

大振幅の衝動性眼球運動に対する眼電位図特性

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⁾京都大学工学部電気工学教室

要 約

臨床診断に应用されている眼電位図(EOG)時間曲線は, 眼球を一定振幅で衝動運動させたときのEOG電位変化として測定される。ここで, 眼球運動に対するEOG電位の特性が分かっていたら, 任意の衝動性眼球運動によるEOG電位からでも, このEOG電位特性に基づいた補正により, 定振幅の眼球運動による電位を計算することによりEOG時間曲線が求められる。筆者らは, $\pm 20^\circ$ までの眼球運動に対しては明順応・暗順応の条件が一定であればEOG電位特性は比例関係であることを報告した。しかし, さらに大きい角度の眼球運動に対するEOG電位特性は, Fennらによれば正弦的な関係があると報告されている。一方, 比例関係があるとの報告もあるので再検討したところ, EOG電位特性は約 80° までは比例関係で近似できることが判明した。(日眼会誌 97: 514—518, 1993)

キーワード: 眼電位図, EOG電位特性, 衝動性眼球運動, 眼球移動量, EOG時間曲線

Characteristics of the EOG Potential Changes Generated by Saccadic Eye Movements of Large Amplitude

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 time curve of the electrooculogram (EOG) as applied to clinical diagnosis is measured as the changes in the standing potentials around the eyes when a subject performs saccadic eye movements of constant amplitude. If the characteristics of these potential changes caused by the eye movements are known, the time curves of EOG can be derived from the potential changes generated by saccadic eye movements of random amplitude, by transforming the measured potentials into the exact values corresponding to the constant amplitudes of saccades. We have already reported that the characteristic curves of EOG are proportional to the angles of the eye movements within $\pm 20^\circ$. However, Fenn and Hursh reported that the characteristics of saccadic eye movements for larger amplitudes up to about 80° were sinusoidal functions. Other workers have reported linear relations of the characteristics of EOG. In this report we attempted to clarify whether the characteristics of EOG were linear or sinusoidal. From our experiments it became clear that the characteristics of EOG could be approximated to straight lines up to about 80° (visual angle). (J Jpn Ophthalmol Soc 97: 514—518, 1993)

Key words: Electrooculogram (EOG), Characteristics of EOG potential changes, Saccadic eye movement, Amplitude of saccade, Time curve of electrooculogram

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12月27日受付, 平成4年10月14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 December 27, 1991 and accepted in revised form October 14, 1992)

I 緒 言

眼電位図 (electrooculogram: 以下 EOG) は眼球周辺から検出される電位 (EOG 電位) を記録したものであり臨床診断に応用されているが、この EOG の波形や振幅あるいは眼球運動との関連性を定量的に解析する場合¹⁾²⁾、眼球運動角と EOG 電位との間の関係 (以下、EOG 電位特性) を把握しておくことは重要である。もし、EOG 電位特性が眼球運動角度に対して正弦的な関係を有していれば、眼球の滑動性追従運動の特性を測定する場合、正弦波状に変化する視標を追従させた時の EOG 電位は、眼球の正弦波状運動に加えて EOG 電位特性の正弦関係によりさらに歪んだ特性となり、波形解析が複雑になる。斜視の特性解析や神経眼科などの領域で眼球運動から各種疾患を検討する場合、通常は EOG 電位特性を線形とみなして解析されている。これらの解析において、眼球運動幅が小さい場合は問題ないが、大振幅の眼球運動に対しては注意が必要である。

また筆者らは、視力の異常や視野障害のある被検者からでも、眼球を自由な振幅で衝動運動させることにより、EOG 時間曲線を求める方法の開発のために基礎的な研究を行っているが、種々の衝動性眼球運動幅から得られた EOG 電位を、EOG 電位特性を使って一定振幅の眼球運動に相当する値に補正する場合³⁾、その特性を明確にしておくことが必要である。

