

眼球運動の追視と固視に関する異方性の検討

吉田 茂・篠田 伸夫

Anisotropy of tracking and fixational eye movements

Shigeru YOSHIDA and Nobuo SHINODA

Anisotropy of tracking and fixational eye movements were examined in terms of mobility and stability or noise tolerance. Eye movements were recorded by the infrared reflex technique from cornea and sclera. Three kinds of target motions, 1Hz, 3Hz sine wave and sinusoidal linear sweep (0.1-3Hz), were presented on a monitor scope with four orientations: horizontal, right-oblique, vertical, left-oblique. Subjects were asked to track the target or to fixate a central point during the target was moving. Gain, phase lag and root mean square of error were computed for evaluating the anisotropy. The results shows that horizontal tracking has a higher mobility than vertical one and that horizontally moving stimulus is more effective to disturb the fixation. No clear characteristic was found in the right and left oblique orientations.

Key words: anisotropy, tracking eye movement, fixational eye movement, mobility, stability.

はじめに

運動場面における眼球運動の役割は、スキルの様式を問わずはなはだ大きいものである。特に、開放スキルの場合は眼球運動の可動性(追視)が、そして、閉鎖スキルの場合は眼球の安定性(固視)が重要となる。

その際、外界の刺激の左右、上下、斜めなどの運動の方向、方位によって、追視あるいは固視に影響がでると考えられる場合がある。一般に、視力、錯視量などが空間的に異方性をもっていることは知覚研究では古くから認められている(和田ら, 1969)。生態学的にも、生体にとっての意味づけにおいて、空間は均質ではないとされている(ギブソン, 1985)。

眼球運動の研究では、認知との関係で位置、停留時間などの研究が盛んであるが、追跡眼球運動などの誤差の評価に関する研究は水平方向での研究が多く、2次元のものは少ない。これは、記録が困難であることと、記録の精度の問題が主な理由となっている(Deubel, 1987; Hallet, 1986)。

現在、測定装置に関しては角膜-強膜反射方式が測定応答が早いこと、直線性がさらに改善されたことによって研究の幅が広がっている(日下, 1987)。今回は、この測定装置の利点を活かし、眼球運動の場合にも知覚現象のような異方性が見られるかどうかを検討した。

実験

目的 眼球運動および固視の異方性を、次の要因に関して検討する。以下、実験要因は{ }、その中の要素は[]で囲んで表示する。

- 1) {方位}: 水平[H], 右斜め[R], 垂直[V], 左斜め[L]の4方位である。
- 2) {周波数}: [1 Hz], [3 Hz]のサイン波と、0.1Hzから3 Hzまでのサイン波のリニア・スイープ[SWEEP]の3種類。それぞれの提示時間は5120ms。
- 3) {課題}: 運動する刺激を追視[MOV]すること、外刺激に惑わされずに固視[FIX]することの2種類。2)の{周波数}要因のもとで、

眼球運動の可動性（追従性）と、眼球の安定性（ノイズ耐性）を調べ、あわせて両者の関係も検討する。

被験者 健康成人4名、視力(0.8~1.2)。

刺激 モニター・スコープ(Sony Tektronix, 654 Monitor (P31))の管面上で輝点を動かし、追視用と妨害(ノイズ)用の刺激とした。また、管面上に半径視角 4° の円を切り抜いた黒マスクをつけ、中心および左右上下、四隅に較正用のマークをつけた【Fig. 1. A】。モニター・スコープの管面と眼球との距離は57cmとし、管面上1cmが視角 1° に相当するようにした。刺激の移動振幅を視角 $\pm 4^\circ$ に限定したのは、測定装置のリニアリティが十分に保証される範囲であることと、頭部固定の記録方式であるため眼球頭部協応運動を起こさせないようにするためである。

輝点は、[H], [R], [V], [L]の4方位でサイン波状の速度で往復運動する。輝点の運動は、ファンクション・ジェネレーター(NF回路設計, 1732)によりコントロールした。さらに、ファンクション・ジェネレーターは、マイクロコンピュータ(NEC, PC9801VM21)により、GPIBを通してコントロールされた【Fig. 1. B】。

