

2003年11月 発行 第13巻

# 運動学習研究会報告集

第13回

運動学習研究会 編

Annual Report of the Japanese Motor Learning Seminar

Vol. 13 (Nov. 2003)

## 動作分析を利用した運動学習研究

門田浩二 (大阪RS専門学校)

松尾知之, 橋詰謙 (大阪大学健康体育部, 大学院人間科学研究科)

### 1. はじめに

伝統的な運動学習研究では, 達成度 (学習曲線) の相違を生み出す練習方法やスケジュールを検討した報告は数多くあるが, 動きそれ自体の変化を探る研究は意外にも多くない. しかしながら, 近年の光学的測定技術の進歩や計算機の高速度化は, 動作分析システムは急速に高速化・簡便化し, 現在では, 高度な知識がなくとも精緻な動作分析が可能となった. その結果, 運動学領域においても, 運動の成績だけでなく, その結果を引き起こす原因として, 身体セグメントの動作自体の変化も同時に分析した研究が急増している. 分析対象も平面的な単純動作を2次元分析したものから, 日常的な複雑動作を3次元的に分析したものに変化してきている.

動作分析と呼ばれている手法の中には, 高速度ビデオカメラや赤外線反射式カメラ等を用いて, セグメントの動きを直接的に記録するモーションキャプチャー以外にも, フォースプレートや加速時計, ゴニオメーター等を利用して, セグメントの動きを計測する方法がある. また, 筋電図やニューログラムなども同時に利用されることが多い. 本稿では, これらの手法の中から主にモーションキャプチャーによって得られる身体セグメントのキネマティクス及びキネティクス変数が, 運動学習研究の中でどの様に利用されてきたかを検討する.

### 2. 動作分析を利用した運動学習研究の例

#### 2.1 相互相関分析を利用した例

関節運動や筋・骨格系, 神経系は膨大な数の自由度を持っている. コップを掴んだり, ボールを投げるといった日常的な動作を行う場合であっても, 行為者はこれらの要素のほぼ無限の組み合わせの中から, 何らかの方法によって一つの組み合わせを決定している. 従って, 運動の学習とは, 身体の持つ自由度を如何にして組み合わせるか, その方法を習得することと言い換えることができる. また, 動作の熟練はこの組み合わせをより課題に適したものに变化させていることが予想される. 従って, 何らかの方法で関節動作の結合状態を定量化できれば, 学習に伴う動作自体の質的な変化の指標となる. いくつかの先行研究では, 一組の関節の角度変位の相互相

関係数を算出することで, その関節の動作の結合パターンを定量化している. 例えば McDonald et al. (1989) や Temprado et al. (1997) は肩, 肘, 手関節の角度変位曲線の組み合わせごとに相互相関係数を算出し, その符号 (正か負か) によって関節間の結合の種類を判定している. また, Vereijken et al. (1992) は相互相関係数の絶対値を比較することで, 関節同士の結合の強さを評価している. また, Young & Marteniuk (1995) は下肢の関節の筋トルクや筋パワーの発揮パターンにおいても, 同様の分析を行っている.

これらの研究のいずれも, 相互相関計数がキネティクス及びキネマティクス変数の結合の様相を定量化するのに有効であることが示されている. しかしながら, 相互相関分析で同時に評価できるのは2変数のみであること, データの振幅の差は検出できない, といった限界もある. また, 関節同士が位相ずれを持ちつつも結合する場合は十分に考えられるが, これに着目した研究は少ない.

#### 2.2 アトラクターの記述

動作パターンのアトラクターを記述するために, 関節角度やセグメントの位置の相空間プロットが利用されてきた. 動作のアトラクターは, 最終的に動作パターンとして発現するとされている. このとき動作のパターンはタスクの持つアトラクターを記述することになり, その動作の安定性はアトラクターの深さを示す (Clark, 1995). アトラクターの表現方法としては, 最終効果器の位置に対する位置や速度のプロットや, 関節角度に対する関節角度や角速度のプロットがある.

