サーチコイルシステムによる眼球運動記録

荻野 貞雄・加藤 功・佐久間 惇・高橋 馨子
岩沢 寛・岡田 智幸・渡辺 昭司・竹山 勇

A Magnetic Search Coil Method Using a Soft Contact Lens for Measuring Human Eye Movements

Sadao Ogino, Isao Kato, Atsushi Sakuma, Kaoruko Takahashi,
Hiroshi Iwasawa, Tomoyuki Okada, Syoji Watanabe, Isamu Takeyama
Department of Otolaryngology, St. Marianna University School of Medicine

The precise recording of human eye movements is important in both clinical and basic researches. Many techniques have been used, but we have found the magnetic search coil method with a soft contact lens to be more convenient than the eye recording systems in common use. We devised a new search coil system based on Remmel's method. In our procedure, the horizontal and vertical field coils are driven at 50 and 75 Hz, respectively, by phase-locked square waves. The size of the frame which delivers the magnetic field is 30 cm in diameter. As a sensor eye coil, a newly designed soft contact lens is applied. The lens is made of silicone rubber and is 13.5 mm in diameter. It was tested in normal subjects, and there was no slipping from the eye and no corneal damage.

With this equipment, we studied the influence of eye-coil position on gains of both pursuit and saccadic eye movements in 10 normal subjects. The gains were unchanged when the eye-coil position moved within 5 cm in all directions and increased linearly when it moved more than 5 cm. With the use of these data, pursuit eye movements were investigated in an open loop condition. The scleral search coil system of measuring eye movements offers higher resolution, higher linearity, wider dynamic range, lower drift and lower noise, and is more stable than the conventional ENG. The advantage of our system were clearly demonstrated in velocity and acceleration tracings in an open loop condition.

In conclusion, our system was found to be ideal for the accurate recording of human eye movements.

Key words: search coil, open loop condition, human eye movements, soft contact lens

はじめに

眼球運動の観察は、内耳障害をはじめとする末梢神経疾患のみならず中枢神経疾患の診断にも重要であり、フレンツェル眼鏡を用いたり、肉眼的に観察することによって臨床検査に役立たせている。さらに、これを記録することによりその応用範囲は広がり、その結果の分析によって責任病巣の予測も可能となり、古くから数多くの報告がみられる^{1)~5)}。しかし、この眼球運動記録の際には、1) 時間的・空間的分解能が高い、2) 測定域が広い、3) 応用範囲が広く安定性がよい、4) 視界を妨げない、5) 水平・垂直・回旋運動が測定できる、6) 眼瞼の動き・筋電図の混入がない、7) 簡単に着脱ができる、8) 被験者に訓練を要しない、9) 侵襲が少ない、などの条件が満たされねばならない⁶⁾。現在、臨床場において眼球運動の記録は、利便性、患者に対する違和感のないことなどから皿電極を用いた ENG(electro-nystagmogram)で行われることが多いが、単眼記録で誘導が安定せず、垂直方向の記録でまばたきが混入すること、汗の影響で皮膚抵抗が変化することや筋電図の混入などといった欠点もみられる。近年の検査機器の発展に伴い精度の高いものが開発され、これらの欠点を補うべくサーチコイルを用いた方法が動物実験^{7)~9)}では広く行われており、コンタクトレンズにコイル巻く方法によってヒトでも使えるようになり、臨床でも応用されるようになってきた^{10)~18)}。今回、私どもは自作の磁場発生装置およびセンサーとなるアイコイルとして高木ら⁹⁾のコンタクトレンズを用い、サーチコイルシステムが臨床応用できるようになった。さらに、このシステムで眼球運動計測を記録するにあたり、磁場内でアイコイルの位置について記録がどう変化するかについても検討を加えた。Rashbass¹⁴⁾の方法に従った step-ramp 刺激で、サーチコイルシステムを使用して眼球運動計測を精密に記録でき、臨床応用が可能となったので報告する。

方 法

1) 磁場発生装置：

磁場発生装置(図1)は、Remmel¹⁰⁾の方法に基づき製作され、木製の外枠(一辺 35 cm 立方)ボックスの中に直径 30 cm のコイルを埋めこんだものである。このシステムの駆動は、

Robinson¹⁵⁾ や Collewyn⁶⁾ らの方法とは異なりサイン波でなく、Remmel¹⁰⁾の方法に基づく矩形波(75 Hz, 50 Hz)で行っている。

