LECTURES

“眼球運動”をテーマとした生理学実習
―学生が生理学に興味を持つ実習を目指して―

奈良県立医科大学生理学第一講座
和田　佳郎，山下　勝幸

1. はじめに

昨今，医学研究における若い人たちの生理学離れが危惧されている．そして医学教育においても，学生は膨大な医学的知識を覚えることに精一杯で，からだのはたらきについて疑問を持ち自分の頭で考える余裕などないように見える．このままではますます生理学離れに拍車がかかるのではないかと心配される．そのような点から考えると，学生が生理学に興味を持つ機会として実習の重要性は極めて高い．しかし，教員数や実習時間数の不足，熟練した技術や高価な機器の必要性など現実的な問題も多く，その役割が充分に果たせているか疑問である．今回，このような問題を解消する目的で，眼球運動をテーマとした実習を考案した．

眼球運動をテーマに選んだ一番の理由は，日常使っている身近な生体現象であり，学生にとってからだのはたらきをイメージしやすいという点である．さらに実習においても，特別な技術や複雑な装置を必要とせず，生体信号の測定原理や臨床的な内容に触れることが可能で，ほぼ全員が積極的に参加することができる，という利点が挙げられる．このように眼球運動は生理学実習にふさわしいテーマのひとつであるが，これまで生理学実習書などではあまり取り上げられておらず，実施している大学も多くはないようである．以上の理由より，眼球運動をテーマとした実習が，学生，教員，そして生理学の将来にとって有益であると思われるので，ここに紙面を借りて紹介したい．

2. 概要

この実習ではあえて学生に予習をさせず，たとえ眼球運動に関する知識がなくても，段階を踏んで眼球運動を理解していくことができるようデザインした．教員が眼球運動に関して質問し，学生がその答を推測する．そして直ちに実験によって確かめ，その場で結果を議論し，教員が簡単な解説を加える，という手順を繰り返す．推測がはずれ，意外な結果に驚き，眼球運動は意外と面白いと学生が感じれば，こちらのねらいどおりである．

実習は実験Ⅰと実験Ⅱから成る．私たちは実験Ⅰを2回繰り返し，2回目は被験者を交代し学生だけで実施している．もし時間に制約があれば，実験Ⅰは1回のみの実施でも構わない．また，実験Ⅱは追加的な内容であるので省略しても差し支えない．私たちの場合，1人の教員が（他のテーマとかけもちで）担当し，すべての内容を約3時間で実施している．

眼球運動の測定は特にシールドを施していない実習室でおこなっており，ここで示す記録例も多少ノイズを含んでいるがご容赦願いたい．

3. 実習器具

実験Ⅰに関しては，1グループにつき1台のAC増幅器（Biophysical amplifier AVB-11，Memory oscilloscope VC-11，日本光電）と1台の紙記録計（Recti-Horiz-8K，三栄）を用意している．実験Ⅱは全員を集め，1台のDC増幅器（EOG Pod，ADInstruments）とデータ記録システム

PowerLab（ADInstruments）をインストールした1台のPCを用いておこなっている．

実験Ⅰで用意する器具類を使用する順に列挙する．

・70％アルコール綿
・スキンピュア（日本光電），Trace Prep（Red Dot，3M）（電極前処理用紙やすり）
・脳波用電極ペースト（Elefix，日本光電）
・皿電極3個（脳波用），接着テープ
・テスター（電極間抵抗の測定）
・10 deg校正用視標（厚紙に17.6 cm間隔で3つの視標を書く）
・黒い大きなビニール袋（暗幕の代用）
・5円硬貨と糸（スムーズに動く視標）
・割り箸と色つきマチ針（頭部固定視標）
・トレーシングペーパー（波形からsaccadeを取り除くために使用）
・ストライプ模様（A3用紙ヨコを2枚つなげる）
・横書き文章（A3用紙ヨコに4，5行くらいの文章）
・直線と曲線（A3用紙ヨコ）

また，実験Ⅱには，

・心電図用ディスポ電極3個（Vitrode F，日本光電）
・20 mlシリンジ，氷水，温度計，ビーカー2個，綿棒（以上，温度性眼振用）
・耳鏡（外耳道・鼓膜観察用）

を用意している．

4. 実験Ⅰ

以下の手順にしたがって実験Ⅰを実施している．

1）実験準備

①グループ分け

見学だけの学生をつくらないためには，1グループ3～4人が理想的である．私たちの場合，9～10人を3グループに分け，1人を被験者，1～2人を測定（増幅器と紙記録計）担当者，1人を刺激担当者としている．被験者の皮膚抵抗が高いと測定状態が悪くなるため，当日は化粧などをひかえるようあらかじめ注意しておく．

②眼球運動測定原理についての説明

この実習では眼球運動測定法として眼電計（electrooculography：EOG）を採用しているが，最初にその原理について以下のような簡単な説明をしている．

“図1aに示すように，眼球には元来，角膜側がプラス，網膜側がマイナスという角膜網膜電位（corneo-retinal potential）と呼ばれる一定の電位差があり，電極電位は眼球の回転角にほぼ比例し

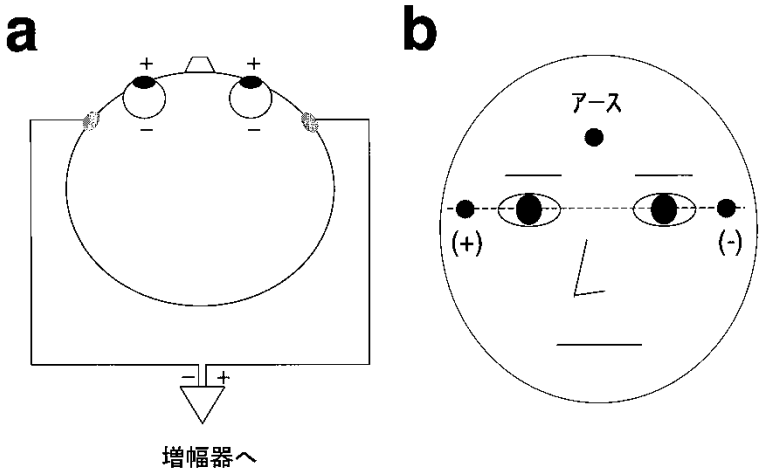


図1．眼球運動の測定
a：EOGの原理．b：電極装着部位

て変化する．EOGとはこの眼球運動による角膜網膜電位の分圧を増幅し記録する方法である．”

