

# 眼の光学特性と視力矯正

魚 里 博

## Optical Properties of the Eye and Vision Correction

Hiroshi UOZATO

Proper understanding of optical properties of the eye is important to evaluate visual functions and to correct refractive anomalies and vision loss. We review the unique properties of the eye's optical system. Influence of optical components (refractive parameters) change upon the resultant refractive states are analyzed. For more accurate correction, recent refractive and cataract surgeries should be performed based on the proper understanding of optical properties of the eye. Noninvasive measurement of optical components of the eye with optical technologies will be contribute to the more accurate vision corrections in near future.

**Key words:** optical system of the eye, optical properties of the eye, visual system, visual function, vision correction

眼の光学系はカメラのそれによく例えられるが、厳密には多くの点で異なっている<sup>1-4)</sup>。ヒトの眼の光学系を正しく理解しておくことは、眼科臨床での検査や治療・手術だけでなく人工的な視覚系の構築、視覚代行やマシンビジョンへの応用、さらには臨床検査機器の開発・視覚実験を行う上でもきわめて重要である。眼の光学系の一般的な特性だけでなく、通常のカメラなどの光学系と異なる特殊性についても言及するとともに、最近の眼内レンズや屈折矯正手術による視力・屈折矯正についてもふれる。

### 1. 眼球光学系の特殊性

眼の光学系の特徴の代表的なものは、非共軸、非球面、偏心光学系であるとともに、屈折率分布型レンズや像面の湾曲、像空間の屈折率が物空間と異なることなどがあげられる<sup>1)</sup>。このような眼球光学系の特殊性を考慮して、視機能評価や眼科手術を行うことが大切である。

#### 1.1 非共軸

眼のレンズは角膜と水晶体であるが、この2つのレンズの光軸は一般に一致していない。わずかであるが数度程度

の角度ずれが存在している。上下方向よりも水平方向に角度がついている。臨床的には光源の反射像であるブルキンエ・サンソン (Purkinje-Sanson) 像を観察すれば角膜と水晶体レンズの前後面反射像がずれて観察されることからも明らかである。また水晶体は屈折率分布型レンズであることと、眼の視軸（固視点と網膜中心窩を結ぶ軸）方向が眼球の光軸とは異なることもいっそう複雑にしている（図1）。そのため、眼の光学系はカメラのような共軸光学系ではなく、非共軸光学系であるといえる<sup>1,5)</sup>。

#### 1.2 非球面

眼球光学系の屈折面、つまり角膜や水晶体の前後面カーブは単純な球面ではない。特に角膜の表面形状は、コンタクトレンズの処方上古くから調べられており、中央部のステップなカーブから周辺部のよりフラットなカーブへ漸次移行していくような非球面形状であり、眼の球面収差補正に役立っている。図2のように、非球面係数Q値で示せば、ヒトの角膜表面は約-0.26程度の非球面性を有しており、角膜中央部の曲率半径RとQ値の間にはほぼ $R = 0.22 Q + 7.78$ の関係があるといわれている<sup>5)</sup>。また、水晶体

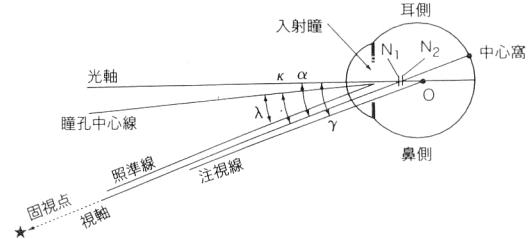
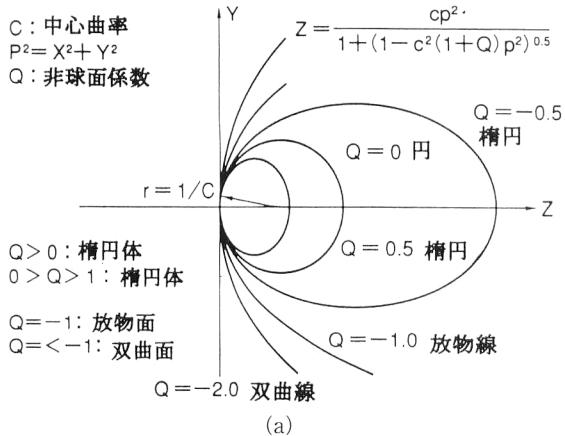


