

眼内レンズ移植眼の超音波眼軸長測定における等価音速値

魚里 博¹⁾, 牧野 弘之²⁾

¹⁾奈良県立医科大学眼科学教室, ²⁾星ヶ丘厚生年金病院眼科

要 約

市販の超音波眼軸長測定装置の標準的な音速を用いれば、眼内組織と移植される眼内レンズ (IOL) の音速の間に大きな隔たりがあるため、眼軸長に大きな誤差を生じる。PMMA 製や最近のシリコン製の IOL を移植された眼を従来から用いられている有水晶体眼や無水晶体眼用の音速 (1,550 あるいは 1,532 m/s) で評価すれば、音速の不一致により発生する眼軸長の誤差はきわめて大きくなる。そこで、偽水晶体眼の超音波眼軸長測定時の測定誤差を検討するとともに、測定時の設定音速値 (等価音速値) を理論的に検討した。その結果、偽水晶体眼の等価音速値 (V_E) は $LV_1V_2/\{T(V_1-V_2)+LV_2\}$ で与えられることを示した (ただし、L は眼軸長、 V_1 は前房・硝子体中の超音波の音速、 V_2 は IOL 内の超音波の音速、T は IOL の中心厚み)。標準的な 24 mm 程度の眼軸長で IOL の中心厚みが 1 mm 程度である場合の等価音速値は、PMMA 製の IOL 移植眼では約 1,560 m/s、シリコン製の IOL 移植眼では約 1,500 m/s であることを示した。しかし、これらの等価音速値は、測定眼の眼軸長 (L)、移植される IOL の中心厚み (T) とその音速値 (V_2) に大きく依存して変化するため、どのような症例でも適応できるものではない。したがって、偽水晶体眼の眼軸長計測をより正確に行うには、無水晶体眼の設定音速値 (1,532 m/s) で測定した後に移植された IOL の中心厚を用いて見かけの眼軸長を補正することが望ましい。(日眼会誌 97:933-938, 1993)

キーワード: 眼軸長, 眼内レンズ, 偽水晶体眼, 等価音速値, IOL パワー

Equivalent Ultrasonic Velocity for Intraocular Lens Implanted Eyes in A-mode Biometry

Hiroshi Uozato¹⁾ and Hiroyuki Makino²⁾

¹⁾Department of Ophthalmology, Nara Medical University

²⁾Department of Ophthalmology, Hoshigaoka Welfare Pension Hospital

Abstract

With the standard ultrasonic velocity in commercially available instruments, there is a large difference of the ultrasonic velocity between the ocular medium and the implanted intraocular lens (IOL). If the PMMA or silicon IOL-implanted eye is assessed by using the ultrasonic velocity of the phakic or aphakic eye (1,550 m/s or 1,532 m/s), the error induced by the mismatch of the velocity is considerable. Therefore, we estimated the axial length error of pseudophakic eyes in ultrasonic biometry, and also derived theoretically the overall average sound speed (equivalent ultrasonic velocity, EUV) in IOL-implanted eyes. We found that the EUV (V_E) can be estimated from the equation, $V_E = LV_1V_2/\{T(V_1-V_2)+LV_2\}$, where L is the axial length of the eye, V_1 the ultrasonic velocity of aqueous and vitreous body, V_2 the ultrasonic velocity of the IOL, and T the central

別刷請求先: 634 橿原市四条町 840 奈良県立医科大学眼科学教室 魚里 博
(平成5年2月26日受付, 平成5年3月29日改訂受理)

Reprint requests to: Hiroshi Uozato, Ph.D. Department of Ophthalmology, Nara Medical University, 840, Shijo-cho Kashihara 634, Japan

(Received February 26, 1993 and accepted in revised form March 29, 1993)

thickness of the IOL. The EUV for a PMMA IOL-implanted eye is approximately 1,560 m/s, and the EUV for a silicon IOL-implanted eye is approximately 1,500 m/s in an eye of standard length (24 mm) and an IOL of standard central thickness (1 mm). However, the EUV is a function of the axial length of the eye (L), the central thickness of the IOL (T), and the sound velocity in the implanted IOL (V₂), and thus the EUV can not be applied for all cases. To perform more accurate ultrasonic biometry in pseudophakic eyes, we should rectify the apparent axial length assessed by the aphakic sound speed (1,532 m/s) with the central thickness of the implanted IOL. (J Jpn Ophthalmol Soc 97 : 933-938, 1993)