さらに表1を示し，増幅器に関して次のような説明を付け加えている．

“一般に増幅器にはDC（直流）増幅器とAC（交流）増幅器の2種類がある．実験Iでは簡便なAC増幅器を使用するが，波形の歪みに注意しなければいけない．これは時定数，すなわち最大変化量の37％に戻るまでの時間（sec）によって表現できる．私たちが使用する増幅器には時定数（τ sec）の代わりにlow-cut filter（f Hz）の設定があり，$f=1/(2\pi\tau)$ の関係があることから，例えばlow-cut filter 0.08 Hzは時定数2 secとなる．”

実験Iでは，low-cut filterは0.08 Hz，high-cut filterはoffあるいは10 KHz，hum filterはonの設定で実施している．

③電極の装着

記録状態をよくするため，あらかじめアルコール綿，スキンピュア，Trace Prepで皮膚処理をおこない，皿電極に電極糊を満たしてプラス電極を右外眼角，マイナス電極を左外眼角，アース電極を前額中央部に装着する（図1b）．接着テープにて電極をしっかり固定し，電極コードが顔にかからないよう頭の後で束ねる．次に電極間抵抗（プラス電極とマイナス電極，プラス電極とアース電極，マイナス電極とアース電極）をテスターにて測定し，それぞれ10 kΩ以下であることを確認する．抵抗値が高ければもう一度やり直す．電極端子を増幅器の入力ボックスに接続し，装置の電源をonにして，被験者の眼球が右方向に動いた際にプラス方向の電位変化として記録されていることを確認する．皮膚抵抗を低くするにはTrace Prepが最も効果的で，2，3回こするだけで1～2 kΩとなるが，こすりすぎると皮膚があれるので注意する．

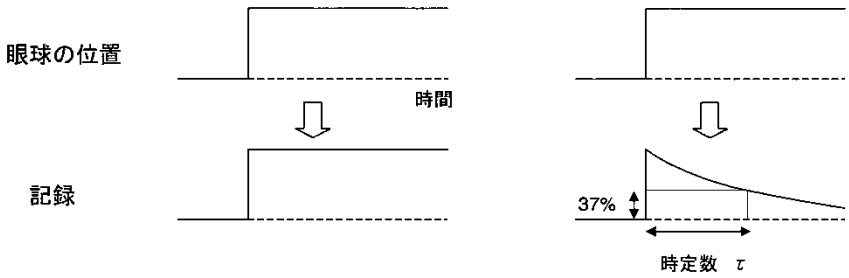
④校正

次のような説明をおこない，眼球運動の校正を実施する．

“この状態ですでに眼球運動は測定可能であるが，定量的な評価をするためには眼球運動と測定電圧の関係をあらかじめ知っておかねばならな

表1．増幅器の説明

	DC（直流）増幅器	AC（交流）増幅器
特徴	・電圧を忠実に増幅	・電圧の交流成分のみを増幅
長所	・正確な電位（眼球位置）の記録が可能	・測定手技が比較的容易 ・記録が安定 ・速い成分はほぼ忠実に記録できる
短所	・記録が電極、皮膚、電源、温度などに影響されやすい	・遅い成分の波形が歪む



い．この作業が校正である．”

10 deg校正用視標を被験者の100 cm正面に置き，頭を動かさないで正面の視標（0 deg）から右の視標（10 deg），あるいは左の視標（−10 deg）に注視点を移し，観察しやすい増幅率，時間軸を設定する．通常，10 degの眼球位置変化で0.1〜0.2 mV程度の電位変化が生じる．図2aの例では右10 degで0.13 mV，左10 degで−0.14 mVの電位変化が記録されている．これ以降，わかりやすいようにEOG記録の縦軸は眼球位置（deg）に換算してあらわすことにする（EOG記録の上方向が眼球の右方向）．

校正後，low-cut filter（あるいは時定数）の特性について再確認しておく．図2bはlow-cut filterを0.08 Hz（時定数2 sec），0.5 Hz（0.3 sec），1.5 Hz（0.1 sec）と設定を変えて，正面から右10 degに注視点を移した場合の波形を比較している．学生は，同じ眼球運動でもlow-cut filterの設定周波数が高く（時定数が小さく）なるほど波形の減衰が速く，電位の最大変化量が小さくなり，その結果波形の歪みがより大きくなることを理解する．

⑤アーチファクトのチェック

EOGには眼球運動以外の生体現象によるartifactの混入があることを確認しておく．図3aは瞬目による眼輪筋，図3bは笑うことによる表情筋の筋電図が混入している例である．この例では観察されていないが，心電図や脳波の混入もありえることも説明しておく．

⑥他の眼球運動の測定状況

この実習の電極装着条件では，共同性水平性眼球運動を測定することになる．それを他の眼球運動の測定状況を確認することによって確認する．

a）輻輳性（非共同性）水平性眼球運動について

被験者には頭を動かさないで刺激担当者の指を注視するように指示し，被験者の正面で指を近づけたり遠ざけたり（20〜100 cm）した時のEOGを記録する．図3cに示すようにわずかなEOG波形の変化しかみられない．

ここで学生に，“なぜ眼球は動いているのにEOG上では電位変化がほとんど記録されないのか”と問い，議論する．学生は，今回のように両眼球の外側に電極を装着すると，両眼球の水平性眼球運動によるEOG変化を差動増幅器にて測定していることになり，両眼球が左右対称に動く輻