図1 眼球における各種参照軸と角度。N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>: 第1および第2節点, O: 眼球回旋点（角度は実際よりも誇張して描いてある）。



(a)

出典 (年)	非球面係数 (Q 値)
Holden (1970)	-0.4 CL 計算
Lotmar (1971)	-0.286
El Hage & Berny (1973)	+0.16
Townsley (1970)	-0.16 to -0.81
Mandell & St. Helen (1969)	-0.04 to -0.72
Kiely <i>et al.</i> (1982)	-0.26 +/- 0.18 (r=7.72 +/- 0.27, n=176 eyes)

(b)

図2 角膜の非球面性。(a) 非球面係数 (Q 値), (b) 人眼角膜の Q 値。

も角膜と同様に周辺部のカーブが緩やかな非球面形状であり、水晶体の屈折率分布と相まって眼球の球面収差補正に役立っている。

角膜の後面形状については、従来から臨床評価は難しかったが、最近の新しい角膜形状解析装置 (ORBSCAN™) により角膜厚み分布とともに評価できるようになっている<sup>6)</sup>。このことは最近のレーザー屈折矯正手術後の薄くなった角膜の前方変位（矯正効果の戻り）等にも応用され始めている<sup>7)</sup>。水晶体の形状についても光学的なスリット像による前眼部解析装置などの普及で臨床評価が進んでいる。人工的な眼内レンズの位置異常の計測や眼調節機能の他覚的な評価にも重要である<sup>8,9)</sup>。

### 1.3 偏心

角膜や水晶体のレンズ光軸が共軸になっていない非共軸

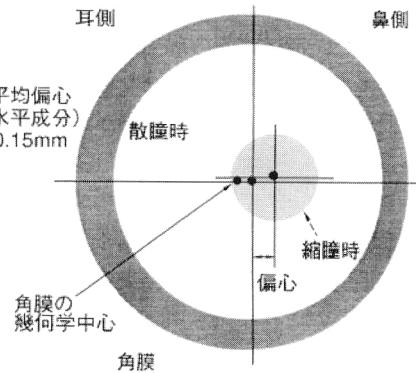


図3 瞳孔サイズによる瞳孔中心の偏位ならびに角膜の幾何学的中心との関係。瞳孔中心はわずかに鼻側にずれており、特に縮瞳時に顕著。

であることとも眼の光学系の特徴であるが、われわれの眼の視力が最も高い部位（網膜の黄斑中心窩）が後極部に限局していることも大きな特徴である。そのため、網膜がカメラのフィルムのような一様な解像力をもつのではなく中心窩がきわめて高い視力分布を有している。

この中心窩が眼軸あるいは眼の光軸上にあるのではなく、それよりも耳側に偏心しており、また瞳孔の中心も角膜レンズの幾何学的中心からわずかに鼻側に偏心している（図3）<sup>1,5)</sup>。このことは眼の視軸方向が両眼とも内側に向いていることを示している。後述するが、この光軸と視軸方向のずれは生理的な斜視角であるが正常人でも約3~6°程度の傾きが存在している<sup>1)</sup>。

さらに、瞳孔の縮瞳・散瞳状態によっても瞳孔中心はわずかではあるが偏位する。縮瞳時には鼻側へ、散瞳時には耳側へ偏位して角膜の幾何学中心へ近づく<sup>5,7)</sup>。

### 1.4 屈折率分布型レンズ

水晶体の屈折率が場所的に分布することはよく知られており、中心部の水晶体核質部で1.41、皮質部は1.38程度で周辺部から中心に向かって連続的に屈折率勾配が認められる<sup>1,2)</sup>。しかし、屈折率の差はたかだか0.03程度である。この屈折率分布は非球面形状と相まって眼の収差補正に役立っており、等質のレンズよりも屈折力を高める働きもある。またこのような屈折率分布は前房（あるいは硝子体）から水晶体への屈折率差を少なくし、ひいては表面での反射損失の軽減にも役立っている。

