

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

石川 隆¹⁾, 平野 東¹⁾, 井上 淳子¹⁾, 中安 清夫¹⁾

金井 淳¹⁾, 武内 邦彦²⁾, 神田 貴之²⁾

¹⁾順天堂大学医学部眼科学教室, ²⁾成田記念病院眼科

要 約

従来の方法(SRK方式)の見直しとレーザーによる治療的角膜表層切除術(PTK)患者の新しい眼内レンズパワーの計算式について考察する。仮称 Gullstrand series を利用し, 角膜系の焦点位置と網膜位置が互いに共役となるような, 設定位置に置かれた設定厚みの眼内レンズ(IOL)のパワーと曲率半径を決定するものである。今回は planoconvex IOL (凸平レンズ) を主体に述べる。角膜前面曲率半径(R), 眼軸長(AXL), 術後前房設定値(ACD), IOLの厚み(LT)を次の計算式に入力する。一般の白内障手術の場合は, $A_1 = -(VC - ACD)$, $B_1 = AXL - 0.5 * K - ACD - 0.103 LT$, $S = 1/A_1 + 1/B_1$, $K = R/7.7$, $DC = 337.5/R$, $VC = 1,000/DC * 1.336$, A_1 : 角膜前側焦点距離, B_1 : 角膜後側焦点距離, VC : 角膜後側頂点焦点距離, K : 角膜前面曲率半径比例計数, DC : 角膜前面屈折力, 以

上から IOL 液中屈折力(VF) $= 1,000/(1/S) * 1.336$ となる。PTKの症例では白内障術前のケラトメータの値を使用せず, 前述の計算式において R の代わりに $R' = R - dT$, R : PTK 前の角膜曲率半径, dT : 角膜切除量とする。また, 白内障術前の角膜厚 $CT' = CT - dT$, CT : PTK 術前の角膜厚とする。レンズ特有の予測前房深度が正確な IOL を選択する必要があるが, 新しい計算式は一般の白内障手術ばかりでなく, PTK 術後の白内障手術の IOL パワー決定に有用である。(日眼会誌 102: 594-600, 1998)

キーワード: 眼内レンズ, SRK-II, 治療的表層角膜切除術, エキシマレーザー, 光線追跡式

Trial of New Intraocular Lens Power Calculation Following Phototherapeutic Keratectomy

Takashi Ishikawa¹⁾, Azuma Hirano¹⁾, Junko Inoue¹⁾, Kiyoo Nakayasu¹⁾
Atsushi Kanai¹⁾, Kunihiro Takeuchi²⁾ and Takayuki Kanda²⁾

¹⁾Department of Ophthalmology, Juntendo University, School of Medicine

²⁾Department of Ophthalmology, Narita City Hospital

Abstract

We reviewed the SRK-II method and introduce a new equation to calculate the intraocular lens (IOL) power for eyes which underwent laser phototherapeutic keratectomy (PTK). The Gullstrand series was used to determine the power and the radius of curvature of planoconvex IOLs which alter the focal point from the cornea to reach the conjugate point on the retina. The radius of anterior corneal curvature (R), axial length (AXL), predicted postoperative anterior chamber depth (ACD), and lens thickness (LT) were employed in the following formula to calculate the IOL refractive power: $K = R/7.7$, $DC = 337.5/R$, $VC = 1,000/DC * 1.336$ where VC is the posterior vertex focal length. $A_1 = -(VC - ACD)$, $B_1 = AXL - 0.5 * K - ACD - 0.103 LT$, $S = 1/A_1 + 1/B_1$; this determined the diopter (D) of IOL in liquid to be $(D) = 1,000/(1/S) * 1.336$. In eyes which underwent PTK, the kera-

tometric value prior to cataract surgery was not applied. Instead, R' defined as $R - dT$, where R is the radius of corneal curvature prior to PTK and dT the amount of corneal tissue removed, was introduced. Further, the corneal thickness before cataract surgery (CT') was defined as $CT - dT$ where CT is the corneal thickness prior to PTK.

Although it is important to select a lens that has an accurate predicted anterior chamber depth, the new equation appears to be more useful than the SRK-II formula. (J Jpn Ophthalmol Soc 102: 594-600, 1998)

Key words: Intraocular lens(IOL), SRK-II, Laser phototherapeutic keratectomy(PTK), Predicted anterior chamber depth(predicted ACD), Ray Tracing

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9年9月日受付, 平成10年4月8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 September 1, 19 and accepted in revised form April 8, 19)