磁場発生装置ボックス内に頭部を入れて眼球が磁場のちょうど中央になるようにした時(図2)、視野角は約 90° 以上あり指標を見るうえで視野の妨げとなることはない。被験者は磁場発生装置ボックス内に、センサーとなるコンタクトレンズ(ア

図1 磁場発生装置

Remmel²⁾の方法に基づき製作された。眼球位置計測のために 5 cm 毎に、木製の外枠に糸を張ってある。

図2 磁場発生装置内に頭部を入れ、bite bar によって頭部を固定する。センサーとなるコンタクトレンズ(アイコイル)を装着した眼球が磁場のちょうど中央になるようにしてある。

図3 センサーとなるアイコイル（日本コンタクトレンズ社製のソフトコンタクトレンズ）

図4 アイコイルを装着したところ
装着に際しリード線は刺激が少ないよう内眼角側にした。

アイコイル：図3）を装着した眼球が磁場のちょうど中央になるように頭部を入れ、bite bar によって頭部を固定する。

2) センサー（アイコイル）：

センサーとなるアイコイルは、日本コンタクトレンズ社製のソフトコンタクトレンズ（図3）を用いた。このコンタクトレンズは、直径 13.5 mm、重さ 76 mg で、導線コイルはウレタン被膜された直径 25 μm の銅線で、直径 12 mm、20回巻に製作されている。被験者の眼球に点眼（ベノキシール[®]）により表面麻酔し、眼球表面にこのレンズを装着、レンズは眼球表面に吸着してズレることが少なくなる。装着に際しリード線は刺激が少ないよう内眼角側にし、また、原則として効き目に装着した（図4）。被験者の眼球角膜表面麻酔および、このアイコイルの装着は医師が行っ

図5 今回の眼球運動記録の略式

た。また、記録の前後に細隙灯にてレンズのズレがないか否か確認し、さらに検査終了後には角膜に対して影響がないかどうか細隙灯にて観察した。今回の研究に際して、アイコイルはデイスポザブルとして使用したが、100°C、15分の煮沸消毒に耐えられるので、繰り返しの使用は可能である¹³⁾。

3) 眼球運動記録：

図5に今回の眼球運動記録のシステム構成を示した。被験者は、パワーアンプによって磁場電流をかけたボックス内に頭部を入れる。眼球に装着したアイコイルは眼球運動により磁場の動きとして誘導電流を発生し（磁界におかれたコイルに磁界となす角度に比例した電位が発生する¹⁶⁾）、コントロールボックスによって電気信号に変換され、A/Dコンバータ（カノーブス社製）を介してパーソナルコンピュータ（NEC PC 9801 DX）に入力、記録される。波形の入力、再生および分析には市販のアプリケーションソフト（WAVEMASTER II: カノーブス社製）を用い、サンプリングタイム 250 Hz で取得した。記録した波形は、専用プリンタ（NEC PC 9801 101E2）にてプリントアウトした。必要に応じて、X-YプロッターあるいはENG（日本光電社製）にて再生した。

4) 磁場内のアイコイルの位置による記録の変化：

単眼にアイコイルを装着し、磁場発生装置ボックス内でアイコイルを装着した眼球が縦横奥行き

のちょうど中央にある状態と、その位置から 5 cm ずつずらしたとき、利得について検討した。対象は、正常成人10名で（男性 5 名、女性 5 名）、年齢は21～32歳（平均24.5歳）、視力は1.0以上（近視の被験者は記録に際し眼鏡を使用）であった。視覚刺激は 0.3 Hz、振幅 20° の三角波と、振幅 20° の二点交互の 2 種類用いた。アイコイル装着眼の縦横奥行きへのズレ幅については、磁場発生装置ボックスの大きさにより制約され、たとえば、右眼にサーチコイルを装着した場合、右方へ 5, 10 cm, 左方へ 5 cm, 下方へ 5, 10 cm, 前方へ 5, 10 cm, それぞれずらした場合について計測した。

また、今回の研究では、step-ramp 刺激による水平方向の眼球運動を精密に行うことを目的としたため、水平方向のみ検討した。

5) step-ramp 刺激：

Rashbass ら¹⁴⁾の方法(図6)に従い step 幅 0, 1, 2, 4, 6° で、1～4°/s の ramp 刺激の open loop condition で、サーチコイルシステムにより眼球

図6 Rashbass ら¹⁰⁾の方法

(open loop condition での追跡眼球運動)

A：ターゲットは動かず、fixation しているの状態。B：ターゲットはある角度だけ step し同じ方向 (onward) に一定速度で動く (ramp 刺激)。C：step なしの ramp 刺激。

