

# 床振動時の姿勢制御の自動化に伴う眼球と手指の運動制御の変化

著者	外山 寛
著者別表示	Toyama Hiroshi
雑誌名	平成13(2001)年度 科学研究費補助金 基盤研究(C) 研究成果報告書
巻	2000-2001
ページ	58p.
発行年	2002-03
URL	<a href="http://doi.org/10.24517/00057002">http://doi.org/10.24517/00057002</a>



KAKEN  
2001  
82

# 床振動時の姿勢制御の自動化に伴う眼球と 手指の運動制御の変化

(課題番号：12680020)

平成12年度～平成13年度科学研究費補助金 【(基盤研究(C)(2))】

研究成果報告書

平成14年3月

研究代表者 外山 寛

(金沢大学大学院医学系研究科)

著 者 寄 贈

## はしがき

立位での動的姿勢制御能は、歩行をはじめとするヒトの多くの運動の根幹をなしている。学習による姿勢制御の向上の特性として、制御の自動化があげられよう。日常生活やスポーツ活動においては、姿勢制御を行いながら視覚情報の処理や上肢などで様々な運動を並行していることも多々ある。その場合の姿勢制御が自動化することの機能的意味として、それらの並行処理制御を容易にすることが考えられる。姿勢制御と他の運動を並行する際には、並行する運動が反射性と随意性の高い運動では、並行処理制御の様相は異なると考えられる。藤原(1982, 1984, 1985)は、0.5 Hzの床振動を繰り返し負荷することで動的姿勢制御において重要となる予測制御能の差異を明確に把握できることを明らかにした。さらに、成人が床振動を開眼で練習した場合には開眼だけでなく閉眼での床振動に対する動的姿勢制御も大きく向上するのに対して、閉眼での練習では閉眼のみの動的姿勢制御に向上を認めている。この結果は、動的姿勢制御の中心が視覚系を含む上位中枢から体性感覚系の強く関与する比較的下位の中枢に移行することを示唆しており、学習による予測制御能の向上に加えて動的姿勢制御の自動化があると推察される。一方、外山と藤原(1990, 1994, 1997)は、運動制御の自動化水準が2つの運動制御を並行処理する場合に生じる干渉程度によって把握できることを明らかにした。その一連の研究では、上肢の運動制御の自動化水準が下肢に比べて低く、かつ運動内容による差異が示された。これらの知見からは、動的姿勢制御と並行する他の運動制御との干渉程度を分析することによって、学習による動的姿勢制御の自動化の様相を定量化でき、かつ並行する反射性と随意性のより高い運動に

対する動的姿勢制御の自動化の影響の違いが明らかにできるものと考えられる。

そこで、本研究では次の2つの検討課題を設定した。(1)床振動時に眼球運動を並行処理する課題を用い、床振動を反復した場合の動的姿勢と眼球の運動制御の変化を検討する。眼球運動には衝動性眼球運動と滑動性眼球運動を採用する。(2)床振動時に手指運動を並行処理する課題を用い、床振動を反復した場合の動的姿勢と手指の運動制御の変化を検討する。手指運動はstep状と低速でramp状に移動する視標のトラッキングとする。

#### 研究組織

研究代表者 : 外山 寛  
(金沢大学大学院医学系研究科運動生体管理学)  
助教授

研究分担者 : 藤原勝夫  
(金沢大学大学院医学系研究科運動生体管理学)  
教授

#### 交付決定額 (配分額)

(金額単位: 千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成12年度	1,900	0	1,900
平成13年度	800	0	800
総計	2,700	0	2,700

## 研究発表

(1) 学会誌等

未発表

(2) 口頭発表

(外山 寛、藤原勝夫、国田賢治、床振動時の動的  
姿勢制御の自動化に伴う眼球運動制御の変化、  
第56回日本体力医学会、平成13年9月20日)

(3) 出版物

なし

## 目 次

要約	-----	1
緒言	-----	3
実験1	-----	7
方法	-----	7
被験者	-----	7
装 置	-----	8
実験手順	-----	9
データ処理	-----	9
統計処理	-----	10
結果	-----	17
実験2	-----	25
方法	-----	25
被験者	-----	25
装 置	-----	25
実験手順	-----	26
データ処理	-----	27
統計処理	-----	27
結果	-----	30
考察	-----	38
文献	-----	43

# 要約

## 要約

床振動を負荷された経験のない健常大学生を対象に、床振動時の姿勢制御の自動化に伴う眼球と手指の運動制御の変化を検討した。眼球と手指の運動は、反応型（それぞれ、サッケード群：9名、反応群：10名）と追従型（それぞれ、スムーズ群：10名、追従群：10名）とした。

床振動は振幅 2.5cm、周波数 0.5Hz での sin 波状の前後移動とした。被験者にはゴーグル型ディスプレイを装着し、標的を提示した。眼球運動は ENG 法で、手指運動は直線型ポテンシオメータを左右方向に操作することによる電圧変化で把握した。追従群では、その電圧変化で左右に移動する追従光源をディスプレイに提示した。標的は 20 度の視角で水平に移動させ、反応型では 2-4 秒の任意の間隔で step 状に、追従型では周波数 0.3Hz で sin 波状に行った。

眼球運動ないし手指運動の練習の後、振動台に装着した床反力計上で立位での眼球運動ないし手指運動のみの測定を行い（control）、その後床振動を 11 回負荷した（各 1 分）。第 1 と第 11 試行では眼球ないし手指の運動を並行した。足圧中心動揺の平均速度、反応時間（サッケード群、反応群）、標的と眼球位置（スムーズ群）ないし追従光源位置（追従群）との相互相関係数を算出した。

足圧中心動揺の平均速度は、全ての群において初期の試行で大きく減少し、第 6-10 試行では低い値を維持した。サッケード群以外では、第 11 試行での平均速度が第 10 試行に比べて有意に増加した。また、追従群でのその増加は反応群に比べて有意に大き



かった。眼球運動の成績は、スムーズ群においてのみ第1試行が control と第11試行に比べて有意に低かった。手指運動では同様の結果が反応群と追従群に認められた。

これらは、姿勢制御の自動化に伴い眼球および手指の運動の並行制御能が向上するが、随意性の強い運動では姿勢制御との干渉が大きいことを示すものと考えられた。

# 緒 言

## 緒言

Jackson<sup>13)</sup> は、随意運動の調節様式の違いについて、初めて階層概念を取り入れて説明した。すなわち、運動を1つの連続体に例えた場合、両端を随意的な運動 least automatic movement と自動的な運動 most automatic movement と表現し、多くの運動がその中間に位置して両者の性質を合わせ持っていると述べている。そして、随意的な運動は脳皮質などの上位中枢に強く依存し、自動的な運動は皮質下の下位中枢に強く依存すると考えられている。日常生活やスポーツ活動においては、複数の運動を並行していることがあり、その場合には意識の関与が少ない自動化された運動が必要であるといわれている。自動化は、習熟による随意運動の調節様式の変化を捉えた概念であり、以下のようにまとめられている。すなわち、自動化とは、運動を繰り返すことによって運動制御に強く関与する中枢が上位から下位に移行し、運動遂行に対する意識の程度が減少することである。自動化された運動には以下のような特徴があるとされている。(1)運動の遂行時間が短い<sup>23)</sup>、(2)繰り返し行う場合の運動の軌道や運動遂行に要する時間の変動が小さい<sup>1)</sup>、(3)同時に行う他の身体部位の運動との干渉が小さい<sup>3)</sup>。この中で、(3)の現象は、運動調節における中枢神経系の階層概念に対応したものと考えられ、自動化によって運動調節に強く関与する中枢が上位から下位へ移行することで達成されるものと考えられている<sup>18)</sup>。外山は、上肢と下肢の機能分化に焦点を当てて、両者の運動間の干渉度を指標に用いて、上肢運動と下肢運動の自動化水準の差異について検討している。上肢または下肢の周期運動時に他肢の一過性運動を挿入した場合の干渉度は、周期的下肢運動時に一過性の上肢運動を挿入した場合の

方が小さく、下肢運動の自動化水準は上肢のものに比べて高いことを明らかにした<sup>19-22)</sup>。このほか、上肢ないし下肢の左右同時運動を行う場合の両運動間の干渉度を指標として、自動化の様相を検討した研究も行われてきた<sup>10, 16, 17, 24)</sup>。

運動の制御について検討するとき、立位姿勢の自動化の様相を明らかにすることは重要であると考えられる<sup>2, 15)</sup>。なぜならば、立位姿勢がヒト特有のものであり、ヒトの運動様式を大きく規定していると思われるからである<sup>11)</sup>。これは姿勢制御が種々の運動を行う場合に並行して行われていることを意味するものである。しかし、姿勢制御と他の身体部位の運動を組み合わせ、姿勢制御の自動化の様相について検討した報告は少ない。これまでに、立位で運動を行う場合の姿勢制御、つまり立位での動的姿勢制御を行うためには、姿勢の変化を予測し調節する機能（予測的姿勢制御）が重要な役割を果たしていると考えられている。立位での動的姿勢制御能を評価するための外乱刺激として、種々のものが報告されている。藤原<sup>4-7)</sup>は、床の前後方向の水平周期振動（以下、床振動とする）を外乱刺激として用いた一連の研究において、足圧中心動揺の平均移動速度を指標として動的姿勢制御能を評価し得ること、および学習による姿勢制御の自動化水準の向上について短時間に定量化し得ることを報告している。特に0.5 Hzの床振動では動的姿勢制御の学習が顕著に進むことが示されている。床振動時の姿勢制御が早期に学習される背景には、予測しやすい周期運動が繰り返し負荷されること、床振動時の姿勢制御において日常で多用している姿勢制御機構を使用し得ることが挙げられている。

