

## Rayleigh 等色法による特発性黄斑円孔術後の視機能評価

西尾 佳晃, 神立 敦

東京慈恵会医科大学眼科学教室

## 要 約

**目的:** 特発性黄斑円孔術後症例の視機能を, Rayleigh 等色法を用いて評価した。

**対象と方法:** 術後に円孔の閉鎖と 0.5 以上の良好な視力改善が得られた症例のうち, 片眼性の特発性黄斑円孔 7 例の患眼および僚眼に対し, IF-2 アノマロスコープを用いて Rayleigh 等色値を測定した。また, 得られた Rayleigh 等色値から, 患眼の網膜視細胞の光学濃度の効率を算出し検討を加えた。

**結果:** Rayleigh 等色の中央値は, 患眼では僚眼に比べて赤側に移行していた。また, 術後に 1.0 以上の視力

回復が得られた症例でも, 患眼の光学濃度の効率は僚眼と比較して低下していた。

**結論:** 視細胞の光学濃度の効率の低下は, 視力が回復した後も長期にわたり残存していることが示された。等色法は視力検査に比べて鋭敏であり, 術後の視機能評価法として有用であると思われた。(日眼会誌 104: 232—236, 2000)

**キーワード:** Rayleigh 等色, IF-2 アノマロスコープ, 光学濃度, 特発性黄斑円孔, 硝子体手術

## The Rayleigh Color Matches in Idiopathic Macular Holes Treated by Vitrectomy

Yoshiteru Nishio and Atsushi Kandatsu

Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine

## Abstract

**Purpose:** The Rayleigh color matches were measured to investigate the optical density in the cone photopigment of the central retina in patients with macular holes that had closed after vitrectomy.

**Methods:** The Rayleigh equation was measured with the IF-2 anomaloscope in 7 patients with macular holes in one eye, that had closed after vitrectomy and gained an improvement in visual acuity of 0.5 or better. Reductions in the pigment optical density of cone photoreceptors of the opposite eyes were estimated with Rayleigh equations obtained in this experiment.

**Result:** The Rayleigh equations of the affected eyes were shifted toward protanomalous setting compared with that of the opposite eyes. The optical

densities of cone photoreceptors of the affected eyes were lower than those in the opposite eyes, even in patients with visual acuity of 1.0 or better.

**Conclusion:** These findings suggest that the recovery of the visual acuity may precede that of the optical density in cone photopigment of central retina. The Rayleigh equation is more sensitive than visual acuity for evaluating visual function after vitrectomy for macular holes. (J Jpn Ophthalmol Soc 104: 232—236, 2000)

**Key words:** Rayleigh equations, IF-2 anomaloscope, Optical density, Idiopathic macular holes, Vitrectomy

## I 緒 言

特発性黄斑円孔に対する硝子体手術は, 1991年に Kelly<sup>1)</sup>によりその有効性が示されて以来多くの施設で施行され, 円孔の閉鎖率や視力回復などの手術成

績<sup>2)~4)</sup>や術前後の視機能評価<sup>5)~10)</sup>も報告されている。術前後の視機能評価法としては, レーザ干渉縞視力測定装置による視力評価<sup>5)</sup>や Humphrey 自動視野計による網膜中心感度<sup>6)</sup>, アムスラーチャート<sup>6)</sup>, 中心フリッカー値<sup>6)</sup>, ステレオテストによる評価<sup>6)</sup>, 走査レーザー検眼鏡

別刷請求先: 105-8471 東京都港区西新橋 3-25-8 東京慈恵会医科大学眼科学教室 西尾 佳晃  
(平成 11 年 5 月 17 日受付, 平成 11 年 9 月 28 日改訂受理)

Reprint requests to: Yoshiteru Nishio, M.D. Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine, 3-25-8 Nishi-shinbashi, Minato-ku, Tokyo 105-8461, Japan

(Received May 17, 1999 and accepted in revised form September 28, 1999)

(SLO)による固視点などの評価<sup>7,8)</sup>, 仮性同色表<sup>9)</sup>, 黄斑部局所網膜電図(ERG)<sup>10)</sup>などが行われている。これらの検査により視機能がほぼ正常範囲内に回復する例もある。一方, 臨床上, 術後に良好な視力が得られても, なお視覚の異常を訴える例に遭遇することがある。そこで今回は, 網膜中心部の視機能を詳細に検索するために, 心理物理学的検査法として Rayleigh 等色法<sup>11)</sup>を採用し, 視細胞の光子の吸収効率(光学濃度)を算出することにより特発性黄斑円孔症例の硝子体手術後における視機能について検討した。

