

ERG 錐体系反応に対する暗順応の影響

飯島 裕幸, 山口 哲

山梨医科大学眼科学教室

要 約

暗順応下と明順応下のそれぞれの条件下で ERG 錐体系反応を分離記録し、振幅と頂点潜時の両者について、順応経過中の経時的変動を正常人眼について調べた。暗順応下で、赤色光にて得られる波形から青色光にて得られる波形を減算することによって、photopic b 波 (x 波) が分離され、暗順応下での錐体系反応として評価した。この錐体系反応の頂点潜時は暗順応経過中に延長し、プラトーに達した。一方背景光点灯下で、赤色刺激光にて惹起される明順応下での錐体系反応において、振幅は暗順応直後では著しく減弱し、明順応経過中に徐々に増大し、暗順応前の大きさまで回復した。しかしその頂点潜時は変化しなかった。暗順応下および明順応下に記録されるこれら2種類の錐体系反応に及ぼす暗順応の影響が、心理物理現象で示された rod-cone interaction と同一のものであるかいは、今後の検討を要する。(日眼会誌 94: 987-992, 1990)

キーワード: 錐体, 杆体, 網膜電図, 暗順応, 明順応

Adaptational Changes of Cone Electroretinograms in Man

Hiroyuki Iijima and Satoshi Yamaguchi

Department of Ophthalmology, Yamanashi Medical College

Abstract

Changes of amplitude and implicit time of human cone electroretinogram (ERG) were studied during dark adaptation and succeeding light adaptation. Dark-adapted cone ERG was isolated by subtracting scotopic blue response from matched scotopic red response. The former represented the rod-mediated b-wave, while the latter consisted of both rod-mediated b-wave and cone-mediated b-wave or x-wave. The b-wave amplitude of dark-adapted cone ERG remained unchanged during dark adaptation, while the implicit time increased systematically, reaching a plateau. Light-adapted cone ERG was obtained by red stimulus lights under a bright background light. The amplitude of light-adapted cone ERG was markedly suppressed through dark adaptation but it recovered gradually during light adaptation, reaching the base line level. The implicit time was unchanged during light adaptation. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 94: 987-992, 1990)

Key words: Cone, Rod, Electroretinogram, Dark adaptation, Light adaptation

I 緒 言

網膜電図 (ERG) における錐体系反応はいくつかの

方法で杆体系反応から分離記録することができる^{1)~3)}。その際、臨床的な評価の対象となる振幅および頂点潜時は、記録時の順応状態あるいは前順応状態に

別刷請求先: 409-38 山梨県中巨摩郡玉穂町下河東1110 山梨医大眼科学教室 飯島 裕幸

(平成2年1月10日受付, 平成2年2月20日改訂受理)

Reprint requests to: Hiroyuki Iijima, M.D. Department of Ophthalmology, Yamanashi Medical College Shimogato 1110, Tamaho, Nakakoma-gun Yamanashi Pref., Japan, 409-38

(Received January 10, 1990 and accepted in revised form February 20, 1990)

よって、変化することが知られている。すなわち明順応下で記録される photopic ERG⁴⁾⁵⁾や30Hz フリッカー-ERG⁶⁾⁷⁾は暗順応直後より記録を開始すると振幅が増大することが知られている。そのため、臨床上、杆体系反応の記録のために行った暗順応に引き続いて、明順応下で錐体系反応を記録する際には明順応を10ないし15分以上行うことがすすめられている²⁾³⁾。また30Hz フリッカー-ERGの記録では、これを背景光を点灯させて行った場合とそうでない場合とで、頂点潜時が異なる²⁾。さらに暗順応下においても長波長刺激光で惹起される反応の一部は錐体系反応と考えられるが、その頂点潜時は暗順応の進行とともに延長することが報告されている⁸⁾。これらの事実のひとつの説明として、杆体による錐体への干渉現象が想定されている⁷⁾⁸⁾。本研究では暗順応下と明順応下のそれぞれで記録される ERG 錐体系反応に対して暗順応がいかに影響するかを明らかにする目的で、それぞれの反応の振幅と頂点潜時の両者について、順応経過中の経時的変動を、正常人眼について検討した。

