

汎用運動プログラムをめぐる運動記憶研究の展開

— 書字の問題を中心に —

東北大学 仁 平 義 明

1. 序

「汎用運動プログラム」という概念の発想そのものは次の通り単純である：文字を書くときのように、熟練した運動パターンを遂行するには、その都度運動のシーケンスをすべて新たに企図することはしないだろう。熟練運動には、すでに長期記憶として貯蔵されている運動生成のための記憶すなわち運動プログラムを利用する。そのプログラムは、同じような運動パターンなら少しずつ違うものごとに別々なプログラムが用意されているわけではない。たとえば大きめの「あ」、小さな「あ」、右上がりの「あ」、右下がりの「あ」を書くために、別々な運動プログラムが貯蔵されていることはない。それは、ある程度パタンのバリエーションを一つのプログラムでカバーできるように汎用化されたプログラムになっている。一つの汎用化されたプログラムのパラメータ（たとえば、運動の絶対的な速度、大きさ、力、方向などのパラメータ）を場合に依りて指定することで個々の運動パタンのバリエーションが作りだされる。

これが汎用運動プログラムの骨子となる考え方である。記憶の経済性という観点からすれば、至極あたりまえの発想である。しかし、近年の運動記憶の研究は、この発想の実験的証拠を提出し、運動記憶の構造を具体的に明らかにしようとしたところに特色がある。ある運動パタンのヴァリエーション群の集合がなぜ一つの共通のプログラムによって生み出されたものだと結論できるのか。また運動パタンのどういう側面の特徴がそのプログラムに組み込まれている特徴であるかについての実験的証拠の提出である。運動の熟練過程では何がどう変化するのかという運動学習の理論もそうした研究を通じて、大きく塗りかえられてきた。

Adams (1987) によれば、運動学習に関する研究の発展はおよそ三つの歴史的時期に区分される。第一期（初期：1880～1940）、第二期（中期：1940～1970）、第三期

キーワード：運動記憶、運動プログラム、書字、相対的タイミング、漢字

(現在の時期：1970～現在)である。第一期は、運動学習研究の古典的なテーマが登場し、基本的な現象の記述が出そろった時期。運動の学習曲線、練習の配分(集中練習対分散練習)、訓練の転移、結果の知識、運動記憶の保持、運動技能の個人差などがそのテーマであった。

第二期は、それらの現象に影響する諸変数の実験的検討がさかに行われ、理論の構成を試みようとした時期である。ただしその理論は、運動研究の領域からの独自の運動学習理論ではなく、C.L. Hullの行動理論のような一般的な学習理論を類推的に適用するのにとどまっていた。その後、第二期後半の1960年代は、入力の情報処理という観点からの初期の認知心理学の隆盛のためあって、運動学習の研究は一時影をひそめる状況だったとAdamsはいう。

第三期は、運動の研究の分野内で独自の理論化が行われだした時期である。「運動研究による運動のための運動独自の学習理論」の形成であるといってもよいかもしれない。ここにきて運動学習の理論は、一般的学習理論のアナロジーとしての理論から、学習によって運動制御過程の何がどのように変化するかという運動制御理論としての運動学習理論へと脱皮をする。この時期は、Adams(1971)によるフィードバック概念を中心にした運動の閉回路制御理論の提出にはじまり、さらにこの論文で問題とする運動のスキーマ理論(汎用運動プログラム理論)をSchmidt(1975)が提出したことで大きな理論上の転換がとげられた。Adamsはそう自画自賛している。

運動学習の心理学的研究が展開される中で、汎用運動プログラムという概念は最も重要なキー概念としての役割を果たした。しかし、Schmidt(1975)以来およそ15年。運動プログラムという用語の意味も、その理論の評価も、すでに幾度かにわたって変化をしている。また、運動プログラムという概念の引用がされる時、どの時期のどのような運動プログラム概念をさしているかに混乱もみられる。

そこで、本論文では、汎用運動プログラムをめぐる実験的な研究の展開を追って運動記憶についての考え方の変化を概観し、今後の研究の方向づけを試みたいと思う。その際、特に書字運動記憶の問題を中心にして考察をすすめることにしたい。というのは汎用運動プログラム研究の最も中心的な領域になったのが、この書字運動の問題だからである。

それには、次のような理由が考えられる。まず、書字運動は熟練度が特に高い運動であり、熟練運動の制御のモデルをつくるのに適した対象であること。同じ文字が速度を変えたり、サイズや字の傾きなどを変えたりと、運動としてはいくらでも異なるかたちで書かれるので、運動プログラムの汎用性の問題を扱うには好都合だったこと。従来から書字の分野では筆跡の恒常性が問題にされており、汎用運動プログラムによる運動の恒常的特徴という考えと直結しやすかったこと。書字運動の一つのシーケンスが分析しやすい適度な長さのシーケンスで構成されていること。コンピュータに接続したディジタイザの使用などによって、ミリ秒単位の微細な書字運動過程の記録と分析が容易に

なっていたことなどである。

2. 運動の記憶の諸相

汎用運動プログラムの問題に入る前に、運動の記憶に関する用語を整理しておく必要があるだろう。

一概に運動記憶といっても、運動に関してつくられる記憶には、いくつかのかたちの表象が可能である。Heuer (1985) は、運動パタンの記憶表象に次のような4種類の表象をあげている：①運動的表象（運動の時空間的なパタン生成の指令の記憶表象で、運動の遠心性指令に変換される）、②筋運動感覚的表象（運動に伴伴する筋運動感覚の記憶表象）、③空間図形的（映像的）表象（運動経過の視覚的な記憶表象）、④シンボルによる（言語的）表象（“右方向にぐいと大きくまげ、次に真下に…”など運動の言語的記述の記憶）。

これらの形態の記憶のどれもが運動を遂行する上で重要であり、それらが相互に緊密に結び付いているには違いない。しかし、運動記憶という表現を用いるとき、その用語がどの種類の記憶表象を指しているのかは明確に意識していなければならない。「運動記憶」や「運動イメージ」などの表現は、ふつう①の「運動をつくりだす運動指令そのものの記憶」の意味と、②の「運動の実行に伴伴して経験される筋運動（内受容）感覚の記憶」のどちらかの意味で使用されることが多い。ときには③の視覚表象としての運動の記憶をさしていることもある。あるいはその区分を曖昧にして使用されている場合もある。

この論文で扱う運動プログラムは、あくまでも①の意味の運動の実行に直接につながる「運動指令に変換される記憶」である。「運動記憶」という言葉も、特にことわらないかぎりには、同じように①の貯蔵されている運動生成指令の意味で使用する。

このほか Schmidt (1975) が定義する運動の「再認スキーマ」、「再生スキーマ」は、適切な運動プログラムの変数を指定したり、行った運動の適切さを評価するための知識ベースとしての記憶の意味であるが、これについては、後の節で述べよう。

3. 初期の「運動プログラム」の考え方

汎用運動プログラムという考えにいたる過程で、その初期の理論は汎用性を想定しない単なる「運動プログラム (motor programs)」という概念を提案している。その基本的発想は、記憶の経済性というよりは、むしろ、熟練運動の迅速性を説明しようとしたときに素朴なかたちでのフィードバック理論には限界がある点にあった。つまり、運動の感覚的なフィードバックに基づいて修正をしながら熟練運動が遂行されるのでは、熟練運動がもつスピードは出ない。だから前もって準備された一定の運動のプログラムを実行するかたちで運動が遂行される。こういう考え方が生まれる。運動制御のフィードバックに基づく閉回路制御重視の考え方に対する開回路制御重視の考え方である。

熟練行動が感覚フィードバックによる制御ではついていけないスピードで遂行されるという指摘は、すでに古く、Lashley (1951) によってもなされている。ただし、この指摘は、彼以前の古典的な S-R 理論の「運動の連合連鎖説」に対する反論として提出されたものであった。運動の連合連鎖説は、系列的な運動パタンの実行は、一つの運動部分が反応として実行されるとそれが次の運動部分の条件刺激となるかたちで徐々に連鎖的に実行されていくという考えをとっていた。Lashley によれば、音楽の演奏家が、ある順序で指を変えながら弾くパッセージにおいて指のストロークは 1 秒あたり 16 回 (1 ストローク 62.5 ms) にも達する。この運動の継起は 100 ms オーダーの視覚単純反応時間にくらべはるかに短い時間である。したがって、熟練運動が感覚に基づいてコントロールされるとは考えにくい。一つの運動シーケンスは「感覚—運動反応の連鎖」ではない。熟練運動では、「前もって定められた強度や持続時間で興奮し、さまざまな筋肉群を前もって定められた順序で活性化するような中枢神経機構を仮定する必要がある」というのが彼の考えであった。

