

明順応および暗順応中における衝動性眼球運動量と EOG 電位との関係

伊月 宣之¹⁾, 久保 賢倫²⁾, 西川 禎一³⁾

¹⁾新居浜工業高等専門学校電気工学科, ²⁾久保眼科医院, ³⁾京都大学工学部

要 約

眼電位図 (EOG) と注視点の同時測定により, 明順応下および暗順応下における EOG 電位変化量と注視点移動量 (衝動性眼球運動量) との関係求めた。すでに前報では 60lx の室内光の下で, EOG 電位変化量が $\pm 15^\circ$ の範囲内で衝動性眼球運動量に比例することを報告した。しかし, EOG 電位変化量が明順応下および暗順応下においても衝動性眼球運動量に比例するかどうかはこれまで明らかにされていなかった。そこで, 健康者 9 名について, EOG と注視点の同時測定により, 明・暗順応中, 2 分毎に両者の関係を測定した結果, どの時刻においても比例関係の成立することが確かめられた。なお, 測定中に視線が視標からずれて EOG に誤差が発生しても, 同時測定法によって注視位置がアイマークレコーダで監視されていたので, ずれた値を補正することにより正確な EOG が求められた。(日眼会誌 96: 1458-1465, 1992)

キーワード: EOG 時間曲線, 衝動性眼球運動, 明順応, 暗順応, アイマークレコーダ

The Relation between Saccadic Eye Movements and Electrooculogram during Light and Dark Adaptations

Nobuyuki Itsuki¹⁾, Masanori Kubo²⁾ and Yoshikazu Nishikawa³⁾

¹⁾Department of Electrical Engineering, Niihama National College of Technology

²⁾Kubo Eye Clinic, ³⁾Department of Electrical Engineering, Kyoto University

Abstract

The relation between the amplitudes of saccadic eye movements and the resting potential changes detected around human eyeballs under light and dark adaptations was clarified by means of simultaneous measurements of electrooculogram (EOG) and eye movements. The authors previously reported that the potential changes are proportional to the horizontal saccadic eye movements within $\pm 15^\circ$ (visual angle) under conditions of the room light of approximately 60 lux. There are few reliable data indicative of the presence of the above relations under light and dark adaptations. The result of the simultaneous measurements of EOG and eye movements during the light and dark adaptation at 2-minute intervals in 9 normal subjects showed that the resting potential changes were in direct proportion of the amplitudes of the saccadic eye movements at any time within $\pm 20^\circ$. In these experiments, the eye positions were monitored with the eye mark recorder during the eye movements. In case the eye positions excursions from a target, the exact EOG was calculated by measuring eye positions and correcting the EOG errors. (Acta Soc Ophthalmol Jpn 96: 1458-1465, 1992)

Key words: Time curve of electrooculogram, Saccadic eye movement, Light adaptation, Dark adaptation, Eye mark recorder

別刷請求先: 792 新居浜市八雲町 7-1 新居浜工業高等専門学校電気工学科 伊月 宣之

(平成 3 年 7 月 17 日受付, 平成 4 年 5 月 29 日改訂受理)

Reprint requests to: Nobuyuki Itsuki Department of Electrical Engineering, Niihama National College of Technology, 7-1 Yagumo-cho, Niihama 792, Japan

(Received July 17, 1991 and accepted in revised form May 29, 1992)

I 緒 言

眼電位図 (electrooculogram; 以下 EOG) には網脈絡膜の機能が反映されており, この EOG の時間的変化を示す EOG 時間曲線は, 網膜色素上皮や脈絡膜の機能検査・疾患の診断などによく用いられている^{1)~3)}. このように EOG の測定は電気生理学的な検査として臨床応用上有用であるが, 従来は眼球の前方に一定角度離して置かれた2つの固定視標を目安にし, 眼球を一定角度の振幅で交互に衝動運動をさせて測定が行われてきた⁴⁾. その場合, 視標注視は患者の意志のもとになされるため患者の協力が必要であるが, 強度近視や視野狭窄, 中心暗点などの視力障害や視野障害のために視標を正確に注視できない場合には, 正確な EOG の測定は難しい⁵⁾. しかし, 眼球運動と EOG との関係がわかっていれば, EOG 測定時に注視点を監視しておくことにより, あとで注視点がずれた分を定振幅の眼球運動に相当する EOG 電位に補正して, EOG 時間曲線を求めることが可能となる. これは, 視標を注視せずに一定のリズムで眼球を自由に動かすだけで EOG の測定が可能になることを意味しており, これまで EOG による診断が不可能であった白内障や緑内障の網膜機能, さらに網膜剝離術後の網脈絡膜の機能回復状態などが非侵襲で検査できることになる. そのためには眼球運動量と EOG との関係を明確にすることが必要である.

