

最新の角膜屈折矯正法

中村 葉・稗田 牧

New Technology of Refractive Corneal Methods

Yo NAKAMURA and Osamu HIEDA

LASIK and orthokeratology are explained as a refractive corneal method. LASIK has become to be able to devise a resection method according to the visual function of the individuals. In addition, clinical application has been advanced as a way of orthokeratology also possible to improve the uncorrected visual acuity. Safety and long-term stability of these methods are being established by the appropriate observation and by the exact indication.

Key words: LASIK, orthokeratology, refractive corneal methods

屈折異常の矯正の最も一般的な方法は、眼鏡による矯正である。眼鏡を使用しない矯正法として、コンタクトレンズ、屈折矯正手術などがあげられる。本稿では、最近30年で進化してきた屈折矯正技術として、レーシックおよびオルソケラトロジーについて解説する。

本論に入る前に、基本的な事項を概説する。視力検査の結果とは、切れ目の視角が1分となるランドルト環を5mの距離から読むことができた場合を1.0としており、視角が2分の切れ目を読むことができた場合を0.5としている。通常、1.0の指標のランドルト環は、切れ目が1.5mmに設定されている(図1)。また近視や遠視の度数をあらわす単位はディオプター(D)で表され、焦点距離の逆数である。たとえば近方焦点距離が50cmの場合は $D = 1/f$ [m]より $D = 1/0.5$ となり、 $2D$ の近視となる(図2)。近視の場合、遠方からの光は網膜面より前方に焦点を結び、遠視の場合は後方に焦点を結ぶ状態である。通常の眼鏡矯正では、眼前に凹レンズをおくことによって焦点を網膜面に合わせるようにしている。

通常、角膜の形状は中央がステープ、周辺がフラットな形をしており、形状解析装置によって角膜全体の屈折率をマップの形で表すことができる。 Q 値とは角膜を完全な球であると仮定したときに $Q = 0$ とし、中央がステープな楕円になっている場合を $Q > 0$ でプロレート(上下に長

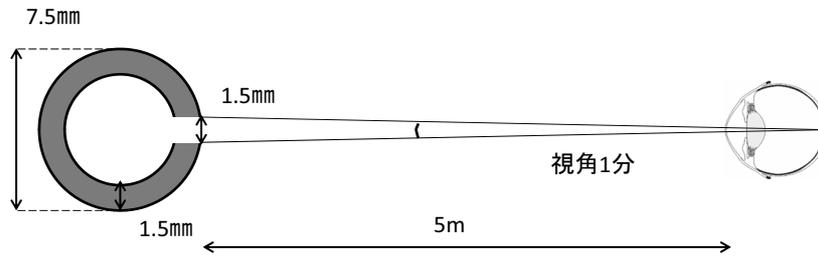
い楕円)、中央が周辺よりもフラットになっている場合を $Q < 0$ でオブレート(上下に短い楕円)と表す(図3)。通常、正常者では Q 値がゼロより小さいプロレートな形状である。

眼鏡で矯正できない収差を高次収差とよんでおり、特に球面収差とコマ収差が見え方の質に影響を与えると考えられている(図4)。高次収差の単位は3次以降の係数のRMS値(μm)で表され、屈折異常や白内障のない正常者では通常 $0.3\mu\text{m}$ 以下である。

高次収差や楕円形状は詳細な視力の質を表す値であり、かなり外れた値の場合にのみ視力検査結果を悪化させる原因となる。しかし、高次収差の小さいほうが視力の質がよいことは明らかであり、屈折矯正手術のみならず、通常の眼鏡や眼内レンズにおいても収差をなるべく軽減する方法が試みられてきている。

