

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動*

坂 口 正 範

信州大学医学部耳鼻咽喉科学教室

(主任: 田口 喜一郎教授)

Chronological Effects of Optokinetic Stimulation on the Body's Center of Gravity

Masanori SAKAGUCHI

Department of Otolaryngology, Shinshu University School of Medicine

(Director: Prof. Kiichiro TAGUCHI)

The effects of horizontal and vertical optokinetic stimulation on changes in the center of gravity for balancing the posture were evaluated in four age-groups from children to adults, using an optokinetic stimulator of the Jung type to evoke optokinetic movement of the center of gravity (M. C. G.), a strain-gauge-platform to detect M. C. G., and a technical computer to analyze M. C. G. The results were as follows:

1. In the group aged 8 to 10 years the total length of M. C. G. was larger when subjects were tested with eyes optokinetically stimulated than that with eyes closed. The area of M. C. G. was larger when subjects were tested with eyes optokinetically stimulated than that with eyes open (unstimulated). In adults these visual conditions did not cause significant changes in the total length and the area.
2. The ratio of the anteroposterior component to the lateral component in M. C. G. was significantly larger in children than in adults.
3. As a characteristic of M. C. G. in children, the anteroposterior swaying velocity was larger than the lateral swaying velocity.
4. In the anteroposterior component, averaged divisional frequencies of M. C. G. were significantly larger in children than in adults. However, in the lateral component, averaged divisional frequencies did not differ between the two age-groups.

These results suggest that a characteristic of M. C. G. of children is that it is easily affected by optokinetic stimulation. The swaying velocity toward the anteroposterior direction of M. C. G. in children is larger than that toward the lateral direction. *Shinshu Med. J.*, 37: 17-30, 1989

(Received for publication July 6, 1988)

Key words: movement of the body's center of gravity, optokinetic stimulation, children, chronological changes

重心動揺, 視運動刺激, 小児, 年齢的変動

* 身体動揺の研究 第26報

I 緒 言

視覚刺激が直立起立姿勢にどのような影響を及ぼすかについては Fischer と Veits¹⁾(1928), Vogel²⁾(1931) の報告以来多くの研究³⁾⁻⁶⁾があるが、身体平衡機能を解析する方法として近年重心動揺検査が導入されて以来、これを用いて視覚刺激の及ぼす影響を定量的に解析した報告⁷⁾⁻¹⁴⁾が増加している。これらの研究により視覚刺激が身体動揺の増大をもたらすこと³⁾⁻⁵⁾¹²⁾¹³⁾、視標の移動速度と重心の位置の変化、動揺の大きさの間には一定の関係があること⁶⁾⁷⁾⁹⁾¹²⁾⁻¹⁴⁾、視標の移動方向と重心動揺の増大方向はほぼ一致すること⁸⁾¹²⁾¹³⁾などが明らかにされているが、これらはいずれも成人例についての成績である。

一方小児の身体平衡機能の発達を重心動揺を指標として定量的に評価しようとする研究¹⁵⁾⁻²²⁾も盛んになり、小児では成人に比較して身体動揺がより大きいこと¹⁵⁾⁻²²⁾、直立姿勢保持には視覚制御系の関与が大きいこと²²⁾などが明らかにされているが、視覚刺激の及ぼす影響を定量的かつ詳細に検討した報告はほとんどない。本研究では、視運動刺激下での重心動揺をいくつかの要素に分けて定量的に検討し、小児における身体平衡機能の特徴を明らかにするとともに、各年齢における平衡機能の発達の様子を明らかにすることを目的とした。

II 方 法

A 被検者

過去に耳疾患、めまいの既往がなく、難聴、視力障害、四肢軀幹の運動障害を有さない健康な男女40名を被検者とした。その内訳は8~10歳の小学生10名(男性4名、女性6名)、12~14歳の中学生10名(男性5

名、女性5名)、16~18歳の高校生10名(男性5名、女性5名)、対照として20~28歳の成人10名(男性4名、女性6名)である。以後本文中および図中で年齢群をそれぞれ小学生、中学生、高校生、成人群と表現した。

B 装置

図1に研究装置のブロックダイアグラムを示した。重心動揺計(日本電気三栄1G06型)からの出力はデータレコーダ(TEAC R280)に内蔵されている増幅器を用いて増幅した後、増幅された出力をX軸成分(左右方向)とY軸成分(前後方向)に分け、さらに解析のために on-line でテクニカルコンピュータ(TEAC PS-9000)に入力した。A/D 変換の分解能は12ビット、サンプリング時間は0.05秒であった。

視運動眼振の解発には部屋を暗くし、Jung 型視運動眼振解発装置(第一医科 FS-02 型)を用いた。この装置は半径1mの半円筒型白色スクリーン上に、視覚30°間隔、幅2.5cmの白色光線条を6本投影することができる装置であり、さらに水平方向、垂直方向いずれの視運動眼振も解発できる。眼振の測定には被検者の両側眼窩外側縁および一侧眼窩上下縁に、電極糊をつけた皿状銀電極を絆創膏で固定し、電気眼振計(日本電気三栄124A型)を用いて、水平方向および垂直方向の眼振波形(時定数3秒の眼振原波形と時定数0.03秒の眼振微分波形)を記録した。また眼振原波形は同時にテクニカルコンピュータにも入力し、記録した。

C 測定方法

被検者は図1のように重心動揺計の検出台上に両足内側縁を接して起立し、重心動揺計の前に置かれた視運動眼振解発装置のスクリーン中央を注視するように指示した。測定は被検者が検出台上に起立し、視運動

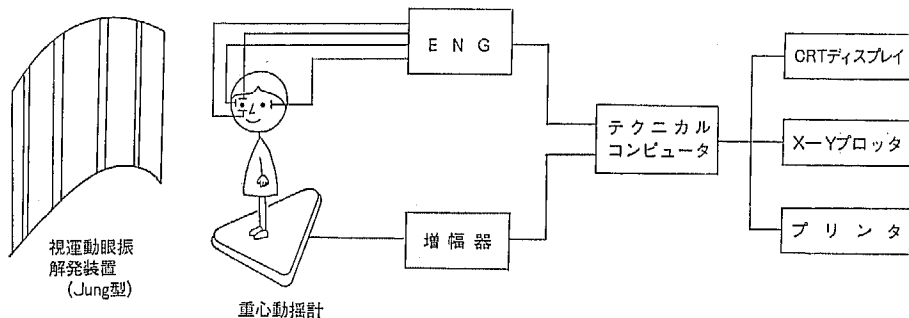


図1 研究装置のブロックダイアグラム

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動

眼振が安定してみられるようになった時点から開始した。視運動刺激は水平方向 $60^\circ/\text{sec}$, $120^\circ/\text{sec}$, 垂直方向 $60^\circ/\text{sec}$, $120^\circ/\text{sec}$ の等角速度刺激を採用し, 検査中被検者には光線条を1つ1つ眼で数えながら追うように指示した。それぞれの被検者における対照としてスクリーン中央の $5 \times 5 \text{ cm}$ 大の黒色の十字標識を注視した時 (以下無刺激時と略す), および閉眼時の重心動揺を測定した。この際の測定開始は検出台上で被検者の重心の動きが安定した時点からとした。重心動揺の記録時間はそれぞれ60秒間とした。測定は無刺激, 閉眼, 視運動刺激の順序に行い, 各視運動刺激の順序は無作為に行った。各刺激の間は被検者を椅子に

坐らせ, 4~5分間休憩させた。なお1回の測定が終了するごとに重心動揺のX軸成分, Y軸成分をCRT画面に表示し, 測定時間内に著しく大きな動揺を認めた場合には再度測定を行った。