一方角膜については、その中心厚みが約0.53 mmと薄いため均質な屈折率を考える場合が多い。しかし、角膜レンズもその光軸方向に屈折率勾配があることが指摘されている。角膜上皮側の実質組織は約1.38、内皮側の実質は1.373と低くなっている<sup>10)</sup>。これは実質組織の含水率の影響が大きいものと考えられている。角膜上皮組織の屈折率は約

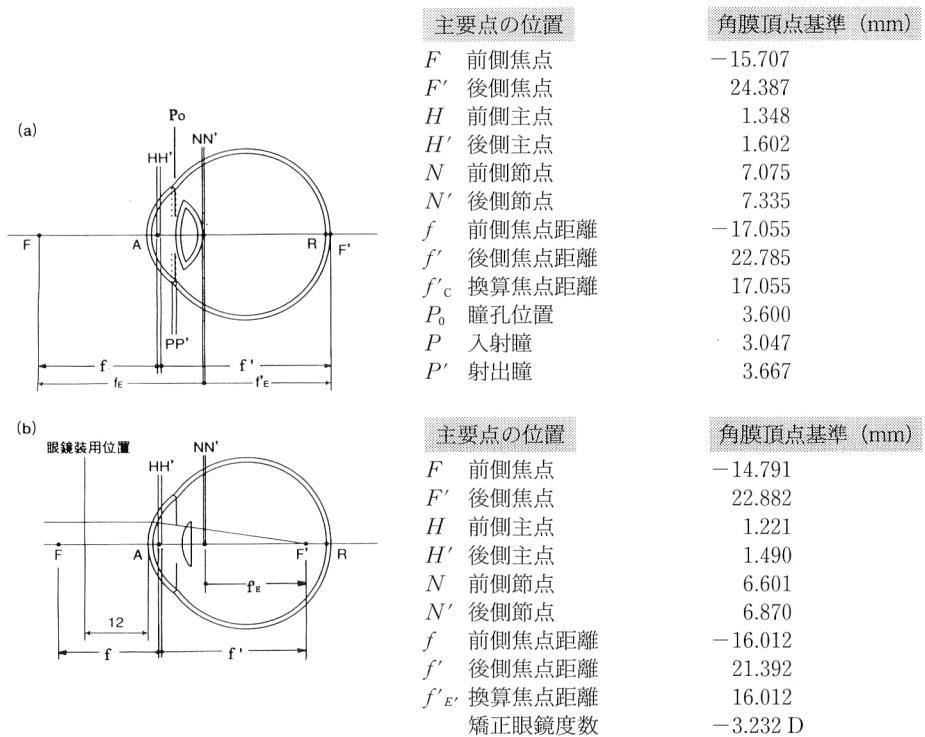


図4 有水晶体眼 (a) と偽水晶体眼 (IOL挿入眼) (b) の主要点の比較 (Gullstrandの精密模型眼を使用).

1.41と実質よりも高いが、空気との界面にほぼ水に近い屈折率の涙液層があり光学的には平滑面の維持と表面反射損失の軽減にも役立っている。

### 1.5 像面湾曲

網膜面は、半径約12 mm程度のほぼ球面を形成しており、カメラのフィルムや撮像面のような平面ではない。そのため像面湾曲や非点収差の影響が比較的少ない光学系となっている。

### 1.6 像空間の屈折率

眼の光学系では像が形成される空間の屈折率がほぼ1.336程度あり、物体空間の空気の屈折率と大きく異なっている。そのためカメラやメガネのような光学系とは大きく相違点が生じる理由にもなっている。厚肉レンズの主要点は主点、節点、焦点それぞれ2つずつ都合6つを考えなければならない。しかし空気中におかれたレンズでは主点と節点は同一平面内にあるため都合4つ考えればよい。眼球は眼内の屈折率が空気と異なり、ほぼ水に近い屈折率であるため、主点位置（角膜頂点より約2 mm）と節点位置（角膜頂点より約7 mm）は異なり、前側焦点距離（約17 mm）と後側焦点距離（約22 mm）は大きく異なる<sup>11,12)</sup>。図4には代表的な模型眼を有水晶体眼と偽水晶体眼（眼内レンズ挿入眼）<sup>12)</sup>について示す。

