

補助背景野を用いた赤錐体系分光感度の測定

大 山 か お り

東京慈恵会医科大学眼科学講座

(受付 平成 18 年 10 月 13 日)

RED CONE SPECTRAL SENSITIVITY MEASUREMENT WITH THE AUXILIARY FIELD METHOD

Kaori OYAMA

Department of Ophthalmology, The Jikei University School of Medicine

To reveal the characteristics of red cone spectral sensitivity, field sensitivity using the 650-nm test light was measured with low and high light intensity backgrounds. To measure field sensitivity under the high intensity condition, the additional background light method was used. Results under the low light intensity condition were what is called the Stiles' π_5 mechanism. The π_5 mechanism was said to show the characteristics of long-wavelength-sensitive cones, but the peak band width with the π_5 mechanism is greater than with the π_1 , π_3 , and π_4 mechanisms, which indicate short-wavelength-sensitive cones and middle-wavelength-sensitive cones. First, threshold-versus-intensity measurement was performed with a 480-nm 8-degree-diameter background and a 650-nm 1-degree-diameter test light. Branch of 2 mechanisms was observed. Next, field sensitivity under low and high light intensity conditions were measured. Field sensitivity measured with a high intensity background using the additional background method was narrower in peak width than the π_5 mechanism. Field sensitivity measured with a high intensity background light is believed to show pure red cone specificity, and the green cone mechanism is believed to participate in the middle wavelength area with what is called π_5 mechanism.

(Tokyo Jikeikai Medical Journal 2007; 122: 11-7)

Key words: spectral sensitivity, red cone, π mechanism, high intensity

I. 緒 言

Stiles は、ヒトの錐体系の分光感度の特性を測定する心理物理学的手法として、単色検査光の閾値測定を行う 2 色閾値法を用い、これにより各錐体系の分光感度特性を明らかにした¹⁾。このなかで π_1 , π_3 は青錐体系, π_4 は緑錐体系, π_5 は赤錐体系の分光感度特性をそれぞれ表すとされているが、赤錐体系反応を示すとされている π_5 とよばれるメカニズムは、他の π_1 , π_3 , π_4 と比較してピークのバンド幅が広く、はたして純粋に一錐体系反応を表しているかという疑問が生じる。そこ

で、今回は、Stiles の 2 色閾値法による赤錐体系の分光感度について検討を加える目的で、主背景野に補助背景野を重ねて呈示し、その中央に 650 nm の検査光を呈示する方法²⁾³⁾で、閾値—強度曲線を求めることにより、高輝度下で得られる分光感度測定を試みた。その結果得られた高輝度下で働くメカニズムを今回 π_6 と呼ぶことにすると高輝度下の測定結果である π_6 のほうが、従来から言われている π_5 よりも、より純粋に赤錐体系の反応を示していると考えられる結果が得られたので、ここに報告する。

II. 対象と方法

1. 対象

実験内容について十分に説明し、同意が得られた眼疾のない、アノマロスコープ・各種色覚検査表・色相配列検査にて色覚正常と認められた、日本人正常ボランティア3名(男1名,女2名)。

2. 検査装置

3系列のマックスウェル視光学系を使用した。

3. 実験方法

実験1 閾値—強度曲線 threshold versus intensity (T.V.I) の測定

背景光として視角8度・波長480nmの背景野を呈示する。被験者に背景の中心を固視させてその中央に視角1度・波長650nm・呈示時間200msecondの検査光を呈示し、背景野の明るさゼロから徐々に明るくしたときのそれぞれの背景の明るさに対する閾値を測定することにより、T.V.I.を求める。このとき閾値はそれぞれの明るさの背景に対して連続して3回以上安定した閾値が得られた後、その前後5回の平値を算出し、その背景光の明るさに対する閾値とした。さらに、背景光の波長を520, 540, 650, 680nmと変化させ、それぞれの背景野における検査光650nmに対するT.V.I.を同様の方法で測定する。

実験1において得られた結果から、T.V.I.上の高輝度下および低輝度下で働く2つのメカニズムが存在すると考えられた。これにもとづき、それぞれのメカニズムについてfield sensitivityの測定を行う。