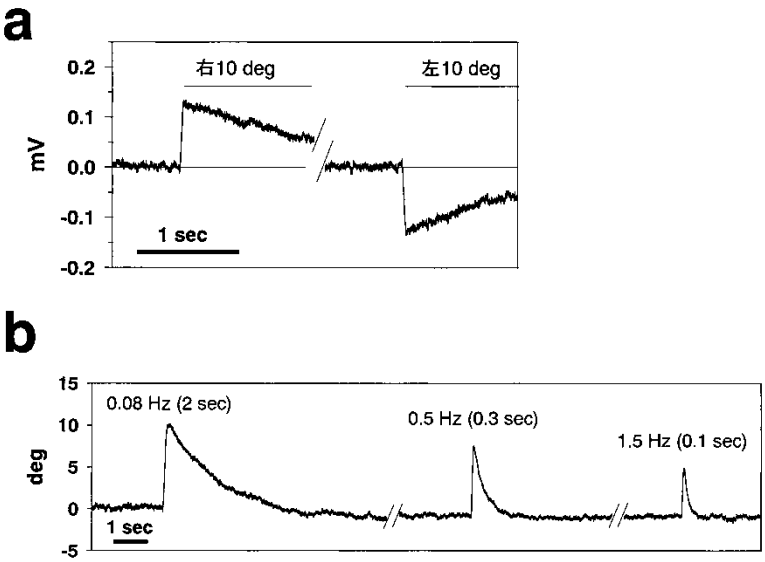


図2．AC増幅器の特徴
a：10 deg校正の例．b：low-cut filterの設定による波形の比較

輳性眼球運動では相殺されて電位の変化は記録されないことを理解する．

b）垂直性眼球運動について

同様に，上下に動かした指を注視した時のEOGを記録すると，図3dに示すようにほとんど変化は見られない．その理由を議論することによって，学生は，垂直性眼球運動では水平成分の電位変化はほとんど生じないことを理解する．

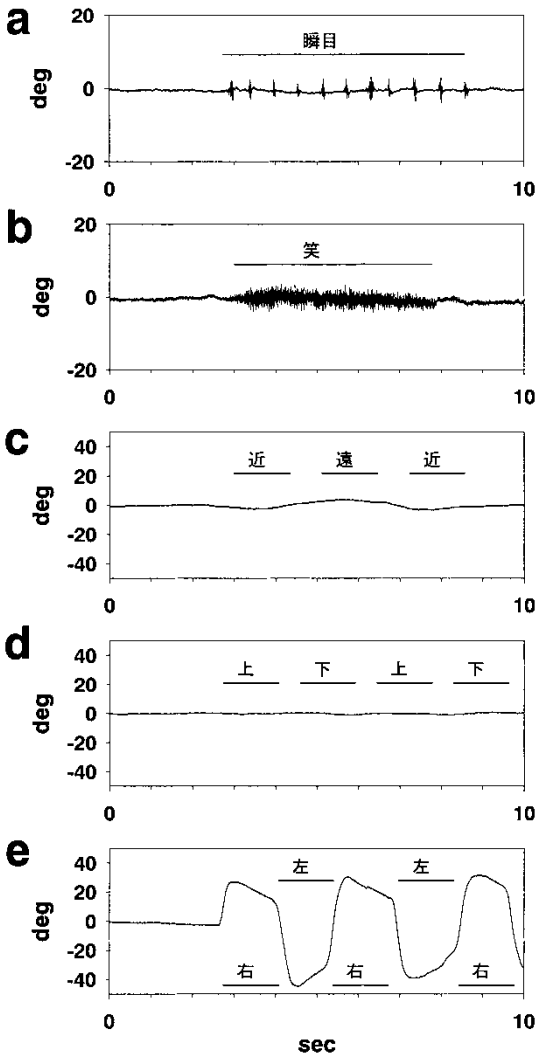


図3．開眼中の共同性水平性眼球運動以外の測定例
a：瞬目による眼輪筋の筋電図．b：表情筋の筋電図．c：輻輳性眼球運動によるアーチファクト．d：垂直性眼球運動によるアーチファクト．e：閉眼中の共同性水平性眼球運動．

もし上記a）b）においてEOG上大きな電位変化が認められた場合は，電極，測定装置，視標の動き，被験者の眼球運動などに異常がないかチェックする．

c）閉眼時の眼球運動について

閉眼しながら眼球を左右に動かした時のEOGを記録する．図3eに示すように眼球運動は閉眼時も記録可能であることがわかる．EOGの他にもCCDカメラや光ダイオードなどを用いた眼球運動測定法もあるが，これらの方法では閉眼時の眼球運動は測定できない．このことより，学生は，EOGは睡眠時などの閉眼時の眼球運動測定に適していることを理解する．

2）各種眼球運動の観察

ここからが本実験である．次の手順にしたがって7種類の条件下における眼球運動を観察する．実習中，速い眼球運動と遅い眼球運動，視覚刺激による眼球運動と前庭刺激による眼球運動を軸にして分類した眼球運動についてのまとめの表（表2）を提示している．

教員が測定条件を指示する．（条件）

↓

教員が（全員に）眼球運動について質問し，学生が推測する．（質問）

↓

実際に学生が眼球運動を測定し，結果から推測が正しいかどうか判定する．（結果）

↓

学生が表2を参考にして観察した眼球運動の種類を確認する．（種類）

↓

教員が簡単な解説を加える．（解説）

①衝動性眼球運動（saccadic eye movement, saccade）

条件：被験者は，頭を動かさず離れた位置にある視標に注視点を移す（図4a）．さらに，途中で黒いビニール袋で眼前を遮り，イメージした視標に注視点を移す．

質問：視標が実際に見える場合と，イメージする場合で眼球運動は異なるか？

結果：図5aは離れた所にある物に注視点を移した時の記録である．注視点を移す瞬間に急速で衝動的な眼球運動が観察されている．図5bは，途中から眼前を遮りイメージした左右の校正視標（20 degの角度）を交互に注視した場合の記録である．波形は多少ぎこちないが，視標が実際に見える場合とイメージした場合でほぼ同様の眼球運動が記録されている．

種類：図5aは視覚刺激によって作り出される随意的な速度の速い眼球運動で，衝動性眼球運動（saccade）と呼ばれる（表2の*1）．

解説：saccadeは視標の位置情報がトリガーとなって誘発される速い眼球運動で，最高速度は500～700 deg/secにまで達する．saccadeは視覚刺激がなくても作り出すことができる．

②滑動性追跡性眼球運動（smooth pursuit eye movement）

条件：被験者は，頭を動かさずゆっくりスムーズに動く視標（5円硬貨を糸で結んで垂らしゆっくりと左右に振る）を追跡する（図4b）．途中で眼前を遮り，引き続きゆっくりスムーズに動く視標をイメージする．また，刺激担当者の指を注視しながら，指の左右往復運動の振幅を一定にして次第に周波数を高くしていく．

