

2 色型色覚異常者における単色閃光 ERP (Early Receptor Potential) 所見

鳥取大学医学部眼科学教室 (主任 玉井嗣彦教授)

高知医科大学眼科学教室 (主任 上野脩幸教授)*

玉井嗣彦・山崎厚志・嶋田一徳・佐々木勇二・中尾 寛
和田秀文*

Monochromatic flash early receptor potential (ERP) in dichromats

Akihiko TAMAI, Atsushi YAMASAKI, Kazunori SHIMADA,
Yuji SASAKI, Hiroshi NAKAO and Hidefumi WADA

*Department of Ophthalmology, Faculty of Medicine,
Tottori University, Yonago 683, Japan*

*Department of Ophthalmology, Kochi Medical School,
Nankoku 783, Japan**

ABSTRACT

The human monochromatic flash early receptor potential (ERP) is generated in the outer segments of the red-, green- and blue-sensitive cones and is closely coupled with the respective visual pigments—erythrolabe, chlorolabe and cyanolabe under the experimental conditions hereinafter. The monochromatic flash ERP was studied in 16 dichromats: 6 protanopes (12 eyes) and 10 deuteranopes (20 eyes). MIF-W interference filters (Vacuum Optics Corporation of Japan Co.) used were (1) No. 21 (λ_0 600 nm, $\Delta \lambda_{1/2}$ 12 nm, T_{max} 46 %); (2) No. 14 (λ_0 532 nm, $\Delta \lambda_{1/2}$ 13 nm, T_{max} 43%); and (3) No. 7 (λ_0 457.5 nm, $\Delta \lambda_{1/2}$ 14.5 nm, T_{max} 48%) for the red, green and blue flash ERPs, respectively. The ERP amplitude was measured between the peaks of the initial cornea-positive phase (R₁) and the later cornea-negative phase (R₂).

Mean amplitudes of the red flash ERP and green flash ERP were very significantly decreased in the protanopes ($P < 0.001$) and deuteranopes ($P < 0.001$), in comparison with the corresponding data for 10 normal subjects (20 eyes). The mean amplitude of the blue flash ERP was significantly lower than normal ($P < 0.001$) in the deuteranopes.

The mean ratio of the blue flash ERP amplitude to the red flash ERP amplitude showed a highly significant increase in the protanopes ($P < 0.001$) and a highly significant decrease in the deuteranopes ($P < 0.001$), compared with the mean ratio in the normal subjects, indicating a useful index for the objective clinical detection of congenital red-green color defects.

(Accepted on March 5, 1991)

色覚異常のメカニズムは複雑であるが、2色型色覚異常者においては、3種の感光色素のうち第1色覚異常 protan では red-sensitive cone (以下 red cone) 外節中の red-sensitive pigment である erythrolabe, 第2色覚異常 deutan では green sensitive cone (以下 green cone) 外節中の green-sensitive pigment である chlorolabe, 第3色覚異常 tritan では blue-sensitive cone (以下 blue cone) 外節中の blue-sensitive pigment である cyanolabe がそれぞれ減少ないし欠如 (tritan においてはなお疑問点が多いが) している可能性が指摘されている^{13)~7)}。したがって、色覚の input 機構にあずかる視細胞レベルにおいて、とくに外節内錐体感光色素の量的、質的異常のもたらす影響は大きいものといえる。

赤色、緑色、青色の各閃光刺激を用いての早期視細胞電位 (early receptor potential, ERP) は、錐体細胞外節由来の電位を主として反映する¹³⁾。さきに、第1色盲 protanopia, 第2色盲 deuteranopia を対象に、色フィルター (Kodak Wratten filter) 使用下での色光刺激 ERP (spectrally selective flash ERP) の動態を観察し、色覚検査における他覚的検査としての有用性

を指摘した⁹⁾¹⁰⁾。

今回は、同上2色型色覚異常者を対象に、波長特性を利用して、分光感度と感光色素の吸収の面より、より精度の高い検討が可能である干渉フィルター使用下での単色閃光 ERP (monochromatic flash ERP)⁹⁾¹³⁾を駆使して、一層の検討を加えたのでここに報告する。

実験方法

1. ERP 記録装置ならびに方法

図1のブロック図に示したごとく、増幅器には日本光電工業社製の生体電気用増幅器 (S-1516) を時定数0.01sec, high cut 10kHz で使用した。記録と観察には同社製データ処理アドスコープII (ATAC-350) ブラウン管モニターおよび X-Y レコーダー用インターフェイス (ZC-131M) を介して、理化電気工業社製の X-Y レコーダー (RW-101S) を用いた。モニター部の波形は、随時浅沼製作所製の King Oscillopolaphy (5R32) 付属の King CRT Camera (M750) により撮影を行った。

