

## 眼鏡, laser *in situ* keratomileusis, 有水晶体眼内レンズが 空間周波数特性および網膜像倍率に及ぼす影響

神谷 和孝<sup>1)</sup>, 清水 公也<sup>1)</sup>, 川守田拓志<sup>2)</sup>, 魚里 博<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>北里大学医学部眼科学教室, <sup>2)</sup>北里大学医療衛生学部

### 要 約

**目 的:** 屈折矯正方法が空間周波数特性 (modulation transfer function; MTF) および網膜像倍率に及ぼす影響を比較する。

**対象と方法:** 軽度, 中等度, 強度軸性近視眼において後房型有水晶体眼内レンズ (phakic IOL), laser *in situ* keratomileusis (LASIK), 眼鏡により同一矯正を行った場合の MTF を, Gullstrand 眼球モデルを使用し光学追跡法により算出した。同時に網膜像の拡大・縮小効果も評価した。

**結 果:** 軽度, 中等度, 強度軸性近視における phakic IOL による MTF (瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm) は, それぞれ 45, 44, 44% であった。LASIK による MTF は 50, 47, 46%, 眼鏡矯正による MTF は 41, 32, 22% であった。網膜像の倍率変化は phakic IOL による

矯正が最も少なく, 次いで LASIK による矯正, 眼鏡矯正の順であった。強度近視眼ではそれぞれ 1.00, 0.97, 0.88 倍であった。

**結 論:** Phakic IOL と LASIK による矯正では, MTF には明らかな差異を認めなかった。一方, 眼鏡矯正では MTF の低下は顕著であり, その傾向は近視が強くなるほど明らかであった。網膜像倍率は phakic IOL, LASIK, 眼鏡の順で影響を受けにくかった。Phakic IOL や LASIK は光学的に優れた屈折矯正方法と考えられた。(日眼会誌 112: 519—524, 2008)

**キーワード:** 有水晶体眼内レンズ, laser *in situ* keratomileusis, 眼鏡矯正, 空間周波数特性, 網膜像倍率

## Effects of Myopic Correction by Replacement of Spectacles, Laser *In Situ* Keratomileusis, and Phakic Intraocular Lens Implantation on Modulation Transfer Function and Retinal Magnification

Kazutaka Kamiya<sup>1)</sup>, Kimiya Shimizu<sup>1)</sup>, Takushi Kawamorita<sup>2)</sup> and Hiroshi Uozato<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Kitasato University, <sup>2)</sup>School of Allied Health Sciences, Kitasato University

### Abstract

**Purpose:** To compare the modulation transfer function and the retinal magnification after myopic correction by replacement of spectacles, laser *in situ* keratomileusis (LASIK), or phakic intraocular lens (phakic IOL) implantation.

**Materials and Methods:** Using the ray tracing method, we measured the modulation transfer function and the retinal magnification after these myopic corrections in a Gullstrand eye model.

**Results:** The modulation transfer function (3-mm pupil, 100 cycles/mm) after phakic IOL implantation for the correction of low, moderate, and high myopia was 45%, 44%, and 44%, respectively. These same measurements after LASIK were 50%, 47%, and

46%, respectively, and the same measurements after spectacle correction were 41%, 32%, and 21%, respectively. The retinal magnification was least changed by the amount of myopic correction after phakic IOL implantation, more changed by LASIK, and most changed by spectacle correction. Specifically, the improvement in the retinal magnification after phakic IOL implantation, LASIK, and spectacle correction for the correction of high myopia was 1.00, 0.97, and 0.88 times, respectively.

**Conclusions:** There were no significant differences in the modulation transfer function after phakic IOL implantation and LASIK. On the other hand, the modulation transfer function was significantly de-

別刷請求先: 228-8555 相模原市北里 1-15-1 北里大学医学部眼科学教室 神谷 和孝

(平成 19 年 8 月 16 日受付, 平成 19 年 12 月 13 日改訂受理) E-mail: kamiyak-tky@umin.ac.jp

Reprint requests to: Kazutaka Kamiya, M.D. Department of Ophthalmology, Kitasato University School of Medicine, 1-15-1 Kitasato, Sagami-hara, Kanagawa 228-8555, Japan

(Received August 16, 2007 and accepted in revised form December 13, 2007)

creased after spectacle correction, especially when the amount of myopic correction was large. The retinal magnification was least affected by phakic IOL implantation, more affected by LASIK, and most affected by spectacle correction. Phakic IOL implantation and LASIK are considered to be optically excellent correction methods.

