

# 累進屈折力レンズの光学設計

小松朗

人間は、外界からの情報のうち、約80%を視覚から得ているといわれている。その受光器官である目は、焦点調節や入射瞳調節など、高度な機能を有しており、その機能の一部が失われたとき、日常生活において、大変な不便を感じることになる。これを補う医療器具のひとつが眼鏡であり、その目的により現在さまざまなもののが発売されている。

目の調節機能は、水晶体の周囲にある毛様体筋の緊張により、レンズの働きをする水晶体が厚くなることによって起こる（図1）<sup>1)</sup>。加齢により水晶体の弾力性や毛様体筋の筋力が減少すると、目の調節力が低下し、近方の物体をはっきり見づらくなる。これが、いわゆる老視と呼ばれる状態である。調節力の変化には個人差があるので一概にはいえないが、一般的には40代の中ごろから調節力が不足はじめ、徐々に老眼鏡が必要な状態になる<sup>2)</sup>。

老視用眼鏡レンズは、高齢者の視力を確保するために必要不可欠であり、社会の高齢化に伴ってその需要が増大しており、今後より良い製品の開発が期待されている。

本論では、老視用眼鏡レンズの中の累進屈折力レンズを光学設計という側面から解説し、併せて最近開発された内面累進屈折力レンズについて紹介する。

## 1. 累進屈折力レンズとは

### 1.1 累進屈折力レンズの原理

人が老視の状態になった場合、遠方視用と近方視用の2つの眼鏡が必要になるが、この掛け替えは非常に煩わしいものである。この欠点を解決するために、二重焦点レンズが開発された。しかし、近用部の境界線が外観上邪魔にな

ったり、像の跳びと呼ばれる現象によって、見えない領域が生じるなど、装用感を悪化させている<sup>3)</sup>。また、老視の程度が進むと、中間距離も見にくくなるため、近用部に境界線がなく、連続的に度数が変化する累進屈折力レンズが必要となる。

原理的には、多重焦点レンズの曲面の分割を無限に増やし、中間帯を滑らかな曲面にしていくと、境界線がなくなり、累進屈折力レンズに近くなる。しかし、分割した屈折面の形状を球面とすると、子午線上で滑らかに繋げることはできるが、周辺部には段差がどうしても残ってしまう。これは分割数を増やしても同じで、全体を滑らかな曲面にするためには、分割した曲面の周辺部をひねって歪みを与える、滑らかに接続しなければならない。この歪みのために、累進帯の周辺部を透過した光束には必然的に非点収差が生じ、像に揺れ・歪みが生じる。周辺部の収差を諦める代わりに、連続した度数変化と、境界線のないレンズ面を得たのが、累進屈折力レンズである（図2, 3）。

### 1.2 累進屈折力レンズの設計

累進帯近傍の曲面形状は、累進帯の曲率変化によって、ほぼ決定される。したがって、累進屈折力レンズの設計にあたり、まず最初に決定することは、この曲率変化である。

世界で初めて発売された累進屈折力レンズである、Essel社のバリラックス（1959年）は、その開発に10年近い年月を要し、加工方法とともに試行錯誤の結果、遠用部および近用部では曲率がほぼ一定で、累進帯上では直線状に変化する構成となった。これは、現代の累進屈折力レンズにも受け継がれている<sup>4)</sup>。

累進帯上の屈折力の変化とともに累進帯の長さは、レンズの使いやすさに影響を与える。累進帯が短いと、近用部の視野は見やすくなるが、像の歪みが大きくなる。また長

セイコーエプソン(株)光学事業部（〒399-4693 長野県上伊那郡箕輪町中箕輪 8793)  
E-mail: komatsu.Akira@exc.epson.co.jp

