

## 光学的方法による眼軸長測定法

奈良県立医科大学眼科学教室

平井 宏明

## OPTICAL AXIAL LENGTH MEASUREMENT

HIROAKI HIRAI

*The Department of Ophthalmology, Nara Medical University*

Received September 28, 1993

*Abstract*: In IOL power prediction, an error of axial length significantly affects the accuracy of implant power calculation. For the purpose of improving the accuracy of axial length measurement, a noncontact optical method for axial length measurement in cataract surgery was developed. Using a newly developed portable infrared autorefractometer (GR-M 3) and a contact lens, the author measured refractive states of aphakia just before IOL implantation in 54 cases. Ten measurements could easily be taken within 2 minutes. Using the ray tracing technique and a portable computer, refractive errors were converted into axial length immediately. Then IOL power calculation and IOL implantation were performed. The data of axial length acquired by this method are compared with data obtained from the conventional ultrasonic method. Between them, good correlation was obtained ( $r=0.981$ ). In 51 cases (94%), differences between the new method and the ultrasonic method were smaller than 0.35 mm. In 3 cases, differences were larger than 0.36 mm. In these cases, the axial length obtained with the ultrasonic measurements were shorter than results obtained with the optical method. The measured results were converted into calculated values based on ray tracing and were compared with refraction data after operation, revealing that the axial length acquired by the optical method was more accurately measured than by the ultrasonic method. This method may contribute greatly to measuring axial length at cataract surgery.

## Index Terms

measurement of axial length, noncontact method, portable infrared autorefractometer, measurement at surgery

## 緒 言

近年、高齢化社会の到来とともに白内障患者が増加し、その手術件数が激増している。水晶体除去後に生じる屈折異常を矯正する手段としては、眼鏡、コンタクトレンズ、眼内レンズがある。しかし、眼鏡では、周辺視障害、網膜像の拡大、不等像視、収差、視野制限などの問題点がある。また、コンタクトレンズでは、眼鏡の光学的欠点はほぼ解消できるものの、白内障術後で自身の手元を

明視できない患者が手元での洗浄、操作を要求されるコンタクトレンズを取扱うことの不便さがあり、保守、管理を十分に行わないと角膜疾患などの合併症をおこすという難点がある。一方、眼内レンズでは、除去した水晶体位置に近い部位に移植することで眼鏡に見られる光学的欠点を避けることができ、コンタクトレンズのような保守管理が不要という長所があるため<sup>1)2)3)</sup>、現在では、眼内レンズ移植が主たる矯正方法となっている。

移植する眼内レンズの度数は術後視機能に与える影響

が大きく、その決定には、幾何光学による理論式、SRK式に代表される回帰式、光線追跡法による方法などが慣用されている<sup>4)~8)</sup>。これらのどの方法を用いるにせよ、術前の眼軸長、角膜曲率半径、前房深度の測定値が必要であるが、これらの測定値の内、眼軸長の値が最も重要である<sup>9)</sup>。なぜなら、眼軸長の誤差1 mmあたり生じる術後屈折異常が2.3 Dと大きい上、現在、眼軸長測定に広く用いられている超音波測定法では、測定時に超音波プローブの角膜圧迫による変形や計算処理に用いる等価音速値により誤差が生じやすいためである。そこで、当教室で開発した手持ちオートレフラクトメーターを利用し、これらの誤差要因をなくし、非接触で良好な精度を発揮し、術中測定が可能な光学的手法による眼軸長測定法を考案し、従来法と比較しつつ臨床応用したので報告する。