## 2. 眼球モデル

眼球光学系の屈折要素の実測値あるいはそれに近い値を基準にして標準的な数値モデルを作製したものを模型眼といい、それをさらに簡略化したものを省略眼とよんで区別する場合がある<sup>1-4)</sup>。模型眼の代表的なものには、Gullstrandの模型眼、HelmholtzやLeGrandの模型眼がある。これらのモデルは基本的に、屈折面は球面で共軸を仮定し屈折率分布を考慮していない（Gullstrandの精密模型眼では水晶体の核質と皮質の屈折率を考慮している）。最近では、屈折面の非球面性や水晶体の屈折率分布を考慮したモデル<sup>13-17)</sup>もいくつか登場しているが必ずしも普及しているわけではない。

## 3. 屈折要素の測定とその影響

眼の屈折状態を決定するには、屈折面の曲率半径と位置および屈折率の第1次屈折要素の決定が必要である。眼の主要点や屈折力などの2次的な屈折要素は計算で求めることができる。生体眼での臨床的な測定は難しいが、角膜と水晶体の前後面曲率半径はブルキンエ・サンソン像や光学的なスリット画像から計測され、角膜厚みや前房深度は超音波あるいは光学的な方法で、また眼軸長も主に超音波での臨床計測が行われているが、最近では光波干渉による非接触眼軸長測定装置も登場しつつある<sup>18)</sup>。ただし、光学式では眼内媒質の屈折率を仮定して用い、超音波でも仮定し

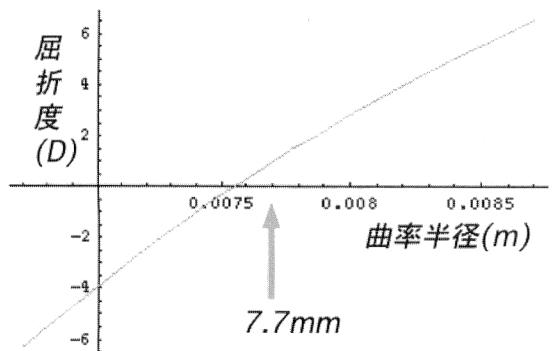


図5 角膜前面曲率半径の変化に伴う屈折度への影響.

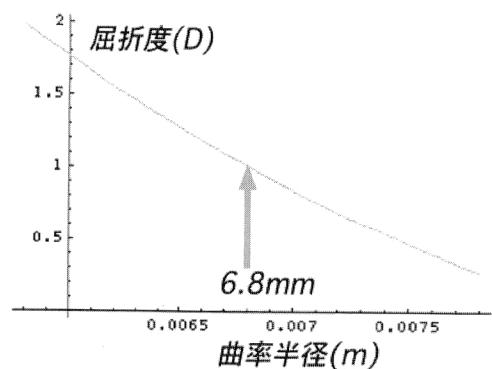


図6 角膜後面曲率半径の変化に伴う屈折度への影響.

た一定音速値を用いる必要がある。

### 3.1 曲率半径の影響

角膜前面は解剖学的に屈折の第1面であるため、その影響は大きく最近の屈折矯正手術の主たる矯正対象となっている。近視矯正では角膜前面中央部がよりフラットになるように角膜実質組織を凸レンズ状に切除し、遠視矯正では逆にスティープな形状になるように凹レンズ状に切除している。図5には、角膜表面曲率半径のみを球面切除により修正する場合の屈折異常矯正の程度を示すが、角膜だけ矯正できる範囲はそれほど大きくなことがわかる。これは現在のPRK (photorefractive keratectomy) やLASIK (laser in situ keratomileusis) による角膜を舞台とした屈折矯正の原理であり、角膜表面をフラット化すれば近視矯正、スティープ化すれば遠視矯正ができる。曲率半径1 mm当たりの変化で約6 D程の矯正効果となる。しかし角膜の中心厚はたかだか0.5 mm程度であるため、必然的に切除限界（最大切除深度は約100 μm程度）が存在し角膜表面の曲率修正はたかだか数D程度までである。

また角膜の後面曲率半径に至っては、たとえ曲率を修正できたとしても矯正効果は大きく望めないことがわかる（図6）。後面曲率半径1 mmの変化で約-1 Dの影響がある。

