

## 光線追跡式による光学的角膜表層切除術術後眼の 眼内レンズパワー決定法の考案

石川 隆<sup>1)</sup>, 平野 東<sup>2)</sup>, 村井 恵子<sup>2)</sup>, 熊谷 麻美<sup>2)</sup>, 中安 清夫<sup>2)</sup>, 金井 淳<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>順天堂大学医学部附属浦安病院眼科, <sup>2)</sup>順天堂大学医学部眼科学教室

### 要 約

**目 的:** 屈折矯正手術後の眼内レンズ(IOL)挿入術では術後遠視が問題になっている。我々は屈折矯正手術にも適応できる光線追跡式の前段階として、光線追跡式による IOL 計算式を考案し、IOL 挿入眼について検討した。さらに、エキシマレーザーによる表層角膜切除術(PRK)術後の白内障患者に対して、この計算式で求めたパワーを計算し、目標屈折値との差について検討した。

**方 法:** 白内障患者でアルコン社製フォールダブル IOL(MA 60 BM)が超音波乳化吸引手術で嚢内固定され、2 か月以上観察された 26 人 32 眼で、全例、術前に SRK-II 式計算値の IOL パワーを挿入された。光線追跡式により、術後の屈折誤差を算出し、この値を SRK-II 式での術後屈折誤差と比較、さらに、米国で両眼の近視に対する PRK を受けた白内障患者の IOL 挿入後の屈折値についても検討した。

**結 果:** SRK-II 式では目標屈折値から、遠視になる症例が 32 眼中 24 眼(75%)でみられ、この 24 眼の遠視化した症例の平均は $+1.52 \pm 1.02$ (平均値 $\pm$ 標準誤差)D であった。術後屈折誤差の絶対値の平均は SRK-II 式

1.32 D、光線追跡式(Ray 1)0.95 D、光線追跡式(Ray 2)0.89 D となった。前房深度(角膜前面から水晶体前面に換算)についてみると、白内障術前平均 3.11 mm、術後 3.88 mm と術前より深くなった。レンズ付随した予測前房深度は 4.71 mm、Olsen の予測前房深度の式では 4.69 mm となり、この二者はかなり近い値となった。また、PRK を受けた白内障患者の術後屈折値(目標 $-0.5$  D)は球面度数で、自覚的には右眼 $-1.00$  D、左眼 $-1.00$  D、他覚的には M レフ値で右眼 $-0.50$  D、左眼 $-0.25$  D となり、ほぼ満足した結果を得た。

**結 論:** IOL(MA 60 BM)のパワー決定に光線追跡式を検討した。Olsen の予測前房深度を利用した IOL パワーは、SRK-II 式での計算された値よりも、術後屈折誤差が約 0.43 D 減少した。屈折矯正手術後の IOL パワーの計算にもこの光線追跡式は有用であると思われる。(日眼会誌 104:165—169, 2000)

**キーワード:** SRK-II 式, 眼内レンズパワー, PRK, 光線追跡式, 予測前房深度

## Intraocular Lens Calculation for Cataract Treated with Photorefractive Keratectomy Using Ray Tracing Method

Takashi Ishikawa<sup>1)</sup>, Azuma Hirano<sup>2)</sup>, Keiko Murai<sup>2)</sup>, Mami Kumagai<sup>2)</sup>,  
Kiyoo Nakayasu<sup>2)</sup> and Atsushi Kanai<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Ophthalmology, Juntendo University, Urayasu Hospital

<sup>2)</sup>Department of Ophthalmology, Juntendo University, School of Medicine

### Abstract

**Purpose:** Conventional methods (such as the SRK-II formula) do not accurately calculate the power of the intraocular lens (IOL) after refractive surgery. Therefore, we compared a new formula including a ray tracing method to the conventional method for foldable IOL lens implantation.

**Method:** Foldable IOLs (MA 60 BM) were implanted in 26 patients (32 eyes) using the phakoemulsification technique. The power of the IOL was measured preoperatively using the SRK-II formula in all cases. From the results of postoperative refractive errors of these cases, the power of IOL calculated by the ray tracing method was compared to the SRK-II formula. Cataract patients first treated with photorefractive keratectomy (PRK) received IOL implants using our ray tracing method and their postoperative refraction was measured.

**Results:** The average postoperative refractive error was 1.32 D in SRK-II formula, 0.95 D in the ray tracing method with Ray 1 used and 0.89 D with Ray 2 used. Postoperative refraction of both eyes first treated with PRK was $-1.00$  D.

