

黄斑色素の分光吸収特性の測定

三原 敬, 久保 朗子, 神立 敦, 北原 健二

東京慈恵会医科大学眼科学教室

要 約

波長 430 nm の単色光背景野における分光感度が赤錐体系のみの特性を表すことを利用し, 中心部と, 黄斑色素の影響がない中心外部位における分光感度測定を施行し, 黄斑色素の分光吸収特性の算出を試みた. 対象は正常者3名とし, 背景野は, 大きさを視角 8°, 波長 430 nm, 明るさを 530 photopic trolands に設定し, 検査光は, 視角 1°, 提示時間を 200 msec, 波長は 400~700 nm まで 10 nm 間隔とした. 以上の条件で, 中心部および中心外 10°部位においてそれぞれ分光感度を測定し, 両者の感度差を求め, 520 nm より長波長領域では黄斑色素の濃度を 0 と仮定することにより黄斑色素の光学濃度を算出した. その結果, 約 460 nm をピークとする分光吸収特性が得られ, 従来報告されている結果とほぼ一致した. したがって, 本法において容易に黄斑色素の分光吸収特性を測定することが可能であり有意義と考えた. (日眼会誌 97:1325-1331, 1993)

キーワード: 黄斑色素, 分光感度, 単色背景野

Optical Density of Human Macular Pigment in Spectral Sensitivity Measurements

Kei Mihara, Akiko Kubo, Atsushi Kandatsu
and Kenji Kitahara

Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine

Abstract

Optical density of the human macular pigment was measured by studying the spectral sensitivities to 1°, 200 ms test flashes on a 430 nm monochromatic background in the fovea and 10° outside the fovea. Narrow-band (6 to 10 nm half band width) interference filters were used for the test lights. The difference between the spectral sensitivity in the fovea and outside the fovea coincided with the optical density of the macular pigment estimated previously by psychophysical means. We suggest that this method is useful for investigating the optical density of human macular pigment. (J Jpn Ophthalmol Soc 97:1325-1331, 1993)

Key words: Macular pigment, Spectral sensitivity, Monochromatic background

I 緒 言

生体における黄斑色素の分光吸収特性の測定は,

種々の心理物理学的方法^{1)~3)}および網膜濃度法⁴⁾などを用いて測定されている. これらの方法は, 主として中心部と黄斑色素の影響がない中心外部位との分光感

別刷請求先: 105 港区西新橋 3-19-18 東京慈恵会医科大学眼科学教室 三原 敬
(平成5年3月31日受付, 平成5年6月15日改訂受理)

Reprint requests to: Kei Mihara, M.D. Department of Ophthalmology, Jikei University School of Medicine, 3-19-18 Nishi-shinbashi, Minato-ku 105, Japan

(Received March 31, 1993 and accepted in revised form June 15, 1993)

度差を利用して黄斑色素の分光吸収特性を算出しているが、いずれも測定が煩雑であり、長時間を要することから、臨床的に応用することは困難である。

今回我々は、波長 430 nm の単色光背景野における分光感度が赤錐体系のみの特性を表すことを利用し⁵⁾、中心部と黄斑色素の影響がない中心外部位において分光感度測定を施行し、直接その差を求めることにより黄斑色素の分光吸収特性を算出し、従来の結果と比較検討した。

II 方 法

対象は、年齢 26~36 歳までの色覚正常者 3 名とした。分光感度測定には 150 W のキセノンランプを光源とした 2 系列のマックスウェル視光学系を使用した。背景野の大きさを視角 8°, 波長を 430 nm, 明るさを 530 photopic trolands に設定し、検査光は、視角 1° で、呈示時間を 200 msec, 波長は 400~700 nm まで 10 nm 間隔とし、それぞれの波長について 5 回以上の閾値測定を行い、その平均値を測定値とした。中心部および中心外部位ともに日を変えてそれぞれ 3 回測定を行

