

総 説

Laser Epithelial Keratomileusis (LASEK) の現状

北澤世志博

神奈川クリニック眼科

The Present Situation of Laser Epithelial Keratomileusis (LASEK)

Yoshihiro Kitazawa

Department of Ophthalmology, Kanagawa Clinic

エキシマレーザーを使用した屈折矯正手術 laser epithelial keratomileusis (LASEK) の手術手技、臨床成績および利点と問題点について述べる。LASEK は 20% エタノールを使用して角膜上皮のフラップを作製し、エキシマレーザー照射後にフラップを戻す手技である。対象は、球面屈折度 $-0.75 \sim -15.50$ D (平均 -7.28 D)、円柱屈折度 $0 \sim -5.00$ D (平均 -1.13 D) の 349 例 690 眼である。裸眼視力 1.0 以上の割合は、術後 6, 12カ月にそれぞれ 92.2%, 91.7% であった。球面屈折度は、術後 6, 12カ月にそれぞれ -0.11 ± 0.82 D, -0.17 ± 0.83 D で安定していた。矯正精度は、術後 12カ月で目標屈折度の ± 0.50 D 以内に 80.2%, ± 1.0 D 以内に 92.6% が入った。角膜上皮混濁は 61.9% であった。LASEK は安全にフラップが作製でき、矯正精度がよく良好な裸眼視力が得られるだけでなく、外傷に強く術後ドライアイが少ないことが利点であるが、軽度の疼痛、視力改善までに時間がかかること、角膜上皮下混濁が多いことが問題である。(視覚の科学 25: 2-8, 2004)

キーワード：エキシマレーザー、角膜屈折矯正手術、Laser epithelial keratomileusis (LASEK)、臨床成績、利点と問題点

This paper describes the method of laser epithelial keratomileusis (LASEK), clinical results, advantages and disadvantages. LASEK is a method for making epithelial flap using 20% ethanol and repositioning the flap after excimer laser ablation. 690 eyes of 349 patients were performed LASEK, whose spherical refraction ranged from -0.75 to -15.50 D (mean, -7.28 D) and cylindrical refraction ranged from 0 to -5.00 D (mean, -1.13 D). At 6 and 12 months after the operation, 92.2% and 91.7% achieved an uncorrected visual acuity of 20/20 or better, and the mean spherical refraction was -0.11 ± 0.82 D and -0.17 ± 0.83 D, respectively. At 12 month, 80.2% were within ± 0.5 D and 92.6% were within ± 1.0 D to the intended refraction. The corneal haze of complications was 61.9%. LASEK is safe to make flap and is expected to achieve on good predictability and a good uncorrected visual acuity, but there are some problems such as postoperative pain, the delay in recovering of visual acuity, and corneal haze. (Jpn J Vis Sci 25: 2-8, 2004)

Key Words: Excimer laser, Corneal refractive surgery, Laser epithelial keratomileusis (LASEK), Clinical results, Advantages and disadvantages

1. はじめに

屈折異常の矯正方法には様々な手段がある (表 1)

が、その選択肢としてまず安全で侵襲の少ない非手術的な眼鏡があり、次いでコンタクトレンズ (以下 CL) であることは、laser in situ keratomileusis (以下

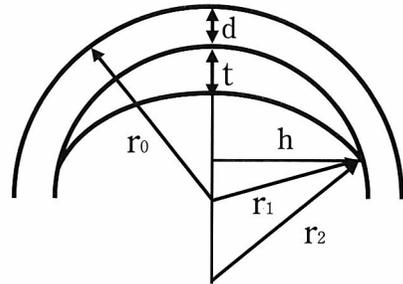
別刷請求先：163-1335 東京都新宿区西新宿 6-5-1 新宿アイランドタワー 35F 私書箱 1539 号
神奈川クリニック眼科 北澤世志博

(2004 年 1 月 13 日受理)

Reprint requests to: Yoshihiro Kitazawa, MD Dept of Ophthalmol, Kanagawa Clinic
P.O.BOX 1539 Shinjuku Island Tower 35F, 6-5-1 Nishishinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-1335, Japan
(Received and accepted January 13, 2004)

表1 屈折異常の矯正方法

非手術的
1. 眼鏡
2. コンタクトレンズ
3. Ortho-K
手術的
1. mini-RK (radial keratotomy)
2. PRK (photorefractive keratectomy)
3. LASIK (laser in situ keratomileusis)
4. LASEK (laser epithelial keratomileusis)
5. phakic IOL (intraocular lens)
6. ICR (intrastromal corneal ring)
7. LTK (laser thermo keratoplasty)



$$\text{式 1 } t = r_1 - r_2 + (r_2^2 - h^2)^{1/2} - (r_1^2 - h^2)^{1/2}$$

$$\text{式 2 } p = \frac{0.376}{r_0} - \frac{0.376}{r_2 + d}$$

図1 Laser in situ keratomileusis (LASIK), laser epithelial keratomileusis (LASEK) における屈折力変化の算出方法

LASIK) を中心とした屈折矯正手術が普及してきた現在においても紛れのない事実である。日本眼科学会の屈折矯正手術のガイドライン¹⁾にも記載されているように、眼鏡やCLの装用に支障があり手術的矯正方法が適していると考えられる症例が手術の適応となる。現在行われている手術的な屈折矯正方法には表1のごとく様々な手技があるが、その中心は疼痛がなく視力改善も早いLASIKである。

今回、これらのなかで近年注目されている laser epithelial keratomileusis (以下LASEK) について述べる。LASEKは、1999年にCamellinが考案した手技である²⁾が、アルコールを使用して角膜上皮のフラップを作り、エキシマレーザー照射後にLASIKと同様にフラップを戻す手技である。

2. LASIK と LASEK の矯正における理論上の相違

LASIK と LASEK の矯正における最大の相違点はフラップの厚さであるが、LASIK のフラップが角膜実質を含む130~160 μm 程度であるのに対し、LASEK のフラップは角膜上皮のみの約50 μm である。LASIK と LASEK の術前後における屈折力の変化を考えると(図1)、術前の角膜曲率半径 r_0 に対して厚さ d のフラップを作製した後の曲率半径を r_1 、更に深さ t の切除を行った後の曲率半径を r_2 とすると、術前後の屈折力の変化 p は式2であらわされる。この式から、理論上同じ矯正量でもフラップ厚 d が大きいほど屈折力の変化が大きいことになり、フラップ厚の少ないLASEKの方がLASIKほど矯正率を下げる必要がない。実際、神奈川クリニック(以下 当院)での矯正率はLASIKで89%、LASEKで92%で

ある。現在の切除量の決定は、フラップ厚を全く加味せずに施設ごとに経験値をもとに矯正率としてノモグラムを作成しているのが現状である。しかし式2から、同一切除深度でもフラップ厚により得られる屈折力は異なるため、本来はノモグラムにまずフラップ厚を加味する必要がある。

3. 手術手技

LASEKの手技は、まず0.4%塩酸ベノキシネートで点眼麻酔をする。次いで直径8.5mmの角膜移植用バロン氏吸引トレパン(JADMED社製)からトレパンを抜き出しヒンジ部をカットする。これを角膜上皮用トレパンとしてプレカットを行い、次に真空トレパンの吸引コーンを吸着させ、5mlのガラスシリンジにあらかじめ採っておいた20%エタノールをこのコーン内に満たし(図2)、30秒間放置する。MQA[®]にてアルコールを吸い取った後BSS PLUS[®]で洗浄し、角膜上皮剝離用スパチュラ(AE-2922, ASICO社製)で上皮フラップの辺縁を立ち上げ、上皮剝離スパチュラ(J2910A, JANACH社製)でフラップを剥がす(図3)。エキシマレーザー照射後に冷却したBSS PLUS[®]で洗浄し、上皮復位スパチュラ(J2920A, JANACH社製)でフラップを戻す。次いで、LASIKと同様にダブルカニューーラ(19018, モリア社製)でフラップ下を洗浄した後に2分間ドライアップを行い、CL Breath-O[®](東レ社製)を装着させて終了する。

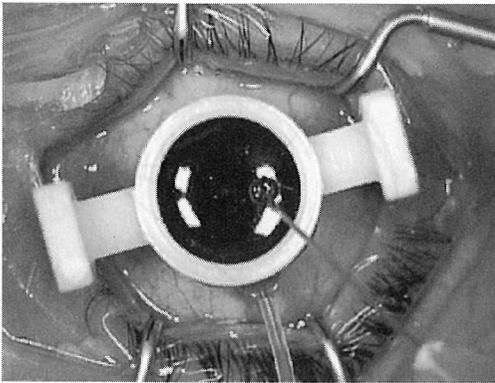


図2 パロン氏吸引トレパン (JADMED 社製) を吸着させ、コーン内に20%エタノールを満たしているところ

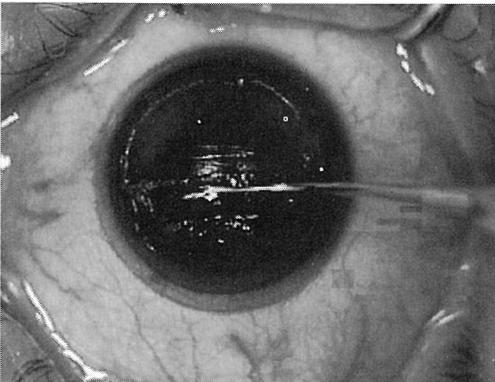


図3 上皮剝離スパチュラ (J2910A, JANACH 社製) にて上皮フラップを翻転させているところ

4. 臨床成績

当院で施行したLASEKの初期臨床成績はすでに報告した⁹⁾が、今回、更に多くの症例の臨床経過をまとめた。対象は、2001年5月～2003年8月の間に当院でLASEKを施行した349例690眼、年齢は19～60歳(平均32.1歳)である。当院ではLASIKを屈折矯正手術の第一選択肢としているが、LASEKを施行した症例の割合は17.1%である。対象の内訳は、角膜が薄くLASIKでは術後の全角膜厚が400 μ m未満またはレーザー照射後のベッド厚が250 μ m未満になると予想される症例が223例438眼(63.4%)、ボクシングなど格闘技をする症例が71例142眼(20.6%)、角膜形状が極端に急峻または平坦でありマイクロケラトームのフラップ作製が危険と考えられた41例82眼

(11.9%)、その他14例28眼(4.1%)である。対象の術前屈折度の範囲は、球面 $-0.75\sim-15.50$ D(平均 -7.28 D)、円柱 $0\sim-5.00$ D(平均 -1.13 D)で、角膜厚は448～639 μ m(平均520.2 μ m)であった。エキシマレーザーはEC-5000(ニデック社製)を使用し、レーザーの照射径はオプチカルゾーン6.0mm、移行帯を含めた径は7.0mmとした。前述の手技により作製されたフラップ厚は42～72 μ m(平均55.2 μ m)であった。

術後は1, 2, 3, 4日, 1, 2週間, 1, 2, 3, 6, 12カ月に診察を行った。経過観察が可能であった症例は、術後1カ月までが690眼、術後3カ月が570眼、術後6カ月が434眼、術後12カ月が121眼である。術後裸眼視力、自覚屈折度、矯正精度、角膜上皮下混濁について検討した。角膜上皮下混濁は、その程度により0～4の5段階(grade 0:透明, grade 1:ごくわずかの混濁, grade 2:スリットランプで容易に認めるが軽度の混濁, grade 3:中等度のはっきりした混濁であるが視力低下はない, grade 4:重度の混濁で視力低下がある)で評価し、角膜上皮下混濁スコアとした。

1) 裸眼視力

術後1週間, 1, 6, 12カ月の裸眼視力を表2に示した。裸眼視力は、術後1週間で0.7以上は91.2%であったが、1.0以上が68.0%、1.5以上が24.2%とやや低かった。術後1週間では角膜上皮が再生中のため、点状表層角膜症や角膜表面の不整などが原因でLASIKの一般的な視力改善速度に比較するとやや遅かった。しかし術後1カ月以降では、0.7以上は97～98%で、1.0以上が90%をこえ、1.5以上も50%を上回る良好な結果が得られた。術後6カ月以降で裸眼視力が0.7未満の症例は、角膜上皮下混濁が強く低矯正になった症例か、または混濁はほとんどないが低矯正になった症例である。術後の裸眼視力をLASIKと比較すると、LASIKで1.0以上の割合は60～90%⁴⁻⁹⁾であり、LASEKでもLASIKと同程度のよい成果が得られる。

2) 自覚屈折度

自覚屈折度の経時的推移を図4に示した。自覚屈折度(等価球面屈折度)の平均は、術後1週間, 1, 3, 6, 12カ月にそれぞれ -0.23 ± 0.86 D, $+0.01\pm 0.63$ D, -0.04 ± 0.80 D, -0.11 ± 0.82 Dおよび -0.17 ± 0.83 Dで安定していた。屈折度の経時的推移は術後早期から安定し、photorefractive keratectomy(以下 PRK)

表2 裸眼視力

視力	術後期間				眼数 (%)
	1週間	1ヵ月	6ヵ月	12ヵ月	
0.7以上	629 (91.2)	680 (98.6)	422 (97.2)	119 (98.3)	
1.0以上	469 (68.0)	630 (91.3)	400 (92.2)	111 (91.7)	
1.5以上	167 (24.2)	348 (50.4)	240 (55.3)	64 (52.9)	
全体	690 (100)	690 (100)	434 (100)	121 (100)	

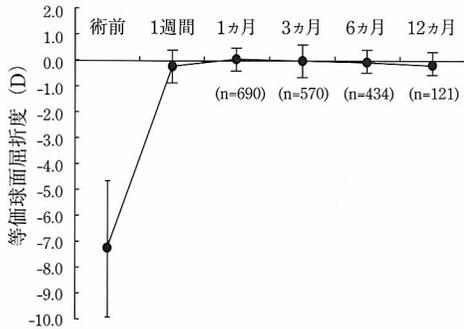


図4 自覚屈折度の経時的推移
横軸に術後期間を、縦軸に自覚屈折度(等価球面屈折度)を示した。

のような術後早期の過矯正や近視への戻りはなく、LASIKに近い経過を示した。PRK後の屈折度変化は、角膜上皮の過形成や実質に線維芽細胞や異常コラーゲンの出現など、実質の再構築が起こるためとされている^{10, 11)}。LASEK後の角膜を共焦点顕微鏡で観察したところ、PRKと同様に上皮混濁に一致して上皮基底膜から実質浅層にかけて輝度の高い不均一な構造物がみられる(投稿中)ことから、程度は軽くてもPRKと同様の組織学的変化があると思われる。

3) 矯正精度

術後3, 6, 12ヵ月の矯正精度を表3に示した。すべての期間で目標屈折度の±0.50 D以内に70%以上、±1.0 D以内に90%以上、±2.0 D以内にはほとんどの症例が入り、良好な結果が得られた。LASEKの過去の報告では、目標屈折度の±1.0 D以内の割合は約93~100%¹²⁻¹⁴⁾であるが、我々の結果も同程度に良好であった。一方、LASIKで目標屈折度の±1.0 D以内の割合は80~100%⁴⁻⁹⁾であるが、LASEKでは矯正量が10 D以上でもよい効果が得られるのに対して、LASIKでは10 Dをこえると低矯正になりやすいことから、対象が最強度近視の場合は、LASEKの矯正精度がLASIKを上回ると考えられる。

表3 矯正精度

矯正精度	術後期間			眼数 (%)
	3ヵ月	6ヵ月	12ヵ月	
±0.5 D以内	435 (76.3)	320 (73.7)	97 (80.2)	
±1.0 D以内	531 (93.2)	400 (92.2)	112 (92.6)	
±2.0 D以内	567 (99.5)	425 (98.0)	118 (97.5)	
全体	570 (100)	434 (100)	121 (100)	

4) 角膜上皮混濁

全期間での角膜上皮混濁の出現は61.9%にみられ、その内訳は grade 0が38.1%, grade 1が35.4%, grade 2が20.5%, grade 3が4.8%, grade 4が1.2%であった。Grade 4の4例8眼は、若年者、矯正量が球面-10 D以上、円柱が-2.0 D以上の症例であった。図5に全症例の角膜上皮混濁スコア(平均値)の経時的推移を示した。角膜上皮混濁は術後1~3ヵ月をピークに徐々に軽減し、術後12ヵ月ではごく一部の症例を除き消失した。角膜上皮混濁に影響する因子を検討したところ(表4)、年齢、切除深度、球面矯正量、円柱矯正量、術後1~3日目の角膜上皮の混濁との間に有意な相関がみられた(Spearmanの順位相関係数)。この結果から、若年者で球面矯正量や円柱矯正量が多い症例、更にCL下で術後早期に上皮の混濁が強い症例は、後になって術後1~3ヵ月で強い上皮混濁が生じやすく注意が必要であることがわかる。術後の角膜上皮混濁は、PRKではよく観察される合併症であるが、LASEKでは報告によりばらつきがありその頻度は13~63%^{12, 13, 15)}で、一般的にPRKに比べ上皮混濁の出現頻度が低く、また出現してもその程度は軽いといわれる¹²⁻¹⁶⁾。PRKにおける混濁は、レーザーを照射した角膜実質にケラトサイトの活性化が起こり、線維芽細胞が出現しコラーゲンの配列に乱れが生じ、実質で再構築が起こ

