原 著

移動視標追視の労働生理学的評価

滝 川 寛*, 山 崎 砂知子*, 坂 本 弘*

WORK-PHYSIOLOGICAL ASSESSMENT OF EYE-TRACKING TASK

Hiroshi TAKIGAWA,* Sachiko YAMAZAKI* and Hiroshi SAKAMOTO*

Mental work-load has increased with technical innovation, while manual work-load has decreased. As a result, eye fatigue has become one of the complaints in the modern working environment. Heretofore, the evaluation of visual work-load was based mainly on observation of the refractive power and accommodative function of the eyes. The purpose of this study is to assess, through observation of eye movement, the work-load created by eye-tracking tasks.

The subjects were required to track, only by eye movement, a target oscillating between a distance of 35 cm in the horizontal or vertical direction for seven minutes. Mispursuit of the target, blinking and heart rate were recorded during the period of the experiment. The subjects were given eye-tracking tasks under nine conditions comprising angles 20°, 40° and 60° in the respective moving widths and 0.1 Hz, 0.3 Hz and 0.5 Hz in the moving frequency of the target. Four healthy male volunteers participated in the eye-tracking experiments involving the horizontally moving target and five healthy male volunteers participated in those involving the vertically moving target.

The task load condition of visual angle of 20° with target frequency of 0.1 Hz was employed as standard. The relative velocity of the target and the velocity of eye movement were obtained using various combinations of visual angles and target frequencies.

The following results were obtained:

1) The frequency of mispursuits increased significantly with the increase of relative target velocity. The degree of increase of mispursuit was especially remarkable at relative target velocities exceeding 1.0 Hz or at eye movement velocities exceeding 40°/s.

2) The frequency of repeated blinks decreased significantly under the task load condition of eye movement velocities exceeding 24°/s.

3) No significant changes in heart rate or sinus arrhythmia were observed with increase of relative target velocity.

Key words: experimental study; visual task; eye-tracking; eye movement; electro-oculogram (EOG); blinking; heart rate

I. は じ め に

技術革新によって重筋作業に伴う負担は減少したが、一方で神経感覚器系の負担が増大し、それに対する適切な労働衛生管理が求められている¹⁻³⁾。神経感覚器系の負担をおこさせる作業態様の代表例として視作業があげられる。

従来、視作業に対する作業管理、健康管理の立場から視器の屈折および調節機能の評価がとりあげられてきた。しかし、視作業が視器に及ぼす負担は屈折や調節機能に反映されるばかりでなく、眼球運動機能にも影響を与える。

本報では視作業の眼球運動機能に対する負担を評価する手掛かりを得るためにモデル実験をおこなった。すなわち、移動視標を追視させながら、眼球運動、瞬目数、心拍数の測定をおこない視標の移動速度別に追視運動の限界速度や緊張状態の変化を分析した。

II. 実 験 方 法

実験は室温 23±2°C、照度 212±86 lx、広帯域の暗騒音 55 dB(A) 以下の条件下でおこなった。

視標の追跡は日本電気三栄製視標追跡装置 3G16 型を用いた。該装置の視標は直径 10 mm の白色ランプであり、その明るさは 60 lx であった。視標は 35 cm の

* 三重大学医学部衛生学教室

昭和 62 年 3 月 16 日受付

* Department of Hygiene, Mie University School of Medicine

Received for publication, March 16, 1987

幅を往復移動するようになっており、その速度は 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 および 0.5 Hz の 5 段階に切り換えることができる。追視させる視標の速度別割りつけは各被験者に対して無作為な順序でおこなった。

被験者を椅座位とし、下顎を固定台上に静置させ、眼前に視標追跡装置を置いた。移動視標追視の際には頸部運動を伴う追視をおこなわないように指示した。また胸鎖乳突筋の筋電図を日本電気三栄製 1205 C 型筋電計によって観察し、追視に際して頸部運動が伴わないことを確認した。