## II 対象および方法

### 1. 対象

対象は, 東京慈恵会医科大学附属病院眼科を受診し, Gass 分類<sup>12)</sup> Stage 3 の特発性黄斑円孔と診断され, 手術により検眼鏡的に円孔の閉鎖が得られ, 術後視力が 0.5 以上と良好に回復した 7 例 7 眼とした。性別は, 男性が 2 例で, 女性が 5 例であり, 年齢は 58~70 歳までで, 平均  $63.0 \pm 3.95$  (平均値  $\pm$  標準偏差) 歳であった。7 例の非手術眼(僚眼)では, 矯正視力は 1.0 以上であり, 検眼鏡的にも中間透光体および眼底に異常はなかった。また, 対象とした 7 例中には, 検査施行時に検眼鏡的に後発白内障や残存硝子体の混濁のあった症例は含まれていない。

手術方法としては, 硝子体ゲル切除および人工的後部硝子体膜剝離の作製を行い, 液空気置換後に 10%  $C_3F_8$  ガスタンポナーデを施行した。同時に, 全症例に対し, 超音波白内障手術と眼内レンズ挿入術も行った。挿入された眼内レンズは, 全症例ともアクリルソフト眼内レンズ(アルコン社製, MA 60 BM)であった。手術から検査施行時までの, 術後の経過観察期間は 8~23 か月であり, 平均  $13.6 \pm 5.2$  (平均値  $\pm$  標準偏差) か月であった。

### 2. 検査方法

#### 1) 検査機器

検査機器として, トーメー社製の IF-2 アノマロスコープを使用した。本検査器の検査視標は円形の左右の二等分割視野で, その大きさは視角  $2^\circ$  である。二等分割視野の左半分には 670 nm の単赤色光および 545 nm の単緑色光ないし両者の混色光が呈示され, 右半分には 589 nm の単黄色光が呈示される。混色目盛の 0 は緑, 100 は赤のそれぞれ単色光で, 緑と赤の混色の割合が目盛 0~100 まで連続的に変化する。単色光目盛は 0~45 まで, その輝度が連続的に変化する。測定は明室で行い, 等色値の範囲およびその中央値を測定した。

#### 2) 光学濃度の効率の算出

各症例で得られた Rayleigh 等色の中央値から, Young ら<sup>13)</sup>と北原ら<sup>14)</sup>の方法に準じ, 僚眼の赤および緑錐体の光学濃度の効率を 100% としたときの患眼における赤および緑錐体の光学濃度の効率を算出した。

すなわち, 今回の Rayleigh 等色の測定に使用した IF-

2 アノマロスコープの緑と赤の混色光目盛は 0~100 まで, 単色光目盛は 0~45 まで連続的に変化する。よって, Rayleigh 等色値における混色光目盛および単色光目盛をそれぞれ  $x$  および  $y$  とすると, 赤色光および黄色光の相対的な刺激光量は, それぞれ  $x/100$  および  $y/45$  となる。ここで, 緑色光の相対的な刺激光量は  $(100-x)/100$  で表される。

また, Rayleigh 等色においては青錐体の関与は考えなくてもよい<sup>15)</sup>ため, 各刺激光の最大光量を  $I(\lambda)$ , 中間透光体の透過率を  $\tau(\lambda)$ , 赤錐体および緑錐体の action spectrum の相対値をそれぞれ  $R(\lambda)$  および  $G(\lambda)$  とすると,

$$y/45 \cdot I(589) \cdot \tau(589) \cdot R(589) = (100-x)/100 \cdot I(545) \cdot \tau(545) \cdot R(545) + x/100 \cdot I(670) \cdot \tau(670) \cdot R(670) \text{ と,}$$

$$y/45 \cdot I(589) \cdot \tau(589) \cdot G(589) = (100-x)/100 \cdot I(545) \cdot \tau(545) \cdot G(545) + x/100 \cdot I(670) \cdot \tau(670) \cdot G(670) \text{ の 2 式が成立する。この 2 式から,}$$

$$x/(100-x) = I(545) \cdot \tau(545) \{G(545) \cdot R(589) - R(545) \cdot G(589)\} / I(670) \cdot \tau(670) \{R(670) \cdot G(589) - G(670) \cdot R(589)\} \text{ および,}$$

$$45 x/100 y = I(589) \cdot \tau(589) \{G(545) \cdot R(589) - R(545) \cdot G(589)\} / I(670) \cdot \tau(670) \{R(670) \cdot G(545) - G(670) \cdot R(545)\} \text{ の 2 式が導かれる。}$$