I 緒 言

最近,日本でもエキシマレーザーによる角膜屈折矯正手術および治療的角膜切除術の治験が終了し,後者は厚生省が認可を承諾した.現在,限られた個人の眼科開業医や眼科以外の開業医によってのみ行われているのが現状である.この術式が認可となれば,日本でも近視手術希望者が増加することは間違いないと思われる.しかし,術後の角膜前面曲率半径の変化に伴い,もしこれらの患者が白内障の手術を受ける際,今まで眼内レンズ(IOL)パワーの決定に用いられてきた計算式(例えばSRK-II)では正確なIOLパワーの決定をすることはできないことが予想される.実際,photorefractive keratectomy (PRK)後のIOL挿入術で,術後遠視化した症例が報告¹⁾されている.また,本邦でもPRK後のIOL挿入術後に遠視化したという発表がみられる(第11回日本眼内レンズ学会抄録,加藤ら).また,我々も phototherapeutic keratectomy (PTK)後に白内障IOL挿入術を施行し,遠視化した症例を経験した.そこで我々はまず第一に,新しいIOLパワーの決定方法を考察し,一般の白内障手術でのIOLパワーを正確に算出できるかどうかを確認するため,少数の症例ではあるが,この方法とSRK-II法から得られたIOLパワーとを比較検討した.第二に,エキシマレーザーによるPTK術後のIOLパワーの決定が,この両者でどちらが正確かを2例ではあるが,経過観察することができたので報告した.

II 方 法

1. Gullstrand series

Gullstrand 模型眼の角膜のデータである角膜前面曲率半径(R1)7.7 mm,角膜後面曲率半径(R2)6.8 mm,角膜厚み(T)0.5 mmを基本値として,R1が変化したとき,これらの相互の比を保つようにT,R2を計算する.これを近軸光線式としてAbbe's zero invariant 法(Abbeのゼロ不変量)を用い,光線追跡を応用する.眼光学系ではほとんどの仕事が頂点屈折力を用いているため,基本式にはAbbeのゼロ不変量の式が最も適している.つまり,角膜前方空気屈折率 $n_1=1$,角膜前面曲率半径R1,角膜後面曲率半径 $R_2=6.8 \times R_1 / 7.7$,角膜厚み $T=0.5 \times R_1 / 7.7$,角膜屈折率 $n_2=1.376$,角膜後方前房水屈折率 $n_3=1.336$,角膜前面からの物体の距離(s1)による像点の距離(s1'),次に,この像点を物点(s2)としたときの角膜後面による新しい像点(s2')を求める.

$$n_1(1/R_1 - 1/s_1) = n_2(1/R_1 - 1/s_1') \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$n_2(1/R_2 - 1/s_2) = n_3(1/R_2 - 1/s_2') \quad \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $s_2=s_1'-T$ となる.ここで,平行光線が入射した場合,像点は焦点を通る.この場合, $s_1=\infty$, s_2' は角膜後側頂点焦点距離(f)となる.(1),(2)式から s_2' つまりfを求め,液中角膜屈折力(VF)= $1,000/f \times 1.336$ によって

VFに変換する.R1を6.5~9.5まで0.2 mmのステップで変化させた時のVFの値を求め,ケラトメータでの角膜屈折力(角膜曲率半径から, $337.5/R_1$ によって便宜上,得られる)と比較すると,わずかに1/1,000 Dの誤差となる.この両者を比較したものが表1である.Gullstrand seriesはケラトメータから得られる角膜屈折力を空気中角膜後側頂点焦点距離に光路長換算して光線追跡を行うことが可能であることを示す根拠となるものである.したがって,これをGullstrand seriesと仮に呼び,本法はこの値を角膜の基本データとする.所²⁾は角膜後面曲率半径測定法を報告しているが,臨床的には実用化していないため,T,R2の測定値がない場合は上記Gullstrand seriesによる値を用いる.

ケラトメータ読み値からの,必要とする角膜の情報は角膜系の焦点位置である.すなわち,前面空気,後面前房水に接した状態における液中の後側頂点焦点距離である.本法はこの角膜後面頂点焦点距離と眼軸長の組み合わせから,角膜系焦点と網膜の2点が共役点となるように,IOLの液中屈折力を決める方法である(図1).また,設定された装着位置に対するIOLのパワー,したがって,設定されたレンズ厚みから眼内レンズの曲率半径も得られる方法である.さらに,得られたレンズパワーとレンズ曲率から光線追跡式にインプットし,最終的光線追跡を行い,また,条件を変えて(例えば前房深度やR2の変化など)シミュレーションを行うことができる.