熟練運動は末梢からの感覚フィードバックによる制御では間に合わないという主張は、後の時期の研究者も述べている。Wing (1979) によれば、書字のタイミングの時間分析をすると、アルファベット (筆記体) の典型的な書字スピードは 1 秒あたり 4 文字で、1 ストローク分の遠動時間は 40 ~ 70 ms の範囲になる。このような短時間の運動の継起は、前の運動部分の終りの視覚的フィードバックを受け取ってから次の運動を調整するかたちの制御方式をとるのにはあまりに短い時間である。したがって、書字のような一つの運動シーケンスを制御する指令は、フィードバックに基づいて行われるのではなく、シーケンスのすべてが運動に先立って準備されているはずであるという。

このような考え方を代表する初期の「運動プログラム」概念と定義は、Keele (1968) に見ることができる。

運動プログラムとは、一つの運動シーケンスが開始される前に構成される一セットの筋肉指令であり、その全シーケンスが末梢のフィードバックに基づかないで実行されることを可能にするものである (Keele, 1968)。

この定義にある初期の「運動プログラム」概念は、①フィードバックに依存しない運動制御、②運動遂行に先立つ全運動シーケンスの準備、の二つの要素を含んだ概念である。この段階の運動プログラムの考え方には汎用性という要素はまだ含まれていない。

4. Schmidt による運動学習のスキーマ理論

——「運動プログラム」から「汎用運動プログラム」へ——

しかし Keele の定義は、運動学習にとって未解決な二つの問題 (Schmidt, 1975) を残してしまう。一つは、プログラムの貯蔵の問題 (the storage problem)、つまり記

憶の経済性的問題である。運動プログラムが少しずつ異なる運動パタンごとにつくられるとすると、膨大な数のプログラムを貯蔵することが必要になる。たとえば書字運動には、主として三つの筋肉と関節のシステムが関与している (Wing, 1979)。第一は、親指、人差指、および中指の屈曲と伸展で、これはアルファベットでは、通常、文字の高さ (y 軸成分) を規定する。第二は、手関節の橈屈と尺屈で、ふつう文字の幅 (x 軸成分) を決定する。第三の肩関節を軸にした上腕の運動はページ内の大きな運動を受け持つ。ただし、これはノートに書くようなサイズの書字での筋肉の使われ方である。黒板に大きく書かれる字や手帳に書かれるごく小さな文字では、使用される筋肉群とその組合せもさらに異なってくる。また書字運動の速度、文字の傾きも状況によって異なる。そのすべての筋肉運動パタン毎に別個の運動プログラムが記憶されるとすると、無数のプログラムが必要になってしまう。不経済である。

第二の問題は運動の新しさの問題 (the novelty problem) である。われわれは厳密な意味で過去と全く同じ運動を繰り返すことはない。それなのに、以前に一度も行ったことのない運動がなぜ可能なのであろうか。

この二つの問題点を一挙に解消する方法は、「運動プログラムという概念を、ある一定範囲の運動群には一つの共通な汎用化された運動プログラムが使用されることを意味するように修正する」(Schmidt, 1975) ことであった。かくして、汎用運動プログラム (generalized motor programs: GMP) を中心にした Schmidt (1975) の運動学習のスキーマ理論が登場する。熟練運動では、①運動パタンのある基本的な特徴だけを記載した汎用化された運動プログラムと、②それを実際のバリエーションのある運動に変換するための法則とが記憶として形成されるという考え方である。彼の運動学習のスキーマ理論では「汎用運動プログラム」、「再生スキーマ」、「再認スキーマ」の三つが主要な概念になっている。

まず、運動プログラムは次のように定義される。

運動プログラムは、いくつかの違った運動パタンに変換することが可能なコードから構成される抽象的な (非特殊的な) 記憶構造である。ある一つのプログラムから生み出される運動パタン群には、反応の間にそれ以外の点では大きな相違があるにしても、ある不変の共通した特徴が存在する。

このような考え方からすると、このプログラムは汎用化されており、プログラムが特定のかたちで実行されるにはパラメータが指定されなければならない (Schmidt, 1975; Schmidt *et al.*, 1979)。

この定義では、運動プログラム概念の中心点が、「フィードバックに依存しない運動制御」という要素から「汎用性」という要素に移っていることがわかる。熟練運動の運動プログラムは必然的に汎用化された運動プログラムであると考えられるようになった。

さて運動プログラムが汎用的、抽象的なものであるなら、それが実際の個々の運動として実現される前にプログラム中のパラメータの値を指定してプログラムを具体化する必要がある。したがって「運動プログラミン」 という用語は、①適切な運動プログラムを選択して、②そのプログラムのパラメータに適切な値を割り当てる、という二つの段階からなる運動の準備過程を指すことになる (Rosenbaum, 1985)。たとえば、ある文字の汎用運動プログラムに文字の大きさの指定がされていないなら、書かれる文字の大きさの指定をしなければならない。しかし、プログラム中の文字の大きさのパラメータの値をどのように指定したら、どんな大きさの運動が実現されるかを知るためには、「パラメータの値と結果の関数関係についての情報」もまた学習されていないといけない。この種のパラメータ決定のための情報である知識ベースを Schmidt は「再生スキーマ」と呼んでいる。この知識ベースは過去の運動経験の累積から作り上げられる。運動学習の一つの側面は、この再生スキーマという知識ベースの豊富化であると考えられる。

Schmidt のスキーマ理論にはもう一つ重要な概念がある。「再認スキーマ」である。これは、過去の運動の結果と運動に伴う感覚との間の関係の法則についての知識である。この知識ベースによって、自分が今行った（あるいは行いつつある）運動が過去に行った運動のどれと同じかを再認し、意図した通りの運動になったか否かを評価することができる。たとえば今ボールを投げたときの筋運動感覚が、前にうまく目標円内に入ったときのそれと同じになっているか、それとも少しずれてしまったときに経験した感覚に近いかなどを認識することが可能になるのである。

Schmidt の考えでは、運動学習とは、練習を通じて①望まれる運動パタンの汎用運動プログラムが形成されること（汎用運動プログラムの形成）、②適切な運動プログラムのパラメータ設定が行えるように再生スキーマの情報がより豊富になること（再生スキーマの形成）、③実行された運動が過去に行った運動と同じになったかあるいは違うものになったかを認識して評価する再認スキーマの情報が豊富になること（再認スキーマの形成）、の三つの要素からなる変化にはかならない。

このように見てくると、スキーマ理論とフィードバックに基づく運動学習の理論との根本的な相違は、単に運動の閉回路制御重視と開回路制御重視という点だけではないことがわかる。学習途上で犯されたエラーの役割をどう考えるかの点でも両者は異なっているのである (Dickinson, 1985)。たとえば、ある一定距離の小円内にボールをうまく投げ入れる学習を考えてみよう。Adams の閉回路理論では、遠くに投げすぎたり、近すぎたりしたエラーは修正されるべき目標値からの逸脱でしかない。だから正しい運動に近い運動が繰り返されるほど、運動学習は進歩するという仮定が導かれる。他方、Schmidt のスキーマ理論では、エラー経験は再生および再認スキーマという知識ベースにデータとして取り入れられ、法則情報をより豊富にするというポジティブな役割を果たすと考えられる。Schmidt (1982 b) は、この種の課題では、一定の決まった距離

の目標で練習した場合よりも、多様な違った距離の目標に投げる練習をしたほうが、結局は成績がよくなることを示す諸実験の結果をあげてスキーマ理論の正当性を主張している。多様な運動経験からは、どんなパラメータ設定をすることでどんなボールの飛びかたをするかというパラメータと運動結果との関係についてより広い範囲にわたる情報が得られるからである。

なお Schmidt (1975) の運動プログラム概念の提案と同時期に、Keeleのもとにあった Summers も運動プログラムの別な定義をしている。ただし、この定義でいう運動プログラムは、ある一定の運動シーケンスを生み出す記憶というだけにとどまっている。

