

# 運動学Ⅱ

## 運動学習

### ・学習目標

- \* 身近な出来事の中の運動学習を見つける。(関心を高める)
- \* 運動学習の意義と概念を理解する。
- \* Bemstein問題から現代の運動制御理論への展開を理解する
- \* 運動学習研究に用いられる基本的な技法を理解する

# A. 運動学習とは

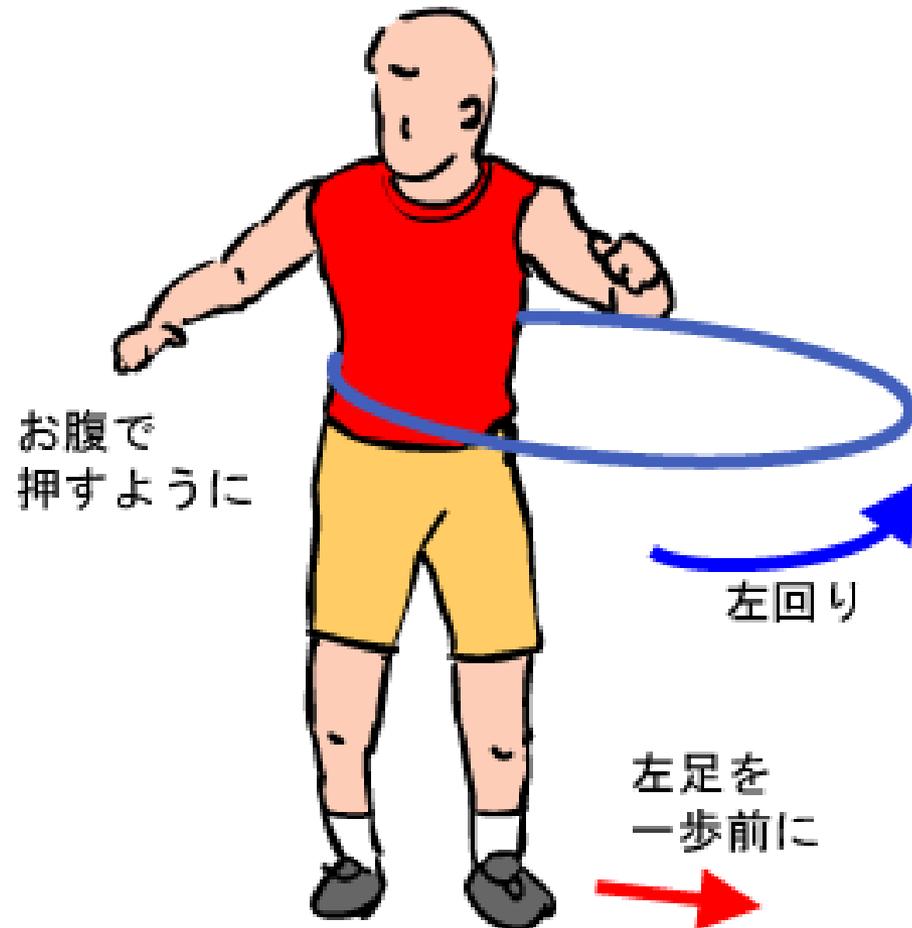
## 1. 運動学習の特異性

- 学習というテーマは古くから心理学の分野で研究されていた.
- 人間の運動に関する学習は, 従来の心理学が中心的に扱ってきた言語学習などの認知的学習とは違った側面をもつ.

# 初めて自転車に乗る



# フラフープを回す



- 1.両足を肩幅より少し大きいくらいに広げます。  
両膝を少し曲げて、自然な姿勢をとりましょう。  
フラフープを回す方向の足を少し前に出しても良いでしょう。
- 2.背筋を伸ばし、腰の力を抜きます。  
体は正面を向いて、胸を張りましょう。
- 3.リズムよく、お腹と背中の中の筋肉だけを使うように意識してフラフープを回します。
- 4.回すときは、お腹で押すようなイメージを持ちましょう。  
腰から下と上半身をなるべく動かさないように意識しましょう。
- どうでしょうか？
- 始めは難しいかもしれませんが、一度できるようになってしまえば
- あとは簡単にできるようになります。



ハートステップ:起立性貧血など医学的に立たせることに問題がある場合を除き,たとえ全麻痺であっても,正しい姿勢で手が自由となり,転倒の心配もなく,家庭でも安全に健常者と同様の歩様で歩行訓練ができる装置

(開発 : 東京理科大学/株式会社ハートウォーカージャパン/神田通信工業株式会社)





“歩ける？”  
運動学習

# 認知的学習

- 「白」という語が提示されたら「雪」と答えなさいという「白＝雪」の関係を学習をさせ、のちにテストをする。学習者が十分学習していれば、テストの際に「ユキ」と答えるべきところを「ユリ」とか「ツキ」と言い間違えることはない。もし答えが間違っていれば、学習が不十分だったことになる。

# 運動課題の学習

たとえば、最大握力の40%の力で握力計を握ると  
いう課題を40回練習させる。のちにテストをすると、  
多くの学習者は38%とか43%という結果を出すの  
である。この場合、学習者は40%という力の強さは  
十分学習していたのだが、実行する際にうまく制御  
できなかったということも考えられる。

つまり、運動課題には学習と制御という2つの  
過程が影響を及ぼす。（言語学習は制御が自動的  
に行われるか、制御によるバラつきがほとんどな  
いものとする）

# 運動療法の根幹

運動学習というテーマは非常に学際的である。運動学習研究は、現在では、心理学、神経生理学、生体工学、体育学など、いくつかの分野でそれぞれの視点から並行して行われている。

理学療法-運動療法・動作練習指導に関わる、さまざまな治療法の**実際と理論の根幹は運動学習**である。

## 2.運動学習の意義と概念

運動学習は、「練習や経験に基づく一連の過程であり、結果として技能的行動を行いうる能力の比較的永続的な変化をもたらすもの」と定義される。（ ）

この定義には、次のような重要な概念が含まれている。  
まず、運動学習は**練習や経験に基づいて形成されるもの**である。小児の運動発達は学習により獲得されると考えがちであるが、この概念では**発達や成熟などによる行動の変化は除外される**。発達では1つの動作の獲得に数か月～数年を要するので、ある動作の獲得にどの経験が役立ったのかという因果関係が特定しにくい。

# 学習と比べた時間の長短で 分類される関連現象

- 発達や成熟

学習よりも**長い**タイムスパン  
(現象)

- 運動の制御

学習よりも**短い**タイムスパン  
(現象)

- 運動学習は技能的行動に関する“能力”を獲得する過程である。学習が形成されると中枢神経系になんらかの生理学的・解剖学的変化がおこるのだろうが、心理学的な学習理論ではこれを“能力”という仮説構成概念にまとめてしまう

# 仮説構成概念

- 仮説構成概念とは、「直接観察することはできないが、先行条件(input)と後続条件(output)から推論して、そのようなものが存在することがほぼ確実と考えられる過程」のことである。

## ブラックボックス

自動販売機のコイン投入と品物選択

運動学習はある能力を獲得する過程なので、それを直接“見る”ことはできない。その代わりに、学習という能力を獲得した結果として生じる行動の変化を観察するのである。

中枢神経系の変化を直接見るのではないという  
と非科学的と思われるかもしれないが、そうではない。これは学習という現象をどのレベルでみよ  
うとするかという視点の違いである。

生理学では、神経系の構造や機能の変化自体を問題にするが、心理学を含む行動科学では、神経系の変化がどのような行動の変化となって現れるかを問題にする。さらに、生体工学では、学習による行動の変化を学習者を含む環境の変化の一部としてとらえる。このように、運動学習を見る視点にはミクロから超マクロまで、さまざまなレベルがある。

最後に、運動学習の結果は比較的永続する行動の変化を引き起こす。運動課題の練習中には指導者が口頭で指示を与えたり、手を触れて誘導したりする。指示や誘導によって学習者の行動は変化するが、この変化のすべてが学習の結果ではない。

しかし、練習中にのみ存在する特別な要因を取り除いたのちにも保持される変化があれば、それは学習が形成された証拠とみなしてよい。この考え方は、のちに述べる運動学習の実験デザインに大きな影響を及ぼしている。

さらに付け加えるならば、現在の新しい理論では、運動学習は行動に関する戦略の学習であるのと同様に、知覚に関する新たな戦略の学習も含み、知覚・認知・行動の相互作用から運動学習が形成されると考えられている。

## B. 学習と記憶

記憶の構造と機能に関する問題も心理学における重要なテーマであり、古くから多くの研究がなされてきた。しかし現在に至っても、どの記憶モデルが適切なのかという結論は得られていないのだが、学習を考えるときに記憶の問題を避けて通ることはできない。

最も一般的な

“短期感覚貯蔵” (short term sensory store; STSS),

“短期記憶” (short term memory; STM),

“長期記憶” (long term memory; LTM) という3つの

構造からなる記憶モデルを用いて考える。

# 短期感覚貯蔵

- 短期感覚貯蔵とは、視覚的な記憶でいえば、網膜像そのものというイメージでとらえることができる。網膜像は外界の視覚対象が網膜に投射されたものであるから、記憶といっても生の感覚のレベルに近い。
- 視覚的な短期感覚貯蔵は"アイコニック・メモリー"または"マイコン"と呼ばれる。アイコンは保持時間が250ミリ秒程度で、容量は無量大である。また、新たな感覚入力があるとすべての情報は上書きされ、失われてしまう。
- アイコンが保持されているわずかな時間の中に"注意"を向けられた情報のみが、短期記憶に移送される。

## 2.短期記憶とリハーサル

- 短期記憶は保持時間が数十秒程度，容量が7個程度の記憶である.
- アドレス帳で電話番号を調べて一時的に記憶しておき，電話のプッシュボタンを押すときなどに使われる. アドレス帳を見ているときには，他の人の名前や番号，あるいはアドレス帳そのものの像も網膜に写っているはずだが，これらには注意が向けられないので意識にのぼるまでもなく消去されてしまう.

# リハーサル

- また、短期記憶に移送されてきた情報も、何もしないでいれば数十秒後には忘却される。もし忘れてはいけないことであれば、リハーサルという操作を加えることにより、安定した情報として保持できるようになる。

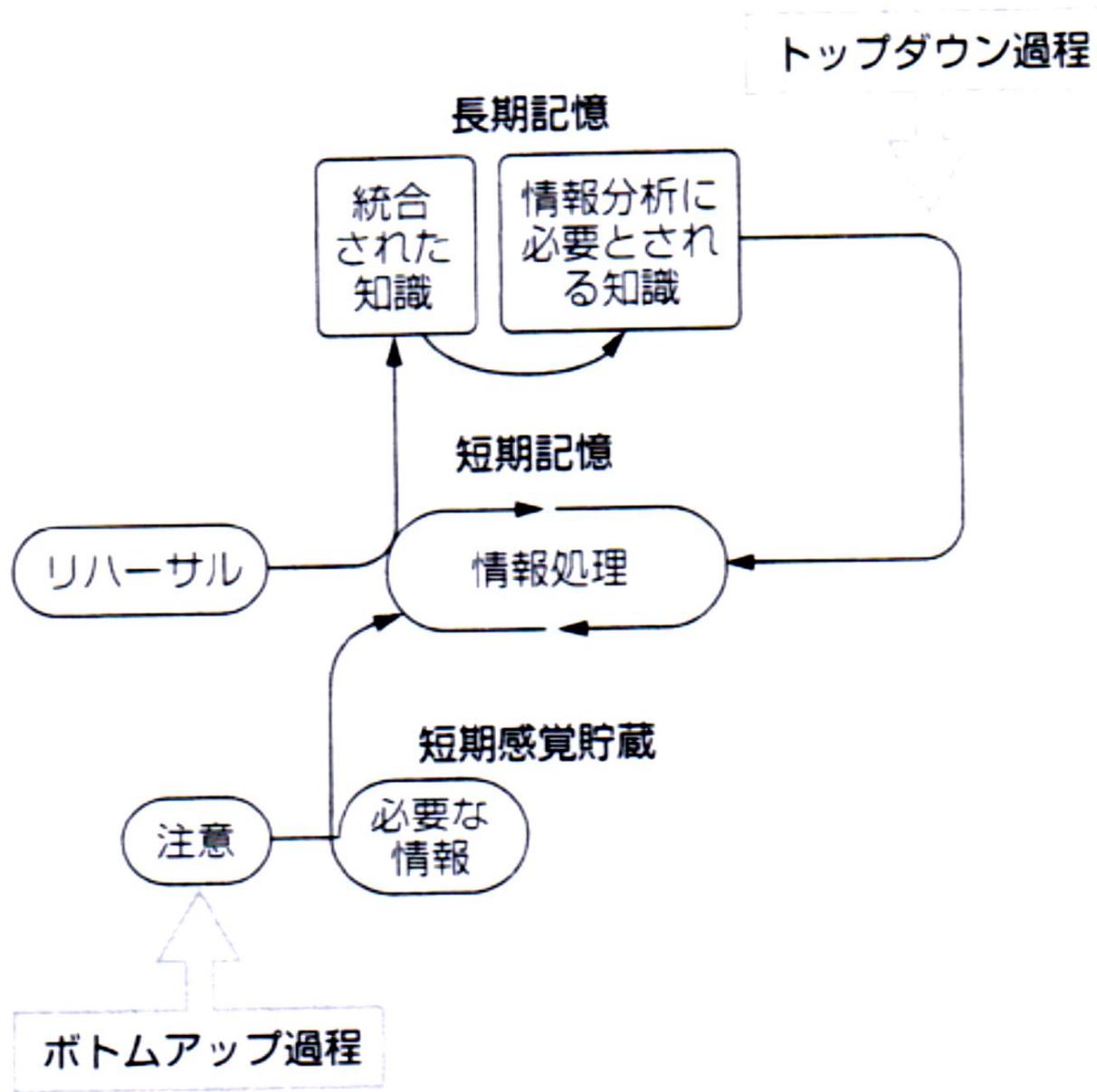
リハーサルとは短期記憶内に情報を保持するために、あるいは長期記憶へ情報を移送するために行われる操作である。

- リハーサルにはいろいろな方法があるが、最も一般的なものは“復唱“である。一度調べた電話番号を胸の内につぶやき続けていれば、その間は忘れてしまうことはない。

- しかし、ここで問題になるのが短期記憶の容量である。短期記憶の容量は小さいので、復唱をしながらほかの考え事をすることは不可能である。
- もし、計算などの作業を強要されれば、復唱を一時中断しなければならず、計算をしている間にそれまで復唱していた情報は忘却されてしまう。
- リハーサルには復唱のほかにも、情報を分析し意味づけをしたり、すでに記憶されている情報と関連づけたりする方法がある。十分なリハーサルを受けた情報は長期記憶に移送される。

# 3.長期記憶

- 長期記憶は保持時間、容量ともに無限大であると考えられている。したがって、いったん長期記憶保存された情報は、生涯消去されることはなく検索不能になることがある。長期記憶になると、「知っているという感覚はあるが、思い出せない」状態になる。



# 記憶構造と情報処理の流れ

記憶構造と情報処理の流れ

## 4.ボトムアップ過程と トップダウン過程

3つの記憶構造のなかで最も能動的に働くのが規則記憶である。情報は外界から短期感覚貯蔵を介して短期記憶へ入りさまざまな処理を受ける。このような下から上への情報の流れを“ボトムアップ過程”と呼ぶ。

また、人間の情報処理システムは外界から情報が入力されると、その情報の分析に必要と思われる知識を長期記憶から引き出し、短期記憶の中に送り込んでくる。このような上から下への情報の流れを“トップダウン過程”と呼ぶ。

- ボトムアップされた情報とトップダウンされた情報は短期記憶構造の中で統合・分析され、その結果として得られた新たな知識が長期記憶へ送り返されるのである(図)

運動学習においても、学ぶための認知的活動は短期記憶の中で行われると考えられる。過去に獲得され貯蔵されていた学習内容が長期記憶から短期記憶へトップダウンされ、感覚受容器からボトムアップされてきたフィードバック情報と統合され、修正されて再び長期記憶に格納される。

# C. 運動学習理論の歴史的展開

## 1. 古典的学習理論の展開

心理学領域で運動学習の理論が提示されるようになるのは1960年代以降のことである。1960年以前には、運動反応の指標も“**成功回数**”のようなごく基本的なものしかみられない。

さらに、運動学習によって人間の内部過程にどのような変化がおこるのかという認知的・神経科学的論点にはほとんど興味をもたれなかった。というのも、この時代は**行動主義心理学**の隆盛期であり、動物の道具的条件づけと人間の運動学習が同じ過程として考えられていたからである。

## a.Thorndikeの効果の法則～1960年代

- 道具的条件づけの研究者として特筆すべきはThorndike(ソーンダイク)である。彼の研究によれば、被験動物は、もともといくつかの行動レパートリーをもっており、そのなかから試行錯誤的にさまざまな反応をおこす。それらの反応のなかで報酬を与えられた反応は強化され、その後の出現確率が増す。Thorndikeはこの現象を“効果の法則”(law of effect)と名づけた。

また、強化された反応はその後も頻繁に出現し、たびに強化されるので、ついに他の多くの反応とは区別された選択的反応となる。つまり、ある刺激に対して常に特定の反応が生起する状態になる。Thorndikeはこれを“学習”と呼んだ。

- Thorndikeの考え方では、**学習には思考や意識の介入は不要であり、刺激と反応の結合が自動的、直接的に強化された結果として学習が形成される。**
- Thorndikeは効果の法則を証明するために、人間の運動学習の実験も行った。実験の目的は、人間の運動学習の形成においても**強化が必須**であることを証明することであった。

- 動物の学習に用いる強化は報酬として餌を与えることである。人間の運動学習では**結果の知識 (knowledge of results: KR)**が強化の機能をもつと考えられていた。KRとは、目標とする運動課題と被験者の反応の間の誤差に関する情報で、通常、指導者から与えられる言語的情報である

- Thorndikeは、フリーハンドで一定の長さの線分を引くという運動課題をKRを与えずに単に反復させる場合と各試行の終了時にKRを与える場合で比較した。結果は、**KRを与えない単なる反復練習では誤差は減少せず、KRを与えた場合のみ誤差が減少した。**この実験結果から、Thorndikeは効果の法則は**人間の運動学習にも適用できると、結論づけた。**

- Thorndike以降も1960年代までは、人間の運動学習におけるKRは動物の学習における強化と同等と考えられていた。動物の学習の延長線上で人間の運動学習が考えられていたので、運動学習にかかわる人間の認知機能には興味もたれなかったのである。

- 1960年代に入ると行動主義的な運動学習研究はいったん衰退する。その主な原因は、この時期に認知心理学が隆盛してきたことにある。当初の認知心理学は情報処理理論を基礎としており、環境のなかから情報を引き出すような人間の能動的な精神活動を重視した。したがって、学習が自動的・無意識的過程であると考え、それまでの学習研究には馴染まなかったのである。