2. 計算方式

二つの光学系を通して像位置を求めるには,この追跡計算を利用する.まず,第一レンズ系による像位置を求め,次にこの像を物点とした第二レンズ系による像を求める(図1).第一レンズ系,すなわち,角膜系は前が空気,後が $n=1.336$ の前房水である.眼光学系においては,角

表1 Gullstrand series

ケラトメーター		Gullstrand series
曲率半径(R)	角膜屈折力(D)	角膜屈折力(D)
6.5	51.9231	51.9228
6.7	50.3737	50.3729
6.9	48.9130	48.9128
7.1	47.5352	47.5349
7.3	46.2329	46.2326
7.5	45.0000	44.9998
7.7	43.8312	43.8309
7.9	42.7215	42.7213
8.1	41.6667	41.6664
8.3	40.6627	40.6624
8.5	39.7059	39.7057
8.7	38.7931	38.7929
8.9	37.9213	37.9211
9.1	38.0879	37.0877
9.3	36.2903	36.2901
9.5	35.5263	35.5261

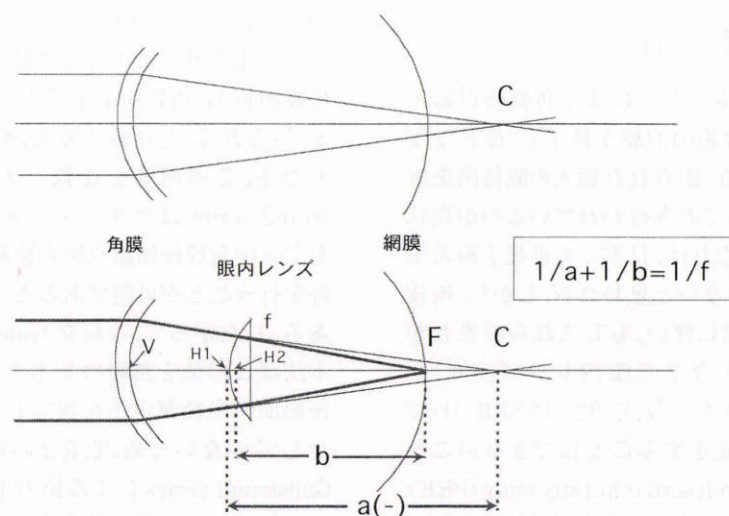


図1 共役点の位置関係について示す。

VCは後側頂点焦点距離を示す。a(-)はaが負であることを意味する。

膜系による像位置は数値如何に拘わらず前房と同じ媒質中にあるとして計算される。つまり、この焦点位置が網膜の外になっても焦点は $n=1.336$ の液中にあると考える。第二レンズ系は水晶体で、前側は前房、後側は硝子体に接し、ともに $n=1.336$ である。IOLの場合、まず、角膜系の焦点位置(C)を求める。この焦点位置と予め設定されたIOLの挿入位置との光学距離を求めて物点距離 a とし、一方、IOLと眼軸長から求めた網膜位置(F)までの距離 b を像距離とし $1/a+1/b=1/f$ の結像の基本式に当てはめる。実際のIOLの計算においてはレンズの肉厚からみて、主点の位置が問題となる。大切なことは a は第一主点(H1)から角膜系の像位置までの距離、 b は第二主点(H2)から網膜までの距離である。凸平レンズの場合、 a, b 式中に示すように第二主点を表すことができる。第一主点は球面頂点にある。共役点法においては先に述べた、レンズの物点と像点の関係式において、 a すなわち、物点距離の誤差はケラトメータ読み値から生じる。また、像位置の誤差は眼軸測定誤差から生じる。これらと挿入誤差、すなわち前房深度の設定値に対する誤差が術後の屈折状態に影響することを考慮する必要がある。

1) 屈折矯正手術を行っていない患者のIOLパワーの決定

(1) 平凸レンズの場合(第一面平面)

$$a = -(VC - ACD - 0.897 \cdot LT)$$

$$b = AXL - 0.5 \cdot K \cdot ACD - LT$$

$$S = 1/a + 1/b, NF = 1/S \text{ これらから}$$

IOL液中屈折力 $VF = 1,000/NF \cdot 1.336$ となる。

角膜後側頂点焦点距離 $(VC) = 1,000/DC \cdot 1.336$, $DC = 337.5/R$, $K = R/7.7$

これらの式に角膜前面曲率半径(R), 眼軸長(AXL)の実測値, IOL特定の前房設定値(ACD)とレンズの厚み(LT)を計算式に入力する。

(2) 凸平レンズの場合(第一面凸面)

$$a = -(VC \cdot ACD)$$

$$b = AXL - 0.5 \cdot K \cdot ACD - LT + 0.897 \cdot LT$$

$$S = 1/a + 1/b, NF = 1/S \text{ これらから}$$

眼内レンズ液中屈折力 $VF = 1,000/NF \cdot 1.336$ となる。

$$VC = 1,000/DC \cdot 1.336, DC = 337.5/R, K = R/7.7$$

これらの式に平凸レンズの場合と同様に、角膜前面曲率半径(R), 眼軸長(AXL)の実測値, 眼内レンズ特定のACDとLTを計算式に入力する。

一般の白内障手術において、IOLを挿入する際にも、我々の新しい計算式は理論的にはSRK-II計算式とほぼ同じ値にならねばならないはずである。これを確かめるためにニデック社製眼内レンズ(NP-74A)とファルマシア社製眼内レンズ(821T)挿入眼で各々10例と少数例ではあるが検討した。実際には、この両者のIOLは両凸レンズであり、今回は凸平レンズでの計算式を使用した場合、SRK-II計算式と比較してどのくらいの最終屈折値の誤差となるかを計算した。