運動プログラムとは、ある運動スキルの系列的な構造を制御するような記憶表象である (Summers, 1975)。

5. 汎用運動プログラムを支持する証拠 —— 相対的タイミング不変仮説 ——

汎用運動プログラム理論からすると、一つの運動プログラムは、「ある不変の特徴」だけは保持しながら、パラメータの調整次第で表面的にはさまざまに異なる運動パターンとして実行される。つまり同じ一つの汎用化された運動プログラムによって作りだされた運動なら、みかけ上違うパタンのようでも、必ずある共通な特徴をもっていることになる。逆にいえば、不変的な特徴を共有する運動パタンのヴァリエーション群が存在することは、汎用プログラムが存在する根拠の一つだと考えられるのである。

さて、汎用運動プログラムに基本的な情報として記憶されている運動パタンの「不変特徴 (invariant features)」とはどんな特徴なのであろうか。また、パラメータ指定によってさまざまに変わる、いわば運動の「表層特徴 (surface features)」(Shapiro & Schmidt, 1982) となるものはどんな特徴なのだろうか。

不変特徴だと考えられたのは、①運動の時間的位相 (phasing) すなわち運動の相対的タイミングと、②相対的な力である (Shapiro & Schmidt, 1982; Schmidt, 1982 b)。前者は運動シーケンスを構成する各部分が占める時間の相対的な比率の不変性である。後者は運動シーケンスの構成部分のどれに相対的に最も力のピークがあるかという力の相対的関係の不変性である。またパラメータの値次第で変化する表層特徴として想定されたのは、①運動の絶対的なスピードないしは運動時間、②運動のサイズ、③運動の全体的な力のレベル、④使用される筋肉の選択、⑤運動の方向や傾きなどである。この考え方からすると、たとえば文字の場合、文字の大きさ、文字の大きさによって規定される使用筋肉群、文字の傾き (右上がり、右下がり)、文字を書く絶対的な速度、あるいは用紙や筆記具の摩擦特性に応じて変わってくる絶対的な力などは、運動プログラムに記載されていない。それらは呼び出された一つの母型となるプログラムのパラメータの値を変えていくことで、自由に変化させられることになる。

熟練運動では相対的タイミングが不変だという実験結果は、腕の運動パターン (Armstrong, 1970), 10 本の手指による一定順序での系列的なキイ押し課題 (Summers, 1975), タイプライティングと書字 (Viviani & Terzuolo, 1980), 歩走行運動パターン (Shapiro *et al.*, 1981) などさまざまな運動について提出されている。これらの研究では、一つの運動シーケンスが全体的に速く遂行されようと、ゆっくり遂行されようと、その運動系列を構成する各部分の持続時間の比率は一定であることが報告された。ある熟練した運動パターンが全体としてゆっくり行われるときには、その運動の各部分もとの時間比を保つような形で実行時間が長くなるのである。たとえば五つの部分から成る一つの運動系列が速く実行されようとゆっくり実行されようと、その各部分の持続時間比はつねに 2 : 3 : 1 : 4 : 7 で変わらないというような現象である。それゆえ「相対的タイミング不変仮説」とも、「比率一定仮説」ともよばれる。

(1) Viviani と Terzuolo の書字およびタイプライティング実験

たとえば、Viviani & Terzuolo (1980) による実験である。図 1 のように、アルファベット「a」を筆記体で書く運動は、四つのストロークから構成される。普通という 1 画とは異なり、この場合、1 ストロークというのは、だんだんに加速していったるピーク速度に達し、次に減速に移り一定の速度の谷に達するまでの運動部分をさして

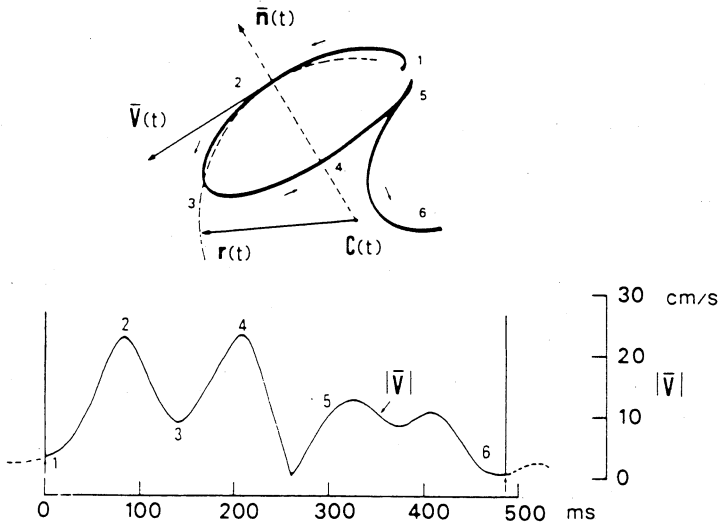


図 1 Viviani & Terzuolo (1980) による「a」の書字運動のストローク解析の一例。「a」の書字運動は、運動の速度が加速されピークに達し次に減速に移り谷にいたるまでの部分を 1 ストロークとすると、4 ストロークから構成されている。

いる（一本の直線を引く場合の運動も普通このような加速—減速の山形速度変化をする）。図2の典型的な例では、この運動の加速—減速という運動位相の相対的なタイミングは、速い速度で書字する場合も、遅い速度で書字する場合も一定である。全体としての書字時間（書字速度）が変化しても、各ストロークの持続時間や速度のピークの位置は一定の比を保ったままのかたちで圧縮されたり、引き伸ばされたりしている。書字は、本来、音楽の演奏のように運動の部分間の相対的タイミングを一定に保つことが表立って要求されているわけではない。このように、ある文字をさまざまな速度で書きわけたときに、全体としての速度の変化にかかわらず、運動パタンの相対的なタイミングが不変であるのは、そうしたさまざまな速度での書字運動が、一つの共通な汎用プログラムによって生み出されている証拠だとされるのである。ただし、彼ら自身は汎用運動プログラムという用語は使わず、「単一の中枢表象」によってコントロールされているという表現をとっている。

彼らの研究で、書字について主張されたのは次の点である：①同じ文字をさまざまに違うスピードで書いた場合、どの場合も速度推移パタンを時間的に伸縮して重ね合せるとほとんど重なり合う相似したパタンになり（図2参照）、相対的なタイミングは不変である。②このタイミング・パタンは文字が単独で書かれる場合だけでなく、単語の中の一文字として書かれる場合も保持される。③同じ文字を、さまざまに違う大きさに書いても、その書字運動の相対的なタイミングはやはり一定である。④署名のような長い運動シーケンスでも、それが極度に熟練度の高い運動シーケンスであるなら、全シーケンスの相対的なタイミングの不変性がみられる。たとえば8文字からなる署名で大中小とサイズを変えても、各ストロークの相対的なタイミングはほぼ不変である。さらに彼らは、書字に限らず、タイプライティングについてもタイミング不変性が成り立つことを例示している。

2人の研究は、汎用運動プログラムという考えにとって強力な証拠として、その後の運動プログラムの問題を扱った論文の中では繰り返してあげられることになった。しかし、彼らのデータは典型例のみを例示したものにすぎないという点には注意が要するだろう。①では1名の被験者、②③④もそれぞれ1名、2名、1名の被験者の例が示されているだけで、その現象が一般的にみられるものかどうか保証されていないからである。

書字での相対的なタイミングの安定性を示唆するデータは、ほかの研究者によっても報告されている。Wann (1986) は字のうまい子どもが、へたな子どもにくらべ、書字の相対的タイミングの安定性が高いことを例示しており、相対的タイミング不変仮説は基本的に支持されると述べている。