記録 眼球運動は、赤外線による角膜一強膜反射方式の眼球運動モニター装置(竹井機器)により記録した。被験者は、眼球運動モニター装置の眼鏡形式のセンサーを装着し、頭部に固定する。

そのうち、顔面固定器に頭部を固定する。水平方向の利き眼を水平成分(X)の検出眼に、他方の眼を垂直成分(Y)の検出眼に設定する。

被験者は、実験者の指示にしたがって、中心、および、左右上下、四隅につけられたマークを見る。その間、実験者は眼球運動モニター装置の較正を行う。中心より左右上下での視角 $\pm 4^\circ$ が、XY出力電圧で $\pm 2V$ になるように調節。さらに、水平、垂直間のクロストークの補正、中心からの正負の極性リニアリティの補正、および左右上下の台形歪の補正を行う。このとき、できるだけ眼鏡式のセンサー部の調節のみで歪がなくなるよう調整する。

眼球運動モニター装置からの、X、Yの電圧データを、マイクロコンピュータのA/D変換ボード(カノーパス, ADX98E)でデジタル・データ化する。分解能は12bitである。サンプル・レンジは $\pm 5V$ 、サンプル間隔は5ms、サンプル・ポイント数は1024個で、5120msの記録時間である。データは、ファンクション・ジェネレーターの刺激信号用XY電圧と、眼球運動のXY電圧の4ch記録である。データはフロッピー・ディスクに保存した。

手続き 被験者には、予めデモンストレーションして実験内容を知らせ、また、リハーサルもして実験場面に慣れるようにした。被験者は、センサーを装着し、頭部を固定して刺激面を見る。予

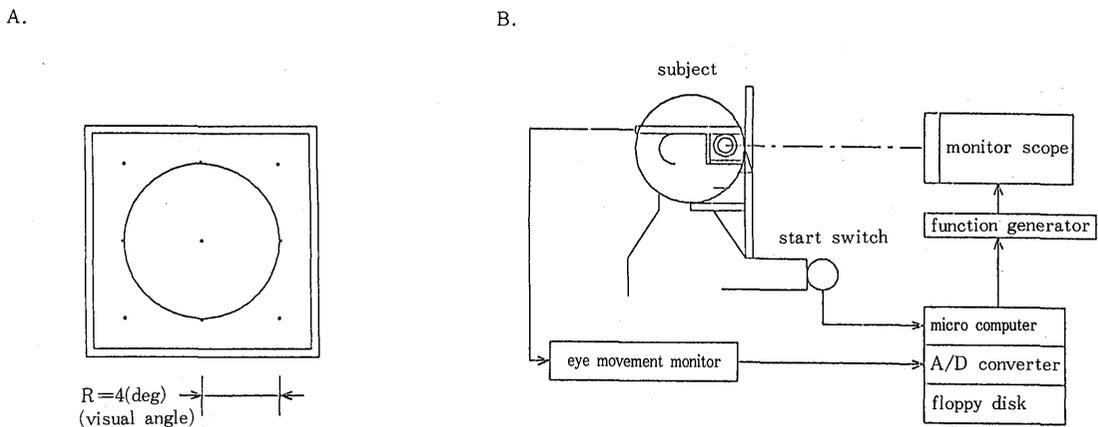


Fig. 1 Surface of a monitor scope(A) and recording system of eye movements(B).

め設定された順序で、校正用刺激 ([CAL], 0.2Hz), {周波数} 要因 ([1 Hz], [3 Hz], [SWEEP]), {方位} 要因 ([H], [R], [V], [L]) に対して, {課題} ([MOV], [FIX]) を行った。

ある{周波数}で輝点が動いているとき, {課題}に従ってそれを追視 [MOV] し, あるいはその動きを無視して中心点を固視 [FIX] して準備し, 被験者自身が傾合をみて手元のスイッチを押すと, サンプルングが開始される。[SWEEP] 条件の場合は, このときスイープが開始される。5120ms のデータ・サンプルの後, ブザー音が鳴る。被験者はこの間, 瞬きをしないで {課題} を遂行するように要求された [Fig. 1. A]。実験室の室温は 23~25°C, 湿度は 60~65% であった。