#### 2.3 逆動力学分析によるトルクの分解

身体の動きは, 筋が発揮する張力や重力, 慣性力などの合成力がセグメントに作用した結果として生ずる. これは, 一見, セグメントが良く似たパターンで動作していたとしても, 異なった力要素の組み合わせによって動作が成立している可能性があることを示す. 即ち, セグメントの動きを記述するキネマティクス変数は, 前述の種々の力の組み合わせに対して冗長であり, 逆動力学により導出されるキネティクス変数を分析することは, セグメントの動作がどのような力の作用により生ずるのかを解明するこ

とができる。

四肢の制御に焦点を当てた研究では、キネティクス変数を利用した動作分析が1970年代後半から盛んに行われてきた。この手法が運動学習領域で頻繁に利用されるようになってきたのは、比較的最近になってからである。また、それらの研究の多くは単純な平面的動作を課題としており、身体の自由度の制約が少ない動作を、三次元的に分析したものは未だに少ないのが現状である。

逆動力学分析によって算出できるのは、セグメントの動作を直接説明する総トルクだけでなく、セグメントに作用する慣性力やセグメント間の相互作用によって生ずるトルク（動作依存トルク）や重力の作用によって生ずるトルクが算出される。総トルクから動作依存トルクと重力トルクを差し引いた残差は、関節周辺の筋の発揮張力や、軟組織の変形に起因するトルクと見なされている。

#### 2.4 非筋力要素（動作依存トルク）の利用

逆動力学分析のメリットは、セグメントに作用しているトルクを、筋活動によって発揮されているトルク（ただしこれは推算である）と、それ以外のトルクに分離できることにある。熟練した動作の制御方略を考える際には、筋活動に由来する力以外の力の利用が重要であることが指摘されている。筋の発揮する張力は生理学的な限界によって制限されるが、筋以外の力を有効に利用することができれば、運動の省力化やパフォーマンスを向上が期待できるからである。これはBernstein（1967）の主要な仮説の一つにも上げられている。

一般的なスポーツ動作時の非筋力要素の利用を分析した例としては、歩行、競歩、スプリントなどがあり、いずれの動作も非筋力要素の利用がパフォーマンス向上に貢献していることを示している。これらの研究の他にも、高度に熟練した動作は動作効率が高いことや、動作効率が熟練に伴い改善した例が数多く報告されていることから、行為者は動作の熟練に伴って非筋力要素をより有効に利用するようになることが予想される。しかしながら、運動の熟練に伴う非筋力要素の利用状況の変化を明らかにしている研究は数少ない。例えば、素早い切り返し動作を含んだリーチングを学習課題とした、Schneider et al.（1989）のもの、動作を水平面上に制限したHeise & Cornwell（1997）のもの、下肢によるリーチングを分析したYoung & Marteniuk（1995, 1997, 1998）等がある。これらの研究は平面的な単純動作を2次元分析したものであり、スポーツ活動などで見られるような、ダイナミックな3次元動作を分析したものは殆ど見あらず、このような動作における非

筋力要素の利用方法と熟練過程に着目した、より詳細な研究が必要であると考えられる（例えばKadota et al.）。

#### 2.5 機械的パワーの算出と非筋力要素の利用

セグメントの速度、角速度や関節間力、関節トルクなどから、セグメントごとの機械的な仕事率（パワー）が推算できる。特に、関節間力に起因するパワー（関節力パワー）は、直接的には筋活動を必要としていないことから、動作時のこのパワーの占める割合の増大は、非筋力要素による貢献度の増大と見なすことができる。これまでに行われてきた歩行や走行の動作分析の結果は、関節力パワー利用の重要性を示しているが、動作の熟練に伴う関節力パワーの貢献に関する報告は数少ない。機械的パワーを算出する場合の問題点として、2関節筋によるエネルギー伝達や、筋の収縮様式の変化など、単純な剛体リンクによるモデリングの範疇を越えた因子の影響が大きいことが指摘されている、この問題を解決するには、より詳細なモデルを採用する必要がある。

#### 2.6 動作の効率、経済性、熟練

熟練した動作が高い動作効率や経済性を持つことは、経験的にも古くから良く知られた現象である。この事実は熟練者の動作分析や生理学的指標（酸素消費量など）を用いた研究でも確認されている。最近では、動作分析から算出される機械の仕事量を生理学的エネルギー消費量と組み合わせて、熟練過程における動作効率の変化を分析した報告もあり、動作の熟練が動作コストを減少させる方向に進行することは間違いないようである。