移動視標の追視に伴う眼球運動の観察は以下のようにした。すなわち、眼球水平動は左右眼裂耳側に、眼球垂直動は利き眼の眼裂上下の位置に電極を装着し、接地電極は前額中央に装着した。眼球運動に伴う電位の変化は日本電気三栄製 1217 型眼振計に誘導し、時定数を 0.03 s とし、水平動は $200 \mu\text{V}$ を 20 mm に、垂直動は $200 \mu\text{V}$ を 10 mm に増幅して同社製ポリグラフ 6729 型に描記させた。

心拍の測定は誘導電極を心尖部と右鎖骨下に、接地電極を胸骨上部に装着し、日本電気三栄製 2 E-16 型心電計から同社製 1240 型心拍計に誘導し、ポリグラフ上に瞬時心拍数として対応する眼球運動とともに記録した。

ポリグラフの記録紙の送り速度は 10 mm/s とした。

実験は下記の 2 部よりなる。

1. 水平方向移動視標の追視実験

健康男子 4 名 (34 ± 7 歳) を被験者とし、明順応下で水平方向に往復移動する視標を眼球運動のみによって 7 分間追視させた。被験者の第 1 眼位に対して視角が 20° , 40° または 60° になるように被験者と視標との距離をそれぞれ設定し、各視角条件で 0.1, 0.3 および 0.5 Hz の視標速度で追視させた。したがって被験者 1 名が 9 条件の試行をおこなうことになる。各試行の間には 5 分間の休憩をとらせた。

2. 垂直方向移動視標の追視実験

健康男子 5 名 (21.2 ± 1.1 歳) を被験者とし、垂直方向に往復移動する視標を眼球運動のみにより 7 分間追視させた。視角および視標速度の組み合わせは実験 1 と同様に各被験者 9 条件であり、各試行間の休憩の挿入も実験 1 と同様とした。

III. 実験成績

1. 水平方向移動視標の追視実験

単位時間あたり平均視線逸脱頻度を Fig. 1 に示した。図の横軸に示した相対視標速度とは視角 20° 、視標速度 0.1 Hz の負荷条件を基準にして視角と視標速度の関係

Fig. 1. Frequency of mispursuit of the target moved horizontally. $\pm$ mean $\pm$ SE, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$. In the difference from the value at the velocity of eye movement of $4^\circ/\text{s}$.

から相対的に求めた値である。例えば視標速度が同じでも視角が 2 倍になると相対視標速度は 2 倍となる。一方、眼球運動速度は相対視標速度を角速度として表したものである。以下に示す図の横軸にとってある相対視標速度についても、これと同様である。

視線逸脱の頻度は相対視標速度 0.1 Hz の条件に比べ、視標速度の上昇とともに有意に増加した。逸脱頻度の増加の程度は相対視標速度 0.9 Hz までの水準に比べ、それを越えた速度になると急激な逸脱の増加がみられた。すなわち、この限界値を眼球運動速度で表すと $36^\circ/\text{s}$ であった。

単位時間あたり平均瞬目頻度を Fig. 2 に示した。平均瞬目頻度は相対視標速度の上昇に伴って減少傾向を示した。相対視標速度 0.1 Hz の条件に比べて、0.3 Hz (眼球運動速度 $12^\circ/\text{s}$)、0.9 Hz (眼球運動速度 $36^\circ/\text{s}$) および 1.5 Hz (眼球運動速度 $60^\circ/\text{s}$) において、その減少は有意であった。

単位時間あたり群発瞬目の頻度を Fig. 3 に示した。群発瞬目は 0.5 秒以内の時間帯に発生する複数の瞬目である。群発瞬目の発生は相対視標速度の上昇とともに減少した。相対視標速度 0.1 Hz の条件に比べて 0.6 Hz 以上 (眼球運動速度 $24^\circ/\text{s}$) において、その減少は有意であった。

瞬目の発生頻度を移動視標の移動中の位置別に求め

Fig.2. Frequency of blinking in tracking the target moved horizontally. As in Fig. 1.

