

## 眼鏡矯正に必要な調節の知識・問題点

梶田雅義, 鈴木説子, 加藤桂一郎

福島県立医科大学医学部眼科学講座

# Refractive Understanding and Problem for Prescribing Eye Glasses

Masayoshi Kajita, Setsuko Suzuki and Keiichiro Kato

Department of Ophthalmology, Fukushima University School of Medicine

眼鏡による屈折異常の矯正は眼科診療における最も基本的な手技である。しかし、実際に取り組んでみると、快適な眼鏡の処方がいかに難しいかがわかる。その理由として、調節機能には個人差があり、眼鏡処方時にそれを十分に把握できないことが挙げられる。屈折矯正を行うときには、どれだけの調節力があるかではなくて、どの程度の調節反応量を快適に利用できるかを推測することが大切である。我々が開発した調節機能解析装置を用いて、調節機能に応じた眼鏡の処方法について述べる。

(視覚の科学 23: 26-31, 2002)

キーワード：屈折異常, 眼鏡, 調節, 調節微動, 眼精疲労

The correction of refraction errors by glasses is the most fundamental skill in ophthalmology medical treatment. However, it is understood how the prescription of glasses which satisfies a patient is difficult, when we actually try to grapple with. The reason is because there is an individual difference in accommodative function and it can not be fully grasped at the time of glasses prescription. When correction is tried, it is necessary to guess how much accommodative response is comfortably available, and not how much accommodative power the patients has. This paper describes the way of prescribing glasses corresponding to the accommodative function by using the accommodative function analytic device which we have developed.

(Jpn J Vis Sci 23: 26-31, 2002)

Key Words: Refractive errors, Eye glasses, Accommodation, Accommodative microfluctuation, Asthenopia

### I. はじめに

眼鏡による屈折異常の矯正は眼科診療における最も基本的な手技であるが、快適に装用できる眼鏡の処方はいかに容易ではない。その理由は、調節機能には個人差があり、眼鏡処方時にそれを十分に把握できないことが考えられる。また、屈折検査に汎用しているオートレ

フラクトメータの測定値には調節が介入している。これらのことが適正な眼鏡処方を困難にしている。

最初に眼鏡の処方に必要な光学的な知識について述べ、続いて眼鏡の処方時に我々が現在開発中の調節微動の高周波成分を解析することによって調節機能を評価する調節機能解析装置による調節機能の評価<sup>1)</sup>が有用であった症例を呈示し、屈折矯正における調節機能

別刷請求先：960-1295 福島市光が丘1 福島県立医科大学医学部眼科学講座 梶田雅義  
(2002年8月26日受理)

Reprint requests to: Masayoshi Kajita Dept of Ophthalmol, Fukushima Medical Univ School of Med  
1 Hikarigaoka, Fukushima 960-1295, Japan  
(Received and accepted August 26, 2002)

検査の重要性について述べる。

## II. 屈折異常

屈折異常の評価は毛様体筋が完全に休んでいる状態で行う。屈折異常には、正視、近視、遠視、および乱視がある(図1)。ここでは説明が冗長になるので、乱視には触れない。正視は無限遠からきた平行光束が網膜面で収束する眼である。近視は無限遠からきた平行光束が網膜面よりも前で収束し、遠視は網膜面よりも後で収束する眼である。これだけから判断すると、正視が最もよい眼と思われるがそうとは限らない(図2)。近視眼は裸眼では遠くにピントが合わないが、眼の前の任意の一点から発散するように眼に入る光は、網膜面で収束する。この任意の一点の距離は近視の程度により異なるが、近視眼はピント合わせを行わない状態でも実空間にピントの合う位置が存在する。このことは視力発達時期には好都合な屈折状態であるといえる。一方、遠視眼は遠くがよく見える眼と思われているが、ピント合わせを行わなければ、実空間にピントの合う位置が存在しない。このため、視力発達時期に十分な調節力のない遠視眼は弱視になる恐れがある。

## III. 調節機能

眼のピント合わせの機構を調節という。毛様体筋の

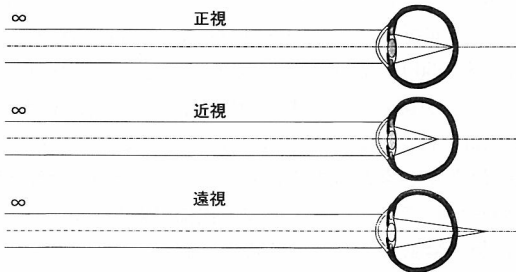


図1 屈折異常

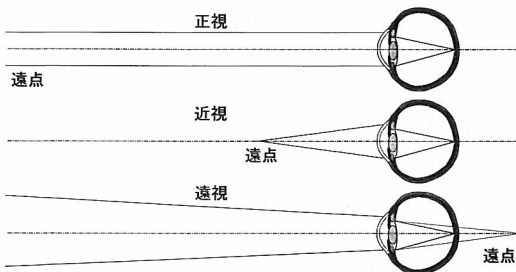


図2 遠点の位置

主として輪状筋が収縮することによってチン小帯が緩み、水晶体は自らの弾力性で屈折力を増し、近方にピントを合わせる<sup>2,3)</sup>。臨床的には毛様体筋の縦走筋が収縮することによって遠方への調節が機能しており、負の調節と呼ばれている<sup>4,5)</sup>が、輪状筋ほどアクティブには活動しておらず、異論もある。毛様体筋が最大限に緊張したときにピントが合う位置を近点という(図3)。一般に近視眼では正視眼に比べ近点の位置は近く、遠視眼では遠い。遠点と近点の間は調節域と呼ばれ、自分の意志でピントを合わせることができる範囲である。

## IV. 調節検査と調節努力

一般に調節の検査には、読書距離において良好な視力値が得られているか(近方視力測定)、どれだけ近方にピントを合わせることができるか(調節力測定)、どれだけ速やかにピント合わせをすることができるか(調節緊張および弛緩速度の測定)、あるいは呈示視標に対してどれだけ調節が反応するか(動的あるいは準静的調節特性測定)などの手法がある<sup>6)</sup>。これらの検査によって、どれだけ調節機能を有しているかを評価することは可能であるが、眼を使用することによって、毛様体筋にどの程度の負担が生じているかを予測するのは困難である。我々は、調節微動の高周波成分出現頻度 (high frequency component 以下 HFC) が水晶体屈折力の揺らぎによって生じている<sup>7-18)</sup>ことに着目し、調節努力と HFC との関係を調査してきた<sup>19,20)</sup>。視標呈示位置、調節反応量および HFC をカラーコードを用いた3次元グラフ (frequency of high frequency component of accommodative microfluctuation in kinetic refraction 以下 Fk-map) で表示した<sup>1)</sup>(図4)。横軸は視標呈示位置を示し、縦軸は調節反応量を示す。カラムの色は HFC の値に応じて、寒色系から暖色系に至るカラーで表示した。HFC 値と色の対応は臨床的な印象に一致するように

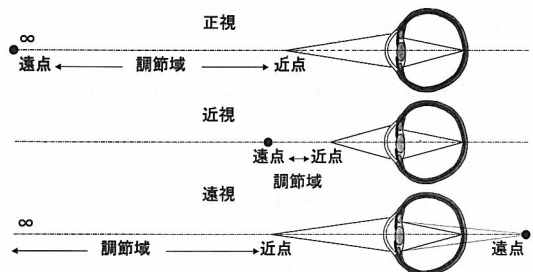


図3 近点と調節域

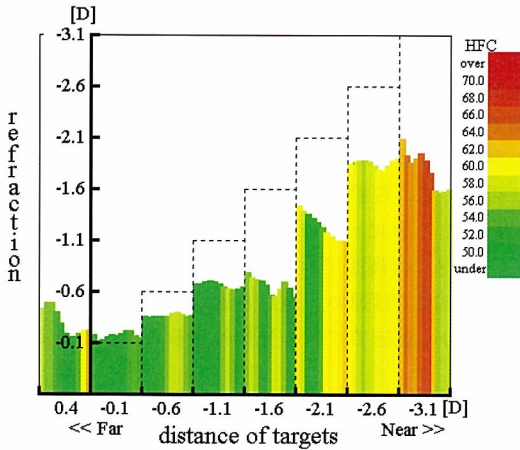


図4 正常者の調節機能解析図

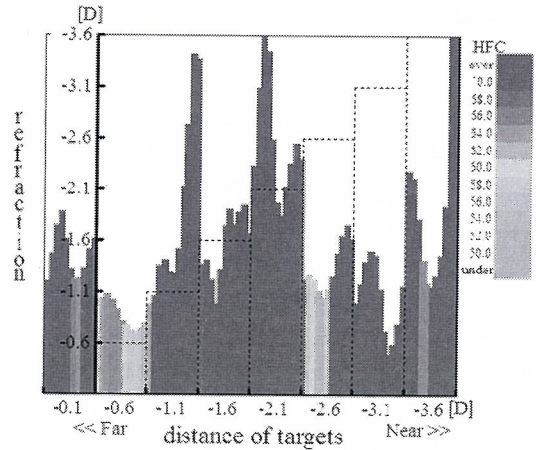


図5 症例1の調節機能解析図

我々が独自に設定した。図4はオートレフラクトメータによる球面屈折値が  $-0.1\text{ D}$  の正常者 (20歳女性) の Fk-map である。距離  $+0.4\text{ D}$  の視標に対しては、視標のボケによって軽い調節が誘発されているが、HFC 値は低い値を呈している。距離  $-0.1\text{ D}$  の視標に対しては、視標位置にピントがほぼ合っており、HFC は低い値を呈し、調節反応量のカラムは緑色で表示されている。距離  $-0.6\text{ D}$  の視標に対しては調節ラグが生じ、更に近接した視標に対しては、視標距離の短縮に応じて調節ラグが増加している。 $-2.1\text{ D}$  の視標を呈示したときには、前半の HFC は低い値を維持しているが、その後、わずかに上昇する。しかし、調節反応量のカラムの色はオレンジ色程度までである。 $-3.1\text{ D}$  の距離に呈示された視標に対しても、毛様体筋の負担はそれほど強くない。

### V. 調節機能と屈折矯正

毛様体筋にかかる負担を推測することによって、より快適な屈折矯正を行うことができる。我々が経験した症例を呈示し解説する。

#### 1. 症例1

13歳女性で、主訴は頭痛であった。視力は右眼  $1.2\text{ (nc)}$ 、左眼  $1.2\text{ (nc)}$  であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は右眼  $S-0.50\text{ D} \ominus C-0.25\text{ D}$   $Ax89^\circ$ 、左眼  $S-0.50\text{ D} \ominus C-0.25\text{ D}$   $Ax96^\circ$  であった。利き眼は右眼であり、右眼の Fk-map は図5のようであった。すなわち、距離  $-0.1\text{ D}$  の軽度のボケ視標に対して活発に毛様体筋が活動していた。また  $-1.1 \sim -2.1\text{ D}$  の中間距離の視標に対する調節応答は不安定で、調節リードを呈していた。それよりも近方

の視標に対しては十分な調節応答を示していないが、HFC 値は高い値を示し、毛様体筋には強い緊張が生じていた。本症例はミドリ M<sup>®</sup> の1日1回点眼によって、頭痛は消退した。