D 解析方法

コンピュータに記録されたデータを BASIC 言語で書かれたプログラム (LABO-AID) を用いて, 下記の項目について分析した。なお分析に先立って CRT 画面上に重心動揺記録を X-Y プロットし, 軌跡型の確認を行った。図2に24歳男性, 8歳女性の各視覚条件における重心動揺軌跡型の CRT 表示例を示した。また軌跡の定量比較のために下記の6項目について検

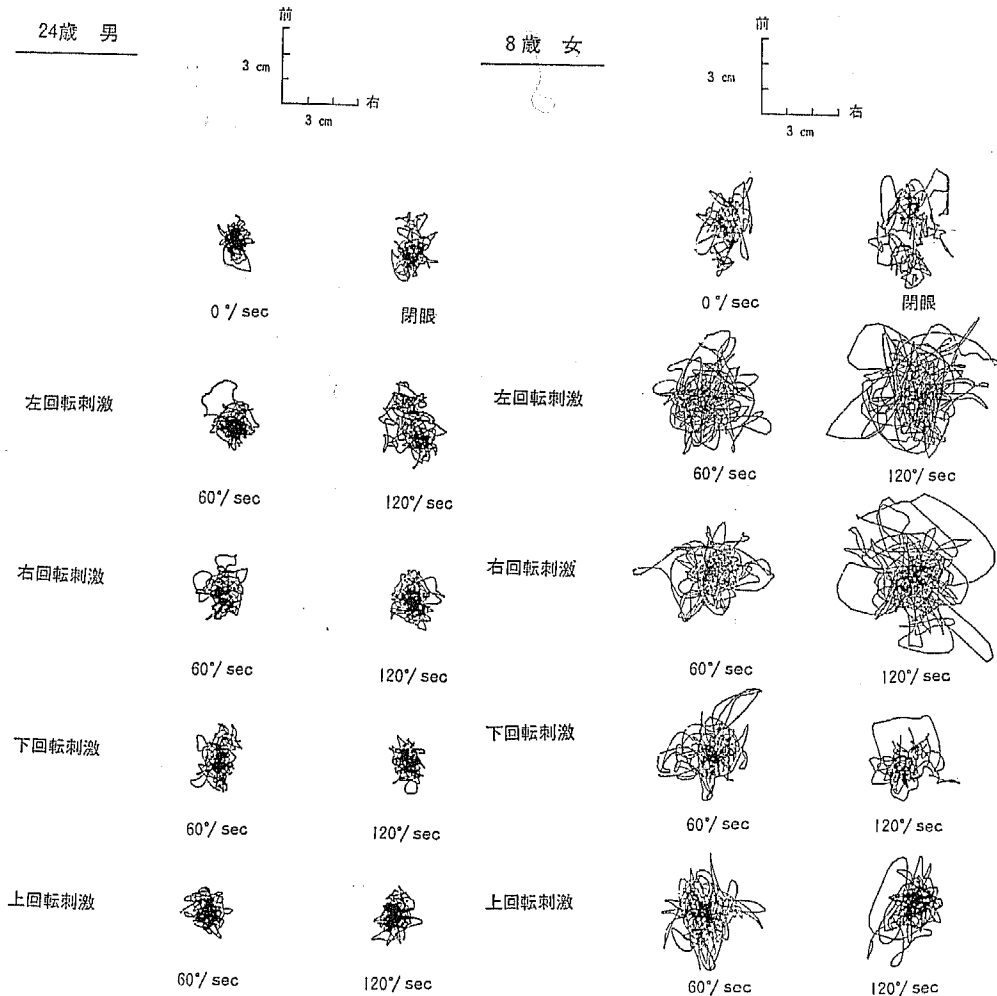


図2 重心動揺軌跡型

左側に24歳男性例, 右側に8歳女性例を示す。
小児例では視運動刺激時の動揺の増大が著明である。

討した。

1 重心動揺軌跡距離

60秒間の重心の移動距離 (L) はX軸成分 (x_i) とY軸成分 (y_i) を基にして下記の式を用いて算出した。

$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$$

2 重心動揺面積

60秒間の重心動揺軌跡図の最大左右径と最大前後径の積を算出し、重心動揺面積とした。

3 重心動揺量のY軸 (y_i)・X軸 (x_i) 成分比

下記の式を用いて算出した。

$$L_Y/L_X = \frac{\sum_{i=1}^n |y_{i+1} - y_i|}{\sum_{i=1}^n |x_{i+1} - x_i|}$$

4 8方向別重心動揺速度

動揺方向を前方、右前方、右方、右後方、後方、左後方、左方、左前方の8つの方向に分け、それぞれの方向別に60秒間の平均速度を求めた。

5 重心動揺周波数

重心動揺のX軸成分とY軸成分の周波数スペクトルを高速フーリエ変換を用いて分析し、下記の式により平均周波数 (F) を算出した。なお周波数分解能は0.0195Hzであった。

$$F = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=a}^b A_n \cdot f_n$$

a ~ b : Fを求めようとする周波数帯域
 A_n · f_n : ある周波数における相対振幅とその周波数との積
 N : a ~ b間の相対頻度

以上の項目について各年齢群ごとに平均値、標準偏差を算出し、t検定を用いて統計学的検討を行い、危険率5%にて有意差があると判定した。

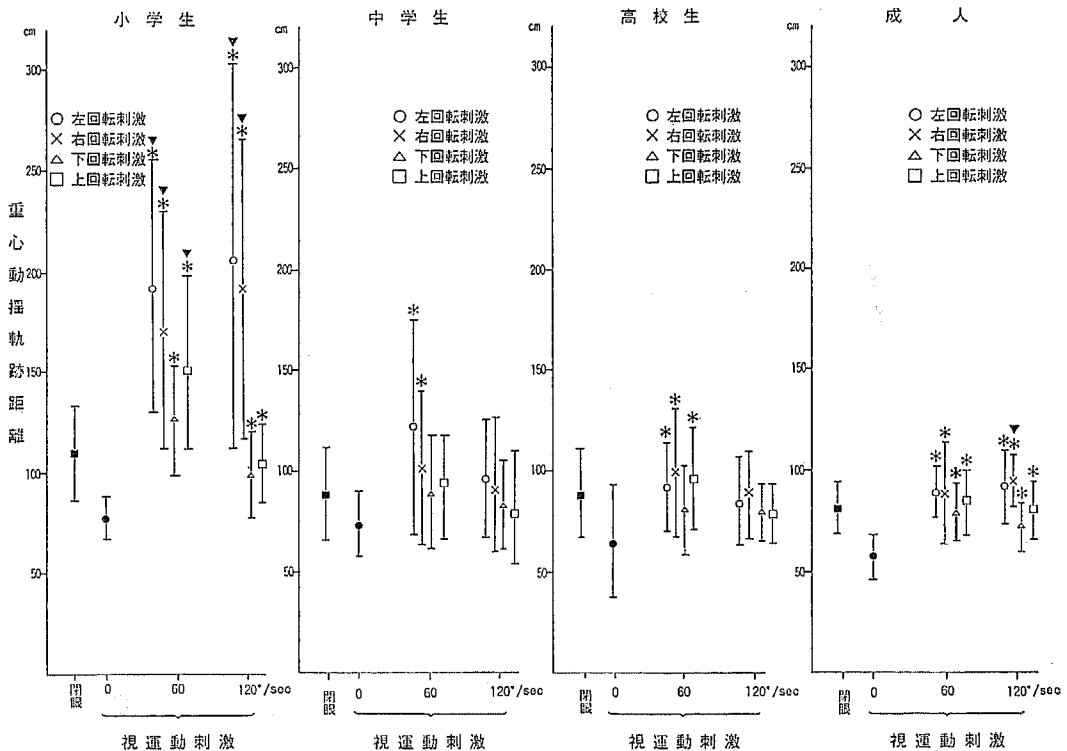


図3 各刺激条件における重心動揺軌跡距離の平均値と標準偏差
 *印は無刺激時 (0°/sec) と比べて有意差 (危険率5%) を認めるもの。
 ▼印は閉眼時と比べて有意差 (危険率5%) を認めるもの。
 小学生群では視運動刺激時の軌跡距離は閉眼時と比べて有意に大きい。