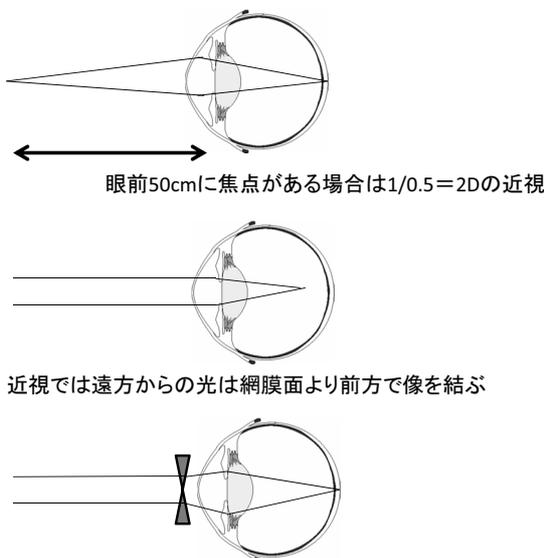
1. レーシック

レーシック(laser in situ keratomileusis)は現在では最も多く施行されている角膜屈折矯正手術である。角膜は、眼球光学系において全体の約3分の2にあたる屈折力をもっていること、組織が透明な無血管組織であり体表面に位置していることなどの理由から、手術的なアプローチがしやすい位置にある。現在、近視、遠視、乱視に対して、



これが判別できたときに視力1.0

図1 視力. 視角1分とは5mの距離から1.5mmの切れ目に相当し, この切れ目が判別できたときの視力を1.0としている.



眼前50cmに焦点がある場合は $1/0.5=2D$ の近視

近視では遠方からの光は網膜面より前方で像を結ぶ

通常は凹レンズの眼鏡によって網膜面に像を結ぶようにできる
 図2 屈折度数. 眼前50cmに焦点がある場合の近視を2Dの近視とよぶ. 通常遠方からの平行光線は網膜の前に焦点を結ぶため, 遠方視のときは通常眼前に凹レンズを置くことによって網膜面に焦点を合わせて矯正している. 通常0Dは正視であり, 焦点が無限遠方にある場合である.

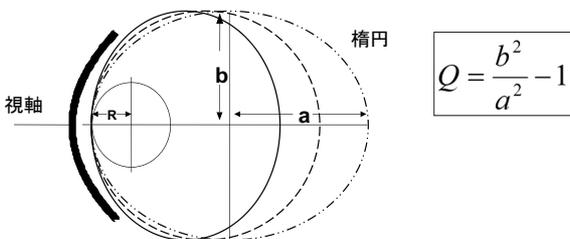


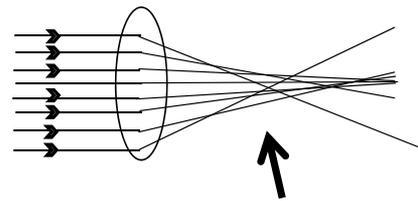
図3 楕円形状とQ値. $Q > 0$ ($b > a$): オブレット形状 (中央フラット-周辺ステープ), $Q < 0$ ($b < a$): プロレット形状 (中央ステープ-周辺フラット), $Q = 0$ ($b = a$): 球状.

レーシックでの矯正が可能となっている.

1.1 レーシックの手術手技

麻酔はオキシプロカインまたはキシロカイン点眼麻酔のみである. まず, 角膜実質に100から150 μm の厚みのフラップを作成し, フラップを開いたあとにエキシマレー

球面収差



コマ収差

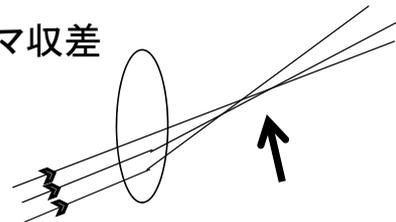


図4 高次収差. 球面収差: レンズの中央部と周辺部での光の屈折が異なるために起こる焦点のずれ, コマ収差: 斜めからはいった光線が1点に焦点を結ばず, 非対称な彗星のような像になる. 斜光線の球面収差のことをコマ収差とよぶ. ↑: 焦点の位置.

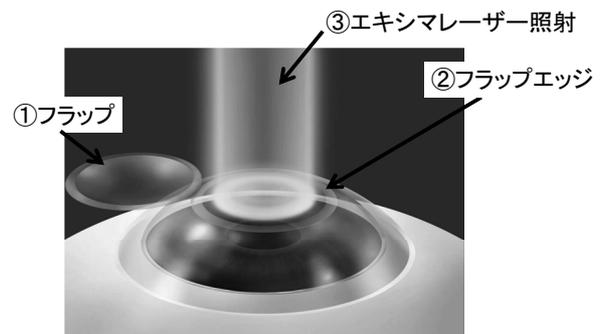


図5 LASIKの模式図. ①フラップ, ②スラップエッジ, ③エキシマレーザー照射.