#### 2. 症例2

24歳医学部女子学生で、主訴は眼の疲れと学習意欲の低下であった。視力は右眼  $0.05\text{ (}1.2 \times S-4.50\text{ D} \ominus C-0.50\text{ D Ax}180^\circ\text{)}$ 、左眼  $0.1\text{ (}1.2 \times S-3.75\text{ D} \ominus C-0.50\text{ D Ax}180^\circ\text{)}$  であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は右眼  $S-5.75\text{ D} \ominus C-1.00\text{ D Ax}5^\circ$ 、左眼  $S-5.00\text{ D} \ominus C-1.00\text{ D Ax}176^\circ$  であった。装着中の眼鏡レンズの屈折力は右眼  $S-6.00\text{ D} \ominus C-1.00\text{ D Ax}180^\circ$ 、左眼  $S-5.50\text{ D} \ominus C-1.00\text{ D Ax}180^\circ$  で、近視の過矯正であることが疑われた。利き眼は右眼であり、右眼の Fk-map は図6のようであった。すなわち、他覚的屈折値よりも遠方の視標に対してのみ、HFC 値は低い値を呈していたが、その他の視標に対しては毛様体筋に強い緊張が働いていることがわかった。所持眼鏡の装着では常に毛様体筋に強い緊張が働くことが推測された。距離  $-7.4\text{ D}$  の視標に対してはデータが欠損しており解析していない。本症例では、レンズ屈折力が右眼  $S-4.25\text{ D} \ominus C-0.50\text{ D Ax}180^\circ$ 、左眼  $S-3.50\text{ D} \ominus C-0.50\text{ D Ax}180^\circ$  の眼鏡を処方したところ、自覚症状は消退した。

#### 3. 症例3

29歳男性で、主訴は急激な視力低下であった。視力は右眼  $0.4\text{ (}1.5 \times S-0.75\text{ D} \ominus C-1.50\text{ D Ax}40^\circ\text{)}$ 、左眼  $0.6\text{ (}1.5 \times S-0.50\text{ D} \ominus C-0.75\text{ D Ax}180^\circ\text{)}$  であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は右眼  $S-0.75\text{ D} \ominus C-1.50\text{ D Ax}37^\circ$ 、左眼  $S-0.50\text{ D} \ominus C-0.75\text{ D}$

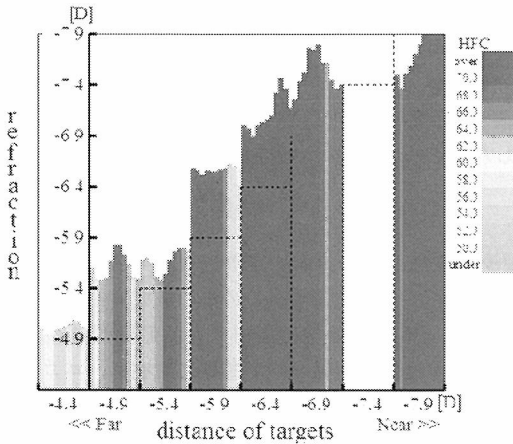


図6 症例2の調節機能解析図

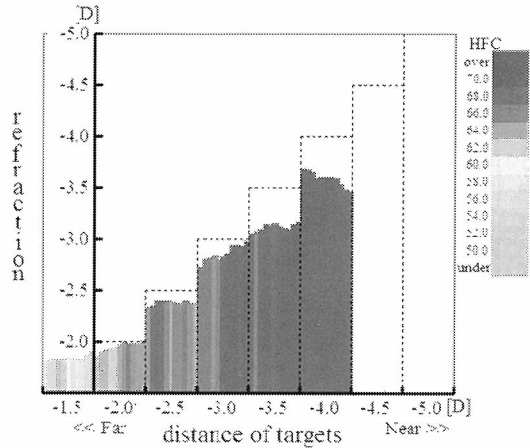


図7 症例3の調節機能解析図

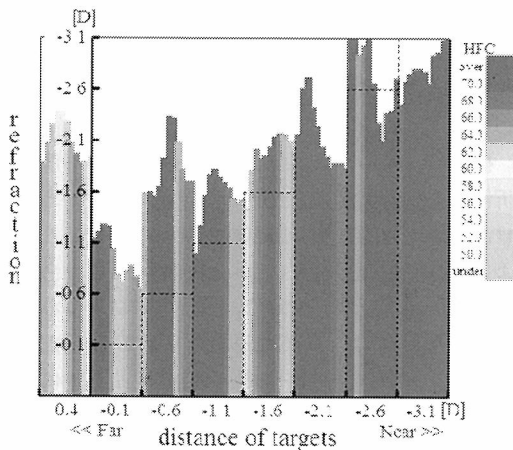


図8 症例4の調節機能解析図

Ax3°であった。眼鏡の装用経験はなかった。利き眼は右眼で、右眼の Fk-map は図7のようであった。すなわち、屈折値よりも遠方である 0.4 D の視標に対しては、著しく調節が介入しており、遠方から中間距離の視標に対しては大きな調節リードと高い HFC 値を呈していた。更に、近方視標に対しては調節ラグは小さく、高い HFC 値を呈していた。本症例には 0.05% シクロペントラート点眼液を1日1回投与したところ、1カ月後には、視力は右眼 1.0 (1.5×C -0.50 D Ax40°)、左眼 1.2 (1.5×S-0.25 D) に改善した。

4. 症例4

39歳女性で、眼鏡の処方を希望して受診した。視力は右眼 0.3 (1.2×S-1.75 D)、左眼 0.4 (1.5×S-1.50 D) であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈

折値は右眼 S-1.75 D C-0.25 D Ax44°、左眼 S-1.50 D C-0.50 D Ax88°で、所持眼鏡レンズの屈折力は右眼 S-1.50 D、左眼 S-1.50 D であった。利き眼は右眼で、右眼の Fk-map は図8のようであった。すなわち、遠方～中間距離の視標に対して、比較的良好な調節応答を呈していたが、全体に高い HFC 値を呈しており、距離 -4.5 D 以内の視標に対しては苦痛を訴え、検査を中断した。主訴にはなかったが、眼の疲れやすさや肩こりの自覚が聴取できたので、屈折力が左眼 S-1.75 D add +1.00 D、左眼 S-1.50 D add +1.00 D の累進屈折力レンズを処方したところ、眼鏡は快適に装用でき、眼の疲れや肩こりも治まった。

5. 症例5

45歳女性で、主訴は眼の疲れであった。視力は右眼 0.06 (1.5×S-4.25 D)、左眼 0.06 (1.2×S-4.00 D C-0.50 D Ax180°) であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は右眼 S-4.75 D C-0.50 D Ax38°、左眼 S-4.25 D C-0.75 D Ax177°であった。装用中の眼鏡レンズ屈折力は右眼 S-4.75 D C-0.25 D Ax45°、左眼 S-4.50 D C-0.75 D Ax180°であり、近視の過矯正であることが疑われた。利き眼は左眼で、左眼の Fk-map は図9のようであった。すなわち、遠方から中間距離にかけて HFC 値は低い値をとり、正常な調節機能を有していた。距離 -7.1 D の視標に対しては、HFC 値がやや高い値を呈していた。年齢と Fk-map のパターンからは加入屈折力の小さい累進屈折力レンズの処方が望まれるところであったが、装用中の眼鏡よりも遠用球面屈折力を下げ、加入累進屈折力 +0.75 D の装用テストを行ったところ、近方視に対する違和感を訴えた。近方作業が

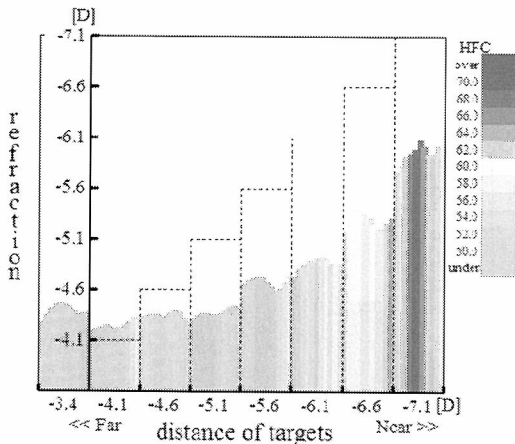


図9 症例5の調節機能解析図

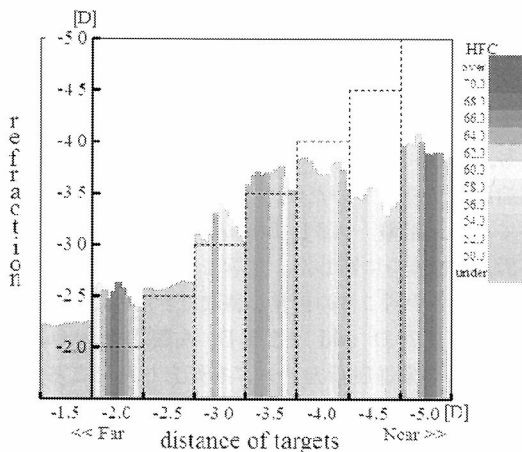


図10 症例6の調節機能解析図

多くないことから、単焦点レンズ右眼 S-4.25 D、左眼 S-4.00 D C-0.50 D Ax180°を処方したところ、症状は消退した。

### 6. 症例6

47歳男性で、主訴は眼の疲れ、および視力低下であった。視力は右眼 0.15 (1.2×S-1.75 D)、左眼 0.2 (1.5×S-1.50 D C-0.75 D Ax110°) であり、オートレフラクトメータによる他覚的屈折値は右眼 S-2.75 D C-0.50 D Ax44°、左眼 S-2.50 D C-1.25 D Ax109°であった。装用中の眼鏡レンズの屈折力は右眼 S-0.50 D C-0.75 D Ax70°、左眼 S-0.50 D C-0.75 D Ax100°であった。近方作業中は眼鏡を装用しないことが多いことが聴取できた。利き眼は右眼で、右眼の Fk-map は図10のようであった。すなわち、遠方視標に対して HFC 値が高く、中間距離においても

HFC 値が比較的高い値を呈していた。中間距離を見たときにかかる毛様体筋の負担を減じるために累進屈折力レンズを用いて、右眼 S-1.50 D add +1.50 D、左眼 S-1.50 D C-0.25 D Ax110° add +1.50 D を処方したところ、眼の疲れは消退した。

## VI. 調節機能異常の推測と検出方法

眼鏡処方を行うときに、調節機能を考慮することは非常に大切である。調節微動の高周波成分を解析することによって調節機能を評価する調節機能解析装置は、ニコン社と協同開発中であり、現在は、ニコン社のオートレフラクトメータを改造し、経時的な屈折値をパソコンに取り込み、このデータを我々が独自に開発したソフトプログラムを用いて、解析を行っている。将来はパソコンにデータを取り込むと同時に、リアルタイムで調節機能を観察できる装置に仕上げ、臨床に供したいと考えている。本装置を用いれば、調節機能を容易に把握できるが、このような特殊な装置を用いなくても、調節機能を推測することは可能である。例えば、オートレフラクトメータを用いた他覚的屈折測定を行うときに、数回の測定値にばらつきが少なければ、比較的正常な調節機能を有していると考えてよい。数回の測定結果にばらつきが大きい場合、あるいは円柱屈折度が不安定で、円柱軸度にもばらつきが大きい場合には、調節緊張状態にあると考える。オートレフラクトメータを用いて測定するときには、屈折値を連続して記録するのではなく、1回ごとに雲霧機構を作動させて数回測定する。更に、自覚的屈折検査を行うときには雲霧法を用いて行い、自覚的屈折値と他覚的屈折値の差を観察することも大切である。我々の印象では、自覚的屈折検査における球面屈折値がオートレフラクトメータを用いた他覚的屈折値よりも 0.75 D 程度プラス寄りの値で得られれば、おおむね正常な調節機能を有していると推測できる。

## VII. おわりに

現在は視覚情報が氾濫し、眼を酷使する機会が多くなっているためか、調節機能が全く正常である症例をみつけるのが困難になってきている。眼鏡処方を行うときには、測定した屈折値に調節が含まれている可能性が高いことを常に念頭におかなければならない。そして、調節機能異常の存在が確認あるいは推測される場合には、症例1と3のように、治療を行った後で、改めて眼鏡処方を検討することが大切である。眼科医としては、見えることで一時的に満足させる眼鏡を処