EOG 時間曲線は, 眼球の衝動性運動の振幅を一定値 (30°) として測定した EOG 電位の時間変化曲線であるが, 一般にこの EOG 電位は不安定要素が多く, 個人差が大きいように測定日時によっても影響を受け, また電極の装着状態やその種類によっても変わる⁶⁾⁷⁾. EOG 時間曲線は暗順応下で 15~30 分, 明順応下で約 15 分の測定により求められるので, 眼球運動の振幅と EOG 電位との関係を使って EOG 時間曲線を求めるには, これら暗順応, 明順応の全期間にわたって, EOG 電位と眼球運動の振幅とが一定の関係にあることを確認しておく必要がある. 眼球運動と EOG との関係を種々の観点から検討したものは報告されているが^{8)~10)}, いずれも注視点の測定に問題がある. 筆者ら¹¹⁾は前報にて, EOG 測定にアイマークレコーダ(注視点計測装置)による注視位置測定を併用し, 顔面照度が 60 lx の室内光の下で眼球移動量と EOG 電位変化量との間の関係を求め, 眼球運動の振幅が $\pm 15^\circ$ 以内では両者はほぼ比例関係にあることを報告した. その中で, EOG の測

定中, 注視点は必ずしも視標を正確に追視していないことが具体的に示され, 従来の方では注視位置のズレによる誤差が明確には把握できないことが明らかになった. このように同時測定法を導入したことにより, EOG 測定時の眼球の挙動が二次元的に細かく把握でき, EOG の解析が詳しく行えるようになった. この同時測定システムを使用し, 本報告ではさらに明順応中および暗順応中でも EOG 電位が眼球移動量に比例するかどうかを検討した.

II 実験方法

本研究では, 衝動性眼球運動を起こしたときの注視点移動量 (以下, 眼球移動量と呼ぶ) と, そのときの EOG 電位変化量との関係を求めるため, 従来 EOG 測定法に角膜反射法を併用して, 注視点移動と EOG とを同時に測定する方法¹¹⁾を用いた. 図1は測定システムの概略図である. EOG 電位は, 左右眼それぞれの内外眼角部に隣接した位置に電極糊で貼り付けられた, 一對ずつの銀-塩化銀皿電極 (日本光電製小型生体電極直径 12 mm) により導出した. なお, 接地電極は左右の耳たぶに置いた. 検出された EOG 電位は, 増幅器で交流増幅 (時定数 1.5 sec, ハイカット 30 Hz) されたあと, A/D 変換器 (分解能 12 ビット) を通してパーソナルコンピュータに入力され, 測定終了後フロッピーディスクへ保存されるようになっている. EOG 電位の測定分解能は約 $10 \mu\text{V}$, 視角に換算すれば約 0.5° に相当する.

一方, 注視点は角膜反射法を使ったアイマークレコーダ (ナック製 EMR-V) により検出した. これは, 近赤外発光ダイオードから角膜に投射されたスポット光の角膜反射像が, 注視点として固体撮像素子内蔵カメラで検出されるものであり, 両眼の測定が可能である. EMR-V により測定された注視点移動データは一旦 VTR に録画された後, インタフェースを介して 30 個/秒の速度でパーソナルコンピュータに入力される. 入力されたデータは固視微動などのために微小なばらつきが多いので, 画面の分解能 2 ドット (半径) 以内に存在する注視点は一点に集約して平均値を代表注視点とした. また, これらの注視点はディスプレイ画面の左上隅を原点とする位置座標データであるので, ディスプレイのほぼ中央になる水平線上の眼球直視正面を原点とする視野角度データに変換した. これらの処理は全てパーソナルコンピュータで行われ, 最後に水平・垂直の視野角度データとしてフロッピーディス

