差の測定.
Hartmann-Shack センサーでは，射出光を多数のレンズレット (lenslet) でとらえて収差解析する．

術後 12 か月を通じて LASIK の方が PRK より有意に大きかった．

別の研究では，LASIK の矯正量が大きいほど，術後の高次波面収差もそれと相関して増加することを報告⁸⁶⁾した．

4. 眼球全体の収差

波面収差の原因となるのは，角膜の前面だけではなく，角膜後面や水晶体も収差を生じる．眼底に投影した光が反射してくる場合，眼球に収差がなければ，射出光の位相は揃い，理想の波面と一致する (図 34)．しかし，水晶体や角膜によって収差成分が持ち込まれると，射出光の位相はずれて波面に不揃いが生じる．

眼球全体の波面収差を測定するための装置がいくつか開発されているが，Hartmann-Shack センサーを用いた波面センサーはその代表である⁷⁸⁾．点光源となる super luminescent diode，網膜に点像を投影する光学系，その点像を 2 次光源として角膜から出射する光を多数の光束に分割するレンズレットと，レンズレットの焦点面に配置される charge-coupled device (CCD) からなる Hartmann-Shack センサーにより構成される (図 35)．この CCD 上にはレンズレットの配列に対応して点像ができ

るため，この CCD 上の点像の位置を測定し，無収差の場合の点像位置と比較することにより，波面収差を計算することが可能になる．

5. 眼内レンズの固定状況と眼球の波面収差

眼内の光学要素によって，眼球の波面収差がどの程度影響されるのか，またそれを波面センサーでとらえることができるのかを検討する目的で，縫着眼内レンズの傾き・偏位と眼球波面収差の関係を解析した．

症例は眼内レンズの毛様溝縫着を受けた 19 例 22 眼．眼内レンズの偏位と傾斜を Scheimpflug 前眼部解析システム (EAS-1000, ニデック) で測定⁸⁷⁾⁸⁸⁾．角膜および眼球の高次波面収差を Wavefront Analyzer (KR-9000 PW, トプコン) で測定した⁸⁹⁾⁹⁰⁾．

図 36 に 1 例を示す．この患者は水晶体全摘手術後の無水晶体眼に対して眼内レンズ毛様溝縫着を受けている．図 36 左に示すように，眼内レンズは大きく傾いている．高次波面収差の測定結果は図 36 右のごとくで，角膜の高次収差は小さいものの，眼球の収差，特にコマ様収差が非常に大きな値となっている．すなわち，眼内レンズの傾きによって眼球のコマ様収差が増大しているということであり，理論的に正しい結果となっている．

全例での解析では，まず眼内レンズの傾斜は平均で $3.31 \pm 1.63^\circ$ ，偏心は $0.26 \pm 0.12 \text{ mm}$ であった．高次波面収差との関係は，眼内レンズ傾斜と眼球のコマ様収差との間に有意の相関がみられたが (Pearson $r=0.649$, $p=0.002$, 図 37)，傾斜と眼球の球面様収差には有意の相関はみられなかった ($r=0.126$, $p=0.596$)．角膜の収差については，眼内レンズ傾斜とコマ様収差 ($r=0.241$, $p=0.307$, 図 38)，傾斜と球面様収差 ($r=0.329$, $p=0.156$) といずれも有意な関係を示さなかった．眼内レンズの偏位については，どの高次波面収差成分とも相関しなかった．

以上から，眼内レンズが傾くことによって眼球のコマ

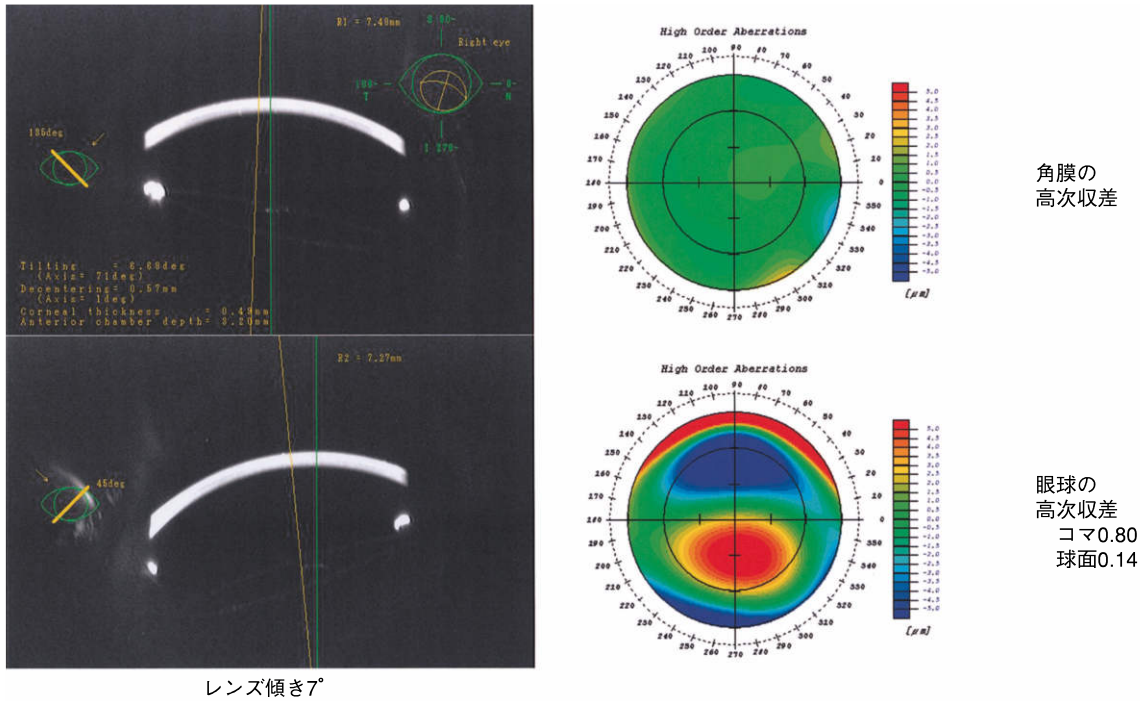


図 36 眼内レンズ縫着の一例。

左：眼内レンズは大きく傾いている。右：角膜の高次収差は小さいものの、眼球の収差、特にコマ様収差が非常に大きな値となっている。

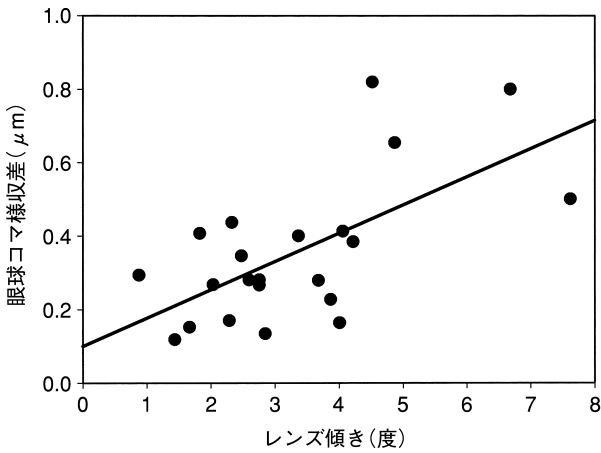


図 37 眼内レンズ傾斜と眼球のコマ様収差。
両者に有意の相関がみられた (Pearson $r=0.649$, $p=0.002$)。

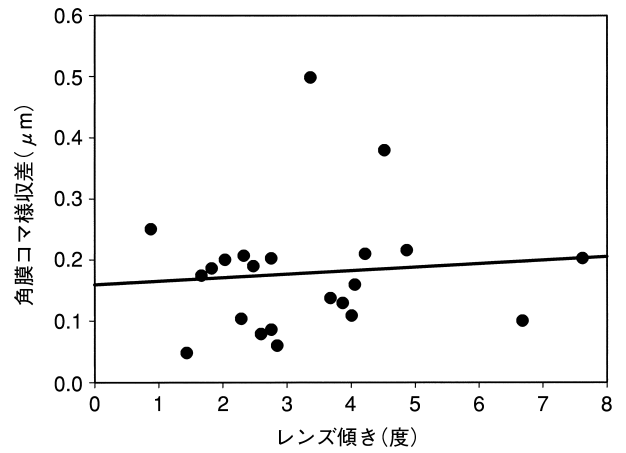


図 38 眼内レンズ傾斜と角膜のコマ様収差。
有意の相関はみられなかった (Pearson $r=0.241$, $p=0.307$)。

様収差が増大すること、波面センサーによってその程度を測定可能であることが明らかになった。

6. 眼球収差の年齢変化

角膜の高次収差の年齢変化⁷⁷⁾⁹¹⁾、また眼球全体の高次収差の年齢変化^{92)~94)}について、これまでにいくつかの報告がある。しかし、角膜と眼球の高次収差の関係を、年齢変化について詳細に検討した報告はない。我々は角膜と眼球の収差を同時に測定できる波面センサーWavefront Analyzer (KR-9000 PW, トプコン)を用いて、両者の関係を解析した⁹⁵⁾。対象は眼科疾患を有しない正常

者 75 例 75 眼 (18~69 歳) で、屈折は +3.5 から -12.0 D (平均 -1.77 ± 3.26 D) であった。

結果は、角膜のコマ様収差は年齢と有意に相関したが (Pearson $r=0.355$, $p=0.0016$, 図 39)、角膜の球面様収差は年齢と相関しなかった ($r=0.2357$, $p=0.139$, 図 40)。眼球の収差に関しては、コマ様収差 ($r=0.381$, $p=0.0007$, 図 41)、球面様収差 ($r=0.312$, $p=0.0062$, 図 42) とともに年齢と有意な相関を示した。

以上から、コマ収差については角膜が年齢変化を示すため、眼球全体のコマ収差も年齢とともに増加する、一

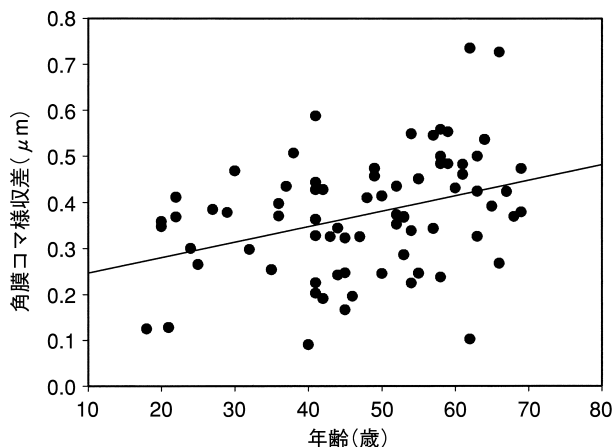


図 39 角膜のコマ様収差と年齢.

両者は有意に相関した (Pearson $r=0.355$, $p=0.0016$).

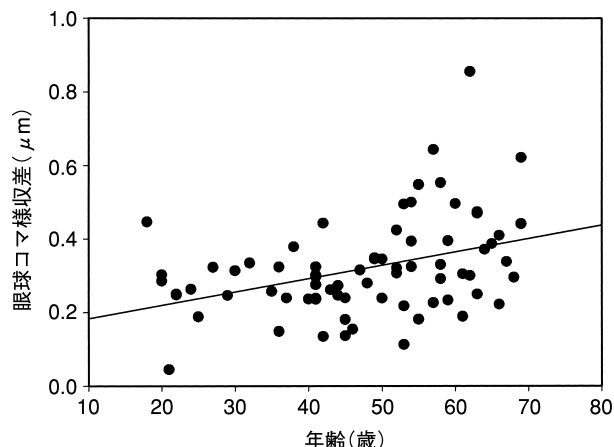


図 41 眼球のコマ様収差と年齢.

両者は有意に相関した (Pearson $r=0.381$, $p=0.0007$).

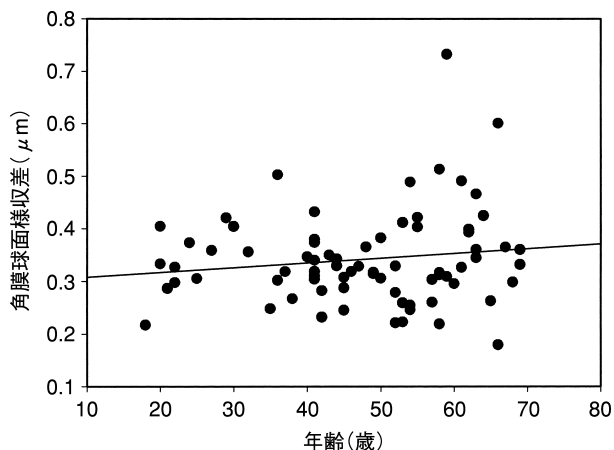


図 40 角膜の球面様収差と年齢.

有意な相関はなかった (Pearson $r=0.2357$, $p=0.139$).

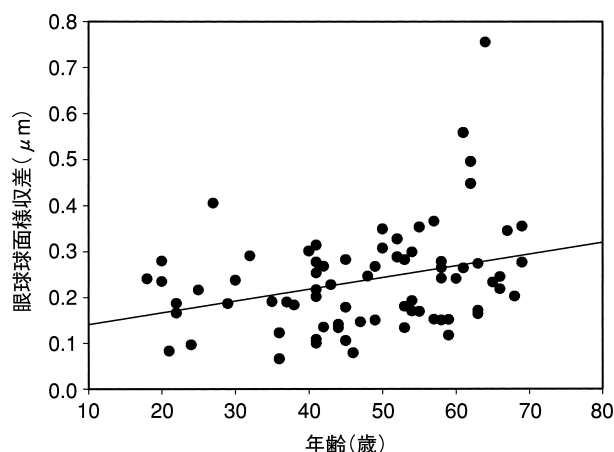


図 42 眼球の球面様収差と年齢.

両者は有意に相関した (Pearson $r=0.312$, $p=0.0062$).

方で球面収差については水晶体を始めとする眼内の屈折要素が年齢変化を示すため、眼球全体の球面収差も年齢とともに増加することが明らかとなった。水晶体に起因する眼球全体の高次波面収差変化は最近盛んに報告^{89)90)96)~104)}されており、今回の結果もそれらを反映するものである。

7. 眼球収差とコントラスト感度

屈折矯正手術は低次の収差を減少させ、裸眼視力を回復させるが、眼光学的にいくつかの問題を生じることが知られている。LASIK が術後のコントラスト感度を低下させることは^{105)~112)}、放射状角膜切開術¹¹³⁾¹¹⁴⁾や PRK^{114)~116)}と同様に報告されている。また、高次波面収差の増加も、LASIK^{85)86)117)~120)}、放射状角膜切開術^{79)~81)113)}、PRK^{83)~85)121)}について報告されている。一方で、Applegate ら¹¹³⁾は放射状角膜切開術の矯正量とコントラスト感度の低下が相関することを明らかにした。最近では、aberroscopy を用いた研究によって、PRK 後に

眼球高次波面収差が増加し、それと関連して低コントラスト視力とグレア視力が低下することが報告¹²¹⁾されている。しかし、LASIK 後の波面収差とコントラスト感度の関係を検討した報告はこれまでにない。我々は LASIK による眼球の高次波面収差とコントラスト感度の変化を解析した¹²²⁾。

対象は近視に対して LASIK を受けた 110 例 200 眼で、年齢は 17~52 歳 (平均 32.7±8.4 歳) であった。術前の屈折は -1.25~-13.25 D (平均 -5.34±2.64 D) であった。手術は VISIX STAR S2 エキシマレーザーシステム (VISIX Inc.) とマイクロケラトーム (MK-2000, ニデック) で行った。術前と術後 1 か月に、Hartmann-Shack センサー (KR-9000 PW, トプコン) による高次波面収差の測定、CSV-1000 E (Vector Vision Co.) によるコントラスト感度の測定、CSV-1000 LanC 10% による低コントラスト視力の測定を行った。縞視標チャート CSV-1000 E の測定から、area under the log contrast

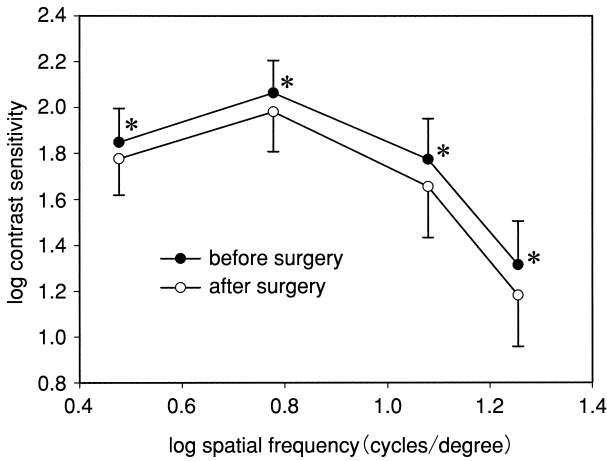


図 43 Laser *in situ* keratomileusis (LASIK) 術前後の
 縞視標コントラスト感度。
 手術によってコントラスト感度はすべての空間周波数で
 有意に低下した(* $p < 0.001$, Wilcoxon signed-rank
 test)。