Nippon Ganka Gakkai Zasshi (J Jpn Ophthalmol Soc 112 : 519—524, 2008)

Key words : Phakic IOL implantation, Laser *in situ* keratomileusis, Spectacle correction, Modulation transfer function, Retinal magnification

## I 緒 言

屈折矯正手術の主流は laser *in situ* keratomileusis (LASIK) であるが、医原性角膜拡張症の発症リスクを避ける意味で、強度近視や角膜が薄い症例では少なからず制限を受ける。また、本来角膜が備え合わせる優れた光学特性を低下させることも無視できない。それらの欠点を補うべく有水晶体眼内レンズ (phakic intraocular lens : phakic IOL) が開発されたが、高い安全性・有効性<sup>1)~4)</sup>だけでなく術後視機能の優位性が報告されている<sup>5)~12)</sup>。しかしながら、これらの屈折矯正手術が空間周波数特性 (modulation transfer function : MTF) に及ぼす影響については不明である。また、屈折矯正手術後の視機能を考慮するうえで、網膜像の倍率変化も無視することができない。今回著者らは、phakic IOL や LASIK が MTF および網膜像倍率変化に及ぼす影響について、眼鏡矯正と比較検討したので報告する。

## II 対象および方法

Gullstrand 精密眼球モデル (No.1) を対象とした。同モデルの詳細データを表 1 に示す。-3, -6, -9 D をそれぞれ軽度、中等度、強度近視として、軸性近視眼 (軽

度 ; +1.5 mm, 中等度 ; +3.0 mm, 強度 ; +4.5 mm) を仮定した。Phakic IOL, LASIK, 眼鏡の詳細な設定を表 2 に示す。Phakic IOL では後房型である Implantable Collamer Lens (ICL<sup>TM</sup>, STAAR Surgical 社) を想定した。Phakic IOL ではレンズ前面曲率半径を、LASIK では角膜前面曲率半径を、眼鏡では眼鏡後面曲率半径を、それぞれ近視量により可変とした。光線追跡法を用いて、phakic IOL, LASIK, 眼鏡により同一矯正を行った場合の MTF を測定した。光学シミュレーションには ZEMAX<sup>TM</sup> (ZEMAX Instrument 社) を使用し、瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm における MTF 値を算出した。また、同モデルにおける網膜像の拡大・縮小効果は Power Factor と Shape Factor の積により計算した。それぞれ Power Factor, Shape Factor は下記に示すとおり算出した。

$$\text{Power Factor} = \frac{1}{1-hF_v}$$

$h$  : 入射瞳とレンズ後面の距離,  $F_v$  : レンズ後頂点屈折力

$$\text{Shape Factor} = \frac{1}{1-t/nF_l}$$

$t$  : レンズ中心厚,  $n$  : レンズ屈折率,  $F_l$  : レンズ前面

表 1 Gullstrand 精密眼球モデルの各データ

	曲率半径 (mm)	厚さ (mm)	屈折率
角膜前面	7.70	0.50	1.380
角膜裏面	6.80	2.25	1.336
虹彩	—	0.75	1.336
水晶体前面	10.00	3.60	1.413
水晶体裏面	6.00	16.69	1.336
網膜	—	—	—

眼軸長 23.79 mm (軽度近視 ; +1.5 mm, 中等度近視 ; +3.0 mm, 強度近視 ; +4.5 mm)

表 2 各屈折矯正方法による設定条件

屈折矯正方法	曲率半径 (mm)	厚さ (mm)	屈折率
phakic IOL	レンズ前面	可変	1.453
	レンズ裏面	10.00	1.336
LASIK	角膜前面	可変	1.380
	角膜裏面	6.80	1.336
眼鏡	眼鏡前面	1000.00	1.520
	眼鏡裏面	可変	1.000