### 3. まとめ

運動学習研究における強力なツールとして、動作分析を利用した研究が増加しているのは前述の通りである。現在では、関節角度変位などのキネマティクス変数を利用して動作を描写することから、剛体セグメントリンクモデルを仮定した逆動力学分析、即ちキネティクス変数を利用する研究が増加してきている。今後は、さらに精緻化した筋骨格モデルの利用や、神経活動記録装置、刺激装置と動作分析装置を同時制御することによって、知覚情報と動作の関連性を明らかにする方向に研究が進んでいくことは確かだろう。しかしながら、動作分析の最も単純かつ基本的な行為である「からだの動き」を、じっくりと「見る」ことはますます重要性を帯びてくるように思えてならない。分析が詳細になりマイクロなレベルの変数が増加すればするほど、研究者にはより敏感に動作の違いを見抜く眼が要求されるのだら

う。何より、これまでに動作分析を利用した研究が扱ってきた問題の多くが、その道の熟練者や指導者が見抜いてきた感覚を、後追的に検証しているに過ぎないことを忘れてはならないだろう。

## 関矢先生(広島大学総合科学部)からのコメント

運動学習研究における動作分析のやり方を分かり易くまとめて発表していただき、とても参考になりました。また、私たちが現在取り組んでいる「心理的ストレスが運動スキルに及ぼす影響」の研究において、どのような動作分析を行ったらよいのかについて考えながら聴くことができました。今回は、この場を借りて、以前から疑問に思っていた2つの点についてご意見をお聞きしたいと思います。

1. まず、門田さんの原稿の「アトラクターの記述」にもありますが、最終効果器の位置に対する位置や速度のプロットや、関節角度に対する関節角度や角速度のプロットがコーディネーションのパターンを表現する方法として用いられています。それらは図示すると分かり易いため、論文などでは典型的な例として載せられることが多いです。そして、学習や心理的ストレスなどの影響でコーディネーションのパターンは変化すると思いますが、その量的、質的な変化をそれぞれ数量化する方法として確立されたものはあるのでしょうか？特に、サイズの変化だけではなく、パターンが変形するような場合、どこに形が変わった(質的な変化が起こった)という基準を設けることができるのでしょうか？また、その質的な変化を数量化する方法はないのでしょうか？刺激パターンの知覚に関する認知科学やロボット工学の分野では確立された方法がありそうな気もしますが、もし分かれば教えてください(これは私が以前いたルイジアナ州立大学の Motor Behavior Lab で、バイオメカニクスの研究者を公募した時に質問として出され、未だ決定的な解決策はないと聞いている問題です。)

2. もう1つお聞きしたいのは、「人間は何を制御しているのか？」という問題です。人間の動きは Timing (時間の制御)、Spacing (四肢の空間位置の制御)、Grading (力量の制御)の3つのうち2つを記述(測定)できれば、残りの1つは自動的に決まってしまうのですが、人間は何を制御しているのかは別問題だと思います。3つとも制御しているのか、それとも2つだけを制御していて、残りの1つはその結果として現れる現象なのか分かりません。また、条件や課題や熟練度によって制御対象が変わることも考えられるかもしれません。これはキネマティク

スとキネティクスのどちらを分析に用いたらよいのかという問題とも直結します。付随現象として現れることよりも制御の対象となっていることを分析した方が、運動制御のメカニズムに迫ることができるような気がします。また、逆にキネマティクスとキネティクスの分析をどのように利用したら、その時に人間が制御しているものが見えてくるであろうというアイデアでも構いませんので、ご意見をお聞かせください。

## 関矢先生のコメントへのリプライ

### プロットパターンの質的評価法について

昨年の研究会で、山本先生が幾つかの指標を検討されていたように、プロットの幾何学的な形状を評価する方法は数多く存在します。これらを利用することで、形状の変化は十分に定量化できます。実際の問題は、プロットの変化がコーディネーションにとってどのような意味を持つのか、だと思います(山本先生の発表も「動作の滑らかさ」の指標を探ることが目的でした)。動作分析から得られる変数を利用すると、相空間プロットは簡単に描くことができます。実際にプロットしてみると、時系列データと比較して、形状の変化が直感的に捉え易くなるのも事実だと思います。この変化の持つ意味が問題なのですが、プロットの持つ意味が明確でないと、コーディネーションについての議論は困難です(これは時系列プロットでも同様なのですが)。プロット形状そのものの意味は、プロットに利用する変数に依存するため、プロットの形状の変化からのみでは、コーディネーションの質的变化は、直接的には分かりません。むしろ、プロットを作成する段階で、どの変数を利用するかが研究者の腕の見せ所だと思います。表現方法と定量化は別問題ですので、プロット形状によって何らかの「状態」の変化が明らかになるなら、それはそれで重要な情報と成りうるのではないかと考えています。

ご質問の回答としては、なんとも歯切れが悪くて心苦しいのですが...