質問：実際に視標が見える場合と，イメージする場合で眼球運動は異なるか？また，視標の周波数が高くなると眼球運動はどうなるか？その際，視標は鮮明に見えているか？

結果：図5cのようにゆっくり正弦波様に動く視標を追跡している場合，視標の動きに一致していると思われる正弦波様の滑らかな眼球運動が観察される．途中から眼前を遮り視標をイメージした場合には（図5d），滑らかな眼球運動は生じず小さなsaccadeの連続となる．図5eは視標の周波数を次第に高く（速度を速く）した場合で，1 Hz前後から眼球運動の振幅は小さく，波形も滑らかでなくなり，小さなsaccadeも混ざるようになる．その時，被験者は視標の動きが不鮮明となっている．

種類：図5cは視覚刺激によって作り出される随意的で速度は遅いが滑らかな眼球運動である．滑動性追跡性眼球運動（smooth pursuit）と呼ばれる（表2の*2）．

解説：smooth pursuitは視標の速度情報が刺激となって誘発されるスムーズな眼球運動であるが，最高速度は60～90 deg/secまでしか出すことのできないいわゆる遅い眼球運動である．smooth pursuit は実際の視覚刺激がないと作り出すことができない．

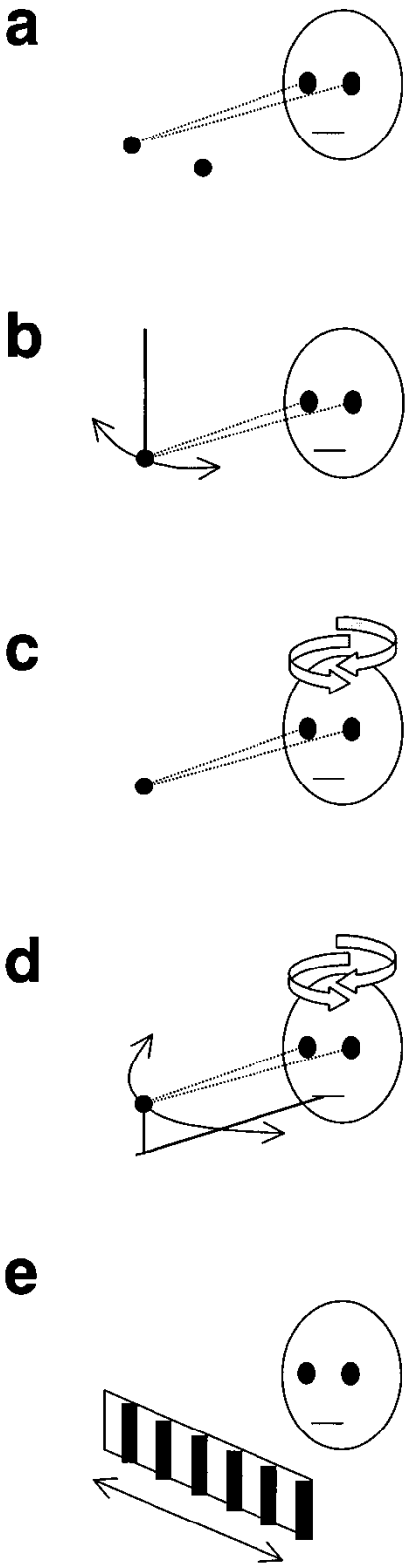
③前庭動眼反射（vestibulo-ocular reflex，VOR）

条件：被験者は，前方に固定している視標（空間固定視標）を注視しながら頭を左右に正弦波様（0.5 Hz程度）に回転させる（図4c）．途中で眼前を遮り，引き続き前方に固定している視標をイメージしながら頭を回転する．また，視標を注視

表2．水平性眼球運動の種類

	速い眼球運動		遅い眼球運動	
視覚性眼球運動	随意的	共同性*1	共同性*2	輻輳性
	反射的	共同性	共同性 *5	輻輳性
前庭性眼球運動	反射的	共同性	共同性*3 *4	輻輳性

*1 衝動性眼球運動（saccadic eye movement，saccade）
*2 滑動性追跡性眼球運動（smooth pursuit eye movement）
*3 前庭動眼反射（vestibulo-ocular reflex，VOR）
*4 前庭性眼振（vestibular nystagmus）
*5 視運動性眼振（optokinetic nystagmus，OKN）



しながら，頭の回転運動の振幅は一定で次第に周波数を高くしていく．

質問：実際に視標がある場合と，イメージする場合で眼球運動は異なるか？また，頭の回転運動の周波数が高くなると眼球運動はどうなるか？その時に視標は鮮明に見えているか？

結果：図6aの前半は固定している視標（空間固定視標）を注視しながら頭を正弦波様に水平回転している場合で，図5cと同様に正弦波様の滑らかな眼球運動が観察される．後半は視標をイメージした場合であるが，実際に視標を注視している場合とほとんど同じ滑らかな眼球運動が観察されている．頭の回転運動の周波数が次第に高く（速度が速く）なっても滑らかな眼球運動が観察されている（図6b）．またその時，被験者は最後まで視標が鮮明に見えている．

ここで学生に，“smooth pursuit（②）と今回（③）の条件下では，相対的な視標と眼球の位置関係はほぼ同じであるのに，なぜ③ではイメージした場合や高周波数運動の場合でも眼球運動は滑らかなのか”と問い，議論する．学生は，②と③の違いは前庭刺激の有無であることを理解する．

種類：頭を水平回転するという前庭刺激によって反射的に誘発される前庭動眼反射（VOR）である（表2の*3）．

解説：VORとは，網膜の中心窩で安定して視標をとらえるために，頭の運動とは逆方向へ動く代償性眼球運動である．表2では遅い眼球運動に分類されているが，刺激条件によっては350 deg/secまでの滑らかな眼球運動を作り出すことができる．図6aの前半や図6bの眼球運動は，視覚刺激によって増強されたVORである．図5eと図6bの比較からわかるように，視覚性の眼球運動であるsmooth pursuitは低い周波数ではしっかりはたらくが，周波数が高くなるとはたらきは

