

両手変換運動試験の客観的評価に関する研究

新潟大学教養部（指導 新潟大学脳研究所神経生理学部門：丸山直滋教授）

岡 田 美保子

Computer-Based Analysis of Alternate Pronation
and Supination of Forearms

Mihoko OKADA

General Education Department, Niigata University

*(Director: Prof. Naoshige MARUYAMA, Department of
Neurophysiology, Brain Research Institute, Niigata University)*

A computer-based method for evaluating alternate pronation and supination of forearms (diadochokinesia test) has been developed. Forearm movements are converted into digital signals through a specially designed recording instrument. Tracings of movements are stored in a computer, and their rapidity and dexterity are quantified by ten parameters. An analysis was made by the method on the groups of healthy people and the patients with methylmercury poisoning, and significant differences were observed between the two groups.

In all six parameters are defined as those related to dexterity. To establish a summary measure for dexterity, the principal component analysis was applied to the patient group, and the first principal component was adopted as the summary measure. The scores of the measure were compared with visual rankings given by five persons (four doctors and one secretary) for some sample tracings of movements, and close agreement was obtained between the measure and human judgment.

As a final step of the study, a microcomputer-based device fully equipped to analyze diadochokinesia tests was implemented. The device has been made compact so that the test may be performed at the bedside and the tracings of the movements as well as the computed measurements are obtained immediately. The device will make the rapid quantitative analysis of diadochokinesia test possible in clinical practices.

Key words: Diadochokinesia test, computer analysis of forearm movements,
pronation and supination of forearms, microcomputer based device,
quantification of dexterity.

ディアドコキネージア テスト, 前腕運動のコンピュータ分析, 前腕の回内回外運動,
マイクロコンピュータ内蔵型装置, 巧緻性の定量化.

Reprint requests to: Mihoko OKADA
General Education Department, Niigata
University, Niigata City, 950-21 JAPAN.

別刷請求先: 〒950-21 新潟市五十嵐2の町 8050
新潟大学教養部 岡田 美保子

協調運動障害の診断のため、両手の変換運動反復試験 (Diadochokinesia test) がよく行われる。この検査は患者にできるだけ速く回内回外運動を行わせて、障害の有無や程度、あるいはその種類などをみるものである。従来その判定は医師の主観によるしかなかったが、神田ら¹⁾は DIADOCHO-METER と呼ばれる変換運動の記録装置を開発し、運動の客観的測定を可能にした。著者らはこの装置の出力波形について幾つかのパラメータを定義し、それをコンピュータで計測する方法を開発した²⁾³⁾。神田⁴⁾はさらに変換運動の周期、振幅、速度などのパラメータについて健康人における年齢変化や性差、左右差など、正常値について詳細な検討を行っている。

これらのパラメータは主として運動の速さをみるものであるが、診断上では反復のリズムや「動きのぎこちなさ」など、運動の巧緻性も問題になると考えられる。そこで著者は医師が観察する際着目すると考えられる個々の特徴を取り上げ、これを記述する一連のパラメータを新たに定義した。

本分析法の有用性を検討するため、先に神田が取り上げた運動の速さを表すパラメータに今回定義した運動の巧緻性を表すパラメータを加えて、疾患群 (水俣病)、対照群の2群からなるおよそ600例を対象として分析を行った。

また巧緻性を表すパラメータに対して主成分分析を行い、医師の観察による判断ときわめてよく一致する主成分を導出することができた。

さらに従来用いていた入力装置 (DIADOCHO-METER) とミニコンピュータを組み合わせて分析する方法を改良し、マイクロコンピュータを内蔵した装置を開発したので、この新しい分析装置についても述べる。

本研究は上記の新知見を加え、一連の研究成果をまとめたものである。なお、これらの研究成果の一部は先に報告している^{5)~8)}。

変換運動試験の実施方法

1. 対象

疾患群 (水俣病患者群)、対照群合せて598例のデータを用い、コンピュータによる分析方法の開発およびその有用性に関する検討を行った。表1に両群の内訳を示す。疾患群には水俣病認定患者のほか、水俣病申請中、未申請などの例も含まれるが、本稿ではこれらをまとめて疾患群と呼ぶ。

2. 検査方法

変換運動試験は a) 右手だけ、b) 左手だけ、c) 両

表1 疾患群、対照群内訳

	疾患群 ¹⁾	対照群 ²⁾
男 性	101	219
女 性	175	103
計	276	322

1) 年齢層 4~84才, 平均51.5才。

2) 年齢層 19~83才, 平均45.8才。

手同時を行い、これらをそれぞれ右片手試験、左片手試験、両手試験と呼ぶ。被験者は通常の diadochokinesia test の姿勢をとり、およそ5秒間回内回外運動をできるだけ速く、大きく繰り返す。

変換運動のコンピュータへの入力は、神田らが開発した記録装置 DIADOCHO-METER¹⁾ (竹井機器) を用いて行う。装置全面には2本の回転軸があり、その先端部分を被験者の手の平にバンドで固定する。回転軸は内部でポテンシオメータに接続されており、被験者が回内回外の運動を繰り返すと、回転角度に比例した電圧 (時計方向90°の回転で+1.5V, 反時計方向90°で-1.5V) が出力される。オンラインで分析する場合は DIADOCHO-METER の出力を直接コンピュータに入力し、オフラインで分析する場合はデータレコーダに記録する。

コンピュータによる分析方法

1. 前処理

分析用プログラムは FORTRAN (一部アセンブリ言語) を用いて、ミニコンピュータ PDP 11/34 (DEC 社製) 上で開発した。DIADOCHO-METER またはデータレコーダの出力を A/D 変換器に入力し、毎秒200点のサンプリングを行う。一方の手の運動について1024

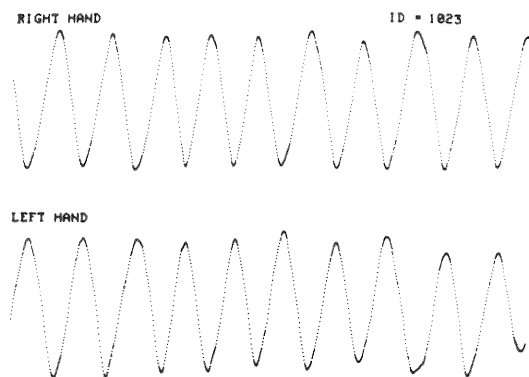


図1 コンピュータの画面に表示された変換運動の波形

ポイントのデータを主記憶装置に格納し、5点移動平均法による平滑化処理を施す。これをコンピュータの画面に表示すると図1のような波形が得られる。上は右手、下は左手の運動をそれぞれ表す。