**Conclusion:** The average postoperative refractive error was reduced in the ray tracing method using Olsen's predicted ACD (Ray 2) compared to SRK-II formula. This new tracing method appears to be useful for determination of IOL power and it may be applied for IOL calculation for cataract surgery after refractive surgery. (J Jpn Ophthalmol Soc 104: 165—169, 2000)

**Key words:** SRK-II formula, IOL implantation, PRK, Ray tracing, Predicted anterior chamber depth

別刷請求先: 113-8431 東京都文京区本郷 3-1-3 順天堂大学医学部眼科学教室 石川 隆

(平成 11 年 7 月 2 日受付, 平成 11 年 9 月 16 日改訂受理)

Reprint requests to: Takashi Ishikawa, M.D. Department of Ophthalmology, Juntendo University, School of Medicine, 3-1-3 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8431, Japan

(Received July 2, 1999 and accepted in revised form September 16, 1999)



I 緒 言

屈折矯正手術後の眼内レンズ (IOL) のパワーの決定は大変難しい問題を含んでいる。その一つは、術後遠視化の問題である。Photorefractive keratectomy (PRK) 後の IOL 挿入術で、術後遠視化した症例が報告<sup>1)</sup>されている。現在の方法は、Binkhorst や Holladay に代表される理論式と Sanders, Retzlaff, Kraff (SRK-II, SRK-T) のような回帰式がある。しかし、いずれも屈折矯正手術後の IOL のパワーの決定では満足する結果を与えることはできない。この問題を解決可能にするものは光線追跡式しかないと思われるが、コンピュータによる煩雑な計算式によらねばならない問題がある。新しいソフトを作り、臨床機器に導入し、誰もが簡単に IOL パワーを計算できるようにならなければ実用化はない。コンピュータを利用し、IOL パワーを計算した報告<sup>2)3)</sup>はいくつかある。また、我々は前回、IOL (凸平レンズ) に対する光線追跡式を検討し報告<sup>4)</sup>した。今回、小切開用 IOL (両凸レンズ) の光線追跡式を考案し、得られた IOL パワーが SRK-II 式のものと比較し、どちらが正確かを実際の症例で検討した。さらに、エキシマレーザーによる PRK 術後の白内障に対する IOL パワーを新しい方法で決定し、実際に眼内に挿入し、術後屈折誤差の検討を行ったので報告する。

II 方 法

1. 光線追跡式

方法は、眼光学系ではほとんどが頂点屈折力を用いているため、近軸光線式として古くから使われている Abbe のゼロ不変量法、または屈折面入射高と光軸に対する傾斜角を用いる方法 (以下、HA 法) を使用した。つまり、Gullstrand 模型眼の角膜のデータである角膜前面曲率半径 (R 1) 7.7 mm、角膜後面曲率半径 (R 2) 6.8 mm、角膜厚 (T) 0.5 mm を基本値として、R 1 が変化したと

き、これらの相互の比を保つように T, R 2 を計算する。R 2 6.8×R 1/7.7, T=0.5×R 1/7.7 となる。コンピュータには IOL の前後面曲率半径、レンズ厚、屈折率、パワーをあらかじめ登録しておき、PRK 術前 R 1、眼軸長、白内障術前前房深度の患者のデータを打ち込むことにより IOL パワーを自動計算できるようになっている。屈折率は、空気 1.00、角膜 1.376、前房水および硝子体 1.336、IOL 1.5542 (37℃, 550 nm) である。

2. PRK を受けていない白内障患者に対する新しい光線追跡式の検討

対象は、超音波乳化吸引手術でアルコン社製フォールダブル IOL (MA 60 BM) を囊内固定され、2 か月以上観察された 26 人 32 眼である。IOL パワーは、術前に SRK-II 計算式により決定されて眼内に挿入され、この結果を光線追跡式で算出された IOL パワーと比較検討した。前房深度 (ACD) に関しては、レンズ付随の予測 ACD (Ray 1)、Olsen 式の予測 ACD (Ray 2) の 2 通りで検討した。著者らの計算式での ACD は角膜後面から水晶体 (または IOL) 前面である。ACD は Ray 1 は  $5.25 - 0.5 \times K \cdot H1$ , Ray 2 は Olsen の式<sup>5)</sup>を利用し、 $5.25 - 0.5 \times K \cdot H1 + 0.25 \times ACD2 + 0.12 \times AXL - 3.56$  を使用した。H 1 は IOL の前面から第一主点までの距離、K は R 1/7.7, AXL は眼軸長、ACD 2 は術前の ACD である。

