

## ■視覚■

## 屈折異常とその矯正

——屈折矯正手術の進歩

Clinical management of refractive error

木下 茂 稗田 牧 (京都府立医科大学大学院医学研究科視覚機能再生外科学) 教授  
Shigeru KINOSHITA and Osamu HIEDA

◎屈折異常には、近視、乱視、遠視、不正乱視がありいずれも視力障害の原因となる。老視は調節障害であり、屈折異常ではない。屈折異常の原因は不明な部分が多いが、有効な矯正方法は存在する。眼鏡、コンタクトレンズ、そして屈折矯正手術である。屈折矯正手術のうち、エキシマレーザーを使用して角膜の形を変える方法が広く行われるようになってきている。オルソケラトロジーや有水晶体眼内レンズといった方法は厚生労働省の未承認医療用具であるものの、アメリカのFDAでは承認されたものもあり、将来的に広まる可能性がある。

## Key word

PRK, LASIK, Phakic IOL, オルソケラトロジー, カスタムアブレーション



## 屈折異常の種類

目の構造をカメラにたとえると、角膜と水晶体という2つのレンズがあり(図1)、網膜とよばれる、フィルムのように光を感じる膜が眼球を裏打ちしている。正視とは調節していないとき、平行光線(無限遠からの光)が角膜と水晶体をとおり網膜の中心部(黄斑)に焦点を結ぶ目である。

## 1. 近視(図2)

近視眼では平行光線は網膜より前で焦点を結ぶ。この原因は、眼軸長とよばれる、角膜前面から網膜までの距離が角膜・水晶体のレンズの焦点より後方に伸展しすぎるためと考えられている。どのような集団においても近視の度数が強いほど、眼軸長は長い傾向にある。

## 2. 遠視

遠視眼では平行光線は網膜より後ろで焦点を結ぶ。したがって、調節を行わないと遠方も近方にも焦点が合わない。調節力が十分ある若年者では遠視であっても遠くも近くも調節により焦点を合わせることができる。加齢により調節力が低下するとまず近方から、やがて遠方でも視力障害をき

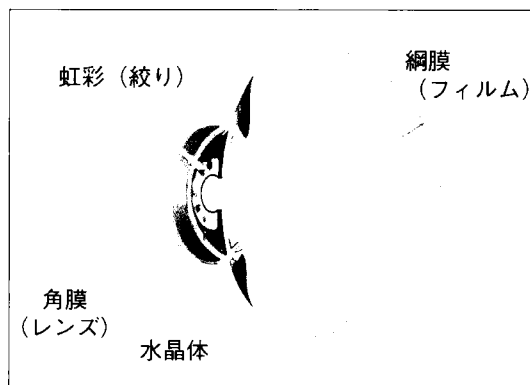


図1 眼の構造

眼球の1/4を取り去った模型。眼をカメラと考えると、レンズは角膜と水晶体の2つが相当する。

たす。

## 3. 乱視(図3)

乱視は近視にも遠視にも存在する。多くの場合、角膜の縦方向と横方向の曲率半径が異なるため、角膜のレンズとしての働きが光の方向によって異なり、目の縦横の近視あるいは遠視の程度が異なる状態である。

