

新しい眼内レンズ挿入術後前房深度予測式

堀内 一郎¹⁾²⁾, 赤木 好男²⁾

¹⁾堀内眼科医院, ²⁾福井医科大学眼科学教室

要 約

目 的：眼内レンズ(IOL)パワー計算における予測精度向上のために、新しい術後前房深度予測式を考案し、その予測精度を検討した。

方 法：超音波乳化吸引術後 IOL が嚢内に固定され、術後 3 か月以上観察可能であった 149 眼を対象とした。前房深度(ACD)は細隙灯顕微鏡に Jaeger 式前房深度計を装着し測定した。初めに 61 眼を対象として、角膜前面曲率半径、術前超音波眼軸長測定の際の術前 ACD 値、水晶体厚の 3 つの術前測定値から術後実測値に重回帰させ、予測式を作成した。得られた ACD 予測式を H 式とし、先の 61 眼とは別の 88 眼において、予測値と実測値の誤差を計算し、これと Olsen の ACD 予測式(Olsen 92, Olsen 95)との比較を行った。

結 果：H 式, Olsen 92, Olsen 95 の各式の実測値と予測値の差の絶対値平均はそれぞれ 0.174, 0.280, 0.229 mm となり、有意に H 式に誤差が少ない結果となった(Olsen 92, Olsen 95 に対して、それぞれ危険率 $p < 0.001$, $p < 0.05$ であった)。

結 論：今回考案した ACD 予測式の予測精度は満足できるもので、光線追跡法による IOL パワー計算式と組み合わせて、より高精度の屈折値予測が期待される。(日眼会誌 105 : 614—618, 2001)

キーワード：術後前房深度予測, 術後実測値, Jaeger 式前房深度計, Olsen 式, 光線追跡法

A New Predictive Formula of Anterior Chamber Depth for Pseudophakia

Ichiro Horiuchi¹⁾²⁾ and Yoshio Akagi²⁾

¹⁾Horiuchi Eye Clinic, ²⁾Department of Ophthalmology, Fukui Medical School

Abstract

Purpose : To develop a new predictive formula of the anterior chamber depth (ACD) of the pseudophakic eyes for more accurate intraocular lens (IOL) power calculation with the Ray Tracing method.

Methods : We studied a series of 149 phacoemulsified eyes with capsulorhexis and in-the-bag fixation of IOL. ACD was measured with a Jaeger type depth measuring unit which was attached to a slit-lamp biomicroscope. We developed the formula with 3 variables : preoperative anterior corneal curvature with keratometer, and ACD and crystalline lens thickness with preoperative ultrasonography. We named the derived formula "formula H". We compared formula H with Olsen's predictive formula for the ACD (Olsen 92, Olsen 95).

Results : Mean absolute error between the pre-

dicted and postoperatively measured ACD was 0.174 ± 0.133 , 0.280 ± 0.235 , 0.229 ± 0.200 mm in formula H, Olsen 92, and Olsen 95, respectively. Formula H was significantly more accurate than both Olsen formulas ($p < 0.001$, $p < 0.05$, respectively).

Conclusions : The accuracy of IOL power calculation can be improved with the new formula using the Ray Tracing method, using the new ACD predictive formula. (J Jpn Ophthalmol Soc 105 : 614—618, 2001)

Key words : Prediction of postoperative anterior chamber depth, Measured ACD value, Jaeger type depth measuring unit, Olsen's formula, Ray Tracing method

別刷請求先 : 922-0243 加賀市山代温泉北部 2-71 堀内 一郎
(平成 12 年 6 月 8 日受付, 平成 13 年 4 月 2 日改訂受理)

Reprint requests to : Ichiro Horiuchi, M. D. Horiuchi Eye Clinic, 2-71 Hokubu Yamashiro-onsen Kaga 922-0243, Japan

(Received June 8, 2000 and accepted in revised form April 2, 2001)