2) PTK後のIOLパワーの決定

PTKの症例では白内障術前のケラトメータの値を使用せず、前述の計算式においてRの代わりに $R' = R - dT$, R: PTK前の角膜曲率半径, dT : 角膜切除量, 白内障術前の角膜厚 $(CT') = CT - dT$, CT: PTK術前の角膜厚(表4), 眼軸長 $(AXL') = PTK \text{ 前の眼軸長}(AXL) - dT$ となる。また、PTK術後のIOLパワーの算出の場合、VCを出すために、入射高と屈折偏角の式を用いる。 $A_0 = 0, B_0 = 100, A_1 = A_0 + B_0 \cdot (N - M_1)/R', B_1 = B_0 - A_1 \cdot CT'/N, A_2 = B_1 + A_1 \cdot (M_2 - N)/R_2, VC = B_1/A_2 \cdot 1.336$, ただし、角膜後面曲率半径 $(R_2) = 6.8 \cdot R/7.7, M_1 = 1.000, N = 1.376, M_2 = 1.336$ である。

各々のIOLには予測前房深度が記されている。この予測前房深度とは、我々が日常臨床で使用している前房の

深さ(角膜後面から水晶体前面)とは異なっていることに注意しなければならない。つまり、IOL の種類によってレンズ付随の予測前房深度のもつ意味が異なっている。ニデック社製眼内レンズ(NP-74 A)では、予測前房深度とは角膜前面から、IOL の第一主点と第二主点の中心までとしている。また、ファルマシア社製眼内レンズ(821 T)では、角膜前面から IOL の前面となっている。さらに、ニデック社製超音波診断装置(A mode)に示される前房深度は角膜前面(正確にはチップの先端)から水晶体(または眼内レンズ)前面までの長さである。このことを十分に理解していないと間違った解釈となる。我々の計算式での前房深度(ACD)は角膜後面から水晶体(または IOL)前面である。

III 結 果

1. 屈折矯正手術を行っていない患者の IOL パワー
ニデック社製眼内レンズ(NP-74 A)挿入眼 10 例(表 2)では、新しい計算式による IOL パワーを挿入した場合、目標屈折値と最終屈折値とのずれは症例 1, 4, 5, 9 で、 -3.58 D 、 -2.50 D 、 -3.97 D 、 -2.35 D となり、SRK-II 計算式より誤差が大きい。そこで、この理由を考察するためにこれらの予測前房深度と術後前房深度を比較してみた(術前、術後前房深度を比較検討するために一時的に前房深度を、角膜前面から水晶体(または眼内レンズ)前面

とした)。この 4 例では、それぞれ 0.96 、 0.485 、 1.16 、 1.00 mm とかなり予測値より浅前房となっていることが判明した。そこで、術前に術後の前房深度がわかっていたと仮定し、新しい計算式にこれらの術後測定値を挿入してシュミレーションしてみると、この 4 症例の最終的な屈折値のずれは -1.90 D 、 -1.19 D 、 -1.01 D 、 -0.27 D となり、SRK-II 計算式の値と類似した。この 10 例をみる限りにおいて、ニデック社製眼内レンズ(NP-74 A)の術後前房深度はバラつきが大きいことがわかる。しかし、すべて最終屈折値はマイナス値になっている。

ファルマシア社製眼内レンズ(821 T)(表 3)では、SRK-II 計算式による目標屈折値と最終屈折値とのずれは、症例 12 を除き 1.17 D 以上となり、術後遠視傾向となることがわかった。新しい計算式によるパワーの IOL を挿入した場合、このずれは症例 11 を除き SRK-II 計算式によるレンズ挿入よりも理想的な結果となった。このレンズはニデックと違い、術後前房深度にバラつきが少なく $4.41\sim 4.65\text{ mm}$ であり、ほぼ予測前房深度 4.60 mm に近似している。症例 16 だけは 3.31 mm と浅くなっており、前述のごとく、新しい計算式にこの値を代用してみると、この症例の最終的な屈折値のずれは 0.99 D であった。