(2) Shapiro らの歩行動作分析実験

Shapiro *et al.* (1981) は、歩行と走行パタンの時間的位相を分析して、Viviani &

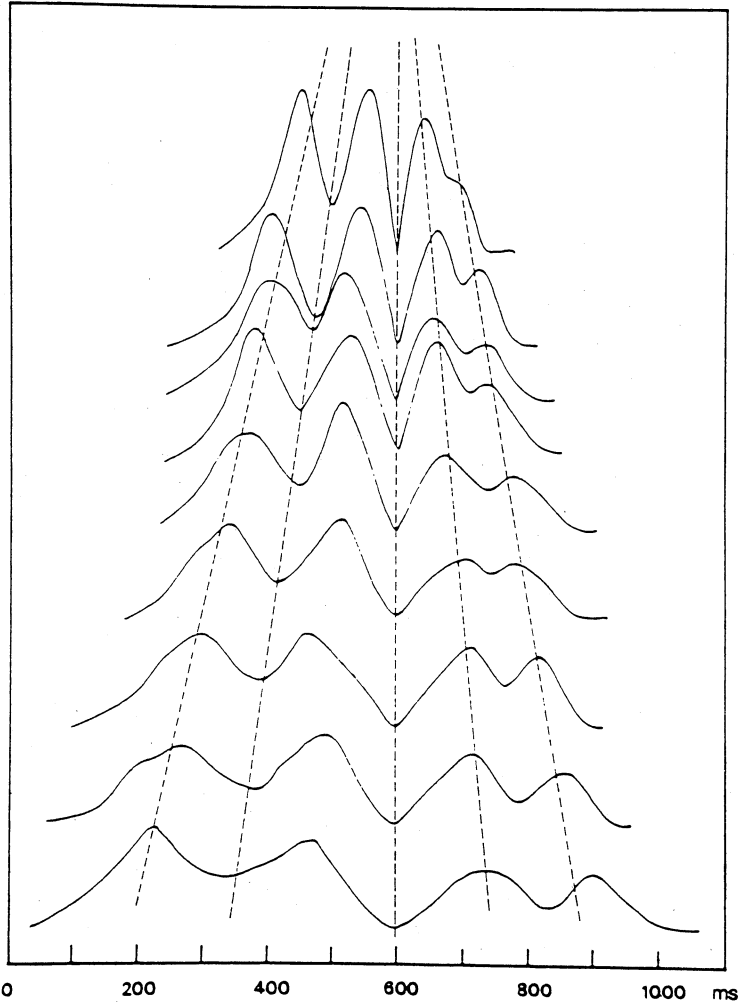


図2 同一被験者が「a」をさまざまな速度で書いたとき、ストロークの相対的タイミングが不変であることを示す例。上のグラフほど速い速度での書字になっている。「a」を書く絶対的な所要時間にかかわらず、どの速度で書いた場合も、各ストロークの所要時間や速度のピーク位置は比例的に変化し、相対的なタイミングは不変であることが例示されている (Viviani & Terzuolo, 1980)。

Terzuoloと同様な相対的タイミングの不変性を報告している。スウィング期（足の振り出し期）の運動の各成分とスタンス期（片足支持期）の各成分の持続時間の占める比率は、絶対的なスピードが変化しても不変だという報告である。書字のような学習性の運動パターンとは違い、歩行や走行は生得的な要素を含んでいる運動パターンだと思われる。しかし、この結果も汎用運動プログラム存在の証拠としてしばしば引用されることになる。

もう一つの不変特徴だとされた相対的な力の不変性については、直接的な証拠は提出されていない（Shapiro & Schmidt, 1982）。

6. 運動プログラムとフィードバックの関係

この後、Schmidt (1982 a) は運動プログラムの定義を次のように変化させている。

運動プログラムとは運動に先立って準備される抽象的な記憶構造である。それが実行されるとき、選択時のエラーの修正につながるようなフィードバックの関与なしに運動を生じさせる筋肉群の収縮と弛緩を引き起こす (Schmidt, 1982 a)。

定義の中に、実行前の運動準備とプログラムの汎用性という要素が含まれている点には変わりない。変わったのは、Keeleの定義(1968)以来いったんその役割を否定されたフィードバック機構が、熟練運動の制御に関与することを部分的に認めた点である。

ここで、Schmidtは2種類の運動のエラーを区別している。ひとつは「選択時のエラー (errors in selection)」, もう一つは「実行時のエラー (errors in execution)」である。選択時のエラーというのは、その運動にとって不適切な運動プログラムを選んでしまったことによる反応のエラーである。たとえば卓球で右回転にカットされたボールに対して左回転のカットを打ち返す運動プログラムを選択したようなエラーで、適切なプログラムを新たに選んでエラーの修正が開始されるためにはおよそ200 msが必要になる。この修正には中枢メカニズムが関与する。実行時のエラーというのは、運動プログラム自体は正しく選択されていても、筋肉系の予想外の疲労や運動対象の予想外の重さ、摩擦などの外乱によって、意図した通りの運動が実行できない場合のエラーである。この種のエラーの修正は脊髄や小脳の反射によって行われ、30～80 ms程度で修正が開始される。したがって、一つの運動プログラムの実行時のエラーならフィードバックによる修正が働きうるというのがSchmidtの考えである。

そもそもKeeleがすばやい熟練運動はフィードバックによる制御を要しないと考えた前提は、感覚フィードバックループによる反応時間が200 ms近くかかり、これでは急速な修正が間に合わないと考えたことにあった。しかし、運動の実行エラーの修正がそれほど時間を要しないことになれば、運動プログラム概念とフィードバック概念を相容れないものとする必要がなくなる。

一つの運動プログラムの実行中にもフィードバックによる急速な修正が行われうる。この考え方を支持する証拠は、Quinn & Sherwood (1983) や Carlton & Carlton (1987) の研究にみることができる。彼らの実験はいったん一つの運動プログラムが選択され、運動が開始されたあとで、その反応をできるだけ早く修正させる実験である。二つの研究とも、レバーを手で水平方向に動かして、指定された目標位置のところまでもっていくという課題が用いられた。被験者がレバーをいったん一定方向に動かしたした後、一定の遅延時間をおいてさまざまな位置に目標が提示される。その提示される目標次第で、被験者は①レバーを動かす方向はそのままですべて速度を速めて目標までもっていく（速度パラメータの値のみを変更する）か、あるいは②スタートした方向とは逆方向の運動に切り替える（新たなプログラムを選択する）かをしなければならない。単に同じ運動プログラムのパラメータを変更するだけですむ場合は、別な運動プログラムを選択し直さなければならない場合にくらべると、はるかに短い反応時間で修正が開始されることが二つの研究に共通に示されていた。Quinn & Sherwood の結果では、合図が反応開始直後に与えられ、しかもパラメータの修正ですむ場合には、運動修正の開始を示す筋電上の変化があらわれるまでの潜時は 122 ms という短いものであった。他方、運動方向の変更つまりプログラムそのものの選択し直しが必要な場合は、通常の単純反応時間並に、200 ms 近く経ってから修正が開始されている。このことは、フィードバックによる運動の急速な修正が一つの運動プログラムの実行中でも可能であることを示唆する証拠だといえるかもしれない。

7. 相対的タイミングは不変か？

汎用運動プログラムの提唱者たちは、運動の相対的タイミングが汎用運動プログラムとして記憶されている主要な情報の一つだと考えた。たとえば Summers (1975) も、運動パタンのシーケンシング（運動のどの要素をどの順序で実行するか）と相対的なタイミング（各要素の持続時間の比率）とは運動プログラム表象の中に一緒に統合された情報として存在していると主張している。

ところが、相対的タイミングの不変性という現象自体に異論が出てきたのである。これまで相対的なタイミングの不変性の根拠とされてきた研究は、積極的に不変「である」ことを統計的に確認するというよりは、むしろ、安定していることをグラフによって示し、さらに相対的なタイミングに「有意な違いがない」という確認にとどまる傾向があったからである。

(1) Gentner による不変仮説への反証

タイプライティングについて、Gentner (1982 a, 1982 b, 1987) は相対的タイミング不変仮説（比率一定仮説）は成り立たないという。Viviani & Terzuolo (1980) は、熟練したタイピストでは少なくとも一つの単語単位で汎用運動プログラムが形成されて

おり、相対的タイミング不変仮説が成り立つことを示唆した。しかし、もしそうなら、タイプ速度の変化にかかわらず、同じ単語内のどの打鍵インターヴァルもつねに同じ割合で伸縮されるはずである。したがって同じ単語が異なる多様な速度でタイプされても、それぞれの打鍵インターヴァル（たとえば with では w-i と t-h）は同じ割合で伸縮されるので、その間には 1 に近い相関がなければならない。Gentner (1982 a) は、実際に職業的タイピストに文章を打たせ、同じ単語が 10 回以上出現する単語について打鍵インターヴァルの変化を分析した。同じ単語内のインターヴァル対間で、有意にゼロより大きな正の相関がみつめられたケースは、全 1517 ケースのうち 12% しかなかった。またこの相関の平均も 0.14 と低い。この結果は相対的タイミング不変仮説を支持しない。