I 緒 言

眼内レンズ手術における眼内レンズ(以下, IOL)のパワー計算において, 理論式では術後の前房深度(以下, ACD)の予測値が必要不可欠である。これまでの理論式^{1)~5)}における ACD 予測式はいずれも眼軸長(以下, AXL)値を予測因子として持つものとなっている。また, 特に最近本邦でも使用されることが多いと思われる SRK-T 式³⁾では, ACD 予測式を得る際に, 現実の術後実測 ACD 値からではなく, 彼らのパワー計算式において予測屈折値が術後実測屈折値に適合するように ACD 予測式の最適化を行うという手法を採っているようであり, 方法論的疑問を禁じ得ない。我々はこれまで数年来 IOL 挿入眼の術後 ACD を測定してきたが, その中で例えば強度近視眼においても術後 ACD が普通眼軸長眼と何ら変わらない症例や, 逆に普通眼軸長眼でも術後 ACD がかなり深い症例をしばしば経験し, 術後 ACD 値は AXL 値とそれほど相関を持たないのではないかという印象をもった。一方, 我々は別報⁶⁾において, IOL パワー計算における予測精度の向上を目指して, 光線追跡法に基づく理論式を考案した。そこで今回, 我々はこの新しい理論式に用いるべく, AXL 値に依存しないで, 術前 AXL 測定の際の術前 ACD 値と水晶体厚および角膜前面曲率半径値から術後 ACD 値を予測すること, および ACD 予測式を求める際に実測屈折値ではなく, 式の係数を実測 ACD 値から決定する方法を試み, 一定の成果が得られたので報告する。

II 対象と方法

対象は, 超音波乳化吸引術後 IOL が囊内に固定され, 術後 3 か月以上観察可能であった 122 例 149 眼である。対象の年齢の平均値±標準偏差は 72.6±9.1 歳, 性別は男性 55 眼, 女性 94 眼であった。手術は全例著者が堀内眼科医院において行ったものである。使用した IOL は NV 22(メニコン社)101 眼, NR 81 K(ニデック社)39 眼, NR 84 G(ニデック社)9 眼である。

本報告での ACD とは別報⁶⁾とは異なり, 角膜前面から IOL 前面までの距離とする。

ACD の測定には細隙灯顕微鏡 30 SL-M(Zeiss 社)に同社製 Jaeger 式前房深度ユニットを装着し測定した。同装置から読みとった値を Jaeger⁷⁾の原著から角膜前面曲率半径によって換算する式を作成し, これによって換算を行った。はじめに 61 眼を対象として, 術前角膜前面曲率半径(以下, R mm), および術前超音波眼軸長測定の際の術前 ACD 値(以下, ACDu mm)と水晶体厚(以下, LENu mm)とから R, 1/R, 1/R², ACDu+0.4・LENu(推定水晶体赤道部位置)の 4 つを説明変数とする重回帰計算を行った。得られた回帰式を術後 ACD 予測式(これを H 式とする)とし, 先の 61 眼とは別の症例 88

眼において, 予測値と実測値の誤差を計算した。さらに, これまで知られている Olsen ら⁴⁾⁵⁾の ACD 予測式(以下, Olsen 92, Olsen 95)との比較も行った。それらは次の通りである。

$$\text{Olsen 92: ACD} = \text{ACDm} + 0.25 \cdot \text{ACDu} + 0.12 \cdot \text{AXL} - 3.56$$

$$\text{Olsen 95: ACD} = \text{ACDm} + 0.5 \cdot \text{ACDu} + 0.1 \cdot \text{AXL} + 0.15 \cdot \text{H} + 0.2 \cdot \text{LENu} - 5.38$$

ただし, ACD: 予測 ACD, ACDm: 術後平均 ACD, ACDu: 術前 ACD, H: corneal height, LENu: 水晶体厚

Holladay 式²⁾, SRK-T 式³⁾における ACD 予測式については, それらの式が IOL 厚み=0 とする薄肉レンズ近似に基づく式であるため, その場合の ACD とは IOL の主平面の位置を意味することになるので, 直接比較することはできない(Olsen 92, 95 式を用いるパワー計算式は IOL 厚を計算に入れた式である⁶⁾)。また, 今回用いた 3 種の IOL については, はじめに行った術後実測 ACD の観察結果では, それらの間に差違はなかったので, 回帰計算から予測式を作る際にも 3 種を区別せずに対象とした。3 種の IOL 間の予測誤差については全例を対象として検討を行った。また, さらに術後 ACD 実測値と AXL 値の相関についても検討を行った。計算はすべて表計算ソフト(Dos 版 Lotus 1-2-3[®])で行った。

III 結 果

1. 予測式

$$\text{予測式は} \\ \text{予測 ACD} = 0.491 \cdot (\text{ACDu} + 0.4 \cdot \text{LENu}) - 0.899 \cdot \text{R} + 326.604/\text{R} + 1376.268/\text{R}^2 - 10.1$$

