

## BRIEF REVIEW

## 反応時間法と H 反射法を使ったヒト随意運動の解析

笠井 達哉\*

An Analysis of Human Voluntary Movement by  
Reaction Time and H-Reflex Technique

Tatsuya KASAI\*

\* Department of Human Movement Studies,  
Faculty of Integrated Arts and Sciences,  
Hiroshima University

## Abstract

Reaction time and H reflex are human neurophysiology's ubiquitous dependent variable. No matter what task a subject is asked to do in an experiment, its completion always takes time. No matter what task a subject is asked to do in an experiment, its completion always takes muscle contractions. Human voluntary movements are always performed by muscle contractions. Therefore, reaction time and H reflex methods which reflected the neural mechanisms related to voluntary movement are the most important technique to investigate mechanisms of human voluntary movement. In this report, I reviewed our results to be done in recent decade. In particular, I discussed about effectiveness and limitation of those methods. In addition, I emphasized and demonstrated that those two methods made full use of effectiveness if we could combine them in our experimental paradigm.

## I. はじめに

ヒトの運動・動作は、基本的には3つの運動の型—反射運動(reflex), 自動運動・半反射運動(automatic reaction, semi-reflex), 随意運動(volun-

tary movement)—から成り立つ。反射運動は「受容器に始まる興奮が意識と無関係に反射中枢(reflex center)で折り返され効果器にその効果が現れる運動」と定義される<sup>96)</sup>。したがって、刺激に対して生体が示す目的、不随的な応答のうち、比較的一定の様式(stereotype)をもち、それ自身の反射中枢で統合されて出現する運動をいう。自動運動は、単純な反射機構にのみ依存する運動ではなく、刺激の様態・その強さ・その時の生体の状態などにより、多くの反射機構を調整・統合し、合目的性をもった無意識下で行われる運動をいう。広義の姿勢反射(postural reflex)がこれに当たる。随意運動は、ある目的をもった意図のもとに行われる運動をいう。すなわち、外界を知覚・判断し、身体的位置とそれらの相互関係、各部位にかかる慣性・外力などの末梢情報(peripheral feedback information)と、身体各部位の時間的・空間的組合せを意図的に調整・統合した運動指令(central motor command)によって遂行される運動をいう。しかし「随意」の明確な定義は困難で確立されたものは無い。先述の自動運動と随意運動に関係した運動の中に、よく訓練された熟練運動がある。このような習熟された随意運動においては、意識の関与は軽減され、見かけ上自動運動のようにみえる。しかし、このような運動でも内外の環境が変化すると、その運動は速やかに意識に上り、意志の統制下に置かれる。このように、合目的な意図的な運動も自動運動と密接な関係の上になり立っており、これら両者を明確に区別することは実際上不可能である。

\* 広島大学総合科学部生体行動科学コース保健体育講座

受付 平成5年4月13日  
受諾 平成5年11月25日

随意運動の特殊な例として反応動作がある。反応動作は任意に決められた特定の刺激(stimulus)に対して、あらかじめ決められた動作を反応(response)として行うものである。刺激—反応の間には合目的性がなくてもよく、実験室的実験では、動作パターンや動作の開始時期などを容易にコントロールできることから、心理学・生理学などの分野でよく随意運動の解析モデルとして用いられる。ところで、この反応動作を用いた随意運動の解析では、ごく最近まで筋活動とその相互関係、身体各部位の位置関係、運動速度、加速度など反応動作開始以後のパラメータを計測・比較することが多く、刺激の様態や呈示条件などのいわゆる情報処理過程の解析が中心課題であった。情報処理過程の解析においては、運動系は一定であると仮定されてきた。しかし、運動の意図や末梢情報が錐体路細胞や $\alpha$ 運動細胞の興奮性レベルを変化させ、また刺激から反応動作開始までの潜時にも影響を与えることが報告され<sup>6,19,103</sup>、反応動作開始以前の運動系の解析に注目が集まり、手が付けられるようになってきた。

ヒトの反応動作開始以前の中樞神経機構の解析手段としては、脳運動関連電位(Breitschaftpotentials, contingent negative variance; CNV)、H反射(Hoffmann reflex)、T波(Tendon reflex)などがある。また、特殊な例(脳の外科手術など)として、直接運動に関係する細胞からの発火様式(unit discharg)の測定などがある。刺激—反応の潜時すなわち反応時間(Reaction time; RT)を測定することもこの方法の一つである。RTは一般に「ある与えられた刺激によって決定される一つの意識的応答の最小の時間遅れ」と定義され<sup>12</sup>、中樞神経機構での刺激—反応に要する処理時間を表すものとみなされる。RTは従来、中樞の情報処理過程の解析手段として多様されてきたが、錐体路細胞および $\alpha$ 運動細胞の興奮レベルとRTの間に負の相関関係が認められることが示すように<sup>39,81</sup>、RTの遅速は運動系の状態をも反映する。刺激の情報処理過程を一定とみなすことができれば、RTの測定は反応動作開始における運動系の機構を解析する有用な手段となりうる。また、H反射は、運動発現の最終共通路である $\alpha$ 運動細胞群の興奮性をヒトにおいて無侵襲的に調べることができる有効な手段である。そこで以下に、随意運動の一つのモデルとして「反応動作」を取り上げ、その開始にかかわる運動系の要因について、RT法とH反射法を用いて10年余りに

わたってわれわれが行ってきた解析結果を中心に総説する。なお、運動筋電図学的に姿勢調節にかかわる随意運動機能の解析手段としても反応動作が多用され、最近興味のある知見が数多く報告されるようになったが<sup>71,78</sup>、その解析結果についてはここでは触れない。

## II. 反応時間の測定

RTは通常スイッチ回路を用いて、刺激呈示から行動としての応答(behavioral response; mechanical response)が現れるまでの時間(overt RT)によって測定される(反応時間に関する歴史的背景およびその解説については松井<sup>82</sup>、Welford<sup>121</sup>、そして大山<sup>99</sup>を参照のこと)。しかし、反応動作は筋活動によるものであるから、その運動神経生理学的機序を解析しようとする場合、その反応動作に関与する筋(一つの筋のみが関与することはまれで、普通は複数の筋が関与する<sup>4</sup>)に活動電位が現れるまでの潜時(electromyographic latency; EMG-RT, premotor time; PMT)の変化を正確に測定することの方が重要である場合が多い<sup>8,47,89,95,105,120</sup>。この方法によれば、特定の筋のRT、協同筋群のRTとその活動順位、さらに空間的な運動を伴わない等尺性筋収縮(isometric contraction)による反応動作のRTも測定できる。反面この測定方法では、対象となる筋は動作前筋放電休止期(premotor silent period<sup>125</sup>)の出現するような特殊な事態を除いて、対象となる筋は常に弛緩状態から筋活動への移行が要求され、反応動作パターンに制約がつかまとう。

EMG-RTの測定では、1-5msの時間単位が大きな問題となることが多く、測定記録装置の特性はこの時間の精度での解析が可能なが必要条件である。反応刺激としては、音・光・皮膚などの刺激が使われるが、刺激の違いによってRTは変化する。一般に、皮膚刺激は音刺激より、音刺激は光刺激より速いRTを得る。刺激強度もRTに影響し、刺激の種類が同じであれば、強い刺激ほど速いRTを示す。したがって、RTによる運動機構解析には、できるだけ立ち上がり速度が速く、しかも一定強度の反応刺激発生装置を用いる必要がある。すなわち、反応刺激発生装置によって反応刺激提示時間が暫増すれば、得られたデータには生体反応にかかわる時間以外の時間が混入することになり、得られたデータの誤差が増大する結果になる。

反応動作の主動筋に筋活動が出現してから、実際の運動が起こるまでの時間的遅れを運動時間 (motor time; MT) と呼ぶ。したがって、MT は EMG-RT とは本来関係をもたない時間である。このことから、 $RT = PMT + MT$  と考える。そして、目的の運動が完了するまでの時間 (response time あるいは movement time; 動作時間) がこれに続く。これらのことから、RT と PMT の相関は高く、RT と MT のそれは低い。実験条件が一定であれば、MT の値は個体間での差は小さく、ほぼ一定の値を示す。RT は運動の開始に要する力の増加に伴って遅延するが、この遅延は MT の遅延によるもので、PMT はほぼ一定である。MT は生体が慣性や外部抵抗に打ち勝って運動を開始するための一種の「force generation time」を意味する。RT を測定し比較する場合、中枢神経機構における遅延であるか、ただ単に筋力の低下による遅延かはデータの解釈上大きな問題になる<sup>61)</sup>。