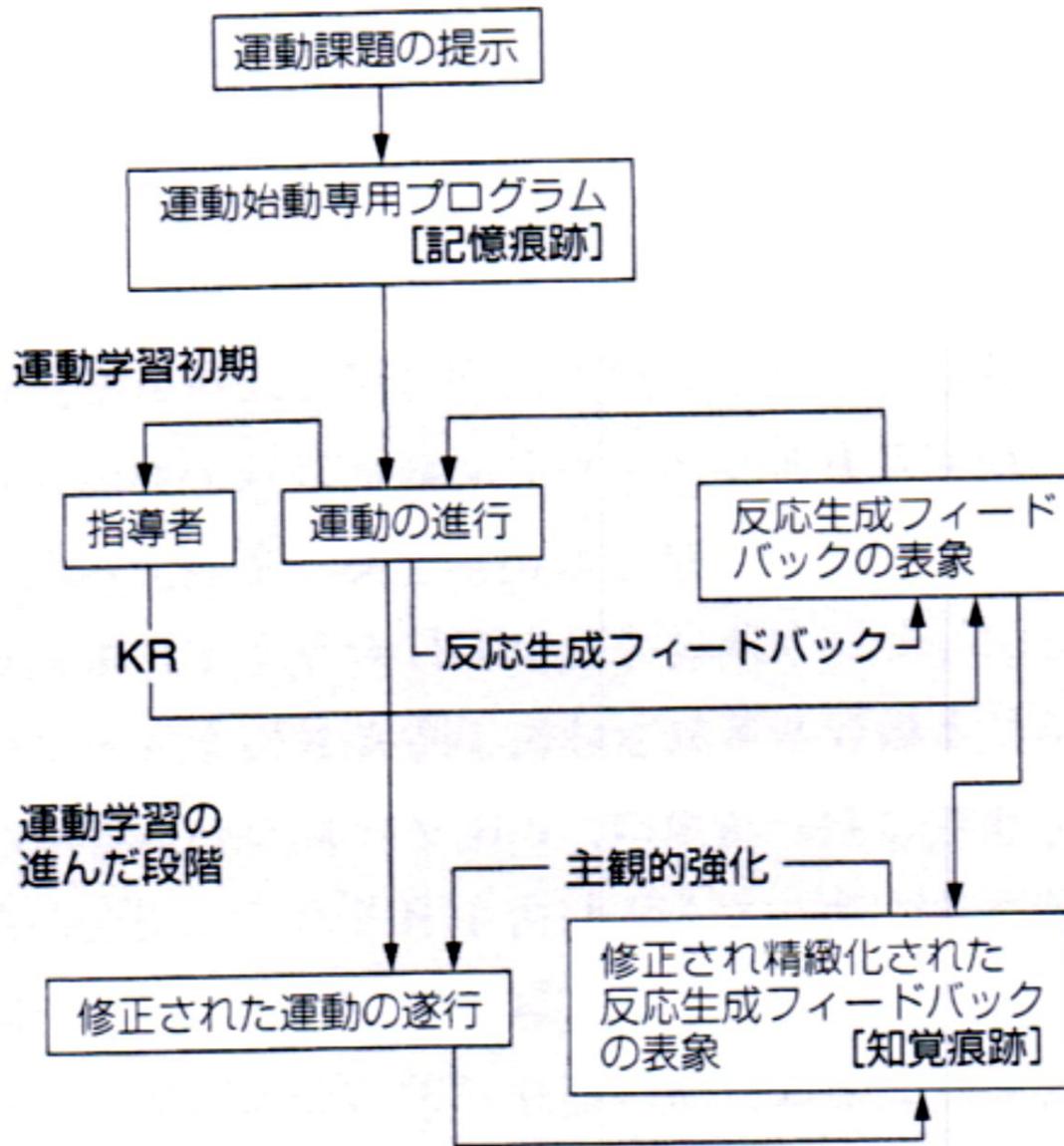
## b.Adamsの閉回路理論

- 近代的な運動学習理論の先駆けは1971年に発表されたAdams(アダムス)の閉回路理論(closed-loop theory)である。閉回路理論は、工学における**自動制御理論**の影響を受けて生まれた。Adamsによれば、**運動学習とは誤差を発見し修正する能力を獲得する過程**であり、この能力の成長が学習過程の主軸となる。

# 閉回路理論による運動課題遂行の ダイアグラム(図)

- 閉回路理論の中心をなす概念は“知覚痕跡” (perceptual trace) と呼ばれるものである。運動を遂行すれば必然的にそれに伴う感覚が生じる。これは 反応生成フィードバック (response-produced feedback) と呼ばれ、固有受容感覚だけではなく、視覚、聴覚、触覚など複数の感覚から形成される。反応生成フィードバックが生じると、これらの表象が記銘される。

# 閉鎖回路理論



閉回路理論による運動課題遂行のダイアグラム

KR：結果の知識

- 学習者が運動反応を改善するためにKRを利用すると、フィードバックの表象は統合され安定したものとなる。この表象が**知覚痕跡**である。
- 学習者の運動反応は、まず**知覚痕跡と照合される**。この段階で誤差が検出されなかったにもかかわらず、KRでは「誤差あり」という情報が提供されると、学習者は知覚痕跡を修正する。

- 学習がある程度進んだ段階では、知覚痕跡が内的な参照基準となるので、KRが与えられなくても学習者は誤りに気づき、自ら修正するようになる。このように、KRなしに自ら誤差修正する過程を“主観的強化”と呼ぶ。
- しかし、知覚痕跡は運動が開始されたあとでないと利用することができない。そこで閉回路理論では、運動の始動にのみ関与する記憶痕跡 (memory trace)という短い運動プログラムを想定している。
- 記憶痕跡は、過去の運動経験に基づいて形成され脳の中の貯蔵庫に保持されている。そのなかから現在の運動課題に類似したプログラムを再生し、とりあえず運動を開始する。運動が開始されさえすれば、誤差修正には知覚痕跡を利用できるのである。

- しかし、閉回路理論では感覚フィードバックを利用する間がないような迷い運動 (ballistic movement) の制御と学習について説明することができない。また運動の始動プログラムにごくわずかな役割しか与えていないなどの問題点があった。

## c.Schmidtのスキーマ理論

- 閉回路理論の次に登場するのが、1975年に Schmidt (シュミット) が発表したスキーマ理論 (schema theory) である。スキーマ理論は閉回路理論に対向するのではなく、それまでの運動学習理論の欠点を補い、さらに発展させた理論ということができる。

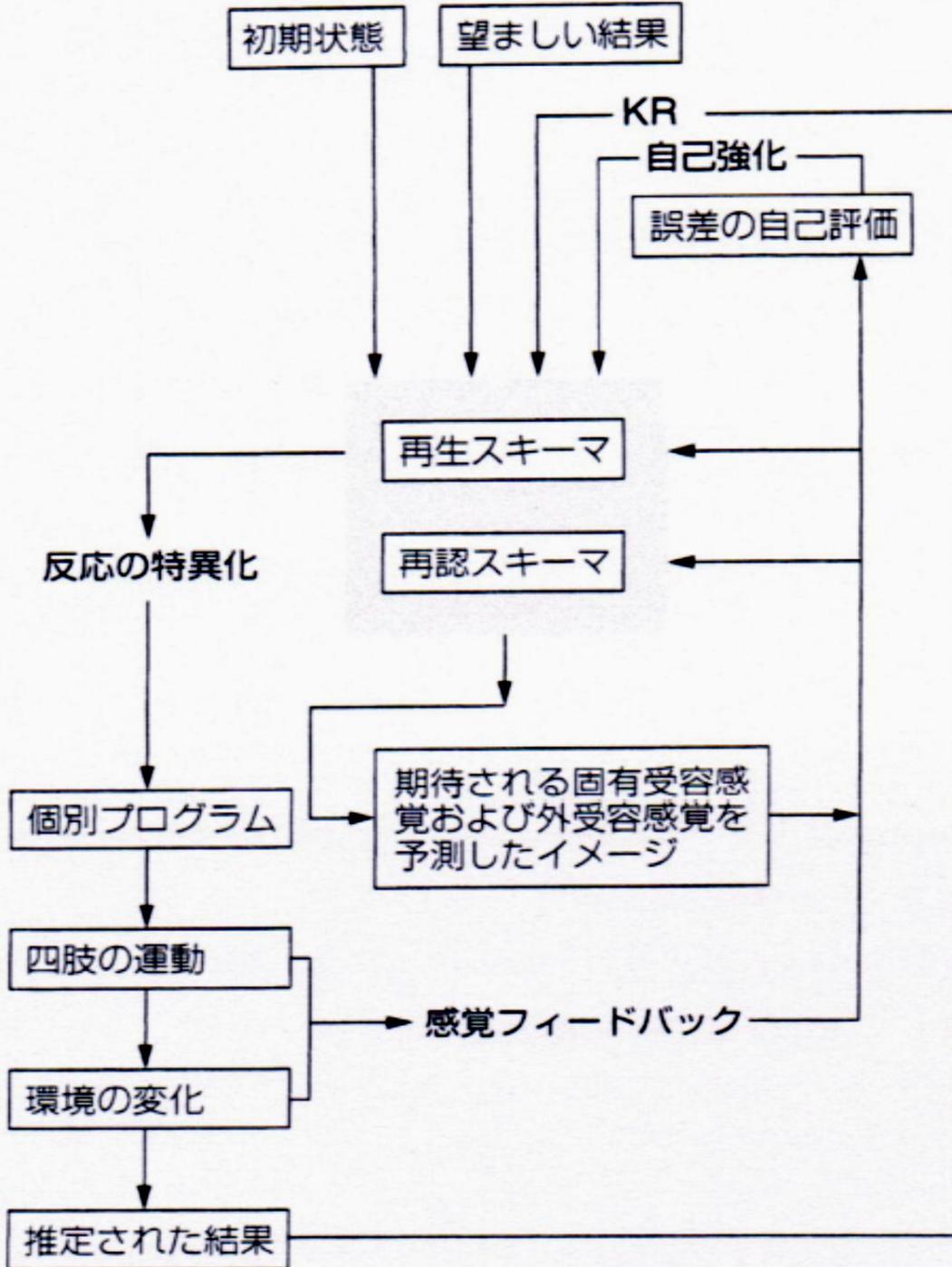
- Adamsの閉回路理論も含めて、それ以前の運動学習理論は、1つの運動プログラムが1つの運動を支配するという一対一対応の仮説を用いていた。Schmidtはこの仮説に対して2つの問題を提起した。

# 新奇の運動はどうやって行いうるのか？

- 1つは「人間の多様な運動様式に対応する膨大な数の運動プログラム(一対一対応の理論では無限大の個数のプログラムが必要となる)を貯蔵するスペース」の問題であり, もう1つは「人間がそれまでに経験したことのない新奇の運動(一対一対応の理論では新奇の運動を指令するプログラムは存在しないことになる)でも行いうるという事実をどう説明するのか」という問題である.

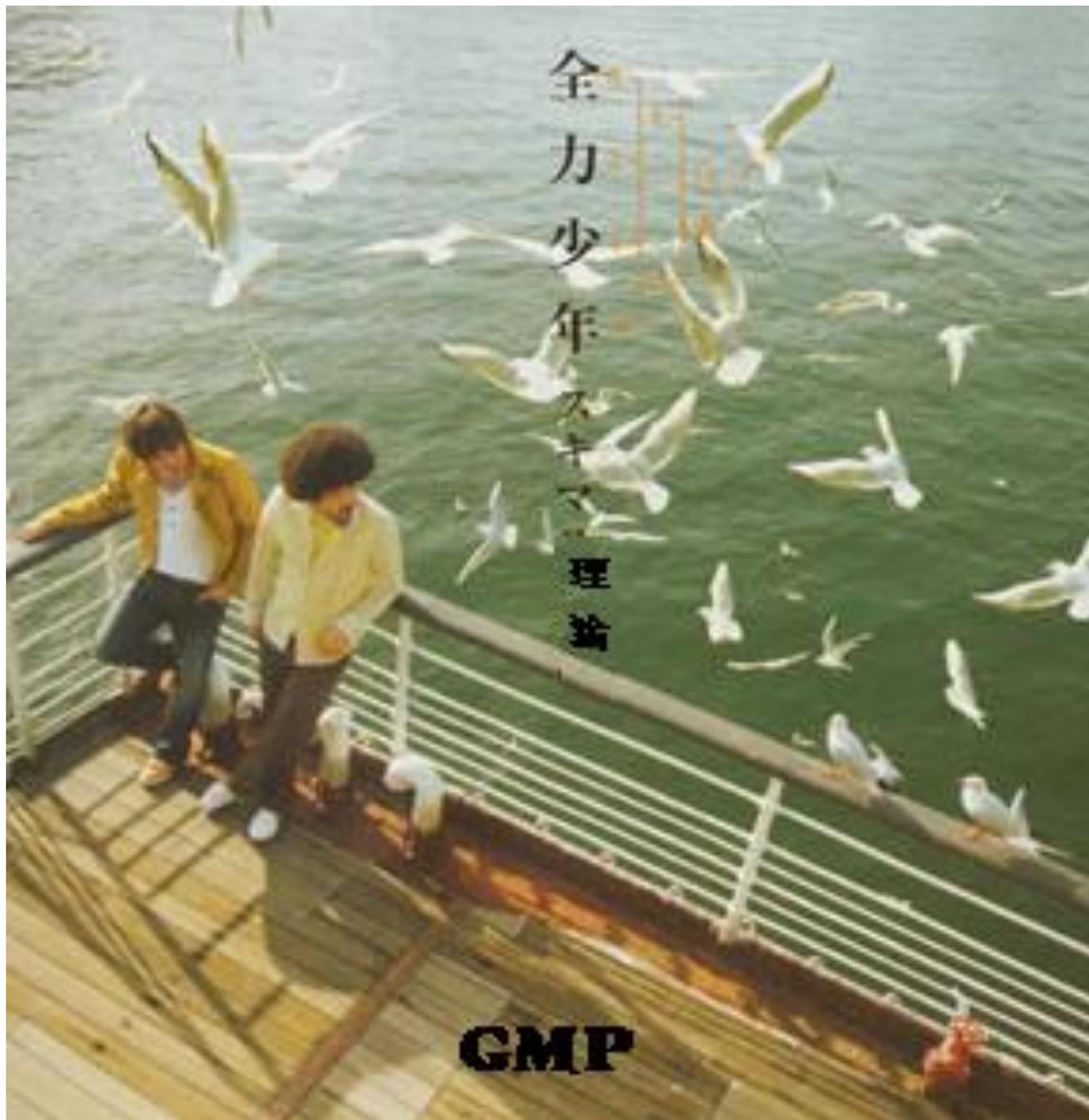
# GMP

- そこでSchmidtは、スキーマ理論に“一般化された**運動プログラム (generalized motor program; GMP)**という**概念を導入**し、これらの問題を解決しようとした。
- GMPは個々の運動に一対一対応した個別プログラムではなく、あるカテゴリーあるいはクラスに属する運動に**共通のプログラム**（たとえば“歩行プログラム”や“投球プログラム”など）である。したがって、スキーマ理論では1つの運動プログラム(GMP)が複数の運動を支配するという**一対多**対応への変換が行われたと考えることができる。
- **共通項**でくる  $>$  因数分解のようなもの (注 木村)



# スキーマ理論

## 運動の生成と評価



全力少年スキマ理論

**GMP**

- これにより、貯蔵しておかなければならない運動プログラムの数は大幅に減少し、新奇の運動への対応もある程度可能になった

<第1部終了>

## 2. Bernstein問題の展開

• 「人間の身体は中枢神経系の指令によって制御されている」。この原則は長い間、普遍的な了解事項として扱われてきた。しかし、現在ではこの原則自体を放棄し、新たな方向性をもった理論が生まれつつある。

ここでは、その発端となった古典的な“鍵盤支配型運動制御モデル”とそれに対するBernstein(ベルンシュタイン)の根本的な批判、およびBernstein理論に導かれて登場した“生態学的アプローチ”(ecological approach)を取り上げる。



## a. 鍵盤支配型モデルとBernstein問題

- 鍵盤支配型モデルが想定されたのは19世紀である。このモデルは映画のコマ撮り技術から発想されたものである。つまり、運動中の瞬時における“**静止した体幹と四肢の配置**”を**運動の最小単位**と考え、この単位を経時的に並べたものが身体の動きであると仮定した。運動プログラム(“楽譜”にたとえられた)は脳に記憶されており、これを呼び出して大脳皮質の運動野の“**鍵盤**”で“**演奏**”することによって運動が実行される。

# (1) 自由度の問題

- 1930年代に入り, 古典的な鍵盤支配型モデルに対して根本的な批判を展開したのがロシアの生理学者Bernsteinである.Bernsteinは次の2つの問題を指摘した.
- “第1度自由度”の問題.
- 1つの運動を選択して実行しようとするとき, 選択肢は関節の運動方向の“数”と活動する筋の組み合わせの“数”、活動を支配する運動単位の数”を掛け合わせた数だけある, 一肢の運動のみを考えても**選択肢は数千～数万**という数になる.

このなかから瞬時にかつ連続的に速切な値の組み合わせを決定しなければならないとなると、中枢神経系の仕事量は膨大なものとなり、このような制御方法は現実的ではない。

## (2) 文脈の問題

Bernsteinが第2に指摘したのは“文脈”の問題である。運動は瞬間で終了するものではなく、ある時間幅をもって組織化されている。

したがって、

特定の瞬間の身体各部の配置を正確に指令するためには、**運動がどのような流れに沿って実行されているのか、これを“文脈”といい、つまりその瞬間の前後の状況判断**が重要となる。しかし、身体運動の文脈は多義的であり、容易には制御できない。

- たとえば,ある関節運動を引き起こす主動作)筋,補助筋,拮抗筋の組み合わせは一義的には決められない.

大胸筋や胸鎖乳突筋は, 関節がどのような肢位にあるかによって, その作用が変わることなどがよい例である. また, . 人間の身体の動きに作用するのは筋活動だけではない.

- 同じ筋力を発揮しても、重力除去位か抗重力位かによって実際に現れてくる関節運動は大きく異なる。その他、関節の慣性モーメントや他の部位からの反作用力など、さまざまな起源の力を相補的に組み合わせて実際の運動が行われているのである。
- これらは運動指令に先行して存在する・”事前の文脈”であるが、「山道を駆け下りる」というような急速で複雑な環境の変化を伴う運動では、“事後の文脈”をも予測したうえで運動指令が発せられなければならない。

- 鍵盤支配型モデルへの批判に端を発するこれらの問題は、現在「Bernstein問題」と呼ばれ、多くの運動制御理論がこの問題の解決を目指しを進めている。



# b. Bernstein問題への解法

# (1) 中枢制御の理論

- Schmidtはスキーマ理論のなかでGMPを仮定し、1つのGMPとそれが支配する運動群という一対多対応の仮説を用いた。実は、これもBernstein問題への1つの解法であった。さらにAdamsの閉回路理論も、古典的な鍵盤支配型モデルに代表される開回路理論の問題点を克服するために想定されたものである。これらの理論は“中枢による制御”の原則を保持しつつ、現実の運動に対応できる“中枢制御”を考えようという立場に立つ。

## (2) 生態学的アプローチ

“中枢制御”の理論が今後どのように展開していくかはわからないが、Bernstein問題にはもう1つの解法が存在する。それは、Gibson(ギブソン)の“生態学的視覚論”に基礎を置く生態学的アプローチと呼ばれるものである。

- 生態学的アプローチは、まず“中枢による制御”の前提を放棄する。では、何か運動を制御するのかというと、中枢神経も、下位レベルの神経系も、末梢運動器も、環境もそれぞれに**自己組織化されたシステムであり、それらが相互に作用し合って運動が引き起こされる**のである。運動の制御はどれか1つのシステムが占有する特権ではないというのが生態学的アプローチの基本的な考え方である。

# D.生態学的アプローチ概論

## 1. 機能的シナジー

- 生態学的アプローチはまだ新しい理論(群)であり, 複数の視点が並列的に存在しているように思われる. そこで, 以下にいくつかのキーワードを取り上げ, 生態学的アプローチにおけるシステムの自律性とアフォーダンスについて説明する.

