

LASIK におけるアイトラッキングシステムの有用性

山田英明*¹ 稗田 牧*¹ 河野明美*² 中村 葉*³ 中島伸子*⁴
 荒島幹雄*⁵ 木下 茂*¹

*¹ 京都府立医科大学眼科学教室 *² こうの眼科クリニック *³ アイケア名古屋 *⁴ パプテスト眼科クリニック
 *⁵ ニデック販売株式会社

Efficacy of Eye Tracking System in Laser *In Situ* Keratomileusis

Hideaki Yamada¹, Osamu Hieda¹, Akemi Kono², Yo Nakamura⁵, Nobuko Nakajima⁴, Mikio Arashima⁵ and Shigeru Kinoshita¹

Department of Ophthalmology, Kyoto Prefectural University of Medicine¹, Kono Eye Clinic², Eyecare Nagoya³, Baptist Eye Clinic⁴, NIDEK SALES CO., LTD⁵

赤外線カメラで記録した LASIK (laser *in situ* keratomileusis) 術中の瞳孔中心偏位量と術後 3 カ月までの成績を比較することによりアイトラッキングシステムの有用性を検討した。LASIK を施行し、術後 3 カ月以上経過観察が可能であった 11 例 22 眼を対象とし、ランダムに片眼にはアイトラッキングシステムを使用し、もう片眼には使用せずに手術を施行した。アイトラッキングシステムを使用した場合、術中の瞳孔中心偏位量は有意に減少した ($p < 0.001$) が、アイトラッキングシステム使用の有無により角膜形状解析の結果から測定した照射中心と瞳孔中心との偏位量をはじめとする術後成績には有意差が認められず、非常に良好であった。しかしアイトラッキングシステムを使用することで術者のセンタリングに要する負担は軽減されたため、今後 LASIK においてもアイトラッキングシステムは普及するものと考えられた。

We investigated the efficacy of the eye tracking system in laser *in situ* keratomileusis (LASIK), evaluating pupillary center distance as recorded with an infrared camera during surgery, and results within 3 months after surgery. Subjects comprised 22 eyes of 11 patients who underwent LASIK and were available for follow-up at 3 months after surgery. One eye was randomly operated on using the eye tracking system; the fellow eye was operated on without it. The mean pupillary center distance during surgery using the eye tracking system was significantly smaller than that without it ($p < 0.001$), but there was no significant difference between the two methods regarding the distance from the ablation zone center to the pupillary center, as measured by corneal topography; we obtained good results with both methods. We believe that the eye tracking system will come into wide use in LASIK, since it lessens the surgeon's burden in regard to centration.

(Atarashii Ganka (Journal of the Eye) 21(2):245~249, 2004)

Key words : LASIK, アイトラッキングシステム, 術中の瞳孔中心偏位量, 術後成績, LASIK, eye tracking system, the mean pupillary center distance during surgery, results after surgery.

はじめに

1990 年に Pallikaris により報告された laser *in situ* keratomileusis (LASIK)¹⁾ に代表されるエキシマレーザー屈折矯正手術は、安全性が高く近視矯正に優れた技術であり、わが国でも広く行われている。しかし、術中の偏心照射による術後不正乱視などの合併症が一定の頻度で出現するため、さらなる手術システムの改良が必要と考えられている²⁾。近

年、術中の偏心照射を予防するためにアイトラッキングシステムが開発された。アイトラッキングシステムは、術中に赤外線カメラで前眼部の画像を取り込み、虹彩と瞳孔のコントラストの違いを利用して瞳孔中心の位置を認識する。術中に眼球が偏位し、それに伴い瞳孔中心が偏位すればその偏位を認識し、レーザーの照射位置を変更する³⁾。このアイトラッキングシステムにより、術中サッケード運動を含む眼球運動

〔別刷請求先〕 山田英明：〒602-0841 京都市上京区河原町通広小路ル梶井町 465 京都府立医科大学眼科学教室

Reprint requests : Hideaki Yamada, M.D., Department of Ophthalmology, Kyoto Prefectural University of Medicine, 465 Kajii-cho, Kawaramachi, Hirokoji, Kamigyo-ku, Kyoto 602-0841, JAPAN