実験2 低輝度下のメカニズムについてのfield sensitivity測定

Stilesのfield sensitivityの基準にしたがい、検査光を視角1度・波長650nmに固定し、背景光の波長を400nmから700nmまで10nmごとに変化させ、それぞれの背景光について検査光の閾値を絶対閾値から1対数単位上昇させるのに要する背景光の強さを求め、field sensitivityを算出する。すなわち、視角1度・波長650nmの検査光の絶対閾値を測定し、次に短波長よりの背景光において検査光の閾値が上方のメカニズムに影響されない範囲の明るさの背景光を呈示し、閾値を測定する。絶対閾値とこの得られた検査光の閾値の2

点がわかれば、これらは1本の標準曲線上にのせることが可能である。得られた曲線上で検査光の閾値を1対数単位上昇させる背景光の明るさを、背景光400nmから700nmのそれぞれの波長について算出することにより、低輝度下のメカニズムのfield sensitivityを求めることができる。

実験3 高輝度下のメカニズムについてのfield sensitivity測定

高輝度下のメカニズムについてはStilesのauxiliary field method²⁾³⁾を用い測定を行う。すなわち視角8度・波長480nmの補助背景野を使用し、これに400から700nmの主背景野を重ねて呈示し、その中央に視角1度・波長650nmの検査光を呈示する。650nmの高輝度下で働くメカニズムのfield sensitivityの求め方をFig.1に模式図で示す。図の下の目盛は実線の曲線で示したT.V.I.の目盛を、図中の目盛は右側の点線であらわした閾値—強度曲線の目盛を表す。まず、実線

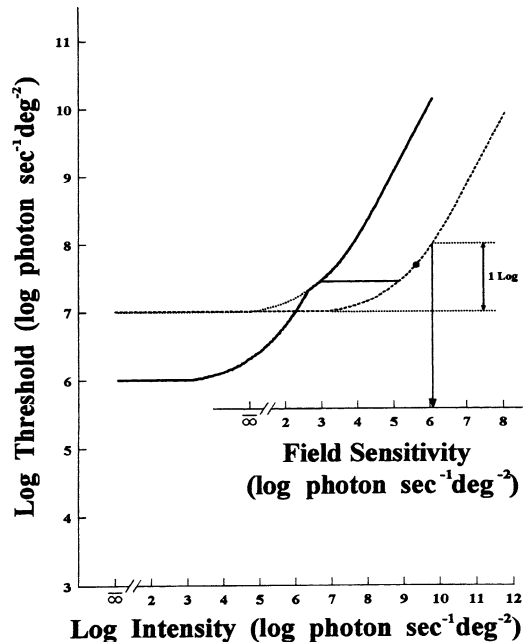


Fig. 1. Method of measuring field sensitivity of upper branch: By using standard curve line, T.V.I. under high intensity background shown by dotted line on the right side of the figure is obtained. Then background intensity which can rise the threshold of test light by 1 Log unit from the absolute threshold of that line can be calculated.

で示すように、480 nm の背景野における T.V.I. を求める。次にこの 480 nm を補助背景野とし、その明るさを高輝度下のメカニズムが働く輝度に設定する。補助背景野の明るさは一定にしたままで、これに 400 から 700 nm の主背景野を加え、この主背景野の明るさを徐々に変化させ、この時の検査光の閾値を測定する。得られた結果に標準曲線を重ね合わせるにより、右側の点線に示したような高輝度下で働くと考えられるメカニズムの T.V.I. が得られることになる。このようにして得られた T.V.I. において、絶対閾値から検査光の閾値を 1 対数単位上昇させるために必要な背景光の明るさを算出することにより高輝度下で働くメカニズムの field sensitivity を求める。

III. 結 果

実験 1 (T.V.I.) の結果: 被験者 1 の検査光 650 nm・背景光 480 nm における T.V.I. の結果を Fig. 2 に示す。縦軸は検査光の対数閾値を、横軸は

背景光の明るさを対数で表しており、オープンサークルで示された閾値は測定値 5 回の平均値を示す。また、絶対閾値は検査光 650 nm における暗順応曲線の測定結果から得られた値を用いた。図中の実線は Stiles の標準曲線であるが、これを今回得られた結果に重ね合わせてみると、背景光 480 nm では実測された T.V.I. は 1 本の Stiles の標準曲線とは一致せず、点線に示すようにさらにもう 1 本の標準曲線を重ねることにより、無理なく標準曲線上にのせることが可能となる。