ザーによって角膜実質切除を行い, 角膜形状を変化させることによって屈折矯正を行う (図5). フラップ作成には, 刃のついたマイクロケラトームという器械, またはフェムトセカンドレーザーという器械を使用する. エキシマレーザー照射は個人の屈折度数によって照射に違いの出る

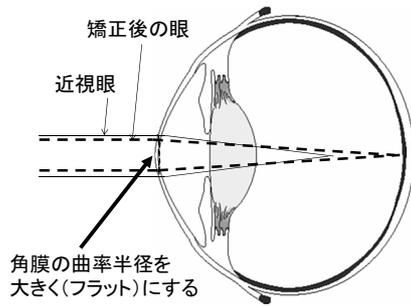


図6 近視の矯正原理. 近視眼では焦点が網膜面の手前に合っている. 角膜をフラットにすることによって, 焦点を網膜面に合わせるようにする.

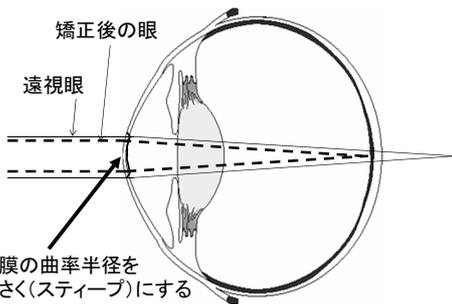


図7 遠視の矯正原理. 遠視眼では焦点が網膜面の後方に合っている. 角膜をスティーブにすることによって, 焦点を網膜面に合わせる.

部分であり, のちほど詳しく説明する. エクシマーレーザー照射後はフラップを戻しておく. 術後はフラップエッジのみが上皮の創傷治癒によって接着し, 通常の接触ではフラップがずれないようになる. 術当日は若干の異物感を生じるが, 術翌日には異物感もなくなり, 良好な視力が得られる手技である. 創傷治癒が起こりにくい角膜実質を照射することによって, 切除面の長期にわたる安定性が得られると考えられている.

1.2 基本原理

近視の場合, 遠方からの光の焦点が網膜面より手前にあってしまうため, 裸眼での遠方視力が悪くなっている. 角膜中央部を切除して凹レンズ型に形状を変化させ, 焦点を後方にずらし網膜面に合わせることによって, 裸眼での遠方視力を矯正することができる(図6). 一方, 遠視矯正は角膜周辺部を切除して凸面を作成することにより焦点を前にずらすことで矯正する(図7).

角膜手術用エクシマーレーザーは 193 nm の紫外線レーザーであり, 高い光エネルギーで分子間結合を解離させる光切除によって正確な切除が行える. 解離した分子の破片は外部へと噴出するために, 周囲組織には熱的な影響をほとんど与えることなく, 綿密な除去を行えることが利点である.

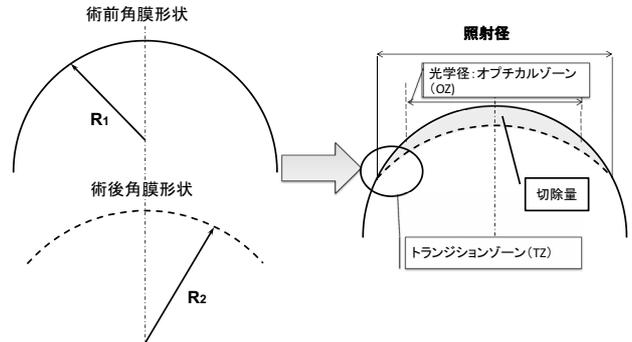


図8 近視矯正切除の基本. R_1 : 術前の角膜曲率, R_2 : 術後の角膜曲率 ($R_1 < R_2$). 照射領域で2つの曲率が交わるようにすることで切除量が求められる.

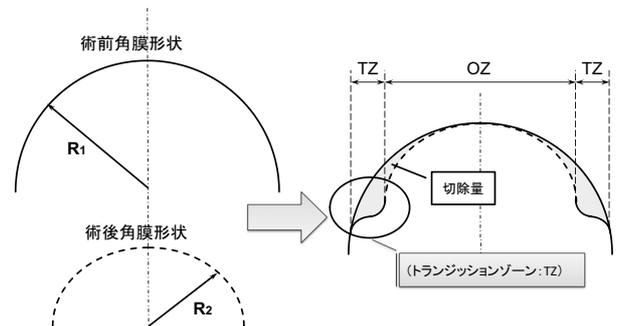


図9 遠視矯正切除の基本. R_1 : 術前の角膜曲率, R_2 : 術後の角膜曲率 ($R_1 > R_2$). OZ: オプティカルゾーン, TZ: トランジションゾーン.