を追跡することが可能となり、術中患者の固視に依存することが少なくなった⁴⁾。

今回使用した EC-5000 (NIDEK 社製) のアイトラッキングシステムでは、1 秒間に 60 回瞳孔中心を認識し、1 mm の位置の変化を約 90 msec で補正する⁵⁾。これにより、エキシマレーザー屈折矯正手術における術中眼球運動による偏心照射が減少し、より正確なレーザー照射が可能になったと考えられる。しかしこれまでにアイトラッキングシステム使用の有無によりその効果を検討した報告は少ない^{3,6)}。そこで今回筆者らは、LASIK 術中の眼球運動を赤外線カメラで記録することにより術中の瞳孔中心偏位量を測定し、この偏位量と術後 3 カ月までの成績を比較することによりアイトラッキングシステムの効果を検討した。

I 対象および方法

対象はバプテスト眼科クリニックにおいて平成 14 年 3 月 8 日から平成 14 年 4 月 19 日までの期間に LASIK を施行し、術後 3 カ月以上経過観察が可能であった 11 例 22 眼 (男性 10 例 20 眼, 女性 1 例 2 眼) である。平均年齢は 39.5 ± 6.8 (平均士標準偏差) (29~54) 歳であった。エキシマレーザー装置は EC-5000 を、マイクロケラトームは MK-2000 (NIDEK 社製) を使用した。これらの症例に対して、ランダムに片眼にはアイトラッキングシステムを使用して手術を施行し、もう片眼にはアイトラッキングシステムを使用せずに手術を施

表 1 術前の屈折度数

	A 群	B 群	p 値
球面度数 (D)	-5.48 ± 2.58	-5.02 ± 2.33	0.27
範囲	-1.00 ~ -11.25	-1.50 ~ -9.75	
円柱度数 (D)	-0.84 ± 0.44	-0.84 ± 0.43	1.00
範囲	0.00 ~ -1.50	0.00 ~ -1.75	
等価球面度数 (D)	-5.90 ± 2.68	-5.44 ± 2.41	0.27
範囲	-1.38 ~ -11.88	-1.88 ~ -10.25	

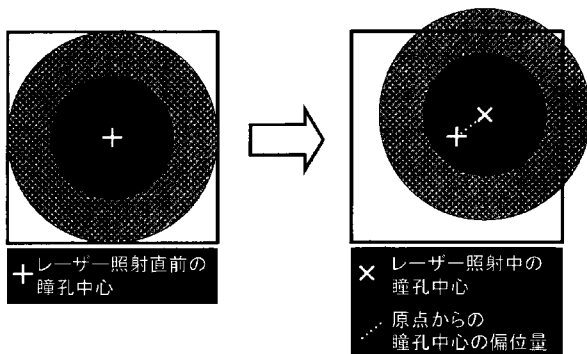


図 1 術中眼球運動の記録の模式図

レーザー照射直前の瞳孔中心を原点とし、レーザー照射中の眼球運動を赤外線カメラで記録した。

行した。アイトラッキングシステムを使用したグループを A 群、使用しなかったグループを B 群と 2 つのグループに分け検討を行った。両群の術前の屈折度数を表 1 に示す。術前の球面度数、円柱度数、等価球面度数にはそれぞれ両群間に差は認められなかった。この両群に対して以下の項目を比較検討した。

1. 術中の瞳孔中心偏位量

レーザー照射直前の瞳孔中心を原点とし、レーザー照射中の眼球運動を赤外線カメラで 1 秒間に 10 回記録した (図 1)。原点からの瞳孔中心の偏位量を測定し、その平均値を比較した。今回、瞳孔中心の偏位量が測定可能であった 8 例 16 眼を対象とした。

2. 矯正精度

術後 1 カ月、3 カ月での等価球面度数から目標屈折度数を差し引いた目標屈折度数からのずれを比較した。

3. 矯正視力

術後 1 カ月、3 カ月での矯正視力を測定し、log MAR に換算して比較した。

4. 高次波面収差

OPD-Scan (NIDEK 社製) を用いて術前、術後 3 カ月での波面収差を測定し、そのうち高次波面収差と coma 収差を瞳孔径 6 mm で比較した。高次波面収差とは、得られた波面を Zernike 多項式で 6 次まで展開し、3 次、4 次、5 次、6 次の項すべてを root mean square (RMS) 表示したものである。Coma 収差は、このうち 3 次の OSA 基準 7 番と 8 番の coma 収差のみを RMS 表示したものである。今回、5% 塩酸フェニレフリン点眼後、両眼ともに瞳孔径 6 mm 以上の状態で測定可能であった症例のみを対象とした。