方するのではなく、持続して快適に装用できる眼鏡の処方にも努めたいものである。

本総説は第37回日本眼光学学会の眼鏡に関するシンポジウムで講演した。

#### 文 献

- 1) 鈴木説子, 梶田雅義, 加藤桂一郎: 調節微動の高周波成分による調節機能の評価. 視覚の科学 22: 93-97, 2001.
- 2) 所 敬: 調節. 屈折異常とその矯正, 改訂第2版, 金原出版, 東京, 1992.
- 3) 所 敬: 調節について. 日本の眼科 71: 273-276, 2000.
- 4) Duke-Elder S: Accommodation. System of Ophthalmology, Vol V, Ophthalmic Optics and Refraction, 189-192, Henry Kimpton, London, 1970.
- 5) 加藤桂一郎: 屈折異常と調節機能. 屈折異常, 99-111, 金原出版, 東京, 1993.
- 6) 塚本光雄: 他覚的調節検査. 眼科検査法ハンドブック, 第3版, 62-65, 医学書院, 東京, 1999.
- 7) 梶田雅義, 伊藤由美子, 佐藤浩之, 小林健太郎, 渡辺まき子, 加藤桂一郎: 調節微動による調節安静位の検出. 日眼会誌 101: 413-416, 1997.
- 8) 梶田雅義: 調節応答と微動. 眼科 40:169-177, 1998.
- 9) Campbell FW, Rebsor JG & Westheimer G: Fluctuations of accommodation under steady viewing conditions. J Physiol 145: 579-585, 1959.
- 10) Alpern M: Variability of accommodation during steady fixation levels of illuminance. J Opt Soc Am 48: 193, 1958.
- 11) Campbell FW, Westheimer G & Robson JG: Significance of fluctuations of accommodation. J Opt Soc Am 48: 669, 1958.
- 12) Stark L: Stability oscillations and noise in the human pupil servomechanism. Proc IRE 47: 1925, 1959.
- 13) Campbell FW & Westheimer G: Factors influencing accommodation responses of the human eye. J Opt Soc Am 49: 568, 1959.
- 14) 鈴木昭弘: 微動調節の研究. 日眼会誌 79: 1257-1271, 1975.
- 15) 鈴木昭弘: 屈折異常における微動調節について. 眼紀 27: 598-602, 1976.
- 16) 前川 浩, 中川 喬: VDT 作業者の調節微動. 眼科 33: 31-39, 1991.
- 17) 鈴木昭弘, 小林明美: 微動調節の臨床診断法の研究. 眼紀 31: 367-373, 1980.
- 18) Suzumura A: Accommodation in myopia. The Journal of The Aichi Medical University Association 7: 6-15, 1979.
- 19) 梶田雅義: 調節疲労と調節微動. 視覚の科学 17: 66-71, 1996.
- 20) Kajita M, Ono M, Suzuki S & Kato K: Accommodative microfluctuation in asthenopia caused by accommodative spasm. Fukushima Journal of Medical Science 47: 13-20, 2001.

原 著

## 都市景観照明の評価に対する定量化に関する研究

長山 信一, 中嶋 芳雄\*, 高松 衛\*

国立高岡短期大学産業デザイン学科, \*富山大学工学部知能情報工学科

## Psychophysical Evaluation of the Lighting Design for Urban Landscape

Shin-ichi Nagayama, Yoshio Nakashima\* and Mamoru Takamatsu\*

Department of Industrial Design, Takaoka National College,

\*Faculty of Engineering, Toyama University

今日の社会生活の24時間化に伴い、夜間における都市景観照明の重要性は益々高まりつつある。本研究では、夜間都市景観照明の効果に対する評価について、視覚工学および計量心理学的な手法を用いて、定量化を試みた。景観サンプルとして、6種類の代表的な建築物を選定した。そして、被験者に提示するための景観サンプルの「昼景」および「夜景」を写真撮影した。その写真を用いて、各景観サンプルの「夜景」と「昼景」に関する印象を Semantic Differential technique (SD 法) を用いて評価し、更にその評価差を因子分析を用いて解析した。被験者は39名である。その結果、「夜景」は「昼景」に比較して全体的に評価が高いことが明らかとなった。更に、適切な景観照明は夜間の都市景観の「イメージアップ」や、街の「活性化」に対して効果的であることが、定量的に明らかとなった。

(視覚の科学 23: 32-37, 2002)

キーワード：都市景観照明, Semantic Differential (SD) 法, イメージ評価, 計量心理学的手法, 夜景

The importance of the lighting effect of urban nightscapes is increasing with the urban lifestyle to a 24-hour-life. In this study, we tried to quantitatively evaluate the lighting effect of urban nightscapes using visual engineering and psychophysical measurement methods. Six kinds of typical architectures in Toyama city were selected as samples for urban landscape lighting. We took photographs of their day and nightscape and presented to subjects. Using these photographs, we applied SD (Semantic Differential) technique to the evaluation for the image of dayscape and lighted nightscape images. Also, we analyzed the difference between both images, using the factor analysis. We examined 39 subjects. Consequently, we proved that generally the evaluation of the nightscape image was better than that of the dayscape image. Also, we found that an appropriate lighting design was effective for improving the image of urban nightscape and activating effective urban life. (Jpn J Vis Sci 23: 32-37, 2002)

Key Words: Urban landscape lighting, Semantic Differential technique, Image-estimation, Psychophysical measurement method, Nightscape

別刷請求先：933-8588 高岡市二上町 180 高岡短期大学産業デザイン学科 長山信一  
(2002年3月26日受理)

Reprint requests to: Shin-ichi Nagayama Dept of Industrial Design, Takaoka National College  
180 Futagami-machi, Takaoka 933-8588, Japan.  
(Received and accepted March 26, 2002)

## I. 緒 言

現代社会においては、生活の質の向上を指向する市民ニーズの高まりにより、精神的な満足感を充足し、個性を尊重し認めあう、文化の香り高い街づくりが求められている。また同時に、IT産業の進歩とグローバル化による社会生活の24時間化へ拍車がかかり、若者達のライフスタイルの変化に伴い、夜間都市景観における美しく豊かな景観の創造は重要度を増し、景観照明の果たすべき役割も、“夜間都市景観の演出”から“快適な光環境の創造”といった、広範なものとなりつつある。

一方、夜間都市景観の創造に際しては、単に照明を増設することにより明るくするだけではなく、むしろ過剰な照明を除去し、抑制することも大切である。すなわち、照明の抑制は逆に対象の建造物を際立たせ、夜間の都市景観に陰翳の多様性を付加することにもつながる。その結果、自然環境と調和を図りつつ、“省エネルギー”、“快適な”、“個性豊か”で“文化的な”夜間都市景観の演出を可能にする。

ところで、これまで景観照明に関連した研究としては、中村<sup>1)</sup>、奥谷ら<sup>2)</sup>、大井ら<sup>3)</sup>による論文が存在する。中村<sup>1)</sup>は昼景と点灯夜景を比較し、ライトアップに対する印象や輝度分布との結びつきを明らかにし、印象評価の構造を分析した。一方奥谷ら<sup>2)</sup>は、景観照明の印象評価をコンピュータ画像処理による、フラクタル次元の分析を行った。景観画像の形態特性を数量化する手法で、印象評価とフラクタル次元についての関連を述べている。また大井ら<sup>3)</sup>は、経時的に変化する要素をまとめて「変動要素」と呼び、景観の時間的な変化の要因を体系的に整理し、1日の変化を扱って、景観分析・評価実験を行った。

このように、都市景観および景観照明にかかわる印象評価には様々なアプローチがあるが、夜間都市景観における照明効果のイメージ評価について定量的に解析した研究事例はいまだに少ない<sup>4)</sup>。

そこで、本研究では最適な景観照明を施行するための基礎的データを提供するという観点より、景観照明の効果に対する評価について、定量化を試みた。

## II. 実験方法

本実験では、雪国として認知されている北陸地方の中核をになう、富山県の典型的な6種類の建造物を含む景観を選定し、Semantic Differential technique (以下 SD 法)<sup>5-10)</sup> のための観測サンプルとした。

その内訳は、商業専用施設の代表例として百貨店（マリエ）①およびショッピングモール（以下 Sモール）④、官公庁施設の代表例として富山市庁舎②、娯楽施設の代表例としてパチンコ店③、文化施設の代表例として富山城⑤および、海王丸⑥の6種類である。

次に、これらの建造物の「昼景」および、照明された「夜景」を同一アングルから数カット撮影し、印象の最も近似した写真を選定し、景観サンプルとした（図1）。同時に、18形容詞対を選定し、調査目的に最も適合する7段階評価尺度を設けたSD法のデータシートを作成した（図2）。なお、形容詞対の選定に際しては、既往研究<sup>1,4,7,10)</sup>などを参考としている。

さて、被験者の属性は男性18名、女性21名、合計39名。年齢は10歳代8名、20歳代22名、30歳代1名、40歳代6名、50歳代2名で、平均年齢26歳。学生25名、一般人14名で、眼科的な疾患者は含まれていない。

それらの被験者に、艶消しの各景観サンプル写真（88×128 mm）を、北窓昼光の下（太陽の南中時、北窓・45°上方からの天空光、照度は平均1,500 lxの環境下）で、視感比較（約1分間意識を集中して観測させた後、写真を見せながらSD法用データシートに印象評価を記入）させた。留意点として、写真はラ

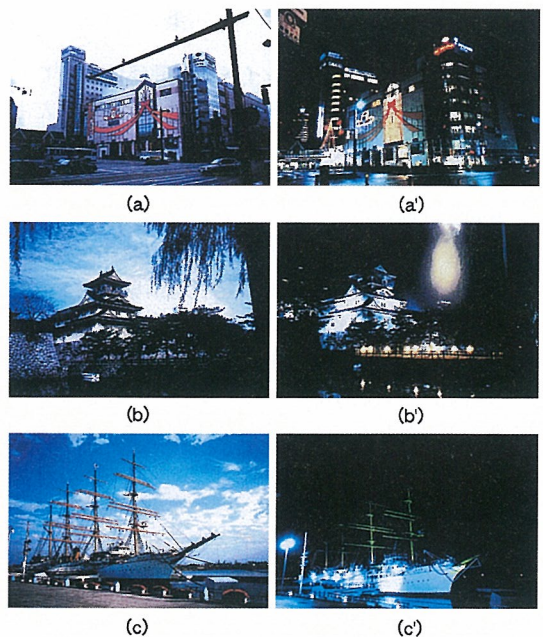


図1 景観サンプル写真事例

- ①百貨店：(a) 昼景，(a') 夜景
- ⑤富山城：(b) 昼景，(b') 夜景
- ⑥海王丸：(c) 昼景，(c') 夜景



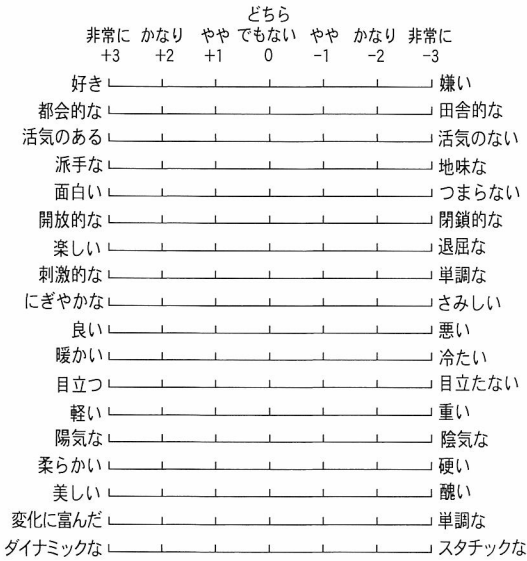


図2 SD 法用データシート

ンダムに提示し、項目を抜かさず、数値を示すポイント上にマークするよう、慎重に記入させた。

各項目の応答結果を集計した印象評価の結果について、「昼景」と「夜景」の比較、および因子分析を行い、分析結果について解析した。

### III. 結 果

#### 1. 景観サンプルに対するイメージ評価について

被験者全員の応答結果の平均値を極座標表示したものを図3に示す。極座標は円周方向に18形容詞対（ただし、ポジティブ側形容詞のみ表示）をプロットし、半径方向には原点を -3 point（以下 pt）とした相対評価尺度をとっている。ただし、この実験における景観サンプルの位置付けは、構造物（富山城・海王丸など）単体の評価とは異なり、都市景観の一部として捉え、共通の評価基準で判定した。