Key words: Axial length, Intraocular lens, Pseudophakia, Equivalent ultrasound velocity, IOL power

I 緒 言

眼軸長の測定には、Aモード超音波眼軸長測定装置が広く臨床で利用されている。その主要目的は、白内障摘出手術後の移植される眼内レンズ(以下 IOL と略す)のパワーを予測するために用いられている。そのため、白内障眼の有水晶体眼では 1,550 m/s、白内障摘出後の無水晶体眼では 1,532 m/s の音速値を設定して臨床測定する場合が多い^{1)~3)}。

IOL を移植された偽水晶体眼の眼軸長を評価することは一般的にそれほど多くないが、術後の屈折異常を正しく把握したり、IOL のパワー誤差の要因を確定したり、または先天性白内障眼において IOL 移植術後の眼軸長の変化を正しく把握する場合など、きわめて重要である^{4)~8)}。また、片眼 IOL 移植をされている他眼の白内障眼に IOL 移植を施行する場合、偽水晶体眼の眼軸長や屈折度を参考に IOL パワーを決定しなければならぬことはよく経験するところである。

しかし、有水晶体眼や無水晶体眼の 1,550 m/s、1,532 m/s のような音速値を用いて IOL 移植眼の眼軸長を評価すれば大きな誤差を持ち込むことはすでに指摘した⁹⁾¹⁰⁾。最近の IOL 移植手術件数の増加とともに、PMMA (polymethylmethacrylate) 製以外にもシリコンやアクリルなどの新しい材質のソフト IOL が用いられるようになってきているため、偽水晶体眼の眼軸長を正しく評価するためには、移植された IOL の効果を検討しておく必要がある。そのため、ここでは IOL 移植眼の眼軸長を臨床的に評価する際、設定すべき音速値(等価音速値)とその問題点について検討した。

II 方 法

1. 偽水晶体眼の眼軸長

音波が偽水晶体眼の眼軸上を伝播するとき、伝播時間(S)は IOL での所要時間とその他の眼内組織中(前房と硝子体)の所要時間の和に等しいとすれば、

$$S = \frac{X}{V_1} + \frac{T}{V_2} + \frac{Y}{V_3} \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。ただし、V₁、V₂、V₃は、それぞれ前房、IOL および硝子体中での超音波の音速である。音速の仮定値 V_M(m/s) を用いて測定された見かけの眼軸長 L_Mは、伝播時間 S と V_Mの積であるから、次式で与えられる。

$$L_M = V_M \cdot S = V_M \left\{ \frac{X}{V_1} + \frac{T}{V_2} + \frac{Y}{V_3} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで、前房と硝子体中での音速が等しいと仮定すれば(V₁=V₃)、また真の眼軸長(L)は、L=X+T+Y であることから、(2)式は

$$L_M = V_M \left\{ \frac{T}{V_2} + \frac{L-T}{V_1} \right\} \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる。したがって、真の眼軸長は

$$L = \left(\frac{V_1}{V_M} \right) L_M + \left(1 - \frac{V_1}{V_2} \right) T \dots\dots\dots(4)$$

から求めることが出来る⁹⁾。

2. 偽水晶体眼での等価音速

偽水晶体眼をある設定音速値 V_Mで測定する場合、IOL による誤差が生じない設定音速値をここでは等価音速値と呼び、V_Eとする。V_Eで評価された見かけの眼軸長 L_Mは真の眼軸長 L に等しくなければならないから、(3)式から

$$L_M = V_E \left\{ \frac{T}{V_2} + \frac{L-T}{V_1} \right\} = L \dots\dots\dots(5)$$

とおけば、等価音速値 V_Eは次式で与えられる。

$$V_E = \frac{LV_1V_2}{T(V_1 - V_2) + LV_2} \dots\dots\dots(6)$$

III 結 果

1. 等価音速値

偽水晶体眼での等価音速値は、(6)式から、移植され

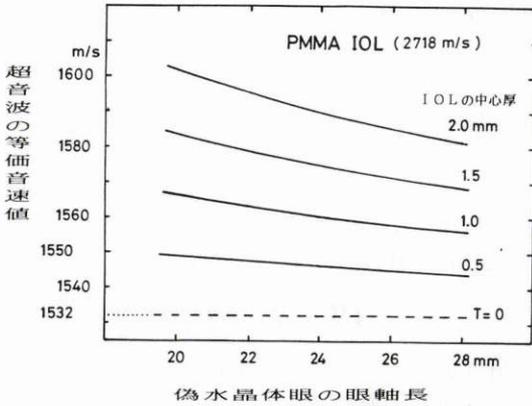


図 1 PMMA 製 IOL 移植眼の等価音速値.

