

視力とコントラスト感度と眼の波面収差

三橋俊文

Visual Acuity, Contrast Sensitivity and Wavefront Aberrations of the Eye

Toshifumi MIHASHI

Several research groups and private companies have been developed a wavefront sensor of the eye for those several years. Some of them are now available for clinical use. With the device, one can not only measure wavefront aberrations but also calculate point spread function and modulation transfer function from the aberrations. Subjective measurement of the eye is also important at clinic. Because it has been known that high contrast visual acuity is not very suitable to evaluate vision under certain circumstances, low contrast visual acuity and contrast sensitivity were studied for clinical use. It is now recognized that low contrast visual acuity and contrast sensitivity are better way for measuring the eye with moderated aberrations, such as a post corneal refractive surgery eye. The aberrations of the eye measured by wavefront sensors were well correlated with the low contrast visual acuity and the contrast sensitivity.

Key words: wavefront sensor, modulation transfer function, high contrast visual acuity, low contrast visual acuity, contrast sensitivity

欧米や日本におけるいくつかの研究グループや企業で、眼の収差測定用波面センサーが急ピッチで開発されている。その理由として、ハルトマンシャック波面センサーの眼への応用^{1,2)}と補償光学眼底カメラによる視細胞の *in vivo* での観察に成功したことが挙げられ³⁾、とくに L, M, S 錐体の分布を *in vivo* で観察した写真はセンセーショナルであった⁴⁾。また、別の理由として、角膜屈折矯正手術への応用が挙げられる。波面センサーをフライングスポットタイプのエキシマーレーザー手術装置と組み合わせることで眼の収差を補正する、super normal vision に現実味が出てきている。こちらも、将来の屈折矯正の主流となりうる技術で、ビジネス的インパクトが非常に強い。

これらの新しい技術以外の用途でも、波面センサーは有効な装置になると考えられている。ここでは、その一例として、視力検査と波面収差測定の関連を考えてみたい。視力(とくに矯正視力)は、光学系だけでなく網膜以降の神経

系にも依存しているので、収差だけで視力を正確に予測することは不可能である。しかし、視力が悪いときは、光学系と神経系のどちらに原因があるかを収差によって判断できるであろう。

臨床では、視力が視機能を評価するために万能ではないことがわかっている。視力(高コントラスト視力)よりも、対比視力(低コントラスト視力)やコントラスト感度が視機能の評価に適している場合も多い。波面収差も、視力よりも対比視力やコントラスト感度との相関が高い。とくに縞視標を使ったコントラスト感度測定値と、波面収差から計算した modulation transfer function (MTF) は直接比較できることから、この組み合わせが臨床で有効な検査手段になると考えられる。

1. 視 力

2 点を分離できる最小間隔を視角(最小視角)に直して分

の単位で測定したとき、その逆数が視力（日本では小数視力、欧米では分数視力）である⁵⁾。視力は眼の見え方を評価するためによく使われており、次のような用途がある。

1. 屈折異常を検査するため
 2. 眼の病気を検査するため
 3. 自動車の運転やパイロットの適正を検査するため
- 裸眼視力が悪い場合、まず屈折異常、つまり近視、遠視、乱視などを疑う。屈折異常をめがねなどで矯正しても視力（矯正視力）が出ない場合には、眼の病気を疑うことになる。視力が悪くなる眼の病気としては、角膜の病気である円錐角膜や、網膜の病気である糖尿病網膜症などがある。また、適性検査の例として、自衛隊のパイロットでは片眼の裸眼視力が0.8要求され、もっと一般的な運転免許では両眼の矯正視力が0.7あればよい。

視力（一般的に遠見視力を指す）は国内では万国式試視力表、欧米ではスネーレンチャートを使って観察距離5mで測定される。視標はランドルト環が標準で、視力はランドルト環の切れ目の視角と対応する。文字視標が使用されることも多いが、文字視標はランドルト環での視力値で校正されている。小数視力は視標の大きさの変化が一定でなく統計処理には向かないため、研究レベルでは視標の大きさの変化率が等間隔である小数視力の逆数を常用対数にしたLogMARが使われる。