これまでの研究によれば、衝動性眼球運動角 (以下、眼球移動量) と EOG 電位変化量との関係は、正弦関係であるとの報告と比例関係であるとの報告がある。Fenn ら⁴⁾によれば、EOG 電位は視角で約 80° までは眼球移動量の正弦に比例すると報告されている。一方、Hamada⁵⁾ (約 20° まで)、Finocchio ら⁶⁾ ($\pm 20^\circ$ まで) は線形であると報告している。廣石⁷⁾、Shackel⁸⁾ も正面から左右 $\pm 40^\circ$ までの水平眼球運動に対する EOG 電位特性が線形かどうかを検討している。筆者らも、振幅が 30° 以内では直線関係となることを報告した⁹⁾。これまで EOG 電位特性を詳しく検討した報告は数少なく、またそれらの中で、EOG 電位特性が線形であるか正弦的であるかの明確な結論は出されていない。Fenn ら⁴⁾の実験は半世紀前のものであり、改めて追試実験を行って再検討することが必要であろう。そこで本報告では、眼球を $10 \sim 100^\circ$ までの広範囲にわたって衝動運動を行わせ、EOG 電位が眼球移動量にどのように依存しているかを検討した。

II 実験方法

図 1 は実験装置の概略である。縦に置かれた半径 50 cm の半円筒状スクリーン表面には、右眼球直視水平線上に左右 $\pm 50^\circ$ まで 5° 間隔で発光ダイオード視標 (視角約 $20' \phi$) が取り付けられており、その中心に被験者の右眼が置かれている。視標は、眼球正面を中心にしてその両側の左右対称な位置にある 2 つが一組となって、0.5 Hz の周期で交互に点滅するようになっている。その角度は $10^\circ, 20^\circ, \dots, 100^\circ$ の 10 種類であり、実験では点灯している視標が一方から他方へ切り替わったとき、被験者がそれを視線で追跡した際の衝動性眼球運動により生じる EOG 電位の変化量 (跳躍量) を測定する。一区切りの測定では、同一角度で 10 往復分の衝動運動による EOG 電位が検出され、その電位は交流増幅されたあと A/D 変換器を通してパソコンに入力される。増幅器の時定数は 1.5 sec、高域遮断周波数は 30 Hz に設定されており、A/D 変換器の分解能は 12 ビット、素子の変換速度は $8 \mu\text{sec}$ 、入力電圧は $\pm 5 \text{ V}$ である。EOG 電位の実際の測定分解能は約 $10 \mu\text{V}$ 、視角にして約 0.5° であり、これは雑音混入の程度により左右される。パソコンに入力された電位波形から、眼球の衝動運動に対応する EOG 電位変化量が半自動的に検出される。この場合のデータ処理においては、10 往復の波形の中から右向き左向き 6 組の眼球運動による EOG 電位変化量が抽出され、各々の平均値からのずれの大きい 2 組のデータが除去されて、残り 4 組の平均値がデータとなる。なお、以下本論文ではこの EOG 電位変化量を単に EOG 電位と呼ぶ。

被験者は 100 W の白熱電灯の下でイスに正座し、右眼が半円筒スクリーンの曲率中心位置になるように顎受け台に顎をのせ、さらに額当てで頭部の動きを止めて視標を追視した。背景光の明るさとしてはスクリーンからの反射照度が右眼の位置で 60 lx であった。対

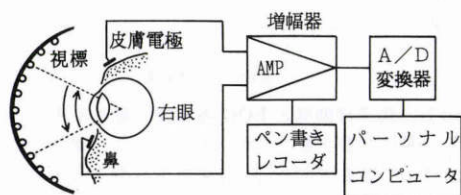


図 1 測定システム。

眼球下側の電極：内眼角部（鼻側）に装着、上側の電極：外眼角部とこめかみの中央部に装着。

象眼は右眼とし、左眼に対する入射光は眼帯により遮断した。なお、EOG 電位はクロストークの処理ができるよう両眼から検出した。測定は左眼への入射光が遮断されてから約 30 分間の順応ののち開始したが、入射光を遮蔽するための眼帯は角膜に触れないようなカップ形とし、測定中は両眼開眼状態で視標を追視できるよう配慮した。そして、図 1 に示したように、EOG 電位検出のため、右眼の内眼角部側の鼻の上および外眼角部から髪の生え際に至る水平線上のこめかみ中央部に小型生体電極(日本光電製 12 mm 径)を貼り付けた。アースは右耳たぶにとり、左眼も右眼と対称な位置に各電極を貼り付けた。被験者は全て正常視力を有する者(裸眼視力 1.0~2.0)であり、12 歳の男児 1 名、19~23 歳の男子学生 6 名、45 歳、48 歳の男性各 1 名ずつの合計 9 名の右眼を対象にした。