phakic IOL : 有水晶体眼内レンズ

LASIK : laser *in situ* keratomileusis

屈折力

Ⅲ 結 果

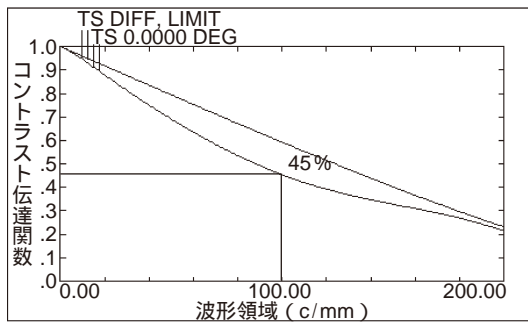
軽度, 中等度, 強度近視における各屈折矯正方法による同一矯正を施行した場合の MTF 曲線をそれぞれ図 1~3 に示す. 軽度, 中等度, 強度近視における phakic IOL による MTF (瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm) は, それぞれ 45, 44, 44% であった. LASIK による MTF は 50, 47, 46%, 眼鏡矯正による MTF は 41, 32, 22% であった. 一方, 網膜像の倍率変化は phakic IOL による矯正が最も少なく, 次いで LASIK による矯正, 眼鏡矯正の順であった(図 4). 軽度近視眼ではそれぞれ 1.00, 0.99, 0.96 倍, 中等度近視ではそれぞれ 1.00, 0.98, 0.92 倍, 強度近視眼ではそれぞれ 1.00, 0.97, 0.88 倍であった. 近視が強くなるほど倍率変化が顕著であった.

Ⅳ 考 按

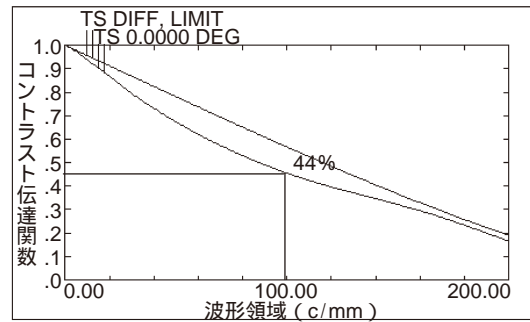
本検討では, phakic IOL と LASIK による屈折矯正後の MTF 曲線は, 近視量が増加しても明らかな低下は認められなかった. また, phakic IOL より LASIK の方がわずかながら MTF 曲線は良好であった. その一方, 眼鏡矯正では近視量に比例して MTF は低下することが明らかとなった. この原因については, LASIK では主に角膜前面の曲率を変更するために, 角膜および水晶体の

二者のみの屈折媒体で光線を収束させるのに対し, 眼鏡矯正では眼鏡, 角膜, 水晶体, また phakic IOL による矯正では角膜, IOL, 水晶体の三者により光線を収束していることが影響していると考えられる. 眼鏡矯正および phakic IOL の比較では, 3つの屈折媒体により光線を収束させている点では共通しているが, 眼鏡では空気(屈折率 1.00)中での矯正に対し, phakic IOL では前房水(屈折率 1.336)中で矯正している. つまり, 光線を収束させる割合が前房水中より空気中の方が大きいため, 眼鏡矯正の方が phakic IOL より MTF が低下したと考えられる.

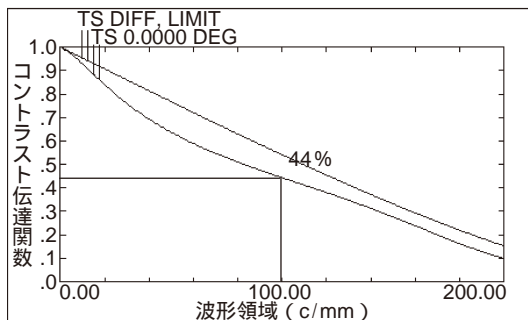
今回の検討はあくまで光学シミュレーションのみ施行したものであり, 臨床結果と必ずしも一致するものではない. まず, 眼球モデルとして Gullstrand 精密眼モデルを使用した, 本来角膜は非球面形状であり, 眼球も屈折媒体の曲率中心が同一直線状には存在しない非共軸光学系である. さらに, LASIK では角膜前面形状のみ可変させているが, 角膜後面形状にも変化が生じる. 加えて, 角膜中央部の切除により, 角膜形状が prolate から oblate shape へと変化することで球面収差が増加する<sup>13)</sup>. また, フラップ作製や照射ずれに起因すると考えられるコマ収差の増加も含め, 高次収差の増加によって視機能に悪影響を及ぼすことが知られている. よって, 実際には臨床上 LASIK 後 MTF が低下している可能性があり, 今後更なる検討が必要である.