(単位 mm, ACDu: 術前 ACD, LENu: 術前水晶体厚, R: 術前角膜前面曲率半径)

となった。

2. 実測値との比較

H 式, Olsen 92, 95 の各式の実測値と予測値の差の絶対値の平均値±標準偏差はそれぞれ 0.174±0.133, 0.280±0.235, 0.229±0.200 mm となり, 有意に H 式が誤差が少ない結果となった(表 1, t 検定, Olsen 92, 95 に対して, それぞれ危険率 p<0.001, p<0.05)。実測値と予測値の相関係数は 0.648 で, 有意の相関を示した(p<0.001, 母相関係数の 95% 信頼区間は 0.561~0.755)。相関図を図 1 に示す。

3. IOL による比較

各 IOL 群での予測誤差は表 2 の通りであり, 各群間に有意差はなかった(t 検定)。

4. 術後実測 ACD 値と AXL の相関

全例 149 眼の術後実測 ACD 値と AXL との相関は図 2 のごとくであり, 相関係数は 0.406 であり, やや相関があるという程度であった。

表 1 各術後前房深度予測式の誤差 (単位: mm)

	絶対値平均	range	危険率
H 式	0.174±0.133	+0.602~-0.595	
Olsen 92	0.280±0.235	+1.072~-0.478	0.001
Olsen 95	0.229±0.200	+0.907~-0.462	0.05

* 危険率は H 式と Olsen 92, 95 との有意差を表す. 平均値±標準偏差 n=88

表 2 各眼内レンズ間での術後前房深度予測式の誤差比較

	絶対値平均	range	n
NV 22	0.161±0.120	+0.602~-0.302	101
NR 81 K	0.117±0.114	+0.465~-0.595	39
NR 84 G	0.132±0.104	+0.301~-0.238	9

* 各群間に有意差なし. 単位: mm

IV 考 按

これまでの IOL パワー計算の歴史を振り返ってみると, 1967 年に初めて提唱された Fyodorov ら⁸⁾の理論式を除き, 初期の理論式では 1978 年の RD Binkhosrst⁹⁾を初めとして術後 ACD を定数としていた. しかし, これでは短眼軸長眼と長眼軸長眼ではやはり屈折誤差が大となるため, AXL 値から術後 ACD 値を予測するようになった¹⁾. 一方, 1980 年に経験式である SRK 式¹⁰⁾が発表され, 術後 ACD 予測の問題は同式の A 定数という一つの定数の中に吸収されてしまった(実際同式の考案者たちは A 定数にそのような意味づけを行っているようである³⁾). SRK 式はその臨床的簡便性と, 普通眼軸長眼では予測精度が良好なことから広く普及するに至ったが, やはり短眼軸長眼, 長眼軸長眼では, かなりの誤差が出現することが明らかとなり, 同式の改良型として SRK II 式, さらに理論式への回帰として, SRK-T 式が提唱された. そこでは術後 ACD 予測値は, 従来の A 定数もしくは「ACD 定数」から得られる因子(offset)と AXL と角膜前面曲率半径から計算する因子(corneal height)から成り立っている(Holladay 式²⁾でも同種の構成となっている). しかし, 彼らの術後 ACD 予測値と実測値を比較すると, ほとんどの症例で前者の方が大きくなっていることが報告¹¹⁾されており, 我々の経験でも同様であった. Olsen ら⁴⁾⁵⁾は ACD 実測値から ACD 予測式を導いている点と, パワー計算式に光線追跡法と同等の式を用い⁶⁾, ACD を角膜前面から IOL 前面までとしている点では我々と共通であるが, Olsen 92 式は前述のようにやはり AXL を予測因子としている. Olsen 95 式ではこれに corneal height の項, さらに水晶体厚の項を加えたものになっているところが注目される. 柏木ら¹²⁾は我々と同様, パワー計算式には光線追跡法(の逐次近似法による解法)を用いているが, 同法で術

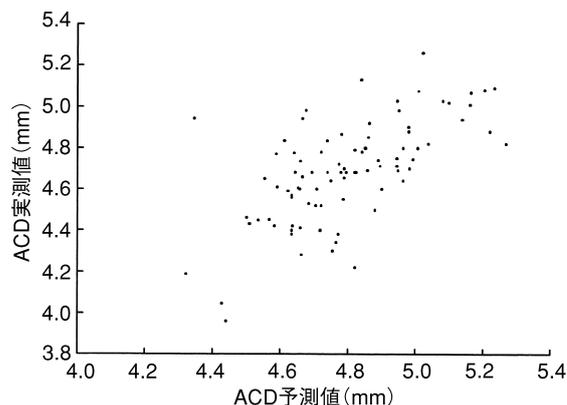


図 1 前房深度(ACD)予測式の精度.