予告刺激の有無、予告刺激—反応刺激の時間間隔 (preparatory period; PP) は EMG-RT に大きな影響を与えるため<sup>44)</sup>、極力一定の条件を保つ必要がある。しかし、実験条件が一定であるとしても、個人の EMG-RT は 1 試行ごとに変動する。特に、実験に対する構え、注意、慣れなどは大きな変動要因である。この他に、疲労、健康状態、脳波、呼吸、心拍などの個体内要因や年齢、性別などの個体間要因なども変動要因である<sup>35)</sup>。

EMG-RT の分布は正規分布ではなく、ある偏りを示す (tailing)。多くの場合、RT あるいは EMG-RT の分布は、右寄りの偏り (right tailing) を示す。各個人の RT あるいは EMG-RT の代表値を求める場合、このような偏りが大きいと、算術平均では分布の最頻度値からの偏差が大きくなり、その個体の代表値として不適当になることがある。このような場合には、データの対数変換を行い、飛び離れた値を棄却検定で処理した後、平均値を求めるなどの処理を行う必要がある<sup>89)</sup>。

### Ⅲ. 反応時間の変化が意味するもの

#### 1) 運動パターン依存性

上腕二頭筋は、その収縮で肘関節の屈曲運動 (Flexion: F) を起こさせる生理的屈筋であるが、同時に前腕の回外運動 (Supination: S) の発現にも関与する<sup>87)</sup>。したがって、上腕二頭筋は、二つの異

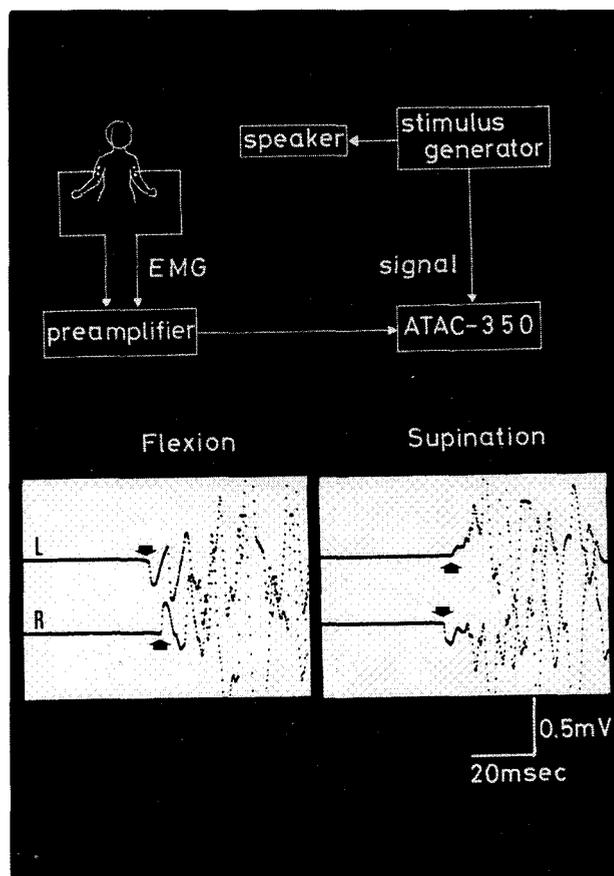


図1 前腕回外 (supination) と屈曲 (flexion) の両手同時反応動作遂行時の上腕二頭筋電図記録法の模式図と実際の記録例。背景筋電図が認められない状態から反応動作を行った時の筋放電の開始時点 (筋電図反応時間) を矢印で示す (文献 50 より)。

なった運動パターンの発現に同時に寄与することになる (図 1 参照)。運動出力経路が同じである点に注目すれば、この異なった運動パターンを行った時の上腕二頭筋の EMG-RT の変化から、上位運動中枢で作られる運動指令の差異 (運動パターンの違いによる差異)、すなわち「運動プログラムの産出」に関わる中枢運動機能の解析が可能である。先駆的な Nakamura らの報告<sup>87,89)</sup> そして、それを発展させたわれわれの一連の報告から<sup>41,46)</sup>、同じ筋が異なる運動パターンの出現にかかわる時、それは RT の遅速に反映される (図 2 の A 参照)。すなわち、S の EMG-RT は F のそれより短く、両運動パターンの EMG-RT の差は個人の EMG-RT に依存する。言い替えると、運動パターンの違いによる反応時間の差は、反応の速い人すなわち反応時間の短い人では小さく、遅い人では大きくなる (図 3 の A, B 参照)。

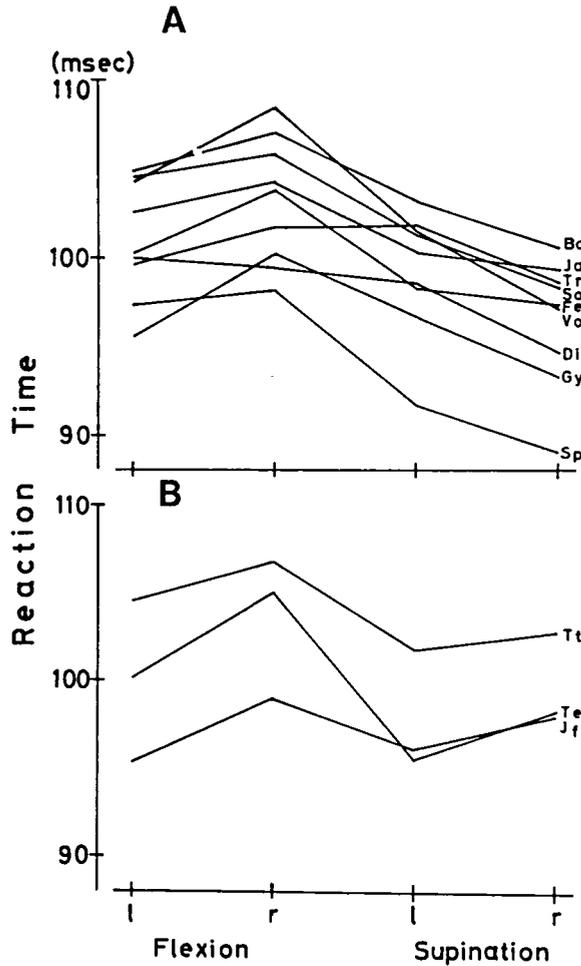


図2 図1の筋電図反応時間法を用いて、各種運動種目経験者(5年以上)の回外と屈曲運動パターンの左右(lとr)それぞれの反応時間の平均値。Aはバスケットボール(Ba)、やり投げ(Ja)、トラック競技(長距離:Tr, 短距離:Sp)、サッカー(So)、フェンシング(Fe)、バレーボール(Vo)、円盤投げ(Di)、体操競技(Gy)選手の結果を示す。回外反応動作時間が反応時間が屈曲反応動作のそれより短いことを示し、運動経験の少ない被験者の結果と同じであったことを示す。また、反応時間の左右差は、回外時間で右が、屈曲動作で左が短いことを示し、これも運動経験の少ない被験者の結果と同じであったことを示す。Bは卓球(Tt)、テニス(Te)、剣道(Jf)の選手の結果で、Aグループの結果と相違していたことを示す。すなわち、Bグループの運動経験者は、回外の反応時間がAグループのそれと相違しており、運動パターンの発現機構がAグループのそれと相違していることを示す(文献50を改変)。

これはFかSの運動パターンが事前にセットされた反応事態(単純反応時間課題)で常に出現することから<sup>117)</sup>、個人のもつ反応時間の属性であり、随意運動の遂行機能の善し悪しを反映している可能性が