また, Beers-Lambert の法則から, 視物質の吸光係数を  $\epsilon$ , 濃度を  $c$ , 光路長を  $l$  とすると, 光学濃度  $= \epsilon cl$  が成り立ち, 光学濃度の効率を  $\alpha$  とすると, 光子の吸収される割合は  $1 - 10^{-\alpha c l}$  となる。

以上の式から, 各々の光学濃度に対するアノマロスコープの混色光目盛および単色光目盛の算出が可能である。なお, 算出に当たり, 赤および緑錐体の視色素の分光感度として Smith ら<sup>16)</sup>の理論値を使用し, 赤錐体および緑錐体の正常光学濃度として Miller<sup>17)</sup>の 0.6 および 0.5 を採用した。

## III 結果

表 1 には, 対象となった 7 例の年齢, 性別, 患眼の術前および術後視力, 僚眼の視力, 観察期間を示した。これらの症例における Rayleigh 等色の等色幅とその中央値について, 患眼と僚眼における比較検討を行った。さらに, 各々の症例における僚眼および患眼の Rayleigh 等色の中央値から, 僚眼の光学濃度の効率を 100% としたときの患眼における光学濃度の効率を算出し, 術後視力との関係について検討した。

### 1. 患眼と僚眼における等色値および患眼の光学濃度の効率

表 2 には, 7 例の患眼と僚眼における Rayleigh 等色の等色幅と, その中央値および患眼の光学濃度の効率を示した。

図 1 は, 7 例の患眼および僚眼の Rayleigh 等色の中央

表1 7例の年齢,性別,患眼および僚眼の視力,術後観察期間

症例	年齢(歳)	性別	視力(術前)→(術後)	視力(僚眼)	観察期間(か月)
Y F	58	F	(0.2)→(1.2)	(1.2)	8
T I	70	F	(0.2)→(1.0)	(1.0)	18
K K	59	F	(0.1)→(0.7)	(1.2)	11
T Y	64	M	(0.1)→(0.7)	(1.2)	23
T W	62	F	(0.1)→(0.6)	(1.0)	12
M F	64	M	(0.3)→(0.5)	(1.2)	10
H W	64	F	(0.1)→(0.5)	(1.2)	13

M: 男性, F: 女性

表2 7例の Rayleigh 等色値および光学濃度の効率

症例	患眼		僚眼		患眼 光学濃度の効率(%)
	等色値	等色幅	等色値	等色幅	
Y F	47	46~48	46	43~50	96
T I	60	58~62	50	50~50	61
K K	58	54~63	50	49~51	69
T Y	50	50~50	46	43~50	84
T W	56	43~70	48	43~53	69
M F	61	60~63	56	56~56	80
H W	59	51~68	52	49~56	73

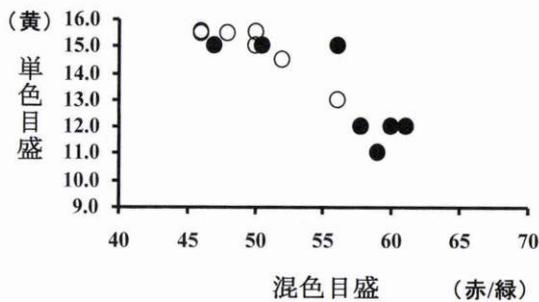


図1 7例における患眼(●印)および僚眼(○印)の Rayleigh 等色の中央値。  
横軸は混色目盛を,縦軸は単色目盛である。患眼において pseudo-protanomaly の現象があった。

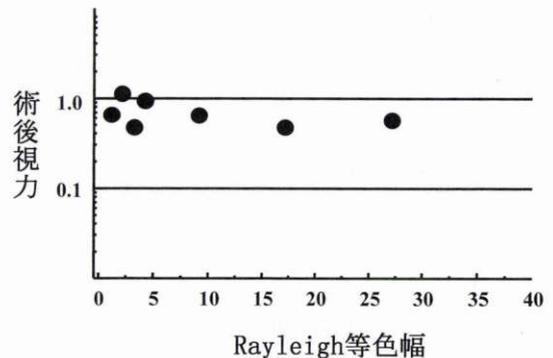


図2 7例の術後視力と Rayleigh 等色の等色幅。  
X 軸は等色幅で, Y 軸は対数目盛で表示した術後視力である。術後視力が不良であるものほど等色幅が拡大する傾向があったが,相関はなかった。