## 方法と対象

### 1. 測定原理および測定装置

眼軸長は角膜前面から網膜面までの長さで決まる。一方、網膜位置は遠点と共役であると定義されるため、遠点の位置と眼の各屈折面の位置、屈折力がわかれば光線追跡法により網膜位置を知ることができ、眼軸長を求めることができる。遠点位置を知るには、眼屈折度の測定が必要である。眼球光学系を考えた場合、屈折度測定に際しては、空気と接する第1面が最も大きく影響する。これは面屈折力を決める因子である屈折面前後の媒質の屈折率の差が第1面で最大となるためである。このことは、たとえば、角膜前面を空気と接する第1面とする場合、屈折率の差は0.3771であるのに対して、房水と接する第2面である角膜内面では0.0397と1/10になり、曲率半径の変化による面屈折力の変化は前面が後面の約10倍となることから明らかである。このことは、逆に空気と接する第1面が最も誤差を持ち込みやすいことを意味している。術中の角膜の状態を考えた場合、縫合や手術操作により、角膜前面の曲率半径は変動し、さらには不整乱視が生じることが考えられ、この状態で眼屈折度測定を行うと誤差を持ち込む可能性が大きくなるばかりか、測定不能という事態も生じる。これらを回避するには空気と接する第1面を曲率半径が既知でしかも変化しないもので置き換え、角膜前面に接する媒質を角膜の屈折率に近い媒質(たとえば水)で置き換えればよい。この目的のため、ワンカーブハードコンタクトレンズを試作して使用した。ハードコンタクトレンズ使用により、角膜乱視が1/20に減少し、使用するコンタクトレンズのベースカーブを症例の角膜曲率半径に近いものにすることでさらに減少させることができ<sup>10)</sup>、さらに、実際の術中

の無水晶体眼の屈折度測定に応用して実用的であることが報告されている<sup>11)</sup>。本方法でも術中眼屈折度測定に際してはワンカーブハードコンタクトレンズを使用した。また、山内<sup>12)</sup>によると、眼圧が18 mmHg程度までは弾性により眼球が膨張することが示唆されており、測定時の眼圧により眼軸長が変動する可能性がある。豚眼を用いた基礎実験では、眼圧が5 mmHgから20 mmHgに上昇すると眼軸長が0.7%(0.15 mm)変化することがわかった。そのため、測定時の眼圧による影響を避ける目的で、測定直前に生理的食塩水を前房に注入し、眼圧を眼圧計(Barraquer's aplanation tonometer, Ocular社)で測定し、眼圧が10-15 mmHgの範囲にあることをまず確認した。その後、ワンカーブハードコンタクトレンズを角膜上に載せ、手持ちオートレフラクトメーターにて屈折度測定を行った。

### 2. 測定方法

測定結果(眼屈折度)から眼軸長を求める方法は次の通りである(Fig. 1)。得られた眼屈折度(aDとする)から、角膜前面より1/amの位置に遠点(点a)が存在する(一なら角膜前方、+なら角膜後方)ことがわかる。この遠点の共役点(点b)がコンタクトレンズ前面通過後、どの位置に存在するかを光線追跡法により求める。すなわち、遠点より発する光線束がコンタクトレンズ前面の面屈折力(曲率半径と曲面前後の屈折率の差で決まる)によりどう変化するかをvergenceの式より求める。vergenceの式は、ある屈折面に入射する光線のvergenceをU、面屈折力をD、屈折面から出てゆく光線のvergenceをVとするとき、 $U+D=V$ で表される<sup>13)</sup>。さらにこの点bのコンタクトレンズ後面に関する共役点(点c)を同様にして求める。以下、順次、角膜前面、角膜後面に対して同様にvergenceの式を適応してゆく。角膜後面通過後の共役点の位置が無水晶体眼の網膜位置となることから、角膜前面とこの共役点の距離から眼軸長を求める。媒質の屈折率としては、Gullstrand模型眼の数値を用いた<sup>14)</sup>(角膜1.376、房水1.336、硝子体1.336)。処理には光線追跡用に作成した計算プログラムをノートパソコン(PC-9800 NSR: NEC)に載せて使用した。

### 3. 対象および方法

対象は白内障患者54眼である。対象者において術前に角膜曲率半径、前房深度、従来法の超音波Aモードによる眼軸長測定を行った。術中の無水晶体眼の屈折度測定には、測定部をホルマリン消毒した手持ちオートレフラクトメーター(GR-M3: グランド精工)を使用した<sup>15)</sup>。嚢外摘出術で水晶体皮質吸引除去後、眼内レンズを移植する直前に生理的食塩水を前房に注入し、さらに眼圧を

