## 単色光背景野における分光感度

### 神 立 敦

東京慈恵会医科大学眼科学教室

## 要 約

各錐体系の分光感度測定を目的とし、単色背景光を使用して分光増分感度の測定を試みた。その結果、背景光の波長を 430 nm、その明るさを 530 photopic troland とした場合は Stiles の II 5-mechanism(赤錐体系)類似の反応が得られた。一方、背景光の波長を 700 nm、明るさを 530 photopic troland とした場合は、短波長領域では青錐体系反応、中および長波長領域では II 4-mechanism (緑錐体系) 類似の反応が得られた。本法は II-mechanism の測定と比較し短時間に容易に測定でき、さらに従来の選択的色順応法とは異なり、背景光が単色光であることから理論的な解析が可能であり、今後、正常者ならびに各種眼疾患における色光情報処理機構の解析にとって有用であることが示唆された。(日眼会誌 97:190—195、1993)

キーワード:分光感度, 視色素, 単色背景光, II-mechanism

## Spectral Sensitivities on Monochromatic Backgrounds

#### Atsushi Kandatsu

Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine

#### Abstract

The spectral sensitivities of cone mechanisms were measured on monochromatic backgrounds and the results were compared with the Stiles  $\Pi$ -mechanism. Narrow band interference filters with dominant wavelengths of 430 nm and 700 nm were used for background lights. The pattern of the spectral sensitivity curve on a 430 nm background with a retinal illuminance of 530 photopic trolands was similar to that of the Stiles  $\Pi$  5-mechanism (long wavelength-sensitive cones). The pattern of the spectral sensitivity curve on a 700 nm background with a retinal illuminance of 530 photopic trolands showed two peaks. The peak in the short wavelength region coincided with that of the short wavelength-sensitive cones and the peak in the middle and long wavelength regions coincided with the Stiles  $\Pi$  4-mechanism (middle wavelength-sensitive cones). As a result, it was suggested that this method is useful to investigate color information processing in both normal and color-defective observers. (J Jpn Ophthalmol Soc 97: 190—195, 1993)

Key words: Spectral sensitivity, Visual pigment, Monochromatic background, II-mechanism

別刷請求先:105 港区西新橋 3 - 25 - 8 東京慈恵会医科大学眼科学教室 神立 敦

(平成4年6月22日受付,平成4年7月21日改訂受理)

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

(Received June 22, 1992 and accepted in revised form July 21, 1992)

## I 緒 言

Stiles<sup>1</sup>は単色背景光下における単色検査光の閾値 測定を行う、いわゆる 2 色閾値法によって各錐体系反 応の分光感度を分離して測定する方法を確立した。本 法は、理論的には優れていたが、測定に長時間を要す る欠点があった。一方、Wald<sup>2</sup>は背景光に透過波長幅 の広いフィルターを用いて、単に増分閾値を測定する いわゆる選択的色順応法により、各錐体系反応をとら えることが可能であることを示した。選択的色順応法 は 2 色閾値法と比較して短時間に測定可能であること から臨床的にも応用されてきた<sup>314)</sup>。しかし、この色順 応法は背景光の強度により分光感度曲線のバターンが 変化すること、また背景光の波長幅が広いことから理 論的な解析が困難であることなどの問題がある。

そこで、今回われわれは、まず Stiles の 2 色閾値法の結果を用いて単色背景野における分光増分閾値の予測値を算出し、つぎに予測値に基づいて背景光用に波長幅の狭い干渉フィルターを用いて正常者における分光増分閾値測定を行った。その結果、本法により比較的容易に Stiles の II-mechanism に相当する分光感度の測定が可能であり、今後正常ならびに各種眼疾患における色光情報処理機構の解析に応用可能であると思われたので報告する。

## Ⅱ 方 法

#### 1. 予測値の算出

Stiles の II-mechanism の結果は単色背景光に対す る単色検査光の増分閾値を測定する2色閾値法の結果 を総合したものである。すなわち、2色閾値法により 得られた各 mechanism の threshold versus intensity (t.v.i.)曲線において、検査光の絶対閾値を1対数単位 上昇させるのに要する背景光の強さを field sensitivity と 規 定 し, field sensitivity を もって 各 Ⅱmechanism の分光感度が表されている. したがって, Stiles の II-mechanism の結果を用いることにより任 意の明るさおよび波長の単色背景光に対する各 mechanism の感度の予測値を求めることが可能である。今 回は、Stiles の II-mechanism として青錐体系の反応を 表す II 1, II 3. 緑錐体系の反応を表す II 4 および赤錐 体系の反応を表す II 5-mechanism の field sensitivity の値を使用し、背景光の波長を430 nm および700 nm, 明るさを530 photopic troland としたときの検査 光の増分閾値の予測値を算出した. 算出法として, ま

ず,各 mechanism の絶対閾値の予測値を Stiles<sup>5)</sup>の各 mechanism の Fechner fraction の値を利用して下記 の式により算出した.