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動

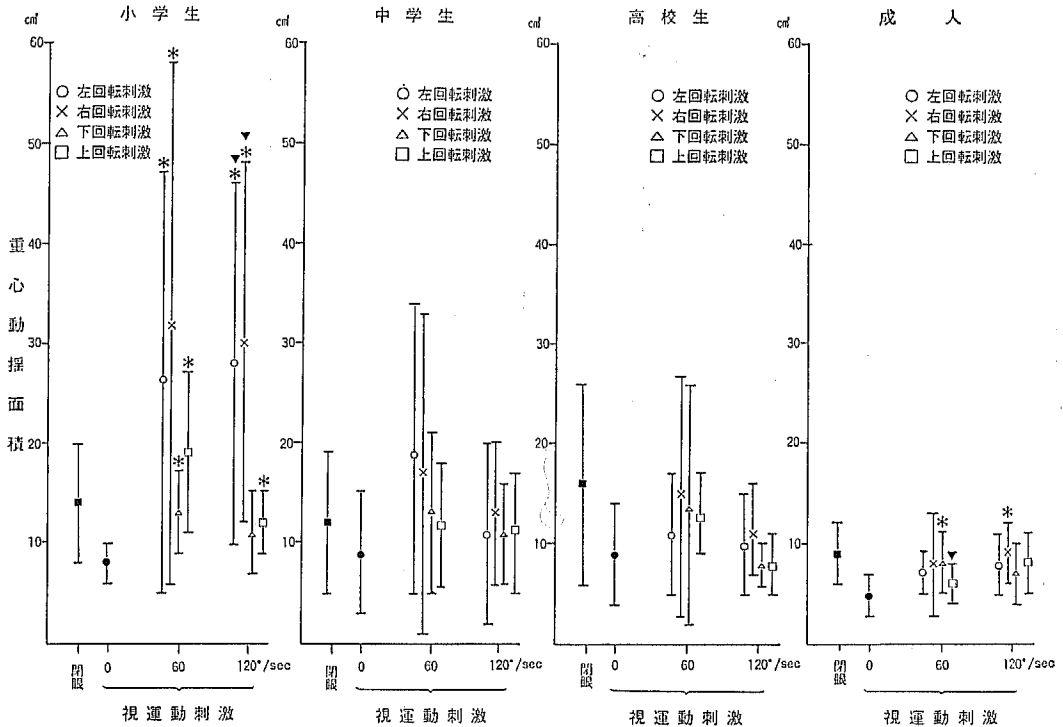


図4 各刺激条件における重心動揺面積の平均値と標準偏差
 *印は無刺激時(0°/sec)と比べて有意差(危険率5%)を認めるもの。
 ▼印は閉眼時と比べて有意差(危険率5%)を認めるもの。
 小学生群では視運動刺激時の動揺面積は無刺激時に比べて有意に大きい。

III 結 果

A 重心動揺軌跡距離

図3に示したように視運動刺激時と無刺激時の重心動揺軌跡距離を比較すると、成人群および小学生群では、いずれの視運動刺激条件においても軌跡距離は無刺激時より有意に大きい値を示した。高校生群では左回転刺激 60°/sec, 右回転刺激 60°/sec, 上回転刺激 60°/sec の条件における軌跡距離が、また中学生群では左回転刺激 60°/sec, 右回転刺激 60°/sec の条件における軌跡距離が、無刺激時に比べて有意に大きい値を示した。

一方視運動刺激時と閉眼時の重心動揺軌跡距離を比較すると、成人群では右回転刺激 120°/sec の場合を除いて、各視運動刺激時と閉眼時の軌跡距離の間に有意差は認められなかった。また高校生、中学生群ではいずれの視運動刺激条件においても閉眼時と有意差は

認められなかった。一方小学生群では水平方向刺激 60°/sec, 120°/sec および上回転刺激 60°/sec の条件における軌跡距離は閉眼時に比べて有意に大きな値を示した。

以上から重心動揺軌跡距離に関しては、中学生以上の年齢群では視運動刺激は閉眼と同程度の動揺増大をもたらすが、一方小学生群では視運動刺激は閉眼に比べてより強い動揺増大効果を有することが示された。

B 重心動揺面積

図4に示したように視運動刺激時と無刺激時の重心動揺面積を比較すると、成人群では下回転刺激 60°/sec, 右回転刺激 120°/sec の場合を除いて各視運動刺激時と無刺激時の動揺面積の間に有意差は認められなかった。また高校生群および中学生群では、いずれの視運動刺激条件においても無刺激時の動揺面積との間に有意差は認められなかった。一方小学生群では、下回転刺激 120°/sec を除くすべての視運動刺激条件に

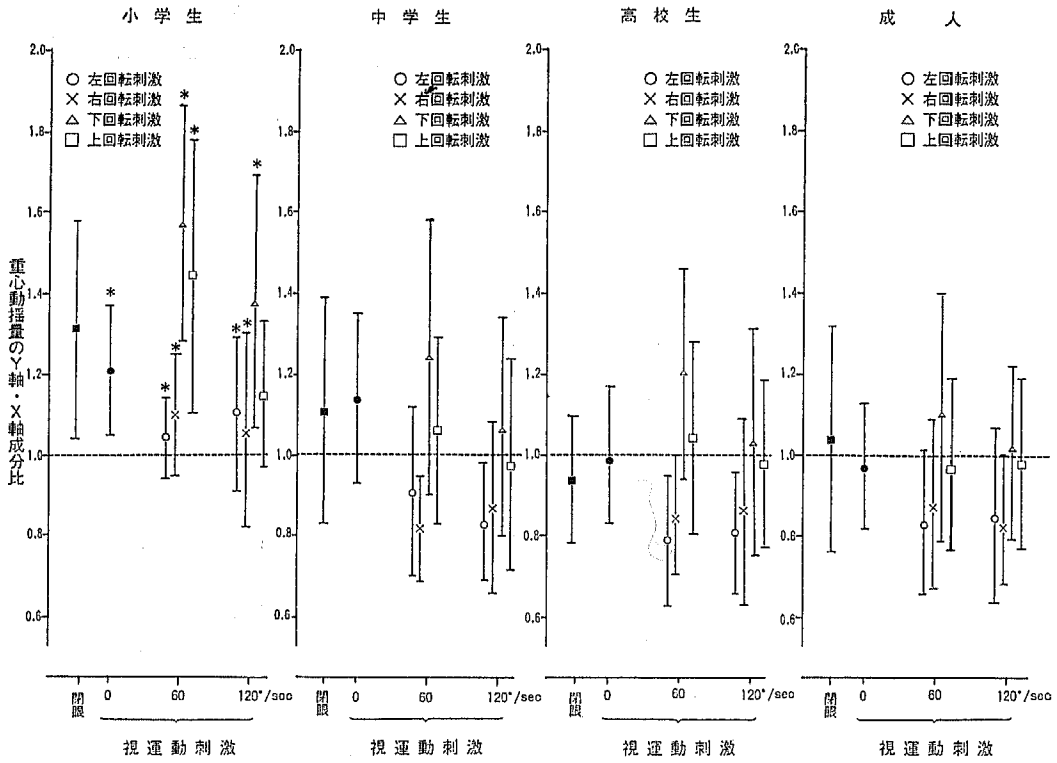


図5 各刺激条件における重心動揺量のY軸・X軸成分比の平均値と標準偏差
 *印は成人群と有意差(危険率5%)を認めるもの。
 小学生群のY軸・X軸成分比は成人群に比べて有意に大きい。