II 実験方法

1. 対象

軽度屈折異常以外に眼疾患を有しない、健康男性2名2眼(S.Y.:28歳, O.H.:25歳)を対象とした。

2. ERG 記録方法

記録電極として金環埋め込み式のコンタクトレンズ電極(直径5mmの人工瞳孔を有し、金環部は遮光されている)を用いた。被験者は0.5%トロピカミドと0.5%塩酸フェニレフリンの合剤の点眼液にて十分に散瞳後、0.4%塩酸オキシブプロカインにて点眼麻酔を行い、医療用ソフトコンタクトレンズ(ベースカーブ:9.00, 直径:14.0)を装着した上から、前記コンタクトレンズ電極を装着した。不関電極と接地電極は直径10mmの銀皿電極を用い、それぞれ、前額部と耳朶に電極糊にて装着した。誘発された反応は日本電気三菱社製シグナルプロセッサ7S12にて増幅され、一部の反応は加算して記録された。増幅の際、low cut filterは0.5Hz, high cut filterは1.5kHzを選択した。記録された各波形はデジタル変換され、フロッピーディスクに保存し、検査終了後波形の減算や振幅、頂点潜時の計測などの解析を行った。

3. 刺激光

光刺激は直径60cmの半球ドームの白色に塗装された内面にむけてキセノンフラッシュランプの光を照射

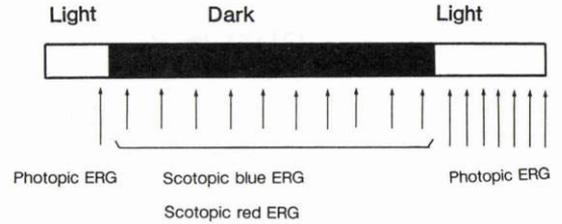


図1 ERG記録のスケジュール。図の矢印はERG記録時点を示す。まず5分間の明順応終了直前にPhotopic ERGを記録する。暗順応開始直後より、Scotopic red ERGとScotopic blue ERGを1組として、2~4分間隔で、30分以上記録する。その後再び明順応を行うが、明順応開始直後よりほぼ1分毎に約15分間Photopic ERGを記録する。

する方式の全視野刺激で行った。このドームは直流電源にて背景光を点灯できるようになっており、その明るさは86~112cd/m²である。光刺激駆動装置は日本電気三菱社製3G21-Pで、刺激光強度は20ジュールとした。色光はコダックラッテンフィルターを用い、青色光はNo. 47bとND 2.0を重ねて、また赤色光はNo. 29にて得た。背景光の有無および、刺激のための色光の違いにより、3種類のERG記録を行った。すなわちPhotopic ERGとして背景光点灯下で、赤色光を2秒間隔で4回繰り返し照射し、それらの加算平均波形を記録した。またScotopic blue ERGとScotopic red ERGはそれぞれ暗順応下で、青色光と赤色光の1回刺激にて得られた波形である。これら3種類のERGを以下に述べるスケジュールで経時的に記録した。

4. 記録スケジュール

被験者は明るい室内で被検眼を散瞳後、背景光を点灯して5分間明順応を行う。背景光はそのままにして、まずPhotopic ERGを記録する。その後暗順応を開始するが、開始直後より、Scotopic red ERGとScotopic blue ERGを1組として、2~4分間隔で、30分以上記録する。その後再び背景光を点灯し、明順応を行うが、明順応開始直後よりほぼ1分毎に約15分までPhotopic ERGを記録する。以上のスケジュールのシエマを図1に示す。

5. 明順応下錐体系反応と暗順応下錐体系反応

明順応下の錐体系反応としてはPhotopic ERG波形をそのまま用いるが、暗順応下錐体系反応の波形としてはScotopic red ERG波形からその直後に記録したScotopic blue ERG波形を減算して得られた波形Red-Blue ERG(図2)を用いた。

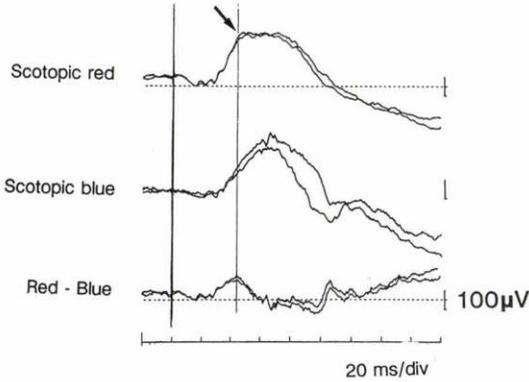


図2 暗順応下錐体系反応の求め方。最上段の暗順応下赤色光刺激にて得られた Scotopic red ERG 波形から中段に示す青色光刺激による Scotopic blue ERG 波形を減算して下段の Red-Blue ERG 波形が得られる。これは photopic b 波(あるいは x 波)のみから成っており、暗順応下錐体系反応と考えられる。右端の縦線は振幅のキャリブレーション、下段は時間のスケールを示す。20msec の時点の縦線は刺激光照射時点を示す。矢印は photopic b 波(x 波)を示し、下段の Red-Blue ERG における陽性波頂点に一致する。

