

(16)

## 床反力作用点のトラッキング動作から見た 動的平衡機能の評価

(久留米工業大学) 小堀 聡

(大阪大学附属病院) 米田 稔彦

(大阪大学) 廣島 和夫, 小野 啓郎

### 1. ま え が き

直立静止姿勢における身体の平衡に関しては、古くから研究がなされており、重心動揺軌跡を解析するというもの<sup>1)</sup>が一般的である。また、それに対して加速度外乱を加えて、その応答を解析するという研究<sup>2)</sup>も見られる。

しかし、それらの研究では、身体を静止させておくことが可能でも、随意的にうまく体重を移動できない場合の問題を議論することは難しい。体重をスムーズに移動させることは、歩行にとっても大切な要素であり、臨床的にも意義深いといえるが、そうした「動的な平衡機能」を解析した報告は少ない。そこで、体重の移動を行わせた場合の動作特性の研究が必要と考えられる。

一方、手動制御系を中心に、運動機能を解析・評価するために、被験者に操作器を操作させ、目標点に追従させる「トラッキング動作」が研究されている。その結果、制御工学の理論から人間の動作特性が解析されており<sup>3)</sup>、疾患との関連についての報告<sup>4)</sup>も見られる。

直立姿勢において、床反力作用点のトラッキング動作を行わせたものとしては、大西らの研究があり、左右方向についての報告<sup>5-7)</sup>がなされているが、疾患例としては片麻痺患者や切断者など少数のみである。

そこで、本研究においては、床反力作用点のトラッキング動作を行わせることにより、運動器系疾患の患者の動作特性を解析することを目的としている。そのため、フォースプレートと呼ばれる床反力の計測器を用い、マイクロコンピュータを中心とした、床反力作用点のトラッキング動作の実験システムを独自に開発・製作した<sup>8,9)</sup>。実験は、フォースプレート上に起立し

た被験者に、CRT 画面の表示を見せ、トラッキング動作を行わせるというものである。

このシステムを用いて、健常者と運動器系の疾患の患者を被験者として実験・検査を行い、その結果を解析した。本論文では、まず製作した実験システムについての概略を述べる。そして、正常例と疾患例の解析結果を考察し、評価値と疾患との関係について、学習効果や加齢の問題に言及しながら論ずる。なお、今回は片側罹患については検討していない。

### 2. 実験システム

#### 2.1 ハードウェア

実験システムは、図1のように16ビット・マイクロコンピュータ(NEC:PC-9801F)を中心に、その周辺機器であるCRT(NEC:PC-8853N)、プリンタ(NEC:NM-9400S)、プロッタ(グラフィック社:MP-1000)を加えて構成される。計測器として用いられるフォースプレート(キスラー社:9281B11)は、

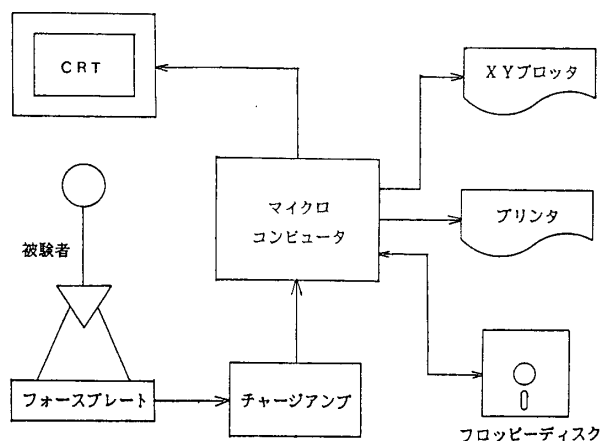


図1 システム構成

大きさが縦 60 cm, 横 40 cm の鉄製の平坦な台であり, 水晶の圧電効果を利用した素子が 4 箇所にある (図 2). 計測した床反力の各成分  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  をチャージアンプに通してから A/D 変換し, マイクロコンピュータに入力する.

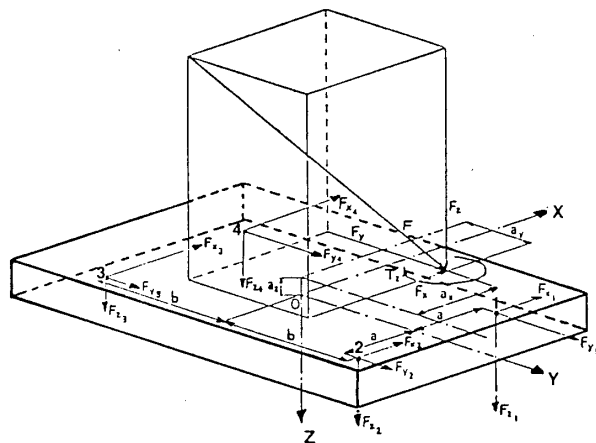


図 2 フォースプレート

## 2.2 ソフトウェア

入力された床反力のデータは, 一定のサンプリング時間で, 床反力の作用点を計算して CRT 上にスポット (5 ドットの十字形) を表示する. なお, 1 ドットはフォースプレート上の 1mm に対応している. 一方, 目標点はステップ状の入力信号が, 半径 10 ドットの円によって, 中央から左右, あるいは前後に示されるが, その時間間隔と振幅はある一定の範囲内でランダムに変化させている. これは, 体重移動のタイミングとその距離を予測しがたくするためである.