結果

校正とデータ例 校正は, それぞれのセッションの初めに行った [CAL] の最大値, 最小値から電圧を補正し, さらに振幅が視角 $\pm 4^\circ$ になるように, 角度変換をした。

このようにして求められたものが, [Fig. 2] である。これは, 1名の被験者の [H] に対する眼

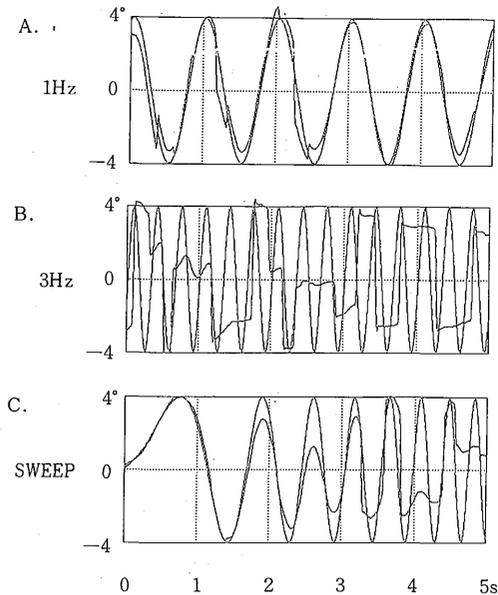


Fig. 2 Traces of tracking eye movements in time course.

球運動の水平成分 (X) を, それぞれ [1 Hz], [3 Hz], [SWEEP] について時間展開したものである。[1 Hz] では, かなりスムーズな追視が行われ, ときどき小さなサッカド (跳躍眼球運動) が見られる。[3 Hz] では, スムーズな追視では追いつけず, 大きなサッカドによって, 補正しようとしている。[SWEEP] では, はじめ 0.1Hz のあたりでは追視できているが, 次第に振幅が小さくなりついには追いつけず, サッカドで補正しようとしているのがみられる。

これらのデータを 2 次元平面上に表したものが, [Fig. 3] である。上から, {周波数} の [1 Hz], [3 Hz], [SWEEP] が順に示され, さらに, それぞれ, {課題} の [CAL], [MOV], [FIX] が示されている。縦列には, {方位} の [H], [R], [V], [L] がとられている。ただし, [H] の場合は, グラフィックの表示上, 円外左にはみえた部分はカットされている。

[1 Hz] の場合, [MOV] がよくできており,

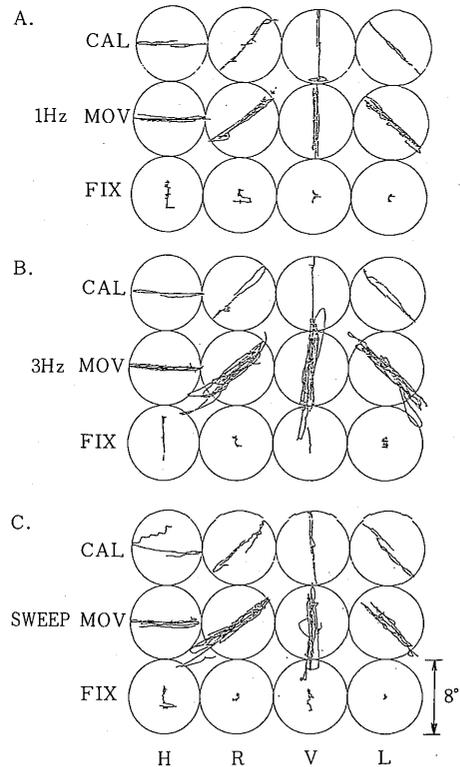


Fig. 3 Two dimensional traces of eye movements.