# absolute sensitivity = Fechner fraction

ここで Fechner fraction の値として  $\Pi 1$  および  $\Pi 3$ -mechanism については 8.7%,  $\Pi 4$  については 1.9%,  $\Pi 5$ -mechanism については 1.8%を採用した。つぎに, 上記で求められた絶対閾値を用いて Stiles の求めた t. v.i. o標準曲線を適用し各波長における増分閾値の予測値を算定した。

#### 2. 分光增分閾值測定

正常被検者 3 名を対象とし、2 系列の Maxwell 視光学系を用いて単色背景光下における分光増分閾値ならびに Stiles の 基準にしたがい  $\Pi 4$  および  $\Pi 5$ -mechanism の測定を行った。検査野および背景野の大きさは、それぞれ視角 1 ならびに 8 とし、検査光刺激時間を 200 msec に設定した.

単色背景光下の分光増分閾値の測定は、背景光には 波長 430 nm および 700 nm で半値幅6 nm の干渉 フィルターを用い、明るさを530 photopic troland に 設定した。検査光は400 nm から700 nm まで10 nm 毎に変化させてそれぞれの波長について5回以上測定を行いその平均値を測定値とし、同じ実験を日を変えて2回以上行いその平均値を求めた。

検査光の波長を、 $\Pi$  4-mechanism の測定では 480 nm、 $\Pi$  5-mechanism では 650 nm とし、背景光の波長を 400 nm から 700 nm まで 10 nm 毎に変化させて閾値測定を行い、Stiles の基準にしたがって field sensitivity を算出した。同様に実験は日を変えて 2 回以上行い平均値を求めた。

なお、背景光ならびに検査光の放射量はシリコンフォトダイオード S 2281 およびフォトセンサアンプC 1837(浜松ホトニクス社製)を使用して実験ごとに測定した。

## Ⅲ 結果

## 1. 予測值

背景光の波長 430 nm, 明るさ 530 photopic troland における  $\Pi$  1,  $\Pi$  3,  $\Pi$  4,  $\Pi$  5-mechanism の感度の予測値を Stiles の結果を用いて算出し重ねて図 1 に示した. 横軸は波数(wavenumber)および波長(wavelength)を,縦軸は対数感度(log sensitivity)を表している。ここで実際に閾値測定を行った場合は,グラフ上で波長ごとに最も感度の高い点が得られることが

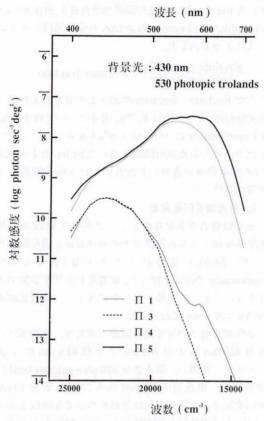


図 1 背景光の波長を430 nm, 明るさを530 photopic troland としたときの II, II3, II4 および II 5-mechanism の分光増分感度の予測値.

予測される。図 2 に、図 1 において最も感度の高い点を選択し図示した。図 1 および図 2 より,背景光を波長 430 nm,輝度 530 photopic troland として感度測定を行った場合,ほば  $\Pi$  5-mechanism に一致する結果が得られることが予測された。

つぎに、背景光の波長を700 nm、明るさを530 photopic troland としてそれぞれの mechanism の感度を算出し図1と同様に図3に示した。図4は、図3において最も感度の高い点だけを選択し図示したものである。図3および図4より、背景光を波長700 nm、輝度530 photopic troland として感度測定を行った場合、短波長領域で $\Pi$ 1-mechanism、中長波長領域でほぼ $\Pi$ 4-mechanismに一致する2峰性のバターンが得られることが予測された。