3. PRK 術後 IOL パワー計算

症例は 47 歳、女性、2 年前、米国で両眼近視矯正手術を受け、両眼核性白内障で視力障害のため当科に紹介された。表 1 に患者データを示す。PRK を施行してある患者に対しては、前述した光線追跡式を多少変形して用いることが必要である。まず、第一に PRK 前の眼鏡での自覚的屈折度数を角膜前面上での屈折に換算し、角膜との合成パワーを計算、さらに、これに対応する曲率半径を計算 (RN) する。さらに、 $RC = RN - DT \cdot (376/1376)$ ,  $CT = CT - DT$ ,  $AXL = AXL - DT$  となる。ここで、RC は PRK 後

表 1 患者データ

| 右眼            | 角膜表層切除術前                    | 白内障術前                           | 白内障術後 (2 か月後)                     |
|---------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| 屈折矯正          | (1.0× - 7.00 = +1.00A × 90) | 0.04 (0.4× - 7.0 = -1.5A × 180) | (1.0× - 1.00 = cyl - 1.75A × 170) |
| ケラトメータ (D)    | 44.25                       | 40.50                           | 40.50                             |
| 角膜前面曲率半径 (mm) | 7.627                       | 8.31                            | 8.33                              |
| 角膜厚 (CT)      | 0.56                        | 0.538                           | 0.528                             |
| 眼軸長 (AXL)     | 26.17                       | 26.1                            | 25.53                             |
| 前房深度 (mm)     |                             | 3.54                            | 3.38                              |
| 角膜切除量 (mm)    | 0.07                        |                                 |                                   |
| 左眼            | 角膜表層切除術前                    | 白内障術前                           | 白内障術後 (2 か月後)                     |
| 屈折矯正          | (1.0× - 6.50)               | 0.08 (0.5× - 7.0 = 1.25A × 20)  | (0.9× - 1.00 = cyl - 1.00A × 35)  |
| ケラトメータ (D)    | 44.25                       | 40.75                           | 40.50                             |
| 角膜前面曲率半径 (mm) | 7.627                       | 8.28                            | 8.33                              |
| 角膜厚 (CT)      | 0.56                        | 0.538                           | 0.528                             |
| 眼軸長 (AXL)     | 26.13                       | 26.06                           | 25.85                             |
| 前房深度 (mm)     |                             | 3.62                            | 3.24                              |
| 角膜切除量 (mm)    | 0.07                        |                                 |                                   |



の新しい角膜前面曲率半径,DT は PRK による角膜切除  
量,白内障術前 ACD(ACD 2),CT は PRK 後の角膜厚で  
ある.次に PRK 前の眼軸長(AXL)と R 1(RC 1),白内障  
術前 ACD[Olsen の予測 ACD(Ray 2)],目標屈折値をイ  
ンプットする.

III 結 果

1. PRK を受けていない白内障患者に対する新しい光  
線追跡式の場合

術後屈折誤差絶対値の平均は,SRK-II 式が 1.320  
D,Ray 1 が 0.953 D,Ray 2 が 0.888 D となり,Ray 2 では  
SRK-II 式より 0.43 D だけ術後目標屈折値に近似した.  
SRK-II 式では 32 眼中 24 眼(75%)は術後遠視となりば  
らつきも大きかった.Olsen の予測前房式を利用した光  
線追跡式 Ray 2 ではばらつきが少なかった(図 1).これ  
らの測定法による結果を眼軸長との関係でみたものが図  
2 である.SRK-II 式では眼軸長が長くなると遠視化は少  
なくなるが,リグレーションラインの負の傾きは大きく  
なった.Ray 1,Ray 2 では逆に正の傾きとなり,Ray 2 で  
は Ray 1 よりもその傾きは少なかった.つまり,光線追  
跡式を利用した Ray 2 では SRK-II 式によるものより眼  
軸長の影響を受けにくいことを示している.

ACD に関して,レンズ附随の Ray 1,Olsen 式の Ray 2  
の 2 通りで検討し,術後の ACD と比較した.ここで,  
ACD は超音波装置の実測値を尊重し,便宜上角膜前面か  
ら IOL 前面までとした.図 3 に示したように,白内障術  
前は平均で 3.11 mm,術後で 3.88 mm,Ray 1 で 4.71 mm,  
Ray 2 で 4.69 mm であった.白内障術後では術前に比較  
し 0.77 mm 前房が深くなっていた.