### 身体運動の制御対象について

人間が身体運動を行うために制御しているもの、即ち制御対象は、神経系の最終効果器である筋の発揮張力であることは言うまでもありません。ですから、「何を制御しているのか？」という質問の回答は、その動きを実行するのに利用される筋張力である、ということになります。筋発揮する張力が変化するため、セグメントの加速度が変化し、移動が生じます。これはモーションキャプチャーやEMG、力量計などによって算出されるキネティクス変数から明

らかにできます。また、その結果はモデリングを利用したシミュレーションにより、動作を再構築することで検証することも可能です。

では、その筋張力の発揮パターン（力量）をどうやって決めているのか？即ち、「どうやって制御しているのか？」という問題には、動作分析が明快な答えが出せるのでしょうか？これは難しい問題です。先生のご指摘の通り、身体の動きはある行為を行った結果ですから、制御方法の変化を分析するには、キネマティクスやキネティクスの変化から、演繹的に推測することになります。

私の知る限りでは、実際の知覚や運動を制御するメカニズムは、未だ十分に説明されていません。どの方法であっても、中枢神経系の情報処理方法は、多かれ少なかれ推測に頼らざるを得ないのが現状でしょう。だとすれば、動作そのものを良く見て詳細に分析することが、意外に近道ではないかと思うのです。発現した動作の中には、知覚から動作発現まで混ざり合った情報が入り込んでいるからです。動物実験も含めた生理学実験の結果などを考慮に入れて、慎重に解釈を行えば、動作分析の持っている情報からだけでも多くのことが判ると思います。

私の発表の中で、キネティクスはキネマティクスに対して冗長であることを繰り返したので、キネティクス変数による分析が原因究明となる、より良い方法であると印象づけてしまったかもしれませんが、私の考えはそうではないのです。どんな場合でも、パフォーマンスを実現している身体運動を直接的に描写できるのは、キネマティクス変数です。キネマティクスの変化を十分に理解した上で、キネティクス分析に移るのが一般的であり、健全な方法だと思います。またキネマティクス分析だけでも、制御のメカニズムに迫ることは十分に可能です。例えば、高次の神経系がセグメントの動きや位置を空間座標系で処理していることが判っている（例えば、Kakei et al. 1999）、リーチングやトラッキングの分析にキネマティクス変数を用いることで、神経系の処理過程を推測できると考えています。

## 門田先生（東京大学大学院総合文化研究科）のコメント

多くの場合、初心者は不必要な力が入った状態で、しかも部分的にしか体を使えていない。逆に熟練者は不必要な力が抜けた状態で体全体を使って運動をしているように感じます。このような初心者から熟練者へと至る過程の変化をキネマティクスやキネティクスといった動作分析により数値的にあらわすことができ、関節力パワーの利用による効率化といった

観点で考えられということは分かりました。

多くの動作は解剖学的な構造的側面、キネティクスのようなパワーの側面の両面から非常に合理的な動きをしており、さらに対戦競技では対戦相手の解剖学的な構造や力学、道具を使用する競技ではその道具の持つ力学的特性も含めて非常に合理的な動作を行っているかと推測されます。そのような合理的な動きというものが時として見ている人に美しいといった印象を与え、人々に感動を与えるのでしょうか。動作分析の研究により、その技や技術といったものの合理性が明らかになっていくと思われまふ。そして体をどのように動かすことが物理的により優れた動作であるかということが明らかになっていくでしょう。実際に体を動かす場面において、どのように体を動かすことが合理的であるのかということを示すことは非常に重要であり、そういった研究の積み重ねによって、現在の動作分析がその道の熟練者や指導者が見抜いてきた感覚を後追的に検証している状態から抜け出し、一部の人間が獲得している感覚を数値的、視覚的にあらわし、誰もが理解できる形にすることによって応用することが可能になるかもしれないと思います。さらにはより合理的な動きの開発、新たな技の開発といったことにもつながる可能性があるのではないのでしょうか。