PMMA での音速は 2,718 m/s を仮定し、各種の眼軸長と IOL 中心厚による等価音速の変化を示す。眼軸長が短くなるほど、IOL 中心厚が厚くなるほど等価音速値は大きくなる。24 mm 程度の眼軸長で 1.0 mm 程度の中心厚の IOL が移植されている場合には、等価音速値は約 1,560 m/s である。

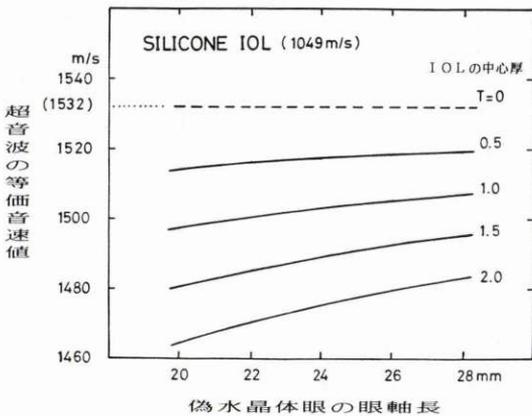


図 2 シリコン製 IOL 移植眼の等価音速値.

シリコンでの音速は 1,049 m/s を仮定し、各種の眼軸長と IOL 中心厚による等価音速の変化を示す。眼軸長が短くなるほど、また IOL の中心厚が厚くなるほど等価音速値は小さくなる。眼軸長が 24 mm で IOL 中心厚が 1.0 mm 程度の標準的な偽水晶体眼では、等価音速値は約 1,500 m/s となる。

た IOL の音速 (V_2) や中心厚 (T) のみならず眼軸長 (L) にも依存する。PMMA 製 IOL 移植眼での等価音速値の結果を図 1 に、またシリコン製 IOL が移植された偽水晶体眼の等価音速値の計算結果を図 2 に示す。ただし、これらの計算には PMMA とシリコンの音速値 (V_2) はそれぞれ 2,718 m/s, 1,049 m/s と仮定した。

眼軸長 24 mm, 移植 IOL の中心厚が 1 mm 程度であれば、PMMA 製 IOL 移植眼では等価音速値は約 1,560 m/s, シリコン製 IOL では約 1,500 m/s となった。PMMA 製 IOL 移植眼では、眼軸長が長いほど、また IOL の中心厚みが薄いほど等価音速値は小さくなった。一方、シリコン-IOL 移植眼では眼軸長が長いほど、また IOL の中心厚みが薄いほど等価音速値は大きくなった。当然ながら、IOL の中心厚みがゼロになれば、等価音速値は無水晶体眼での 1,532 m/s の設定音速値に等しくなる。

2. PMMA 製 IOL 移植眼での誤差

PMMA 製の IOL を移植された偽水晶体眼では、無水晶体眼 (1,532 m/s) や白内障眼 (1,550 m/s) 用の設定音速で評価される見かけの眼軸長は、真の眼軸長と異なる。1,532 m/s の設定音速で計る場合、(4)式から、 $V_M = V_1 = 1,532$ m/s, $V_2 = 2,718$ m/s とすれば、真の眼軸長 (L) は

$$L = L_M + 0.436 T \dots\dots\dots(7)$$

となる。一方、1,550 m/s の設定音速で計る場合は同様に

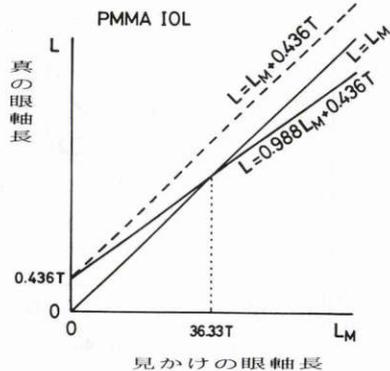


図 3 PMMA 製 IOL 移植眼での設定音速の相違による見かけの眼軸長と真の眼軸長との関係.

