

Eyhanceの使用経験と高次収差



京都府立医科大学眼科学教室 講師
稗田 牧 先生

アイフレイル対策につながる広い空間認識に貢献

高次収差における球面収差とコマ収差

当施設でEyhanceを数例ながら使用した経験をご紹介します。

まず高次収差について説明したい。高次収差とは球面と円柱成分以外の屈折異常のことで、コマ収差と球面収差の2つがある(図1a)。コマ収差は瞳孔中心に対して非対称、球面収差は瞳孔中心に対して対称な分布である。これは収差の波が瞳孔中心から同心円状に波打つか、中心をずれて斜めに波打つかというイメージである。

球面収差は瞳孔中心が高く、周辺に向けて少し下がり、周辺部でまた高くなる(図1b)。瞳孔の中心と周辺の屈折度が異なり、正の球面収差を持つ角膜において、瞳孔中心に対して周辺が近視となる。ただ近方視時、水晶体が角膜と反対の負の球面収差を作るため、球面収差が減り、瞳孔の中心と周辺の度数はほぼ同じになる。一方、コマ収差は非対称で、特定の方向に沿って屈折が変化し多様な質を有するため、コントロールが難しい収差である(図1c)。

図1 高次収差とは

a 高次収差(Higher Order Aberration)とは、球面と円柱成分以外の屈折異常

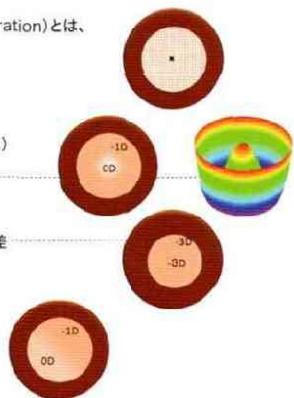
- ① コマ収差: 瞳孔中心に非対称
- ② 球面収差: 瞳孔中心に対称

b 球面収差(Spherical Aberration)

- 中心と周辺の同心円の差
角膜には正の球面収差がある
瞳孔中心より周辺が近視
- 調節時に水晶体が負の球面収差
角膜には正の球面収差がある
=近方調節時に球面収差が減る

c コマ収差(Coma Aberration)

- 非対称の歪化
方向によって多様な質



球面収差とコマ収差の網膜像を比較するため、瞳孔径4mm、0.25 μ mの収差をシミュレーションした波面(Wavefront)と点像(MTF)、ランドルト環を比較した(図2)。両方ともかなりぼやけているのが分かる。ただ球面収差は、球面度数と組み合わせることで焦点深度を拡張するという特徴がある(図3)。このグラフはストレーレシオ(Strehl Ratio)を示し、点像の強度のピークをグラフ化したものである。球面収差が全く無

図2 球面収差・コマ収差の網膜像シミュレーション

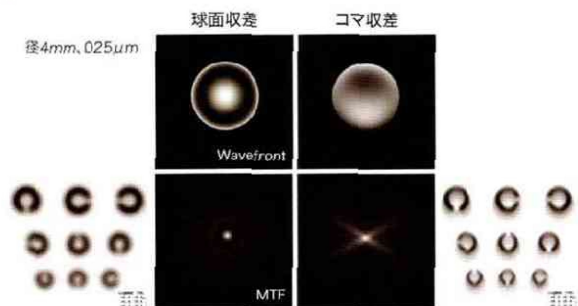
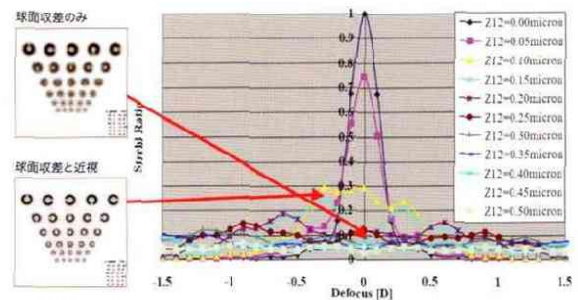