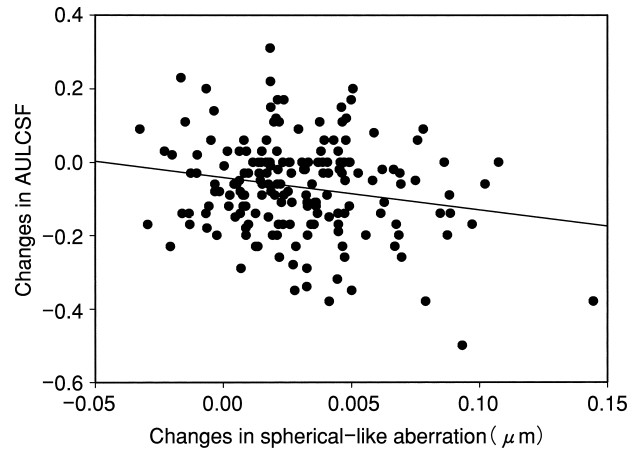


図 45 眼球の球面様収差の変化と area under the log
 contrast sensitivity function (AULCSF) の変化。
 両者には有意の相関がみられた (Pearson correlation
 coefficient $r = -0.171$, $p = 0.022$)。

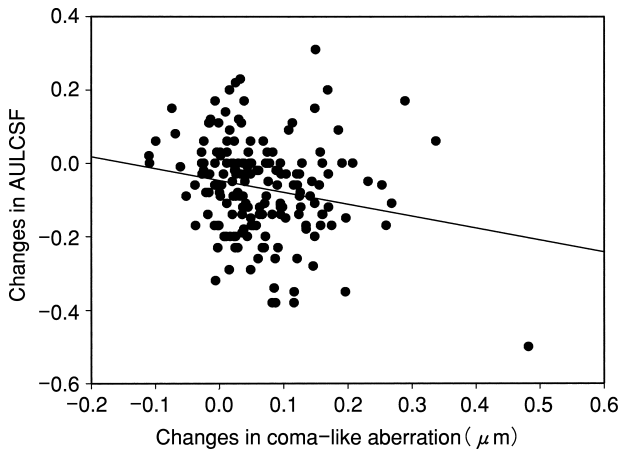


図 44 眼球のコマ様収差の変化と AULCSF の変化。
 両者には有意の相関がみられた (Pearson correlation
 coefficient $r = -0.205$, $p = 0.006$)。

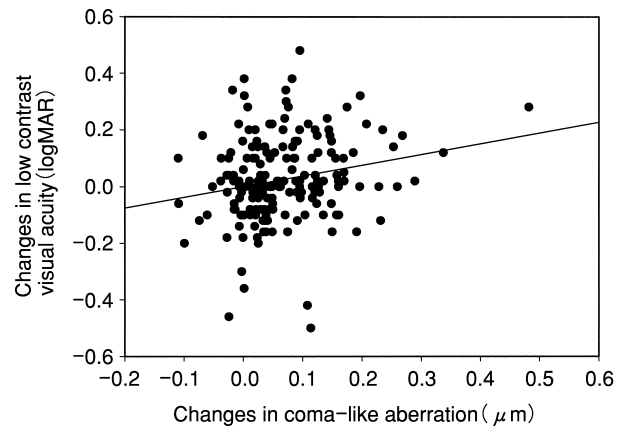


図 46 眼球のコマ様収差の変化と低コントラスト視力
 の変化。
 両者には有意の相関がみられた (Pearson correlation
 coefficient $r = 0.201$, $p = 0.007$)。

sensitivity function (AULCSF) を計算した¹¹³⁾。

手術によって縞視標コントラスト感度はすべての空間
 周波数において有意に低下した ($p < 0.001$, Wilcoxon
 signed-rank test, 図 43)。手術による収差の変化とコ
 ントラスト感度の変化の関係では、コマ様収差の変化と
 AULCSF の変化 (Pearson correlation coefficient $r =$
 -0.205 , $p = 0.006$, 図 44), 球面様収差の変化と AU-
 LCSF の変化 ($r = -0.171$, $p = 0.022$, 図 45) に有意な
 相関がみられた。また、眼球のコマ様収差の変化と低コ
 ントラスト視力の変化 ($r = 0.201$, $p = 0.007$, 図 46),
 眼球の球面様収差の変化と低コントラスト視力の変化
 ($r = 0.207$, $p = 0.005$, 図 47) も有意に相関した。以上
 から、従来型の LASIK は眼球の高次波面収差を有意に
 増大させ、それに比例してコントラスト感度が低下する
 ことが明らかとなった¹²²⁾。

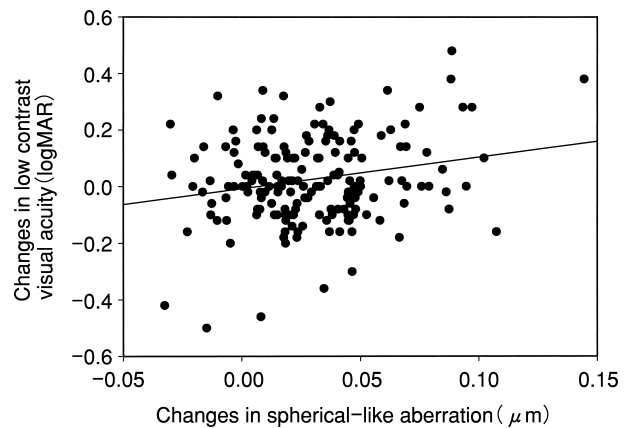


図 47 眼球の球面様収差の変化と低コントラスト視力
 の変化。
 両者には有意の相関がみられた (Pearson correlation
 coefficient $r = 0.207$, $p = 0.005$)。

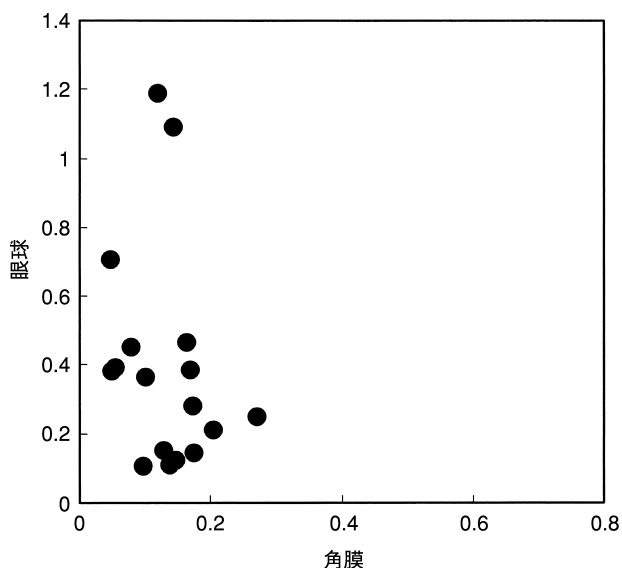


図 48 白内障のコマ様収差.

角膜と眼球の値は相関せず (Pearson $r = -0.262$, $p = 0.294$), 平均値は眼球の値が角膜より有意に高かった ($p < 0.01$, paired t-test).

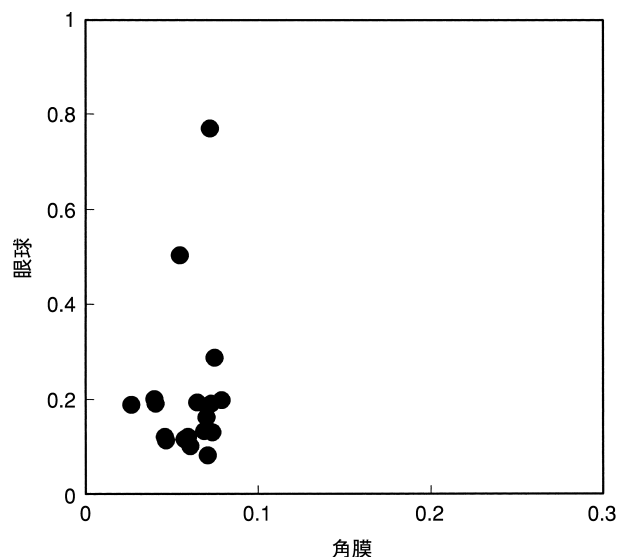


図 49 白内障の球面様収差.

角膜と眼球の値は相関せず (Pearson $r = 0.144$, $p = 0.569$), 平均値は眼球の値が角膜より有意に高かった ($p < 0.01$, paired t-test).

近年, wavefront-guided LASIK が臨床応用されるようになってきている^{123)~130)}. Wavefront-guided LASIK の利点についてはまだ一致した意見はみられておらず, 術後の高次波面収差の量は従来の LASIK と変わらなかったとする報告¹²⁴⁾¹²⁵⁾がある一方で, wavefront-guided あるいは topography-guided LASIK 術後の高次波面収差は少なく, より良い視機能が得られたとする報告¹²⁹⁾もある. 今回の我々の検討が示すように, 手術による高次波面収差の変化が少なければ, コントラスト感度の変化も少ないことから, wavefront-guided LASIK では高次波面収差とコントラスト感度の両者においてより良い臨床成績が得られる可能性がある. 今後の検討を期待したい.

ただここで一つ注意が必要なのは, 術後の高次波面収差とコントラスト感度の相関を解析するだけでは, 手術による影響を示したことにはならないということである. 多くの症例で, 術前の高次波面収差とコントラスト感度がすでに相関している. したがって, 今回我々が示したように, 手術による高次波面収差の変化と, 手術によるコントラスト感度の変化の関係を解析する必要がある¹²²⁾.

IV 白内障・眼内レンズと QOV

1. 角膜と水晶体・眼内レンズ

正常若年者では, 水晶体は負の球面収差を有し, 正の球面収差を有する角膜と互いに相補関係にあり, 眼全体の球面収差はバランスが取れている¹³¹⁾. しかし, 加齢によって水晶体が硬化し, 屈折率の変化あるいは形状の変化が生じると, 水晶体の球面収差も正となって角膜と

のバランスが崩れる¹³²⁾¹³³⁾. 白内障手術によって水晶体が眼内レンズに置き換わった場合も, 通常の球面眼内レンズではやはり角膜の球面収差を補うことはできない.

我々は, 白内障 18 眼 (65.7 ± 11.6 歳), 偽水晶体 21 眼 (68.4 ± 9.9 歳), 無水晶体眼 9 例 13 眼 (68.7 ± 6.1 歳) で, 角膜の収差と眼全体の収差を比較した. 結果として, 白内障眼ではコマ様収差 (Pearson $r = -0.262$, $p = 0.294$, 図 48), 球面様収差 ($r = 0.144$, $p = 0.569$, 図 49) とともに, 角膜と眼球で相関しなかった. コマ様, 球面様収差ともに, 平均値は眼球が角膜より有意に高い値であった ($p < 0.01$, paired t-test). 偽水晶体眼ではコマ様収差 ($r = 0.583$, $p = 0.007$, 図 50), 球面様収差 ($r = 0.669$, $p = 0.001$, 図 51) とともに, 角膜と眼球の間に有意な相関がみられた. またコマ様収差は角膜と眼球で差がなく, ほぼ等しい値であったが, 球面様収差は眼球が角膜より有意に大きな値を示した ($p < 0.01$). 無水晶体眼でもコマ様収差 ($r = 0.714$, $p = 0.02$, 図 52), 球面様収差 ($r = 0.639$, $p = 0.047$, 図 53) とともに角膜と眼球の間に有意な相関があり, 平均値はコマ様, 球面様収差ともに角膜と眼球で差はなかった. 4 次の係数 Z_4^0 の角膜と眼球での相関は, 偽水晶体眼で $r = 0.457$ ($p = 0.037$), 無水晶体眼で $r = 0.840$ ($p = 0.002$) と, 後者でより高かった. Z_4^0 は偽水晶体眼では角膜 < 眼球であったが, 無水晶体眼では角膜 > 眼球であった.

以上から, 白内障眼では角膜と眼球の収差バランスは大きく崩れていること, 偽水晶体眼では角膜と眼球で高次波面収差に相関があるが, 角膜と眼内レンズの相補関係欠如により, 球面収差の平衡が保たれていないことが示された.

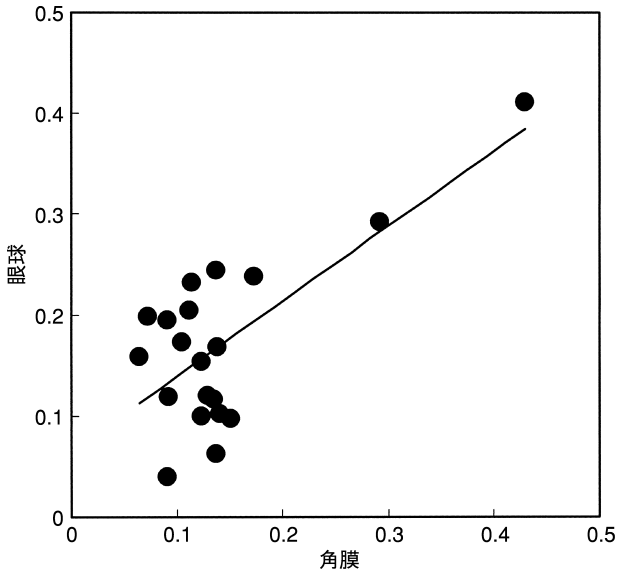


図 50 偽水晶体眼のコマ様収差.
角膜と眼球の値は有意に相関し($r=0.583, p=0.007$),
平均値は角膜と眼球で差がなかった。

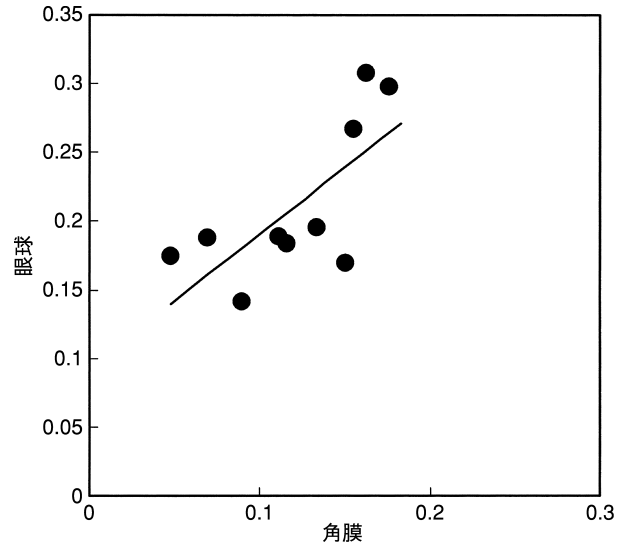


図 52 無水晶体眼のコマ様収差.
角膜と眼球の値は有意に相関し($r=0.714, p=0.02$),
平均値は角膜と眼球で差がなかった。

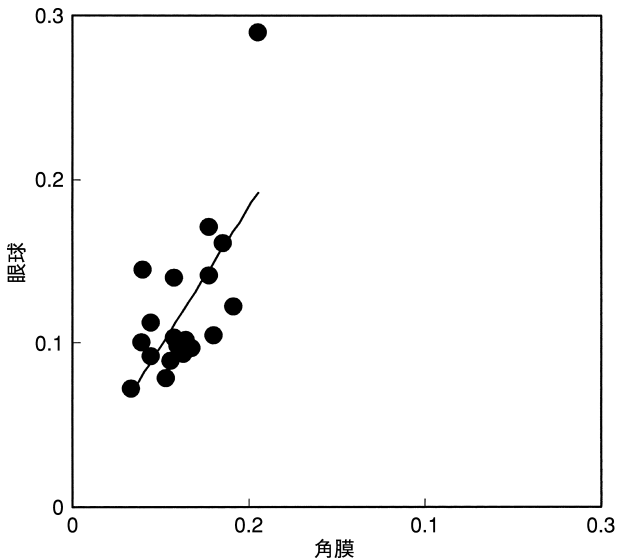


図 51 偽水晶体眼の球面様収差.
角膜と眼球の値は有意に相関し($r=0.669, p=0.001$),
平均値は眼球の値が角膜より有意に高かった($p<0.01$,
paired t-test).