## 4. 老視(老眼)

若年者では遠方のものがはっきりみえる場合、近くもはっきりみることができる。このオート

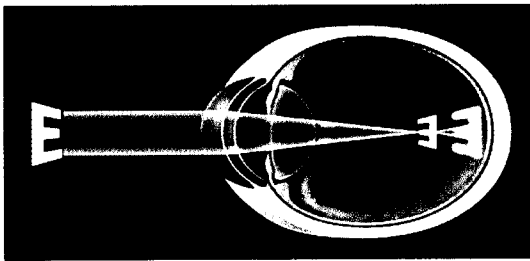


図 2 近視の模型眼  
遠方から来た光が、網膜の前で結像する。

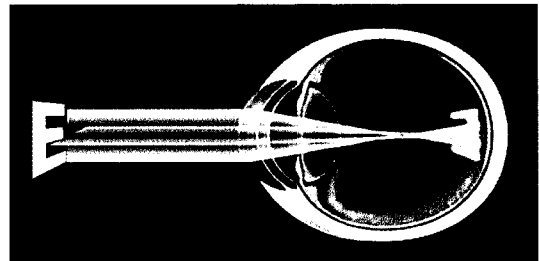


図 3 近視性乱視の模型眼  
通常の近視に加えて、多くの場合角膜の縦方向と横方向の曲率半径が異なり、縦方向と横方向の近視の度数が異なっている状態。

フォーカスの機能が目の調節とよばれる。調節力の低下は近視でも遠視でも乱視でも等しく起こる。したがって、老視は屈折異常ではなく調節障害である。

### 5. 眼鏡・コンタクトレンズ

屈折異常の原因には遺伝と環境要因があることは確かだが、はっきりとした原因はいまでも解明されていない。もっとも古い矯正方法である眼鏡は遠視に対する凸(プラス)レンズは13世紀、近視への凹(マイナス)レンズは15世紀ごろから使われはじめており、長い歴史がある。コンタクトレンズは角膜上に乗せるハードコンタクトレンズが1940年代に開発され、その後ソフトコンタクトレンズ、さらにディスプレイザブルコンタクトレン

ズとより異物感の少ない、装用しやすい、手間のかからないレンズへと進化している。これらの矯正で不十分な場合に、下記の最近発達してきた矯正方法が適応となる。

### 6. オルソケラトロジー

コンタクトレンズを装用することで、矯正を行うのみならず、コンタクトレンズで角膜の形を変えることで、装用していないときでも矯正効果を保つことを意図したコンタクトレンズとその処方方法を意味する。レンズデザインが4カーブとなり矯正効果が安定した。高酸素透過性の素材が開発されたことで、就眠時にレンズを装用する、夜間装用のオルソケラトロジーが行われるようになった(図4)。わが国でも現在臨床試験が進行中である。-4Dまでの近視で、乱視が-1.5D以下の場合であれば安定した矯正ができる。

#### サイドメモ1

#### 新しいSurface ablation(表面切除)

LASIKの隆盛であまり行われなくなったPRKであるが、LASIKを行えない強度近視や角膜厚が薄い眼にも適応があることで、10%程度の症例では現在も行われている。LASIKはフラップを作製するために、角膜実質の100 $\mu$ m相当を屈折矯正ではなく単に生体蓋として使用している。この蓋の部分を含めて屈折矯正を行う術式を総称し、Surface ablationとよび、PRK以外にtrasepithelial PRK、LASEKなどがある。最新のsurface ablationであるEpi-LASIKはエピケラトームという特殊な機器で角膜上皮のみのフラップをつくりレーザー照射後に元に戻す方式である。もし、上皮フラップが生着するのであれば、LASIKに限りなく近いSurface ablation手術となる可能性がある。

#### サイドメモ2

#### モノビジョン

調節力が減弱した老視眼への屈折矯正方法のひとつ。一眼を遠見用に他眼を近見用に矯正し、人工的な不同視(左右眼で屈折状態が異なる)にすること。固視交代により遠方も近方も鮮明な見え方が得られ、他眼は中枢で抑制されることで、おおまかな両眼視は保たれる。遠視眼が多い欧米ではコンタクトレンズや屈折矯正手術において盛んに用いられているが、利き目が交代しない(眼優位性が強い)場合には適応にならない。

### 7. エキシマレーザー屈折矯正手術

ArF エキシマレーザーは 193 nm の紫外線レーザーであり、高い光エネルギーにより分子間結合を解離させる光切除によって角膜をサブミクロン単位で平滑に切除することができる。1980 年代に Trokel が角膜にエキシマレーザーを照射することで、精確な角膜切開が可能なことを報告し<sup>1)</sup>、角膜手術への応用が試行されはじめた。現在のような角膜中央部の屈折力を変化させるような術式が正常眼へ適応されたのは 1980 年代後半のことである。術式としては Photorefractive keratectomy (PRK) とよばれるものであり、角膜上皮をゴルフメスなどで剝離してボウマン膜と角膜実質をレーザー切除することで角膜屈折力を変化させて近視矯正を行った。PRK は高い矯正精度をもつはじめ