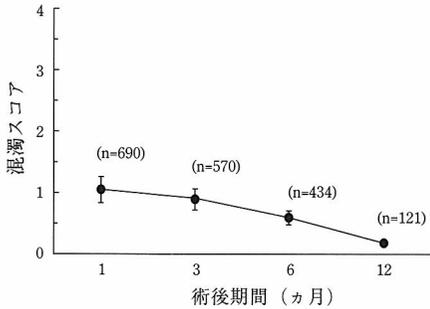


図5 角膜上皮下混濁の経時的推移
横軸に術後期間を、縦軸に角膜上皮下混濁スコアを示した。

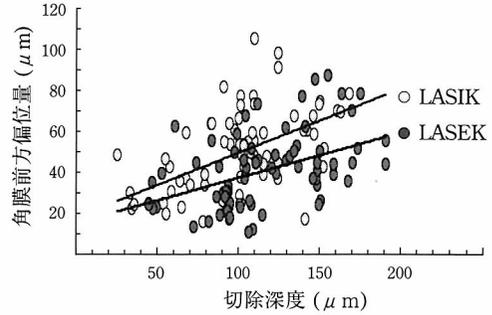


図6 角膜後面の前方偏位量
横軸に切除深度を、縦軸に前方偏位量を示した。

表4 角膜上皮下混濁に影響する因子

	術後期間	
	1ヵ月	3ヵ月
年齢	-0.27**	-0.22*
術前角膜厚	0.07	0.09
切除深度	0.31**	0.30**
球面矯正量	-0.22**	-0.14
円柱矯正量	-0.23**	-0.39**
フラップ作製時間	0.03	0.04
術後疼痛	0.09	0.10
術後1~3日目の上皮混濁	0.52**	0.40**

* : p<0.01, ** : p<0.001

ることが原因であるが、LASEKでは照射面がある程度生存した上皮細胞に覆われているため、涙液や上皮細胞から分泌されるケモカインなどのケミカルメディエーターなどからレーザーの照射面が守られ、炎症が抑制されるためケラトサイトの活性化や線維芽細胞の出現が少なく上皮下混濁も少なくなると思われる。このことは、LASEK後の上皮下混濁は術翌日に角膜上皮の一部混濁した部分（アルコールやフラップ操作により死んだ上皮細胞であると考えられる）が多いほど術後1週～1ヵ月で起こる上皮下混濁が多いことでも裏付けられる。そこで、上皮下混濁を少なくするためにはより多くの生存した上皮細胞が照射面を被覆することが大切といえる。

5) 角膜後面前方偏位

LASIKでは矯正量が多いほど術後に角膜後面の前方偏位量が多くなることが報告されている¹⁷⁻¹⁹⁾。LASEK術後3ヵ月の症例で角膜上皮下混濁が全くなく、角膜形状解析装置ORBSCAN (ORBTEK社製)で周辺まで測定可能であった70眼の術後の角膜後面前

方偏位について、LASIK 70眼と比較検討した(図6)。LASEKにおいてもLASIKと同様に、矯正量が多いほど術後の角膜後面偏位量が多く測定されたが、その偏位量は全体としてLASIKより少なかった。LASEKはLASIKよりも表層で切除を行うため術後の角膜前方偏位量がLASIKより少なくなる可能性もあるが、ORBSCANを使用した角膜後面の術前後の評価自体も再検討する必要があると思われる。

5. LASEKの利点と問題点

LASIKでは極端に平坦または急峻な形状の角膜ではフリーフラップやボタンホールなどが、また皸裂の狭い症例では吸引不良によるハーフカットなどのフラップ作製時の器械的トラブルが危惧されるが、LASEKの利点はフラップ作製が角膜の形状や皸裂幅に全く影響されないことである。また、術後のdiffuse lamellar keratitisやマイクロストリエなどのフラップにまつわる合併症もない。更に、ボクシングなど格闘技をする人はLASIKではフラップのずれや皸が危惧されるが、LASEKでは上皮のフラップは消失するのでこの心配もない。また、角膜厚についてもLASIKより表層を切除するので残角膜厚がLASIKより少なくても、術後keratectasiaを起こす危険性も少ないと思われる。これらの理由から、LASIKより適応を広くできるのがLASEKの最大の利点である。当院では、LASEKの術後予測残角膜厚を350μm以上としているが、現在までこの基準で術後にkeratectasiaを起こした症例はない。更に、LASIKはフラップ作製時に深層で太い三叉神経を切断してしまうので知覚低下が継続し、それに伴う術後ドライアイが多いが、LASEKでは知覚が低下しにくくその回復も迅

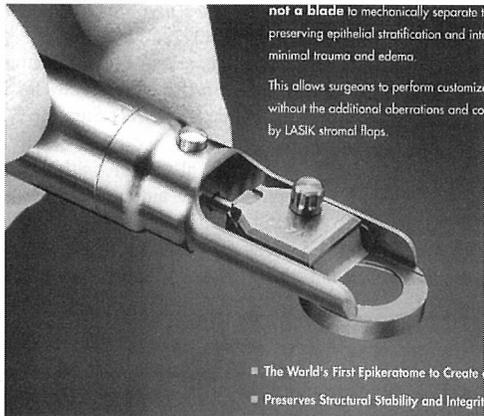


図7 Epi keratome
Centurion SES EpiEdge (チバビジョン社製)

速である^{20, 21)}ため、術後ドライアイの訴えはほとんどない。

一方LASEKの欠点は、PRKほどではないが術後に軽度の疼痛を伴うこと、また視力改善にLASIKより時間がかかり、角膜上皮下混濁が起こることである。とくに角膜上皮下混濁はPRKよりは軽度で視力にはほとんど影響しないが、かなり多くの症例に出ることが問題である。また、まれではあるがフラップ作製が難しくPRKに移行せざるを得ない場合もある。LASEKはきれいにフラップができればLASIKにかなり近い臨床経過が得られるが、アルコールの影響で上皮細胞の一部死滅は避けられない。これが、どんなにLASEKが改善されLASIKに近づいてもLASIKをこえることはできない理由であり、LASEKは屈折矯正手術のもう一つのオプションでしかあり得ない。

6. LASIKをこえるか?—Epi-LASIK—

さて、そこで近年注目されているのがEpi-LASIKである。Epi-LASIKはギリシャのPallikarisが考案した手技である²²⁾が、LASIKのフラップを角膜上皮のみに薄くしたものである。また、これはLASEKのフラップ作製をアルコールに頼らずに機械的に行う方法とも考えられるが、この手技ではEpi-keratome (図7)を使用する。Epi-keratomeは通常のマイクロケラトームと違い刃が鈍であるため、角膜上皮とボーマン膜の間を分離でき、角膜上皮のみのフラップを作ることができる。Epi-keratomeを使用した病理所見では、上皮細胞の基底膜領域はlamina lucidaやlamina densaも損傷を受けずに維持されていることも報告さ

れている²³⁾。これによりLASEKで問題となる上皮細胞の死滅をかなり軽減することができ、従来のLASEKより更にLASIKに近い臨床経過が、つまり痛みがほとんどなく術翌日から良好な視力が得られる可能性がある。更に、上皮下混濁につながる実質細胞の活性化を抑えることが期待でき、LASEKの最大の問題点である混濁も少なくできる可能性がある。McDonaldはEpi-keratomeで作られたフラップは、術翌日の接着が良好で、良い視力を得るのに十分透明で辺縁もきれいであることを紹介している²⁴⁾。もしEpi-LASIKが通常のLASIKに限りなく近い臨床経過を得られれば、LASIKとLASEKから進化したEpi-LASIKに近い将来屈折矯正手術の中心になり、LASIKやLASEKが淘汰される日がくるかもしれない。現在、Epi-keratomeの作製は数社が研究中であるが、そのなかでもCenturion SES EpiEdge (チバビジョン社製)は、2003年9月に世界で初めてEpi-keratomeとしてFood and Drug Administration (FDA)の認可を得ている。

7. おわりに

LASEKは術後軽度の疼痛を伴い、視力改善に若干時間を要する点がLASIKに劣るものの、矯正精度はLASIKと同程度によく、良好な裸眼視力も期待できる。更にその適応をLASIKより広くできる利点もある。しかし、LASEKでは上皮フラップの作製にアルコールを使用するため上皮細胞のある程度の死滅は避けられず、角膜上皮下混濁を減らすための対策が必要である。このようなLASEKの利点と欠点を理解した上で、屈折矯正手術のもう一つのオプションとしてLASEKを施行することがよいと思われる。

文 献

- 1) エキシマレーザー屈折矯正手術のガイドライン. 日眼会誌 104: 513-515, 2000.
- 2) Camellin M: LASEK may offer the advantages of both LASIK and PRK. Ocular Surgery News, International Edition 10: 14-15, 1999.
- 3) 北澤世志博, 沢井秀明他: エキシマレーザー屈折矯正手術 Laser epithelial keratomileusis (LASEK) の初期臨床成績. 日眼会誌 107: 249-256, 2003.
- 4) Fernandez AP, Jaramillo J & Jaramillo M: Comparison of photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis for myopia of -6 D or less using the Nidek EC-5000 laser. J Refract Surg 16: 711-715, 2000.
- 5) Stojanovic A & Nitter TA: 200Hz flying-spot technology of the LaserSight LSX excimer laser in the treatment of myopic astigmatism: Six and 12 month outcomes of laser

- in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy. *J Cataract Refract Surg* 27: 1263-1277, 2001.
- 6) Reviglio VE, Bossana EL et al: Laser in situ keratomileusis for myopia and hyperopia using the LaserSight 200 laser in 300 consecutive eyes. *J Refract Surg* 16: 716-723, 2000.
 - 7) Nuijts RM, Nabar VA et al: Wavefront-guided versus standard laser in situ keratomileusis to correct low to moderate myopia. *J Cataract Refract Surg* 28: 1907-1913, 2002.
 - 8) Chitkara DK, Rosen E et al: Tracker-assisted laser in situ keratomileusis for myopia using the autonomous scanning and tracking laser: 12-month results. *Ophthalmology* 109: 965-972, 2002.
 - 9) McDonald MB, Carr JD et al: Laser in situ keratomileusis for myopia up to -11 diopters with up to -5 diopters of astigmatism with the summit autonomous LADARVision excimer laser system. *Ophthalmology* 108: 309-316, 2001.
 - 10) Amm M, Wetzel W et al : Histopathological comparison of photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis in rabbits. *J Refract Surg* 12: 758-766, 1996.
 - 11) Park CK & Kim JH: Comparison of wound healing after photorefractive keratectomy and laser in situ keratomileusis in rabbits. *J Cataract Refract Surg* 25: 842-850, 1999.
 - 12) Claringbold TV 2nd : Laser-assisted subepithelial keratectomy for the correction of myopia. *J Cataract Refract Surg* 28: 18-22, 2002.
 - 13) Shahinian L: Laser-assisted subepithelial keratectomy for low to high myopia and astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 28: 1334-1342, 2002.
 - 14) Anderson N, Beran R & Schneider T: Epi-LASEK for the correction of myopia and myopic astigmatism. *J Cataract Refract Surg* 28: 1343-1347, 2002.
 - 15) Lee JB, Seong GJ et al: Comparison of laser epithelial keratomileusis and photorefractive keratectomy for low to moderate myopia. *J Cataract Refract Surg* 27: 565-570, 2001.
 - 16) Rouweyha RM, Chang AZ et al : Laser epithelial keratomileusis for myopia with the autonomous laser. *J Refract Surg* 18: 217-224, 2002.
 - 17) Wang Z, Chen J & Yang B: Posterior corneal surface topographic changes after laser in situ keratomileusis are related to residual corneal bed thickness. *Ophthalmology* 106: 406-409, 1999.
 - 18) Kamiya K & Oshika T: Corneal forward shift after excimer laser keratorefractive surgery. *Semin Ophthalmol* 18: 17-22, 2003.
 - 19) Yoshida T, Miyata K et al: Difference map or single elevation map in the evaluation of corneal forward shift after LASIK. *Ophthalmology* 110: 1926-1930, 2003.
 - 20) 松井裕康 : LASEK って何ですか. あたらしい眼科 18 (臨増) : 92-94, 2001.
 - 21) 松井裕康 : 屈折矯正角膜手術のこれからの方向 : LASEK. 臨眼 56: 1232-1235, 2002.
 - 22) Pallikaris IG, Katsanevaki VJ et al: Advances in subepithelial excimer refractive surgery techniques: Epi-LASIK. *Curr Opin Ophthalmol* 14: 207-212, 2003.
 - 23) Pallikaris IG, Naoumidi II et al: Epi-LASIK: Comparative histological evaluation of mechanical and alcohol assisted epithelial separation. *J Cataract Refract Surg* 29: 1496-1501, 2003.
 - 24) McDonald MB: New technology may combine benefits of PRK and LASIK. *EyeWorld* 8(3): 45, 2003.
-

Glenn Fry Award Lecture 2002 波面計測・理想的な矯正・視機能

Raymond A. Applegate (College of Optometry, University of Houston)

(訳 大川 賀孝, 不二門 尚 (大阪大学))

序 文

1971年に Glenn Fry 氏に初めて会って過ごした2時間のことは今でも憶えている。私はそのとき Indiana 大学を卒業間近で、同大学の optometry program に進もうかと考えていたが、同時に Ohio 州立大学の program にも興味を惹かれており、面接のため Columbus (Ohio 州の州都) に行った。Glenn Fry 氏は自ら施設見学に付き添ってくれたが、そのときの私は彼のことを知らず、見学担当者がなぜこのような年長のスタッフに施設見学の付き添いなんてさせるのだろうと不思議に思っていた (32年経って、私にもこのことの意味がわかったのだが)。一方、彼は私のことも、Indiana 大学心理学部の Lee Guth 教授の研究室で働いていることも知っていた。挨拶代わりに彼は色覚に関する自分の考えを議論し始めたが、あまりに唐突で私は狼狽した。その反応をみて、今度は自分の研究室に連れて行き、データ解析用に自分で組み立てたコンピュータをみせてくれた。その分野が苦手な私は深く感銘を受けた。2時間の面接はあっという間だったが、私はこの研究室で働くことを決心していた。学部長は自分の故郷に有名な optometry school があるにもかかわらず、州外授業料を払ってまでここに来る価値があるのかと気にしていたが、私にとってそれは十分価値のあることだった。そして Indiana 大学卒業後、Glenn Fry 氏と働き始めた。

波面計測・理想的な矯正・視機能について語る前に、この業績に関して謝辞を述べたい。いつも私の才能を信じ続けてくれた両親に、ずっと私を支え続けてくれた妻の Rachel と Aaron, Ryan, Camille, Olivia の4人の子供達に感謝している。研究面では、恩師・同僚とともに、偉大な先人達に感謝したい。

研究成果というものは、多くの先人達の業績の上に成り立っているものであるが、特に重要な人物を幾人か挙げる (表1)。この多様な人々に共通しているのは (もちろん才能という点はそうだが)、彼らは研究そのものが好きであり、知識や技術を皆と共有することをいとわず、未知を探索することに惹かれていることである。

Henry Hofstetter は自分の授業を「新しい学問を習うということの90%は一連の単語の意味と含意を憶えるということである」と切り出した。1971年に私が optometry の初授業を受けたときだった。ものを厳密に定義するのに便利な単語はたくさんあるが、“optometry” という単語の二つ目の意味はこの問題を考えるのに特に有用だ。Optometry という単語の二つ目の定義は「optometer の使用」である。Optometer という単語は「眼の屈折度を主観的・客観的に計測する機器」を定義している。

表1 謝辞 (ほぼ年齢順)

Lee Guth	Chris Jonston
Jim Huff	Howard Howland
Gordon Heath	Wick van Heuven
Bob Massof	Joe Harrison
Jim Worthey	Ed Sarver
David Henson	Gene Hilmantel
Irv Borish	Xiaoxiao Zhang
Marshall Marvelli	Steve Klyce
Tony Adams	Marguerite McDonald
Gerald Westheimer	Ron Krueger
Mert Flom	Scott MacRae
Arthur Bradley	Austin Roorda
Russ DeValois	David Williams
Rafi Mallach	Bill Donnelly
Larry Thibos	Jason Marsack