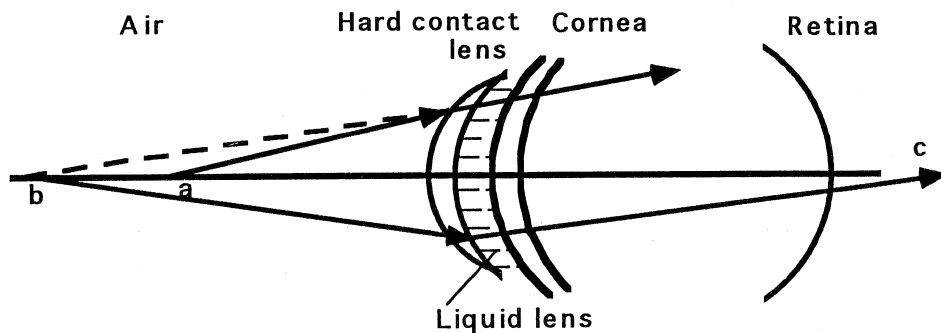


Fig. 1. The principle of the optical method for axial length measurement in cataract surgery. Using a newly developed portable infrared autorefractometer (GR-M3) and a contact lens, refractive states of aphakia just before IOL implantation were obtained and were converted into axial length by the ray tracing technique.

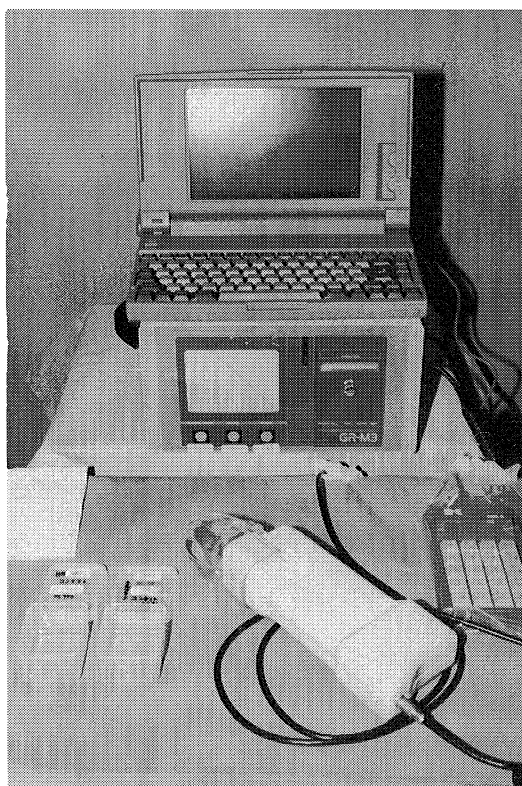


Fig. 2. The system of the optical method. Measuring devices were consist of a portable infrared autorefractometer (GR-M3), a contact lens (+13D) and a portable computer.



Fig. 3. Measurement at surgery. Ten measurements could easily be taken within 2 minutes.

眼圧計 (Barraquer's aplanation tonometer, Ocular 社) で測定し、通常眼圧 (10-15 mmHg) とした後、ワンカーブハードコンタクトレンズ (+13D, ベースカーブ 7.80 mm) を載せ、手持ちオートレフラクトメーターを用いて

眼屈折度を 10 回測定した (Fig. 2, Fig. 3)。解析には乱視の少ない順に 3 個の球面度数の平均値を用い、併置したノートパソコンで直ちに光線追跡法により眼軸長を求めて移植眼内レンズ屈折力決定を行った。術後、1-2 ヵ月後、角膜曲率半径、矯正視力、前房深度を測定した。

### 結 果

#### 1. 本法の理論上の誤差範囲

レフラクトメーターの精度は通常、0.25 D 刻みであることから、眼軸長としては最大で 0.10-0.14 mm の誤差要因となると考えられた。ハードコンタクトレンズの前面曲率半径の変化による眼軸長への影響は、シミュレーションの結果、0.05 mm 変化することにより生じる眼軸長の変化は約 0.25 mm であり、コンタクトレンズ後面の変動による変化は前面の 1/3 であった。ただし、ハードコンタクトレンズの曲率半径の変動に関しては、13 D という厚みのあるレンズを使用したことで変形が生じにくいため、ラジাসゲージによる予備実験では曲率半径の変化は 0.02 mm 以下にとどまり、眼軸長に及ぼす影響は 0.1 mm 以下と考えられた。手術時に、手術操作により 90 度方向の曲率半径が変化し、180 度方向と仮に 3 D の差をもった場合、ハードコンタクトレンズ使用により残存する乱視は最大 5% で 0.15-0.1 D 以下となり、眼軸長としては最大で 0.06-0.08 mm の誤差要因となると予想された。従って、0.3 mm を越える誤差は生じないと考えられた。