この 2 種の IOL について屈折値のずれを、SRK-II 法、新しい計算式、前房深度矯正後で比較したものが図 2 で

表 2 新しい計算式と SRK-II の術後屈折値のずれと前房深度の関係 ニデックスリーピースレンズ

	症例 1	症例 2	症例 3	症例 4	症例 5	症例 6	症例 7	症例 8	症例 9	症例 10
SRK-II 値(D)	19.95	17.49	16.32	26.1	26.05	18.88	10.9	9.66	22.1	17.86
目標屈折値(D)	-0.88	-0.8	-0.94	-0.75	-0.76	-0.91	-2.6	-2.7	-1.1	-0.74
最終屈折値(D)	-4	-1.25	-2.5	-0.5	-2	-1.25	-3	-3.5	-1.75	-1.26
SRK-II での屈折値のずれ(D)	-3.12	-0.45	1.56	0.25	-1.24	-0.34	-0.4	-0.8	-0.65	-0.52
新しい計算式の IOL パワー(D)	20.41	16.76	16.07	28.85	28.78	16.92	10.13	6.19	23.8	17.25
新しい計算式の屈折値のずれ(D)	-3.58	0.28	-1.31	-2.50	-3.97	-0.38	0.37	0.67	-2.35	0.35
予測前房深度(mm)	4.355	4.41	4.41	4.255	4.255	4.38	4.45	4.47	4.32	4.32
術後前房深度(mm)	3.4	4.66	4.1	3.77	3.1	4.1	3.89	3.76	3.32	3.54
(予測-術後)前房深度(mm)	0.955	-0.25	0.31	0.485	1.155	0.28	0.56	0.71	1	0.78
前房深度矯正後の屈折値のずれ(D)	-1.9	-0.11	-0.88	-1.19	-1.01	0.08	0.81	1.13	-0.27	1.53

IOL：眼内レンズ

表 3 新しい計算式と SRK-II の術後屈折値のずれと前房深度の関係 ファルマシアシングルピースレンズ

	症例 11	症例 12	症例 13	症例 14	症例 15	症例 16	症例 17	症例 18	症例 19	症例 20
SRK-II 値	12.3	12	17	19.9	20.1	22	21.4	19.2	21	19.4
目標屈折値	-1.2	-2.1	-2	-0.9	-1.1	-1.2	-1	-1.1	-0.8	-1
最終屈折値	0	-2.6	-0.5	0.75	0.25	0	0.5	0	0.75	1.5
SRK-II での屈折値のずれ	1.19	-0.5	1.52	1.62	1.37	1.17	1.53	1.06	1.58	2.52
新しい計算式の IOL パワー	12	11.4	17.8	21.3	21.5	24.8	24	20.4	23.2	20.8
新しい計算式の屈折値のずれ	1.49	0.06	0.68	0.24	-0.1	-1.6	-1	-0.1	-0.6	1.17
予測前房深度	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
術後前房深度	4.51	4.54	4.41	4.45	4.45	3.31	4.65	4.1	3.87	3.81
(予測-術後)前房深度	-0	-0	0.09	0.05	0.05	1.19	-0.2	0.4	0.63	0.69
前房深度矯正後の屈折値のずれ(D)	1.48	0.02	0.81	0.24	0	0.99	-1.4	0.65	-0.3	1.6

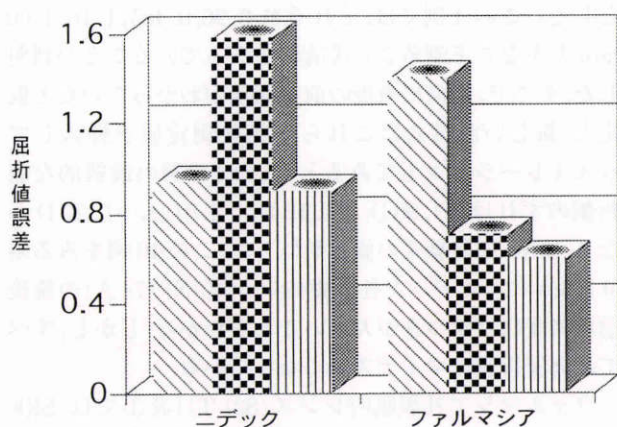


図2 二種眼内レンズ(ニデック, ファルマシア)での最終屈折値のずれ(絶対値)の平均値を, SRK-II法(斜線), 新しい計算式(格子状), 新しい計算式でさらに前房深度矯正した場合(縦線)の三者について比較した。

ある。つまり, 目標屈折値と最終屈折値の差の絶対値を平均して比較したものである。ニデックスリーピースレンズでは, SRK-IIが 0.93 ± 0.87 (平均値 $\pm$ 標準偏差)D, 新しい計算式が 1.57 ± 1.42 D, 前房深度矯正後, 新しい計算式で再計算値は 0.89 ± 0.599 Dであった。また, 新しい計算式ではSRK-IIに比較し有意な差はないものの, 約1.6倍と大きな誤差となった。術後前房深度は予測前房深度と比較すると, 有意に低い値をとっている($p < 0.05$ non paired t-test)。この低下のずれは平均0.65 mmであった。