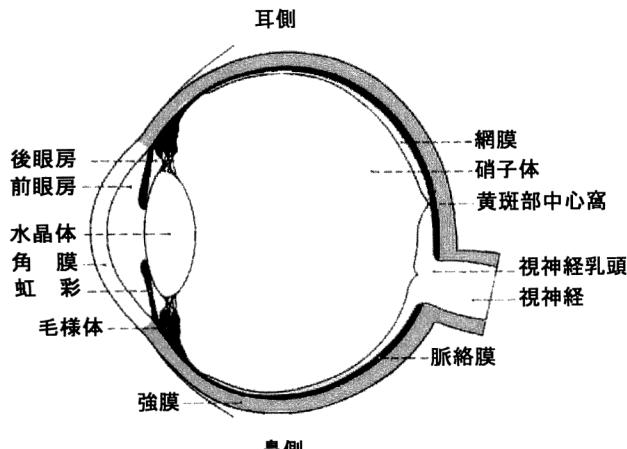


図1 眼球の水平断面。

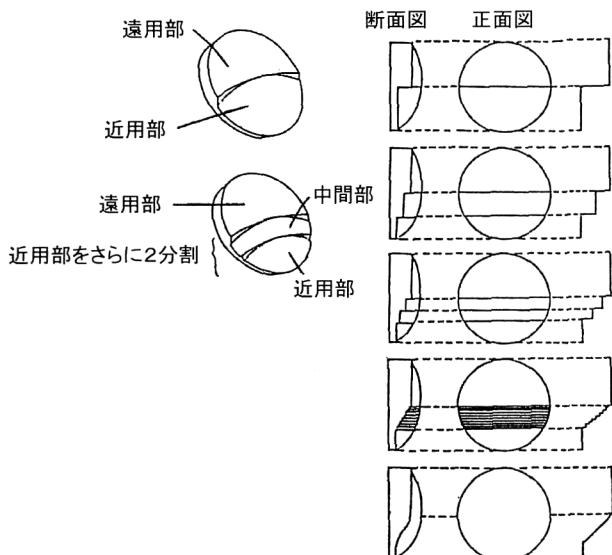


図2 二重焦点レンズから累進屈折力レンズへ。

いと、近用部が離れてしまい見にくくなってしまう。この相反する特性をどこでバランスさせるかによってそのレンズの特徴が決まる。現在、使用者のさまざまな目的に応じられるように、いろいろな累進長のレンズが発売されている。

累進帯の長さと、屈折力変化を決めるとき、累進帯近傍の曲面形状は、ほぼ決まるが、それ以外の部分特に累進帯の側方部の形状には、自由度があり、その設計によって非点収差の分布が変わり、それに伴い装用感も大きく変わる。累進帯側方部に生じる非点収差の分布をコントロールして、目立たなくさせ、不快感をいかに減らすかが、設計上のポイントになる。

収差分布の設計には、大きく分けるとハード設計とソフト設計の2つがある。ハード設計は、遠用部および近用部の明視域（収差量が少なく、視力を確保できるレンズ上の

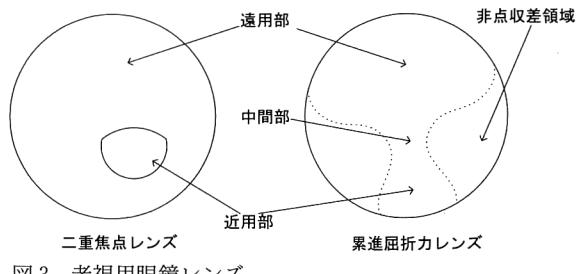


図3 老視用眼鏡レンズ。

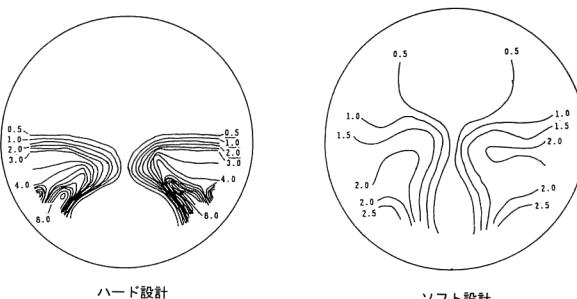


図4 累進屈折力レンズの収差分布。

領域）を広く取り、視野を広げた設計であるが、その反面、明視域以外の収差量は多くなり、像の揺れ・歪みも多くなる。このため、ハード設計のレンズは、室内作業など、顔の動きが比較的少ない場合に向くとされている。これに対し、ソフト設計は、収差を広い範囲に散らすことにより、明視域の広さをある程度犠牲にしつつも、全体の収差量を減らし、揺れ・歪みを少なくしたものである。明視域の狭さは、視線の使い方などによってある程度カバーできるので、汎用のレンズとしては、装用感の良いソフト設計が主流になっている（図4）。

