

サーチコイル法による眼球運動測定

高木 峰 夫

新潟大学医学部眼科

〒951 新潟市旭町1-757

1. はじめに

サーチコイル法は、磁界におかれたコイルに磁界と成す角度に比例した電位が発生することを利用して、眼位・眼球運動を測定する方法である。コイルが眼球にうまく装着されていれば、精度・測定域・安定性などに優れ回旋が測定できるなど、眼球運動の最も優れた計測法とされている。動物実験では強膜にコイルを慢性的に縫着することで広く利用されており、人の場合はコンタクトレンズにコイルを組み込み眼球に装着させる方法がとられる。

2. 原理

Robinson¹⁾はサーチコイル法の現実的な方法を最初に提案した。それによれば、均一な垂直方向の磁場 $H_z \cdot \cos \omega t$ の中で、面積 A ・巻数 N のコイルが、 $x-z$ 平面と成す角度 ϕ の位置にある時、生ずる電位は Faraday の法則 ($e = -N \cdot d \phi / dt \times 10^{-8}$) により

$$e_1 = +N \cdot A \sin \phi \cdot H_z \omega \cdot \sin \omega t \times 10^{-8}$$

であり、眼位の垂直成分については $\sin \phi$ に比例した電位が発生する (図1)。水平・垂直の二方向に磁場 (H_x , H_z) をかければ水平・垂直の二次元的な眼位の測定ができ、別のコイルを直角に ($y-z$ 平面に) 増設すればさらに回旋の測定が可能になる。水平・垂直・回旋の3成分については、いわゆる Fick の座標を考える。図2で、 θ は水平成分、 ϕ は垂直成分、 ψ は回旋成分である。各成分の電位は、

水平成分 … H_x に対する誘導：コイルの $y-z$ 平面に対する投射面積に比例

$$e \theta \propto \sin \theta \cos \phi$$

垂直成分 … H_z に対する誘導：コイルの $x-y$ 平面に対する投射面積に比例

$$e \phi \propto \sin \phi$$

回旋成分 … H_x に対する誘導：コイルの $y-z$ 平面に対する投射面積に比例

$$e \psi \propto \sin \psi \cos \phi$$

となる。 θ , ϕ , ψ のいずれも 20° 以内の時は $\sin \theta \approx \theta$, $\cos \phi \approx 1$ と考えて、

$$e \theta \propto \theta$$

$$e \phi \propto \phi$$

$$e \psi \propto \psi$$

と近似できる。正確には、

$$\theta = \sin^{-1} (e \theta / \sqrt{1 - e \phi^2})$$

$$\phi = \sin^{-1} (e \phi)$$

$$\psi = \sin^{-1} (e \psi / \sqrt{1 - e \phi^2})$$

を計算することで正確な眼位の情報が得られる。

ここで、コイルに発生する電位は H_x による誘導と H_z による誘導の和である。これを分離するためには、 H_x と H_z を位相を 90° ずらして与え (即ち $H_x \sin \omega t$ と $H_z \cos \omega t$)、検出コイルに発生した電位の位相を用いて H_x に対する誘導電位と H_z に対する誘導電位を分離する。

以上が Robinson の原法であるが (図3)、種々の変法が考案されている。 H_x と H_z の成分の分離については、Sullivan ら²⁾は H_x と H_z の位相差を利用し、 $\sin \omega t = 0$ 、または $\cos \omega t = 0$ となる時に sampling する回路を考案した。また McElligott ら³⁾は周波数 1 : 2 (75kHz, 150Hz) で正弦波状の、Remmel⁴⁾は 2 : 3 (50kHz, 75kHz) の方形波状の電流をそれぞれ水平および垂直の磁場コイルに与え、検出されたシグナルを各々の周波数に分離する回路を考案した。

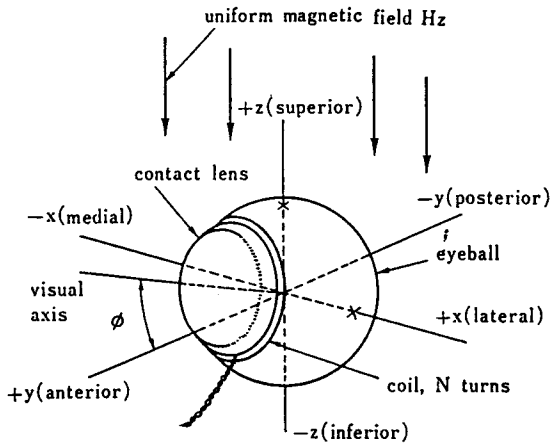


図1 眼球にコイルが装着され ϕ 上転した位置にある時、 $\sin \phi$ に比例した電位が誘導される。(文献1より)