ある特定の目的を満たす動作であれば出来るだけエネルギー効率が良かったり、楽な方の動作を行うということが起こり、それが非筋力要素の利用といった形であらわれたりします。しかし人によっては非筋力要素を上手く使えなかったり、使えたりします。そのような違いはどうして起こるのでしょうか。いわゆる上手く体を使えない人というのは合理的な動きが出来ていない人のことですが、ある程度は動作コストを減少する方向に進むにしろ、完璧に合理的な動きを獲得できるわけでは無さそうです。

そもそも、運動を生み出すメカニズムはどうなっているのか？これは多くの人を知りたいところであり、まだ明らかになっていない所です。動作分析をすれば外から見える物理的变化がいかなるものなのかを記述することは出来るのですが、脳が何をどのようにコードして運動を生み出しているのかというメカニズムの解明には他のアプローチも必要となってくると思います。神経系から筋骨格系へと指令が渡り、そこからパフォーマンスが生み出される過程において、情報の変化や減少が起きています。そのような情報の変化や減少を経た結果あらわれる動作を分析するだけでは動作を生み出している機構を完全に明らかにしていくことはできないので、運動を生み出しているメカニズムの理解には脳神経系の活動の記録や現象から導き出される仮説（理論、モデル）

などが必要になってくるのではないのでしょうか。実験的事実と仮説の積み重ねによって運動を生み出すメカニズムというものが明らかになってくるでしょう。現段階では様々な仮説とその検証が行なわれている状況にあり、因果関係があるということと相関関係があるということが混在している状況であります。運動研究の全体の流れとしては、実験によりどのような運動が作り出されるか、その動作にはどのような要素が関係しているかといった知見の蓄積から、その背景にあるメカニズムとして様々な理論や仮説が生まれ、さらにそういった理論や仮説を検証したり、応用するという流れで運動の理解というものが進むのではないかと思います。

さらに(運動)学習は目的や意図の変化や外部状態の変化など、変化に対して適応していく過程そのものであると考えています。つまり動作以外の変化というものを考慮に入れないと運動学習というものを考えていくことが出来ないのではないのでしょうか。時々刻々と変化し続ける環境に適応していくヒトの運動学習能力を明らかにするためには、知覚と運動の結びつきなどを包括的に理解していかなければならないのではないのでしょうか。

昔、こころなど計測不可能、実証不可能なものほどまで研究しても想像の域を出ないという考えから、内的過程を排除し、実際に目に見える行動を研究対象にしようということで刺激と反応(S-R)という客観的に観察、測定できるものを研究の対象とした行動主義というものが生まれ、さらにそこから発展して、認知的な内的心理過程をも考慮に入れて、刺激 生体 行動(S-O-R)という流れで考えようという新行動主義といわれる研究の流れがあったという話を聞いたことがあります。動作分析も外界に現れる動きを研究対象にしている点が行動主義の姿勢と似ていると思います。動作分析の研究の流れも行動主義と似たような発展、変遷をたどる(たどっている)のではないのでしょうか。さらに中田力先生によると人間は思考のように外部からの刺激を受けない状態で、自発的な脳活動を行なう内因性の賦括を持っており、もっとも顕著な活動として運動機能(随意運動)があるとしています。将来的には外界との関係によって生み出される運動、自発的に生み出される運動、さらには創造的な運動といった感じで、より拘束条件の少ない、自由で創造的な運動に対する理解が進めば面白いと思います。

## 門田先生のコメントへのリプライ

### 動作の熟練と機械的効率

日常生活中で使用頻度の高い動作の多くが、高い機械的効率を示すことは多くの実験で明らかになっています(例えばNelson, 1983)。熟練に伴って身体の制御方法が、より機械的効率を高めるように変化することは事実だと考えて良さそうです。また、その動作が「機械的に」最高の効率を示さない場合は、その他の要因を最適化している可能性があることも指摘されています(Sparrow, 2000)。複合システムである身体にとって、どの程度まで機械的効率を最適にする必要があるのかは、面白い問題だと思っています。種々の運動において、機械的効率が常に最優先で効率化されているとは限りませんよね。日常的な様々な場面で、運動の機械的効率を犠牲にしても、実現する必要のある何かがあるかもしれません。