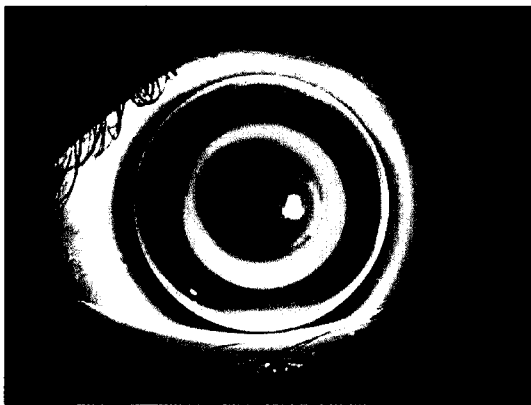


図 4 オルソケラトロジー  
通常のコンタクトレンズと異なり、レンズの中間周辺部に涙液が貯留している。

ての屈折矯正手術として 1990 年代前半から盛んになり、1995 年にはアメリカの FDA に認可された。しかし、術後に疼痛があることや、視力安定に時間を要すること、また時として術後角膜上皮下混濁が発生することなどの短所ももちあわせていた<sup>2)</sup>。

このエキシマレーザーとは別の流れで、Lamellar refractive surgery は 1960 年代にコロンビアの Barraquer により開始された。マイクロケラトームとよばれる表層角膜を円形に切除する手術器具を開発し、切除した角膜片を凍結加工したうえで再度自己の角膜に逢着する屈折矯正手術(keratomileusis)を試みた。この方法はさまざまな問題があり、普及するには至らなかったが、マイクロケラトームを改良したコロンビアの Ruiz らは角膜を表層切除時に一部を残してフラップとし、屈折矯正用の 2 回目の角膜切除を行ってからフラップをもとの位置に戻す automated lamellar keratoplasty (ALK, 術式としては keratomileusis *in situ*) を開発した。しかし、この方法も屈折矯正用の角膜切除の精度などに問題があり、限局した使用にとどまっていた。ギリシャの Pallikaris はフラップを作成した後の 2 回目の角膜切除にエキシマレーザーを使用する術式を発表し Laser *in situ* keratomileusis (LASIK, 図 5) が生まれることになった<sup>3)</sup>。