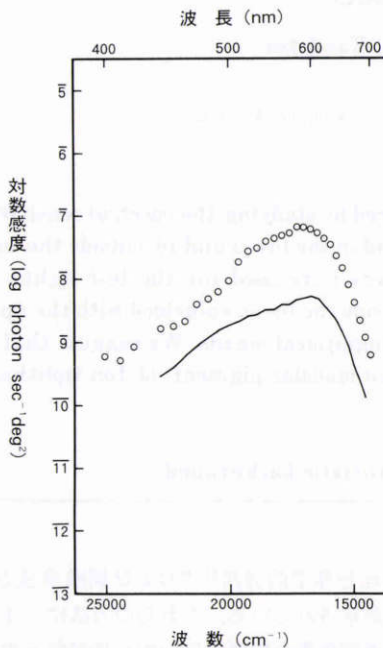


図1 被検者 AK の 430 nm 単色背景野における分光感度。

丸印は中心部、実線は中心外 10° 部位における 3 回の測定結果の平均値。両者ともに 580~600 nm 付近にピークを有する赤錐体系の反応が得られている。

○：中心部 —：中心外 10° 部位

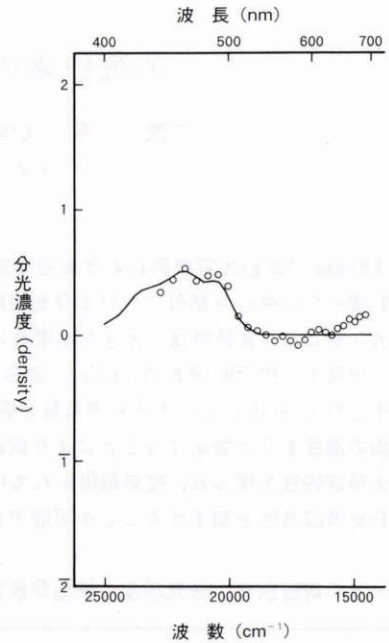


図2 丸印は、被検者 AK における黄斑色素の分光濃度。実線は Wyszecki ら⁴⁾の黄斑色素の分光濃度。両者は、ほぼ類似のパターンを示す。○：被検者 —：Wyszecki & Stiles