運動を原波形、速度、加速度を記録、分析した。刺激は、専用のパーソナルコンピュータ (NEC PC 9801 RX) によって自作の step-ramp 刺激用プログラムで、上記の step 幅および ramp 速度を無作為に与え、慣れの現象を排した。

結 果

1) 被験者の眼球に点眼（ペノキシール®）により表面麻酔した後、眼球の表面にこのレンズを装着したが、記録の前後に細隙灯での検査でレンズのズレはなかった。角膜表面の障害、眼圧の上昇も認められなかった。装着に際し、リード線は刺激が少ないよう内眼角側に出したことによって、コンタクトレンズの使用経験のない被験者でも約30～40分の検査中、異物感を自覚することはなかった。原則として効き眼にアイコイルを装着しデータをとったが、装着眼による差異（左右差）は認められなかった。

2) 図7, 8はこのシステムで記録した実際の眼球運動である。図7は刺激速度 30° の視運動性眼振 (OKN) の原波形及びその緩徐相速度、0.3 Hz、振幅 20° の三角波刺激時の追跡眼球運動、ランダム刺激による急速眼球運動の記録である。まばたきや筋電図の混入がなく、汗の影響も受けず、安定した記録がとれている。図8は step-ramp 刺激時の open loop condition で記録したものである。原波形、速度波形に、アーチファクトの混入がなく基線のずれも見られず、きわめてスムーズである。

3) 図9は、磁場内のアイコイルの位置による記録の変化についてのグラフで、アイコイル装着

図7 このシステムにて記録した実際の眼球運動-1 左側が 30°/s の OKN の原波形及びその緩徐相速度、右上段が三角波刺激時の追跡眼球運動、右下段がランダム刺激による急速眼球運動の記録。時間軸は1目盛1秒。

図8 このシステムにて記録した実際の眼球運動-2 1° step, 4°/s ramp 刺激での open loop condition で記録したもの。上から、ターゲットの動き、眼球運動の原波形、速度波形。start でターゲットは 1° step し、一定速度 4°/s で同方向に動く。眼球はやや遅れてターゲットを追跡しはじめ (Pursuit), 衝動性眼球運動になる (Initial saccade)。

図9 磁場内のサーチコイルの位置による利得の変化

アイコイル装着眼(右眼)が磁場発生装置内、縦横奥行きのちょうど中央にある状態の時の gain を1.0とした。○は三角波刺激 (pursuit), ●は二点交互刺激 (saccade)の時のものを示しており、横軸は中央からの眼球位置 (L は左方へ, R は右方へ, D は下方へ, F は前方へ, それぞれ5ないし 10 cm ずらした) で、その時の利得を縦軸にとりそれぞれ標準偏差を加えた。

眼(右眼)が縦横奥行きの丁度中央にある状態の時の利得を1.0とし、○は三角波刺激、●は二点交互刺激の時のものを示してあり、それぞれ標準偏差を加えた。この図9から分かるように、中心からずれると利得が変化し、最大1.5倍になっている。

考 案

サーチコイルシステムを用いた眼球運動記録法は、眼球の動きをアイコイルによって磁場の動きとしてとらえ、それを電気信号に変換し眼位を記録するものである。コイルが眼球にうまく装着されていれば、精度、測定域、安定性などに優れた、眼球運動の最も優れた測定法とされている¹⁷⁾。この方法は1963年、Robinson¹⁵⁾が最初に報告し、レンズに吸引チューブがついており陰圧をかけて眼球に密着させる方法をとっている。動物実験ではコイルの埋め込み手術を行い、コイルを眼筋に埋め込んだり^{7)~8)}、角膜にコイルを縫着したりして⁹⁾ 広く用いられている。1974年に、Collewijn⁶⁾によってコンタクトレンズにコイルを巻く方法が採用され、ヒトに使われるようになった。センサーとなるアイコイルは、一般にはこのスカラー社のものが広く用いられているようである(図10)¹²⁾。これは、シリコンラバー製、重さ約1g、直径約18mmで、中央部は瞳孔がかくれないように直径12mmの穴が開いており、この穴の周囲に極細(0.05mm)の線が巻いてあり磁場のなかで眼球の動きに応じた電位を発生させる。このタイプのものは、点眼麻酔を行っても装着時の違和感は依然として残り、着脱が難しく、高価で破損しやすい、といった欠点があり¹²⁾、角膜障害や眼圧上昇

図10 センサーとなるアイコイル (スカラー社製)