値をグラフ上に示したものである。横軸は赤と緑の混色目盛を,縦軸は黄色の単色目盛を表している。また,図中の●印と○印は,それぞれ患眼および僚眼の結果である。●印で示した患眼の等色中央値は,○印で示した僚眼の結果と比較して混色目盛で赤側に移行する,いわゆる pseudo-protanomaly の傾向があった。7例の患眼ならびに僚眼における等色の中央値の範囲は,それぞれ 47~61 および 46~56 であり,その平均値と標準偏差は,前者で  $55.9 \pm 5.3$ , 後者で  $49.7 \pm 3.5$  であった。7例において,患眼と僚眼の等色の中央値の間には統計学的に有意差があった (Wilcoxon 符号付順位和検定,  $p < 0.05$ )。

また, Rayleigh 等色の中央値から算出した患眼の光学濃度の効率は,僚眼を 100% とみなしたときは 61~96% であり,その平均値と標準偏差は  $76.0\% \pm 11.6\%$  であった。

等色幅の比較では,僚眼と比べて患眼において等色の幅が拡大する傾向があったが,統計学的には有意な差はなかった。

## 2. 患眼における等色幅および光学濃度の効率と術後視力

図2には,7例の患眼の術後視力と Rayleigh 等色の等色幅との関係を示す。X 軸は等色幅で, Y 軸は対数目盛で表示した術後視力である。対数変換した術後視力 [the logarithm of the minimal angle of resolution (log-MAR)] と等色幅との相関係数は  $R = -0.465$  で,  $Y = -0.088 - 0.07 X$  ( $R^2 = 0.216$ ,  $p = 0.293$ ) の回帰式が得られた。術後視力が不良であるものほど等色幅が拡大する傾向があったが,術後視力と Rayleigh 等色の等色幅の間に相関はな

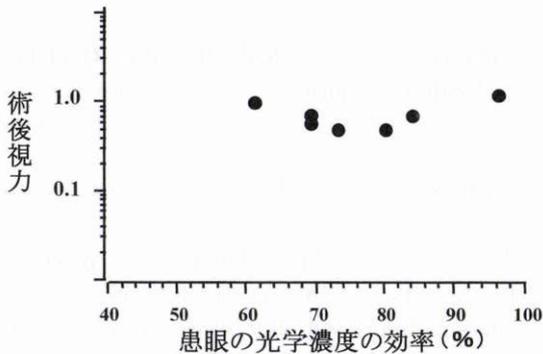


図3 7例の僚眼を100%とみなしたときの患眼の光学濃度の効率(%)と術後視力。

X軸は患眼の光学濃度の効率で、Y軸は対数目盛で表示した術後視力である。術後視力と患眼の光学濃度の効率との間に相関はなかった。

かった。

図3には、7例の僚眼を100%とみなしたときの患眼の光学濃度の効率と術後視力との関係を示す。X軸は患眼の光学濃度の効率(%)で、Y軸は術後視力を対数目盛で表示したものである。対数変換したLog-MARと患眼の光学濃度の効率との相関係数は $R=0.265$ で( $R^2=0.070$ ,  $p=0.565$ ),  $Y=0.003X-0.402$ の回帰式が得られた。術後に円孔の閉鎖と良好な視力改善が得られた7例7眼においては、術後視力と光学濃度の効率の間に相関はなかった。

#### IV 考 按

等色法の結果は、視物質の分光吸収特性および光学濃度に依存する<sup>13)16)18)</sup>。すなわち、等色法における等色中央値の変化は、視細胞における光子の吸収効率が増加したことを示しており、視細胞層より上位の伝達系における色覚の変化には関与していない<sup>19)</sup>。しかし、等色幅の広狭は視細胞層より上位の伝達系が関与する。また、等色法はその他の閾値測定より測定のばらつきが少ないため、視細胞の状態を詳細に検索することが可能である。そこで今回は、特発性黄斑円孔の術後の視機能を視力とは異なった側面から、より詳細に検索するため、Rayleigh等色法を用いて検討したものである。