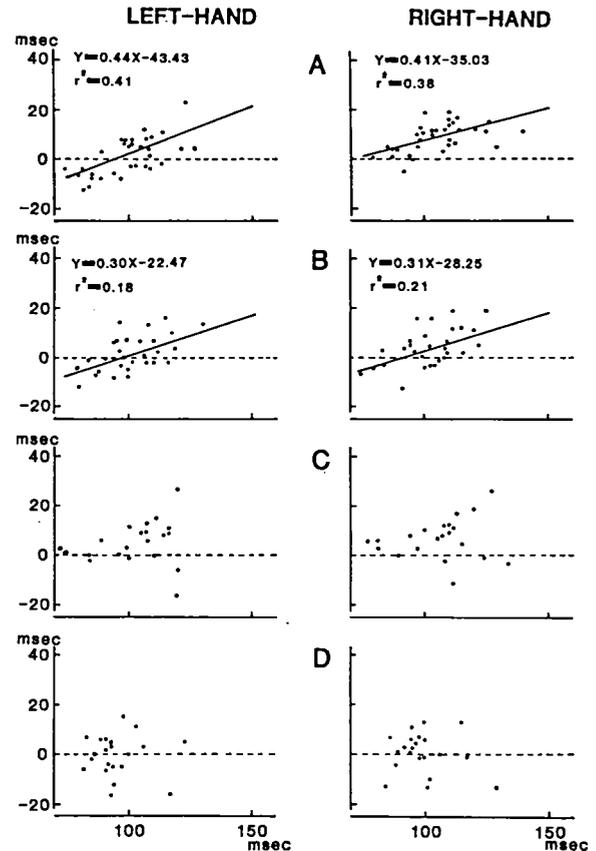


図3 図2の結果から、Aは陸上選手、Bはサッカー選手、Cはテニス選手、Dは剣道選手の結果を運動パターンの違いによる反応時間の差(縦軸、屈曲反応時間から回外のそれを差し引いた値)と各被験者の反応時間(横軸)との関係をプロットしたものである。AとBでは、反応時間の運動パターンの違いによる差は個人の反応時間に依存していたが、CとDではその依存性が消失してしたことを示す。一つのプロットが選手一人の平均値を示す(文献54より)。

考えられる。

中枢性神経疾患患者を被検者として、肢位変化(後述)による影響、そしてFおよびSの出現動態を調べた結果から<sup>90,92,93,94)</sup>、この様な運動パターンのプログラムを決定している脳の責任部位は、右大脳皮質と大脳基底核であると考えられている。すなわち、両者の相互作用の結果として、FとSのEMG-RTに差異が生じる。この点を確認するために、運動関連電位を使って調べた筆者の結果<sup>66)</sup>では、この推定が正しいことを支持した。この推定は、最近の神経心理学的手法を使って異なった指標から得られた結論とも必ずしも矛盾しない<sup>3)</sup>。また最近、サルを使って運動プログラム形成に関わる中枢運動領野の解析が進行中であるが、それらの報告を見ても

大筋では矛盾しないようである。しかし、運動プログラムの産出にかかわる大脳皮質運動領野のかかわり方に関しては、まだまだ未知な部分が多く、今後解析されなければならない課題が山積している<sup>31,102,110,122,123,124</sup>。

しかし、人においてはこのような運動パターンは固定的なものではなく、その時の状況や上肢をどのように使ったかという経験の違いによって容易に変容する。具体的には、その筋のもっている本来の機能(生得的あるいは生理的機能;上腕二頭筋の場合にはF機能)に比べて、生後獲得された機能(同S機能)は容易に変容する(詳しくは次節参照)。これは、人の「運動学習」に関する運動神経生理学的機序の一端を示すもので、われわれの脳が大いなる可塑性を有していることの証拠である。

## 2) 肢位変化による影響

反応動作は、その運動を遂行する直前の心理的並びに身体的“構え”の違いに強く影響される。運動の出力機構についても例外ではない<sup>42,88</sup>。特に、運動出力機構に及ぼす構えの影響、すなわち運動を遂行する直前の四肢並びに体幹部の位置変化の影響は、反応時間の違いとして記録できる<sup>112</sup>。基本的には、上肢と下肢の協応運動の反応時間に見られるように<sup>49,58</sup>、肢位変化による反応時間の変化も、1960年にHenryとRogersが報告した「メモリー・ドラマ理論」<sup>27</sup>に従うものと思われる。すなわち、肢位変化によってその運動の遂行に必要な運動プログラムが単純化されれば反応時間は短縮するであろうし、逆に複雑になれば延長することになるであろう<sup>70</sup>。

しかし、肢位変化によって運動出力機構が影響を受けるもう一つの重要な点は、肢位変化によって末梢から流入する感覚の情報量が影響を受け、それが脳の活性レベル(賦活水準)を変えることである<sup>97,98</sup>。脳の賦活水準の変化はそのまま運動出力機構の機能レベルと密接にかかわっている<sup>2,20,24</sup>。このことは、身体を自由度の大きな一つの機械と考えた時、運動遂行に際して物理的に最も効率のよいやり方があるように、ヒトにおいては、構えの違いが生理学的な機能の効率に大きくかかわる重要な問題であることを意味している。

## 3) トレーニングによる影響

先述のように、運動パターンの形成にかかわる中

枢運動機構は、固定的なものではなく、極めて可塑性に富んだものである。先述のFとSの運動パターンを用いたわれわれの研究では、9-10歳頃にこのような運動パターンを形成する運動中枢は著しく発達し<sup>25</sup>、その後、どのような運動経験を積むかによって、個人によって多用な運動パターン生成機構が確立されてくるものと思われる。上腕二頭筋の反応時間の変化を、FとSの運動パターンを用いて調べてみると、当然のことながら、長年上肢がどのように使われてきたかという、運動経験の違いによって運動パターン形成機能が異なってくるのが分かった。それは、上肢の使われ方の異なる運動選手を調べた結果から判明した<sup>48,50,54,57,62</sup>。すなわち、運動学的に上肢の使われ方が特殊な運動種目の選手は、運動経験の少ない一般の人や他の運動選手と異なって、FとSの運動パターンに依存した反応時間の変化は示さなかった(図2のB、図3のC、D参照)。そこで、このような違いが本当に後天的な運動経験(それも上肢の運動という観点から)の違いによるものなのかどうかを実験的に確かめた。その結果、前腕の回内運動や肩関節の運動に関するトレーニングでは、FとSの反応時間の現れ方にはほとんど影響しなかった<sup>55,56</sup>。しかし、テニスのストロークのように、その運動の遂行に上腕二頭筋が特異的にかかわる運動<sup>50</sup>を、集中的にトレーニングさせるとFとSの反応時間の出現が変化した。しかも、これは一過性のもので、トレーニングをやめるともとの状態に戻った<sup>59</sup>。この事実も、先述の通り脳の可塑性を示す実験結果といえよう。

ところで、反応時間を使ってトレーニング効果を見ようとする報告が多いが、反応時間で本当にトレーニング効果の評価ができるのであろうか。確かに反応時間は先述の通り、中枢性の運動機能を調べる事の出来る簡便な方法ではあるが、それをトレーニング効果の指標にすることに関しては注意を要する<sup>64</sup>。すなわち、その一つは、反応時間はあくまでも個人依存性の指標であるから(個人の反応時間の遅速は、個人特有のものであり、決まった法則性は無い)、それをグループ間の違いの指標に用いようとする時に問題が起こる。したがって、二つ目には、反応時間をトレーニング効果の指標として用いようとするなら、それが個人内でどのように変化したかを指標とすべきである。これには、先述の反応時間の変動要因がすべて絡んでくる。すなわち、われわれが用いたように、反応時間の変化の中で何が

トレーニング効果を反映するかを十分吟味して、精度のよい変数を考えなければならない。この努力を怠ると、牛刀で鶏を切る結果となる。

4)運動学的要因による影響

実際の随意運動の遂行では、ある特殊な場合を除いて、身体の一部を使って運動を実行することは希で、いくつかの部位がお互いに協応してある一つの目的のある運動を遂行するのが一般的である。それでは、このような協応運動の遂行にかかわる随意運動機能は、反応時間を使って調べることが出来るであろうか。