1.3 コンベンショナル照射

従来の切除方法であるコンベンショナル照射の場合, 矯正できるのは, 眼鏡で矯正できる球面および円柱レンズ測定の数値である. 近視矯正の場合は術後の曲率半径 (R_2) を術前 (R_1) よりも大きくフラットにするような切除が必要であり, 2つの円として重ねた部分の上部の部分が切除量となる(図8). 実際には, 最周辺部でゆるやかに変化させる部分(トランジションゾーン)を設けて, 急峻な変化が起こらないような工夫がされている. 実際の光学径をオプティカルゾーンとよんでいる. 基本的な矯正量 D はマネリンレンズ式で求められ, 照射する光学径 (mm) と切除深度 (μm) で決まる.

$$\text{切除深度} = \{(\text{光学径})^2 \times \text{矯正量}\} / \{8 \times (\text{角膜屈折率} - 1)\}$$

角膜屈折率: 1.376

通常 6 mm の光学径を得られるように切除すると考えると, 1D の近視矯正の場合, 11.9 μm の切除深度が必要になる. 乱視に対しては, 楕円形の照射をすることによって円柱レンズと同様の効果を得ている.

遠視矯正の場合は, 術後の曲率半径 (R_2) を術前 (R_1) よりも小さくスティーブにするような切除形式が必要であり, 図のように周辺部を切除することとなる(図9).

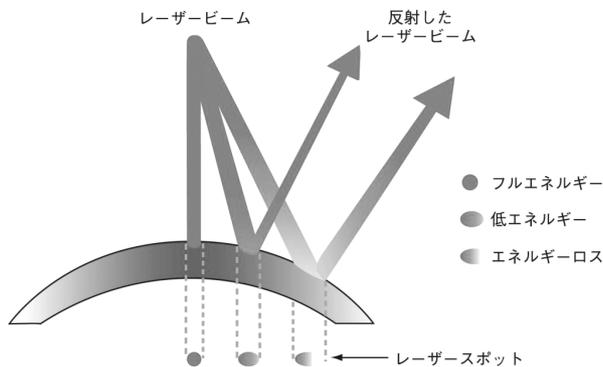


図 10 レーザーロス. 中央部に比較して周辺部にあたるレーザースポットはロスを生じる.

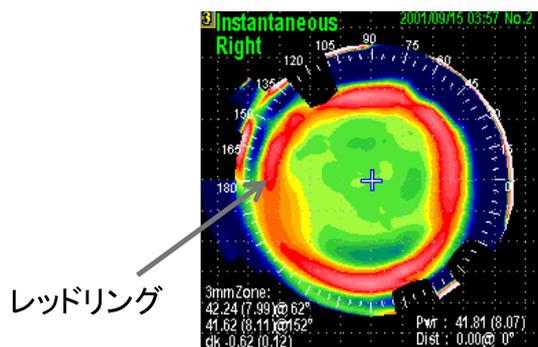


図 11 角膜形状解析装置による測定結果 (レッドリング). 角膜形状解析装置による測定結果. 角膜形状解析装置では前面の形状マップを色で示すことができ, 暖色系が突出してステープな状態を, 寒色系が平らでフラットな状態を示している. 照射により中心部の照射面はフラットになっているが, 最周辺部におけるエネルギーロスのため照射面の周辺部で削り残しができ, 非照射面との境界でステープな部分 (レッドリング) ができている.

角膜実質照射の切除深度を決めるのは, 光学径と矯正度数である.

コンベンショナル照射の場合, 正面からの通常照射を行うと周辺部の照射が斜めに当たるため, エネルギーロスが起こる (図 10). このため, 中心部はきちんと矯正できるが, 周辺部は低矯正となってしまう, 段差ができることが問題となった (図 11). この形状によって夜間瞳孔が開くようになるとハローグレアが強く出てしまうため, ならかに矯正効果が減るような切除形式に変わってきている. また, 偏心照射を行った場合は有意に高次収差が増えるとの報告も散見され, 周辺の切除法の改善, 偏心照射の予防などとともに, 高次収差の増加を少しでも軽減できるような照射法が考え出されてきた.