新しく臨床・研究で使われるようになった収差計は optometer の新しい分野である。収差計は眼の光学的欠陥を比類のない精密さで効率的に計測でき、従来の球面・円柱レンズによる矯正よりも網膜像をはるかに良好に改善できるような矯正手段を可能にした。この新しい波面計測計は莫大な額の新市場を生み出す。波面収差は網膜像の質を決定する重要な要素ではあるが、唯一の要素ではない。他の要素とは、回折・散乱・色収差である。網膜像の質と視力は同じものと結論付けがちだが、それは間違っている。網膜像の質は視力に影響する一要素でしかない。他の重要な要素とは、入力を翻訳する視路（神経伝達）の能力と、感知したものの意味を外界に伝達する能力（認識・行動）である。Marguerite McDonald の「網膜像は2.0なのだが、脳は0.05だ」という言葉を引用して、この2要素を強調しておく。ここでは波面を利用した矯正について検討し、波面や波面収差とは何かを定義しよう。そのあとに網膜像の質、視力を制限する因子、各々の収差やその組み合わせがどのように視機能に影響し、波面収差がどのように視力に影響するかを決定するために、これらの複雑な因子を最小限におさえる方法を述べよう。

網膜像の質に影響する重要な因子

網膜像の質は回折・波面収差・散乱・色収差などのいくつかの因子で決定される。ここでは回折と波面収差について解説・図解するが、散乱・色収差については触れるだけしておく。

波面計測が臨床で実用化され始めてから²⁾、眼科機器産業界は（屈折矯正手術の結果を改善する可能性、という市場の動きにつられて）、従来の屈折矯正手術によって引き起こされる球面収差等の高次収差を減少させるための様々な屈折矯正法を評価し始めた。実用的なものとして、コンタクトレンズ、無水晶体眼・有水晶体眼の眼内レンズ、角膜実質内レンズ、様々な方法の角膜屈折矯正手術等が対象である。

波面収差を理解することが、網膜像の質を鮮明にし quality of vision を改善させることにどう役立つかということは重要であるが、同様に眼の波面収差を矯正することは、逆に眼の観察像を改善することにも注目するべきである。補償光学により網膜像は生体で無侵襲に視細胞レベルまで観察できるようになり³⁾、網膜生理機能や病態の理解が深まった（Roorda & Williams^{4, 5)}）。

波面計測を理解するには光に対する考えを光線から波面へと変えることが役に立つ。光線は波面へと変換できる（図1）。点光源を発してから同じ経過時間を経た光線上の点（同じ光学的距離を通過した点）に短い垂線を書き込み、それを光線間でつなげればよい。無限遠にある点光源から発した波面は図のように、平行な光束に対して垂直な面となる。無収差の光学系によって屈折すると、光線は焦点に集まる。先ほどと同様に各光線に短い垂線を書き込んでそれをつなげれば、波面は焦点が近づくにつれだんだんと小さくなる球面として描かれる。

収差のある眼では屈折後の波面（赤線）は球面にならず、理想面（黄線）から歪んだ面を描く（図2）。それぞれの瞳孔径においてその内側にあるすべての点で、完全な球面を描く波面と実際の歪んだ波面との差がその眼の波面収差である。

実際の波面と理想的な波面との違い、すなわち波面収差を表現するのに非常に有用なのが Zernike 展開である。Zernike 展開では収差をいくつかの独特な成分に分解する。Zernike の各項は図3のようによく描かれる。眼科では各項は“Z”に二つの添え字を付けてあらわされる（double index system⁶⁾）。下付の“n”は次数（緑の数字）を意味し、上付の“m”は角周波数（赤の数字）を意味する。Zernike 展開の0次および1次の項は単色光の光学収差を測定する際は無視

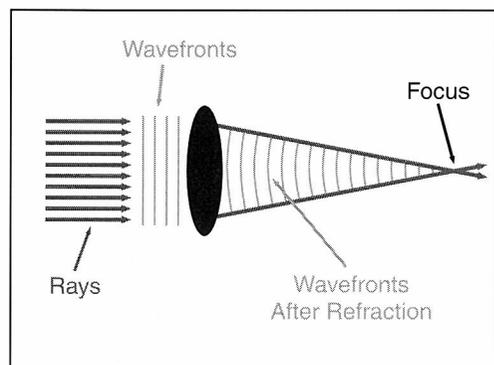


図1 無限遠にある点光源からの光は観測点では平行な光束となる。入射する光束を波面に変換するには各光線の同じ位相の点に小さな垂線を書き込み、それを光線間でつなげればよい。波面は光速で進む平行な面となる。無収差の光学系で屈折した光は焦点に集まる。先ほどと同様に屈折した光にも小さな垂線を書き込み、同じ位相の点をつなぐと、焦点に近づくにつれて小さな曲率となる球面、すなわち波面ができあがる。

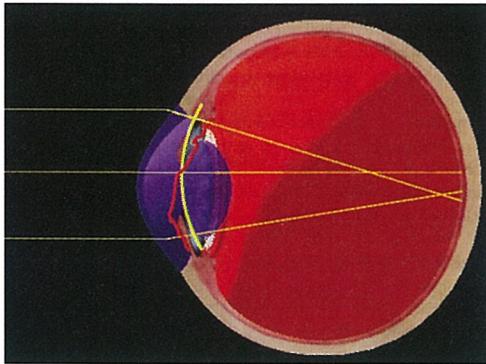


図2 無収差眼では無限遠からの平行な光線は、平行な波面となり、屈折後は完全な球面となる（黄の弧）。収差のある眼では屈折後の波面（赤線）は球面とならずに黄で描かれた理想的な面から歪んだ面となる。これが眼の光学収差である。それぞれの瞳孔径においてその内側にあるすべての点で、完全な球面を描く波面と実際の歪んだ波面との差がその眼の波面収差である。

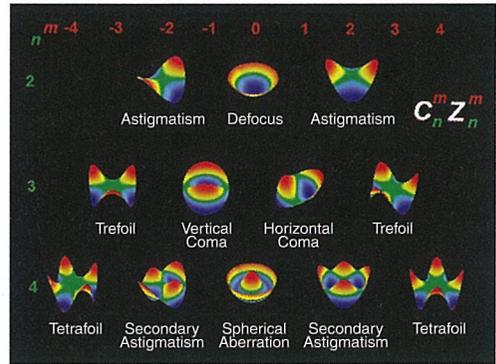


図4 2次から4次までのZernike展開各項の一般名

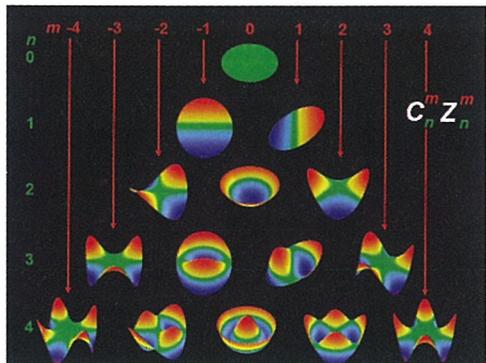


図3 Zernike展開ではこのようにピラミッド状に項を並べて表示することが多い。項は無数にあるがここには最初の15個を示す。各項は“Z”に二つの添え字（double index system）を付けてあらわされる。下付の“n”は次数（緑の数字）を意味し、上付の“m”は角周波数（赤の数字）を意味する。各項の大きさ（ C_n^m ）の合計が計測された波面収差をあらわす。

される。理由は簡単で、単色光の像の質にはどちらも影響しないからである。0次の項（ Z_0^0 ）はすべての位置で一定の波面収差を加え、1次の項（上下方向 Z_1^1 、横方向 Z_1^1 ）はプリズムの項であり、網膜像の位置に関係するが質には影響しない。2次の項は球面值（ Z_2^0 ）、乱視（ Z_2^{-1} 、 Z_2^1 ）として临床上よく使われていることは意外と知られていない。3次以上の項はまとめて高次収差と呼ばれる。2次から4次までの項で一般名のあるものを図4に示す。

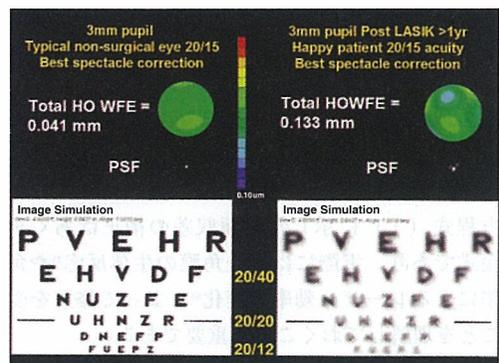


図5 各々完全矯正された正常眼および従来型のLASIK手術眼の高次収差・point spread function (PSF)・網膜像シミュレーション
両眼とも視力は1.25であるが、LASIK手術眼は正常眼に比べ高次収差が3倍もある。

波面収差が重要かつ有用であるのは、それが網膜像の質を低下させるからである。完全矯正した、正常眼および laser in situ keratomileusis (以下 LASIK) 手術成功眼 (S-0.12D=C-0.12D Ax 176°) の波面収差を比較したものを図5に示す。両方とも1.25の視力であるが、LASIK眼の高次収差が正常眼の高次収差の約3倍になっていること、網膜像シミュレーションにて視力1.25のラインの文字が判読するには十分である点に注意してほしい。重要なのはその文字像の光学的な質である。この図は従来型の屈折矯正手術と比較的よくある、「文字は読めるのです。しかし、以前ほど鮮明ではありません。」という術後愁訴の説明になる。Wavefront-guided refractive surgery は従来の (wavefront-guided でない) 屈折矯正手術に比べ、もともとある収差を減少させると同時に球面・円柱面の屈折異常をなくしたり、医原性の高次収差増加

をはるかに少なくしたりすることでこの愁訴を減らすことができる。

波面収差から理想的な収差補正光学系を定義することができる。瞳孔領内の各位置において波面収差から方程式 (1) で計算される量の実質を除去すればよい。

$$\text{除去すべき実質の量} = \frac{C+WEF}{n'-n} \dots\dots (1)$$

C: 除去される組織の最小量 [μm] WFE: 波面収差 [μm]
 n': 角膜の絶対屈折率 n: 空気 of 絶対屈折率

図 6 に示したように、波面が遅れている、すなわち理想の面よりも後ろにある場合は (屈折率の低い空気中で) 光がより速く進み理想面に追いつけるように実質をもっと削る。波面が進みすぎている、すなわち理想の面よりも前にある場合は (屈折率の高い角膜中で) 光がより遅く進み理想面まで後退するように削る実質を減らせばよい。

方程式 (1) に示した波面収差の補正はあくまで理論式であり、実際には術後角膜の生体反応⁷⁾や角膜曲率によるレーザー効率の変化⁸⁾によって修飾を受けることを理解しておくことは重要である。

それにしても、実際のところ高次収差は本当に重要なのだろうか? 高次収差は収差の大きさ・瞳孔面における分布・生理学的な瞳孔径の大きさを含むいくつかの因子と関係して視覚に影響する。

今まで不正乱視 (これは無数にある高次収差の臨床的な速記法である) というカテゴリーでひとまと

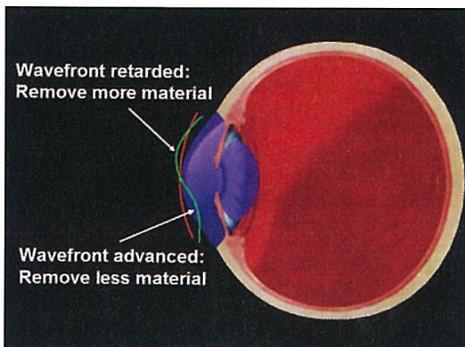


図 6 波面が遅れている、すなわち理想面よりも後ろにある場合はより速く進める空気中の部分を増やすよう実質をもっと削る。波面が進みすぎている、すなわち理想面よりも前にある場合はよりゆっくり進める角膜中の部分を増やせるよう削る実質を減らせばよい。

めにしてきた眼にとって最も重要なのは瞳孔径である。典型的な正常眼では、瞳孔径が大きいほど利得は大きくなり、瞳孔径が 3mm 以下になるとかなり見にくくなる。正常眼では瞳孔径が大きい方が利得は大きく⁹⁾、状況によっては見えるかどうかを決定する。雨天時の暗い夜にジーンズと暗い色のシャツを着て田舎道を歩いている人物を周りの景色と見分けようとする状況を想像してみるとよい。収差を小さくすることは、この人物を見分けるのに十分な網膜上のコントラストを得られるかどうかの違いを生み出す。

回折と網膜像の質

回折は網膜像の質を決定するのに重要である。可変絞りを付けた収差のない光学系では、Airy disk (回折により再分配された光束が焦点につくる回折のみの影響を考えた point spread function (以下 PSF) 像の直径) によって、理論上可能な最も鮮明な像を定義できる。瞳孔径が大きくなるにつれ、Airy disk の径が大きくなる (解像度が下がる)。方程式 (2) の結

$$r = \frac{1.22 \lambda f'}{n'a} \dots\dots\dots (2)$$

r: Airy disk の直径 λ: 真空中での波長
 f': 第二焦点距離 n': 像側媒体の屈折率 a: 瞳孔径

果が図 7 である。結果として、収差のない眼では瞳孔径が小さくなるほど網膜像の質は下がる (図 8)。瞳孔径による網膜像への回折の影響は optical transfer function (以下 OTF) によって周波数領域に表現される。論点はずれるので、ここでは OTF について説明しないが、あらましを述べる。もっと詳しく知りた

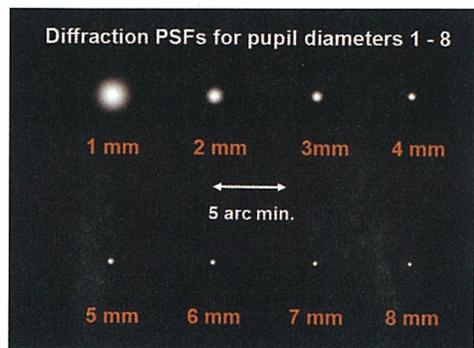


図 7 無収差眼の PSF と瞳孔径との相関
 PSF は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

ければ Williams と Bechlund の論文¹⁰を参照のこと。

どのようなものでも様々な空間周波数・コントラスト・方位・位置の正弦曲線成分からなるスペクトルに分解することができる。OTF は眼などの光学系によってそのスペクトルがどう変化するかをあらわす。OTF は modulation transfer function (以下 MTF) と phase transfer function (以下 PTF) の二つの成分からなる。MTF は射入側から射出側に空間周波数としてのコントラストを伝達する光学系の能力を意味する (図9)。PTF は光学系がスペクトルに含まれる各空間周波数の位置をどのように変化させるかを意味する。収差のない光学系では、瞳孔径にかかわらず位相 (PTF) の変化はないが、一方で MTF は大きく変化する。図9に回折のみの影響を考えた場合の

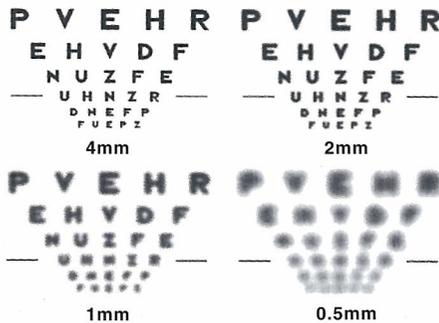


図8 4つの瞳孔径での無収差眼の logMAR チャート網膜像シミュレーション
横線は logMAR 視力 0.0 (小数視力 1.0) のライン。PSF は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

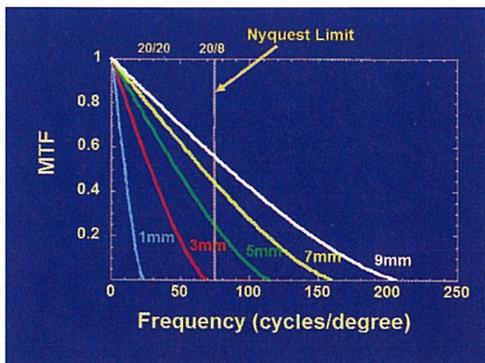


図9 無収差眼において5つの瞳孔径での modulation transfer function (MTF)
Nyquist の限界とは視細胞レベルでの解像限界のこと。これは直径約 2 μ m の視細胞による空間解像度から眼の視力限界は 2.0~2.5 までであることを示している。

5つの瞳孔径 (1, 3, 5, 7, 9 mm) の MTF を示す。すべての空間周波数で、MTF が 1 であるということは射入側から射出側にその空間周波数におけるコントラストが伝えられたことを示す。逆に MTF が 0 であることは全くコントラストが伝達できていないことを示す。図9で第一に注目すべきなのは、瞳孔径にかかわらず、全空間周波数でコントラストが 1 よりも小さいことである。これはどのような光学系でも (たとえ無収差であっても) 回折の影響でコントラストは損なわれるということである。第二に、瞳孔径が大きくなるにしたがい、像のコントラストと光学系を通過する空間周波数が増加することに注目してほしい。このように無収差の眼においては瞳孔径が最大の時に最もよいコントラストと忠実な網膜像が得られる。このことは先ほど記した PSF における回折の役割を反映している。

臨床的に回折は以下の影響をもたらす。(1) 網膜像の質を制限する大きな要素の一つである、(2) 瞳孔径が小さくなるにしたがい、影響が大きくなる、(3) 焦点深度と回折の影響のバランスを考えた場合、ピンホールテストでの理想の瞳孔径は 0.75~1.0 mm である。