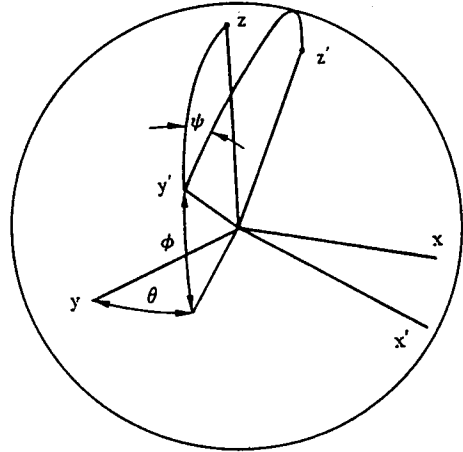


図2 Fickの座標

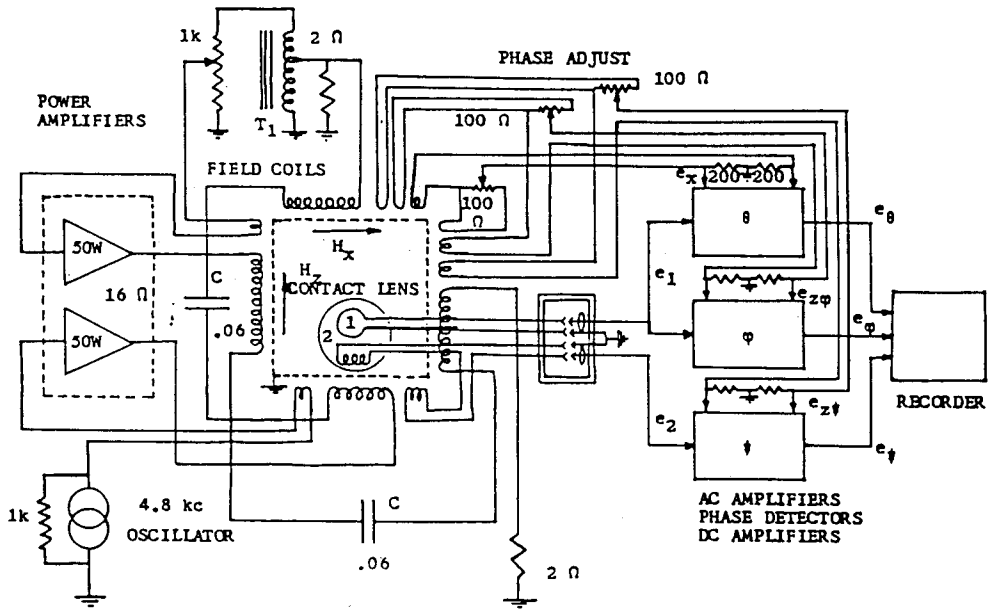


図3 Robinsonの方法(文献1より)

また回旋成分については、 H_x と H_z の位相差を利用した場合、回旋コイルからの電位の位相を評価することで 360° 直線性のある測定が可能である。同様な原理で水平成分だけを測定の対象にする場合には、磁場を水平面内に H_x と H_y を位相差 90° で設定すれば(rotating magnetic field)水平回転について 360° 直線性のある測定が行える⁵⁾。

3. システムの構成

図3のごとく、①発振器からの交流を増幅し磁場コイルに電流を与えるためのパワーアンプ②被検者に水平・水平磁場を与えるための左右・上下2対の磁場コイル③眼球に密着した眼球運動検出コイル④検出アンプ⑤位相検出器⑥データの取り込み装置から構成される(図4)1.6)。