2. パラメータの定義

図2は右手の波形を表し、上昇曲線は回外運動、下降曲線は回内運動にそれぞれ対応する。図中、縦線で波形の各谷の位置を示すが、以後1つの谷から次の谷までの区間を1周期と考える。(谷の位置の検出アルゴリズムについては後述する。)1つの周期の始点、終点、頂

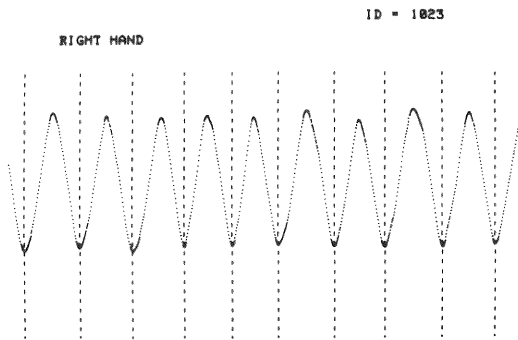


図2 周期の終点を識別した後の右手波形

点をそれぞれ p_1 , p_2 , p_3 と表すとき、次のように定義される項目 $x_1 \sim x_{11}$ を各周期の波形ごとに計測する(図3)。

x_1 : p_1 , p_2 間の時間。

x_2 : p_1 , p_3 の間の振幅。

x_3 : p_3 , p_2 の間の振幅。

x_4 : 曲線上のサンプル点から p_1 , p_2 を結ぶ直線までの鉛直線の長さをその点の高さと呼ぶとき、区間 p_1 , p_2 の全サンプル点における高さの総和 ($p_1 p_2$ と曲線で囲まれる面積)。

$x_5 \sim x_{11}$: $p_1 p_2$ と曲線で囲まれる面積を7本の鉛直線で8等分し、各鉛直線上のサンプル点の高さ。

これらの計測値に基づいて、波形全体の巧緻性を表す6個のパラメータの値と、速さを表す4個のパラメータの値を計算する。以下に各パラメータの計算式を定義する。ただし全波形を構成する周期の個数を N とし、第 i 番目の周期における $x_1 \sim x_{11}$ の値をそれぞれ $x_{1i} \sim x_{11i}$ と表す。

巧緻性に関するパラメータ

(1) 類似度

巧緻性の一つの目安として、各周期の波形が互いにどの程度似通っているかを定量的に表す。類似性を表す指

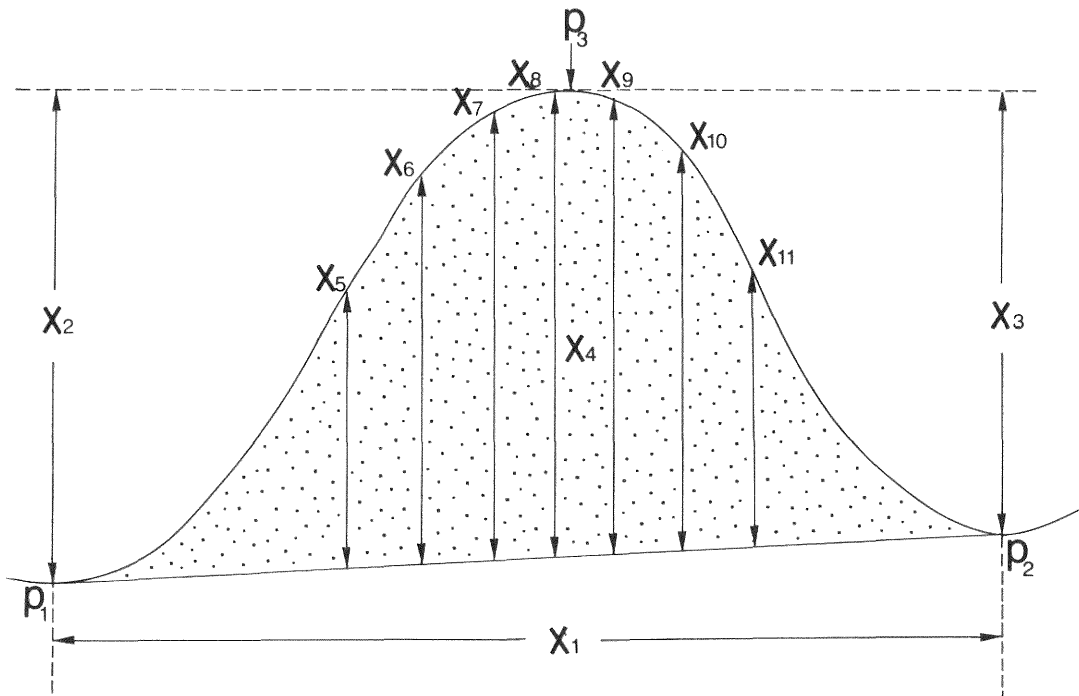


図3 パラメータの定義に用いる記号法

標はパターン認識の分野で数多く提案されているが^{9)~11)}、ここではまず第*i*周期と第*j*周期の波の類似度を表す d_{ij} (座標空間上の距離) を次式により定義する。

$$d_{ij} = \sum_{l=1}^4 (x'_{li} - x'_{lj})^2 + \sum_{l=5}^{11} (x'_{li} - x'_{lj})^2 / 7$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, N, i < j)$$

ただし

$$x'_{li} = x_{li} / \bar{x}_l, \quad \bar{x}_l = \sum_{j=1}^N x_{lj} / N$$

$$(i = 1, 2, \dots, N, l = 1, \dots, 11)$$

d_{ij} は、その値が小さいほど第*i*周期と第*j*周期の波がより類似していることを表す。 d_{ij} は任意の2つの周期間で波の類似性を表すが、運動全体としての巧緻性を考える場合には、連続する2個またはそれ以上の周期がどの程度似通っているかが問題になる。そこで連続する($k+1$)個の周期間の平均距離を

$$D_k = \left\{ \sum_{l=1}^{N-k} \left(\sum_{i,j=l, l+1, \dots, l+k} d_{ij} \right) / \binom{k+1}{2} \right\} / (N-k)$$

$$(k = 1, 2, \dots, N-1)$$

なる量 D_k で表し、これを用いてパラメータ「類似度」を

$$\sum_{k=1}^{N-1} D_k / (N-1)$$

と定義する。

(2) 相似度

類似度は波の形と大きさを共に考慮した指標であるが、形だけの類似性に着目した指標として相似度を定義する。第*i*周期と第*j*周期の波の形(大小関係を除外した)に関する距離 d_{ij}^* を

$$d_{ij}^* = \sum_{l=5}^{11} (x_{li}^* - x_{lj}^*)^2 \quad (i, j = 1, 2, \dots, N, i < j)$$