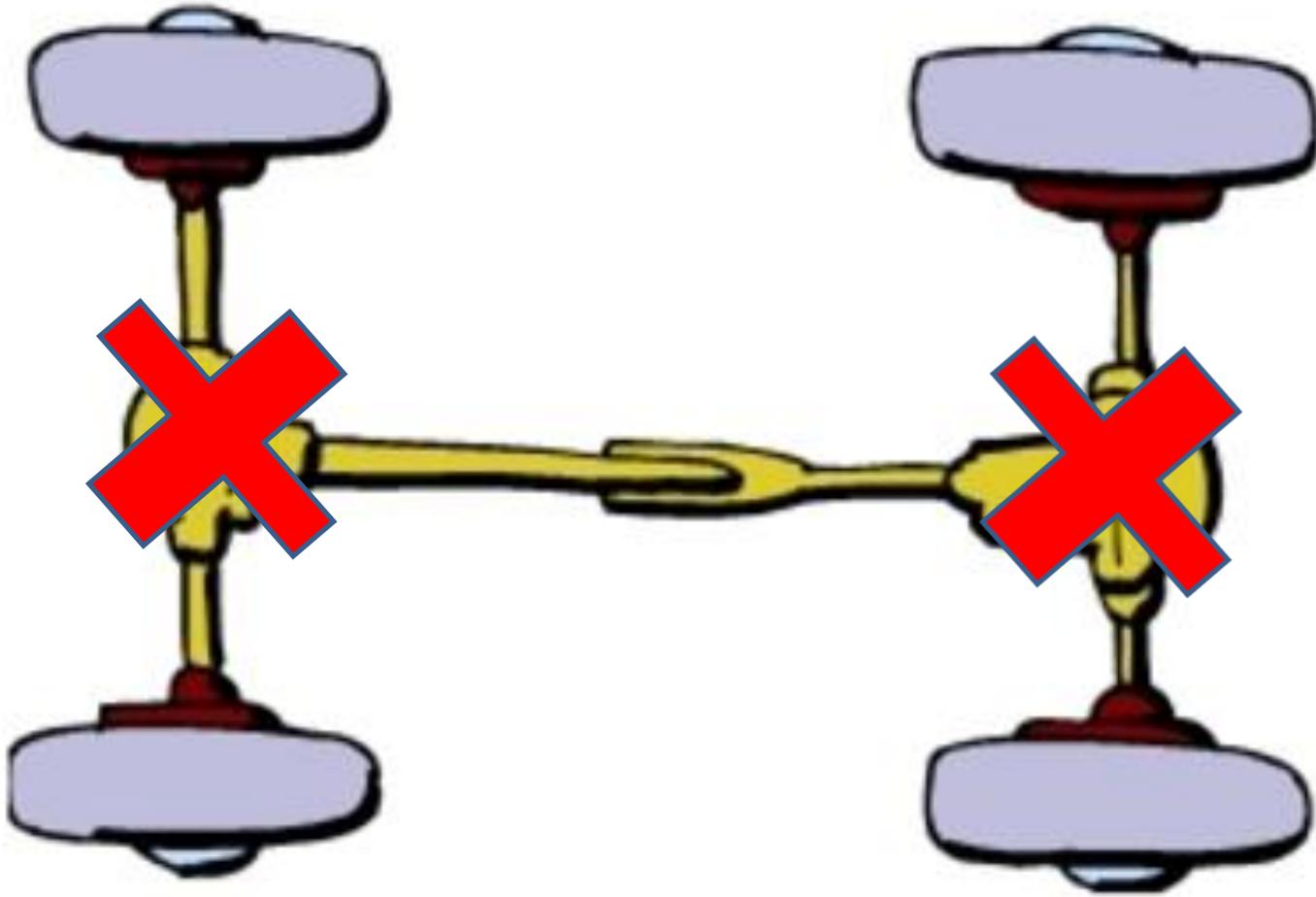
# 機能的シナジー

- Gibsonの仮説はBernsteinの“機能的シナジー”から派生したものである。Bernsteinは自由度問題を解決するために階層的運動制御を仮定した。
- 上位の神経系は下位の神経系を活性化し、下位の神経系は機能的シナジーを活性化する。機能的シナジーとはある課題の遂行に際して1つの単位として集合的に働くように結びつけられた筋群のことである。Bernsteinによれば、**運動が協調性を増していく過程は、余剰な自由度を制御する過程**である。そして、自由度を制御するうえで重要な役割を果たすのが**機能的シナジー**である。

＞バラバラさ(自由度)を、制限するために集合的に働かせる  
(注 木村)

# 協応構造 (coordinated structure)

- 同じような考え方が、人工的な動作システムの設計原理にも用いられている。もし、4つのタイヤをバラバラに制御するように設計された自動車が あったら、これを運転することは非常に困難だろう。しかし実際には、車輪どうしを結合させることで、操縦の際の自由度は大幅に制限されている。人工的な動作システムの制御に用いられるこのような機構を“協応構造 (coordinated structure)”と呼ぶ。



- 小児の理学療法では、下腿三頭筋に強い痙性がある脳性まひ児の立位・歩行練習に短下肢装具を用いる場合がある。装具を装着させると、それまで腰を引き、体幹を過伸展していたアライメントが一気にアップライトになり、抗重力筋が働き出すことがある。この現象も**機能的シナジーの考え方**で説明することができる。



- この例では、短下肢装具は下腿以遠の運動自由度を“1”に規定するために使われた。すると、それまで下腿～足部の数百～数千の運動自由度の制御に割り当てられていた制御能力を他の部位に振り替えることができるので、中枢部の制御が飛躍的に改善するのである。

＞制御可能数に制限があるのならば、その制限の範囲で動けるようにすることで、随意性が改善する  
(注 木村)

## 2. 内在的ダイナミクス

生態学的アプローチでは、運動学習は白紙の上に新しい技能を積み上げる過程ではなく、個人がすでにもっている行動の傾向を課題や状況の要求に適応させる過程であると考えるのである。ここで、「個人がすでにもっている行動の傾向」とは、以前の経験によって学習されたものだけではない。

むしろ多くは神経・筋・骨格系の本質的な性向によって規定されてしまう自然発生的な行動傾向で、個人に特有なパターンを示す場合もある。

- このような行動傾向は発達初期の幼児の行動パターンのなかにも観察され, “内在的ダイナミクス” (intrinsic dynamics) と呼ばれる.

Thelen(テーレン)らは4名の乳児を対象として, リーチ動作がどのように発現してくるかを観察した. ガブリエルという男児は運動的に非常に活発な子供であった. 彼は生後15週目に初めてリーチに成功したのだが, それ以前の数週間, 彼は上肢を激しく羽ばたかせるような運動に熱中していた.

- 彼の上肢の運動にはいくつかの特徴があった。まず、両上肢を同時に、素早く激しく、しかも規則的に円運動させること。次に、この自発的な円運動がランダムな打ち振りではなく、**muscle-spring** の特性をうまく生かした滑らかな楕円軌道で行われていたことである。

この時期にガブリエルは、おもちゃを見て興味がわき、体の活動性が高まると上肢がバネ様の運動を始めるという1つの安定した状態卵 attractor”stateと呼ばれる)にあった。

しかし、Thelenらが求める課題は、ガブリエルにとって安定した状態をいったん破壊し、リーチ動作という別の状態に移行することであった。そして、生後15週目に観察されたガブリエルの初めてのリーチ動作は、まさに彼の内在的ダイナミクスを応用するパターンで達成された。

ガブリニルは、いったん後方への羽ばたき運動を行ったのち、上肢を持ち上げおもちゃに近づけた。この間の運動は達い速度で、何回も方向を変えながら行われ、おもちゃに接触する寸前でやっと速度が遅くなるというものであった。

その後、数週間のガブリエルのリーチ動作を追跡してみると、動作中の上肢の運動速度が徐々に

制御されてくる様子が観察された。

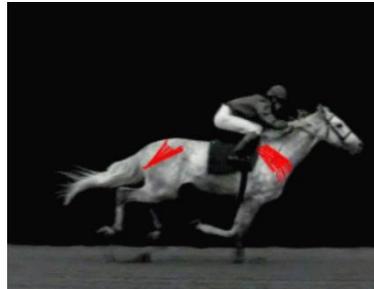
また、ハンナという女児はガブリエルとは対照的に運動的には非常におとなしく、物を見て遊ぶことを好む子供だった。彼女は生後22週目に初めてリーチに成功したが、そのときの上肢の運動は、どちらかといえば大人のリーチ動作に近い、一見完成されたパターンで行われた。

これ以前数週間の彼女の上半身運動は、運動速度も筋トルクも他の子供に比べ小さかった。ハンナが学ばなければならないことは、ガブリエルとは逆に、いかに重力に抗して上半身を持ち上げる力を強くし、おもちゃに手を伸ばす速度を速くするかであった。

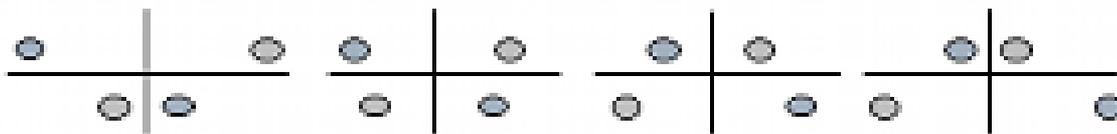
その後のハンナのリーチ動作を追跡すると、ガブリエルとは逆の方向への変化がおこっていくことが観察された。

# 3.運動のタイミング

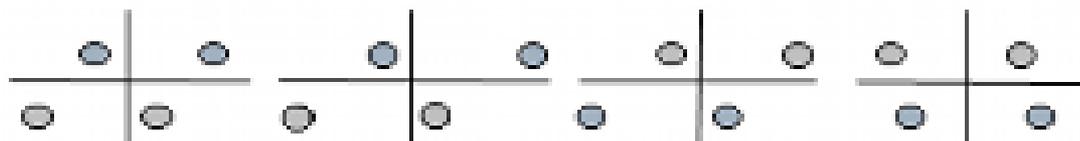
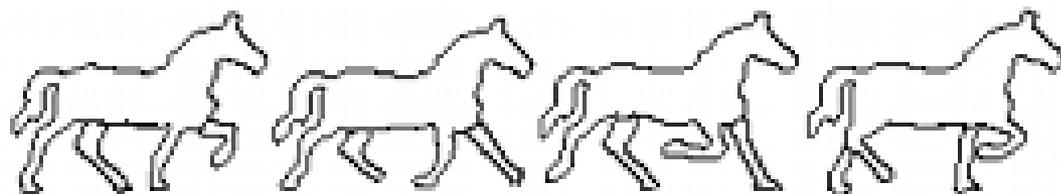
- システムの自律性は、運動のタイミングのなかにも観察できる。たとえば、**歩行における各フェイズが1歩行周期に占める割合は歩行速度が変化しても一定に保たれる**こと、熟練したピアノ奏者が左右の手を動かすタイミングは曲の速さが変化しても一定に保たれることなどが知られている。
- 
- 一方、四足動物の足並みが、移動速度が増してくると、ある時点でトロットからギャロップへと突然移行する事実も観察されている。これらは一見、逆の現象のように感じられるが、本質的には、**ある幅をもった運動速度の範囲内での安定した運動のタイミングというものが存在する**ことを示している。



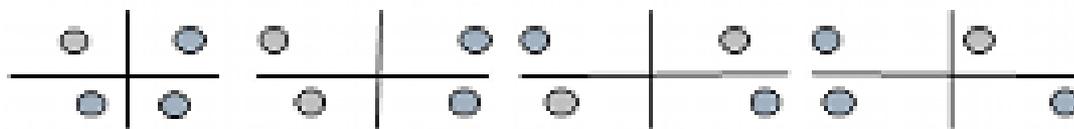
低速



Trot

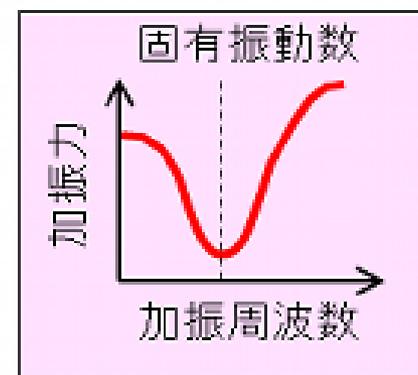
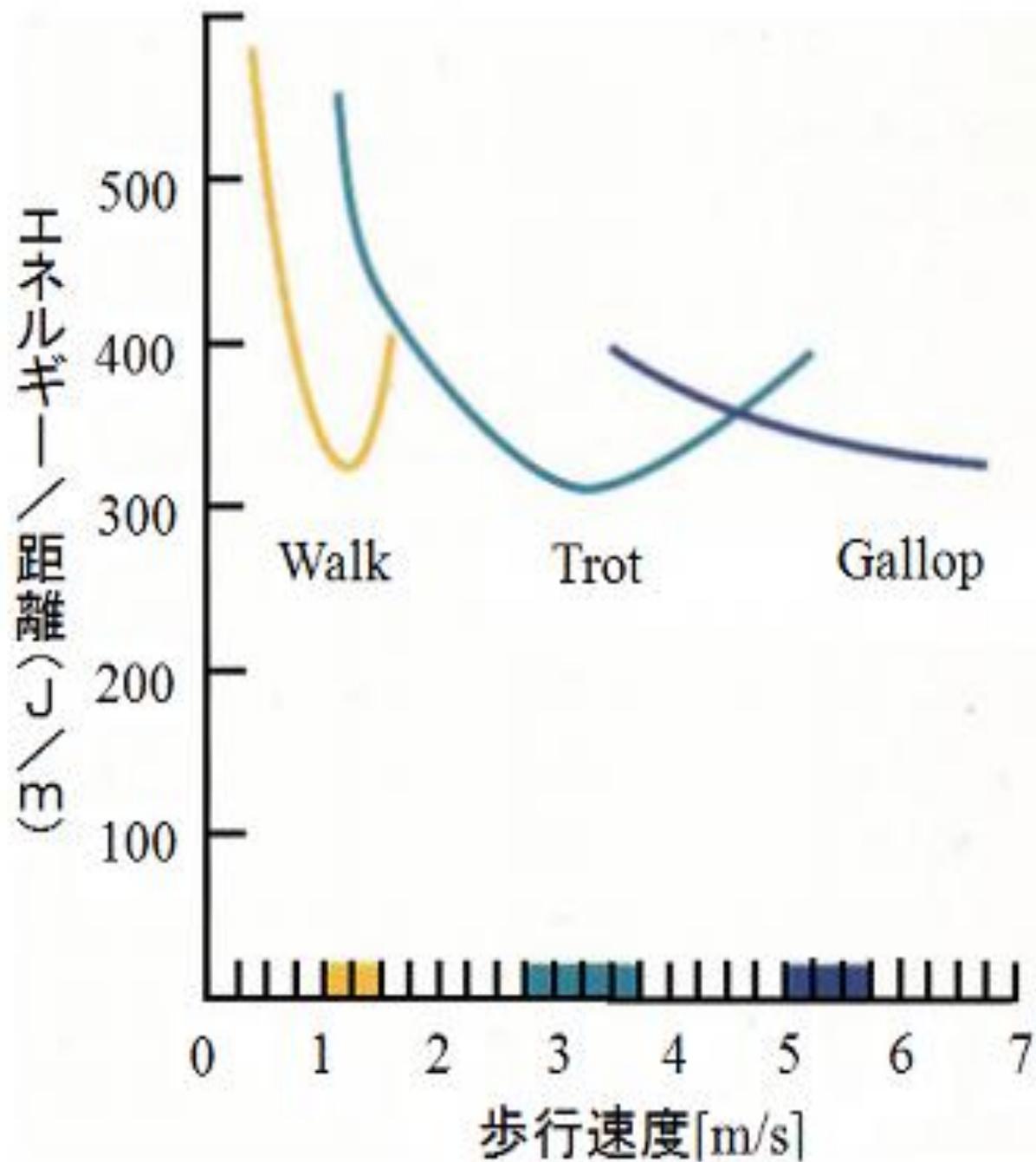


Pace



Gallop

高速



所望の振幅を得るために必要な加振力と加振周波数の関係

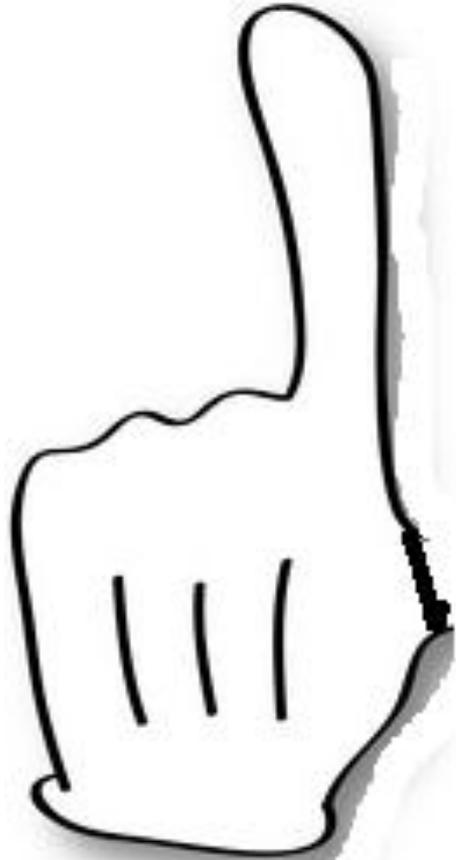
## 4. 協調的ダイナミクス

Kelso(ケルソー)は、両手動作をはじめとする

各肢節間の協調運動に関する一連の実験を行った。まず、被験者の両手を台上に置き、第2指だけを伸展し、他の指を握った肢位をとらせる。ここで**左右の第2指を同時に内転し、次に同時に外転するような運動を`in-phaseの運動`**と呼ぶ。in-phaseの運動では、左右の同名筋が同時に活動することになる。

逆に、左の第2指を内転するときには右の第2指を外転し、左の第2指を外転するときには右の第2指を内転するような運動を`antiphaseの運動`と呼ぶ。antiphaseの運動では、左右の同名筋が交互に運動することになる。

ワイパー運動がantiphase (注 木村)



- 被験者への課題は,左右の第2指をメトロノームに合わせて同時に動かす(内・外転する)ことである.メトロノームは1.25 Hz から徐々に速度を上げていくように設定されている. 被験者への指示は,たとえば次のようなものである。「antiphaseの運動をメトロノームの速度に合わせて行ってください. ただし,途中で自分の運動がantiphaseではなくなったことに気づいても修正しようとせず,最もやりやすい方法で動かし続けてください」.

- このようにしてantiphaseの運動を開始し，メトロノームの速度を上げていくと，**ある速度で運動はin-phaseに変わってしまう**。しかし，in-phaseの運動から開始した場合には，速度が上がってもantiphaseの運動に変わることはなかった。
- Kelsoの実験は，四足動物の足並みがある移動速度を境にトロットからギャロップへ変化することにヒントを得たものであった。左手の第2指を四足動物の前肢に，右手の第2指を後肢に見立てれば，antiphaseの運動はトロットのパターンに，in-phaseの運動はギャロップのパターンによく似ている。

Kelsoの実験はこののち、両手間の種々の協調運動、一肢内の複数関節の協調運動、多肢間の協調運動へと拡大され、人間の運動は自律的な・‘協調的ダイナミクス (coordination dynamics)によって自己組織化されていることを示した。

# 5. アフォーダンス

- アフォーダンスは、Gibson(ギブソン)の生態学的視覚論に端を発する概念で、行為者に対して環境が提供する行為の可能性についての予見的情報である。

たとえば、大地が行為者に対して十分な広がりを持ち、十分な強度があれば、大地は身体の支持や移動をアフォード(afford)する。道具はそれに固有の身体の動きをアフォードする。

- また、行為者に接近してくる物体は、行為者の側から見て、その“見え”が刻々と変化する。“見え”の変化は、物体との“接触までの時間”や“衝突の激しざという行為者と環境との‘潤保則に関する情報を提供し、それに見合った行動をアフォードする。

アフォーダンス(affordance)とは、環境が動物に対して与える「意味」のことである

- 従来の情報処理理論では、人間は外界にある物体そのものを刺激として知覚し、情報処理過程のなかで**知覚刺激**に意味づけをされると考えられていた。
- これに対して生態学的視覚論では、人間が知覚するのは物体そのものではなく、ある人にとってその物体がどのような意味をもつかという情報を直接知覚すると考えるのである。

分かりづらければ、これを利用した錯覚現象を考えてみる（注 木村）

- しかし、身体運動の文脈は環境の側からのみ制御されているわけではない。アフォーダンスは環境の側に存在しており、運動システムがそれを抽出するための探索に成功しなければ、有効な情報とはなりえない。Gibsonによれば、知覚とは「行為者が環境からアフォーダンスを抽出するために、活動を持続的に組織化すること」である。
- 生態学的アプローチでは身体の動きと知覚は本質的に分けることのできない一体のものであると考えられている。

## 6.何が学習されるのか

生態学的アプローチでは、課題とそれを遂行する環境の制約に応じた知覚-行動の協応性を増すことが運動学習であるとされる。

たとえば、コップを持ち上げるという課題を学習する場合には、コップまでの距離やコップにどのくらい中身が入っているかなどの条件を変えて練習を繰り返すことが必要である。このとき、課題状況のどのような特性に注目すべきかということも学習しなければならない。

- 知覚的手がかりは、最適な行動ストラテジーの作成に役立つが、知覚的手がかりがない場合でも行動をおこすことはできる。
- ただし、その場合の行動ストラテジーは最適なものではないかもしれない。

練習中に課題解決に適したストラテジーが検索される。最適なストラテジーを検索するためには、最適な知覚的手がかりと最適な運動反応が発見されなければならない。

このように生態学的アプローチでは、運動学習は課題に関連した知覚と行動を情報処理スペースの中にマッピングする過程であるといえる。

# E. スキーマ理論概論

## 1. スキーマとは

スキーマは通常、**知覚に関する概念**で、1組の視覚刺激のセットを認識し、これをあるカテゴリーに分類するために使われる。たとえば、われわれは「イヌ」というスキーマをもっている。それは「マルチーズ」や「シェパード」というイヌの品種よりは広い概念であるが、「ネコ」や「ウマ」という他の四足獣と区別できる程度に狭い概念である。

さらに重要なことは、われわれは初めて見るイヌであっても、それが「イヌ」と認識できるということである。われわれはイヌの**特性を抽象化した概念**（すなわち、“イヌのスキーマ四に当てはめて、それがイヌだと認識するのである”。

- スキーマの特性に関してPosner(ポスナー)らが行った実験の概要を図3に示す.