図4．各種眼球運動の測定条件
a：頭を動かさず離れた視標に注視点を移す．b：頭を動かさずゆっくりスムーズに動く視標を追跡する．c：前方に固定している視標を注視しながら左右に頭を回転する．d：頭と一緒に動く視標を注視しながら左右に頭を回転する．e：頭を動かさず眼前で左右に動くストライプ模様を眺める．

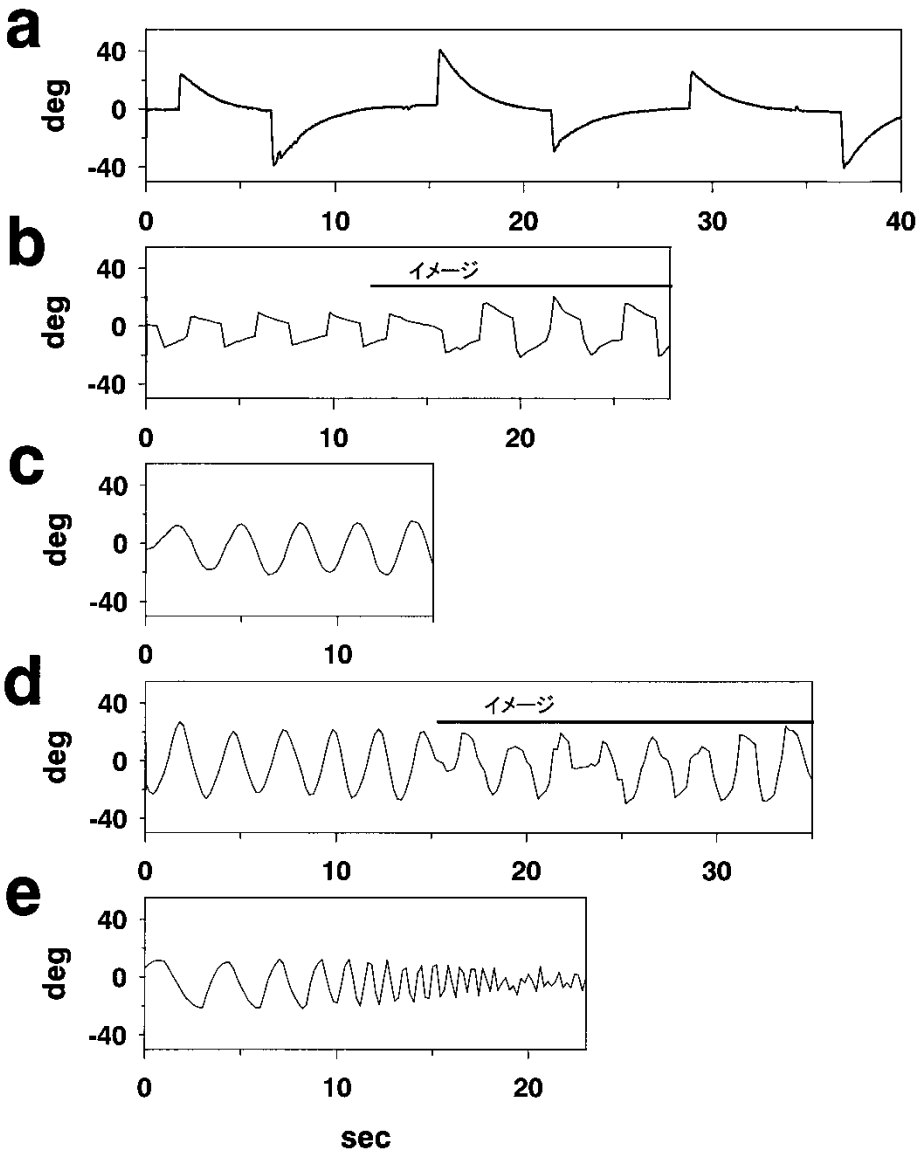


図5．衝動性眼球運動（saccade）と滑動性追跡性眼球運動（smooth pursuit）の記録例
a：頭を動かさず離れた視標に注視点を移した時のsaccade．b：途中から眼前を遮って離れた視標をイメージした時のsaccade．c：頭を動かさずゆっくりスムーズに動く視標（糸で垂らした5円硬貨を左右に振る）を追跡した時のsmooth pursuit．d：途中から眼前を遮ってゆっくりスムーズに動く視標をイメージした時の眼球運動．e：注視している視標（指）の往復運動の周波数を高くした時の眼球運動．

小さくなる．それとは逆に，VORは高い周波数ではしっかりはたらくが，低い周波数では前庭刺激が小さくなるため反応も小さくなる．日常では頭を動かしながら物を見る場面が多く，図6gに示すように，2つの眼球運動システムが相補的にはたらくことにより，より広い周波数にわたって視標を中心窩でとらえることができる．