と定義する。ただし x_{li}^* は x_{li} を第*i*周期の波の高さの最大値で割った値を表す。さらに D_k の式において d_{ij} を d_{ij}^* で置き換えた式を D_k^* と表し、パラメータ「相似度」を

$$\sum_{k=1}^{N-1} D_k^* / (N-1)$$

と定義する。

(3) 変動係数

計測項目 $x_1 \sim x_{11}$ の*N*個の区間における変動係数を

$$s_l = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{li} - \bar{x}_l)^2 / N} / \bar{x}_l \quad (l = 1, 2, \dots, 11)$$

と表す。これを用いて

$$\begin{aligned} (1 \text{ 周期時間の変動係数}) &= s_1 \\ (\text{振幅の変動係数}) &= (s_2 + s_3) / 2 \\ (\text{面積の変動係数}) &= s_4 \\ (\text{高さの変動係数}) &= \sum_{i=5}^{11} s_i / 7 \end{aligned}$$

と定義し、パラメータ「変動係数」をこれら4つの値の平均値として定義する。

(4) 平滑度

1つの周期を構成するサンプル値の列を y_1, \dots, y_n と表す。各サンプル値 y_i に対し、その前後の7ポイント $y_{i-3}, \dots, y_i, \dots, y_{i+3}$ にあてはめた最小2乗直線の傾きを y'_i と表し、これを第*i*番目のポイントにおける波形の勾配と定義する。すなわち y'_i の計算には

$$y'_i = \sum_{k=i-3}^{i+3} k \cdot y_k \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

なる式を用いる。図4(a)にコンピュータの画面に表示した原波形(上段)と勾配(中段)のグラフを示す。さらに相対勾配 y_i^* を次式により定義する(図4(b)参照)。

$$\begin{aligned} y_i^* &= y'_i / y'_{i_1} \text{ for } y'_i \geq 0 \\ &= y'_i / y'_{i_2} \text{ for } y'_i < 0 \end{aligned} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

ただし

$$y_m = \max\{y_i | i = 1, \dots, n\}$$

$$y'_{i_1} = \max\{y'_j | j = 1, \dots, m\}$$

$$y'_{i_2} = \min\{y'_j | j = m+1, \dots, n\}.$$

図4(a)の下段は相対勾配のグラフである。波形が滑らかならば相対勾配は $[1, \ell_1], [m, \ell_2]$ の区間では単調に増加し、 $[\ell_1, m], [\ell_2, n]$ の区間では単調に減少すると考えられる。そこで相対勾配の1点おきの変化量 $z_j = y_{j+2}^* - y_j^*$ を用いて1周期の波形の滑らかさを

$$\left(\sum_{\substack{l_1 \leq j \leq m, \\ z_j \geq 0}} z_j - \sum_{\substack{l_2 \leq j \leq n, \\ z_j < 0}} z_j \right) \times 100 / x_4$$

なる量で表し、その*N*個の周期における平均値をパラメータ「平滑度」と定義する。

(5) 尖度

1周期の波形の尖り度合いをその区間における相対勾配の平均値

$$\sum_{j=1}^n y_j^* / n$$

で表し、その*N*個の周期における平均値をパラメータ「尖度」と定義する。

(6) 対称度

第*i*周期における波形の対称性の度合いを

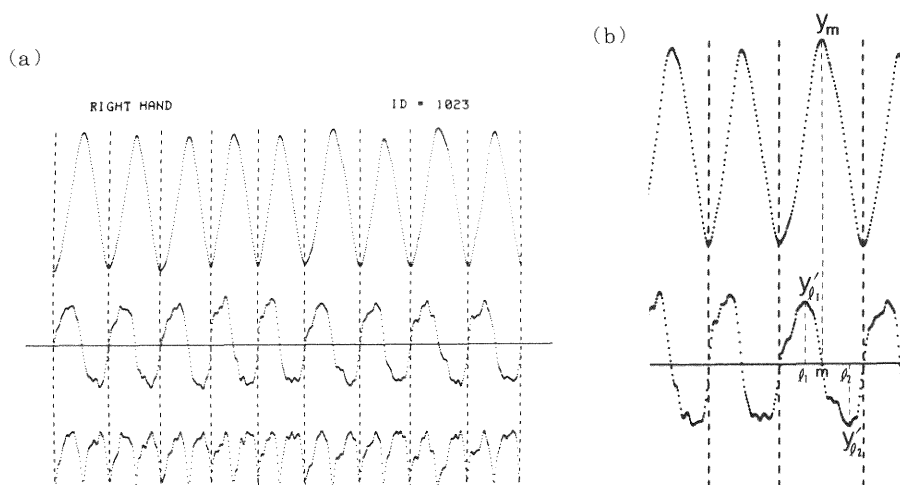


図 4 変換運動のグラフ

(a) 上段より順に原波形，勾配，相対勾配をそれぞれ表す。
 (b) 勾配の最大値と最小値。

$$\sum_{j=1}^n (y_j' / |y_j'|) \cdot y_j$$

なる値で表し，そのN個の周期における平均値をパラメータ「対称度」と定義する。

図 5 に速さ，巧緻性の異なる数例の右手波形を示す。表 2 はこれらの波形について各パラメータの値を計算した結果である。（ただし結果を表示する際は，読み易くするため直接得られる計算値を定数倍し，整数値として表している。）尖度を除き各パラメータはいずれも値が小さいほど波形はより巧緻性が高いと考えられる。尖度は波形に平坦な部分があると（たとえば図 5c）小さい値となる。先端の平坦な波形は変換運動の方向切り替えの遅れを表すことから，尖度の場合は値が大きいほど巧緻性が高いと解釈される。尖度は相対的な速度変化に

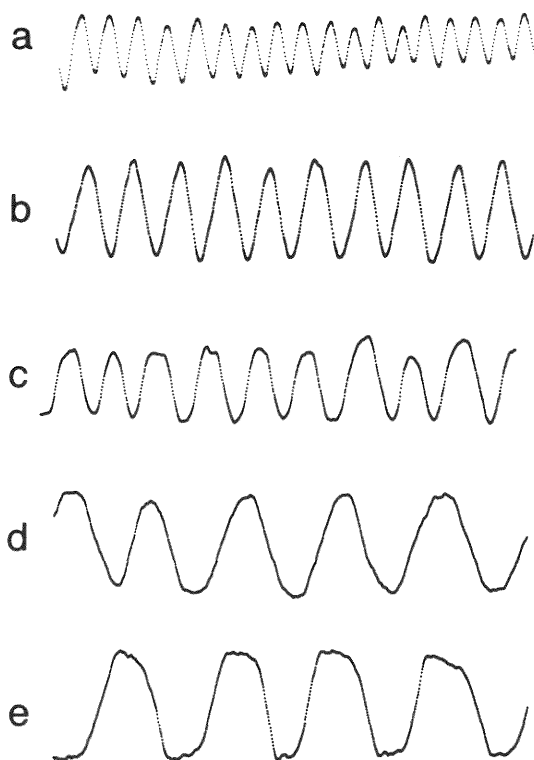


図 5 速さや巧緻性の異なる右手波形の例

表 2 図 6 の波形に対する巧緻性のパラメータの値

	a	b	c	d	e
類似度	24	4	20	11	2
相 似 度	1	1	2	2	4
変 動 係 数	21	6	13	9	4
平 滑 度	0	6	4	20	16
尖 度	65	65	50	51	39
対 称 度	6	6	16	8	20
Z	-1.32	-2.27	1.00	0.17	0.62