Fig. 3, 4 に他の 2 名の被験者における背景光 480 nm・検査光 650 nm を用いた T.V.I. の結果を示す。これらについても Fig. 2 の場合と同様に背景光 480 nm では実測された T.V.I. は 1 本の Stiles の標準曲線とは一致せず、2 本の標準曲線を用いることにより、無理なく標準曲線上にのせることが可能になっている。

これらの結果から、検査光 650 nm・背景光 480 nm における T.V.I. は、1 つのメカニズムのみか

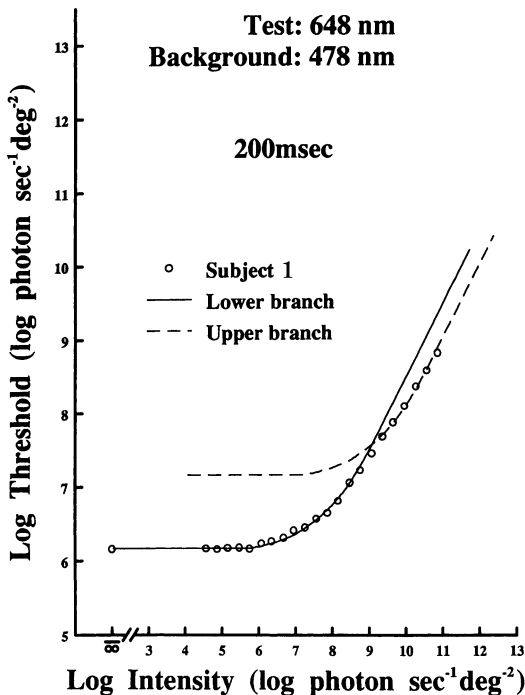


Fig. 2. Result of the T.V.I. curve measurement under 650 nm test light and 480 nm background: Horizontal axis is test light intensity and vertical axis is background light intensity. Open circle shows the average of 5 measurement. T.V.I. curves consist of two branches.

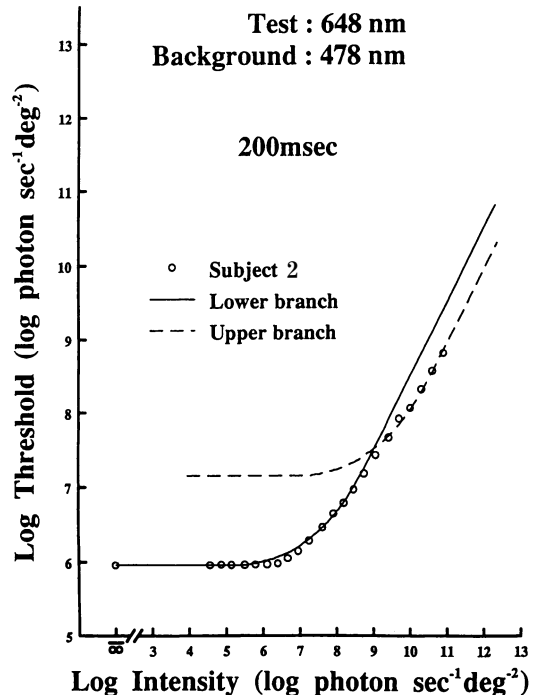


Fig. 3. Result of the T.V.I. curve measurement under 650 nm test light and 480 nm background: Horizontal axis is test light intensity and vertical axis is background light intensity. Open circle shows the average of 5 measurement. T.V.I. curves consist of two branches.