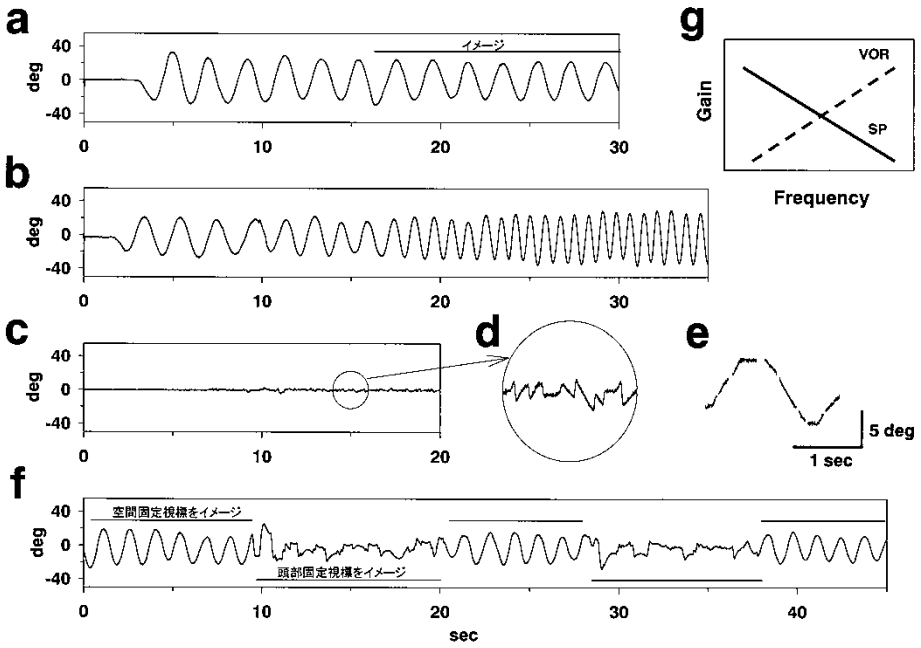


図6．前庭動眼反射（VOR）の記録例
a：前半は空間固定視標を注視しながら左右に頭を回転した時の眼球運動．途中から眼前を遮って空間固定視標をイメージした時の眼球運動．b：空間固定視標を注視しながら頭の回転の周波数を高くした時の眼球運動．c：頭部固定視標を注視しながら左右に頭を回転した時の眼球運動．d：cの一部を拡大すると眼振が観察できる．e：dの緩徐相のみをつなぎ合わせると正弦波様波形となる．f：暗所で視覚刺激がない条件下でも，眼球運動は空間固定視標をイメージすると大きく，頭部固定視標をイメージすると小さくなる．g：視覚性の眼球運動（smooth pursuit）と前庭性の眼球運動（VOR）の動特性の模式図

④視覚刺激によるVORの抑制

条件：被験者は，先端に色つきマチ針を刺した割り箸をくわえ，マチ針（頭部固定視標）を注視しながら頭を左右に正弦波様（0.5 Hz程度）に回転させる（図4d）．また黒いビニール袋で眼前を遮り，頭を水平回転しながら空間固定視標と頭部固定視標を交互にイメージする．

質問：上記の条件で眼球運動は③と異なるか？

結果：図6cは頭部固定視標を注視した場合の眼球運動で，小さなノコギリ波状の波形が観察される．一部拡大したのが図6dで，速度の遅い眼球運動と速い眼球運動が交互に出現している．トレーシングペーパーで遅い眼球運動の部分だけをつなぎ合わせると図6eのように正弦波様波形となっている．図6fのように視覚刺激が無い場合，頭部回転運動中に空間固定視標をイメージすると眼球運動は大きく，頭部固定視標をイメージすると眼球運動は小さくなる．

種類：速度の遅い眼球運動と速い眼球運動が交互に出現する眼球運動を眼振（nystagmus）と呼び，遅い眼球運動を緩徐相，速い眼球運動を急速相という．これは前庭刺激によって誘発される眼振で，前庭性眼振（vestibular nystagmus）と呼ばれる（表2の*4）．

解説：VORは視覚刺激によって増強されたり抑制されたりする．図6cは視覚抑制の例であるが，この場合も緩徐相だけをつなぎ合わせると小さいながらもVORが誘発されることがわかる（図6e）．実際に視覚刺激がなくても視覚イメージだけでVORは大きく変化する（図6f）．言い換えると，VORを評価する際は，被験者にどのような視標をイメージさせるか十分に注意を払わね

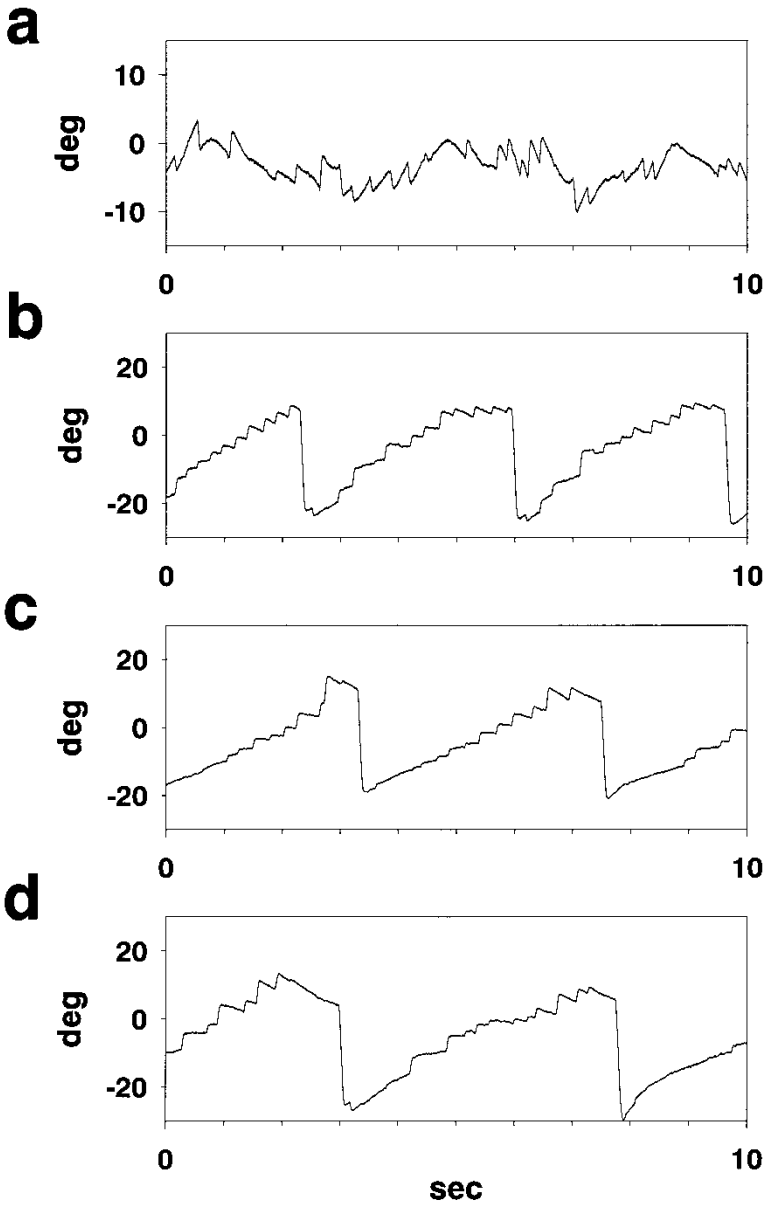


図7．いろいろな条件下での視覚性眼球運動の記録例
a：視運動性眼振（OKN）．b：横書き文章を読んだ時の眼球運動．c：横向きの直線を左から右へゆっくりスムーズになぞった時の眼球運動．d：横向きの曲線を左から右へゆっくりスムーズになぞった時の眼球運動．