LASIK はマイクロケラトームを使用してフラップを作製することで、角膜上皮細胞層に神経終末をもつ知覚神経への影響が少ないため術後疼痛が

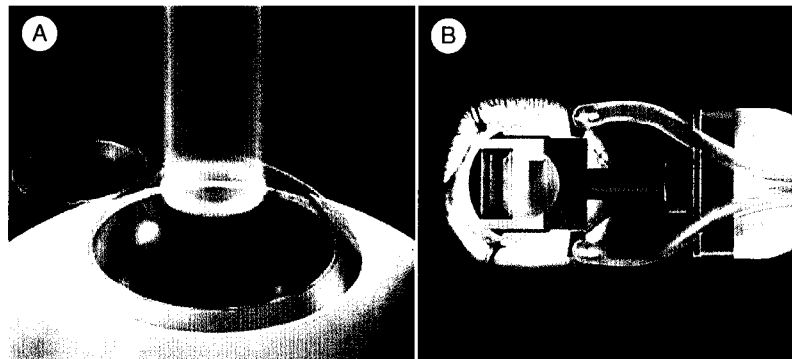


図 5 近視矯正手術LASIK  
マイクロケラトームという機器を用い、角膜の一部でフラップを作製し、その後エキシマレーザーを照射する。

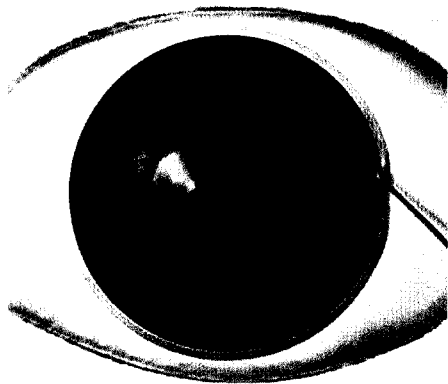


図 6 Phakic IOL

水晶体がある眼に眼内レンズを挿入することで近視を矯正する。

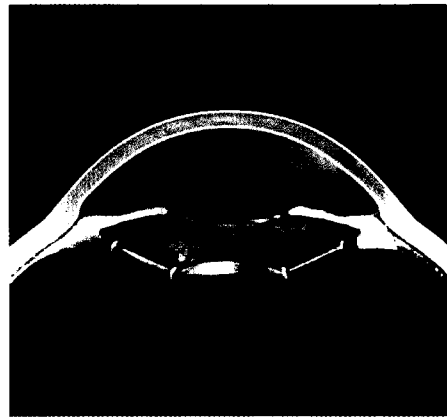


図 7 調節可能眼内レンズ

従来の眼内レンズより、柔らかい支持部を持ち、硝子体の圧力で移動する。

少ない。また、角膜上皮が保たれるため早期に視力回復が得られ、角膜上皮混濁の問題も少ない。しかもエキシマレーザーを使用することで手術の精度も高い。アメリカでは近視手術の件数が飛躍的に増加するのとときを同じくして、PRK から LASIK へ術式の変換が劇的にすすみ、年間 100 万件を超える LASIK がなされるようになった<sup>4)</sup>。わが国でも年間数万件の角膜屈折矯正手術のほとんどが LASIK で行われている。

LASIK や PRK に関しては日本眼科学会からガイドライン<sup>5)</sup>が出ており、6D までの中程度の近視であり、角膜厚が十分にあれば手術適応となる。90%が 1.0 以上の裸眼視力を得ることが可能である。遠視用 LASIK は現時点では厚生労働省未承認であるが、4D 程度までであれば、かなり正確に矯正できる。乱視も 4D 程度までであれば矯正精度は高い。

おもな術後の合併症としてはドライアイや夜間視機能の低下などがあげられるが、術後半年程度で改善されることが多い。LASIK に特徴的な合併症としてはフラップ作成時のトラブルが起こりうることである。フラップが不完全な場合にはレーザー照射をせずに、3 カ月以上延期して、もう一度フラップをつくり直すことで後遺症を残すことなく矯正できる。また、角膜を切除しすぎることによって、長期経過後に角膜中央部が突出する角膜拡張症が報告されている。術前に円錐角膜の疑いがな

いこと、角膜フラップ下厚を 250  $\mu\text{m}$  かならず残すことなどで避けることができる。

#### 8. Phakic IOL

LASIK をはじめとした角膜屈折矯正手術の適応にならないような強度近視(-10D を超す)矯正には有水晶体眼内レンズ(Phakic IOL)が有望な治療法として注目されはじめている。Phakic IOL としては虹彩支持型(図 6)や後房型のものがある。眼内操作を必要とする手術であるので、術後白内障の発生や角膜内皮細胞への障害が起こる可能性があるが、強度の近視では前房が深いので、比較的安全な手術ができる。遠視に関してはむしろ調節可能眼内レンズなどが今後開発されるかもしれない(図 7)。乱視も矯正可能なレンズも開発されてきている。

#### 9. カスタムアブレーション

ヒトの眼には近視や乱視の低次収差以外に高次収差とよばれる細かな屈折異常が存在し、adaptive optics(補償光学系)とよばれる特殊な光学機器を用い高次収差を矯正すると、眼底を高解像度で観察できるのみならず、自覚的なコントラスト感度が改善するという報告が 1997 年に Liang らによってなされた<sup>6)</sup>高次収差を矯正し Super vision を達成することが眼光学における新しいトピックスとなったのである。現時点では臨床的に高次収差を矯正する方法は確立されていないが、