において、動揺面積は無刺激時に比べて有意に大きな値を示した。

以上から重心動揺面積に関しては、小学生群は中学生以上の年齢群に比べて視運動刺激の影響をより強く受けていることが示された。

C 重心動揺量のY軸・X軸成分比

図5に示したように成人群では、無刺激時のY軸・X軸成分比(以下 Y/X と略す)の平均値は0.97であり、水平方向視運動刺激時の Y/X の平均値は0.83~0.88, 垂直方向刺激時の Y/X の平均値は0.97~1.09であった。高校生群および中学生群の Y/X の平均値を成人群の平均値と比較した場合、いずれの視覚条件においても有意差は認められなかった。一方小学生群では無刺激時, 水平方向刺激時および上回転刺激120°/secを除いた垂直方向刺激時の Y/X の平均値はそれぞれ1.21, 1.04~1.10, 1.38~1.57であった。これら小学生群の無刺激時および上回転刺激 120°/secを除いた各視運動刺激時の Y/X の平均値は、成人群の

平均値に比べて有意に大きかった。

以上から小学生群の重心動揺は中学生以上の年齢群に比べて、左右方向よりも前後方向の動揺の割合が大きいことが示された。

D 8方向別重心動揺速度

前方, 右前方, 右方, 右後方, 後方, 左後方, 左方, 左前方の8方向の重心動揺速度の平均値を図6に示した。中学生以上の年齢群では無刺激時, 閉眼時および垂直方向視運動刺激時の重心動揺速度は8方向のいずれへもほぼ等しく, 類円形のパターンを呈し, 水平方向刺激時には左右方向への速度の増大が著しいため横長楕円型のパターンを呈した。一方小学生群においては無刺激時, 閉眼時および垂直方向刺激時の動揺速度は, 前後方向への速度が左右方向への速度よりも大きいため縦長楕円型のパターンを呈し, 水平方向刺激時には両者がほぼ等しくなるため類円型のパターンを呈した。