実測値と予測値の相関係数は 0.648 で, 有意の相関を示した($p < 0.001$, 母相関係数の 95%信頼区間は 0.561~0.755). $n=88$.

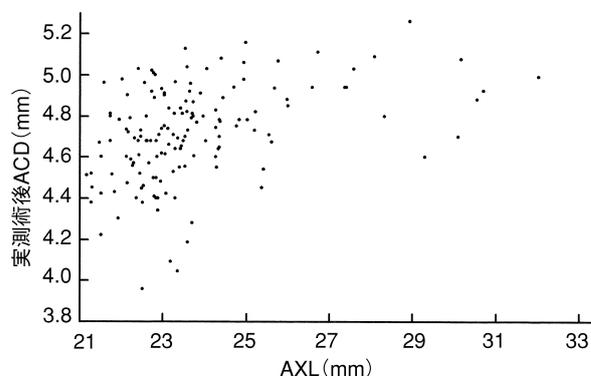


図 2 ACD 実測値と AXL の相関.

AXL: 眼軸長. 実測値と予測値の相関係数は 0.406 であり, やや相関があるという程度である. $n=149$.

後屈折値からの術後 ACD 逆算値を求め, そこから角膜前面曲率半径, AXL 値を予測因子として ACD 予測式を導いていて, その実測値との比較では誤差平均は 0.661 mm と大きなものとなっている. 杉野ら¹³⁾も同じく光線追跡法による屈折値計算式から同じく術後 ACD を逆算し, この値を corneal height (SRK-T 式)・AXL 値から予測する式を導いたが, ACD の実測は行っていない.

以上, これまでの理論式における術後 ACD 予測のあり方を概観してみたが, そこには 2 つの問題点が指摘できる. 1 つは Holladay 式²⁾, SRK-T 式³⁾, 柏木ら¹²⁾, 杉野ら¹³⁾のように, 予測を術後 ACD の実測をしないで, 報告者たちが各自用いているパワー計算式において予測屈折値=術後屈折値として, ここから計算上の術後 ACD 値を逆算し, この値を角膜前面曲率半径, AXL 値, corneal height などから予測するという方法をとっているということである. したがって, それは現実の術後 ACD 予測値ではなく, 彼らのパワー計算式において術後実測屈折値に合うような ACD 値予測になっていて, 彼らのパワー計算式の中でのみ意味を持つものとなって

いるということである(このことを Olsen ら⁴⁾も「架空の因子」であると評している)。ところが術後屈折値は、元来生体計測上の誤差(角膜前面曲率半径, AXL, 術後屈折値など), IOL の製造上の誤差, パワー計算式自体が近似式である(柏木ら, 杉野らでは光線追跡法である)ことから起こる誤差など, 多くの誤差を生む要因を持っている。このような ACD の実測値と無関係に, 術後 ACD 予測を術後屈折値からそれぞれのパワー計算式から逆算する方法では, 術後屈折誤差をもたらす諸要因をそのまま ACD 予測に持ち込むことになり, 予測精度向上は期待できないものと思われる。したがって, 症例ごとに術後屈折誤差を評価する場合にも, その誤差の起因が AXL 値など生体計測上の誤差によるものか, あるいは ACD の予測誤差によるものか, あるいは A 定数が不適切なのか, あるいはまた他の原因によるものか解析のしようがないということになる。これに対して, 我々のように ACD 予測の問題と屈折度予測の問題を分離する方法をとれば, 例えば屈折誤差が大であるとき, 術後 ACD を実測してみても, 予測 ACD 値と実測 ACD 値の差が少なければ, 誤差の要因は他の要因に求めることになるし, 一方, これが大きければ誤差の要因は ACD の予測誤差に帰するということになり, 誤差の原因の追及範囲を絞り込むことができるのである。