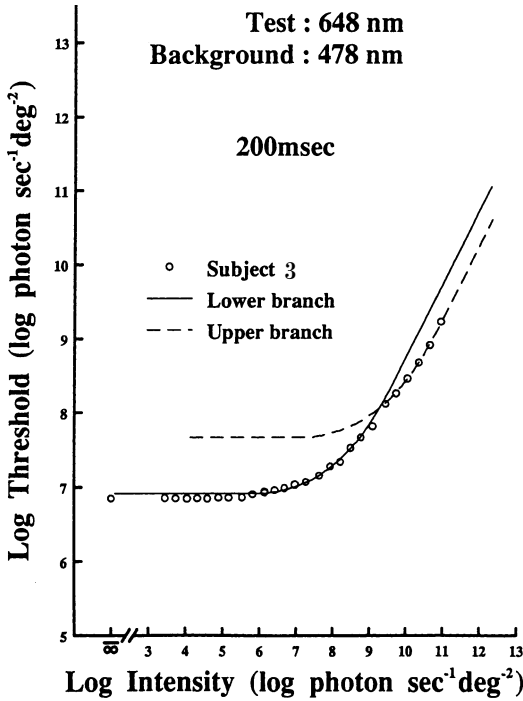


Fig. 4. Result of the T.V.I. curve measurement under 650 nm test light and 480 nm background: Horizontal axis is test light intensity and vertical axis is background light intensity. Open circle shows the average of 5 measurement. T.V.I. curves consist of two branches.

ら構成されているのではなく、2つのメカニズムがこれに関与している可能性が考えられた。被験者1において検査光を650 nmに固定し、背景光の波長をそれぞれ480, 520, 540, 650, 680 nmと変化させて測定した5本のT.V.I.の結果を1つのグラフ上にまとめて表示したものをFig. 5に示す。ただし、それぞれの曲線はわかりやすくするためにグラフ上で水平方向に移動させて表示してある。左側の3本の曲線は、左から順に背景光が480, 520, 540 nmにおけるT.V.I.であるが、先ほどのFig. 2の結果と同様で、それぞれが2つのメカニズムから構成されていると考えられる。一方、右側の2本の曲線は背景光が650と680 nmにおけるT.V.I.の結果であるが、こちらはそれぞれ1本のStilesの標準曲線と重ね合わせることが可能であり、1つのメカニズムから構成されていると考えられる。

実験2 (低輝度下のメカニズムにおける field

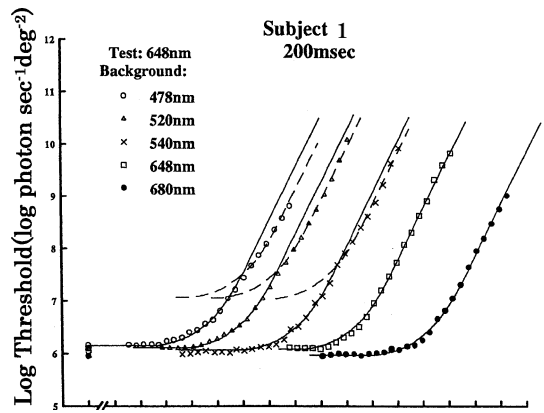


Fig. 5. T.V.I. curves of different background shown on one figure.: Test light is 650 nm (fixed) background wavelength is changing 480, 520, 540, 650, and 680 nm respectively. The result is shifted horizontally. The T.V.I. curves on 480 nm, 520 nm, and 540 nm background consist of two branches, while the T.V.I. curves on 650 nm and 680 nm background consist of one branch.

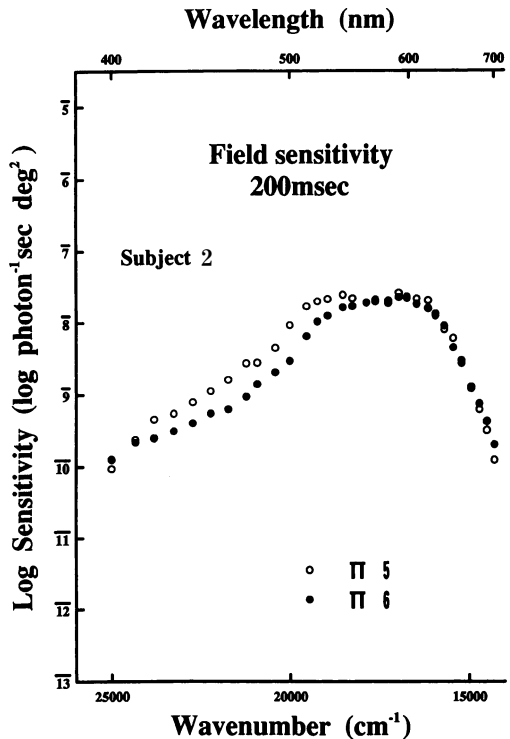


Fig. 6. Result of field sensitivity curves under low intensity background (open circle, $\pi 5$) condition and high intensity condition (closed circle, $\pi 6$): The result is shifted vertically to be compared easily. The shape of the $\pi 6$ is narrower than that of $\pi 5$.