に基づいて計算され、絶対速度には依存しない。たとえば図5の波形cとdでは速さは明らかに異なるが両者の尖度はほぼ等しく評価されている。

速さに関するパラメータ

速さについては先に定義した往復時間、回転範囲、回転速度⁵⁾⁶⁾に加えて、今回新たに最大勾配を定義する。以下に各パラメータ(N周期の平均値)の定義を示す。

(1) 往復時間

$$\sum_{i=1}^N x_{1i}/N$$

[注: 先の報告⁵⁾⁶⁾ではこのパラメータを「持続時間」と呼んでいる.]

(2) 回転範囲

$$\sum_{i=1}^N (x_{2i} + x_{3i})/N$$

(3) 回転速度

$$\sum_{i=1}^N \{(x_{2i} + x_{3i})/x_{1i}\}/N$$

(4) 最大勾配

$$\sum_{i=1}^N \{|y'_{1i} - y'_{2i}|/2\}/N$$

ただし y'_{1i} , y'_{2i} はそれぞれ第 i 周期における y'_{1i} , y'_{2i} の値を表す (巧緻性に関するパラメータ (4) 参照)。

3. 周期の識別

サンプリングした波形に対する周期の始点識別アルゴリズムを以下に示す。入力データは片方の手につき1024ポイントのサンプル値の列で、平滑化処理の後、主記憶装置のバッファ内に格納されているものとする。

[始点識別アルゴリズム]

step 1 バッファ内先頭のサンプル値にポイントをセットする。

step 2 ポインタから開始して単調に減少する長さ k の数値列を捜す (k の決定法は後述)。見つかったならば数値列の終点にポイントをセットして step 3 へ。バッファの最後まで見つからなかった場合は step 4 へ。

step 3 ポインタから開始して、単調に増加する長さ k の数値列を捜す。見つかったならば数値列の始点を1周期の始点として記録し、ポイントを列の終点にセットして step 2 へ。

step 4 識別した各周期について、その周期内における波形の頂点 (最大値) を求める。

step 5 各周期について、その周期の頂点と後続周期の頂点との間の最小値を求め、その位置をあらためて後続周期の始点とする。

数値列の長さ k の値はおおよそ600例のデータを用いて実験により決定した。ただしその際、周期性のほとんど認められない波形や運動を途中で中止してしまったものなど、目で見ても始点の識別が困難な波形は事前に除外した。 k の値が小さすぎる場合は遅い波形に対して False Positives が、逆に大きすぎる場合は速い波形に False Negatives が生じてしまう。 k を段階的に変化させたところ $k=7$ のとき False Negatives は1つもなく、また False Positives も最も少なかった。この場合の False Positives は機械的なノイズや振せんなどによる細かい振れに対して生じたものである。 False Positives があると周期間の距離 d_{ij} の最大値が異常に大きな値となることから、最初 $k=7$ として始点の検出を行い、 d_{ij} の最大値がある域値を越えたら k の値を3増して始点の検出をやり直す、という方法をとった。この方法によると、対象とした全波形において False Positives, False Negatives は皆無であった。

有用性の検討

疾患群、対照群あわせて598例を対象として (表1)、本分析法の有用性について検討した。正規分布との適合度検定を行ったところ、定義したパラメータのうち類似度、相似度、変動係数および平滑度については対数正規分布に従うものと考えられたので、これら4パラメータのデータには事前に対数変換を施した。

1. 2群の差に関する検討

疾患群と対照群の間には年齢差がある (表1参照)。変換運動の速さに関するパラメータについては著明な年齢による変化が認められている⁴⁾。そこで巧緻性の検定に際しても両群から同一の年齢層を抽出し、各パラメータの両群における差異について検討した。対象は疾患群167例 (35才~60才, 平均49.0才)、対照群173例 (40才~65才, 平均49.9才) である。表3に両群の平均値と標準偏差、および平均値の差に関する検定の結果を示す。巧緻性に関する1から4のパラメータについては対数変換後の値で平均値と標準偏差を示しているが、参考のため [] 内に対数変換前の値の平均値の95%信頼限界を示す。差は速さに関する4パラメータで特に顕著であるが、巧緻性についても相似度、平滑度、尖度に明らかな差が認められた。

回内回外の反復が極端に遅い場合異常は明らかであるが、疾患群には比較的速く反復できる例も多い。そこで次に往復時間のほぼ等しい例 (330ms から 450ms の間) だけを選んで比較を行った。該当例は疾患群で70例

表 3 同一年齢層における疾患群と対照群の比較

	疾患群 (n=167)	対照群 (n=173)
速さ		
1. 往復時間	519.2±250.5	363.7±74.9 ^{***}
2. 回転範囲	247.6± 73.8	307.6±64.2 ^{***}
3. 回転速度	53.3± 18.9	86.5±19.8 ^{***}
4. 最大勾配	4.8± 1.3	7.1± 1.4 ^{***}
巧緻性		
1. 類似度	-3.7±0.9 [9.0, 11.9]	-3.8±0.9 [8.0, 10.4]
2. 相似度	-3.8±0.8 [1.9, 2.4]	-4.1±0.6 ^{**} [1.5, 1.8]
3. 変動係数	-2.3±0.5 [9.2, 10.7]	-2.3±0.4 [9.1, 10.3]
4. 平滑度	1.0±1.3 [4.4, 6.6]	0.7±1.3 [*] [3.4, 5.1]
5. 尖 度	54.4±7.4	60.1±4.8 ^{***}
6. 対称度	5.2±2.4	5.0±2.7

平均年齢は疾患群 49.0才，対照群 49.9才。数値は平均値±標準偏差を表す。

速さ 1～3 のパラメータの単位はそれぞれ ms, degrees, degrees/100ms。

巧緻性 1～4 については [] 内に出力時の大きさでの平均値の95%信頼区間を示す。

*p=0.05, **p=0.0001, ***p<0.00001。

(平均 388ms)，対照群で158例(平均 384ms)である。

表 4 に結果を示すが，疾患群の回転範囲は対照群に比べ明らかに小さい。また巧緻性に関しては類似度，相似度，変動係数に差が認められた。

2. パラメータの相互関係

定義した10個のパラメータに年齢を加えて11変数とし，対照群のデータを用いて相関行列を計算した。相関係数(単相関)は多くのパラメータの間で高い値となり，全部で55の組合せのうち絶対値で 0.3を上回るものが22組あった。中でも類似度と変動係数 ($r=0.97$)，最大勾