このように、像の揺れ・歪みと視野の広さは、トレードオフの関係にあり、この両者をともに良くすることは不可能であり、どこでバランスを取るかに各社の設計思想が表れる。

## 2. 累進屈折力レンズの設計の実際

### 2.1 累進面の表現方法

累進面は機能的に、遠用部、近用部、累進部、側方部に分けられるが、もちろんレンズ上に明確な境界があるわけではなく、これは便宜的なものである。それぞれの領域は、機能も形状も異なっており、しかも全体を滑らかに接続していくなければならないため、曲面形状を解析的な单一の式で表現することは難しい。以前は、ツエルニケ級数や、高次多項式なども用いられていたが、最近では、曲面上の点の座標を与えておいて、それらを補間する方法や、スプライン曲面等の区分曲面が、主に用いられている。スプライン曲面は、パッチ間の接続関係が数学的に保証され

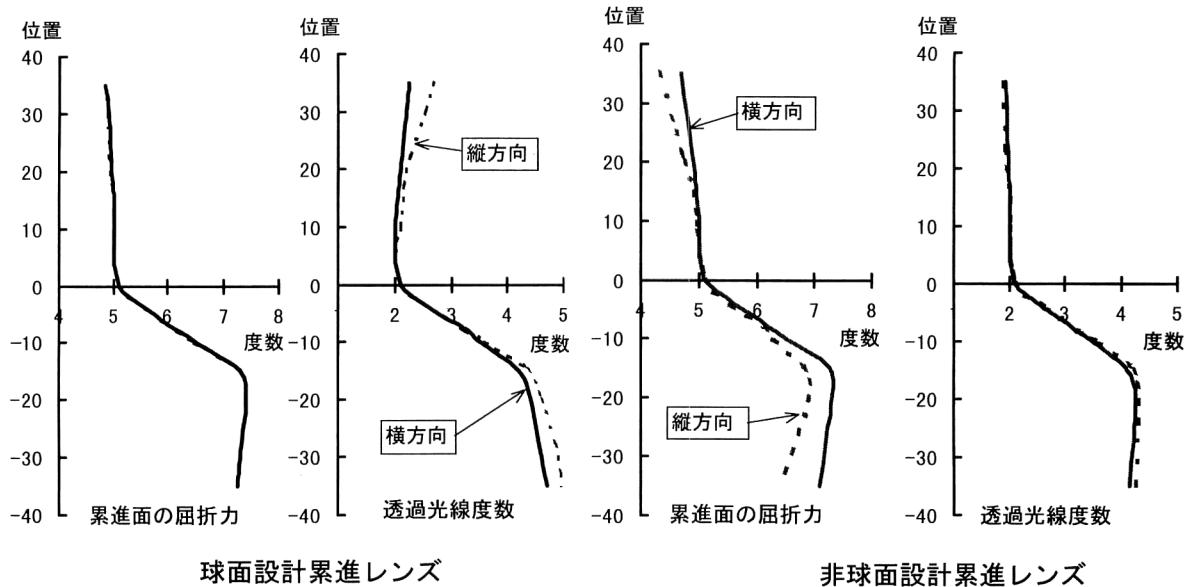


図5 主注視線上の面屈折力と透過光線度数。

ており、局所変形性等、累進面に使用する上で便利な性質を備えている<sup>5)</sup>。

累進面をスプライン曲面で表現する場合、その区分間隔(パッチの大きさ)にもよるが、1つの曲面に対して数百個のパラメーターが必要になる。よく使われる軸対称非球面の場合には、曲率や非球面係数等、数個のパラメーターによって形状が決まるが、累進屈折力レンズを設計する場合は、この数百のパラメーターをすべて決定しなければならない。この点で、累進屈折力レンズは、光学機器の中でも、最も複雑な曲面形状を有しているといえる。