図9に示した MTF は眼の光学系は軸中心に対称だと前提している。ゆえに空間周波数に関しては MTF をみれば十分ということになる。無収差眼における4つの異なる瞳孔径での MTF を図10に示すが、実際には MTF は 3次元であり、軸中心に対称でない光学系をもつ眼の波面収差を考えるとときには MTF の 3次

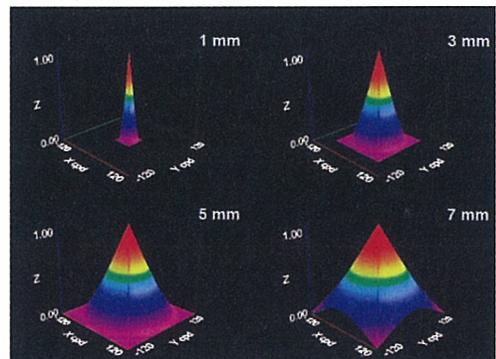


図10 無収差眼で4つの瞳孔径 (1, 3, 5, 7 mm) の MTF を 3次元的に計測したもの
図中の 120 cpd は視力 4.0, 60 cpd は視力 2.0, 30 cpd は視力 1.0 にそれぞれ相当する。MTF 像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

元的な変化を考えなければならない。

波面収差と網膜像の質

どのような瞳孔径であっても、回折のみの影響を考えた MTF や PSF に波面収差の影響を加えると悪化する。小瞳孔径（典型的には 2mm 以下）では回折の方が波面収差よりずっと影響が大きい。逆に正常眼では、瞳孔径が大きくなるにつれ、回折よりも波面収差の影響が大きくなる。図11をみればわかりやすい。無収差眼と完全矯正した正常眼（視力 1.33 以上）とを瞳孔径を 7 とおりにして PSF を比較したものである。瞳孔径 3mm 以下では波面収差はほとんど PSF に影響していないことに注意してほしい。図12

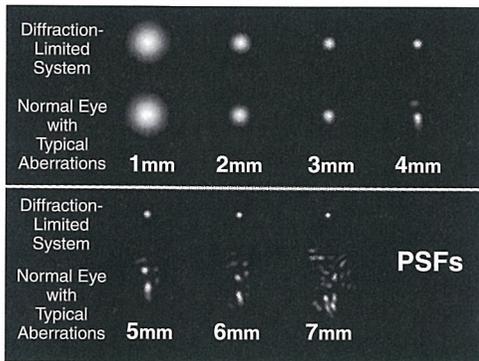


図11 回折のみの影響を考えた PSF 像
完全矯正した正常眼における瞳孔径の影響をみている。PSF 像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

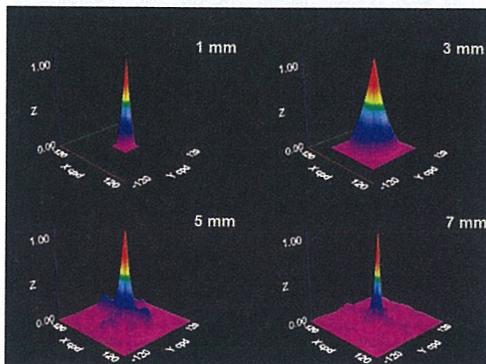


図12 完全矯正した正常眼の瞳孔径を変化させた MTF 像
図10と比較すると正常眼の波面収差をなくすことで利得が大きくなるのがわかる。像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

は同症例の瞳孔径 1, 3, 5, 7 mm の MTF への影響をみたものである。図10の回折のみの MTF 像と図12の完全矯正例を比較すると、小瞳孔径では回折が増え、大瞳孔径では収差が増えており、この典型例では最もよい瞳孔径は 3 mm であることを示している。3mm をこえる瞳孔径で比べると、正常眼では波面収差をなくすことで瞳孔径の大きさにしたがって利得が増え得ることがわかる。

眼科機器メーカーはまさに波面収差を小さくすることに着手し始めたところである。エキシマレーザーを使用した初期の屈折矯正手術は波面収差の著しい増加を引き起こし、それにより MTF の低下を招いた。手術方法の進歩により術後の生体力学的な効果を先読みし、レーザー効率も改善するにつれ術後の MTF も改善してきた。しかし、今よりもよい MTF が得られるだろうと術前に予言できるようになったのは、wavefront-guided 法が使用できるようになってからである。図13にこの時代の流れを図示する。左下は瞳孔径 6mm の術前眼の MTF、左上は1998年に施行された従来型 LASIK の成功例、右上は FDA (Food and Drug Administration) に Alcon 社が申告した従来型 LASIK の平均的な症例、右下は同様に申告された wavefront-guided custom cornea の平均的な症例である。FDA 審理では瞳孔径が 6mm でなく 6.5mm になっていることに注意。図13の中心に最も MTF が大きい、瞳孔径 6mm の回折のみの影響をみたときの MTF 像を示す (波長 555 nm の単波長)。様々な理由で、ここまでの MTF を得ることは不可能であるが、

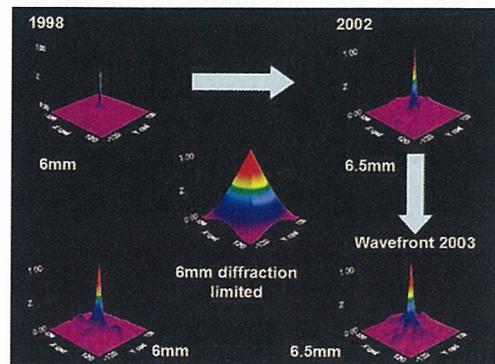


図13 MTF 像でみる、この 5 年間の屈折矯正手術の進歩 (詳細は本文参照)
MTF 像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

これからも手術方法はどんどん改善していこう。

相変化の影響

波面収差は相変化ももたらす。図14に示すように、Siemen's star を波面収差をもつ眼で見るとすぐにわかる。Siemen's star 中心部では0.5Dの defocus が相の反転をもたらす（黒い棒が白くなり、白い棒が黒くなっている）ことに注意してほしい。この相反転は文字視力に特に大きく影響する（図15）。上列では文字が大きいうちは相変化の影響はコントラストの低下に紛れているが、文字が小さくなるにつれ読み辛くなってくる。下列は収差をそのままにして、相変化だけを補正したもので、コントラストは低下しているが、文字は判読できる。これは相反転による視力への影響はコントラスト低下に付随する視力低下よりも大きい可能性があることを示している。

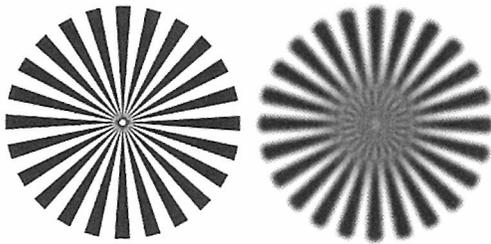


図14 左は無収差眼で見た Siemen's star
右は 0.5D の defocus のある眼で見たもの。
中心付近で相反転が起こっていることに注意。
像は Visual Optics Laboratory, version 6.11
を使用して作成。(Sarver and Associates
社, www.sarverassociates.com)

Images with phase reversals present



Images with phase reversals corrected



図15 光学的に収差を与えた文字視標
上は optical transfer function をすべて (MTF
および phase transfer function (PTF)) 加えた
網膜像シミュレーション。下は相のずれを
なくしたもの。波面収差による相のずれは
コントラストの低下よりも重要である。像
は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を
を使用して作成。(Sarver and Associates 社,
www.sarverassociates.com)

臨床的な影響

波面収差の臨床的影響は以下のようなものである。瞳孔径は回折と逆の影響を与え、瞳孔径が大きくなるほど網膜像の質は悪くなる。球面・円柱面を矯正した正常眼では3mmの瞳孔径が最も忠実な網膜像をもたらす。球面・円柱面の値が非常に小さい正常眼では瞳孔径を3mm以下にしても焦点深度と回折のバランスは変化しない。視機能と波面収差との相関は同じ瞳孔径でみるべきである。

円錐角膜のような病的眼の多くで、高次収差を減少させることで得られる利得の増加は大きい。典型的な正常眼で高次収差を減少させた場合に得られる利得の増加は、3mm以下の瞳孔径では無視できるほど小さく、それ以上の瞳孔径では大きくなる。

散 乱

眼における散乱は一般に前方散乱と後方散乱の2つに分類される。前方散乱とは違う方向に行くもの、もともと進んでいた方向に進み続ける光のことである。前方散乱は網膜像のコントラストを減少させ、像をぼけさせる。後方散乱とは、もともと進んでいた方向と逆方向に進む光のことである。後方散乱はスリットランプで見るように角膜や水晶体といった眼の中間透光体を可視化する。前方散乱させる要素が多いほど網膜像はぼける。前方・後方散乱の原因で一番多いのが白内障である。手術による治療は進んでいるが、世界では白内障はいまだに失明原因の1位であり¹⁾、低コストの予防法や進行を抑える手段が望まれている。ごく軽度の白内障があるふつうの眼では散乱は視覚の質にあまり影響しない。

色 収 差

眼の中では波長ごとに光の速度は変化し、これは屈折率に従う。すなわち、方程式(3)に示すように

$$n_{\lambda} = \frac{\text{真空中の光の速度}}{\text{媒体内での波長 } \lambda \text{ の光の速度}} \dots\dots (3)$$

波長が短いほど速度は遅くなり、屈折率は高くなる。眼に入った光は屈折率が高いほど屈折角が大きくなる。したがって、青色光の焦点は赤色光より手前になる。図16に示したように波長450nmと750nmでは焦点のずれは1.5D相当になる。色収差は像の焦点や大きさ、位置に影響を及ぼし、網膜像の質を落と

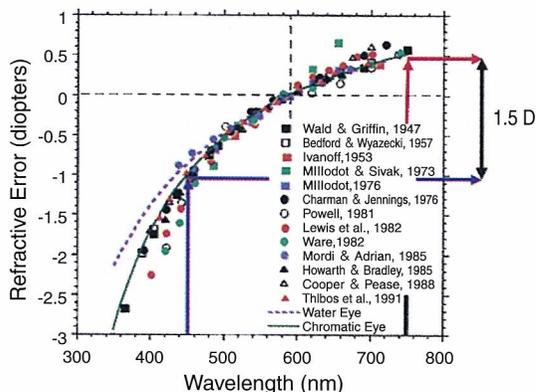


図16 波長 [nm] による屈折誤差 [D]
Kruger RP らによる Wavefront Customized Visual Corrections: The Quest for Supervision II 内の Chromatic aberration and its impact on vision より許可を得て改変。

す。焦点の合っていない光に対して視細胞は感度が低くなるため、この質の低下はある程度カバーされる。色収差は悪さばかりするわけではない。多色光の PSF は単色光のものに比べて円滑であり、ある程度の色収差ならお互いに相殺される。

単色光波面収差は視機能にどう影響するか

単色光の波面収差が視機能へどう影響するかを理解するには、どの収差が特に有害か、収差間でどのように相互作用しているかを知ることが役に立つ。標準化された Zernike 展開で重要なのは、それぞれの項の係数の大きさが合計した波面収差にどれくらい寄与しているかということである。図17に図示しているのは従来型 LASIK 成功例術後3年の波面収差を10次まで Zernike 展開した各項の係数 [μm] である。一番大きな値の項が視機能に最も影響していると考えがちである。同様に、収差の合計が大きくなるほど視機能は落ちるとも考えがちである。この2つの考え方は常に正しいとは限らない。各係数の大きさが全収差の大きさに影響しているからといって、一番大きな Zernike 係数が視機能に最も影響するというわけではない。後で述べるが、Zernike 展開の項のうち、特に視機能に影響しやすいものがある¹²⁾。更に、項の組み合わせによって、視機能への影響は改善したり悪化したりする¹³⁾。

視機能を予測できる一価の光学的測定基準を発達させることは研究者・臨床家の両者に等しく重要である。波面収差を使って、眼の光学的性質を計測し

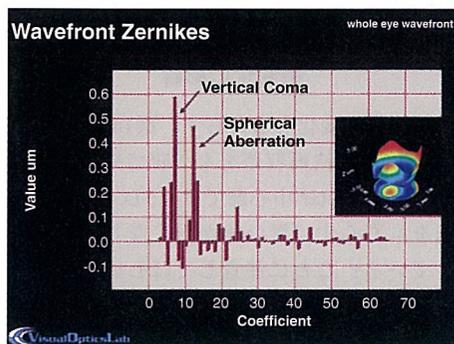


図17 従来型 LASIK 成功例術後3年の波面収差を10次まで Zernike 展開した各項の係数値 [μm] 瞳孔径は6mmで測定。一番大きいのは縦方向のコマ収差 (double index system では C_{-1}^0 , ここでは single index system の C7 で表示している) と球面収差 (同様に C_4^0 , ここでは C12) である。しかし、最も大きい値であるにもかかわらず、視機能に一番影響しているわけではなさそうである。グラフ中の挿絵はこの眼の全収差を図示したもの。像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

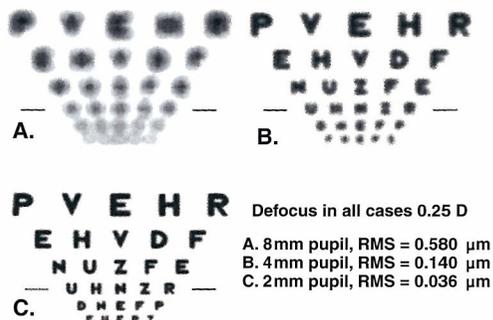


図18 3つの瞳孔径で0.25Dのdefocusを負荷した網膜像シミュレーション像 (A: 8mm, B: 4mm, C: 2mm) Defocus は一定であるので、瞳孔径が小さくなるにつれて像の質が改善していることを屈折ずれでは説明できない。Root mean square (RMS) ではそれが可能である。Zernike 各項の RMS 値は視機能に影響する。視力表中の線は視力 1.0 (logMAR 視力 0.0) の線。像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

たり、PSFのような他の光学的測定基準を算出することができる。一方で PSF により網膜像シミュレーションが可能である。このような変換は収差の視機能への影響を定量化・可視可するときに便利な道具となる。図18は logMAR チャートの4つの瞳孔径に

て0.25Dの defocus を起こしたときの網膜像シミュレーションである。Defocusの値は変わらないにもかかわらず瞳孔径が小さくなるほど波面収差は減少していることに注意してほしい。図18でわかるように、また過去にも報告されているとおり、Zernike 項の root mean square (以下 RMS) をみると網膜像が悪化したのか改善したのかわかる¹⁰⁾。Defocus の値やその換算値ではわからない。

過去に波面収差のどの項が大きくなって視力は低下するということを証明した¹⁰⁾が、同時に、すべての収差が同等なものではなく¹²⁾、収差間で相互作用することも報告した¹³⁾。すべての収差が同等でないことを証明するために、被験者に瞳孔径6mm、0.25μmの波面収差を負荷して高コントラスト logMAR チャートを読んでもらった¹²⁾。0.25μmの波面収差は一度につき Zernike の各項の一つに負荷した。瞳孔径6mm、0.25μmの波面収差は、等価球面值に換算して0.25D以下に相当する。この条件を選んだのは、典型的な従来型のレーザーによる屈折矯正手術成功例の残存高次収差の範囲内にあるからである。光学収差を最小(全員1.25以上の視力)になるよう被験者を選び、ランダムに Zernike 各項の収差を負荷したチャートを読んでもらい、5文字間違うところまでの文字数を数えるということを三度繰り返した。3回分の結果を平均し、各チャートで読める文字数から収差を負荷していないチャートで読める文字数を引き算した。この結果は負荷による文字数の増減を意味し、被験

者に対する収差の影響を反映し、かつ収差以外の光学的影響を最小限にとどめたものとなる。予想どおり、文字数が増加した被験者はいなかった。Zernike の各項がすべて同じくらいに視力に影響するならば、減少する文字数は項すべてで一定であるはずである。図19に示すようにこれは正しくない。Zernike 展開のピラミッドでは中心近くにある項の方が端寄りにある項よりも視力に影響している。図20は視力0.5のE視標に、Zernike 各項で瞳孔径6mm、0.25μm RMSの波面収差を負荷してシミュレーションしたものである。Zernike 各項は相互作用しながら視機能に影響する。研究し始めてすぐに気付いたことだが、同じ符号(正か負)をもつ項、同じ角周波数(図3の赤字)をもつ項、次数(図3の緑字)が2つ離れた項は適当な組み合わせのときには、それぞれ単独の時よりも視機能を改善する¹³⁾。例えば、defocus (C_2^0)と球面収差(Z_4^0)は適当な組み合わせになると、それぞれ単独の時よりも視機能の低下が少ない。図21に波面収差の合計を一定(0.25μm, 瞳孔径6mm)にし、defocusと球面収差の割合を変化させたものを図示する。グラフはそれぞれの組み合わせで読める文字数がどれくらい減少したかを示している。左端は球面収差のみ、右端は defocus のみとなっている。すべての組み合わせで波面収差の合計は一定にもかかわらず、適当な組み合わせにより視力は2段階近く改善していることに注意してほしい。図22は適当な組み合わせにする前とした後の網膜像シミュレーションである。それぞれ単独の時の方が、波面収差の大きさは小さいにもかかわらず、適当な組み合わせになった時よりも視力が落ちていることが網膜像シミュレーションからわかる。この発見は2つ次数が離れ