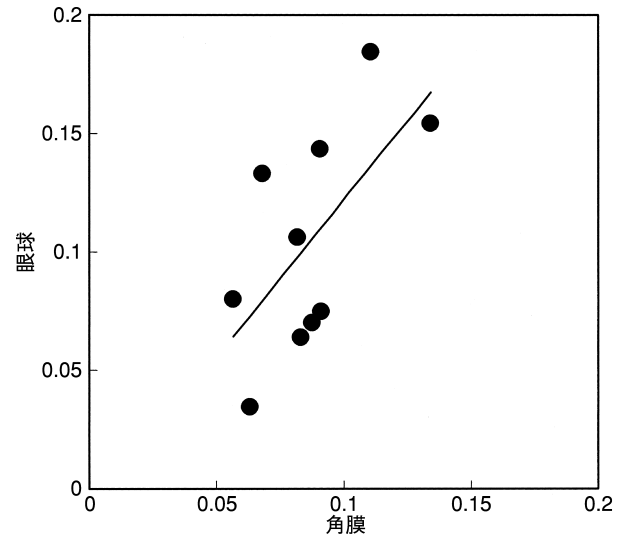


図 53 無水晶体眼の球面様収差.
角膜と眼球の値は有意に相関し($r=0.639, p=0.047$),
平均値は角膜と眼球で差がなかった。

2. 非球面眼内レンズ

前述のように、従来の眼内レンズを挿入された偽水晶体眼では、角膜と眼内レンズの球面収差のバランスが取れていない。そこで、眼内レンズの光学部を非球面状にして、眼球全体の球面収差を減らそうとの試みがある^{134)~139)}。我々も本レンズを使用して、術後眼の光学特性およびQOVを検討した。

対象は両眼の老人性白内障患者 18 例 36 眼(72.0 ± 6.5 歳)で、一眼に非球面眼内レンズ(Tecnis)、他眼に通常の眼内レンズ(IOL)(911 A)を挿入した。911 A は、光

学部が球面である以外、Tecnis と同じ材質および形状のシリコン眼内レンズである。

術後の結果を示す。Wavefront Analyzer(KR-9000 PW, トプコン)で測定した角膜の高次波面収差は、コマ様収差、球面様収差とも、両レンズに差はみられなかった(図 54)。眼球全体では、コマ様収差はレンズ間に差がなかったものの、球面様収差および Z_4^0 はTecnisで有意に低いとの結果であった(図 55)。コントラスト感度は縞視標チャート CSV-1000 E(Vector Vision Co.)で測定し、AULCSFを計算した¹¹³⁾。結果は図 56のごとくで、非球面眼内レンズでやや良好な傾向にあったが、群間に有意差はみられなかった。CSV-1000 Lan-

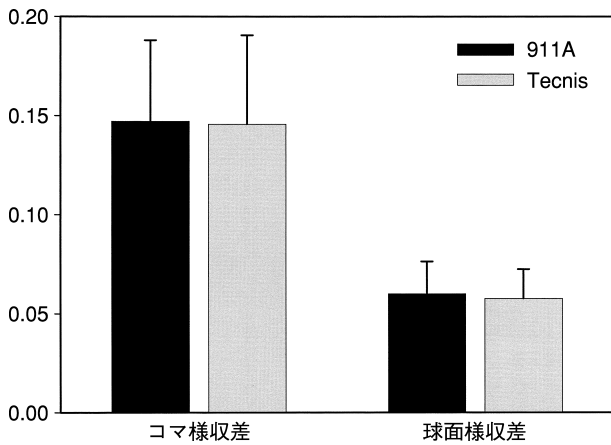


図 54 術後の角膜高次波面収差.

球面レンズ (911 A) と非球面レンズ (Tecnis) の間に有意差はなかった。

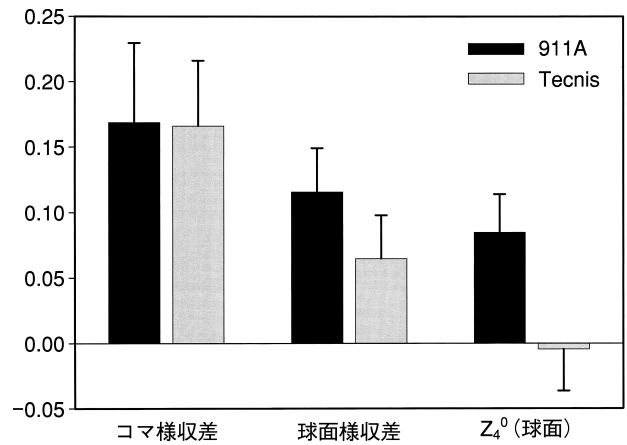


図 55 術後の眼球高次波面収差.

コマ様収差はレンズ間に差がなかったものの、球面様収差および Z₄⁰ は Tecnis で有意に低かった。

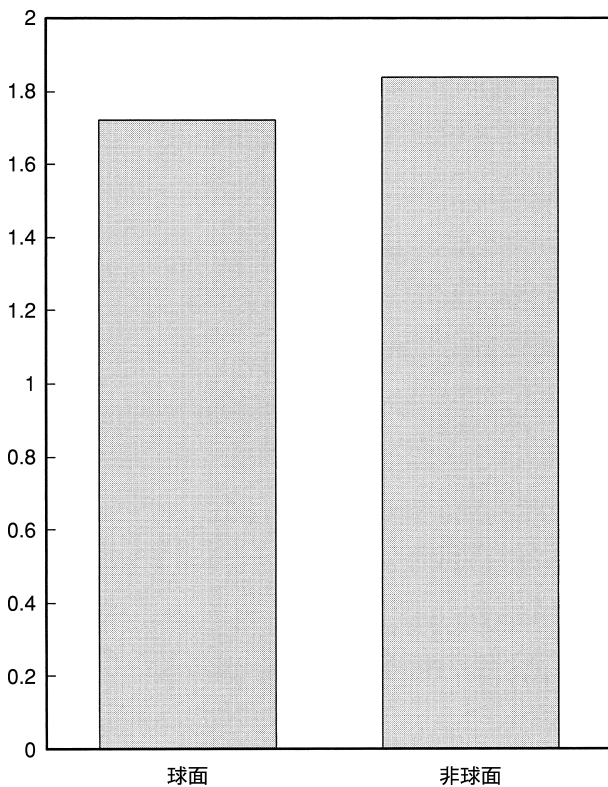


図 56 縞指標コントラスト視力の結果.

Area under the log contrast sensitivity function (AUL-CSF) を計算した。非球面眼内レンズでやや良好な傾向にあったが、群間に有意差はみられなかった。

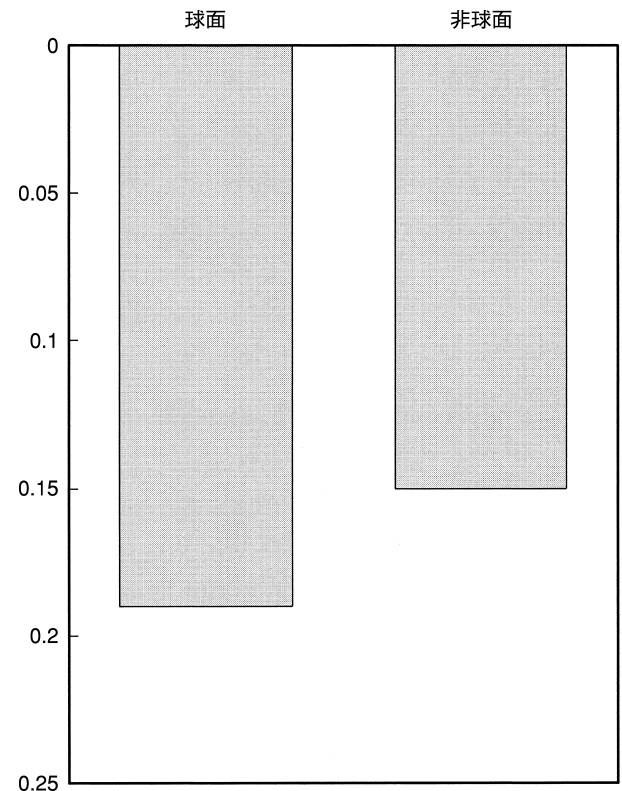


図 57 低コントラスト視力 logMAR 値.

非球面レンズでやや良好であったが、有意な差はなかった。

C 10% で測定した低コントラスト視力も同様で(図 57)、非球面レンズでやや良好であったが、有意な差はなかった。

患者の実際の高次波面収差データを使用して、網膜像のシミュレーションを行ってみた。図 58 に示したように、瞳孔径 3 mm の場合は両レンズに差はない。しかし、瞳孔径が 4 mm になると、非球面眼内レンズの方

が良好な網膜像が得られる。さらに瞳孔径が大きくなれば、網膜像の差はより拡大する。

以上から、非球面眼内レンズ Tecnis は偽水晶体眼の球面収差を有意に減少させ、網膜像を改善する。しかし、瞳孔径が小さな場合はその程度は限られたものになり、臨床的に大きな違いは見られない。瞳孔径の大きな若年者、あるいは夜間視などの条件下では、コントラスト感度の改善が期待される。

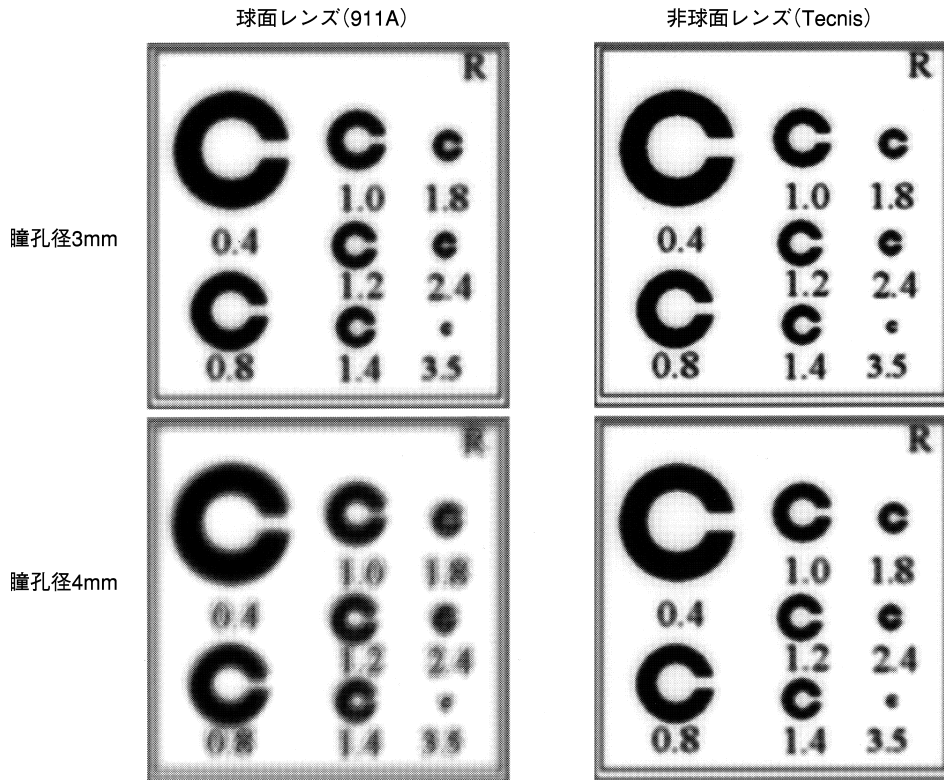


図 58 網膜像のシミュレーション。

実際の高次波面収差データを用いて網膜像のシミュレーションを行った。瞳孔径 3 mm の場合は、両レンズに差はない。瞳孔径 4 mm だと、非球面眼内レンズの方が良好な網膜像が得られる。

3. 偽調節と角膜多焦点性

白内障手術によって偽水晶体眼となれば、生理的な調節力は失われ、老眼と同様の状態になるはずである。しかし、矯正なしで、あるいは遠方だけの矯正で、遠近とも良好な視力を示す患者がいることが知られている^{140)~142)}。この現象は偽調節と呼ばれ、その機序としてこれまでにいくつかのものが提唱されてきた^{143)~149)}。そのうちの一つは、眼内レンズが前後に動くというものであるが、光学的に意味があるほど眼内レンズが移動するという考えは否定されている¹⁴⁵⁾¹⁴⁸⁾。その他、近視性乱視によって焦点深度が深くなるという説明もあるが¹⁴⁰⁾¹⁴³⁾¹⁴⁴⁾¹⁴⁷⁾、決定的な説とはなっていない。

我々は、明視域の拡大と角膜の多焦点性に注目した¹⁵⁰⁾。これまでも、放射状角膜切開や^{151)~154)}、PRK¹⁵⁵⁾¹⁵⁶⁾を受けた眼で、多焦点角膜とでもいふべき状態の存在が示されている。老視年齢域にある患者で、RK 術後に遠近とも視力が良好な症例において、角膜多焦点性がその原因であるとする報告¹⁵¹⁾¹⁵³⁾もある。

白内障手術においても角膜の形状が変化し、乱視や不正乱視の状態は変化する。そこに、屈折矯正手術と同様、角膜多焦点性が持ち込まれても不思議はない。我々は白内障手術を受けた 98 例 121 眼において、角膜形状解析(Orbscan, キヤノン販売)を行い、瞳孔領域内における角膜屈折力の最大と最小の差をとり、これを角膜屈

表 7 偽調節測定患者のデータ

眼数	121
年齢	69.8±0.73
屈折乱視	0.96±0.50 D*
角膜乱視	0.80±0.46 D
瞳孔径	3.51±0.57 mm
偽調節量	2.00±0.92 D
角膜屈折力勾配	5.26±1.73 D

平均±標準偏差。*D : diopter

折力勾配とした¹⁵⁰⁾。解析は、個々の症例の瞳孔径サイズに従って行った。偽調節量はアコモドメータ(NP Accommodometer AS-13, 興和)で測定し、近方→遠方、遠方→近方を各 10 回行って、その平均を記録した。

偽調節量は 2.00±0.92 D となり、これは過去の報告¹⁴¹⁾¹⁴²⁾¹⁴⁹⁾と矛盾しない結果であった。その他、患者データを表 7 に示す。

偽調節量を目的変数、屈折乱視量、角膜乱視量、瞳孔径、年齢、角膜屈折力勾配を説明変数として多変量解析を行ったところ、角膜屈折力勾配(図 59)と瞳孔径(図 60)が有意に関連する因子となった。その他は、有意な関与を示さなかった。

これらの結果から、偽水晶体眼では、角膜の多焦点性が大きく、また広い角膜領域を使用している(瞳孔径が

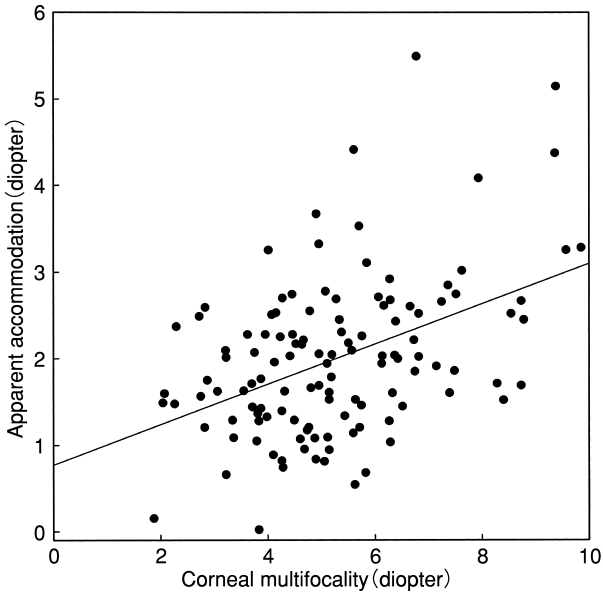


図 59 角膜の屈折力勾配と偽調節量.

両者には有意の相関がみられた (Pearson $r=0.440$, $p<0.0001$).

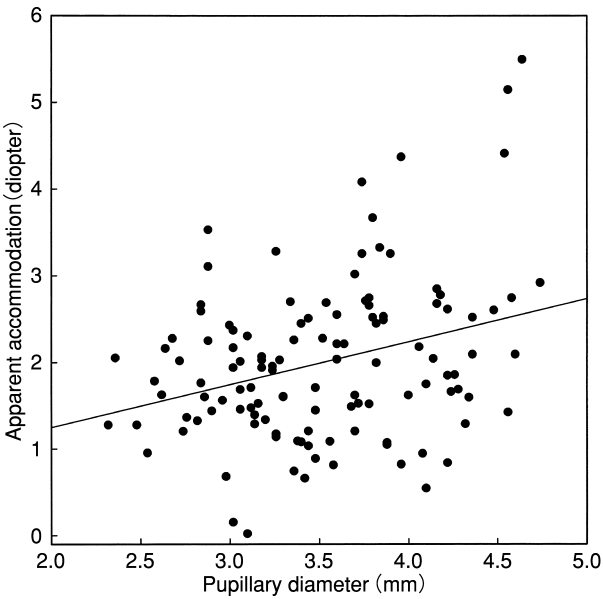


図 60 瞳孔径と偽調節量.