### 主観的印象と動作分析から得られる定量的変数の関係

動きの効率の良さが、それを観ている人に主観的な「美しさ」や「滑らかさ」といった印象を与えている可能性は、ご指摘の通りだと思います。熟練した指導者の持つ感覚、または熟練者が持つ感覚を、動作分析によって得られる変数によって定量化することにより、その感覚の一般化が可能になるかもしれません。しかしながら、現場での応用を考えた場合には、難しい問題が残ります。動作分析より定量化された数値と行為者の感覚と一致させるには、その数値化された感覚を、再び行為者自身の感覚に一致させて戻す必要が生じます。これにはかなり特殊な能力が要求されると考えられます。もちろん興味深い問題であることは確かだと思います。

### 非筋力要素の利用

ご存じの通り、逆動力学分析を利用すると、総トルクを要因別に分割することができます。しかしながら、これは分析上の手順であり、実際にはこれら種々のトルクが独立して作用したり、制御されたりすることは起こり得ません。以下の議論はあくまで私の予測ですので、あまり外には持ち出さないいただきたいのですが、行為者は実際に動いてみないと動作依存トルクの影響を知ることができませんし、どの程度動作依存トルクを利用することが、その動作に有効かどうかも知り得ません。従って、経験の少ない動作を行う場合には、予測のできない動作依存トルクの影響を、フィードバック的に修正しながら、探索的に動作を行うことになります。上手く動作依存トルクを利用できるかどうかは、この探索能力によるのではないのでしょうか?もしくは、身体の動作によって生ずる力やトルクの情報を処理する能

力に差があることも考えられます。また、体性感覚の受容器の感度の個人差が影響することも考えられます。可能性は沢山ありますので、それぞれを検証していく必要があるのでしょうか。

#### 動作分析の利用法

以下の話は学術的なものではなくて、私の個人的な研究のスタンスとして読んで下さい。動作分析だけでは、運動を生み出すメカニズムの全ては明らかにならないことは、おっしゃる通りだと思います。動作生成のメカニズムに迫るには、神経活動の分析から得られる知見に基づいて実際の動作を解釈し、検証していくことは重要でしょう。必要に応じて神経活動を同時に記録する必要が生ずる場合もあるでしょう。言うまでもなく、このような目的でデザインされている実験は、現在でも数多く報告されていますよね。実際に生成された動作から、神経系も含んだ身体システムが、どのような運動を実現しようとしているかが推測している訳です (Winter & Eng, 1995)。このような方法は、演繹的にならざるを得ないとしても、運動生成のメカニズムに迫るには有用だと思います。これに対して、中枢を含めた神経活動の記録は何を示すのでしょうか？その動作を実行するための「何か(原因)」を、直接的に示すのでしょうか？神経系のイメージング技術の急速な発達によって、今までは見ることでできなかった神経活動の記録が可能になったことで、これまでに残された数多くの疑問が解決されるでしょう。でも、認知や意図といった、いわゆる「内的心理過程」のようなものと神経活動の対応が十分に明らかにならない限りは、刺激と行動の間に「生体の何か」を仮定したところで、その内容は推測に頼らざるを得ない訳です。むしろ、高次機能の分析が進めば進むほど、その現象を解釈するには神経系を含んだ身体システムが実現しようとしている運動そのものの情報が必要になるかもしれません。そういったことから考えると、脳神経科学を直接記録し分析することと、表出する運動からシステムを推測することには、運動システムとしての身体を研究するには、現時点では大きな隔りがあるものではないと考えています。神経系を含んだモデルと実際に生み出される動作を検証していくことの繰り返しですが、まさに私たちが実験をして論文を

書く作業の根幹となる作業だと思っています。運動システムとしての身体を洗い出す作業にとって、動作分析はまだまだ有用なツールと成りうると思っています。

随意的に生じている運動の、どの程度までが内因的に生成されているかどうかを定量化することは、現時点では難しいのですが、何らかの方法で内因的な運動とそうでない物(外因性)を分離することができて、その上で、外部環境との相互作用だけではなくて、内部要素の影響によっても新たな運動が創発されることを証明できれば、それは興味深いテーマになるでしょうね。