5. 照射中心と瞳孔中心との偏位量

OPD-Scan を用いて術後 1 カ月で測定した角膜形状を instantaneous map で表示し、角膜屈折度数が局所的に急峻に変化する境界を照射径とした。この照射径の中心と瞳孔中心との距離を実測し比較した³⁾。今回、OPD-Scan にて瞳孔中心が測定可能であった 9 例 18 眼を対象とした。

6. コントラスト感度

CSV-1000 (VECTOR VISION 社製) を用いて術後 3 カ月でのコントラスト感度を測定し、対数値に換算して検討した^{7,8)}。

7. Surface regularity index (SRI)

TMS-2 (TOMEY 社製) にて術後 1 カ月、3 カ月での角膜形状を測定し SRI を検討した。いずれの比較も対応のある *t* 検定を用い、有効水準 ($p < 0.05$) で判定した。

II 結 果

1. 術中の瞳孔中心偏位量

原点からの瞳孔中心の偏位量をプロットした 1 例を図 2 に

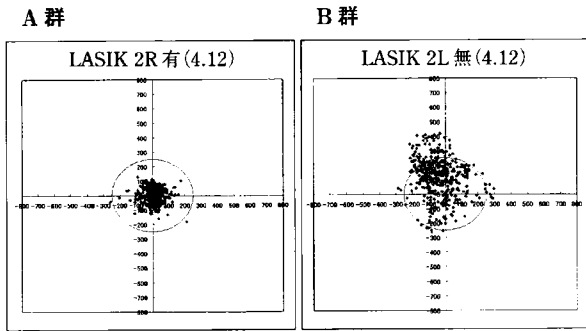


図2 原点からの瞳孔中心の偏位置

レーザー照射中の原点からの瞳孔中心の偏位置をプロットした。

表2 矯正精度, 矯正視力

矯正精度 (D)			
	A 群	B 群	p 値
術後1カ月 範囲	-0.14 ± 0.29 -1.00 ~ 0.00	-0.20 ± 0.32 -1.00 ~ +0.25	0.34
術後3カ月 範囲	-0.27 ± 0.47 -1.50 ~ -0.25	-0.23 ± 0.46 -1.50 ~ +0.25	0.55
矯正視力 (log MAR)			
	A 群	B 群	p 値
術後1カ月 範囲	-0.16 ± 0.04 -0.18 ~ -0.08	-0.15 ± 0.04 -0.18 ~ -0.08	0.34
術後3カ月 範囲	-0.16 ± 0.08 -0.30 ~ -0.08	-0.17 ± 0.06 -0.30 ~ -0.08	0.78

示す。A群の術中の瞳孔中心偏位置の平均は 65.5 ± 22.5 ($43 \sim 115$) μm , B群では 188.5 ± 40.1 ($136 \sim 253$) μm であった(図3)。両群間に有意差が認められた ($p < 0.001$)。

2. 矯正精度 (表2)

術後1カ月, 3カ月ともに両群間に有意差は認められなかった(術後1カ月: $p = 0.34$, 術後3カ月: $p = 0.55$)。

3. 矯正視力 (表2)

術後1カ月, 3カ月ともに両群間に有意差は認められなかった(術後1カ月: $p = 0.34$, 術後3カ月: $p = 0.78$)。

4. 高次波面収差 (図4, 5)

高次波面収差は術前, 術後3カ月ともに両群間に有意差は認められなかった(術前: $p = 0.76$, 術後3カ月: $p = 0.77$)。術前後ともに測定可能であった4例8眼について高次波面収差の増加量を比較したところA群では 0.345 ± 0.120 RMS error (μm), B群では 0.208 ± 0.079 RMS error (μm) であり, 両群間に有意差は認められなかった ($p = 0.30$)。

Coma 収差についても術前, 術後3カ月ともに両群間に有意差は認められなかった(術前: $p = 0.23$, 術後3カ月: $p = 0.84$)。高次波面収差と同様に術前後ともに測定可能であ