1.4 カスタム照射

コンベンショナル照射に加えて, よりよい視力の質が得られるように工夫され, 個人個人に合わせたカスタム照射とよばれる切除法が可能になってきている. 使用するレー

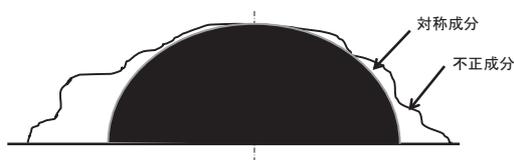


図 12 トポガイド照射. 対称成分に加えて, 角膜形状の不正な部分を切除する方法. ■: 対称成分 (理想形状), □: 不正成分.

ザー光はコンベンショナル照射と同様の種類であるが, 一括照射の場合はスリット光との組み合わせや照射径をさまざまに変化させるなどの工夫が行われている. コンベンショナル照射に追加して収差部分の切除を行うため, 切除深度が増加するのは避けられない. カスタム照射には以下に述べるように多くの種類がある.

1.4.1 トポグラフィガイド照射

角膜形状より不正乱視成分のみを打ち消すことのできる方法である. 角膜形状データを使用して, 通常の対称的な照射および不正成分の照射を行う (図 12). 光学径は可能な限り 6 mm を確保できるようにプログラムされている. 角膜にもともと不正乱視成分の多い症例や, 偏心照射症例が適応となる. この方法によって, 角膜高次収差の増加をコンベンショナル照射よりも低減できる. 偏心照射後で矯正視力の出にくい症例を改善させることも可能である.

1.4.2 非球面照射

通常, わたしたちの角膜は, 中央部がステープで周辺部がフラットなプロレートな形をしている (図 3). 楕円の形状を示す値である Q 値の正常者の平均は, 約 -0.2 である. この形状に対して通常の近視矯正を行うと, 中央がフラットになるが, 周辺の照射効率が悪いのでプロレートな形状に変化させることとなり, 球面収差が増大する. 非球面照射とは, 周辺部に多くの照射を行うことによって, 形状をなるべく変化させないようにした照射法である. 瞳孔が大きく開く夜間ではより周辺部の影響を受けることを考え, 照射径を大きくとっている.

1.4.3 ウェーブフロントガイド照射

全眼球の波面収差から, それを打ち消すような切除形式をとるものである. 各エキシマレーザーに付随する収差計で測定されたデータをもとに波面データを算出し, 解析により算出された高次収差を不正成分として切除する. 波面収差測定の方法としては, ハートマンシャック方式, チャーニング方式, トポグラフィ+レチノグラフィ (角膜形状+屈折測定) の 3 種類の方法がある. 最も頻用されているのはハートマンシャック方式である. レンズアレイまたは格子状の参照パターン光を眼球に入射させ,

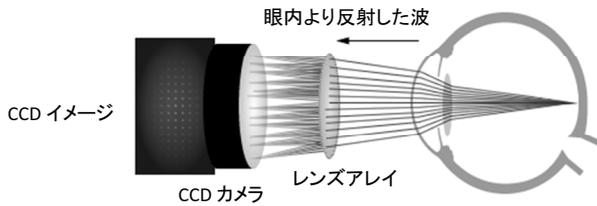


図13 ハートマンシャック収差計。小さなレンズが並んだレンズアレイで生じるハートマン像をイメージとしてとらえ、それぞれの点ずれの方向でその位置の波面が計算できる。

表1 エキシマーレーザーおよびそれぞれの収差計と方式。

企業名	レーザー機種	ウェーブフロントアナライザー	収差解析方式	トポグラフィ
AMO	Visx StarS4IR	Wavescan	HS	Custom CAP
NIDEK	Quest	OPD-scan	角膜形状+屈折測定	OPD-scan
Technolas	Technolas217 Zyoptix	Zywave	HS	Orbscan
Carl Zeiss Meditec	MEL80	WASCA	HS	TOSCA
Alcon	WAVELIGHT ALLEGRETTO WAVE EYE-Q	WaveLight Analyzer	チャージング	Oculyzer