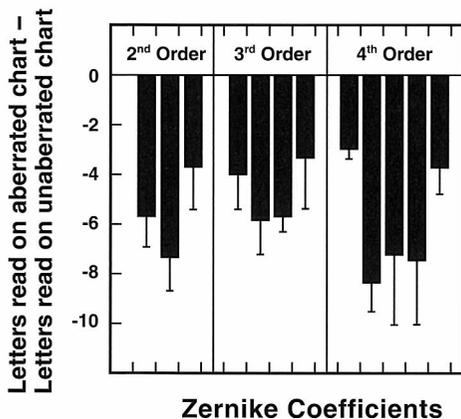


図19 Zernike 各係数で、収差を負荷したチャートで読めた文字数から負荷しないチャートで読めた文字数を引いたもの
すべての係数で収差は0.25μm RMS, 瞳孔径6mm (等価球面值で0.19D相当)。

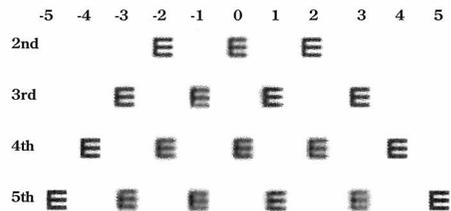


図20 Zernike 各項で、視力0.5のE視標を収差を0.25μm RMS, 瞳孔径6mm (等価球面值で0.19D相当)を負荷したもののピラミッドの中心寄りの項は端寄りの項よりも像の質に影響していることに注意。Rochester 大学 David Williams Laboratory の Li Chen のご厚意によるもの。

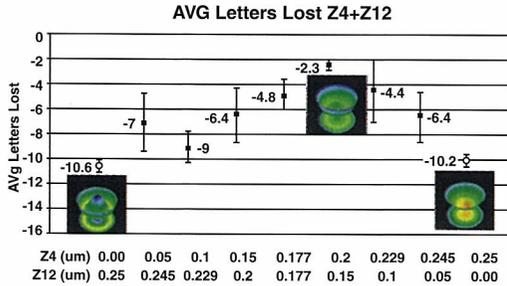


図21 波面収差の合計を $0.25\mu\text{m}$ RMS で統一した defocus (Z_0^0) と球面収差 (Z_4^0) を様々に組み合わせ (グラフ横軸), 減少した文字数の被検者間平均値 (収差負荷のチャートで読めた数 - 収差なしのチャートで読めた数) 誤差は $\pm 1\text{SD}$ 。Applegate らの論文より改変。

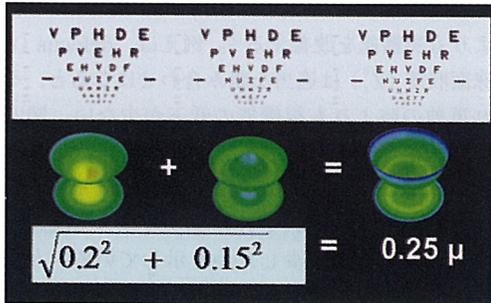


図22 右端は C_2^0 と C_4^0 を適当に組み合わせたときの網膜像シミュレーション。同様に C_2^0 だけのとき, C_4^0 だけのときの網膜像シミュレーション 組み合わせたときの波面収差の合計は $0.25\mu\text{m}$ で, それぞれ defocus (C_2^0) は $0.2\mu\text{m}$, 球面収差 (C_4^0) は $0.15\mu\text{m}$ とそれよりも小さいにもかかわらず網膜像シミュレーションの質は落ちている。RMS の合計はそれぞれを 2 乗して合計したものの平方根と等しい。像は Visual Optics Laboratory, version 6.11 を使用して作成。(Sarver and Associates 社, www.sarverassociates.com)

ている項, 同じ符号の項, 同じ角周波数の項が適当な組み合わせのときに網膜像の質を改善するという ことと矛盾しない^{12,13)}。同じ次数の項同士, 隣の次数の項同士など, すべての Zernike 項の組み合わせが網膜像の質を上げるということではなく, また, 角周波数や符号の異なる項は逆に網膜像の質を悪くさせることが多い。

この実験では RMS (したがって等価球面值も) は $0.25\mu\text{m}$ で一定であるので, RMS では logMAR 視力が 2 段階も変化することを説明することができない (図23)。同様に等価球面值の 0.19D も一定であり,

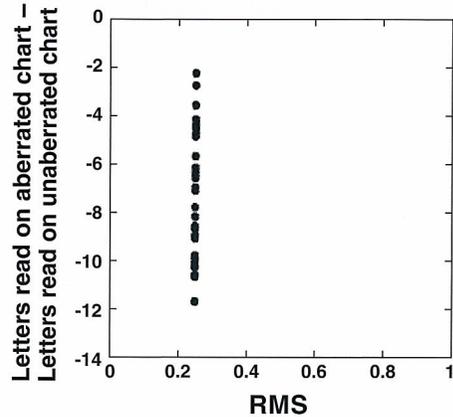


図23 この実験では RMS 値を $0.25\mu\text{m}$ で一定にし, Zernike 項の組み合わせの割合を変化させただけなので, 視力の変化は RMS 値では説明できない。RMS 値 $0.25\mu\text{m}$ (等価球面值では 0.25D 以下) が瞳孔面内にどう分布しているかによって, 2 段階もの視力の差が出ている。

視力変化を説明できない。波面収差や等価球面值以外にも何かこれを説明できるものがあるのだろうか?

私は Indiana 大学 School of Optometry の Larry Thibos と, Rochester 大学 Center for Vision Science の David Williams と共同して, この結果を説明できるような様々な測定基準の研究をしている。これらの測定基準では, 波面収差を Zernike 展開したものをベースとして入力・計算している。RMS 値等は瞳孔面で計算し, Strehl 比等は網膜面で計算している。ここには記さないが, 今まで31種類の測定基準について調査した。ここではそのうちの3つを示す。詳細はここでは記さないが, これにより波面収差の RMS 値よりも図23に示したことをうまく説明できる。

一つ目の方法は whole pupil fraction という方法で, 瞳孔面内で計算している。Whole pupil fraction は 0 から 1 の間の数で, あらかじめ決定しておいた値 (ここでは波長の $1/4$) よりも小さな波面収差が存在する全瞳孔面積を決定することで計算される。図 24A にあるように, これで先ほどの実験の文字数の変化を 21% 説明することができる。

二つ目の方法は central pupil fraction という方法で, 同様に 0 から 1 の間の数で, 瞳孔面内で計算される。瞳孔と中心を合わせた円形絞りを, RMS 合計値があらかじめ決定しておいた値 (ここでは波長の $1/4$) になるまでゆっくりと広げることによって計算する。

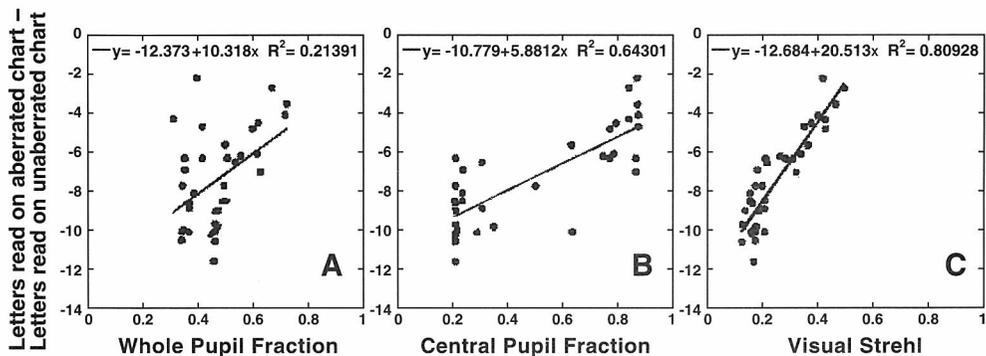


図24 Zernike展開にて合計が $0.25\mu\text{m}$ RMSになるように二つの項を様々な割合で組み合わせた場合の高コントラストlogMAR視力の変化を、3とおりの測定基準で予測したもの(詳細は本文を参照)。

図24Bにあるように、これで上の実験結果を64%説明できるが、統計的根拠に乏しい。

光学的特性を測定することによる視機能の一価的測定基準は発達を続けているが、網膜像の質というのは視機能全体の第一段階に過ぎないということを忘れてはならない。これを強調するためにカメラで説明しよう。カメラのレンズが優れていてもフィルムがよくなければ、できあがる写真も悪いだろう。カメラのレンズが優れており、フィルムもよく、現像が正確に行われても、引き延ばし機のレンズが汚れていたり、プリント処理に不備があれば、写真の画像も悪くなる。眼でも同じである。眼の光学系が優れていても視細胞が死んでいれば視覚はよくない。眼の光学系が優れており、視細胞が正常に機能していても視路に障害があれば同様である。光学系・視細胞・視路のすべてに問題がなくても、知覚したものが劣化する余地は残っている。

眼の波面収差を測定することで網膜像を非常に正確に評価することはできるようになったが、脳がそれをどうやって視認識しているかはわからない。しかし、典型的な正常眼の神経伝達機能の統計は十分にあり(例: Campbell & Green¹⁹⁾、これを使えば、三つ目の方法、あるいはそれ以上に将来有望な測定基準を可能にするかもしれない。この方法では測定されたOTFにneural contrast sensitivity functionを加味し、その値をneural contrast sensitivity functionと回折のみを考えたocular transfer functionで計算したもう一つの値で割ることで得られる。Visual Strehlと呼ばれるこの方法は0から1までの間の数で、先ほ

どの実験の約81%を説明できる(図24C)。今まで調査した32の方法のうち、このvisual Strehlが上記の実験を説明できる最良の一価的測定基準である。

実験デザインにより光学的な効果以外の要素を制御することができる。先の実験では、被験者自体のcontrol値と比較することによりデータを標準化した。すなわち、視力変化(収差負荷チャートで読めた文字数-収差なしのチャートで読めた文字数)という各被験者の従属変数を定義することによる標準化、および波面収差による既知の変化から計算された網膜像を計測するどのような方法でも、それを独立変数として定義することによる標準化である。標準化したデータを使って波面収差による影響を計測することにより、視力や焦点に影響する他の要素による影響を最小化することができる。

結 論

- ・近年発達し商品化された最先端の収差計は眼の屈折異常を比類のない正確さで計測できる。
- ・それらの収差計は今までの正常眼・屈折異常眼に対する矯正方法を変化させつつある。
- ・Zernike展開された収差の各項は相互作用することにより、視覚を改善または悪化させる。
- ・瞳孔径は網膜像の質を決定する重要な因子である。
- ・収差と回折の両者の結果が最小となる瞳孔径の時に最高の視覚が得られる。
- ・収差が最小の時に網膜像と視覚は最高となる。
- ・散乱は像のコントラストを下げる。
- ・色収差は網膜像の質を下げる。

- ・色収差の悪影響は眼の分光感度により、ある程度補償される。
- ・色収差は単色光収差の影響を少し補償する傾向がある。
- ・すべての収差が視力に対して同じだけの影響力をもつわけではない。
- ・Zernike 各項で2つ次数がずれている項、同じ符号の項、同じ角周波数の項は適当に組み合わせると網膜像の質を改善する。
- ・波面収差より計算される一偏的測定基準により、光学的に引き起こされた視機能の変化を予測することができる。

文 献

- 1) Schapero M, Cline D & Hofstetter HW: Dictionary of Visual Science. 2nd Ed, Chilton Book, Philadelphia, 1968.
- 2) Liang J, Grimm B, Goelz S & Bille JF: Objective measurement of wave aberrations of human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor. J Opt Soc Am (A) 11: 1149-1157, 1994.
- 3) Roorda A, Romero-Borja F, Donnelly WJ III, Queener H, Hebert TJ & Campbell MCW: Adaptive optics scanning laser ophthalmoscopy. Opt Express 10: 405-412, 2002.
- 4) Roorda A & Williams DR: The arrangement of the three cone classes in the living human eye. Nature 397: 520-522, 1999.
- 5) Roorda A & Williams DR: Optical fiber properties of individual human cones. J Vis 2: 404-412, 2002.
- 6) Thibos LN, Applegate RA, Schwiegerling JT & Webb R: Standards for reporting the optical aberrations of eyes. J Refract Surg 18(S6): 52-60, 2002.
- 7) Roberts C: Biomechanics of the cornea and wavefront-guided laser refractive surgery. J Refract Surg 18(S5): 89-92, 2002.
- 8) Mrochen M & Seiler T: Influence of corneal curvature on calculation of ablation patterns used in photorefractive laser surgery. J Refract Surg 17: S584-S587, 2001.
- 9) MacRae SM, Schwiegerling JT & Snyder R: Customized corneal ablation and supervision. J Refract Surg 16: S230-S235, 2000.
- 10) Williams CS & Bechlund OA: Introduction to the Optical Transfer Function. Wiley, New York, 1989.
- 11) Foster A & Johnson GJ: Magnitude and causes of blindness in the developing world. Int Ophthalmol 14: 135-140, 1990.
- 12) Applegate RA, Sarver EJ & Khemsara V: Are all aberrations equal? J Refract Surg 18: S556-S562, 2002.
- 13) Applegate RA, Marsack JD, Ramos R & Sarver EJ: Interaction between aberrations to improve or reduce visual performance. J Cataract Refract Surg 29: 1487-1495, 2003.
- 14) Applegate RA, Ballentine C, Gross H, Sarver EJ & Sarver CA: Visual acuity as a function of Zernike mode and level of root mean square error. Optom Vis Sci 80: 97-105, 2003.
- 15) Campbell FW & Green DG: Optical and retinal factors affecting visual resolution. J Physiol (Lond) 181: 576-593, 1965.

この総説は、2003年度の日本眼光学学会・眼科 ME 学会合同総会で講演していただいた Houston 大学の Dr. Applegate が話された内容とほぼ同等の内容を、Optometry and Vision Science に投稿されたものを、許可を得て翻訳したものである。

R. Applegate
 Glenn Fry award lecture 2002: wavefront sensing, ideal corrections, and visual performance.
 Optometry and Vision Science
 Volume 81, Issue 3, Pages 167-177
 ©The American Academy of Optometry
 2004

Light-Emitting Diode (LED) 情報板の視覚バリアフリー化に関する基礎的研究

— 高齢化社会への対応を目指して —

高松 衛*, 梅野 恵*, 中嶋芳雄*, 中島賛太郎**, 加藤象二郎***, 佐々和博*
*富山大学工学部, **星和電機株式会社, ***愛知みずほ大学

Research on the Light-Emitting Diode (LED) Information Board for Visual Barrier-Free — Aim at an Aging Society —

Mamoru Takamatsu*, Megumi Umeno*, Yoshio Nakashima*,
Santaro Nakajima**, Zojiro Katoh*** and Kazuhiro Sassa*

*Faculty of Engineering, Toyama University

**Seiwa Electric Mfg. Co., Ltd.

***Aichi Mizuho College

現在、急速に進行する少子高齢化社会において、老人性白内障の患者数も年々増加の一途をたどっている。このことは医学的な問題のみにとどまらず、大きな社会問題ともなってきた。白内障視環境下では水晶体の黄変化や屈折率低下により、健常人の場合と比較して若干見え方が異なってくるため、なんらかの配慮が必要であることはいうまでもない。すなわち、高齢者のよりよい生活の質向上のためにも、視力障害への対策は極めて重要な課題なのである。そこで本実験では、高齢者の視覚を擬似的に再現するゴーグルを用いて、近年、急激にその設置台数が増加しているフルカラー LED 情報板における高齢者と若年者の知覚色の差異についての検討、考察を試みた。結果より、黄から青色にかけての色でその認識に差のあることが明らかとなり、各色における認識可能な色範囲について定量的に明らかにした。本研究結果は、今後の超高齢化社会に対応した視認しやすい情報板のあり方を考える上で、極めて有効な基礎的データを提供するものと確信する。

(視覚の科学 25: 21-24, 2004)

キーワード：高齢化社会, 白内障, 知覚色, バリアフリー, LED 情報板

Today, in the accelerating aging society with fewer children, the number of patients of senile cataract is also increasing every year. This has become not only a medical problem but also a major social problem. A certain consideration is required for elderly people, since their vision slightly differs from that of young people due to yellow change and a refractive-index fall of crystalline lens. For an improvement of the life of elderly people, too, measures to the visually handicapped is quite an important subject. In this study, using goggles for reproducing the vision of elderly people and an information board screen, we measured the difference in color recognition between elderly people and young people. From the results, certain differences were observed in colors between yellowish green and blue. And, we clarified quantitatively the color range which can be recognized in each color. We believe these results are quite useful in designing information boards to assist elderly people in their recognition.