閃電極には半田屋製の ERG 用 Riggs 型角膜白金電極を用い、緩衝液には生理的食塩水を用いた。

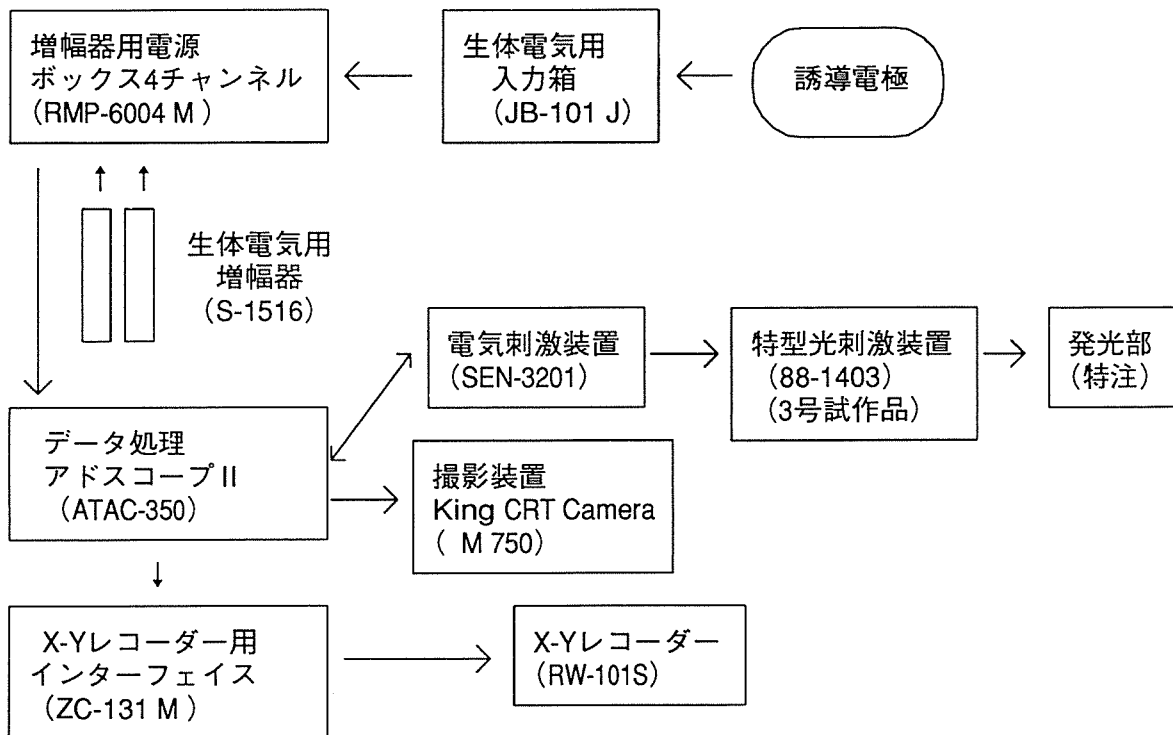


図1 ERP測定装置ブロック図

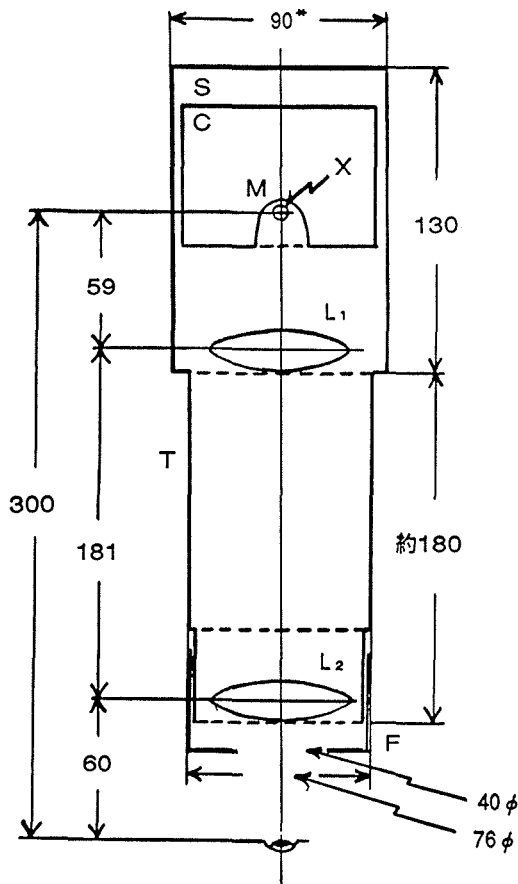


図2 特型光刺激装置発光部模式図 (3号試作品)
 X: xenon放電管, M: 反射鏡, C: コンデンサーセット部, S: シールドケース, T: 照射筒,
 L₁: 8D凸レンズ, L₂: 16D凸レンズ, F: 干渉フィルター用アタッチメント。
 *mm単位

なお、閃電極の装着にさきだち、0.5%トロピカミドおよび0.5%塩酸フェニレフリン(ミドリンP®)で散瞳、0.4%オキシプロカイン(ベノキシル®)にて表面麻酔が施行された。不閃電極、接地電極には日本光電工業社製の脳波用銀盤電極を用い、前者は眉間部に、後者に耳朶に電極糊を介してセットした。セット部には Becquerel 効果による artifact¹³⁾¹⁵⁾の混入を防ぐ意味において、さらに黒色の絶縁テープを貼布した。

光刺激装置には同社製の特型光刺激装置 (88-1403) ならびに牛尾電気 (東京ゼノン) に特別注文して作成させた xenon 放電管を内蔵する発光部装置 (3号試作品)⁹⁾ (図1, 図2) を用いた。射出光部を除いて発光部全体をパーマロイ板 (厚さ約2mm) で3重にシールドすることにより、電磁誘導に起因すると思われる stimulus artifact¹³⁾¹⁵⁾の除去に努めた。なお、本装置は色光刺激ERP用の色フィルターを適宜発光部本体に挿入して使用することができる⁹⁾が、今回は照射筒先端にセットされた干渉フィルター用アタッチメント (図2 F) に各種干渉フィルター (後述) を挿入して検査を行った。

放電エネルギーは21.5Jであったが、420 μ Fのコンデンサーを xenon 放電管に近接してセットすることにより回路の抵抗による瞬時の大電流の減衰を最小限に抑えることができ、コンデンサー両端電圧は320Vで、閃光時間 (1/3光出力 (h))

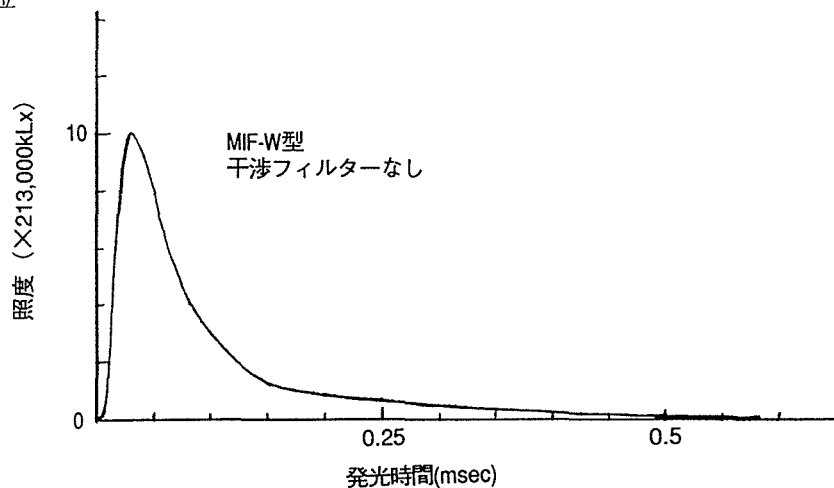


図3 刺激光の時間特性 (3号試作品)
 xenon放電管より30cmの距離で、photodiode (Sharp SBC-541) で測定。放電エネルギー: 21.5J (コンデンサー両端電圧: 320V, コンデンサー容量: 420 μ F)。発光時間: 約0.5msec, 閃光ピーク時間: 30 μ sec, 閃光時間 [1/3光出力 (h)]: 約76 μ sec, 閃光ピーク時の照度: 2,130,000kLx。