III 結 果

1. 暗順応下錐体系反応

図3, 4, 5にSYの暗順応経過中の Scotopic blue ERG, Scotopic red ERG, およびその両者の減算の結果である Red-Blue ERG の波形を示してある。このうち Scotopic blue ERG の振幅(基線から陽性波の頂点までの振幅)および Red-Blue ERG の振幅(基線から陽性波の頂点までの振幅)と頂点潜時(陽性波の頂点までの時間)の値を計測し、図6のグラフに示した。Scotopic blue ERG 振幅(黒丸)は暗順応の経過とともに、増大し、30~40分でプラトーに達している。これに対して Red-Blue ERG の振幅(白三角)には明瞭な増大傾向はみられなかった。一方、Red-Blue ERG の頂点潜時(白丸)は暗順応開始直後は約35msecであったものが、徐々に延長し、20分くらいで約45msec程度のプラトーに達している。図7にもうひとりの被験者OHでの結果をグラフに示している。同様に、Scotopic blue ERG 振幅は暗順応とともに増大し、Red-Blue ERG の頂点潜時は徐々に延長している。

2. 明順応下錐体系反応

図8はSYの暗順応前の Photopic ERG と30分以上

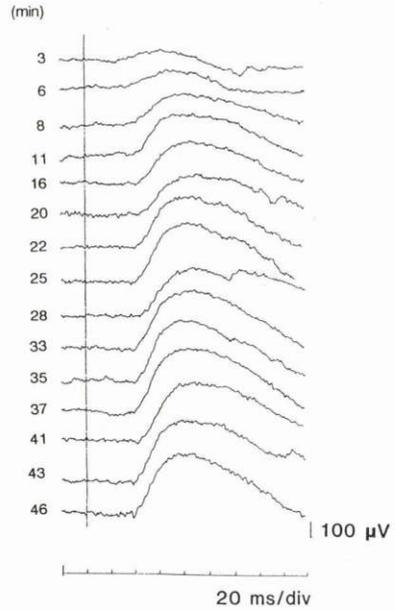


図3 被験者 S.Y.の暗順応経過中の Scotopic blue ERG 波形。左端の数字は暗順応開始後の時間を示す。右下に振幅のキャリブレーション、下段に時間のスケールを示す。20msec の時点の縦線は刺激光照射時点を示す。

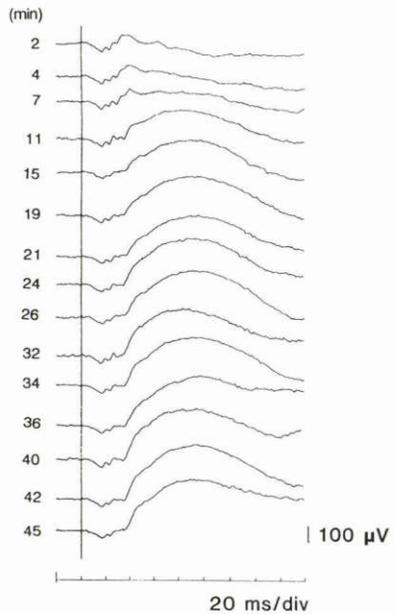


図4 被験者 S.Y.の暗順応経過中の Scotopic red ERG 波形。左端の数字は暗順応開始後の時間を示す。右下に振幅のキャリブレーション、下段に時間のスケールを示す。20msec の時点の縦線は刺激光照射時点を示す。

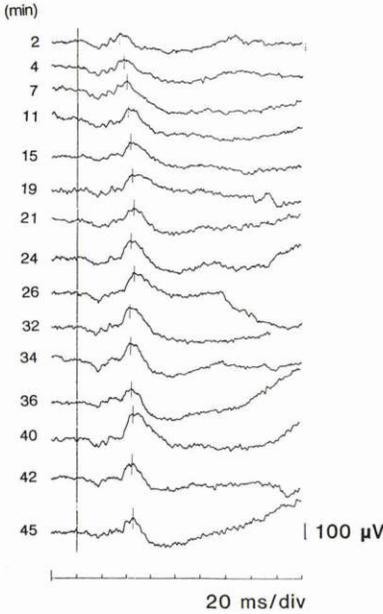


図5 被験者 S.Y.の暗順応経過中の錐体系反応である Red-Blue ERG 波形. 左端の数字は暗順応開始後の時間を示す. 右下に振幅のキャリブレーション, 下段に時間のスケールを示す. 20msec の時点の縦線は刺激光照射時点を示す. 短い縦線は陽性波の頂点を示す.