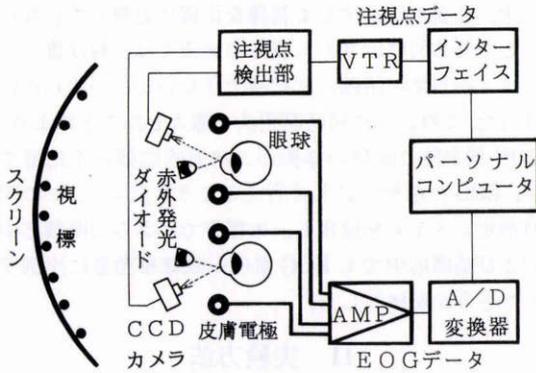


図1 EOG・注視点同時計測システムの概要。

アイマークレコーダで検出された注視点は図の上側の処理でコンピュータに入力される。皮膚電極で検出されたEOG電位は下側の処理でコンピュータに入力される。

クに保存した。最終的に処理された注視点データの精度は視野中心部で約0.6°であった。ここで、注視点の水平移動量を縦軸に、時間を横軸にとることにより、注視点移動の時間経過が求められるので、これをEOG電位変化の時間経過とともに同時表示をすれば、注視点の衝動性水平移動量とEOG電位変化とを関連づけることができる。

以上の測定はシールドされた暗室内で行われ、被験者は頭部にゴーグル型のアイマークレコーダを装着して机の前の椅子に正座し、顎を受け台にのせて眼球前方50cmの位置の机の上に置かれた曲率半径50cm、幅50cm×高さ50cmの半円筒状白色スクリーンを見ようになっている。図2は頭部の装着状態を示す写真である。

被験者には暗順応または明順応の下で1秒間隔で発信している圧電スピーカの合図に従い、眼球直視水平線上左右±20°の範囲内で自由な幅の衝動性眼球運動を行わせた。測定に先行して60lxの室内白熱電灯光の下で15~40分の明順応を行ったあと、暗順応16分間とこれに引き続きスクリーンからの反射照度が顔面位置で1,000lxとなるような300Wハロゲンランプの白熱光照射による明順応を16分間行った。測定中、連続的に眼球を動かす続けるのは被験者に苦痛を与える恐れがあり、またディスクメモリにデータを格納するための時間も必要なので、測定は暗順応下と明順応下ともに2分間隔で行った。一区切りの測定で被験者は±20°以内の任意の角度で1秒間隔毎に衝動運動を行い、停止した位置で次の衝動運動まで固視を続けた。

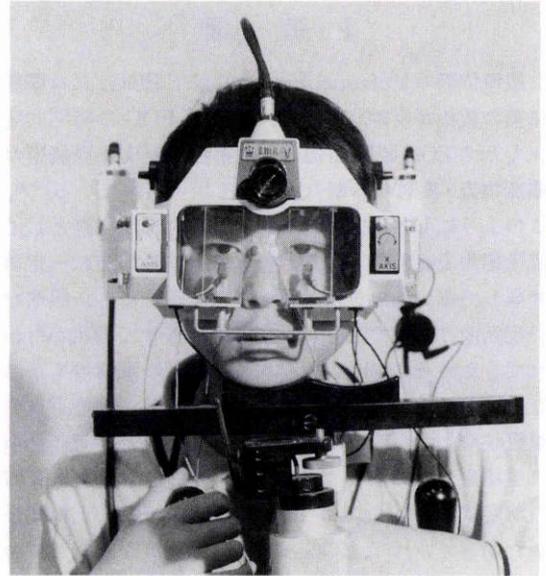


図2 頭部装着状態。

内外眼角部に一対ずつの皮膚電極を糊付けし、その上からアイマークレコーダを装着した状態。顎は受け台にのせている。

各区間では眼球を左右8往復衝動的に動かし、そのときの眼球移動とEOG電位変化量とを検出し、その中から6組のデータをソフトウェア処理により、一部マニュアル操作を加えて半自動的に抽出した。被験者は19~23歳で健常視力(裸眼視力1.2~2.0)の男性9名18眼であり、日内変動の影響を少なくするため測定は13時30分から14時30分の間で行った。