両者には有意の相関がみられた (Pearson $r=0.309$, $p=0.0006$).

大きい)眼ほど、大きな偽調節量を有するものと考えられた¹⁵⁰⁾.

4. 偽調節と高次波面収差

角膜の多焦点性により、偽水晶体患者の明視域が広がることが明らかになったが、眼の光学特性、延いては視機能にどのような影響があるのかは不明であった。そこで、多焦点角膜効果を波面解析の観点から検討した¹⁵⁷⁾.

偽水晶体眼において角膜形状解析を行い、その高さデータを Zernike 多項式に展開し、3 次と 5 次の各項の

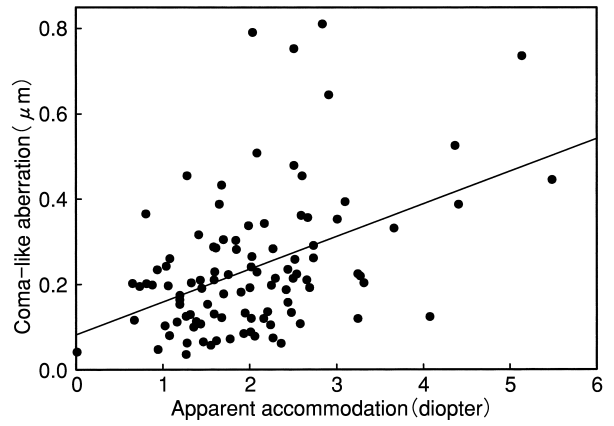


図 61 角膜のコマ様収差と偽調節量.

両者には有意の相関がみられた (Pearson, $r=0.440$, $p<0.001$).

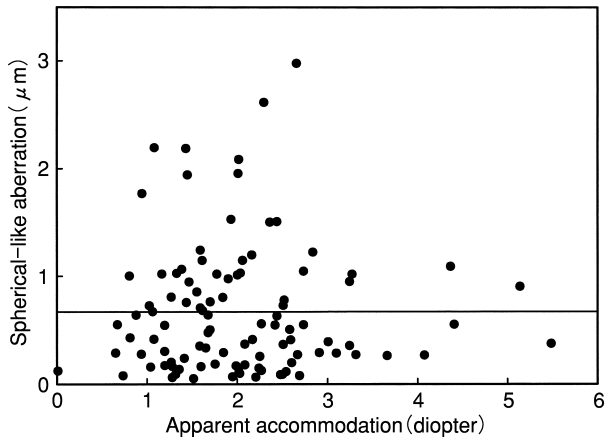


図 62 角膜の球面様収差と偽調節量.

有意の相関はみられない (Pearson, $r=0.001$, $p=0.993$).

RMS をコマ様収差、4 次と 6 次の各項の RMS を球面様収差として算出した。

その結果、角膜の瞳孔領内におけるコマ様収差 [$0.241 \pm 0.165 \mu\text{m}$ (平均値 \pm 標準偏差)] は偽調節量と有意に相関したが (図 61), 球面様収差 ($0.667 \pm 0.596 \mu\text{m}$) は偽調節量と相関しなかった (図 62). さらに、3 次の各項 ($Z_3^{-3} \sim Z_3^3$) ごとに偽調節量との相関を検討したところ、垂直方向に勾配を持つ triangular astigmatism (Z_3^{-3}) が最も強く相関するとの結果であった。これはつまり、多焦点眼鏡レンズのように上下に屈折度数勾配を持つことが、偽調節に関与しているということであり、多焦点角膜説を裏打ちするものである。

次に、収差の視機能に対する影響を、モデル眼でシミュレーションした。瞳孔径 4 mm で、0.5 D の近視を仮定した場合、高次収差が全くない眼は図 63 A のような point spread function (PSF) とランドルト環イメージを示し、平均的なコマ収差を有する眼では図 63 B のようになる。Strehl ratio は収差なしの場合 0.023、コ

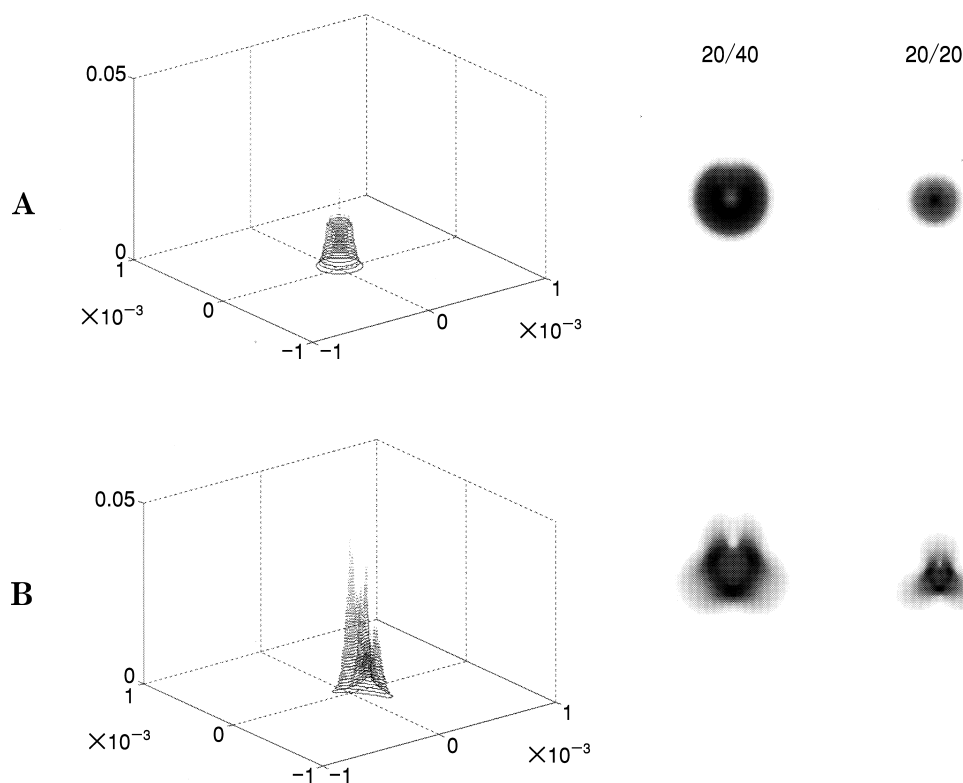


図 63 シミュレーションで 0.5 D 近視化させた場合の point spread function (PSF) とランドルト環イメージ。
A: 高次波面収差が全くない場合。B: 平均的なコマ収差を有する場合。

マ収差がある場合で 0.043 と、後者の方が良好であった。Modulation transfer function (MTF) も同様の結果であった¹⁵⁷⁾。このことから、全く収差のない眼は屈折度数ずれに非常に弱いこと、コマ収差は明視域拡大に役立っていることが明らかとなった。

偽調節は、白内障手術後の QOV にとって重要な問題である。白内障術後眼に調節力を取り戻そうとの試みは、現在種々のものが行われているし^{158)~170)}、今後も引き続いて行われていくであろう。そのためには、偽調節のメカニズムに関する議論は欠かせない。

角膜の多焦点性、そしてコマ収差が偽調節に関与していることは間違いないと考えられるが、ではそれが視機能全般にどのような影響を与えているのかまだ明らかではない。明視域を拡大させている代わりに、視機能の何らかの部分犠牲にしている可能性もある。この問題については、現在別途解析中である。

V 眼疾患による健康関連 QOL の変化

1. 視覚関連 QOL の測定

医療の目的は、患者の人生・生活を制限するような身体的あるいは精神的不具合を、将来の可能性も含めて軽減する(あるいは取り除く)こと、すなわちより良き QOL を実現することであり、医療あるいは健康状態に関連する QOL は一般に health-related QOL (HR-QOL, 健康関連 QOL) と呼ばれる。薬物治療や手術などの医療行

為の評価基準として、これまでは検査値や著効率など数値で表される客観的なアウトカム指標を用いられることが多かった。しかし、HR-QOL の視点から考えると、より重要なのはそのような客観的な数値そのものの増減ではなく、それが患者の身体的あるいは精神的不具合を軽減することにどのように役立ったかという点であることは明らかである。

医療行為によるアウトカムの HR-QOL に基づいた評価の重要性は明白であるものの、HR-QOL は本質的に各個人の主観に基づくものであり、医療行為評価の必須条件である多数症例から得られたデータによる客観評価とは本質的に相容れないものがある。「A 手術をしたら、ホントによく見えるようになって、人生がぱっと明るくなった」という患者の感想は明らかに術後の HR-QOL の向上を表現したものであるが、あくまで個人的な主観にとどまり、このような感想を多数集めたとしても、A 手術と他の B 手術のどちらが HR-QOL の改善の面でより優れているかを客観的に判定することは困難であろう。

このように患者の主観的なものに偏りがちな HR-QOL の評価を、できるだけ客観的に行おうとする試みが、近年、医療の各分野でなされている。眼科は、元来、生命維持よりも生活上の機能維持あるいは機能向上の側面が強い医療分野であることから、HR-QOL による眼科診療の評価の重要性は他分野に比べて高いことが考えら

れる。研究や臨床の現場からの要請に応じて、1998 年、米国 National Eye Institute (NEI) は、51 項目からなる視覚関連の HR-QOL を測定する尺度、The National Eye Institute Visual Function Questionnaire (NEI-VFQ) を開発した¹⁷¹⁾¹⁷²⁾。NEI-VFQ は当初 51 項目で構成されていたが、回答の負担をできるだけ減らしデータの質を向上させることを目的に、短縮版である NEI-VFQ 25 が開発された¹⁷³⁾。VFQ-25 は vision-targeted QOL を測定する 25 項目からなり、当初の 51 項目から、健康全般(2 → 1 項目)、視覚全般(2 → 1 項目)、眼痛・眼刺激感(2 → 2 項目)、近見障害に伴う不都合(7 → 3 項目)、遠見障害に伴う不都合(7 → 3 項目)、視覚障害による社会生活への影響(4 → 2 項目)、視覚障害による精神面への影響(8 → 4 項目)、将来の視覚の予測(3 → 0 項目)、視覚障害による社会的役割への制限(5 → 2 項目)、視覚障害による他者への依存(5 → 3 項目)、自動車運転(4 → 2 項目)、周辺視野(1 → 1 項目)、色覚(1 → 1 項目)(項目数は NEI-VFQ → VFQ 25 を示す)となっている。質問項目の 1 例を図 64 に示す。各項目は、得点が高いほど良い QOL 状態を示すように 0~100 得点に変換され、同じ下位尺度に含まれる項目の平均値を求めて尺度得点とする。さらに、健康全般を除いた全項目の平均値を求めて composite NEI-VFQ25 score とする。VFQ-25 は、十分な信頼性や妥当性を持ち、original long version と比較して情報の損失がほとんどないことが示されてい

る。VFQ-25 は、すでに数か国語に翻訳・検証され^{174)~176)}、視力に関連する疾患の QOL の記述や治療法の評価研究に広く使用されている^{177)~183)}。

我々はまず、英語版 NEI-VFQ 25 の日本語訳を作成した。国際的に標準とされている方法¹⁸⁴⁾に従って、多段階にわたる順翻訳、逆翻訳、翻訳の質の検討、眼疾患患者と対照群計 15 名を対象としたパイロットテストなどの作業を行った。翻訳の等価性について原作者から確認を得て、日本語版を完成した(表 8)。次に validation study として、5 施設の眼科での白内障、緑内障、加齢黄斑変性症患者と眼疾患を持たない対照群、計 276 名を

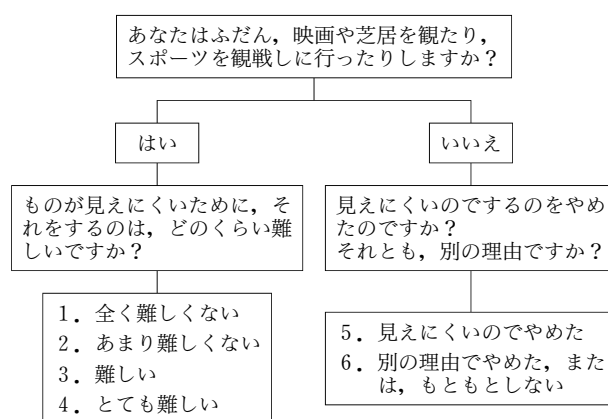


図 64 The National Eye Institute-Visual Function Questionnaire (NEI-VFQ) 25 の質問例。

表 8 Visual Function Questionnaire (VFQ) -25 の質問内容

1. あなたの全身の健康状態はどうですか？
2. 現在、あなたの両眼での「ものの見えかた」は、どうですか？ 眼鏡(やコンタクトレンズ)を使っているときのことをお答え下さい。
3. 自分の「ものの見えかた」について、不安を感じますか？
4. 今まで、目や、目の周りに、痛みや不快感、例えば熱っぽさ、かゆみ、痛みなどは、どの程度ありましたか？
5. ものが見えにくいために、新聞の記事を読むのは、どのくらい難しいですか？
6. ものが見えにくいために、物を近くで見る作業(例えば料理や裁縫をしたり、家の中で修理をしたり工具を使ったり、など)をするのはどのくらい難しいですか？
7. ものが見えにくいために、たくさん物が置いてある棚から特定の物を見つけるのは、どのくらい難しいですか？
8. ものが見えにくいために、道路標識や商店の看板の文字を読むのは、どのくらい難しいですか？
9. ものが見えにくいために、夜や薄暗いところで、階段をおりたり、歩道の段差をおりたりするのはどのくらい難しいですか？
10. ふだん道を歩くとき、ものが見えにくいために、まわりのものに気が付かないことがありますか？
11. ものが見えにくいために、あなたが何か言った時に相手はどう反応するかをみるのはどのくらい難しいですか？
12. ものが見えにくいために、その日に着る服を自分で選んだり、組み合わせたりするのはどのくらい難しいですか？
13. ものが見えにくいために、誰かの家を訪ねたり、何かの集まりやレストランに行ったりするのはどのくらい難しいですか？
14. ものが見えにくいために、映画や芝居を観たり、スポーツを観戦しに行ったりするのは、どのくらい難しいですか？
15. 昼間、走り慣れた道を運転するのは、どのくらい難しいですか？
16. 夜間の運転はどのくらい難しいですか？
17. ものが見えにくいために、物事を思いどおりにやりとげられないことがありますか？
18. ものが見えにくいために、仕事などのふだんの活動が長く続けられないことがありますか？
19. 目や、目のまわりの、痛みや不快感が原因で、やりたいことができないことがありますか？
20. ものが見えにくいために家にいることが多い。
21. ものが見えにくいために、欲求不満を感じる。
22. ものが見えにくいために、したいことが思うようにできない。
23. ものが見えにくいために、他の人が話すことにたよらなければならない。
24. ものが見えにくいために、誰かの手助けを必要とすることが多い。
25. ものが見えにくいために、自分が気まずい思いをしたり、他の人を困らせたりするのではないかと心配である。

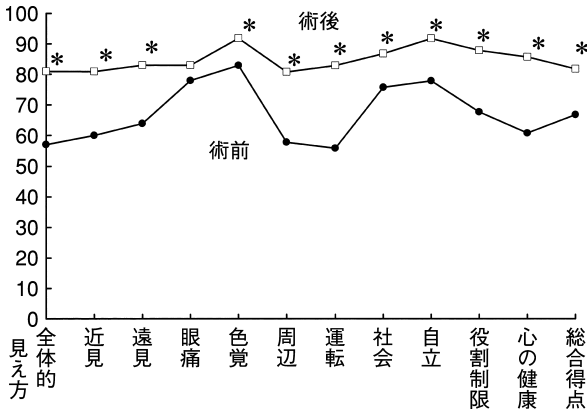


図 65 白内障手術前後のVFQ-25スコア。

眼痛の項目を除いて、すべて手術により有意に改善した (* $p < 0.01$, paired t-test).