HS：ハートマンシャック方式。

戻ってきたパターン光と元の参照パターンを比較することにより、波面を再構築する(図13)。求められた波面の誤差から収差成分を算出し、その収差を打ち消すように照射パターンを作成する。収差成分の算出法として、ツェルニケ多項式を用いる方法とフーリエ変換を用いる方法がある。ツェルニケ多項式のほうが一般的に用いられているが、いずれの方式を用いても高次収差に関しては大きな違いは出ないものと考えられている¹⁾。参考として、現在日本で使用されているエキシマーレーザーおよびそれぞれの収差計とその方式を表1に示す。

ウェーブフロントガイド照射を実現する条件として、収差計で測定した中心と照射中心を一致させることが必要である。そのために、眼球を追尾するアイトラッキングシステム、虹彩紋理を認識し回旋補正、瞳孔偏位補正を行うシステムを各エキシマーレーザーがもっている。

コンベンショナルな切除法と比較すると、ウェーブフロントガイド照射であっても、術後裸眼視力に有意差はみられない。しかし、術後の高次収差ではコマ様収差、球面様収差、全高次収差の増加がコンベンショナル照射よりも有意に抑えられることがわかっている^{2,3)}。現状では、正常眼では術前よりも高次収差自体は増加することが多いが、術前高次収差が0.3 μm RMS以上の症例(白内障や不正乱

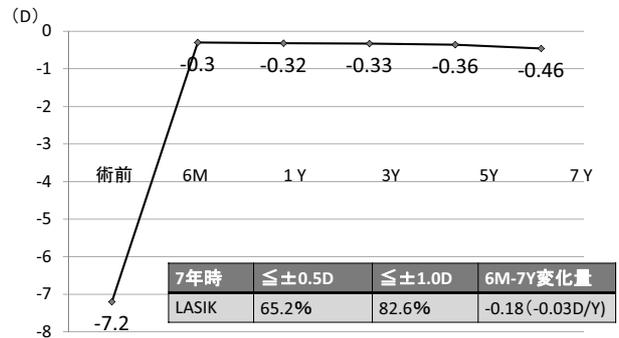


図14 自覚屈折度(平均屈折度数)の平均値の長期経過。術前平均-7.0Dの強度近視症例において、術後7年経過時でも極軽度の近視であり、良好な視力が保たれている。0Dは正視であり焦点が無限遠にある場合を示す。

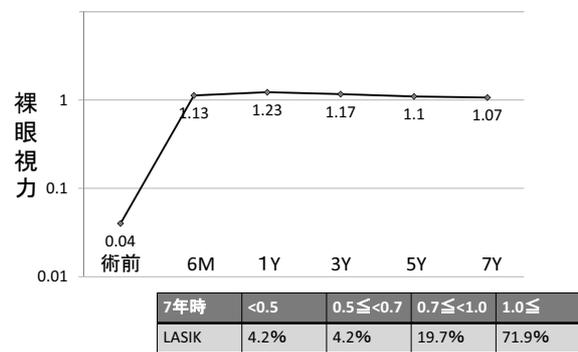


図15 コンベンショナル照射における裸眼視力の長期経過。7年経過後も70%の症例で1.0以上の視力を維持している。

視症例)では術後の収差を減らすことができるとの報告もある⁴⁾。

1.5 術後長期経過

術後は早期に視力の回復が得られ、長期的に安定していることがわかってきている。その理由は、切除面である角膜実質は創傷治癒が最小限しか生じないためである⁵⁾。しかし、長期的にみたときには、若干の屈折の戻り(リグレッション)が認められる。コンベンショナル照射を行ったレーシック症例の6か月以降7年までの変化量をみたところ、年間0.1D以下のごくわずかな変化であった(図14)。裸眼視力では、術後6か月時には82%が1.0の視力を得ているが、術後7年時にはやや低下し、1.0以上の視力は72%となる(図15)。この若干の視力低下の原因はまだはっきりとはわかっていないが、角膜上皮の過形成、経年変化による白内障の影響などが考えられている。

1.6 視機能関連の問題点

臨床治験が行われた1990年代当初は、光学径が5.0mm程度と小さかったため、夜間視機能の低下が問題となった。夜間瞳孔が開くと照射径以外の部分の光が入ることとなるため、ハローグレアを感じると考えられる。いままで