III 実験結果

測定結果を図3~図6に示す。図3は1被験者について暗順応2~16分(3a)および1,000lxの明順応2~16分(3b)で2分毎に測定されたデータを示したものである。横軸は眼球移動量を、縦軸はEOG電位変化量を表している。2分毎に測定された一区切りのデータは6個からなり、直線は6個のデータに対する回帰直線である。各直線の平均値の点に標準偏差を縦棒で示している。2分毎のデータは回帰直線の傾きの小さい順に、縦軸の目盛りを100μVずつ上方にずらして表示している。図4も別の被験者について同様に表示したものである。図5は、被験者9名について暗順応8分後(5a)、16分後(5b)の(眼球移動量-EOG電位)特性を表示したものである。図6は、同様に1,000lxの明順応8分後(6a)、16分後(6b)の特性を示し

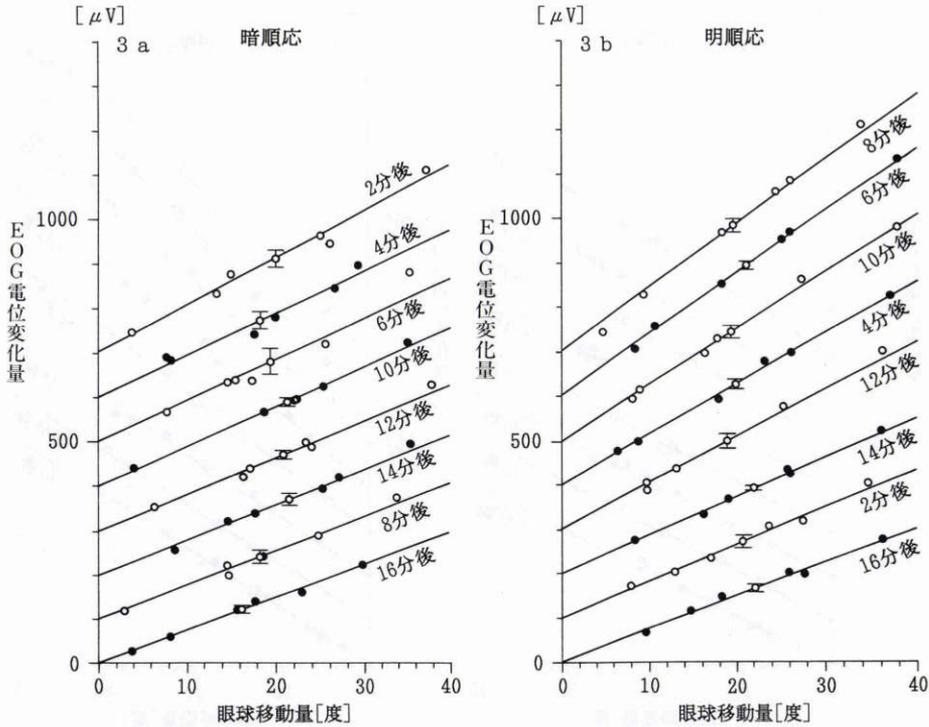


図 3 明順応および暗順応中の 2 分毎の経時変化に対する EOG 電位変化特性。被験者 J.H. の場合。横軸は眼球移動量 [度]，縦軸は EOG 電位変化量 [μV]。回帰直線の原点は縦方向上側に 100 μV ずつシフトされている。3 a：暗順応特性。3 b：明順応特性。

た図である。

IV 考 按

眼球移動量と EOG 電位変化量との関係は EOG の特性を解析する上で重要であり、これまでいくつかの報告がなされている。例えば、Fenn ら¹⁰⁾は EOG が眼球移動角の正弦に比例すると報告している。しかし、Hamada⁹⁾は 20° の範囲内で、Finocchio ら⁹⁾は ±20° の範囲内で両者は比例すると報告している。筆者ら¹¹⁾も EOG と注視点の同時測定から ±15° の範囲では比例するとの結果を得ている。ところで、EOG の測定には不安定要素が多く、それが網膜電位図 (ERG) に比べて EOG の臨床応用面での普及が遅れている原因の一つとなっている。例えば、電極の種類による影響⁷⁾、電極の接着位置や骨による影響⁶⁾¹²⁾、あるいは日内変動などがあげられる。筆者らは自由に眼球を衝動運動させて EOG 時間曲線を測定する方法を検討しているが、そのためにはこれら変動成分の特性を検討しておく必要がある。電極の種類や位置を固定すれば電極による