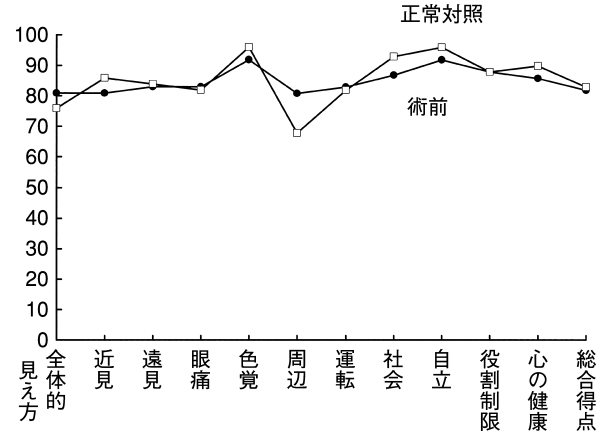


図 67 白内障術後患者と正常対照患者のVFQ-25スコア。

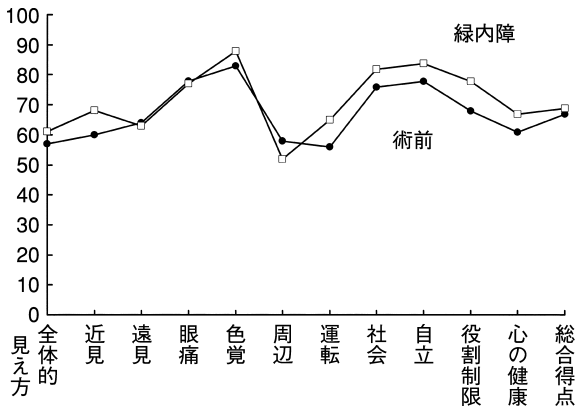


図 66 白内障術前患者と緑内障患者のVFQ-25スコア。

対象として、訓練されたインタビュアーによってVFQ-25およびオプション項目のインタビューを行った。その結果、NEI VFQ-25日本語版は、一部の項目で非該当や信頼性の問題があり、項目の置き換えや composite score から外すなどを必要とするが、視覚関連QOLを測定するのに十分な信頼性、妥当性、反応性を持っていると結論された。

2. 白内障と視覚関連 QOL

上記のようにして最終的に完成したVFQ-25日本語版を用い、白内障および白内障手術が視覚関連QOLにどのように影響するか検討した。対象は両眼白内障の110例220眼(70.4±9.2歳)で、両眼とも矯正視力0.7以下であった。両眼に超音波水晶体乳化吸引術と眼内レンズ挿入術を行った。術前と術後2か月に、自己記入版VFQ-25を記録した。

結果はグラフに示す通りで、白内障手術によってVFQ-25スコアは大きく改善し、眼痛・眼刺激感以外のすべての下位尺度で、術前後に有意差がみられた($p < 0.01$, paired t-test, 図65)。術前のスコアを他疾患と比較すると、両眼に視野障害を有する緑内障患者と同程度のVFQ-25スコアであった(図66)。術後には、眼疾患を

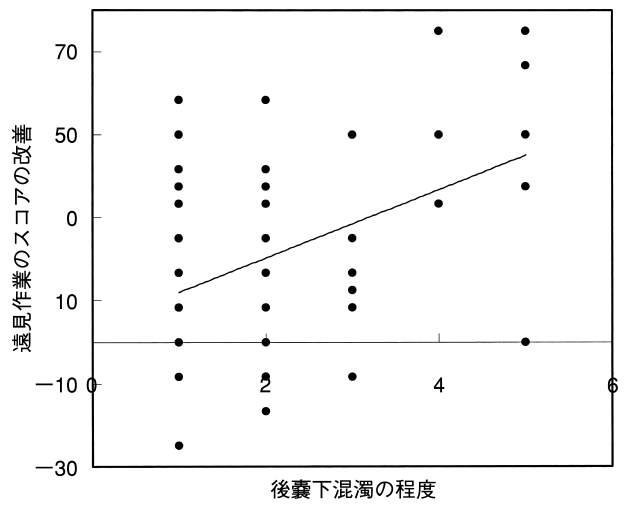


図 68 後囊下白内障の程度と遠見作業スコアの改善度。後囊下白内障の程度が強いほど、遠見作業スコアは大きく改善した(Spearman rank correlation coefficient $r_s = 0.413$, $p < 0.001$)。

有しない正常対照者と同程度までVFQ-25スコアは改善していた(図67)。このように、白内障罹患によって患者のQOLは著しく障害されるが、白内障手術によって有意かつ大幅に改善することが、定量的に示された。

VFQ-25スコアの改善度と関連する因子を検索した。術前・術後視力のいずれも、また良い方/悪い方の眼の視力いずれも、VFQ-25スコアの改善度と関連しなかった。次に、白内障のタイプと程度をLens Opacities Classification System III(LOCS III)^{185)~187)}に基づいて評価したところ、後囊下白内障の程度とVFQ-25スコアの改善度に有意の相関がみられた(図68, 69)。核白内障、皮質白内障の程度は、VFQ-25スコアの改善度と関連しなかった。患者の年齢との関係を見ると、若年者ほどVFQ-25スコアが大きく改善する傾向がみられた(図70)。

白内障手術とQOL改善度の関係については、白内障術後の視力・視機能改善とQOLの向上は必ずしも一致

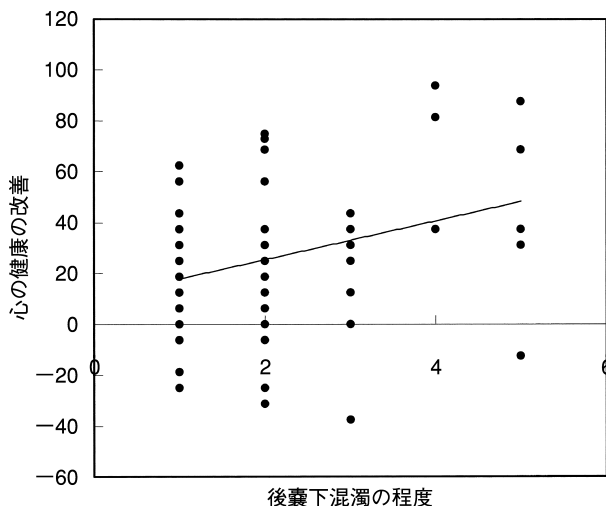


図 69 後囊下白内障の程度と心の健康スコアの改善度。後囊下白内障の程度が強いほど、心の健康スコアは大きく改善した(Spearman rank correlation coefficient $r_s=0.330$, $p=0.002$)。

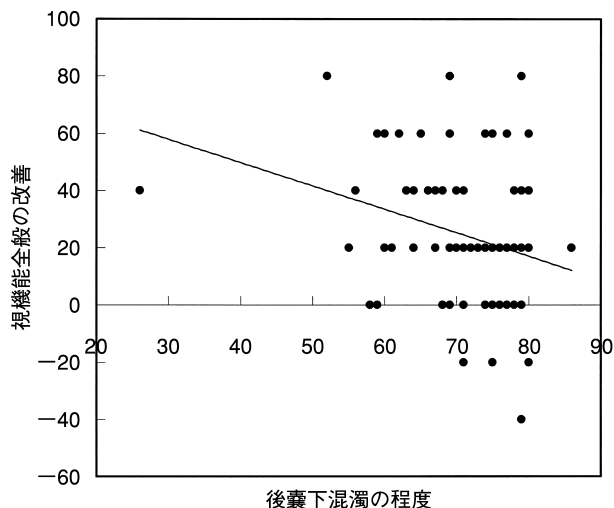


図 70 年齢と視機能全般スコアの改善度。若いほど、視機能全般スコアは大きく改善した(Spearman rank correlation coefficient $r_s=-0.286$, $p=0.009$)。

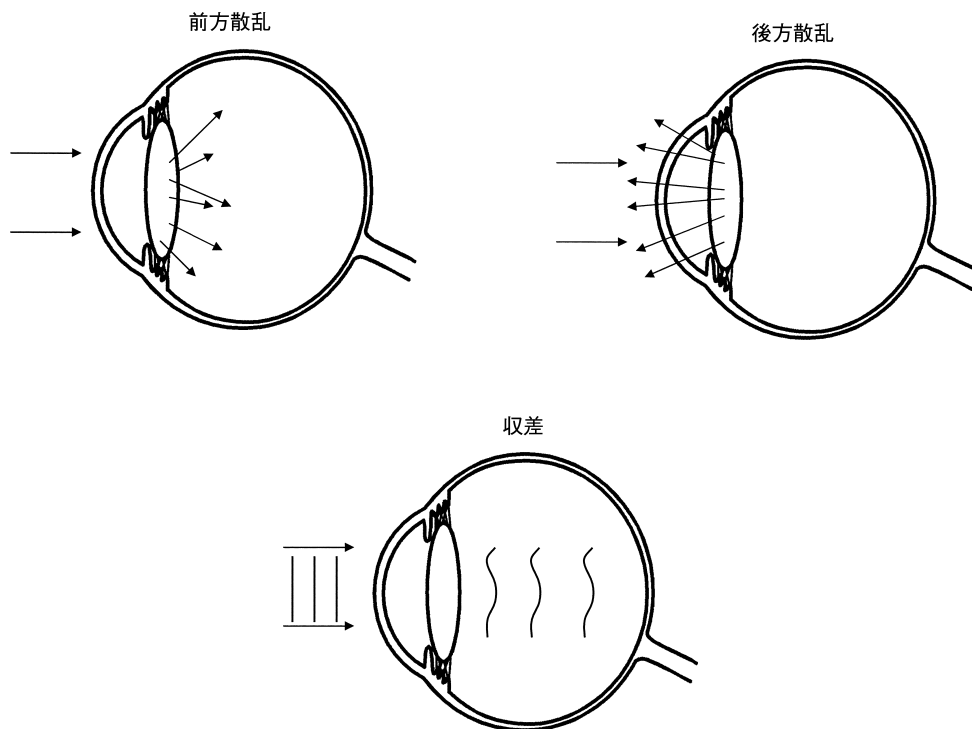


図 71 水晶体の加齢変化による散乱と収差の増大。

しないと報告されており、また白内障術後の QOL 向上に寄与する術前因子として、若年者、後囊下白内障、黄斑変性や糖尿病網膜症がないことが挙げられている¹⁸⁸⁾。また、視力改善が不良な場合でも QOL の改善はみられることから、臨床的な視機能の指標評価だけでは QOL の改善を過小評価するとされている¹⁸⁹⁾。すなわち、白内障手術の結果・効果を視力や視機能の面だけから評価するのではなく、患者の日常生活機能や QOL の面から評価することは非常に重要であり、医療政策・医療経済

的な観点からその重要性は今後一層増すものと考えられる。

3. 水晶体混濁の定量と QOV・QOL

水晶体の加齢変化により、前方散乱、後方散乱、波面収差の増大が生じる(図 71)。前方散乱は網膜像の signal-to-noise ration(SN 比)を下げ、後方散乱はコントラストを減じ、波面収差は像のぼけを起こす(図 72)。それぞれを測定することにより、どの因子が白内障眼における視力障害の原因となっているのか、評価できるよ



図 72 散乱と収差による網膜像の変化.

前方散乱は網膜像の signal-to-noise ratio を下げ、後方散乱はコントラストを減じ、波面収差は像のぼけを起こす。

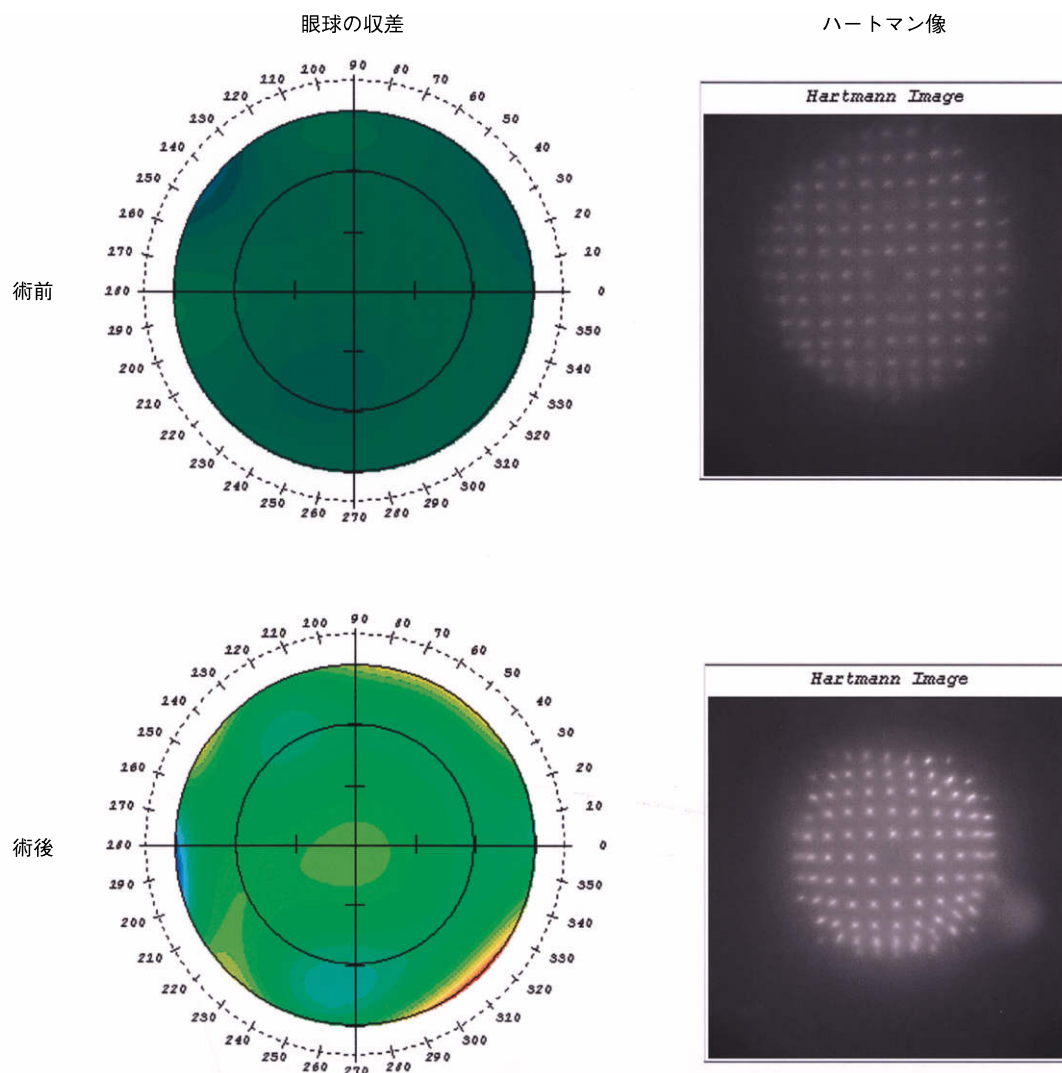


図 73 Hartmann-Shack センサー.

眼球の高次波面収差を測定するとともに(左), ハートマン像から前方散乱を定量した(右).

うになる可能性がある¹⁰³⁾。我々は Hartmann-Shack センサー (KR-9000 PW, トプコン) で眼球の高次波面収差を測定するとともに、ハートマン像から前方散乱を定量し (図 73)、さらに Scheimpflug 前眼部解析システム (E-AS-1000, ニデック) で後方散乱を定量した (図 74)。

図 75 は後嚢下白内障の 1 例である。手術により前方散乱が大きく改善しているが、球面収差はかえって術後に増大している。一方、核白内障の場合、前方散乱は手術でほとんど変化はないが、球面収差は手術によって著明に改善している (図 76)。これらのことから、LOCS III による白内障タイプ分類別に、散乱や収差の程度と、QOL 改善度 (VFQ-25 スコアの改善度) との相関を解析した。結果として、後嚢下白内障では前方散乱が強い症例ほど QOL は大きく改善しており (Pearson $r=0.462$, $p=0.010$, 図 77)、前方散乱の程度が、後嚢下白内障の進行や手術時期を決定する指標になり得る可能性が示された。これは、後発白内障における同様の研究の結果と極めて近い¹⁹⁰⁾。一方、核白内障では高次波面収差のうち球面収差と ($r=0.281$, $p=0.174$)、皮質白内障では後方散乱と ($r=0.202$, $p=0.267$)、QOL 改善度が相関する傾向にあったが、その関係は統計的に有意ではなかった。

この分野はまだ研究が端緒に付いたばかりであり、今後の大きな発展が期待される。白内障の程度を数的に評価でき、QOL や QOV と定量的に関連づけることができれば、その進行の程度や手術時期の決定を極め

て科学的かつ再現性のある方法でクリアカットに行うことができるようになるであろう。

VI おわりに

球面值や円柱値といった屈折要素はジオプトリー単位で正確に表現できるのに、不正乱視はなぜ数字で表示できないのか、著者は眼科医になってから長らく疑問に思っていた。それをきっかけに、角膜形状解析装置の測定データを独自に解析する方法を模索し始め^{191)~195)}、さらにフーリエ解析を用いた不正乱視定量化へと発展し⁵⁾⁴⁹⁾⁵⁸⁾、やがて QOV/QOL に関する一連の研究へと繋げていくことができた。この間、眼科 medical engineering (ME) の発展は大きく、それなくしては QOV の定