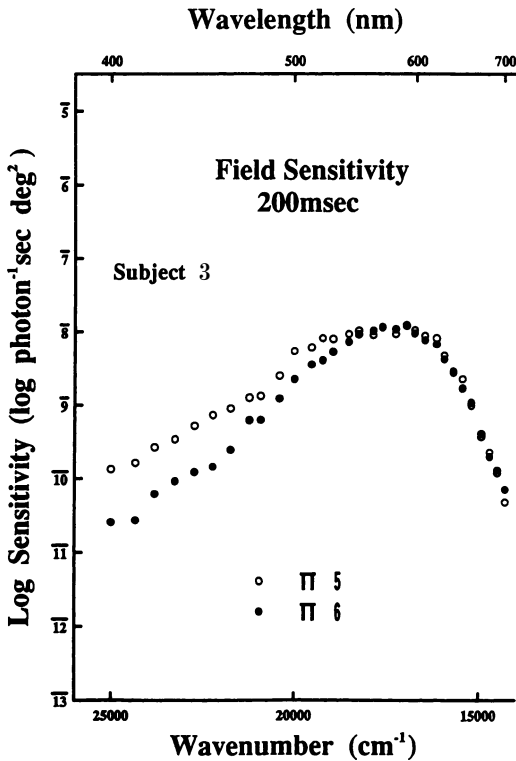


Fig. 7. Result of field sensitivity curves under low intensity background (open circle, $\pi 5$) condition and high intensity condition (closed circle, $\pi 6$): The result is shifted vertically to be compared easily. The shape of the $\pi 6$ is narrower than that of $\pi 5$.

sensitivity) および実験3 (高輝度下のメカニズムにおける field sensitivity) の結果: 実験1の結果をふまえ、今回得られた T.V.I. 上には高輝度下および低輝度下で働く2つのメカニズムが存在すると考え、それぞれのメカニズムについて field sensitivity の測定を試みた。

被験者2における、低輝度下および高輝度下のメカニズムの field sensitivity の結果を Fig. 6 に示す。オープンサークルは低輝度下のメカニズムすなわち $\pi 5$ を、クローズドサークルは高輝度下のメカニズムを表している。ただし、比較しやすくするため、両者は図表上で上下に平行移動させ表示してある。今回仮にこの高輝度下の曲線を $\pi 6$ と呼ぶことにする。 $\pi 5$ と $\pi 6$ の曲線を重ねてみると、両者は長波長よりではほぼ一致した曲線を示したが、中波長よりでは $\pi 6$ の曲線は $\pi 5$ の曲線に比べ感度がやや急峻に低下し、また短波長よりで

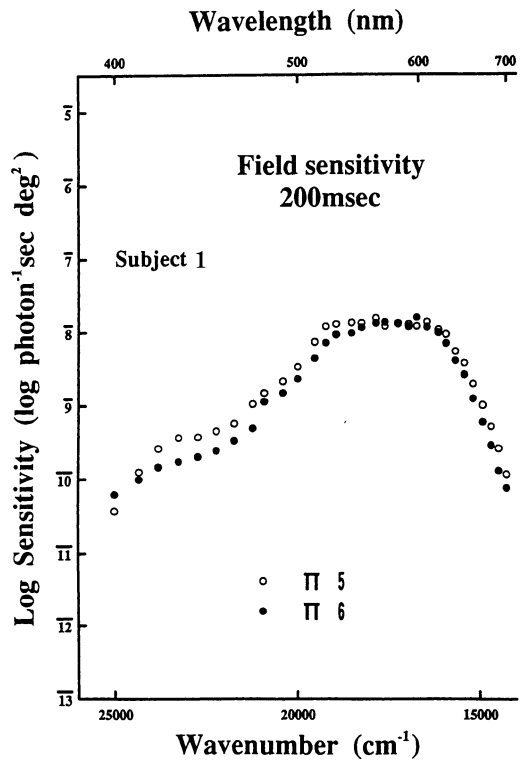


Fig. 8. Result of field sensitivity curves under low intensity background (open circle, $\pi 5$) condition and high intensity condition (closed circle, $\pi 6$): The result is shifted vertically to be compared easily. The shape of the $\pi 6$ is narrower than that of $\pi 5$.