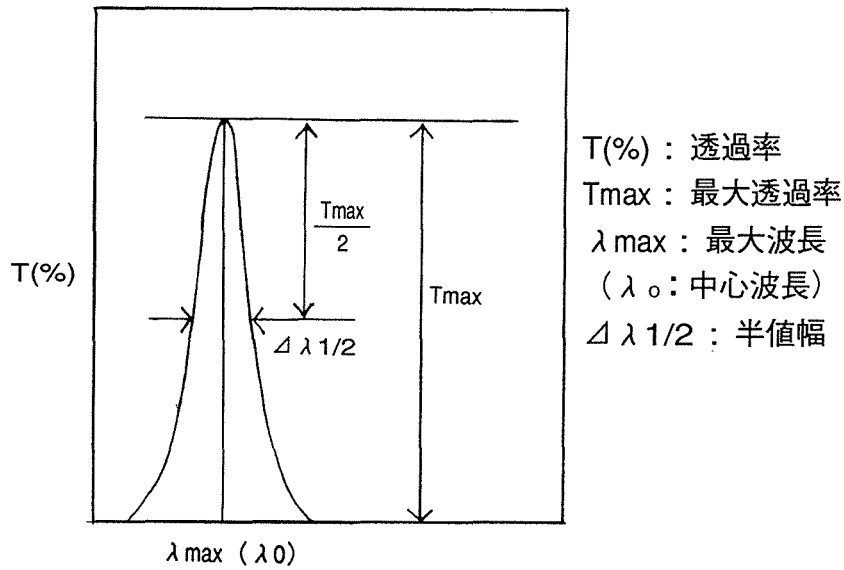


図4 フィルター特性の表示法

表1. 単色閃光ERP用干渉フィルターとその分光特性

色	干渉フィルター*	分 光 特 性		
		λmax (λo)	Δλ1/2	Tmax
赤	No. 21	600 nm	12 nm	46%
緑	No. 14	532 nm	13 nm	43%
青	No. 7	457.5 nm	14.5 nm	48%

*日本真空光学：31分割、40φ(入射角0°のデータ)

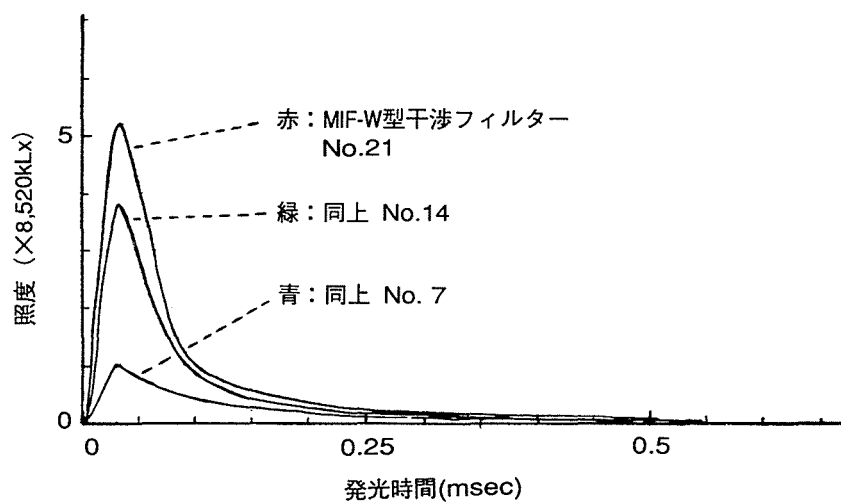


図5 各種刺激光の時間特性 (3号試作品)

xenon放電管より30cmの距離で、photodiode (Sharp SBC-541) で測定。
 放電エネルギー：21.5 J (コンデンサー両端電圧：320V, コンデンサー容量：420 μF). 閃光ピーク時の照度：45,262.5kLx(赤), 33,547.5kLx(緑), 8,520kLx(青).

で約76 μ sec(発光時間約0.5msec), 閃光ピーク時間30 μ sec, 照射筒(図2 T)より眼前5cm(xenon放電管より30cmの距離)にてのphotodiode(Sharp SBC-541)を用いての測定で, 閃光ピーク時の照度は干渉フィルターなしで2,130,000 kLxの効率のよい放電を得た(図3).

単色閃光ERPの誘導に際しては, 日本真空光学のMIF-W型干渉フィルターを用いた. フィルター特性を図4のごとく表示すると, 赤色閃光ERP用にはNo.21(最大波長(中心波長); λ_{max} (λ_0) 600nm, 半値幅 $\Delta\lambda/2$ 12nm, 最大透過率Tmax 46%), 緑色閃光ERP用にはNo.14(λ_{max} (λ_0) 532nm, $\Delta\lambda/2$ 13nm, Tmax 43%), 青色閃光ERP用にはNo.7(λ_{max} (λ_0) 457.5nm, $\Delta\lambda/2$ 14.5nm, Tmax 48%)の干渉フィルターを用いた(表1). この種フィルターの時間特性を図5に示した. 上記photodiodeを用いてxenon放電管より30cmの距離にての測定で, 閃光ピーク時の照度は赤色閃光が45,262.5kLx, 緑色閃光が33,547.5kLx, 青色閃光が8,520kLxと3者で違いをみせたが, 発光時間は約0.5msec, 閃光ピーク時間は30 μ secと共通であった.

被検者は, シールドルーム内のベットに仰臥した状態で測定を行った. 暗順応15分後に15分間隔で, 赤色閃光, 緑色閃光, 青色閃光の順にERPを誘導したが, 各シリーズにおいて初回光刺激に応ずるERP波形を観察波形として尊重した. 信憑性の確認には2分後のERP波形をもってした. 測定は右眼より行った. その際, 左眼は黒色のアイパッチで完全に遮光を行った.

ERP振幅を観察の対象としたが, その振幅は角膜陽性相R₁の頂点より角膜陰性相R₂の頂点までを測定した.

2. 対象

対象は, 石原表, 東京医大式色覚検査表(T.M.C.), 大熊式色覚検査表, Farnsworth Panel D-15, およびNagel I型アノマロスコープの検査結果より診断された8歳から20歳(平均15.2歳)の第1色盲(全て男性)6例12眼と6歳から24歳(平均14.8歳)の第2色盲(全て男性)10例20眼である(表2). 対象症例の視力は全て正常範囲であり, $\pm 4D$ をこえる屈折異常を有するものは含まれていない. 眼底は正常であり, その他の眼科的検査においても, 色覚異常を除いて著変をみなかった. 全身的にも異常はみられなかった.

対照として, 10歳から29歳(平均16.1歳)の正常者(全て男性, 正視あるいは $\pm 3D$ 以内の屈折異

表2. 正常対照者と2色型色覚異常者(第1色盲, 第2色盲)の年齢区分

対象	例数	眼数	年齢(歳)
正常者	10	20	10-29(16.1*)
第1色盲	6	12	8-20(15.2)
第2色盲	10	20	6-24(14.8)

*平均

常のみを有し他科的疾患のないもの)10例20眼を無差別に選んで用いた(表2).