FとSの運動パターンを左右肢で同時に、しかも同じパターンを遂行する場合と、左右肢で異なる運動パターンを同時に遂行する場合について、反応時間に与える影響を調べた<sup>60)</sup>。その結果、左右肢で異なる運動パターンを遂行する場合に、反応時間の特異な影響がみられた。すなわち、左右肢で遂行する運動パターンが同じ場合には、左右のFとSの反応時間は高い相関関係をもって出現するが、異なる運動パターンを同時に遂行する時には、非利き手でこの関係がくずれる(右利き、左利きとも)。このことは、運動遂行時に左右の運動パターンが異なると、脳にあるバイアス(constrain: 圧迫)がかかり、これが運動パターンの出現機構を修飾することを示唆している<sup>106)</sup>。それも、非利き手の反応時間のみ影響したことから、このような運動パターン出現機構にも、脳の機能的左右差が有ることを示唆している<sup>29,91)</sup>。また、このような機能的差異は、下肢の運動の遂行時にも観察されたことから<sup>111)</sup>、上下肢の随意運動遂行時には常に駆動される脳の特異的な機能であると考えられる。

さて、随意運動の遂行時にかかわる中枢運動機能の解析で、常に問題になることとして、「脳は運動の何をプログラムしているのか」という問題がある。「運動の速さ」については、すでに「Fittsの法則」として既知の通り、運動の速さはその運動の正確さと密接に関係している(speed-accuracy trade off)<sup>22,23,83)</sup>。同じことは反応時間についてもいえる。すなわち、よく制御された正確でゆっくりした運動を遂行する時は、素早い運動を遂行する時に比べて運動の開始は遅れる。同じことは、随意筋収縮を行う時も同じである。最大筋収縮力の数パーセントの力を反応時間課題で遂行する時は、数10パーセントの力を発揮する時に比べて反応時間は遅れ

る<sup>33,67)</sup>。これは最大筋収縮力の数パーセントの力を発揮する時には、ゆっくりとした運動を遂行する時と同様に、注意を集中して運動を十分にコントロールする必要があるからである。したがって、これらのよく制御された運動を遂行する際には、上位運動中枢の関与の程度が自ずから異なっており<sup>5,7,16)</sup>、このことが反応時間の遅れとして出現するものと考えられる(後述)。

随意運動の特殊な例として、切り替え動作がある。実際の運動場面では、日常的に観察される運動事態である。それでは、このような切り替え動作を遂行する時、われわれの上位運動中枢はどのように行っているのであろうか。そして、それが反応時間の遅速にどのように反映されるであろうか。事前にある決められた力で拮抗筋に持続性筋収縮を行わせ、素

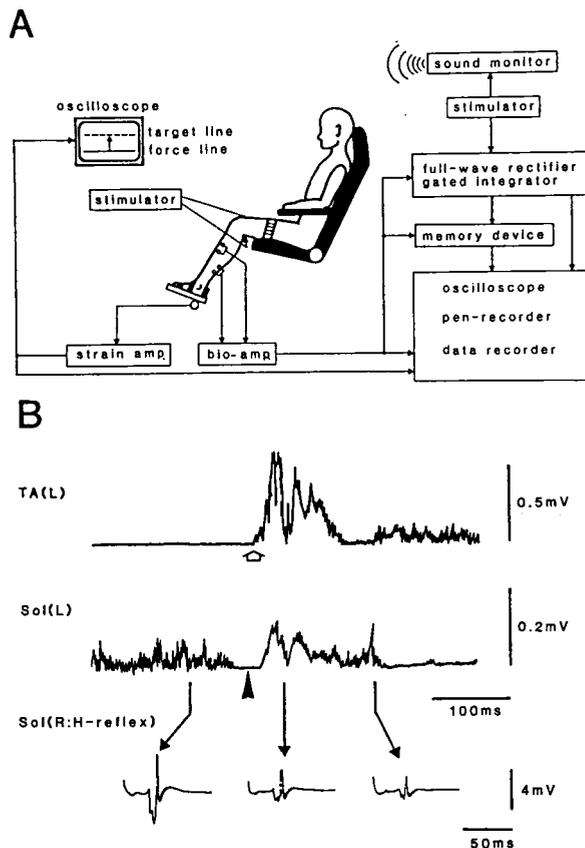


図4 Aは足背屈反応動作の実験模式図。Bは実際の筋電図記録。足背屈反応動作の主動筋である前脛骨筋の筋放電開始時点(TA:白三角印)に先行して、拮抗筋であるヒラト筋(Sol)にも筋放電休止期が観察されることを示す(黒三角印)。また、主動筋と拮抗筋の筋放電の出現動態に対応して、H反射の大きさが変化するを示す(文献76と77を改変)。

早い切り替え動作を行わせると、主動筋と拮抗筋ともに筋放電休止期が出現し、それに続いて主動筋の相動性筋放電が見られる(図4のB参照)。この主動筋の筋放電出現時点をEMG-RTとして計測し、これが事前の筋収縮力の違いや、反応する力の違いによってどのように影響されるかを調べてみると<sup>76)</sup>、事前の筋収縮力の違いそして発揮する力の違いによって反応時間は変化した。しかし、筋電図休止期の持続時間は、事前の筋収縮力の違いには影響されず、発揮する筋出力の違いによって影響を受けた。この結果は、反応時間は運動の準備状態や運動の強さなど、反応動作にかかわるあらゆる条件の違いに対応して変化することを意味している。すなわち、随意運動の発現機構の動態は、反応時間の変化としての確に反映されることを示唆している。しかし、実際にこの機能がどのようなメカニズムに支えられているかを理解するには、ただ単に反応時間の変化を解析するだけでは不十分である(H反射法の項参照)。

#### IV. H 反射の測定

ヒトのH反射の記録法およびその結果の解釈など、基本的な事項に関してはSchippatio<sup>107)</sup>および田中<sup>114,115)</sup>の優れた総説がすでに出されており、筆者もそれに追加する事項についてすでに総説を出した<sup>69)</sup>。したがって、H反射に関する基本的な事柄については、それらの総説を参照していただくとして、ここでは繰り返さない。ここでは、実際の身体運動の遂行時に当然起こっている脊髄運動細胞群の変化とその意味、そして前述の反応時間との関係で、H反射法がヒトの随意運動機構解析の手段としてどの程度有効な方法となり得るかという点に焦点を絞って、いままでに筆者が行ってきた研究を中心に総説する。

##### 1) 肢位変化とH反射

随意運動の遂行に先行する四肢の位置変化は、前述の通り反応時間に影響を与えるのみならず、脳からの運動指令を受けて実際に筋の収縮を起こさせる $\alpha$ 運動細胞の興奮性にも影響を与える。運動細胞の活動にかかわる諸機構は、抑制作用が優位であるが<sup>116)</sup>、呼吸や注意の集中あるいはジェンドラッシュ法などによって、その抑制機構は一時的に解除される<sup>35,37)</sup>。四肢の変化の場合も同様で、肢位

の変化を行った筋では $\alpha$ 運動細胞の興奮性が変化するのみならず<sup>43)</sup>、他の筋の $\alpha$ 運動細胞の興奮性にも影響を及ぼす<sup>15,51)</sup>。この時の $\alpha$ 運動細胞の興奮性の変化がそのまま筋電図反応時間の遅速にも影響する。そのメカニズムを模式図的に示したのが図5である。

##### 2) 運動の準備状態とH反射

肢位の具体的な位置変化は伴わなくとも、随意運動の遂行に先行してわれわれは常に何等かの準備状態を作っている<sup>79)</sup>。この準備状態が不十分だと、それに伴って遂行される運動のできればは満足のいくものにはならない。随意運動の準備状態の運動神経生理学的解析に、前述の筋電図反応時間法とH反射法を組み合わせる方法が確立された<sup>36,38,45,52,53,63,65,68,80)</sup>。要は、被検者が反応時間課題遂行中にランダムな時間にH反射を記録し、運動開始時点を正確に同定してそれを基準にタイムコース上に