複数の運動を並行する場合に、中枢神経系の階層性に着目すると、並行する運動が反射性の強い運動と随意性の強い運動では、並行制

御の様相は異なると推察される。そこで本研究では、制御特性が明らかに異なる運動を動的姿勢制御と並行して行う場合に、動的姿勢制御の自動化がなされる前と後で、並行制御の様相にどのような変化が生じるかについて検討した。動的姿勢制御能を評価するために、その学習過程が明らかにされている床振動法を用いた。並行制御する運動としては、実験1では眼球運動を用い、実験2では手指運動を用いた。眼球運動では、衝動性眼球運動と滑動性眼球運動を取り上げた（それぞれに当てた被験者群をサッケード群、スムーズ群とする）。衝動性眼球運動は、反射性の強い運動であり、下位中枢を中心にして制御されるとされている<sup>14)</sup>。一方、滑動性眼球運動は、随意性の強い運動であり、上位中枢を中心にして制御されるとされている。また手指運動では、一過性の反応動作と周期的追従動作を取り上げた（それぞれに当てた被験者群を反応群、追従群とする）。後者の手指運動は前者に比べて随意性の強い運動と推察される。眼球運動と手指運動のいずれにおいても随意性の強い制御を要する課題の方が、動的姿勢制御の学習が進む以前の段階での両運動間の干渉度は大きいですが、動的姿勢制御の学習が進んだ段階では、眼球運動ないし手指運動への干渉は減少すると推察される。

本研究では、以下の作業仮説を設定した。

実験1では、(1) 反射性の強い衝動性眼球運動と動的姿勢制御を並行する場合、動的姿勢制御が自動化されていない段階から衝動性眼球運動への干渉は起こらず、動的姿勢制御の自動化は衝動性眼球運動の制御に影響を及ぼさない。(2) 随意性の強い滑動性眼球運動と動的姿勢制御を並行する場合、動的姿勢制御が自動化されていない段階では滑動性眼球運動への干渉が起こるが、動的姿勢制御が自動化された段階では滑動性眼球運動への干渉は減少する。

実験2では(1)手指による一過性の反応動作と周期的追従動作を並行する場合、動的姿勢制御が自動化されていない段階から一過性の反応動作への干渉は起こらず、動的姿勢制御の自動化は一過性の反応動作の制御に影響を及ぼさない。(2)周期的追従動作と動的姿勢制御を並行する場合、動的姿勢制御が自動化されていない段階では周期的追従動作への干渉が起こるが、動的姿勢制御が自動化された段階では周期的追従動作への干渉は減少する。

# 実 験 1

## 方 法

## 実験 1

### 方法

#### 被験者

被験者は、眼球による視標追従運動の内容ごとに、サッケード群（9名）とスムーズ群（10名）に分けた。彼らは、過去に床振動刺激を負荷されたことがない健康な大学生であり、実験の主旨について説明を受け、同意して参加した。両群の身体特性を表 1 に示した。年齢、身長、体重のいずれの項目においても、被験者群間に有意な差は認められなかった。

#### 装置

全ての測定は、振動台（電子制御グループ、PW0198）に固定した床反力計（パテラ、S110型）の上で立位で行った。床反力計は、3つの load-cell で構成されたものであり、床振動時の前後方向の足圧中心動揺を検出するために用いた。振動台は正弦波状に周波数 0.5 Hz、前後方向に振幅 2.5 cm で振動させた。振動台の位置は直線型ポテンシオメーター（縁測器、LP10）で検出し、その出力信号を周波数カウンター（ADVANTEST Co.Ltd.、TR-5822）に入力し、振動周波数を設定した。

眼球による視標追従運動を行うための視標は、パーソナルコンピュータ画面上の円（直径 1 cm）とした（図 1）。視標は、多機能シンセサイザ（NF、wave factory WF1945）の出力電圧で移動させた。サッケード群では、視標を 2.0～4.0 秒の任意の時間間隔で左右各 10° の視角位置に交互に水平移動させて、衝動性眼球運動を行わせ



た。スムーズ群では、視標を最大視角が左右各  $10^{\circ}$  となるように 0.3 Hz の正弦波にて水平移動させて滑動性眼球運動を行わせた。いずれの視標の動きも任意波形作成ソフト (NF、0105) で波形を作成し、多機能シンセサイザの出力を設定し、視標提示ソフト (エレクトロデザイン社、F-monitor) を用いてコンピューター画面に提示した。その画面をズームを最小に設定したビデオカメラ (SONY、CCD-VX1) を用いて、画面から 44 cm (画面からビデオカメラのズームレバー前端まで) の距離から撮影し、被験者に装着させたゴーグル型ディスプレイ (OLYMPUS、eye-trek) に提示した。ゴーグル型ディスプレイを介した視角が視標を直視した場合と同じである (左右各  $10^{\circ}$ ) ことを、眼振図法を用いて確認した。また測定では、外界からの視覚情報を完全に遮断するために、ゴーグル型ディスプレイを布で覆った。

水平方向の眼球運動の記録には、眼振図法を用いた。表面電極は、前頭部中央 (基準電極とした) と左右両眼の外側端に取り付けた。電極の入力抵抗は  $10\text{K}\Omega$  以下にした。電極からの信号は、DC 増幅器 (日本光電、AN-601G) を介して増幅した ( $\times 2000$ )。安定した眼振図を得るために、電極を取り付けてからデータ記録を開始するまでの時間間隔を 20 分以上とした。

後の分析のために、ポテンシオメータ、床反力計、多機能シンセサイザの出力及び、眼振図を、A/D 変換器 (Contec、AD12-16U (PCI)E) を介して、サンプリング周波数 1 KHz、分解能 12 ビットでパーソナルコンピューター (iiyama、M533MS) に取り込んだ。

## 実験手順

実験手順を図 2 に、測定状況を図 3 に示した。

測定開始前に、椅座位姿勢で、1 分間の眼球による視標追従運動を、3 回練習させた。被験者が視標追従運動に十分慣れたことを確認してから、測定を開始した。

被験者には、手を体側に軽く付け、意図的な膝や腰の屈曲をできるだけ避け、リラックスした立位姿勢を保持するように指示した。最初に、安静立位姿勢で、眼球による視標追従運動を1 分間行わせた（これをコントロール試行とする）。次に、床振動時に立位姿勢を保持する試行を11 回繰り返した。1 試行は1 分間とし、試行間に1 分間の休憩を設けた。視標追従運動は第1 試行と第11 試行で負荷した。視標の移動は、床振動開始5 秒後から始めた。第2 試行～第10 試行は閉眼条件下で行った。サッケード群には、可能な限り速やかに視標の移動を追従するように指示した。スムーズ群には、可能な限り正確に視標の移動を追従するよう指示した。

## データ処理

眼球による視標追従運動能と、床振動時の足圧中心動揺の平均移動速度を分析した。代表的な記録波形を図4 に示した。

分析は、床振動開始10 秒後から50 秒間のデータを対象に行った。床振動時の足圧中心動揺の前後方向の平均速度は、サンプリング周波数を20Hz に変換した後、5 点の移動平均法を用いて算出した。これらの計算はExcel97 (Microsoft Corp.) で作成したプログラムを用いて行った。平均速度値には以下の式にて身長補正を行った。

$$\text{補正值} = \text{実測値} \times 160 / \text{身長 (cm)}$$

眼球による視標追従運動能は、サッケード群では、視標移動に対する眼球運動の開始遅延時間で評価した。1 試行全てのデータの平均値  $\pm 2SD$  を越える値は不採用とし、平均値を算出し、被験者の

代表値として用いた。スムーズ群では、視標の移動を制御する多機能シンセサイザの出力と眼振図に 10 Hz のローパスフィルターをかけた後に、視標移動と眼球運動との相互相関係数を算出した。瞬きのある場合には、瞬きから 300 ms 間のデータを不採用とした。

これらの分析には、多用途生体信号解析プログラム BIMTAS® II (KISSEI Comtec Co. Ltd.) を用いた。

### 統計処理

サッケード群、スムーズ群における視標追従運動能及び足圧中心動揺の平均速度の試行間の差異は、二元配置分散分析（繰り返しなし）を用いて検討した。分散分析の結果示された差異は、Fisher's PLSD による多重比較検定を用いて詳細に検討した。なお、スムーズ群における視標移動と眼球運動との相互相関係数は、 $z$  スコアに変換してから検定を行なった。同一試行における平均速度の被験者群間の差異は student-t テストを用いて検討した。特定の 2 試行間の平均速度の差異は paired-t テスト（片側検定）を用いて検討した。有意水準はすべて  $p < 0.05$  とした。これらの統計は Excel97 (Microsoft Corp.) に加えた Statcel (OMS Co. Ltd.) を用いて行なった。

**表1 被験者の身体特性**

		年齢(歳)	身長(cm)	体重(Kg)
サッカー群 (n=9)	平均値	19.3	167.1	61.7
	標準偏差	1.4	10.3	8.8
スムーズ群 (n=10)	平均値	20.5	165.7	58.1
	標準偏差	3.4	8.5	11.2