Posnerらの実験は9つのドットから構成される図形を分類させ、記憶させるというものであった。実験では24個の異なる図形が用いられた。これらのパターンは、3つの基本図形(原型)を少しずつ変えてつくった変化型である。

# 図3 スキーマの特性に関する実験の概要

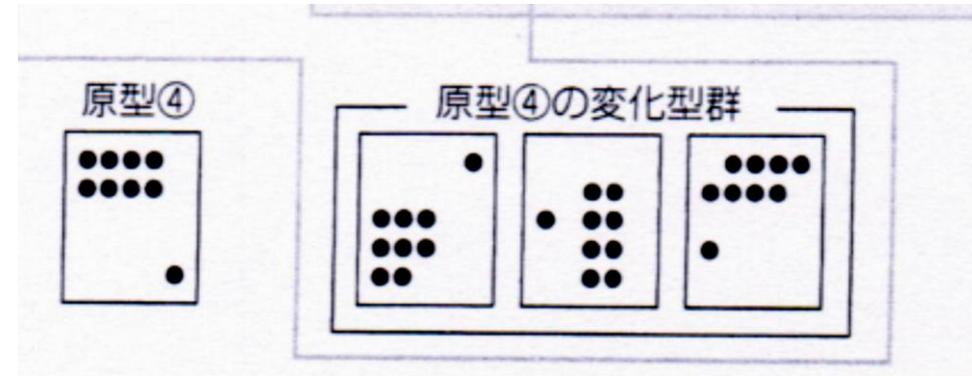
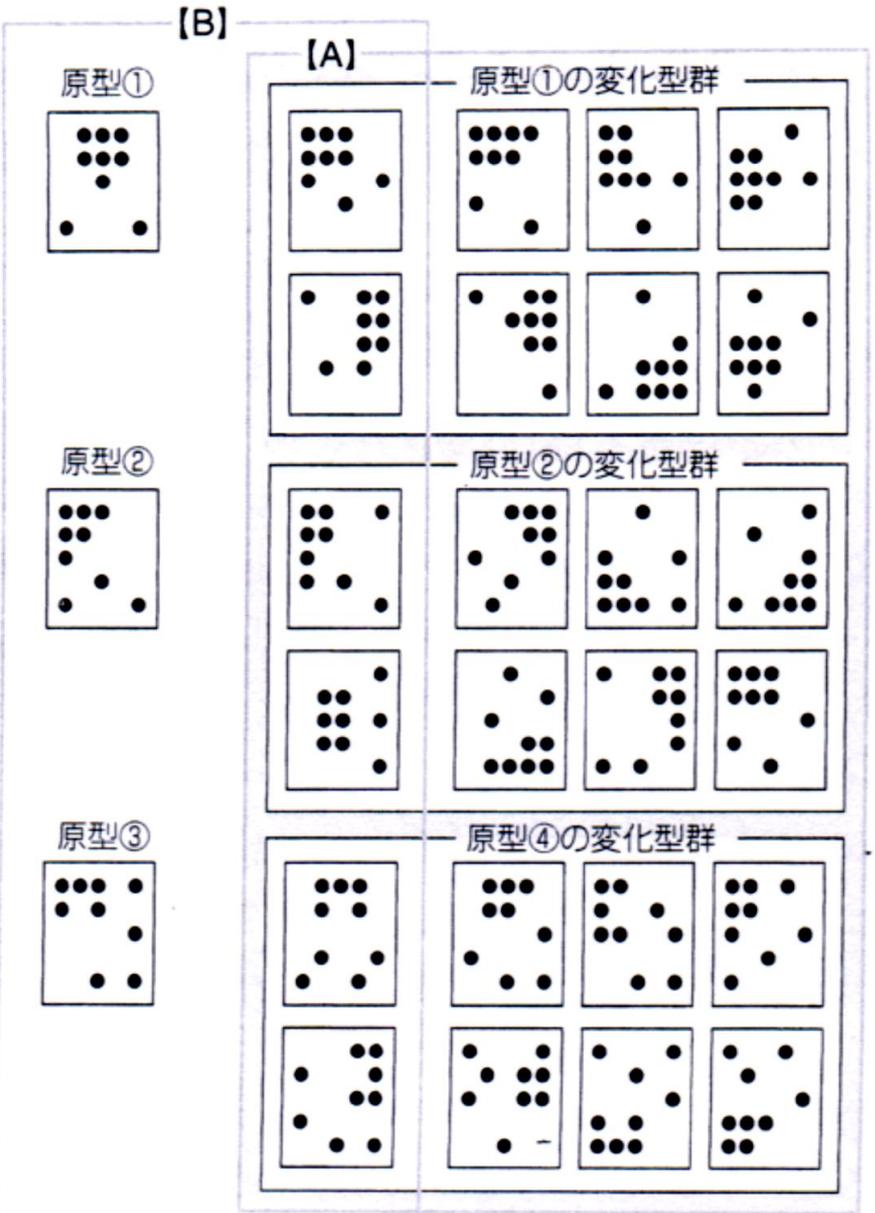


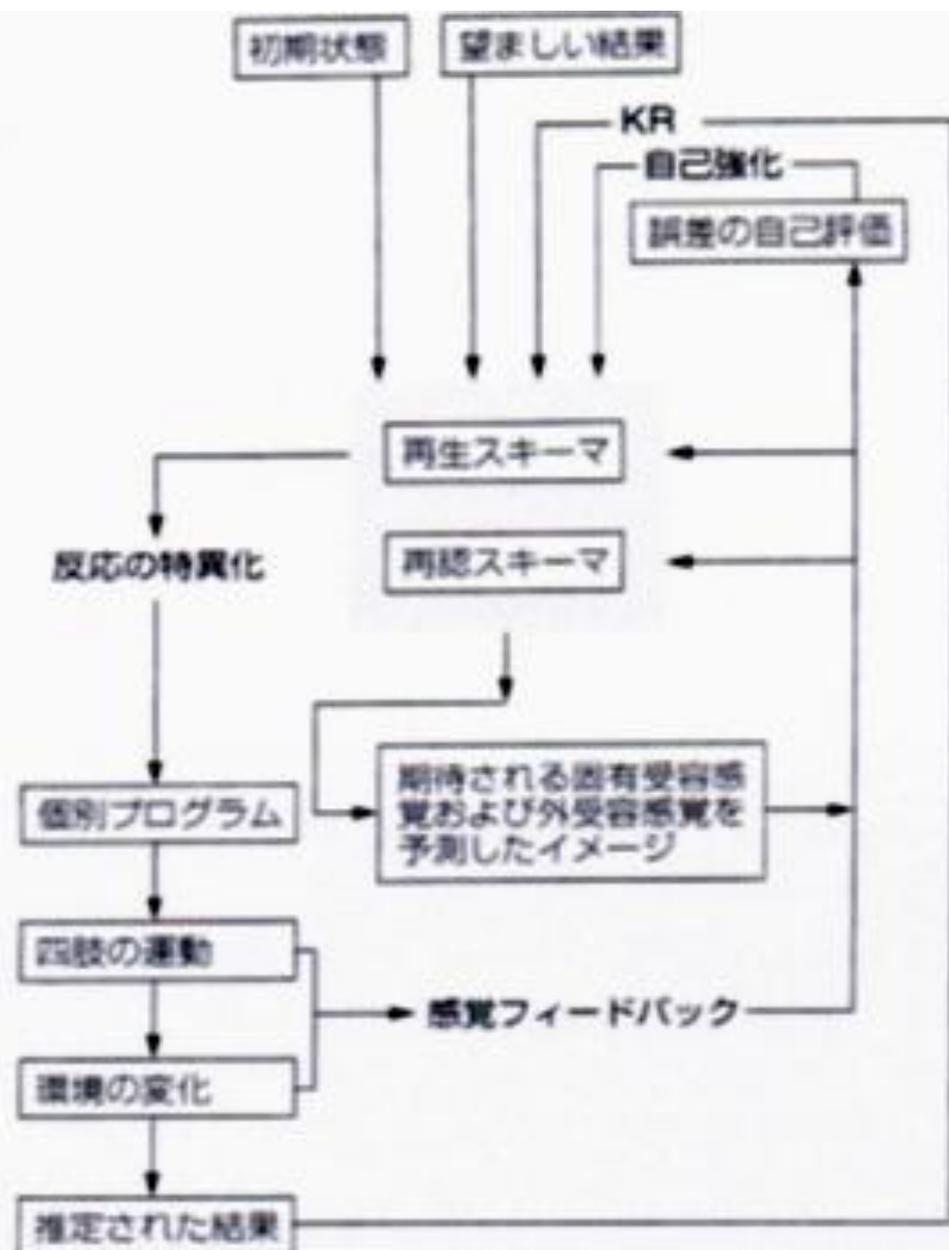
図 スキーマの特性に関する実験の概要

Posner らが用いたパターンを予想して作成したパターン。実験の第 1 段階は【A】の 24 パターンを分類させる訓練、第 2 段階は【B】の 12 パターンを分類させるテスト、第 3 段階はこれらのパターンを用いて、以前の分類訓練・テストで実際に使われた図形か否かを問う再認テストである。

被験者には原型そのものは見せないようにする。まず、24個の図形を正しくもとの3つのカテゴリーに分類できるように訓練を行う。その後、訓練で用いた24個の図形のなかから選んだ6個の図形と、原型の3個の図形と、まったくカテゴリーの異なる3個の図形の合計12個の図形を分類させるテストを行った。

その結果,訓練時には提示しなかった原型図形についても正確な分類ができることが明らかになった. さらに1週間後に,訓練で用いた変化型図形と原型図形を示し,以前に見たことがあるかどうかを答えさせたところ,原型図形は正しく記憶されていたが,変化型図形は原型図形ほど正確には記憶されていなかった.

- Posnerらの実験から示唆されることは,
  - ①被験者が分類の訓練中に個々の図形の特徴を抽象化したスキーマ(この場合は,原型の3つの回形)を形成したこと
  - ②各図形の抽象的概念であるスキーマは個々の事象が忘却されたあとにも記憶として残るものであることの2点である.



## スキーマ理論

### 運動の生成と評価

- (1) 初期状態

運動開始時の身体の状態および環境の状態が含まれる。運動遂行者はこれらを感じ受容器を通じて知り、記憶する。

- (2) 反応の特異化

人間の運動は記憶として貯蔵されている運動プログラムによって開始される。しかし、スキーマ理論では、貯蔵されているプログラムは個々の運動に一対一対応した個別プログラムではなく、GMPである。そこで、実際の運動遂行にあたっては遂行者は運動開始前に運動の速度や強度などの具体的なパラメータを決定しなければならない。このとき、どのようなパラメータを選択して反応を特異化したかを記憶する。

- (3) 運動遂行に伴って生じる一連の感覚

運動遂行に伴ってフィードバックされてくる固有受容器, 外受容器からの情報を記憶する. これらの情報は運動時に実際に生じた感覚のコピーである.

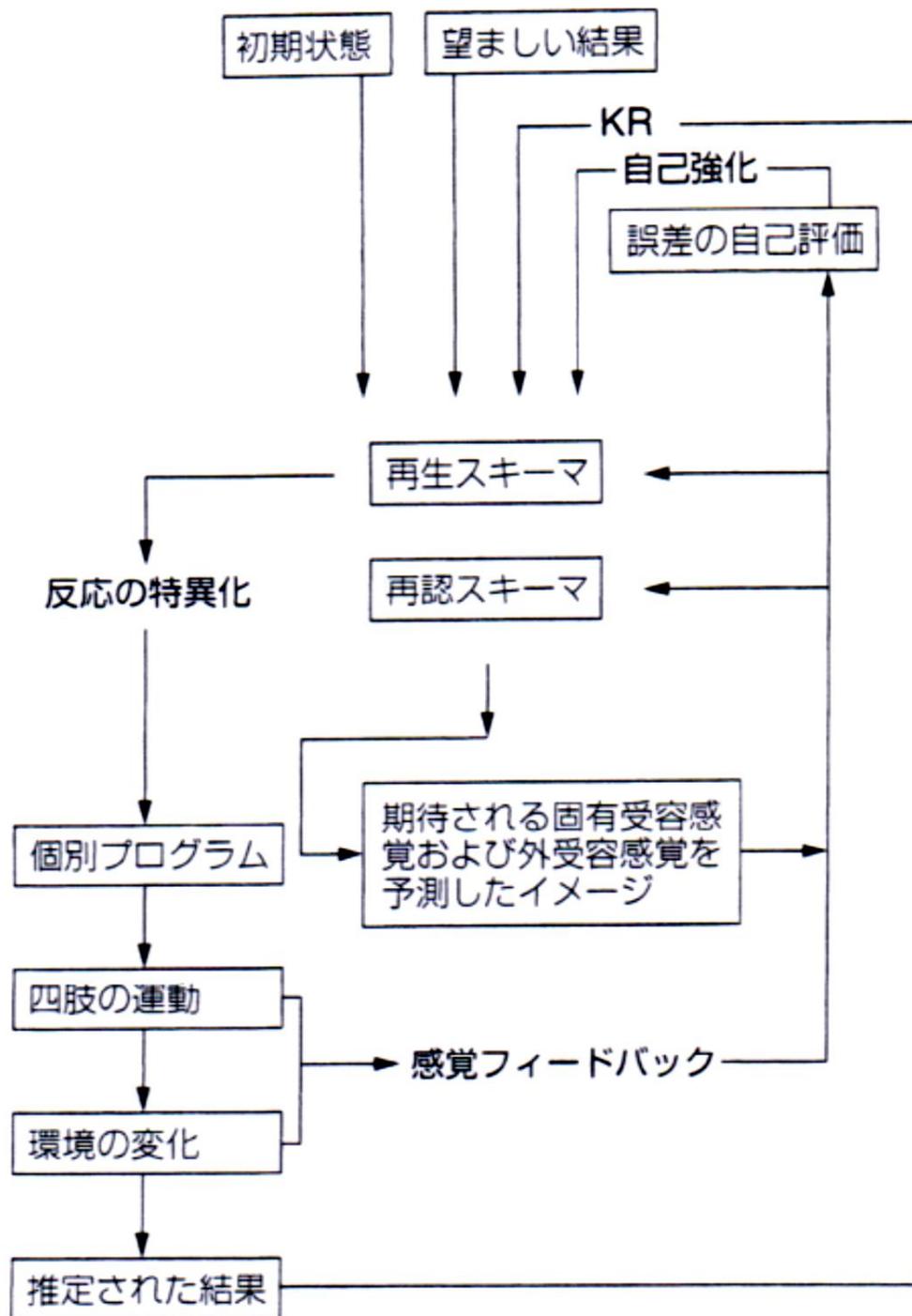
- (4) 運動の結果

指導者から与えられるKRが代表的なものであるが、KRが与えられない場合には遂行者自身が知りえた結果を記憶する。

- 運動が繰り返し行われると、遂行者はこれら4つの情報源から得られる**情報の関係を抽象化し始める**。これらの関係がそのカテゴリーに属する運動のスキーマであり、**実際に行った個々の運動反応よりも重要なもの**とみなされる。

### 3. 運動反応の生成と評価

- スキーマ理論では, GMPに基づき, 運動反応スキーマが機能して実際の運動が遂行されると考えられている. スキーマ理論による運動反応の生成と評価のダイアグラムを
- 図に示す.



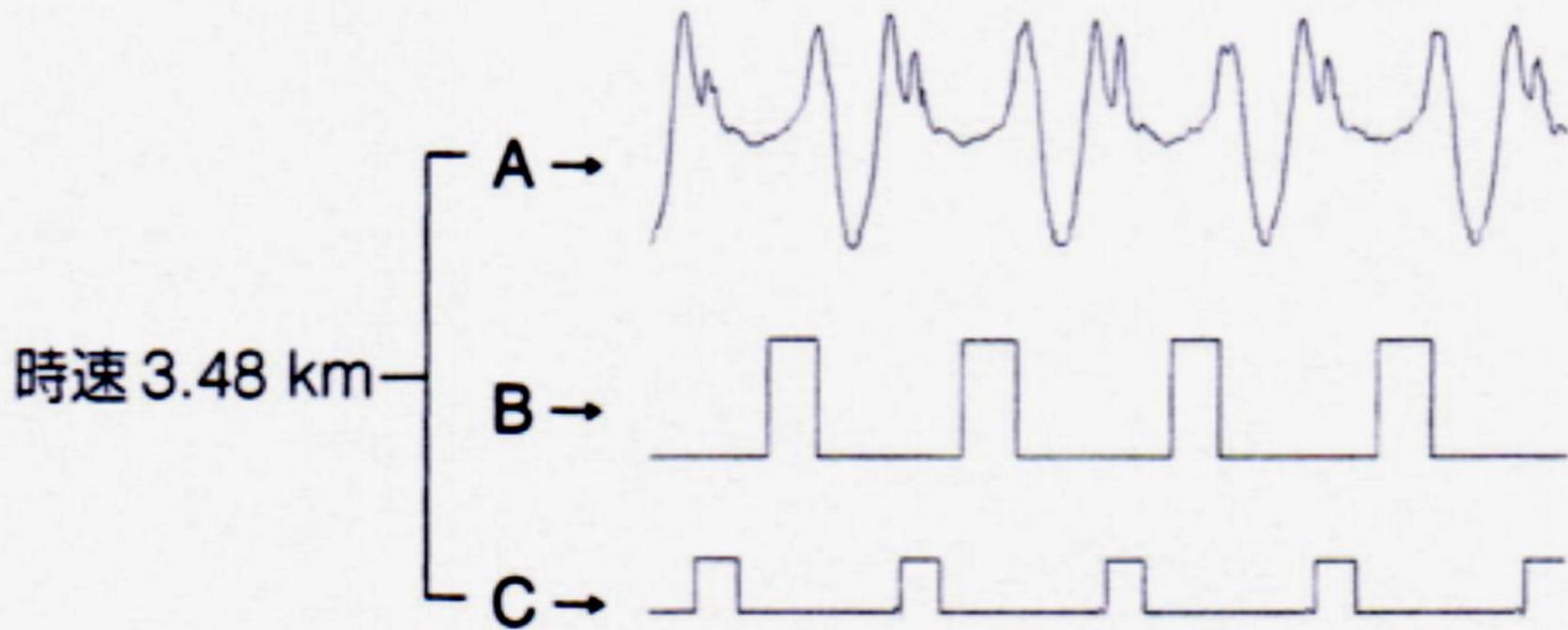
- 運動反応スキーマを使って運動を行うとき、まず“望ましい結果”`ど勃期状態”という2つの要素がスキーマに入力される。すると、遂行者は再生スキーマ”を使って反応の特異化を行う。
- 再生スキーマとは、“過去に行った運動の結果”と‘そのときに用いた反応の特異化”の関係である。これから行おうとしている運動が過去に経験したことのないものであっても、再生スキーマを利用することにより、適切なパラメータを予測することができる(図)。
- **反応の特異化に従い**、実際に行う運動がプログラミングされ、実行される、