[FIX]では[H]でY成分の変動がみられる。[3 Hz]では、[MOV]は[H]以外ではズレが大きく、[FIX]は[H]、[V]でY成分の変動がみられる。[SWEEP]では、[1 Hz]と[3 Hz]の中間ほどの変動がみられる。

追視 [MOV] 一般的な表示法では、刺激周波数を横軸に、ゲインとフェイズを縦軸にとっているが、ここでは異方性を問題にしているので各{方位}を横軸にした。ゲイン、フェイズ差とも刺激信号に対応した周波数での比較である【Fig. 4】。

信号および眼球運動について、[H]はそのX成分、[V]はそのY成分を、[R]、[L]については座標変換をし、それぞれR方向成分、L方向成分をもとに分析した。それぞれのデータにHanningウィンドーをかけ、Sande-Tukey法のFFTで処理した後、アンプ・スペクトラム、フェイズ・スペクトラムを求めた(小池, 1987)。そののち、追従性指標として、振幅差はdB単位のゲイン($10\log(\text{反応振幅}/\text{信号振幅})$)で、位相差はdeg(°)単位のフェイズ(反応位相-信号位相)で示した。

被験者が条件全てにわたって測定しているので、{方位}×{被験者}の2要因分散分析を行っ

た。ただし、{被験者}は無作為変数とみなすので検定はしない(岩原, 1965)。

ゲイン：[1 Hz]ではほとんど変わらず多少増加する傾向がみられた。[3 Hz]では追いつけず、-4~-8 dBの減少がみられる。{方位}についての有意差はみられなかった。

フェイズ：[1 Hz]では多少位相が進み、[3 Hz]では-70~-110°の遅れがみられる。{方位}についての有意差はみられない。

次にRMSをズレの指標として検討した【Fig. 5. A】。RMSは、XY成分の信号からの誤差(距離)の2乗の平均の開平として計算した(ベンダット・ピアソル, 1976)。RMSの値は、それぞれ、[1 Hz]では1~2°, [3 Hz]では3~4°, [SWEEP]では2~3°であった。なお、[SWEEP]の図示は省略した。{方位}には有意差がなかった。

[SWEEP]について、誤差(距離)を時間軸に沿って累積表示したものが、【Fig. 6】である。対応づけができるように、[SWEEP]の信号も重ねて表示した。[V]では、1 sあたりで急増している。最終的に累積誤差の大きい順にみると、[V]、[R]、[H]、[L]となった。しかし、これらの

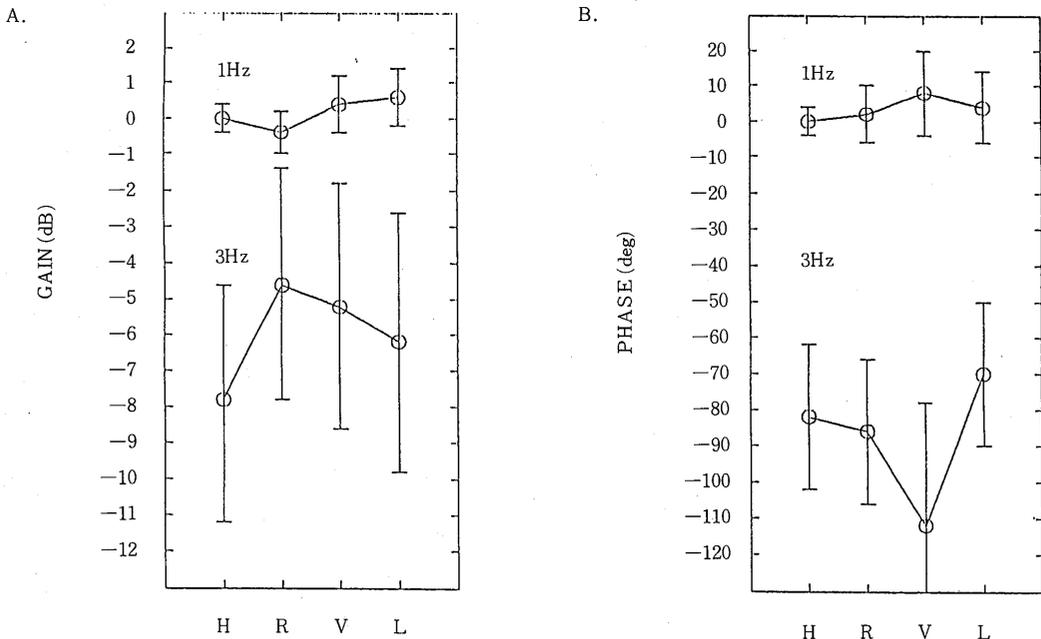


Fig. 4 Gain and phase lag of tracking eye movement.