表 4 往復時間を一定にした場合の疾患群と対照群の比較

	疾患群 (n=70)	対照群 (n=158)
速さ		
1. 往復時間	———	———
2. 回転範囲	244.0± 59.8	317.1±62.8 ^{**}
3. 回転速度	63.1± 15.5	82.9±16.4 ^{**}
4. 最大勾配	5.4± 1.2	7.1± 1.4 ^{**}
巧緻性		
1. 類似度	-3.6±0.8	-3.9±0.8 [*]
2. 相似度	-3.9±0.7	-4.2±0.6 [*]
3. 変動係数	-2.3±0.4	-2.4±0.4 [*]
4. 平滑度	0.7±1.0	0.7±1.3
5. 尖 度	57.8±4.1	58.8±4.1
6. 対称度	5.3±2.5	5.1±2.7

往復時間の平均値は疾患群 388ms，対照群 384ms。数値の単位は表 3 に同じ。

*p=0.01, **p<0.00001。

配と回転速度 ($r=0.73$)，往復時間と尖度 ($r=-0.72$)などの組合せに高い相関がみられた。次に偏相関行列を求めたところ，単相関では高い値を示した多くの組で偏相関は小さい値となり，絶対値で 0.3を上回るものは全部で8組となった。しかし往復時間，回転範囲，回転速度の3パラメータの3つの組については偏相関は単相関より著しく大きな値となった。表 5 にこれら3パラメータの間の単相関係数と偏相関係数を示す。一般に複数の変数(要因)が互いに関連し合うとき，偏相関係数は他の要因の影響を除外した上での2変数間の直接的な関係を表すと考えられる。これら3パラメータの相関は「1往復に要する時間が長いほど回転の範囲は大きく，また往復時間が短いほど，あるいは回転範囲が大きいほど回転速度は速い」という変換運動のごく自然な性質として解釈され，巧緻性や年齢など他の要因の影響を除去すると，健常者ではこの性質が顕著に現れると考えられる。

表 5 パラメータ間の相関関係(対照群)

	単 相 関			偏 相 関		
	往復時間	回転範囲	回転速度	往復時間	回転範囲	回転速度
往復時間	1.00	0.45	-0.47	1.00	0.93	-0.86
回転範囲		1.00	0.56		1.00	0.92
回転速度			1.00			1.00

表 6 パラメータ間の相関関係 (疾患群)

	単 相 関			偏 相 関		
	往復時間	回転範囲	回転速度	往復時間	回転範囲	回転速度
往復時間	1.00	0.26	-0.67	1.00	0.80	0.66
回転範囲		1.00	0.36		1.00	-0.59
回転速度			1.00			1.00

疾患群についても同様に単相関、偏相関行列を求めてみた。単相関係数では絶対値で0.3を上回るパラメータの組合せは27組、偏相関では12組となったが、往復時間、回転範囲、回転速度の3パラメータの間には対照群のような明瞭な関係は見出せなかった(表6に単相関、偏相関行列を示す)。往復時間と回転速度、回転範囲と回転速度との偏相関はそれぞれ健常者の場合と符号が逆になっており、自然と思われる変換運動の性質が疾患群では成り立っていないことがわかる。往復時間と回転速度の偏相関についてもっと具体的に言えば、往復時間が長くなるような病的状態では波形が角張る傾向があるため、回転速度(最大速度)はかえって大きくなる場合も多く、健常者における自然の関係が成立しなくなる。回転範囲と回転速度の偏相関についても全く同じ事が言える。

巧緻性の総合評価

1. 主成分分析による指標の定義

巧緻性を表す目安として6個のパラメータを定義した。各パラメータはそれぞれ波形の特徴を記述する上で有用であるが、総合的に変換運動がどの程度巧みであるといえるのか、個々のパラメータをみても明らかではない。そこで6個のパラメータを変数として主成分分析¹²⁾¹³⁾を適用し、導出される第1主成分を巧緻性の総合指標として用いることにした。疾患群のデータを用いて相関行列より計算したところ、表7に示す固有値を得た。最大固有値2.60より、第1主成分の総分散に占める割合は43.5%と計算される。表8は第1主成分の固有ベクトルと因子負荷量である。結局巧緻性の総合指標は表8の固有ベクトルを係数とする6個の変数の1次式Z(ただし各変数はデータを基準化して用いる)として定義される。

Zは6変数の1次結合からなるあらゆる関数の中で、疾患群データに対する分散が最大となる。すなわち6変数を座標軸とする6次元空間における疾患群のデータの分布を考えると、Zはその分布の広がり、の最も大きい

表 7 固有値および累積寄与率

主成分	固有値	累積寄与率
1	2.60	0.43
2	2.03	0.77
3	0.72	0.89
4	0.31	0.94
5	0.31	0.99
6	0.03	1.00

表 8 第1主成分の固有ベクトルと因子負荷量

	固有ベクトル	因子負荷量
類似度	0.420	0.677 (0.459)
相似度	0.548	0.885 (0.782)
変動係数	0.365	0.589 (0.347)
平滑度	0.411	0.663 (0.440)
尖度	-0.329	-0.531 (0.282)
対称度	0.337	0.545 (0.297)

() 内の数値は第1主成分の各パラメータに対する寄与率を表す。

方向に一致する、新しい座標軸となっている。表2の最後の行は図5の波形に対して計算されたZの値を示す。

2. 人による評価との比較

速さと異なり巧緻性については客観的な評価基準がない。そこで巧緻性の総合指標としてのZの有用性について検討するため、次のような実験を行った。まず往復時間の長さにより疾患群の波形を7つのクラスに分け、各クラスからそれぞれ8ないし10個の波形を選んだ。これら7組の波形を5名の被験者(うち4名は医師)に示し、各クラス内で運動の巧緻性が高いと思われる順に順位をつけてもらった。ただしその際「巧みさ」の解釈については一切各自に任せ、また同順位は幾つあってもよいことにした。例として図6に7番目のクラス(往復時間の一番長いクラス)全例の波形を示す。これらの波形に