影響は軽減され、また日内変動についてはすでに報告がある^{13)~15)}。EOG 時間曲線の測定では、一般には数十 lx の照度の室内光で 15 分以上の明順応がなされたのち、暗闇で 15 分または 30 分の暗順応、続いて約 1,000 lx 前後の照度の白色光のもとで約 15 分間明順応が行われる。このように、EOG 時間曲線は明順応下および暗順応下で測定されるので、任意眼球運動から得られた EOG 電位を、一定振幅の眼球運動に相当する値に補正して EOG 時間曲線を求めるためには、明順応および暗順応の全期間にわたって衝動運動量と EOG 電位とが一定の関係を保っていることが必要であるが、明・暗順応下での EOG 電位特性についてはこれまでに報告例がなかった。Hamada⁹⁾は角膜の光学的な性質を使って注視位置を写真撮影し、EOG の補正を試みている。この場合は室内光の下だけでの実験と考えられ、人間の場合では 20° までは EOG が眼球回転角に比例すると報告している。また、Finocchio ら⁹⁾は幼児を対象として EOG の較正を行い、±20° までは線形性が保たれているという結果を得ている。この場合は薄暗

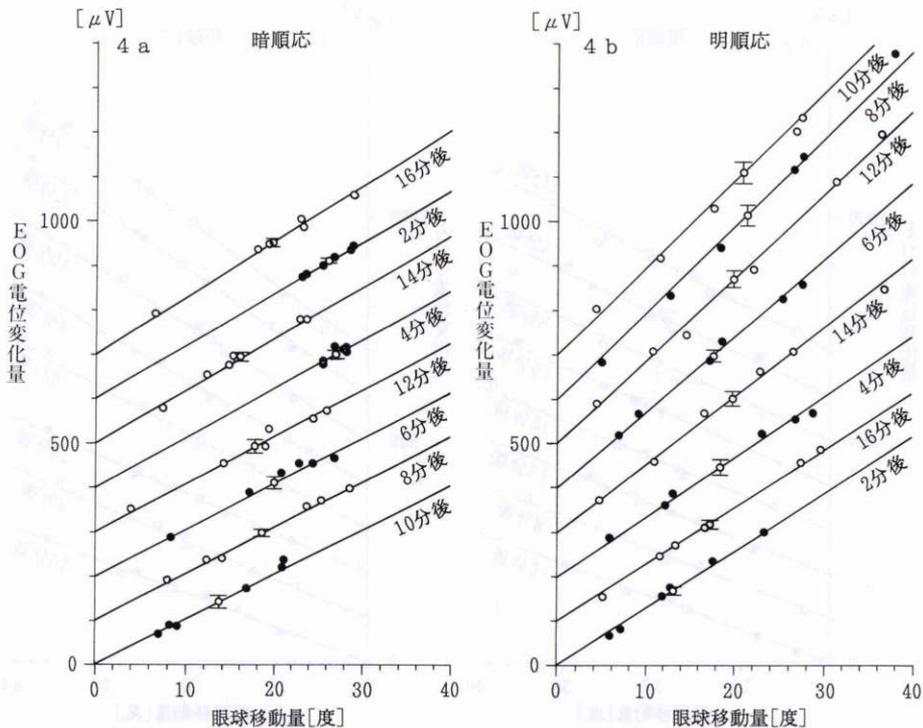


図4 明順応および暗順応中の2分毎の経時変化に対するEOG電位変化特性。
被験者R.K.の場合、4a：暗順応特性、4b：明順応特性。

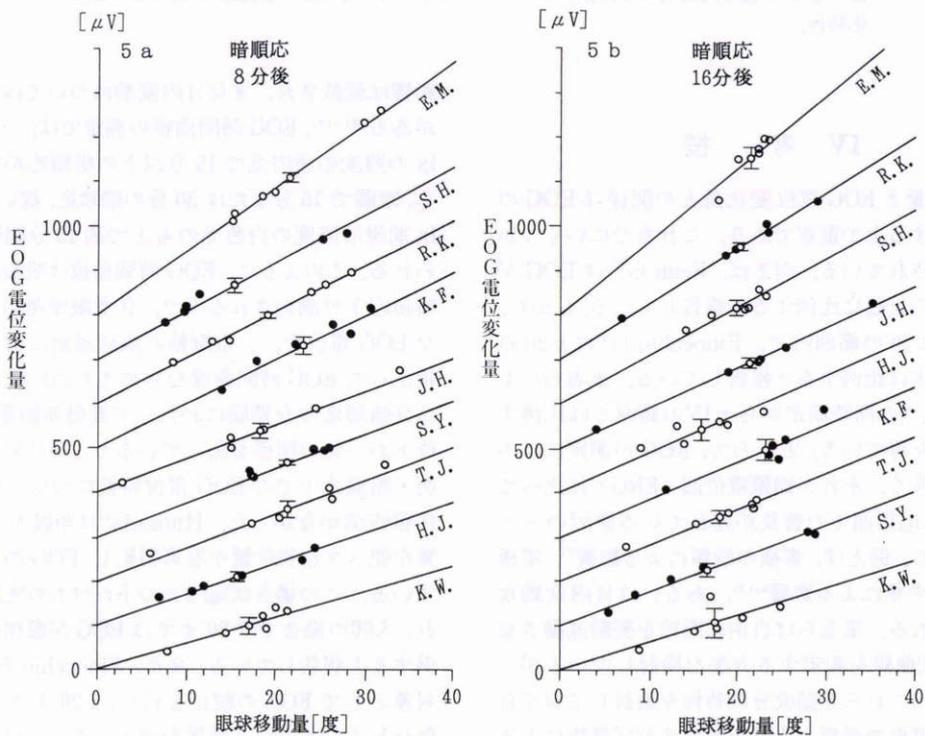


図5 暗順応中のEOG電位特性。
表示方法は図3と同じ、5a：暗順応8分後、5b：暗順応16分後。

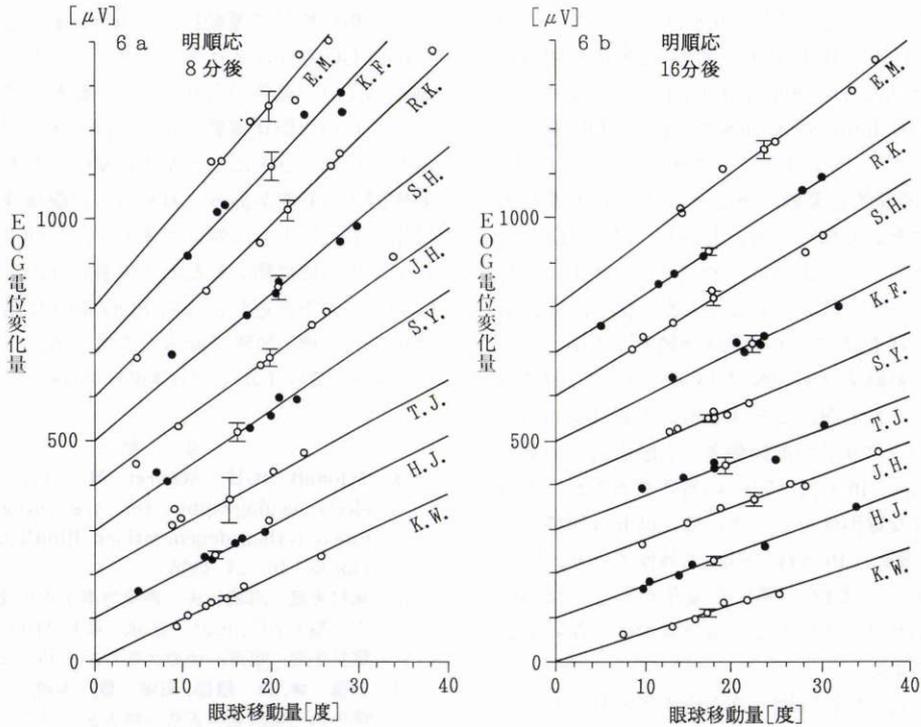