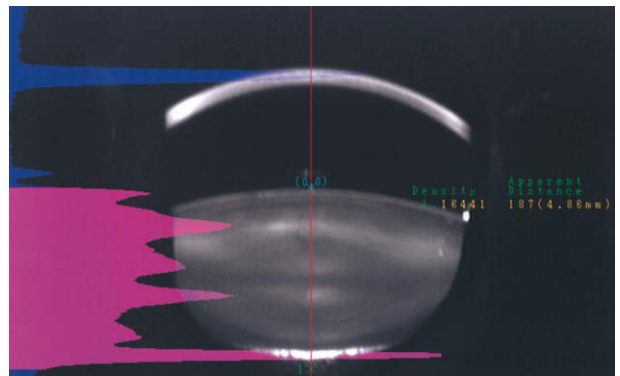


図 74 Scheimpflug 前眼部解析システム (EAS-1000). 後方散乱の定量を行った。

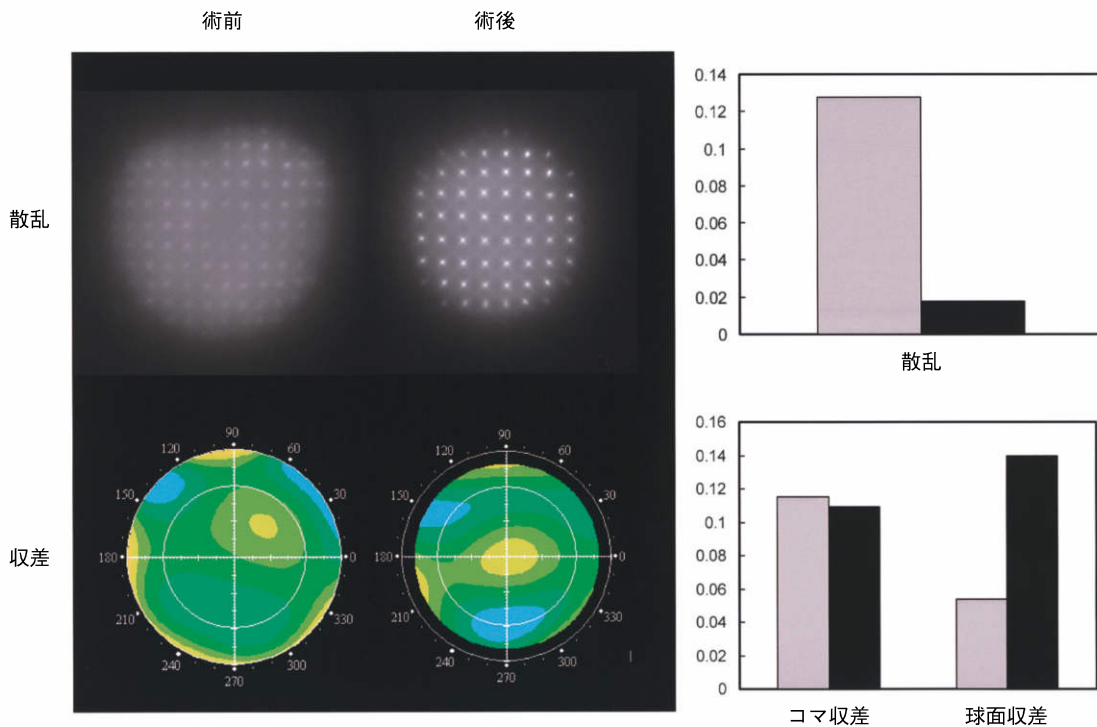


図 75 後嚢下白内障の 1 例。手術により前方散乱が大きく改善しているが、球面収差はかえって術後に増大している。

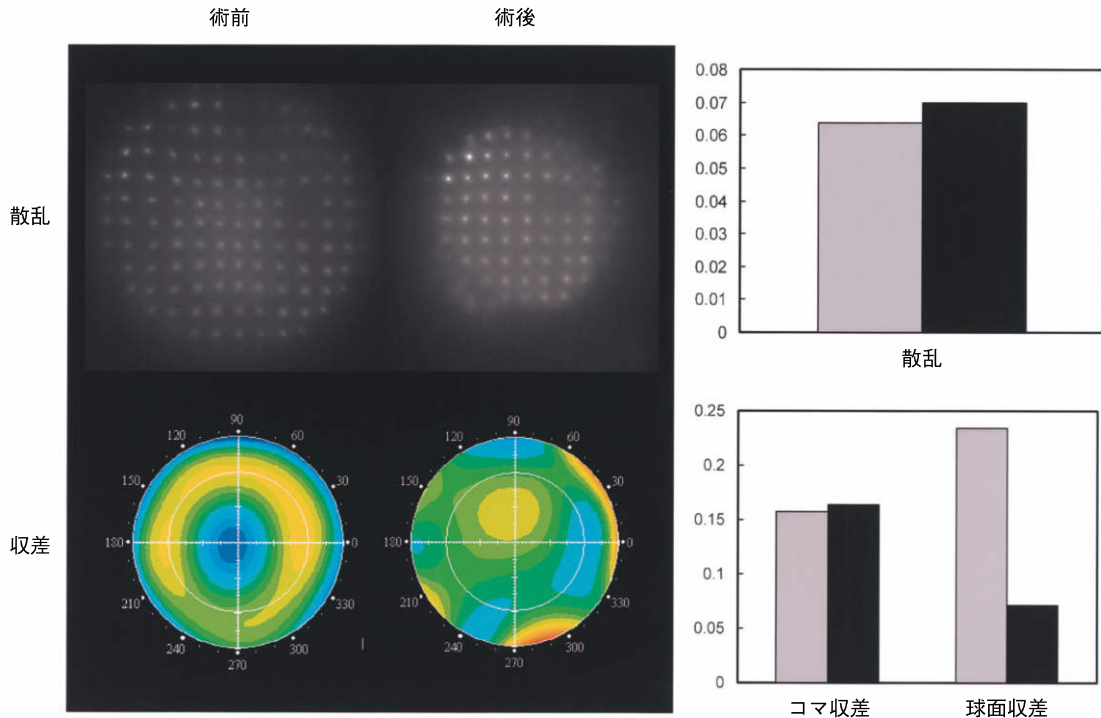


図 76 核白内障の 1 例。
前方散乱は手術でほとんど変化はないが，球面収差は手術によって著明に改善している。

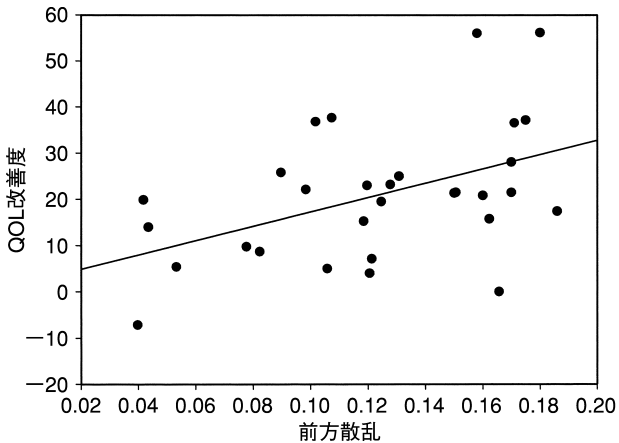


図 77 術前の前方散乱と手術による QOL 改善度。
後囊下白内障では前方散乱が強い症例ほど手術による QOL の改善は大きく (Pearson $r=0.462$, $p=0.010$)，前方散乱の程度が，後囊下白内障の進行や手術時期の決定の指標になりうる可能性が示された。

量化に関する研究は不可能であったと思う。ME とこれほど相性の良い科は，眼科において他にないであろう。Medical の側と engineering の側が今後も協力し合い，眼科ならではの数学的，生理学的，光学的な研究が今後一層盛んになっていくことを期待したい。

特に 21 世紀は感覚器の時代である。本稿で述べたようなフーリエ解析・波面収差解析による QOV 評価や，疾患特異的な尺度で視覚関連 QOL を評価することは，この感覚器の時代においてますます重要性を増していくと考えられる。

文 献

- 1) Duke-Elder S, Abrams D : Simple refractive errors. In : Duke-Elder S(Ed) : System of Ophthalmology Vol. 5, Ophthalmic Optics and Refraction. Henry Kimpton, London, 255—295, 1970.
- 2) Wyzinski P : Escalation of keratospeck : Regular and irregular astigmatism. Refract Corneal Surg 6 : 231, 1990.
- 3) Azar DT, Strauss L : Principles of applied clinical optics. In : Albert DM, et al(Eds) : Principles and Practice of Ophthalmology, Vol. 5. WB Saunders Philadelphia, 3603—3621, 1994.
- 4) Troutman RC, Buzard KA : Corneal Astigmatism. Etiology, Prevention, and Management. Mosby Year Book St Louis, 5—22, 1992.
- 5) Oshika T, Tomidokoro A, Maruo K, Tokunaga T, Miyata N : Quantitative evaluation of irregular astigmatism by Fourier series harmonic analysis of videokeratography data. Invest Ophthalmol Vis Sci 39 : 705—709, 1998.
- 6) Hjortdal JØ, Erdmann L, Bek T : Fourier analysis of video-keratographic data : A tool for separation of spherical, regular and irregular astigmatic corneal power components. Ophthalmol Physiol Opt 15 : 171—185, 1995.
- 7) Raasch TW : Corneal topography and irregular astigmatism. Optom Vis Sci 11 : 809—815, 1995.
- 8) Olsen T, Dam-Johansen M, Bek T, Hjortdal J Ø : Evaluating surgically induced astigmatism by Fourier analysis of corneal topography data.

- J Cataract Refract Surg 22 : 318—323, 1996.
- 9) **Tanabe T, Tomidokoro A, Samejima T, Miyata K, Sato M, Kaji Y, et al** : Corneal regular and irregular astigmatism assessed by Fourier analysis of videokeratography data in normal and pathologic eyes. *Ophthalmology* 111 : 752—757, 2004.
 - 10) **Maguire LJ, Meyer RF** : Ectatic Corneal Degeneration. In : Kaufmann HE, et al (Eds) : *The Cornea*. Churchill Livingstone, New York, 485—510, 1988.
 - 11) **Stiles WS, Crawford BH** : The luminous efficiency of rays entering the eye pupil at different points. *Proc R Soc Lond Ser B* 112 : 428—450, 1933.
 - 12) **Enoch JM, Laties AM** : An analysis of retinal receptor orientation. II. Predictions for psychophysical tests. *Invest Ophthalmol* 10 : 959—970, 1971.
 - 13) **Van Loo JA Jr, Enoch JM** : The scotopic Stiles-Crawford effect. *Vision Res* 15 : 1005—1009, 1975.
 - 14) **Bonds AB, MacLeod DIA** : A displaced Stiles-Crawford effect associated with an eccentric pupil. *Invest Ophthalmol* 17 : 754—761, 1978.
 - 15) **Belin MW, Ratliff CD** : Evaluating data acquisition and smoothing functions of currently available videokeratography. *J Cataract Refract Surg* 22 : 421—426, 1996.
 - 16) **Wilson SE, Klyce SD** : Quantitative descriptors of corneal topography : A clinical study. *Arch Ophthalmol* 109 : 349—353, 1991.
 - 17) **Dingeldein SA, Klyce SD, Wilson SE** : Quantitative descriptors of corneal shape derived from the computer-assisted analysis of photokeratographs. *Refract Corneal Surg* 5 : 372—378, 1989.
 - 18) **Krachmer JH, Feder RS, Belin MW** : Keratoconus and related noninflammatory corneal thinning disorders. *Surv Ophthalmol* 28 : 293—322, 1984.
 - 19) **Rabinowitz YS** : Keratoconus. *Surv Ophthalmol* 42 : 297—319, 1998.
 - 20) **Kennedy RH, Bourne WM, Dyer JA** : A 48-year clinical and epidemiologic study of keratoconus. *Am J Ophthalmol* 101 : 267—273, 1986.
 - 21) **Woodward EG, Moodaley LC, O'Hagan A** : Predictors for likelihood of corneal transplantation in keratoconus. *Eye* 4 : 493—496, 1990.
 - 22) **Lass JH, Lembach RG, Park SB, Hom DL, Fritz ME, Svilar GM, et al** : Clinical management of keratoconus. A multicenter analysis. *Ophthalmology* 97 : 433—445, 1990.
 - 23) **Tuft SJ, Moodaley LC, Gregory WM, Davison CR, Buckley RJ** : Prognostic factors for the progression of keratoconus. *Ophthalmology* 101 : 439—447, 1994.
 - 24) **Weed KH, McGhee CN** : Referral patterns, treatment management and visual outcome in keratoconus. *Eye* 12 : 663—668, 1998.
 - 25) **Maguire LJ, Lowry JC** : Identifying progression of subclinical keratoconus by serial topography analysis. *Am J Ophthalmol* 112 : 41—45, 1991.
 - 26) **Smolek MK, Klyce SD, Maeda N** : Keratoconus and contact lens-induced corneal warpage analysis using the keratomorphic diagram. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 35 : 4192—4204, 1994.
 - 27) **Smolek MK, Klyce SD** : Cinemakertography using computer morphing. *Optom Vis Sci* 74 : 970—975, 1997.
 - 28) **Rabinowitz YS, McDonnell PJ** : Computer-assisted corneal topography in keratoconus. *Refract Corneal Surg* 5 : 400—408, 1989.
 - 29) **Maeda N, Klyce SD, Smolek MK, Thompson HW** : Automated keratoconus screening with corneal topography analysis. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 35 : 2749—2757, 1994.
 - 30) **Rabinowitz YS** : Videokeratographic indices to aid in screening for keratoconus. *J Refract Surg* 11 : 371—379, 1995.
 - 31) **Maeda N, Klyce SD, Smolek MK** : Neural network classification of corneal topography. Preliminary demonstration. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 36 : 1327—1335, 1995.
 - 32) **Smolek MK, Klyce SD** : Current keratoconus detection methods compared with a neural network approach. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 38 : 2290—2299, 1997.
 - 33) **Dastjerdi MH, Hashemi H** : A quantitative corneal topography index for detection of keratoconus. *J Refract Surg* 14 : 427—436, 1998.
 - 34) **Rabinowitz YS, Rasheed K** : KISA % index : A quantitative videokeratography algorithm embodying minimal topographic criteria for diagnosing keratoconus. *J Cataract Refract Surg* 25 : 1327—1335, 1999.
 - 35) **Edrington TB, Szcotka LB, Begley CG, Burger DS, Wilson BS, Barr JT, et al** : Repeatability and agreement of two corneal-curvature assessments in keratoconus : Keratometry and the first definite apical clearance lens (FDACL). CLEK Study Group. Collaborative longitudinal evaluation of keratoconus. *Cornea* 17 : 267—277, 1998.
 - 36) **Oshika T, Tanabe T, Tomidokoro A, Amano S** : Progression of keratoconus assessed by Fourier analysis of videokeratography data. *Ophthalmology* 109 : 339—342, 2002.
 - 37) **Genisi C** : Computerized corneal topography in keratoconus. In : Buratto L (Ed) : *Corneal Topography*. The Clinical Atlas. Slack, Thorofare Chap. 3, 1996.
 - 38) **Feder RS** : Noninflammatory ectatic disorders. In : Krachmer JH, et al (Eds) : *Cornea*. Cornea and External Disease : Clinical Diagnosis and Management. St Mosby, Louis. Vol. 2, Chap. 91,