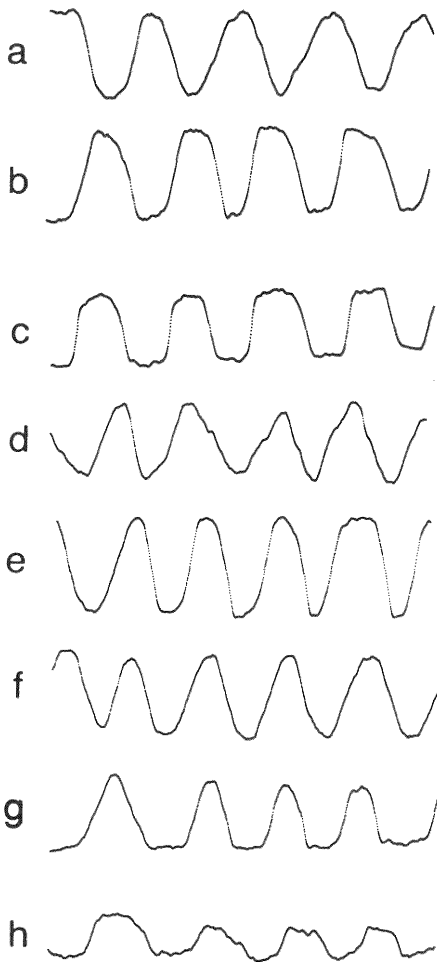


図 6 巧緻性の評価の実験に用いたクラス 7 の全波形

表 9 図 7 の波形に対する判定者の順位づけと Z のスコア

	A	B	C	D	E	Z
a	3	3	4	1	2	0.44
b	1	5	3	2	3	0.62
c	2	6	5	2	3	0.66
d	5	8	7	4	4	2.53
e	1	1	2	3	1	0.59
f	2	2	1	1	1	0.17
g	4	4	6	3	3	2.41
h	6	7	8	5	5	4.70

表10 表 9 に示す順位データの間の順位相関

	A	B	C	D	E	Z
A	—	0.63	0.86	0.55	0.71	0.69
B	0.63	—	0.83	0.57	0.95	0.83
C	0.86	0.83	—	0.74	0.92	0.93
D	0.55	0.57	0.74	—	0.71	0.88
E	0.71	0.95	0.92	0.71	—	0.93
平均	0.69	0.75	0.84	0.64	0.82	0.85

対する 5 名 (A～E の記号で表す) の順位づけは表 9 のようになった。表には Z のスコアも示してある。こうして得られた人による順位づけと Z のスコアがどの程度一致しているかをみるため、各判定者とそれぞれ他の判定者との間、および各判定者と Z との間でスピアマンの順位相関係数を求めた。表 9 の順位づけに対する順位相関は表10の通りである。表11は 7 つのクラスに対する順位相関をまとめた結果で、第 1 列目から 5 列目は個々

表11 順位相関係数の平均値

クラス	往復時間	例数	A	B	C	D	E	Z
1	～300	9	0.90	0.82	0.84	0.87	0.89	0.93
2	300～400	10	0.93	0.88	0.93	0.92	0.91	0.95
3	400～500	9	0.95	0.91	0.94	0.89	0.95	0.97
4	500～600	9	0.69	0.71	0.84	0.80	0.83	0.78
5	600～700	9	0.91	0.85	0.89	0.86	0.92	0.83
6	700～800	8	0.96	0.91	0.97	0.93	0.97	0.97
7	800～	8	0.69	0.75	0.84	0.64	0.82	0.85
7 クラスの平均値			0.86	0.83	0.89	0.84	0.90	0.90

A～E の列は各判定者和其他の 4 名の判定者との順位相関の平均値を、Z の列は総合指標 Z と 5 名の判定者との順位相関の平均値を表す。

の判定者について他の4名の判定者との順位相関を平均した値を、最後の列はZと各判定者との相関の平均値を示す。スコアZは全クラスを通じて人の判定とよく一致していることがわかる。

マイクロコンピュータ内蔵型の分析装置

1. 開発の目的

以上コンピュータによる変換運動の分析方法とその有用性の検討について述べた。分析を行うには実験室向けのミニコンピュータをはじめ A/D 変換器、グラフィックディスプレイ、プロッターなど特殊な機械設置を必要とする。同様の設備を設けることは一般に容易ではなく、病院・診療所等で本分析法を利用する場合、オンライン分析は困難である。日常臨床においてはどこでも簡単に検査が実施でき、その場でただちに分析結果が得られることが望ましい。そこで以下のような設計目標の下に、マイクロコンピュータ内蔵型の変換運動分析装置を開発した。

- a) 小型、軽量で病棟内での移動も容易である。
- b) 分析結果および変換運動の記録波形がその場でハードコピーとして得られる。
- c) マニュアルなどを参照せずに誰にでも簡単に操作ができる。
- d) 分析機能の変更や拡張が容易である。

2. 装置の概要

図7に試作した装置を示す。装置全体の大きさは幅43cm、奥行き36cm、高さ20cmで、通常は高さ45cmのキャリアに載せて使用する。上部パネルには5インチモニターテレビ、ドラム型X-Yプロッター（17cm×17cm×7cm）、キーパッドおよび電源スイッチがある。モニターテレビは検査者に対して19°上向きに置かれている。装置背面には前出のDIADOCHO-METERと同様の2本の回転軸が設置されている。

図8に機器構成のブロック図を示す。回内回外の運動はポテンシオメータ、A/D変換器（COSMOS A/D HZ-201、分解能12ビット）をへて数値化された後、マイクロコンピュータへと入力される。マイクロコンピュータシステムはマイクロプロセッサ6502、48KバイトのダイナミックRAM、16KバイトのROM、および各種I/Oインタフェースからなる。入出力装置としては操作のキーパッド、計算結果や波形の表示用にモニターテレビとプロッタ、またデータの保存用にフロッピーディスクが備わっている。

3. 操作法と出力例

ソフトウェアは先にPDP 11/34上で開発したFORTRANプログラムをマイクロコンピュータ用としてBASIC（一部機械語）に変換した。電源を投入するとただちにシステムが稼動し、患者IDを聞いてくる。これに答

