

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

富所 敦男¹⁾, 大鹿 哲郎²⁾

¹⁾大宮赤十字病院眼科, ²⁾東京厚生年金病院眼科

要 約

角膜不正乱視を定量的に解析する方法を検討した。まず、トーリック面から成る正乱視角膜を角膜形状解析装置で測定した場合、円周上の屈折力の分布曲線が、2周期をもつ正弦曲線に近似されることを示した。この近似正弦曲線と実際の屈折力の隔たりを、不正乱視のパラメータ（不正乱視量、単位はジオプトリー）とした。球面モデルおよびトーリック面モデルでの測定では、不正乱視量は最小値（0.02～0.05 D）となり、両モデルは差のない値を示した。正常人眼における連続測定では、不正乱視量は0.10～0.25 Dの範囲で安定した値となった。翼状片をもつ眼で、そのサイズ別に不正乱視量を計算したところ、翼状片が大きくなるほど不正乱視量は大きく

なり、すべての群で正常対照群との間に有意差がみられた。翼状片切除術後では、全群で正乱視量は減少し、大翼状片群（先端が角膜中央から2 mm以内）以外では不正乱視量は正常と差のない値まで減少した。しかし、大翼状片群では術後も有意に高い不正乱視量を示しており、不正乱視が残存していると考えられた。以上から、本法は不正乱視を正乱視から分離して定量的に解析できる方法として有用なものと考えられた。（日眼会誌 99：296—301, 1995）

キーワード：角膜形状解析, 不正乱視, 正弦曲線近似, 翼状片

Quantitative Evaluation of Corneal Irregular Astigmatism Using Computed Corneal Topography

Atsuo Tomidokoro¹⁾ and Tetsuro Oshika²⁾

¹⁾Department of Ophthalmology, Omiya Red Cross Hospital

²⁾Department of Ophthalmology, Tokyo Kosei Nenkin Hospital

Abstract

A new method was developed to quantify corneal irregular astigmatism using computed corneal topography. Refractive powers on a mire ring projected on a toric plane (regular cornea) can be approximated to follow a sine curve. The discrepancy between the approximated sine curve and actual refractive powers was calculated and employed as a parameter of corneal irregular astigmatism. Artificial precision models of a sphere and a toric plane showed similar parameters and the least amount of irregular astigmatism (0.02~0.05D). Consecutive measurements on normal human corneas displayed a reproducible irregular astigmatism range of 0.10~0.25D. Irregular astigmatism of the eyes with pterygium was significantly greater than that of normal human controls even from early

stages of the disease. Surgery for removal of the pterygium normalized the amount of regular astigmatism regardless of the size of the pterygium, but irregular astigmatism of the eyes with large pterygium (the apex reaching within the central 2 mm cornea) remained at a significantly higher than normal level. It was concluded that the current method enables a quantitative analysis of corneal irregular astigmatism, independent by the amount of regular astigmatism. (J Jpn Ophthalmol Soc 99: 296—301, 1995)

Key words: Computed corneal topography, Irregular astigmatism, Sine curve approximation, Pterygium

I 緒 言

屈折矯正手術や小切開創白内障手術に対する関心が高

まるにつれ、角膜形状を詳細に評価する重要性が増している。一般に角膜の形状は基本カーブとなる球面成分、正乱視と呼ばれる円柱成分、そしてそれら2つの成分で

別刷請求先：338 埼玉県与野市上落合 903 大宮赤十字病院眼科 富所 敦男
(平成6年8月15日受付, 平成6年10月27日改訂受理)

Reprint requests to: Atsuo Tomidokoro, M.D. Department of Ophthalmology, Omiya Red Cross Hospital, 903 Kamiyochiai Yono-shi, Saitama-ken 338, Japan

(Received August 15, 1994 and accepted in revised form October 27, 1994)