視力は、観察距離や明るさにより変化する。遠見視力に対し、近見視力は検査距離30cmで測定される。近見の見えには、心理物理的な要因は別として、調節による収差が関与していることが考えられる。また、昼間と夜間の視力を比較すると、夜間は暗いため瞳孔領が開き収差が大きくなり視力が低下することが考えられる。

通常の視標がコントラスト100%（正確には85%以上）に対し、低コントラストの文字やランドルト環を視標にした対比視力を測定することもある。対比視力を測定するための視力表として、ETDRS 10%の低コントラスト視力表、スネーレンチャートのコントラストを7%, 4%にしたリーガンチャートなどがある。

2. コントラスト感度

図1は、空間周波数対コントラスト感度のグラフを模式的に描いたものである。横軸は視標の空間周波数、縦軸はコントラスト感度である。横軸に平行な2本の線のうち、下の線が視力測定を、上の線が対比視力の測定を表している。視力と対比視力の測定では、視標のコントラストは一定で大きさが変化する。これに対し、縦軸に平行な5本の線はコントラスト感度の測定を表している。それぞれの視

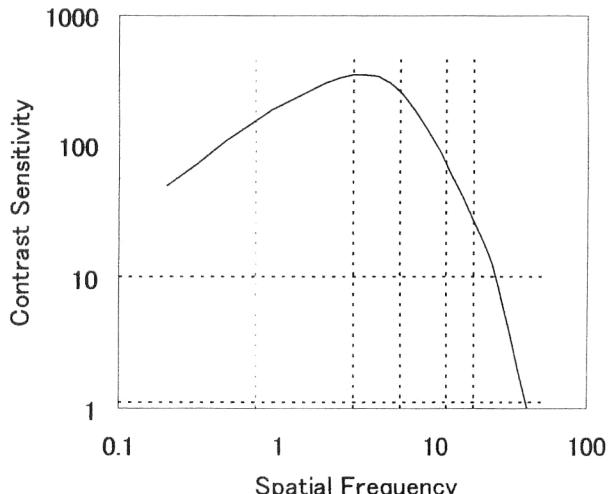


図1 コントラスト感度。曲線はコントラスト感度を模式的に表した。横軸（空間周波数軸）に平行な2直線のうち、下が視力測定を、上が対比視力の測定を表す。縦軸（コントラスト軸）に平行な直線はそれぞれの空間周波数でのコントラスト感度の測定を表す。

標の空間周波数は一定で、コントラストが変化して閾値を測定する。

CSV1000では、空間周波数3, 6, 12, 18 cycle per degree (cpd)の縦縞視標を二者択一(2AFC)でコントラスト感度を測定できる。文字コントラストチャートのペリ・ロブソンチャートでは、比較的低空間周波数である0.72 cpdのコントラスト感度を測定できる。

3. 他覚的な屈折測定

臨床で使用されている自動屈折計（オートレフラクトメーター）は、球面度、乱視度、乱視軸を自動的に測定する他覚的屈折測定装置である。屈折計は、矯正視力やコントラスト感度の予測はできない。

シャイネル原理は、古くから使われている屈折計の基本原理である。光軸を挟んだ2光束の合致位置によって屈折度を測定する。図2はヤングの屈折計とよばれる装置で、被検者自身が2つの光点を観察しながらスクリーンを動かして、2光束の合致点を見つける。合致したときのスクリーンの位置により屈折度を得ることができる。ZeissのHartinger屈折計やTopconのRM100, RM200は、合致点を検者が探すシャイネル原理を使った製品であった。RM100では、測定光に近赤外光を使うことにより、被検者に測定光が見えないようになり、測定光が調節と瞳孔径に与える影響をなくした。さらに自動屈折計になると、撮像素子を使って光点の合致を自動的に測定できるようになった。