結 果

上記の各種色覚検査の結果より第1色盲と診断した15歳男性例(視力両眼1.5(n.c.))において, 赤色閃光ERPは図6の上段にみるごとく, 正常

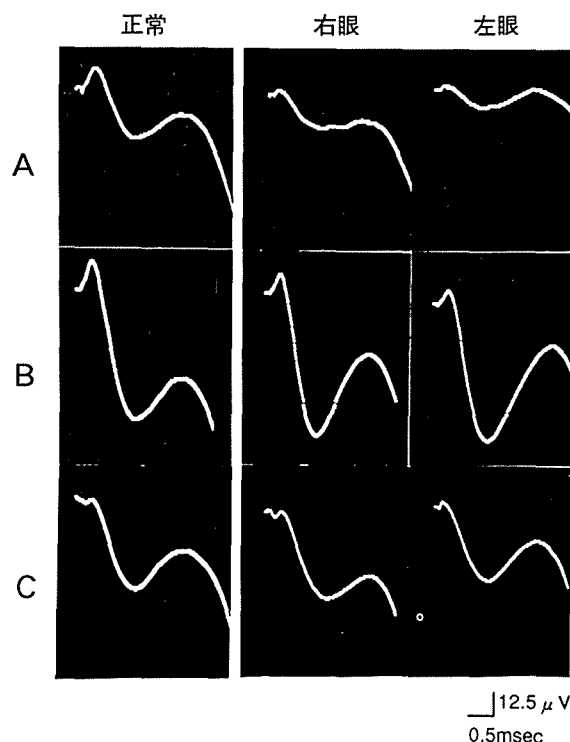


図6 第1色盲(15歳男性)の単色閃光ERP所見
正常対照は16歳男性の右眼である.
A: 赤色閃光ERP. B: 緑色閃光ERP.
C: 青色閃光ERP.

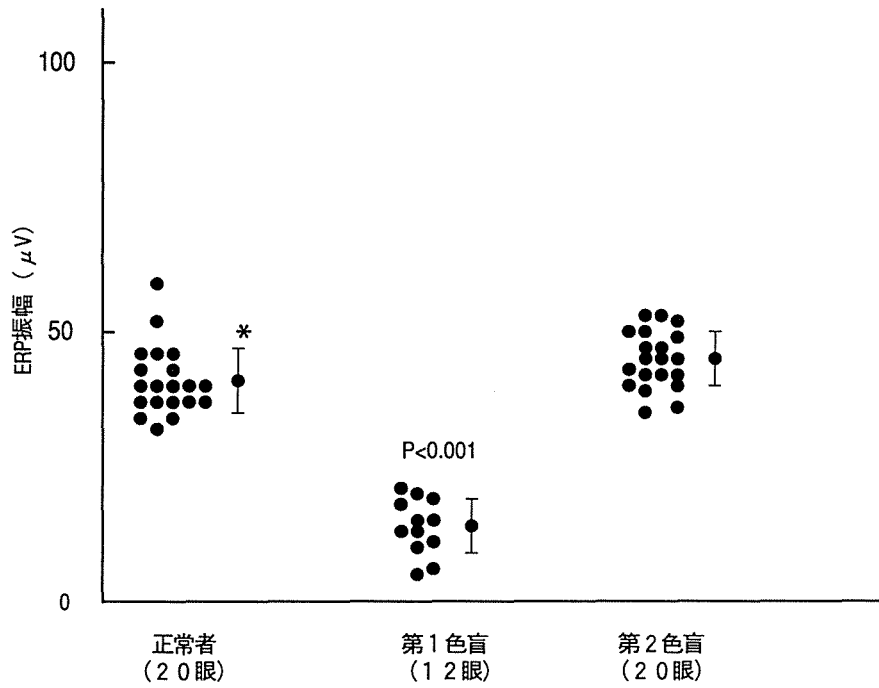


図7 正常者と第1色盲および第2色盲の赤色閃光ERP振幅の比較 (*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

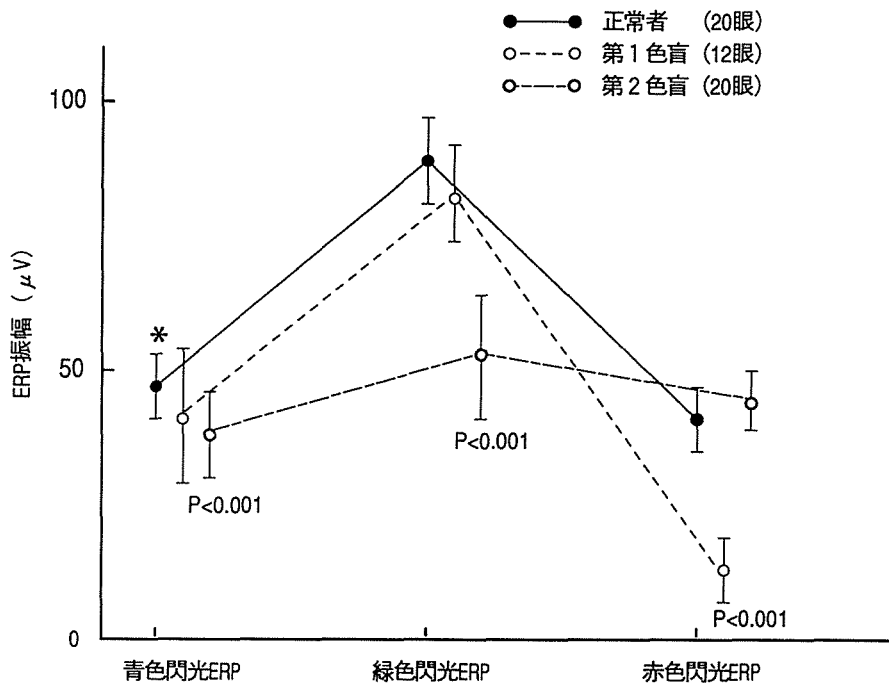


図8 正常者と第1色盲および第2色盲の単色閃光ERP振幅の比較 (*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

者(16歳男性, 右眼; 視力1.5 (n.c.)) の $31.3\mu\text{V}$ に比べて, 右眼が $18.8\mu\text{V}$, 左眼が $10.9\mu\text{V}$ と明らかな振幅減弱を示した. 一方, 緑色, 青色閃光 ERP においては図6の中段, 下段にみるごとく, 正常者の $71.9\mu\text{V}$, $41.4\mu\text{V}$ に比べて, 前者において右眼が $73.4\mu\text{V}$, 左眼が $68.8\mu\text{V}$, 後者において右眼が $41.4\mu\text{V}$, 左眼が $36.3\mu\text{V}$ と明らかな振幅変化はみられなかった.