また別な分析をするなら、ある単語を打つための総時間 (T) に占めるその単語内の特定の打鍵インターヴァル ($d(i)$) の割合は、タイプ速度にかかわらず一定でなければならない。したがって、ある単語を打つのに要した時間 (T) に対してその単語内の特定の打鍵インターヴァルの時間の割合 ($d(i)/T$) をプロットしたときの回帰直線の傾きが有意にゼロより大きいなら、不変仮説（比率一定仮説）は棄却されることとなる。すべての打鍵インターバルのうちで、このような比率一定仮説を棄却するような有意にゼロより大きい傾きがあったケースが 5% 以上あれば不変仮説はもはや成立しない (Gentner, 1987)。彼がさまざまなタイプ速度での実験から得た平均棄却率は 41% であった。タイミング不変仮説は維持できない結果である。

ただしこれはタイプライティングについての、しかも単語を運動の 1 シーケンスと考えた場合の反証である。

(2) Nihei による書字運動タイミングの解析

書字について、Nihei (1984) の実験結果は不変仮説に同様な疑問を投げかける。Viviani & Terzuolo (1980) が示した書字での相対的なタイミングの不変性の例とされるものは、一、二の熟練した特殊な被験者による結果だった。もし、多くの一般的な被験者を検討対象にしたとしても、書字の相対的タイミングの不変性は保たれるであろうか。

この研究では、連続して行われた 2 回の書字で、文字を構成する各ストロークの相対的タイミングの類似性（相関）は、その 2 回の書字速度が離れてくればくるほど低下することが明らかにされた。つまり 2 回の書字がそれほど違わない速度で行われた場合だけ、相対的なタイミングが似ていたのである。

実験では、漢字「子」の書字の相対的なタイミングが分析された。被験者は、「子」を自己のごく普通の書字速度、およびその 2 分の 1 の速度で書くことを求められた。書字はパーソナル・コンピュータに接続されたディジタイザ上の紙に行われた。

「子」の書字ストロークは、基本的には、五つのストロークから構成される。結果を

みると、「子」を構成する五つのストロークの相対的な持続時間の割合は、普通で書いた条件と主観的に2分の1の速度で書いた条件の間で、かなり一定しているようにみうけられる。全被験者平均では、どのストロークの占める比率も、普通で書いた条件と2分の1の速度条件の間で数%の差もない。ところが、これをより詳細に検討すると相対的タイミングは必ずしも恒常ではないことがわかる。

被験者が「普通で書いたときの実際の書字時間」と「2分の1」の速度のときの実際の書字時間の比は、被験者間で一定していない。指示された1対2に近い被験者もいれば、1:1.1程度で、ほとんど2回の速度が変わっていない被験者もいる。ここで相対的タイミング不変仮説が成り立つとすれば、このような2回の書字の実際の所要時間の比（速度の比）にかかわらず、ストロークの相対的タイミングは一定でなければならない。

そこで、同一被験者の二つの書字速度条件間でのタイミングの不変性（一致度）の指標として、五つのストロークの相対的な持続時間について二つの書字条件間の相関を求めた。結果は、 $r=0.99$ という高い有意な相関を示す被験者から、 $r=0.21$ と相関が低い被験者まで多様である。この相関の違いを生み出している要因を探ってみると、それは2回の書字における速度の差にあった。2回の書字の速度の差が小さい（1:1に近い）場合はストロークの相対的なタイミングは比較的一致（高相関）しており、2回の書字の速度差（比）が大きい場合は、相対的なタイミングはかなり違って（低相関）いた。そこで、2回の書字の持続時間の比と2回の書字間でのタイミングの一致度（ストロークの相関）との相関を求めると、両者の間には $r=-0.53$ ($p<0.01$)という有意な相関がみられた。つまり、2回の書字が近い速度で行われているほど、相対的タイミングは一致し、2回の書字速度の違いが大きくなればなるほど相対的タイミングは一致しなくなってしまう。この結果は、汎用運動プログラムの相対的タイミング不変仮説の適用を制限することになる。

(3) Teulingsらによる書字運動の不変特徴に関する実験

Teulings *et al.* (1986)も、相対的タイミングが書字の運動プログラムの不変特徴として貯蔵されていないという主張をした。書字で相対的タイミングが恒常であるように見えても、それはもっと恒常的な特徴の結果として二次的に派生するのであって、相対的タイミングが本来的に恒常だからではないと彼らは考える。各ストロークの相対的な所要時間が一定になりやすいのは、各ストロークの高さの相対的な関係が恒常であるために、それを書く運動の相対的な所要時間も一定になりやすいからである。だから本来的に恒常であるストロークの相対的な高さ（空間的特性）のほうが、その結果であるストロークの相対的持続時間（時間的特性）よりも恒常的なはずだというのである。

実験では「mehelmen」という疑似単語を筆記体で書く課題が用いられた。被験者はこれを、①ディジタイザ上の紙に自分が一番書きやすい速度で、②その2倍の速さで、

③半分の速さで、④低摩擦面（トランスベアレンシーシート）に普通の速さで、の4条件で書くことを求められた。各条件16試行。このとき、運動の空間的特性、時間的特性、力の特性がそれぞれの書字条件を超えてどれだけ恒常的で変動の少ないものであるかが比較された。空間的特性というのは、「mehelmen」を構成する各ストローク（全部で29ストロークで構成される）間の相対的高さである。時間的特性は同様に各ストロークの相対的な持続時間、力の特性は各ストロークの加速度から推測された相対的ピークの力である。

これらの特性の恒常性を比較するために彼らがとった一つの方法はそれぞれの特性の「SN比」というべきものを求めることだった。ある特性の平均的な状態をシグナルとし、一回一回の試行が平均からどれだけ変動しているかをノイズとする。このとき全試行をした平均ノイズが小さい、すなわちSN比が高いものほど恒常的な特性であるとする考えである。彼らは、このような考えに基づいて計算された平均SN比からすると、空間的特性が最も変動の少ない安定したものであり、時間的特性にくらべてはるかに安定性の高いものであることを確認した。

彼らは、結局のところ書字運動プログラムの不変特徴として長期記憶に保存されている情報は、①文字のトポロジカルな構造、②ストローク構成のシーケンス、③文字を構成する各ストロークの空間的なサイズの比率の三つだと考えている。（Teulings, 1988, p.45）。

（4） Wann と Nimmo-Smith による書字タイミングの分析

さらに、Wann & Nimmo-Smith (1990) も書字での相対的タイミング不変仮説は棄却せざるをえないという。彼らは、Gentner がタイプライティングで使用した検討方法を書字に適用して不変仮説の当否を検討した。分析されたのは「select」と「delete」の二つの単語の書字運動であった。各単語が、書字速度と書字サイズを変えながら多数回書かれた。この二つの単語とも最初の文字を除いたそれぞれ10ストロークが分析対象となった。

各ストロークの持続時間がその単語の書字の全持続時間に占める割合が一定であるかどうか、Gentner のタイプライティングの分析と同様に検討された。結果では、この各ストロークの時間の割合が書字のサイズの変動によって有意に変化してしまう率（棄却率）は平均30.4%にもなった。不変仮説は、タイプライティングと同様、書字についても成立しない。

このようにして、相対的なタイミングが恒常だということ自体が疑問視されるようになってしまったのである。

8. 汎用運動プログラム理論のゆくえ

汎用運動プログラム理論が広く受け入れられていった最大の原因は、相対的タイミン

グの不変性という興味深い現象が各種の熟練運動で、当初次々と報告されたことにあつたらう。表面的には差異のある運動パターンが共通のプログラムから生まれるという主張にとって、相対的タイミングの不変性は説得力のあるわかりやすい現象だったのである。ところが、その後詳細な検討がなされていくと、その実験結果は相対的タイミング不変仮説を支持しなかった。汎用説は、最大の拠り所を失ったかのようにみえる。議論にもまだ最終的な決着がついていない段階ではあるが、汎用運動プログラム理論に残された今後の方向について考えることにしたい。