このとき同時に、遂行者はこれから行う運動によって生じると期待される一連の感覚のイメージを“再認スキーマ”からつくり出す。再認スキーマとは、‘過去に行った運動の結果’と‘そのときに生じた一連の感覚’の関係である。ダイアグラムでは便宜上、固有受容感覚と外受容感覚を分けているが、これらの作用や機能は同じである

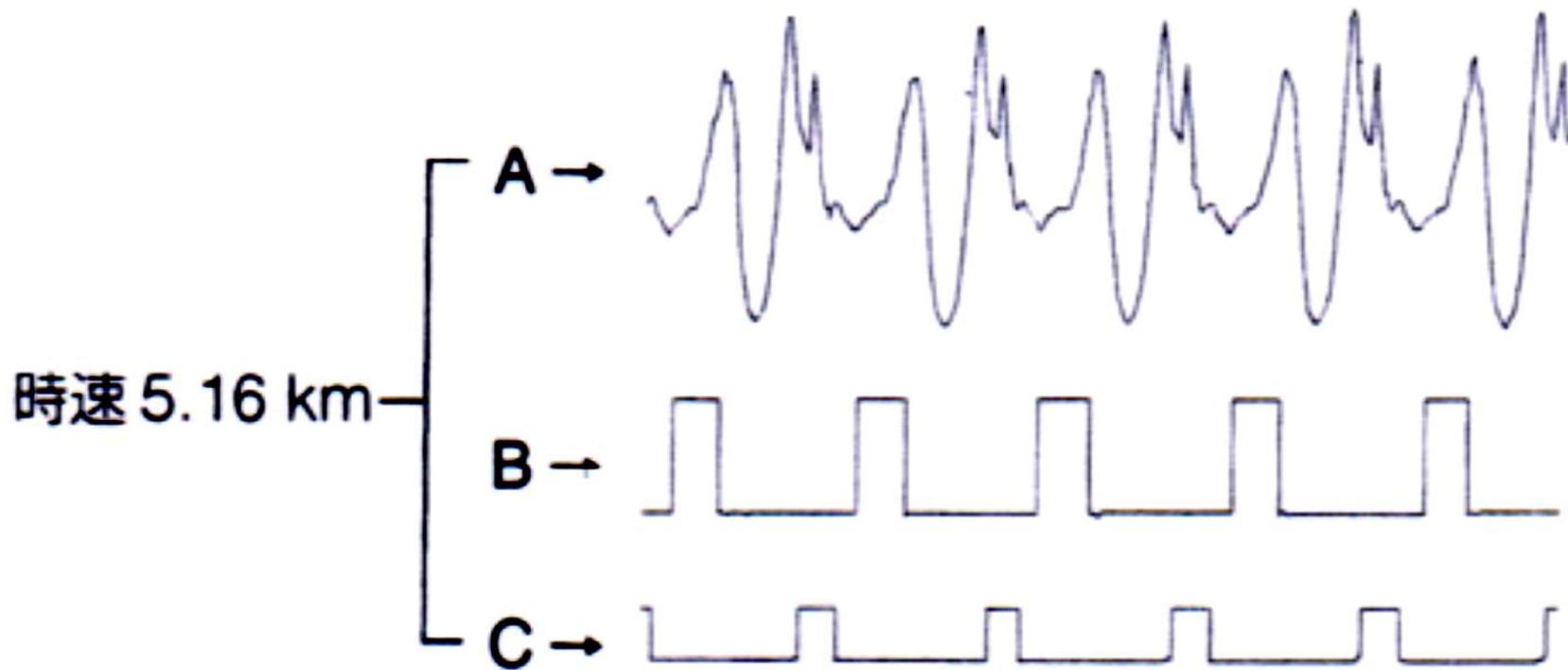
- 遂行者が予測した感覚のイメージは、実際の運動に伴って生じる感覚フィードバックを待ち受け、両者が比較される。そこで誤差に関する情報が生じ、これが目標運動に照らして評価される。つまり、どの程度うまくできたのかという判断が下されるわけであるが、判断を下すのは、まず遂行者自身である。自己評価として、うまくできなかったという判断が下されれば、それがフィードバックされてスキーマが修正される。

# 自己強化機能

- スキーマ理論では、このような遂行者自身によるスキーマの**自己強化機能**を想定しているので、KRが与えられない場合にも、学習が成立する可能性がある。さらに指導者からKRが与えられれば、判断はより正確なものとなる。
- 自己評価として満足のいく段階まで学習が進んでしまうと、自己強化によっては、もはやそれ以上の上達は望めなくなるが、指導者がKRで誤差情報を提供することにより、さらに学習が進む。



A



B

## 4.一般化された運動プログラムと パラメータ

GMPがあるクラスに属する運動に共通のプログラムであることはすでに述べた。では、具体的にはどこまでが一般化されていて、反応の特異化の段階で選択されるパラメータの範囲はどこからなのか。歩行プログラムを例にとって説明しよう。

図A, トレッドミル上で歩行している被験者の下腿速位部に取り付けた加速度計および前足部と踵に取り付けたフットスイッチの出力波形である。

(図Aは、被験者が時速3.48kmで歩行しているときのグラフ)

- 図Bは同じ被験者が時速5.16kmで歩行しているときのグラフである。上段と下段の加速度グラフには共通する点と異なる点がある。
- どちらも歩行という同一のGMPを使って実行されている運動なので、両者の共通点はGMPがくり出している運動特性、両者の差異はパラメータ選択時に生じた差異と考えることができる。

- 両者の共通点の1つ目は運動の相対的タイミングである。相対的タイミングが等しいということは、1歩行周期時間のなかで各フェイズが占める時間比率が等しいということである。このデータでは上段のグラフの横軸を89%に縮小すれば、加速度的変換点は下段のグラフと重なる。
- 共通点の2つ目は運動の相対的強度である。今度は、上段のグラフの縦軸を136%に拡大すれば、主要なピークの高さは下段のグラフと等しくなる。
- 逆に、両者の差異はいうまでもなく絶対的タイミングと絶対的強度ということになる。

- 図A・Bから読み取れる現象はそのまま一般化することができる。
- つまり、GMPの役割は運動の相対的な時間構造と相対的な運動強度の構造を規定することである。反応の特異化で選択されるのは、当該の運動をどれだけの時間範囲で、どれだけの強度で行うかという絶対的な速度と強度のパラメータである。

- ただし、パラメータ選択には、この例とはレベルの異なる視点で見なければならないものがある。
- それは、運動の実行にあたり、どの身体部位を使うか、さらにどの筋、どの運動単位を使うかである。
- **書字を例にとれば、黒板に板書をするのと机上でノートに字を書くのとでは、使用する上肢の部位は大きく異なる。**板書では肩関節や肘関節が主に動くが、机上の書字では動くのは手関節から先である。しかし、同じ人が書いた文字であれば黒板でもノートでも筆跡はあまり違わない。
- このように、パラメータ選択時にどの身体部位を選択しても、GMPが同一ならば、実行される運動には共通の相対的時間構造と相対的強度の構造がみられるのである。

# F.運動学習研究の技法

## 1. 運動学習課題の種類

運動技能 (motor skill) を分類する主要な次元

2つ.

# (1) 開放スキルか閉鎖スキルか

- 運動遂行中にフィードバック情報を利用した制御が可能か否かという次元上の分類である。開放スキル (open skill) では遂行中にフィードバック情報を利用できるが、**閉鎖スキル (closed skill) では利用できない**。
- すなわち、開放スキルは環境に対してオープンであり、運動を開始したのちも環境とのやりとりのなかで運動が修正される可能性がある。
- しかし、閉鎖スキルは運動を開始してしまえば途中で修正することができず、環境に対してクローズである。
- 自動車の運転は**開放スキル**、ゴルフのスイングは**閉鎖スキル**である。

## (2) 離散的スキルか連続的スキルか

- 運動の時間的な連続性に関する次元上の分類である。離散的スキル (discrete skill) は1試行に明らかな始めと終わりがあるが、連続的スキル (con-tinuous skin) はそれ自体には明らかな終わりはない、ゴルフのスイングは離散的スキル、自動車の運転は連続的スキルである。
- また、系列的スキル (serial skiH) は離散的スキルと連続的スキルの中間的な性格をもつ。体操競技の演技など、いくつかの離散的スキルを連続的な時間の流れのなかで行うものを“系列的スキル”という。

### (3) その他のスキル

- このほかに運動技能を分類する次元として、運動の速度やリズムに関して自律スキルか他律スキルか、運動の結果を左右する要因に関して認知的スキルの要素をどの程度含むかなどがある。
- 運動学習課題は、これらの次元の組み合わせで分類される、

＞これらはMcgill(運動学習研究者)の概念に従っている(注 木村)

## 2.運動学習の測度

- 運動学習では、学習者はある運動課題をできるだけ正確に行うことが要求される。したがって、**運動学習の主要な測度は運動反応の正確性、すなわち、誤差を示すスコア**である。
- また運動反応は、それが**十分に学習されたものであっても、1回ごとにばらつく傾向**があり、単一試行のスコアに基づいて運動反応の正確性を判断するのは難しい。そこで、連続する数試行を1つの試行ブロックとして、その段階における**平均的な運動反応の傾向を求めるのが一般的**である。

よく使用される誤差の指標に次の5つがある.

- ①定常誤差 (constant error: CE)
- ②変動誤差 (variable error: VE)
- ③総合変動 (total variability: E または  
root-mean-square error: RMSE)
- ④絶対誤差 (absolute error: AE)
- ⑤絶対定常誤差 (absolute constant error:  $|EI|$ )

## a. 定常誤差 (CE) と変動誤差 (VE)

- CEは次式により算出される.

$$CE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{目標値})}{n}$$

CEは、ある試行ブロックにおける誤差の平均値であり、学習者の運動反応が目標値のどちら側へ偏位しているか(目標値より大きすぎるのか、小さすぎるのか)を表す。

- VEは次式により算出される.

$$VE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

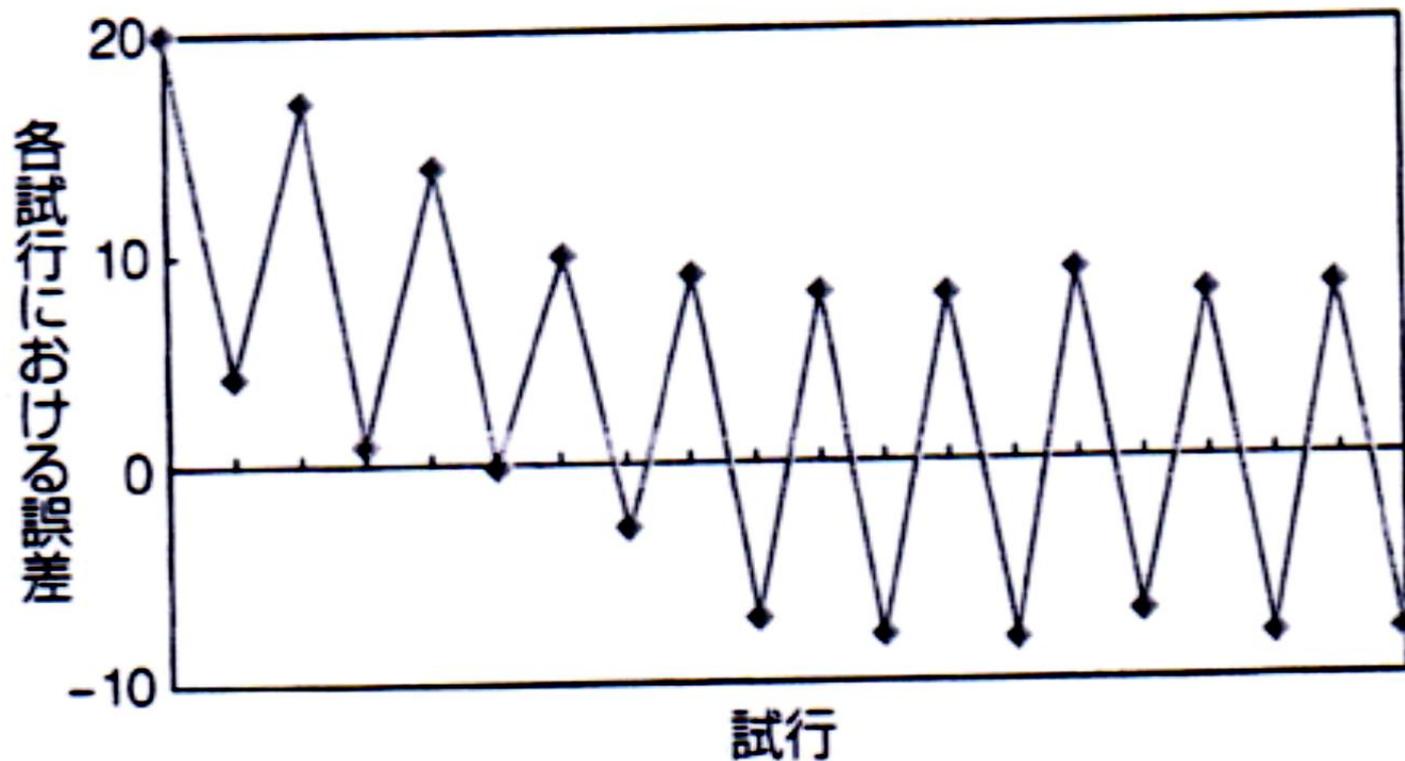
VEは、ある試行ブロックにおける誤差の標準偏差であり、運動反応のばらつきを表す指標である。

CEとVEは運動反応の異なる側面を表しているので、対にして用いることが多い。実験条件によってはCEはゼロに近づくが、VEが減少しない場合がある(図7)。たとえば、学習者が自らの運動反応を振り返ろうとしない場合に、このような現象がおこる。

- 指導者に[大きすぎる]と言われれば、次は極端に小さくし、「小さすぎる」と言われれば、次は極端に大きくし、これを交互に繰り返す。

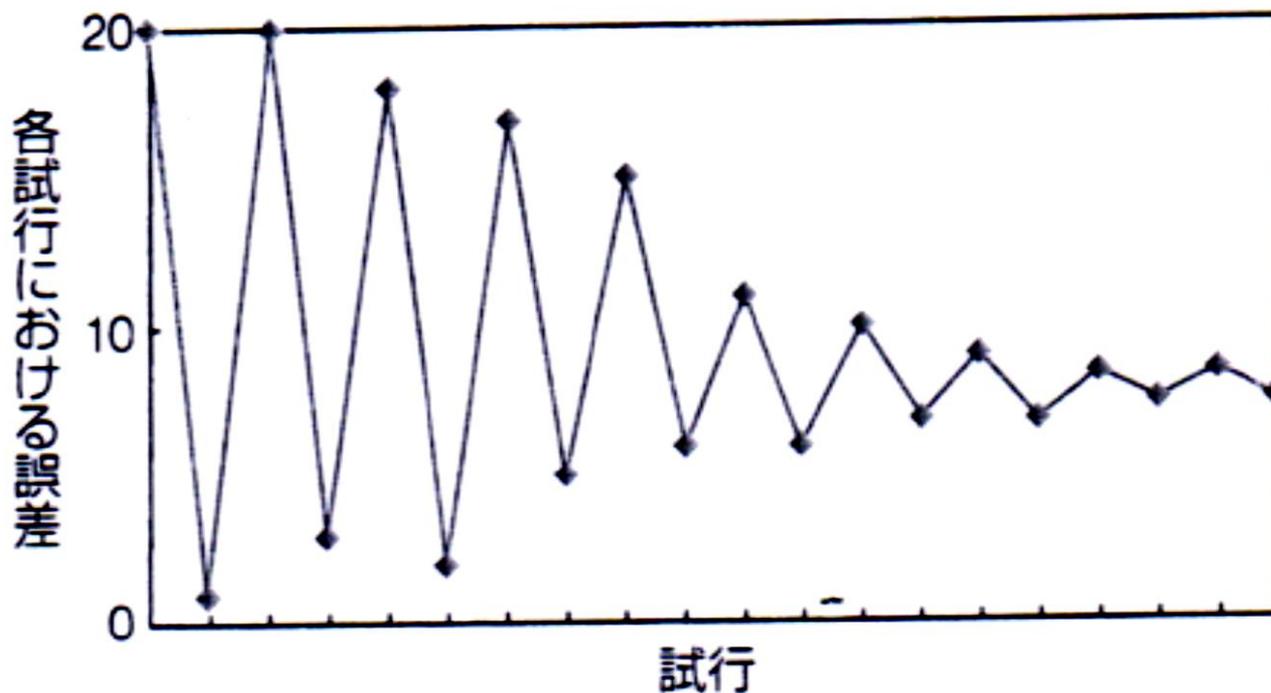
自らの運動を振り返らない、あるいは振り返ることのできないような条件のもとでは、直前の試行とその前の試行の中間の反応をするという調整ができないので、反応のばらつきは減少しない。

- 逆に、VEはゼロに近づくが、CEが減少しない場合もある(図).閉眼で10cmの線を引くという課題を与えておき、結果を知らせずに何十回も遂行させると、ある長さに反応が収束してくる.
- この場合、学習者は自分の反応に対して何の評価も与えられないので、自分なりにこれが10cmだろうと思っている基準を変える理由がない.すると関節覚などの受容器からの感覚フィードバックを頼りに、自分なりの基準に向けて自分の運動を



### 図 CEのみ低下する例

5 試行ごとの試行ブロックで誤差の平均 (CE) を算出すれば, 後半の試行では "0" に近づいているが, 誤差の標準偏差は減少していない.