2. PRK 術後 IOL パワー計算の場合

新しい光線追跡式を用い,術後の目標球面度数を-0.5  
D とするように設定された IOL パワーは両眼とも +18.5  
D であった.一方,白内障術前のデータのみを利用した  
SRK-II 式では +17.0 D となり,1.5 D の差がみられた.  
PRK を受けた白内障患者で,+18.5 D の IOL 挿入後の

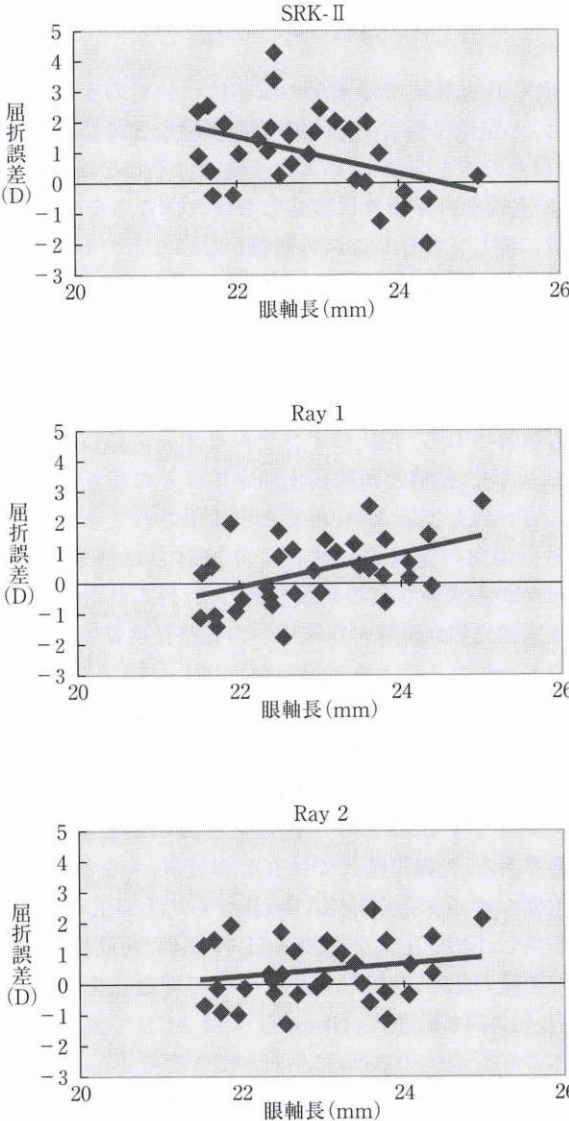


図 2 各計算式における術後屈折誤差と眼軸長の関係.

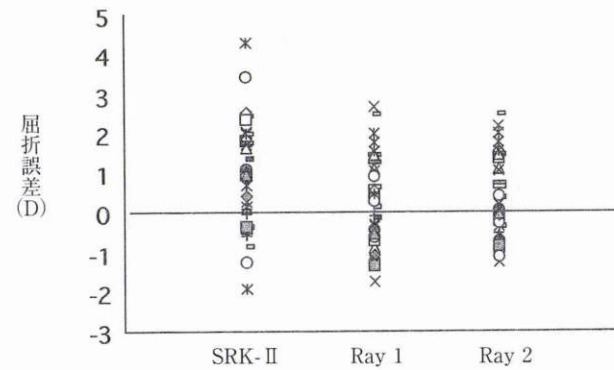


図 1 計算式による術後屈折誤差の比較.  
Ray 1(レンズ付随の予測前房深度を利用した場合),Ray  
2(Olsen の予測前房深度を利用した場合)

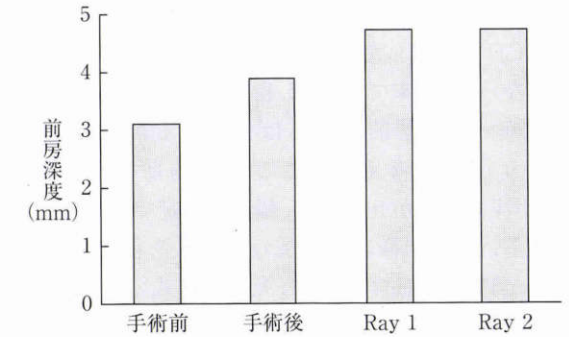


図 3 手術前,後の実際の前房深度と光線追跡式に使用  
した予測前房深度の比較.