使用者の装用状態を勘案して、使用感の良い累進面形状を、いかに合理的に効率よく生成するかが、各社の重要なノウハウになっており、この点を盛り込んだ設計用ソフトが重要な役目を果たしている。累進屈折力レンズの設計には、通常の結像系レンズの設計用ソフトとは異なる機能が必要となるため、筆者らは、眼鏡レンズ設計ソフト SODES (SEIKO EPSON Optical Design and Engineering System) をすべて自社開発し、使用している。

## 2.2 設計上の改善例

レンズの装用感を向上させるために、各社でさまざまな技術開発が行われている。

そのひとつが、累進面の非球面化である。もともと複雑な非球面形状を有する累進面を、さらに非球面化するといふと、奇異な感じを受けるであろうが、これは、累進屈折力レンズ独特の呼び方に由来している。累進屈折面において、遠用部の上方から、遠用中心点・累進帯の中央部・近用中心点を通り、さらに近用部の下方に至る線は、主注視線と呼ばれ、累進屈折力レンズの設計上最も重要な部分で

ある。この線の点において、方向による曲率差がないようなレンズは、球面設計のレンズと呼ばれる。この設計はオーソドックスで数年前まではすべてこのタイプであった。これに対し、単焦点レンズが球面から非球面に進化したのと同様に、累進屈折力レンズも主注視線上の点において曲率差をもたらすことによって、光学性能を改善できることが明らかになってきた。このようなレンズを非球面設計の累進屈折力レンズと呼び、近年適用例が増えている。累進屈折面の非球面化は、非点収差の減少のみならず、レンズの薄型化、明視域の拡大、揺れの低減などにも効果がある<sup>6,7)</sup>(図5)。

さまざまな設計上の改良により、累進屈折力レンズの装用感は年々向上してきており、今では、老視用眼鏡レンズの中で、最もポピュラーなものになった。しかし、累進屈折面の宿命である非点収差と像の歪みは、使用上目立たなくさせているだけで、本質的には改善されていない。筆者らは、より光学性能の高いレンズを目指し、従来の累進屈折力レンズのコンセプトを打ち破り、レンズの内側に累進面を配した内面累進屈折力レンズを開発したので、これについて報告する<sup>8)</sup>。

## 3. 内面累進屈折力レンズ

### 3.1 開発の背景

現在市販されている累進屈折力レンズは、外面に累進屈折面を有し、内面に球面またはトーリック面を配置して所定の遠用度数と加入度を得ている。これは、累進屈折面が複雑な形状をしており、その加工が難しく、時間がかかるためである。従来の累進屈折力レンズは、累進屈折面をあ

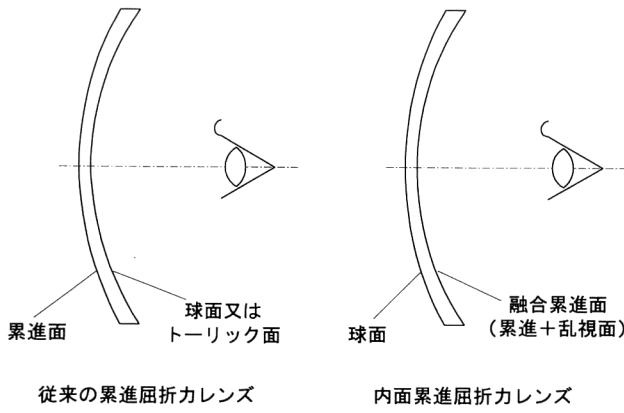


図6 内面累進屈折力レンズの構造。

らかじめ型で成形しておき、ユーザーの注文により内面を加工し所定の度数のレンズとした後出荷するのである<sup>9)</sup>(図6)。

従来外面にあった累進屈折面を内面に配置することにより、揺れ・歪みが減少することは、理論的に予測できる。眼鏡レンズの歴史をみると、初期には眼鏡の外面にあったトーリック面が、歪みの改善のために内面に配置されるようになったという事例があり、累進屈折面を内面側に配置するのは、歴史的必然であろうと思われる。