### 図 VEのみ低下する例

5 試行ごとの試行ブロックで誤差の標準偏差 (VE) を算出すれば、後半の試行では "0" に近づいているが、誤差の平均は減少していない。

制御していくことになるので、VEのみが減少してくる。

上記2例は極端な場合だが、このようにCEとVEは互いに拮抗するような側面をもっている。

そこで、CEの変化とVEの変化を総合的に表す指標がEである。

## b. 総合変動 (E)

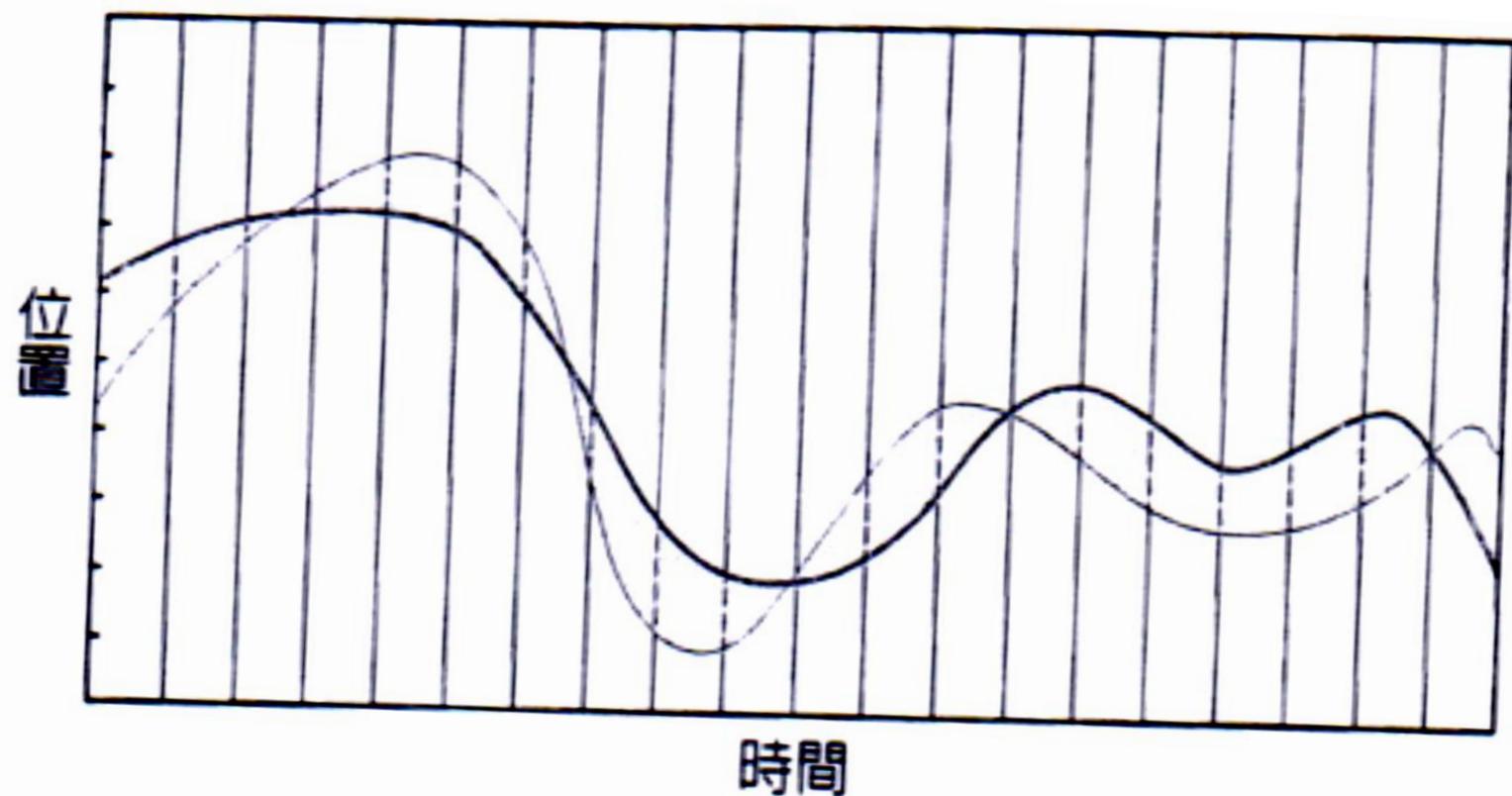
- Eは次式により算出される.

$$E^2 = CE^2 + VE^2$$

または, 個々のデータを用いて,

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \text{目標値})^2}{n}}$$

- Eは目標値の周囲にどの程度の広がりをもってデータが分布しているかを表しており、学習者の目標達成度を総合的に表す指標とすることができる。
- **RMSEは、概念としてはEと同じように考えてよいが、**通常、連続課題における運動反応の正確性を表す指標として用いられる。図は、トラッキング課題における標的の動きと学習者の反応を時間軸に沿って示したものである。この図では時間軸を20個の単位時間に区切っている。そこで、単位時間あたりの誤差面積を求め、20個の誤差面積の合計を20で割った値がRMSEである。



## 図 トラッキングにおける RMSE

太線：標的の動き，細線：学習者の反応。

太線と細線の間誤差面積（斜線部分）を単位時間の数（20）で割った値が RMSE（root-mean-square error）である。

## c. 絶対誤差 (AE) と絶対定常誤差 (ICEI)

- AEは次式により算出される.

$$AE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \text{目標値}|}{n}$$

AEも、ある意味でCEとVEを足し合わせたような性格をもつ。CEにもVEにも少しずつ変化があるが、統計処理をするとどちらも有意水準に達しない場合でも、AEを指標にすると有意水準に達することがある。AEは運動反応の変化に敏感な指標ではあるが、その反面、どのような変化なのか、あるいは変化がおこった理由は何かなどの示唆に乏しい。

運動反応が目標値のどちら側に偏位するかという方向性には特別な意味がなく、優位の大きさのみを問題とするときにはICEIを用いる。

複数の被験者を1つの実験群に配置し、実験群内の平均的な優位の大きさをみる場合に有用である。CEがプラス側に優位する被験者と、マイナス側に優位する被験者がいてもCEIを用いれば相殺されることなく、優位の絶対的な大きさを知ることができる。

## d. 学習曲線の問題点

- 上記5つのスコアは、値が小さくなるほど運動反応の正確性が増したことを表す。では、運動学習のどの段階でこれらのスコアを算出すれば学習の形成度を知ることができるのだろうか。

古くから学習の測度と考えられてきたものに、いわゆる“学習曲線”がある。横軸に練習試行ブロック、縦軸に誤差のスコアをとり、練習中の誤差の変化を示したグラフが“学習曲線”と呼ばれてきたものである。

# 学習曲線 to パフォーマンス曲線

- しかし現在では，“学習曲線”を学習の測度とみなすことの問題点が指摘されている。前述したように，学習者の練習中の行動の変化には練習中にしか存在しない要因が影響を及ぼしている可能性がある。指導者からの助言や動機づけ，**学習者の疲労**などが，それである。練習中の行動の変化は，これらの要因の影響を受け，さらに学習による変化が加わったものと考えられ，このなかから学習の作用だけを分離することは困難である。
- そこで運動学習研究では，従来，“学習曲線”と呼ばれてきたグラフを“パフォーマンス曲線”と改称して用いることが多くなった。

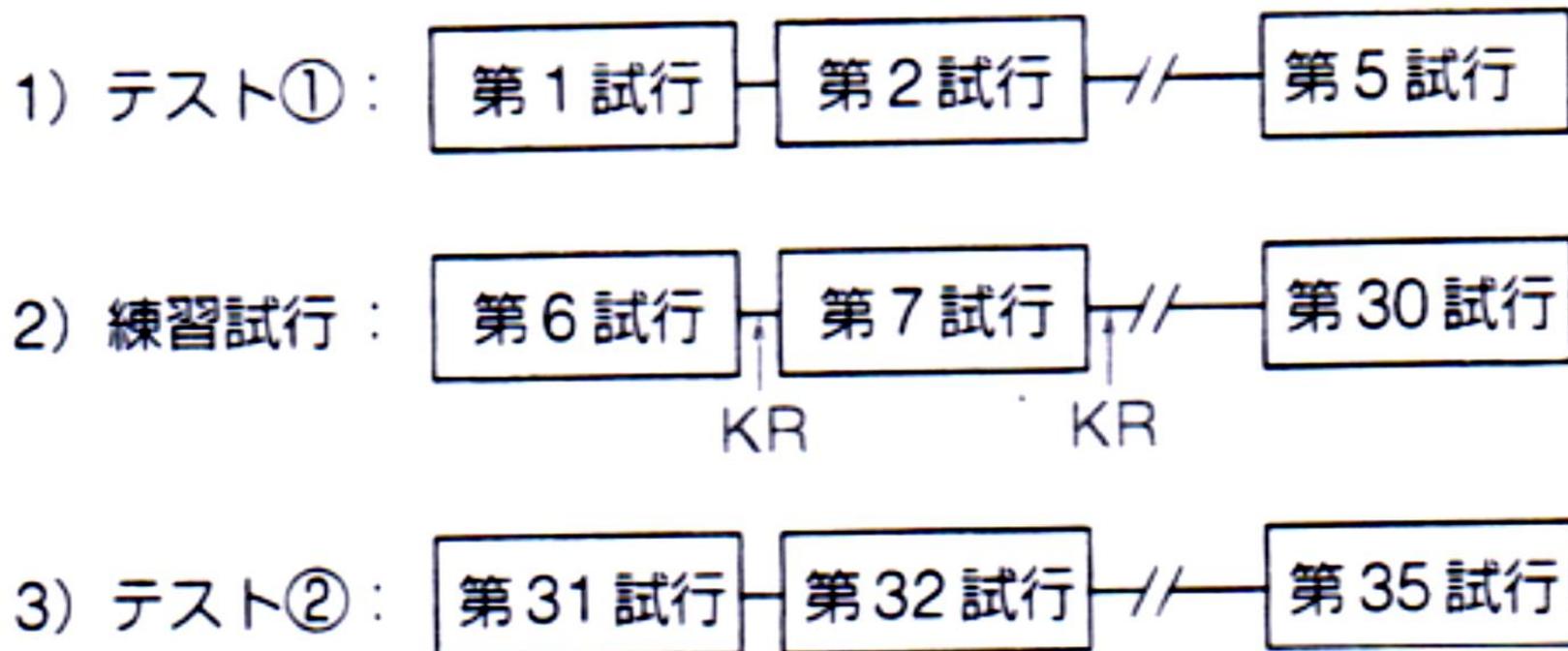
# G. 運動学習の実験デザイン

運動学習研究に必要な基本的な実験デザイン  
とその技法

# トランスファー・デザイン

- トランスファー・デザインは、運動学習による行動の変化が比較的永続的なものであるという概念に基づいて、Schmidtが提唱した技法である。
- トランスファー・デザインを図示すると、図のようになる。トランスファー・デザインは、プレ・テスト、練習試行群、ポスト・テストの3つの部分から構成される。

## 【実験第1日】



## 【実験第2日】

4) テスト③： 第1試行 — 第2試行 // — 第5試行

5) 練習試行： 第6試行 ↑  
KR 第7試行 ↑  
KR // — 第30試行

6) テスト④： 第31試行 — 第32試行 // — 第35試行

## 【実験第3日】

7) テスト⑤:

第1試行

第2試行

//

第5試行

### 図 トランスファー・デザインによる実験手続き

試行数は実験者が任意に設定してよい。各テストではKRは与えない。テスト①はプレ・テストで、テスト②④は各実験日の練習のポスト・テスト（短期保持テスト）である。テスト③⑤は当日のプレ・テストとおのおの前日の練習のポスト・テスト（長期保持テスト）を兼ねる。

- プレテストは学習前の状態を知るために行われる。学習者が成人である場合は特に、学習課題がまったく新奇の運動であることはほとんどない。
- 多くの課題は過去に経験したことのある運動を応用して行われる。したがって課題によっては、学習開始前にすでにその運動反応の正確性に個人差がある場合がある。この点を確認するためにプレテストが行われる。

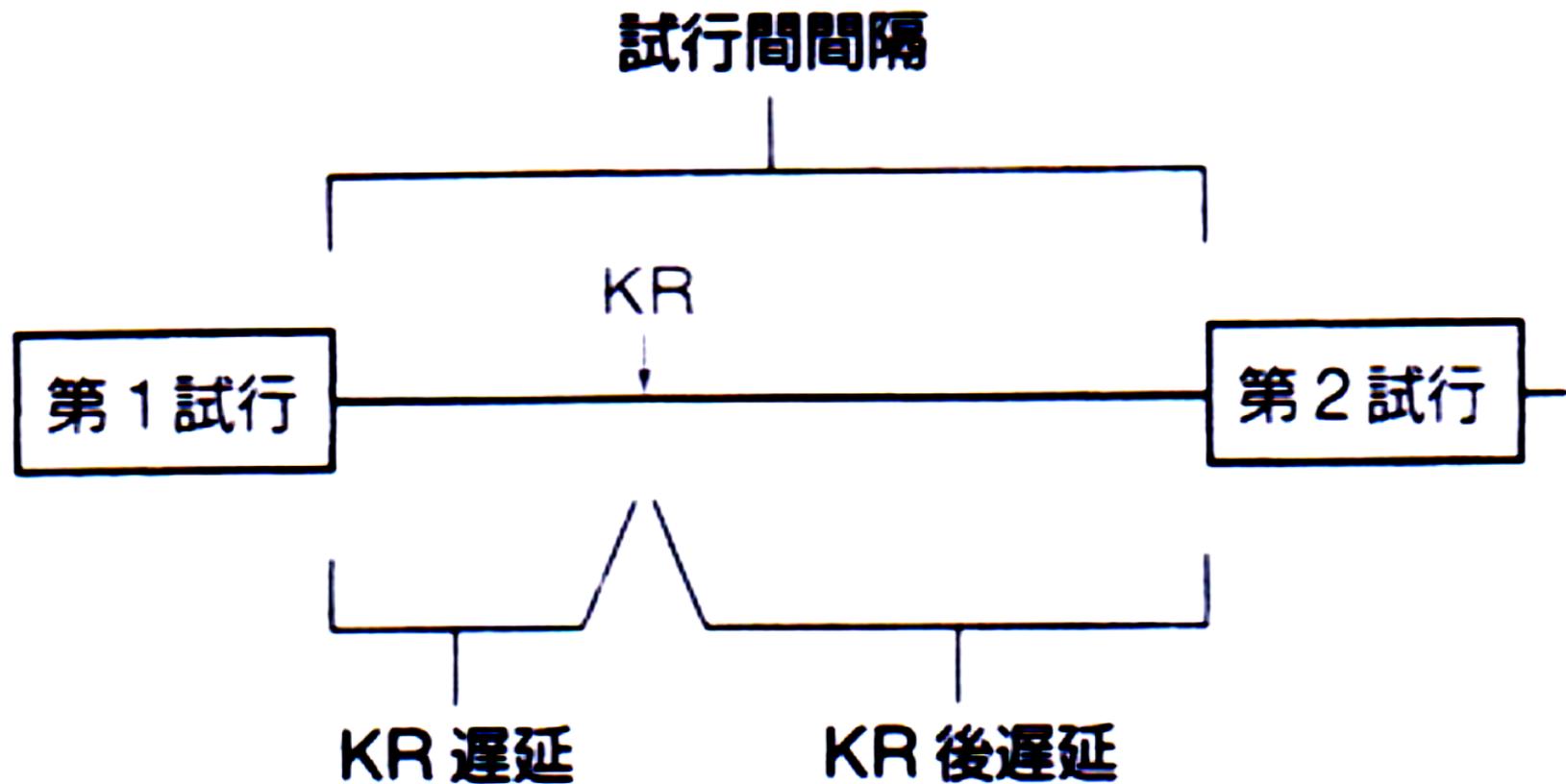
- 練習試行群は、実験的操作の対象となる部分である。ここでは実験者の意図により、試行数、フィードバックの与え方、練習の順序など、学習の形成に影響を及ぼすと考えられる要因が操作される。
- ポスト・テストには、練習終了後、十数分程度の休止時間をおいて実施される短期保持テストと、24時間以上あとに行われる遅延保持テストがある。保持テストでは、練習してきた課題を実験的操作を除いた状態で遂行させる。また、保持テスト中にはKRは与えない。

- 学習者の練習中のパフォーマンスに影響を及ぼす要因のなかで、指導者が意図的にフィードバックを与えていた場合などは短期保持テストの段階で、すでにその影響は除外されるが、学習者の身体的・精神的疲労などの要因は遅延保持テストの段階にならないと除かれないこともある。
- なお、トランスファー・デザインでは保持テストをトランスファー・テストと呼ぶこともある。しかし、近年では、練習させた課題とは別の課題でポスト・テストを行い、学習の転移をみる方法も用いられるようになっているので、ポスト・テストに同じ課題を用いる場合を保持テスト、異なる課題を用いる場合をトランスファー・テストとして区別しておく。

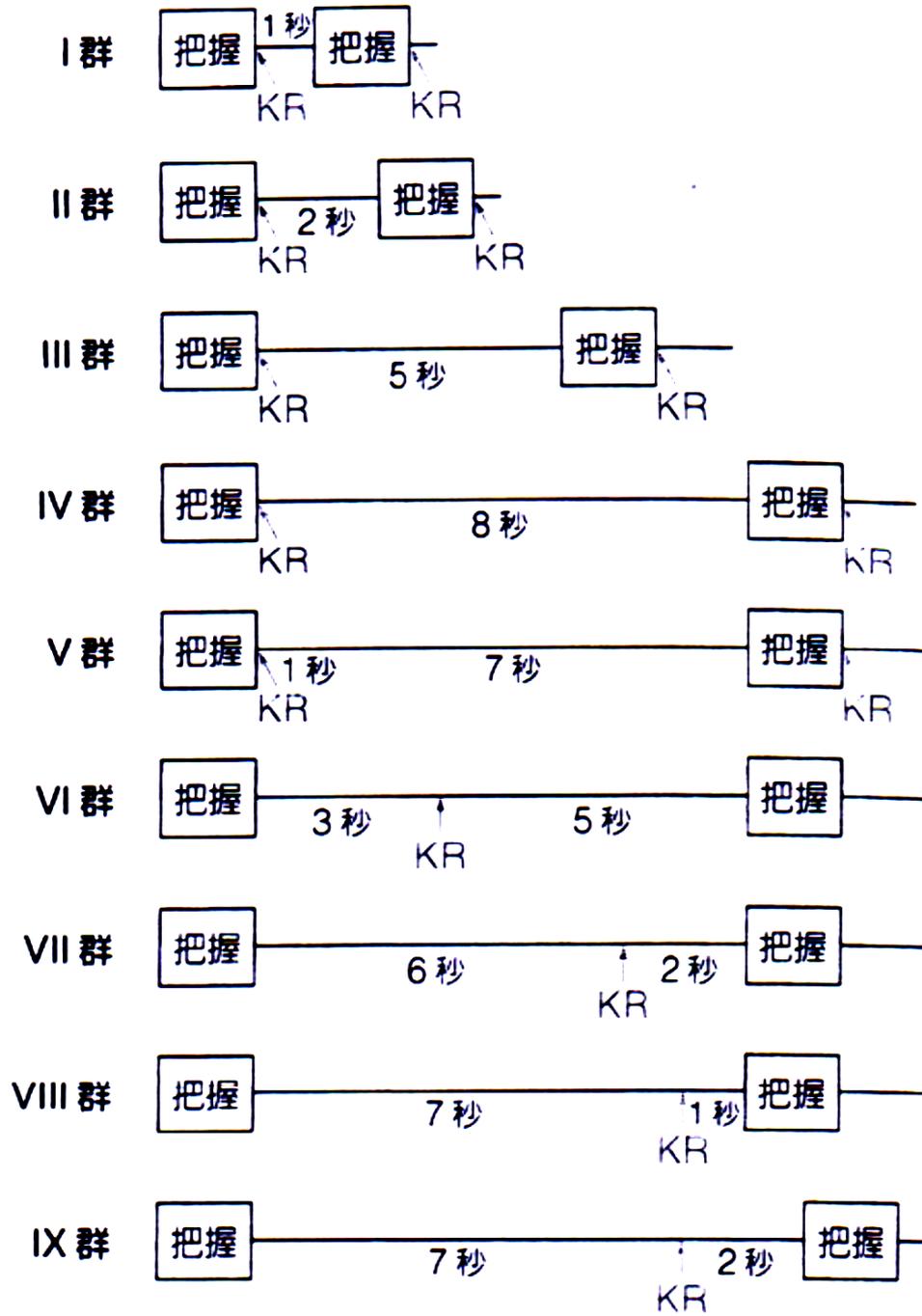
## 2.時間間隔のデザイン

- KRは運動終了後に運動結果に関する情報を提供するものなので、KR付与を含む実験では離散的運動課題が用いられる。一般に、離散的運動課題の練習スケジュールは、運動を遂行している時間(運動遂行期)と運動を行っていない時間(試行間隔)を交互に繰り返すものとなる。KRは試行間隔のどこかの時点で付与される。人間の認知機能から考えて、KR付与前か、付与後かによって情報処理の内容は大きく異なると予測される。

- そこで、KR付与前後の時間間隔にそれぞれ名称が与えられている。
- 図に示すように、試行間間隔をKR付与時点を境に2分し、KR付与前を“KR遅延”（KR delay）、KR付与後を“KR後遅延”（post-KR delay）と呼ぶ。



**図 試行間隔, KR 遅延, KR 後遅延の定義**  
 試行間隔 = KR 遅延 + KR 後遅延の関係にある.



KR遅延とは、運動終了直後ではなく、いくらかの遅れをもってKRが付与されることから、KR付与の遅延時間という意味である。KR後遅延とはKRが付与されたのちに、いくらかの遅れをもって次の試行が開始されることから、次試行開始の遅延時間という意味である。

- 運動学習研究では試行間間隔を休止時間とは考えない。むしろ運動を行っていない分、注意を内在的な情報処理に集中することができると考え、試行間間隔内に学習者が行う認知的な作業に焦点を当てる。
- 離散的運動課題の学習で、次試行における誤差をなるべく減らしたいと考えるならば、KR遅延、KR後遅延に行うべき情報処理はおおむね予測することができる。

閉眼で10 cm の線を引く課題で考えれば, 1つの試行を遂行する間に, 上肢の関節がどの程度動いたかという運動感覚が学習者にフィードバックされる. 視覚は遮断されているので, 運動反応の正確性は判断できないまま運動感覚を保持しておき, KRが与えられるのを待つ. KRが与えられると, それまで保持してきた運動感覚とKRを照合し, 誤差を修正して次に行うべき運動のイメージをつくり上げる.