の報告例もみられる¹³⁾。最近では、ソフトコンタクトレンズを用いたものも開発されてきており^{11) 13)}、これらの欠点をカバーできるようになった。今回私どもは、高木ら¹³⁾が実用化したアイコイル（日本コンタクト社製：図2）を用いたが、彼らのデータ（図11）によれば 30° saccade させたときの peak velocity と duration とで、二つのタイプのものを比較した結果、saccade の幅が大きい場合スカラー社のものはそれらの値に低下および延長がみられ、日本コンタクト社製のものの方が、正確に眼球運動を反映していることがわかった。記録に際してのレンズのズレについては、アイコイルを眼球に装着した場合と磁場内でアイコイルのみを動かした場合で有意差はないと考えられるが、スカラー社のものではレンズと眼球との接着が悪く記録中に利得が減少することがある¹⁶⁾。この点、私どもの使用したレンズでは記録の前後に細隙灯での検査でレンズのズレはなく、かつ、記録の途中でも利得の変化は見られなかった。また、このコンタクトレンズ型のものは、1) 装着感がよい、2) 着脱が容易である、3) 角膜障害がほとんどない、酸素透過性が高い、4) size が小型で、極端な側方視にも機械的影響がほとんどない、5) 眼圧上昇がない、6) 耐久性に優れる、7) 低コストである、といった特徴⁶⁾がある。しかしながらコンタクトレンズの使用経験のない被験者ではやはり異物感を覚えるので、充分角膜表面麻酔を施し、30～40分以内に検査を済ませるのが大切である。リード線は内眼角側に出

す方が刺激が少なく、また、検査中であっても角膜表面麻酔は積極的に行うことがコツである。

磁場発生装置については、Remmel¹⁰⁾の方法に基づいて製作した。この装置は自作のものであり市販されているものではないが、製作費も30万円以下であり、今回用いたサーチコイルシステム全体が非常に低コストである。

磁場の中で、アイコイルを装着した眼球の位置としては、磁場の中心部が最も安定した記録がとれる¹⁵⁾ことから、中心部に眼球がくるようにする必要がある。眼球のこの中心部からの距離については、図9に示すように縦横奥行きのちょうど中央にある状態から横方向（水平方向）に移動させると利得は徐々に大きくなり、上下方向（垂直方向）と前後方向では、利得は小さくなっているのが分かる。しかし、それぞれ5cmだけの移動では、利得でみてみると統計学上有意差はなく、10cmでは有意差がみられた（図9）。従って眼球運動記録の際には、それぞれ中心から5cm以内にレンズ装着眼がくるように固定する必要がある。

眼球運動記録する際に、三角波、サイン波を用いた追跡眼球運動や OKN、急速眼球運動などの定性的な分析は、従来の ENG で充分可能でコンピュータを使ってその定量化も試みられている。しかし皿電極では、まばたき、汗による基線のズレや筋電図の混入などのアーチファクトは常に定量分析の妨げとなる。このサーチコイルシステムでは、図7、8に示すようにこれらの問題を

各被験者の衝動性眼球運動の peak velocity の平均値 (単位 deg/sec)

subject	No. 1	No. 2	No. 3	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	平均
日コ	444	508	424	535	430	434	425	565	485	472±50
スカー	392	447	376	534	420	424	405	506	401	433±50

各被験者の衝動性眼球運動の duration の平均値 (単位 msec)

subject	No. 1	No. 2	No. 3	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	平均
日コ	96	90	112	95	107	95	100	94	105	99±7
スカー	114	115	134	98	117	97	105	99	128	112±12

(高木ら、1992)

図11 水平方向 30° saccade させたときの peak velocity と duration とで、スカラー社製、日本コンタクト社製の二つのタイプのものを比較した結果。

解決し非常に安定した記録がとれている。特に、速い眼球運動の速度、加速度などの記録の際、ハムの混入によって基線のずれが大きく、従来のENGでの分析では難渋していたが、step-ramp刺激での記録で分かるように(図8)、アーチファクトの混入などがなく平滑化しており、ほとんど基線のずれも見られず、これらの眼球運動の定量的な分析ではサーチコイルシステムが最も適していると考えられる。こうして、精密な記録を必要とする速度や加速度の分析が可能となったことにより、step-ramp刺激でのopen loop conditionで追跡眼球運動の記録や分析が可能になれば、従来の三角波刺激やサイン波刺激で問題となってくる予測性や慣れの現象の影響を排し正確な評価も可能となり、また、加齢現象などの分析もできるようになる。