E 重心動揺周波数

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動

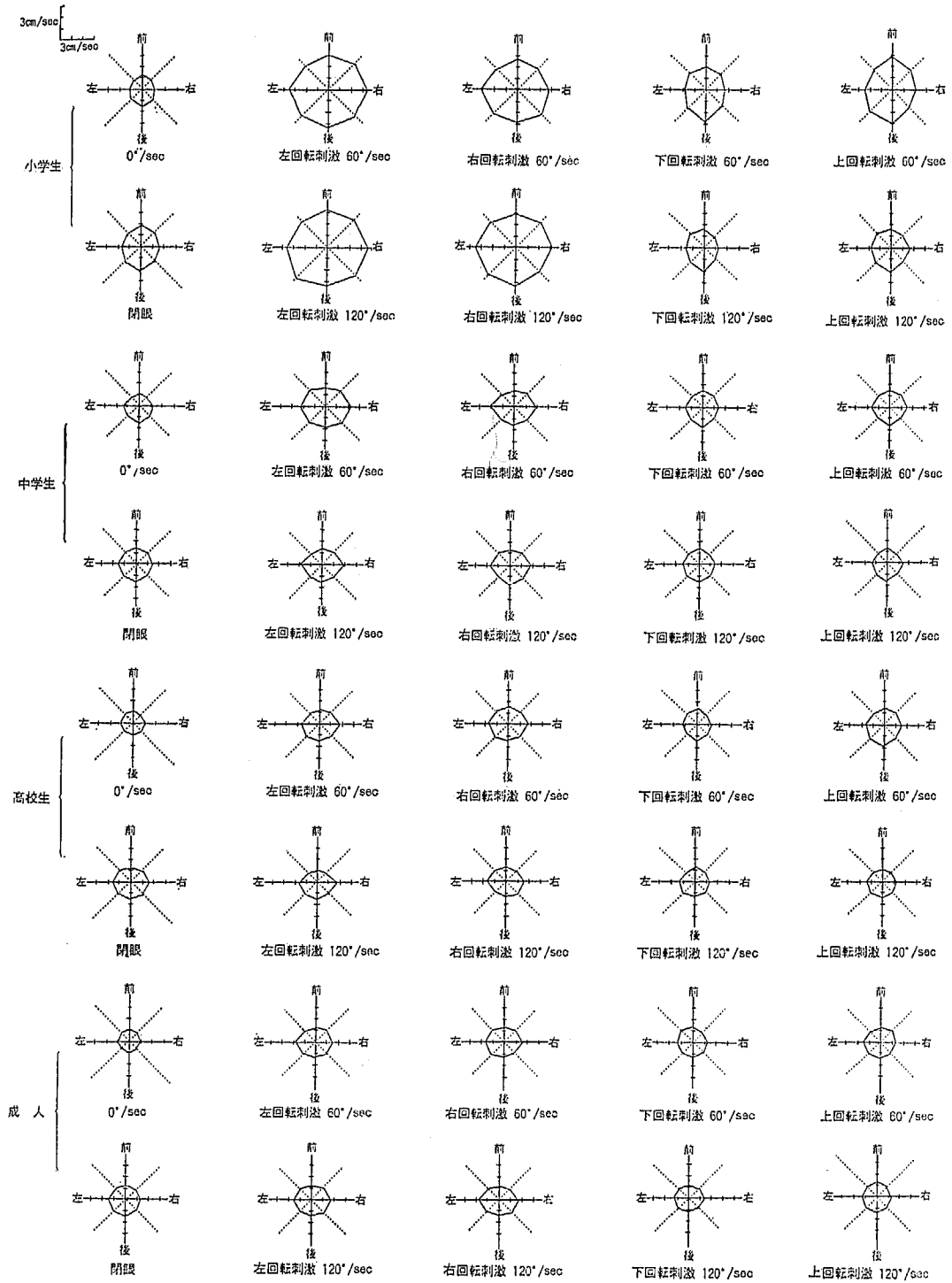


図6 各刺激条件における8方向別重心動揺速度の平均値
小学生群と中学生以上の年齢群では動揺速度のパターンが異なる。

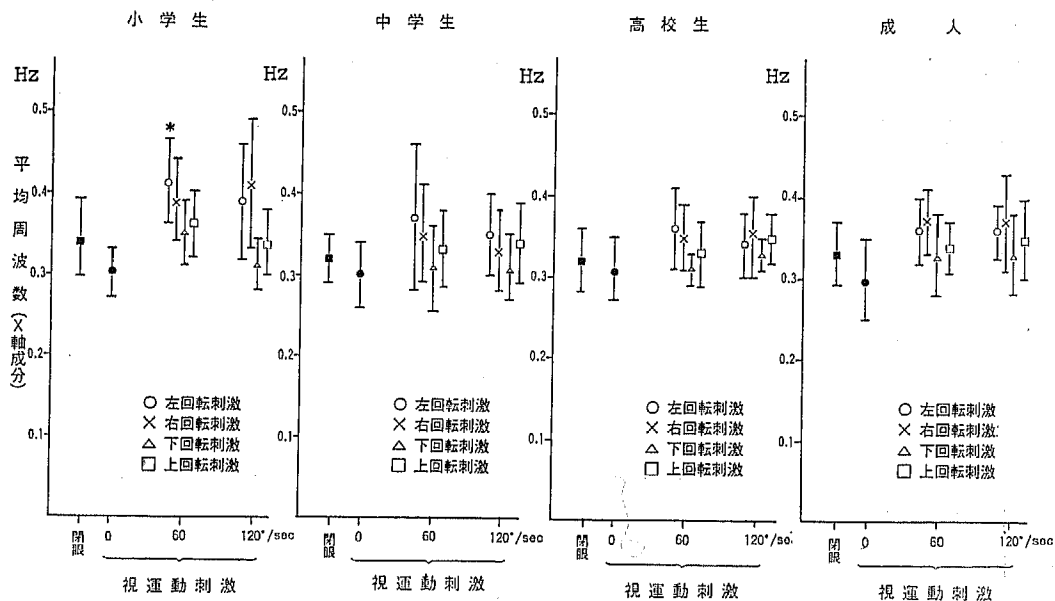


図7 各刺激条件における重心動揺のX軸成分平均周波数(0.0195~1.00Hz)の
 平均値と標準偏差

*印は成人群と有意差(危険率5%)を認めるもの。

小学生群と成人群の間有意差はほとんど認められない。

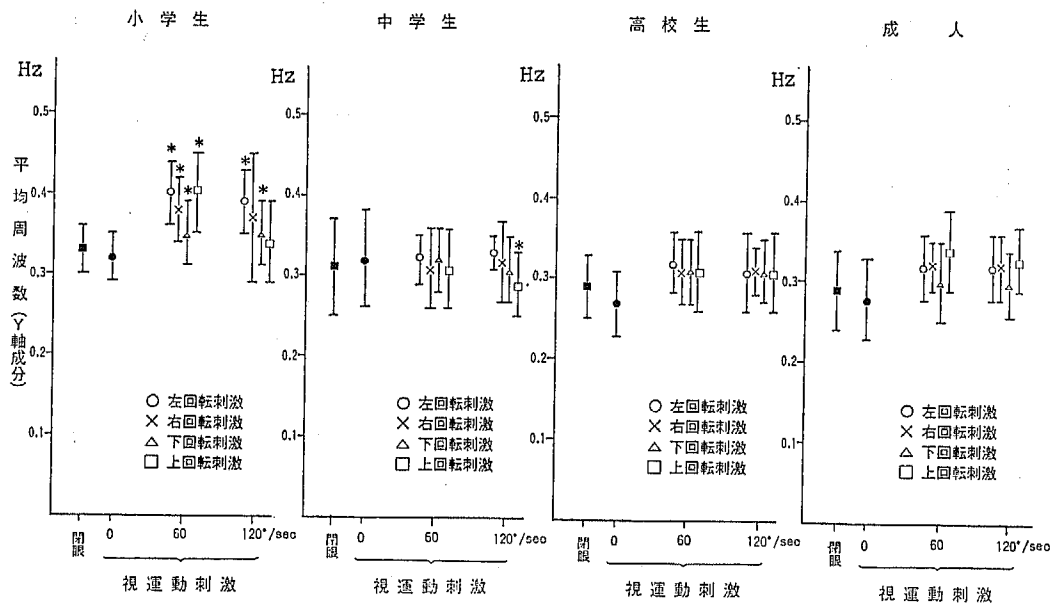


図8 各刺激条件における重心動揺のY軸成分平均周波数(0.0195~1.00Hz)の
 平均値と標準偏差

*印は成人群と有意差(危険率5%)を認めるもの。

小学生群では視運動刺激時の平均周波数は成人群に比べて有意に大きい。

視運動刺激による重心動揺周波数スペクトルの変動の主体をなすのは 1Hz 以下であったので、1Hz 以下の周波数帯域における平均周波数を算出した。

1 X軸成分

各視覚条件における X 軸成分の平均周波数を成人群の平均値と比較した場合、図 7 に示したように高校生群および中学生群ではいずれの視覚条件においても成人群と有意差は認められず、また小学生群においても、左回転刺激 $60^\circ/\text{sec}$ の場合を除いて成人群と有意差を認めなかった。

2 Y軸成分

各視覚条件における Y 軸成分の平均周波数を成人群の平均値と比較した場合、図 8 に示したように高校生群ではいずれの視覚条件においても成人群と有意差は認められず、また中学生群においても、上回転刺激 $120^\circ/\text{sec}$ の場合を除いて成人群と有意差を認めなかった。一方小学生群では右回転刺激 $120^\circ/\text{sec}$ 、上回転刺激 $120^\circ/\text{sec}$ を除く各視運動刺激条件における平均周波数は、成人群に比べて有意に大きな値を示した。

すなわち小学生群における視運動刺激時の平均周波数を成人群と比較した場合、Y 軸成分では有意に大きな値を示す場合が多い一方、X 軸成分ではほとんど有意差が認められなかった。

IV 考 察

A 実験条件の設定

1 視運動刺激条件

身体動揺に及ぼす視覚刺激の影響を検討する際の刺激としては、本研究のごとき視運動刺激のほか、振り子³⁾、発光塗料を塗った木枠⁴⁾⁵⁾や着色パッチを並べた半球形ドーム¹⁰⁾なども用いられている。これらのなかで、本研究で用いられた Jung 型視運動眼振解装置による視運動刺激は他の視覚刺激に比べて、定量的な刺激負荷が可能であり、かつ広範囲の網膜刺激による強い効果を与えることができ、さらに刺激の方向を上下左右の任意の方向に設定できる点で有利と思われる。

一般に視運動眼振解装置を用いた場合、刺激速度が遅く眼振緩徐相速度と一致している間は、眼前を移動する線条がはっきり見え、めまい感が生じないが、刺激速度が速くなり $40\sim 60^\circ/\text{sec}$ を越え、眼が線条の動きに追従できなくなった時、すなわち眼振緩徐相速度が刺激速度よりも遅くなった時にめまい感が発生する²³⁾²⁴⁾。そしてさらに刺激速度が速くなり、線条の動

きが流れとして見えるようになるためめまい感は減ずる²⁵⁾。このように視覚的に誘発されるめまい感（自己回転感）を Dichgans ら²⁶⁾⁻²⁸⁾は circular vection と呼んだ。彼らは視運動刺激速度が $120^\circ/\text{sec}$ までの間は自己回転感に速度に比例して増大するが、それ以上の速度では回転感に一定であったと報告している。この自己回転感（circular vection）は周辺視野刺激によって生じ、網膜中心部のみの視覚刺激では誘発されない²⁶⁾²⁷⁾。視標速度が小さい間は外界像は網膜上に固定されており、外界の認識が正確に保たれるために空間内での正確な定位が可能である一方、速度が速くなると外界像は網膜上を滑り始めるため、被検者は外界の状態を正しく認識することができず、空間内での定位の誤認を生ずる²⁹⁾³⁰⁾。このような機序によって発生するめまい感が circular vection であると考えられている。

視運動刺激に対する眼の適応限界速度（optokinetic adaptation limit：以下 OAL と略す）について、時田ら³¹⁾は水平方向での OAL は $30\sim 65^\circ/\text{sec}$ 、垂直方向での OAL は $15\sim 50^\circ/\text{sec}$ であると報告し、石川³²⁾は水平方向での OAL は $30\sim 40^\circ/\text{sec}$ 、垂直方向での OAL は約 $20^\circ/\text{sec}$ であると報告している。水平方向の OAL に関して、富田³³⁾は $40\sim 60^\circ/\text{sec}$ 、加藤ら³⁴⁾は $60^\circ/\text{sec}$ 、Brandt ら²⁷⁾は $90^\circ/\text{sec}$ と述べている。Hood と Leech³⁰⁾は $100^\circ/\text{sec}$ までは可能であるが、この OAL を得るにはかなりの意識的努力が必要であり、長時間維持することは困難であるとしている。本研究と同一の視運動眼振解装置を用いた石山³⁵⁾の報告での OAL は $60^\circ/\text{sec}$ である。このように眼の適応限界速度は報告者によりかなりのばらつきを認めるが、その原因として OAL の個人差が大きいことに加えて、刺激負荷方法の違い（等角速度刺激か、等角加速度刺激か）や測定方法の違い（用手計測か、コンピュータによる自動計測か）なども一因ではないかと推測される。