実験結果は各成分の波形や後述する評価値が CRT 上やプロッタに出力され, プリンタには実験日時や被験者のデータなどとともに実験記録として出力される. また, 目標点の入力信号や, 床反力の各成分と計算された床反力作用点の座標は, フロッピーディスクに保存され, 後の本格的な解析に利用できる.

本システムのソフトウェアは, 床反力の計測, 床反力作用点の計算, スポットの表示に関しては, i8086 の機械語<sup>10)</sup>でプログラムされており, インターバルタイマ割り込み<sup>11)</sup>を用いて, 一定のサンプリング時間ごとにそれらの機械語ルーチンを実行している. また, 目標点の時間間隔と実験時間は, サンプリング時間の整数倍にフラグを変化させ, それをもとに制御される.

機械語以外のプログラムは, N 88-BASIC (86) で

記述されており, 目標点の形式や評価値の計算方法など, 必要に応じて比較的自由に変更や追加を行える. また, キーボードによる入力は対話形式で進めていくことができる.

従来のこうした研究のシステムでは, データレコーダに記録し, オフラインのコンピュータで解析するという形であったが, このシステムを用いれば, 臨床の場で測定を行い, 即時に簡易な評価を与えることができる.

## 3. 正常例

### 3.1 実験方法

まず, 実験に際して, 被験者の氏名, ID, 年齢, 性別, 体重, 身長をキーボードより入力する. 実験の日付や時間などは自動的に記録される. 被験者には, 一定の足幅 (内側が 20 cm) で平行に足を広げて, 両下肢に均等に体重を加えた状態で, フォースプレート上に起立させ, まず CRT の枠の中心にある目標点に自己の床反力作用点が合うように, 足の位置を調整させる. CRT 画面と被験者の距離は 120 cm とした.

被験者には, 「目標点の変化に自己の体重の点をできるだけ素早く, しかも正確に一致させるように, 体重を移動する」という課題を与えて, 実験を開始する. また, 重心の移動は上半身ではなく, 左右の下肢への加重により行うように指示した.

今回は左右のみに目標点を動かし, サンプリング時間は 30 ms, 試行時間は 60 s, 目標点の変化の時間間隔は 6.0 s から 9.0 s, 振幅は 6.2 cm から 10.0 cm であった. つまり, 1 回の試行ではおよそ 6 回から 8 回体重を移動させることになる. 試行後 1 回ごとに結果の波形と評価値が表示される. 約 1 分程度のインターバルで試行を続け, データの記録は 3 回の試行の後に行った. 時間間隔や振幅の数値は健常者であれば, 十分問題なく実験が行え, 評価値にも影響しないことを確かめたうえで決定している. なお, 実験中の CRT 画面は図 3 に, プロッタに出力された各成分の波形のうち左右方向の波形は図 4 に示した.