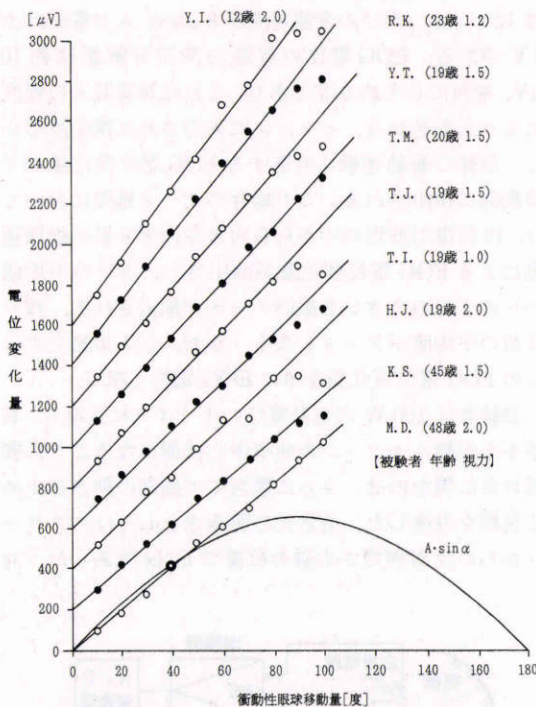


図 2 眼球移動量と EOG 電位変化量との関係。

9 名の健常右眼 9 眼の例が示されている。横軸の目盛りは眼球移動量であり、EOG 電位変化量を示す縦軸は表示を明瞭にするために原点が $200 \mu V$ ずつ上方にずらされている。最下段の曲線は被験者 M.D. のデータの○印を通る正弦波曲線を示す。他眼からのクロストーク値は -16.4 dB として処理した。

III 結 果

図 2 は 9 名について眼球移動量と EOG 電位との関係を求めたものである。被験者は両眼とも全て正常視力を有していたので、他眼からのクロストーク値は -16.4 dB として処理した¹⁰⁾。EOG 電位特性は眼球運動の右向き、左向きおよびその平均を求めたが、眼球運動の向きによる有意差は認められなかった。図 2 のデータは平均値であり、識別しやすくするため被験者毎に原点を $200 \mu V$ ずつ上方にずらして表示している。測定結果から、約 80° までは直線関係が得られた。被験者 T.M., M.D. の例ではさらに 100° まで直線性が保たれていた。最下段の曲線は、被験者 M.D. の場合で眼球移動量が 40° のときの EOG 電位測定値 $359 \mu V$ の点(○印)を通る正弦波曲線を示したものである。

今回得られたデータを Fenn ら⁴⁾ のデータと比較するため、横軸を眼球移動量の正弦で表示し直したのが図 3 である。図には原点を通る近似直線が表示されて

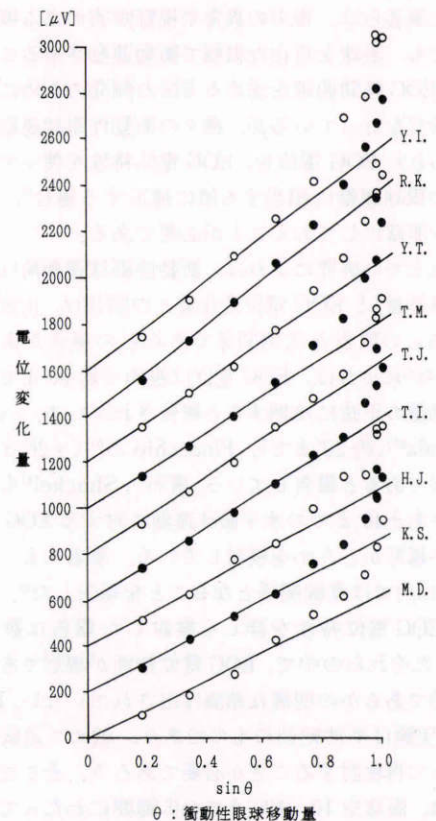


図 3 図 2 のグラフで横軸の目盛りに眼球移動量の正弦関数値をとった場合。

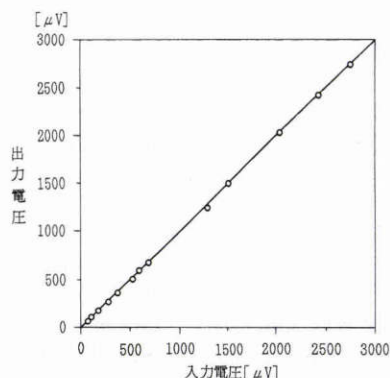


図4 測定システムの入出力特性.