一方、サーチコイルには、1) 記録には磁場発生装置を必要とし、どこでも記録できるわけではない¹²⁾、2) 頭部の動きにともなう生じる眼球運動記録には適していない、3) アイコイルの導線は非常に細く断線しやすい、などといった欠点もみられる。

以上のように、このサーチコイルシステムはsaccadeなどの速い眼球運動のDC記録¹¹⁾やRashbass¹³⁾の方法に従ったstep-ramp刺激での記録、分析に適していると考えられ、臨床応用に役立つものである。今後はこのサーチコイルシステムを用いて、step-ramp刺激での追跡眼球運動の精密な記録、分析を行っていきたいと考えている。さらには、垂直眼球運動、回旋運動についても検討を加えていきたいと考えている。

まとめ

1) このサーチコイルシステムにより、眼球運動の精密な記録が可能であり、臨床応用に有用であることが確かめられた。

2) 筋電図などのアーチファクトの混入、基線のずれもなかった。

3) 今回使用したアイコイルは、違和感が少なく、着脱が容易で、角膜障害がほとんどなく、耐久性に優れている。

4) magnetic field(磁場)内では、眼球が中央に来るようにすることが重要である。

5) 磁場発生装置を含めたサーチコイルシステムは非常に低コストである。

6) 記録には磁場発生装置が必要、頭位変化による眼球運動記録には適していない、アイコイルの導線は細く断線しやすい、などの欠点がある。

尚、本論文の要旨は第51回日本平衡神経科学会総会において発表した。

文 献

- 1) Kato I, Watanabe J, Nakamura T: Mapping of brainstem lesions by the combined use of tests of visually-induced eye movements. *Brain* 113: 921-935, 1990
- 2) Waespe W, Cohen B, Raphan T: Role of the flocculus and paraflocculus in optokinetic nystagmus and visual-vestibular interactions: effect of lesions. *Exp Brain Res* 50: 9-33, 1983
- 3) Takemori S, Cohen B: Loss of visual Suppression of vestibular nystagmus after flocculus lesions. *Brain Res* 72: 213-224, 1974
- 4) Zee DS, Yee RD, Cogan DG: ocular Motor Abnormalities in hereditary Cerebellar Ataxia. *Brain* 99: 207-234, 1976
- 5) Hood JD, Kayan A, Leech J: Rebound Nystagmus. *Brain* 96: 507-526, 1973
- 6) Collewijin H, Mark F van der, Jansen TC: Precise recording of human eye movements. *Vision Res* 15: 447-450, 1975
- 7) Fuchs AF, Robinson DA: A method of measuring horizontal and vertical eye movement chronically in the monkey. *J Appl Physiol* 21: 1068-1070, 1966
- 8) McElligott JG, Loughnane MH, Mays LE: The use of synchronous demodulation for the measurement of eye movements by means of an ocular magnetic search coil. *IEEE Trans Bio-Med Engng BME-26*: 370-374, 1979
- 9) Judge SJ, Richmond BJ, Chu FC: Implantation of magnetic search coils for measurement of eye position: An improved method. *Vision Res* 20: 535-538, 1980
- 10) Remmmel RS: An Inexpensive eye movement monitor using the scleral search coil technique. *IEEE Trans Biomed Eng* 31: 388-390, 1984

- 11) Kenyon RV: A soft contact lens search coil for measuring eye movements. *Vision Res* 25: 1629-1633, 1985
 - 12) 竹森節子, 森山春子: サーチコイルによる眼球運動の記録・分析. *Equilibrium Res* 45: 310-317, 1986
 - 13) 高木峰夫, 長谷川茂, 臼井知聡, 他: Magnetic search coil 法に用いるコンタクトレンズの考案. *眼紀* 43: 814-821, 1992
 - 14) Rashbass C: The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements. *J Physiol Lond* 159: 326-338, 1961
 - 15) Robinson DA: A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Trans Biomed Eng* 10: 137-145, 1963
 - 16) Collewijn H, Steen J van der, Steinman RM: Human eye movements associated with blinks and prolonged eye lid closure. *J Neurophysiol* 54: 11-27, 1985
 - 17) 高木峰夫: サーチコイルによる眼球運動測定. *Vision* 3: 67-72, 1991
 - 18) 森山春子, 竹森節子: 磁場内のサーチコイルの位置に対する検討. *Equilibrium Res* 47: 410-413, 1988
- (原稿到着: 平成 5 年 6 月 29 日
別刷請求先: 荻野貞雄
〒216 神奈川県川崎市宮前区菅生 2 丁目 16-1
聖マリアンナ医科大学耳鼻咽喉科学教室)