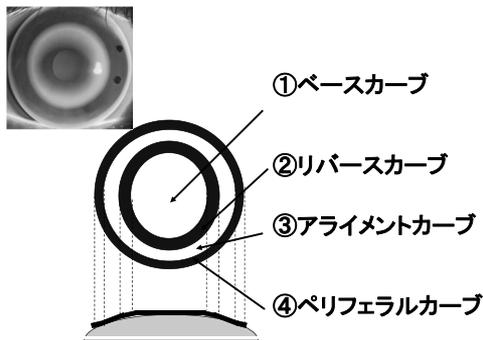


図16 リバースジオメトリレンズのデザイン（レンズ径は10～11 mm）。①ベースカーブ：角膜を圧迫し平坦化されるためのフラットな部分（直径6 mm 前後）、②リバースカーブ：ベースカーブの周辺にあるスティーブな部分（幅0.8～1.0 mm）、③アライメントカーブ：角膜曲率と同じカーブでセンタリングを決定する部分（幅1.2～2.5 mm）、④ペリフェラルカーブ：レンズ下の涙液交換を促し、レンズの固着を防ぐ部分（幅0.3～0.6 mm）。

の報告から考えると、光学径を6.0 mm以上とれば、夜間視機能の低下はほぼ問題がなくなると考えられている⁶⁾。一般的には術後6か月以内程度で慣れが生じ、自覚的には改善することがほとんどであるが、瞳孔径の大きい症例や神経質な症例では改善を認めないこともありうる。

コントラスト感度については術後一時的に低下し、6か月から1年程度で戻る症例が多いと報告されている⁷⁾。ウェーブフロントガイド照射においてはコンベンショナル照射よりも改善はするものの、術前よりはやや悪化するといった報告が多い^{3,8)}。実際患者を診察していて、6D以上の矯正を行った症例ではまれに夜間視機能の低下の自覚が続く症例もあるが、ほとんどの症例では視機能が持続しており、困難を生じることはない。

コントラスト感度は瞳孔径とも密接に関連しており、術前の評価をしっかりとした上で術後の視機能低下の可能性について説明することが必要である。

1.7 まとめ

角膜屈折矯正手術は近年の手術機器の技術革新によって飛躍的に進歩してきた。現時点において正確な術前評価を行うことによって、長期的に安全かつ精度の高い屈折方法として確立しつつあるといっても過言ではない。しかし、正常眼に対する手術であることに十分留意し、術後視機能についての説明を行った上での適応決定が大切であると考ええる。

2. オルソケラトロジー

オルソケラトロジーとは、夜間就寝時に酸素透過性ハードコンタクトレンズを装用することによって角膜形状を変化させる角膜屈折矯正法で、おもに近視矯正を目的とした

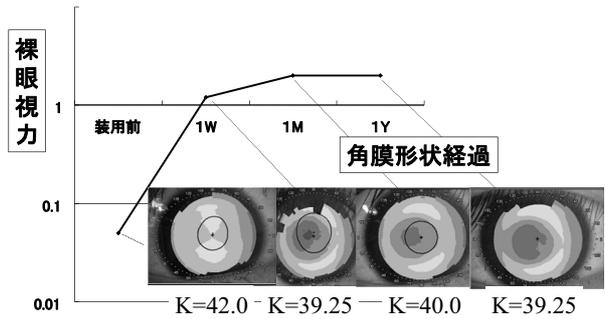


図17 代表的な症例の経過（装用前-4.25Dの近視）。K（ケラト値）：角膜の曲率半径の値。値が小さいほどフラットな形状を示す。装用前裸眼視力は0.05で、1週目には裸眼1.2に改善し、その後1年を通じて経過良好であった。角膜形状において、装用1週間目から1年を通じて中央部のフラット化を示している。

方法である。

2.1 オルソケラトロジーの原理

基本的には、レーシックと同様、近視を矯正するために角膜をフラットにする矯正法である。現在最も効果的と考えられ臨床応用されているのは、レンズ内面が4段階のカーブで構成されるリバースジオメトリレンズである（図16）。矯正原理としては角膜前面の形状変化が主であると考えられており、その変化のもとはおもに角膜上皮である。角膜上皮が中央部で菲薄化し、周辺部で肥厚することが動物実験で確かめられている⁹⁾。また、この変化は可逆的であり、装用中止によって元の状態に戻る。このような角膜上皮の変化によって角膜厚に部位によって変化が生じ、屈折変化と裸眼視力の変化が起こる。