その結果、百貨店①は「夜景」のイメージ評価が極めて高く、「昼景」のそれを大きく上回っていた。派手な、楽しい、刺激的な、暖かい、活気のある、面白い、目立つ、にぎやかな、などの形容詞で大きなスコア差を示していた。同様に、図3に示した6サンプルのうち、海王丸⑥以外のサンプルは、近似した傾向を示していた。すなわち、適切に照明された「夜景」のイメージ評価は「昼景」のそれを全体的に大きく上回っていることが示された。

次に、「昼景」を基準にサンプル6例の「夜景」をわかりやすく比較するために、図3をリプロットしたも

のを図4に示す。極座標の円周方向および半径方向は、図3と同様に、それぞれ形容詞対と相対評価尺度をとっている。ただし、拡大表示するために、原点を -1.5 pt とした。なお、基準となる「昼景」は半径 1.5 pt のハーフトーンの円で示した。すなわち、円周を 0 pt として「昼景」と「夜景」の評定値の差をプロットしたものである。

この図では、派手な、刺激的な、活気のある、都会的な、にぎやかな、面白い、などの形容詞対において、「夜景」と「昼景」との間に評定値の大きな差がみられた。すなわち、景観照明が街や地域の“活性化”や“イメージアップ”に、大きな効果をもたらしていることが明らかとなった。

また、富山城⑤は百貨店①と比べると、閉曲線の膨らみ方が変則的であるが、これは城郭という建物のもつ特性が評価された結果である。また、同サンプルにおける照明効果としては、活気のある、目立つ、にぎやかな、都会的な、変化に富んだ、開放的な、などの形容詞の評価が高かった。

ところで、海王丸⑥は「夜景」と「昼景」のスコアが逆転した事例である。図1の(c), (c')は海王丸の「昼景」と「夜景」の写真であるが、この写真からもわかるように、「昼景」の海王丸は大変魅力的で、昼景サンプル中では最高のスコアであった。ただし、「夜景」はスポットライトで照らされているが、アンバランスで陰鬱な印象を与える不適切なライトアップではないかと思われる。したがって、イメージ評価値が大幅に低下したため、両者のスコアが逆転したものである。

#### 2. 照明効果の因子分析による評価について

6種類の景観サンプルにおける照明効果のイメージ評価の相関性を把握するために、「夜景」および「昼景」の各条件ごとの評定値の差に基づき、因子分析を行った。その結果、固有値表(表1)では主要因子が6であることが判明した。ただし、第1因子から第3因子までの因子寄与率はそれぞれ87.8%, 7.5%, 2.1%で、累積寄与率は97.4%に達した。ちなみに、第4因子の因子寄与率は1.4%である。したがって、因子数3で十分全体を説明し得ると考えた。

次いで、因子分析を行った。因子数3で因子分析し、Kaiserの正規分布を伴う、varimax回転した後の結果を表2に示す。

SD法では形容詞対を尺度とみなしている。したがって、各尺度に対する評価値を因子分析した結果は次のようになる。第1因子は、変化に富んだ、軽い、ダイナミックな、都会的な、活気のある、目立つ、派

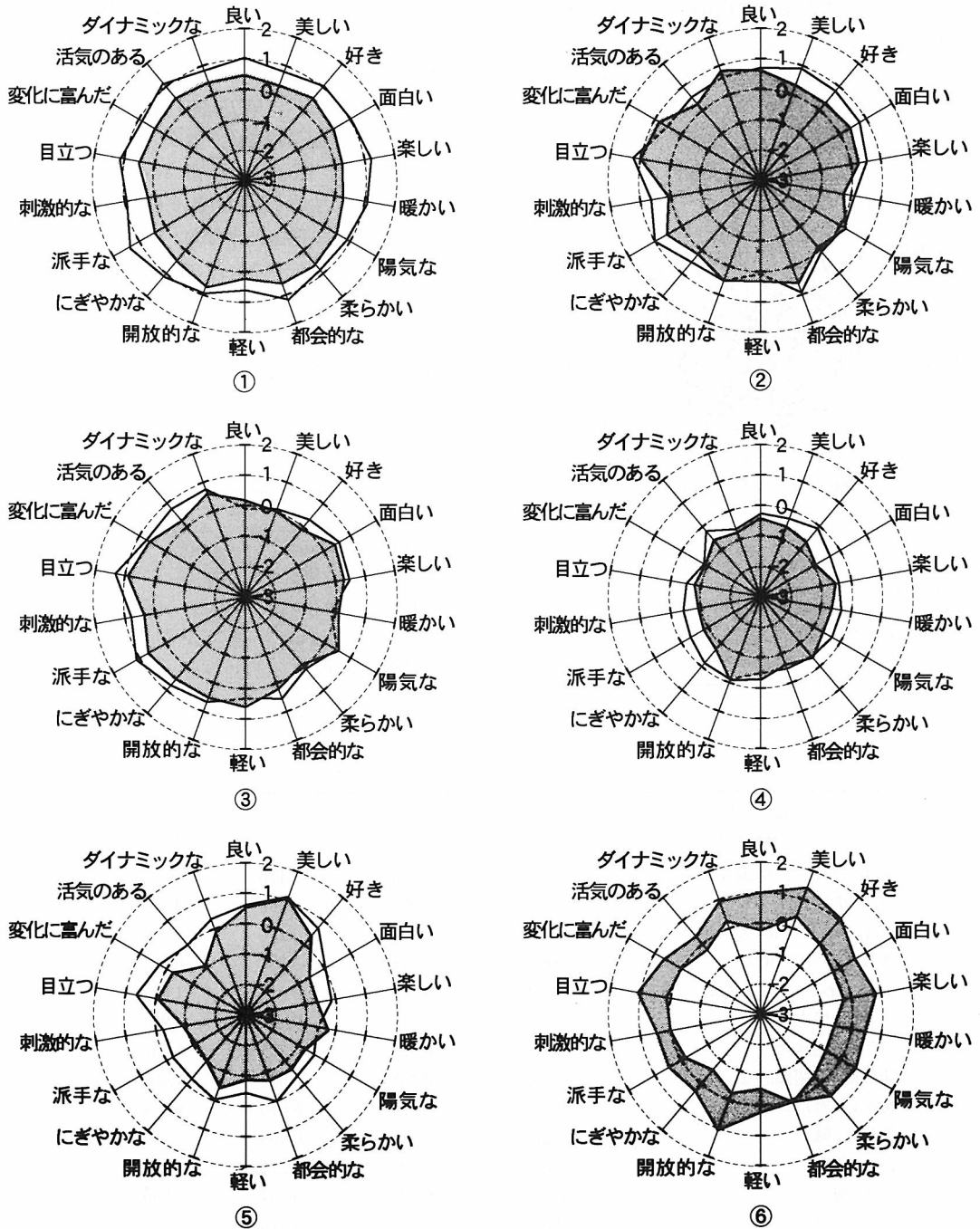


図3 極座標表示による昼景と夜景の比較  
 ①百貨店, ②富山市庁舎, ③パチンコ店, ④ショッピングモール (Sモール), ⑤富山城, ⑥海王丸  
 □: 夜景スコア, ■: 昼景スコア

手な, 開放的なに代表される。ここではこの因子を『活動性』と命名した。第2因子は, 暖かい, 美しい, 良い, 好き, 楽しい, 面白い, 陽気な, 刺激的な, に

ぎやかなに代表されている。この因子を『評価性』と呼んだ。第3因子は, 柔らかい, 好き, 開放的な, 活気のあるに代表される。ここでは『潜在性』と名付けた。

次いで、因子得点を示す。Kaiser の正規分布を伴う varimax 回転後の結果である。因子得点をアイソメトリック図法による3次元の意味空間にプロットし

たものを図5に示す。この図は、各景観サンプルにおける照明効果の相関性を示しているものと考えられ、X 軸は第1因子『活動性』を、Y 軸には第3因子『潜在性』を、Z 軸には、第2因子『評価性』をとった。

図より、第1因子軸では、富山城⑤の因子得点が高く、百貨店①がつづく。一方、富山市庁舎②や海王丸⑥は低い値を示している。第2因子軸『評価性』については、百貨店①、富山市庁舎②、Sモール④、の順で、得点の高さを示している。逆に、低い値を示すものとして、海王丸⑥や富山城⑤が挙げられる。第3因子軸『潜在性』に関してはパチンコ店が最も因子得点が高く、次いで富山市庁舎②がつづく。一方、海王丸⑥や百貨店①は低い値を示している。

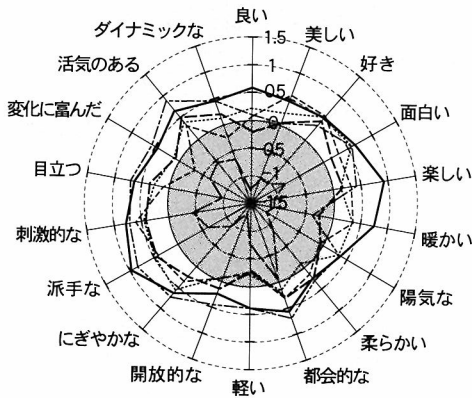


図4 昼景スコアを基準とした夜景景観サンプルスコア  
昼景を0ポイントのハーフトーンの円で示し、昼景と夜景スコアの差をプロットしたもの。  
———：①百貨店、-----：②富山市庁舎、  
-----：③パチンコ店、-----：④Sモール、  
-----：⑤富山城、-----：⑥海王丸

表1 固有値表(回転前)

固有値表	固有値	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
第1因子	15.806	87.81	87.81
第2因子	1.353	7.52	95.33
第3因子	0.378	2.10	97.43
第4因子	0.245	1.36	98.79
第5因子	0.061	0.34	99.13
第6因子	0.002	0.01	99.14

表2 因子分析結果 (Varimax 回転後)

評価尺度 (形容詞対)	因子 負 荷 量			共通性 h <sup>2</sup>
	第1因子	第2因子	第3因子	
変化に富んだ-単調な	0.926	0.274	0.176	0.963
軽い-重い	0.902	0.373	0.106	0.964
ダイナミックな-スタティックな	0.867	0.344	0.274	0.945
都会的な-田舎的な	0.865	0.248	0.286	0.891
活気のある-活気のない	0.789	0.383	0.482	1.002
目立つ-目立たない	0.764	0.471	0.438	0.997
派手な-地味な	0.747	0.576	0.332	1.000
開放的な-閉鎖的な	0.697	0.451	0.560	1.003
暖かい-冷たい	0.206	0.975	0.070	0.998
美しい-醜い	0.278	0.861	0.408	0.984
良い-悪い	0.554	0.806	0.211	1.001
好き-嫌い	0.385	0.728	0.564	0.996
楽しい-退屈な	0.634	0.693	0.275	0.958
面白い-つまらない	0.619	0.679	0.343	0.962
陽気な-陰気な	0.637	0.648	0.350	0.948
刺激的な-平静な	0.631	0.643	0.418	0.986
賑やかな-さみしい	0.630	0.619	0.433	0.968
柔らかい-硬い	0.607	0.519	0.575	0.969
寄与度	8.351	6.597	2.589	17.537
% of C	47.620	37.618	14.762	100.000