Fig.3. Frequency of repeated blinking in tracking the target moved horizontally. As in Fig. 1.

Fig.4に示した。いずれの視角条件、また、いずれの視標速度においても視標の方向転換位置付近に多発する傾向が認められた。すなわち、右方移動視標が左方移動に移る折り返しの位置、もしくは左方移動視標が右方移動に移る折り返しの位置で瞬目が多発した。この瞬目多発

Fig.4. Frequency of blinking corresponding to the location of target in tracking the target moved horizontally. Target frequency—0.1 Hz, ----0.3 Hz, —·—0.5 Hz.

には各視角条件ともに視標速度による差異は認められなかった。

心拍数の変化率を Fig.5 に示した。心拍数変化率とは試行当初1分間の瞬時心拍数の平均値と試行7分目の1分間の瞬時心拍数の平均値から変化率を求めた。図に示すように心拍数変化率と相対視標速度との間には一定の有意な関係は認められなかった。

心拍標準偏差の変化率を Fig.6 に示した。心拍標準偏差の変化率は試行当初1分間の心拍標準偏差と試行最終7分目の1分間の心拍標準偏差から変化率を求めた。各1分間の心拍標準偏差は瞬時心拍数記録から心拍数を1秒間隔でサンプリングし、1分間の平均値と標準偏差を算出することにより求めたものである。心拍標準偏差の変化率は相対視標速度の上昇によって低下傾向を示したが、その変化は有意ではなかった。

2. 垂直方向移動視標の追視実験

垂直移動する視標を追視した際の眼球運動垂直動の波

形には眼瞼、眼輪筋、前頭筋など顔面筋の運動に伴う筋電図が加わり追視眼球運動による波形を複雑にする。その1例を Fig.7 に示した。図の右側(B)の波形が水平移動視標を追視した際の眼球運動波形であり、左側(A)が垂直移動する視標を追視した際の眼球運動波形である。図の左(A)に示すように、垂直移動視標を追視する場合には視標からの視線逸脱頻度を垂直眼球運動波形から正確に求めることは困難であった。したがって垂直移動視標を追視する場合には視線の逸脱を次のようにして求めた。すなわち、垂直移動する視標を追視する際、視線の逸脱は垂直方向の眼球運動にのみ出現するとは限らない

Fig. 5. Changes of heart rate at the last 1 min compared with the value at the first 1 min.

ため、ある程度以上の逸脱現象は眼球の水平方向の運動波形にも投影され则认为られるので、眼球水平動波形における逸脱頻度を計測の対象とした。また、群発瞬目の発生は確認しえないので、これは計測しなかった。

単位時間あたり視線逸脱頻度を Fig.8 に示した。相対視標速度 0.1 Hz における逸脱頻度に比べ、0.5 Hz までの速度では逸脱上昇はみられなかった。しかし、それ以上の相対視標速度になると逸脱頻度は増大しはじめ、相対視標速度 1.0 Hz (眼球運動速度 40°/s) および 1.5 Hz (眼球運動速度 60°/s) となると、その増大は 0.1 Hz の速度条件に比べ有意となった。

単位時間あたり瞬目頻度を Fig.9 に示した。相対視標速度 0.1 Hz の条件に比べ 0.5 Hz の条件までは瞬目頻

Fig. 6. Degree of sinus arrhythmia at the last 1 min compared with the value at the first 1 min.

Fig. 7. Examples of tracking electro-oculogram (EOG) comparing vertical(A) with horizontal(B) movements of the target.

Fig. 8. Frequency of mispursuit of the target moved vertically. As in Fig. 1.

Fig. 9. Frequency of blinking in tracking the target moved vertically. As in Fig. 1.