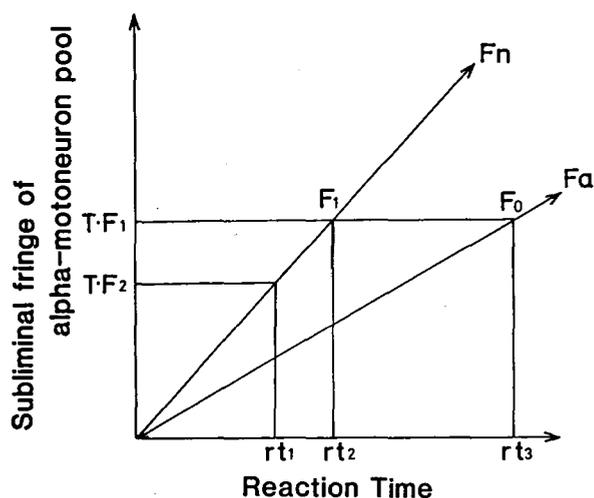


図5 脊髄 $\alpha$ 運動細胞の興奮性(縦軸)と実際の筋電図反応時間との関係(横軸)を示す模式図。Fnで示した $\alpha$ 運動細胞と反応時間の関係は、上位運動中枢からの運動指令が一定であっても、その運動指令を受けて立つ $\alpha$ 運動細胞の閾値が何らかの条件の違い(特に肢位変化などによる末梢からの感覚入力の違いを想定する)によって変化している場合( $T \cdot F_1$ と $T \cdot F_2$ )、それがそのまま反応時間の長短に影響を与えることを示す( $r_{t1}$ と $r_{t2}$ )。または、Faの直線で示したように、 $\alpha$ 運動細胞の閾値は一定( $F_1$ と $F_0$ )であっても、上位運動中枢からの運動指令の違いによって脊髄内 $\alpha$ 運動細胞の興奮性の起こり方が違ってれば(素早い運動やよく制御されたゆっくりした運動のような運動プログラムの違いを想定する:FnとFaの直線の違い)、それも反応時間の違いとして出現することを示す( $r_{t2}$ と $r_{t3}$ )(文献43から)。

記録した H 反射の振幅変化を、基準の H 反射(コントロール)との比較でプロットし、時間経過に伴う変化を解析する。その結果、実際に運動を遂行する筋から記録した H 反射は、筋放電開始に数十ミリ秒先行してその興奮性が増大した<sup>17,53,84,85,108</sup>)。これは *Evarts*<sup>18)</sup> が、サルに手首の伸展・屈曲運動を行わせて、錐体路細胞 (PT 細胞) の発火様式を記録した時、その発火時間は実際の筋電図開始に数 10 ミリ秒先行していた事実と符合する現象である。

反応動作の特殊な例として切り替え動作がある。この時に認められる特殊な現象として動作前の筋放電休止期現象があり<sup>125)</sup>、その運動神経生理学的メカニズムの解析に H 反射が使われる。タイムコース上に H 反射の変化を記録してみると、確かに一過性の H 反射の減弱が認められた<sup>36,38,45,52</sup>)。しかし、それはそれほど強い H 反射の減弱ではないこと、またその時の反応事態の違いによって容易に出現しなくなることから考えて、強い抑制機序の関与を考えるよりも、脱促進のような機序の関与を考える方が妥当なように思われる。したがって、運動神経生理学的なメカニズムの解析は未解決のまま残されている<sup>1,13,30,40,74,86,101,113,118,119</sup>)。一方、運動の切り替えの方向が異なる場合にも、前述の運動方向が同じ場合と同様に筋放電の休止期が認められる<sup>14,28,76</sup>)。この現象を H 反射法を使って調べみると (図 4 参照)、拮抗筋 (準備状態では一定の緊張性筋収縮を維持する主動筋) の事前の筋収縮力の大小に依存して、H 反射の抑制量が異なった。この結果は、随意運動の遂行に際して、われわれの脳は事前の準備状態 (この場合は事前の筋収縮量) を巧みに読み込んで適切な運動指令を作り、脊髄反射機構 (シナプス前抑制機構など) の適切な駆動を制御していることを示唆している<sup>68)</sup>。

### 3) 随意運動の質と H 反射

われわれの脳が運動の何をプログラムして、それをどう制御しているかを解析することは前述の通り重要な問題である。そこで、運動の質すなわち、運動の強さ、速さ、方向、正確性、大きさ、などと H 反射の変化とにどのような関係があるかが解析される。

運動の強さについては、等尺性筋収縮の多寡を課題に解析が行われる<sup>63,77)</sup>。H 反射の変化は、実際の筋放電開始前では筋収縮の違いに対して違いは認められない。しかし、筋放電開始直後からは、筋収

縮力の大小に対応した変化を示す。すなわち、筋収縮力が大きくなればそれに比例して H 反射は増大する (拮抗筋の H 反射では反対に減弱する)。筋収縮力の大小が、駆動される  $\alpha$  運動細胞、すなわち PT 細胞の数と発火頻度を反映しているとすれば<sup>11,21,73)</sup>、H 反射の変化はこれらの変化を反映した結果であることを意味している。しかも、促進の開始時点は筋出力の大小で差が無かったことから、ヒトの筋収縮に伴う運動神経生理学的機序においても、サイズの原理にしたがって興奮性の変化が起こっていることを示唆している<sup>77)</sup>。また、関節の滑らかな運動に大切な働きをしている相反性抑制機構は、筋収縮力の大小に比例してその駆動のされ方が修飾されることがわかっている<sup>32,63,109)</sup>。

それでは、運動の速さに対して H 反射はどのような変化を示すであろうか。運動の速さの違いによって、加算脳波 (脳運動関連電位) の形状が異なることはよく知られている<sup>5)</sup>。すなわち、よく制御されたゆっくりとした随意運動の遂行時には、素早い運動の遂行時に比べて、脳運動関連電位は運動の開始に対して早期に発現する。これは、運動の制御の難しさに対するわれわれの脳の関与の違いを反映したものと考えられている。H 反射を使ってこの点を調べた *Kagamihara* らの報告<sup>33)</sup> では、脳運動関連電位で観察されたように、ゆっくりとした運動の遂行時には H 反射の興奮性の変化は早期に起っていた。このことは前述の通り、H 反射の変化は脳内で形成される運動プログラムの違いに相応した  $\alpha$  運動細胞の興奮性の変化を時間的にも忠実に反映していることを示唆している。

このような変化は、単純反応時間課題において観察された結果であった。単純反応時間課題では、事前に運動プログラムはセットされており、反応シグナルによって駆動されるだけの状態である。このことは、選択反応課題でも同じであろうか。選択反応課題では、反応シグナルの提示後運動プログラムを選択し、運動を開始しなければならない事態である。この違いを前述の筋収縮力の違いを例に調べてみると、選択反応課題において H 反射の興奮性の開始時点が、単純反応時間課題に比べて、著しく先行した<sup>80)</sup>。すなわち、選択反応時間課題において、H 反射の興奮性が早期に開始した。このことは、決まった運動プログラムを事前にセットして待つ事態と、複数の運動プログラムを用意しそのどれかを素早く選ぶような状態で待つ事態では、同じ運動の

遂行であっても、その運動神経生理学的背景は著しく異なっていることを示唆している。最近、選択反応動作状態で観察される中間的な運動の起こり方を「default movement」と称して、運動学的に詳細な解析が試みられている<sup>26)</sup>。

#### 4) 姿勢調節とH反射

H反射はいくつかの理由から<sup>69)</sup>また、その動揺性の大きさから姿勢や歩行のような動的な状態でヒトの $\alpha$ 運動細胞の変化を記録し、解析することには適さないと考えられてきた。しかし、*Capady*と*Stein*<sup>9,10)</sup>は、歩行のような動的状態でも信頼のおけるH反射が記録できることを示した。以来、姿勢調節(歩行は姿勢の連続的な変化と考える)の運動神経生理学的機序の解析にH反射が多用されるようになった。河合ら<sup>75)</sup>は、*Kaneoka*ら<sup>34)</sup>や*Nardone*ら<sup>99)</sup>、そして*Yamashita*ら<sup>126,127)</sup>が用いた踵部挙上運動を反応時間課題で行なわせ、同時にH反射の変化をタイムコース上で記録した。その結果、主動筋(この運動の場合はヒラメ筋)と拮抗筋(前脛骨筋)の $\alpha$ 運動細胞はきれいな相反性変化を示した。そして、この変化は事前に準備された運動プログラムの違い(踵部挙上後にその姿勢を維持するか、しないかの違い)に対応して、興奮性の起こる時間的關係が変化した。すなわち、踵部挙上後その姿勢を維持する反応動作では、興奮性の変化が早期に起こった。これは、筋電図記録の結果と対応しており、H反射の興奮性の違いは運動プログラムの違いを反映することを意味していた。