#### 2. 本法と従来法(超音波 A モード)による眼軸長測定結果.

術中屈折度を 10 回測定し、ノートパソコンにより眼軸長を得るのに要した時間は約 4 分以内であり、測定は容易であった。感染など問題となった症例はなかった。対象とした 54 眼における結果を Fig. 4 に示した。同一症例に対する本法による結果と超音波による結果の相関係数は 0.981、差の平均値 -0.04、標準偏差 0.23 であった。両者の差が ±0.35 mm 以内であったものは 51 例 94% であった。両者の差の分布を Fig. 5 に示した。0.36 mm 以上の差を生じた 3 症例はいずれも光学的方法による測定値が超音波による測定値より大きい値となっていた。おのおのの測定値からの術後屈折度予測値と実際の術後の屈折度を Fig. 6 に示した。

### 考 察

#### 1. 眼軸長測定で誤差が生じた場合の最終度数への影響

角膜前面曲率半径 7.7 mm、術後前房深度 4 mm で A 定数 117.5 のいくつかの度数の眼内レンズを移植した場合の術後屈折異常と眼軸長の関係を Fig. 7 に示す。例え

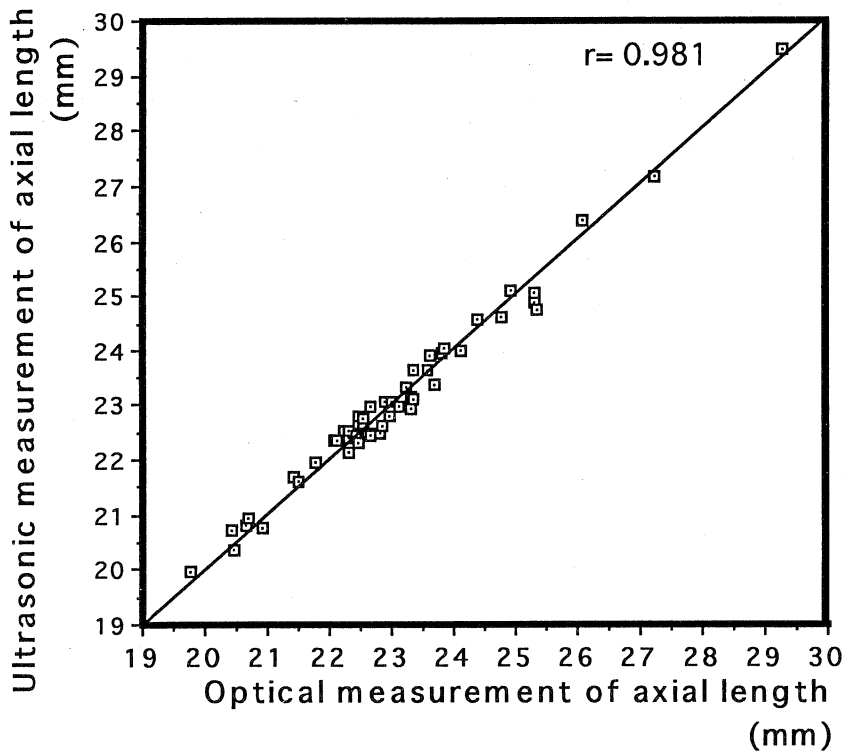


Fig. 4. A comparison of axial length measurements between this optical method and the conventional ultrasonic method. Good correlation was obtained.