ばならない．

⑤視運動性眼振（optokinetic nystagmus, OKN）

条件：被験者は，頭を動かさず眼前で左右に動くストライプ模様をぼんやり眺める（図4e）．

質問：どのような眼球運動が生じるか？

結果：図6dと似た遅い眼球運動と速い眼球運動が交互に出現するノコギリ波状の波形が観察さ

れる（図7a）．

種類：外界が動くという視覚刺激によって，遅い眼球運動と速い眼球運動が交互に出現する視運動性眼振（OKN）が反射的に誘発される（表2の*5）．

解説：視覚性眼球運動にはこのように反射性の眼球運動もある．OKNはVORと同様，網膜上の像のズレを小さくする方向にはたらく．OKNの緩徐相の限界は60 deg/sec付近である．OKNは反射性であるので，被験者に随意的にストライプを追うように指示してはならない．

⑥文章を読む時の眼球運動

条件：被験者の眼前に横書き文章を提示し，頭を動かさず文章を読む．

質問：文章を読む時はsmooth pursuitかsaccadeか？

結果：図7bに示すように，smooth pursuitではなく，saccadeと眼球運動の停止（2～8文字分）の繰り返しと，行が変わる時の反対方向の大きなsaccadeから構成される階段状の眼球運動が観察される．

種類：saccadeである（表2の*1）．

解説：文字はsaccade中に網膜を横切って不鮮明となるはずである．しかし，被験者はそれを知覚せず，文字を滑らかに読んでいると知覚する．これがsmooth pursuitで文章を読んでいると錯覚する理由であり，saccadeの間は視覚が抑制（saccadic suppression）されているためこのような現象が起こる．また，ここでもsmooth pursuitは実際に動く視標（速度情報）がなければ作り出せないという性質が確認できる．

⑦直線や曲線を目でなぞる時の眼球運動

条件：被験者の眼前に横向きの直線や曲線を提示し，頭を動かさず線を左から右へゆっくりとスムーズになぞる．

質問：この時の眼球運動はsmooth pursuitかsaccadeか？

結果：図7cは直線，図7dは曲線を目でなぞった時の眼球運動であるが，いずれも⑥とよく似たsaccadeと眼球運動停止の繰り返しである．

種類：saccadeである（表2の*1）．

解説：上記⑥と同様である．

3）注意点

眼球運動に関する教員の質問に対して，学生はまったく見当もつかないので答えられないと言う場合があるが，直感でも思いつきでも構わないのでとにかく答えさせる．自分の答と実験結果を比較するところから議論を展開したいためである．

被験者を代えて実験を2回行なった場合，2人の眼球運動記録が必ずしも同一の傾向を持つとは限らない．このようなデータのばらつきを学生は嫌う傾向にあるが，被験者の眼球運動（saccade，smooth pursuit，VOR）のゲイン，イメージの内容，集中力の違いなどによって眼球運動には個体差が生じ得ることを説明する．さらに，眼球運動に限らず生体現象にはそのような個体差が存在すること，そしてその中からあらたな知見が明らかになる場合もあることを強調する．

5. 実験II

全員を集め，DC増幅器を用いて温度性眼振に関する以下の実験をおこなうが，引き続きAC増幅器で実施しても構わない．私たちは増幅器からのデータをPCに取り込み（sampling rate 200 Hz，low-pass filter 50 Hz），眼球運動を実験中はPCモニターにて観察し，実習後はレポート提出用にプリンターにて印刷している．

1）実験準備

被験者，電極装着担当者，PC操作担当者，被験者の頭を保持する担当者，冷水（約10℃）を作る担当者，被験者の耳からこぼれる水を受け止める担当者をそれぞれ1人決める．教員が，問診にて被験者に中耳，内耳疾患の既往がなく，耳鏡を用いて外耳道や鼓膜に異常がないことを確認する．

ディスポ電極を実験Iと同じ部位に装着し，同じ手順で10 deg校正をおこなう．表1に示したようにDC記録はAC記録に比べ電極や皮膚の状態に影響されやすいため，特に皮膚処理は念入りにおこない，電極装着後にドリフトが大きければ落ち着くまで数分様子を見る．校正波形を図8aに示す．この例では，左右10 degの眼球位置変

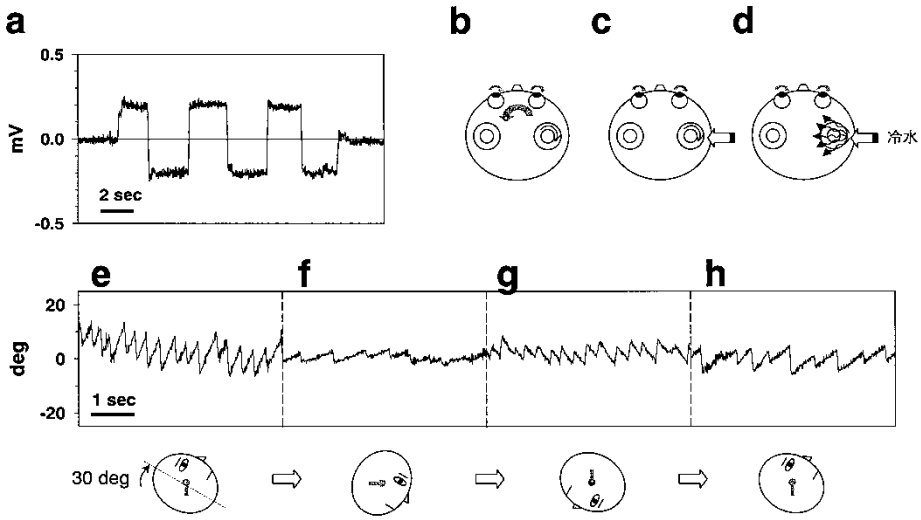


図8．温度性眼振の記録例

a：DC増幅器による10 deg校正の例．b：頭が左へ回転すると右水平半規管の内リンパ液は慣性力により時計回りに流れ，有毛細胞を（抑制）刺激する．その結果（神経経路は省略），眼球は右へ回転する（VOR）．c：冷水によって右水平半規管の内リンパ液に対流が生じ，bと同様の刺激となる（対流説）．d：冷刺激が右の前庭器あるいは前庭神経の機能を直接抑制する（直接刺激説）．e：右の外耳道に冷水を注入し頭を仰臥位から30 deg前屈させると緩徐相が右方向の眼振が出現する．f：eから頭をさらに90 deg前屈させると眼振は消失する．g：fから頭をさらに90 deg前屈させると眼振はeと逆方向になる．g：頭をeの位置に戻すと再び右方向の眼振となる．