- このように、KR遅延では受動的な情報保持、KR後遅延では能動的な誤差修正の作業が必要であろうと考えられる。すると、KR遅延が長すぎれば保持しておくべき情報が忘却されるだろうし、逆にKR後遅延が短すぎれば誤差修正の作業が間に合わなくなるだろうと予測することができる。そこで大橋らは、握力計を最大握力の40%の力で揺るという課題を用いて実験を行った。実験条件として操作したのは、KR遅延とKR後遅延の長さの組み合わせで、図のように9群を設けた。
- I～IV群はKR遅延0の条件、V～VIII群はKR遅延とKR後遅延の合計時間(試行間隔)が8秒になる条件、VIII～IX群はKR遅延が7秒の条件である。握力計の把握時間(運動遂行期)はすべて1秒とした。結果を図に示す。

図13および図14で、パフォーマンスの絶対誤差が大きいのはI群とVIII群である。この2つの群に共通の要因はKR後遅延が実験条件中最短の1秒であったということである。この結果より、前述の予測のとおり、KR後遅延が短すぎると誤差修正が不十分になると考えられる。しかし、VIII群はKR遅延が実験条件中最長の7秒という条件なので、前述の予測から、KR遅延の間に運動感覚が薄れてしまった可能性もある。



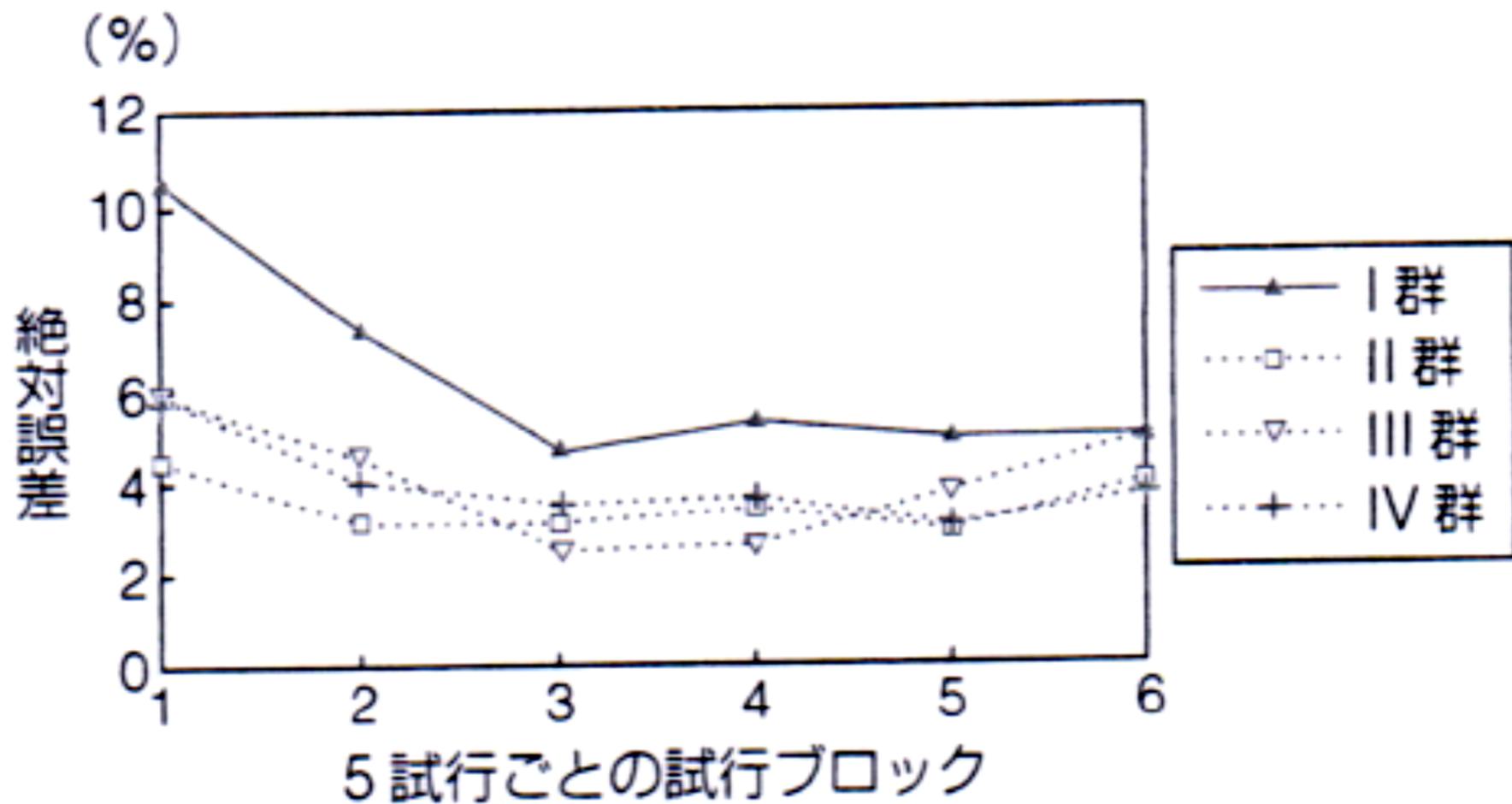


図 1~IV 群の絶対誤差の推移

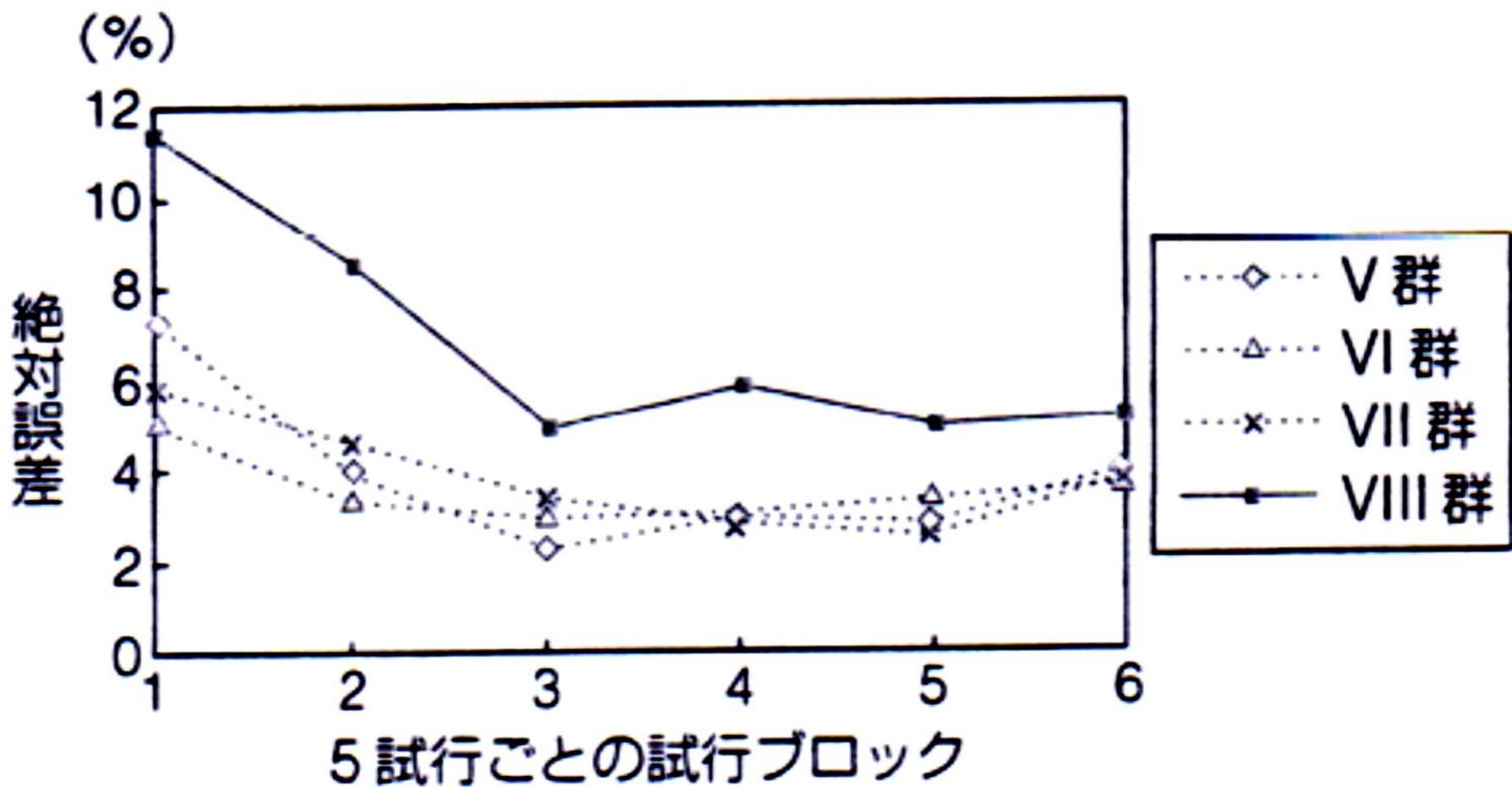


図 V~VIII 群の絶対誤差の推移

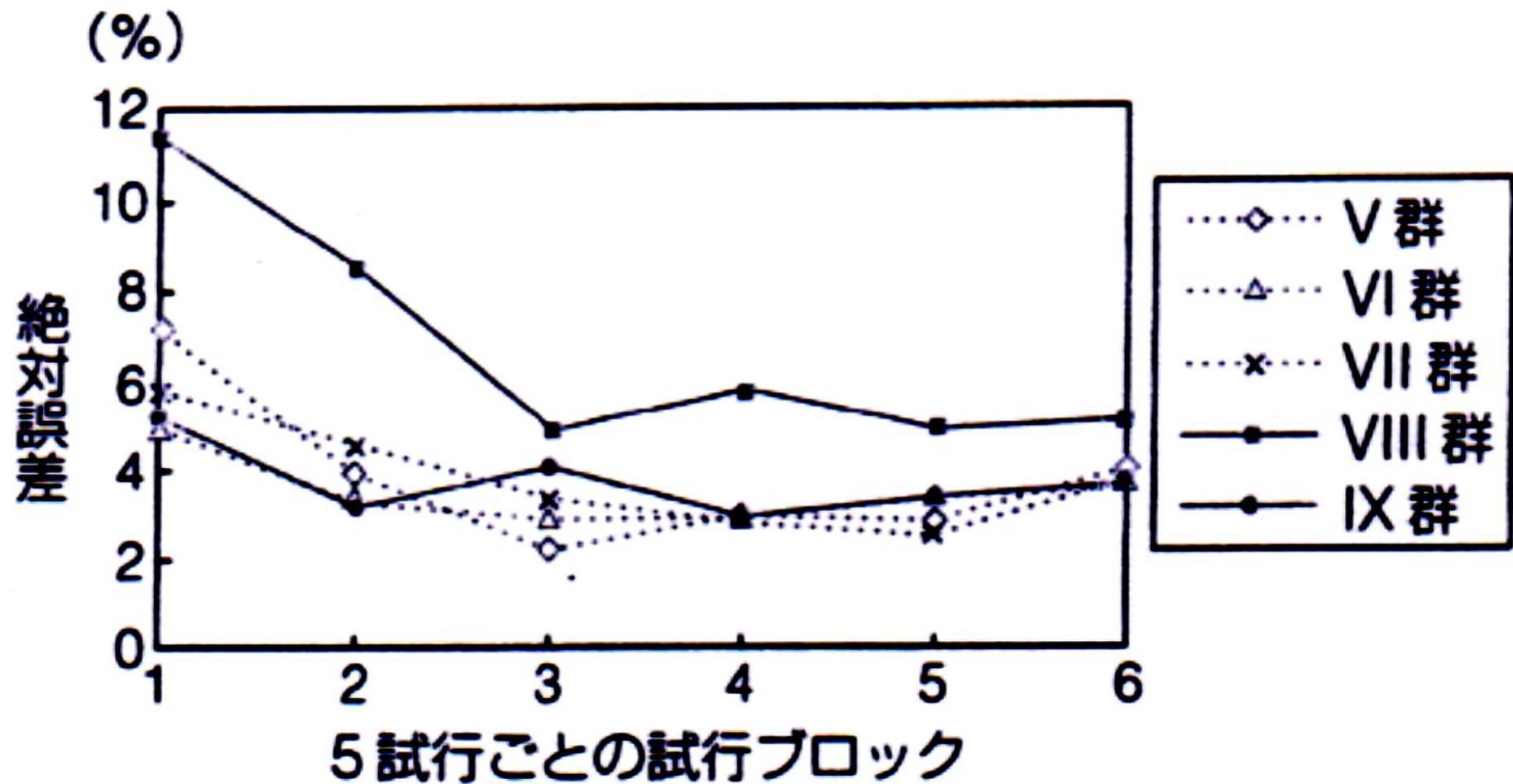


図 IX 群の結果を 加えたグラフ

そこで、IX群の(7,2)という条件による結果を加えてみたところ、図15のようにIX群の誤差レベルはV~VII群と同等であった。したがって、KR後遅延には、ある程度の時間を必要とする誤差修正のような情報処理が行われていると結論することができる。

しかし、この実験ではKR遅延の長さの影響は見いだせなかった。また、保持テスト・転移テストを行っていないので、学習への影響には言及できないが、KR後遅延における情報処理に関しては予測した内容を裏づける結果であった。

# 3. KR付与のデザイン

- a.付与方法

KRの与え方には,次のような方法がある(図16).

(1) KRの相対頻度の削減(reduced KR)

全試行にKRを与えるのではなく,何%かの試行にのみKRを与える

(2) 要約的KR(summary KR)

1試行ごとにKRを与えるのではなく,1試行ブロック終了時ごとにそのブロック内の各試行に対するKRを順番に連続的に与える.

### (3) 平均的KR (averaged KR)

1試行ごとにKRを与えるのではなく、1試行ブロック終了時ごとにそのブロック内の各試に対するKRの平均値のみを知らせる。

### (4) 削減的KR (faded KR)

練習の後期に徐々にKRの相対頻度を削減していく。

### (5) バンド幅KR (bandwidth KR)

- 目標値の±何%かにバンド幅を設定しておき、運動反応の結果がバンド内のときは成功”、バンド外の場合は失敗”の成否のみを知らせる(練習後期に運動反応が正確性を増してくれば、自動的に削減的KRとなる)

- これらのKR付与デザインは毎試行KRを与えるデザインよりも学習を促進する。スキーマ理論との関連では要約的KRと平均的KRは異なった意味をもつようだが、それはのちに述べるとして、これらのデザインに共通の特性は“KRの相対頻度の削減”である。すると、頻回なKR付与には学習を妨害する負の効果が含まれていると考えられるが、その理由は次のように説明されている。

まず、KRが頻回に与えられると学習者はKRに依存的となり、運動反応生成のための内在的な情報処理に十分な注意を向けなくなる。そのため反応の誤差を示すシグナルに対する感受性が低くなり、学習が形成されにくくなる。

次に、頻回なKRは運動反応の過剰修正を引き起こす。KRは誤差に関する情報を提供するので、学習者はKRを利用して、次の反応をより誤差の少ないものにしようとする。ところが運動反応には、学習の形成度には無関係な、いわば神経筋系のランダム・ノイズによっておこる“ばらつき”がある。学習が進んだ段階では真の誤差は小さくなり、反応のばらつきのなかに占めるノイズの割合が大きくなる。

この段階で頻回なKRが与えられると、学習者は過剰な修正を強いられ、安定した反応を行うことができなくなる。このようなKRによって引き起こされる運動反応の過剰な変動により、学習が形成されにくくなる。

## 4. 課題配置のデザイン

複数の運動課題を学習させる場合、練習スケジュールとして課題をどのような順序で配置するかという問題がある。課題配置の主要なデザインに、ブロック練習とランダム練習がある。

ブロック練習は、1つの試行ブロックの中で単一の課題を集中的に反復したのちに次の課題へ進む方法である。ランダム練習は、1つの試行ブロックの中にいくつかの課題をランダムな順序で配置する方法である(図17)。この2つのデザインで練習を行い、学習の形成度を比較すると、ランダム練習のほうが優位である。

ランダム練習の優位性は、次のような仮説で説明されている。

## a. 処理深度仮説

ブロック練習では同じ課題が繰り返されるので、学習者はどちらかというと自動的に、あまり注意を払わずに課題に取り組んでいるようにみえる。しかし、ランダム練習では毎回異なった課題が提示されるので、学習者はより深く課題を解釈しようとする。以前の課題との関連づけをしたり“精緻化、課題間の違いに注意を向けたり”識別“、課題に“意味づけ”を行ったりする。

このように、練習中により深い情報処理を行うことで学習が促進されると考えるのが処理深度仮説

## ブロック練習

### 第1試行ブロック

第1試行 課題A	第2試行 課題A	第3試行 課題A	第4試行 課題A	第5試行 課題A
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

### 第2試行ブロック

第6試行 課題B	第7試行 課題B	第8試行 課題B	第9試行 課題B	第10試行 課題B
-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

### 第3試行ブロック

第11試行 課題C	第12試行 課題C	第13試行 課題C	第14試行 課題C	第15試行 課題C
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

### 第4試行ブロック

第16試行 課題D	第17行 課題D	第18試行 課題D	第19試行 課題D	第20試行 課題D
--------------	-------------	--------------	--------------	--------------

### 第5試行ブロック

第21試行 課題E	第22行 課題E	第23試行 課題E	第24試行 課題E	第25試行 課題E
--------------	-------------	--------------	--------------	--------------

## ランダム練習

### 第1試行ブロック

第1試行 課題B	第2試行 課題E	第3試行 課題D	第4試行 課題A	第5試行 課題C
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

### 第2試行ブロック

第6試行 課題D	第7試行 課題C	第8試行 課題A	第9試行 課題E	第10試行 課題B
-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

### 第3試行ブロック

第11試行 課題A	第12試行 課題B	第13試行 課題C	第14試行 課題D	第15試行 課題E
--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

### 第4試行ブロック

第16試行 課題E	第17行 課題D	第18試行 課題B	第19試行 課題C	第20試行 課題A
--------------	-------------	--------------	--------------	--------------

### 第5試行ブロック

第21試行 課題C	第22行 課題A	第23試行 課題E	第24試行 課題B	第25試行 課題D
--------------	-------------	--------------	--------------	--------------

図 ブロック練習，ランダム練習における課題配置

## b.再生成仮説

ランダム練習では次々に新しい課題が提示されるので、学習者は前に行った課題の解を記憶しておくことが困難になる。「 $21 \div 3$ 」という課題を解く場合を例にとれば、ブロック練習では学習者は毎回計算をやり直さなくても「7」という解のみを覚えておけばよい。しかし、ランダム練習では同じ問題が続けて提示されるわけではないので、学習者は問題が提示されるたびに計算そのものをやり直さなければならない。このように、ランダム練習は運動課題に対する解の再生成を強要することになり、学習者が解の生成過程を何回も反復することにより学習が促進されると考えるのが、「再生成仮説」である。

## c. 転移最適化仮説

上記2つの仮説も、根底には「転移最適化仮説」と同じ考え方がある。すなわち、テスト時には情報処理を深めたり、解の再生成を行ったりする過程が当然求められるのだが、**ランダム練習では学習者はテスト時に求められるこのような操作を練習時から行っていることになる。**