### 3.2 解析方法

トラッキング動作の制御成績を評価する方法としては, 入力 (目標値) と出力 (制御値) との間の全誤差

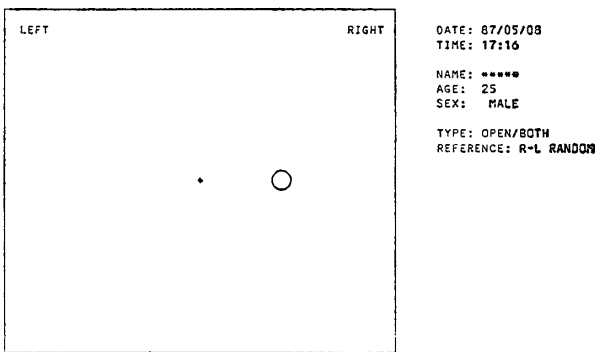


図3 実験中の CRT 画面

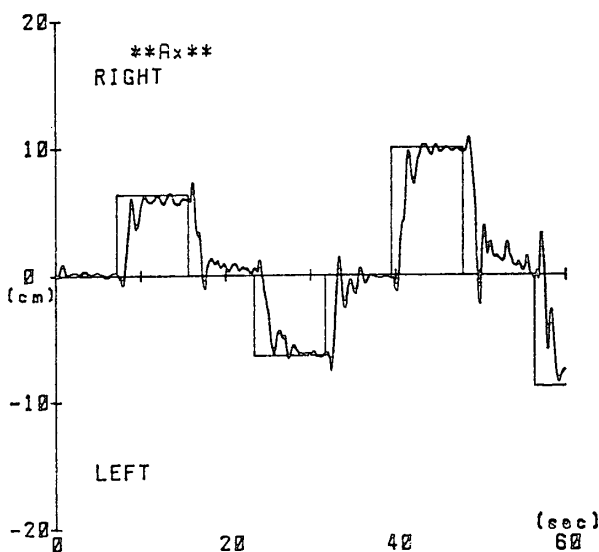


図4 出力波形の一部

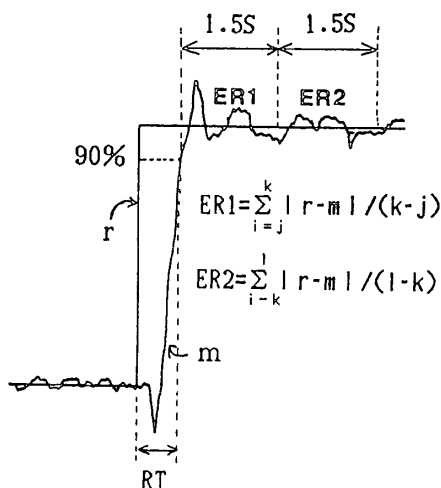


図5 評価値の定義

の絶対値を用いたもの<sup>3)</sup>が一般的であるが、本実験では入力がステップ信号であることを考慮し、応答ごとに評価値を求めることにした。大西らの研究<sup>7)</sup>では、

7つの評価パラメータが示されているが、ここではそれを参考にして、ステップ応答を3つの部分に区切り、図5に示した通りの評価値を計算した。

まず、目標値が変化してから、それに応答した制御値(床反力作用点)が目標値の90%に達するまでの立ち上がり時間を  $RT(s)$  とした。次に、目標値の90%に達してからの1.5s ずつの目標値と制御値との誤差の平均値を、それぞれ  $ER1 (mm)$  と  $ER2 (mm)$  と定めた。

### 3.3 結果

#### 3.3.1 動作特性

本実験における健常者の動作特性を調べ、患者との比較を行うため、20歳代(平均25.8歳)の健常者20名(男子14名、女子6名)を被験者にして実験を行い、4回目の試行のデータから、先に述べた評価値を求め、その平均値と標準偏差を計算した。また、各評価値の間には相関があると考えられる<sup>7)</sup>ので、 $RT$  と  $ER1$ 、 $RT$  と  $ER2$  のそれぞれの間の相関係数を求めたところ、 $-0.62$  と  $-0.18$  であった。そこで、 $RT$  と  $ER1$  との回帰直線を求めてみた。以上の結果は表1に示した通りである。

表1 評価値(20歳代の健常者20名)

$RT$ の平均値 (s)	1.42
$RT$ の標準偏差 (s)	0.49
$ER1$ の平均値 (mm)	13.0
$ER1$ の標準偏差 (mm)	5.4
$ER2$ の平均値 (mm)	5.7
$ER2$ の標準偏差 (mm)	2.6
$RT$ と $ER1$ の相関係数	-0.62
$RT$ と $ER2$ の相関係数	-0.18
$RT$ と $ER1$ の回帰直線	$Y = -0.55X + 20.2$

ここで、単に評価値を数値として見るだけでは把握しにくいので、 $RT$  と  $ER1$ 、 $RT$  と  $ER2$  のそれぞれの相関係数を考慮して、 $RT$  と  $ER1$  はそれぞれを  $X$  軸と  $Y$  軸とした2次元のグラフで、 $ER2$  は単独の1次元のグラフで、それぞれの分布を示した。また、その際2次元のグラフには、先に求めた評価値の平均値±標準偏差の点線の枠と回帰直線とを描き、目安となるようにした。以下の解析にはこの表示方法を用いることにした。図6に示すように健常者ならば、評価値の分布がほぼ点線の枠の中に収まることになる。なお、2次元のグラフ中の大きな点は平均値を示している。

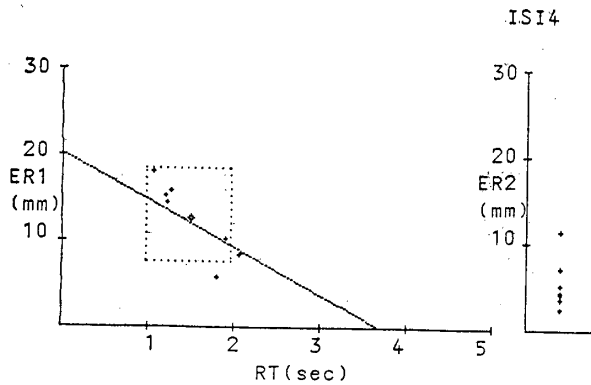


図6 評価値の分布 (健常者)

### 3.3.2 学習効果

本研究のようなトラッキング動作においては、試行を繰り返すことにより制御動作が安定し、制御成績が良くなるという、学習効果が表れる<sup>12)</sup>と考えられる。