2.2 臨床経過

適切なレンズ装用によって1か月以内に裸眼視力が改善することがほとんどである。代表的な症例経過を図に示す（図17）。装用前の角膜曲率半径が42.0Dであったが、装用後約1週間で39.25Dとフラット化し、その後長期にわたりフラット化が継続していることがわかる。近視度数が安定している場合は、その後長期にわたり安定して裸眼視力を保つことができる。しかし、角膜形状を変化させることで、レーシックと同様、角膜不正乱視や高次収差を惹起してしまう¹⁰⁾。高次収差の惹起を抑えるためにレンズのセンタリングは重要である。適切なレンズ装用を行うことによって、高次収差によるコントラスト感度の低下や夜間視機能の低下の惹起を許容範囲にとどめることができる。惹起される球面収差はレーシックよりも大きいとの報告もあるが¹¹⁾、装用中止によって装用前に戻る可逆性がオルソケラトロジーの利点のひとつでもある。

眼鏡以外の屈折矯正方法として近年進化してきたレーシックとオルソケラトロジーについて解説した。正確な適応判断と経過観察によって、長期的に良好な裸眼視力が得られることはわかってきている。両者に共通している角膜中央部が平坦化した眼球光学系には、近視進行抑制の効果があるのではないかと考えられるようになってきており、今後の研究が期待される¹²⁾。

文 献

- 1) 宮田和典, 加賀谷文絵, 子島良平, 宮井尊史, 尾方美由紀, 南慶一郎, 天野史郎: “フーリエ変換波面パターン作成を用いた Wavefront-guided LASIK の臨床効果”, *あたらしい眼科*, **26** (2009) 705-708.
- 2) 山村 陽, 稗田 牧, 脇舛耕一, 中村 葉, 木下 茂: “150 KHz フェムトセカンドレーザーでフラップを作成して施行した LASIK の治療成績”, *臨眼*, **65** (2011) 1325-1330.
- 3) S. C. Schallhorn, A. A. Farjo, D. Huang, B. S. Boxer Wachler, W. B. Trattler, D. J. Tanzer, P. A. Majmudar and A. Sugar: “Wavefront-guided LASIK for the correction of primary myopia and astigmatism a report by the American Academy of Ophthalmology”, *Ophthalmology*, **115** (2008) 1249-1261.
- 4) Y. Feng, J. Yu and Q. Wang: “Meta-analysis of wavefront-guided vs. wavefront-optimized LASIK for myopia”, *Optom. Vis. Sci.*, **88** (2011) 1463-1469.
- 5) D. G. Dawson, H. F. Edelhauser and H. E. Grossniklaus: “Long-term histopathologic findings in human corneal wounds after refractive surgical procedures,” *Am. J. Ophthalmol.*, **139** (2005) 168-178.
- 6) D. Myung, S. Schallhorn and E. E. Manche: “Pupil size and LASIK: A review,” *J. Refract. Surg.*, **29** (2013) 734-741.
- 7) S. D. Hammond, Jr, A. K. Puri and B. K. Ambati: “Quality of vision and patient satisfaction after LASIK,” *Curr. Opin. Ophthalmol.*, **15** (2004) 328-332.
- 8) A. Igarashi, K. Kamiya, K. Shimizu and M. Komatsu: “Visual performance after implantable collamer lens implantation and wavefront-guided laser in situ keratomileusis for high myopia,” *Am. J. Ophthalmol.*, **148** (2009) 164-170.
- 9) J. D. Choo, P. J. Caroline, D. D. Harlin, E. B. Papas and B. A. Holden: “Morphologic changes in cat epithelium following continuous wear of orthokeratology lenses: A pilot study,” *Cont. Lens Anterior Eye*, **31** (2008) 29-37.
- 10) T. Hiraoka, Y. Matsumoto, F. Okamoto, T. Yamaguchi, Y. Hirohata, T. Mihashi and T. Oshika: “Corneal high-order aberrations induced by overnight orthokeratology,” *Am. J. Ophthalmol.*, **139** (2005) 429-436.
- 11) R. N. Goldstone, E. H. Yildiz, V. C. Fan and P. A. Asbell: “Changes in higher order wavefront aberrations after contact lens corneal refractive therapy and LASIK surgery,” *J. Refract. Surg.*, **26** (2010) 348-355.
- 12) 中村 葉, 稗田 牧, 中井義典, 木下 茂: “オルソケラトロジーによる近視進行抑制効果について”, *日本コンタクトレンズ学会誌*, **56** (2014) 19-22.

(2014年8月29日受理)