シャイネル原理では、瞳孔領の測定部位は2光束の通る

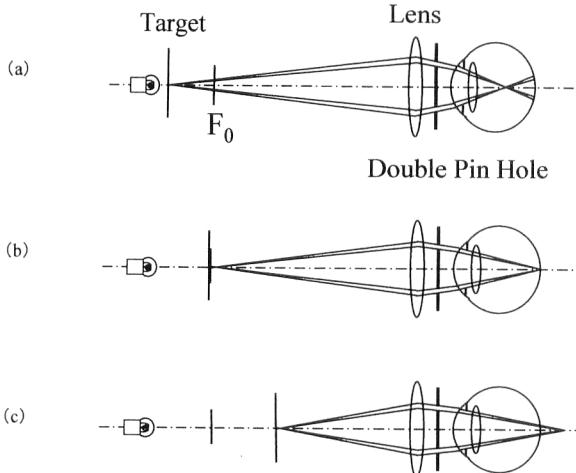


図2 ヤングの屈折計。被検者がターゲットを移動して(b)の状態にする。そのときのターゲットの位置で球面度が測定できる。

領域のみである。自動屈折計で使われる改良された方式でも、測定部位は瞳孔領の輪帶状の領域に限られていることが多い。このように瞳孔領の中心部分が測定できないと、球面収差がある場合に正確な測定ができない。たとえば、近視眼を角膜屈折矯正手術したとき球面収差が発生するため、自動屈折計の測定値が自覚検眼の測定値に比べて近视化することが確認されている⁶⁾。

このほか、最新の自動屈折計では、固視標、雲霧機構の追加や装置と眼のアライメントの自動化などがなされている。これらは、ほとんどが、波面センサーでも眼の屈折測定装置として必須な機能である。

ここで、めがね矯正值の測定と自動屈折計の関係について少しだけ触れておく。自動屈折計はめがねの矯正量を与える。自動屈折計の測定値は自覚検眼で校正されているが、最終的なめがね処方は自覚検眼によらなければならぬ。これは、自動屈折計では被検者は機械を片眼で覗き込むため機械近視の状態になっている可能性があること、自動屈折計では近赤外光を使っているため色収差があること、さらに近赤外光の眼底反射が光受容器より奥の脈絡膜の反射であること、などの誤差要因が考えられるためである。

4. 波面収差測定

眼の収差測定のための装置として、現在の主流はハルトマンシャック波面センサーである(図3)。ハルトマンシャック波面センサーは、シャイネル原理をoutgoingタイプにした(眼底反射光を測定光にした)自動屈折計の自然な拡張と考えられる。さらに、ハルトマンシャック波面センサーでは瞳孔領での光線通過部位を2点(または輪体状)

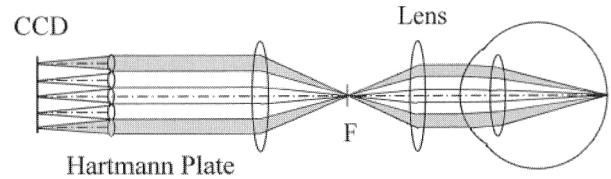


図3 ハルトマンシャック波面センサー。Fより眼側の灰色の2光束はヤングの屈折計と同じ。光源は省略している。

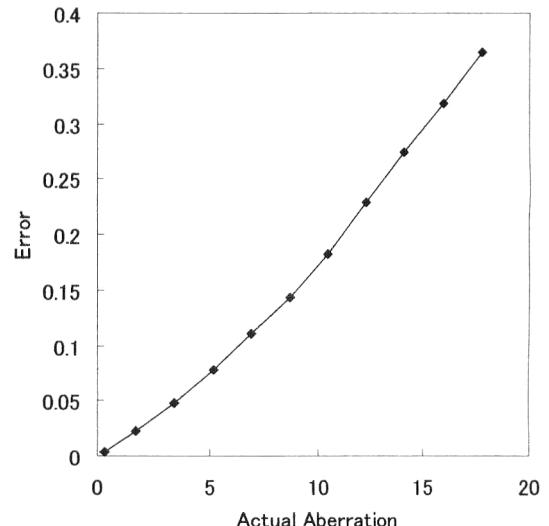


図4 眼底から反射する光束を測定することによって生じる誤差量。グルストランド模型眼の第1面にコマ収差を付加して光線追跡により波面収差を計算した。横軸は見るときと同じ方向で計算した収差量。縦軸は順方向と逆方向で計算した収差量との差。