そこで、20歳から23歳の5名の健常な学生(男子2名、女子3名)を被験者として、1日1回の試行を10回行い、学習効果について検討した。ただし、5名の平均を求めると、特徴が打ち消される可能性があるため、個別に解析を行った。

まず、試行回数を横軸にして、各評価値の平均値および標準偏差の変化をグラフにした例を図7に示した。平均値の変化を見ると、ER2は3回目ぐらいからほぼ一定であるが、ER1とRTは増加と減少を互い違いに繰り返して安定していく傾向にある。一方、標準偏差は試行回数に対して、各評価値とも4回目ぐらいまで減少する傾向にあり、その後は一定の範囲で安定している。このことは他のすべての被験者にも見られる。

次に、実際の評価値の分布の変化の代表例を示すと

図8のようになり、最初は分布のばらつきが大きい、それが次第に小さくなり、3回目ぐらいから点線の枠の中に収まるようになるのが見られる。また、評価値の平均値を示す点も、3回目ぐらいまでには回帰直線の原点側に行くようになる。

このことは他の被験者にもあてはまり、平均値の変化を線で結んだグラフにおいても、図9のように、1回目の位置はさまざまであるが、次第に回帰直線の原点側に行くという傾向は、いずれにも見られる。

### 3.3.3 加齢の影響

臨床に応用した場合、患者の年齢の分布は広い範囲にわたっており、コントロール群として20歳代のデータを用いたのでは、加齢による影響を考慮することができず、不十分であると思われる。そこで、健常な30歳代から60歳代の被験者各6名から8名に実験を実施した。それぞれの年齢層の各評価値の平均値と標準偏差は表2のようになった。いずれの年齢層においても、20歳代の評価値とは明らかな差が認められない。

表2 年齢別の評価値 (平均値±標準偏差)

	RT(s)	ER1(mm)	ER2(mm)
20歳代	1.42±0.49	13.0±5.4	5.7±2.6
30歳代	1.36±0.51	13.1±4.5	5.2±2.6
40歳代	1.41±0.63	14.1±6.6	5.6±2.4
50歳代	1.42±0.44	12.6±6.0	5.5±2.9
60歳代	1.52±0.52	12.5±5.9	4.8±2.8

### 3.4 小 括

RTとER1に負の相関が見られるので、RTとER1は同時に検討する必要がある。したがって、2次元のグラフはそれに対して有効であるといえる。

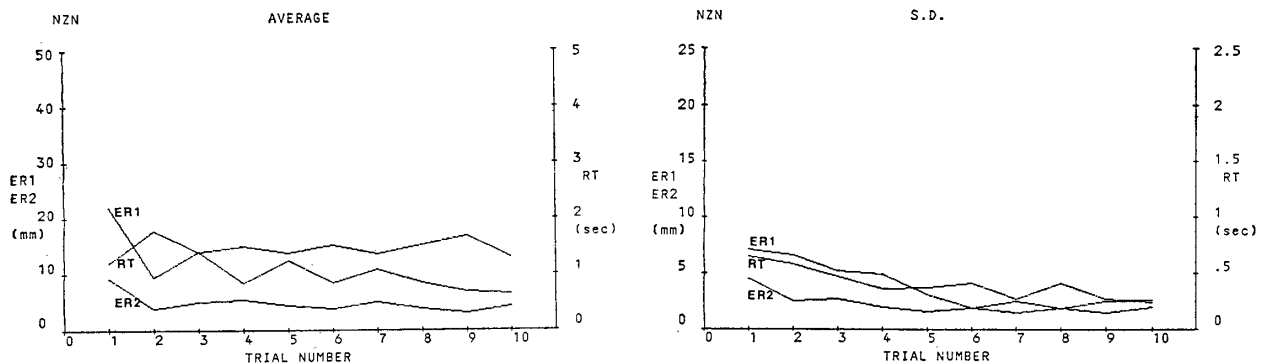


図7 評価値の変化 (左:平均値, 右:標準偏差)