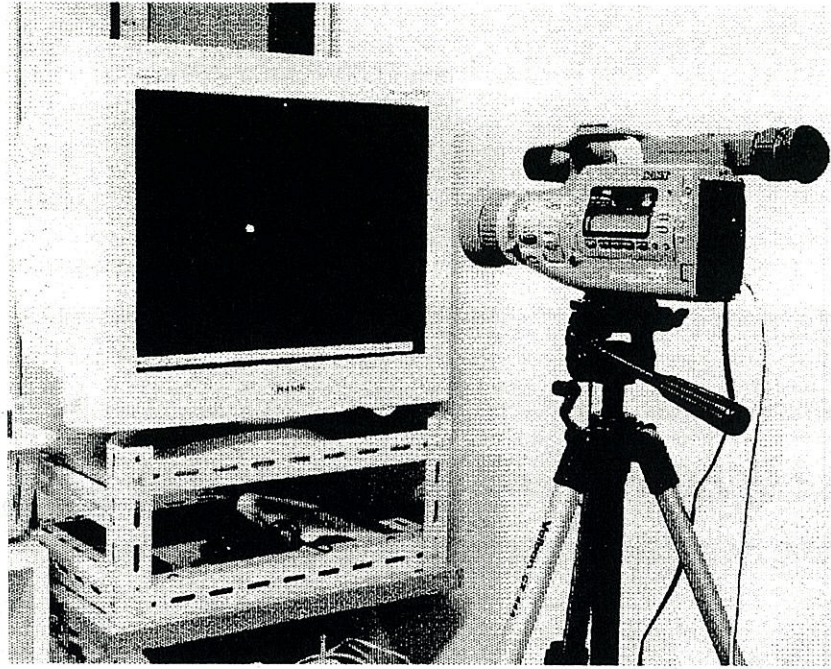


図1 視標

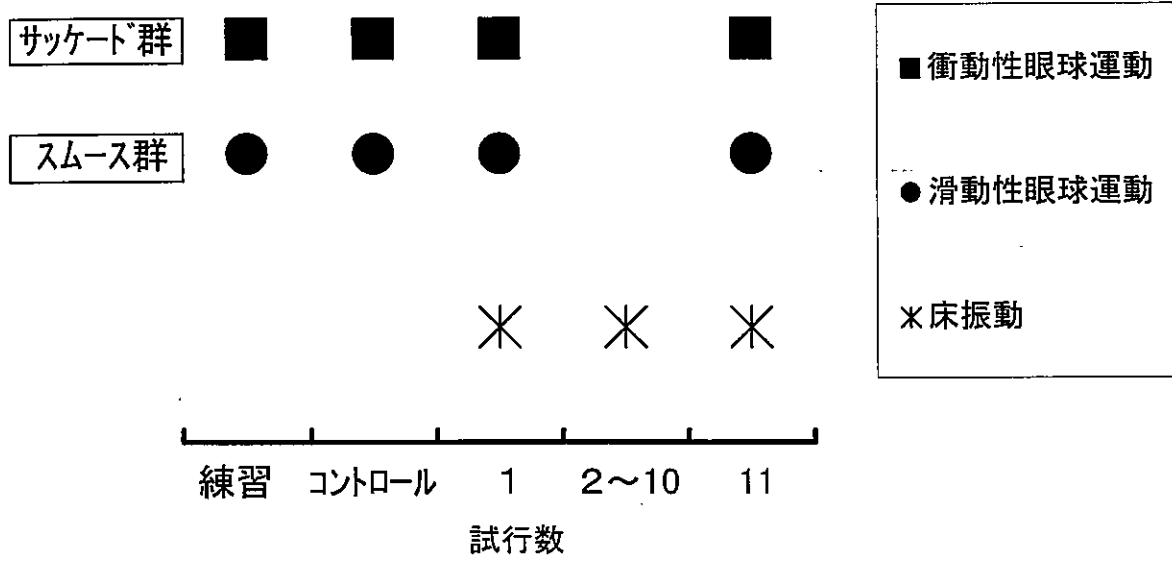


図2 実験プロトコル



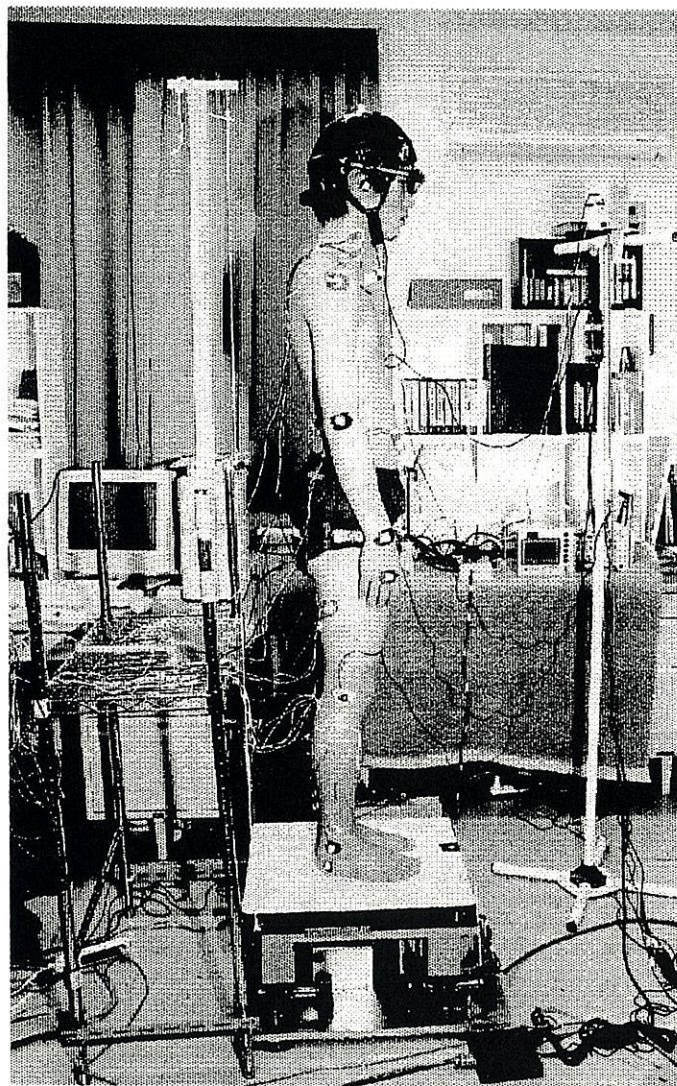


図3 測定状況

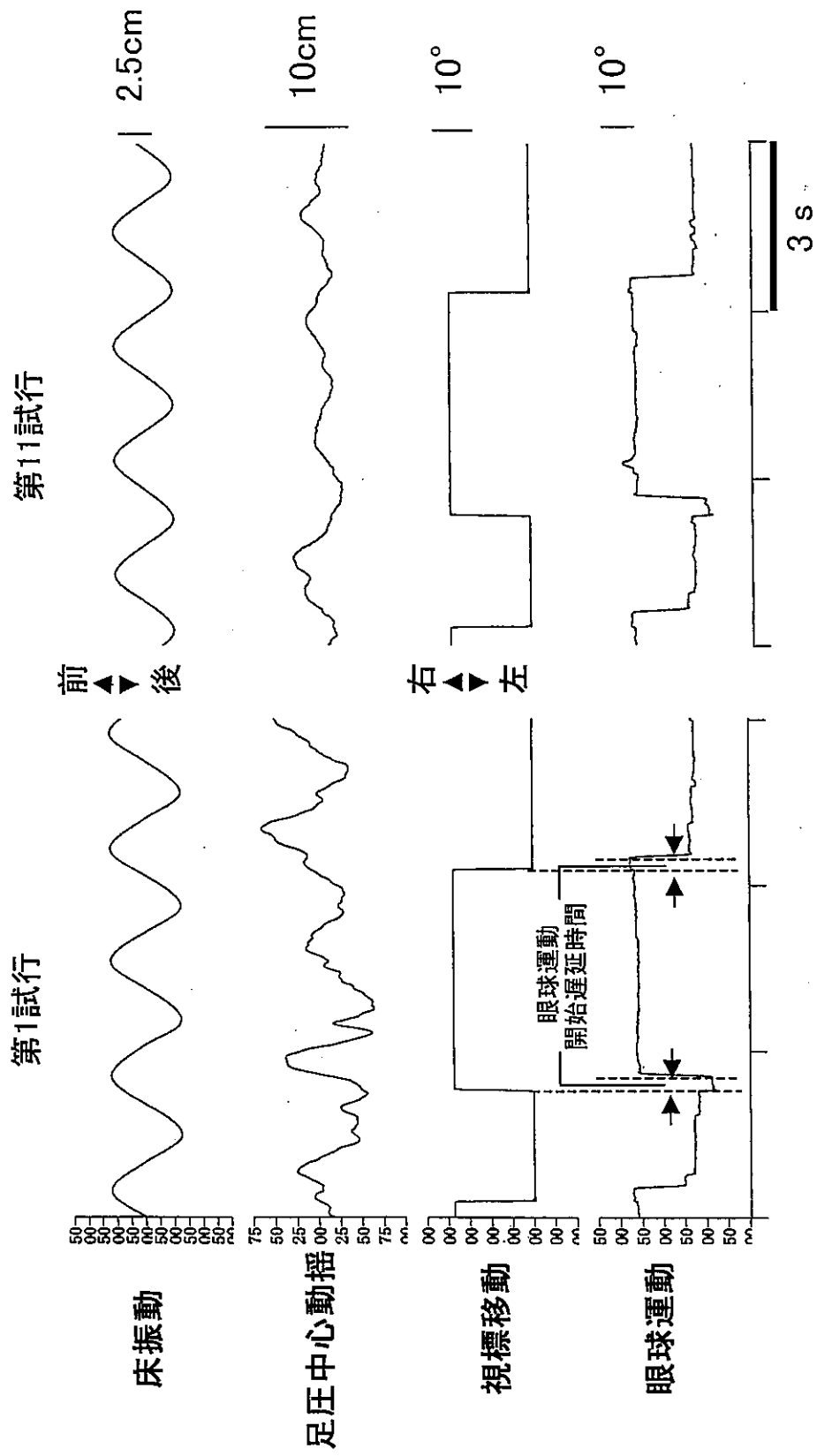


図4a 床振動と眼球運動(サッカーダブ群)