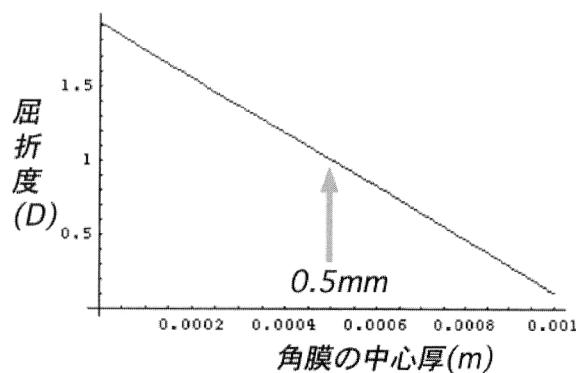


図7 角膜厚の変化に伴う屈折度への影響.

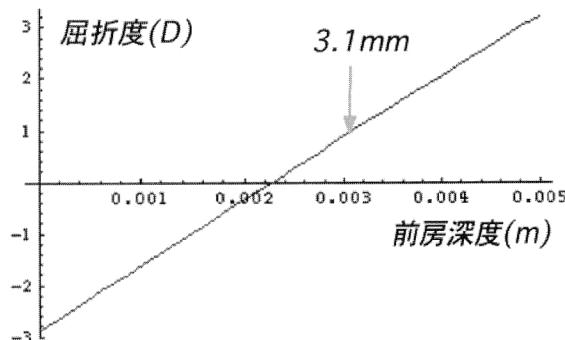


図8 前房深度の変化に伴う屈折度への影響.

水晶体の曲率半径は、調節（眼のピント合わせ）機能により特に前面の曲率半径とその中心厚が大きく変わる。後面の位置と曲率半径の変化は少ない。人為的に水晶体の曲率半径を矯正できたとしても屈折異常矯正の効果はそれほど大きくなれない。

### 3.2 屈折面位置の影響

眼の屈折状態に影響するものとして、角膜厚、前房深度、水晶体厚、硝子体長あるいはこれらの総計である眼軸長がある。

角膜厚の変化による屈折への影響は小さく、0.1 mm当たり約0.16 D程度の影響しかないが、単純に厚くなれば近視化し、薄くなれば遠視化する（図7）。

前房深度（角膜と水晶体のレンズ間距離に関する）は眼の調節によっても影響を受けるが、水晶体（あるいは眼内レンズ）の前後移動によっても屈折への影響が出る。前房深度が1 mm変化すると約+1.16 D程度の屈折への影響が出る（図8）。前房深度が深くなれば遠視化し、浅くなれば近視化する。

硝子体長あるいは眼軸長は、眼の屈折度に大きく影響する重要な因子であり、臨床的には超音波Aモードによる眼軸長測定が普及している。硝子体腔長のみが変化した場合の屈折への影響は1 mm当たり約2 Dである。長くなれば