表現しきれない残りの不正乱視成分の3成分により構成されると考えられる。従来からのケラトメータを用いれば、角膜の中心領域に限定されるものの、球面成分、円柱成分については十分実用性の高い定量的な測定が可能である。しかし、ケラトメータでは不正乱視に関する定量的情報はほとんど得ることができず、また、不正乱視の大きな角膜では正確な測定が困難でさえあった^{1)~3)}。これに対し、近年に一般化した角膜形状解析装置 (computed corneal topography) を用いれば、角膜のほぼ全域にわたる測定が可能であり、ある程度大きな不正乱視まで測定の対象にできる^{2)~6)}。しかし、角膜形状解析装置を用いた不正乱視の評価法としては、屈折力の分布を表すカラーコードマップなどの定性的な方法が現在のところ中心であり、定量的な解析法はいくつか提案されているものの^{7)~10)}、球面成分、円柱成分から分離して、不正乱視成分を定量化することが可能な方法は確立していない。そこで我々は、円柱成分と球面成分のみにより構成されるトーリック面と、実際の角膜形状のずれを算出することにより、不正乱視を定量的に分離する解析法を考案し、その有用性を検討した。

II 方 法

1. 不正乱視の定量化の原理

角膜形状解析装置 (EyeSys 社製, EyeSys Corneal Analysis System[®]) は16本の同心円状のマイアーリングを角膜上に投影する。この光源を例えば球面に投影した場合には、マイアーリングは円となり、トーリック面では楕円となる。トーリック面は平面上の円をその中心を通らない軸で回転させることで得られる面であり、一般に球面成分と円柱成分から成る正乱視角膜のモデルとされている^{11)~13)}。トーリック面を成す角膜を測定した場合、各マイアーリングは楕円となり、xy座標上では次の方程式により表される。

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (1)$$

ここではaはx軸上の、bはy軸上の楕円半径である。式(1)に $x = r \cos \theta$, $y = r \sin \theta$ (r:楕円の中心と各点との距離) を代入し、極座標上での楕円方程式に変換すると、

$$\frac{1}{r^2} = \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \quad (2)$$

これと $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta = (\cos 2\theta + 1)/2$ から、

$$\frac{1}{r^2} = \frac{(a^2 + b^2) - (a^2 - b^2) \cos 2\theta}{2 a^2 b^2} \quad (3)$$

角膜曲率半径 R はマイアーリング上の測定点とリングの中心との距離 r に比例し¹⁴⁾¹⁵⁾、また、R と角膜屈折力 K の関係は $K = 1,000 \times (1.3375 - 1)/R$ となる¹⁶⁾ので、K は r に反比例することから、式(3)は

$$K = \sqrt{\frac{(K_1^2 + K_2^2)}{2} + \frac{1}{2} (K_1^2 - K_2^2) \cos 2\theta} \quad (4)$$

と変換される。この式は、楕円の軸が x, y 軸に平行な場合であるので、軸が x 軸から角度 γ 傾いている場合には、

$$K = \sqrt{\frac{(K_1^2 + K_2^2)}{2} + \frac{1}{2} (K_1^2 - K_2^2) \cos 2(\theta - \gamma)} \quad (5)$$

となる。ここで K_1, K_2 は、それぞれ楕円の短軸上、長軸上の角膜屈折力、つまりトーリック面を成す角膜での最大屈折力、最小屈折力を表す。式(5)から、トーリック面のある円周上の屈折力 K は $0^\circ \sim 360^\circ$ の間に2周期をもち、最大角膜屈折力 K_1 と最小角膜屈折力 K_2 の間を正弦曲線に近い曲線を描きながら振動する量であることがわかる(図1)。この式は、以下の正弦方程式で近似される。

$$K = \alpha + \beta \cos 2(\theta - \gamma) \quad (6)$$

ここで α は平均の屈折力を表し、 β は正弦曲線の振幅であり、 2β が円柱成分、すなわち正乱視の大きさに相当する。また、 γ は強主経線の角度を表す。式(5)と式(6)の誤差をトーリック面上でシミュレートすると、円柱成分が大きくなるにつれて両式の誤差は大きくなるが、例えば球面成分40ジオプトリー(以下、D)で円柱成分が1.0Dのときの差は0.004D、5.0Dのときは0.079Dである(図2)。以上から、実用上十分な精度で式(5)の代わりに式(6)を用いることが可能である。