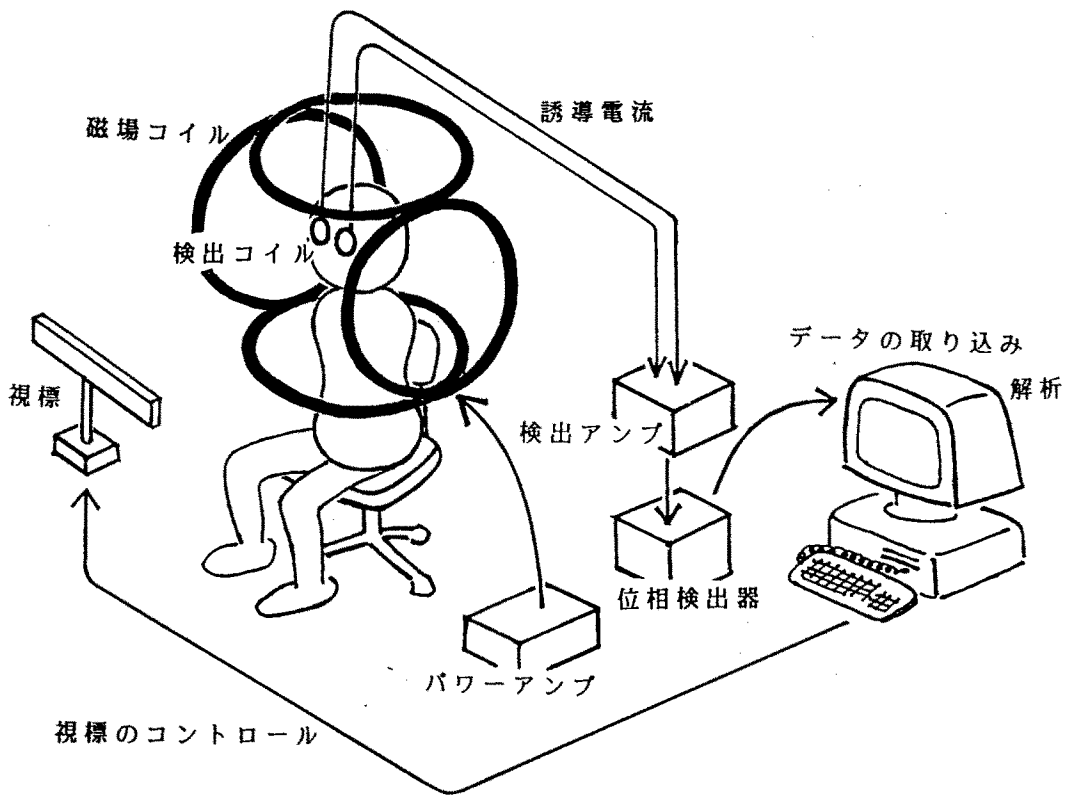


図4 サーチコイルシステムの構成

4. 特徴

4.1 利点

本方法の長所を列挙すると次のようになる。

- ① 水平・垂直・回旋要素が独立かつ同時に測定できる(図5)。特に回旋が測定可能なのは本法とビデオ画像処理法のみである。
- ② 精度に優れる。空間的分解能は, Robinson¹⁾ はノイズレベルから15秒程度 ($\theta 16.9^\circ$, $\phi 13.2^\circ$, $\psi 52.8^\circ$) を報告している。De Bieら⁷⁾ は残像を用いた方法で検証し, 1分以上の精度を報告している。時間的分解能の最大は理論的には励磁周波数の半分であるが, 実際には処理過程での low-pass filter の特性で規定される。
- ③ 線形性に優れる。前述のようにコイルと磁場のなす角の正弦に比例するが, 20° 以内なら, $e \theta \propto \theta$, $e \phi \propto \phi$, $e \psi \propto \psi$ と近似してもほとんど問題ない。
- ④ dynamic range が広い。平常の眼球運動測定には問題ないが, 正弦波特性のため大角度では誤差が大きくなる。目的に応じて, rotating magnetic field に対する位相検出法を用いれば 360° 正確な測定が可能である。

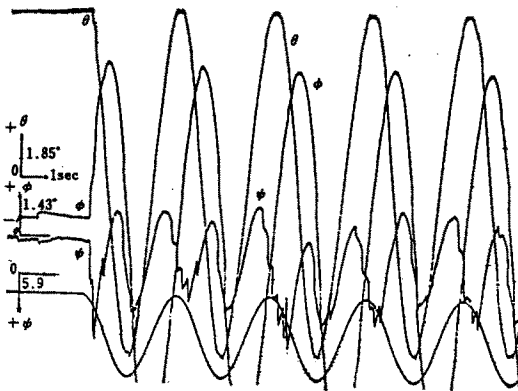


図5 円運動(半径:視覚 15° , 周期4秒)のトレース。上から水平, 垂直, 回旋, 視標。(文献1より)