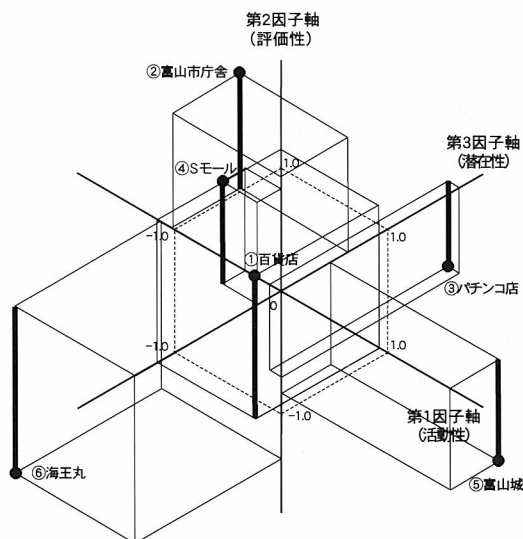


図5 因子得点の三次元表示  
アイソトニック空間座標における各景観サンプルの位置。

なお、図における各サンプルの位置を識別しやすくするため、黒丸点であらわした各サンプルの座標点から、XY 平面に垂線を垂らし太い実線で表示し、同時に、細線で立体表示を行った。

#### IV. 考 按

夜間都市景観のイメージアップに関しては、景観照明が重要な役割を担っているといわれている<sup>4)</sup>。本研究では、典型的な6種類の建造物を含む景観サンプルを、SD法<sup>5-10)</sup>を用いて、「昼景」と照明された「夜景」を比較し、定量的な分析を行った。

本研究の結果を、中村<sup>1)</sup>の印象評価の構造、すなわち、「昼景と点灯夜景の比較をする場合は、『目立ち』・『落ち着き』・『柔らかさ』の3軸で考えれば良い<sup>1)</sup>と照合すると、一部の形容詞対の選択に差異は認められるが、概念の括りは一致している。

また、奥谷<sup>2)</sup>の印象評価とフラクタル次元の関連からの因子分析の結果は、因子数を3とし、第1因子は『柔らかさ』、第2因子は『目立ちやすさ』、第3因子は『美しさ』であるとした。線画のフラクタル次元1.6~1.8では、印象評価の第2因子の示す目立ち感と、第1因子の柔らかさを示す形容詞対との関連が認められた。ただし、第3因子の美しさとの対応はつかなかった。この結果は、本研究と形容詞対の選択が異なるため同じではないが、近似した結論といえる。

更に大井<sup>3)</sup>は、「変動要素」に関する、経時的な景観分析・評価実験を行ったが、因子分析の結果、第1因子は『評価性』、第2因子は『活動性』、第3因子は『日常性』、第4因子は『明瞭性』であるとした。因子の順序や特性について、本研究の結果と近似している。3因子、『評価性』・『活動性』・『明瞭性』の評価は、昼景に比較して夜景で高くなる傾向が明らかであり、この結果も本論文の結論と一致している。

すなわち、1. 適切に照明された「夜景」のイメージ評価は、一般に「昼景」を全体的に上回っていることが示された。2. 景観照明のイメージ評価の構造は『活動性』・『評価性』・『潜在性』の3因子で構成されることが明らかとなった。3. 照明効果は、街や地域の“活性化”や“イメージアップ”に大きな影響をもたらしていることが明らかとなった。

ただし、この結論は学生・中年および壮年までの年齢層を測定対象としており、若年者から高齢者までに該当するかどうかは不明である。したがって、その点については今後の研究課題として捉え、調査を進めたい。

なお、本論文の一部は、第37回日本眼光学学会・第16回眼科ME学会、合同学会総会において口頭発表したものである。

#### 文 献

- 1) 中村芳樹：都市景観照明の印象評価，照明学会誌 74: 23-28, 1990.
- 2) 奥谷 明，多田裕一，山口就平，梶見和孝：景観照明の印象評価とフラクタル次元について，神戸大学発達科学部研究紀要 7.1: 11-23, 123-135, 1999.
- 3) 大井尚行，平手小太郎，安岡正人：時刻変化に伴う心理量の変化—都市景観評価における変動要素の影響に関する研究 その1. 日本建築学会計画系論文報告集 435: 45-51, 1993.
- 4) 中嶋芳雄，高松 衛，長山信一：景観照明の評価に対する定量化に関する研究，照明学会誌 85: 167-170, 2001.
- 5) Osgood CE: Semantic differential technique in the comparative study of cultures. American Anthropologist 66: 171-200, 1964.
- 6) Osgood CE: Studies on the generality of affective meaning systems. American Psychol 17: 10-28, 1964.
- 7) 石井一郎，元田良孝：景観工学. 48-65, 鹿島出版会，東京，1990.
- 8) 富田忠道，栗田正一，川本元郎：Semantic Differential法による照明効果測定，色彩学会 16: 11-23, 1969.
- 9) 杉浦芳夫，加藤近之：SD法による都市公園イメージ分析，総合都市研究 46: 53-79, 1992.
- 10) 岩下豊彦：SD法によるイメージの測定—その理解と実施の手引き. 1-63, 川島書店，東京，1996.

原 著

## バイフォーカルコンタクトレンズ装用時の波面収差測定と 近視の網膜像シミュレーション

広原陽子\*+, 三橋俊文\*, 洲崎朝樹\*\*+, 黒田輝仁+, 前田直之+, 不二門 尚+  
\*株式会社トプコン研究所光応用研究室, \*\*株式会社メニコン臨床研究所, +大阪大学大学院感覚機能形成学教室

## Wavefront Aberrations and Retinal Image Simulation in Near Vision with Bifocal Contact Lenses

Yoko Hirohara\*+, Toshifumi Mihashi\*, Asaki Suzaki\*\*+, Teruhito Kuroda+,  
Naoyuki Maeda+ and Takashi Fujikado+

\*Topcon Corp. Optical Engineering Laboratory Technical Research Institute

\*\*Menicon Co., Ltd. Clinical Laboratory +Osaka University Medical School

バイフォーカルソフトコンタクトレンズ (BFSCCL) 装用時における遠視, 近視の他覚的評価に, 波面センサーによる結像状態の解析を応用した。同時視型 BFSCCL, モノフォーカルソフトコンタクトレンズ (MFSCCL) 装用前後の波面収差を Hartmann-Shack 波面センサーによって測定し, 更に波面収差から点像強度分布 (PSF), 周波数伝達特性 (MTF) を算出し, ランドルト環の網膜像をシミュレーションした。その結果, BFSCCL 装用によりコマ様収差が有意に増加していた。また, BFSCCL 装用時の MTF は, y 方向で遠方視では裸眼, MFSCCL 装用時と比較して減少, 近方視では増加していた。BFSCCL 装用時の網膜像シミュレーションは遠視では y 方向へのぼけがみられたが, 近視では視標のぼけが少なく, ランドルト環の方向が判別しやすくなった。波面センサーにより BFSCCL 装用時の波面収差を測定することができ, 網膜像の他覚的評価の可能性を示すことができた。

(視覚の科学 23: 38-44, 2002)

キーワード: バイフォーカルコンタクトレンズ, 波面収差, 網膜像シミュレーション, 近視視, 周波数伝達特性 (MTF)

The analysis of image-formation with the wavefront sensor was applied to the objective evaluation of far and near vision with bifocal soft contact lenses (BFSCCLs). Wavefront aberrations of normal eyes without contact lenses, with simultaneous vision BFSCCL and with mono-focal soft contact lenses (MFSCCLs) were measured by the Hartmann-Shack wavefront sensor. Point spread function (PSF) and modulation transfer function (MTF) were calculated from the wavefront aberrations, and the retinal image of the Landolt's ring was simulated. The coma-like aberrations were increased with BFSCCL. MTF with BFSCCL in y direction was decreased in far vision and was increased in near vision, more than that of the others. As for the simulation of retinal image with BFSCCL, the Landolt's ring was blurred in y direction in far vision. However, in near vision, the Landolt's ring was slightly sharper and easier to discriminate direction of the ring compared with the others. This suggests the wavefront sensor can be used to measure wavefront aberrations with BFSCCL, and the possibility of objectively evaluation retinal image.

(Jpn J Vis Sci 23: 38-44, 2002)

Key Words: Bifocal contact lenses, Wavefront aberrations, Retinal image simulation, Near vision,  
Modulation transfer function (MTF)

別刷請求先: 174-8580 東京都板橋区蓮沼町 75-1 (株)トプコン研究所光応用研究室 三橋俊文  
(2002年6月4日受理)

Reprint requests to: Toshifumi Mihashi Topcon Corp. Optical Engineering Laboratory Technical Research Institute  
75-1 Hasunuma-cho, Itabashi-ku, Tokyo 175-8580, Japan  
(Received and accepted June 4, 2002)

## I. はじめに

累進屈折力レンズなどの遠近両用眼鏡は一般的に使用されており、調節力の減少した高齢者を中心に広く利用されている。コンタクトレンズ（以下 CL）においても遠近両用 CL (bifocal contact lens 以下 BFCL) の研究開発が活発で、すでに製品化されている。BFCL の評価は、装着して遠見と近見の視機能を自覚的に測定する、設計値からのシミュレーションを行う、などの方法がとられている<sup>1-4)</sup>。他覚的にはビデオケラトスコープを使用し、BFCL 装着時の BFCL 前面形状を解析する方法がすでに行われている<sup>5)</sup>。しかし、実際に装着した状態での他覚的な屈折評価はなされていなかった。

我々は、眼の収差測定用 Hartmann-Shack 波面センサーを開発し、眼の収差測定が可能であることを確認した<sup>6)</sup>。また、この Hartmann-Shack 波面センサーでハードおよびソフト CL (以下 SCL) 両方における装着時の測定も可能であることを確認している (黒田輝仁ら：第44回日本コンタクトレンズ学会総会抄録集, 39, 2001.)。

今回使用した同時視型のバイフォーカル SCL (bifocal soft contact lens 以下 BFSCCL, メニフォーカルソフト S<sup>®</sup>, メニコン)<sup>7)</sup> は、瞳孔領に遠用部と近用部が同時に存在するため、装着時における波面収差の高次成分 (高次波面収差) が増加すると考えられる。そこで、同時視型 BFSCCL 装着時の波面収差を Hartmann-Shack 波面センサーで測定し、測定された高次波面収差を使って遠見と近見の周波数伝達特性 (modulation transfer function 以下 MTF) やランドルト環の網膜像をシミュレーションすることを試みた。

## II. 方法

### 1. 使用した BFSCCL

使用した同時視型 BFSCCL は、遠用、近用光学部を通った光が同時に網膜に到達する同時視型である (図1)。外側に遠用光学部、内側に近用光学部を配し、これらを滑らかにつなぐ移行部分とからなっている。近用光学部を内側にすることで近用部重視型としてある。また一般的に、瞳孔は角膜中心からわずかに鼻側へ偏心し、SCL は耳側へ偏心して安定する傾向にあることから、近用光学部は鼻側へ若干偏心した配置となっている。

今回の処方では、遠用度数は BFSCCL, モノフォーカル SCL (monofocal soft contact lens 以下

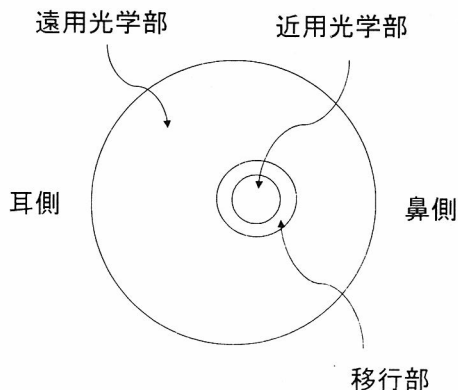


図1 右眼装着時 バイフォーカルソフトコンタクトレンズ (BFSCCL)