#### V. おわりに

「反応時間法」と「H反射法」という二つのパラメーターについて、特にヒトの随意運動解析にそれらがどのような有効性をもつかについて総説した。どちらのパラメーターも幾多のテストをくぐり抜けて、ヒトの随意運動解析に有効な方法として位置づけられ、生き残ってきたパラメーターである。特に、H反射を反応時間法に組み込むことによって一層その有効性が発揮されるようになったことを強調した。しかし、最近のサルを使った随意運動機能の解析から注目されているように、反応時間は随意運動の一面(外発的運動)をみているにすぎない。したがって、随意運動を十分理解するには、自己ペース(内発的)のような運動も反応時間課題と同じように、精力的に解析されなければならない。実際、このよ

うな運動の違いに対応して、中枢運動領野のかかわり方が異なっていることが分かってきている<sup>110,123)</sup>。H反射を使った解析で内発的な運動の解析にも手が付けられ始めたが(小宮山、私信による)、その技術的な困難さを克服することが当面の課題である。

H反射に代わる有効なヒトの随意運動解析手法として、最近誘発運動電位(motor evoked potential; MEP)<sup>72)</sup>やPET(positron emission tomography)<sup>104)</sup>が注目されている。これらのパラメーターは今後幾多のテストにかけられ、その有効性と限界性が試されることになるだろう。

#### 文 献

- 1) 青木ほか：運動前 silent period の動的筋力増強効果，臨床脳波，27：650-655，1985。
- 2) *Asanuma, H.* and *K. Arissian*: Experiments on functional role of peripheral input to motor cortex during voluntary movements in the monkey. *J. Neurophysiol.*, 52: 212-2-227, 1984.
- 3) *Balfour, C.A.*, et al.: Interhemispheric differences in the planning execution of sequences of skilled finger movements. *Neuropsychol.*, 29: 889-905, 1991.
- 4) *Basmajian, J.V.*: Muscle Alive: Their function revealed by electromyography. 4rd ed. Williams & Wilkins, Baltimore, 1978.
- 5) *Becker, W.*, et al.: Bereitschaftspotential preceding voluntary slow and rapid hand movements. In: *McCallum, W.C.* & *Knott, J.R.* (eds.) The Response Brain, John Wright and Sons, Bristol, 1976, pp. 99-102.
- 6) *Blair-Thomas, C.A.* and *E.S. Luschei*: Increases in reflex excitability of monkey masseter motoneurons before a jaw-bite reaction-time response. *J. Neurophysiol.*, 38: 981-989, 1975.
- 7) *Bonnet, M.*: Comparison of monosynaptic tendon reflexes during preparation for ballistic or ramp movement. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 51: 353-362, 1981.
- 8) *Botwinick, J.* and *L.W. Thompson*: Premotor and motor components of reaction time. *J. Exp. Psychol.*, 71: 9-15, 1966.
- 9) *Capady, C.* and *R.B. Stein*: Amplitude modulation of the soleus H reflex in the human during walking and standing. *J. Neurosci.*, 6: 1308-1313, 1986.
- 10) *Capady, C.* and *R.B. Stein*: Difference in the amplitude of the human soleus H reflex during walking and running. *J. Physiol.*, 392: 513-522, 1987.
- 11) *Cheney, P.D.*, et al.: Patterns of facilitation and suppression of antagonist forelimb muscles from motor cortex sites in the awake monkey. *J. Neurophysiol.* 53: 805-820, 1985.
- 12) *Chocholle, R.* (萬代敬三・訳)：反応時間。現代心理学 III, pp 87-185. 白水社。
- 13) *Conrad, B.*, et al.: Premovement silent period in fast movement initiation. *Exp. Brain Res.*, 51: 310-313, 1983.
- 14) *Crenna, P.* and *C. Frigo*: A motor programme for the initiation of forward oriented movements in humans. *J. Physiol.*, 437: 635-653, 1991.

- 15) *Delwaide, P.J.*, et al.: Effects of postural changes of upper limb on reflex transmission in the lower limb: Cervicolumbar reflex interactions in man. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, 40: 616-621, 1977.
- 16) *Desmedt, J.E.*: The size principle of motoneuron recruitment in ballistic or ramp voluntary contractions in man. *Prog. clin. Neurophysiol.*, 9: 97-136, 1981.
- 17) *Eichenberger, A.* and *D.G. Ruegg*: Relation between the specific H-reflex facilitation preceding a voluntary movement and movement parameters in man. *J. Physiol.*, 347: 545-559, 1984.
- 18) *Evarts, E.*: Pyramidal tract activity associated with a conditioned hand movements in the monkey. *Jm. Neurophysiol.*, 29: 1011-1027, 1966.
- 19) *Evarts, E.* and *J. Tanji*: Gating of motor cortex reflexes by prior instruction. *Brain Res.* 71: 479-494, 1974.
- 20) *Favorov, O.*, et al.: Functional role of corticoperipheral loop circuits during voluntary movements in the monkey: A preferential bias theory. *J. Neurosci.*, 8: 3266-3277, 1988.
- 21) *Fetz, E.E.* and *P. D. Cheney*: Postspike facilitation of forelimb muscle activity by primate corticomotoneuronal cells. *J. Neurophysiol.*, 44: 751-772, 1980.
- 22) *Fitts, P.M.*: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *J. exp. Psychol.*, 47: 381-391, 1954.
- 23) *Fitts, P.M.* and *J.R. Peterson*: Information capacity of discrete motor response. *J. exp. Psychol.*, 67: 103-112, 1964.
- 24) *Furubayashi, T.* and *T. Kasai*: Influence of initial forearm position on premotor times (PMTs) of the biceps brachii during an elbow flexion task. *Human Mov. Sci.*, 9: 583-598, 1990.
- 25) 古井敏美ほか：反応時間の運動パターン依存性の検討—その発達的变化と性差について—。体育学研究, 31: 1-11.
- 26) *Ghez, C.*, et al.: Parallel interacting channels in the initiation and specification of motor response features. In: *Jeannerod, M.* (ed.) *Attention and Performance XIII*. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1990, pp. 265-293.
- 27) *Henry, F.M.* and *D. Roger*: Increased response latency for complicated movements and a 'memory drum' theory of neuromotor reaction. *Res. Quart.* 31: 448-458, 1960.
- 28) *Hufschmidt, J.H.* and *T. Hufschmidt*: Antagonist inhibition as the earliest sign of a sensory-motor reaction. *Nature*, 174: 607, 1954.
- 29) *Hongo, T.*, et al.: Reaction times and their left-to-right differences in bilateral symmetrical movements. *Physiol. Behav.*, 15: 477-482, 1976.
- 30) *Hummelsheim, H.* and *H. Helter*: A premotor silent does not occur prior to rapid changes of velocity during human limb movements. *Neurosci. Lett.* 124: 52-56, 1991.
- 31) *Humphrey, D.R.* and *T. Tanji*: What features of voluntary motor control are encoded in the neural discharge of different cortical motor area? In: *Humphrey, D.R. & Freund, H.-J.* (eds.) *Motor Control: Concepts and Issues*. John Wiley & Sons, 1991, pp 413-443.
- 32) *Kagamihara, Y.* and *R. Tanaka*: Reciprocal inhibition upon initiation of voluntary movement. *Neurosci. Lett.*, 55: 23-27, 1985.
- 33) *Kagamihara, Y.*, et al.: Facilitation of agonist motoneurons upon initiation of rapid and slow voluntary movements in man. *Neurosci. Res.* 14: 1-11, 1992.
- 34) *Kaneoka, Y.*, et al.: Reaction times of movement preparation in patients with Parkinson's disease. *Neurol.*, 39: 1615-1618, 1989.
- 35) 笠井達哉：全身反応時間、握力およびH-reflexと呼吸相との関係。国士館大学体育学部紀要, 5: 39-44, 1979.
- 36) 笠井達哉, 中原凱文：随意動作開始前のH波の変化。体力科学, 28: 299-306, 1979.
- 37) 笠井達哉：反射増強法に関する研究, 国士館大学体育学部紀要, 6: 31-40, 1980.
- 38) 笠井達哉：下肢底屈・背屈同時動作開始前の抑制現象, 体育の科学, 30: 209-213, 1980.
- 39) 笠井達哉：脊髄の興奮性と反応時間の関係—下肢底屈・背屈反応動作について—。体育学研究, 25: 95-104, 1980.
- 40) 笠井達哉, 館山昭：動作開始前 silent period の出現頻度とその持続時間に与える練習の影響。体育の科学, 30: 745-749, 1980.
- 41) 笠井達哉, 小林朝子：運動パターンの違いによる反応時間の変動量—両手前腕同時反応動作について—。体育の科学, 31: 557-560, 1981.
- 42) 笠井達哉：上肢肢位変化による反応時間の変動性。国士館大学体育学部紀要, 7: 57-62, 1981.
- 43) 笠井達哉：下肢肢位変化による反応時間とH波の変動性。体育学研究, 26: 129-135, 1981.
- 44) *Kasai, T.*, et al.: Effect of warning signal on reaction time of elbow flexion and supination. *Percept. Mot. Skills.*, 55: 675-677, 1982.
- 45) 笠井達哉：足関節底屈選択反応動作 (Go or No-Go) 開始前の抑制現象。体力科学, 31: 266-268, 1982.
- 46) 笠井達哉：運動パターンの違いによる反応時間の変動量—利き手・非利き手および肢位変化による影響—。体育学研究, 27: 97-109, 1982.
- 47) 笠井達哉：脳の興奮レベルと反応時間。体育の科学, 32: 97-102, 1982.
- 48) 笠井達哉：運動パターンの違いによる反応時間の変動性—その運動種目特性とトレーニングによる影響について—。国士館大学体育学部紀要, 8: 15-23, 1982.
- 49) 笠井達哉, 長塚友恵, 古海秀子：上肢屈曲, 伸展の構えが下肢底屈反応時間におよぼす影響。体育の科学, 32: 229-232, 1982.
- 50) 笠井達哉：反応時間と筋電図による各種スポーツ種目の上肢運動特性の解析。体育学研究, 28: 227-236, 1983.
- 51) 笠井達哉：上肢肢位変化が下腿部運動ニューロンに及ぼす影響。国士館大学体育研究所所報, 3: 25-32, 1983.
- 52) 笠井達哉：先行抑制の運動パターン presetting 依存性の検討。体力科学, 32: 278-284, 1983.
- 53) 笠井達哉：下肢底屈選択反応動作に伴う片側性促進現象。国士館大学体育学部紀要, 9: 7-10, 1983.
- 54) 笠井達哉：反応時間の運動パターン依存性—その各種スポーツ種目による違いについて—。体育の科学, 33: 468-471, 1983.
- 55) 笠井達哉：反応時間の運動パターン依存性の検討—利き手回内反応動作トレーニングによる影響について—。国士館大学体育学部紀要, 10: 8-14, 1984.
- 56) 笠井達哉, 西村理：反応時間の運動パターン依存性の検討：肩関節屈曲反応動作トレーニングの影響。体育の科学, 35: 381-385, 1985.
- 57) *Kasai, T.*: The dependence of reaction times on movement patterns in unilateral and bilateral upper limbs in