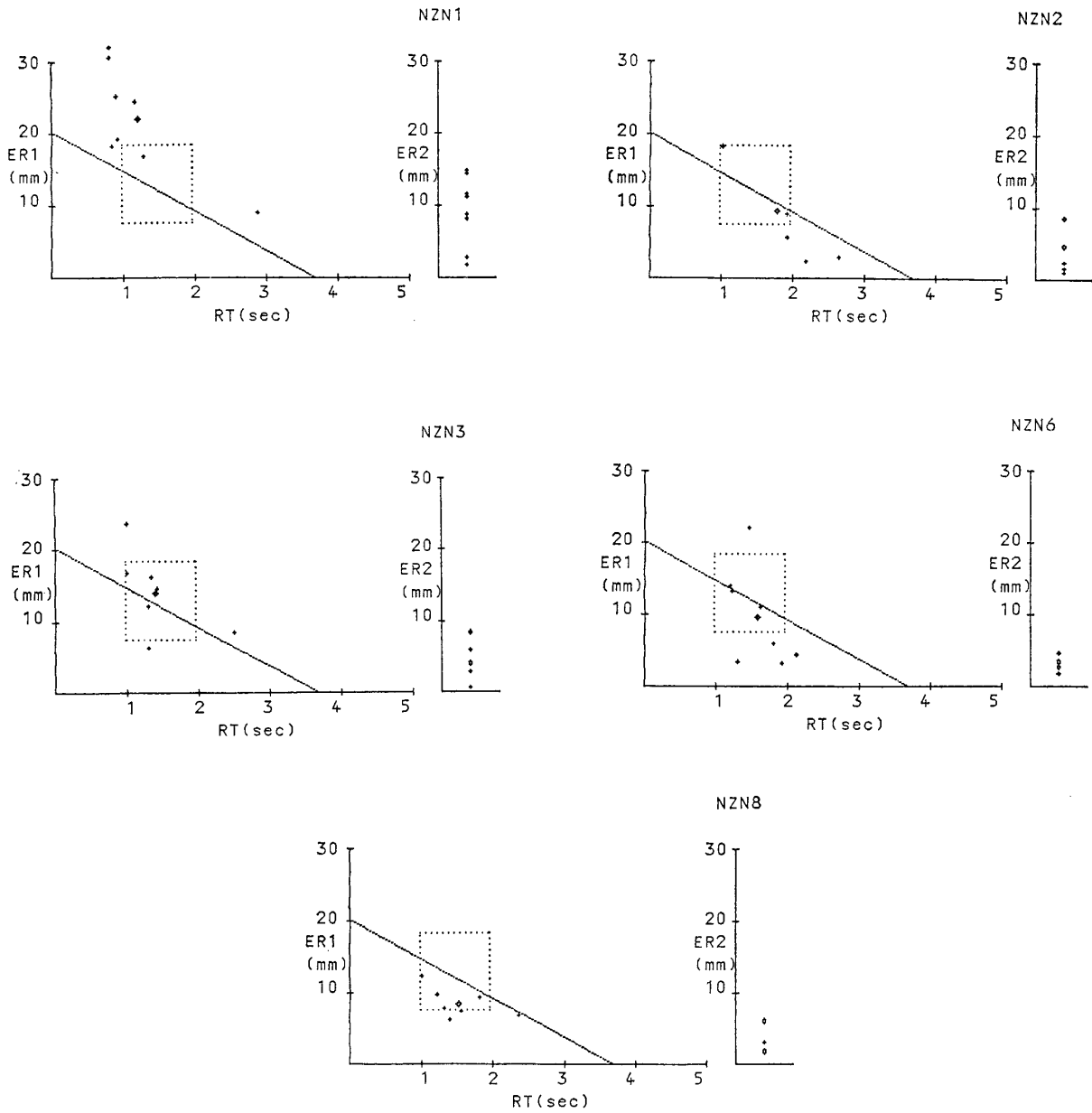


図 8 評価値の分布の変化 (1, 2, 3, 6, 8 回目)

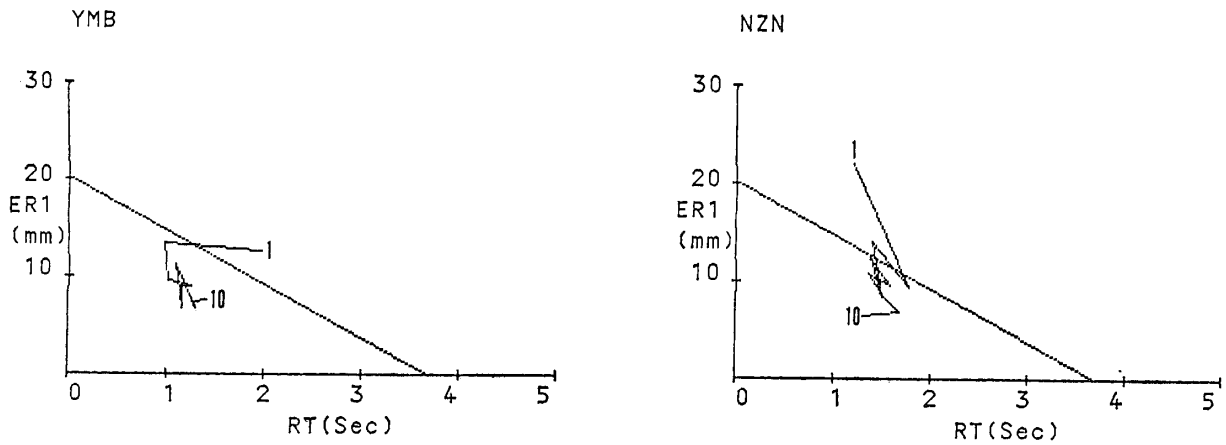


図 9 評価値の平均値の変化 (2 次元)