図6 明順応中のEOG電位特性。
表示方法は図3と同じ。6a：明順応8分後。6b：明順応16分後。

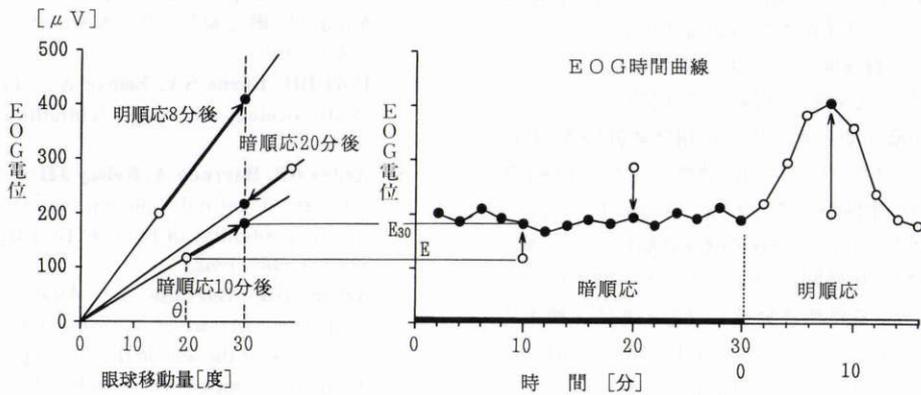


図7 任意眼球運動によるEOG時間曲線測定のご概念図。
左図の白丸は測定データとし、これを原点を通る直線により30°の眼球移動量に換算したEOG電位が黒丸で示されている。

い測定室で実験が行われている。これらの実験はすべて一定の環境条件下のみで行われたものであり、明順応・暗順応など種々の順応下における眼球運動量とEOG電位変化量との関係、およびその経時的特性を検討した報告ではない。

本報告では、明・暗順応の全期間にわたって眼球移

動量とEOG電位との関係を求めた。図3は被験者J.H.の場合の明・暗順応2分毎のEOG電位変化を表示したものであり、6個からなる一区切りの測定データ群は各々の回帰直線に良好に一致している。図4は被験者R.K.の場合を示しているが、同様に良好な線形特性を示している。実験では、1秒間隔で左右交互に8

往復種々の振幅で衝動性眼球運動を行わせているので、1回の測定には16秒必要である。暗順応の場合にはEOG電位の時間的な変動は比較的ゆっくりしているが、明順応中のlight peak前後におけるEOG電位の変動は速いので、一区切りのデータ個数を多くとると、EOG電位の時間的な変動が測定データに混入する恐れがあり、注意が必要である。しかし、図3(b)および図4(b)からわかるように、今回のデータ中にはそれらの変動はあまり認められなかった。図3、4に示されたデータは右眼右向きの眼球運動であるが、データの線形性は被験者9名の健常18眼に対して、眼球の運動方向および左右眼によらずとも差異は認められなかった。