図3 球面収差と球面度数の組み合わせ

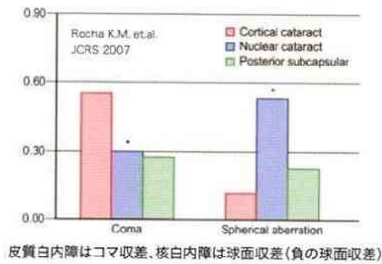


ければデフォーカス0Dでのピークが高くなり、デフォーカスを加えると急激に下がる。青色線の0.15 μ mを見ると、デフォーカス0Dのときより、-0.5Dのとき、つまり球面収差と近視が組み合わせるときのほうがはっきり見えることが分かる。少し球面収差があると、むしろピークが平らになり、焦点深度が拡張する効果がある。

焦点深度拡張に役立つ球面収差

従って、同じ高次収差でもコマ収差は多様性を示すが、球面収差は視軸付近の変化で焦点深度拡張に役立つ。例えば、白内障の形態による高次収差の違いを見ると、皮質白内障はコマ収差が多く、核白内障は球面収差、中でも負の球面収差が多い(図4)。核白内障は、濁っていてもよく見えるという患者さんが多いことは臨床的にも感じる。

図4 白内障の形態による高次収差(径6mm)



では、高次収差がどの程度あれば視覚に影響を与えるのか。もともと高次収差は球面と円柱度数を除いた波面収差の残りであり、ミクロン単位の小さいものである(図5a)。全ての収差が球面度数だと想定して高次収差をデフォーカスに変換する数式を用いると、解析径4mmで球面0.5Dは0.29 μ mに相当する(図5b)。およそ0.30 μ m以上の高次収差は視覚に影響を与えることが示唆される。

では、無視しても良い高次収差の程度とは何か。既報によると、解析径4mmで0.07 μ mの高次収差の変化は、視力でLogMAR0.1以下の変化とされる(図5c)。0.3 μ m以上は視機能に影響を与え、0.07 μ m未満はほぼ影響ないと示唆される。

図5 高次収差の視覚への影響

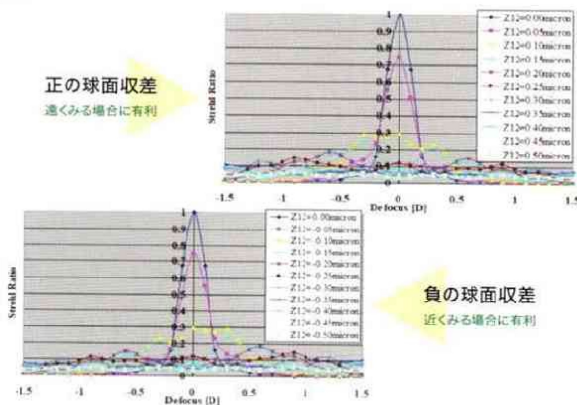
a 高次収差=球面と円柱度数を除いた波面収差の残り

b 高次収差の基礎知識
 $Defocus(D) = 4\sqrt{3} * defocus(\mu m) / \text{瞳孔半径}^2 *$
 解析径4mmで球面0.5Dは0.29 μ mに相当
 0.30 μ m以上であれば臨床的に意味がある
*新田直之(編集), 不二門尚(編集), 大原哲郎(編集) 角膜トポグラフィ-解説のポイント 2002

c 高次収差の臨床的意味ある最小値
 解析径4mmで0.07 μ mの変化はlogMAR0.1以下の変化*
 臨床的に意味をもつ最小の値とは... 解析径4mm 0.1 μ m = 球面度数0.175D
*Rocha K.M. et al. Journal of Refractive Surgery 2007

およそ解析径4mmで約0.1 μ mと解釈した場合、球面度数に換算すると0.175Dとなる。通常、眼鏡レンズの最小度数幅は0.25Dであり、

図6 正の球面収差と負の球面収差



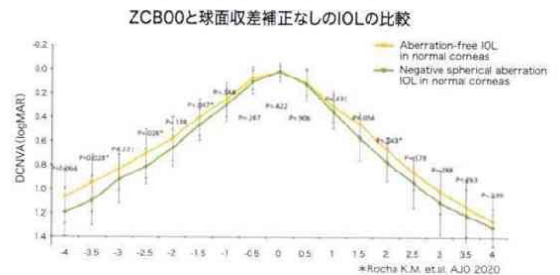
この点から0.1 μ mはほぼ視機能に影響しないと考えられる。つまり0.1 μ mほどの収差は、視力にはあまり影響ないが、焦点深度を増やす効果は期待できる。