MFSCCL) とも被検眼の完全矯正値を用い、BFSCCL の加入度数は +2D である。

### 2. 波面収差測定

同時視型 BFSCCL を男性正常例1 (42歳)、正常例2 (43歳) の2名2眼に装着して波面収差を測定した。比較のために裸眼状態と MFSCCL 装着時の波面収差も測定した。波面収差の測定には Hartmann-Shack 波面センサー (Wavefront analyzer KR9000PW, トプコン) を使用した。波面センサーの測定波長は 840 nm, 測定後の評価は、瞳孔領の中央、径 4 mm の円領域を利用し、その中心位置をゼルニケ多項式による解析の原点とした。露光時間は 300 msec である。波面センサー内部の自動雲霧機構を利用して、調節麻痺薬を使用せずに、調節の介入しない状態、あるいは、それに近い状態での測定を行った。波面収差測定は各3回ずつ行い、Zernike 多項式における動径関数の次数が3次、4次、3次と4次の合計に対する波面収差の平均二乗誤差 (以下 RMS) をそれぞれ求めた。ここで、3次は波面収差の非対称成分であり、コマ様収差と、4次は対称成分であり、球面様収差とそれぞれ呼ぶこととする<sup>8)</sup>。

シミュレーションでは、被検眼が完全に調節をなくした状態を想定した。また、Schwiegerling の模型眼<sup>9)</sup> を使用し、遠見と +2D 近見での球面収差の計算を行い、高次波面収差の変化が 0.02  $\mu\text{m}$  以下と無視できる量であることを確認し、遠見と近見での高次波面収差は変化しないと仮定した。

### 3. 遠見での評価

遠点での光学系の性能は、測定された高次波面収差のみを使って MTF とランドルト環の網膜像のシミュレーションを行った。高次波面収差から瞳関数を

求め、2次元高速フーリエ変換（以下 FFT）により点像振幅分布を計算し、その複素共役をとって点像強度分布（point spread function 以下 PSF）を求めた。そして、光学的空間周波数伝達関数（optical transfer function 以下 OTF）を PSF の2次元 FFT によって求め、その絶対値である MTF を算出した。算出した MTF の総和として、x 方向、y 方向それぞれの断面積を算出した。また、2次元 FFT によりランドルト環視標の空間周波数成分を求め、これに先に求めた OTF をかけることにより網膜像の空間周波数分布を求めた。そして、この網膜像の空間周波数成分を逆フーリエ変換（IFFT）してランドルト環の網膜像を得た。

#### 4. 近見での評価

本研究では、調節機能を完全に失った眼を仮定し、ディフォーカス成分（Zernike 多項式次数2次の回転

対称成分の大きさ）を変化させることで近見の評価とした。今回の処方では、BFSCCL の加入度数を +2D としたが、近方視評価時はディフォーカス成分を +2D 付加したときの評価を行った場合、ディフォーカス成分にあたる波面収差の影響が大きすぎ、各状態での比較が困難となるため、本報告ではディフォーカス成分を +1D 付加したときの評価をした。このとき高次収差成分は変化しないと仮定すると、先に測定した高次収差にディフォーカス成分を加えた波面から瞳関数を得ることができる。瞳関数から MTF、ランドルト環の網膜像のシミュレーションに関する計算方法は遠見で説明した方法と同様である。

### III. 結 果

#### 1. 波面収差

波面センサーで測定された高次波面収差のマップを

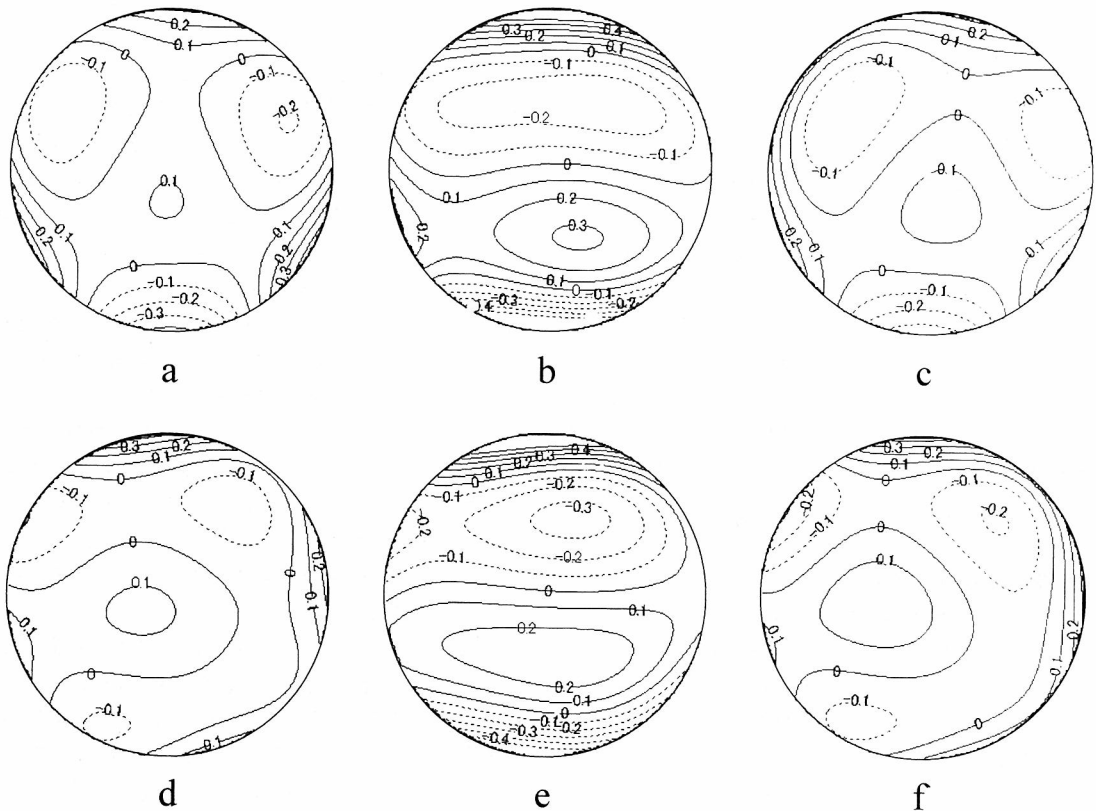


図2 高次波面収差マップ（単位は  $\mu\text{m}$ ）

α：正常例1右眼の裸眼時，b：正常例1右眼のBFSCCL装用時，c：正常例1右眼のモノフォーカルソフトコンタクトレンズ（MFSCCL）装用時，d：正常例2右眼の裸眼時，e：正常例2右眼のBFSCCL装用時，f：正常例2右眼のMFSCCL装用時。実線部は波面収差が正、波面の相対的な進みの部分をあらわし、破線部は波面収差が負、波面の相対的な遅れの部分をあらわす。

図2に示す。この波面収差マップは波面収差量に関する等高線図になっており、実線は波面収差が正、すなわち波面の相対的な進みをあらわし、破線は波面収差

が負、すなわち波面の相対的な遅れをあらわす。被検眼正常例1右眼では、裸眼での波面収差マップの上部両端と下部中央に波面の遅れがみられた。また、同様

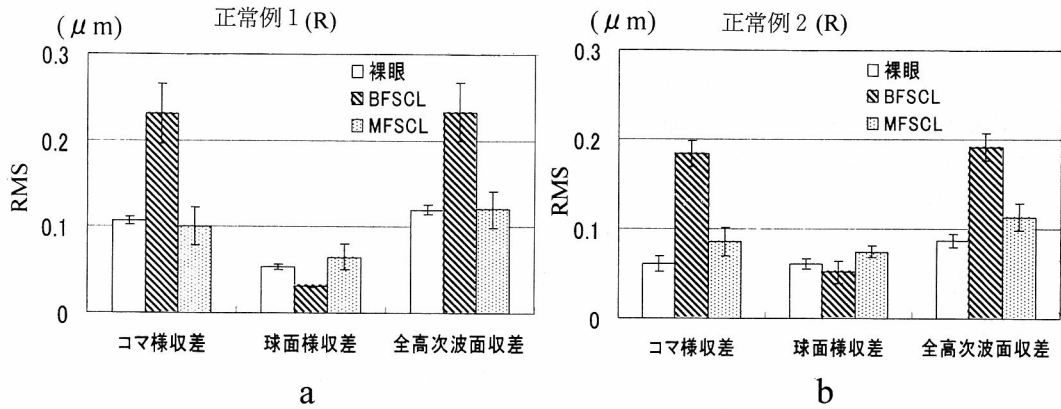


図3 高次波面収差量 (単位は  $\mu\text{m}$ )  
 a: 正常例1右眼, b: 正常例2右眼

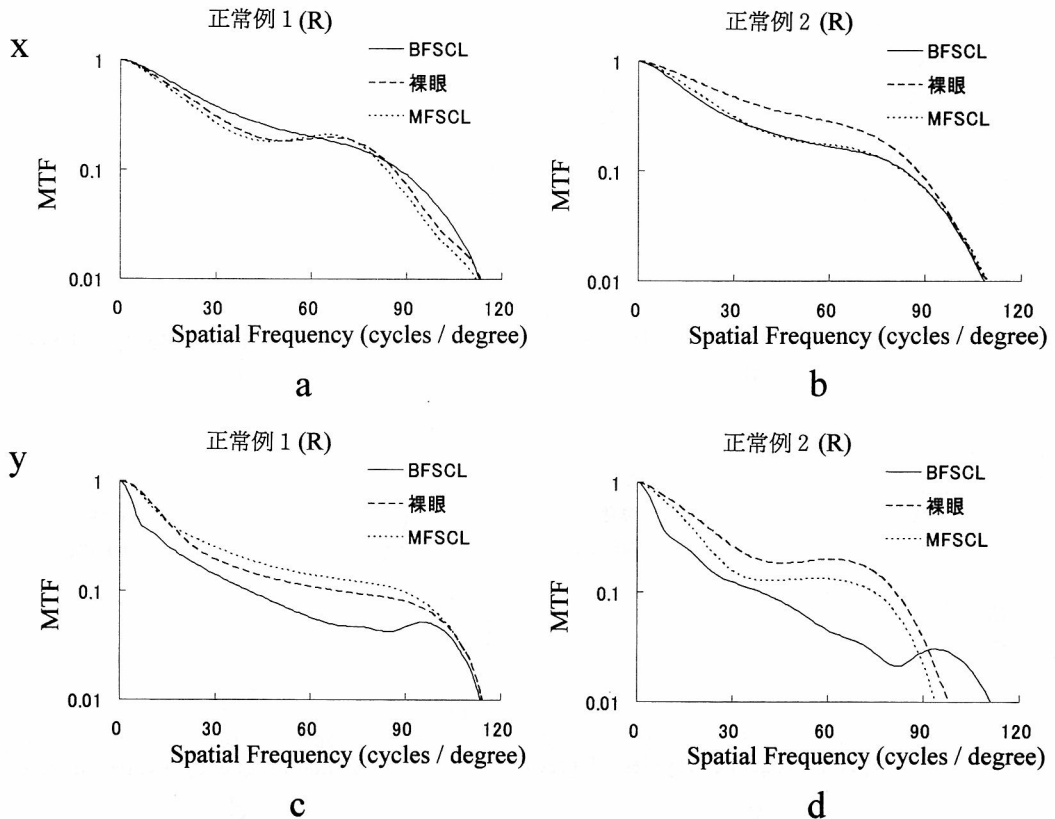


図4 遠見視 (0D) での modulation transfer function (MTF)  
 a: 正常例1右眼の x 方向, b: 正常例2右眼の x 方向, c: 正常例1右眼の y 方向, d: 正常例2右眼の y 方向



な波面の遅れが MFSCl 装用時でもみられた。一方、BFSCl 装用時では上部が遅れ、下部が進むパターンがみられ、上部が近視傾向、下部が遠視傾向となっていた。被検眼正常例2右眼もすべての場合で、同様な傾向のパターンとなっていた。

図3に、裸眼時、BFSCl、MFSCl 装用時の高次波面収差量のグラフを示す。BFSCl 装用時の高次波面収差が最も増加していた。また、コマ様収差と球面様収差の比率は、BFSCl 装用時に顕著に大きく、正常例1右眼で BFSCl 装用時でのコマ様収差、球面様収差の RMS (root mean square) はそれぞれ  $0.23 \mu\text{m}$ 、 $0.03 \mu\text{m}$ 、正常例2右眼ではそれぞれ  $0.18 \mu\text{m}$ 、 $0.05 \mu\text{m}$  であった。