式(6)はトーリック面に一致した角膜、すなわち、完全な正乱視角膜を表現する式なので、不正乱視を有する人眼角膜の角膜屈折力 K をこの式に回帰した場合、不正乱視量に応じた偏差が生じる。この偏差 F を、

$$F = \sqrt{\frac{\sum (K_n - K'_n)^2}{N}} \quad (D) \quad (7)$$

と計算し、不正乱視量とした。ここで、N は有効測定値の個数(最高360個)、 K_n は n 番目の測定点での屈折力(D)、 K'_n は近似正弦曲線上で n 番目の測定点に相当する位置の屈折力(D)である。不正乱視量は単位 D で表される量となる。具体的には、角膜形状解析装置の16本のリングのうち、3本目、6本目、9本目のリング上の

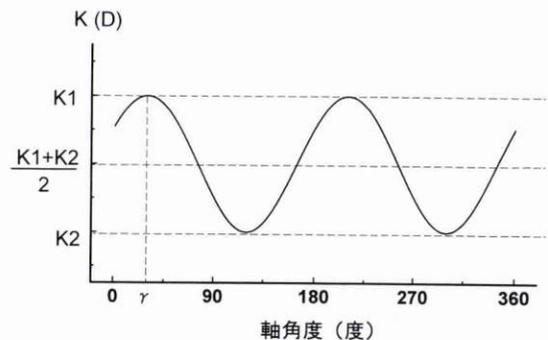


図1 トーリック面の円周上の屈折力分布。

K は最大屈折力 K_1 と最小屈折力 K_2 の間を正弦曲線に近い曲線を描きながら振動する量である。

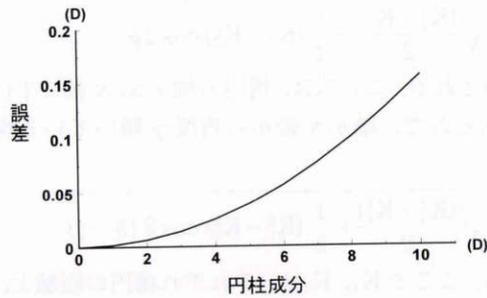


図2 理論式と近似式の差。

トーリック面の正乱視の大きさごとに、式(5)と式(6)の誤差をプロットした。円柱成分が大きいほど両式の間の誤差は広がるが、10 Dの正乱視角膜を仮定してもその誤差は0.16 Dにとどまる。

最高360ポイントのK値を最小二乗法により式(6)に近似し、式(7)によって不正乱視量を計算した。

2. モデル角膜面による球面、トーリック面の解析

ステンレス製の球面およびトーリック面のモデルの角膜面を固定具により角膜形状解析装置の測定位置に固定し、人眼測定とほぼ同様な条件下で測定し、不正乱視量を算出した。測定したモデル角膜面は曲率半径8.00 mm (角膜屈折力42.19 Dに相当)をもつ球面と、強主経線方向および弱主経線方向の曲率半径がそれぞれ7.42 mm (角膜屈折力45.5 Dに相当)、8.02 mm (同42.0 D)のトーリック面である。

3. 正常人眼角膜測定における不正乱視量の再現性

眼疾患を有せず、オートケラトメーターより測定される角膜乱視の値が1.5 D以下の正常人眼10眼において角膜形状解析装置の測定を2回連続して行い、不正乱視量の再現性を検討した。対象者の年齢は25~31歳 (28.0 ± 2.3 , 平均値 \pm 標準偏差)であった。

4. 翼状片手術前後の角膜形状の検討

翼状片手術を初めて受ける患者23人25眼を対象に、翼状片手術前後の角膜形状につき検討した。角膜形状解析装置により撮影された前眼部像上で翼状片の大きさを測定し、3群に分類した。翼状片の先端と角膜中心との距離が3 mm以上の群を小翼状片群、2 mm以上3 mm未満の群を中翼状片、2 mm未満の群を大翼状片群とした。それぞれの群の例数は9眼 (62.3 ± 9.0 歳)、8眼 (65.6 ± 4.1 歳)、8眼 (68.0 ± 6.0 歳)であった。