以上の報告はいずれも成人例で検討した成績であるが、小児の視運動眼振検査に関する報告はきわめて少ない。竹森と鈴木³⁶⁾は小児の optokinetic pattern test の視標として黒い線条を用いた場合と絵を用いた場合とを比較検討した結果、成人ではこの両者の間に有意差はないが、小児では絵を用いた場合の方が眼振緩徐相速度の上昇は良好であること、さらに 8 歳以上の小児では線条を用いた場合でも成人なみの値を示すことを報告している。また道下³⁷⁾は視運動刺激検査

は3歳以下の幼児では不可能、4歳から9歳では幼児用または小児用ドラムを使用すれば検査することが可能であり、10歳以上では小児用あるいは成人用ドラムで十分検査が施行できると述べている。しかしいずれの報告³⁶⁾³⁷⁾にも小児の適応限界速度については記載されていない。

著者は田口と¹²⁾ Taguchi と Yoda¹³⁾ がすでに報告した視運動眼振解発装置を用いて本研究を行った。本研究を行うにあたり、田口¹²⁾ と Taguchi と Yoda の報告¹³⁾ では視運動刺激速度が $60^\circ/\text{sec}$ の時重心動揺軌跡距離が最大となり、重心の2相性移動が生ずることや、眼の適応限界速度が $60^\circ/\text{sec}$ 付近にあることを考慮して、 $60^\circ/\text{sec}$ の視運動刺激速度を採用した。また適応限界をはるかに超える速度として $120^\circ/\text{sec}$ を採用した。

2 重心動揺のパラメータ

日本平衡神経科学会³⁸⁾は重心動揺検査のパラメータとして前後径、左右径、面積、単位軌跡長、実効値、振幅確率密度分布と標準偏差、パワースペクトラムなどを推薦しているが、現時点では未だ研究者によって千差万別のパラメータが使用されているのが実状である。本研究では、重心動揺の程度(大きさ)を表すパラメータとして軌跡距離と動揺面積を採用し、一方重心動揺の特徴(性質)を表すパラメータとして重心動揺量のY軸・X軸成分比、8方向別速度および平均周波数を採用した。そして前2者のパラメータを用いて、各年齢群ごとに重心動揺に及ぼす視運動刺激の影響の強さについて比較検討を行う一方、後3者のパラメータを用いて小学生、中学生、高校生の各年齢群の重心動揺と成人群の重心動揺の性質の相違について比較検討を行った。なお本研究では、重心動揺面積は最大左右径と最大前後径の積、すなわち矩形面積として計測したが、この矩形面積とプラメータで測定した圍繞面積の間には高い相関関係・回帰関係が認められるので、圍繞面積を矩形面積で代用することは統計的に可能である³⁹⁾とされている。

B 本研究成績の検討

1 重心動揺に及ぼす視運動刺激の影響

小児の起立姿勢保持における視覚制御系の役割を詳細に検討した報告はきわめて少ない。柳田²²⁾は重心動揺軌跡距離、動揺面積、動揺速度などの開眼閉眼差が幼稚園児と小学校低学年児童において大きいことを報告し、小児の直立には視覚からの姿勢制御系の働きが大きいことを示唆している。また Lee ら⁴⁰⁾⁴¹⁾は幼児

の直立において、視覚情報入力に機械的末梢自己受容器からの情報入力よりも大切であることを観察しているが、いずれの報告²²⁾⁴⁰⁾⁴¹⁾でも小児の直立において視覚制御系の関与が大きい理由についての詳細な説明はなされていない。

視覚が年齢を問わず身体平衡の保持に重要な役割をはたしていることは周知の事実である。一方視運動刺激のような過度の視覚刺激が、逆に身体平衡を乱し破綻させること⁴²⁾もよく知られた事実である。本研究では、身体平衡に及ぼす視運動刺激の外乱効果の大きさが、小児の場合と成人の場合で異なることが示唆された。すなわち重心動揺面積に関して、中学生以上の年齢群では視運動刺激時と無刺激時の値の間に有意差が認められない一方、小学生群では視運動刺激時の重心動揺面積は無刺激時に比べて有意に大きい値を示した。この成績は小学生群が中学生以上の年齢群に比べて、視運動刺激の影響をより強く受けていることを示唆しているといえる。さらに重心動揺軌跡距離に関して、中学生以上の年齢群では視運動刺激時と閉眼時の値の間に有意差が認められない一方、小学生群では視運動刺激時の軌跡距離は閉眼時より有意に大きい値を示した。視覚が身体平衡保持に関与する一方で、過度の視覚刺激が平衡を破綻させるという観点からは、閉眼時と視運動刺激時のデータの単純な比較はあまり意味をなさないが、重心動揺軌跡距離に関して、視運動刺激と視覚の遮断(閉眼)のもたらす外乱効果の大きさが、中学生以上の年齢群と小学生群とで異なるという本成績は、小児が成人に比べて視運動刺激の影響を受けやすいことを間接的に支持しているものと考えられよう。

身体平衡保持のために視覚系、前庭系、自己受容器を含めた体性知覚系からの情報入力が必要であることはよく知られているが、これら三系の相互作用に関する研究は未だ十分とはいえない。Dichgans と Brandt²⁶⁾はうさぎの前庭神経核ニューロンにおいて、また Klinke⁴³⁾は金魚の前庭神経において、それぞれのインパルス発射頻度が角加速度刺激(前庭刺激)だけでなく視運動刺激にも反応して変化することを報告している。小高⁴⁴⁾は体性知覚系一視覚系一前庭系の相互作用の数学モデルを考え、これら三系からの入力の合流する速度貯蓄積分機構が前庭神経核に存在すると推察している。一方視覚情報は、視蓋前野を通り下オリブ核の後帽で中継される登上线維系と、視蓋前野を通り橋被蓋網様核で中継される苔状線維系の径路を介して、小脳片葉へ入力され、プルキンエ細胞を介して

小脳片葉からの出力が前庭神経核に抑制を及ぼすことが知られている⁴⁵⁾。視覚情報が前庭脊髄路へ至る神経ルートは未だ十分に解明されていないが、Brandtら⁴⁶⁾は、大脳の視覚領野を経て前庭神経核へ至る皮質ルートと、上丘を介する皮質下ルートを考えており、前述の前庭小脳を介する径路が、この皮質下ルートに関与していると推測することは可能と思われる。このように視覚入力の前庭小脳を介して前庭神経核に作用を及ぼしていることが推測される。柳原⁴⁷⁾は、開眼では直立姿勢に異常が認められない小脳障害患者に視運動刺激を与えた場合、起立が不可能となり転倒することを報告しており、この事実は上記の推論を支持しているように思われる。したがって、小児の神経系の形態学的発達や髄鞘形成が思春期頃に完成すること⁴⁸⁾⁴⁹⁾を考慮すると、小児においては小脳の抑制系の機能が未発達なために、成人に比べて視運動刺激による影響を受けやすいのではないかと推察される。福田⁴²⁾は一流の野球選手に視運動刺激を与えた場合、片脚で起立していても姿勢が崩れなかったという観察から、強い視覚刺激に耐えて身体の平衡を保持できることが、いわゆる“運動神経がすぐれている”ことの客観的証明の1つであると述べているが、この見解は、本研究で得られた成長に伴って視運動刺激による影響を受けにくくなるという成績を解釈する上で、興味深い指摘であると思われる。

2 小児の重心動揺の特徴

成人と比較して小児の重心動揺がより大きいことは、多くの研究者¹⁵⁾⁻²²⁾が報告している。具体的には、重心動揺軌跡距離、重心動揺面積は年齢が増加するにつれて減少し、およそ10歳~15歳で成人値と有意差がなくなるとした報告¹⁷⁾²⁰⁾⁻²²⁾が多い。本研究においても、上記のパラメータに関して各視覚条件ごとに成人群の平均値との有意差検定を行うと、中学生、高校生群ではほとんどの場合で有意差が認められない一方、小学生群では大部分の視覚条件において成人値より有意に大きい値を示すという結果が得られる。この点は諸家の報告に一致するものである。HellebrandtとBraun¹⁵⁾は小児の重心動揺が大きい理由として、1) 神経の髄鞘化がまだ完成しておらず、神経学的に発達が不十分であること、2) 下肢の発育が不十分で重心が相対的に高い位置にあること、3) 抗重力筋の発育が不十分で、筋力が弱いこと、4) 精神的に落ち着きがないことなどを考慮している。しかしながら、従来の報告は小児と成人の重心動揺の大きさの相違を研究の