また球面収差には、正の球面収差と負の球面収差がある。瞳孔中心における収差が高いか低いかの違いであるが、両者とも焦点深度を拡張する(図6)。両者の違いは、図6の黄色線にあるように、正の球面収差では、少し近視があると像質が良く、負の球面収差では少し遠視があると像質がいいことである。正視のとき、近くを見ると少し遠視状態になるように、焦点深度が近方に拡大する。

理想的な球面収差補正を目指したEyhance

球面収差を補正するIOLが存在するが、そもそも球面収差を0にすることが良いのかという疑問がある。実際に、球面収差補正なしのIOLと補正ありのテクニス ワンピースIOL ZCB00を比較すると、フォーカスが合ったODではZCB00の視力が良いが、両方向に離れると球面収差を補正しないIOLの方の視力が良いという結果であった(図7)。

図7 球面収差の減らしすぎはメリットか?



このような課題を克服し、さらに理想的な球面収差補正を目指したのが、テクニスEyhanceである(図8)。

図8 テクニス Eyhanceの概要

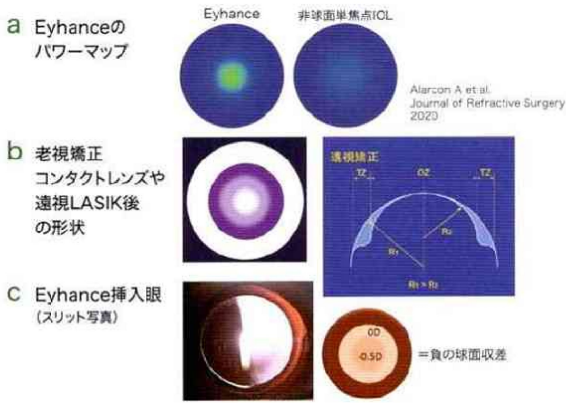
医療機器承認番号	30300BZX00084000	
販売名	テクニス アイハンス VB Simplicity	
製品名(モデル)	テクニス アイハンス オプティブルー Simplicity (0B00V)	
形状	高次非球面	
全長	13.0mm	
光学部直径	6.0mm	
材質	紫外線・紫外光吸収剤含有アクリル-メタクリル架橋重合体	
エッジデザイン	ProTEC360° ショープエッジデザイン	
支持部デザイン	Haptics offset from optic, TIT-FLXデザイン	
量産率	1.47(35℃)	
A定数*	超音波式測定 118.8	光干渉式測定 119.3
度数範囲	+6.0D ~ +30.0D (0.5D 刻み)	



Eyhanceは、中心が尖ったようなパワーマップを持っており(図9a)、老視矯正コンタクトレンズや遠視LASIKの術後と似ている(図9b)。実際に挿入したEyhanceのスリット写真では、中心が尖って見える(図9c)。これは負の球面収差の形であり、瞳孔の中心が周辺よりも少し近視の状態である。

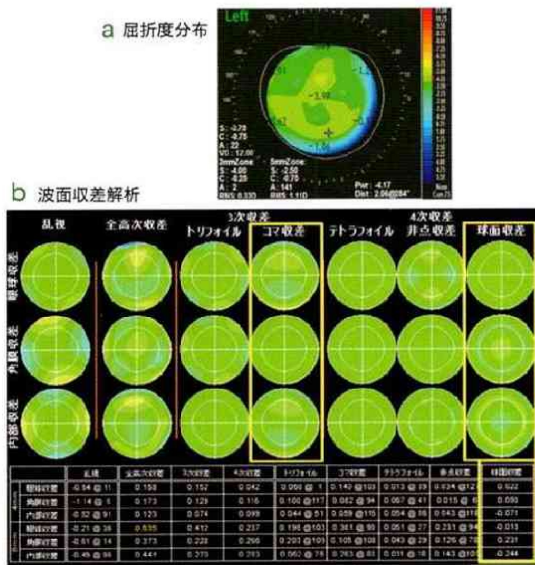
近方矯正してEyhanceを入れた眼の屈折度マップでは、瞳孔中心が-4Dほど、周辺部が1Dほどであり、中心部の近視が強い(図10a)。