第1色盲6例12眼の赤色閃光ERPの各振幅測

定値は図7に示したとおりであるが, その平均値 $13.7\pm 5.0\mu\text{V}$ (標準偏差) は, 正常者10例20眼の $41.2\pm 6.2\mu\text{V}$ に比べて推計学的に高度に有意 ($P < 0.001$) の振幅の低下を示した (表3, 図7, 図8). 第1色盲6例12眼の緑色, 青色両閃光ERPの各振幅測定値は図9, 図10に示したが, それぞれの平均値 $82.6\pm 9.2\mu\text{V}$ および $41.2\pm 13.7\mu\text{V}$ は正常者10例20眼の $88.5\pm 8.3\mu\text{V}$ および $41.2\pm 13.7\mu\text{V}$ に比べて有意の振幅変化を示さなかった

表3. 正常者と第1色盲の単色閃光ERP振幅ならびに青色閃光ERP振幅/赤色閃光ERP振幅比(青/赤振幅比)の比較

	ERP振幅 (μV)			青/赤振幅比 (%)
	赤色閃光	緑色閃光	青色閃光	
正常者 (20眼)	$41.2\pm 6.2^*$	88.5 ± 8.3	47.6 ± 6.2	1.2 ± 0.2
第1色盲 (12眼)	13.7 ± 5.0	82.6 ± 9.2	41.2 ± 13.7	3.1 ± 0.4
t 検定	$P < 0.001$	n.s.	n.s.	$P < 0.001$

*平均値±標準偏差

n.s.: 有意差なし ($P > 0.05$)

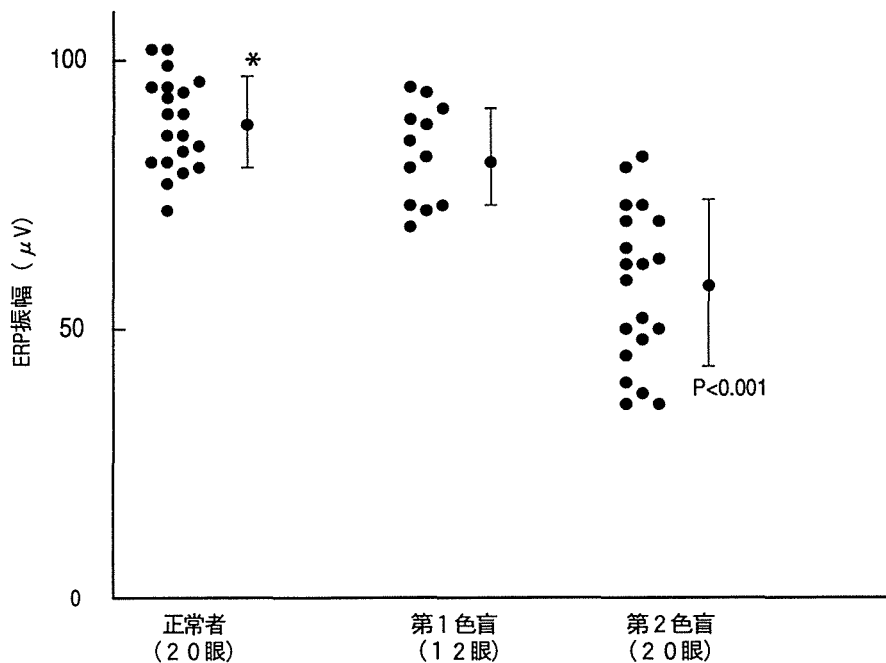


図9 正常者と第1色盲および第2色盲の緑色閃光ERP振幅の比較 (*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

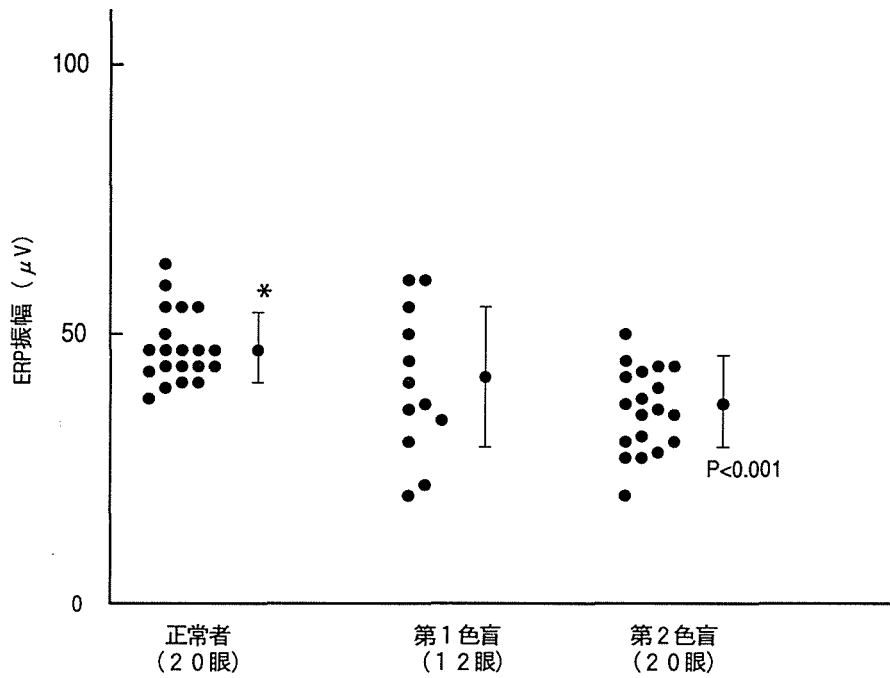


図10 正常者と第1色盲および第2色盲の青色閃光ERP振幅の比較 (*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

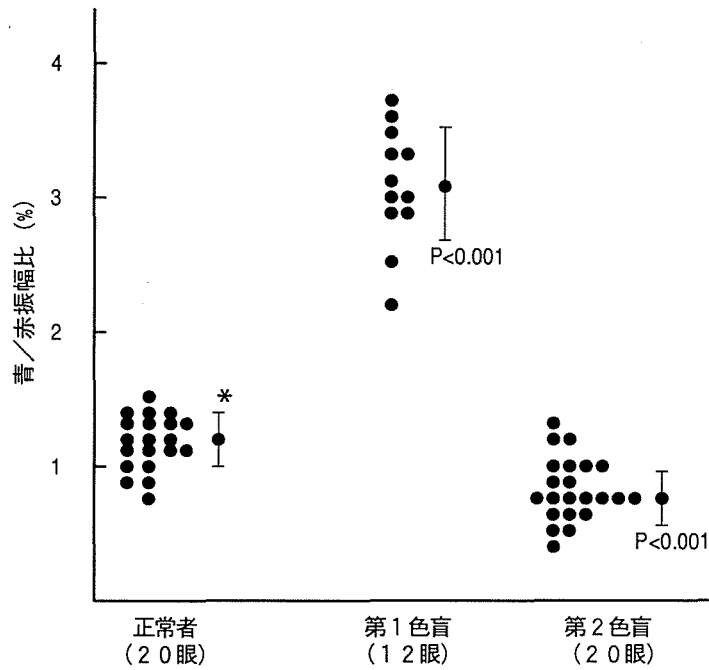


図11 正常者と第1色盲および第2色盲の青色閃光ERP振幅/赤色閃光ERP振幅比(青/赤振幅比)の比較 (*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