主眼にしたものが多く、重心動揺の性質の相違について検討した報告は少ない。

本研究においては重心動揺量のY軸・X軸成分比、8方向別速度および平均周波数のパラメータを用いて、小児と成人の重心動揺の質的差異を検討した。その結果、Y軸・X軸成分比、8方向別速度の成績から、小児の重心動揺の特徴として左右方向より前後方向の動揺の大きいことが示唆された。山元²¹⁾は重心動揺の前後径、左右径の比から、また柳田²²⁾は動揺速度の分析から、それぞれ小児では左右動揺より前後動揺が大きいという結論を得ているが、著者の成績もこれに一致する。

また重心動揺周波数に関して、成人を対象にした分析では、重心動揺の周波数スペクトルの主成分は0~1 Hzの周波数帯域にあり、視覚の影響による周波数の変動は主としてこの帯域に発生するという報告⁵⁰⁾⁻⁵³⁾が多いが、本研究でも周波数スペクトルの主体は各年齢群とも0~1 Hzの帯域に認められた。そこで1 Hz以下の周波数帯域における平均周波数⁵⁰⁾を算出して比較検討した結果、Y軸成分では小児は成人に比べて平均周波数が有意に大きい値を示す一方、X軸成分に関しては成人と有意差が認められないという成績が得られた。重心動揺が周期運動であるか否かについては議論があるが¹²⁾、平均周波数を目安として重心の動揺周期が速いか遅いかを推定することは、ある程度可能ではないかと考えられる。この観点から本研究成績を検討すると、小児は成人に比べて前後方向の動揺が速いといえる。このような結果は、重心動揺速度の成績から得られた結果と一致するものと考えられる。

小児の重心動揺が左右方向より前後方向に大きい理由として柳田²²⁾は、解剖学的構造上ヒトの脊柱、股関節、膝関節、足関節が前後方向に可動性が大きいことを挙げているが、両足内側縁を接した閉足位で重心動揺の測定を行っていることも前後動揺が大きくなる原因の1つではないかと推測される。さらに身体発育に伴う姿勢の変化、重心の位置の変化なども、何らかの形で重心動揺の質的变化に関与している可能性があるように思われる。たとえば腰椎の前彎は生後3年目から出現し、8年で著明となり、10年で成人と同様になるとされている⁵⁴⁾。また重心の位置は、乳幼児期には剣状突起と臍部の中間の高さにあり、5~6歳では臍部にあり、13歳頃には恥骨結合の高さにあるとされている⁵⁵⁾。成人に比べて小児の重心の位置がより高位にあることは物理的に不安定であり、起立姿勢における

身体動揺の増大をもたらすことが予想され、これが重心動揺速度と平均周波数の増大に反映されていると推測される。しかしながら福田⁴⁾が指摘しているように、ヒトの重心は動物（たとえば亀など）に比べてより高位にあり、物理的に不安定であるがゆえに運動性が大きいともいえる。すなわち重力により倒れる物理的運動と、これに拮抗する抗重力的な筋運動によって機敏な運動が遂行されるという見方も成り立つ。もちろんこの見解をそのまま静止時の起立姿勢に適用することは困難ではあるが、このような観点から本研究成績を検討すると、小児において前後方向の重心動揺速度と平均周波数が大きいことは、必ずしも前後方向に不安定であることを意味せず、視運動刺激という外乱に対して、前後方向のすばやい反応により身体のバランスを保っていると考えられることも可能である。したがって小児が前後方向に不安定であると解釈するか、あるいは前後方向で姿勢制御のバランスを保っていると解釈するかについては、今後の詳細な研究を必要とする点と考えられる。またその過程で重心動揺速度と動揺周波数の生理学的意義についても、さらに詳細に検討していく必要があるといえる。

V 結 語

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動と、小児の重心動揺の特徴を明らかにするために、小学生、中学生、高校生、成人各10名ずつについて、無刺激時、閉眼時、視運動刺激時（水平方向、垂直方向、60°/sec、120°/sec）の重心動揺を測定し、次の結果を得た。

A 小学生群では視運動刺激時の重心動揺軌跡距離

は閉眼時より有意に大きい値を示す一方、中学生以上の年齢群では視運動刺激時と閉眼時の軌跡距離の間に有意差を認めなかった。

B 小学生群では視運動刺激時の重心動揺面積は無刺激時より有意に大きい値を示す一方、中学生以上の年齢群では視運動刺激時と無刺激時の動揺面積の間に有意差を認めなかった。

C 小学生群の重心動揺量のY軸・X軸成分比は成人群に比べて有意に大きい値を示した。

D 視運動刺激時の8方向別重心動揺速度のパターンは小学生群と中学生以上の年齢群で異なり、小学生群では前後方向の動揺速度の大きいことが特徴的であった。

E 小学生群の重心動揺周波数（平均周波数）を成人群と比較した場合、X軸成分では有意差が認められない一方、Y軸成分では小学生群の平均周波数は成人群に比べて有意に大きい値を示した。

F 以上から小児は成人に比べて視運動刺激の影響を受けやすいこと、および前後動揺が左右動揺よりも大きいことが示唆された。

稿を終えるにあたり御指導、御校閲を賜りました恩師山口喜一郎教授に深甚なる謝意を捧げます。また研究に助言、協力をいただきました宮下善和先生はじめ耳鼻咽喉科学教室の諸先生方に深謝致します。快く御協力を賜りました松本市立旭町小学校、松本市立旭町中学校、長野県立美須ヶヶ丘高等学校の皆様にも厚く御礼申し上げます。

文 献

- 1) Fischer, M.H. und Veits, C. : Über optokinetisch ausgelöste Körperreflexe beim Menschen. Pflügers Arch, 219 : 579-587, 1928
- 2) Vogel, P. : Über optokinetische Reaktionsbewegungen und Scheinbewegungen. Pflügers Arch, 228 : 632-643, 1931
- 3) Edwards, A.S. : Body sway and vision. J Exp Psychol, 36 : 526-535, 1946
- 4) Wapner, S. and Witkin, H.A. : The role of visual factors in the maintenance of body-balance. Am J Psychol, 63 : 385-408, 1950
- 5) Witkin, H.A. and Wapner, S. : Visual factors in the maintenance of upright posture. Am J Psychol, 63 : 31-50, 1950
- 6) 桑鶴正子 : 動く物を見る場合の姿勢の動揺について。久留米医学会雑誌, 23 : 584-595, 1960
- 7) 三好豊二 : 視機刺激の重心動揺に及ぼす影響——重心偏位の2相性について——。耳鼻臨床, 61 : 1620-1641, 1968
- 8) De Wit, G. : Optic versus vestibular and proprioceptive impulses, measured by posturometry. Agressologie, 13, B : 75-79, 1972