2. MTF

遠方視での MTF のグラフを図4に、近方視での MTF のグラフを図5に示す。BFSCl 装用時の MTF の断面積を1とすると、遠見時 x 方向で正常例1右眼では裸眼時 0.90、MFSCl 装用時 0.85、正

常例2右眼では裸眼時 1.34、MFSCl 装用時 1.03、y 方向で正常例1右眼では裸眼時 1.50、MFSCl 装用時 1.65、正常例2右眼では裸眼時 1.90、MFSCl 装用時 1.48 となり、BFSCl 装用により x 方向では裸眼時、MFSCl 装用時と同等であるが、y 方向では顕著に減少していた。また、近見時 x 方向で正常例1右眼では裸眼時 1.09、MFSCl 装用時 1.19、正常例2右眼では裸眼時 1.00、MFSCl 装用時 1.16、y 方向で正常例1右眼では裸眼時 0.47、MFSCl 装用時 0.55、正常例2右眼では裸眼時 0.65、MFSCl 装用時 0.68 となり、BFSCl 装用により x 方向では遠見時と同様に裸眼時、MFSCl 装用時と同等であったが、逆に、y 方向では MTF が顕著に増加していた。

3. ランドルト環の網膜像

測定された高次波面収差から解析した遠見 (0 D) と近見 +1 D の視標 0.5 に対するシミュレーション結果を図6に示す。遠見時では裸眼、MFSCl 装用時

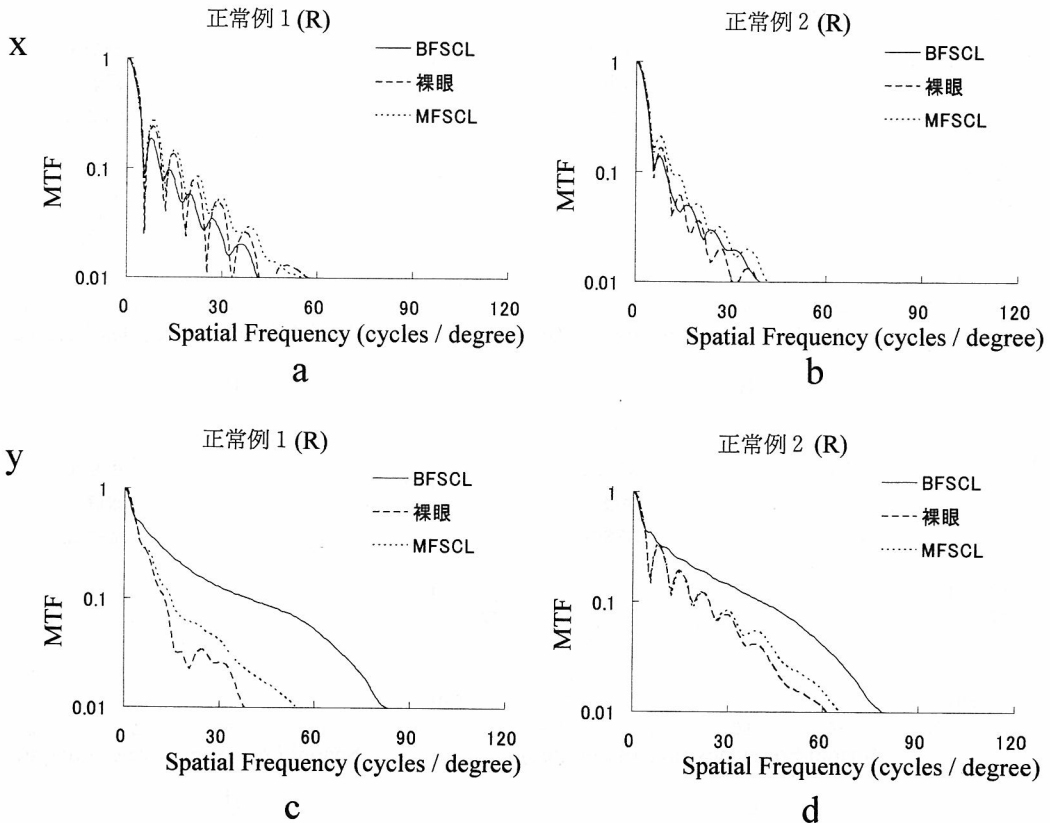


図5 近見視 (1D) での MTF

a: 正常例1右眼の x 方向, b: 正常例2右眼の x 方向, c: 正常例1右眼の y 方向, d: 正常例2右眼の y 方向

に比べ、BFSCCL 装着時はランドルト環の y 方向へのぼけがみられた。逆に、近見時には、裸眼、MFSCCL 装着時に比べ BFSCCL 装着時が視標のぼけが少なく、ランドルト環の方向が判別しやすくなった。

IV. 考 按

ランドルト環の網膜像は、遠方視では BFSCCL 装着時が最も悪いが、近方視では BFSCCL 装着時が最も改善されていた。遠方視での MTF は、x 方向ではすべての場合でほぼ等しいが、y 方向は BFSCCL 装着時に最も減少していたのに対し、近方視での MTF は、x 方向は遠方視と同様すべての状態でほぼ等しいが、y 方向は BFSCCL 装着時に最も増加していた。これは、近方視では加入度数が +2D 追加されたために改善されたが、コマ収差の増加により、光学的特性が遠見でやや不良になったと考えられ

る。  
このコマ収差は、図3から、正常例1右眼で裸眼時より 1.2 μm, MFSCCL 装着時より 1.3 μm, 正常例2右眼で裸眼時より 1.2 μm, MFSCCL 装着時より 1.0 μm と、大きく増加していた。BFSCCL の設計は図1に示されるように、光学部中心を眼の照準線に一致するように偏位させた<sup>7)</sup>ものとなっている。しかし、瞳孔領の中心位置に個人差があることや測定時のフィッティング状況により、近用光学部が被検眼瞳孔領の中心付近に行かず、光学部中心が眼の照準線とずれを生じてしまい、コマ収差を増大させていた。

本被検眼において、BFSCCL 装着時の高次波面収差の最大値、最小値の差が 0.5 μm 程度あった。この高次収差、屈折力分布の差を微分幾何の教えるところの平均曲率<sup>10)</sup>により算出し、ディオプターマップとして図7に表示する。図7から、瞳孔領内での屈折力差は、正常例1右眼は約 2.5 D, 正常例2右眼は約 2 D あった。加入度数 +2D と一致した結果が得られたといえる。

ところで、図2 a, d の裸眼時に対する高次波面収差マップでは、上部両端と下部中央に波面の遅れが被検眼2眼共通にみられた。これは、Zernike 係数  $C_3^{-3}$  が負の場合に対するパターンであり、BFSCCL を必要とする眼で特有の収差という可能性もある。矯正時での被検眼の波面収差を小さくするためには、このような被検眼が本来もっている波面収差を打ち消すことのできる眼鏡や CL の設計が考えられる。

本研究では被検眼に遠方視させた状態で高次波面収差の測定を行い、その結果を被検眼が調節機能のない、近見時の高次波面収差と同じであると仮定して評

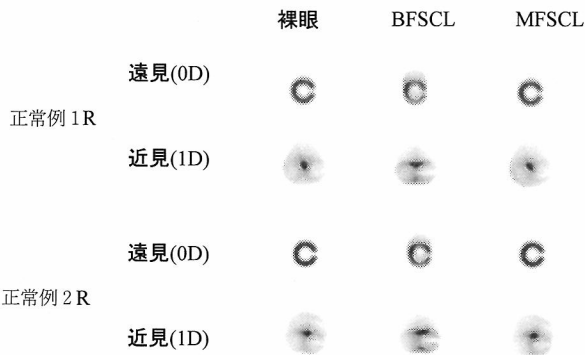


図6 ランドルト環の網膜像シミュレーション

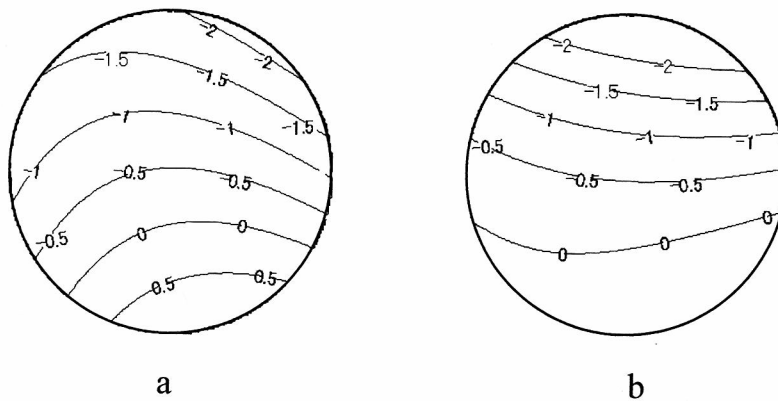


図7 BFSCCL 装着時での屈折力分布の差分マップ (単位は D)  
a: 正常例1右眼, b: 正常例2右眼

価した。しかし、より正確な近見時の評価を行うためには、近見視標を固視させた状態で測定し、評価を行う必要がある、今後の課題としたい。

波面センサーにより BFSCL 装用時の波面収差を測定することができ、網膜像の他覚的評価の可能性を示すことができた。今後この波面センサーを BFSCL 装用時に限らず様々な CL 装用時の他覚的評価に応用することが期待できる。

本稿の要旨は第37回日本眼科学学会・第16回眼科 ME 学会合同学会総会にて口演した。

#### 文 献

- 1) 畑田豊彦：バイフォーカルコンタクトレンズの光学特性. あたらしい眼科 18: 423-427, 2001.
- 2) 植田喜一：遠近両用ソフトコンタクトレンズの特性. あたらしい眼科 18: 435-446, 2001.
- 3) Bradley A, Rahman HA et al: Effects of target distance and pupil size on letter contrast sensitivity with simultaneous vision bifocal contact lenses. *Optom Vis Sci* 70: 476-481, 1993.
- 4) Chateau N & Baude D: Simulated in situ optical performance of bifocal contact lenses. *Optom Vis Sci* 74: 532-539, 1997.
- 5) Bullimore MA & Jacobs RJ: Subjective and objective assessment of soft bifocal contact lens performance. *Optom Vis Sci* 70: 469-475, 1993.
- 6) 広原陽子, 中澤直樹, 高橋義嗣, 三橋俊文, 黒田輝仁, 前田直之, 不二門 尚: 人眼の波面収差測定. *Vision* 13: 99-105, 2001.
- 7) 田中英成, 稲垣恭子他: メニフォーカルソフト S<sup>®</sup> の臨床経験. *日コレ誌* 43: 20-25, 2001.
- 8) Thibos LN, Applegate RA et al: Standards for reporting the optical aberrations of eyes. *Customized Corneal Ablation*, 348-361, SLACK, New Jersey, 2001.
- 9) Schwiegerling J, Greivenkamp JE et al: Optical modeling of radial keratotomy incision patterns. *Am J Ophthalmol* 122: 808-817, 1996.
- 10) 小林昭七: 曲線と曲面の微分幾何. 第10版, 40-60, 裳華堂, 東京, 1985.