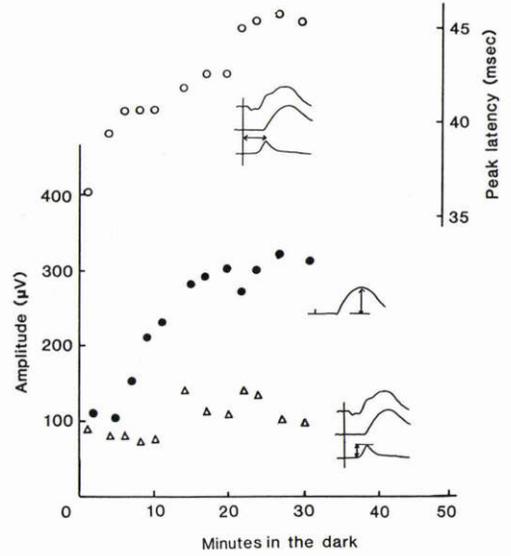


図7 被験者 O.H.の暗順応下錐体系反応である Red-Blue ERG の振幅(白三角)と頂点潜時(白丸), 及び杆体反応である Scotopic blue ERG (黒丸)の振幅を暗順応開始後の時間に対してプロットしたものの。

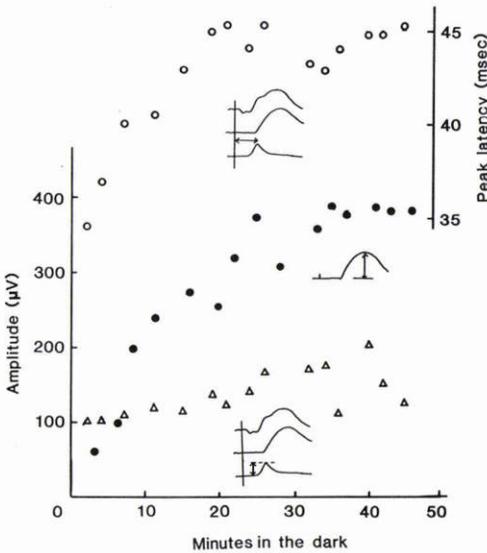


図6 被験者 S.Y.の暗順応下錐体系反応である Red-Blue ERG の振幅(白三角)と頂点潜時(白丸), 及び杆体反応である Scotopic blue ERG の振幅(黒丸)を暗順応開始後の時間に対してプロットしたものの。

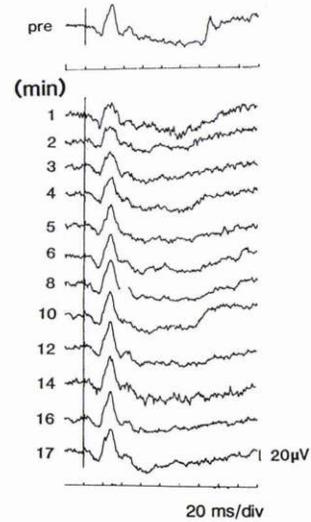


図8 被験者 S.Y.の明順応下錐体系反応である Photopic ERG 波形について, 暗順応前(pre)と暗順応終了後の明順応経過中の波形の変化. 左端の数字は明順応開始後の時間を示す. 右下に振幅のキャリブレーション, 下段に時間のスケールを示す. 20 msec の時点の縦線は刺激光照射時点を示す.