- trained athletes. In: *Winter, D.A., et al. (eds.) Biomechanics IX-A., Human Kinetics. 1985, pp 372-376.*
- 58) 笠井達哉：手関節屈曲・伸展および足関節底屈・背屈同時動作の反応時間. 国士館大学体育学部紀要, 11: 1-8, 1985.
- 59) 笠井達哉：反応時間の運動パターン依存性の検討—利き手によるフォーワードハンドとバックハンド・ストロークトレーニングによる影響—, 体育の科学, 30: 13-24, 1985.
- 60) *Kasai, T. and T. Komiyama*: EMG-reaction time of the biceps brachii in bilateral simultaneous motions. *Percept. Mot. Skills*, 63: 455-460, 1986.
- 61) *Kasai, T. and H. Seki*: Motor reaction times of the simple and the choice ballistic elbow extension. *J. Human Mov. Studies*, 13: 353-361, 1987.
- 62) *Kasai, T.*: Dependence of reaction time on movement patterns in athletes. *Kokusikan University Bulletin*, 14: 1-6, 1988.
- 63) *Kasai, T. and T. Komiyama*: The timing and the amount of agonist facilitation and antagonist inhibition of varying ankle dorsiflexion force in man. *Brain Res.*, 447: 389-392, 1988.
- 64) *Kasai, T.*: Is the reduction of reaction time an adequate estimate of the effect of practice? *Percept. Mot. Skills*, 66: 51-56, 1988.
- 65) 笠井達哉, 小宮山伴与志：誘発筋電図記録法の随意筋収縮開始時点の同定法—負荷運動速度の違いについて—. 国士館大学体育学研究所報, 8: 1-9, 1989.
- 66) 笠井達哉：脳運動関連電位とCNVの運動パターン依存性. 国士館大学体育学部紀要, 15: 7-15, 1989.
- 67) *Kasai, T. and T. Komiyama*: Effects of varying components on EMG reaction times of isometric ankle dorsiflexion. *Human Mov. Sci.*, 9: 133-147, 1990.
- 68) *Kasai, T. and T. Komiyama*: Antagonist inhibition during rest and precontraction. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 81: 427-432, 1991.
- 69) 笠井達哉：反射と運動機能. 体育の科学, 41: 99-107, 1991.
- 70) *Kasai, T. and H. Seki*: Premotor reaction time (PMT) of the reversal elbow extension-flexion as a function of response complexity. *Human Mov. Sci.*, 11: 319-334, 1992.
- 71) *Kasai, T. and T. Taga*: Effects of varying load conditions on the organization of postural adjustments during voluntary arm flexion. *J. Mot. Behav.*, 24: 359-365, 1992.
- 72) 笠井達哉：ヒトの経頭蓋的大脳波質刺激法. *J. J. Sports Sci.*, 12: 54-70, 1993.
- 73) *Kasser, R.J. and P.D. Cheney*: Characteristic of corticomotoneuronal postspike facilitation and reciprocal depression of EMG activity in the monkey. *J. Neurophysiol.*, 53: 959-978, 1985.
- 74) *Kawahatsu, K. and M. Miyashita*: Electromyogram pre-motion silent period and tension development in human muscle. *Exp. Neurol.*, 82: 287-302, 1983.
- 75) 河合一武ほか：踵部挙上動作時の姿勢調節にかかわる下腿筋群の活動様式. 体育学研究, 37: 145-158, 1992.
- 76) 小宮山伴与志, 笠井達哉：足関節底屈・背屈切り替え動作時の筋放電休止期—予備筋緊張量の違いと筋出力量の違いによる影響—. *J. J. Sports Sci.*, 7: 253-268, 1988.
- 77) 小宮山伴与志, 笠井達哉：筋収縮力の違いが主動筋促進及び拮抗筋抑制に与える影響. 体育学研究, 33: 135-144, 1988.
- 78) 小宮山伴与志, 笠井達哉：上肢挙上反応動作に伴う大腿および腰部筋群の筋放電開始順序. 姿勢研究, 9: 15-23, 1989.
- 79) *Komiyama, T. and R. Tanaka*: The differences in human spinal motoneuron excitability during the foreperiod of a motor task. *Exp. Brain Res.*, 79: 357-364, 1990.
- 80) 小宮山伴与志, 笠井達哉：単純及び選択課題遂行時の主動筋H反射の促進動態. 体力科学, 42: 189-200, 1993.
- 81) *Kubota, K. and I. Hamada*: Preparatory activity of monkey pyramidal tract neurons related to quick movement onset during visual tracking performance. *Brain Res.*, 168: 435-439, 1979.
- 82) 松井三雄：スポーツ科学における反射時間の研究. 桜門体育学研究, 3: 1-10, 1967.
- 83) *Meyer, D.E., et al.*: Seed-accuracy tradeoffs in aimed movements: Toward a theory of rapid voluntary action. In: *Jeannerod, M. (ed.) Attention and Performance XIII*, Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1990, pp 173-226.
- 84) *Michie, P.T., et al.*: Latera facilitation of Hoffmann-reflexes prior to voluntary movement in a choice reaction time task. *Appl. Neurophysiol.*, 38: 191-196, 1975.
- 85) *Michie, P.T., et al.*: Reaction time and spinal excitability in a simple reaction time task. *Physiol. Behav.*, 16: 311-315, 1976.
- 86) *Mortimer, J.A., et al.*: Premotor silences in agonist muscles preceding maximum efforts. *Exp. Neurol.*, 98: 542-552, 1987.
- 87) *Nakamura, R. and H. Saito*: Preferred hand and reaction time in different movement patterns. *Percept. Mot. Skills*, 39: 1275-1281, 1974.
- 88) *Nakamura, R. and E. Viel*: The influence of position changes in the proximal joint on EMG-recorded reaction time on key muscles in the human extremity. *Proc. WCPT 7th. Int. Congress*, 1974, pp 117-123.
- 89) 中村隆一, 谷口礼二：筋電図による反応時間の測定. 臨床生理, 6: 223-229, 1976.
- 90) *Nakamura, R.*: Postural dependence of reaction time in normal subjects and patients with forcal brain lesions. *Appl. Neurophysiol.*, 39: 321-325, 1976/1977
- 91) 中村隆一, 谷口礼二：同時動作の反応時間. 臨床脳波, 19: 230-238, 1977.
- 92) *Nakamura, R. and R. Taniguchi*: Reaction time in patients with cerebral hemiparesis. *Neuropsychol.*, 15: 845-848, 1977.
- 93) *Nakamura, R., et al.*: Dependence of reaction times on movement patterns in patients with cerebral hemiparesis. *Neuropsychol.*, 16: 121-124, 1978.
- 94) *Nakamura, R. and R. Taniguchi*: Dependence of reaction times on movement patterns in patients with Parkinson's disease and with cerebellar degeneration. *Tohoku J. exp. Med.*, 132: 153-158, 1980.
- 95) 中村隆一：筋電図反応時間による運動発現の検討. 臨床脳波, 30: 566-572, 1988.
- 96) 中村隆一, 齊藤宏：基礎運動学(第3版), p 102-114, 医歯薬出版, 1988.
- 97) 奈良雅之, 笠井達哉：運動開始前の前腕肢位変化が反応時間に及ぼす影響. スポーツ心理学研究, 16: 85-87, 1989.
- 98) 奈良雅之, 笠井達哉：運動開始前の前腕位及び手関節角度の違いが肘屈曲動作の反応時間に及ぼす影響. 体育学研究, 35: 349-358, 1991.