- 1997.
- 39) **Corbett MC, Rosen ES, O'Brart DPS** : Corneal ectasia. In : Corneal Topography : Principles and Applications. BMJ Books, London. Chap. 9, 1999.
 - 40) **De Molfetta V, Brambilla M, De Casa N, Arpa P, Riva M** : Residual corneal astigmatism after perforating keratoplasty. *Ophthalmologica* 179 : 316—321, 1979.
 - 41) **Troutman RC, Gaster RN** : Surgical advances and results of keratoconus. *Am J Ophthalmol* 90 : 131—136, 1980.
 - 42) **Binder PS** : The effect of suture removal of postkeratoplasty astigmatism. *Am J Ophthalmol* 105 : 637—645, 1988.
 - 43) **Musch DC, Meyer RF, Sugar A** : The effect of removing running sutures on astigmatism after penetrating keratoplasty. *Arch Ophthalmol* 106 : 488—492, 1988.
 - 44) **Lin DT, Wilson SE, Reidy JJ, Klyce SD, McDonald MB, Insler MS, et al** : Topographic changes that occur with 10-0 nylon running suture removal following penetrating keratoplasty. *Refract Corneal Surg* 6 : 21—25, 1990.
 - 45) **Mader TH, Yuan R, Lynn MJ, Stulting RD, Wilson LA, Waring GO 3rd** : Change in keratometric astigmatism after suture removal more than one year after penetrating keratoplasty. *Ophthalmology* 100 : 119—127, 1993.
 - 46) **Shimazaki J, Tsubota K** : Analysis of Videokeratography after penetrating keratoplasty. *Ophthalmology* 104 : 2077—2084, 1997.
 - 47) **Touzeau O, Borderie VM, Allouch C, Scheer S, Laroche L** : Effect of penetrating keratoplasty suture removal on corneal topography and refraction. *Cornea* 18 : 638—644, 1999.
 - 48) **Kagaya F, Tomidokoro A, Tanaka S, Amano S, Oshika T** : Fourier series harmonic analysis of corneal topography following suture removal after penetrating keratoplasty. *Cornea* 21 : 256—259, 2002.
 - 49) **Oshika T, Sugita G, Tanabe T, Tomidokoro A, Amano S** : Regular and irregular astigmatism after superior versus temporal scleral incision cataract surgery. *Ophthalmology* 107 : 2049—2053, 2000.
 - 50) **Hayashi K, Hayashi H, Oshika T, Hayashi F** : Fourier analysis of irregular astigmatism after implantation of 3 types of intraocular lenses. *J Cataract Refract Surg* 26 : 1510—1516, 2000.
 - 51) **Hayashi K, Hayashi H, Oshika T, Hayashi F** : Fourier analysis of irregular astigmatism after trabeculectomy. *Ophthalmic Surg Lasers* 31 : 94—99, 2000.
 - 52) **Baek TM, Lee KH, Tomidokoro A, Oshika T** : Corneal irregular astigmatism after laser *in situ* keratomileusis for myopia. *Br J Ophthalmol* 85 : 534—536, 2001.
 - 53) **Honda N, Hamada N, Amano S, Kaji Y, Hiraoka T, Oshika T** : Five-year follow-up of photorefractive keratectomy for myopia. *J Refract Surg* 20 : 116—120, 2004.
 - 54) **Tomidokoro A, Soya K, Miyata K, Armin B, Tanaka S, Amano S, et al** : Corneal irregular astigmatism and contrast sensitivity after photorefractive keratectomy. *Ophthalmology* 108 : 2209—2212, 2001.
 - 55) **Tomidokoro A, Oshika T, Amano S, Eguchi K, Eguchi S** : Quantitative analysis of regular and irregular astigmatism induced by pterygium. *Cornea* 18 : 412—415, 1999.
 - 56) **Tomidokoro A, Oshika T, Kojima T** : Corneal astigmatism after scleral buckling surgery assessed by Fourier analysis of videokeratography data. *Cornea* 17 : 517—521, 1998.
 - 57) **Hiraoka T, Furuya A, Matsumoto T, Okamoto F, Sakata N, Hiratsuka K, et al** : Quantitative evaluation of regular and irregular corneal astigmatism in patients having overnight orthokeratology. *J Cataract Refract Surg* 30 : 1425—1429, 2004.
 - 58) **Oshika T, Tomidokoro A, Tsuji H** : Regular and irregular refractive powers of the front and back surfaces of the cornea. *Exp Eye Res* 67 : 443—447, 1998.
 - 59) **Tomidokoro A, Oshika T, Amano S, Higaki S, Maeda N, Miyata K** : Changes in anterior and posterior corneal curvatures in keratoconus. *Ophthalmology* 107 : 1328—1332, 2000.
 - 60) **Howland HC, Howland B** : A subjective method for the measurement of monochromatic aberrations of the eye. *J Opt Soc Am* 67 : 1508—1518, 1977.
 - 61) **Walsh G, Charman WN** : Measurement of the axial wavefront aberration of the human eye. *Ophthal Physiol Opt* 5 : 23—31, 1985.
 - 62) **Howland HC, Beuttner J** : Computing high order wave aberration coefficient from variations of best focus for small artificial pupils. *Vision Res* 29 : 979—983, 1989.
 - 63) **Malacara D, DeVore SL** : Interferogram evaluation and wavefront fitting. In : Malacara D (Ed) : *Optical Shop Testing*. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York, 455—499, 1992.
 - 64) **Leighton DA, Tomlinson A** : Changes in axial length and other dimensions of the eyeball with increasing age. *Acta Ophthalmol* 50 : 815—826, 1972.
 - 65) **Baldwin WR, Mills D** : A longitudinal study of corneal astigmatism and total astigmatism. *Am J Optom Physiol Opt* 58 : 206—211, 1981.
 - 66) **Kame RT, Jue TS, Shigekuni DM** : A longitudinal study of corneal astigmatism changes in Asian eyes. *J Am Optom Assoc* 64 : 215—219,

- 1993.
- 67) **Goh WSH, Lam CSY** : Changes in refractive trends and optical components of Hong Kong Chinese aged 19-39 years. *Ophthalmic Physiol Opt* 14 : 378-382, 1994.
- 68) **Lam CSY, Goh WSH, Tang YK, Tsui KK, Wong WC, Man TC** : Changes in refractive trends and optical components of Hong Kong Chinese aged over 40 years. *Ophthalmic Physiol Opt* 14 : 383-388, 1994.
- 69) **Hayashi K, Hayashi H, Hayashi F** : Topographic analysis of the changes in corneal shape due to aging. *Cornea* 14 : 527-532, 1995.
- 70) **Ninn-Pedersen K** : Relationships between pre-operative astigmatism and corneal optical power, axial length, intraocular pressure, gender, and patient age. *J Refract Surg* 12 : 472-482, 1996.
- 71) **Sanders H** : Age-dependence of human refractive errors. *Ophthalmic Physiol Opt* 1 : 159-174, 1981.
- 72) **Fledelius HC** : Prevalences of astigmatism and anisometropia in adult Danes. *Acta Ophthalmol* 62 : 391-400, 1984.
- 73) **Saunders H** : Changes in the orientation of the axis of astigmatism associated with age. *Ophthalmic Physiol Opt* 6 : 343-344, 1984.
- 74) **Millodot M, Newton IA** : A possible change of refractive index with age and its relevance of chromatic aberration. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 201 : 159-167, 1976.
- 75) **Ware C** : Human axial chromatic aberration found not to decline with age. *Albrecht v Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 218 : 39-41, 1982.
- 76) **Mordi JA, Adrian WK** : Influence of age on chromatic aberration of the human eye. *Am J Optom Physiol Opt* 62 : 864-869, 1985.
- 77) **Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC** : Changes in corneal wavefront aberrations with aging. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 40 : 1351-1355, 1999.
- 78) **Liang J, Williams DR** : Aberrations and retinal image quality of the normal human eye. *J Opt Soc Am A* 14 : 2873-2883, 1997.
- 79) **Hemenger RP, Tomlinson A, Caroline PJ** : Role of spherical aberration in contrast sensitivity loss with radial keratotomies. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 30 : 1997-2001, 1989.
- 80) **Applegate RA, Howland HC, Buettner J, Cottingham AJ Jr, Sharp PP, Yee RW** : Changes in the aberration structure of the RK cornea from videokeratographic measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 35(Suppl) : 1740, 1994.
- 81) **Applegate RA, Hilmantel G, Howland HC** : Corneal aberrations increase with the magnitude of radial keratotomy refractive correction. *Optom Vis Sci* 73 : 585-589, 1996.
- 82) **Seiler T, Reckmann W, Maloney RK** : Effective spherical aberration of the cornea as a quantitative descriptor in corneal topography. *J Cataract Refract Surg* 19 : 155-165, 1993.
- 83) **Oliver KM, Hemenger RP, Corbett MC, O'Brart DP, Verma S, Marshall J, et al** : Corneal optical aberrations induced by photorefractive keratectomy. *J Refract Surg* 13 : 246-254, 1997.
- 84) **Martinez CE, Applegate RA, Klyce SD, McDonald MB, Medina JP, Howland HC** : Effect of pupillary dilation on corneal optical aberrations after photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 116 : 1053-1062, 1998.
- 85) **Oshika T, Klyce SD, Applegate RA, Howland HC, El Danasoury MA** : Comparison of corneal wavefront aberrations after photorefractive keratectomy and laser *in situ* keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 127 : 1-7, 1999.
- 86) **Oshika T, Miyata K, Tokunaga T, Samejima T, Amano S, Tanaka S, et al** : Higher order wavefront aberrations of cornea and magnitude of refractive correction in laser *in situ* keratomileusis. *Ophthalmology* 109 : 1154-1158, 2002.
- 87) **Sasaki K, Sakamoto Y, Shibata T, Emori Y** : The multi-purpose camera : A new anterior eye segment analysis system. *Ophthalmic Res* 22 (Suppl)1 : 3-8, 1990.
- 88) **Sakamoto Y, Sasaki K, Nakamura Y, Watanabe N** : Reproducibility of data obtained by a newly developed anterior eye segment analysis system, EAS-1000. *Ophthalmic Res* 24(Suppl)1 : 10-20, 1992.
- 89) **Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T** : Wavefront analysis of higher order aberrations in patients with cataract. *J Cataract Refract Surg* 28 : 438-444, 2002.
- 90) **Kuroda T, Fujikado T, Maeda N, Oshika T, Hirohara Y, Mihashi T** : Wavefront analysis in patients with nuclear or cortical cataract. *Am J Ophthalmol* 134 : 1-9, 2002.
- 91) **Guirao A, Redondo M, Artal P** : Optical aberrations of the human cornea as a function of age. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 17 : 1697-1702, 2000.
- 92) **Calver RI, Cox MJ, Elliott DB** : Effect of aging on the monochromatic aberrations of the human eye. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 16 : 2069-2078, 1999.
- 93) **McLellan JS, Marcos S, Burns SA** : Age-related changes in monochromatic wave aberrations of the human eye. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42 : 1390-1395, 2001.
- 94) **Artal P, Berrio E, Guirao A, Piers P** : Contribution of the cornea and internal surfaces to the change of ocular aberrations with age. *J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis* 19 : 137-143, 2002.
- 95) **Amano S, Amano T, Yamagami S, Miyai T,**

- Miyata K, Samejima T, et al : Age-related changes in corneal and ocular higher-order wavefront aberrations. *Am J Ophthalmol* 137 : 988—992, 2004.
- 96) He JC, Burns SA, Marcos S : Monochromatic aberrations in the accommodated human eye. *Vision Res* 40 : 41—48, 2000.
- 97) Artal P, Guirao A, Berrio E, Williams DR : Compensation of corneal aberrations by the internal optics in the human eye. *J Vis* 1 : 1—8, 2001.
- 98) Ninomiya S, Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Tano Y, Oshika T, et al : Changes of ocular aberration with accommodation. *Am J Ophthalmol* 134 : 924—926, 2002.
- 99) Marcos S : Are changes in ocular aberrations with age a significant problem for refractive surgery? *J Refract Surg* 18 : S 572—578, 2002.
- 100) Roorda A, Glasser A : Wave aberrations of the isolated crystalline lens. *J Vis* 4 : 250—261, 2003.
- 101) Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Kim A, Tano Y, Oshika T, et al : Wavefront analysis of an eye with monocular triplopia and nuclear cataract. *Am J Ophthalmol* 137 : 361—363, 2004.
- 102) Fujikado T, Kuroda T, Ninomiya S, Maeda N, Tano Y, Oshika T, et al : Age-related changes in ocular and corneal aberrations. *Am J Ophthalmol* 138 : 143—146, 2004.
- 103) Fujikado T, Kuroda T, Maeda N, Ninomiya S, Goto H, Tano Y, et al : Light scattering and optical aberrations as objective parameters to predict visual deterioration in eyes with cataracts. *J Cataract Refract Surg* 30 : 1198—208, 2004.
- 104) Cheng H, Barnett JK, Vilupuru AS, Marsack JD, Kasthurirangan S, Applegate RA, et al : A population study on changes in wave aberrations with accommodation. *J Vis* 4 : 272—280, 2004.
- 105) Mutyala S, McDonald MB, Scheinblum KA, Ostrick MD, Brint SF, Thompson H : Contrast sensitivity evaluation after laser *in situ* keratomileusis. *Ophthalmology* 107 : 1864—1867, 2000.
- 106) Chan JW, Edwards MH, Woo GC, Woo VC : Contrast sensitivity after laser *in situ* keratomileusis, one-year follow-up. *J Cataract Refract Surg* 28 : 1774—1779, 2002.
- 107) Sano Y, Carr JD, Takei K, Thompson KP, Stulting RD, Waring GO 3rd : Videokeratography after excimer laser *in situ* keratomileusis for myopia. *Ophthalmology* 107 : 674—684, 2000.
- 108) Pérez-Santonja JJ, Sakla HF, Alio JL : Contrast sensitivity after laser *in situ* keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 24 : 183—189, 1998.
- 109) Holladay JT, Dudeja DR, Chang J : Functional vision and corneal changes after laser *in situ* keratomileusis determined by contrast sensitivity, glare testing, and corneal topography. *J Cataract Refract Surg* 25 : 663—669, 1999.
- 110) Nakamura K, Bissen-Miyajima H, Toda I, Hori Y, Tsubota K : Effect of laser *in situ* keratomileusis correction on contrast visual acuity. *J Cataract Refract Surg* 27 : 357—361, 2001.
- 111) Carr JD, Stulting RD, Sano Y, Thompson KP, Wiley W, Waring GO 3rd : Prospective comparison of single-zone and multizone laser *in situ* keratomileusis for the correction of low myopia. *Ophthalmology* 105 : 1504—1511, 1998.
- 112) Wang Z, Chen J, Yang B : Comparison of laser *in situ* keratomileusis and photorefractive keratectomy to correct myopia from -1.25 to -6.00 diopters. *J Refract Surg* 13 : 528—534, 1997.
- 113) Applegate RA, Howland HC, Sharp RP, Cottingham AJ, Yee RW : Corneal aberrations and visual performance after radial keratotomomy. *J Refract Surg* 14 : 397—407, 1998.
- 114) Ghaith AA, Daniel J, Stulting RD, Thompson KP, Lynn M : Contrast sensitivity and glare disability after radial keratotomomy and photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 116 : 12—18, 1998.
- 115) Bullimore MA, Olson MD, Maloney RK : Visual performance after photorefractive keratectomy with a 6-mm ablation zone. *Am J Ophthalmol* 128 : 1—7, 1999.
- 116) Niesen U, Businger U, Hartmann P, Senn P, Schipper I : Glare sensitivity and visual acuity after excimer laser photorefractive keratectomy for myopia. *Br J Ophthalmol* 81 : 136—140, 1997.
- 117) Marcos S, Barbero S, Llorente L, Merayo-Llodes J : Optical response to LASIK surgery for myopia from total and corneal aberration measurements. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42 : 3349—3356, 2001.
- 118) Mrochen M, Kaemmerer M, Mierdel P, Seiler T : Increased higher-order optical aberrations after laser refractive surgery ; A problem of subclinical decentration. *J Cataract Refract Surg* 27 : 362—369, 2001.
- 119) Miller JM, Anwaruddin R, Straub J, Schwiegerling J : Higher order aberrations in normal, dilated, intraocular lens, and laser *in situ* keratomileusis corneas. *J Refract Surg* 18 : S 579—583, 2002.
- 120) Pallikaris IG, Kymionis GD, Panagopoulou SI, Siganos CS, Theodorakis MA, Pallikaris AI : Induced optical aberrations following formation of a laser *in situ* keratomileusis flap. *J Cataract Refract Surg* 28 : 1737—1741, 2002.
- 121) Seiler T, Kaemmerer M, Mierdel P, Krinke HE : Ocular optical aberrations after photorefractive keratectomy for myopia and myopic astigmatism. *Arch Ophthalmol* 118 : 17—21, 2000.
- 122) Yamane N, Miyata K, Samejima T, Hiraoka T,