入力にはEOG電位検出用電極の入力ピン端子に既知の矩形電圧が印加され、出力はその入力電圧にパーソナルコンピュータで最終処理が施されて得られた電位データである。

いるが、眼球移動量が約 60° 以上になると、EOG電位は眼球移動量の正弦に比例しなくなっている。横軸は正弦関数なので、眼球移動量が 80° と 100° の場合($\sin 80^\circ = \sin 100^\circ$)のEOG電位は横軸の同一目盛り上にある。

以上の結果より、EOG電位は眼球移動量の正弦関数ではなく、約 80° までの眼球移動量に対しては線形な特性が得られた。

本装置のEOG電位入力端子に0.5 Hzの既知の矩形波を入力し、EOG電位測定と全く同じ処理で増幅器の出力をパーソナルコンピュータに入力して計算した電位から、測定システム全体の入出力特性を求めた。図4に結果を示す。横軸は入力電位、縦軸は最終の処理を受けた出力電位であり、本測定で用いた装置の入出力特性は完全な線形特性を有していた。

IV 考 按

EOGは網膜色素上皮の機能検査のみならず、斜視、弱視の障害レベルの検査、診断に有用であり²⁾¹¹⁾¹²⁾、種々の観点から研究がなされている。これらの検査や研究においては、滑動性眼球運動または衝動性眼球運動によるEOG波形が測定されているが、EOG電位は一般的には測定条件によって異なる場合が多く、臨床検査に適用するには、各々の条件下での眼球移動量とEOG電位との関係(EOG電位特性)を定量的に把握する必要がある。

Fennら⁴⁾(1936)は、眼球移動量が約 80° 以内では

EOG電位が眼球移動量の正弦に比例すると報告しており、多くの文献で引用されている¹³⁾¹⁴⁾。一方、廣石⁷⁾(1953)は、正面から左右各々 40° までの眼球運動に対するEOG電位は原点を通る直線に比例すると報告している。この場合の測定視野は 80° であるが、運動の基準点を正面にとっているので、衝動性の眼球運動幅は実質 40° 以内である。図2に示した正弦波形と被験者M. D.の場合の直線とを比較してもわかるように、 $40 \sim 50^\circ$ 以内の眼球運動に対するEOG電位は直線で近似しても正弦で近似しても有意な差異は認められない。Shackel⁸⁾(1960)も類似の実験を行っているが、EOG電位特性が正弦的であるか直線的であるかの明確な結論は出していない。彼の報告したデータもやはり正面から左右 40° までの眼球運動に対するものである。最近では、Finocchioら⁹⁾(1990)が乳幼児を対象とした測定で、 $\pm 20^\circ$ までEOG電位特性は直線関係があることを示している。これらの報告の中で、約 80° 程度までの大振幅の眼球運動幅に対するEOG電位特性を求めているのは、Fennら⁴⁾だけである。しかし、Fennらの報告は約半世紀前の測定であり、測定装置の入出力関係が明確にされていない点や、上述のようにEOG電位特性が線形であるとする報告も散見する点を考慮すれば、再度検討し直すべきである。そこで筆者らは測定装置の入出力特性を十分把握した上で(図4)彼らの追試実験を行い、大振幅の眼球移動量に対するEOG電位特性の再検討を試みた。

実験では 100° までの大振幅の眼球運動に対するEOG電位特性を求めたが、図2に示したように、約 80° まではほぼ直線関係が成り立っていた。これは、これまで多くの研究者から支持されていたFennらのデータとは異なる結果である。図2のグラフで、EOG電位が直線から少し下がっている 90° 、 100° の場合は、視標が視野の両端付近にあるため追視しにくいなど、測定データの信頼性に問題が残る。アイマークレコーダで注視点位置が検出できればこの点は明確になるが、アイマークレコーダの測定視野範囲は 60° なので、注視点監視による確認は不可能である。図2の横軸を正弦関数($\sin \theta$)に変えて表示すると図3となるが、これはFennら⁴⁾の表示と同じであり、 60° 以上になるとほとんどの場合 $\sin \theta$ を表す直線から外れていることがわかる。なお、今回のデータは左右対称な位置の視標を追視したため、眼球の運動方向によるEOG電位の差は認められなかったが、廣石⁷⁾の報告にあるように、正面を基準にして左右に眼球を振らせる場合にはその向きに