(Jpn J Vis Sci 25: 21-24, 2004)

Key Words: Aging society, Cataract, Color perception, Barrier-free, Light-emitting diode (LED) information board

別刷請求先：930-8555 富山市五福 3190 富山大学工学部 知能情報工学科 (視聴覚情報処理研究室) 高松 衛
(2004年6月14日受理)

Reprint requests to: Mamoru Takamatsu Faculty of Engineering, Toyama Univ
3190 Gofuku, Toyama 930-8555, Japan
(Received and accepted June 14, 2004)

1. 緒 言

今日、我が国では少子高齢化社会の急速な進行が問題となっており、それに伴い老人性白内障の患者数も年々増加の一途をたどっている。一般に老人性白内障では、眼球内における水晶体の黄変化¹⁾や屈折率低下などが生じる。また、水晶体の混濁により光が眼内に入りにくくなるため、外界の像がかすんで見えにくくなる。言い換えると、健康な若年者と比較してものの見え方が高齢者では若干異なってくる。とくに水晶体の黄変化による視対象物の色相の変化などがある場合には、若者がある色と認識している色が、白内障高齢者には異なる色として認識されている可能性がある。駅構内における電車の車体や路線地図などに代表されるように、色を情報として積極的に利用している現在では、この誤認のもたらす影響は決して小さくない。急速に少子高齢化が進行している日本の社会においては、このような老人性白内障による視力障害者への対策は極めて重要な課題といえる。

高齢化社会とは、言い換えると体になんらかのハンディキャップをもつ人の割合が増えるということであり、そのため昨今では、より住みやすい安全な環境作りを目指してバリアフリー化が進められている。例えば駅やデパートなどでは、足腰の弱い方のための専用手すりやトイレ、段差のないスロープなどが設置されている。しかしながら一方では、視覚



図1 Light-emitting diode (LED) 情報板

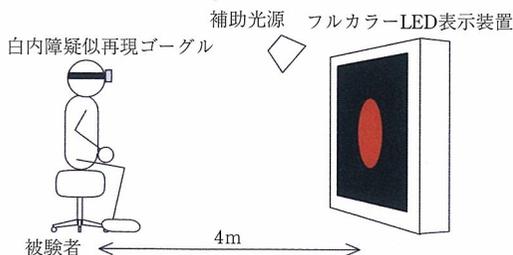


図2 実験概要

工学の観点からの「視環境」整備に関しては近年になってようやく注目されてきたというのが現状である。それは、白内障などによる見えの変化が緩やかであるため、多くの場合は自覚症状があまりないことなどが理由の一つと考えられる。

ところで近年、駅構内における発車案内やバスの行き先表示などにも light-emitting diode (以下 LED) 式のものが増え見られるようになってきた (図1)。LED は長寿命、低電力の利点より近年とくに注目されており、その利用範囲や設置台数は今後益々増加していくものと考えられる。しかしながら高齢者の色覚環境下での見え方^{2, 3)}と、近年その設置台数が急激に増加している LED 情報板に対する見え方^{4, 5)}との関連について報告した例は極めて少ないのが現状である。

そこで本研究では、フルカラー LED 情報板および白内障疑似再現ゴーグルを用い、老人性白内障視環境下における色の見え方について基礎的データを収集することを目的とした。

2. 実験方法

実験概要を図2に示す。本実験では、刺激呈示装置としてフルカラー LED 情報板を使用した。実験室内の天井灯と補助の蛍光灯により、電光表示板表面

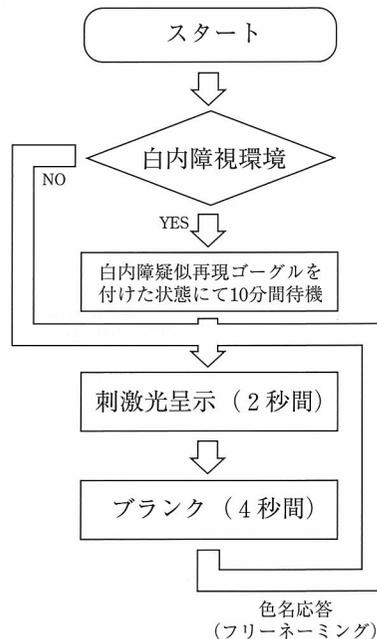


図3 実験手順

の照度は 300 lx 一定に設定している。これは、実際に駅にある発車案内板の表面照度に相当するものである。

実験手順を図 3 に示す。被験者はまず白内障疑似再現ゴーグルを装着した状態で 10 分間待機する。続いて LED 情報板上に視角 2° (直角に対して 14 cm) の円形テスト刺激光が 2 秒間呈示される。被験者はそのテスト刺激光を 4 m 離れた所から観測する。被験者のタスクは、カテゴリカルカラー観測^{6,7)}より、呈示されたテスト刺激光について感じたままの色名を自由に応答することである (フリーネーミング法)。次にブランクが 4 秒間呈示される。以下、同様にテスト刺激光とブランクが交互に呈示され、被験者はその都度、各テスト刺激光に対して感じた色名を応答する。これを白内障疑似再現ゴーグルを装着していない場合についても同様の手順にて試行する。なお、実験で用いた白内障疑似再現ゴーグル⁸⁾は、水晶体の混濁を再現した「白濁フィルター」と、白内障水晶体の分光透過率を再現した「色フィルター」とにより、白内障高齢者の視環境を再現している。このゴーグルにより再現されている白内障視環境は、症状としてはかなりの強度レベルに相当する。

用いたテスト刺激光は、LED 電光表示板上において表示可能な最高彩度の R, G, B よりその 3 点を頂点とする三角形の辺上および内部から、色差が均等になるように選定した 78 色である。LED の表示輝度は、暗室内で単色表示した条件下においては、R ($u'=0.157, v'=0.522$) で 78 cd/m^2 , G ($u'=0.07, v'=0.567$) で

116 cd/m^2 , B ($u'=0.164, v'=0.144$) で 26 cd/m^2 となるように設定した。各被験者に対して、これら 78 色のテスト刺激光呈示を 1 セッションとし、ゴーグルを着けた状態で 5 セッション、ゴーグルを着けていない状態で 5 セッションの計 10 セッションを試行した。

被験者は、平均年齢 23.4 歳 (最高年齢 23 歳, 最低年齢 22 歳) の色覚正常者 10 名である。

3. 実験結果

結果の 1 例を図 4 に示す。

全 78 色のテスト刺激光に対し、フリーネーミング法により得られた各被験者の応答色名を基に、50% 以上の出現確率をもって色名応答が得られた点をプロットしたものである。それぞれ、(a) は白内障疑似再現ゴーグルを装着していない状態、(b) は装着している状態での測定結果である。

結果より、いずれの場合においても得られた色数は 10 色であり、その内訳は、赤, オレンジ, 黄, 黄緑, 緑, 水色, 青, 紫, ピンク, 白であった。しかしながら両者の結果を比較した場合、各色の領域において違いが観測された。とくに「黄緑」, 「緑」, 「水色」, 「青」については白内障視環境下 (b) では、そうでない場合 (a) と比較して領域が狭くなる傾向を示した。この傾向は、とくに黄緑, 水色で顕著であった。更に、黄および白の 2 色においてはその領域が大きく色度図上の左側にシフトする傾向を示した。言い換えると、これらの範囲の色においては若年者と高齢者とは、同じ色度点を呈示してもそれ

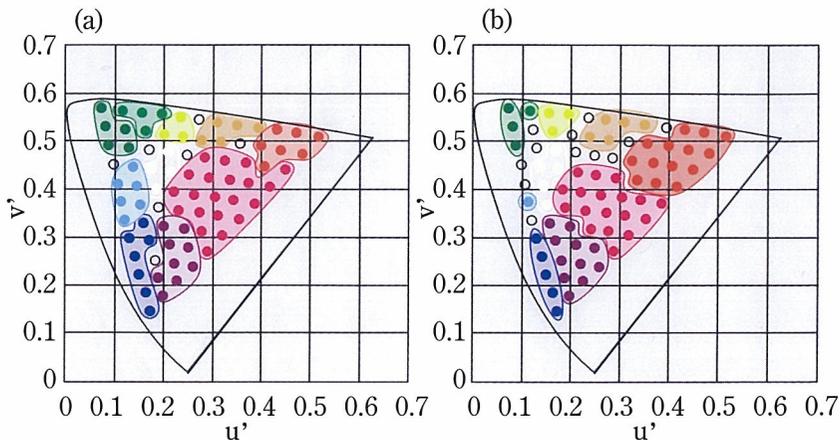


図 4 10種類の基本的知覚色および各色の領域

(a) ゴーグルを装着していない場合

(b) ゴーグルを装着している場合 (白内障疑似視環境)

ぞれ異なる色と認識する可能性があるといえる。とくに黄の場合は、高齢者が黄色と認識する範囲と若年者が黄色と認識する範囲に重なりが存在しており、したがって、この色相の使用にはとくに注意が必要と考えられる。

更に、水色、黄緑、白についても重なる領域は極端に狭くなっており、したがってこれらの3色を使用する場合には、「水色」ならば ($u'=0.115, v'=0.374$), 「黄緑」ならば ($u'=0.122, v'=0.562$), 「白」ならば ($u'=0.178, v'=0.444$) の色度点を大きく外れないことが望ましいと考えられる。

4. 考 按

本研究では白内障疑似再現ゴーグルを用い、老人性白内障視環境下におけるマルチカラーLED電光表示板の色の見え方について基礎的データの収集を試みた。

結果より、高齢者と若年者における色の認識について、その領域の変化も含めて定量的に明らかにした。とくに、黄、黄緑、水色、白の4色のカテゴリカルカラーについては、定量的な差異が明確であるので、その使用については十分に注意が必要であることが示唆された。

ところで、白内障は徐々に進行するものであり、その速さや白内障がはじまる年齢にも個人差がある。したがって、同年代であっても白内障のレベルは大きく異なってくる。本研究ではとくに強度レベルの白内障視環境に限定して測定を行ったが、今後、本

実験データの実用性を高めていくためには、何段階かの白内障視環境下にて同様の測定を行い、更にデータを収集していくことが望ましいと考えられる。また、様々な輝度による表示を考慮する場合、それらによる影響、すなわち「輝度依存特性」についても明らかにする必要がある。更には、実際に白内障の方を対象とした測定を行い、本実験結果と比較していくことも必要である。今後の取り組み課題としたい。

文 献

- 1) 柴田崇志：生体眼における水晶体の色度に関する検討：正常水晶体色度の加齢変化。眼紀 39: 598-605, 1988.
- 2) Pokorny J, Smith VC & Lutze M: Aging of the human lens. Appl Opt 26: 1437-1440, 1987.
- 3) 池田光男, 久住亜津沙他：白内障疑似体験ゴーグルによる色票の見えの変化。日本色彩学会誌 27: 113-124, 2003.
- 4) 高松 衛, 中嶋芳雄他：短時間呈示における最適表示色数—LED道路情報板について—。視覚の科学 22: 7-10, 2001.
- 5) 釣 慎輔, 高松 衛他：LED表示設置を用いた短時間呈示における最適表示色数。映像情報メディア学会 56: 2013-2015, 2002.
- 6) Boynton RM & Olson CX: Locating basic colors in the OSA space. Color Research Application 12: 94-105, 1987.
- 7) Boynton RM & Paul KF: Categorical colour perception under low-pressure sodium lighting with small amounts of added incandescent illumination. Lighting Research Technology 21: 23-27, 1989.
- 8) The government of Ontario, Canada: "Through Other Eyes" program.

レンズ特性とその選択について（その2）

木谷 明

HOYA(株)ビジョンケアカンパニー

累進屈折力レンズは各メーカー独自の基準により分類されているのが実情である。用途別では汎用累進、中近累進、近近累進の3種類に分類される。光学的変調レベルにより、ハード設計とソフト設計の2種類に分類される。累進帯長について短累進という分類が生まれてきた。構造的には外面累進、内面累進、両面累進、両面複合累進に分類できる。個別設計には眼鏡の装用状態、装用者の趣味・職業や癖などに対応するものなどがある。

(視覚の科学 25: 25-29, 2004)

キーワード：光学的変調，ハード／ソフト設計，内面累進，両面複合累進，個別設計

It is the fact that progressive-addition lens (PAL) is classified according to each manufacturer's own standard. It can be divided into 3 types as "General-purpose PAL", "Middle/Near distance PAL" and "Near vision PAL" according to the purpose of use. It can be divided into 2 types as "hard design" and "soft design" by the level of optical modulation. The classification of "Short channel PAL" was created about the progressive length. According to structure, it can be divided into "Front surface PAL", "Back surface PAL", "Double surface PAL" and "Integrated double surface PAL". There are several types of individual design corresponding to the wearing situation of eyewear, wearer's hobby, job and habits.

(Jpn J Vis Sci 25: 25-29, 2004)

Key Words: Optical modulation, Hard/soft design, Back surface PAL, Integrated double surface PAL, Individual design

4. 累進屈折力レンズ

累進屈折力レンズが初めて実用化されてから今日までの数十年間、多くの改良が加えられるとともに多様化が進んできた。その結果、今日では累進屈折力レンズの特徴や用途、構造の種類などといった様々な切り口による分類がなされている。しかしながら、累進屈折力レンズは二重焦点や三重焦点レンズとは異なり、遠方視野、中間視野、近方視野などの明確な境界線を有していないため、分類方法はメーカー独自の基準に従っているのが実情である。このため、業界紙などにおいて日常的に用いられている累進屈折力レンズの分類方法を選んでみた。(なお、ここで用いたレンズの図面はすべて右レンズを凸面側から見た図に統一してある。)

1) 用途別分類

累進屈折力レンズは「遠・中・近の各々の視野領域を使用頻度に応じて配分したレンズ」であるといえる。すなわち汎用としての累進屈折力レンズは使用頻度の高い遠用領域を最も広く確保し、次いで老視用眼鏡として必須の近用領域を確保し、最後に両視野の移行領域として中間領域を確保している。したがって各々の視野領域の広さはおのずから制限されることになるが、それらの広さの配分について定説があるわけではなく、設計者の意図に一任されているのが実情である。このため、明示的であるか否かにかかわらず、「遠方重視」や「近方重視」といったバリエーションが生まれる結果となっており、個々の累進屈折力レンズの個性となっている。

これらのバリエーションの範疇をこえ、意図的に

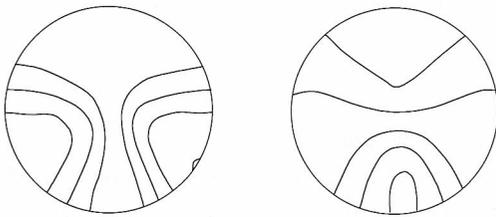
専用の用途(視野)を優先、もしくは限定することにより利便性を高めた商品も普及している。これらの用途の違いは主として見ようとする視標までの距離(対物距離)に対応した視野領域の広さの違いとなっており、大別して、汎用累進屈折力レンズ、中近累進屈折力レンズ、近近累進屈折力レンズの3種類に分類できる。また、例は少ないが「遠方重視タイプ」や「遠中重視タイプ」と呼ばれるものもある。

(1) 汎用累進屈折力レンズ(図1)

従来からある「遠近両用」という汎用目的の商品である。遠方から近方まで見ることのできる機能をもつが、万能であることの代償として中間領域や近用領域の視野の広さに制約がある。一般に遠近の視野領域を広くとるほど、中間領域側に累進特有の揺れや歪みが発生しやすい傾向がある。「オールラウンドタイプ」「一般用」「常用」「汎用バランスタイプ」「遠中近バランス重視タイプ」という用語が用いられる場合もある。ただし、前述のごとく分類基準は各メーカーごとに異なっており、同一用語が使われていても類似な設計とは限らない。

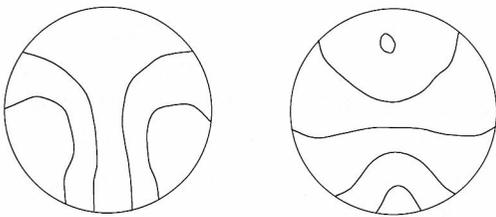
(2) 中近累進屈折力レンズ(図2)

遠用領域を限定することで中間領域や近用領域を



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図

図1 汎用累進屈折力レンズの設計例



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図

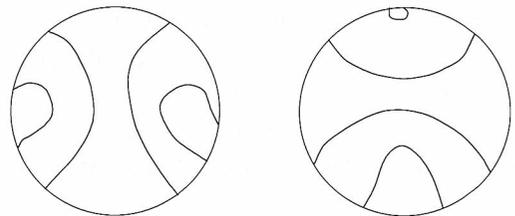
図2 中近累進屈折力レンズの設計例

広く確保した商品である。「室内用」「近中視野重視」と称されることもある。メーカーにより差異はあるが概して遠用領域の位置は汎用よりも上方にあり、長い累進帯をもつことが特徴である。このため累進特有の揺れや歪みは少ないが、車の運転などの遠方視を多用する用途には向かない。加入度数の種類は汎用と同様に全種類準備されているものもあるが、2~3種類に限定されているものもある。

(3) 近近累進屈折力レンズ(図3)