翼状片手術は、翼状片切除のあとに上部輪部結膜弁を網膜欠損部に移動させる方法¹⁷⁾で行った。術前と術後最終診察時の2回、ケラトメータ (Bosch-Lomb社製)により角膜乱視量(以下、K値)、角膜形状解析装置により不正乱視量をそれぞれ測定した。翼状片手術から最終診察時までの期間は小翼状片、中翼状片、大翼状片のそれぞれの群で 4.6 ± 1.8 か月、 4.9 ± 2.3 か月、 5.3 ± 2.2 か月 (平均値 \pm 標準偏差)であった。対照として、前眼部疾患を有せず正乱視が1.5 D以下の16例16眼につき、

同様にK値、不正乱視量の測定を行った。対照群の測定時の年齢は 64.5 ± 18.4 歳であり、翼状片各群と有意差はなかった。

III 結果

1. モデル角膜面による球面、トーリック面の解析

球面モデルおよびトーリック面モデルでの、リング3における角膜屈折分布曲線と近似正弦曲線を図3、4に示す。球面モデルでは屈折力分布はほぼ直線になり、トーリック面モデルでは360°間に2周期を持つ正弦曲線となった。

式(6)を用いた回帰分析では、各モデルにおいて表1

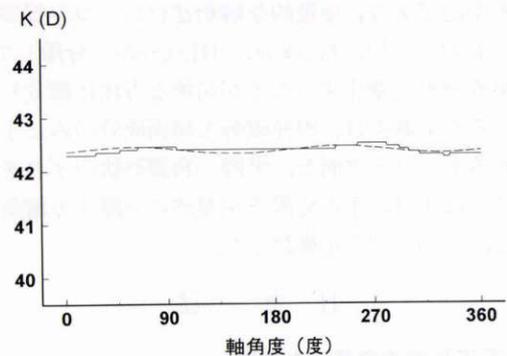


図3 球面モデルの解析結果。

リング3の屈折力分布曲線(実線)と近似正弦曲線(破線)を示す。不正乱視量は0.04 D。

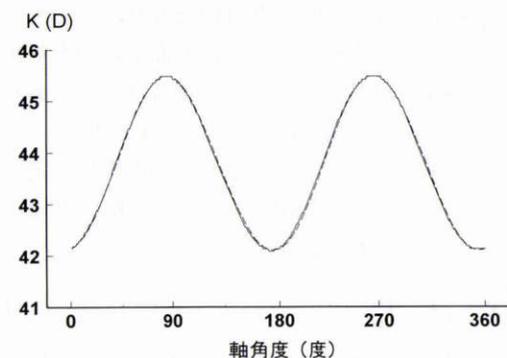


図4 トーリック面モデルの解析結果。

リング3の屈折力分布曲線(実線)と近似正弦曲線(破線)を示す。不正乱視量は0.02 D。

表1 球面モデル、トーリック面モデルでの近似式の各定数および不正乱視量

	リング	α	β	γ	不正乱視量
球面モデル	3	42.4	0.06	15.4	0.04
	6	42.3	0.04	0.26	0.04
	9	42.4	0.08	46.6	0.03
トーリック面モデル	3	43.8	-1.69	0.26	0.02
	6	43.8	-1.65	0.25	0.03
	9	43.9	-1.61	0.25	0.05

α , β および不正乱視量の単位は D。

のような定数および不正乱視量が得られた。おのおの平均屈折力 (α)、正乱視量 (2β) のパラメータは、測定モデルの固有値とよく一致した。また不正乱視量は、球面モデルをトーリック面モデルともにごく小さい値を示