一方, ファルマシアシングルピースではSRK-II 1.41 ± 0.515 D, 新しい計算式 0.70 ± 0.587 D, 前房深度矯正後, 新しい計算式で再計算値は 0.59 ± 0.749 Dであった。ファルマシアレンズでは, 新しい計算式ではSRK-IIに比較し, 最終的な屈折値のずれは50%と有意に減少した($p < 0.005$ non paired t-test)。また, ファルマシアレンズでは予測前房深度と術後前房深度のずれは少なく, 平均0.33 mmとニデックレンズの1/2であった。このため,

前房深度矯正後の再計算値は新しい計算値とさほど差を認めなかった。

2. 治療的表層角膜切除術(PTK)後のIOLパワー

症例: KS, 73歳男性, 両帯状角膜変性症

平成6年5月初診。視力は右眼光覚(-), 左眼10 cm/nd(矯正不能), 角膜屈折力(K_1 33.50 D, K_2 37.25 D), 平成6年8月左眼PTK施行, 角膜切除量は160 μ m, 術後3か月での左眼視力0.05($0.08 \times +2.00$ D), 平成7年1月左計画的晶体体囊外摘出術+IOL(+13.0 D)挿入術施行(SRK-II式使用), 白内障術前角膜屈折力 K_1 33.50 D, K_2 37.25 D(Ave 35.25 D), 眼軸長29.64 mm, 予測前房深度4.8 mm, 白内障術後9か月での視力は左眼0.3($0.4 \times +2.25$ D $\cap$ cyl-1.50 D Ax 20°), K_1 33.50 D, K_2 35.75 D(Ave 34.62 D)であった。

症例: HT, 78歳男性, 両帯状角膜変性症

平成6年7月初診。視力は右眼0.08($0.2 \times +2.50$ D), 左眼0.3($0.4 \times +1.75$ D $\cap$ cyl-3.00 D Ax 90°), 角膜屈折力 K_1 41.75 D, K_2 44.37 D(Ave 43.06 D), 平成7年9月左眼にPTK施行, 角膜切除量は110 μ m, 術後1か月での左眼視力0.4($0.6 \times +2.00 \cap$ cyl-2.00 D Ax 90°), 平成8年3月左眼に超音波破碎乳化吸引術+IOL(+21.5 D)挿入術施行(SRK-II式使用), 白内障術前角膜屈折力 K_1 43.00 D, K_2 43.50 D(平均43.25 D), 眼軸長23.31 mm, 予測前房深度4.60 mm, 白内障術後9か月での視力は左眼0.07(0.2×-1.00 D $\cap$ cyl-2.50 D Ax 180°), K_1 42.00 D, K_2 45.50 D(平均43.75 D)であった。

この2例のSRK-IIによるIOLパワーと今回の新しい計算方法での値を比較したものが表5である。症例KSではSRK方式によるIOLパワー+13.0 Dを使用し, 術後球面度数を-1.5 Dに設定してあるので, 実際は+3.75 Dの遠視となったわけである。新しい計算式では挿入すべきIOLパワーは+13.87 Dとなり, 実際には最終術後球面度数は+1.44 Dとなりやはり遠視とはなるが, SRK-IIによるIOLパワーに比べ予測値との誤差は減少した。症例HTではSRK方式によるIOLパワー+21.5

表4 PTK術後症例における凸平レンズ挿入の計算式

$dR' = R - dT$, $DC' = 337.5/R'$	ACD:	予測前房深度(mm)
$CT = 0.5 \cdot R/7.7$, $CT' = CT - dT$	AXL:	眼軸長(mm)
$AXL' = AXL - dT$	CT:	角膜厚(mm)
$ACD' = ACD - CT' \cdot 0.103LT \cdot 0.5$	LT:	レンズ厚(mm)
$CF = 1,000/DC' \cdot 1.336$	DC:	PTK前の角膜屈折力
$A1 = -(CF \cdot ACD')$	DC':	PTK後の角膜屈折力
$B1 = AXL' \cdot CT' \cdot ACD' \cdot LT + 0.897LT$	R:	PTK前の角膜前面曲率半径(mm)
$S = 1/A1 + 1/B1$	R':	PTK後の角膜前面曲率半径(mm)
$NF = 1/S$	dT:	角膜切除量(mm)
$DL = 1,000/NF$	CF:	後側頂点焦点距離(mm)
$IOL\ Power = DL \times 1.336$	A1:	レンズ第一主点~後側頂点焦点距離
	B1:	レンズ第二主点~網膜の距離