術後屈折値は,球面度数で自覚的に,右眼-1.00 D,左眼  
-1.00 D,他覚的には M レフ 値で右眼-0.50 D,左眼-  
0.25 D となり,ほぼ満足のいく結果であった.



#### IV 考 按

SRK-II 計算式では前房の深さについての変数がないこと、A 定数は術者の個々の手術経験などの結果に基づき、自身の値を開発し、術者は経験的にそれぞれのレンズの A 定数を自分なりに設定しなければならないこと、A 定数に関して各社レンズの情報がないなどの不便さがあることなどが問題点となっている。IOL は、挿入位置が変化すれば異なるパワーが必要であることは明らかである。さらに、ケラトメータ値(K 値)はオフサルモメータによって測定されるが、この値は換算表により R1(R mm)にも換算される。各社のオフサルモメータについて比較してみると、K 値と角膜前面曲率半径との相互関係は必ずしも一致していない。古くから使用されてきた入射高と屈折偏角の光線追跡式により検討した結果、ケラトメータから求められる角膜屈折力は、得られた液中の角膜後側頂点焦点距離の空気中への光路長換算値による屈折力と一致することを見出した<sup>4)</sup>。

著者らの計算式では、コンピュータには IOL の前後面曲率半径、レンズ厚、屈折率、パワーがあらかじめ登録されており、R1、術前の ACD、眼軸長を患者データとしてインプットする。この中で問題になるのが術後 ACD の予測である。光線追跡式では IOL の位置、すなわち、ACD が重要なポイントとなる。Retzlaff ら<sup>6)</sup>は SRK-T 計算式を推奨し、SRK-II 式を術後 ACD 予測値、角膜径、硝子体膜—網膜の距離、角膜屈折率について理論式を併用して再検討している。また、Olsen ら<sup>5)7)</sup>は ACD 予測の誤差は全体の屈折誤差の 38% に生じ、ACD を考慮した計算式の必要性を説いている。Olsen ら<sup>5)</sup>、Hoffer ら<sup>8)</sup>は予測 ACD を求める計算式を報告している。今回の我々の結果について、術前に比較し、術後 ACD は深くなることは経験上理解できるが、Olsen 式の予測 ACD は術後 ACD より約 0.8 mm 大きかった。しかし、結果的には術後屈折誤差に関して、術後 ACD を利用した結果から、Olsen 式の予測 ACD を利用した光線追跡式の方が予測屈折値に近い値となった。本来であれば、術後 ACD を利用した光線追跡式が一番理想的であるはずであるが、この理由ははっきりしない。考えられることは、術前に比べ術後の ACD が浅いものが 5 眼あり、超音波測定での正確性が問題である。また、同様に眼軸長の測定誤差も重要である。さらに、角膜後面曲率半径が、光線追跡式では  $6.8 \times R1 / 7.7$  で計算することが問題であるかも知れない。最近、オーブスキャンによる角膜後面屈折力測定が可能になり、これによると角膜後面曲率半径は中心で約 6.0 mm であり、この違いが問題となる可能性もある。また、著者らの方法では、光線追跡式は IOL パワーを最終的に決めているのではない。光線追跡式は術前検査によって決められた角膜前面 R、眼軸長、および先に発表した方法による角膜厚、角膜後面 R を用いて IOL パワーを計算する方

法で、この IOL が予測 ACD の位置に入った場合、すなわち、メーカーの予測 ACD となったとき、全焦点位置がどこになるかの検算、および誤差がでたときのシミュレーション計算のためのものである。つまり、光線追跡式の過程の中で IOL パワーが決定されるということである。今回の Alcon のフォーダブル IOL の場合は初めから検算する方法で、誤差の最も小さいレンズを選出するものであり、この方法が取れたのはこのレンズのデータ配置の規則性にある。ただし、このレンズにおいても予測 ACD は 5.25 であるが、ここでは Olsen の補正式を用いた。その理由は、メーカーによって指示された予測 ACD の値の位置に IOL を置いたとして計算した場合、光線追跡式で確認しても術後の ACD が予測 ACD からずれたり、屈折誤差が様々な値で現れるのは、一般光学系では起きないことが起こるからで、主原因は ACD が予測と術後で違う所にあるためである。予測 ACD は、現在のところメーカー以外では設定できる手がかりがない。それで、とりあえず考えられる補正項による術後データの蓄積と解析から補正項の精度を上げていくようにしたいと思っている。