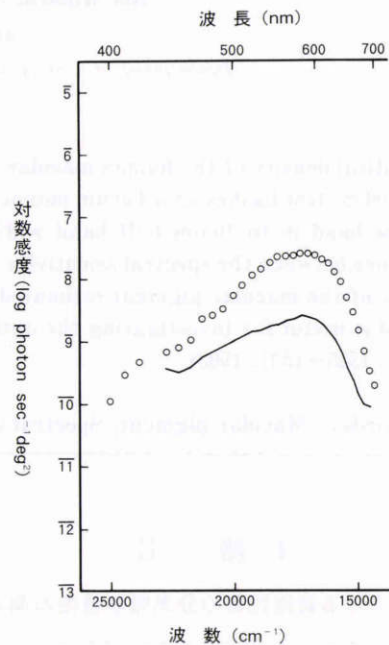


図3 被検者 KA の 430 nm 単色背景野における分光感度。

図1同様 580~600 nm 付近にピークを有する赤錐体系の反応が得られている。○：中心部 —：中心外 10° 部位

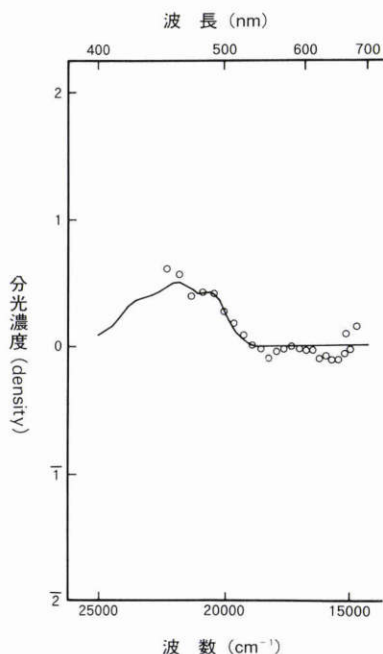


図 4 被検者 KA における黄斑色素の分光濃度。

従来の約 460 nm 付近にピークを有する黄斑色素の分光濃度と比較し、ややばらつきを認めた。○：被検者 —：Wyszecki & Stiles

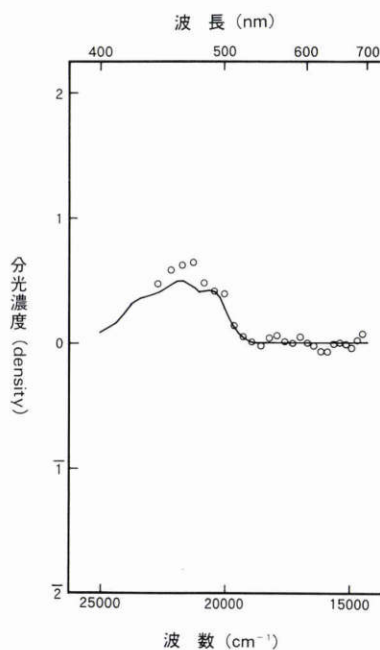


図 6 被検者 KM における黄斑色素の分光濃度。

Wyszecki らの結果とほぼ同様のパターンを認めた。○：被検者 —：Wyszecki & Stiles

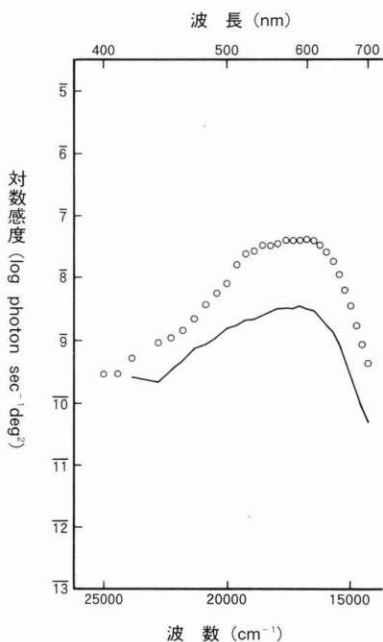


図 5 被検者 KM の 430 nm 単色背景野における分光感度。○：中外部 —：中心外 10°部位

い、その平均値を求めたが、今回は黄斑色素の影響を受けない部位として中心外耳側 10°の位置を選択した。なお、中心外部位における測定は、耳側 10°の方向に固視点を提示し、被検者が固視することにより中心外耳側 10°部位に背景光ならびに検査光が当たるようにした。ここで、従来の報告においては黄斑色素の光学濃度は 540 nm より長波長側においては 0 とされていることから⁶⁾、今回得られた 2 つの感度曲線の感度差を求め、540 nm の値を 0 とし、黄斑色素の光学濃度とした。

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

図 1 は、被検者 AK における波長 430 nm 背景光下の分光感度測定の結果を示したものである。横軸は波数および波長を、縦軸は対数感度を表している。図中、丸印は中心部、実線は中心外 10°部位におけるそれぞれ 3 回の測定結果の平均値を示したものである。両者ともに 580~600 nm 付近にピークを有する赤錐体系

の反応が得られている。図2は、これら中心部と中心外部位の感度差を求め、540 nmにおける値を0とすることにより得られた結果を丸印で示したものである。図中、同時に Wyszecki ら⁶⁾の黄斑色素の分光濃度の結果を実線で示したが、両者はほぼ類似のパターンを示すことが確認された。

同様に、図3および図4に、色覚正常者KAの結果を、図5および図6に色覚正常者KMの結果を示した。被検者KAにおいては、短波長領域の感度が低下していたために、他2名と比較して短波長領域で多少ばらついた結果を示したが、いずれの被検者においても波長460 nmにピークを持つ曲線が得られ、網膜における黄斑色素の分光濃度測定が可能であることが確認された。また、波長460 nmにおける光学濃度は被検者AKにおいては0.52、被検者KAにおいては0.58、

被検者KMにおいては0.64であった。

なお、表1に被検者AK、表2に被検者KA、表3に被検者KMの中心部および中心外部位における分光濃度の実測値を示した。

IV 考 按

1945年Wald¹⁾は、中心部と中心外8°部位において各波長に対する錐体系反応の閾値を測定し比較検討した結果、中波長から長波長領域においては両者の差はほぼ一定であるにもかかわらず、短波長領域において中心部の感度が著明に低下することを報告し、黄斑色素によるものと考えた。また、その差がキサントフィルの波長吸収特性とよく類似していることから、黄斑色素はキサントフィルであろうと推定した。しかし、この方法は、両部位における本来の錐体系分光感度が