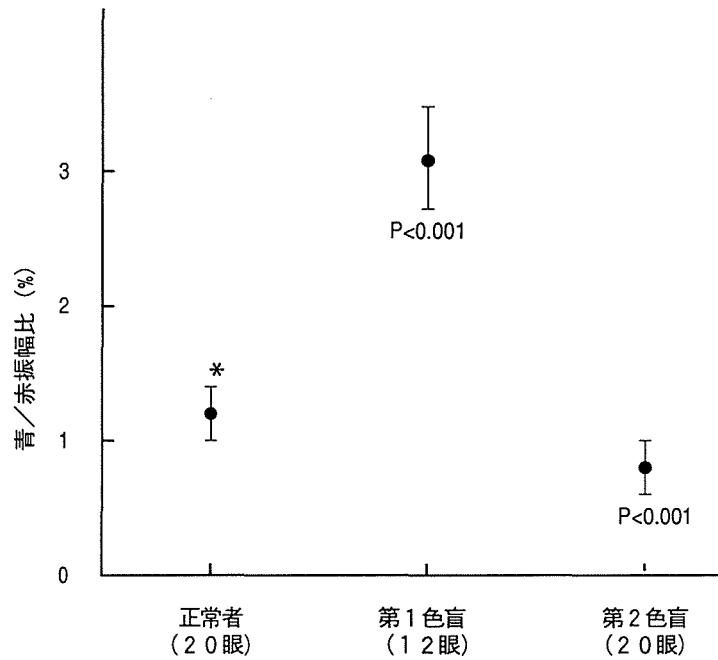


図12 正常者と第1色盲および第2色盲の青色閃光ERP振幅/赤色閃光ERP振幅比(青/赤振幅比)の比較(*平均値±標準偏差, P値は正常者に対するもの)

(表3, 図8, 図9, 図10).

赤色閃光ERP振幅に対する青色閃光ERP振幅比(以下青/赤振幅比)は, 上述の第1色盲15歳男性例で右眼2.2%, 左眼3.3%(平均2.8%)であったが, これは16歳の正常対照者右眼の1.3%に比べて大きな値を示した(図6).

第一色盲6例12眼の青/赤振幅比の各測定値は図11に示したとおりであるが, その平均値 $3.1 \pm 0.4\%$ は, 正常者10例20眼の $1.2 \pm 0.2\%$ に比べて高度の有意($P < 0.001$)の増大を示した(表3, 図11, 図12).

各種色覚検査の結果より第2色盲と診断した17歳男性例(視力両眼1.2(n.c.))においては, 赤色閃光ERPは図13の上段にみるごとく, 正常者(図6と同一男性, 右眼)の $31.3\mu V$ に比べて, 右眼が $43.8\mu V$, 左眼が $42.2\mu V$ と明らかな変化ではないが, 若干大きい値を示した. 逆に青色閃光ERPは図13の下段にみるごとく, 正常者の $41.4\mu V$ に比べて, 右眼が $37.5\mu V$, 左眼が $35.9\mu V$ と明らかな変化ではないが, 若干小さい値を示した. しかし, 緑色閃光ERPにおいては図13の中段にみるごとく, 正常者の $76.8\mu V$ に比べて, 右眼が $39.1\mu V$,

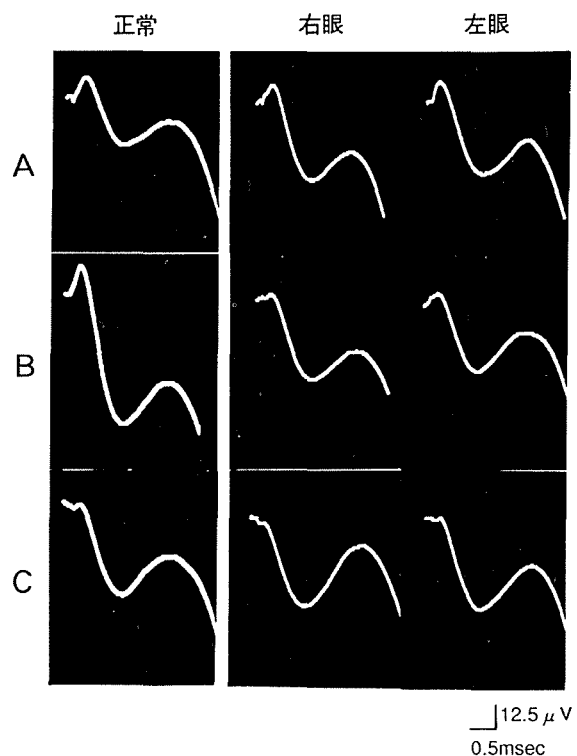


図13 第2色盲(17歳男性)の単色閃光ERP所見
 正常対照は16歳男性の右眼である。
 A: 赤色閃光ERP, B: 緑色閃光ERP,
 C: 青色閃光ERP.

表4. 正常者と第2色盲の単色閃光ERP振幅ならびに青色閃光ERP振幅/赤色閃光ERP振幅比(青/赤振幅比)の比較

	ERP振幅(μV)			青/赤振幅比(%)
	赤色閃光	緑色閃光	青色閃光	
正常者(20眼)	41.2 \pm 6.2*	88.5 \pm 8.3	47.6 \pm 6.2	1.2 \pm 0.2
第2色盲(20眼)	44.8 \pm 5.5	53.1 \pm 11.6	37.7 \pm 8.9	0.8 \pm 0.2
t 検定	n.s.	P<0.001	P<0.001	P<0.001

*平均値 \pm 標準偏差

n.s.:有意差なし(P>0.05)

左眼が35.9 μV と明らかな振幅の減弱が観察された。

第2色盲10例20眼の赤色閃光ERPの各振幅測定値は図7に示したとおりであるが、その平均値44.8 \pm 5.5 μV は、正常者10例20眼の41.2 \pm 6.2 μV に比べて若干大きい値を示すものの推計学的には有意の変化は示さなかった(表4, 図7, 図8)。第2色盲10例20眼の緑色閃光ERPの各振幅値は図9に示したとおりであるが、その平均値53.1 \pm 11.6 μV は、正常者10例20眼の88.5 \pm 8.3 μV に比べて高度に有意(P<0.001)の振幅の低下を示した(表4, 図8, 図9)。第2色盲10例20眼の青色閃光ERPの各振幅測定値は図10に示したとおりであるが、その平均値37.7 \pm 8.9 μV は、正常者10例20眼の47.6 \pm 6.2 μV に比べて高度に有意(P<0.001)の振幅の低下を示した(表4, 図8, 図10)。

青/赤振幅比は、上述の第2色盲17歳男性例で両眼0.9%であったが、これは16歳の正常対照者右眼の1.3%に比べて小さな値を示した(図13)。

第2色盲10例20眼の青/赤振幅比の各測定値は図11に示したとおりであるが、その平均値0.8 \pm 0.2%は、正常者10例20眼の1.2 \pm 0.2%に比べて高度に有意(P<0.001)の減少を示した(表4, 図11, 図12)。