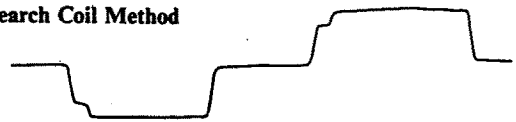
- ⑤ ドリフトがなく安定性に優れ, 常に眼位の絶対値を表現している。
- ⑥ 左右眼の cross talk がなく, 非共同性運動の評価に適する。
- ⑦ 眼瞼の運動を拾わないため, 垂直運動の評価が正確に行え(図6)⁸⁾, また Bell 現象や閉瞼時の眼位の評価ができる⁹⁾。動物実験においても顔面・舌の運動によるノイズが混入しない¹⁰⁾。
- ⑧ 並進運動を拾わないため, 眼球の回転中心の移動が混入せず, また頭部を強固に固定しなくてよい。
- ⑨ コイルの設定の工夫により眼瞼の運動, 頭部運動の評価^{5, 11)}ができる。

4.2 欠点

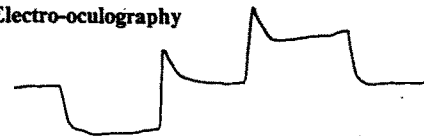
欠点は次のとおりである。

- ① 被検者に侵襲がある。実験動物ではコイルの縫着による炎症, 感染を起こすことがある。人ではコンタクトレンズの密着による眼への侵襲が問題点である。
- ② コンタクトレンズが高価で破損しやすい。

Search Coil Method



Electro-oculography



Infrared Limbus Tracking

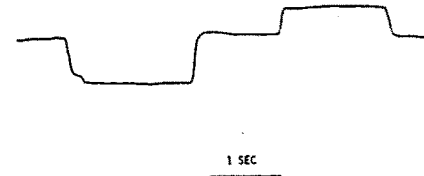


図6 15° の垂直サッケードのトレース。サーチコイル法では正確に記録されているが, EOGでは上転時に overshoot が見られ, リンバストラッカーでは上転の振幅が小さい。(文献8より)

5. 検出コイルの装着

上述のように本法の問題点は検出コイルの設定にある。眼球に確実に密着し、眼球運動に影響せず、侵襲が少なくなければならない。

動物実験の場合には麻酔下でコイルの埋め込み手術を行う。角膜輪部で結膜を切開し(図7-A)、結膜を剝離して強膜を露出し(B)、数回巻いたコイルを強膜上に縫着し(C)、導線は皮下を通して頭部にソケットを設け、結膜切開創を閉じる(D)^{12,13}。適切に縫着されれば少なくとも数カ月安定に固定されており、実験動物に苦痛はない。

人の場合にはコイルを組み込んだコンタクトレンズを利用することになる。Robinson が考案したものは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式によっている¹⁾が、角膜障害があり違和感が強く、ずれもあるため普及に至らなかった。Collewijn は角膜を開放し強膜部で眼球に密着させる強膜レンズを考案し¹⁴⁾、ずれがなく角膜障害も少ないことから支持を受け、現在用いられるのは主としてこのタイプである。回旋も同時に計測できるように巻きかたを工夫したものもある(図8)¹⁵⁾。しかし違和感の問題は残り、着脱が難しく、高価で破損しやすいため、一般臨床への応用の報告は少ない¹⁶⁾。そのため、ソフトコンタクトレンズによる方法が検討されており¹⁷⁾、実用的なものが望まれている。私たちも独自にシリコンゴムによるコンタクトレンズを考案中である。

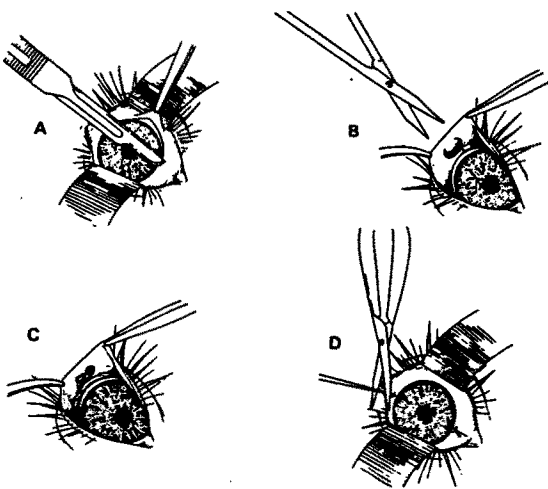


図7 実験動物への検出の埋め込み手術(文献13より)