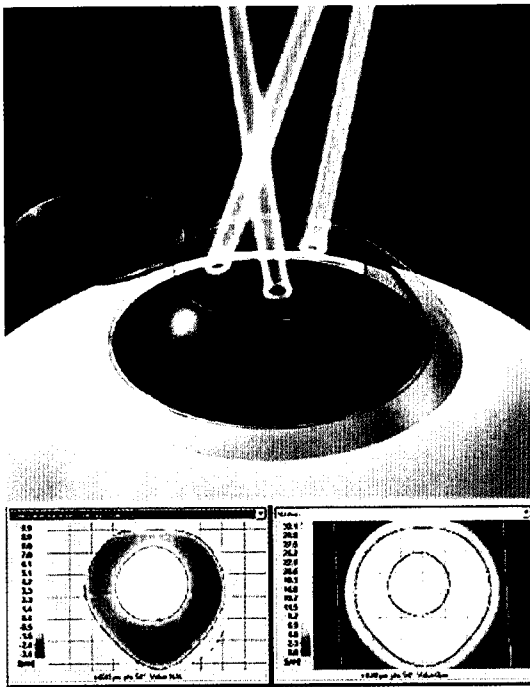


図 8 ウェーブフロントLASIK

各眼の波面収差を測定し、それを打ち消すような角膜切除を行う。細かい切除を行うため、高性能のアイトラッキングとスポット照射が必要となる。

カスタムアブレーションで行うエキシマレーザー角膜屈折矯正手術により症例を選択すれば高次収差を減少させることが可能になってきている。

個人の特徴や嗜好によって物事をつくり上げたり再構成したりすることがカスタム化である。カスタムアブレーション(custom ablation)とは、各眼の光学的な特徴、おもに眼球の波面収差(wavefront aberration；ウェーブフロントアブレーション)に応じて屈折矯正手術のレーザー照射プロフィールを変えるような、よりきめ細かな各眼の情報を使った角膜切除(ablation；アブレーション)を行うことである。波面収差を使ったLASIKはWavefront-guided LASIKとよばれ(図8)、高次

収差のなかでもとくにコマ収差の矯正を行うことができる<sup>7)</sup>。



おわりに

屈折異常がある場合、それを矯正するには眼鏡かコンタクトレンズといった補助具が必要であった状態に、手術により矯正するというオプションが加わったことで、屈折矯正の方法は非常にバラエティに富んだものとなりつつある。とくに、インターネット上で近視矯正手術に関してさまざまな情報が流されている。はたして、どのような矯正方法が自分にふさわしいのか、個々人が情報を吟味して選択する時代になりつつある。

文献

- 1) Trokel, S. L. et al. : Excimer laser surgery of the cornea. *Am. J. Ophthalmol.*, **96** : 710-715, 1983.
- 2) American Academy of Ophthalmology : Excimer laser photorefractive keratectomy (PRK) for myopia and astigmatism. *Ophthalmology*, **106** : 422-437, 1999.
- 3) Pallikaris, I. G. et al. : Laser *in situ* keratomileusis. *Lasers Surg. Med.*, **10** : 463-468, 1990.
- 4) Sugar, A. et al. : Laser *in situ* keratomileusis for myopia and astigmatism : safety and efficacy : A report by the American Academy of Ophthalmology. *Ophthalmology*, **109** : 175-187, 2002.
- 5) エキシマレーザー屈折矯正手術のガイドライン-日本眼科学会屈折矯正手術ガイドライン委員会答申. *日本眼科学会雑誌*, **108** : 237-239, 2004.
- 6) Liang, J. et al. : Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. *J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.*, **14**(11) : 2884-2892, 1997.
- 7) Mrochen, M. et al. : Clinical results of wavefront-guided laser *in situ* keratomileusis 3 months after surgery. *J. Cataract. Refract. Surg.*, **27** : 201-207, 2001.

\* \* \*