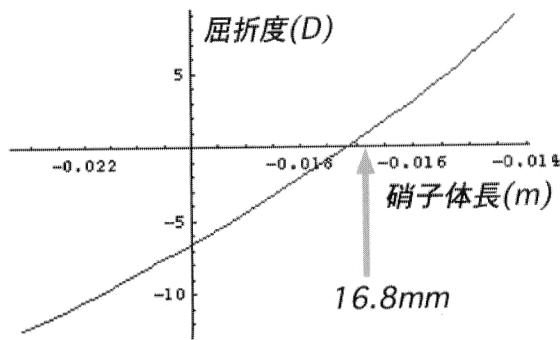


図9 硝子体長の変化に伴う屈折度への影響。

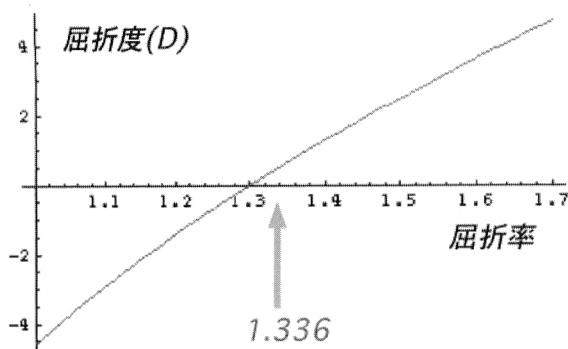


図10 角膜屈折率の変化に伴う屈折度への影響。

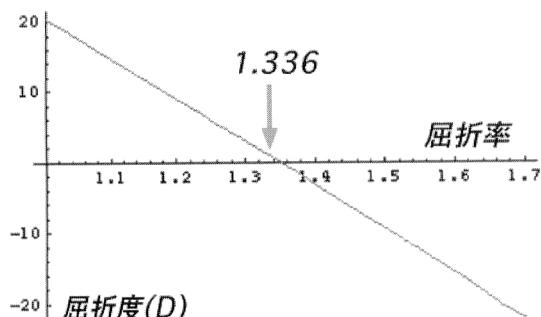


図11 前房屈折率の変化に伴う屈折度への影響。

近視化し、短くなれば遠視化する（図9）。

### 3.3 屈折率の影響

眼内組織の屈折率は実測が困難であるので模型眼などの値を定数的に使用している。しかし眼内での屈折率が一定である保証は何もない。また最近の眼科手術のように人工的なレンズや物質にて置換する場合もある。眼内組織の屈折率が変化した場合の屈折への影響は重要である。

角膜屈折率はほぼ実質組織の屈折率 1.336 度を仮定して用いている。この屈折率が変化した場合の影響は比較的大きく、0.1 の屈折率変化で約 1.3 D の屈折への影響がある（図10）。

前房水の屈折率はほぼ 1.336 度できわめて安定しているが、この屈折率の影響は大きく、0.1 の屈折率変動で約

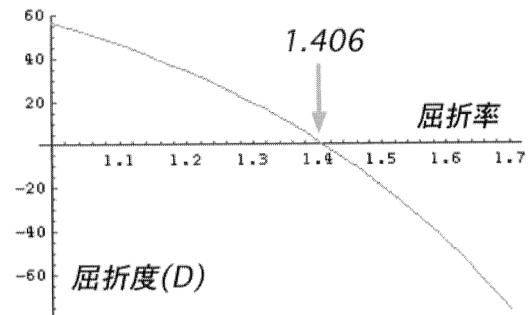


図12 水晶体核質の屈折率変化に伴う屈折度への影響。

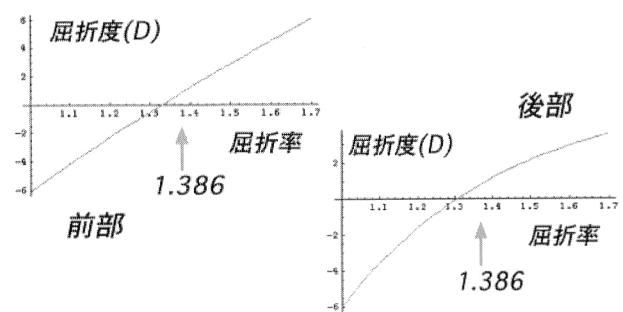


図13 水晶体皮質の屈折率変化に伴う屈折度への影響。

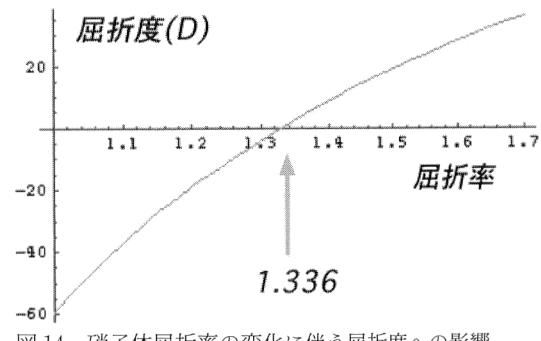


図14 硝子体屈折率の変化に伴う屈折度への影響。

-5.7 D の屈折への影響が出る（図11）。屈折率が上がれば近視化し、下がれば遠視化する。

水晶体は本来屈折率分布型レンズであるため、一様な屈折率で仮定することには問題があるが、図12には水晶体核質の屈折率が変化する場合の屈折への影響を示した。核質屈折率 0.1 の変動で約 -20 D の影響が出る。一方皮質屈折率の影響はきわめて小さく屈折率 0.1 の変動で約 2 D の影響である（図13）。