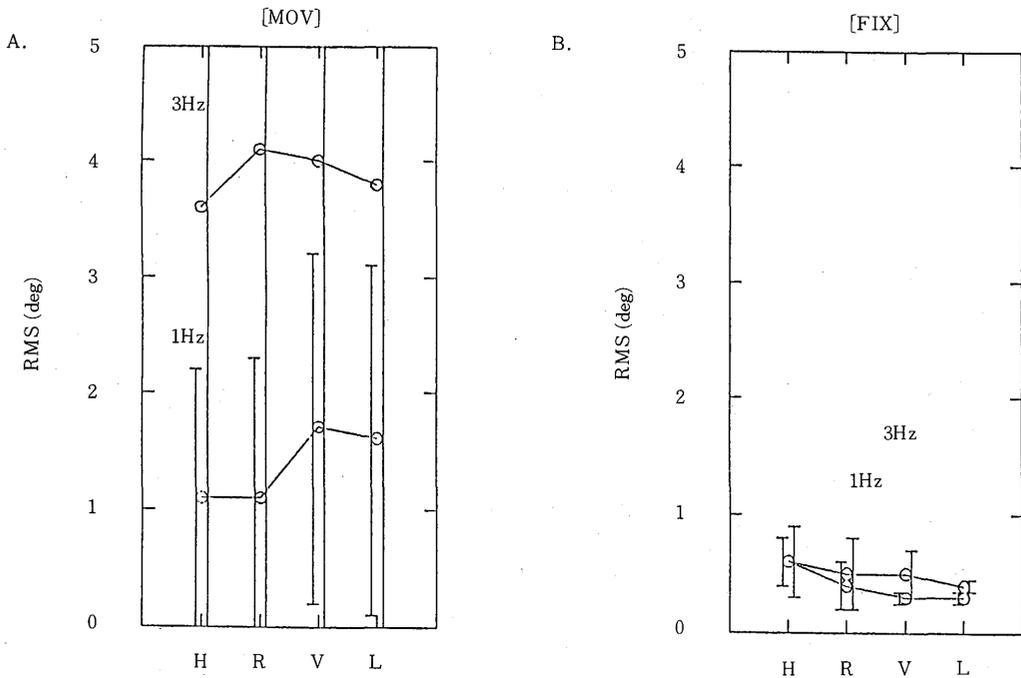


Fig. 5 RMS (root mean square) values of tracking and fixational eye movements.

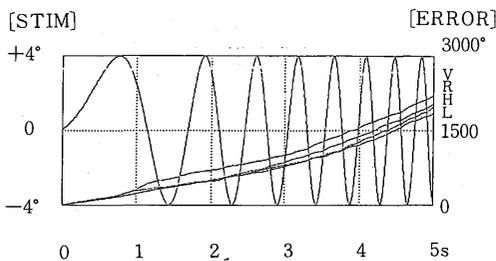


Fig. 6 Cumulative absolute error of tracking eye movement to linear sweep stimulation (0.1-3Hz).