視運動刺激に対する重心動揺の年齢的変動

- 9) Gantchev, G.N., Draganova, N. and Dunev, S. : The role of visual information and ocular movements for the maintenance of body equilibrium. *Agressologie*, 13, B : 55-61, 1972
- 10) Dichgans, J., Mauritz, K.H., Allum, J.H.J. and Brandt, T. : Postural sway in normals and atactic patients : Analysis of the stabilizing and destabilizing effects of vision. *Agressologie*, 17, C : 15-24, 1976
- 11) Kapteyn, T.S. and Bles, W. : Circular vection and human posture III. Relation between the reactions to various stimuli. *Agressologie*, 18, 6 : 335-339, 1977
- 12) 田口喜一郎 : 視運動刺激の重心動揺におよぼす影響——正常者の成績——. *耳鼻*, 26 : 182-191, 1980
- 13) Taguchi, K. and Yoda, M. : Effects of optokinetic stimulation on the center of gravity during standing. *Auris Nasus Larynx*, 7 : 19-29, 1980
- 14) Kikukawa, M. and Taguchi, K. : The movements of the head and the body's center of gravity while eye tracking. *Agressologie*, 24, 2 : 75-76, 1983
- 15) Hellebrandt, F.A. and Braun, G.L. : The influence of sex and age on the postural sway of man. *Am J Phys Anthropol*, 24 : 347-360, 1939
- 16) 宇野良二 : 平衡機能の年齢的変遷に関する研究——加速度計による身体動揺の観察——. *耳鼻臨床*, 56 : 68-86, 1963
- 17) Hirasawa, Y. : Study on human standing ability. *Agressologie*, 14, C : 37-44, 1973
- 18) 小島幸枝, 竹森節子 : 小児の身体平衡の発達について——正常小児, 起立位を中心に——. *耳鼻臨床*, 73 : 865-871, 1980
- 19) 小山吉明, 藤原勝夫, 池上晴夫 : 幼児の立位姿勢における身体動揺. *姿勢研究*, 2 : 79-85, 1982
- 20) 平林千春, 田口喜一郎 : 小児の発育に伴う重心動揺の定量的変動. *Equilibrium Res*, 44 : 252-256, 1985
- 21) 山元 暁 : 正常児および脳性麻痺児における立位重心動揺の研究. *岐阜大医紀*, 33 : 822-849, 1985
- 22) 柳田三洋子 : 小児のめまい平衡障害に関する研究——第二編 健常小児の重心動揺——. *Equilibrium Res*, 45 : 332-344, 1986
- 23) 時田 喬 : 視器, 迷路, 自己受容器, 意志運動の協働より見たニスタグムスの生理. *耳鼻臨床*, 54 : 613-620, 1961
- 24) 時田 喬, 青木 茂, 青木 守, 田代和彦, 中村 丘, 菱田 健, 渡辺忠彦 : 実験的めまいと平衡失調——めまいの客観化に必要な検査について——. *日耳鼻*, 68 : 837-844, 1965
- 25) 時田 喬 : めまい平衡障害へのアプローチ——耳鼻咽喉科の立場より——. 祖父江逸郎, 時田 喬(編), めまい・平衡障害, 第1版, pp.61-80, メディカルリサーチセンター, 東京, 1985
- 26) Dichgans, J. and Brandt, T. : Visual-vestibular interaction and motion perception. *Bibl Ophthalmol*, 82 : 327-338, 1972
- 27) Brandt, T., Dichgans, J. and Koenig, E. : Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Exp Brain Res*, 16 : 476-491, 1973
- 28) Dichgans, J. and Brandt, T. : Optokinetic motion sickness and pseudo-coriolis effects induced by moving visual stimuli. *Acta Otolaryngol*, 76 : 339-348, 1973
- 29) 三好豊二 : 体平衡と各種視運動性刺激の関係. *耳鼻臨床*, 76 : 538-547, 1983
- 30) Hood, J.D. and Leech, J. : The significance of peripheral vision in the perception of movement. *Acta Otolaryngol*, 77 : 72-79, 1974
- 31) 時田 喬, 宮田英雄, 藤垣 照, 永田隆郎, 小林 武, 加藤祐峰, 鈴木智雄, 田口拓雄, 島田六郎, 日比孝也 : 視機性眼振異常とその解釈. *耳鼻臨床*, 62 : 923-953, 1969
- 32) 石川和光 : 水平・垂直性視機性眼振検査の臨床的研究. *日耳鼻*, 73 : 1329-1349, 1970
- 33) 富田 翼 : 定量的視運動性眼振検査法の研究. *耳鼻臨床*, 70 : 1281-1337, 1977
- 34) 加藤 功, 金山亮治, 中村 正, 長谷川智彦, 五十嵐敬彦, 石川 誠 : Step 刺激による視運動性眼振の意義. *耳鼻臨床*, 補2 : 46-56, 1986
- 35) 石山哲也 : 中枢性平衡障害例における聴性脳幹反応と視運動性眼振の診断的意義. *日耳鼻*, 90 : 1087-1099, 1987
- 36) 竹森節子, 鈴木淳一 : 小児における視運動性眼振検査. *耳喉*, 43 : 3-10, 1971

- 37) 道下和美：小児の平衡機能検査法。耳鼻臨床，64：1056-1060，1971
- 38) 日本平衡神経科学会：重心動揺検査の基準。Equilibrium Res, 42：367-369，1983
- 39) 伊保清子，阿部勇勝，笹原絹代，浅野和江，斉藤 彰，竹内義夫，徳増厚二：ヒト直立時重心動揺記録図の圍繞面積と矩形面積との相関。Equilibrium Res, 44：171-175，1985
- 40) Lee, D. N. and Lishman, J. R. : Visual proprioceptive control of stance. Journal of Human Movement Studies, 1 : 87-95, 1975
- 41) Lee, D. N. and Aronson, E. : Visual proprioceptive control of standing in human infants. Perception and Psychophysics, 15 : 529-532, 1974
- 42) 福田 精：運動と平衡の反射生理。第2版，pp.72-211，医学書院，東京，1981
- 43) Klinke, R. : Efferent influence on the vestibular organ during active movements of the body. Pflügers Arch, 318 : 325-332, 1970
- 44) 小高修司，渡辺 勲，Bles, W : 小脳虫部欠損症例における somatosensory 系—視覚系—前庭系の相互作用について。脳神経，36 : 1083-1088，1984
- 45) 篠田義一：眼球運動の生理学。小松崎 篤，篠田義一，丸尾敏夫(編)，眼球運動の神経学，第1版，pp.1-147，医学書院，東京，1985
- 46) Brandt, T., Paulus, W. and Straube, A. : Vision and posture. In : Bles, W. and Brandt, T. (ed.), Disorder of posture and gait, pp.157-175, Elsevier, Amsterdam, 1986
- 47) 柳原亮一：視性運動失調ならびに視性眩暈の研究。耳鼻臨床，45：47-59，1952
- 48) 有馬正高：神経系の形態発達。馬場一雄(編)，成長の形態学，第1版，pp.202-221，医学書院，東京，1967
- 49) 前川喜平：乳幼児の神経と発達の診かた。第2版，pp.9-11，新興医学出版，東京，1987
- 50) 田口喜一郎，飯島美千穂，滝沢正臣：重心動揺の周波数分析——周波数スペクトルと平均周波数——。耳鼻臨床，70：825-831，1977
- 51) 羽柴基之，向井 研，三宅彰英，林 良一，渡辺 悟：人の立位重心動揺のパワースペクトルの定常性についての検討。Equilibrium Res, 41 : 83-89, 1982
- 52) 中田英雄：重心動揺からみた視覚障害者の直立姿勢保持能力。姿勢研究，2 : 41-48, 1982
- 53) 瀧口哲也：重心動揺検査の総合的評価に関する研究——パーソナルコンピュータによる解析システムの開発——。耳展，29，補3 : 217-240, 1986
- 54) Kapandji, I. A. : 関節の生理学Ⅲ，体幹・脊柱。荻島秀男，嶋田智明(訳)，pp.10-11，医歯薬出版，東京，1986
- 55) 中村仁吉，嶋田龍二：生体観察。馬場一雄(編)，成長の形態学，第1版，pp.66-68，医学書院，東京，1967

(63. 7. 6 受稿)