無水晶体眼の設定音速 (1,532 m/s) では、 $L = L_M$ の直線より上方に 0.436 T だけ平行移動する。つまり、見かけの眼軸長は常に過小評価される。有水晶体眼の設定音速 (1,550 m/s) では、勾配は 1 より小さくなり $L_M = 36.33 T$ で $L = L_M$ の直線と交差し誤差はゼロとなる。T は IOL の中心厚み。

$$L = 0.988 L_M + 0.436 T \dots\dots\dots(8)$$

となる。これら(7)および(8)式の関係を図3に示す。これより、1,532 m/sの設定音速で計れば、見かけの眼軸長は常に短く評価される。その量はIOLの中心厚み(T)の約44%である。一方、1,550 m/sの音速で計った場合は、測定対象によりその傾向は異なる。眼軸長が短い対象では短く、長い対象ではより長く評価される。(8)式と $L=L_M(45^\circ)$ の直線との交点は、 $L=L_M=36.33 T$ の場合であり、眼軸長がちょうどIOLの中心厚の36.33倍の場合のみ、1,550 m/sの設定音速で測定した値が真の眼軸長を与えてくれる。測定対象の眼軸長が36.33 Tより短い場合には見かけの眼軸長は短く評価され、36.33 Tより長い対象ではより長く評価される。PMMA製のIOL移植眼で従来の標準的な有水晶体眼の設定音速1,550 m/sで測定して比較的正しい値が評価できていたのは、眼軸長(L)とIOL中心厚(T)との組み合わせが $L=36.33 T$ の関係を満足する場合であったと考えられる。ちなみにLが24 mmの眼では、Tが0.66 mmのIOLの場合である。それ以外の場合には1,550 m/sの設定音速では正しい評価ができないことに留意すべきである。

3. シリコン製 IOL 移植眼での誤差

シリコン製のIOL移植眼では真の眼軸長よりも常に長く評価される。(4)式から、 $V_2=1,049$ m/s、 $V_M=$

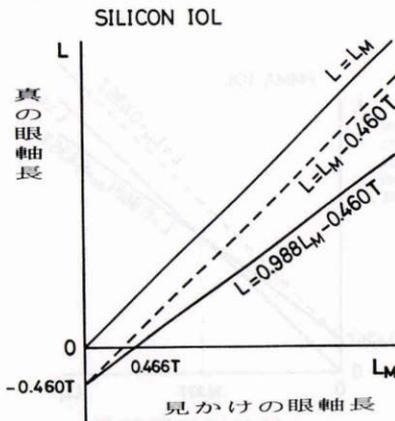


図4 シリコン製 IOL 移植眼での設定音速の相違による見かけの眼軸長と真の眼軸長との関係。

無水晶体眼の設定音速 (1,532 m/s) では、 $L=L_M$ の直線より下方に0.460 Tだけ平行移動する。つまり、見かけの眼軸長は常に過大評価される。有水晶体眼の設定音速 (1,550 m/s) でも勾配は1より小さくなり、さらに大きな誤差を伴って過大評価される。TはIOLの中心厚み。

$V_1=1,532$ m/sとすれば、

$$L=L_M-0.460 T \dots\dots\dots(9)$$

となり、 $V_M=1,550$ m/sを用いれば

$$L=0.988 L_M-0.460 T \dots\dots\dots(10)$$

となる。これらの関係を図4に示す。両者の直線はいずれも L_M が正の範囲で、 $L=L_M$ の直線より下方にくる。つまり、シリコン製のIOL移植眼では、1,532や1,550 m/sの従来の設定音速で測定すれば、いずれも長く評価されてしまう。無水晶体眼の設定音速1,532 m/sではIOL中心厚の46%だけ常に長く評価される。また、1,550 m/sの設定音速では眼軸長の増加につれてそれ以上の誤差を持ち込みより長く評価されてしまう。それらの量は眼軸長に換算して約0.3~0.6 mm以上に及ぶ大きな誤差を持ち込み、屈折の誤差に換算すれば、1~2 D以上にも及ぶと思われる⁹⁾。