図5は9名の被験者の右眼右向きの暗順応8分後(5a)、16分後(5b)の特性であるが、どのデータも良好な線形性を示している。図6は同様に明順応8分後(6a)、16分後(6b)の特性であり、明順応8分後のデータはEOG電位の変化が大きいため幾分ばらつきが目立っているが、ほぼ線形性を保っているとみなしてよい。

眼電位図は再現性に問題があると考えられており定量的な評価に対する信頼性は低い。本研究により被験者数は少ないものの、種々の順応状態でもEOG電位と衝動性眼球運動との間に成り立つ線形性は、EOG解析を容易にする基本的な特性になると考えられる。上述のように、眼球運動が $\pm 20^\circ$ 以内では明・暗順応下ともにEOG電位変化量は衝動性眼球移動量にほぼ比例することが確かめられたので、眼球運動幅を 30° に固定しないで $\pm 20^\circ$ 以内で自由に運動させてもEOG時間曲線測定の可能性が示唆される。すなわち、図7の左側に示されるように、任意の眼球運動について得られたEOG電位を比例関係によって、どの時刻においても 30° に相当する眼球運動量に対応する値に補正することが可能である。たとえば、図中の暗順応10分後を例にとると、実測されたEOG電位が E [μV]でありそのときの眼球運動量が θ [$^\circ$]である場合、眼球運動量 30° に換算したEOG電位 E_{30} [μV]は、

$$E_{30} = 30 E / \theta$$

で求められる。明、暗順応の期間中すべての時刻にわたって、眼球運動量 30° に換算したEOG電位を求めて図示すれば、図の右側に示されたようなEOG時間曲線が求められる。この方法によれば、眼球が自由な水平性衝動運動をしていてもEOGの測定は可能である。