#### 2. 単色背景光下における増分閾値

背景 光 430 nm で の 増 分 感 度 の 結 果 と II 5-mechanism の結果を, 3 名の正常者についてれぞれ各

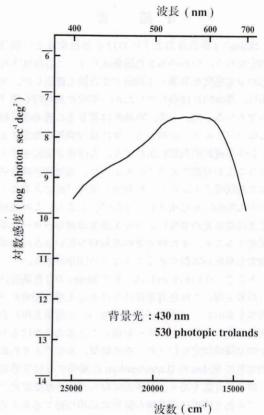


図2 図1において各波数ごとに最も感度の高い点を 結んだもの。

波長ごとに平均値を算出し同時に図 5 に示した。図中  $\Pi$  4-mechanism の結果は任意に上下に移動したものであるが,予測通り 2 つの結果はほぼ一致した。しかし,図 6 に示すように背景光 430 nm における増分感度の結果は中波長および短波長領域で $\Pi$  5-mechanism の結果と比較してやや感度が低い傾向が認められ,540 nm 付近ではいわゆる  $Stiles^{60}$ の高輝度下における赤錐体系反応である  $\Pi$  5'-mechanism に類似していた。

図 7 は,正常者 3 名の 700 nm 背景光下での増分感度と  $\Pi$  4-mechanism の結果を同時に図示したものである。図 5 と同様に,図中の  $\Pi$  4-mechanism の結果は任意に上下に移動し重ねて図示した。予測通り,背景光 700 nm における増分感度の結果の長波長側のパターンは  $\Pi$  4-mechanism の結果とほぼ一致した。

## IV 考 按

各錐体視色素の分光感度を分離して測定する一方法

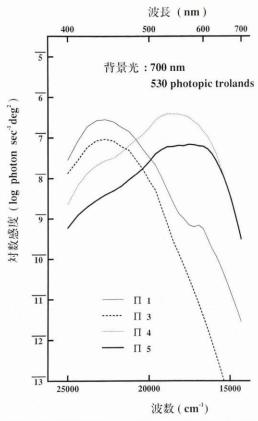


図 3 背景光の波長を700 nm,明るさを530 photopic troland としたときの  $\Pi$ 1,  $\Pi$ 3,  $\Pi$ 4 および  $\Pi$ 5-mechanism の分光増分感度の予測値.

として、Stiles は単色背景光に対する単色検査光の増分感度を測定するいわゆる 2 色閾値法を開発し、一連の実験結果から正常者に 5 つの mechanism の存在を明らかにした。 5 つの mechanism は  $\Pi$ 1 から  $\Pi$ 5 と名付けられ、それぞれの mechanism の分光特性が求められている。その分光特性により、 $\Pi$ 1、 $\Pi$ 2、 $\Pi$ 3 は青錐体系の反応を、 $\Pi$ 4 は緑錐体系の反応を、 $\Pi$ 5 mechanism は赤錐体系の反応を表すものとされている。これらの 2 色閾値法ならびに  $\Pi$ -mechanism は詳細に研究され理論的な解析が行われている。しかし、 $\Pi$ -mechanism の測定は操作が繁雑であり長時間を要するため、一般臨床で行うことは困難である。

一方,簡易法として透過波長幅の広いフィルターを背景光用に使用した,いわゆる選択的色順応法が行われ,各種の先天ならびに後天色覚異常の成立機序の解析に用いられてきた。しかし,この方法では背景光の強度を変えると分光感度曲線のバターンが変化するな

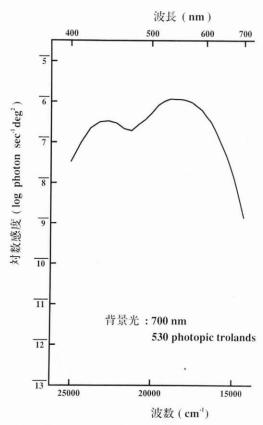


図4 図3において各波数ごとに最も感度の高い点を 結んだもの。

どの問題があり、また広い波長幅の背景光を使用しているため理論的に解析を行なうことが困難である。

そこで、今回われわれは背景光として単色光を用いて分光増分感度を求めることにより解析を行った。解析にあたり、まず波長 430 nm の高輝度背景下における増分感度により赤錐体系反応、波長 700 nm の高輝度背景下における増分感度測定により青錐体系と緑錐体系反応が得られるものと考え、明るさ530 photopic troland における各背景下に相当する増分感度の予測値を Stiles の field sensitivity と Fechner fraction の値から算出した。その結果、波長 430 nm の背景下では  $\Pi$  5、波長 700 mm 背景下では  $\Pi$  1 および  $\Pi$  4 の分光感度が得られることが判明した。

つぎに、正常者の同条件下での分光増分感度の測定を試みた。その結果、背景光を  $430~\rm nm$  としたときには  $\Pi$  5-mechanism に類似した結果が、背景光を  $700~\rm nm$  にしたときにはその長波長領域で  $\Pi$  4-mechanism に一致する結果が得られ、完全ではないものの簡便  $\Pi$ -