表1 被検者AKの430 nm単色背景野における分光感度の実測値

波長(nm)	中心部 1回目	中心部 2回目	中心部 3回目	中心部 平均値	中心外部 1回目	中心外部 2回目	中心外部 3回目	中心外部 平均値
400		-9.244		-9.24				
410	-9.463	-8.817	-9.643	-9.31				
420	-9.303	-8.535	-9.393	-9.08				
440	-9.026	-8.276	-9.108	-8.8		-9.562		-9.56
450	-8.992	-8.242	-9.069	-8.77	-9.478	-9.444	-9.373	-9.43
460	-8.899	-8.163	-8.966	-8.68	-9.3	-9.216	-9.242	-9.25
470	-8.597	-7.984	-8.686	-8.42	-9.171	-9.072	-9.03	-9.09
480	-8.543	-7.814	-8.634	-8.33	-9.03	-8.921	-8.921	-8.96
490	-8.406	-7.695	-8.543	-8.21	-8.875	-8.797	-8.817	-8.83
500	-8.188	-7.557	-8.376	-8.04	-8.835	-8.719	-8.705	-8.75
510	-7.894	-7.281	-8.042	-7.74	-8.748	-8.664	-8.647	-8.69
520	-7.678	-7.106	-7.914	-7.57	-8.658	-8.589	-8.55	-8.6
530	-7.628	-7.006	-7.88	-7.52	-8.602	-8.595	-8.536	-8.58
540	-7.529	-6.989	-7.72	-7.41	-8.535	-8.508	-8.458	-8.5
550	-7.488	-6.948	-7.65	-7.36	-8.585	-8.503	-8.405	-8.5
560	-7.434	-6.912	-7.602	-7.32	-8.49	-8.453	-8.329	-8.42
570	-7.437	-6.869	-7.544	-7.28	-8.527	-8.417	-8.308	-8.42
580	-7.353	-6.741	-7.454	-7.18	-8.435	-8.33	-8.294	-8.35
590	-7.343	-6.766	-7.464	-7.19	-8.425	-8.306	-8.225	-8.32
600	-7.39	-6.787	-7.468	-7.22	-8.385	-8.241	-8.248	-8.29
610	-7.448	-6.856	-7.531	-7.28	-8.417	-8.271	-8.293	-8.33
620	-7.556	-6.938	-7.608	-7.37	-8.511	-8.419	-8.387	-8.44
630	-7.677	-7.028	-7.714	-7.47	-8.635	-8.526	-8.525	-8.56
640	-7.834	-7.236	-7.876	-7.65	-8.743	-8.642	-8.681	-8.69
650	-8.05	-7.448	-8.063	-7.85	-8.956	-8.849	-8.813	-8.87
660	-8.312	-7.71	-8.306	-8.11	-9.091	-9.099	-9.041	-9.08
670	-8.578	-8.075	-8.543	-8.4	-9.462	-9.36	-9.349	-9.39
680	-8.891	-8.272	-8.873	-8.68	-9.684	-9.608	-9.595	-9.63
690	-9.172	-8.53	-9.148	-8.95	-9.933	-9.828	-9.903	-9.89
700	-9.443	-8.808	-9.443	-9.23		-10.101		-10.1

(単位 log photon sec⁻¹deg²)

表 2 被検者 KA の 430 nm 単色背景野における分光感度の実測値

波長(nm)	中心部 1回目	中心部 2回目	中心部 3回目	中心部 平均値	中心外部 1回目	中心外部 2回目	中心外部 3回目	中心外部 平均値
400			-9.96	-9.96				
410	-9.476	-9.384	-9.748	-9.54				
420	-9.267	-9.198	-9.569	-9.34				
440	-9.213	-8.972	-9.369	-9.18		-9.453		-9.45
450	-9.077	-8.936	-9.31	-9.11	-9.534	-9.341	-9.645	-9.51
460	-8.945	-8.825	-9.167	-8.98	-9.412	-9.271	-9.587	-9.42
470	-8.644	-8.478	-8.842	-8.65	-9.24	-9.165	-9.385	-9.26
480	-8.58	-8.441	-8.739	-8.59	-9.147	-9.119	-9.258	-9.17
490	-8.446	-8.339	-8.694	-8.49	-9.085	-8.996	-9.164	-9.08
500	-8.257	-8.129	-8.417	-8.27	-9.016	-8.858	-9.132	-9
510	-8.139	-7.95	-8.219	-8.1	-8.923	-8.812	-9.017	-8.92
520	-7.933	-7.768	-8.109	-7.94	-8.852	-8.775	-8.936	-8.85
530	-7.855	-7.686	-7.97	-7.84	-8.805	-8.822	-8.876	-8.83
540	-7.758	-7.57	-7.909	-7.75	-8.781	-8.812	-8.704	-8.77
550	-7.685	-7.539	-7.74	-7.65	-8.694	-8.78	-8.738	-8.74
560	-7.65	-7.468	-7.793	-7.64	-8.644	-8.673	-8.724	-8.68
570	-7.715	-7.421	-7.767	-7.63	-8.635	-8.632	-8.688	-8.65
580	-7.662	-7.421	-7.72	-7.6	-8.623	-8.549	-8.634	-8.6
590	-7.658	-7.421	-7.722	-7.6	-8.628	-8.577	-8.657	-8.62
600	-7.713	-7.41	-7.776	-7.63	-8.584	-8.719	-8.686	-8.66
610	-7.776	-7.517	-7.805	-7.7	-8.677	-8.741	-8.785	-8.73
620	-7.841	-7.615	-7.835	-7.76	-8.811	-8.848	-8.918	-8.86
630	-7.976	-7.712	-8.005	-7.9	-8.926	-8.931	-9.085	-8.98
640	-8.09	-7.91	-8.191	-8.06	-9.162	-9.137	-9.209	-9.17
650	-8.358	-8.145	-8.437	-8.31	-9.323	-9.484	-9.451	-9.42
660	-8.573	-8.41	-8.67	-8.55	-9.514	-9.695	-9.627	-9.61
670	-8.894	-8.626	-8.992	-8.84	-9.709	-10.042	-9.861	-9.87
680	-9.259	-9.011	-9.249	-9.17	-9.863	-10.222	-9.981	-10.02
690	-9.572	-9.346	-9.55	-9.49	-10.005		-10.103	-10.05
700	-9.804	-9.577	-9.779	-9.72				