しかし、内面に累進屈折面を有する眼鏡レンズを作るためには、ユーザーの処方に合わせて任意の球面度数・乱視度数・乱視軸方向をもつ曲面と累進屈折面を融合して複合した非球面形状を創成しなければならない。また、その複雑な曲面を短時間で加工する方法が確立されなければならない。これまで、この2つの障壁に阻まれ、内面累進屈折力レンズは実用化されていなかったのだが、このたび筆者らは、これらの問題を解決し、世界初の内面累進屈折力レンズを世に送り出すことができた。

### 3.2 内面累進の効果

累進面を内面側に設けることにより、像の歪みと明視域の広さに対して、大きな改善効果が得られる。累進屈折力レンズによる像の歪みは、見かけの倍率が視線の方向によって変わることから生じる。ある方向を見たときの倍率(*SM*: spectacle magnification)は、次式で表される。

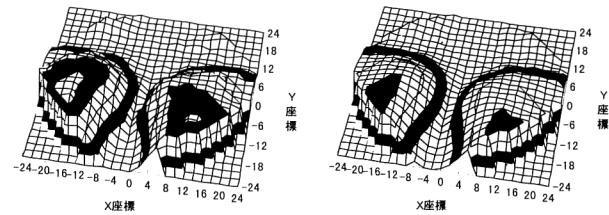
$$SM = M_s \times M_p \quad (1)$$

$$M_s = 1 / (1 - tD/n) : シェイプファクター$$

$$M_p = 1 / (1 - LP) : パワーファクター$$

*t*: レンズの厚さ, *n*: 屈折率, *D*: 外面のベースカーブ, *L*: レンズから瞳までの距離, *P*: レンズの度数

累進屈折力レンズである以上、外面累進屈折力レンズであろうと内面累進屈折力レンズであろうと、遠用部と近用



外表面累進屈折カレンズ

内面累進屈折カレンズ

部で一定の度数差(加入度)をもっている。したがって、*P*の値はレンズの場所によって変化し、これに伴って*M<sub>p</sub>*の値も変化する。同じ加入度のレンズであれば、遠用部と近用部の度数差は、外面累進屈折力レンズでも内面累進屈折力レンズでも変わらないので、*M<sub>p</sub>*の差も変わらない。これに対し、外面累進屈折力レンズでは*D*の値が加入度分変わるので、それに伴い*M<sub>s</sub>*も変わるが、内面累進レンズでは*D*の値が一定なので、*M<sub>s</sub>*も一定である。したがって、内面累進屈折力レンズでは、*M<sub>s</sub>*の分だけ遠近の倍率差が小さくなり、周辺部の揺れ・歪みも小さくなる。

式(1)を用いて、レンズ面上の点における最大倍率と最小倍率の差を歪み率とし、これを3次元表示したものが、図7である。最大歪み率を比較すると、内面累進レンズは外面累進レンズに対して約25%改善されている。

また、累進面を目に近づけたことにより、明視域の見かけの幅を約20%広げることも同時に達成された。この結果、内面累進屈折力レンズは、揺れ・歪みの低減と明視域の拡大の相乗効果によって、従来のレンズに対して装用感を大幅に向上させることができた。

### 3.3 累進面の創成方法

内面累進屈折力レンズを量産するためには、ユーザーから注文を受けてから加工する累進面の形状を設計する必要がある。しかし、累進面の形状をゼロからそのつど設計していたのでは時間が足りないので、基本の累進面形状はあらかじめ設計しておき、処方に合わせて所定の屈折力を有するよう曲面を合成するのである。

光軸を*Z*軸方向、それと直交する方向を*X*軸、*Y*軸とし、*XY*平面上の点(*x*, *y*)に対して*Z*座標を定める方程式が決まれば、曲面の形状は、決定される。累進面の*Z*座標を*z<sub>p</sub>*、合成する乱視面の*Z*座標を*z<sub>t</sub>*、両者を融合した曲面の*Z*座標を*z<sub>pt</sub>*としたとき、累進面と乱視面を融合する最も単純な方法は、*Z*座標の和を取り、*z<sub>pt</sub>* = *z<sub>p</sub>* + *z<sub>t</sub>*とすることである。しかし、この方法では、でき上がった曲面の曲率がそれぞれの曲面の曲率和にならないため、度数誤差が生じる。この誤差を解消するためには、座標値を基にするのではなく、曲率を基にして、曲面の融合を考え