第11試行

第1試行

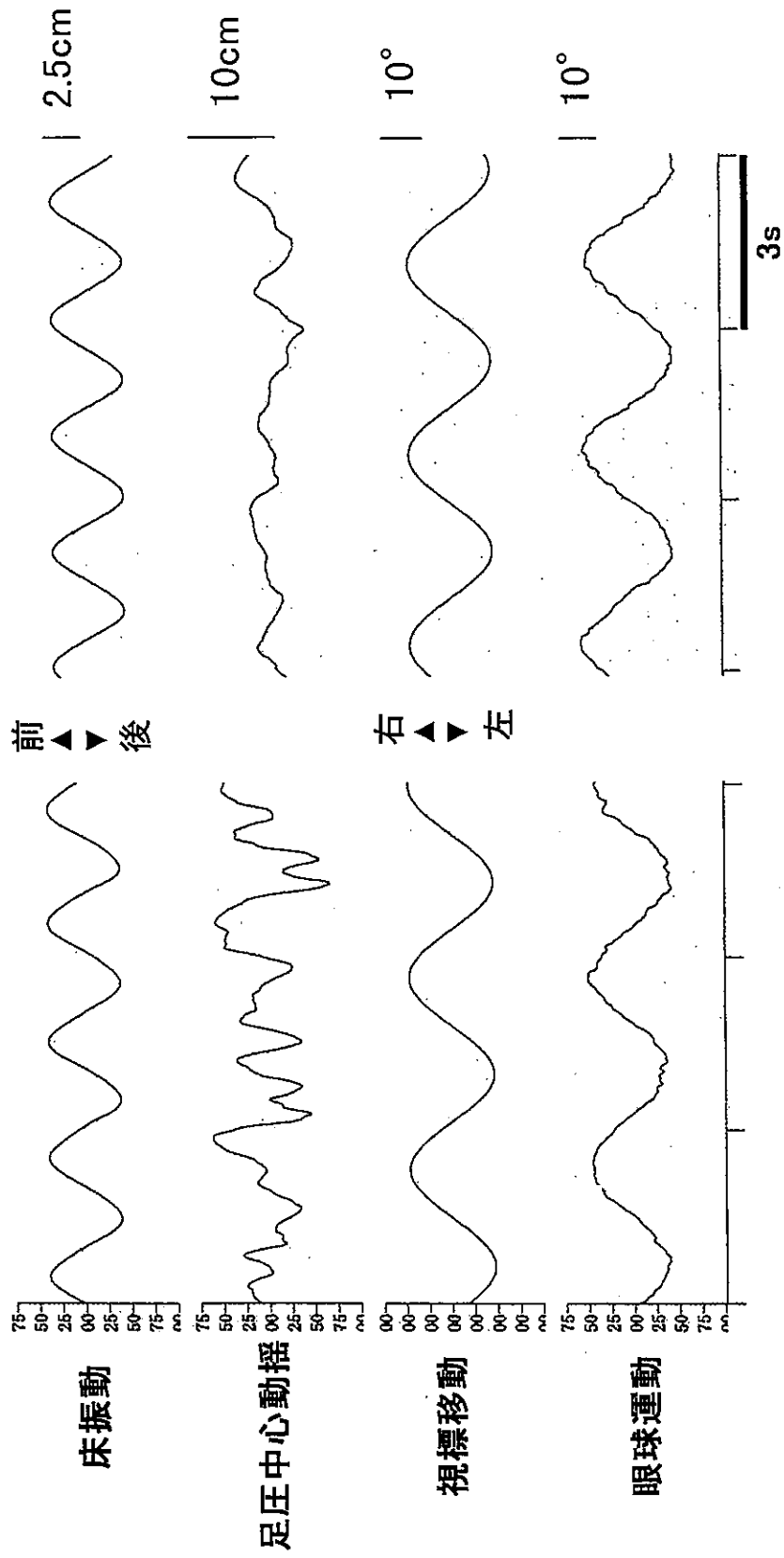


図4b 床振動と眼球運動(スムーズ群)

# 実 験 1

## 結 果

## 結果

### 眼球による視標追従運動

サッケード群における眼球運動開始遅延時間を表 2、図 5 に示した。コントロール試行、第 1 試行および第 11 試行の平均値と標準偏差は、それぞれ  $235.9 \pm 21.3$  ms、 $234.0 \pm 13.8$  ms、 $244.1 \pm 27.0$  ms であり、試行間に有意差は認められなかった。

スムーズ群における視標移動と眼球運動との相互相関係数およびその  $z$  スコアを表 3、図 6 に示した。コントロール試行、第 1 試行、第 11 試行の相互相関係数 ( $z$  スコア) の平均値と標準偏差は、それぞれ  $0.992 \pm 0.212$  ( $2.744 \pm 0.215$ )、 $0.988 \pm 0.181$  ( $2.553 \pm 0.183$ )、 $0.992 \pm 0.183$  ( $2.780 \pm 0.185$ ) であった。 $z$  スコアには試行による有意差が認められ ( $F_{2,29}=27.64$ ,  $p<0.05$ )、第 1 試行の値は、コントロール試行と第 11 試行の値に比べて有意に低かった ( $p<0.05$ )。コントロール試行と第 11 試行との間には有意差が認められなかった。

### 動的姿勢制御

足圧中心動揺の平均速度の変化を表 4、図 7 に示した。両群ともに、足圧中心動揺の平均速度は早期の試行では試行を繰り返すことによって減少し、試行間による有意差が認められた (サッケード群:  $F_{10,99}=9.45$ ,  $p<0.05$ 、スムーズ群:  $F_{10,109}=7.27$ ,  $p<0.01$ )。サッケード群の平均値と標準偏差は、第 1 試行、第 2 試行、第 10 試行、第 11 試行それぞれ  $82.3 \pm 38.0$  mm/s、 $74.3 \pm 26.7$  mm/s、 $42.5 \pm 13.2$  mm/s、 $43.5 \pm 9.5$  mm/s であった。第 10 試行の値は、第 1 試行～第 5 試行それぞれの値に比べて有意に小さかった ( $p<0.05$ )。

第1試行の値の分散と第2試行のそれには有意差は認められなかった。第11試行と第10試行の値には有意差は認められなかった。スムーズ群の平均値と標準偏差は、第1試行、第2試行、第10試行、第11試行それぞれ  $94.7 \pm 39.6$  mm/s、 $73.4 \pm 28.3$  mm/s、 $50.3 \pm 12.6$  mm/s、 $58.4 \pm 19.9$  mm/s であった。第10試行の値は第1試行～第3試行それぞれの値に対して有意に小さかった ( $p < 0.01$ )。第1試行の値は第2試行の値に比べて大きい傾向があり ( $p = 0.099$ )、第1試行の値の分散は第2試行のそれに比べて有意に大きかった ( $F_{10,109} = 7.27$ 、 $p < 0.01$ )。第11試行の値は第10試行の値に対して有意に大きかった ( $t = 2.107$ 、 $p = 0.032$ )。

サッケード群とスムーズ群の比較では、全ての試行、および第1試行と第2試行間の差、第2試行と第10試行間の差に被験者群間で有意差が認められなかった (第1試行と第2試行間の差：サッケード群  $8.0 \pm 23.8$  mm/s、スムーズ群  $21.4 \pm 48.6$  mm/s。第2試行と第10試行間の差：サッケード群  $31.8 \pm 19.2$  mm/s、スムーズ群  $23.1 \pm 23.0$  mm/s)。

表2 サッケード群における  
眼球運動開始遅延時間(ms)

氏名	コントロール	1st	11th
T	219.5	216.0	209.0
C	233.5	226.0	228.0
M	271.0	257.0	278.0
I	246.0	241.0	266.0
O	216.0	230.0	230.0
K	257.0	246.0	288.0
Y	213.0	244.0	244.0
A	251.5	228.0	228.0
S	216.0	218.0	226.0
平均値	235.9	234.0	244.1
標準偏差	21.3	13.8	27.0