PTK: phototherapeutic keratectomy

表 5 PTK 術後の眼内レンズ挿入例

	症例 KS	症例 HT
SRK- II (D)	11.48	20.50
新しい計算式(D)	13.87	21.72
目標屈折値	-1.50	-1.00
最終屈折値	2.25	-1.00
最終屈折値のずれ(SRK- II)	3.75	0
最終屈折値のずれ(新しい計算式)	1.44	-1.20
予測前房深度(ACD) (mm)	4.79	4.60
術後前房深度(mm)	4.38	4.07
(予測—術後)前房深度	0.41	0.53
前房深度矯正後の屈折値のずれ(D)	1.81	-0.21

D を使用し、やはり術後球面度数を -1.00 D に設定した結果は -1.00 D とほぼ予想値になっている。しかし、新しい計算式では挿入すべき IOL パワーは $+21.72$ D となり、これを使用すると、実際には最終術後球面度数は -1.20 D となり、予想値は SRK 方式に比べ近視化してしまうこととなる。しかし、術後前房深度を新しい計算式に挿入すると -0.21 D となり、IOL パワーのずれは良好な結果となった。

IV 考 按

周知の通り、SRK-II 方式では眼内レンズパワー $P=A-2.5AXL-0.9K$ 、A：定数、AXL：眼軸長、K：角膜屈折力である。しかし、SRK-II 計算式では前房の深さについての自由度がないこと、インターメディックスのイントラオキュラー社は、A 定数と前房深度予測値は術者の個々の手術経験、装置、テクニックなどの結果を基に自身の値を開発することを勧めており、どのレンズを使うにしろ、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。しかし、この式には表面上、前房深度を変数とする項はなく、レンズ形式に対する予測前房深度があるだけで、他は全部、レンズの定数 A によっている。これは術後の前房深度がこの値に規定されることであると推定される。さらに、K 値はオフサルモメーターによって測定されるが、この値は換算表により角膜前面曲率半径 (R mm) にも換算される。したがって、各社の製品について比較してみると、mm 目盛と D 目盛との相互関係は必ずしも一致していない。すなわち、 $n=1.336$, 1.3367 , 1.3375 , 1.332 などが選択されてきているからである。この混乱は、米国で最も使用されているボッシュロム製ケラトメータが当初、角膜乱視の測定だけを実用用途と考え、測定目盛に D 値だけ刻まれていたのにも拘わらず、その後、コンタクトレンズの装着検査の際の角膜前面曲率半径の表示にその D 値が流用される

ようになった米国での事情によるものである。一般に、ある面の曲率半径とその屈折力の関係式は $D=1000(n-1)/R$ である。Helmholtz は 1924 年に Gullstrand 模型眼を引用し、角膜屈折率 n は 1.376 であるとしているが、実際にケラトメータでは、角膜曲率半径 R は $337.5/D$ と換算されている³⁾。つまり、角膜屈折率を 1.3375 としていることになる。したがって、ケラトメータのパワーは角膜前面でなく他のパワーと組み合わせられたもの、おそらく、角膜後面曲率半径と角膜の厚みが何らかの形で関係しているのではないと思われる。日本ではボッシュロム製ケラトメータが一般に使われているが、ボッシュロム製ケラトメータでは角膜前面曲率半径 (R mm) と角膜屈折力 (K 値) の関係に、やはり $n=1.3375$ を利用している。では、この $n=1.3375$ はどのような意味を持つのであろうか。そこで、古くから使用されてきた入射高と屈折偏角の光線追跡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 (図 1, VC) 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 (表 1)。

我々の計算式では眼軸長、角膜厚、予測前房深度、角膜屈折力 (または角膜曲率半径)、眼内レンズの厚みのデータが必要になる。このうち、眼軸長測定誤差はかなり大きく影響する。SRK-II 式では眼軸長で 0.5 mm の測定誤差は、常に 1.25 D の誤差となる。一方、我々の計算式では、同じ 0.5 mm の測定誤差でも、眼軸長が短いほど測定誤差は大きくなる。つまり、眼軸長が 20 mm の時、約 2.4 D、 27 mm では 1.3 D となるため、正確な眼軸長計測が必須である。さらに、理想的な計算式にするためには IOL の種類の選択も必要になる。術後予測前房深度がニデックスリーピースレンズのようにばらついた場合、SRK-II 式では前房深度は挿入レンズのパワーに影響を及ぼさないが、新しい計算式では挿入すべき IOL のパワーに誤差を生じる。Retzlaff ら⁴⁾は SRK/T 計算式を推奨し、SRK-II 式を術後前房深度予測値、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⁵⁾⁶⁾は、前房深度予測の誤差は全体の屈折誤差の 38% に生じ、前房深度を考慮した計算式の必要性を説いている。Olsen ら⁶⁾、Hoffer ら⁷⁾は予測前房深度を求める計算式発表している。今回は、症例数が 10 例と少ないことや、我々の計算式での検討段階で術後の屈折値と予想屈折値の結果にくい違いが出たため、その原因として前房深度に目を向け、術後の前房深度を測定し、レンズ付随の予測前房深度と比較することによって、我々の光線追跡式による IOL パワー計算法が使用可能かどうかを検討することを目指した。つまり、術後の前房深度は、予測より実際の術後のデータ使用が一番正確であり、このデータを使用し、我々の計算式が信頼性のあるものかどうかを考察することが基本となるためである。今後、Olsen らの方法によって得られた予測前房深度と術