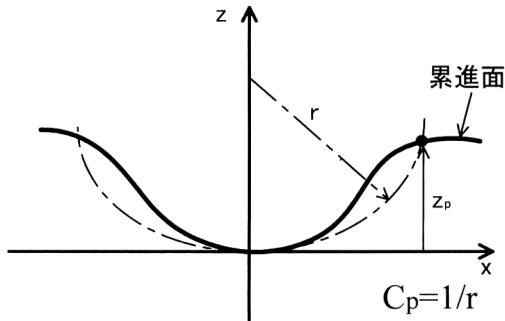


図 8 累進面形状から  $C_p$  を定義する。

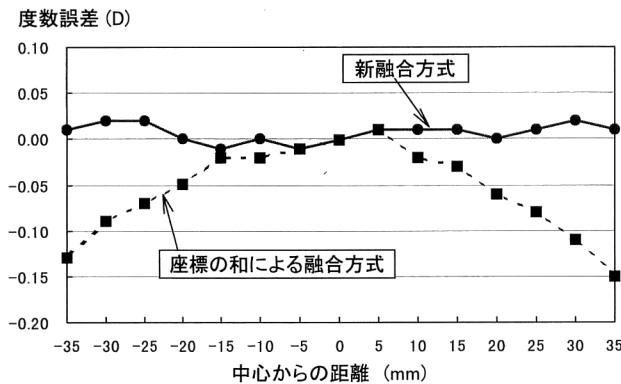


図 9 累進面と乱視面を融合したときの曲率の誤差。

る必要がある。

そこで筆者らは、従来のトーリック面の表現式とは異なる下記の式で  $z_t$  を表現し、これを基に曲面の融合を試みた。

$$z_t = \frac{C_x x^2 + C_y y^2}{1 + \sqrt{1 - C_x^2 x^2 - C_y^2 y^2}} \quad (2)$$

(ただし、 $C_x, C_y$  は  $x$  と  $y$  方向の曲率)

この乱視面の表現式は、従来のトーリック面の式と異なり、 $x$  と  $y$  が平等に扱われており、原点付近における桁落ちもないので、曲面の融合を考えるときに都合がよい。

次に、累進面の座標  $z_p$  を用いて、累進面上の各点に対して  $C_p$  を定義する。

$$C_p = \frac{2z_p}{x^2 + y^2 + z_p^2} \quad (3)$$

この式で定義される  $C_p$  は、 $Z$  軸上に中心をもち、点  $(x, y, z_p)$  を通る球面の曲率を表す。この  $C_p$  を用いて  $z_p$  を表せば、

$$z_p = \frac{C_p x^2 + C_p y^2}{1 + \sqrt{1 - C_p^2 x^2 - C_p^2 y^2}} \quad (4)$$

が成り立つ。これは、 $C_p$  を用いて累進面形状を表したことにはかならない(図 8)。

式(2)と式(4)をみると、式の形はまったく同じで曲率のみが異なっていることがわかる。そこで、下記の式で累

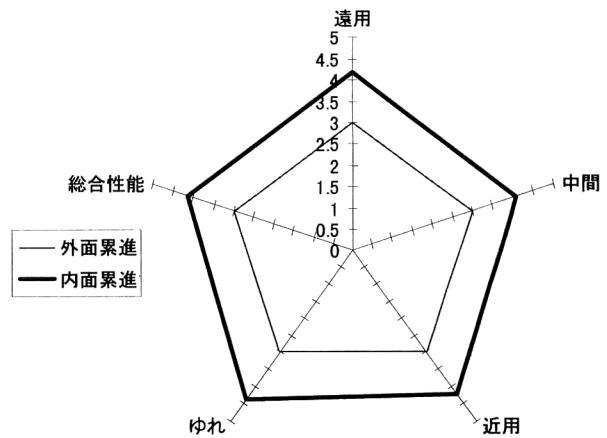


図 10 モニター評価結果。

進面と乱視面を融合した曲面を表す。

$$z_{pt} = \frac{(C_p + C_x)x^2 + (C_p + C_y)y^2}{1 + \sqrt{1 - (C_p + C_x)^2 x^2 - (C_p + C_y)^2 y^2}} \quad (5)$$