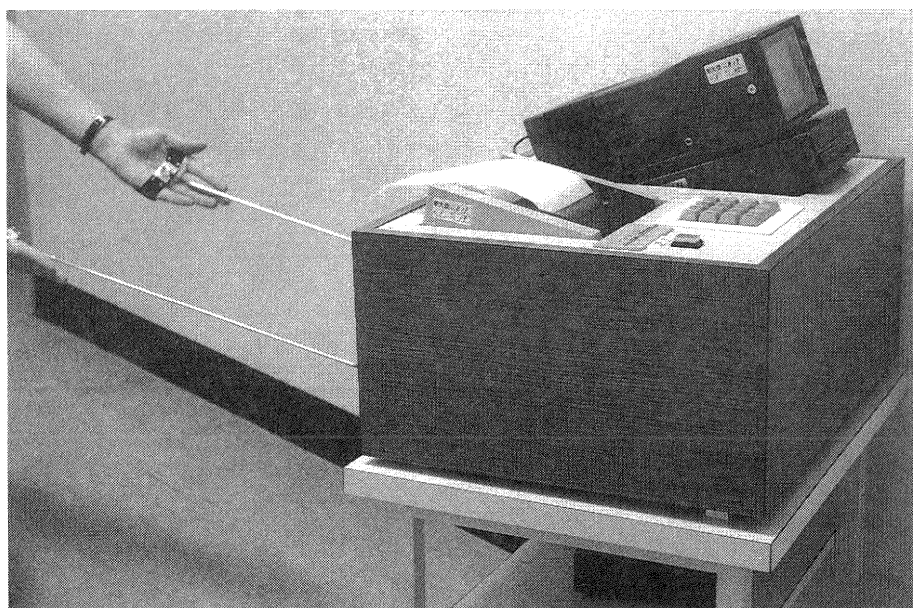


図7 試作したマイクロコンピュータ内蔵型変換運動分析装置

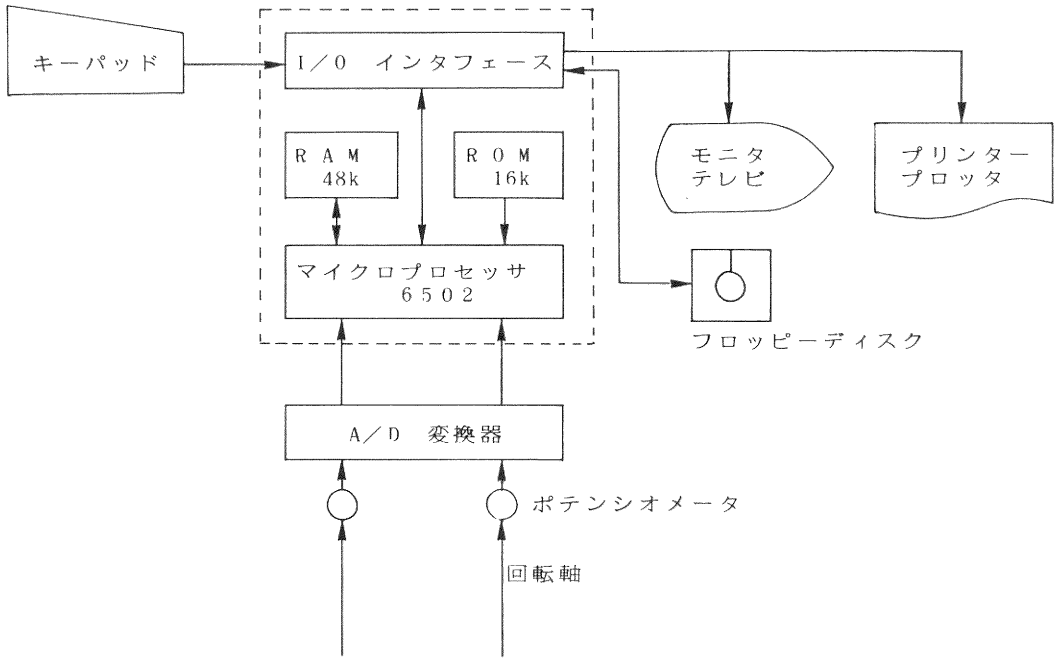


図 8 変換運動分析装置のブロック図

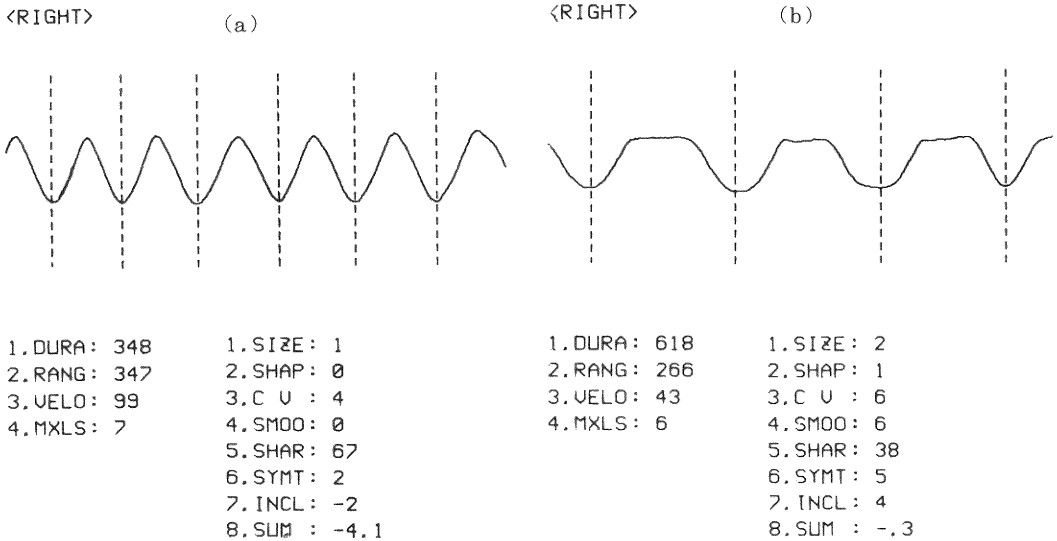


図 9 分析結果のプロッター出力例

(a) は健康者, (b) は脳梗塞の例.

えると続いて

PRESS ENTER KEY TO START

と表示し, 待ち状態となる. ここで検査者は被験者に対

し回内回外運動開始の合図を与え, 同時に ENTER キーを押す. すると約5秒間の変換運動が数値化されて RAM 領域内に格納される. システムはこれをグラフ表示した

後、メニューにより 1) 右片手試験, 2) 左片手試験, 3) 両手試験の選択を促してくる。この選択に応じて第2章で述べた分析を行い、波形と各パラメータの値を出力する。図9にプロッターに出力された波形と分析結果を示す。(a)は健康者、(b)は脳梗塞の例で、下方左側は速さに関するパラメータの値を、右側1から6は巧緻性に関するパラメータの値をそれぞれ表す。右側の7は対称度とほぼ同様に定義されるパラメータであるが、正負の符号により波形の傾き(右寄り、左寄り)の傾向を区別している。8は巧緻性の総合指標Zの値である。

考 察

両手の回内回外運動を数値化して波形として表し、速さと巧緻性を表すパラメータを定義した。パラメータの有用性については対照群、疾患群(水俣病)の2群からなるデータを用いて検討した。両群からはほぼ同一の年齢層を選んで比較したところ、両群には速さを表す全パラメータと、巧緻性のうち方向切り替え時の遅れを反映する尖度で特に顕著な差異が認められた。従来から水俣病では運動が遅延することが専門医により指摘されているが、本法により初めてこれを幾つかのパラメータに分析し、それらを定量的に表すことができた。次に往復時間のほぼ等しい例を選んで両群を比較したところ、回転速度、最大勾配に顕著な差がみられたが、これは疾患群で回転範囲が狭いことに基づくものである。さらに巧緻性では、類似度、相似度、変動係数で対照群と疾患群に明らかな差が認められた。これらのパラメータは変換運動の反復のリズムを反映すると考えられ、この結果より疾患群では反復のリズムに乱れが生じると言える。なお尖度には差が見られないが、これは往復時間のほぼ等しい例を選んだためである。疾患群で往復時間の長い例では尖度は小さくなり、前述のごとく全体の比較では尖度の差は顕著である。