今 1 つは ACD 予測値に果たして AXL 値がどれほど寄与しているかということである。我々は IOL 移植眼の ACD 値を 1993 年以来実測してきた。その経験では, 確かに AXL が長くなるにつれて術後 ACD が深くなるという傾向はみられたが, 必ずしも術後 ACD 値と AXL 値は正比例の関係にない, また, steep な眼(角膜前面曲率半径が小)では術後 ACD が深くなることが多い, という観察結果を得た。また, 加齢とともに水晶体厚が増大してゆくという傾向があることもすでに多く指摘されている¹⁴⁾¹⁵⁾ところであり, 自らも経験するところである。しかし, 水晶体厚自体は相当個人差があり, また白内障の成熟度により著しく変化することがある。ところが, 水晶体の赤道部の位置(角膜前面からの深さ)は白内障の成熟度の如何にかかわらず, 不変であろうと推定され, また, 術後 IOL の状態を経時的に観察してゆくと術直後は IOL と前後囊との間に間隙がある症例でも, 経過とともにその間隙は徐々に減少してゆき最終的には前後囊は IOL に密着した状態となるということが観察される。このとき, IOL は水晶体赤道部の位置(深さ)付近に位置するのではないかという推定が成り立つ。そこで「術後 ACD は AXL よりも, 水晶体赤道部位置と角膜前面曲率半径と相関を持つのではないか?」という仮説のもとに, 今回の予測式を考案したものである。そして, 今回の我々の結果は実測値との誤差の絶対値平均は 0.174 mm と Olsen 92, 95 式よりも有意に良好な結果となった。また, 図 2 でみるように術後 ACD と

AXL 値の相関は多いとはいえ, 術後 ACD 予測式には AXL 因子を入れない方がよいということが判明した。

最近, 瀬津¹⁶⁾は術後屈折度とは独立に術前 ACD 値・水晶体厚を変数として(AXL 値を用いないで), 術後実測 ACD 値から回帰させ, 術前の水晶体厚のある深さに IOL が位置するであろうという発想から予測式を得ている。その点では, 我々の方法に最も近いものである。しかし, 我々の場合は角膜前面から IOL 前面までを予測するのに対して, 彼らは角膜前面から IOL のループ付着部平面までの距離を予測する点が異なっており, 直接結果を比較することができない。

以上の 2 つの問題点については, どちらも術後 ACD の実測があまり行われていないことに関連しているように思われる。本来 IOL パワー計算の問題は純粋に光学的問題である。ただし, 術後 IOL の位置(すなわち ACD)が予測できないと計算不可能であるから, その位置の予測は極めて重大な問題である。ところが, これまで術後 ACD をまず実測してみようという試みが, 余りに少なかったのではないかとと思われる。このように ACD の実測が少ないということについては, ACD 測定自体が眼科臨床において一般的でないことがその背景にあると思われるが, この点 ACD 測定ハードウェアの問題もあると思われる。最近では前眼部解析装置という有用な機器も存在するが, 高価であり, 一般的とはいえない。今回, 我々は Jaeger 式前房深度測定装置を用いたが, 本装置は細隙灯顕微鏡に装着するもので簡便で廉価である。しかし, 本装置の場合, スケールの読みそのものを ACD 値とすることはできず, 換算という操作が必要である。本装置の取扱説明書には換算表が添付されているが, その精度は粗いもので, しかも, 換算表から補間計算が必要である。この点機会があれば別報で報告したい。今後 IOL パワー計算の予測精度向上のために, 安価で簡便正確な測定装置の開発が待たれるところである。

なお本装置による測定では, 目盛りは 0.1 mm 単位であり, これを目視によって 0.01 mm 単位で読み取り, 得た値を既述の方法で換算し, ACD 測定値としている。症例は全例 2 回以上(異なる日に)測定しているが, 測定の再現性はおおむね良好であった。また, 術前では本装置による ACD 測定値と超音波眼軸長測定装置によるものとの比較が可能であったが, その差はほぼ 0.05 mm 以内で両者は良い相関を示した。

次に, 術後 ACD 予測については, IOL のどの部分を予測位置とするかという問題も存在する(SRK-T 式などの IOL 厚=0 とおく式ではこの問題は存在しないが)。前述のように瀬津¹⁶⁾は IOL のループ付着部平面の位置を予測位置とし, 柏木ら¹²⁾も同一である。我々は IOL 前面を文字通り IOL 位置としたが, この場合 IOL パワー

ごとに IOL の球面部分の厚みは変化するので、パワーの変化によってもそれが一定であるループ付着部平面を、予測位置とした方が水晶体赤道部位置との相関が良いかも知れないとも考えられる。ところが、実際に ACD を測定する際にはループ付着部平面を正確に測定することは困難で、現実的ではない。また、屈折値計算⁶⁾において、このループ付着部平面位置を用いると計算がより煩瑣になるという問題がある。それらの問題と、今回の実際の予測結果が良好であったことから、我々は現在のところ、IOL 前面を IOL 位置とする方法で不都合はないものと考えている。