図9 Eyhanceの特徴



Eyhance挿入眼の高次収差マップで、球面収差を見ると、眼球全体としてはほぼ緑であるが、角膜は少し正の球面収差があり、内部収差は角膜と逆の負の球面収差が見て取れる(図10b)。瞳孔径6mmでの球面収差はマイナスとなっている。

図10 近方矯正してEyhanceを挿入した眼



ただ、瞳孔の中心に大きな球面収差を持っており、視軸はコントロールできないため、視軸からずれるとそれはコマ収差となる。Eyhanceは負の球面収差を起こすが、視軸がずれるとコマ収差になることは留意すべきである。

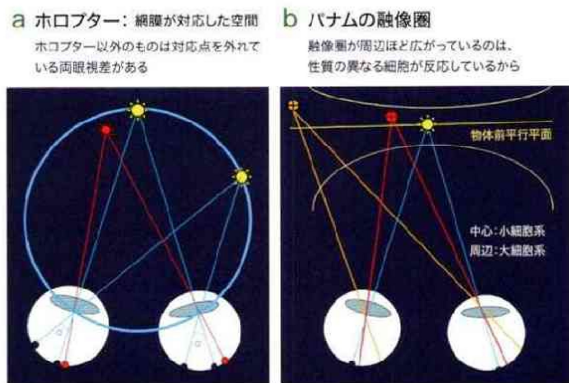
Eyhanceは広い空間認識に貢献

ではEyhanceをどのように使うべきか。人間の眼は、両眼の違う映像を脳で処理して一つであると感じる。これを両眼単一視(Haploopia)と言う。網膜には視方向があり、視方向が一致しているエリアは両眼で重なって見える。網膜の対応点を結んだものをホロプターと呼ぶが、ホロプ

ターを外れているエリアは、両眼で見ている角度が異なるため、両眼視差が生じる(図11a)。

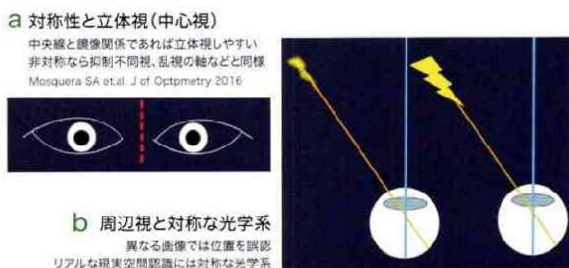
しかしホロプターから外れても、両眼単一視し、ずれを奥行き感覚に変えることで立体視できる。このしくみは「パナムの融像圏」と呼び、両眼で見ているエリアから周辺に広がるイメージとなる(図11b)。これには性質の異なる神経節細胞が働いており、中心部は小細胞系の錐体で見て、周辺部は桿体を含んだ大細胞系でおおらかに見ている。

図11 人の眼の空間認識



両眼単一視による立体視感覚は、鼻を中央線とし、収差が対称であるほど起こりやすい(図12a)。一方、不同視や乱視軸が異なるような非対称の場合は立体視しにくい。しかし周辺の立体視に関しては、視線から外れており、ある程度異なる画像でも融像できるが、違いが基だしいと位置を誤認しやすい(図12b)。

図12 両眼単一視による立体視感覚



Eyhanceは、球面収差により焦点深度がなだらかだが、対称的な光学系であり、正面で見たときと同様に周辺視でも位置誤認を起こしにくい。

最後にEyhanceを選ぶ理由を挙げる。①従来、高次収差は減らすべきとされていたが、焦点深度を考えると高次収差は「選ぶ」時代になった。②通常の眼は正の球面収差を持ち、Eyhanceによる負の球面収差で焦点深度を拡張することができる。そのため近視矯正レーシック後には適しているが、遠視矯正レーシック後には向かない。③Eyhanceは、対称な光学系により、安定した広い空間認識が得られ、アイフレイル対策にも有用と期待される。