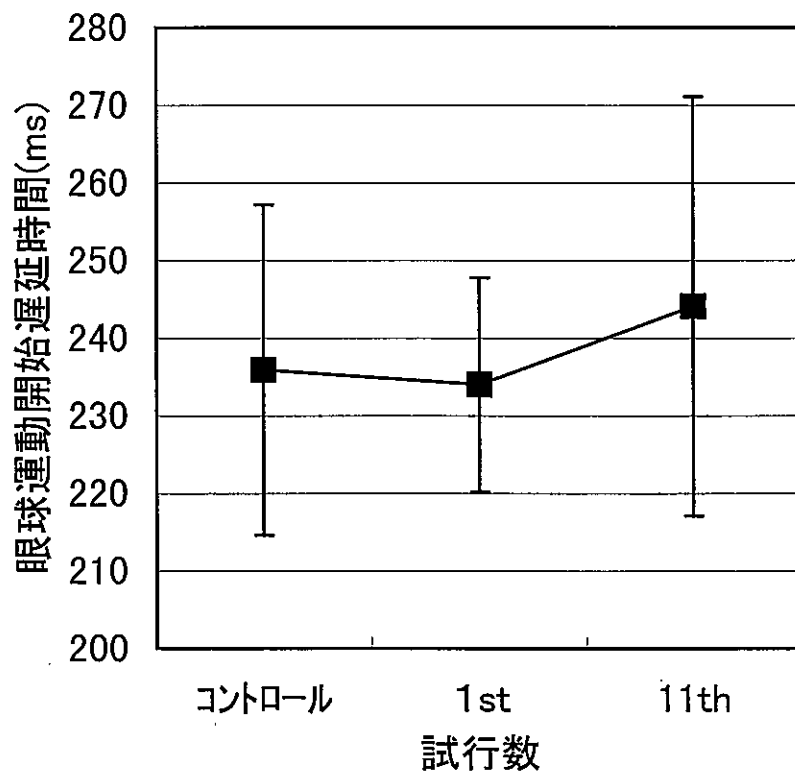


図5 サケット群における眼球運動開始遅延時間

表3 スムース群における視標移動と眼球運動との相互相関係数  
及びそのz-スコア

氏名	相互相関係数 r			z-スコア		
	コントロール	1st	11th	コントロール	1st	11th
F	0.993	0.986	0.993	2.793	2.463	2.848
Y	0.979	0.974	0.987	2.280	2.159	2.532
B	0.992	0.988	0.993	2.783	2.554	2.836
N	0.993	0.988	0.994	2.834	2.559	2.864
O	0.985	0.982	0.986	2.448	2.362	2.466
D	0.994	0.991	0.995	2.931	2.710	3.039
M	0.993	0.990	0.993	2.811	2.661	2.805
A	0.994	0.990	0.993	2.871	2.654	2.859
I	0.991	0.990	0.989	2.728	2.626	2.605
T	0.995	0.992	0.995	2.958	2.779	2.948
平均値	0.992	0.988	0.992	2.744	2.553	2.780
標準偏差	0.212	0.181	0.183	0.215	0.183	0.185

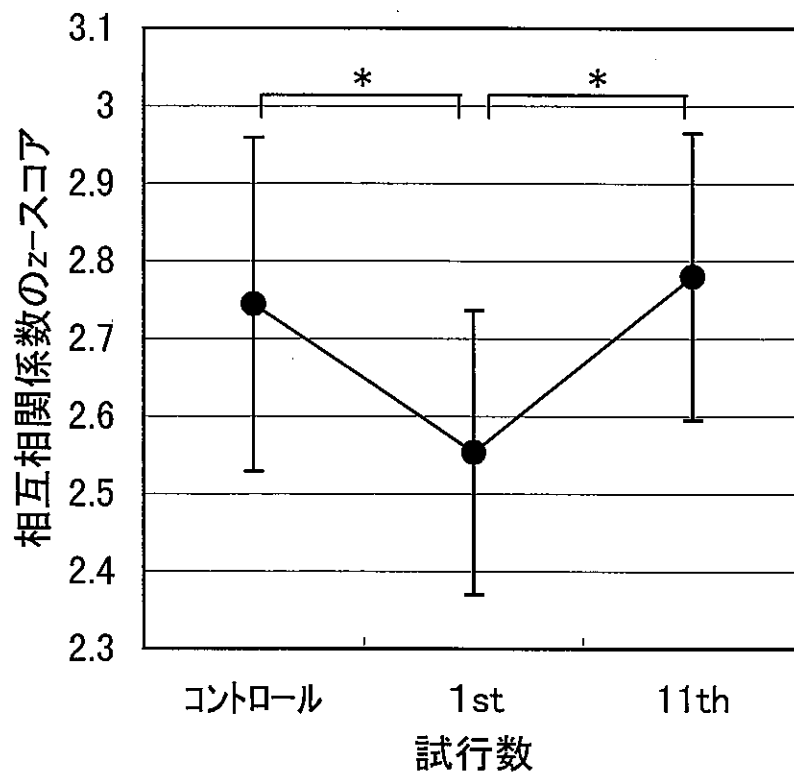


図6 スムース群における視標移動と眼球運動との相互相関係数のz-スコア  
 (\* :  $p < 0.05$ )



表4 足圧中心動揺の平均速度

	試行数	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th
サッカー <sup>*</sup> 群	平均値	82.2	74.3	64.0	60.2	56.4	47.0	47.4	43.6	44.8	42.5	43.5
	標準偏差	38.0	26.7	26.2	30.0	33.3	9.9	16.4	11.8	15.6	13.2	9.5
スムース群	平均値	94.7	73.4	69.4	62.5	61.4	58.9	60.5	53.0	51.6	50.3	58.4
	標準偏差	39.6	28.3	23.2	20.9	15.2	15.1	16.9	12.9	10.8	12.6	19.9

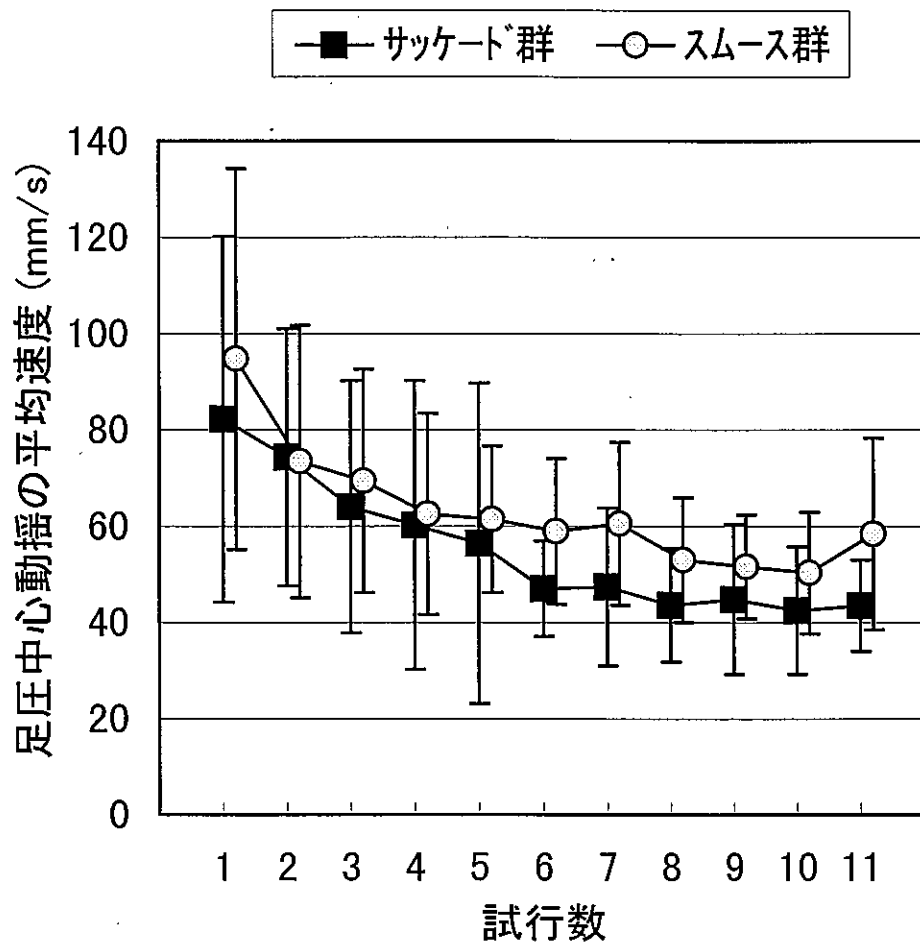


図7 足圧中心動揺の平均速度  
(身長補正後)

# 実 験 2

## 方 法

## 実験2

### 方法

#### 被験者

被験者は、手指運動の内容ごとに、反応群（10名）と追従群（10名）に分けた。彼らは、過去に床振動刺激を負荷されたことがない健康な大学生であり、実験の主旨について説明を受け、同意して参加した。両群の身体特性を表5に示した。年齢、身長、体重のいずれの項目においても、被験者群間に有意な差は認められなかった。

#### 装置

実験1と同じ振動台と周波数カウンター、および床反力計を用いて、正弦波状に周波数 0.5 Hz、前後方向に振幅 2.5 cm で振動を負荷し、その際の前後方向の足圧中心動揺を検出した。

手指運動は、視標の移動に対する反応動作と追従動作とした。視標の提示には実験1と同じ装置および方法を用いた。ゴーグル型ディスプレイ上の視標の移動は、反応群では 2.0~4.0 秒の任意の時間間隔で左右交互の step 状に、追従群では 0.3 Hz の正弦波状に、いずれも 20° の視角（左右各 10°）で水平方向とした。手指運動を把握するために、被験者には、直線型ポテンシオメータ（緑測器、LP250-FXM、重さ 420 g）の本体を左手にもたせ、右手での左右方向への移動によって抵抗を変化させた。左右方向への移動距離は 15 cm とした。追従群では、視標に加えて手指運動によって移動する光源（追従光源：1 辺が 1 cm の正方形）をゴーグル型ディスプレイ上に提示した。追従光源は、視標提示ソフトを用いてパーソナルコンピ