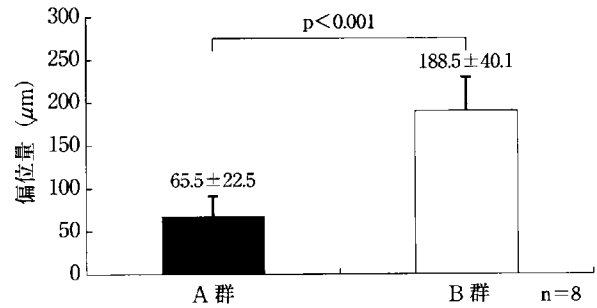


図3 術中の瞳孔中心偏位置

原点からの瞳孔中心の偏位置を測定しその平均値を比較した。両群間に有意差が認められた ($p < 0.001$)。

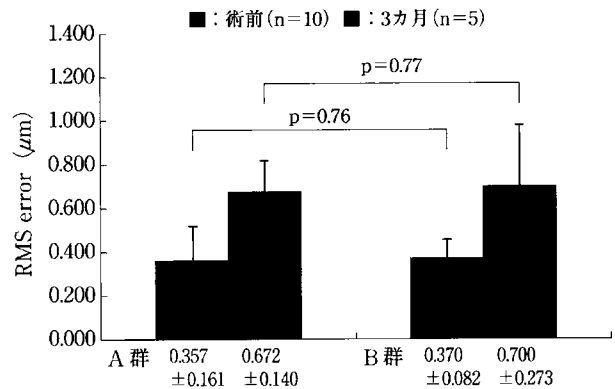


図4 高次波面収差

術前, 術後3カ月での高次波面収差を比較したが, 両群間に有意差は認められなかった。高次波面収差の術後増加量にも両群間に有意差は認められなかった。

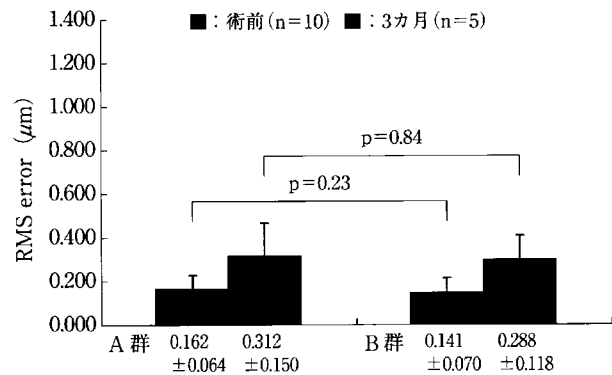


図5 Coma 収差

術前, 術後3カ月でのcoma 収差を比較したが, 両群間に有意差は認められなかった。Coma 収差の術後増加量にも両群間に有意差は認められなかった。

た症例についてcoma 収差の増加量を比較したところA群では 0.159 ± 0.162 RMS error (μm), B群では 0.120 ± 0.101 RMS error (μm) であり, 両群間に有意差は認められなかった ($p = 0.79$)。

5. 照射中心と瞳孔中心との偏位置

A群では 0.38 ± 0.29 ($0.14 \sim 1.15$) mm, B群では $0.35 \pm$

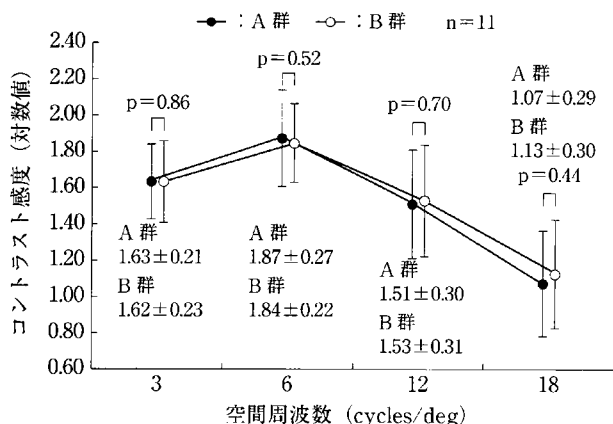


図6 コントラスト感度

術後3カ月でのコントラスト感度を比較した。各空間周波数の両群間に有意差は認められなかった。

0.37 (0.00~1.15) mmであった。両群間に有意差は認められなかった ($p=0.66$)。

6. コントラスト感度 (図6)

空間周波数3, 6, 12, 18 cpdそれぞれのコントラスト感度において両群間に有意差は認められなかった (3 cpd : $p=0.86$, 6 cpd : $p=0.52$, 12cpd : $p=0.70$, 18 cpd : $p=0.44$)。

7. SRI

術後1カ月のSRIは、A群では 0.73 ± 0.39 (0.24~1.74)、B群では 0.53 ± 0.32 (0.25~1.72) であった。術後3カ月のSRIは、A群では 0.75 ± 0.51 (0.09~1.33)、B群では 0.72 ± 0.53 (0.00~1.93) であった。術後1カ月、3カ月ともに両群間に有意差は認められなかった (術後1カ月 : $p=0.27$, 術後3カ月 : $p=0.91$)。