化でそれぞれ約0.20 mVの電位変化が記録されている．学生は，DC記録はAC記録（図2a）と異なり減衰がなく波形は矩形波様であることを理解する．

2）温度性眼振についての説明

水平半規管の簡略図（図8b-c）を示し，あらかじめ以下の説明をおこなう．

“実験Iで観察したように，頭を左へ回転するとVORにより眼球は右へ回転する．これは右側の水平半規管について考えてみると，慣性力により生じた時計回りの内リンパ流によって有毛細胞が（抑制）刺激されているのである（図8b）．ところが，被験者を仰臥位にして右耳に冷水を注入しても同様の眼球運動が誘発される．また，温水では反対方向の眼球運動が誘発される．実はこれも水平半規管刺激によるVORであるが，どのような機序で半規管が刺激されるのであろうか？”

ここで学生からいくつか説が出されるが，それを内リンパ対流説（温度によって生じた内リンパ対流が刺激となる，図8c）と直接刺激説（前庭器あるいは前庭神経の活動は冷やされると低下し暖められると亢進する，図8d）に集約する．そして，“いずれの説も冷水と温水で誘発される眼球運動の方向が逆になるという現象は説明できる．しかし簡単な方法によって，どちらの説が正しいか（間違っているか）を証明することができる．さて，どのような方法だろうか？”と問う．その答えが次の実験であると前置きをして，実験IIを始める．

3）温度性眼振の観察

被験者を仰臥位にして水平半規管が垂直位の状態となるよう頭を30 deg前屈させる．教員がシリンジを用いて20 mlの冷水を約20秒間にわたり右耳の外耳道に注入する．注入終了20～30秒後から図8eに示すような緩徐相が右方向，急速相が左方向の眼振が出現する．そこから頭を90

deg前屈すると眼振は消失し（図8f），さらに90 deg前屈すると今度は反対方向に眼振が生じる（図8g）．再び最初の頭位にゆっくり頭を戻すとやはり最初と同じ方向の眼振が出現する（図8h）．このような頭位に依存して眼振の方向や大きさが変化するという結果は，温度の直接刺激は頭位とは無関係なので直接刺激説を否定し，対流は頭位によって流れの方向が変わるので内リンパ対流説を裏づけることになる．また，被験者にめまい感の方向や大きさについて聞くと，眼振の方向や大きさの傾向とよく一致していることがわかる．

このように，温度性眼振は非生理的ではあるが一側の水平半規管の機能をよく反映する生体現象であり，臨床的にもめまいの責任部位や患側を調べるための有用な臨床検査であることを説明する．

4）注意点

温水（44℃）刺激を実施しても構わないが，冷水と比べ刺激として弱いため眼振誘発の程度が小さく，被験者への負担も考慮して，私たちは冷水刺激のみをおこなっている．

温度性眼振については，水平半規管のみならず他の半規管や耳石器の関与も示されている．また，対流の生じ得ない無重力の宇宙においても誘発されたことから，内リンパ対流説以外の機序も存在する．しかし，少なくとも地上においては，水平半規管の内リンパ対流の関与が大きいとことは一般的に支持されている．

外耳道への冷水の注入は慎重に行ない，実験後に外耳道や鼓膜に異常がないことを耳鏡にて確認する．そのため，実験IIについては，教員は温度性眼振検査の経験がある臨床医であることが望ましい．

まれに前庭自律反射によって，気分が悪くなったり，冷汗，顔面蒼白などが出現したりする例があり，被験者にはあらかじめその可能性を説明し，了承を得ておく．また，その場合は充分に休養を取らせて，当日は車やバイクなどの運転は避けるように注意しておく．

6. おわりに

眼球運動は神経生理学的に感覚-運動系制御システムのよいモデルである．本実習においても，視覚と前庭覚の相互作用，速い眼球運動と遅い眼球運動，随意運動と反射の関係を軸にして実験を進めている．この実習ではEOG測定というbehaviorの観察にとどめているが，学生がより詳しい神経メカニズムに興味を持つよい動機づけとなるはずである．

私たちのこれまでの印象では，頭の動きという前庭刺激によって誘発される眼球運動，すなわちVORに強く興味を持つ学生が多かった．前庭覚は感覚でありながら日常ほとんど意識に上らず，その存在も忘れがちであるが，この実習によって前庭覚の重要性が理解できる．さらに，VORは実際の視覚刺激のみならず視覚イメージによっても大きく変化することにも驚いていた．また，滑らかに見えるのならば滑らかな眼球運動であるという推測がことごとくはずれることによって，saccadeとsmooth pursuitの関係について興味を示す学生も多く見られた．このような学生にとって予想外の結果が知的好奇心を刺激するのであろう．

いまだ未熟な内容ではあるが，この眼球運動をテーマとした実習をきっかけに少しでも“生理学は面白い”と感じる学生が増え，自分の頭でからだのはたらきを考える臨床医，研究者が育つことを切望する．

7. 参考図書

1. 小松崎篤，篠田義一，丸尾敏夫：眼球運動の生理学．医学書院（東京），1986.
2. 芋阪良二，中溝幸夫，古賀一男：眼球運動の実験心理学．名古屋大学出版会（名古屋），1993.
3. Leigh RJ & Zee DS : The neurology of eye movements. F.A. DAVIS COMPANY(Philadelphia), 1991.
4. 日本生理学会編：生理学実習書．南江堂（東京），1977.