(1) 汎用運動プログラム理論の縮小とその問題点

汎用運動プログラム理論に残された一つの方向は、内容を一部修正し、適用範囲を縮小することにより説を維持することである。

これについては、まず、タイミング不変仮説に対する反証実験とされたものは、限定つきのものであることを指摘しておかなければならないだろう。それは、Gentner によるタイプライティング実験にしても、Teulings *et al.* や、Wann & Nimmo-Smith による書字実験にしても、一つの単語を単位にして汎用運動プログラムがつくられる、したがって単語全体の時間の長さに応じて各ストローク時間が一定比率を保ったまま伸縮するという前提に立っていたことである。Viviani & Terzuolo (1980) は単語単位でも相対的なタイミングが一定である例を示しているので、以上のような実験はその反証にはなる。けれども、それは文字単位で汎用運動プログラムがつくられていることに對する反証ではない。

とはいえ、アルファベットでは1文字が3ないし4、あるいはせいぜい5～6ストロークで書いてしまう。1単語全部の長いシーケンスに不変性がみられることが理論として面白いのであり、短いシーケンスの運動に話を限定することはあまり魅力がないことになる。したがって、今後、1文字単位で汎用運動プログラム理論の当否を検討することはまず行われまいと思われる。

また、確かに、Teulings *et al.* (1986) は、相対的タイミングが汎用運動プログラムに記載されている基本的な要素ではないことを指摘した。だからといって彼らは汎用運動プログラムそのものを否定したわけではない。プログラムの基本的な記載内容が、当初考えられた相対的タイミングという時間的特性ではなく、各ストロークの相対的高さという空間的特性である可能性を指摘しただけである。しかし、この空間的特性の不変性は、相対的タイミングほどには他の熟練動作にも共通して観察しやすい現象ではないため、書字という分野を超えて汎用運動プログラム理論一般を支えるほど強力な証拠とはなりにくい。タイミング不変説が成り立たないことが今後確実になったとしたら、運動プログラム理論は「汎用性」を以前ほど声高に主張することはなくなると考えられる。

(2) 運動プログラムのリタルランド—アッチェレランド

しかしそれでもなお、おおまかにみた相対的タイミングは、全くめちゃくちゃに変動するわけではなく、“かなり”安定しているといつてよい。そのことは別な可能性を考えさせる。運動プログラムには相対的タイミングが記載されているが、それは硬直した不変のものではなく、柔軟な伸び縮みが可能なものではないかという可能性である。フレキシブルな相対的タイミングの発想といえよいだろう。

たとえば音楽でのリタルダンドやアツチェレランドがそうである。リタルダンドやアツチェレランドがかけられるとき、各音のタイミングは小節単位で均一に縮小あるいは拡大されていくのではなく、1小節内でもだんだんに縮小されていったり拡大されていったり変化する。楽章の初期に各拍均一のタイミングで提示されたテーマが、再び楽章の最後で再現されリタルダンドされたり、アツチェレランドされて終わるようなとき、両者の相対的タイミングは決して一致はしない。

同様に書字でも、一つの文字の書き出しの部分から最後の部分にかけてだんだんに速度を速めていったり、だんだん遅くしていくようなことは容易に行えると思われる。実際そのようにして書いた経験は誰にでもあるだろう。相対的タイミング自体にもフレキシビリティを認めることは、運動プログラムの汎用性の主張と必ずしも矛盾しない。逆に、運動シーケンスのリタルダンドやアツチェレランド実験は、運動のタイミング制御に関する新たなアプローチとして考えたときにも興味深いものをもっているといえる。

書字運動記憶についていえば、汎用性の問題は相変わらず解決しなければならない問題でありつづける。同一人物が書いた文字は、使用される筋肉の違い他の運動条件を超えて恒常性や一貫性を感じさせることは否定できない (Merton, 1972; Smyth & Wing, 1984)。フレキシブルな相対的タイミングという発想は、汎用性という概念を維持する考え方の一つの方向であるかもしれない。

(3) 運動系の特性の考慮

もう一つの方向は、運動プログラムによるタイミング制御について中枢レベルと末梢レベルの2段階の制御を考えることで、理論をそのまま維持しようとするものである。たとえば Heuer (1988) は、中枢での運動指令については相対的タイミング不変が成立しているが、末梢の筋肉骨格系の実行レベルでは運動のタイミング・パターンに不均一な遅延が生じ、最終的な相対的タイミングは変動するという説明をすることで汎用運動プログラム理論の擁護をしている。

運動系の特性を考慮すべきだという考え方は、Zelaznik *et al.* (1986) にもみられる。彼らは、手に持ったスタイラスで単一目標をねらう運動の実験で、運動の加速-減速タイミング・パターンに実際の運動時間にかかわらない時間伸縮性 (time rescalability)、すなわち相対的タイミング不変性が成立するかどうかを検討した。彼らは、結果からリニアな時間伸縮性が認められないことを確認したとき、単純な汎用運動プログラム理論のかわりに複雑な非線形性を考慮した新たな汎用運動プログラム理論を考えるべきこと

を提案している。運動系自体が非線形な特性をもっているからというのがその理由である。

たしかに書字運動は、運動を実現する筋肉骨格系の拘束条件をまねがれず、末梢レベルの多くの条件を考慮する必要がある。書字運動には、肩関節から指の末節骨関節までの多段階の関節やそれにつながる筋肉骨格系の特性、それにかかるトルク等、運動の力に関する側面すなわちダイナミクスが関与する。さらに筆記具の特性もここに加わる。これらの最終的な結果として、筆記具先端の運動軌道のうち用紙接触面の軌跡が文字を形成することになる。また、筆記具最先端の軌跡は、一本の指にいたる各関節の自由度のほか、他の指の動きとの相互作用によっても規定される。理想的には、運動制御の理論は、このようなすべての条件を考慮したものであればよいのかもしれない〔比較的単純な軌跡をもつ上肢運動のダイナミクスと軌道形成についての解説は、たとえば、川人(1988), Hollerbach (1990 a, 1990 b) などが参考になるだろう〕。

しかし、当初の汎用運動プログラム理論は、プログラム中のサイズや速度などのパラメータ設定によって書字が行われると概念的に考えるものの、このような書字運動が具体化されるダイナミクスそのものについては、特に考慮しない理論として登場した。逆に、筋肉骨格系の組合せが違う運動パターン群が、なぜ時間的に、あるいは空間的に相似した特徴をもつのかを説明するために考えられた概念的理論だったというほうが正確であろう。

特に書字運動は、単一標的運動のような単純な運動にくらべ、はるかに複雑な軌跡をもった運動である。その書字について、上記のような末梢特性までも考慮した運動記憶についての理論がつくられるとしても、それにはなお時間を要すると考えられる。それまでは、やはり、運動プログラム理論は汎用性の主張を弱め、汎用を冠さない運動プログラム理論へと戻ることになるであろう。

そのようなとき、書字運動の生成と制御についての考え方にはどのような道が残されているのだろうか。

(4) 書字のオッシレーション説

その一つの例は、Hollerbach (1981) にみることができる。彼はアルファベット筆記体は、 x 方向のオッシレーションと y 方向のオッシレーションが複合した直交的オッシレーション・パターンを基本として、このパターンに一定速度の右方向へのスウィープがかぶせられた結果だと考えることを提案している。垂直方向の変調によって高さは自由に変えられるし、また水平方向の変調が位相やアンプリチュードを変えることによってコーナーのかたちを自由に決定する。

この考え方は、書字の軌跡を決定する運動の記憶がどのような表現内容になっているかについて示唆的である。汎用運動プログラム理論が仮定していたのは、文字ごとにそれぞれプログラムが形成されているということであった。汎用説は、同じ文字内での変

動はパラメータの調整によって行われるので、同じ文字なら一つのプログラムですむという記憶の経済性を売りものにしていたといえる。しかし、オッシレーション説では、書字のための記憶はさらに節約可能である。基本的なオッシレーション・パタンのさまざまな変調によって、違った文字のパタンが簡単に作りだせるからである。たとえば「e」のサイクロイドは容易に「i」のサイクロイドに変調可能である。