よる差異が認められた。この点に関しては別の機会に検討を加えたい。

本測定では、視標注視の際に優位眼が左右の位置で入れ替わることを避けるため、左眼をカップ形の眼帯で遮蔽して（開瞼状態で）、右眼のみで測定を行った。片眼を遮蔽したときのEOG電位特性については廣石⁷⁾がすでに検討しており、8例の正常眼に対しては遮蔽しても開瞼状態であればその影響がないことを報告している。筆者らも確認のため、4名の被験者に対して60 lxの白熱光の下で30分間の明順応後、左眼を遮蔽してからさらに30分の順応後のEOG電位特性を測定し、引き続いて眼帯を外した開瞼状態で30分間の順応後両眼で同様の測定を行い、片眼遮蔽の影響を調べた結果、その影響はほとんど認められなかった。

近年の電子機器関係の発達には著しいものがあり、Fennらが実験を行った約半世紀前とは雲泥の差がある。その最新の測定装置を使ってEOG電位特性を測定した結果、大振幅の眼球運動に対するEOG電位は80°程度までは比例していることが明らかになった。筆者らは、視標が見えなくても一定のリズムに合わせて眼球を自由に動かすだけで、EOG（眼電位図）時間曲線の測定ができるような方法の開発を目標にしてEOG電位特性の解析を行っている³⁾⁹⁾が、EOG時間曲線の測定には眼球運動の振幅が一定（30°）であるという条件が必要である。したがって、眼球を自由な振幅で動かしたときのEOG電位から時間曲線を求めるためには、EOG電位を一定振幅の眼球運動に相当する値に換算する必要がある。その際、EOG電位特性が線形であれば換算の処理が非常に簡単になる。今回の結果は、EOG測定処理の簡略化にとって大変有利なことである。また、眼科における電気生理学的な検査をする場合にも、EOG電位特性が線形であることはデータ解析の際に極めて好都合である。今回のデータに基づき、さらにEOG電位特性の理論的な解析を進めたい。

最後に、有益なるご助言をいただいた金沢大学医学部眼科学教室河崎一夫教授に謝意を表します。また、測定に協力していただいた新居浜高専学生並びに教職員の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) 山崎篤巳：眼球運動の定量的分析。筒井 純（編）：眼科 Mook, 4, 神経眼科へのアプローチ。金原出版、東京、90—101, 1978.
- 2) 深井小久子：視能矯正の神経眼科。筒井 純（編）：眼科 Mook, 4, 神経眼科へのアプローチ。金原出版、東京、182—198, 1978.
- 3) 伊月宣之、久保賢倫、西川禎一：明順応及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。日眼会誌 96: 1458—1465, 1992.
- 4) Fenn WO, Hursh JB: Movements of the eyes when the lids are closed. *Am J Physiol* 8: 8—14, 1936.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 廣石 恂：Electro-oculogram（眼球電位図, E.O.G.）に関する研究：正常眼球運動に於けるElectro-oculogram. 日眼会誌 57: 71—80, 1953.
- 8) Shackel B: Pilot study in electrooculography. *Br J Ophthalmol* 44: 89—113, 1960.
- 9) 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.
- 10) 久保賢倫、平井健一、三井幸彦：EOGにみられるContralateral Effect（Cross-Talk）の測定法および消去法。眼紀 30: 701—704, 1979.
- 11) 筒井 純、深井小久子、木村 久：弱視の電気生理。田沢 豊（編）：眼科 Mook, 14, 眼と電気生理。金原出版、東京、133—150, 1980.
- 12) 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。金原出版、東京、230—253, 1980.
- 13) Miles WR: Experimental modification of the polarity potential of the human eye. *Yale J Biol Med* 12: 161—183, 1939.
- 14) Arden GB, Kelsey JH: Changes produced by light in the standing potential of the human eye. *J Physiol* 161: 189—204, 1962.