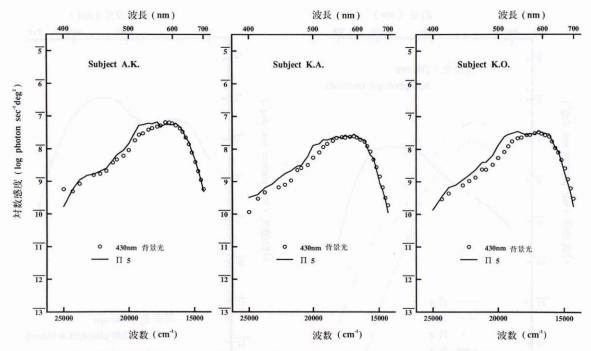


図 5 背景光の波長を 430 nm,明るさを 530 photopic troland としたときの分光増分感度および II 5-mechanism の 3 名の平均値を同時に重ねて表示したもの。

II 5-mechanism の結果は上下に移動して表示してある.

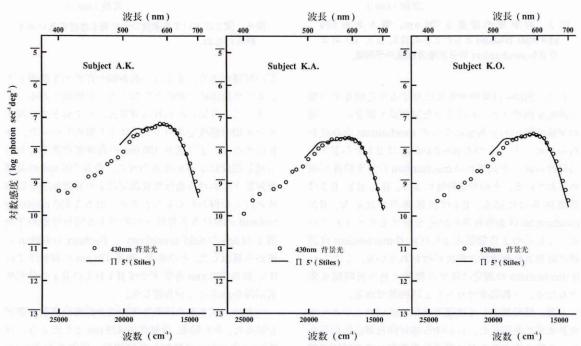


図 6 背景光の波長を 430 nm,明るさを 530 photopic troland としたときの分光増分感度および II 5'-mechanism の 3 名の平均値を同時に重ねて表示したもの。

II 5'-mechanism の結果は上下に移動して表示してある.

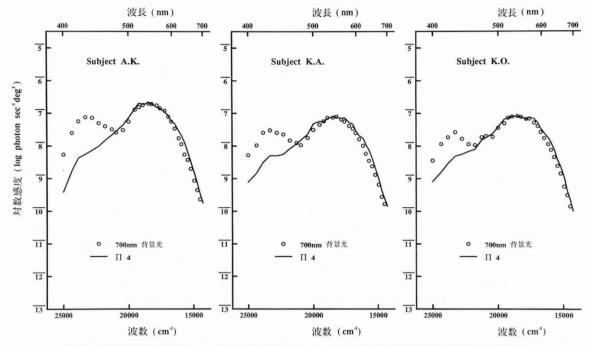


図7 背景光の波長を 700 nm,明るさを 530 photopic troland としたときの分光増分感度および II 4-mechanism の 3 名の平均値を同時に重ねて表示したもの。

II 4-mechanism の結果は上下に移動して表示してある.

mechanism に相当する分光感度を求めることが可能であった。したがって、本法は比較的短時間で容易に測定が可能であることから、今後先天ならびに後天色覚異常の解析にとって有用であることが示唆された。

ここで、背景光を  $430\,\mathrm{nm}$  したときの結果は  $\Pi$  5-mechanism とやや異なり、いわゆる Stiles の  $\Pi$  5'-mechanism に - 致するものであった。  $\Pi$  5'-mechanism は真の  $\Pi$ -mechanism ではなく  $\Pi$  5-mechanism に高輝度下の補正を行ったものである。したがって、今回の背景光  $430\,\mathrm{nm}$ ,  $530\,\mathrm{photopic}$  troland という条件が比較的高輝度であり、 $\Pi$  5-mechanism ではなく  $\Pi$  5'-mechanism に類似の結果が得られたものと思われる。しかし、 $\Pi$  5'-mechanism についてはいまだに詳細な解析がなされておらずさらに検討を要するものと思われた。

稿を終えるにあたり、御校閲を賜りました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 28: 215 —237, 1949.

- Wald G: The receptors of human color vision. Science 145: 1007—1017, 1964.
- Marré M: The investigation of acquired colour vision deficiencies. In: Colour 73, 2nd Congr AIC, York 1973, Hilger, London, 99—135, 1973.
- 4) Marré M: Wald-Marre approach to measurements of the three primary color vision mechanisms (CVM). In: Pokorny J, et al (Eds): Congenital and acquired color vision defects. Grune & Stratton, New York, 160—172, 1979.
- Stiles WS: Further studies of visual mechanisms by the two colour threshold method.
  Coloq Probl Opt Vis 1: 65—103, 1953.
- Stiles WS: Color vision: The approach through increment threshold sensitivity. Proc Nat Acad Sci 45: 100—114, 1959.