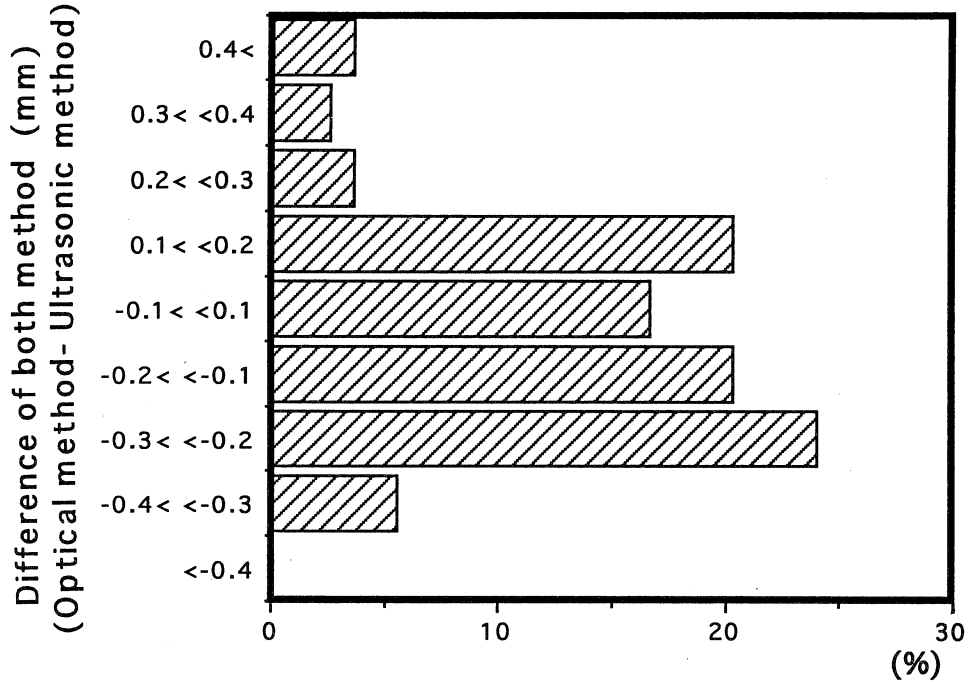


Fig. 5. A distribution of differences between the optical method and the ultrasonic method.

ば、患者の眼軸長が  $x$  mm で術後屈折異常として  $y$ D を期待するならば、対応する  $x$  の点で立てた垂線と、 $y$  の点で引いた水平線との交点に最も近いところを通る度数の眼内レンズが選択されることを意味している(実際の眼内レンズは 0.5 D 刻み)。従って、例えば、術後正視を期待するならば、0 D を通る水平線と患者の眼軸長との交点に最も近い眼内レンズが選ばれる。この時、真の眼軸長が測定値より短ければ、術後屈折異常は遠視側に、長ければ近視側に变化する。眼軸長の誤差量あたりの屈折異常の変化量は、各眼内レンズの曲線が水平線を切る傾きで表される。この傾きは Fig. 7 からわかるように眼内レンズ度数が大きいくほど大きくなる。術後眼屈折度の期待値からのズレは 0.3 mm の眼軸長の誤差あたり、8 D, 12 D, 16 D, 20 D, 24 D, 28 D の眼内レンズで 0.54 D, 0.64 D, 0.73 D, 0.82 D, 0.91 D, 1.02 D となる。従って、強い眼内レンズ度数使用時ほど眼軸長測定誤差の影響は大きくなるため注意が必要である。

2. 本法と従来法(超音波Aモード測定法)による眼軸長測定結果の比較

両者の相関係数は 0.981 と高く、ほぼ同一の値が得られている。両者の差が  $\pm 0.35$  mm 以内のものが 51 例 94% であったこともこのことを示している。両者の差が 0.36 mm 以上あった 3 症例について術後屈折度から検

討した結果、Fig. 6 から明かなように、本法の方が優れているという結果が得られた。これらの例の超音波測定で眼軸長が本法より短く測られた理由として、白内障が著明なことにより、視軸を通る測定が出来なかった可能性が最も考えられた。このことは逆に、固視するという患者の協力が得られない場合には、本法が優れていることを示していると考えられた。