考 按

単色閃光ERPにおいて単色閃光刺激エネルギーの測定が問題となるが、今回は矩形波単色刺激光(50msec持続時間)を使用せず、発光時間約0.5msecのxenon放電管からの非常に短い閃光を利用しているため、生物学的方法⁸⁾¹³⁾による測光

は困難である。そこで、photodiodeを用いての物理的方法¹³⁾により、各種刺激光の時間特性を求めるのみにとどめた。用いた干渉フィルターの半値幅は12~14.5nmで、最大透過率は43~48%と近似しており、最大波長(中心波長)は赤色閃光で600nm、緑色閃光で532nm、青色閃光で457.5nmと異なっているが、放電管への入力エネルギー21.5J下で、それぞれ45,262.5kLx, 33,347.5kLx, 8,520kLxと効率のよい閃光ピーク時の照度が得られた。

前回使用したKodak Wratten filter下では、ピーク時の照度は赤色閃光が333,302.4kLx、緑色閃光が161,385.8kLx、青色閃光が85,881.6kLxと1桁違う大きい値を示した¹⁰⁾が、波長の幅が大きく、厳密な意味では3種の錐体色素の反応を明瞭に反映したものではなかった。

その意味において、単色閃光ERP使用下での検索が興味深いが、その結果は前報⁹⁾¹⁰⁾とほぼ同様の傾向が観察され、色光刺激ERPの色覚検査における他覚的検査としての有用性を2色型色覚異常者において損なうものではなかった。

今回、第1色盲6例12眼においても、緑色、青色両閃光ERPの平均振幅は正常者10例20眼のものに比べて有意の変化を示さなかったが、赤色閃光ERPにおいては13.7 \pm 5.0 μV を示し、これは正常者の41.2 \pm 6.2 μV に比べて高度に有意(P<0.001)の振幅の低下を示した。

LappとTanabe²⁾は2名のprotanomalにおいて、ERP(R₂)の分光感度は正常者に比べ長波長側で低下していることを報告している。また、田辺ら¹¹⁻¹³⁾は、protanopeとprotanomalを含む9名¹²⁾および15名¹¹⁾のprotan症例でR₂の平均振幅

は580~600nmの長波長域において、正常者に比べて有意 ($P < 0.001$ および $P < 0.05$) に低下していることを報告しており、protanにおいてはerythrolabe (red cone) の減少ないし欠如に呼応する変化を本ERPは反映しているように思われる。本検査は他覚的検査であるので、色光刺激ERP (波長特性570nm以上通過) においてもその可能性は指摘された⁹⁾¹⁰⁾が、視細胞外節レベルにおいて、色覚異常の程度をより定量的に測定できるのではないかと考えられる。

第2色盲10例20眼においては、青色閃光ERPの変化は後述するとして、赤色閃光ERP平均振幅は正常者10例20眼のものに比べて有意の変化を示さなかったが、緑色閃光ERPにおいては $53.1 \pm 11.6 \mu V$ を示し、これは正常者の $88.5 \pm 8.3 \mu V$ に比べて高度に有意 ($P < 0.001$) の振幅の低下を示した。

田辺ら¹¹⁻¹³⁾は, deuteranope と deuteranomalous を含む21名¹²⁾および31名¹¹⁾のdeutan症例でERP (R_2) の平均振幅は480~520nm以下の短波長域で、正常者に比べて有意 ($P < 0.01$ および $P < 0.05$) に低下したことを報告している。前報⁹⁾¹⁰⁾の緑色閃光ERP (波長特性460~620nm, 530nmで最大) においても、deuteranopeにおいて同様の観察結果が得られた。これより、protanにおけると同様にdeutanにおいてもchlorolabe (green cone) の減少ないし欠如に呼応する変化を反映しているように思われる。しかし、LappとTanabe²⁾の1名のdeuteranomalousな患者におけるスペクトル感度は520nm以下の短波長領域で低下していないので、緑色閃光ERP振幅がdeuteranomalousにおいて、視細胞外節レベルにおけるchlorolabeの減少の程度に呼応した変化を示すかどうかという点に関しては、考按の最後にもふれるが、なお慎重な検討を要する。

Wald¹⁴⁾は色覚正常者に比べて、第1色覚異常者ではred coneは少なくgreen coneは多く、一方第2色覚異常者ではgreen coneは少なくred coneは多いとの仮説を提唱した。すなわち、前者でmissing coneのred coneがgreen coneに、後者ではgreen coneがred coneにtransformationされている可能性を指摘したわけである。しかし、田辺ら¹¹⁾¹²⁾の報告では、ERP (R_2) 振幅の平均値は色覚正常群に比べ、第1色覚異常群では中波長域で増大せず、第2色覚異常群ではその傾向

はみられるものの長波長域で有意の増大をみていない。前回⁹⁾¹⁰⁾および今回の検索においても同様の結果が観察された。しかし、田辺ら¹²⁾も指摘しているように、色光刺激ないし単色閃光刺激下のERPの記録条件とWald¹⁴⁾の測定条件の相違を考慮すると、田辺ら¹¹⁾¹²⁾および著者らの結果は必ずしもmissing conesの病態生理を反映するWald¹⁴⁾の仮説を否定するものではない。

田辺ら¹²⁾は、第2色覚異常群で R_2 平均振幅は460nmでも高度に有意 ($P < 0.01$) に低下することを報告している。前報⁹⁾¹⁰⁾の青色閃光ERP (波長特性380~520nm, 440nmで最大) の観察結果に引き続き、今回の第2色盲例でも青色閃光ERPの平均振幅は $37.7 \pm 8.9 \mu V$ を示し、正常者の $47.6 \pm 6.2 \mu V$ に比べて高度に有意 ($P < 0.001$) の低下を示した。

前回⁹⁾¹⁰⁾および今回の第1色盲例および田辺ら¹²⁾の第1色覚異常群においては、460nm付近の短波長域での振幅低下は認められなかった。半値幅14.5nmの青色閃光用干渉フィルター使用下での今回の観察では、erythrolabe, chlorolabeへの直接的影響は皆無であろうから、deutanにおけるcyanolabeの関与¹⁰⁾を今後検討しなければならないと考えている。

青/赤振幅比をみると、正常者の $1.2 \pm 0.2\%$ に対して、第1色盲では $3.1 \pm 0.4\%$ 、第2色盲では $0.8 \pm 0.2\%$ といずれも高度に有意 ($P < 0.001$) の増大ないし減少を示した。当然第1色盲と第2色盲の青/赤振幅比に差があることが前報⁹⁾¹⁰⁾と同様に判明したわけであるが、600nmにおけるERP (R_2) 振幅に対する460nmにおけるERP (R_2) 振幅の比を指標とした田辺ら¹¹⁻¹³⁾の報告でも同様の傾向が観察され、第1および第2色覚異常者が互いに明確に分離されている。またERG-off 応答急峻部の分光感度比との間に有意の相関 (相関係数0.823) が検証されている¹²⁾¹³⁾。