Hollerbach は、書字がもつ宿命的な情報処理の負荷、つまり考えることと書くことを同時に行わなければならないという負荷を低減させるという点で、オッシレーション説による書字運動情報の単純化には利点があるといっている。しかし、オッシレーション説に基づく研究でも文字の諸特性の恒常性については一様な結論が得られていないのが現状であり、彼自身、記憶されている書字のユニットがどんなものであるかは未解決な問題だと述べている。

オッシレーション説のように、サイクロイドがさまざまに変調されたものとして運動軌跡を分析していくことは、運動にとってそれが基本的な軌跡であると考えられるときは適切な分析であるかもしれない。たとえば歩行やアルファベット書字はもともとサイクリックな運動が水平方向にほぼ一定速度でスウィープされていくという特徴をもっている。アルファベット筆記体の基本運動パタンなどは本来そのようなものとして生まれたといってもよいだろう。現に、アルファベット筆記体のトレーニングや書字の治療的教育でも、オッシレーション・パタンを一定のスウィープ速度で連続的に書いていく基本練習が含まれている事実は、それを示唆している。

このオッシレーション説も適用範囲の制限という問題を抱えている。汎用運動プログラム理論の魅力の一つは、運動の領域を超えた理論であるという理論の「汎用性」にあった。つまり、書字、タイプライティング、歩行、腕の運動などさまざまな領域にみられる現象を統一的に説明するということは、弱点のもとにもなったが、同時に魅力でもあったといえる。一方オッシレーション説を、より複雑な漢字の書字や恣意的なキー配列をもつタイプライティングなどにどれだけ拡張できるかは疑問が大きい。Hollerbach (1981) があらかじめ限定しているが、オッシレーション説では、アルファベット筆記体しかも筆記具のアップ・ダウンのない連続したストロークによる運動のみが適用対象となる。もちろん、筆記具のリフトを必要とする t や x のクロス、あるいは i のドットは考慮対象外である。

こうした限界は、同じ書字でも、漢字の書字への適用にとっては致命的である。漢字の書字運動は、一文字を書くうちにもペンのリフト回数の多い運動である。いったんリフトした筆記具先端の再接触位置を決めるのにも、漢字内の小部品を配置していくのにも、視覚的なフィードバックは不可欠である。このことは、閉眼で書かれた漢字にどれだけ大きな歪みや変形が生じやすいかという点からも容易に推測できる。この意味で、日本語、特に漢字の書字は特異的な問題を含んでいると考えられる。

振り返ってみると、運動制御の理論で常に問題の中心にあったのは、フィードバック

制御成分とフィードフォワード制御成分を相対的にどれだけ重視するかだったといえる。運動プログラム理論は、フィードバック重視の制御からフィードフォワード重視への大きな振れであった。また汎用運動プログラムの定義のその後の変遷は、それをフィードバックを考慮する方向に再び少しだけ戻してきたものだと見える。

汎用運動プログラム理論が混迷状態にある今、最後に、フィードバックが特に大きな役割を果たすと考えられる日本語における書字を考えてみることで、書字運動記憶の問題についての新たな糸口を探ることにしたい。

9. まとめに代えて——日本語での書字運動記憶研究に特異的な問題——

まず、日本語においても、書字運動の長期記憶が存在すること自体はさまざまな根拠から十分推測される。失読患者に読めない文字をなぞらせることでその文字が読めるようになる運動性促進現象が日本語でもみられること、意図していなかった文字を書いてしまう書字エラー（スリップ）が実験的操作によって容易に誘発されること（Nihei, 1986 a, 1986 b, 1988）、実際に文字を書く前、文字を思い出すときに、文字を書く動作だけをする空書行動がみられること（佐々木・渡辺, 1983, 1984）、これらの現象は、日本語での書字運動の長期記憶がなんらかのかたちで存在していることを示している。問題は、それがどのような性質を備えたものかである。特に漢字の書字では、運動記憶が実際の文字として実現されるにいたる過程には、アルファベット筆記体書字の場合といくつかの点で相違があると考えられる。

第一の相違点は、前に述べたフィードバックに関するものである。Teulings (1988) は、書字運動の運動としての特異性について、「書字運動は二次元空間において規定され、視覚的あるいは内受容的なフィードバックはあまり必要とされない」という点をあげている。実際、これまでアルファベットでの汎用運動プログラム研究の対象はすべて、筆記体でペンのアップ・ダウンのない連続した二次元的運動に限られている。しかし、このようなアルファベットの書字でさえ、フィードバックは実際には無視しえない役割を果たしているふしがある。Smyth & Silvers (1987) は、書字中の視覚フィードバックを除去すると、被験者は書字のエラーを数多く起こすことを明らかにしている。著者たちは「ここで報告されたエラーは、フィードバックの役割がこれまで、過小に評価されてきたこと、さらに文字が書かれるという過程の完全な説明は感覚情報の役割をより詳細に明らかにしなければならないことを示唆する」と述べている。

漢字ではフィードバックの役割はさらに大きくなるだろう。日常的には、ストロークすべてを連続させて一つの漢字が書かれることはあまりない。1ないし2ストロークのあと筆記具をリフトして、次のストロークをスタートさせるところに移動する。これが繰り返されて一つの漢字の書字が行われるのが普通である。こうした運動パターンは、二次元的な運動ではなく、三次元的な複雑な軌跡をもつ運動である。毛筆による書字では特にそうだが、「抜く」「はらう」「はねる」など三次元的運動成分が重要な意味をもつ

ている場合がある。三次元的運動制御は「太さ」という特徴のためにも必要になる。このようなとき、フィードバック抜きに全運動シーケンスが遂行されるのは困難である。

それゆえ、すべて前もって定められたシーケンスが二次元平面内で展開され自動的に進行すると考えるような単純な書字の運動プログラム理論は、日本語の書字制御過程には当てはめ難い。漢字の運動記憶が文字として実現される際には、視覚的なフィードバックや筆記具や用紙の摩擦特性による内受容感覚的なフィードバックを随所でとり入れる運動制御がなされなければならない。漢字の書字のための運動プログラムがあるとすれば、それはSTARTからENDまで完全に自動的に進行するプログラムではなく、外部からのフィードバックを織り込みながら進行していく「外界に開かれたゆるやかな自動性」(仁平, 1990)をもったプログラムでなければならないだろう。今後の日本語の書字研究では、初期の運動プログラム理論が排除したフィードバックの役割を逆に積極的に検討する必要があると思われる。書字運動の視覚的フィードバックの除去や遅延、さらには変換フィードバックの効果を体系的に検討していくことは、日本語での書字過程を明らかにするうえで多大の情報をもたらしてくれることになるだろう。

第二の問題。アルファベット筆記体の書字は、基本的には時間と共に右方向へ移動していくサイクリックな運動である。これに対して、漢字では、1文字を構成する部品の空間配置情報が文字によって異なり、運動の時間的進行と空間的移動が単純には対応しない。漢字の書字には、運動記憶以外に、こうした部品配置に関する情報が重要な意味をもっていると考えられる。

一例をあげよう。日常的な意図しない書字エラー(スリップ)の中で5%近くを占めるものに「文字の融合エラー」がある(仁平, 1989)。「問2」と書こうとして、問の「口」の部分の位置にその代わりに「2」を書いてしまう(つまり門構えの中に「2」が書かれる)類のエラーである。「勝ち」と書こうとして力の部分にその代わりに「ち」を入れてしまったエラーも同様である。このようなエラーでは、誤って書かれた「2」や「ち」は、本来それが単独で書かれるときのサイズではなく、「口」や「力」が書かれるべきウィンドウのサイズに合わせて小さく出力されている。こうした現象は、漢字の書字過程は、1回の運動プログラムの呼び出しとサイズなどのパラメータの指定ですんでしまう単純な過程ではないことを示唆している。文字部品の空間配置情報によって、各部品のウィンドウ・サイズの設定がまず行われ、それに合わせて運動記憶が出力される。後に書かれるべき字がその部分に入りこんでしまうときにも、そのサイズ設定は優先される。つまり、書字過程は、運動記憶がそれ以外の種類の“上位の”記憶によってコントロールされる過程を含む、より複雑な過程である可能性を考えなければならないのである。

漢字の書字については、上述のような書字過程におけるフィードバックの役割の再吟味、文字部品の空間配置情報の役割の解明のほか、書字運動記憶相互のネットワーク構造、書字運動記憶と文字に関する他の種類の記憶(音韻記憶、意味記憶、視覚的形態の