し、両モデルの値の間には差がみられなかった。

2. 正常人眼角膜測定における不正乱視量の再現性

正常人眼 10 眼での不正乱視量は、1 回目の測定ではリング 3, 6, 9 でそれぞれ 0.12 ± 0.06 D, 0.19 ± 0.09 D,

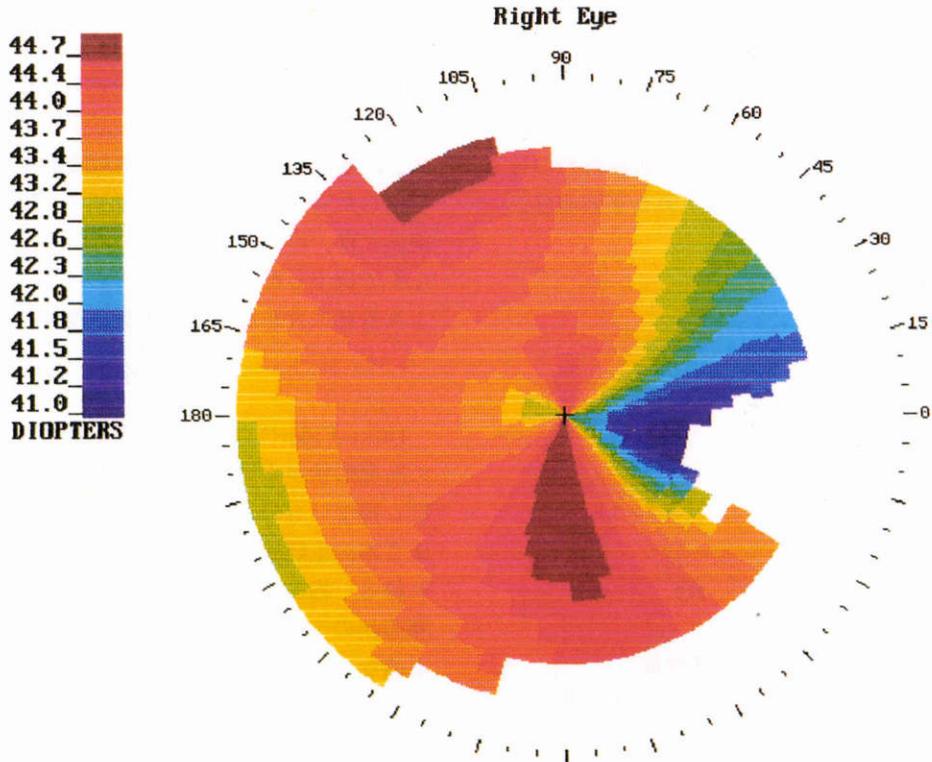


図5 翼状片術前のカラーコードマップ。

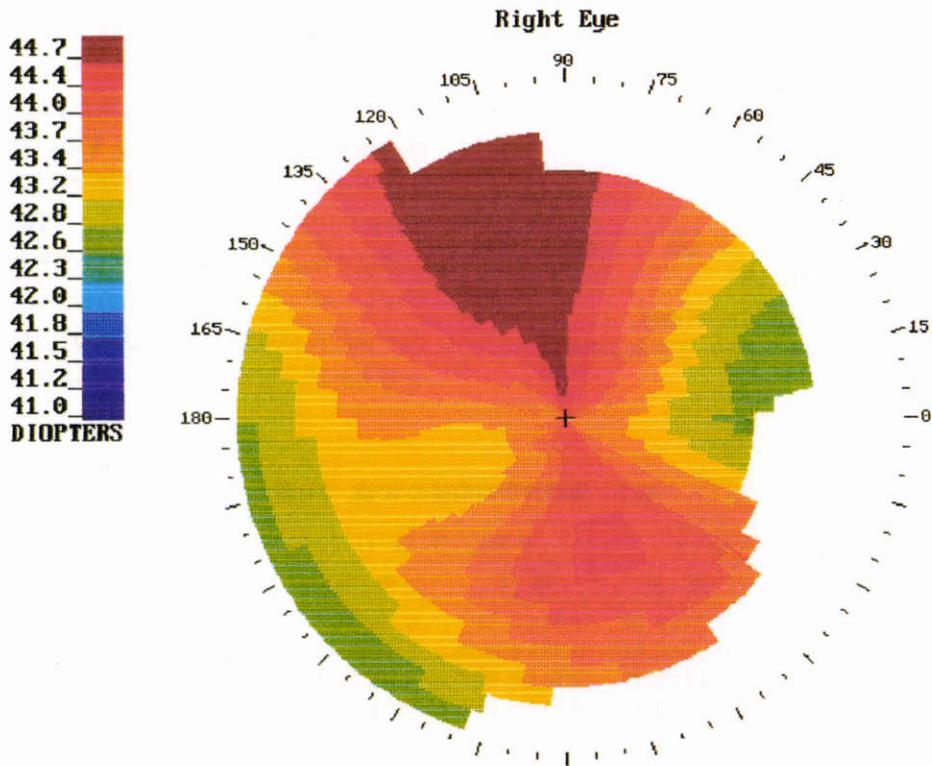


図6 翼状片術後のカラーコードマップ。

0.25±0.10 D (平均値±標準偏差)で、2回目は0.10±0.05 D, 0.20±0.14 D, 0.25±0.10 D と、ほぼ同様の値を示した。

3. 翼状片手術前後の角膜不正乱視の検討

翼状片群の一例における手術前後のカラーマップ (図5, 6) と角膜屈折力の分布曲線 (図7, 8) を示す。術前のカラーマップでは、鼻側 (3時方向) のフラット化, 下方のスティープ化が強くみられたのが、術後では鼻側および下方のフラット化が減弱し, 上下左右がほぼ中心に対して対称の形状を示している。角膜屈折力の分布曲線をみると、術前 (図7) は近似された正弦曲線か