この式を用いれば、曲率誤差を生ぜずに曲面を融合することが可能になる。図 9 をみれば、単純に座標の和をとったときには、周辺部で最大  $0.15 D$  の誤差が生じており、曲率を基に合成したときには、誤差がほとんどゼロになっていることがわかる。この結果、累進面と乱視面の両方の作用を有する複合曲面を合成することに成功し、累進面をレンズの内側に配した内面累進屈折力レンズを開発することができたのである<sup>10,11)</sup>。

### 3.4 評価結果

眼鏡レンズの評価では、光学的なシミュレーションだけではわからない感覚的な部分が大きいため、モニター調査を行い、内面累進屈折力レンズの効果を検証した。対象者は、無作為に抽出した累進屈折力レンズ経験者 100 名で、それぞれ累進面設計が同一の外面累進屈折力レンズと内面累進屈折力レンズを比較した。評価方法は、揺れや視野の広さ等 5 項目に対して、外面累進屈折力レンズを基準としたときの相対比較とし、5 段階で評価した。基準とした外面累進屈折力レンズに対して、各項目ともに 1 ポイント以上の改善効果があり、このような高い評価結果は、従来の累進屈折力レンズでは見られなかったもので、内面累進屈折力レンズの性能の高さを実証している<sup>12)</sup> (図 10)。

老視用眼鏡レンズの究極の姿は、どのようなものであろうか。生来の調節機能を補い、自動的に焦点調節を行う眼鏡がそのひとつの姿であろう。これを目指しまぎらまな研究<sup>13)</sup>が行われているが、いまだ実用化には至っていない。

内面累進屈折力レンズは、この夢へと向かう道の途中で得られたひとつの回答である。それは、従来の累進屈折力

眼鏡レンズがもっていたジレンマを解消し、設計者の夢を実現させた<sup>14-16)</sup>。しかし、内面累進屈折力レンズも完璧ではない。われわれは、このようなレンズを世に送り出せたことを誇りに思うと同時に、今後もユーザーのよりよい視生活のために、より性能の高い眼鏡レンズを提供していくことを願っている。

## 文 献

- 1) 仁田正雄：眼科学（文光堂，1988）pp. 1-3.
- 2) 所 敬：屈折異常とその矯正（金原出版，1988）pp. 177-197.
- 3) 東 秀夫：やさしい光学（日本光学工業眼鏡事業部，1974）pp. 82-95.
- 4) 鶴田匡夫：第3・光の鉛筆（新技術コミュニケーションズ，1993）pp. 288-298.
- 5) 加賀唯之，加藤一寿：PCT 出願特許国際公開番号 WO96/11421.
- 6) 小松 朗，加藤一寿，向山浩行：特開平8-220489.
- 7) 白柳守康：“薄型非球面設計累進多焦点レンズ「JOYAS」の開発”，眼鏡学ジャーナル，1 (1997) 43-48.
- 8) 最上隆夫：“内面累進多焦点レンズ”，眼鏡学ジャーナル，1 (1997) 33-36.
- 9) 最上隆夫：“光重合によるメガネレンズの製作”，O plus E, 20 (1998) 562-568.
- 10) 向山浩行，加藤一寿：PCT 出願特許国際公開番号 WO97/19382.
- 11) 向山浩行，加藤一寿，小松 朗，加賀唯之：PCT 出願特許国際公開番号 WO97/19383.
- 12) 向山浩行，加藤一寿：“内面累進多焦点レンズの光学性能”，視覚の科学，19, No. 3 (1998) 89-93.
- 13) 向山浩行：PCT 出願特許国際公開番号 WO93/15432.
- 14) 小松 朗：“眼鏡用プラスチック累進多焦点レンズ”，光アライアンス，9, No. 10 (1998) 11-14.
- 15) 小松 朗：“累進多焦点レンズの光学設計”，光技術コンタクト，36, No. 10 (1998) 33-42.
- 16) 高橋文男：“眼鏡レンズの設計”，視覚の科学，19, No. 4 (1999) 122-134.

(1999年8月2日受理)