ューター画面上に提示し、これを直線型ポテンシオメータの出力電圧の変化で左右方向へ移動させた。

眼振図法を用いて上下方向の眼球運動を記録し、瞬きの有無を把握した。表面電極は、前頭部中央（基準電極とした）と右眼窩縁の上下からそれぞれ1 cm 離れた部位に取り付けた。電極の入力抵抗は10K $\Omega$ 以下にした。電極からの信号は、DC 増幅器（日本光電、AN-601G）を介して増幅した（ $\times 2000$ ）。安定した眼振図を得るために、電極を取り付けてからデータ記録を開始するまでの時間間隔を20分以上とした。

手指による反応動作の開始時点を把握するために、大胸筋と三角筋中部線維の表面筋電図を記録した。電極は筋腹上に約2 cm 離して取り付けた。電極の入力抵抗は10 K $\Omega$ 以下にした。電極からの信号は、筋電アンプ（日本電気三栄、バイオトップ 6R12）を用いて1.6 Hz $\sim$ 1500 KHz のバンドパスフィルターをかけ2000 倍に増幅した。

後の分析のために、ポテンシオメータ、床反力計、多機能センサーの出力及び、眼振図、筋電図を、A/D 変換器（Contec、AD12-16U（PCI）E）を介して、サンプリング周波数1KHz、分解能12ビットでパーソナルコンピュータ（iiyama、M533MS）に取り込んだ。

## 実験手順

実験手順を図8に示した。

測定開始前に、椅座位姿勢で、1分間の手指運動を3回練習させた。被験者が手指運動に十分慣れたことを確認してから、測定を開始した。

被験者には、意図的な膝や腰の屈曲をできるだけ避け、リラックスした立位姿勢を保持するように指示した。最初に、安静立位姿勢

で、手指運動を1分間行わせた（これをコントロール試行とする）。次に、床振動時に立位姿勢を保持する試行を11回繰り返した。1試行は1分間とし、試行間に1分間の休憩を設けた。手指運動は第1試行と第11試行で負荷した。手指運動は、床振動開始5秒後から始めた。第2試行～第10試行は閉眼条件下で行った。反応群には、視標の移動に対して可能な限り速やかに手指を移動するように指示した。追従群には、可能な限り正確に視標の移動を手指で追従するように指示した。

## データ処理

分析は、床振動開始10秒後から50秒間のデータを対象に行った。床振動時の足圧中心動揺の前後方向の平均速度は、実験1と同じ方法で算出した。

反応群における手指運動の成績は、視標移動に対する大胸筋ないし三角筋中部線維の活動開始の遅延時間で評価した。1試行全てのデータの平均値  $\pm$  2SD を越える値は不採用とし、平均値を算出し、被験者の代表値として用いた。追従群では、視標の移動を制御する多機能シンセサイザの出力と手指で操作するポテンシオメータの出力に10 Hz のローパスフィルターをかけた後に、両データの相互相関係数を算出した。なお、瞬きのある場合には、瞬きから300 ms間のデータを不採用とした。

これらの分析には、多用途生体信号解析プログラム BIMTAS® II (KISSEI Comtec Co. Ltd.) を用いた。

## 統計処理

実験1と同様の手順で統計処理を行った。

**表5 被験者の身体特性**

		年齢(歳)	身長(cm)	体重(Kg)	足長(cm)
反応群 (n=10)	平均値	19.5	163.2	59.6	24.3
	標準偏差	0.8	9.0	5.2	0.9
追従群 (n=10)	平均値	20.1	164.8	56.5	24.2
	標準偏差	1.7	8.4	6.8	1.8

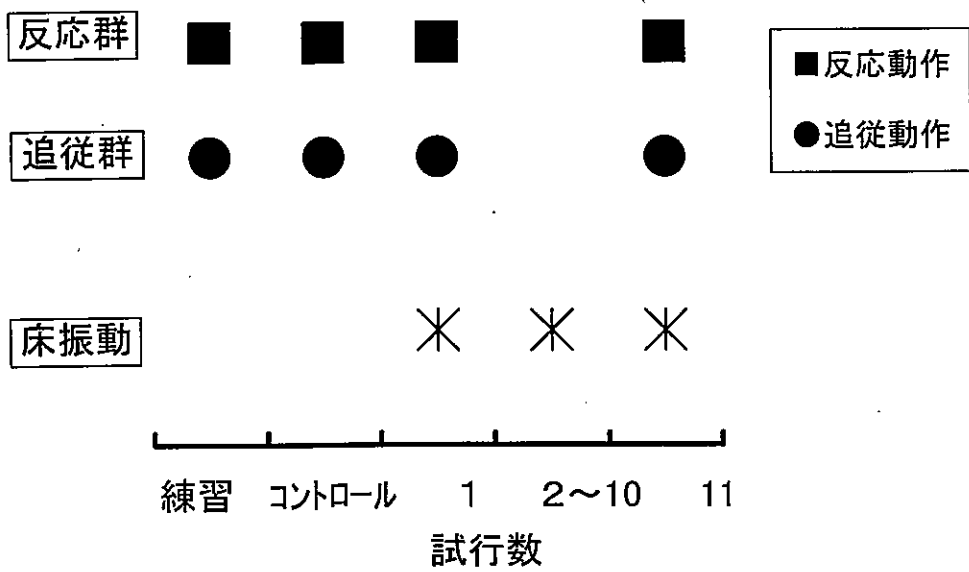


図8 実験プロトコル



# 実 験 2

## 結 果

## 結果

### 手指運動

反応群における手指運動開始遅延時間には、試行による有意差が認められた（表6、図9、 $F_{2,29}=7.55$ 、 $p<0.05$ ）。第1試行での手指運動開始遅延時間（ $195.9 \pm 29.5$  ms）は、コントロール試行（ $179.4 \pm 17.8$  ms）と第11試行（ $179.3 \pm 16.4$  ms）のそれに比べて有意に遅かった（ $p<0.05$ ）が、コントロール試行と第11試行との間には有意差が認められなかった。

追従群における視標移動と手指運動との相互相関係数およびそのzスコアを表7、図10に示した。コントロール試行、第1試行、第11試行の相互相関係数（zスコア）の平均値と標準偏差は、それぞれ $0.995 \pm 0.225$ （ $2.956 \pm 0.228$ ）、 $0.987 \pm 0.315$ （ $2.501 \pm 0.326$ ）、 $0.994 \pm 0.190$ （ $2.883 \pm 0.192$ ）であった。zスコアには試行による有意差が認められ（ $F_{2,29}=23.96$ 、 $p<0.0001$ ）、第1試行の値は、コントロール試行と第11試行の値に比べて有意に低かった（ $p<0.0001$ ）。コントロール試行と第11試行との間には有意差が認められなかった。

### 動的姿勢制御

足圧中心動揺の平均速度の変化を表8、図11に示した。両群ともに、足圧中心動揺の平均速度は早期の試行では試行を繰り返すことによって減少し、第11試行では再び増加した（反応群： $F_{10,109}=23.40$ 、 $p<0.0001$ 、追従群： $F_{10,109}=16.77$ 、 $p<0.0001$ ）。反応群の平均値と標準偏差は、第1試行、第2試行、第10試行、第11試行それぞれ $102.3 \pm 25.1$  mm/s、 $85.7 \pm 28.6$  mm/s、 $43.5 \pm 9.5$

mm/s、 $55.0 \pm 12.4$  mm/s であった。ただし、両群とも、第 11 試行の値は第 1 試行に比べると有意に減少していた ( $p < 0.0001$ )。第 10 試行の値は、第 1 試行～第 6 試行それぞれの値に比べて有意に小さく、さらに第 11 試行に比べても有意に小さかった ( $p < 0.05$ )。第 2 試行の値は第 1 試行のそれに比べて有意に小さかった ( $p < 0.05$ )。追従群の平均値と標準偏差は、第 1 試行、第 2 試行、第 10 試行、第 11 試行それぞれ  $116.6 \pm 33.3$  mm/s、 $87.1 \pm 41.4$  mm/s、 $51.3 \pm 14.2$  mm/s、 $76.2 \pm 17.2$  mm/s であった。第 10 試行の値は第 1 試行と第 2 試行の値に対して有意に小さく、さらに第 11 試行に比べても有意に小さかった ( $p < 0.001$ )。第 2 試行の値は第 1 試行のそれに比べて有意に小さかった ( $p < 0.0001$ )。

反応群と追従群の比較では、第 1 試行～第 10 試行に有意差が認められなかった。しかし、第 11 試行では追従群の方が有意に大きかった ( $t = 2.83$ 、 $p = 0.05$ )。

**表6 反応群における手指運動開始遅延時間(ms)**

氏名	コントロール	1st	11th
H	191.9	192.4	188.3
B	170.7	165.3	173.4
R	176.6	188.4	179.1
U	204.7	231.8	210.1
E	170.8	223.2	182.5
G	151.2	149.9	148.4
I	166.4	189.3	166.8
W	169.9	181.4	171.5
C	183.6	192.8	181.1
A	208.4	245	192.1
平均値	179.4	195.9	179.3
標準偏差	17.8	29.5	16.4