なお、本報では眼球正面の水平線上付近での種々の

振幅の衝動性眼球運動によるEOG電位特性を検討したが、EOG電位はクロストークなどのために耳側と鼻側では多少の差異があり、眼位の影響も考えられる¹⁶⁾ので、自由な眼球運動によりEOG時間曲線を作成するためには、さらに上下左右に変位した眼位での特性も検討する必要がある。斜め方向の眼球運動に対しては本方式では十分に対応できるが、今回は眼球を主として水平方向に動かしたので考慮しなかった。また、眼瞼などの垂直運動によるEOG電位に混入した雑音はデータ処理の段階で除去できている。

本論文の要旨は第95回日本眼科学会総会において発表された。

文 献

- 1) Schmidt JGH, Mäurer M: The value of electro-oculography for the diagnosis of tapeto-retinal degenerations. *Bibthca Ophthalmol* 85: 10-24, 1976.
- 2) 米村大蔵, 河崎一夫: 網膜色素上皮の電気現象とその臨床応用. 田沢 豊編: 眼科Mook 14 眼と電気生理. 東京, 金原出版, 35-45, 1980.
- 3) 三善 恵, 森 敏郎, 田澤 豊: 連続した3種の網膜色素上皮機能検査法—検査法の改良および疾患眼への応用—. 眼紀 41: 370-374, 1990.
- 4) 筒井 純, 武田純爾, 市橋 進: 眼科診断における眼球運動—EOGとENG—. 田沢 豊編: 眼科Mook 14 眼と電気生理. 東京, 金原出版, 230-253, 1980.
- 5) Doft BH, Burns SA, Elsner A: The inverse electro-oculogram. *Br J Ophthalmol* 66: 379-381, 1982.
- 6) Arden GB, Barrada A, Kelsey JH: New clinical test of retinal function based upon the standing potential of the eye. *Br J Ophthalmol* 46: 449-467, 1962.
- 7) Arden GB, Barrada A: Analysis of the electro-oculograms of a series of normal subjects: Role of the lens in the development of the standing potential. *Br J Ophthalmol* 46: 468-482, 1962.
- 8) Hamada T: A method for calibrating the gain of the electro-oculogram (EOG) using the optical properties of the eye. *J Neurosci Methods* 10: 259-265, 1984.
- 9) Finocchio DV, Preston KL, Fuchs AF: Obtaining a quantitative measure of eye movements in human infants: A method of calibrating the electrooculogram. *Vision Res* 30: 1119-1128, 1990.
- 10) Fenn WO, Hursh JB: Movements of the eyes when the lids are closed. *Am J Physiol* 118: 8

—14, 1937.

11) 伊月宣之, 久保賢倫: アイマークレコーダを使った視線移動の測定とEOGの補正. 日眼会誌 95: 1085—1093, 1991.

12) 米村大蔵, 河崎一夫: EOG. 臨床網膜電図学. 東京, 医学書院, 131—146, 1985.

13) Anderson ML, Purple RL: Circadian rhythms and variability of the clinical electro-oculogram. Invest Ophthalmol Vis Sci 19: 278

—288, 1980.

14) 矢ヶ崎克哉: 正常者のEOG (Electro-Oculogram)の変動. 眼紀 32: 1383—1389, 1981.

15) 玉井 信, 清沢源弘, 福与貴秀, 他: 眼球常存電位 (Standing Potential)の日内変動. 眼紀 32: 1501—1507, 1981.

16) 荻田洋二, 會谷尚之, 三村 治: EOGによる眼球運動の解析における基礎的研究—眼位変化とEOG振幅との関係—. 眼臨 73: 943—946, 1979.