3. 従来法に対する本法の長所

従来の眼軸長測定では、通常 10—15 MHz の超音波 A モードで測定される。注意点として次の点があげられる。1) 本来白内障で見えない眼を計測するため固視の確認が困難であり、視軸からずれていた場合には、誤差要因となる。2) 測定時にはプローブを角膜に接触させる必要があるが、松浦らによりプローブの圧迫による眼軸長測定値への影響が指摘されている<sup>16)</sup>。また、Shammus らによると<sup>17)</sup>、角膜接触による測定で平均 0.24 mm, Hoffer<sup>18)</sup> によると 0.33 mm 眼軸長が短く測定されると報告されている。3) 眼内の媒質により超音波の音速が異なるにもかかわらず、角膜、房水、水晶体、硝子体の音速を等価音速値で代表させていること、さらに、加藤ら<sup>19)</sup>が指摘しているように、諸種の白内障を有する水晶体の音速を一定としており、白内障による諸種の変化は加味されていない点が測定精度に影響を及ぼす可能性がある。そのた

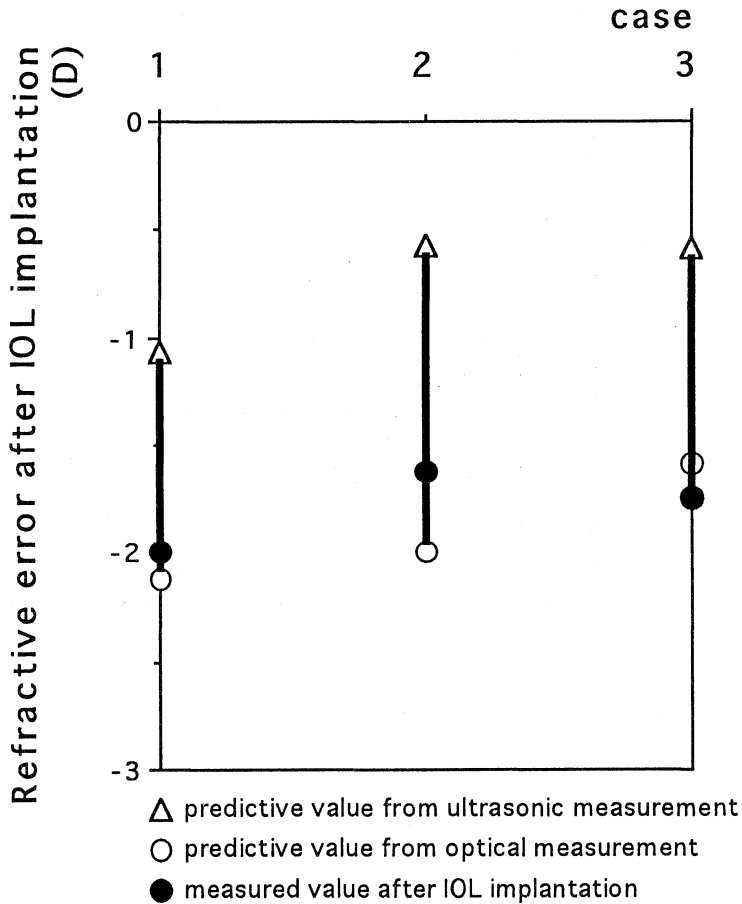


Fig. 6. In 3 cases, differences were larger than 0.36 mm. Predicted refractive error from the optical method and ultrasonic method were compared with refractive data after operation. The accuracy of the optical method was better than that of the ultrasonic method.

め、超音波測定での誤差は1)0.5% 2)0.24—0.5 mm 3)0.05 mm とされ、従って測定誤差は約0.3 mm 以上と考えられる<sup>20)</sup>。一方、本法では、圧迫による誤差は回避でき、モニター観察により、瞳孔中心にて測定を行うため極端な視軸からのずれも回避しうる。さらに、本法でも、媒質の屈折率を仮定しているが、関与する媒質は角膜、房水、硝子体のみであり、年齢、病状により変化する可能性が大きい水晶体を回避できている。さらに、角膜、房水、硝子体の屈折率は、1.375—1.388, 1.335—1.337, 1.335—1.337 とされ、屈折率0.001 当りの眼軸長への影響は、それぞれ、0.008 mm, 0.04 mm, 0.04 mm であり、測定精度への影響は小さいと考えられる。