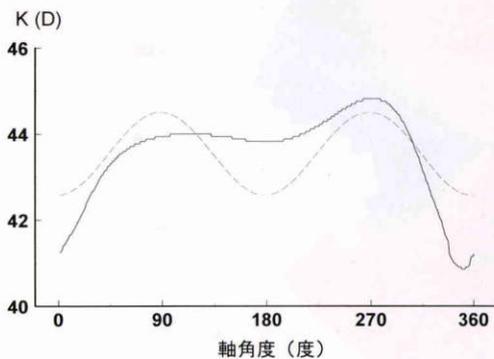


図7 翼状片術前の屈折力分布曲線。

リング6での屈折力分布曲線 (実線) と近似正弦曲線 (破線)。

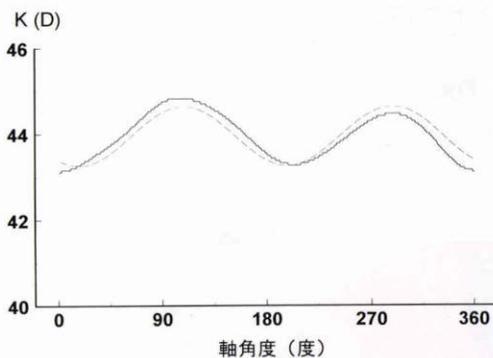


図8 翼状片術後の屈折力分布曲線。

リング6での屈折力分布曲線 (実線) と近似正弦曲線 (破線)。

ら大きく離れていたものが、術後 (図8) では正弦曲線にかなり近づいており、これにより不正乱視量は0.79 Dから0.20 Dに減少して、不正乱視の軽快をよく反映している。

翼状片手術前後のK値と不正乱視量の変化を表2に示す。術前K値は中翼状片群, 大翼状片群で正常群より有意に大きかった (unpaired t-test, それぞれ $p < 0.05$, $p < 0.01$) が、術後にはどの群でも正常群と有意差のない値に低下した。不正乱視量は、全群において術前, リング3, 6, 9のすべてで正常対照群より有意に大きな値を示した (unpaired t-test, $p < 0.05$ または, $p < 0.01$)。術後には、小および中翼状片群の不正乱視量は正常レベルまで低下したが、大翼状片ではすべてのリングで正常より有意に大きな不正乱視量が残存した。