遠用領域が全くないので、累進屈折力レンズではなく単焦点レンズとして扱っているメーカーもあるが、それらの分類がいずれであっても広く快適な近用部の確保を主目的とした商品であることに変わりはない。側方や上方の領域にやや遠めの距離を見る機能をもたせてあり、視野に奥行きを与えているところが一般的な近用単焦点レンズとの違いである。「パソコン用」「デスクワーク用」「手元専用」といった位置付けがなされていることもあり、「近用視野重視」「近用ワイドタイプ」と称されることもある。また、遠用領域がないので加入度は定義し得ないが、視野に奥行きを与える度数変化量は2~3種類準備されているのが普通である。この場合、主たる領域である近用領域から上方に至る度数変化は通常の累進屈折力レンズと逆であることから、「マイナス加入」という表現をとっている商品もある。

これら用途別の累進屈折力レンズは汎用の代替ではなく副次的な存在であり、「1本で万能」として市場に登場した累進屈折力レンズも、更に快適な視界を得るために用途に応じて複数の商品を使い分ける時代になったといえよう。



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図

図3 近近累進屈折力レンズの設計例

近用領域が下方中央にあり、上方の領域が外寄せとなっている。

2) 設計上の分類

累進屈折力レンズによる「像の歪み」を軽減する基本的な設計手法として、「光学的変調」と呼ばれる技術がある。これはレンズ上の屈折力変化を、累進帯に沿った方向（縦方向）ばかりではなく、累進帯から離れる方向（横方向）にも与えるものである。この横方向への屈折力変化は、レンズ上半分では側方に行くにしたがって屈折力を高くし、下半分では側方に行くにしたがって屈折力を低くするという逆の性質をもたせてある。このためレンズ中央付近の像の歪みの性質はあまり変わらないが、側方に行くにつれ累積しがちな像の歪みが緩和されることになる。この光学的変調の少ない設計がハード設計であり、多い設計がソフト設計である（図4）。

(1) ハード設計とソフト設計（図5, 6）

ソフト設計という用語が初めて用いられたのは1973年に全面非球面型累進屈折力レンズ Varilux 2[®] が登場したときであり、それまでの製品であった1959年発売の Varilux[®] は対比的にハード設計と呼ばれた。これらの用語に数値的な定義があるわけではないが、表1のような相対的特徴を有する。

ところが累進屈折力レンズ設計のソフト化傾向はその後も続き、全体的にソフト化されてきたために過去にソフト設計として登場したレンズが、今日ではハード設計に分類されることもある。このような

事情から、上記の分類基準も実際の商品に合わせて変化しているのが実態である。すなわち、累進帯の長さは必ずしも設計の違いに対応しておらず、同じ長さであっても異なる設計のものが存在する。また、近年の累進屈折力レンズにおいて遠用領域が球面のものは極めてまれである。更にレンズ表面の平均度数分布や非点収差分布を手軽に測定できる機器が開発された影響で、表1における遠近領域の広さや表面非点収差などの違いを基準とした概念的な分類がなされることが多い。

ただし、ほとんどの累進屈折力レンズに対して、ソフト設計やハード設計としての表示はされていないのが普通である。また、ソフトさの度合い（光学的変調の量）も標準化されていない。しかしながら、汎用累進屈折力レンズに限っていえることは、概して広い近方領域を強調している製品にハード設計が多く、揺れや歪みの少なさを強調している製品にソフト設計が多い。

3) 累進帯長の分類

(1) 累進帯長の定義

累進屈折力レンズの累進帯長の定義にはメーカーや国によって違いがあり、数値だけで長短を判断することは危険である。例えば欧米のメーカーの多く

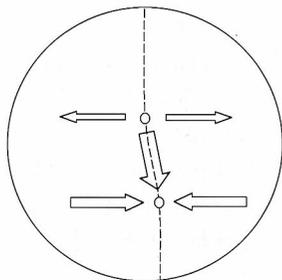
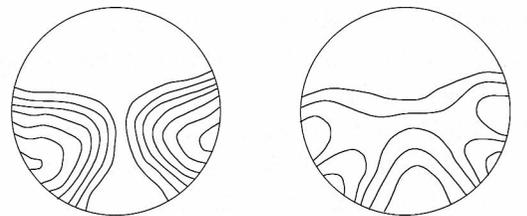


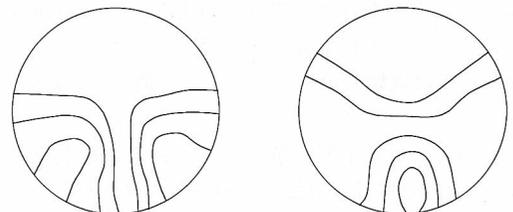
図4 光学的変調の概念図

表1 ハード設計とソフト設計

	ハード設計	ソフト設計
累進帯の長さ	短い	長い
遠用部表面	球面	非球面
遠近領域の広さ	広い	狭い
表面非点収差	多い	少ない



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図
図5 ハード設計の例



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図
図6 ソフト設計の例

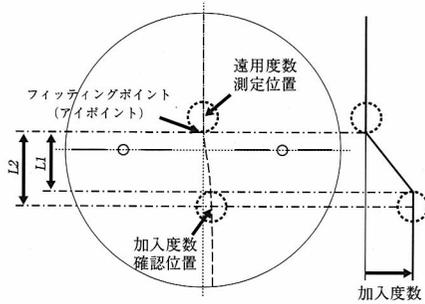


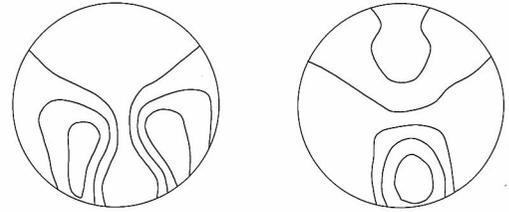
図7 子午線（太点線）上の度数変化の概念図

は、累進帯長の定義として「フィッティングポイントから近用度数測定円の中心（厳密には加入度数確認位置）まで（図7のL2）」としているのに対し、日本の一部のメーカーは「フィッティングポイントから近用度数測定円の上端まで（図7のL1）」としている。近用度数測定円の直径は6~8mm程度なので、累進帯長の表示は欧米より3~4mm短めの表示となる。

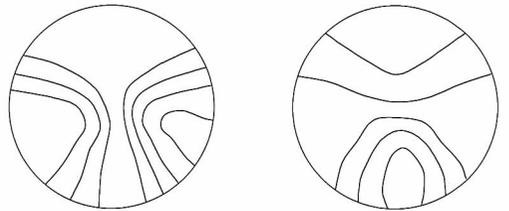
累進の起点や終点で度数を測ると、測定円内に累進帯が入るため本来の度数は出ない。現に、遠用度数測定位置は累進起点より上部に設定されており、累進帯の影響を避けている。したがって、加入度数確認位置を累進の終点とみなす欧米方式には明らかに矛盾があるが、累進発売当初からの伝統的な定義であり現在も継続している。ただし、両者の実質的な測定位置やレイアウトに大きな差があるわけではなく、累進帯長の表示だけの違いであることから、眼鏡装用上の大問題にはなっていない。

(2) 短累進

累進屈折力レンズをフレームに枠入れするとき、枠の縦幅が短いために遠用領域と近用領域とを両方同時に枠内に収めきれないことがある。このような場合、従来であれば「累進屈折力レンズに不向きな眼鏡枠」として枠を変更すれば事足りたが、近年のフレームは縦幅の短いものが多く流通しているので、枠ではなくレンズを変える必要が出てきた。このような場合、最も手軽な解決方法は近用領域が枠外となることを想定し、0.25~0.50ジオプター程度高めの加入度数とすることである。ところがこれでは比較的狭い中間領域を近用領域として代用するため、視野の狭さが問題となる。



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図
図8 短累進の設計例-その1



非点収差分布イメージ図 平均度数分布イメージ図
図9 短累進の設計例-その2

このような背景から開発されたのが短累進と呼ばれる「累進帯長が短い」累進屈折力レンズである。一般に累進屈折力レンズにおける非点収差量は累進度数変化の勾配に比例するが、その勾配は加入度数に比例し、累進帯の長さに反比例する。したがって、短累進の非点収差量は一般に大きくなり、累進特有の揺れや歪みが増える傾向がある。例えば、同一加入度数で累進帯長が14mmから10mmのものに掛け替えた場合、非点収差量は単純計算で14/10となる。すなわち40%も非点収差量が増大してしまう。したがって短累進と呼ばれる累進屈折力レンズでは様々な手法により収差低減を併用している。この収差低減方法について2種類の大きく異なった短累進の設計例を図8および9に示す。

一方、縦幅が十分に長いフレームの場合、短累進とは逆に累進帯の長い累進屈折力レンズを選べば累進度数変化の勾配は小さくなり、非点収差量は減少する。その結果、累進特有の揺れや歪みが少なくなるという長所が得られるが、累進帯が長くなれば遠方視から近方視に移るときに大きな眼球回旋角（視線の偏角）が必要となる。また、限られた眼鏡枠のなかで累進帯が下方に伸びれば、必然的に近方視領域の上下幅が狭められるという欠点が生ずる。

4) 構造(面構成)上の分類

(1) 凸面累進と内面累進, および両面複合累進と両面累進

累進面の配置を従来(対比的に「外面累進」と呼ばれる)の凸面側から凹面側に移行すれば, 限られた面積の視野領域が眼に近付くことになり, 実質的な視野(角)を広げることができる。このような長所を得る目的で開発されたのが「内面累進」である。ただし, 眼に近付くことにより広がるのは横方向(実質的な視野幅)ばかりではなく, 縦方向(実質的な累進帯長)も同様である。このため外面累進から内面累進への掛け替えにおいて, やや短めの累進帯長を選定することが推奨されている。

これに対し, 累進帯の長さにかかわる縦方向の屈折力変化は凸面側に残し, 揺れ・歪みにかかわる横方向の屈折力変化のみを凹面側に移行することで双方の長所を両立させたのが「両面複合累進」である。このため, 両面複合累進の面は表裏ともに累進面ではない特殊な非球面である。

これに対し表裏ともに累進面を用い, 所定の加入度数を表裏で分担する「両面累進」も開発されている。これは外面累進と内面累進との両方の性質を有する構造となっている。これらはいわば累進屈折力レンズの構造的な改良であり, 今後様々なバリエーションをもった製品が開発されていくものと思われる。

5) 個別設計としての分類

装用者の眼の状態や使い方の個性に合わせようという個別設計型の累進屈折力レンズも提案されている。これらは専用化の対象が視野領域ではなく装用者自身であり, 万人向け設計からその人だけの専用設計に変えようとするものである。これらの新規な製品は発表されてから日が浅く, いまだ分類し得るほどには分化していないが, 少なくとも視標, レンズ, 眼球の3次元的な相互の位置関係を事前に把握し設計に生かそうとする流れと, 装用者の度数, ライフスタイル, 趣味, 職業などに設計のバリエーションを対応させる流れ, 更には装用者が側方視するときの頭部と眼球との回旋比率といった個人の癖などを把握して設計に生かそうとする流れなどがあるようである。この個別設計の分野においても, 今後様々なバリエーションをもった製品が開発されていくことは確実であろうと思われる。

参 考 文 献

- 1) Bruneni J: New design concept for PALs—the future looks bright. Lens Vision Vol XXIX (Number 26): August, 2001, Frames Data Inc., USA.
- 2) Fowler C: What is meant by 'hard' and 'soft' varifocal lenses? Optician No. 5674 Vol. 216: Oct. 23, 1998.
- 3) 美濃部 隆編: 各社の累進/多焦点レンズ一覧. 月刊「眼鏡」8月号, 眼鏡光学出版(株), 東京, 2003.

解 説

Photorefractor と Crossed Cylinder Aberroscope の開発

III. 兄ブラッドとの収差計についての共同研究

Howard C. Howland (Cornell University)

(訳 伊那真生子, 三橋俊文 (Topcon 研究所), 不二門 尚 (大阪大学))

1968年, 兄ブラッド・ホーランドは, カメラレンズの光学性能を決定する方法についての短い論文を *Applied Optics* に発表した¹⁾。その方法は, 像面上にデフォーカスによるパターンが形成されるように, プラス球面レンズと格子を使用した Tscherning 収差計 (Tscherning²⁾ 1894) (図1) の変形であった。ブラッドフォードの収差計は, Tscherning 収差計の +5D 球面レンズの代わりに, クロスシリンダーレンズを使っている。この改良による利点は二つあった。一つ目は像面に形成された高次模様により鮮明なこと, 二つ目は格子の歪みのパターンが光学で使われている伝統的な収差の形として解釈しやすいことだった。図2が, 人眼を測定するためのクロスシリンダー収差計の光学配置である。ブラッドフォードは, この収差計を, 彼の 35 mm カメラレンズの光学系の優劣を決めるのに使っていた。彼は単にクロスシリンダー

収差計を通して離れた光源を写真に写していた。おおまかにいえば, 格子が歪んで見えるほどレンズの光学性能は劣っていた。

1972年, 常勤の職を得るための審査に合格するために, できるだけ多くの論文を発表しなくてはならなかった私は, しばらく休暇をもらうことにした。ブラッドと私はそのときすでに直交型光学屈折計について共同研究をはじめていたため, 私がその人眼への適用を模索するのは当然のことだった。最初のカメラレンズ用の収差計は, 湾曲したプレートとエポキシ樹脂を使ったクロスシリンダーレンズで, 非常に巧みな設計であった。一方, 人眼収差計用に用いられたクロスシリンダーレンズは二つの平面シリンダーレンズを組み合わせたもので, レンズの平面の間に写真製版によって作成された 1.2mm 間隔の格子が挟まれていた。この格子はあらかじめ垂直および水平から斜めに曲げられていて, それぞれ 73° と 103° になっていた。これによりクロスシリンダーレンズによって格子線がねじれ, 垂直・水平の格子が

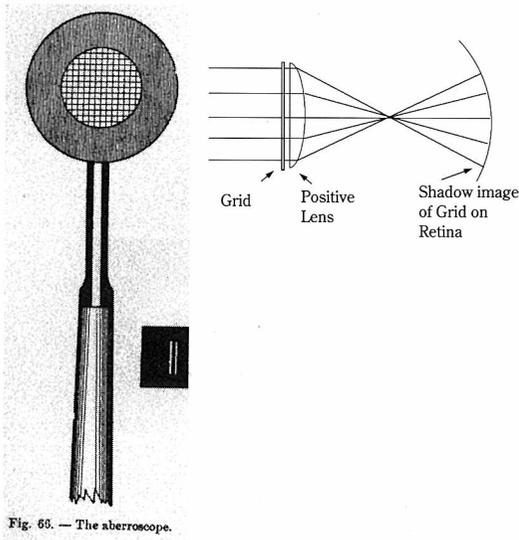


図1 Tscherning aberroscope
(左) Aberroscope, (右) Aberroscope の光学

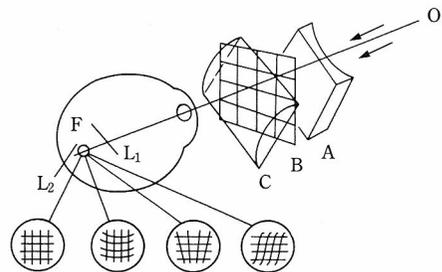


図2 クロスシリンダー収差計の光学系
水平から45°の角度で光軸を直交させたクロスシリンダーレンズ (A,C) を眼鏡と同じ面に置く。レンズのプラスとマイナスの間に格子を置く。遠方に配置された光源から光が網膜上に格子の影を形成する。二つの焦線が網膜の前後に結ばれる。Sturmの間のこの小さな図は本来の網膜像をあらわすことができる。

被験者の角膜に投影される。

私が FOCAL という代数インタプリタ (プログラム言語) を使うようになったことで、我々のチームアップは非常に素晴らしいものとなった。Richard Merrill によって書かれた BASIC と類似したこのコンピュータ言語は、PDP8 (Digital Computer Corporation) というミニコンの 2 キロバイトのメモリ上で動いていた。当時、プログラムとアウトプットは紙製のテレタイプリーダーおよびプリンターによって処理されていたので、私はその年、リーフを過ごしていたドイツにコンピュータとテレタイプを運び込んでいた。

いずれにしても、はじめのうちは人眼の格子模様を写真に撮ることができなかったため、被験者に見えた格子模様をスケッチとして描いてもらうしかなかった。格子模様を定量的に評価するために格子の交点の位置を記録し、全体的に最適にフィットできる長方形格子を求め、これと元のスケッチの交点との位置ずれを測定した。これらの交点の位置ずれは、対応する瞳孔領の入射点の波面の傾きと直接比例した。

普通、眼底上の一点を光源とし、眼から出射光の波面はほとんど平坦であると想像するかもしれない。硝子体内では波面は球形に近いが、眼から離れるとほとんど平坦となる。

コンピュータプログラマーとしての私の役割は、これらの交点の位置ずれを傾きにして、ブラッドフォードが離散的な 4×4 または 5×5 サンプルの格子点に対して正規直交となるようにデザインした多項式をこの傾きにフィットすることであった。この多項式はまるで魔法の杖のようだった。交点の位置ず