また、 $RT$  と  $ER2$  には相関があるとはいえず、 $ER2$  は  $RT$  とは独立した評価値であるといえる。

また、学習効果を調べたところ、3回程度の試行で安定することが分かり、データの記録を3回の試行の後に行うのは妥当といえる。

さらに、加齢の影響に関しては、60歳代までであれば特に考慮する必要はなく、20歳代のデータを目安としても、差し支えないといえる。

#### 4. 疾患例

##### 4.1 検査方法

検査は大阪大学医学部附属病院理学療法部において、運動器系の疾患の患者を対象に行った。年齢層は10歳代後半から60歳代までである。具体的な方法は、正常例と同じである。

##### 4.2 解析方法

解析方法としては、正常例と同様の評価値とその表示方法を用いた。

##### 4.3 結果

検査を行った症例とその件数は表3の通りである。本来ならば、疾患ごとの平均値と標準偏差を求めるべきだが、症例が多種であり、かつその程度がさまざまであり、個々の件数が多くないので、そのような方法での検討は行わなかった。そこで、以下に解析を行ったなかで、疾患の特徴をよく表した症例を紹介する。

表3 症例

末梢運動器障害 (神経系障害を除く)	
関節疾患	8例
その他 (軟部組織の欠損, 脚長差など)	20例
神経系障害	
脳脊髄疾患	22例
末梢神経・筋疾患	3例
合計	53例

##### 4.3.1 末梢運動器障害

図10は両股関節症などの関節疾患により運動機能に障害の生じた患者の評価値の分布の例である。 $ER1$ は小さいが $RT$ は大きいという特徴があり、そのことは関節疾患8例中、7例に見られる。しかし、軟部組織の拘縮、欠損や脚長差には、この傾向はほとんど見

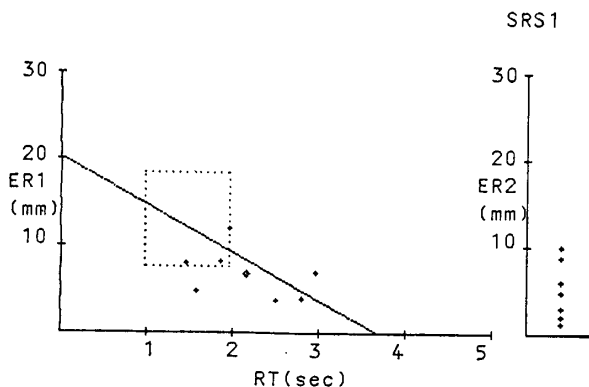


図10 両股関節症 (48歳女性)

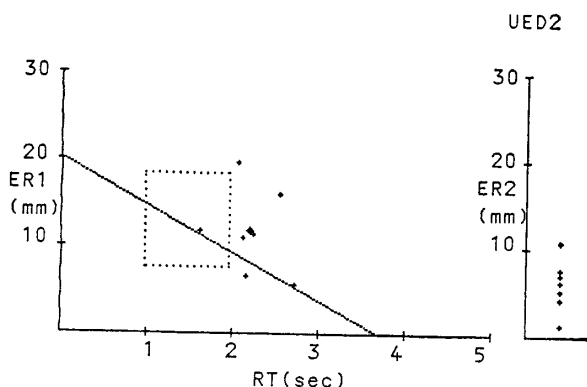


図11 頸髄症 (55歳男性)

られない。

##### 4.3.2 神経系障害

図11は、頸髄の疾患により運動知覚が障害された患者の例である。 $ER1$ と $RT$ が健常者より劣っており、この傾向は他の神経系障害でも、その程度はさまざまであるが、すべてに共通して見られるものである。

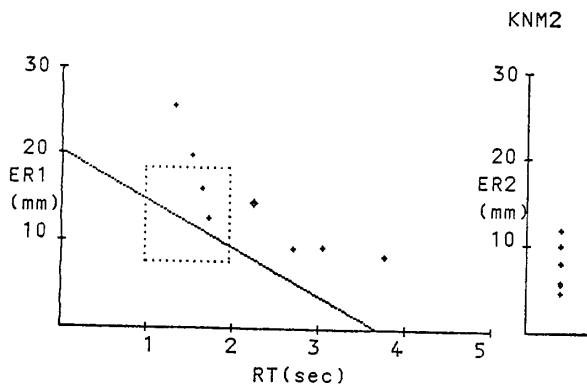


図12 小脳腫瘍 (56歳男性)

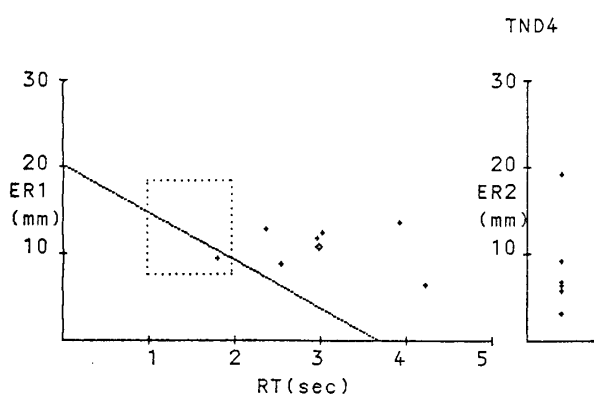


図 13 ウィルソン病 (23 歳女性)