度に差はみられなかった。しかし相対視標速度が 0.6 Hz (眼球運動速度 24°/s), 1.0 Hz (眼球運動速度 40°/s) および 1.5 Hz (眼球運動速度 60°/s) の条件では有意に減少した。

心拍数変化率を Fig. 10 に示した。相対視標速度の上昇に伴って心拍数変化率は低下の傾向を示したが、統計的に有意ではなかった。

心拍標準偏差の変化率を Fig. 11 に示した。相対視標速度の上昇に伴い一定傾向は認められなかった。

IV. 考 察

視作業には作業対象が静止している場合とそれが移動

Fig. 10. Changes of heart rate at the last 1 min compared with the value at the first 1 min.

Fig. 11. Degree of sinus arrhythmia at the last 1 min compared with the value at the first 1 min.

している場合とがある。本報は移動視標を追視させておこなう作業を想定し、そのモデル実験において視覚生理的限界を得ようとした。

眼球運動は外界視覚刺激に応答する生体制御系の一つであり、その運動には外界視覚刺激と前庭刺激によっておこる滑動性眼球運動、衝動性眼球運動および前庭性眼球運動がある。

滑動性眼球運動は滑らかに移動する視標に眼球を同調させる運動であり、視像を網膜中心窩に一致させる動きである。視覚中枢は網膜上に出現した像と眼球位置との間の誤差を微分して誤差速度を求め橋傍内側網様体に伝達する。橋傍内側網様体では、この信号を積分して眼球位置信号に変換する。このように、滑動性眼球運動は視覚性 feed back に支配されており、追視速度を変化させて像を網膜中心窩に一致させるための修正をおこなっている。しかし、視標速度が更に上昇した場合、滑動性眼球運動系のみによる追視は困難となり、衝動性眼球運

動系が代償的に働いて網膜上の誤差を修正する。すなわち、橋傍内側網様体の眼球位置信号は反対側の眼球運動神経を介して眼筋に伝達され、急速な眼球運動によって眼球位置が修正される。本報では頭部を固定した条件下で眼球運動をみているため、滑動性眼球運動と衝動性眼球運動を観察したことになり、前庭性眼球運動の介入は除外されている。

滑動性眼球運動によって追視できる視標速度は動物の種類によって異なるといわれており、人の場合、正常者の追視可能な水平方向の滑動性眼球運動速度は $60^{\circ}/s$ 程度と考えられている。しかし、時には $130^{\circ}/s$ まで追視可能という報告もある⁴⁾。また、垂直方向の滑動性眼球運動速度はこれより遅く $40^{\circ}/s$ 程度であるといわれている⁵⁾。これらの報告はいずれも視認の可能な限界速度として求められたものである。一方、視作業の負担限界の立場から橋本ら⁶⁾は連続的に追視する場合に $30^{\circ}/s$ が限界であると述べている。

衝動性眼球運動の最大速度は振幅と相関し、耳側方向への動きが鼻側方向の動きに比べて早く、最大値は $600 \sim 1000^{\circ}/s$ にも及ぶといわれる^{7,8)}。馬嶋ら⁹⁾は10歳から79歳までの男女114名について光電素子によって衝動性眼球運動速度の加齢影響を観察している。すなわち、1.4 m 前方に第1眼位を中心にして左右それぞれに 5° および 10° の位置に視標を置き、それをメトロノーム音にあわせて左右視標を交互に注視させ、その際に発生する衝動性眼球運動の速度を被験者の年齢階級別に計測した。その結果、20歳代の被験者の衝動性眼球運動速度は振幅 10° の場合 $351^{\circ}/s$ 、振幅 20° の場合 $468^{\circ}/s$ と最も早く、加齢とともに速度の低下傾向がみられたが統計的に有意な変化ではなかった。この成績を参考にと、本報被験者の年齢は実験1では平均34歳、実験2において平均21歳であり衝動性眼球運動に関して年齢の影響を考慮する必要はないと考えられる。また、実験1と2では被験者が異なるため、本報では視標の水平動と垂直動との両追視を比較することはできなかった。したがって、この点からも両実験の被験者年齢については意味ある差としては取り扱わなかった。