IV 考 按

PMMA製やシリコン製のIOL移植眼では、眼軸長を過小・過大評価する危険性がある。その誤差の原因は、1 mm程度の薄いIOLであるが、材質によってはその超音波の音速が眼球組織の音速や測定装置の設定音速と大幅に異なるためである。したがって、眼球媒質と大幅に異なる材質のIOLを移植された偽水晶体眼では、音速値の相違に十分な留意が必要である。

PMMA製のIOL移植眼での等価音速値は約1,560 m/sであるが、図1に示したように、眼軸が長いほど、またIOLの中心厚が薄いほど等価音速値は小さくなる。当然のことながら、IOL中心厚がゼロに近くなれば、等価音速値は無水晶体眼の音速値1,532 m/sに近づく。PMMA-IOL移植眼の等価音速値(1,560 m/s)は白内障モードの測定音速値(1,550 m/s)と比較的近い値であるため、図3に示すように、比較的誤差は少なく、対象によっては過大評価されたり過小評価されたりする。無水晶体眼の設定音速値(1,532 m/s)で測定すれば、真の眼軸長よりも常に過小評価される。シリコン製のIOL移植眼では、図4あるいは(9)(10)式から、見かけの眼軸長は真の眼軸長よりも常に長く評価され、その誤差はIOL中心厚の約46%程度(1,532 m/s)、またはそれ以上(1,550 m/s)となる。シリコン製IOL移植眼での等価音速値は約1,500 m/s(T=1 mm)から1,490 m/s(T=1.3 mm)程度であり、図2に示したように、眼軸長が長いほど、またIOLの中心厚が薄いほど等価音速値は大きくなる。IOLの中心厚がゼロに近づけば、等価音速値は無水晶体眼の音

速値 1,532 m/s に近く、シリコンレンズの屈折率は PMMA 製より一般に低く、そのため同一パワーのレンズでもシリコン製の方が中心厚が厚くなるため、図 4 からわかるように等価音速値はより低い値に設定する必要がある。

最近小切開手術のためにシリコン製の IOL が用いられるようになってきているが、この材質の超音波音速は約 1,049 m/s であり⁹⁾¹¹⁾¹²⁾、眼内組織の音速値よりもかなり小さな値である。最近の Milauskas ら⁹⁾の臨床結果では、シリコン移植眼で眼軸長が平均 1 mm (0.70~1.55 mm) 過大評価され、IOL パワーの誤差が 3D にも及んでいる。Milauskas ら⁹⁾は、シリコン IOL 移植眼での等価音速値は 1,486 m/s、PMMA 移植眼では 1,548 m/s (ただし、PMMA の音速を 2,850 m/s としている) と報告している。また、Hoffer¹³⁾もシリコン-IOL 移植眼では 1,495 m/s、PMMA 製 IOL 移植眼では 1,548 m/s (0.5 mm IOL 厚み) に測定音速を変えるべきだと報告している。しかし、等価音速値は、眼軸長が大きいほど PMMA では小さく、シリコンでは大きくなる。また、IOL の中心厚が大きくなるほど、PMMA では大きく、シリコンでは逆に小さくなるため、測定対象によっては等価音速値を変える必要がある。

このような IOL 移植眼の等価音速値はあくまでも一つの目安であり、等価音速値を決めればどのような症例にも適用でき得るものではない。最も正確に眼軸長を評価するには、(1)式で示したように、眼内の各組織での超音波伝播時間にその音速を掛けて各媒質での長さを求めて合計することである。しかし、移植された IOL による反射エコーを前後面とも得ることは、IOL が薄くてしかもレンズ内での音速が大きいため (PMMA 製) かなり困難である。また、IOL の傾きや偏心の影響も無視できない。そのため、臨床的には偽水晶体眼の等価音速値を用いて測定するのが簡便であろう。しかし、この場合も PMMA (1,560 m/s) やシリコン (1,500 m/s) などの等価音速値の代表値ですべての症例に適用できるものではなく、IOL の中心厚や眼軸長の値に依存することに注意すべきである。

なお、今回の計算では、比較的単純な関係式で等価音速値を表現し、解析結果の見通しを良くする目的で、角膜の厚みを無視 (角膜と前房での超音波音速を等しいものと仮定) した単純モデルを考えた。角膜の厚みを考慮した場合と無視した場合の差は、超音波の伝播時間に $X_c/(1/V_c - 1/V_a)$ だけ誤差を含むことになる