PRK 術後の IOL パワー決定式は根本的には前記の光線追跡式を使用するが、一部変形する必要がある。眼鏡による屈折矯正値を角膜上での屈折力に換算し、これに角膜前面の屈折力を加えた値で 376 を割ると R1(RN)である。角膜前面曲率半径が同じ位置で RN に変われば焦点位置は変化しない。この値は角膜厚を変えない場合の曲率半径である。しかし、近視の場合、実際にはここで術前の角膜曲率半径との sagittal depth(sag)の差だけ角膜厚を薄くしなければならないので、RC は  $RC = RN \cdot DT \times (376/1376)$  となる。実際に PRK 術後患者の白内障 IOL パワー決定にこの光線追跡式を使用し、術後屈折誤差について検討した結果、予想通り  $\pm 0.5 D$  以内に落ち着き、患者の満足度も高かった。一般に、角膜屈折力は術後 1 年を経てもほとんど変化しないが、PRK では regression のため、2~3% 増加する。角膜厚は PRK 術後 1 年で 2~3% 増加する。このことも十分に考慮した上で、IOL 挿入を検討していかねばならないと思われる。

エキシマレーザー屈折矯正手術は治験を終了し、現在(1999 年)、厚生省の認可を待っている状況にある。治験の症例選択基準では、経過観察中に白内障によるドロップアウトがでないよう症例を選択するようになっており、まだ PRK 術後の白内障患者は稀である。今回の症例は PRK 術後 2 年目に核性白内障を起こしており、その原因についてレーザーとの因果関係も興味があるところである。我々には、この新しい光線追跡式での PRK 術後の IOL パワー決定の実例は 2 眼しかなく、今後、さらに症例数を増やして検討する必要があると思われる。

我々の光線追跡式による IOL パワー決定法は、フォーダブル IOL(MA 60 BM)使用に際し、術後屈折誤差は

SRK-II 計算式によるものよりも、眼軸長の影響を受けにくく、ばらつきも少なく、屈折誤差も 0.43 D 減少したことから十分に使用可能と思われた。屈折矯正パワーの決定に際し、手術後の SRK-II 計算式が作成されたのと同じように、多数の臨床結果に基づく新しい簡易な計算式が開発されればそれに越したことはないであろうが、将来的にも未だ見通しが立っていない。今回、我々が示した結果はより理想的な計算式を確立する一過程であり、屈折矯正手術後の IOL パワー計算にも将来的に十分応用できると思われるが、症例を増やし、さらに検討する予定である。

## 文 献

- 1) Siganos DS, Pallikaris IG, Lambropoulous JE, Koufala CJ: Keratometric readings after photorefractive keratectomy are unreliable for calculation IOL power. J Cataract Refract Surg 12: 278—279, 1996.
- 2) 内尾英一, 工藤成樹, 大野重昭, 草川 徹: パーソナルコンピューターを用いた光線追跡法による眼内レンズ選択システム. IOL & RS 11: 106—110, 1997.
- 3) 柏木豊彦: レンズ位置の回帰式を用いた眼内レンズ度数決定法. 日眼会誌 97: 519—525, 1993.
- 4) 石川 隆, 平野 東, 井上淳子, 中安清夫, 金井 淳, 武内邦彦, 他: 眼内レンズパワーの決定と治療的表層角膜切除術眼での変法. 日眼会誌 102: 594—600, 1998.
- 5) Olsen T, Corydan L, Gimbel H: Intraocular lens power calculation with an improved anterior chamber depth prediction algorithm. J Cataract Refract Surg 21: 313—319, 1995.
- 6) Retzlaff JA, Sanders DR, Kraff CM: Development of the SRK/T intraocular lens implant power calculation formula. J Cataract Refract Surg 16: 333—340, 1990.
- 7) Olsen T, Corydan L, Gimbel H: Intraocular lens power calculation with an improved anterior chamber depth prediction algorithm. J Cataract Refract Surg 21: 313—319, 1995.
- 8) Hoffer KJ: The Hoffer Q formula: A comparison of theoretic and regression formulas. J Cataract Refract Surg 19: 700—712, 1993.