軽度近視

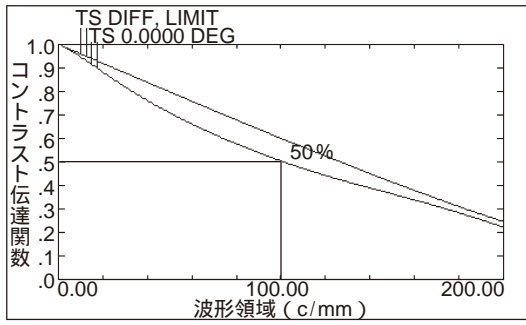


中等度近視

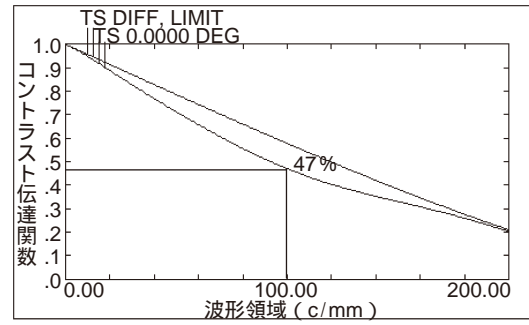


強度近視

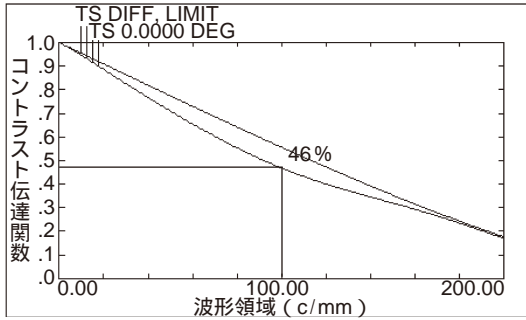
図 1 それぞれの近視における後房型有水晶体眼内レンズ(phakic IOL)挿入後の空間周波数特性(MTF). 近視が強くなっても MTF の低下は軽度であり, 軽度, 中等度, 強度近視における phakic IOL による MTF (瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm) は, それぞれ 45, 44, 44% であった.



軽度近視



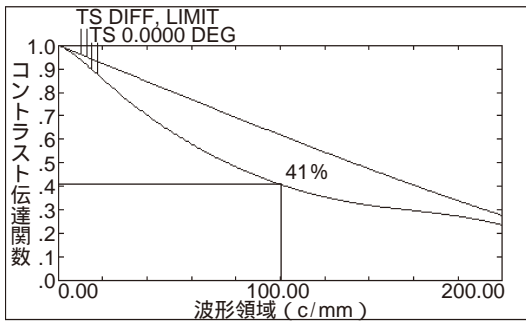
中等度近視



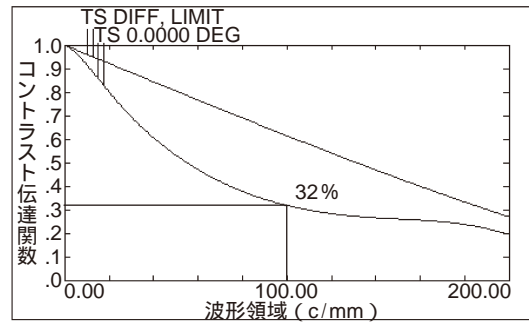
強度近視

図 2 それぞれの近視における LASIK 後の MTF.

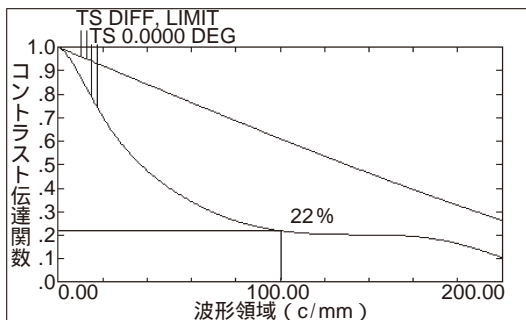
近視が強くなっても MTF の低下は軽度であり、軽度、中等度、強度近視における LASIK による MTF (瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm) は、それぞれ 50, 47, 46% であった。



軽度近視



中等度近視



強度近視

図 3 それぞれの近視における眼鏡矯正後の MTF.