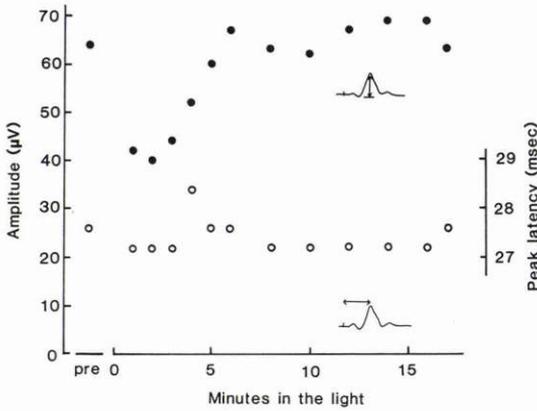


図9 被験者 S.Y. の明順応下錐体系反応である Photopic ERG の振幅 (黒丸) と頂点潜時 (白丸) を明順応開始後の時間に対してプロットしたもの。

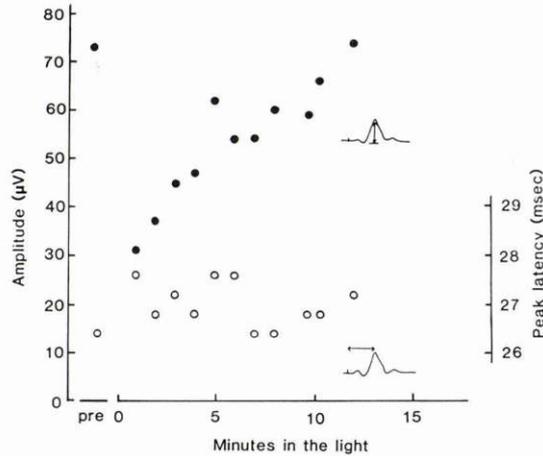


図10 被験者 O.H. の明順応下錐体系反応である Photopic ERG の振幅 (黒丸) と頂点潜時 (白丸) を明順応開始後の時間に対してプロットしたもの。

の暗順応終了直後から開始した明順応経過中の Photopic ERG の波形である。その振幅と頂点潜時の測定値を図9に示してある。頂点潜時は暗順応前後で変化なく、また明順応経過中もほぼ一定である。振幅は暗順応終了直後に著しく減弱したものが明順応経過とともに増大し、5~10分で暗順応前の値にまで回復している。図10はOHの結果であるがほぼ同様の傾向を示している。

IV 考 按

ERG 記録時の順応光, 刺激光波長, 刺激光頻度など

をかえることによって、錐体系と杆体系の反応を分離して記録することができる。杆体系の反応は暗順応下で弱い白色または青色光刺激にて得られる波形で評価できる^{1)~3)}。今回の実験では Scotopic blue ERG 波形を杆体系反応とみなすことができ、その振幅は暗順応経過中に増大し、やがて一定になった。これに対して、錐体系反応は明順応下で、比較的強い刺激光にて惹起されるいわゆる Photopic ERG で評価するのが一般的である³⁾。また杆体では追従できない30Hz程度のフリッカー光刺激にても錐体系反応を分離記録できる³⁾。Weleberはこの30Hzフリッカー-ERG波形の頂点潜時が、背景光がある時とない時で異なることを報告しており、その原因として背景光なしの場合、杆体機能が働いて、錐体に対して頂点潜時を延長させる方向で影響を及ぼす rod-cone interaction の存在を想定している²⁾。しかし彼が杆体の影響をうけるとしている背景光なしの30Hzフリッカー-ERGは、刺激光自体による明順応効果のため、暗順応が十分でなく、順応状態の正確な評価が困難である。

一方、暗順応下で赤色光刺激にて惹起される ERG 波形では、b波が分峰しその最初のピークは錐体系反応を反映しており、X波あるいは Photopic b波と呼ばれる^{9)~11)}。ただしこの Photopic b波は図2の Scotopic red ERG 波形からも明らかなように、これに引き続く杆体由来の波形である Scotopic b波と大部分重なっているために振幅、頂点潜時の解析が困難である。そこで Birch ら¹²⁾の方法にならって、赤色光による波形 (Scotopic red ERG) から青色光による波形 (Scotopic blue ERG) を減算することによって Photopic b波のみを記録した。その際、Scotopic b波の振幅が両者で等しくなるように、青色フィルター (ラッテン No. 47b) に加える中性フィルターの濃度として2.0を選択した。このことは図2の減算波形 (Red-Blue ERG) で Photopic b波に引き続く部分が平坦であることによって確認できる。

以上の方法で分離された暗順応下の錐体系反応 (Red-Blue ERG) を暗順応開始直後からの経過とともに記録し、その振幅、頂点潜時について検討したところ、頂点潜時は暗順応経過とともに延長し、暗順応20~30分でほぼ一定値に達することが確認できた。頂点潜時の延長については、640nmの単色光を用いて、錐体系反応を分離したとする Sandberg ら⁹⁾による結果と一致するものであった。