から瞳孔領全体に広げ、格子状にする。光束の数は装置によって異なるが、70~800本程度である。これらの光束1本1本の方向を測定することで、瞳孔領の局所的な屈折を測定することが可能になる。

この測定された光束1本1本の方向と波面の法線の向きが等しいことを利用して、波面形状を計算することができる。収差は、干渉計による光学系の評価と同様にゼルニケ多項式を使って解析され、評価ばかりでなく、屈折矯正手術装置への収差量の伝達手段としても使われている。

ただし、ハルトマンシャック波面センサーで測定された波面収差は、実際に眼でものを見るときの光線の方向と逆向きの光線で測定されるので、ある程度誤差が発生することが予想される。ここで、グルストランド模型眼のデータを使用して誤差量を検討する。グルストランド模型眼の第1面に円錐角膜と同様なコマ収差成分を加える。加えたコマ収差成分は、実際の円錐角膜眼よりも十分に大きくとる。このモデルを両方の方向から光線追跡して収差量を調べると、図4のグラフのようになる。横軸は第1面にコマ収差成分を加えたことによる波面収差、縦軸は誤差であ

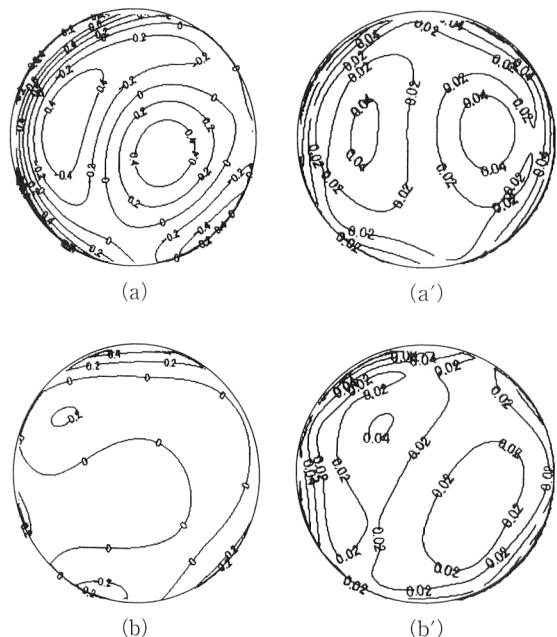


図5 (a)はLASIK術後の波面収差、(b)は正常眼の波面収差。図中の単位はマイクロメートル。LASIKで収差が増加している。このLASIKの例では多少偏心照射している。(a'), (b')は4回の繰り返し計測の標準偏差をマップ化した。

る。グラフから、誤差は収差量の2%程度であり、ハルトマンシャック波面センサーで十分正確な測定が可能であることがわかる。

また、波面収差測定でも自動屈折計と同じで測定に近赤外光を使っているため、色収差によって誤差が生じる可能性に注意しなければならない。

眼の波面収差測定では、眼と装置のアライメント誤差が測定誤差を生じさせる。また、眼の調節によって収差が変化して、これが収差測定の繰り返し誤差となっていることも考えられる。LASIK術後眼と正常眼の測定された波面収差マップを示す(図5(a), (b))。また、4回繰り返し測定から、波面収差の標準偏差を求めマップ化した(図5(a'), (b'))。波面収差はLASIK術後眼が正常眼よりも大きいが、繰り返し精度に大きな差はみられず、最大値で $0.04 \mu\text{m}$ 程度であった。

5. 波面収差と視力の関係

円錐角膜眼や角膜屈折矯正術後眼の光学系全体の主な収差は、角膜前面で発生する収差と考えることができる。角膜前面の形状と視力や対比視力の関係を調べた研究を紹介し、波面収差と視力の関係を検討しよう。