IV 考 按

Duke-Elder¹⁸⁾によれば、不正乱視とは角膜の経線方向の断面形状が不規則であり、どんな規則的な曲線にも一致し得ないものと定義されているが、魚里¹³⁾はこれに加え2本の主経線が直交しないものも不正乱視の範疇に入れ得ると指摘している。角膜形状解析装置が登場し、角膜形状のより広範囲かつ詳細な検討が可能となり、屈折手術などに際して乱視に関する厳密な評価が要求されている現状を考えれば、不正乱視の概念として球面成分, 円柱成分以外の要素全般を考慮することが望ましいといえる。角膜形状解析の定量的指標として、Klyceら⁷⁾⁸⁾の提案したSAI (surface asymmetry index) とSRI (surface regularity index) は比較的良好に用いられているが、それぞれ角膜形状の非対称性, 非均一性の定量化を企図したものであり、不正乱視のインデックスとして一義的に使用するには適していない。また、Maloneyら¹⁰⁾のbest-fit topographic measures法を用いれば比較的明瞭に不正乱視を定量化し得るが、解析の対象が角膜中心の直径4mmの円内に限定されている。円錐角膜の初期の変化が直径4mmより外側に生ずることがあったり¹⁹⁾、エキシマレーザーによるphotorefractive keratectomy術後の不正乱視が角膜中央の限局した区域に生じ得る²⁰⁾ことを考えれば、解析対象によっては直径4mmの円内を横

表2 翼状片手術前後のK値, FL値

	小翼状片群 (n=9)		中翼状片群 (n=8)		大翼状片群 (n=8)		正常対照群 (n=16)
	術前	術後	術前	術後	術前	術後	
K値	1.31±0.24	1.25±0.20	1.85±0.35*	0.89±0.39	7.90±1.78**	1.25±0.47	0.92±0.72
不正乱視量	リング3	0.33±0.05**	0.23±0.02	0.48±0.08**	0.24±0.06	1.21±0.42**	0.65±0.24*
	リング6	0.45±0.09*	0.40±0.05	0.81±0.08**	0.37±0.09	1.30±0.38**	0.81±0.25*
	リング9	0.70±0.33*	0.55±0.18	0.81±0.19**	0.55±0.19	1.29±0.94**	1.71±0.34*

** : 正常対照群との間に有意差あり (unpaired t-test, $p < 0.01$)

* : 同上 (unpaired t-test, $p < 0.05$)

平均値±標準誤差, 単位はD.

断的に評価するだけでは不十分であるといえる。今回我々が示した解析法では、正乱視のモデルであるトーリック面からの隔たりを不正乱視のパラメータとすることにより、広義の角膜形状の不正性が定量化され、かつ球面成分、円柱成分の影響が比較的よく除外される。また、解析の対象のマイアリングを任意に選ぶことにより、角膜の局所的な不正乱視も検出可能である。

本法による解析をまず球面モデルおよびトーリック面モデルで行ったところ、平均屈折力 (α) や正乱視量 (β) のパラメータは測定モデルの固有値とよく一致し、また、不正乱視量も両者で差のない結果となった。この結果は、不正乱視量が測定される屈折系の絶対値や正乱視量に影響されないパラメータであることを、さらには不正乱視量と正乱視量を分離解析し得ることを示している。正常人眼での連続測定でも不正乱視量は安定した値を示した。

翼状片手術前後の角膜形状の解析では、手術により正乱視、不正乱視ともに減少するものの、角膜中心から半径2 mm以内にその先端が侵入した翼状片では、術後にも不正乱視が残存するとの結果が得られた。翼状片手術前後の角膜形状の変化については今までにいくつかの報告²¹⁾²²⁾があり、正乱視、特に倒乱視の減少は知られているが、不正乱視につき定量的に詳細に検討した報告はなく、今回の結果は翼状片の手術適応時期の決定に役立つものと思われる。

今回、不正乱視の定量化の新しい方法につき報告した。この方法は不正乱視量の正常値の範囲、視力との相関などは今後検討すべき課題としても、現在知られている他の方法に比べ、より明瞭に角膜不正乱視のみを分離して定量化することができる方法である。また、角膜上の任意の半径上の位置を解析の対象にできることなどにより、汎用性が高い方法であり、今後の検討に十分値するものと考えられた。