記憶)の間のつながりなど、解明されるべき問題が数多く残されている。またそれらの解明は、漢字書字の問題にとどまらず、アルファベットなど他の文字体系での書字運動記憶についても、さらには運動記憶一般についても、新たな視点を与えてくれることが期待される。

文 献

- Adams, J. A. 1987 Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, **101**, 41-74.
- Adams, J. A. 1971 A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, **3**, 111-149.
- Armstrong, T. R. 1970 *Training for the production of memorized motor patterns*. Technical Report No. 26, Human Performance Center, University of Michigan.
- Carlton, L. G., & Carlton, M. J. 1987 Response amendment latencies during discrete arm movements. *Journal of Motor Behavior*, **19**, 227-239.
- Dickinson, J. 1985 Some perspectives on motor learning theory. In D. Goodman, R. B. Wilberg, & I. M. Franks (Eds.) *Differing perspectives in motor learning, memory, and control*. Elsevier, Pp. 209-237.
- Gentner, D. R. 1982a Evidence against a central control model of timing in typing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **8**, 793-810.
- Gentner, D. R. 1982b Testing the central control model of typing: Comments on the reply by Viviani and Terzuolo. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, **8**, 814-816.
- Gentner, D. R. 1987 Timing of skilled motor performance: Tests of the proportional duration model. *Psychological Review*, **94**, 255-276.
- Heuer, H. 1985 Wie wirkt mentale Übung? *Psychologische Rundschau*, **36**, 191-200.
- Heuer, H. 1988 Testing the invariance of relative timing: Comment on Gentner (1987). *Psychological Review*, **95**, 552-557.
- Hollerbach, J. M. 1981 An oscillation theory of handwriting. *Biological Cybernetics*, **39**, 139-156.
- Hollerbach, J. M. 1990a Fundamentals of motor behavior. In D. N. Osherson, S. M. Kosslyn, & J. M. Hollerbach (Eds.) *Visual cognition and action*. The MIT Press, Pp. 153-182.
- Hollerbach, J. M. 1990b Planning of arm movements. In D. N. Osherson, S. M. Kosslyn, & J. M. Hollerbach (Eds.) *Visual cognition and action*. The MIT Press, Pp. 183-211.
- 川人光男 1988 運動軌道の形成——神経回路の計算機構—— 伊藤正男・佐伯 胖 (編) 認識し行動する脳——脳科学と認知科学 第8章 東京大学出版会, Pp.

150-181.

- Keele, S. W. 1968 Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, **70**, 387-403.
- Lashley, K. S. 1951 The problem of serial order in behavior. In L. P. Jeffress (Ed.) *Cerebral mechanisms in behavior*. Wiley, Pp. 112-136.
- Merton, P. A. 1972 How we control the contraction of our muscles. *Scientific American*, **226**(5), 30-37.
- Nihei, Y. 1984 Limit of duration of a generalized motor program for handwriting. *Tohoku Psychologica Folia*, **43**, 127-133.
- Nihei, Y. 1986a Experimentally induced slips of the pen. In H. S. R. Kao, & R. Hoosain (Eds.) *Linguistics, psychology, and the Chinese language*. Centre of Asian Studies, University of Hong Kong, Pp. 309-315.
- Nihei, Y. 1986b Dissociation of motor memory from phonetic memory: Its effects on slips of the pen. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.) *Graphmatics: Contemporary research in handwriting*. North-Holland, Pp. 243-252.
- Nihei, Y. 1988 Effects of pre-activation of motor memory for kanji and kana on slips of the pen: An experimental verification of the recency hypothesis for slips. *Tohoku Psychologica Folia*, **47**, 1-7.
- 仁平義明 1989 日常的な書字スリップからみた日本語の書字過程 日本心理学会第53回大会発表論文集, 653.
- 仁平義明 1990 からだと意図が乖離するとき——スリップの心理学的理論—— 佐伯 胖・佐々木正人(編) アクティブ・マインド——人間は動きのなかで考える—— 第2章 東京大学出版会, Pp. 55-86.
- Quinn, J. T., Jr., & Sherwood, D. E. 1983 Time requirements of changes in program and parameter variables in rapid ongoing movements. *Journal of Motor Behavior*, **15**, 163-178.
- Rosenbaum, D. A. 1985 Motor programming: A review and scheduling theory. In H. Heuer, U. Kleinbeck, & K. H. Schmidt (Eds.) *Motor behavior: Programming, control, and acquisition*. Springer, Pp. 1-33.
- 佐々木正人・渡辺 章 1983 空書行動の出現と機能—表象の運動感覚的な成分について 教育心理学研究, **31**, 273-282.
- 佐々木正人・渡辺 章 1984 空書行動の文化的起源——漢字圏・非漢字圏との比較 教育心理学研究, **32**, 182-190.
- Schmidt, R. A. 1975 A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, **82**, 225-260.
- Schmidt, R. A. 1982a More on motor programs. In J. A. S. Kelso (Ed.) *Human motor behavior: An introduction*. Lawrence Erlbaum, Pp. 189-217.
- Schmidt, R. A. 1982b The schema concept. In J. A. S. Kelso (Ed.) *Human motor behavior: An introduction*. Lawrence Erlbaum, Pp. 219-235.
- Schmidt, R. A., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. S., & Quinn, J. T., Jr. 1979 Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts.

- Psychological Review*, **86**, 415-451.
- Shapiro, D. C., & Schmidt R. A. 1982 The schema theory: Recent evidence and developmental implications. In J. A. S. Kelso, & J. E. Clark (Eds.) *The development of movement control and co-ordination*. Wiley, Pp. 113-150.
- Shapiro, D. C., Zernicke, R. F., Gregor, R. J., & Diestel, J. D. 1981 Evidence for generalized motor programs using gait pattern analysis. *Journal of Motor Behavior*, **13**, 33-47.
- Smyth, M. M., & Silvers, G. 1987 Functions of vision in the control of handwriting. *Acta Psychologica*, **65**, 47-64.
- Smyth, M. M., & Wing, A. M. 1984 Movement, action and skill. In M. M. Smyth, & A. M. Wing (Eds.) *The psychology of human movement*. Academic Press, Pp. 1-15.
- Summers, J. J. 1975 The role of timing in motor program representation. *Journal of Motor Behavior*, **7**, 229-241.
- Teulings, H-L. 1988 *Handwriting movement control: Research into different levels of the motor system*. NICI.
- Teulings, H-L., Thomassen, A. J. W. M., & Van Galen, G. P. 1986 Invariants in handwriting: The information contained in a motor program. In H. S. R. Kao, G. P. Van Galen, & R. Hoosain (Eds.) *Graphnomics: Contemporary research in handwriting*. North-Holland, Pp. 305-315.
- Viviani, P., & Terzuolo, C. 1980 Space-time invariance in learned motor skills. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.) *Tutorials in motor Behavior*. North-Holland, Pp. 525-533.
- Wann, J. P. 1986 Handwriting disturbances: Developmental trends. In H. T. A. Whiting, & M. G. Wade (Eds.) *Themes in motor development*. Martinus Nijhoff, Pp. 207-223.
- Wann, J. P., & Nimmo-Smith, I. 1990 Evidence against the relative invariance of timing in handwriting. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **42**, 105-119.
- Wing, A. M. 1979 Variability in handwritten characters. *Visible Language*, **8**, 283-298.
- Zelaznik, H. N., Schmidt, R. A., & Gielen, S. C. A. M. 1986 Kinematic properties of rapid aimed hand movements. *Journal of Motor Behavior*, **18**, 353-372.

Abstract

Development in Research on Motor Memory around the Notion of Generalized Motor Programs: With Special Reference to Handwriting

YOSHIAKI NIHEI

Tohoku University

Developments in the experimental research on motor memory are reviewed centering around the notion of generalized motor programs. The area of handwriting movements, where experimental studies on the concept have been most intensively done, is the focus of the present discussion.

In the first part, changes in the definition of a generalized motor program are traced. The following part argues experimental findings for and against the invariance of relative timing, which has been considered an essential evidence for the presence of generalized motor programs. Finally, it is pointed out that the visual feedback has an especially important role in writing kanji (Chinese originated characters).

Key words: motor memory, motor programs, handwriting, relative timing,
kanji