- 99) *Nardone, A. and M. Schieppati*: Postural adjustments associated with voluntary contraction of leg muscles in standing men. *Exp. Brain Res.*, 69: 469-480, 1988.
- 100) 大山正: 反応時間研究の歴史と現状. *人間工学*, 21: 57-64, 1985
- 101) *Palmer, S.S., et al.*: Premotor silence of EMG activity prior to movement in Parkinson patients. *Electromyogr. clin. Neurophysiol.*, 31: 425-431, 1991.
- 102) *Passingham, P.E.*: Two cortical systems for directing movement. In: *Motor areas of the cerebral cortex*, Ciba Foundation Symposium 132, John Wiley & Sons, 1987, pp 151-170.
- 103) *Porter, P.*: Influences of movement detectors on pyramidal tract neurons in primates. *Ann. Rev. Physiol.*, 38: 121-137, 1976.
- 104) *Roland, P.E.*: Cortical organization of voluntary behavior in man. *Hum. Neurobiol.*, 4: 155-177, 1985.
- 105) 佐直信彦, 中村隆一: 他動運動の反応時間への影響. *臨床脳波*, 31: 285-288, 1989.
- 106) *Sanders, A.F.*: Structural and functional aspects of the reaction process. In: *Dornic, S. (ed.) Attention and Performance VI*, Hillsdale, NJ: Erlbaum, 1977, pp 3-25.
- 107) *Schieppati, M.*: The Hoffmann reflex: A means of assessing spinal reflex excitability and its descending control in man. *Prog. Neurobiol.*, 28: 345-376 1987.
- 108) *Semjen, A., et al.*: Relation between the time-course of Hoffmann-reflexes and the foreperiod duration in a reaction-time task. *Physiol. Behav.*, 10: 1041-1050 1973.
- 109) *Shindou, M., et al.*: Changes in reciprocal Ia inhibition during voluntary contraction in man. *Exp. Brain Res.*, 53: 400-408 1984.
- 110) *Tanji, J.*: Neuronal activity in the primate non-primary cortex is different from that in the primary motor cortex. In: *Motor areas of the cerebral cortex*, Ciba Foundation Symposium 132, John Wiley & Sons, 1987, pp 142-150.
- 111) 多賀恒雄, 笠井達哉: 左右の異なる運動パターンの同時反応時間—上肢と下肢について—. *明治大学教養論集—体育学—*, 210: 89-100, 1988.
- 112) *Taniguchi, R., et al.*: Influence of arm positions on EMG-reaction time of the biceps brachii for elbow flexion and forearm supination. *Percept. Mot. Skills*, 59: 191-194, 1984.
- 113) *Tanii, K.*: Occurrence of a rhythmic slower wave in EMG prior to a rapid voluntary movement. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 57: 435-440, 1984.
- 114) 田中勲作: H反射—ヒトにおける神経生理学研究の一技法. *日本生理誌*, 48: 719-734, 1986.
- 115) 田中勲作: 随意運動制御の脊髓神経機構—筋電図学的解析—. *神経科学レビュー*, 3: 61-91, 1989.
- 116) 田中勲作: 随意運動調節における抑制の役割. *臨床整形外科*, 25: 1049-1055, 1990.
- 117) *Wakabayashi, S., et al.*: Movement patterns as an output variable in reaction time. *Percept. Mot. Skills*, 53: 832-834, 1981.
- 118) *Walter, C.B.*: The influence of agonist premotor silence and the stretch-shortening cycle on contractile rate in active skeletal muscle. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 57: 577-582, 1988.
- 119) *Walter, C.B.*: Voluntary control of agonist premotor silence preceding limb movements of maximal effort. *Percept. Mot. Skills*, 69: 819-826, 1989.
- 120) *Weiss, A.D.*: The locus of reaction time change with set, motivation, and age. *J. Gerontol.*, 20: 60-64, 1965.
- 121) *Welford, A.T.*: Reaction times. Academic Press, 1980.
- 122) *Wise, S.P.*: The nonprimary motor cortex and its role in the cerebral control of movement. In: *Edelman, G., Gall, W.E. & Cowan, W.M. (eds.) Dynamic aspects of neocortical function*. New York: Wiley, 1984, pp 525-555.
- 123) *Wise, S.P.*: What are the specific functions of the different motor areas? In: *Humphrey, D.R. & Freund, H.-J. (eds.) Motor Control: Concepts and Issues*. John Wiley & Sons, 1991, pp 463-485.
- 124) *Wise, S.P.*: Monkey motor cortex: movements, muscles, motoneurons and metrics. *TINS*, 16: 46-49, 1993.
- 125) *Yabe, K.*: Premotor silent period in rapid voluntary movement. *J. Appl. Physiol.*, 41: 470-473, 1976.
- 126) *Yamashita, N. and T. Moritani*: Anticipatory changes of soleus H-reflex amplitude during execution process for heel raise from standing position. *Brain Res.*, 490: 148-151, 1989.
- 127) *Yamashita, N., et al.*: Inter-relationships among anticipatory EMG activity, Hoffmann reflex amplitude and EMG reaction time during voluntary standing movement. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 60: 98-103, 1989.