れの行列を適切な多項式の項で掛けるだけで多項式の係数が得られた。決まったことをするだけで、我々は人眼の波面収差を、瞳孔上の点の基準面からの波面の高さとして多項式とその係数であらわすことができた。その式は下記のとおりである。

$$\begin{aligned}
 Z = & A + Bx + Cy \quad (\text{プリズム項}) \\
 & + Dx^2 Exy + Fy^2 \quad (\text{球面・シリンダー項}) \\
 & + Gx^3 + Hx^2y + Ixy^2 + Jy^3 \quad (\text{コマ・コマ様収差項}) \\
 & + Kx^4 + Lx^3y + Mx^2y^2 + Nxy^3 + Oy^4 \\
 & \quad (\text{球面・球面様収差項}) \dots (1)
 \end{aligned}$$

我々は、計量的な結果が出る自覚的な検査一実際にはブラッドが発案したものだったが一非常に誇りをもっていた。しかし、どうしてここまで被験者のスケッチに信頼をおくことができるのかと疑問に思うかもしれない。

各高次式の係数に対する歪んだ格子の形状を検討すると、それぞれの形が特徴的な「サイン」に見えることがわかる (図3)。図3に示される K の格子模様を描いた被験者に、彼の描いた S 字の向きは正しいか逆向きかを尋ねた。もしくは、被験者が J に似たスケッチを描いた場合、我々は、その線はケーブルのようにたわんでいたかとかアーチ状に上に曲がっていたかと尋ねた。被験者はそれらの描写に対して総じて肯定的で、我々の質問に対してスケッチを手直しするようなことはしなかった。

被験者が描く多種多様な模様を見るのは我々にとって実に面白かった。当時、すべての被験者はプラスの球面収差とわずかなコマ収差をもっているのが通説だった。

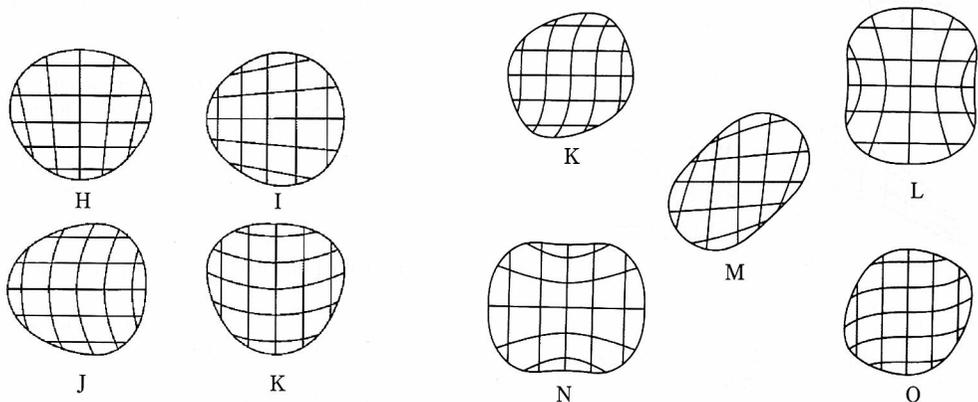


図3 (1) 式であらわされた高次波面収差の係数を、同じ単位であらわした場合のグリッドパターン
左の四つのグリッドはコマおよびコマ様パターンを示し、右の五つのグリッドは球面および球面
様パターンを示す。古典的球面収差は係数 K, M および O を 1 : 2 : 1 の割合で足したものである。

したがって図4のようなスケッチになるはずだ。しかし、我々が見た多くのスケッチは図4のように見えなかった事実は、この通説が正しくないことを意味した。更に驚いたことに、33名55眼の収差を数量的に評価したところ、通説に反して、コマ収差、コマ様収差が高次収差に寄与する主要要因であって、球面収差が主要な要因ではないことを発見した。

方程式(1)のテイラー項を、ほかの直交多項式(位相差顕微鏡の発明者である Fritz Zernike にちなんでゼルニケ多項式と呼ばれる多項式)に変換すると、基準面からの波面の root mean square (以下 RMS) 偏差を算出することができ、収差を一つの数に収約

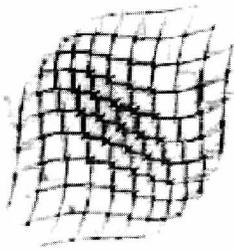


図4 古典的な正の球面収差のグリッドパターン

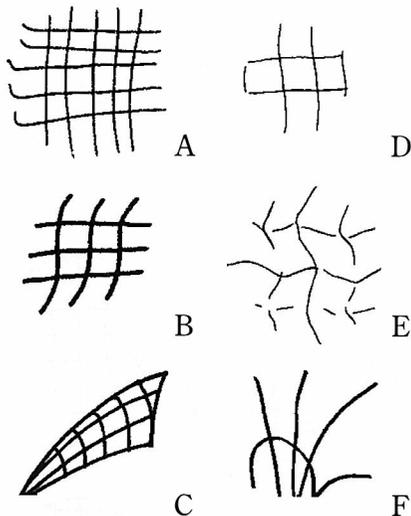


図5 様々な被験者が示した自覚的な収差のパターン
Aの被験者は、左の端以外は完全な正方形のグリッドに見えたと表現した。Bの被験者はK項が大きかった。Cの被験者はコマ収差が大きかった。Dの被験者は軽度の球面収差を示した。Eの被験者はコンタクトレンズ装用者で、高次の収差が大きかった。Fは円錐角膜の患者のパターン (Howland & Howland⁹, 1976)

することができた。この直交多項式のとても好都合な特徴は、すべての RMS 偏差 (より正確にいうと、その2乗) を3次、4次項の独立した構成要素に分配することができることであった。

こうして、ほとんどすべての被験者で、古典的な球面収差だけではなくその他の4次項すべてを含んだ球面様収差よりも、コマ収差の全波面収差に対する寄与が大きいことが証明できた (Howland & Howland⁹ 1977)。

我々はこの発見を「サイエンス」誌にプレリポートとして発表し、格子模様は同誌の表紙を飾ることができた (図5)。

この収差の研究で我々は、van Meeteren⁹ (我々はこの人の理論的な結果を大きく覆した) と Barakat & Houston⁹ (1965) と Smirnov⁹ (1961) (人眼の収差の測定に波面収差を用いることを提唱したおそらく最初の人物で、非常に多くの測定を行った) の研究から多くのことを学んだ。

この研究は、後に述べるように、術後の角膜に非常に大きな収差を引き起こして問題となった角膜放射状切開術が行われるようになって、人眼の高次単色収差が重大な関心を引き起こすおおよそ10年前に行った。この話と、収差を測定するため我々が発案した自覚的な方式からどのように他覚的方式に移行したかが、このシリーズの最後の主題となる。

文 献

- 1) Howland B: Use of crossed cylinder lens in photographic lens evaluation. *Applied Optics* 7: 1587-1599, 1968.
- 2) Tscherning M: Die Monochromatischen aberrationen des Menschlichen Auges. *Zeitschrift fuer Psychologie und Physiologie der Sinnesorgane* 6: 456-471, 1894.
- 3) Howland HC & Howland B: A subjective method for measurement of the monochromatic aberrations of the eye. *Journal of the Optical Society of America* 67: 1508-1518, 1977.
- 4) Howland B & Howland HC: Subjective measurement of high-order aberrations of the eye. *Science* 193: 580-582, 1976.
- 5) van Meeteren A: Calculations on the optical modulation transfer function of the human eye for white light. *Optica Acta* 21: 395-412, 1974.
- 6) Barakat R & Houston A: The aberrations of non-rotationally symmetric systems and their diffraction effects. *Optica Acta* 13: 1-30, 1965.
- 7) Smirnov MS: Measurement of wave aberration in the human eye. *Biophysics (English Translation of Biofizika)* 6: 52-64, 1961.

手術用顕微鏡 OMS-800 OFFISS

(株)トプコン 北島 延昭

1. はじめに

手術用顕微鏡は、手術操作を支援する手段として手術部位の拡大観察を目的とした実体顕微鏡であり、脳神経外科、形成外科、眼科などの分野で使用されている。なかでも眼科では、ほとんどの手術において使用され、広く普及している。近年、眼科手術における手術手技の進歩は目覚ましく、それは手術時間の短縮という形であらわれている。とくに白内障手術においては顕著であり、手術に要する時間は約10分と、数年前の半分程度に短縮されている。こうした手術手技の進歩は、手術装置と眼内レンズによるところが大きい。手術用顕微鏡の性能向上も少なからずその一翼を担っている。

本稿では、網膜硝子体手術において、新たな手術手技を可能とする OFFISS (Optical Fiber Free Intra-vitreal Surgery System) を搭載した手術用顕微鏡 OMS-800 (図1) の主に光学系の特長について紹介する。



図1 OMS-800 OFFISS 外観

2. 開発の背景

増殖糖尿病網膜症 (PDR) や増殖硝子体網膜症 (PVR) の症例で、増殖膜が網膜と面状に癒着している場合、双手法^{1,2)}による膜処理が必要になるケースがある。鑷子と剪刀の組み合わせによる双手法での膜処理を行うことで、安全かつ短時間に手術を施行することが可能となる。従来、双手法の実現手段として、照明付き硝子体鑷子や剪刀³⁾を用いる方法と、スリット照明⁴⁾を用いる方法とがあった。いずれの方法も、ファイバーによる眼内照明が術者の片手を占有しない工夫がなされている。OFFISS の共同開発者である藤田保健衛生大学の堀口教授は、双眼倒像鏡の原理に着目され、手術用顕微鏡に内蔵されている照明を用いることでファイバー照明を不要とし、双手操作を可能とする方法を提案された。

3. 原理

OFFISS の概略光学配置を図2に示す。双眼倒像鏡と同じ原理であり、顕微鏡 (観察者) と患者眼の間

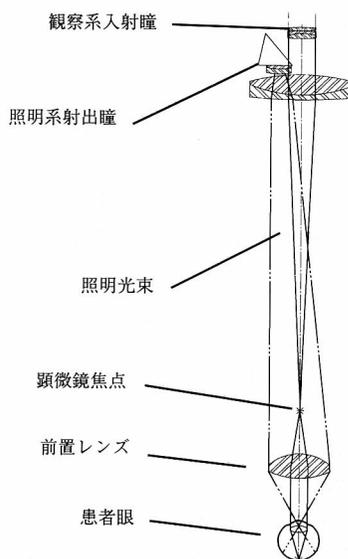


図2 OFFISS の光学配置図

に前置レンズが配置される。前置レンズは、照明光を角膜に集めて眼内を均一に照明し、同時に眼球光学系とともに作用して眼底像を顕微鏡焦点面に結像する。

顕微鏡の光学的な瞳は、観察系の入射瞳と照明系の射出瞳が空間的に分離しているため、前置レンズにより、その相似像が患者角膜上に形成される。したがって、角膜で反射する照明光は、再び前置レンズを通り照明系に戻るため、観察系に混入することなく視野全体にわたり、鮮明な観察が可能となる。

4. OFFISS の特長

従来の Optical Fiber による照明はスポット状に眼内を照明するため、一度に得ることができる視野は狭い範囲であるのに対して、OFFISS による照明は光学的に観察可能な範囲のすべてを照明できるため、広い範囲の視野を得ることができる。例えば、暗がりの中を懐中電灯が照らす範囲内で作業する場合と、部屋の電気をつけて周囲の状況を把握しながら作業するような違いといえる。

今まで片手で進めていた操作を両手で行えることによる効果（図3）と、広い視野を得られる効果により、手術の効率を格段に向上させることができる。これが OFFISS による最大の効果である。

1) 広い視野と良好な操作性

視野の大きさと操作性の良否とを左右するパラメータは、前置レンズの外径とパワーである。外径が大きくなり、パワーが強いほど広い視野を得るには有利であるが、外径が大きすぎると、前置レンズが手術器具あるいは術者の指と干渉し、操作の妨げになってしまう。また、パワーを強くすると、作動距離（前置レンズと患者角膜との距離）は短くなるため、水掛けの際にレンズに水滴が掛かり観察に支障を来す。

このように、視野の大きさと操作性とはトレードオフの関係にあるため、実用性を考慮して最適化を図った。シミュレーションと試作評価を繰り返し、OFFISS で使用する前置レンズ（図4）は外径φ25mm、パワーを40Dとした。その結果、視野は50°、作動距離は22mmで、バランスのよい組み合わせとなっている。

2) 鮮明な観察像

OFFISS のように眼球の外部から照明する方式では、中間透光体からの反射光をいかにして観察系に入れないようにするかがポイントとなる。とくに角

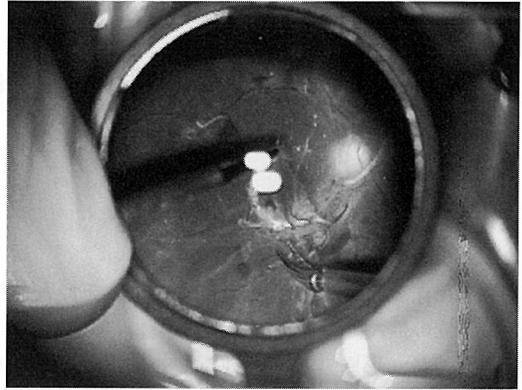


図3 Bimanual 手技

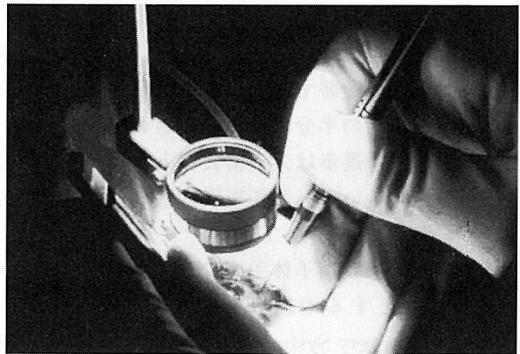


図4 前置レンズ

膜での反射は強く、十分に除去しなければならないため、鮮明な観察像を得るために、照明角度を最適化し、また、独立したフォーカス調整機構を備えている。

(1) 照明角度の最適化

角膜反射によるグレアを抑制するためには、角膜の反射光が観察光束内に入らないように顕微鏡からの照明角度を大きくする必要がある。一方、白内障手術においては照明の同軸性が問題となる。このように手術の種類に応じて照明角度は最適に設定しなければならないが、OFFISS では、前置レンズの使用状態を検知し、照明角度は自動的に4°に設定される。

(2) 独立した調整機構⁹⁾（図5）

手術用顕微鏡のフォーカスは物面に対して顕微鏡自体を上下させる方式が一般的で、OMS-800 もこの方式を採用している。OFFISS を使用して観察する際のフォーカスも同様の動作である。仮に前置レンズが顕微鏡に支持されているとすると、フォーカス操作をしたときに、前置レンズも一緒に移動すること



図5 前置レンズ微動部

になり、前置レンズと患者眼の間隔が変化してしまい、角膜反射によるグレアが観察野に入り込んでくる。OFFISSでは、これを防ぐために前置レンズを顕微鏡の上下動とは独立した状態で支持している。

また、患者角膜と前置レンズとの間隔は、基準寸法に対し数ミリメートル以内に設定しなければならないため、前置レンズの上下機構を別に設けることで、フットスイッチによる微動操作を可能としている。更に、OFFISS未使用状態においては、前置レンズを清潔な状態で保ち、かつ手術空間を確保する目

的で、前置レンズを顕微鏡の下部に連結する構造となっている。

5. おわりに

OMS-800 OFFISSを使用した硝子体手術は、今までにない良好な観察像を得られる反面、従来とは少し異なった手技が必要となる。フットスイッチの操作個所も増えており、慣れるまである程度の時間を要する。また、現時点では、適応症例⁶⁾が明確になってはいないが、普及に伴う拡大が期待されている。

OFFISSを使用した術中蛍光眼底検査 (FA)⁷⁾や、更なる広視野前置レンズの開発などを今後検討していく予定である。

文 献

- 1) Horiguchi M, Kojima Y & Shimada Y: New system for fiberoptic-free bimanual vitreous surgery. Arch Ophthalmol 120: 491-494, 2002.
- 2) 佐藤文平：糖尿病網膜症。池田恒彦編，硝子体手術ABC, 76-83, メジカルビュー社，東京，2001.
- 3) 池田恒彦：双手法による硝子体手術。あたらしい眼科 21: 222, 2004.
- 4) 門之園一明，大路正人：手術用顕微鏡用スリット照明。あたらしい眼科 20: 1111-1112, 2003.
- 5) 公開特許公報 (特開 2003-62003)
- 6) 堀口正之：Optical Fiber-free Intravitreal Surgery System (OFFISS) による硝子体手術。眼科手術 16: 57-60, 2003.
- 7) 堀尾直一，堀口正之：Optical Fiber-free Intravitreal Surgery System (OFFISS) を用いた術中蛍光眼底撮影。あたらしい眼科 20: 1461-1464, 2003.