(単位 log photon sec⁻¹deg²)

異なることが考えられることから問題を有していた⁷⁾。そこで、中心部と中心外部位における分光感度が本来同一であることが推察される単一錐体、または単一機構体を利用して黄斑色素の光学濃度を求める試みがなされてきた。

しかし、II-機構体を利用する方法は、膨大な測定時間を要する。Stiles²⁾は、II 1 メカニズムに相当する機構体を用いて、中心部と周辺部との閾値を比較することにより黄斑色素の濃度を測定した。Stabell ら³⁾は、高輝度の白色背景光とフリッカー刺激光を用いることにより、青錐体系の関与を除外したうえで、閾値特性から黄斑色素の濃度を測定した。同様に、Pease ら⁴⁾は、高輝度の赤色背景野とフリッカー刺激光を用いて緑錐体のみの波長吸収特性を抽出し、黄斑色素の濃度を測定した。しかし、単一錐体系反応であるという証明は

なされていない。

今回、我々は単一錐体系の分光吸収特性は中心部と中心外部位とで同じであることを前提として、波長 430 nm の単色光背景野を用いることにより、赤錐体系のみ、すなわち単一錐体系の波長吸収特性を抽出し、中心部と周辺部における感度差を比較して黄斑色素の濃度の測定を試みた。表 4 に、黄斑色素の光学濃度および濃度のピークについて本実験結果とともに過去の結果を示した。本実験結果は、過去の報告に認められるように、約 460 nm がピークであり分光吸収特性の結果とはほぼ一致していた。なお、本実験においては、3名の黄斑色素の光学濃度は、約 0.58 ± 0.048 と著明な個人差は認められなかったが、Pease ら⁴⁾の報告のように、光学濃度 0.77 から 0.21 と著明な個人差を示しているものもあり、また、黄斑色素の人種差を指摘