脳脊髄疾患のなかでも、小脳や錐体外路系に障害のある場合は、先に示した頸髄の疾患とは異なった分布を示す。図 12 と図 13 はその例であり、 $ER1$ 、 $ER2$ 、 $RT$  ともに数値が大きい、分布のばらつきも大きいことが特徴となっているのが分かる。

## 5. 考 察

### 5.1 動作特性

$RT$  と  $ER1$  に負の相関が見られるのは、 $RT$  を小さくしようとするとオーバーシュートして  $ER1$  が大きくなり、逆に  $ER1$  を小さくしようとすると  $RT$  が大きくなるという、力学的なことによると考えられ、反応性を見るには  $RT$  と  $ER1$  を同時に検討する必要がある。

また、 $RT$  と  $ER2$  の相関係数から、 $ER2$  は体重を移動してからの安定性を見る独立した評価値であるといえる。

以上のことに加えて、評価値の分布のばらつきが小さいことも、正常例において見られる特徴である。

関節疾患において痛みや筋力低下がある場合は、体重の移動に時間がかかるので、 $RT$  が大きく  $ER1$  の小さい分布が見られ、正常例に見られた負の相関の関係がここでも見られると考えられる。ただし、分布は回帰直線を右下に移動したところに見られるようになるという傾向がある。

また、中枢神経系疾患の場合では、求心路と遠心路がともに障害されるため、体重移動の時間が長いうえに、オーバーシュートを小さく抑えることができないので、 $RT$  も  $ER1$  も大きい分布となると考えられる。

さらに、特に小脳や錐体外路系の障害で分布に大きなばらつきが見られるのは、運動のプログラムの組み立てが困難なことによると考えられる。

### 5.2 学習効果

試行を繰り返した場合の各評価値の平均値の変化を見ても、4 回目ぐらいまででは、 $RT$  と  $ER1$  は単調に減少していない。したがって、平均値の変化だけでは制御成績が総合的に良くなっているかどうかは分かりにくい。むしろ、標準偏差の変化の方が、3 回まで単調に減少しており、学習効果をよく表しているということが、図 7 より分かる。

一方、2 次元のグラフ (図 9) において評価値の平均値の点が原点側に近づくというのは、すべての被験者に見られ、試行により制御成績が良くなっていくことを示しているといえる。また、1, 2 回目の評価値の平均値の位置が被験者によってさまざまであるのは、課題に対する個性の表れであると考えられる。

以上のことから、試行を繰り返すことにより、「目標点にできるだけ素早く応答し、しかも誤差を少なく」という力学的に矛盾した課題に対して、最初是不慣れた被験者も、次第に制御の要領を得て全体の制御成績も良くなり、また恣意的な要素 (素早さか、正確さかの一方に重点を置く) が少なくなり、個性も表れにくくなるということが考えられる。制御動作に慣れるのは、図 7 から 4 回目ぐらいからと判断できる。そして、再現性に関しても、4 回目以降の平均値と標準偏差が安定していることから確認でき、実験データの記録を 3 回の試行後に行っているのは、再現性の面からも妥当といえる。

一方、患者において断続的な検査を行ったところ、病態の改善に伴って制御成績が良くなったと考えられるケースがいくつか見られた。しかし、患者の場合でも 3 回の試行による学習効果が認められ、もっと回数を重ねれば、成績がさらに良くなる可能性もあるので、検査を続けて制御成績が良くなるのは、疾患そのものの改善によるのか、学習効果によるのかは分からない。また、疾患によっては学習効果の表れにくいものもあると考えられる。したがって、正常例と同様の方法で調べたうえでないと、健常者と患者とに学習効果についての差異があるのかどうかは議論できない。

### 5.3 加齢の影響

年齢別の各評価値の平均値と標準偏差は、 $RT$  と  $ER1$  が独立していないことから、そのまま単純に比較できないが、健常者であれば、60歳代までなら20歳代とほぼ同様のトラッキング動作が行えるということが示唆された。文献7)には加齢の影響があると報告されているが、それは、実験の際に「素早さ」だけを課題としているためであろう。つまり、今回の実験の課題のように「素早さ」だけでなく、「正確さ」も求めたものであれば、加齢の影響は表れにくくなると考えられる。また、そのような課題の方が日常生活動作に即していると思われる。

したがって、今回の実験方法の範囲では、加齢による明らかな影響というものが見られないので、評価においては年齢を考慮する必要はない、と考えられる。ゆえに、他の年齢層に対しても、20歳代のデータによる表示方法を用いることに問題がないといえる。

### 5.4 今後の課題

今後の課題としては、症例数を増やすことにより、解析結果と疾患との関係をより明らかにするという点が残る。また、評価値だけでは表れにくい特性を調べるために、パワースペクトルやコヒーレンスなどを求めるスペクトル解析も同時に行っているが、それについては紙面の都合もあり、他の機会に譲りたい。