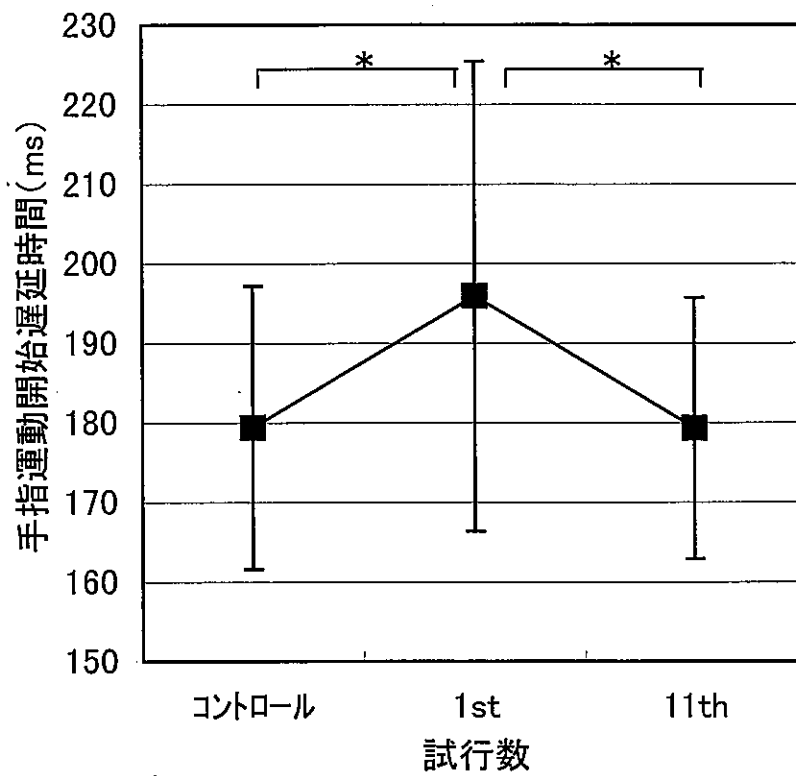


図9 反応群における手指運動開始遅延時間  
 (\* :  $p < 0.05$ )

表7 追従群における視標移動と手指運動との相互相関係数  
及びそのz-スコア

氏名	相互相関係数 r			z-スコア		
	コントロール	1st	11th	コントロール	1st	11th
U	0.987	0.979	0.991	2.511	2.277	2.673
M	0.993	0.991	0.993	2.820	2.703	2.819
Y	0.998	0.994	0.997	3.380	2.887	3.257
O	0.994	0.982	0.990	2.867	2.337	2.670
T	0.996	0.992	0.995	3.159	2.775	2.951
S	0.995	0.970	0.992	2.951	2.089	2.742
Z	0.996	0.993	0.994	3.097	2.842	2.939
K	0.995	0.992	0.996	2.951	2.757	3.065
N	0.994	0.981	0.995	2.888	2.321	2.993
F	0.994	0.966	0.991	2.941	2.023	2.724
平均値	0.995	0.987	0.994	2.956	2.501	2.883
標準偏差	0.225	0.315	0.190	0.228	0.326	0.192

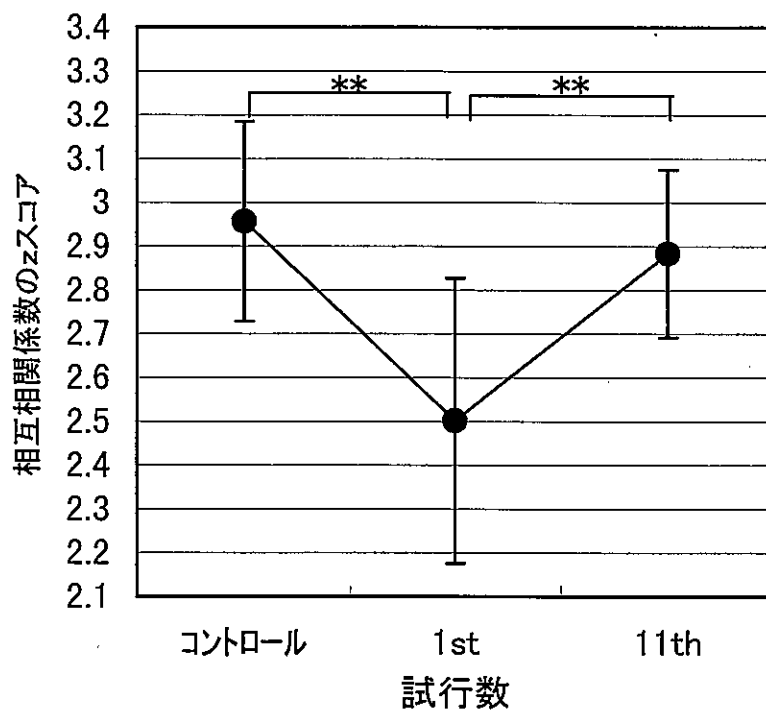


図10 追従群における視標移動と手指運動との相互相関係数のz-スコア  
 (\*\*:  $p < 0.01$ )

表8 足圧中心動揺の平均速度

	試行数	1st	2nd	3rd	4th	5th	6th	7th	8th	9th	10th	11th
反応群		102.3	85.7	69.3	62.4	58.5	55.0	49.8	50.6	46.3	43.5	55.0
	標準偏差	25.1	28.6	27.9	19.9	23.7	18.1	13.4	15.1	11.7	9.5	12.4
追従群		116.6	87.1	63.9	62.2	57.5	53.2	55.9	54.8	52.9	51.3	76.2
	標準偏差	33.3	41.4	27.0	26.4	26.1	20.7	15.2	16.7	17.5	14.2	17.2



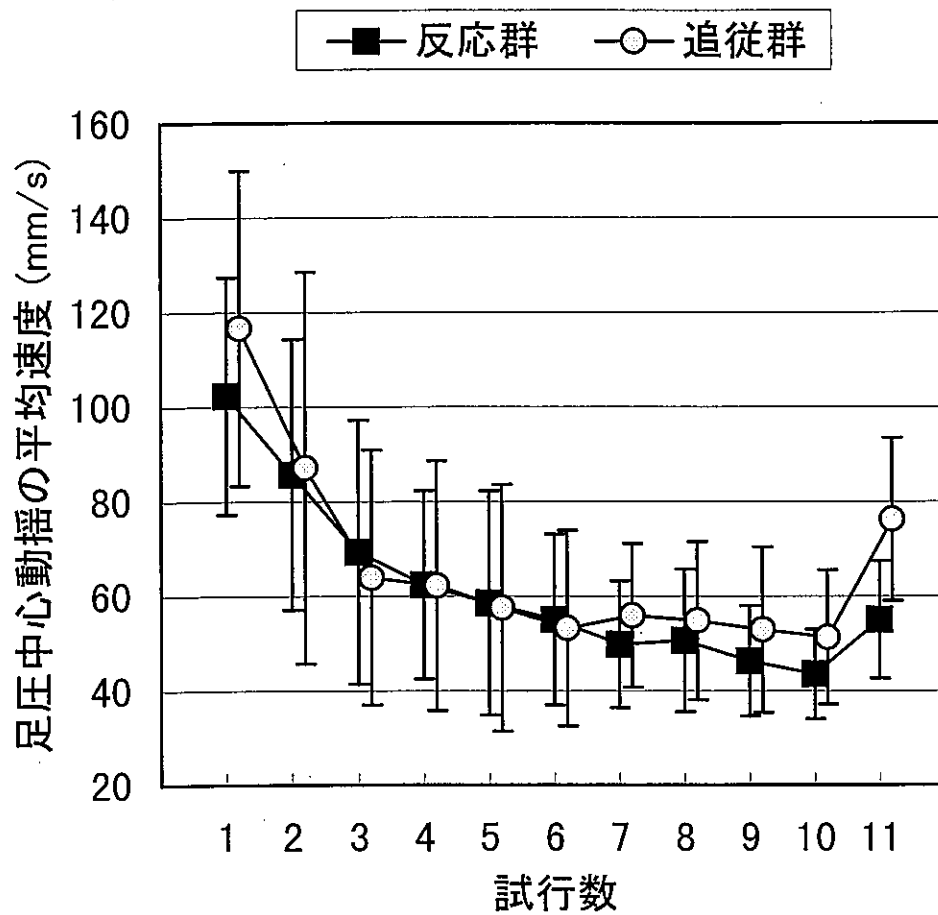


図11 足圧中心動揺の平均速度  
(身長補正後)

# 考 察

## 考察

本研究では、実験1と実験2において、被験者に第1試行と第11試行ではゴーグル型ディスプレイに眼球なしし手指で追従するための視標を提示し、第2試行から第10試行では閉眼条件を設定した。いずれの場合においても、視覚情報を用いた姿勢制御がなされていないという点で同一条件であると考えられる。以下、運動の並行制御能についての考察を行う。

第1実験においては、サッケード群では、床振動時の足圧中心動揺の平均速度は、第1試行から第5試行までに大きく減少し、その後ほとんど変化しなかった。この結果から、動的姿勢制御の学習が早期になされ、その後一定の状態を維持したものと推察される。衝動性眼球運動の開始遅延時間は、コントロール試行、第1試行、第11試行で有意な変化がなかったことから、動的姿勢制御の自動化水準の差異が衝動性眼球運動の制御に影響を及ぼさなかったものと考えられる。スムーズ群でも、サッケード群と同様に、床振動時の足圧中心動揺の平均速度が早期に大きく減少し、第10試行までほとんど変化しなかった。視標追従運動を負荷していない第2試行と第10試行間の足圧中心動揺の平均速度の差に被験者群間の差異が認められなかったことから、動的姿勢制御の学習が両群とも同程度になされたと考えられる。視標移動と眼球運動の相互相関係数が第1試行で有意に低下していたことから、動的姿勢制御の自動化水準の差異が滑動性眼球運動の制御に影響を及ぼしていたものと考えられる。