表3 被検者 KM の 430 nm 単色背景野における分光感度の実測値

波長(nm)	中心部 1回目	中心部 2回目	中心部 3回目	中心部 平均値	中心外部 1回目	中心外部 2回目	中心外部 3回目	中心外部 平均値
400	-9.532			-9.53				
410	-9.477		-9.569	-9.52				
420	-9.238	-9.288	-9.307	-9.28	-9.588			-9.59
440	-9.056	-8.957	-9.12	-9.04	-9.684	-9.756	-9.567	-9.67
450	-8.952	-8.873	-9.053	-8.96	-9.493	-9.589	-9.358	-9.48
460	-8.839	-8.785	-8.886	-8.84	-9.327	-9.462	-9.18	-9.32
470	-8.651	-8.587	-8.754	-8.66	-9.136	-9.252	-8.974	-9.12
480	-8.401	-8.454	-8.454	-8.44	-9.038	-9.22	-8.926	-9.06
490	-8.267	-8.158	-8.361	-8.26	-8.949	-9.108	-8.795	-8.95
500	-8.152	-7.919	-8.223	-8.1	-8.809	-8.903	-8.705	-8.81
510	-7.817	-7.65	-7.927	-7.8	-8.775	-8.892	-8.611	-8.76
520	-7.591	-7.502	-7.792	-7.63	-8.689	-8.85	-8.504	-8.68
530	-7.569	-7.423	-7.733	-7.58	-8.684	-8.835	-8.483	-8.67
540	-7.427	-7.387	-7.668	-7.49	-8.624	-8.766	-8.427	-8.61
550	-7.437	-7.367	-7.658	-7.49	-8.564	-8.678	-8.397	-8.55
560	-7.469	-7.283	-7.642	-7.46	-8.495	-8.633	-8.366	-8.5
570	-7.44	-7.197	-7.55	-7.4	-8.476	-8.628	-8.357	-8.49
580	-7.411	-7.306	-7.488	-7.4	-8.529	-8.644	-8.332	-8.5
590	-7.438	-7.281	-7.499	-7.41	-8.476	-8.567	-8.328	-8.46
600	-7.438	-7.231	-7.521	-7.4	-8.595	-8.562	-8.352	-8.5
610	-7.494	-7.209	-7.517	-7.41	-8.579	-8.629	-8.381	-8.53
620	-7.596	-7.249	-7.592	-7.48	-8.733	-8.762	-8.446	-8.65
630	-7.72	-7.382	-7.699	-7.6	-8.792	-8.934	-8.578	-8.77
640	-7.853	-7.561	-7.877	-7.76	-8.89	-8.999	-8.734	-8.87
650	-7.978	-7.844	-8.084	-7.97	-9.058	-9.224	-8.919	-9.07
660	-8.254	-8.119	-8.3	-8.22	-9.389	-9.466	-9.137	-9.33
670	-8.479	-8.385	-8.525	-8.46	-9.688	-9.718	-9.39	-9.6
680	-8.775	-8.742	-8.792	-8.77	-9.908	-9.921	-9.708	-9.85
690	-9.048	-9.073	-9.087	-9.07	-10.162	-10.236	-9.904	-10.1
700	-9.442	-9.331	-9.388	-9.38	-10.379	-10.345	-10.175	-10.3

(単位 log photon sec⁻¹deg²)

表4 黄斑色素の光学濃度の各報告者の比較

著者	方法	被検者数 (人)	ピークの波長 (nm)	濃度 (density)
Wald ¹⁾ (1945)	Sensitivity	10	460	0.50
Stiles ²⁾ (1953)	Sensitivity	1	460	0.50
Stabell ³⁾ (1980)	Sensitivity	1	460	0.28
Kilbride ⁴⁾ (1988)	Fundus reflectometry	7	460	0.22-0.45
Pease ⁵⁾ (1987)	Sensitivity	27	460	0.21-0.77
著者ら	Sensitivity	3	460	0.52, 0.58, 0.64

する報告¹⁰⁾もみられているが、被検者は3名と少数であることから、今後の検討を要するものと思われる。

以上、本法においては測定が比較的容易であることから、臨床的にも黄斑色素の分光吸収特性を測定することが可能であり有意義であると考えた。

この論文の要旨は第96回日本眼科学会総会で発表した。

文 献

- 1) Wald G: Human vision and the spectrum. Science 101: 653-658, 1945.
- 2) Stiles WS: Further studies of visual mechanisms by the two-colour threshold method. Coloq Probl Opt Vis (UIPAP, Madrid) 1: 65

- 103, 1953.
- 3) **Stabell U, Stabell B**: Variation in density of macular pigmentation and short wave cone sensitivity with eccentricity. *J Opt Soc Am* 70: 706—711, 1980.
 - 4) **Kirbride PE, Alexander KR, Fishman M, Fishman GA**: Human macular pigment assessed by imaging fundus reflectometry. *Vision Res* 29: 663—674, 1988.
 - 5) **神立 敦**: 単色背景野における分光感度. *日眼会誌* 97: 190—195, 1993.
 - 6) **Wyszecki G, Stiles WS**: *Color Science*. 2nd edn: Wiley, New York, 1982.
 - 7) **Weale RA**: Spectral sensitivity and wavelength discrimination of the peripheral retina. *J Physiol* 119: 170—190, 1953.
 - 8) **Pease PL, Adams AJ**: Macular pigment difference spectrum from sensitivity measures of a single cone mechanism. *Am J Optom Physiol Opt* 60: 667—672, 1983.
 - 9) **Pease PL, Adams AJ, Nuccio E**: Optical density of human macular pigment. *Vision Res* 27: 705—710, 1987.
 - 10) **Ishak GH**: The photopic luminosity curve for a group of fifteen Egyptian trichromats. *J Opt Soc Am* 42: 529—534, 1952.
-