ちなみに、先述の症例で青/赤振幅比をみると、第1色盲例は右眼が2.2%、左眼が3.3%で両眼の平均値は2.8%を示し、これは一正常対照者右眼の1.3%に比べて大きい値を示した。これに対して、第2色盲例は両眼が0.9%を示し、これは一正常対照者右眼の1.3%に比べて小さい値を示した。当然の結果であるが、第1色盲と第2色盲症例間において青/赤振幅比に明らかな差がみられた。

これらの所見は、先天赤緑色覚異常者における錐体系の異常は視細胞外節レベルに端を発する¹²⁾¹³⁾ことを示唆するばかりでなく、色覚検査における単色閃光 ERP の他覚的検査としての臨床的有用性を確認するものである。

最近田辺ら¹¹⁾¹³⁾は、先天性赤緑色覚異常の程度と ERP (R_2) との相関を検討し、 R_2 振幅ならびに、460nm での R_2 振幅の 600nm での R_2 振幅に対する比の平均値と色覚異常の程度とは有意の相関はなかったと報告した。これより、色覚異常の程度の多様性は広範囲の網膜（刺激光の照射範囲は著者らの場合も含めて、後極部中心に約 60° ¹²⁾と推察される）における視細胞外節の異常には依存しないと程度判定 (grading) の問題に関しては、悲観的な見解を述べている。

これは、色覚異常の程度は狭い範囲の網膜の異常に依存するという仮説¹¹⁾に矛盾しない見解であるが、現段階では刺激光をより狭い範囲にスポット照射した状態で ERP を誘導することには成功していない。色覚異常の程度差が錐体より近位の伝達系の異常に依るものか¹¹⁾、視細胞外節レベルの異常に依るものか、錐体感光色素の質的および量的解析をふまえて、今後の検討が待たれるところである。程度判定ができれば一層単色閃光 ERP の有用性が増すので、今後その可能性を求めて装置の改良と症例を重ね、さらに検討を加えてみたい。

結 語

16名の2色型色覚異常者（第1色盲6例12眼、第2色盲10例20眼）を対象に、本報記載の測定条件下では3種の錐体細胞外節由来の単色閃光 ERP 測定を手段として、錐体感光色素の動態を検索した。赤色閃光 ERP 用には No.21 (λ_0 600nm, $\Delta\lambda_{1/2}$ 12nm, Tmax 46%), 緑色閃光 ERP 用には No.14 (λ_0 532nm, $\Delta\lambda_{1/2}$ 13nm, Tmax 43%), 青色閃光 ERP 用には No.7 (λ_0 457.5nm, $\Delta\lambda_{1/2}$ 14.5nm, Tmax 48%) の MIF-W 型干渉フィルター（日本真空光学）を用いた。ERP 振幅は、角膜陽性相 R_1 の頂点より角膜陰性相 R_2 の頂点までを測定した。

その結果、赤色閃光ならびに緑色閃光 ERP の各平均振幅は、第1色盲ならびに第2色盲において、正常対照者10例20眼と比べて、ともに高度に有意 ($P < 0.001$) の低下を示した。第2色盲にお

いては、青色閃光 ERP の平均振幅は、正常者と比べて、高度に有意 ($P < 0.001$) の低下を示した。

赤色閃光 ERP に対する青色閃光 ERP の平均振幅比は、第1色盲ならびに第2色盲において、正常者と比べて、それぞれ高度に有意 ($P < 0.001$) の増大ないし減少を示した。2色型色覚異常者においては、青色閃光 ERP 振幅/赤色閃光 ERP 振幅比は protan と deutan の他覚的検出のための一つの指標として、臨床的有用性を有することを述べた。

稿を終えるにあたり、今研究にご協力とご助言をいただいた光電エンジニアリング株式会社の桑山隆夫代表取締役専務に厚く御礼申し上げます。

本研究は文部省科学研究費補助金（一般研究（C）：63570834）によって行われた。

文 献

- 1) Baker, H.D. and Rushton, W.A.H. (1965). The red-sensitive pigment in normal cones. *J Physiol* **176**, 56-72.
- 2) Lapp, E.R. und Tanabe, J. (1981). Das frühe Rezeptorpotential (ERP): Aktionspektren bei normal Farbtüchtigen und Farbblinden. *Ber Dtsch Ophthalmol Ges* **78**, 727-731.
- 3) Marks, W.B., Dobbelle, W.H. and MacNichol, E.F., Jr. (1964). Visual pigments of single primate cones. *Science* **14**, 1181-1182.
- 4) Rushton, W.A.H. (1963). A cone pigment in the protanope. *J Physiol* **168**, 345-359.
- 5) Rushton, W.A.H. (1963). Cone pigment kinetics in the protanope. *J. Physiol* **168**, 374-388.
- 6) Rushton, W.A.H. (1965). A foveal pigment in the deuteranope. *J Physiol* **176**, 24-37.
- 7) Rushton, W.A.H. (1965). Cone pigment kinetics in the deuteranope. *J Physiol* **176**, 38-45.
- 8) 坂井尚登, 川崎一夫, 米村大蔵, 田辺讓二, 藤井 茂, 山崎清彦, 宮下裕至 (1984). 早期視細胞電位 (ERP) 用の単色閃光の生物学的測光. *日本眼科学会雑誌* **88**, 1566-1571.
- 9) 玉井嗣彦 (1989). ERP の臨床応用. 安達 恵

- 美子編, 眼科 Mook No41, 視覚電気生理最新の知識, pp.87-96, 金原出版, 東京.
- 10) Tamai,A., Wada,H., Takahashi,T. and Ueno,H.(1989). Studies on the early receptor potential in the human eye. X. Spectrally selective flash ERP in dichromats. *Yonago Acta med* **32**, 137-146.
- 11) 田辺久芳, 田辺譲二, 花崎秀敏, 牛村 繁 (1988). 先天性赤緑色覚異常の程度と早期視細胞電位. *日本眼科学会雑誌* **92**, 1565-1568.
- 12) 田辺譲二, 河崎一夫, 米村大蔵, 田辺久芳, 仲里博彦, 花崎秀敏(1985). 先天性赤緑色覚異常における早期視細胞電位の分光特性. *日本眼科学会雑誌* **89**, 1145-1150.
- 13) 田辺譲二, 田辺久芳(1989). 早期視細胞電位(ERP)と色覚. 安達恵美子編, 眼科 Mook No41, 視覚電気生理最新の知識, pp.97-109, 金原出版, 東京.
- 14) Wald,G.(1966). Defective color vision and its inheritance. *Proc Natl Aca d Sci USA* **55**, 1347-1363.
- 15) 米村大蔵, 河崎一夫, 蓮井 勲(1966). 人眼の網膜受容器電位の記録. *日本眼科学会雑誌*, **70**, 766-768.