#### 4. 本法の実施上の注意点

測定実施時の注意点として、次の2点がある。

- 1) ハードコンタクトレンズを瞳孔中心に置く。

測定時のハードコンタクトレンズとして+13 D のレンズを使用した。これはより良い精度の値を得る点から手持ちオートレフラクトメーターの測定レンジ±20 D の中心付近を使用するという意味と、薄いレンズでは変形による曲率半径の変動の可能性があり、これを避ける意味からである。しかし、逆に厚いレンズでは、レンズが瞳孔中心とずれると乱視が持ち込まれる。たとえば、+13 D のハードコンタクトレンズが2 mm だけ90度方向にずれた場合をシミュレーションすると、90度方向の屈折率はほとんど変化せず、180度方向で0.20 D 変化する。誤差の点からの寄与は大きくないが、角膜乱視の状態によってはさらに大きくなる可能性がある。誤差の介入を防ぐという点から、測定時、ハードコンタクトレンズ位置が瞳孔中心とずれないように心がける必要があると考えられる。

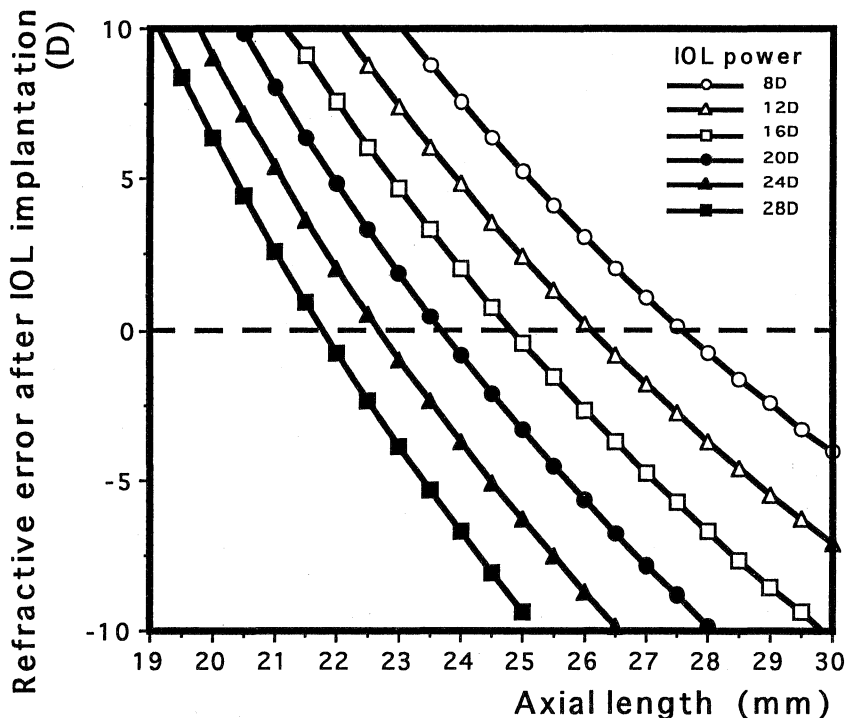


Fig. 7. An influence of an error of axial length to the refractive error after IOL surgery.

2) 極端な低眼圧を避け、測定前に前房に生理食塩水を注入するなど、通常眼圧下で測定する。

手術時には前房が一度、開放されており、仮に虚脱時のような極端な低眼圧下であれば、眼球が通常の形態から変形しており、測定値の信頼性が著しく損なわれる。しかし、この状態は、容易に認知でき、通常、測定時は水密下と考えられるため前房に生理食塩水を注入することで回避することができる。一方、眼圧の変化による眼軸長の変化の可能性に関しては、豚眼を使用した基礎実験では、眼圧の変化による眼軸長の変化は、5から20 mmHgへの眼圧上昇に対する眼軸長の変化は0.7% (0.15 mm)にすぎなかった。しかし、よりよい値を求める点からは、通常眼圧下に置くことが望ましいと考えられた。

### 結 語

移植眼内レンズ屈折力の予測精度に最も影響を与えると考えられる眼軸長測定の精度を向上させる目的で、光学的手法による非接触術中眼軸長測定法を開発した。この方法は、白内障術中に無水晶体眼の屈折度を当教室開発の手持ちオートレフラクトメーターで測定し、その値か