近視が強くなるほど MTF の低下は明らかであり、軽度、中等度、強度近視における眼鏡矯正による MTF (瞳孔径 3 mm, 100 cycles/mm) は、それぞれ 41, 32, 22% であった。

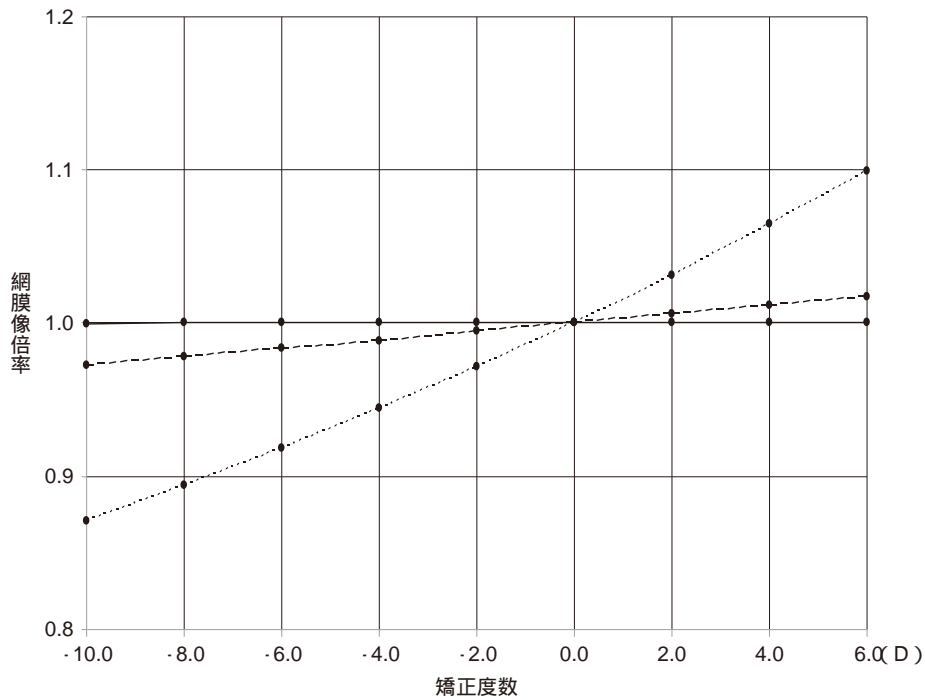


図 4 各屈折矯正方法による網膜像倍率変化.

網膜像の倍率変化は phakic IOL による矯正が最も少なく, 次いで LASIK による矯正, 眼鏡矯正の順であった. 近視が強くなるほどその傾向が顕著であった.

---●---: 眼鏡, --●--: LASIK, —●—: phakic IOL.

また, 軸性近視眼を仮定して MTF を算出したが, 屈折性近視眼においても同様の結果が予測される. 何故なら, Gullstrand 眼球モデルではすべての曲率半径は球面で設定されている. 一般に MTF は収差量に依存することから球面収差が MTF を低下させる要因となるが, phakic IOL, LASIK, 眼鏡矯正によるそれぞれの球面収差量は不変であり, 屈折性近視眼でも同様と考えられる. さらに, 瞳孔径 3 mm として MTF を算出したが, 瞳孔径 5 mm として同設定条件によりシミュレーションを行ったところ, MTF は 10~15% と全体的に低値を示すが, phakic IOL や LASIK は眼鏡に比較して優れており, 近視量が大きくなるほど低下するという同様の傾向が得られた. 瞳孔径が変化しても全体としての傾向は一定であることが推測される.

図 4 に示すとおり網膜像については, phakic IOL, LASIK, 眼鏡矯正の順に変化率が少ない結果となった. その傾向は近視が強くなるほど顕著であった. phakic IOL は瞳孔に最も近い部位での矯正であり, 網膜像の倍率変化が事実上無視しうる, 理論上光学的に優れた矯正方法の一つと考えられた. このことは phakic IOL で強い乱視を矯正しても, 経線方向による像倍率の相違が伴わないため, 像の歪み(歪曲収差)が生じない利点でもある.

一般に, 網膜像の拡大率が 1.2589 倍となると  $0.1 \log$

MAR (minimum angle of resolution) 単位で 1 段階の視力が向上する. つまり, 強度近視眼では, phakic IOL で 0.5 段階 (2.5 文字), LASIK で 0.4 段階 (2 文字) 視力が向上することになる. このことは術前眼鏡矯正視力が 1.0 であった症例が, 理論上 LASIK 術後に視力 1.10 へ, phakic IOL 術後に視力 1.13 へと改善することを意味する. 临床上強度近視眼における phakic IOL 挿入術後, 矯正視力やコントラスト感度の上昇が報告されており<sup>2)5)~11)</sup>, この一因として網膜像の倍率変化による影響が示唆された<sup>14)15)</sup>. その一方, LASIK では, 矯正視力やコントラスト感度は不変ないしは軽度低下という報告が多く<sup>7)10)11)16)</sup>, 網膜像の倍率変化による改善効果を, 先述した高次収差の増加により相殺している可能性が高い. LASIK の安全性・有効性を考えるうえで, 高次収差の増加を抑制することの重要性が示唆された.