も $\pi 6$ は $\pi 5$ に比較し感度が低い傾向が認められており、 $\pi 6$ は $\pi 5$ に比べピークのバンド幅が狭くなっていることがわかる。

他の2名の被験者の結果を Fig. 7 および 8 に示す。これらについても前述と同様の結果が得られ、やはり $\pi 6$ の曲線は $\pi 5$ の曲線に比べバンド幅が狭くなっていることが確認された。

3名の低輝度下のメカニズム ($\pi 5$) の field sensitivity の結果を1つのグラフ上にまとめたものを Fig. 9 に、高輝度下のメカニズム ($\pi 6$) の field sensitivity の結果をまとめたものを Fig. 10 に示す。これらは、それぞれよく似た曲線を示している。(わかりやすくするため、それぞれの結果は図表上で上下に平行移動させ表示してある)

IV. 考 察

心理物理学的にはかねてより Stiles の2色閾

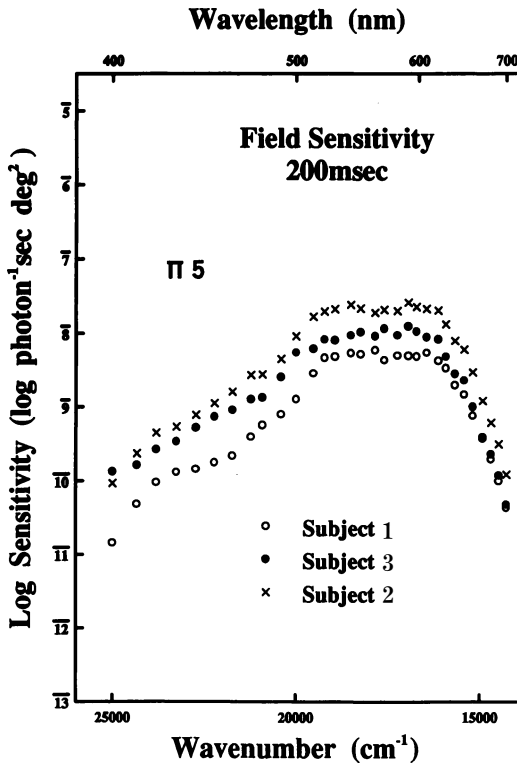


Fig. 9. Result of field sensitivity of low intensity background condition ($\pi 5$) of 3 subjects shown on one Fig.: They show similar curve.

値法により各錐体系の分光感度測定が行われてきた¹⁾⁻³⁾. Stiles の π メカニズムとして, 青錐体系の反応を表す $\pi 1$, $\pi 3$, 緑錐体系の反応を表す $\pi 4$, そして赤錐体系の反応を表すものとして $\pi 5$ が知られているが, この $\pi 5$ を表す反応が他の錐体系の反応とは異なり, 一錐体系反応としては, バンド幅が広すぎることが指摘されている⁴⁾⁵⁾. 今回は, 正常者において 650 nm の検査光を用いて各種の背景光における T.V.I. を測定することにより中波長領域では低輝度下と高輝度下において反応する 2 本のメカニズムが存在することが示唆された. この結果をふまえ低輝度下の field sensitivity 測定ならびに Stiles の auxiliary field method²⁾³⁾ を用いて高輝度下で得られる分光感度測定を行ったところ, 高輝度下で得られる分光感度曲線 $\pi 6$ は低輝度下の分光感度曲線である $\pi 5$ に比べその形はピークのバンド幅が狭く, 他の錐体系の反応である $\pi 1$, $\pi 3$, $\pi 4$ などにより近い特徴を示した. このことから $\pi 6$ のほうがより純粋な赤錐体系の