ら遠点を求め、遠点から発した光線を追跡することで網膜位置を決め、眼軸長を求める方法である。屈折度測定には手持ちオートレフラクトメーターを使用し、最も精度に影響する空気と接する第1面の影響を避けるためハードコンタクトレンズを用いた。ハードコンタクトレンズ使用により、術操作による不整乱視や角膜曲率半径の変動による眼軸長測定への影響を著しく軽減することができた。測定から眼軸長をきめるまでに要した時間は4分以内であり、手術の進行に影響をほとんどおよぼさなかった。この方法は超音波測定で生じる圧迫による誤差、音速仮定による問題点を回避でき、通常の症例に加え、乳幼児や外傷性白内障など術前に従来の方法による眼軸長測定が困難な例にも適用でき、さらに、従来の超音波による測定と同等の精度で測定できることが確認できた。さらに、患者の固視が困難な例では超音波測定法より優れた精度をもつことがわかった。本法は、移植眼内レンズ屈折力決定の精度向上に大きく寄与できると考えられた。

謝辞：稿を終えるにあたり、終始かわらぬ御指導、御校閲を賜った恩師西信元嗣教授に深く感謝の意を捧げる

とともに、御助言、御校閲を賜った第2生理学教室榎 泰義教授、ならびに耳鼻咽喉科学教室松永 喬教授に深謝致します。さらに、本研究を行うに当り絶えず有益な御助言、御助力を頂いた眼科学教室原 嘉昭助教授、魚里博講師、原 徳子助手に衷心より厚くお礼申し上げますとともに、御協力いただいた教室諸兄に感謝致します。

## 文 献

- 1) 所 敬：白内障. 眼科 Mook. Vol 17, 金原出版, 東京, p113, 1982.
- 2) 魚里 博：応用物理 54: 1039, 1985.
- 3) 江口甲一郎：眼内レンズ. 眼科 Mook. Vol 147, 金原出版, 東京, p13, 1992.
- 4) Fyodorov, S. N., Galin, M. A. and Linksz, A. : Invest. Ophthalmol. 14: 625, 1975.
- 5) Van der Heijde G. L. : Ultrasonogr. Ophthalmol. 83: 273, 1975.
- 6) Binkhorst, R. D. : Ophthalmol. Surg. 6: 17, 1975.
- 7) Sanders, D. R. and Kraff, M. C. : J. Am. Intraocul. Implant. Soc. 6: 263, 1980.
- 8) Sanders, D. R., Retzlaff, J., Kraff, M., Kratz, R., Gills, J., Levine, R., Colvard, M., Weisel, J. and Loyd, T. : J. Am. Intraocul. Implant. Soc. 7: 337, 1981.
- 9) 所 敬：眼科における超音波診断. 眼科 Mook. Vol 25, 金原出版, 東京, p186, 1985.
- 10) 平井宏明, 魚里 博, 西信元嗣：日本コンタクトレンズ学会誌. 35: 98, 1993.
- 11) 平井宏明, 原 徳子, 魚里 博, 原 嘉昭, 西信元嗣：眼科手術 5: 463, 1992.
- 12) 山内愛造：眼科手術 3: 485, 1990.
- 13) 西信元嗣：眼光学の基礎. 金原出版, 東京, p21, 1990.
- 14) Duke-Elder, S. : System of Ophthalmology. Vol. 5, Ophthalmic Optics and Refractdon, C. V. Mosby, St. Louis, p115, 1970.
- 15) 平井宏明, 魚里 博, 西信元嗣：日本眼科学会誌. 97: 752, 1993.
- 16) 松浦豊明, 魚里 博, 平井宏明, 仁木純子, 西信元嗣：IOL. 3, 1989.
- 17) Shammus, H. J. : J. Am. Intraocul. Implant. Soc. 10: 444, 1984.
- 18) Sander, D. R. : Anterior Segment Surgery. Williams & Wilkins, Baltimore, p43, 1987.
- 19) 加藤桂一郎, 梶田雅義：眼内レンズ光学上の問題点. 眼科 Mook. Vol 47, 金原出版, 東京, p34, 1992.
- 20) 所 敬：臨床眼科 35: 1391, 1981.