以上, 今回の検討では, phakic IOL と LASIK による矯正では, MTF には明らかな差異を認めなかった. 一方, 眼鏡矯正では MTF の低下が大きく, 近視が強くなるほどその傾向が顕著であった. また, 網膜像倍率は, phakic IOL, LASIK, 眼鏡の順で変化が少なく, 近視が強くなるほど著明であった. phakic IOL や LASIK は, 眼鏡に比較して光学的に優れた屈折矯正方法と考えられた.

## 文 献

- 1) **Sanders DR, Vukich JA, Gaston M** : Implantable Contact Lens in Treatment of Myopia Study Group : U.S. Food and Drug Administration clinical trial of the Implantable Contact Lens for moderate to high myopia. *Ophthalmology* 110 : 255—266, 2003.
- 2) **Sanders DR, Doney K, Poco M** : ICL in Treatment of Myopia Study Group : United states food and drug administration clinical trial of the implantable collamer lens (ICL) for moderate to high myopia : three-year follow-up. *Ophthalmology* 111 : 1683—1692, 2004.
- 3) **Saxena R, Landesz M, Noordzij B, Luyten GP** : Three-year follow-up of the Artisan phakic intraocular lens for hypermetropia. *Ophthalmology* 110 : 1391—1395, 2003.
- 4) **Tahzib NG, Nuijts RM, Wu WY, Budo CJ** : Long-term study of Artisan phakic intraocular lens implantation for the correction of moderate to high myopia : ten-year follow-up results. *Ophthalmology* 114 : 1133—1142, 2007.
- 5) **Jimenez-Alfaro I, Gomez-Telleria G, Bueno JL, Puy P** : Contrast sensitivity after posterior chamber phakic intraocular lens implantation for high myopia. *J Refract Surg* 17 : 641—645, 2001.
- 6) **Malecaze FJ, Hulin H, Bierer P, Fournie P, Grandjean H, Thalamas C, et al** : A randomized paired eye comparison of two techniques for treating moderately high myopia : LASIK and artisan phakic lens. *Ophthalmology* 109 : 1622—1630, 2002.
- 7) **Sanders DR, Vukich JA** : Comparison of implantable contact lens and laser assisted *in situ* keratomileusis for moderate to high myopia. *Cornea* 22 : 324—331, 2003.
- 8) **Hruba H, Vlkova E, Horackova M, Svacinova J** : Comparison of clinical results between LASIK method and ICL implantation in high myopia. *Cesk Slov Oftalmol* 60 : 180—191, 2004.
- 9) **Lombardo AJ, Hardten DR, McCulloch AG, Demarchi JL, Davis EA, Lindstrom RL** : Changes in contrast sensitivity after Artisan lens implantation for high myopia. *Ophthalmology* 112 : 278—285, 2005.
- 10) **Sanders D, Vukich JA** : Comparison of implantable collamer lens (ICL) and laser-assisted *in situ* keratomileusis (LASIK) for low myopia. *Cornea* 25 : 1139—1146, 2006.
- 11) **Sanders DR** : Matched population comparison of the visian implantable collamer lens and standard LASIK for myopia of 3.00 to 7.88 diopters. *J Refract Surg* 23 : 537—553, 2007.
- 12) **Chung SH, Lee SJ, Lee HK, Seo KY, Kim EK** : Changes in higher order aberrations and contrast sensitivity after implantation of a phakic artisan intraocular lens. *Ophthalmologica* 221 : 167—172, 2007.
- 13) **Hersh PS, Fry K, Blaker JW** : Spherical aberration after laser *in situ* keratomileusis and photorefractive keratectomy. Clinical results and theoretical models of etiology. *J Cataract Refract Surg* 29 : 2096—2104, 2003.
- 14) **Applegate RA, Howland HC** : Magnification and visual acuity in refractive surgery. *Arch Ophthalmol* 111 : 1335—1342, 1993.
- 15) **Garcia M, Gonzalez C, Pascual I, Fimia A** : Magnification and visual acuity in highly myopic phakic eyes corrected with an anterior chamber intraocular lens versus by other methods. *J Cataract Refract Surg* 22 : 1416—1422, 1996.
- 16) **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* 45 : 3986—3990, 2004.