Rayleigh等色においては、赤および緑の2つの原刺激のみで黄色の検査刺激との等色が可能であることから、等色には赤および緑錐体の2種類の視物質のみが関与しており、青錐体の関与は無視できる<sup>15)</sup>。さらに、使用している波長が545nm以上であり、中間透光体の影響をほとんど受けず、等色の結果は主として赤および緑錐体の視細胞における視物質のスペクトル感度特性を反映している。また、網脈絡膜疾患においては、Rayleigh等色が第1色弱の等色側、すなわち赤側に移行する、いわゆるpseudo-protanomalyの現象が観察されることが知られている<sup>20)</sup>。

今回のRayleigh等色の結果においても、患眼と僚眼と

の比較において、視力が良好に改善した症例も含めた全例で、患眼のRayleigh等色の中央値が僚眼と比較して赤側に移行するpseudo-protanomalyがみられ、Rayleigh等色の中央値から算出した患眼の光学濃度の効率は、僚眼を100%とみなしたとき、61~96%に減少していた。ここで、今回の7例では、患眼は眼内レンズ挿入眼、僚眼は有水晶体眼であることから、この影響を考慮する必要がある。しかし、Rayleigh等色値は眼内レンズ挿入眼である患眼において、僅かに緑側に移行することが報告<sup>21)22)</sup>されており、Rayleigh等色の中央値は全例で患眼と比較して僚眼で赤側に移行していたことは、眼内レンズ挿入眼による影響を考慮しても、それ以上にpseudo-protanomalyの現象が存在していることを推定しているものと思われた。また、今回の7例は、円孔の閉鎖と良好な術後視力が得られた症例であるため、ほぼ中心固視をしていると考えられる<sup>7)8)</sup>。したがって、視力が良好に改善した後も、なお長期間にわたって網膜中心部の赤および緑錐体の光学濃度の効率が低下していることが示されたといえる。

また、今回の7例において、術後視力と僚眼を100%とみなしたときの患眼の光学濃度の効率との間には相関はなかった。視力は形態覚の一評価法であり、臨床的には2点間の最小分離閾値が測定されており、受容野は神経節細胞に反応を起こし得る網膜上の広がりとして定義される。したがって、視力には錐体細胞の大きさや細胞間の距離などの解剖学的な要因と、視細胞間の輝度差を検出する視細胞から神経節細胞までの伝達系および水平方向への伝達系が関与する。一方、視細胞の光学濃度は構成する物質そのものに依存する係数 $\epsilon$ と、濃度 $c$ および光路の長さ $l$ の積で表される。係数 $\epsilon$ は一定と考えられるので、光学濃度の効率の変化は濃度 $c$ と光路の長さ $l$ の変化が関与しているものと考えられる。今回の術後に円孔の閉鎖と良好な視力改善を得ることのできた7例において、視力と光学濃度の効率との間に相関がなかった理由として、以上のように、両者はそれぞれ異なる網膜機能を評価しているためと考えられた。Terasakiら<sup>10)</sup>は術後視力と術後の中心4°,5°の黄斑部局所ERGとは相関していたと報告しているが、これは中心4°,5°の黄斑部局所ERGが、その範囲内の視細胞や視細胞から神経節細胞までの伝達系を反映しているためと思われる。したがって、術後の中心4°,5°の黄斑部局所ERGは、視細胞の光学濃度の効率とは必ずしも相関しないことが推察される。

光学濃度の減少の原因としては、Smithら<sup>23)</sup>は視力の良好な中心性網脈絡膜症では、視細胞の配列の乱れにより光路長が短くなることが原因であると報告している。今回の特発性黄斑円孔術後の症例においては、視細胞の配列の乱れにより光路長が短くなっていること、視細胞間の間隔が広がることによって相対的な濃度が減少していることなどが視細胞の光学濃度の効率の低下の一因で

ある可能性が推察された。

等色幅については、理論上は色識別能が低下するほど等色幅は拡大することから、等色幅の拡大の度合いが色識別能を表すと考えられるが、今回の症例では、等色幅と術後視力との間にほとんど相関はなかった。等色幅は他の要因によっても結果が左右される場合があり得ることから、今後、症例数を増やして再検討を要するものと思われる。

以上、手術により円孔の閉鎖と視力の良好な改善が得られた症例においても、等色法により視細胞の光学濃度の効率はなお低下していることが示されたといえる。前野ら<sup>6)</sup>は特発性黄斑円孔症例の術後6か月で視機能はほぼ回復し、変視症や両眼視機能の改善も得ることができるとしているが、本研究により視力が1.0以上に回復した症例においても、pseudoprotonomalyの現象が観察され、視細胞の光学濃度の効率の低下は、視力が回復した後も長期にわたり残存していることが推察された。