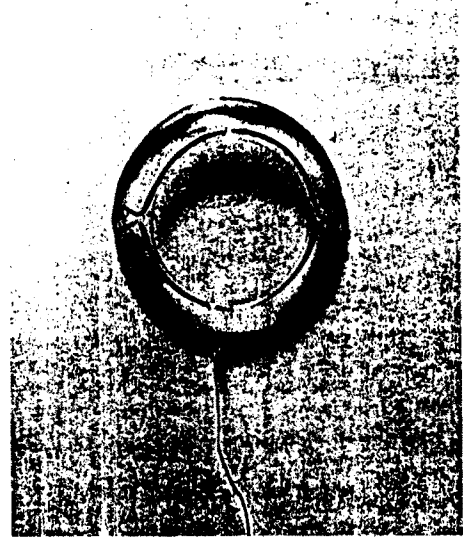


図8 Collewijn による回旋運動測定用のコンタクトレンズ。角膜部がくり抜かれ、強膜部で吸着するように工夫されている。

文 献

- 1) D. A. Robinson: A method of measuring eye movement using a scleral search coil in a magnetic field. *IEEE Transactions on Biomedical Electronics*, **10**, 137-145, 1963.
- 2) M. J. Sullivan and A. Kertesz: Signal detection via phase-locked sampling in a magnetic search coil eye movement monitor. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **26**, 50-52, 1979.
- 3) J. G. McElligott, M. H. Loughnane and L. E. Mays: The use of Synchronous demodulation for the measurement of eye movements by means of an ocular magnetic search coil. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **26**, 370-374, 1979.
- 4) R. S. Rempel: An inexpensive eye movement monitor using the scleral coil technique. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, **31**, 388-390, 1984.
- 5) R. Hartmann and R. Klinke: A method for measuring the angle of rotation (movements of body, head, eye) in human subjects and experimental animals. *Pfugers Archiv fur die Gesamte Physiologie des Menschen und der Tiere*, **362**, 52, 1976.
- 6) 河野憲二, 山根 茂, 黒田裕泰: 電磁誘導式眼位計測装置の高性能化. 計測研究会資料, IM-86-17, 1986.
- 7) J. de Bie: An afterimage vernier acuity method for assessing the precision of eye movement monitors: Results for the scleral coil technique. *Vision Research*, **25**, 1341-1343, 1985.
- 8) R. D. Yee, V. L. Schiller, V. Lim, F. G. Baloh, R. W. Baloh and V. Honrubia: Velocities of vertical saccades with different eye movement recording methods. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, **26**, 938-944, 1985.
- 9) 瀬尾 徹, 池田利夫, 雲井健雄: 閉眼時に於ける眼球運動の記録 —サーチコイル法による—. *Equilibrium Research*, **49**, 185-191, 1990.
- 10) J. Schlag, B. Merker and M. Schlag-Rey: Comparison of EOG and search coil techniques in long-term measurements of eye position in alert monkey and cat. *Vision Research*, **23**, 1025-1030, 1983.
- 11) H. Collewijn: Eye and head movements in freely moving rabbits. *Journal of Physiology*, **266**, 471-498, 1977.
- 12) A. F. Fuchs, and D. A. Robinson: A method of measuring horizontal and vertical eye movement chronically in the monkey. *Journal of Applied Physiology*, **21**, 1068-1070, 1966.
- 13) S. J. Judge, B. J. Richmond and F. C. Chu: Implantation of magnetic search coils for measurement of eye position: An improved method. *Vision Research*, **20**, 535-538, 1980.
- 14) H. Collewijn, F. van der Mark and T. C. Jansen: Precise recording of human eye movements. *Vision Research*, **15**, 447-450, 1975.
- 15) H. Collewijn, J. van der Steen, L. Ferman and T. C. Jansen: Human ocular counterroll: Assessment of static and dynamic properties from electromagnetic scleral coil recordings. *Experimental Brain Research*, **59**, 185-196, 1985.
- 16) 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 Research*, **45**, 310-317, 1986.
- 17) R. V. Kenyon: A soft contact lens search coil for measuring eye movements. *Vision Research*, **25**, 1629-1633, 1985.