一方、単に臨床での動的な平衡機能の評価だけでなく、体重移動の訓練への応用の可能性についても検討していきたいと思う。

## 6. むすび

本研究は、床反力作用点のトラッキング動作により、運動器系の疾患の患者の動作特性を調べることが目的に実験を行った。その結果を考察し、以下の結論を得た。

1) 本研究のシステムにより、臨床の場で容易に床反力作用点のトラッキング動作の実験を行い、解析ができる。

2) 解析方法としては、動作特性を考察した結果、応答ごとの評価値の分布の表示が有効である。

3) 疾患によっては、その症状に対応づけられる特徴的な評価値の分布の形があることが示され、臨床での評価に利用できる。

4) 健常者の実験から、試行回数を重ねることにより、制御成績が良くなるという学習効果が認められ、また、実験の再現性も確かめられた。

5) 加齢による影響は、60歳代までであれば、考慮する必要がないといえる。

以上のように、体重の移動に関して、評価値の分布の表示という簡易な方法によって、定量的に、しかも視覚的にも分かりやすい評価が行えるようになった。単にフォースプレートによる床反力のデータだけからでも、人間の動作特性を知り、臨床へ応用できるシステムを作ることができることを示せたのは、意義深いことだといえる。

### 参考文献

- 1) 山野井 昇：姿勢制御の定量的解析とその応用，姿勢研究，5(2) (1986)，85-91.
- 2) 石田明允：左右方向加速度外乱に対する姿勢制御系の応答，医用電子と生体工学，22(2) (1984)，130-132.
- 3) 井上和夫他：重回帰分析を用いた制御者の予見動作モデル，システムと制御，26(2) (1982)，106-112.
- 4) 山下利之他：筋ジストロフィー症患者のトラッキング動作の解析，心理学研究，55(2) (1984)，102-108.
- 5) 大西 昇他：体重移動時の逆応答現象の解析，計測自動制御学会論文集，18(5) (1983)，520-526.
- 6) 大西 昇他：ステップ入力に追従した体重の左右移動動作パターンの解析，電子通信学会論文誌，66(A-4) (1983)，320-327.
- 7) 大西 昇他：立位時トラッキング動作の解析と評価，バイオメカニズム 5，(1980)，168-178，東京大学出版会.
- 8) 小堀 聡他：マイコンによる重心トラッキング動作実験装置の試作，第30回システムと制御研究発表講演会論文集，(1986)，163-164.
- 9) 小堀 聡他：重心トラッキング動作の実験システムと臨床における評価方法，第7回バイオメカニズム学術講演会予稿集，(1986)，31-32.
- 10) 藤木文彦：98 マシン語，技術評論社 (1984).
- 11) 藤田英時：PC-Techknow 9800，システムソフト(1983).
- 12) 伊藤宏司他：人間の安定化動における学習過程と非線形性について，電気学会論文誌，96(C-5) (1976)，109-115.



## THE EVALUATION OF DYNAMIC BALANCE BY MEANS OF TRACKING MOTION

Satoshi KOBORI\*, Toshihiko YONEDA\*\*, Kazuo HIROSHIMA\*\*\*, Keiro ONO\*\*\*

*\*Kurume Institute of Technology, \*\*Osaka University Hospital, \*\*\*Osaka University Medical School*

Postural control is widely studied by various methods. But there are few studies of the dynamic balance in standing posture. Tracking motion is studied to investigate the dynamic balance function. Tracking motion means that the subject on the force plate shifts his body weight according to the reference points on the CRT display. The purpose of our study is to analyze the characteristics of dynamic balance.

For this study, we have developed a system using a micro computer, with a force plate as the measuring instrument. Using this system, we can perform an experiment on the tracking motion in standing posture, and we can display the distribution of the parameters. We have applied this study to patients and experimented on normal and pathological subjects. We analyze the results using the distribution of the parameters.

This paper summarizes the system with the analysis method, examines the results in normal and pathological subjects, and discusses the relation of the parameters and the disorders, with reference to the learning effects and the aging

problem. The following results are observed:

(1) Using this system, we can experiment and evaluate the tracking motion in standing posture almost instantly.

(2) The experimental results indicate that it is effective for the evaluation method to display the distribution of the parameters.

(3) In some disorders, there are unique distributions of the parameters that correspond to their clinical conditions. Thus, it is indicated that the system can be applied to patients.

(4) There are learning effects in which the scores get better as the normal subjects repeat the trials, and reproducibility is also recognized.

(5) The results for subjects aged from 30 to 70 suggest that they can perform the motion as well as those in their 20s. Thus, it is not necessary to consider the aging problem when the subject is younger than in the 7th decade.

As is mentioned above, for body weight shifting, quantitative and visual evaluation can be based on the display of the distribution of the parameters. Therefore, this system is effective for clinical application.