硝子体屈折率の影響はきわめて大きい。図14に示すように、屈折率 0.1 の変動で約 13 D の影響が出る。

外界の屈折率の影響もきわめて大きい（図15）。空気中でほぼ +1 D の遠視から水中屈折率の +45 D まで遠視化する。外界の屈折率 0.1 の変動当たり約 12 D の変化となる。

以上のことから、矯正範囲の大きさから考えれば水晶体

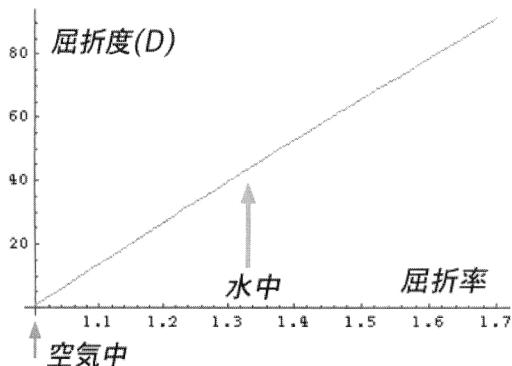


図15 外界屈折率の変化に伴う屈折度への影響。

核質の屈折率、硝子体あるいは外界の屈折率が制御できれば、屈折矯正が理論的には可能である。現在の角膜を舞台とした屈折矯正手術は大部分が角膜の曲率修正を目指したものであるが、眼内レンズのように人工のレンズを眼内に移植して高度の屈折矯正を目指す方法もある (ICL (implantable contact lens), Phakic IOL (intraocular lens))<sup>19)</sup>。

#### 4. 白内障・屈折矯正手術

白内障に伴う眼内レンズ移植手術も従来の開眼的な手術からよりよい視機能を目指した屈折矯正手術となりつつある。従来の単焦点眼内レンズだけではなく、シリンドーIOLや多焦点IOL(遠近両用など)、モノビジョン法(片眼を遠方、片眼を近方にする方法)も利用されているが、本来の調節機能が喪失している欠点はまだ十分に解決できていない<sup>8,11,12)</sup>。将来自動焦点眼内レンズあるいは水晶体そのものの再生により本来の調節機能を取り戻すような手術方法も切望されている。詳細は後述の眼内レンズの解説<sup>20)</sup>を参照されたい。

一方、屈折矯正手術は従来のRK, PRKからLASIKに主流が変遷してきているが<sup>5)</sup>、最近の波面解析の登場で眼球波面収差の臨床評価が進みつつあり<sup>21,22)</sup>、そのデータを元に角膜切除を行ういわゆるcustomed ablationあるいはwavefront guided LASIKなども可能になりつつある。単に屈折異常(近視、遠視や乱視)だけでなく、不正乱視(円柱レンズで矯正できない乱視)や高次の波面収差までも矯正できるようになってきた。これらの波面収差の測定やレーザーによる屈折矯正手術に関しては後述の解説を参照されたい。

白内障や屈折矯正手術の術後の眼はほぼ正常な正視眼に近くなるが、厳密には大きな相違も現れる。つまり全屈折力はほぼ60D程度となるが、屈折面の曲率や屈折面位置あるいはレンズの屈折率、分光透過率なども大きく異なることに留意すべきである<sup>8,11,12)</sup>。

このように眼の波面収差の臨床評価やそのレーザー矯正が可能になることは、術後の視機能が従来の矯正よりもよりよい視機能を提供できる可能性も高い<sup>21,22)</sup>。従来の屈折矯正手術では眼鏡やコンタクトから解放されて術後の裸眼視力が1.0得られることのみが強調されてきた。しかし術後のコントラスト感度低下やグレア・ハローなどの問題も少なからず発生していた。このような波面収差解析<sup>20)</sup>や補償光学<sup>21)</sup>などの新しい技術によれば、従来よりもよりよい視機能を提供できる可能性が高い。術後の視力は2.0を超える症例も始めている(super normal vision)<sup>23)</sup>。もちろん単に良好な視力(高コントラストでの視力)を裸眼で得るだけでなく、低コントラスト視力<sup>24)</sup>やコントラスト感度だけでなく両眼視機能などを含めた視機能全体を改善することがますます望まれる。