本報で観察した眼球運動には滑動性眼球運動と衝動性眼球運動とが混在している。すなわち、視標の動きに同調して記録紙上に描かれる正弦波形が滑動性眼球運動であり、この正弦波形が乱れた場合に視標速度に対して追視が困難になったと判断できる。一方、追視波形上に出現する基線からの逸脱波形は視標像のずれをすみやかに網膜中心窩でとらえようとする際に生ずる波形であり、したがって視線逸脱頻度の観察は追視誤差を代償する衝動

性眼球運動の頻度を観察したことになる。

視線逸脱頻度は実験1および実験2ともに相対視標速度の上昇によって有意に増大し、視標速度 1.0 Hz 、眼球運動速度として $40^{\circ}/s$ を超えると著しい増大がみられた。また、滑動性眼球運動の波形にも円滑さが失われた。本報でみられた、この追視課題遂行上の支障となる眼球運動速度は橋本らによる限界値 $30^{\circ}/s$ よりやや早く、Young ら⁴⁾のいう $60^{\circ}/s$ より低速であった。また、Feldon ら⁸⁾は滑動性眼球運動速度の最大値は $100^{\circ}/s$ であるが、追視精度を維持できる速度は $30^{\circ}/s$ であるとしている。したがって追視課題の質的な差異が眼球運動の速度に影響することも考えられる。

瞬目には不随意性に繰り返される反射性瞬目と周期性瞬目および随意性瞬目がある。Lehtelä¹⁰⁾は不随意性瞬目の発生は脳興奮性と密接に関連することを報告している。また、瞬目の発生頻度には個人差が大きく、同一人であっても環境要因の違いにより発生頻度に差がみられる。松井ら¹¹⁾は注意力を集中することによって作業当初に瞬目数の有意な減少がおり、時間経過とともに増加することを観察している。また、注意力の低下は一過性に瞬目数を増加させ、群発瞬目を発生する。Lewis¹²⁾は群発瞬目の発生は脳興奮性の低下を示す生体情報の一つであり、その発生は結膜を介した網様体賦活系の求心性刺激になると述べている。本報実験1および実験2ともに瞬目数は視標移動速度の上昇に伴って減少をみている。また、群発瞬目は実験1において視標移動速度の上昇により有意な減少が観察された。すなわち、視標移動速度の上昇が脳の興奮水準を高め緊張状態となっているためと考えられる。

瞬目数の減少傾向は実験1では $12^{\circ}/s$ 、実験2では $24^{\circ}/s$ 以上の眼球運動速度でみられた。この限界速度は視標からの視線逸脱を指標として認めた限界速度 $40^{\circ}/s$ より低値であった。すなわち、視標移動速度がある水準以下では瞬目数が多く、追視の継続に必要な一定水準の脳興奮性に達する以前の課題内容であるといえる。しかし、視標速度がある水準を超えると追視課題そのものが脳興奮性を高め緊張状態となり瞬目数を減少させる。この転換速度が $24^{\circ}/s$ あたりと推定される。さらにそれ以上の視標移動速度となると眼球運動系は滑動性眼球運動のみでは円滑な追視が困難となり、衝動性眼球運動の介入頻度が増大し、その結果、視線逸脱頻度が増大する。その限界速度が $40^{\circ}/s$ と考えることができる。

瞬目の視標移動位置別発生頻度は視標の運動方向が逆転する左右両極で多発した。この両極は視標移動幅の中央部のように視標速度が均一ではなく速度低下のおこる

場所である。しかし一方、視標速度の低下は移動方向転換の予告となり、眼球運動の方向を転換するために緊張を要することになる。したがって、視標移動速度の低下による緊張緩和とそれを trigger にして緊張を喚起するために瞬目が多発したものと思われる。