巧緻性については、リズムや動きの滑らかさ、方向転換の素早さなど個々の運動特徴に対応するパラメータを全部で6個定義したが、これらの特徴を総合的に評価するため、6個のパラメータを変数として主成分分析を施し、導出された第1主成分Zを巧緻性の総合指標として定義した。複数個の波形について、5人の判定者による巧緻性の順位づけとZのスコアを比較したところ、両者は非常によく一致し、Zの値と判定者との一致の度合いは判定者同士のそれを上回ってさえいた。すなわちZのスコアは複数の人の判断を片寄りにくく安定して表すことができたと言える。「巧みさ」はある程度主観に依存す

る概念であり、絶対的な評価基準がない。したがってZが巧緻性の指標として正しいか否かを論じることとはできないが、この実験結果より少なくとも応用の上では、Zは有用な客観指標と考えられる。

本分析法の利用を容易にするため、分析用ソフトウェアをマイクロコンピュータに移植し、単体で機能する変換運動分析装置を試作した。装置は小型、コンパクトに設計されており、診察室やベッドサイドなどに持ち運んで検査を実施し、その場で結果を得ることができる。またマイクロコンピュータを内蔵しているため、分析機能の拡張や更新が容易である。今後は臨床医の協力を得て医療の現場での使用を重ね、分析機能、装置の使いやすさ等について検討し、改良を加えてゆきたい。

要 約

(1) 両手変換運動試験(diadochokinesia test)の客観的評価のため、運動の特徴を定量的に記述する方法を開発した。変換運動のコンピュータへの入力には記録装置DIADOCHO-METERを用いた。

a) 記録波形に平滑化を施し、周期の始点を自動的に識別するアルゴリズムを開発した。

b) 巧緻性を表す指標として類似度、相似度、変動係数、尖度、平滑度、対称度の6個のパラメータを定義した。

c) 速さの指標として、先に定義した往復時間、回転範囲、回転速度の3パラメータに加えて、今回新たに最大勾配を定義した。

(2) 疾患群(水俣病)、対照群合せて598名を対象として検討し、次の結果を得た。

2群の平均値について

a) 両群の同一年齢層を比較した結果、疾患群における運動の遅延が明らかとなった。また相似度、尖度、平滑度にも有意な差があり、疾患群は動きの滑らかさにおいても対照群に劣ると考えられる。

b) 両群で往復時間のほぼ等しい例を比較した結果、疾患群では反復が速くできる場合でも、回転範囲が狭いため結局運動速度が遅く、また巧緻性についてもリズムに乱れがあることが明らかになった。

パラメータ間の関係について

a) 対照群では周期の往復時間が短いほど回転範囲は狭く、また往復時間が短いほど、または回転範囲が大きいほど回転速度が速い。全パラメータに対して偏相関分析を行った結果、年齢や巧緻性の影響を除去すると、この関係は一層顕著になることが示された。

b) 疾患群に対する偏相関分析の結果、対照群で観察された上記の変換運動の性質は疾患群の中では成立しないことが示された。

(3) 巧緻性の総合指標を定義し、その有用性について検討した。

a) 巧緻性を表す6個のパラメータを変数として主成分分析を行い、導出された第1主成分Zを巧緻性の総合指標として定義した。

b) 実験の結果、Zのスコアは人の観察による判断と非常によく一致し、巧緻性の総合指標としての有用性が確かめられた。

(4) 従来の分析方法を改良し、分析に必要な機能をすべて1台に搭載したマイクロコンピュータ内蔵型の分析装置を開発した。本装置は小型、コンパクトに設計されているため、病室などに持ち運んで検査を実施し、その場で分析結果を得ることが可能である。

謝 辞

本研究は新潟大学脳研究所神経生理学部門丸山直滋教授の御指導の下で行った。研究を進めるにあたり終始御批判、御教示いただき、また本稿の御校閲をいただいた丸山教授に心から感謝する。また燕労災病院神経内科神田武政部長、新潟大学医学部検査診断学教室岡田正彦助教授には度重なる御討議と御助言をいただいた。さらに分析装置の開発には脳研究所神経生理学部門田村尚末氏、多賀信義氏より御協力いただいた。ここに深く感謝の意を表す。

本研究の一部は昭和58年度文部省科学研究費（奨励研究A）の援助を受けて行った。

参 考 文 献

- 1) 神田武政, 丸山直滋: 変換運動反復試験 (diadochokinesia test) の記録法, 神経内科, 5: 467~468, 1976.
- 2) 岡田美保子, 神田武政, 丸山直滋, 白川健一, 岡田正彦: Diadochokinesia test の定量分析, 神経内科, 9: 70~72, 1978.
- 3) 岡田美保子, 神田武政: Diadochokinesia test の定量的分析方法, 臨床脳波, 21: 447~454, 1979.
- 4) 神田武政: 健康人における協調運動機能の定量的研究, 新潟医学会雑誌, 96: 46~63, 1982.
- 5) Okada, M. and Okada, M.: A method for quantification of alternate pronation and supination of forearms, Comput. Biomed. Res., 16: 59~78, 1983.
- 6) 岡田美保子, 岡田正彦, 神田武政, 丸山直滋, 白川健一: 前腕回内回外運動のコンピュータ分析—規則性の評価を中心として—, 最新医学, 39: 413~418, 1984.
- 7) 岡田美保子, 岡田正彦: マイクロコンピュータを内蔵した両手変換運動分析装置の試作, 医療情報学, 4: 25~29, 1984.
- 8) Okada, M., Kanda, T., Okada, M. and Maruyama, N.: A microcomputer-based device for quantitative analysis of alternate pronation and supination of forearms, J. Clin. Eng., 10: 157~169, 1985.
- 9) Tomek, I.: A clustering technique in the classification of almost periodic waveforms, Comput. Biomed. Res., 5: 621~628, 1972.
- 10) Tomek, I.: Two quantitative measures of similarity of one class of waveforms, Comput. Biomed. Res., 6: 499~508, 1973.
- 11) Anderberg, M.R.: Cluster analysis for applications, Academic Press, New York, 1973.
- 12) Rao, C.R.: The use and interpretation of principal component analysis in applied research, SANKHYA, 26: 329~358, 1964.
- 13) Kendall, M.: Multivariate analysis, Griffin, London, 1980.

〔特別掲載〕（平成元年4月24日受付）