現在の白内障を含めた屈折矯正手術は、安全性や予測性も高くなりわが国でも急速に普及しだしている。一方で患者の視機能に対する要望も従来よりもはるかに高いものが要求される時代となっている。屈折異常を手術的に矯正し、メガネやコンタクトの必要のない視力を得られているが、長期的な安全性や経年変化による屈折度の変化などの問題点もまだ十分には解決できていない。さらに中高年からの老視の問題も、矯正手術、特に近視矯正では問題となるがその解決方法も得られていない。さらに、屈折矯正手術症例が将来白内障手術を受ける際、手術適応が難しくなったり、眼内レンズ度数の予測精度が低下することも起り得る<sup>5,18)</sup>。

このような問題は眼球光学系の臨床計測がまだ十分ではなく、実測できる数少ないパラメーターから予測しているためである。眼光学系の屈折要素をできるだけ数多く臨床計測する必要がある。できれば、眼内組織の屈折率を含めた曲率や屈折面位置情報などを非接触で簡便に臨床計測できることが重要となる。

#### 文 献

- 1) 魚里 博：“眼球光学”，眼光学の基礎，西信元嗣編（金原出版，1990）pp. 119-143.
- 2) 萩原 朗：眼の生理学（医学書院，1966）.
- 3) 神谷貞義、梶浦睦雄編：生理光学と眼鏡による治療（医学書院，1967）.
- 4) 大頭 仁：“眼球の光学”，生理光学，応用物理学会・光学懇話会編（朝倉書店，1975）.
- 5) 魚里 博、清水公也：屈折矯正のプロセスと実際，水流忠彦監修（金原出版，1998）.
- 6) 魚里 博：“角膜形状の評価法”，眼科，39 (1997) 697-705.
- 7) 魚里 博：“屈折異常の光学系と矯正”，眼科，43 (2001) 357-364.

- 8) 魚里 博：“眼内レンズ（人工水晶体）”，応用物理，**54** (1985) 1039-1051.
- 9) 魚里 博：“偽水晶体眼の光学”，眼科手術，**2** (1989) 279-295.
- 10) 魚里 博：“ヒトの目に特有な光学”，O plus E，**22** (2000) 418-430.
- 11) 魚里 博：“像形成用アンコンベンショナルレンズ—眼内レンズ (IOL)”，O plus E，**159** (1993) 100-105.
- 12) 魚里 博：“眼内レンズの光学特性”，IOL & RS，**15** (2001) 26-32.
- 13) 中尾主一：“眼球光学系の非球面性について”，臨床眼科，**30** (1976) 1091-1101.
- 14) 白柳守康：“水晶体の屈折率分布を考慮した模型眼の設計”，眼光学，**5** (1984) 40-43.
- 15) O. Pomerantzeff, M. Pankratov, G. J. Wang and P. Dufault: “Wide-angle optical model of the eye,” Am. J. Optom. Physiol. Opt., **61** (1984) 166-176.
- 16) R. Navarro, J. Santamaria and J. Bescos: “Accommodation dependent model of the human eye with aspherics,” J. Opt. Soc. Am. A, **2** (1985) 1273-1281.
- 17) 劉 龍輝, 加藤久幸, 大頭 仁：“屈折率分布水晶体によるヒト模型眼”，光学，**30** (2001) 407-413.
- 18) 魚里 博：“新しい屈折矯正：白内障・屈折矯正手術前後における検査の留意点”，日本視能訓練士協会誌，**29** (2001) 89-102.
- 19) 清水公也, 魚里 博：“ICL™ (the implantable contact lens,)”あたらしい眼科，**16** (1999) 653-654.
- 20) 平山典夫：“最近の眼内レンズと評価方法”，光学，**31** (2002) 9-13.
- 21) 大鹿哲郎：“LASIK における眼光学”，あたらしい眼科，**17** (2000) 1507-1513.
- 22) 前田直之, 魚里 博編：診療に役立つ眼光学, 眼科診療プラクティス 71 (文光堂, 2001).
- 23) 魚里 博：“視力の光学的側面とスーパービジョン”，神経眼科，**18** (2001) 257-264.
- 24) 魚里 博：“低コントラスト視力”，IOL & RS，**15** (2001) 200-204.

(2001年10月31日受理)