心拍数は筋活動や精神神経系の負荷によって増大する。そのうち精神神経系の負担は心拍分散の大きさに反映されるといわれる。Lacey ら¹³⁾は精神作業負荷の増大に伴って心拍分散が小さくなり sinus arrhythmia が減少し、筋負荷では増大することを観察している。本報では心拍数変化率および sinus arrhythmia の程度を心拍標準偏差の変化率として検討した。その結果、各視標速度別に一定の傾向を認めることはできなかった。本報モデルにおける視覚課題は循環系自律神経機能に対して影響を与えるものではなかったと考えることができる。したがって、心拍数を指標にした精神作業負荷と瞬目を指標にした緊張状態とは併行しないといえる。

V. 結 語

視標追跡装置（日本電気三栄製 3 G-16）を用いて、被験者に水平方向または垂直方向に往復移動する視標を眼球のみにより7分間追視する課題を負荷した。視標の移動速度を 0.1、0.3 および 0.5 Hz とし、被験者と視標移動幅の視角を 20°、40° および 60° に設定し、追視に伴う眼球運動、瞬目、心拍を観察した。

視角 20°、視標速度 0.1 Hz を基準として相対的視標速度と眼球運動速度を求め、それぞれの生体反応との関係を検討し、次の結果を得た。

1. 水平移動視標または垂直移動視標を追視させた場合、視標からの視線逸脱頻度は相対視標速度の上昇とともに有意に増加した。相対視標速度が 1.0 Hz、眼球運動速度が 40°/s 以上では視線逸脱頻度の増加が著しかった。

2. 瞬目数および群発瞬目数は水平移動視標を追視させた場合には眼球運動速度 12~24°/s、垂直移動視標を

追視させた場合の瞬目数は眼球運動速度 24°/s 以上で減少した。

3. 水平移動視標または垂直移動視標を追視させた場合、心拍数変化率および心拍標準偏差の変化率は相対視標速度の上昇に伴う変化はみられなかった。

以上の成績から眼球運動速度が 12~24°/s 以上の追視課題では緊張状態が高まり、それが 40°/s 以上の追視課題では滑動性眼球運動による追視が困難になることを考察した。

文 献

- 1) 坂本 弘, 本間 寛. 産業衛生における静的疲労の問題. 産業医学 1984; 26: 15-25.
- 2) VDT 作業に関する検討委員会. VDT 作業に関する検討委員会報告. 産業医学 1985; 37: 172-194.
- 3) 労働省. VDT 作業のための労働衛生上の指針. 労働衛生 1986; 27: 11-33.
- 4) Rashbass C. The relationship between saccadic and smooth tracking eye movements. J Physiol 1961; 159: 326-338.
- 5) 山崎篤巳. 眼球運動の定量的分析. 三島濟一ほか編. 眼科 Mook, No. 4. 東京: 金原出版, 1978: 90-101.
- 6) 橋本邦衛, 遠藤敏夫. 生体機能の見かた. 東京: 人間と技術社, 1963: 54-60.
- 7) Bahill AT, Clark MR, Stark L. The main sequence, a tool for studying human eye movements. Math Biosci 1975; 25: 191-204.
- 8) Feldon SE, Burde RA. The oculomotor system. Moses RA, Hart WM Jr, eds. Adler's physiology of the eye. St. Louis: The C.V. Mosby Company, 1987: 122-168.
- 9) 馬嶋 明, 三宅三平, 栗谷 忍, ほか. 衝動性眼球運動の年齢変化について. 日眼会誌 1981; 85: 2103-2107.
- 10) Lehtela J. Differences in eye movement data recorded by electro-oculogram and corneal reflection techniques. Human Factors 1981; 23: 661-665.
- 11) 松井清夫, 坂本 弘, 中邨 重. 照準作業中の瞬目と眼球運動. 三重医学 1978; 23: 29-38.
- 12) Lewis JA. Eye closure as a motor trigger for seizures. Neurology 1972; 22: 1145-1150.
- 13) Hahn WW. Attention and heart rate, a critical appraisal of the hypothesis of Lacey and Lacey. Psychol Bull 1983; 72: 50-70.