したがって、**ランダム練習の優位性**は「練習時にテストで要求される操作を行うことが学習の形成を促進する」という転移最適化仮説で説明することができる。

# 5.二重課題法

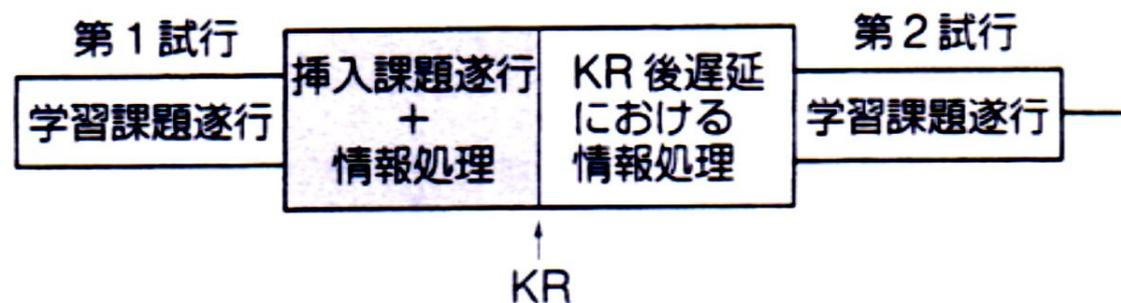
- 人間がある時間のなかで同時並列的に処理できる情報量には自ずと限界がある。KR遅延,KR後遅延のなかでなんらかの情報処理作業が行われているならば,そこへ別の課題を負荷することにより,もとの運動課題に関する情報処理が不十分になり,パフォーマンスや学習に影響を及ぼすだろうと予測される。この仮説を検証するために**KR遅延またはKR後遅延に挿入課題を負荷する実験**が過去に多数行われている。これらの研究で用いられた実験デザインを“二重課題法”という(図18)。
- 過去の研究では, KR遅延,KR後遅延への挿入課題負荷は**パフォーマンスの正確性を低下させる結果をまねいた**。このことから, KR遅延, KR後遅延には, 外示的な行動としては観察することができないが, 内在的な情報処理作業が行われていると考えられる。

＞大橋先生の知見、現在論争あり(注 木村)

## 挿入課題なしの場合の情報処理の流れ



## KR 遅延に挿入課題を遂行させる場合の情報処理の流れ



## KR 後遅延に挿入課題を遂行させる場合の情報処理の流れ



内在的な情報処理作業を行うことによりパフォーマンスの誤差が減少するという事実は、運動に関する**メンタル・プラクティス**が可能であることを示している。メンタル・プラクティスとは、**実際の運動は行わずに、イメージ上で過去に行った運動の感覚に修正を加える**ことである。

体操競技などの複雑な運動技能では、練習の初期にメンタル・プラクティスを行うことで危険を回避できるなどの効果が期待できる。理論的にはメンタル・プラクティスにより運動反応スキーマを改善することも可能であると考えられるが、どの**程度の効果が期待できるかなどはまだはっきりしていない**。

## 6.プログラム学習とパラメータ学習

- Schmidtによれば, GMPは練習によって発達し, そのカテゴリーに属する運動反応の生成の基礎となる. 同一のカテゴリーに属する運動は, 同一の“相対的タイミング”／相対的強度“で行われるという共通の特性をもつ. 実際に行われる個々の運動は, 再生スキーマを用いて絶対的タイミング”, “絶対的強度”などのパラメータをGMPに割り当てることによって生成される

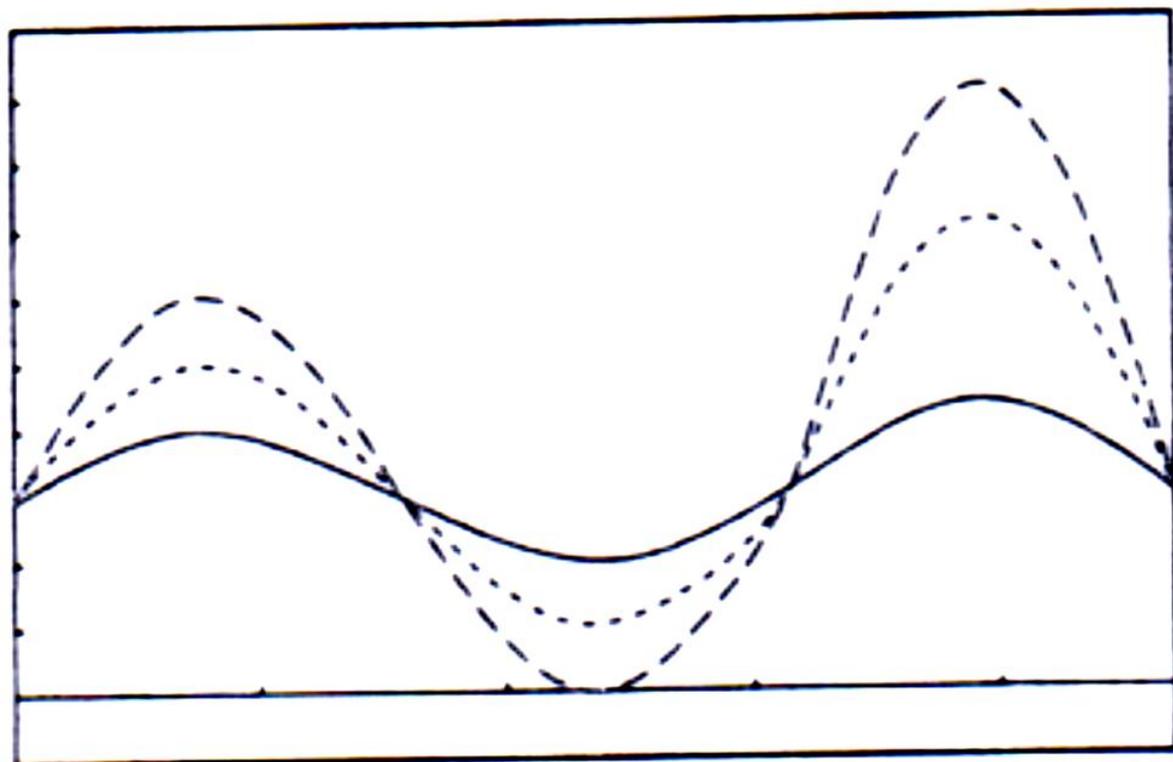
- したがってスキーマ理論では, GMPが精緻化されること(プログラム学習), またはパラメータの決定における適切性が増すこと(パラメータ学習)により, 運動技能が上達すると考えられる.
- 近年, 特殊な構造の課題を用いて, KR付与条件や課題配置条件がプログラム学習に作用するのか, あるいはパラメータ学習に作用するのかを明らかにしようとした研究が報告されている.

## a. Wulfによる実験

- Wulf(ウルフ)らは, 時間構造は相対的にも絶対的にも同一で, 振幅は相対的には同一だが絶対的には異なる3つの課題パターンを用いた(図19)

各試行の開始前に課題パターンのうちの1つをコンピュータ画面上に4秒間提示し消去する. その後, 被験者はレバーを操作することにより, 提示されたパターンを再生するように指示された. レ

振幅



時間

### 図 Wulfらのパターンを一部改変した課題パターン

A, B, C は時間構造は同一で、振幅は相対的には同一だが絶対的には異なる。

- バーを動かすと、それに応じてコンピュータ画面上でカーソルが動くが、軌跡は描画されないように設定されている。
- KRを付与する試行では、その試行の運動反応が終了したのちに短い時間間隔をおいて、課題パターンと被験者が実際に動かしたカーソルの軌跡を重ね書きした画像を提示した。
- 実験条件は、I群は全試行にKRを付与、II群は3試行ごとに平均的KRを付与、III群は直前3試行の平均誤差を毎試行後に付与、IV群は相対頻度33%でKRを付与、V群は全試行に通常のKRを付与し、さらに3試行ごとに平均的KRを付与する条件とした。

- 結果として、課題の時間構造の学習(プログラム学習)には、実験条件による差はなかった。しかし、練習試行においても、保持テストにおいても、II群とIII群の振幅の正確性(パラメータ学習)は他の実験群に比べ劣っていた。これは、平均的KRというKR付与条件が、被験者による1試行ごとのパラメータ選択の正否判断を妨げたためと考えられる。

## b. Laiによる実験

- Lai(ライ)らはコンピュータを用いて, 右手示指で4つの数字キー(順に“2”> “4”、“8”> “6”)を連続的に指示されたタイミングで押すという課題を用いた.

この課題では, キーを押す相対的タイミングは,

第1セグメント(2→4)がトータル時間の22.2%, 第2セグメント(44→8)が44.4%, 第3セグメント(8→6)が33.3%に統一されている。しかし, 4つのキーを押し終わるまでのトータル時間は, 700ミリ秒, 900ミリ秒, 1.100ミリ秒の3種類のうちのどれかである。

実験条件は, 練習方法(恒常練習か, 多様性練習か)×KR頻度(50%KRか, 100%KRか)の組み合わせによる4条件である。

恒常練習, 多様性練習は, GMPの特性に基づいて開発された練習法である。恒常練習は, あるクラスのGMPに特定のパラメータを割り当てた1種類の課題のみを練習する方法である。これに対して多様性練習は, GMPは同一だがパラメータの異なるいくつかの課題を並列的に練習する方法である。

- Laiらの実験では、恒常練習条件ではすべての練習試行をトータル時間900ミリ秒で行わせ、多様性練習条件では3種類のトータル時間からなる試行をランダムな順序で行わせた。したがって、多様性練習群の課題は相対的タイミングは同一だが、絶対的タイミングのみ異なる3種類ということになる。
- 主な結果は次のとおりである。まず相対的タイミングの正確性(プログラム学習)については、練習試行、保持テスト、転移テストを通じて、50%KR群が100%KR群に比べ優れていた。しかし、KR頻度の影響を受けるのは多様性練習群のみであって、恒常練習群はKRの頻度にかかわらず、練習試行においてもテストにおいても正確な相対的タイミングを示した。

- 次に、絶対的タイミングの正確性(パラメータ学習)については、練習試行では恒常練習群が優れていたが、保持テストでは恒常練習群の優位性は失われ、転移テストでは逆に多様性練習群のほうが優れていた。この結果は、恒常練習が1つの特異的なパラメータを学習することを目的としており、パラメータと遂行結果の関係からなる**再生スキーマの精緻化には不適切**であることを示している。

以上の結果をまとめれば、練習試行における運動反応を安定化させる要因-すなわち、恒常練習およびKR頻度の削減は、GMPの精緻化を促す、逆に、練習試行における運動反応の多様性を引き出す要因--すなわち、多様性練習は、パラメータ選択の適切性を高めるといえる。

## c.運動技能を向上させる要素

- 上記2つの実験はスキーマ理論を検証し、補強するうえで意義がある。しかし、実際に行われる運動技能が向上するためには、GMPも精緻化し、パラメータ選択の適切性(再生スキーマの精度)も向上しなければならない。また、これらの実験ではふれられていないが、再認スキーマが正確性を増すことも必要である。再認スキーマは運動に伴って生じた各種の感覚と遂行結果の関係なので、

これが正確性を増すためには、目的に合った正しい運動反応が遂行されることが必要である。

- GMP, 再生スキーマ, 再認スキーマという3つの要素は互いに関連をもって機能しているのだから, 実際には1つが変化すれば残りの2つも影響を受けるはずである. これらの要素をどのような順番で, どのような方法で強化していくのが運動技能を向上させるうえで有利なのか,あるいは, これらの相互作用を有利に利用するためにはどのような練習方法がよいのか. 非常に難しい問題ではあるが, 今後はこれらの問題を解決していかなければならない.

# 7.注意の方向づけ

- Wulfらは、複雑な運動技能を学習させる際に有効な教示の与え方に関する実験を行った。課題には、スキーのスラローム競技のシミュレーターを用いた。被験者を3群に分け、練習時に与える教示の内容を変えた。
- I群の被験者には、運動時の注意を自分の体の動きに向けさせるような教示を与えた。
- II群の被験者には、運動時に生じる外界の変化に注意に向けさせるような教示を与えた。III群は何も教示を与えない対照群とした。
- 結果として、II群はI群、III群に比較してテストの得点が高く、I群とIII群には差がなかった。
- この実験では、**学習者の注意を外界の変化に向けさせたほうが学習が促進された**といえる。

- Wulfらの実験は、運動学習の初期段階を扱っているが、生体生理工学分野の計算論アプローチによれば、より広範な**学習段階における注意の方向づけ**を説明することができる。
- 例として、手先の位置をS地点からT地点へ直線的に移動するという到達運動を考えてみる、目標位置は**視覚を通して与えられる**ので、まず**視覚の作業座標上で軌道が決定される**。ここでは仮に、視覚の作業座標は外界をzリ座標で表現した座標系にを・**聯邦座標**"と呼ぶ)であるとしておく。

- 学習の初期段階では、学習者は手先の動きを目で追い、目標軌道からのズレを視覚的フィードバックにより修正していく。
- つまり、この段階では学習者の注意は外界の変化に向けられていることになる。しかし、感覚情報のフィードバックには時間がかかる。視覚情報は200～300ミリ秒、固有受容器からの情報は100～150ミリ秒の時間遅れを伴ってフィードバックされる。

# 身体座標

ある程度学習が進んだ段階で動作速度を上げるためには、視覚情報よりは固有受容情報を用いたほうが有利である。固有受容情報をフィードバックとして利用するためには、視覚的に表現されていた軌道を、体の動きに変換しなければならない。手先が目標軌道上のある位置に置かれているときに、上肢の各関節がどのような肢位にあり、どの程度のトルクを発生しているかというように、到達運動を関節角度、トルクなどの運動学的・運動力学的パラメータで表現した座標を“**身体座標**”と呼ぶ、学習の中盤以降において学習者が身体座標を用いて運動を制御しているとするならば、**学習者の注意が自分の体の動きに向くように方向変換された**ということになる。

# 無意識的・自動的な運動遂行

- さらに、熟練期になると運動は無意識的・自動的になる。熟練者に「体の動きに注意を向けながら遂行せよ」と指示すれば、運動の円滑性はたちまち失われてしまう。このように、注意をどの方向に向けるのがよいのかという問題は、学習の進行段階によっても異なると考えられる。
- さらに付け加えれば、外部座標を手がかりにする運動は**フィードバック情報**によってのみ制御された**ぎこちない運動**でしかない。しかし、座標系が身体座標に変換されたのちには**フィードフォワード制御**も機能するようになり、**動作の円滑性**が飛躍的に向上していく。

# H. 制御と学習

## —臨床への示唆

運動の制御と学習は表裏一体の関係にあり、切り離すことはできない。スキーマ理論では、“一般化された運動プログラム”が制御と学習の核となって脳に存在すると仮定する。これに対して、生態学的アプローチでは運動の制御はどれか1つのシステムが占有する機能ではないとされる。

しかし、制御が成功したときにその方法を記憶しておくシステムを仮定しておかないと学習は形成されない。

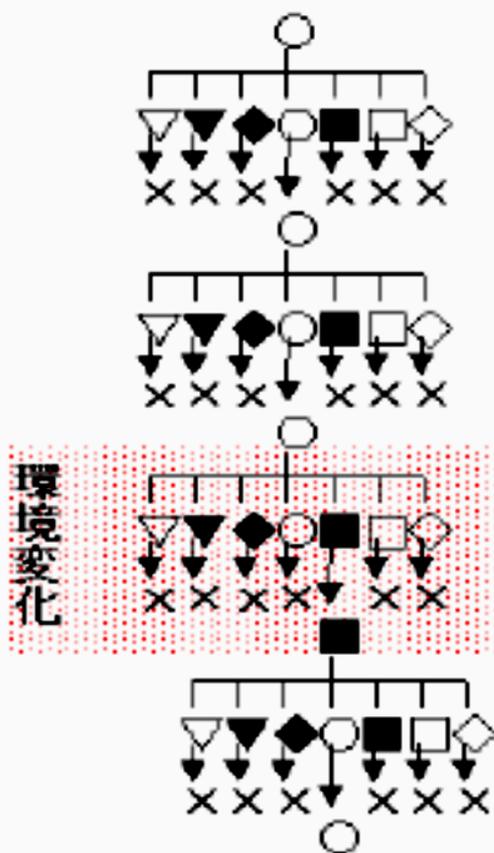
- そこで仮に、この記憶システムを制御と学習の核と想定して話を進めることにする。すると・“核”に対する入力系が学習過程であり、出力系が制御過程であると考えることができる。つまり、学習の核がいかに形成されていくのかという過程を考えるのが学習理論であり、学習の核をいかに使いこなしていくのかという過程を考えるのが制御理論である。
- さらに、制御のしかたを学習し、その結果、より精緻化された学習の核を使いこなすために運動を制御するというように、学習と制御は常に連動しているのである。

# 1.理学・作業療法との関連事項

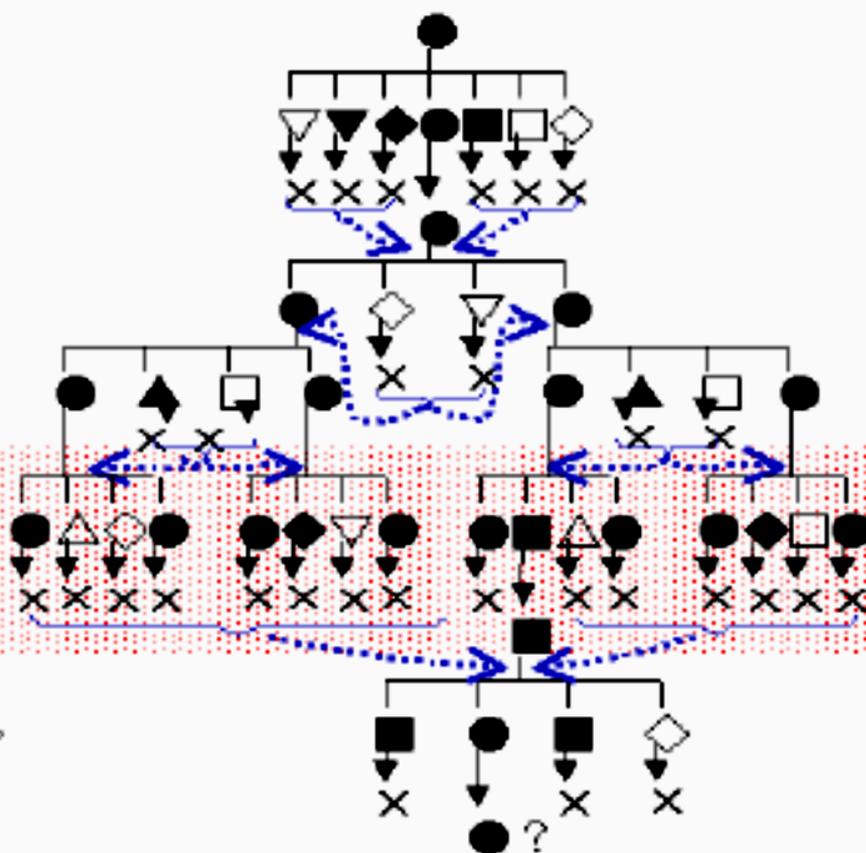
- 理学・作業療法になぜ運動学習理論が必要なのかといえは、患者の身体機能の改善を目指すからには、理学・作業療法により機能が改善された状態が比較的永続的に維持される(すなわち、学習される)のでなければ意味がないからである。
- 現在、理学・作業療法の臨床的実践においては、さまざまな理論・技術が用いられ、治療場面のなかで患者の運動を制御することは可能になりつつあるといえるかもしれない。しかし、制御のしかたを学習させる方法ははるかに立ち遅れている。制御さえしておけば、次のステップとして自動的に学習されるというものではない。

- また、単に反復すれば学習できるという考えも、現在の運動学習理論においてさえ非効率的な方法ということになる。では、効率的に学習させるためには何か必要かとなると、どうしても運動学習理論に立ち返らざるをえない。
- 現存の運動学習理論は即座に臨床応用できるものではないかもしれない。しかし、基本的な概念は理学・作業療法にも十分応用できるものである。また、その先の臨床への適用は、運動機能障害のフィールドをもつ理学・作業療法の領域でこそ発展させたいものである。

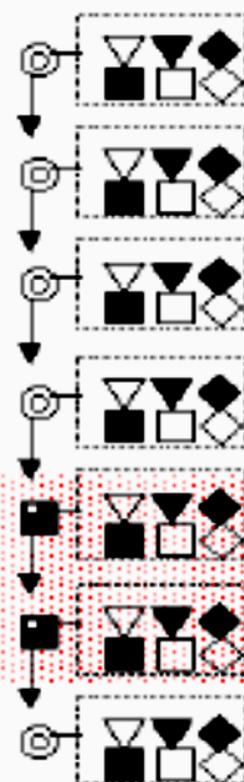
機能化の淘汰 (selection for function)による自律性の獲得



(a) Function generation



(b) Short-term Memory  
ex. feed back system



(c) Long-term Memory  
ex. Program (gene)

効率化の淘汰 (selection of efficiency)による記憶システムの獲得