Garciaらは、臨床で使われている角膜形状の係数(surface regularity index (SRI), surface asymmetry index (SAI), coefficient of variation of power (CVP))と独

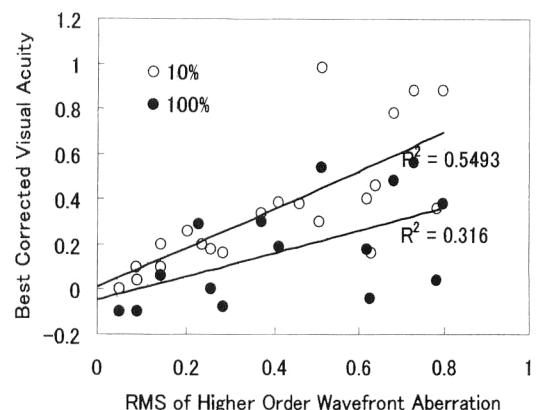


図6 角膜形状から計算で求めた高次波面収差量と視力、対比視力の関係。視力と対比視力はそれぞれETDRS 100%, 10%チャートを使って測定された。

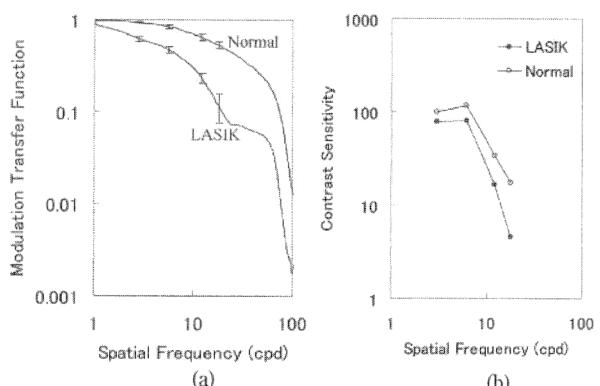


図7 (a) 波面収差から求められたMTF。(b) CRTに表示されたGabor刺激(空間周波数は3, 6, 12, 18 cpd)を使って上下法により測定したコントラスト感度。

自のコヒーレントエリアを視力と対比視力とで比較した⁷⁾。角膜形状と視力は相関しなかったが、対比視力は相関した。また、筆者らは、角膜形状に独特な係数の代わりに、ゼルニケ(Zernike)多項式の展開係数を視力と対比視力とで比較した⁸⁾。結果のグラフ(図6)からわかるように、ゼルニケ多項式の係数を変数に選んだ場合も、対比視力との相関が視力よりも高い。

Garciaらの結果と筆者らの結果を比較すると、視力との比較において筆者らの結果のみに相関がみられる。これは、Garciaらの被検者がPRK, PARK術後眼で収差量がそれほど多くないのでに対し、筆者らの被検者は円錐角膜眼で収差がかなり多いため、相関が出やすい条件にあったことによると考えられる。

6. 高次収差とコントラスト感度

次に、波面収差とコントラスト感度の関係を検討しよう。Maedaらは、臨床で使われる角膜形状の係数(SRI, SAI, CVP)とコントラスト感度の相関を調べた⁹⁾。矯正視

力1.0以上の円錐角膜眼に対し、コントラスト文字視標(2.4 cpd)を使用してコントラスト感度を測定した。その結果、角膜形状の係数と正解文字数との相関が認められた。このことは、視力では区別できない視機能の差をコントラスト感度では区別できることを意味している。つまり、コントラスト感度検査は視力検査よりも収差に対して感度が高いといえる。

次に、波面収差の繰り返し精度(図5)で紹介したLASIK術後眼と正常眼のMTFとコントラスト感度を比較してみる。矯正視力はLASIK術後眼で2.0、正常眼が1.5であり、波面収差量が大きいLASIK術後眼のほうがよかつた。ところが、コントラスト感度は図7(b)のように正常眼のほうがよかつた。波面収差から眼の光学系のMTFを計算すると、図7(a)のように、正常眼がLASIK術後眼より高いことがわかった。この結果から、光学系の収差の影響を評価するためにはコントラスト感度を測定する必要があることが示唆される。