III 考 按

エキシマレーザー屈折矯正手術においてレーザー照射域のセンタリングは重要であり、現在照射中心は瞳孔中心にするべきであると考えられている⁹⁾。レーザーの偏心照射によって、グレアの増加、矯正視力の低下、コントラスト感度の低下など術後視機能に障害をひき起こす可能性がある^{9,10)}。アイトラッキングシステムを使用することにより、理論的には偏心照射を減少させ、より正確なセンタリングが可能であると考えられる。今回筆者らはレーザー照射中の眼球運動を赤外線カメラで記録することにより、術中の瞳孔中心偏位量を測定し、アイトラッキングシステムの有無によりその偏位量に差があるかどうかを検討した。その結果アイトラッキングシステムを使用した場合の術中の瞳孔中心偏位量は使用しなかった場合に比べて有意に減少していた。このことからアイトラッキングシステムを使用することによってより正確なセンタリングが可能であり、偏心照射による術後不正乱視の発

生頻度は減少するものと考えられた。

角膜形状解析の結果から測定した照射中心と瞳孔中心との偏位量はアイトラッキングシステムの使用の有無により有意差は認められなかった。これまでに報告されている角膜形状解析の結果から測定した照射中心と瞳孔中心との偏位量と比較してみると、PRK (photorefractive keratectomy) で 0.44 (0.11~1.09) mm¹¹⁾, 0.36 ± 0.25 (0.00~1.50) mm¹²⁾, アイトラッキングシステムを使用したPRK, LASIKでそれぞれ 0.33 ± 0.32 mm, 0.35 ± 0.26 mm¹³⁾, LASIKでアイトラッキングシステムを使用した場合 0.55 ± 0.30 (0.10~1.40) mm, 使用しなかった場合 0.43 ± 0.23 (0.10~1.00) mm³⁾ であり、これまでと同等の結果が得られた。照射中心と瞳孔中心との偏位量がどの程度まで許容されるかは不明であるが、0.5 mm以内が望まれ、1.0 mmを超えると矯正視力が低下したとの報告¹⁴⁾, 0.1~0.2 mmは臨床上問題ないが0.5~0.8 mmに及ぶと視機能にきわめて大きな影響を与えるとの報告⁹⁾がある。今回の検討では偏位量が0.5~1.0 mmのものがB群で1眼、1.0 mmを超えたものが両群とも1眼ずつ認められたが、3眼とも裸眼、矯正小数視力はともに1.5と良好な結果が得られた。

コントラスト感度は視力値に比べ見え方の質についてより多くの情報が得られる⁸⁾。今回術後3カ月でのコントラスト感度を比較したが、各空間周波数とも両群間に有意差は認められなかった。照射中心と瞳孔中心との偏位量が0.5 mm以上であった3眼のうちB群で偏位量が0.86 mmであった1眼は3 cpdでのコントラスト感度が1.17であったが、その他の空間周波数では平均値に比べ著明な低下は認められず、他の2眼についても各空間周波数でコントラスト感度の著明な低下は認められなかった。しかしこの1眼は反対眼の偏位量が0.43 mmで3 cpdでのコントラスト感度が1.17であり左右差は認められなかった。SRIは角膜中心部付近の角膜屈折力の経線方向の変動を測定し定量化した角膜形状指数で、矯正視力と相関している¹⁵⁾。SRIが大きいほど角膜中央部の形状が不正であることを示し、矯正視力は不良となる¹⁶⁾。今回、術後1カ月、3カ月でのSRI、矯正視力を比較したが、両群間に有意差は認められなかった。照射中心と瞳孔中心との偏位量が0.5 mm以上であった3眼についてもSRIの著明な上昇は認められず、平均値との差は -0.09 ± 0.27 (-0.37~0.24) であった。アイトラッキングシステムの使用の有無によりコントラスト感度、SRI、矯正視力に差が認められなかったのは、アイトラッキングシステムを使用しなくても術中の偏心照射による臨床上問題となるような不正乱視が認められなかったためと考えられた。

エキシマレーザー屈折矯正手術は2次収差までを矯正する方法であり、3次収差以上の高次波面収差を増加させる¹⁷⁾。今回術前、術後3カ月での波面収差を測定し、そのうち高次