今回使用した IOL は 3 種 (NV 22, NR 81 K, NR 84 G) と多くはないが、同一の予測式を用いても誤差の絶対値平均はそれぞれ 0.161, 0.117, 0.132 mm で統計学的にも有意差はなかった。これはポリメチルメタクリレートという同一素材や、シングルピースタイプで支持部取り付け角度などのデザインがたまたま同一傾向(したがって術後 ACD が同一傾向の)の IOL であったためかも知れない。それ故、foldable lens のようにかなり異なる材質の IOL を使用する場合は予測式の各項の係数が異なってくることも予想される。

今回の H 式の予測精度は誤差の絶対値平均で 0.174 mm で、これを光線追跡法で普通眼軸長眼の場合に計算すると屈折値では 0.252 D 程度の誤差となり、予測精度として満足のゆくものとなった。しかし、予測式自体は試行錯誤的に得たものであり、より simple で精度の良い式が存在するかも知れないし、また、角膜径という因子を導入した方がより高精度となることも考えられる。この点は今後の課題としたい。本 ACD 予測式を用いた臨床例における IOL パワー計算の結果については別報⁶⁾で述べたが、パワー計算式に光線追跡式を用いていることと相まって、第三世代式よりも有意に屈折誤差が少ないという結果であった。

本論文の要旨の一部は第 14 回日本白内障眼内レンズ屈折手術学会で報告した。

文 献

- 1) **Binkhorst RD** : Intraocular Lens Power Calculation Manual : A Guide to the Author's TICC-40 Programs, 3rd ed. RD Binkhorst, New York,

- 1978.
- 2) **Holladay JT, Musgrove KH, Prager TC, Lewis JW, Chandler TY, Ruiz RS** : A three-part system refining intraocular lens power calculations. J Cataract Refract Surg 14 : 17–24, 1988.
- 3) **Retzlaff J, Sanders DR, Kraff MC** : Development of the SRK/T intraocular lens implant calculation formula. J Cataract Refract Surg 16 : 333–340, 1990.
- 4) **Olsen T, Olesen H, Thim K, Corydon L** : Prediction of pseudophakic anterior chamber depth with the newer IOL calculation formulas. J Cataract Refract Surg 18 : 280–285, 1992.
- 5) **Olsen T, Corydon L, Gimbel H** : Intraocular lens power calculation with an improved anterior chamber depth prediction algorithm. J Cataract Refract Surg 21 : 313–319, 1995.
- 6) **堀内一郎, 赤木好男** : 光線追跡法に基づく新しい理論式による眼内レンズパワー計算. 日眼会誌 105 : 619–627, 2001.
- 7) **Jaeger W** : Tiefenmessung der menschlichen Vorderkammer mit planparallelen Platten. Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol 153 : 120–131, 1952.
- 8) **Fyodorov SN, Galin MA, Linksz A** : Calculation of the optical power of intra-ocular lenses. Invest Ophthalmol 14 : 625–628, 1975.
- 9) **Binkhorst RD** : The optical design of intraocular lens implants. Ophthalmic Surg 6 : 17–31, 1975.
- 10) **Retzlaff J** : A new intraocular lens calculation formula. Am Intra-Ocular Implant Soc J 6 : 148–152, 1980.
- 11) **福山 誠, 吉富文昭** : 眼内レンズ度数決定法. あたらしい眼科 14 : 529–534, 1997.
- 12) **柏木豊彦, 木下裕光, 山中健一** : Ray Tracing Error Correction (RTEC) 法による IOL 挿入後レンズ位置の計算値. 日眼会誌 96 : 1014–1021, 1992.
- 13) **杉野公彦, 松阪有紀, 上野珠代, 高峯行男** : 理論的回帰式による眼内レンズ度数決定式の作成. あたらしい眼科 11 : 457–461, 1994.
- 14) **Hoffer K** : Axial dimension of the human cataractous lens. Arch Ophthalmol 111 : 914–918, 1993.
- 15) **襦津直久** : 加齢と白内障の進行による水晶体厚の変化. 臨眼 53 : 923–926, 1999.
- 16) **襦津直久** : 水晶体の位置からの術後前房深度予測. IOL & RS 12 : 44–47, 1998.