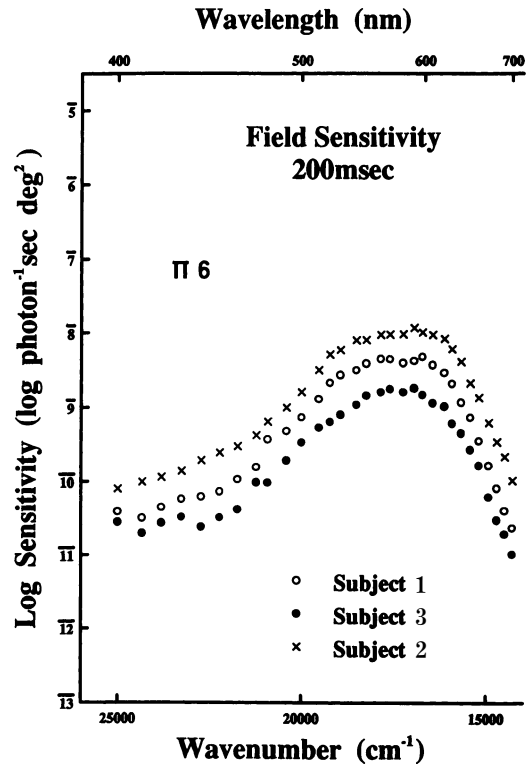


Fig. 10. Result of field sensitivity of high intensity background condition ($\pi 6$) of 3 subjects shown on one Fig.: They also show similar curve.

反応を示す曲線なのではないかと推察された.

また, 実験 1 の検査光 650 nm ・背景光 480 nm における T.V.I. の測定結果から 650 nm の検査光においてはその曲線は 2 相性を示し, 低輝度下ならびに高輝度下で働く 2 つのメカニズムの関与していることが示唆されている. 中波長領域では緑錐体系の反応である $\pi 4$ の閾値のピーク波長が $\pi 5$ の中波長よりのピークと近いところに存在していると考えられ, 実験 2 で得られた分光感度曲線には赤錐体に加えて緑錐体が関与している可能性が考えられた.

今回の実験で得られた, $\pi 6$ の結果は神立の単色背景野における分光感度測定の手法⁶⁾ による波長 430 nm ・明るさ 530 photopicroland の背景野を用いて測定した分光感度測定の結果と近似しており, これが従来言われてきた Stiles の $\pi 5$ よりより純粋な赤錐体系反応を表していると考えられた.

正常者においては auxiliary field method を用

いて測定した高輝度下の分光感度曲線である π_6 がより赤錐体系の分光感度の特徴を示しており、 π_5 の曲線には緑錐体系が関与していることが考えられた。

V. 結 語

正常者における T.V.I. の結果から検査光 650 nm・視角 1 度・呈示時間 200 msecond における T.V.I. は中波長領域では 2 つの成分からなり、低輝度下および高輝度下で機能している 2 つのメカニズムが関与していることが確認された。

正常者において、補助背景光を用いることにより、650 nm の検査光において低輝度下および高輝度下の分光感度曲線を求めた。

高輝度下で機能する今回 π_6 と名づけた分光感度曲線は従来から赤錐体系反応を示すといわれている π_5 の曲線の形に比べピークのバンド幅が狭く、青錐体系反応を示す π_1 π_2 π_3 や緑錐体系反応を示すといわれる π_4 の形に近い形状を示し、より純粋な赤錐体系の反応を表していると考えられた。

低輝度下での分光感度曲線である π_5 メカニズ

ムの構成には赤錐体のみでなく緑錐体視物質の関与が推察された。

ご高閲を賜りました東京慈恵会医科大学眼科学講座北原健二教授に深謝いたします。

文 献

- 1) Stiles WS. Investigation of the scotopic and trichromatic mechanism of vision by two colour threshold technique. Rev d'Optique 1949; 28: 215-37.
- 2) Stiles WS. The approach through increment threshold sensitivity. Proc Nat Acad Sci 1959; 45: 100-14.
- 3) Stiles WS. Further studies of visual mechanisms by two colour threshold method. Colloq Probl Opt Vis 1953; 1: 65-103.
- 4) Wald G. The receptors of human color vision. Science 1964; 145: 1007-17.
- 5) Vos JJ. Colorimetric and photometric properties of a 2° fundamental observer. Color Res & Appl. 1978; 3: 125-8.
- 6) 神立 敦. 単色背景野における分光感度. 日眼会誌 1993; 97: 190-5.