第2実験においても、床振動時の足圧中心動揺の平均速度は、反応群でも追従群でも、第1試行から第5試行までに大きく減少し、その後は第10試行までほとんど変化しなかった。しかし、両群とも

に第11試行での足圧中心動揺の平均速度は、第10試行に比べて有意に増加した。このことは、学習によって動的姿勢制御の自動化が進むことで手指運動を並行する機能が向上するが、床振動を10回反復した状況下では動的姿勢制御に干渉が生じる状況であったことを示すものであると考えられる。反応群と追従群における手指運動の成績は、いずれも第1試行で有意に低下していた。このことから、動的姿勢制御の自動化水準の差異が手指による反応動作と追従動作の制御に影響を及ぼしていたものと考えられる。

動的姿勢制御が早期に学習され、その後一定の状態を維持したという実験1と実験2の結果は、藤原<sup>5)</sup>の報告と一致する。実験1では、スムーズ群とサッケード群の間に次のような2つの異なる現象が認められた。第一に、スムーズ群でのみ、第11試行の足圧中心動揺の平均速度が第10試行の値に比べて有意に増加していた。このことから、スムーズ群では、動的姿勢制御の学習はなされていたものの、第11試行では、滑動性眼球運動を並行することによる干渉が動的姿勢制御に現れたものと推察される。第二に、スムーズ群における視標移動と眼球運動の相互相関係数が、第1試行で有意に低下していた。一方、サッケード群では、眼球運動開始遅延時間にこのような試行間の変化は認められなかった。スムーズ群でのみ、動的姿勢制御の自動化が進んでいない段階では、姿勢を制御することによる干渉が滑動性眼球運動の制御に現れていたものと推察される。以上のことから、実験1についての2つの作業仮説は実証されたと考えられる。衝動性眼球運動は、網膜上に映った像と中心窩との距離や眼窩内の目の位置が刺激となって生ずる運動である<sup>12)</sup>。この運動は、反射回路を中心にして、比較的下位の中枢によって制御されおり、運動中に視覚によるフィードバック制御が行われないとされて

いる。そのため、サッケード群では、動的姿勢制御に上位中枢が関与する段階においても、干渉が生じなかったと推察される。滑動性眼球運動は、視標の移動速度と網膜上に映っている対象物の移動速度との差が刺激となって生じる運動である。この運動には、視覚系によるフィードバック制御が不可欠であり、上位中枢の関与が比較的大きいとされている。そのため、第1試行では、上位中枢が動的姿勢制御と滑動性眼球運動制御の両者へ関与し、並行制御することによる干渉が両者に現れたものと推察される。

実験2では、第10試行に対する第11試行での足圧中心動揺の平均速度の増加が反応群と追従群に認められたが、その増加の程度は追従群の方が大きいという差異が認められた。このことから、両群とも動的姿勢制御の学習はなされていたものの、第11試行では、手指運動を並行することによる干渉が動的姿勢制御に現れ、その程度は随意性の強い手指運動で顕著であったものと推察される。また、反応群における手指運動開始遅延時間は第1試行で有意に遅かった。同様に追従群では、視標移動と手指運動との相互相関係数は第1試行で有意に低かった。これらの結果は、両群ともに、動的姿勢制御の自動化が進んでいない段階では、姿勢を制御することによる干渉が手指運動の制御に現れていたものと推察される。ことから、実験2についての2つ目の作業仮説のみが実証されたと考えられる。

実験1と実験2の比較では、次のような2つの異なる現象が認められた。第一に、第10試行に対する第11試行での足圧中心動揺の平均速度の増加が実験1ではスムーズ群にのみ認められ、実験2では反応群と追従群の両者に認められた。第二に、第1試行における眼球運動の成績の低下がスムーズ群にのみ認められ、第1試行における手指運動の成績の低下は反応群と追従群の両者に認められた。

これらは、手指の追従動作のような随意性の強い運動でなくとも動的姿勢制御と手指運動を並行することは、困難であることを示すものと推察される。

以上のことから、運動の制御特性によってその運動と動的姿勢の並行制御の様相が異なり、動的姿勢制御の自動化が並行制御において重要な役割を果たしていることが示されたと考えられる。

これまで、複数の運動を並行する場合の干渉度を自動化水準の指標としてきた研究では、一過性の運動と周期運動との組み合わせが多く用いられてきた<sup>1, 3)</sup>。一過性の運動と周期運動を組み合わせた場合、その干渉は周期運動に現れることが報告されている。実験1でスムーズ群が並行した動的姿勢制御と滑動性眼球運動、および実験2で追従群が並行した動的姿勢制御と手指運動はいずれも周期運動であり、2種類の周期運動を並行する場合には、干渉が両者に生じ得ることを示す新たな知見と言えよう。また、これまでは上位中枢が必ず関与すると考えられている一過性の運動と周期運動が組み合わせられてきたが、本実験のサッケード群では、比較的下位の中枢によって制御されると考えられている衝動性眼球運動と動的姿勢制御を組み合わせた。比較的下位の中枢によって制御される運動と動的姿勢制御を組み合わせた場合には、動的姿勢制御が自動化される以前の段階から、干渉を生じることなく2つの運動を並行することが可能であることも新たな知見であると言えよう。また、実験1のスムーズ群と実験2の反応群と追従群では、第11試行において、眼球ないし手指の運動を並行することによる干渉が動的姿勢制御に認められた。このことは、床振動時の予測的姿勢制御には高次の機能が関与しており、10回の練習では干渉なく並行制御が可能な水準までその制御を自動化することが困難であったことを示すものと考え

られる。今後、練習をさらに重ねた場合の干渉度の変化を検討する必要がある。

# 文 献



## 文献

- 1) Bahrick H P, et al. : Time sharing as an index of automation. *Journal of Experimental Psychology* **56** : 288-293, 1958
- 2) Brooks V B : The neural basis of motor control. Oxford University Press, Oxford, 1986
- 3) Cohen L : Interaction between limbs during bimanual voluntary activity. *Brain* **93** : 259-272, 1970
- 4) 藤原勝夫, 他 : 床振動時の立位姿勢の応答特性. *体育学研究* **29** : 251-261, 1984
- 5) 藤原勝夫, 他 : 水平床振動を繰り返し負荷した場合の立位姿勢調節の変化. *体力科学* **37** : 25-36, 1988
- 6) Fujiwara K, et al. : The learning ability of postural control during horizontal floor vibration for preschool children and adult. Seoul Olympic Scientific Congress Organizing Committee(eds.), *NEW HORIZONS OF HUMAN MOVEMENTS*, Sport Science Institute Dankook University, Cheonan, 1990
- 7) Fujiwara K, et al. : Adaptability of postural control during floor vibration in the elderly. Taguchi K, et al.(eds.), *Vestibular and neural front*, Elsevier Science, 1994
- 8) Fujiwara K, et al. : Changes in saccadic reaction time while maintaining neck flexion in men and women. *European Journal of Applied Physiology* **81** : 317-324, 2000
- 9) 福岡義之, 他 : 成人と6歳児における床振動時の立位姿勢調節の学習. *姿勢研究* **8** : 73-81, 1988
- 10) Gazzaniga M S, et al. : The integrated mind. Plenum Press,

New York, 1978

- 11) 猪飼道夫：動作学. 藤森聞一編：運動系の生理学, 生理学体系 VII. 医学書院, pp717-766, 1966
- 22) 石川哲：眼球運動. 勝木保次, 他監修. 田崎京二, 他編：新生理学体系 第9巻 感覚の生理学. pp216-222, 医学書院, 1988
- 13) Jackson J H: Relations of different divisions of the central neurons system to one another and to parts of the body. Lancet, In. Selected writings of John Hughlings Jackson. (1932), vol. II (Tailor J. Ed.), 422-443, Hodder and Stoughton, London, 1898
- 14) 国田賢治：眼球運動反応時間に及ぼす頸部前屈姿勢保持の影響. 金沢大学大学院自然科学研究科博士論文, 1997
- 15) 水野祥太郎：ヒトの足の研究. 医歯薬出版株式会社, 1973
- 16) Ohtsuki T: Increase in simple reaction time of knee extension induced by simultaneous bilateral performance. Percept. Motor Skills 53, 27-30, 1981
- 17) Posner M I, et al. : Attention demands of movements. In., Proceedings of the 16th international congress of applied psychology (Swets and Zeitliger Eds.), Amsterdam, 418-422, 1969
- 18) Smyth M M, et al., 小坂健二監訳：運動行動のメカニズム. pp155-172, 建帛社, 1990
- 19) 外山寛, 他：自動化水準の異なる下肢の周期運動に対する上肢運動の干渉. 体力科学 37 : 44-52, 1990
- 20) 外山寛, 他：上・下肢運動の自動化水準に及ぼす運動学習の影響. 体力科学 43 : 45-57, 1994

- 21) 外山寛：上肢運動と下肢運動の干渉現象から見た自動化水準の検討. 金沢大学大学院自然科学研究科博士論文, 1997
- 22) Toyama H, et al. : Difference in level of automatization of upper and lower limb movement. *Anthropol Sci* **105** : 1-14, 1997
- 23) 梁瀬度子：手作業の習熟過程における中枢機能の研究. 奈医誌.19 : 240-262, 1968
- 24) Wyke M : The effects of brain lesions on the performance of bilateral arm movement. *Neuropsychologia* **9** : 33-42, 1971