眼のMTFは早い時期から研究され、すぐれた装置も開発されてきた^{10,11)}。しかし、臨床では最近まで、眼の光学系のMTFを測定することはあまりなかった。この原因は、これまでの研究内容や装置にあったわけではなく、MTFを測定する要求がなかったことだったのではないだろうか。しかし、世紀も変わり quality of vision や quality of life が求められ、角膜屈折矯正手術による視力矯正が当たり前になってくれば、状況も変わってきそうである。

波面センサーは角膜屈折矯正手術で必要とされる波面収差が測定できるうえ、MTFを計算することができ、将来性が大きい。波面センサーは光学系のみの収差やMTFしか評価できないが、自覚的なコントラスト感度測定などと組み合わせることで、網膜以降の神経系の情報を得られる可能性がある。

また筆者らは、波面センサーによる散乱測定を研究しており、成功すれば、見えに影響する収差量と散乱量を同一の装置で同時に測定できるようになる¹²⁾。

最初に説明した視力のうち、昼間視力と夜間視力については、波面センサーで瞳孔領域を適切に制限して解析することで評価が可能である。また、遠見視と近見視についても、遠見視は通常通り雲霧により遠点で測定し、近見視は近見

位置に固視標を移動して調節緊張状態で波面を測定することで評価が可能である。

「視力と波面収差」よりも「対比視力と波面収差」あるいは「コントラスト感度と波面収差」で直接的な関係をみつけられることができた。今後、臨床研究などにより、波面収差と視機能の関係がさらに明らかになることを期待したい。

文 献

- 1) J. Liang, B. Grimm and S. Goeltz: "Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the Hartmann-Shack wave-front sensor," *J. Opt. Soc. Am. A*, **11** (1994) 1949-1957.
- 2) J. Liang and D. R. Williams: "Aberrations and retinal image quality of the normal human eye," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2873-2883.
- 3) J. Liang, D. R. Williams and D. T. Miller: "Supernormal vision and high resolution retinal imaging through adaptive optics," *J. Opt. Soc. Am. A*, **14** (1997) 2884-2892.
- 4) A. Roorda and D. R. Williams: "The arrangement of the three cone classes in the living human eye," *Nature*, **397** (1999) 520-522.
- 5) 所 敬, 山下牧子: 視力・屈折検査の進めかた (金原出版, 2000) pp.37-57.
- 6) 吉崎桃子, 大鹿哲郎, 天野史郎, 宮田和典, 鮫島智一, 前田直之, 不二門尚, 広原陽子, 三橋俊文: "Wavefront Analyzerによるlaser in situ keratomileusis後の屈折力測定", 第55回日本臨床眼科学会予稿集 (2001) p. 67.
- 7) D. D. Garcia, C. van de Pol, B. A. Barsky and S. A. Klein: "Wavefront coherence area for predicting visual acuity of post-PRK and post-PARK refractive surgery patients," *Proc. SPIE*, **3591** (1999) 303-310.
- 8) T. Mihashi, N. Maeda and T. Fujikado: "Prediction of corrected visual acuity using Zernike representation of corneal topography," *Optical Society of American Annual Meeting Conference Program* (1999) p. 96.
- 9) N. Maeda, S. Sato, H. Watanabe, Y. Inoue, T. Fujikado, Y. Shimomura and Y. Tano: "Prediction of letter contrast sensitivity using videokeratographic indices," *Am. J. Ophthalmol.*, **129** (2000) 759-763.
- 10) 河原哲夫, 大頭 仁: "視覚系の空間周波数特性", *応用物理*, **2** (1977) 128-138.
- 11) 河原哲夫, 尾羽沢大: "視覚系のMTF簡易測定装置の試作", *臨眼*, **33** (1979) 1505-1509.
- 12) 三橋俊文, 広原陽子, 山口達夫, 黒田輝仁, 前田直之, 不二門尚: "ハルトマンシャック波面センサーによる散乱測定", 第37回日本眼光学学会予稿集 (2001) p. 42.

(2001年10月2日受理)