文 献

- 1) **Duke-Elder S, Abrams D**: The optical constants of the eye. In: Duke-Elder S (Ed): System of Ophthalmology Vol. 5 Ophthalmic optics and refraction, Henry Kimpton, London, 93—117, 1970.
- 2) **Sanders ER, Gills JP, Martin RG**: Characterizing astigmatism. In: Sanders DR, et al (Eds): An Atlas of Corneal Topography, Slack, Thorofare, 45—61, 1993.
- 3) **Hannush SB Crawford SL, Waring GO**: Accuracy and precision of keratometry, photokeratoscopy, and corneal modeling system on calibrated steel balls. Arch Ophthalmol 107: 1235—1239, 1989.
- 4) **Koch DD, Foulks GN, Moran CT, Walkil JS**: The corneal eyesys system: accuracy analysis and reproducibility of first generation prototype. Refract Corneal Surg 5: 424—429, 1989.
- 5) **Klyce SD**: Computer-assisted corneal topography, high resolution graphic presentation and analysis of keratoscopy. Invest Ophthalmol Vis Sci 25: 1426—1435, 1984.
- 6) **Maguire LJ, Singer DE, Klyce SD**: Graphic presentation of computer-analyzed keratoscope photographs. Arch Ophthalmol 105: 223—230, 1987.
- 7) **Dingeldein SA, Klyce SD**: Quantitative descriptors of corneal shape derived from computer assisted analysis of photokeratographs. Refract Corneal Surg 5: 372—378, 1989.
- 8) **Wilson SE, Klyce SD**: Quantitative descriptors of corneal topography. Arch Ophthalmol 109: 349—358, 1991.
- 9) **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.
- 10) **Maloney RK, Bogan SJ, Waring GO**: Determination of corneal image-forming properties from corneal topography. Am J Ophthalmol 115: 31—41, 1993.
- 11) **西信元嗣**: 眼光学の基礎. 金原出版, 東京, 39—41, 1990.
- 12) **西信元嗣**: 乱視. 丸尾敏夫(編): 眼科診療プラクティス9, 屈折異常の診療. 文光堂, 東京, 32—35, 1994.
- 13) **魚里 博**: 不正乱視. 丸尾敏夫(編): 眼科診療プラクティス9, 屈折異常の診療. 文光堂, 東京, 66—69, 1994.
- 14) **Fry GA**: Analysis of photometric data. Am J Optom Physiol Optics 52: 305—312, 1975.
- 15) **Doss JD, Hutson RL, Rowsey JJ, Brown DR**: Method for calculation of corneal profile and power distribution. Arch Ophthalmol 99: 1261—1265, 1981.
- 16) **Koch DD, Haft EA**: Introduction to Corneal Topography. In: Sanders DR, et al (Eds): An Atlas of Corneal Topography, Slack, Thorofare, 1—30, 1993.
- 17) **江口甲一郎**: 翼状片手術の基本手技. 眼科手術 2: 385—371, 1990.
- 18) **Duke-Elder S, Abrams D**: Regular Astigmatism. In: Duke-Elder S (Ed): System of Ophthalmology vol. 5 Ophthalmic optics and refraction, Henry Kimpton, London, 274—295, 1970.
- 19) **Rabinowitz YS, Garbus J, McDonnell PJ**: Computer-assisted corneal topography in patients with keratoconus. Arch Ophthalmol 108: 365—371, 1990.
- 20) **Wilson SE, Klyce SD, McDonald MB, Liu JC, Kaufman HE**: Changes in corneal topography after eximer laser photorefractive keratectomy for myopia. Ophthalmology 98: 1338—1346, 1991.
- 21) **江口甲一郎, 多田圭一, 藤岡敏彦**: 翼状片手術の予後および手術適期に関する研究. 眼臨 80: 1171—1176, 1986.
- 22) **富所敦男, 江口甲一郎, 多田圭一, 若林憲明, 大鹿哲郎**: 翼状片手術による角膜形状の変化. あたらしい眼科 11: 407—410, 1994.