後前房深度との比較も当然、検討していく予定である。勿論、術者の技量、IOL の囊内固定の有無、狭隅角(緑内障)の合併などによっても、予測前房深度が術後前房深度と一致しないことはあり得る。また、我々の方法を用い、光線追跡でできるだけ正確に IOL パワーを決定するためには、正確な予測前房深度を持つ IOL を選択することが重要であると思われる。

PRK または PTK 術後眼に白内障の手術で IOL を挿入するような場合、角膜の厚みや曲率半径が変化し、SRK-II 式では IOL パワーに誤差を生じると考えられる。今回、PTK 術後患者 2 例は SRK-II 式により白内障術前のケラトメータ値を使用し IOL を挿入された。症例 KS では新しい計算式を使用した場合に +1.4 D 前後の予測値とのずれがでたが、その原因として考えられるのは、正常眼での測定でも同じことが起こり得るように、眼軸長、予測前房深度の測定誤差である。PTK では角膜表面の形状が不規則であるため、ケラトメータの値(屈折力)や角膜曲率半径の計測が正確でないことも予想される。この症例において、眼軸長は 29.64 mm であったが、もし 29.0 mm であったとすると、予測値のずれは 0 D となる。また、角膜屈折力を 34.0 D とすると、ほぼ予測値とのずれは 0 D となる。特に眼軸長の測定がばらつく傾向があることは度々経験するところであり、数回の計測を行い、測定誤差をできるだけ少なくするように配慮する必要がある。さらに、角膜後面曲率半径が PTK により Gullstrand の法則に従わず変化しているのではないかという疑問もある。しかし、これに関しては角膜後面曲率半径が仮に変化したとしても、最終的な IOL パワーにはさほど影響してこないことが我々の光線追跡でわかっている。忘れてならないのは、PTK では術後の角膜屈折力は術後 1 年を経ても殆ど変化しないが、PRK では regression のため 2~3% 増加する。角膜厚は PTK および PRK 術後 1 年とともに 2~3% 増加するということである。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。このような角膜手術後の影響をできるだけ避けるためには、角膜の状態がほぼ落ちつくと思われる約 1 年は経過観察期間とすべきであると考ええる。

柏木⁸⁾は ray tracing error correction (RTEC) 法では、SRK-II 式は凸平レンズについてのみ正しく、両凸、平凸レンズには補正が必要であることが推測されたと述べて

いる。今回、我々の結果は前にも述べたように使用眼内レンズ(両者とも両凸レンズ)を planoconvex レンズ(特に凸平レンズ)として考察をしたものである。この計算式をそのまま適用することはできないが、SRK-II 計算式よりも、我々の計算式は多少のばらつきはあるものの、SRK-II 計算式以上に有用と思われる。今後は両凸レンズでの IOL パワー計算式での考察を行う予定である。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、まだ将来的にも見通しが立っていない。また、試行錯誤で IOL パワーを決定し、患者に負担をかけることは避けなければならない。したがって、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、今後、さらに検討して行かねばならない問題と考える。

文 献

- 1) Siganos DS, Pallikaris IG, Lambropoulos JE, Koufala CJ: Keratometric readings after photorefractive keratectomy are unreliable for calculation IOL power. J Cataract Refract Surg 12:278—279, 1996.
- 2) 所 敬, 林 一彦, 武藤政春, 浅原典郎: 角膜後面曲率半径の測定. 臨眼 30:83—87, 1976.
- 3) Aran Safir: Refraction and Clinical Optics, Harpar & Row, New York, 445—450, 1980.
- 4) 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.
- 5) Olsen T: Sources of error in intraocular lens power calculation. J Cataract Refract Surg 18:125—129, 1992.
- 6) 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.
- 7) Hoffer KJ: The Hoffer Q formula: A comparison of theoretic and regression formulas. J Cataract Refract Surg 19:700—712, 1993.
- 8) 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.