この同じ暗順応経過中に杆体系反応である

Scotopic blue ERG の振幅は、同様の経過で増大しており、これは錐体系反応の頂点潜時が暗順応により回復してきた杆体機能によって、延長されるという仮説⁸⁾に矛盾しない。一方、暗順応後、明順応下で記録されるいわゆる Photopic ERG や30Hz フリッカー-ERG の振幅は明順応経過とともに増大することが知られている⁴⁾⁵⁾。これは増幅現象と呼ばれることもあるが⁹⁾⁷⁾、今回のように暗順応前の波形と比較してみると、これは暗順応によってもたらされたと考えられる抑制が、徐々に解除されて生じた結果と考えるのが妥当である。そして暗順応終了直後に記録した Photopic ERG 波形は暗順応の影響を最大にうけた波形であるといえる。その際、暗順応下の錐体系反応とは異なり、頂点潜時は影響されず、振幅の減弱のみを生じている。

杆体の錐体に対する干渉現象は心理物理現象において存在することが示されている¹³⁾。今回の結果は暗順応下の ERG 錐体系反応の頂点潜時、および明順応下の ERG 錐体系反応の振幅に対して、暗順応が影響を及ぼしていることを示すものである。しかし太田⁷⁾がのべているごとく、ERG にて捉えられた現象と心理物理学的に示された現象が、視覚反応における同一の機序を観察しているかいなかはまだ不明である。また暗順応下の ERG 錐体系反応と明順応下の錐体系反応で、暗順応による影響が、一方は頂点潜時の延長として、また他方は振幅の減弱としてみられたという点は、これら両者さえも同一機序ではない可能性を示唆する。これらの現象における暗順応の影響が、はたして杆体機能の賦活という形で生じたものであるかいなかについては、今後さらに検討すべき問題であろう。

稿を終えるにあたり、御校閲いただいた塚原重雄教授に深謝いたします。

本論文の要旨は平成元年度日本臨床視覚電気生理学会において講演した。

文 献

1) **Berson EL**: Electrical phenomena in the ret-

ina, In Moses RA, Hart WM (ed): Adler's Physiology of the Eye. Clinical Application (8th ed). St Louis, The CV Mosby Co 506-567, 1987.

- 2) **Weleber RG, Eisner A**: Retinal function and physiological status, In Newsome DA (ed): Retinal Dystrophy and Degenerations, New York, Raven Press, 21-69, 1988.
- 3) **International Standardization Committee**: Standard for clinical electrophysiology. Arch Ophthalmol 107: 816-819, 1989.
- 4) **Gouras P, MacKay CJ, Ivert L, et al**: Computer assisted spectral electroretinography in vitrectomy patients. Ophthalmology 92: 83-90, 1988.
- 5) **Gouras P, MacKay CJ**: Growth in amplitude of the human cone electroretinogram with light adaptation. Invest Ophthalmol Vis Sci 30: 625-630, 1989.
- 6) **三宅養三, 堀口正之, 矢ヶ崎克哉**: 明順応下の人眼錐体系 ERG の増幅現象. (1) 正常者と網膜色素変性症. 日眼会誌 90: 1102-1109, 1986.
- 7) **太田一郎, 城山敬康, 堀口正之, 他**: 人眼錐体系フリッカー-ERG の順応変化. 日眼会誌 92: 549-556, 1988.
- 8) **Sandberg MA, Berson EL, Efron MH**: Rod-cone interaction in the distal human retina. Science 212: 829-830, 1981.
- 9) **Motokawa K, Mita T**: Über eine einfachere Untersuchungsmethode und Eigenschaften der Aktionsströme der Netzhaut des Menschen. Tohoku J Exp Med 42: 114-133, 1942.
- 10) **Adrian ED**: The electric response of the human eye. J Physiol 104: 84-104, 1945.
- 11) **永田 誠**: Photopic ERG の研究. 日眼会誌 66: 1614-1673, 1962.
- 12) **Birch DG, Fish GE**: Rod ERGs in retinitis pigmentosa and cone-rod degeneration. Invest Ophthalmol Vis Sci 28: 140-150, 1987.
- 13) **Arden GB, Hogg CR**: Rod-cone interactions and analysis of retinal disease. Br J Ophthalmol 69: 404-415, 1985.