間（{方位}）には有意差はなかった。全体的にみると、3.5sのあたり、周波数に換算しておよそ2 Hzのあたりで勾配が急になっているのが見られる。

固視 [FIX] [FIX] の誤差として RMS を表示したのが、【Fig. 5. B】である。この RMS は、中心固視点（0°, 0°）を目標値として算出している。[1 Hz], [3 Hz], [SWEEP]とも、1°以内

の RMS であった。[SWEEP] の図示は省略した。[1 Hz] の場合、{方位} に有意差がみられた ($F(3, 9) = 6.22, p < 0.05$)。

追視と固視 ([MOV] × [FIX]) RMS で {方位} × {課題} × {被験者} の分散分析をした。{方位} の主効果はみられなかったが、[1 Hz] で {方位} × {課題} の交互作用に有意差がみられた ($F(3, 9) = 4.7, p < 0.05$)。

考 察

実験結果 {方位} の主効果に関しては、RMS 値で [1 Hz] [FIX] の場合のみ有意差がみられた。これは、RMS で最大の [H] と最小の [V] の差とみてよい。{方位} × {課題} の交互作用に関しては、RMS 値で [1 Hz] の場合に有意差がみられた。これは、各 {方位} での RMS の変動のしかたが、[MOV] と [FIX] では異なることを意味する。

全体の特徴 両者の関係を見るため、{方位} は [H] と [V]、{周波数} は [1 Hz] に限って考える。[R] [L] に関しては順序尺度的にも一貫

していないので、特徴づけが困難である。

追視 [MOV] については、[H] が [V] よりも RMS が小さく可動性が高い。固視 [FIX] については、[H] が [V] より RMS が大きく、[V] のほうがノイズ耐性があるようである。さらに、[H] は [V] よりもゲインと位相差が 0 に近く、可動性が高いといえよう。

[FIX] では、眼球の可動性が高い [H] に対してはノイズ耐性が悪い。ただし、必ずしも刺激方向に引きずられているわけではない。【Fig. 3】の例の、[FIX] の [H] では、垂直方向 (Y) に変動がみられている。他のデータでは斜めに変動がみられている。

前回の報告 (吉田・篠田, 1987) では、ノイズが固視点を中心にしたリサージュ状であり、速い運動であったので 1 つの 2 次元パターンとしてとらえられ、ノイズとしての効果が少なかったと考えられる。

[3 Hz] と [SWEEP] [3 Hz] の周波数では、ゲイン、フェイズとも大きな誤差がでることが認められている (Matsuoka and Ueda, 1986; Hallet, 1986)。本実験の狙いとして、[3 Hz] [SWEEP] という、困難な課題の場合に、より { 方位 } の特徴がみられるであろうと考えた。

[SWEEP] の場合は、時間的な変動を期待したのであった。しかし、反応のしかたのばらつきが大きく、特徴は抽出できなかった。

知覚現象 一般には、[HV] が [RL] に比べて視力が良く、錯視量が低いといった関係が報告されている (和田ら, 1965; Yoshida et al., 1975)。しかし、本実験の結果では、[H] と [V] との対比が浮き彫りにされた。この点、知覚過程との違いがみられる。日常生活でも、我々は地上の生活であり、垂直よりも水平の動きに敏感であることはうなずける事実である。動物でも生態によく適合した異方向がみられるという (Blakeslee et al., 1985)。

眼筋 眼球運動は、上下左右の 4 直筋と上下の 2 斜筋が司っている。この内、内直筋が最も強いとされている。これは [H] の可動性が高いことと符合している。斜め眼球運動は、4 直筋と 2 斜筋との共同と拮抗がスムーズにいかないと、ぎくしゃくした動きになる (仁田, 1980)。1 名の例であるが、[R] [L] の場合、スムーズにいかず、多少階段状となる場合がみられた。全体に、デー

タに個人差が大きかったのはこの辺の理由によるのかも知れない。

測定法 角膜反射方式で垂直成分 (Y) に影響を与えるものとして、[MOV] の場合、上眼瞼と下瞼の微少な動きによるアーチ・ファクトが考えられる。[FIX] でも、良く見ようとして、あるいは動かすまいとして、上眼使いになってしまうことがある。また、眼球と頭部は協応して動くのが自然であり、あごの皮がわずかながら動いてしまうこともあげられる。さらに、眼鏡式の故に、良く見ようとして、鼻、耳の部分が動いて、センサーの位置に誤差がでる場合もある。特に垂直成分 (Y) はこの影響を受けやすい。バイト・ボードによって頭部を固定しても、この点は避けられないであろう。今後、これらの点を改善する必要がある。