## 波 面 収 差

(キヤノン(株)医療機器開発部) 松村 勲

## 波動光学的な結像評価

エキシマレーザー屈折矯正手術の増加とともに、より正確な手術が求められるようになり、眼屈折測定も従来の幾何光学理論下での単純な測定結果ではもはや満足できなくなってきた。これに似た事例は過去においても自覚値と他覚値の不整合といった形で提起されており、今日改めてクローズアップされることになってきた。ここには主に二つの要素およびそれらの合わされたものが含まれている。一つは眼屈折測定に際して利用される瞳径であり、もう一つは被験眼における非球面を含む非軸対象性である。

他覚的眼屈折測定の際、測定装置に取り込まれる光線は瞳孔を中心に  $\Phi$  2~2.5 mm 程度の小さなものであるため、自然散瞳状態で瞳孔径が大きい場合や虹彩が真円から外れている場合には自覚値と合わない値を示すことがある。一方、円錐角膜のように角膜に異常のある眼の場合は、不正乱視のため単純には一つの乱視軸のみで表示できないので測定不能に陥ってしまう。ここで登場してきたのが Wavefront analysis (波面解析) 理論で、1999年ごろから refractive laser surgery に相応して学会などで話題にのぼりはじめたのであるが、今では収差解析の技法も含め、たちまち業界を賑わす流行語となった。また、これによって従来は近視・遠視もしくは乱視として単純に扱っていた眼屈折処方にも、新たな方向が示されたといえる。

一点から発した光は均質な媒質中ではいわゆる球面波として、球面状に光波が広がってゆく。この波はその発信源から等距離の位置では位相、すなわち波の山や谷に相当する部分が同じである。このような球面波が不均質な媒質を通過したり、光学系で屈折したり、ミラーで反射されると波の形が崩れ、球面波ではなくなってくる。この球面波からのズレが波面収差で、一般的には各光線群ごとに球面波の収束点を中心とした球面(参照球面)からのズレとしてあらわされるが、波面収差を扱うには参照球面の曲率半径によらない角度表示(極座標表示)の方が便利な場合もある。波面収差を求める方法としては、先に述べたような各光線の

光路長を忠実に求める方法よりも光線収差から求める方法の方が一般的である。これは例えば眼の場合、網膜上の一点から出た光線が瞳上の分割した各点を通過後どのように進むか、言い換えれば、理想的には平面波として光軸に平行な光線群になるべきところ、どのように傾きを変え、どのような場所に至るかを見定めることによって行うものである。そして、瞳面をいかに細かく分割できるかによって測定精度が変わってくる。

具体的な方法としては、Hartmann-Shack 波面センサーを用いる方法が最もよく知られており、以下に概要を示す。

図1において、点光源からの光は投影レンズ、ビームスプリッター、対物レンズを経て被験眼網膜上に点像 P を結ぶ。次にこの網膜上の点像 P を発した1本の光線は被験眼瞳上の高さ  $Y_1$  を通過した後、光軸に対して角度  $\Phi_1$  の方向に向かい、対物レンズ、ビームスプリッターを経てリレーレンズに至り、被験眼瞳と共役位置に置かれた高さ  $Y_2$  の位置のレンズアレイに角度  $\Phi_2$  をもって入射する。レンズアレイに入射後はレンズアレイの焦点位置に置かれた固体撮像素子 (CCD: charge coupled device) 上でレンズアレイの光軸からの高さ  $\Delta Y$  として検出される。以下、この光線に着目し、光線収差を求める。

対物レンズ、リレーレンズ、レンズアレイの焦点距離をそれぞれ  $F_1, F_2, F_0$  とし、 $\tan\Phi \approx \Phi$  とすると、

$$Y_1 = \frac{F_1}{F_2} \cdot Y_2$$

$$\Phi_2 = \frac{\Delta Y}{F_0}$$

$$\Phi_1 = \frac{F_2}{F_1} \cdot \Phi_2 = \frac{F_2}{F_1} \cdot \frac{\Delta Y}{F_0}$$

である。光線収差による像点位置(眼底から出て瞳面での高さ  $Y_1$  を通過する光線の結像位置)は、

$$\begin{aligned} L &= \frac{Y_1}{\Phi_1} = \frac{F_1}{F_2} \cdot Y_2 \cdot \frac{F_1}{F_2} \cdot \frac{F_0}{\Delta Y} \\ &= \frac{F_0 \cdot Y_2}{\Delta Y} \cdot \left( \frac{F_1}{F_2} \right)^2 \end{aligned}$$

である。なお、瞳面での高さ  $Y_1$  位置を通過する光線

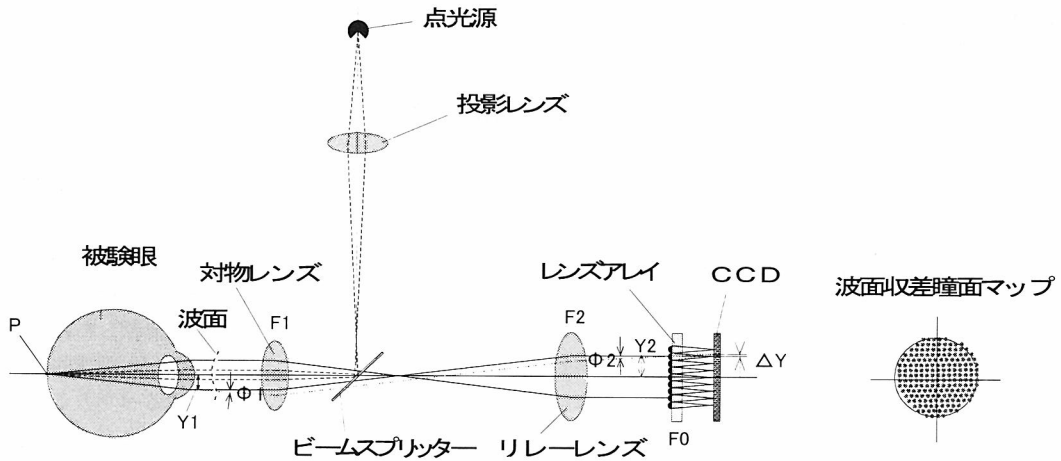


図1 Hartmann-Shack 法

を眼屈折度表示すると

$$D = 1000 \cdot \Delta Y \cdot \frac{\left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}{F_0 \cdot Y_2}$$

となり、瞳面上の位相データとして扱うことができる。

現実にはこのような単純な形ではないが、上記概念を瞳面上の各点にあてはめることにより光線収差群を求め、測定データとして利用する。光線収差を求める方法としては、このほかにも検眼法でおなじみの Skiascopy 法などいくつかの方法が提案されているが、基本的には、従来の眼屈折測定において瞳を細かく分割して計測したデータを再構成したものである。一方、光学計測分野でよく知られた手法として、複屈折光学材料や回折格子などを使って波面を変位（横変位、角変位、放射状変位などがある）させて2光束とし、この2光束を干渉させる方法などもある。

### Zernike多項式の光学収差への応用

Zernike 多項式は Knife edge 法や位相差顕微鏡の基本原理解である位相差法などの研究で著名な Fritz Zernike により導入されたもので、光学部品や光学系など光学システムの結像性能をあらわす光学収差を定量的に解析する手法として利用価値が高い。Zernike 多項式は光学設計の分野においては一般的な波面収差の多項式級数展開の一つであるが、この利用目的は球面収差、コマ収差、非点収差など光学システムの結像性能評価に必須の収差量の算出にある。光線収差などから求められた波面収差の Zernike 多項式展開は実

際の波面収差の数式的近似形状、言い換えれば収差関数を示しており、この収差関数の算出は最小二乗法をもって実行される。ここで、多項式級数展開をどの次数まで行うかは解析者の意思によるが、当然のことながら高次まで展開すればするほど近似した後の波面収差との偏差は小さくなる。しかしむやみに計算精度を上げて高次収差成分を追求しすぎても、基礎データや結果の扱いを考えると無意味なものになる。

Zernike 多項式展開は、一般のべき級数展開とは異なり、単位円内で直交、正規化しており、この多項式の独立した各項の値が像面の傾き、フォーカス、球面収差等の意義をもつ形として示されるため、これらの組み合わせによって Seidel の3次収差に相当する収差量の算出などに利用されている。表1は Zernike 多項式の独立した各項の値で、 $\theta$  は極座標での角度、 $\rho$  は極座標での半径を意味する（図2）。

次に、Zernike 多項式による収差展開の内容について述べる。

図2において瞳面を半径1の円とし、この円内において波面を circle polynomial で展開する、すなわち波面収差  $W$  を Zernike 多項式で展開（近似）したときの関数  $W$  を求めると、

$$W(\rho, \theta) = Z_0 + Z_1 \rho \cos \theta + Z_2 \rho \sin \theta + Z_3 (2\rho^2 - 1) + Z_4 \rho^2 \cos 2\theta + Z_5 \rho^2 \sin 2\theta + Z_6 (3\rho^2 - 2) \rho \cos \theta + Z_7 (3\rho^2 - 2) \rho \sin \theta + Z_8 (6\rho^4 - 6\rho^2 + 1) + \dots$$

となる。ここで、 $W'(\rho, \theta)$  を  $Z_8$  項までの展開として収差係数を計算するには、Hartmann-Shack 法のなかで述べた、位相データを  $W'(\rho, \theta)$  であらわし、これを用いて多項式  $W'$  の Zernike 係数  $Z_0 \sim Z_8$  を

表1 Zernike 多項式による収差分類

収差次数	項 (Z)	Zernike 多項式	内 容
	0	1	
1次	1	$\rho \cos \theta$	Y 軸 方向傾き
	2	$\rho \sin \theta$	X 軸 方向傾き
	3	$(2\rho^2 - 1)$	焦点ずれ
3次	4	$\rho^2 \cos 2\theta$	0° or 90°軸での非点収差
	5	$\rho^2 \sin 2\theta$	±45° 軸での非点収差
	6	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$	Y 軸方向の3次コマ収差
	7	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$	X 軸方向の3次コマ収差
	8	$(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1)$	3次球面収差
	5次	9	$\rho^3 \cos 3\theta$
10		$\rho^3 \sin 3\theta$	
11		$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cdot \cos 2\theta$	
12		$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cdot \sin 2\theta$	
13		$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta$	
14		$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta$	
15		$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$	

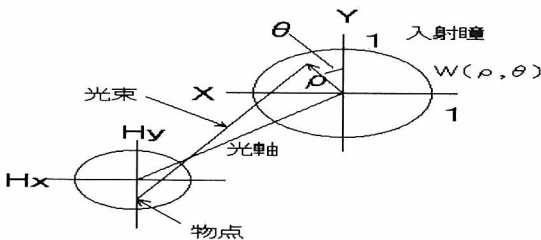


図2 評価光学系

の基本コンセプトはすでに1950年代に adaptive optics と呼ばれる微小な光学要素による制御技術として研究が開始され、1980年ごろには天文学の分野において花開いていたものである。これら解析された波面を補正する光学理論は波面センサーとアクチュエータで駆動される可変形ミラーとの組み合わせによる手法のほかに、像面での光強度分布の測定を基に位相変調液晶素子により波面補正を行うシステムの提案もあるが、今後はこれらの技術が生体のより詳細な観察や機能の忠実な再現に結びついていくことが予想される。

参 考 文 献

- 1) Liang J, Williams DR & Miller DT: Supernormal vision and high-resolution retinal imaging through adaptive optics. J Opt Soc Am A 14: 2884-2892, 1997.
- 2) Hardy JW: Active optics: A new technology for the control of light. Proc IEEE 66: 651-697, 1978.
- 3) 前田直之: 波面収差と補償光学. 臨眼 55: 1599-1602, 2001.
- 4) 柳沢忠司, 高木康博: 波面を補正するハイブリッドシステムへの遺伝的なアルゴリズムの適用. 光学 26: 608-614, 1997.

求める。各測定ポイントにつき、係数  $Z_0 \sim Z_8$  を Zernike 多項式  $W'$  に代入して  $W'$  を再構築すれば、高次波面収差  $W''$  は

$$W''(\rho, \theta) = W(\rho, \theta) - W'(\rho, \theta)$$

で算出される。

ザイデルの3次収差に相当する収差量の Zernike 係数表示には以下の計算式が利用される。

◇非点収差 (Astigmatism) :  $2 \{(Z_4)^2 + (Z_5)^2\}^{1/2}$

◇コマ収差 (Coma) :  $3 \{(Z_6)^2 + (Z_7)^2\}^{1/2}$

◇球面収差 (Spherical & Focus) :  $6 (Z_8)$

以上、波面収差解析の考え方を中心に Seidel 収差 (3次収差) とのかかわりについて述べたが、波面解析