- Kiuchi T, Okamoto F**, et al : Ocular higher-order aberrations and contrast sensitivity after conventional laser *in situ* keratomileusis. Invest Ophthalmol Vis Sci, in press.
- 123) **Nuijts RM, Nabar VA, Hament WJ, Eggink FA** : Wavefront-guided versus standard laser *in situ* keratomileusis to correct low to moderate myopia. J Cataract Refract Surg 28 : 1907—1913, 2002.
- 124) **Vongthongsri A, Phusitphoykai N, Nariphapan P** : Comparison of wavefront-guided customized ablation vs. conventional ablation in laser *in situ* keratomileusis. J Refract Surg 18(3 Suppl) : S 332—335, 2002.
- 125) **Phusitphoykai N, Tungsiripat T, Siriboonkoom J, Vongthongsri A** : Comparison of conventional versus wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis in the same patient. J Refract Surg 19(2 Suppl) : S 217—220, 2003.
- 126) **Durrie DS** : First 100 CustomCornea commercial eyes. J Refract Surg 19 : S 687—690, 2003.
- 127) **Aizawa D, Shimizu K, Komatsu M, Ito M, Suzuki M, Ohno K**, et al : Clinical outcomes of wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis : 6-month follow-up. J Cataract Refract Surg 29 : 1507—1513, 2003.
- 128) **Cosar CB, Saltuk G, Sener AB** : Wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis with the Bausch & Lomb Zyoptix system. J Refract Surg 20 : 35—39, 2004.
- 129) **Kanjani N, Jacob S, Agarwal A, Agarwal A, Agarwal S, Agarwal T**, et al : Wavefront-and topography-guided ablation in myopic eyes using Zyoptix. J Cataract Refract Surg 30 : 398—402, 2004.
- 130) **Kymionis GD, Panagopoulou SI, Aslanides IM, Plainis S, Astyrakakis N, Pallikaris IG** : Topographically supported customized ablation for the management of decentered laser *in situ* keratomileusis. Am J Ophthalmol 137 : 806—811, 2004.
- 131) **el-Hage SG, Berny F** : Contribution of the crystalline lens to the spherical aberration of the eye. J Opt Soc Am 63 : 205—211, 1973.
- 132) **Sivak JG, Kreuzer RO** : Spherical aberration of the crystalline lens. Vision Res 23 : 59—70, 1983.
- 133) **Glasser A, Campbell MC** : Presbyopia and the optical changes in the human crystalline lens with age. Vision Res 38 : 209—229, 1998.
- 134) **Packer M, Fine IH, Hoffman RS, Piers PA** : Prospective randomized trial of an anterior surface modified prolate intraocular lens. J Refract Surg 18 : 692—696, 2002.
- 135) **Kershner RM** : Retinal image contrast and functional visual performance with aspheric, silicone, and acrylic intraocular lenses. Prospective evaluation. J Cataract Refract Surg 29 : 1684—1694, 2003.
- 136) **Mester U, Dillinger P, Anterist N** : Impact of a modified optic design on visual function : Clinical comparative study. J Cataract Refract Surg 29 : 652—660, 2003.
- 137) **Altmann GE** : Wavefront-customized intraocular lenses. Curr Opin Ophthalmol 15 : 358—364, 2004.
- 138) **Packer M, Fine IH, Hoffman RS, Piers PA** : Improved functional vision with a modified prolate intraocular lens. J Cataract Refract Surg 30 : 986—992, 2004.
- 139) **Packer M, Fine IH, Hoffman RS** : Wavefront technology in cataract surgery. Curr Opin Ophthalmol 15 : 56—60, 2004.
- 140) **Huber C** : Planned myopic astigmatism as a substitute for accommodation in pseudophakia. J Am Intraocul Implant Soc 7 : 244—249, 1981.
- 141) **Nakazawa M, Ohtsuki K** : Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses. Am J Ophthalmol 96 : 435—438, 1983.
- 142) **Nakazawa M, Ohtsuki K** : Apparent accommodation in pseudophakic eyes after implantation of posterior chamber intraocular lenses : Optical analysis. Invest Ophthalmol Vis Sci 25 : 1458—1460, 1984.
- 143) **Huber C** : Myopic astigmatism a substitute for accommodation in pseudophakia. Doc Ophthalmol 52 : 123—178, 1981.
- 144) **Huber C** : Myopic astigmatism as a substitute for accommodation in pseudophakia. Dev Ophthalmol 5 : 17—26, 1981.
- 145) **Hardman Lea SJ, Rubinstein MP, Snead MP, Haworth SM** : Pseudophakic accommodation? A study of the stability of capsular bag supported, one piece, rigid tripod, or soft flexible implants. Br J Ophthalmol 74 : 22—25, 1990.
- 146) **Ravalico G, Baccara F** : Apparent accommodation in pseudophakic eyes. Acta Ophthalmol (Copenh) 68 : 604—606, 1990.
- 147) **Sawusch MR, Guyton DL** : Optimal astigmatism to enhance depth of focus after cataract surgery. Ophthalmology 98 : 1025—1029, 1991.
- 148) **Gonzalez F, Capeans C, Santos L, Suarez J, Cadarso L** : Anteroposterior shift in rigid and soft implants supported by the intraocular capsular bag. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 230 : 237—239, 1992.
- 149) **Elder MJ, Murphy C, Sanderson GF** : Apparent accommodation and depth of field in pseudophakia. J Cataract Refract Surg 22 : 615—619, 1996.
- 150) **Fukuyama M, Oshika T, Amano S, Yoshitomi F** : Relationship between apparent accommodation and corneal multifocality in pseudophakic eyes. Ophthalmology 106 : 1178—1181, 1999.
- 151) **McDonnell PJ, Garbus J, Lopez PF** : Topo-

- graphic analysis and visual acuity after radial keratotomy. *Am J Ophthalmol* 106 : 692—695, 1988.
- 152) **Maguire LJ, Bourne WM** : A multifocal lens effect as a complication of radial keratotomy. *Refract Corneal Surg* 5 : 394—399, 1989.
- 153) **Moreira H, Garbus JJ, Lee M, Fasano A, McDonnell PJ** : Multifocal corneal topographic changes after radial keratotomy. *Ophthalmic Surg* 23 : 85—89, 1992.
- 154) **Moreira H, Fasano AP, Garbus JJ, Lee M, McDonnell PJ** : Corneal topographic changes over time after radial keratotomy. *Cornea* 11 : 465—470, 1992.
- 155) **Moreira H, Garbus JJ, Fasano A, Lee M, Clapham TN, McDonnell PJ** : Multifocal corneal topographic changes with excimer laser photorefractive keratectomy. *Arch Ophthalmol* 110 : 994—999, 1992.
- 156) **Scher K, Hersh PS** : Disparity between refractive error and visual acuity after photorefractive keratectomy : Multifocal corneal effects. *J Cataract Refract Surg* 23 : 1029—1033, 1997.
- 157) **Oshika T, Mimura T, Tanaka S, Amano S, Fukuyama M, Yoshitomi F, et al** : Apparent accommodation and corneal wavefront aberration in pseudophakic eyes. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 43 : 2882—2886, 2002.
- 158) **Cumming JS, Slade SG, Chayet A, AT-45 Study Group** : Clinical evaluation of the model AT-45 silicone accommodating intraocular lens : Results of feasibility and the initial phase of a food and drug administration clinical trial. *Ophthalmology* 108 : 2005—2009, 2001.
- 159) **Kuchle M, Nguyen NX, Langenbacher A, Gusek-Schneider GC, Seitz B, Hanna KD** : Implantation of a new accommodative posterior chamber intraocular lens. *J Refract Surg* 18 : 208—216, 2002.
- 160) **Langenbacher A, Seitz B, Huber S, Nguyen NX, Kuchle M** : Theoretical and measured pseudophakic accommodation after implantation of a new accommodative posterior chamber intraocular lens. *Arch Ophthalmol* 121 : 1722—1727, 2003.
- 161) **McLeod SD, Portney V, Ting A** : A dual optic accommodating foldable intraocular lens. *Br J Ophthalmol* 87 : 1083—1085, 2003.
- 162) **Findl O, Kiss B, Petternel V, Menapace R, Georgopoulos M, Rainer G, et al** : Intraocular lens movement caused by ciliary muscle contraction. *J Cataract Refract Surg* 29 : 669—676, 2003.
- 163) **Kuchle M, Seitz B, Langenbacher A, Martus P, Nguyen NX, et al** : Stability of refraction, accommodation, and lens position after implantation of the 1 CU accommodating posterior chamber intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 29 : 2324—2329, 2003.
- 164) **Langenbacher A, Huber S, Nguyen NX, Seitz B, Gusek-Schneider GC, Kuchle M** : Measurement of accommodation after implantation of an accommodating posterior chamber intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 29 : 677—685, 2003.
- 165) **Lehrer IE, Tetz MR, Dumke K, Ruokonen P** : Refractive lensectomy and accommodating lens implantation in a case of hyperopia. *J Cataract Refract Surg* 29 : 2430—2434, 2003.
- 166) **Rana A, Miller D, Magnante P** : Understanding the accommodating intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 29 : 2284—2287, 2003.
- 167) **Mastropasqua L, Toto L, Nubile M, Falconio G, Ballone E** : Clinical study of the 1 CU accommodating intraocular lens. *J Cataract Refract Surg* 29 : 1307—1312, 2003.
- 168) **Doane JF** : Accommodating intraocular lenses. *Curr Opin Ophthalmol* 15 : 16—21, 2004.
- 169) **Kuchle M, Seitz B, Langenbacher A, Gusek-Schneider GC, Martus P, Nguyen NX, et al** : Comparison of 6-month results of implantation of the 1 CU accommodative intraocular lens with conventional intraocular lenses. *Ophthalmology* 111 : 318—324, 2004.
- 170) **Werner L, Pandey SK, Izak AM, Vargas LG, Trivedi RH, Apple DJ, et al** : Capsular bag opacification after experimental implantation of a new accommodating intraocular lens in rabbit eyes. *J Cataract Refract Surg* 30 : 1114—1123, 2004.
- 171) **Mangione CM, Berry S** : Identifying the content area for the 51-item National Eye Institute Visual Functioning Questionnaire : Results from focus groups with visually impaired persons. *Arch Ophthalmol* 116 : 227—233, 1998.
- 172) **Mangione CM, Lee PP, Pitts J, Gutierrez P, Berry S, Hays RD** : Psychometric properties of the National Eye Institute Visual Function Questionnaire (NEI-VFQ). *NEI-VFQ Field Test Investigators*. *Arch Ophthalmol* 116 : 1496—504, 1998.
- 173) **Mangione CM, Lee PP, Gutierrez PR, Spritzer K, Berry S, Hays RD, et al** : Development of the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire. *Arch Ophthalmol* 119 : 1050—1058, 2001.
- 174) **Rossi GC, Milano G, Tinelli C** : The Italian version of the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire : Translation, validity, and reliability. *J Glaucoma* 12 : 213—220, 2003.
- 175) **Nordmann JP, Viala M, Sullivan K, Arnould B, Berdeaux G** : Psychometric Validation of the National Eye Institute Visual Function Questionnaire-25 (NEI VFQ-25) French version : In a population of patients treated for ocular hyper-

- tension and glaucoma. *Pharmacoeconomics* 22 : 197—206, 2004.
- 176) **Broman AT, Munoz B, West SK, Rodriguez J, Sanchez R, Snyder R**, et al : Psychometric properties of the 25-item NEI-VFQ in a Hispanic population : Proyecto VER. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 42 : 606—613, 2001.
- 177) **Deramo VA, Cox TA, Syed AB, Lee PP, Fekrat S** : Vision-related quality of life in people with central retinal vein occlusion using the 25-item National Eye Institute Visual Function Questionnaire. *Arch Ophthalmol* 121 : 1297—1302, 2003.
- 178) **Globe D, Varma R, Azen SP, Paz S, Yu E, Preston-Martin S**, et al : Psychometric performance of the NEI VFQ-25 in visually normal Latinos : The Los Angeles Latino Eye Study. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44 : 1470—1478, 2003.
- 179) **Paz SH, Globe DR, Wu J, Azen SP, Varma R, Los Angeles Latino Eye Study** : Relationship between self-reported depression and self-reported visual function in Latinos. *Arch Ophthalmol* 121 : 1021—1027, 2003.
- 180) **Globe DR, Wu J, Azen SP, Varma R, Los Angeles Latino Eye Study Group** : The impact of visual impairment on self-reported visual functioning in Latinos : The Los Angeles Latino Eye Study. *Ophthalmology* 111 : 1141—1149, 2004.
- 181) **Miskala PH, Bressler NM, Meinert CL** : Relative contributions of reduced vision and general health to NEI-VFQ scores in patients with neovascular age-related macular degeneration. *Arch Ophthalmol* 122 : 758—766, 2004.
- 182) **Maguire M, Complications of Age-Related Macular Degeneration Prevention Trial Research Group** : Baseline characteristics, the 25-Item National Eye Institute Visual Functioning Questionnaire, and their associations in the Complications of Age-Related Macular Degeneration Prevention Trial (CAPT). *Ophthalmology* 111 : 1307—1316, 2004.
- 183) **Scilley K, DeCarlo DK, Wells J, Owsley C** : Vision-specific health-related quality of life in age-related maculopathy patients presenting for low vision services. *Ophthalmic Epidemiol* 11 : 131—146, 2004.
- 184) **Acqudro C, Jambon B, Ellis D** : Language and translations issues. In : Spilker B, (Ed) : *Quality of life and pharmacoeconomics in clinical trials*. 2nd ed. Lippincott Raven, Philadelphia (PA), 63, 1995.
- 185) **Chylack LT Jr, Wolfe JK, Singer DM, Leske MC, Bullimore MA, Bailey IL**, et al : The Lens Opacities Classification System III. The Longitudinal Study of Cataract Study Group. *Arch Ophthalmol* 111 : 831—836, 1993.
- 186) **Karbassi M, Khu PM, Singer DM, Chylack LT Jr** : Evaluation of lens opacities classification system III applied at the slitlamp. *Optom Vis Sci* 70 : 923—928, 1993.
- 187) **Leske MC, Chylack LT Jr, Wu SY, Schoenfeld E, He Q, Friend J, Wolfe J** : Incidence and progression of nuclear opacities in the Longitudinal Study of Cataract. *Ophthalmology* 103 : 705—712, 1996.
- 188) **Mangione CM, Orav EJ, Lawrence MG, Phillips RS, Seddon JM, Goldman L** : Prediction of visual function after cataract surgery. A prospectively validated model. *Arch Ophthalmol* 113 : 1305—1311, 1995.
- 189) **Desai P, Reidy A, Minassian DC, Vafidis G, Bolger J** : Gains from cataract surgery : Visual function and quality of life. *Br J Ophthalmol* 80 : 868—873, 1996.
- 190) **Meacock WR, Spalton DJ, Boyce J, Marshall J** : The effect of posterior capsule opacification on visual function. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 44 : 4665—4669, 2003.
- 191) 大鹿哲郎, 富所敦男 : 白内障術後不正乱視の定量的検討. *臨眼* 49 : 365—371, 1995.
- 192) 富所敦男, 大鹿哲郎, 宮田和典, 徳永忠彦, 鮫島智一 : 円錐角膜の不正乱視の定量的検討. *臨眼* 49 : 349—352, 1995.
- 193) 富所敦男, 大鹿哲郎 : 角膜形状解析装置を用いた角膜不正乱視の定量的解析法. *日眼会誌* 99 : 296—301, 1995.
- 194) 大鹿哲郎, 富所敦男 : ビデオケラトスコープによる角膜不正乱視の定量. *あたらしい眼科* 12 : 583—589, 1995.
- 195) 石井 清, 富所敦男, 大鹿哲郎 : 乱視矯正角膜切開後の不正乱視の定量的検討. *臨眼* 49 : 1223—1225, 1995.

Comment : 所 敬

現代は高度視覚情報化社会であり、視覚情報の質の重要性が問題になっている。すなわち、視力だけでなく見え方の質が問われるようになってきている。しかし、質の高い見え方を調べる良い評価方法がないのが現状である。従来、QOL を主に規定しているものは個人の主観的側面であり、心理的側面を重視した調査が行われている。一方、できるだけ客観的に行おうとする試みもなされてきている。情報の 80%以上は眼からはいるといわれ、眼科における視機能の評価は他分野に比べても大切である。眼疾患が QOL/QOV にどのように影響し、治療でどのように変化するか定の量的解析は 21 世紀の眼科診療上重要な課題である。この問題を取り上げたのが本論文である。

遠視、近視、乱視の屈折異常は球面レンズや円柱レンズで視機能を評価できるが、角膜不正乱視の評価は角膜形状変化の定性的なものである。本論文では角膜形状解析装置の投影リング上の屈折力分布関数をフーリエ解析することで角膜不正乱視を定量化している。不正乱視の解析にフーリエ法を導入し定量化したことは新規性が高い。そして、この方法を用いて円錐角膜の経年変化の定量的測定、角膜移植抜糸後の角膜形状変化の解析を行っている。また、フーリエ法を利用した新しい視力矯正法は角膜不正乱視の強い症例には極めて有用な画期的方法である。

最近では眼科領域にも幾何光学だけではなく、波動光学の考え方が導入されてきた。すなわち、焦点ボケだけでなく、波面収差も考慮されるようになってきている。眼の波面収差は角膜の収差と眼球の収差に分けられ、角膜と眼球の高次波面収差であるコマ様収差と球面様収差の加齢変化が検討されている。この他、LASIK 術後の波面収差の増加、眼内レンズの固定状態と眼球の波面収差との関係、波面収差とコントラスト感度の相関なども示されている。偽調節の原因として角膜の多焦点性と角膜の瞳孔領域内におけるコマ収差の関与なども述べられている。

視覚関連の QOL の測定には NEI-VFQ 25 の日本語版を作成して白内障術前後の QOL/QOV の評価を行っている。これは手術の結果や効果を視力や視機能の面だけから評価するのではなく、患者の日常生活や QOL の面から評価することで、今後の眼科診療上、考慮すべき課題である。また、白内障の形態変化を波面収差から検討して QOL/QOV と関連づける試みについても述べているが、今後の成果に期待したい。