個人差 全体を通して大きな個人差がみられた。そして、実際には被験者に共通した変化パターンはみられなかった。つまり、本実験結果は平均値を元にした分析であった。今後、個人内での安定した特徴がみられるかを、繰り返し実験により検討する必要がある。

スキル 測定装置の制限から頭部を固定し移動範囲も狭い眼球運動測定であったので、実際の運動場面にはまだ言及できるものではないが、次のような練習も効果的であろう。まず、開放スキルの場合、水平方向の動きは眼球のみで追跡し易いが、垂直方向では追視しにくいので頭部運動に大きく依存することになる。このとき、姿勢反射などで体勢が不安定になる可能性がでてくる。したがって、垂直方向の眼球運動をよく練習することによって、これを改善できるのではないだろうか。また、閉鎖スキルの場合、ゴルフのパッティングなどで、つい動くボールを追視してしまい、コントロールを乱すことがある。水平方向の動きは、眼球運動を誘発し易く、頭部運動、体幹運動へと影響を及ぼす。ボール脇の芝 1 本を凝視するなどの練習も効果的ではないだろうか。

まとめ

知覚現象などで一般に知られている空間の異方向性が、眼球運動でもみられるかどうかを検討した。追視、固視の両面から、1 Hz、3 Hz のサイン波と 0.1~3 Hz のリニア・サイン・スイープ波により、ゲイン、フェイズ、平均 2 乗誤差 (RMS) 等

を指標として分析した。その結果、1 Hz の刺激の場合、固視の RMS に異方向性が認められ、さらに、追視と固視の間に交互作用がみられた。水平、垂直の方位を比較すると、水平の方位は眼球の可動性が高く、水平の運動刺激に対しては安定性が低いという特徴がみられた。斜め方位に関しては、特徴づけが困難であった。今後は、同一被験者での繰り返し実験により、個人内での安定した特徴が認められるかを検討していく。

文 献

- 1) ベンダット・ピアソル (得丸英勝 訳) ランダムデータの統計的処理 培風館 1976
- 2) Blakeslee, B.B., Jacobs, G.H. and McCourt, M. E. Anisotropy in the preferred directions and visual field location of directionally-selective optic nerve fibers in the gray squirrel. *Vision Research*, 25, 4, 615-618, 1985.
- 3) Deubel, H. Adaptivity of gain and direction in oblique saccades. In J.K. O'Regan and A. Levy-Schoen (Eds.) *Eye movements: From physiology to cognition*. Elsevier Science Publishers, 182-190, 1987.
- 4) ギブソン (古崎 敬・古崎愛子・辻敬一郎・村瀬 旻 訳) 生態学的視覚論—ヒトの知覚世界を探る—サイエンス社 1985
- 5) Hallet, P.E. Eye movements. In Boff, K, R., Kaufman, L., and Thomas, J.P. (Eds), *Handbook of perceptual and human performance, Vol. 1, Sensory processes and perception*, John Wiley & Sons, pp. 10.1-10.112, 1986.
- 6) 岩原信九郎 教育と心理のための推計学 日本文化科学社 1965
- 7) 小池慎一 C による科学技術計算 CQ 出版社 1987
- 8) 日下秀夫 視線の動きの測定と応用に関する基礎技術 NHK エンジニアリングサービス 1987
- 9) Matsuka, K. and Ueda, Y. Frequency characteristics of the smooth pursuit component in tracking eye movements, *Ergonomics*, 2, 197-214, 1986.
- 10) 仁田正雄 眼科学 89-115 文光堂 1980
- 11) 和田陽平・大山正・今井省吾 感覚知覚ハンドブック 420-423 誠信書房 1969
- 12) Yoshida, S., Iwahara, S. and Nagamura, N. The effect of stimulus orientation on the visual evoked potential in human subjects. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 39, 53-57, 1975.
- 13) 吉田 茂・篠田伸夫 標的固視の眼球運動特性 筑波大学体育科学系紀要 10, 69-73, 1987.