波面収差と coma 収差を比較した。高次波面収差, coma 収差の平均値はともに術後増加していたが, アイトラッキングシステム使用の有無により有意差は認められなかった。またアイトラッキングシステムを使用することでエキシマレーザー屈折矯正手術後に coma 様収差, 球面収差の増加量が有意に減少したとの報告⁶⁾がある。今回の検討では術前後で高次波面収差と coma 収差の増加量を比較したが, それぞれの増加量にアイトラッキングシステム使用の有無による有意差は認められなかった。これは術前後両眼ともに瞳孔径 6 mm 以上の状態で波面収差が測定可能であった症例数が 4 例 8 眼と少なかったが, コントラスト感度, SRI, 矯正視力に差が認められなかったことと同様に, アイトラッキングシステムを使用しなくても臨床上問題となるような不正乱視が認められなかったためではないかと考えられた。

今回アイトラッキングシステムを使用することにより, 術中の瞳孔中心偏位量が有意に減少したが, 術後成績は両群間に有意差を認めず非常に良好であった。アイトラッキングシステム使用の有無にかかわらず手術成績はほぼ同等のものが得られるが, アイトラッキングシステムを使用することで術中の瞳孔中心偏位量は減少し, 術者のセンタリングに要する負担は軽減されることは確かである。したがって今後 LASIK においてもアイトラッキングシステムは普及するものと考えられた。また今回の検討では赤外線カメラでの記録がレーザー照射と同期しておらず, 術中レーザーの照射中心と瞳孔中心との偏位量を測定しているわけではないため, 今後レーザー照射時の瞳孔中心偏位量をより正確に測定する必要があると考えられた。

文 献

- 1) Pallikaris IG, Papatzanak ME, Stathi EZ et al : Laser in situ keratomileusis. *Laser Surg Med* 10 : 463-468, 1990
- 2) 前田直之 : 屈折手術のための角膜形状解析. *眼科手術* 10 : 481-486, 1997
- 3) Pineres OE : Tracker-assisted versus manual ablation zone centration in laser in situ keratomileusis for myopia and astigmatism. *J Refract Surg* 18 : 37-42, 2002

- 4) Pallikaris IG, Koufala KI, Siganos DS, Papadaki TG, Katsanevaki VJ, McDonald MB : Photorefractive keratectomy with a small spot laser and tracker. *J Refract Surg* 15 : 137-144, 1999
- 5) 稗田 牧 : 次世代のエキシマレーザー. *あたらしい眼科* 18 : 1369-1374, 2001
- 6) Mrochen M, Eldine MS, Kaemmerer M, Seiler T, Hutz W : Improvement in photorefractive corneal laser surgery results using an active eye-tracking system. *J Cataract Refract Surg* 27 : 1000-1006, 2001
- 7) Pomerance GN, Evans DW : Test-retest reliability of the CSV-1000 contrast test and its relationship to glaucoma therapy. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 35 : 3357-3361, 1994
- 8) 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
- 9) 魚里 博 : 屈折手術における中心軸決定法. *眼科手術* 10 : 487-504, 1997
- 10) Pande M, Hillman JS : Optical zone centration in keratorefractive surgery. *Ophthalmology* 100 : 1230-1237, 1993
- 11) Cavanaugh TB, Durrie DS, Riedel SM, Hunkeler JD, Leshner MP : Centration of excimer laser photorefractive keratectomy relative to the pupil. *J Cataract Refract Surg* 19 : 144-148, 1993
- 12) Lin DTC, Sutton HF, Berman M : Corneal topography following excimer photorefractive keratectomy for myopia. *J Cataract Refract Surg* 19 : 149-154, 1993
- 13) Tsai YY, Lin JM : Ablation centration after active eye-tracker-assisted photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis. *J Cataract Refract Surg* 26 : 28-34, 2000
- 14) Cavanaugh TB, Durrie DS, Riedel SM, Hunkeler JD, Leshner MP : Topographical analysis of the centration of excimer laser photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 19 : 136-143, 1993
- 15) Wilson SE, Klyce SD : Quantitative descriptors of corneal topography. *Arch Ophthalmol* 109 : 349-353, 1991
- 16) 前田直之 : 屈折矯正手術と角膜トポグラフィ. *眼科手術* 9 : 297-303, 1996
- 17) Oshika T, Klyce SD, Applebgate RA et al : Comparison of corneal wavefront aberrations after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis. *Am J Ophthalmol* 127 : 1-7, 1999

* * *