(ただし、 X_c は角膜の中心厚み、 V_c 、 V_a はそれぞれ角膜および前房での超音波音速を示す)。角膜での超音波音速 (V_c) を 1,640 m/s、前房水での超音波音速 (V_a) を 1,532 m/s、角膜の中心厚み (X_c) を 0.5 mm とすれば、伝播時間の誤差は約 21.5 ns となり、角膜前面から網膜面までの伝播時間約 15~16 μ s に比較して 10^{-3} のオーダーとなる。角膜の厚みを無視したことによる等価音速値への誤差 (相対誤差) を見積れば約 0.14% である。ちなみに 1,550 m/s の音速の場合、角膜の厚みを無視したことによる音速値の誤差は約 2 m/s 程度含まれていることになるが、眼軸長への影響は約 0.03 mm 程度であり、臨床計測上は十分許容でき得るものと思われる。

偽水晶体眼の眼軸長を臨床的に簡便かつ正確に評価するには、移植された IOL の材質や中心厚があらかじめ判明している場合には、(4)式を用いて補正することが望ましいと考えられる。その際、無水晶体眼の設定音速値である 1,532 m/s を用いて測定し、その後 IOL の中心厚みで補正する方法が最も簡便で正確な評価ができる⁹⁾。

今回、IOL を移植された眼の眼軸長を市販の超音波 A モード装置で測定する際の設定音速値 (等価音速) について検討した。その結果、通常の PMMA 製 IOL (中心厚 1 mm) を移植された標準的な眼 (眼軸長がほぼ 24 mm 程度) では、等価音速値は約 1,560 m/s であり、またシリコン製の IOL 移植眼では、等価音速値は約 1,500 m/s 程度となった。しかし、等価音速値は、移植される眼の眼軸長や IOL 中心厚の他、IOL 材質中の音速値によって大きく異なるため、一義的に設定して使用できるものではなく、注意が必要である。正確には、1,532 m/s の無水晶体眼の設定音速で測定し、IOL の中心厚みを用いて補正する方法が望ましいと考えられた。

文 献

- 1) Binkhorst RD: The accuracy of ultrasonic measurement of the axial length of the eye. *Ophthalmic Surg* 12: 363-365, 1981.
- 2) Janssen F, Koch E: Determination of the velocity of ultrasound in the human lens and vitreous. *Acta Ophthalmol* 40: 420-433, 1962.
- 3) 所 敬: 眼科領域における超音波生体計測。太根節直 (編): 眼科 Mook, 25, 眼科における超音波診断, 金原出版, 東京, 186-198, 1985.
- 4) Holladay JT, Prager TC: Accurate ultrasonic biometry in pseudophakia. *Am J Ophthalmol*

mol 107: 189-190, 1989.

- 5) **Milauskas AT, Marney S:** Pseudo axial length after sllicon lens implantation as determined by ultrasonic scans. *J Cactract Refract Surg* 14: 400-402, 1988.
- 6) **魚里 博:** 超音波診断装置 (眼球計測用). 湖崎克, 他(編): 眼科器械の使い方. 第3版, 医学書院, 東京, 303-309, 1992.
- 7) **山本 節:** 小児白内障術後に見られる眼軸長と視力の変化. *眼科手術* 4: 461-465, 1991.
- 8) **山本 節:** 先天白内障術後の弱視と眼軸長. *眼科手術* 4: 639-644, 1991.
- 9) **魚里 博:** 眼内レンズ移植眼の超音波眼軸長計測

における誤差. *視覚の科学* 13(2): 34-38, 1992.

- 10) **志水敏夫, 牧野弘之, 魚里 博, 西信元嗣:** 偽水晶体眼の眼軸長測定における誤差. 第7回日本眼内レンズ学会講演抄録集, 66, 1992.
- 11) 日本超音波医学会編集: 超音波医学, 改訂第2版. 医学書院, 東京, 501-510, 594-604, 1979.
- 12) **Coleman DJ, Lizzi FL, Jack RL:** Ultrasonography of the Eye and Orbit. Lea & Febiger, Philadelphia, 91-141, 1977.
- 13) **Hoffer KJ:** Lens Power Calculation for Multifocal IOLs. In: Maxwell A, et al (Eds): Multifocal Intraocular Lenses. Slack Inc, Thorefare, 193-208, 1991.