特発性黄斑円孔術後症例においてRayleigh等色値を測定し検討することは、術後の網膜中心部視細胞の機能を視力と異なる側面から評価する上で、臨床上有意義であると思われた。

稿を終えるに当たり、ご校閲を賜りました東京慈恵会医科大学眼科学教室北原健二教授に深謝いたします。本論文の要旨はOSW in Sendai第37回日本網膜硝子体学会において報告した。

## 文 献

- 1) Kelly NE, Wendel RT: Vitreous surgery for idiopathic macular holes: Result of pilot study. Arch Ophthalmol 109: 654—659, 1991.
- 2) 荻野誠周: 黄斑円孔手術の成績. 日眼会誌 99: 938—944, 1995.
- 3) 荻野誠周, 舘奈保子, 半田嘉久, 塩屋美代子: 黄斑円孔に対する硝子体手術の成績. 臨眼 48: 1475—1480, 1994.
- 4) 舘奈保子, 加藤ゆい子, 鈴木寿美代, 近藤瑞枝, 荻野誠周: 特発性黄斑円孔閉鎖後の検眼鏡所見と長期視力経過. 眼紀 47: 955—959, 1996.
- 5) 辻川明孝, 小椋祐一郎, 本田孔士: 特発性黄斑円孔に対する硝子体手術. 術後視力に影響する因子の解析. 日眼会誌 99: 450—454, 1995.
- 6) 前野貴俊, 服部匡志, 二宮欣彦, 竹中 久, 満田久年, 不二門尚, 他: 特発性黄斑円孔硝子体手術における視機能変化. 日眼会誌 100: 40—45, 1996.
- 7) 牧野伸二, 伊野田繁, 清水由花, 清水昊幸: 特発性黄斑円孔の硝子体手術後の固視点の変化. 眼紀 47: 273—277, 1996.
- 8) Guez JE, Le Gargasson JF, Massin P, Rigaudière F, Grall Y, Gaudric A: Functional assessment of macular hole surgery by scanning laser ophthalmoscopy. Ophthalmology 105: 694—699, 1998.
- 9) 小柳賀子, 北岡 隆, 雨宮次生: 特発性黄斑円孔の後天色覚. 臨眼 51: 1055—1057, 1997.
- 10) Terasaki H, Miyake Y, Tanikawa A, Kondo M, Ito Y, Horiguti M: Focal macular electroretinograms before and after successful macular hole surgery. Am J Ophthalmol 125: 204—213, 1998.
- 11) Rayleigh L: Experiments on colour. Nature 25: 64—66, 1881.
- 12) Gass JDM: Reappraisal of biomicroscopic classification of stage of development of a macula hole. Am J Ophthalmol 119: 752—759, 1995.
- 13) Young RSL, Fishman GA: Color matches of patients with retinitis pigmentosa. Invest Ophthalmol Vis Sci 19: 967—972, 1980.
- 14) 北原健二, 環龍太郎, 野地 潤, 神立 敦: 中心性漿液性脈絡網膜症の視機能, Rayleigh均等について. 日眼会誌 88: 1364—1368, 1984.
- 15) Wyszecki G, Stiles WS: Color Science Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae. John Wiley and Sons, New York, 459—463, 1982.
- 16) Smith VC, Pokorny J: Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. Vision Res 15: 161—171, 1975.
- 17) Miller SS: Psychophysical estimates of visual pigment densities in red-green dichromats. J Physiol 223: 89—107, 1972.
- 18) Smith VC, Pokorny J: Letter to the editors. Psychophysical estimates of optical density in human cones. Vision Res 13: 1199—1202, 1973.
- 19) 北原健二: 視神経疾患の色覚. 三島濟一, 他(編): 眼科Mook 30 視神経とその疾患. 金原出版, 東京, 257—269, 1986.
- 20) 北原健二: 眼底疾患と色覚異常. 眼科 26: 1493—1499, 1984.
- 21) Jay JL, Gautam VB, Allan D: Colour perception in pseudophakia. Br J Ophthalmol 66: 658—662, 1982.
- 22) 花房 晶, 宮本 正, 野寄 忍, 鳴戸みどり, 清水金郎, 太田安雄: 白内障眼, 無水晶体眼, 人工水晶体眼の中心色覚. 臨眼 40: 786—787, 1986.
- 23) Smith VC, Pokorny J, Diddie KR: Color matching and Stiles-Crawford effect in central serous choriopathy. Mod Prob Ophthalmol 19: 284—295, 1978.