#### 参考文献

- Bernstein (1967) *The coordination and regulation of movements*, Pergamon Press
- Clark (1995) *Research Quarterly for Exercise and Sports* 66: 173-183
- Heise & Cornwell (1997) *Research Quarterly for Exercise and Sports* 68: 116-124
- Kadota et al. (submitted)
- Takei et al. (1999) *Science* 285: 2136-2139
- McDonald et al. (1989) *Journal of Motor Behavior* 21: 245-264
- Nelson (1983) *Biological Cybernetics* 46: 135-147
- Schneider et al. (1989) *Journal of Biomechanics* 22: 805-817
- Sparrow (2000) *Energetics of Human Activity, Human Kinetics*
- Temprado et al. (1997) *Human Movement Science* 16: 653-676
- Vereijken et al. (1992) *Journal of Motor Behavior* 24: 133-142
- Winter & Eng (1995) *Behavioural Brain Research* 67: 111-120
- Young & Marteniuk (1995) *Journal of Biomechanics* 28: 701-713
- Young & Marteniuk (1997) *Human Movement Science* 16: 677-701
- Young & Marteniuk (1998) *Journal of Biomechanics* 31: 809-816

## 【実験計画】視覚刺激呈示のタイミング (Foreperiod) が選択反応時間に与える影響についての検討

國部雅大 (京都大学大学院 人間・環境学研究科)

### 1. はじめに

視覚情報に対する認知・判断・反応が早いことは多くのスポーツパフォーマンスにおいて有利であることが多いと考えられており (Kioumourtzoglou et al., 1998), スポーツ選手の反応の早さを反応時間として検討する研究は数多く行われている。今回注目するのは, 反応時間測定における刺激呈示のタイミングに関する問題である。

実際のスポーツの場面における反応では, 相手プレイヤーまたはボールの動き出しのタイミング (「いつ」相手あるいはボールの動き出しが起こるか) を視覚情報によって予め特定できる場面と特定できない (または特定困難な) 場面がある。

例えば, バレーボールにおける反応を考えると, レシーバーの立場で相手のスパイクの瞬間に対して反応する場合, あるいはブロッカーの立場で相手セッターのトスアップの瞬間に対して左右に移動反応をする場合に, 相手プレイヤーがボールに触れるタイミングを視覚情報によって予め特定できる場面が多い。一方, 剣道における反応を考えると, 相手の動き出しのタイミングが予め特定できない状況下で反応することが多いと考えられる。このように, タイミングが特定できる状況で反応を行う場面の多い競技と, 特定できない (または特定困難な) 状況で反応する場面の多い競技が存在すると考えられる。

実験室的な反応時間課題における設定に関して, 予告刺激の呈示から反応刺激の呈示までの時間 (Foreperiod) が反応時間に与える影響についての研究は行われている (Los & van den Heuvel, 2001) が, それらの要素が各スポーツ選手の選択反応時間に与える影響について比較検討したものは見られない。

そこで, 「動き出しのタイミングが特定できる状況下で素早い反応が要求されることの多い競技選手は, 刺激呈示タイミングが一定である条件での選択反応に優れ, タイミングが特定できない状況下で素早い反応が要求されることの多い競技選手は, 刺激呈示タイミングがランダムである条件での選択反応に優れている」という仮説を立て, その検証を行う。

### 2. 目的

各競技選手および非競技選手を対象に, Foreperiod が試行間で一定である条件と試行間でランダムである条件の2種類を用い, 視覚刺激の呈示タイミングが各競技選手の選択反応時間に与える影響を調べることを目的とする。

### 3. 方法

#### 3.1 被験者グループの設定

- 大学バレーボール選手 (バレー群) 10 名
- 剣道選手 (剣道群) 10 名
- 対照群 10 名

#### 3.2 実験課題

被験者は, 頭部を顎台で固定した状態でコンピュータディスプレイに正対し, 前方の台に固定された2つの圧力センサ上に左右の示指をそれぞれ置いた状態で準備する。被験者は, 常に画面の中央に現れている注視点を注視した状態で準備する (図1)。まず, 注視点上に予告刺激 (WS) が呈示された後, 時間間隔 (Foreperiod) をおいて, 反応刺激 (RS) が注視点の左右  $5^\circ$  のいずれかの位置に呈示される。要求される反応動作は, RS が注視点の左側に呈示されたら左指を, また注視点の右側に呈示されたら右指を圧力センサから離す動作とする。被験者は RS の呈示に対して「できるだけ早く正確に」という教示の下で選択反応を行う。1 ブロックは 16 試行とする。

#### 3.3 視覚刺激の呈示条件

視覚刺激の呈示条件としては「一定条件」と「ランダム条件」を用いる (図2)。一定条件は, 1 ブロックの試行間で Foreperiod がいずれも同じである条件である。一方ランダム条件は, Foreperiod が試行間でランダムに変わる条件である (つまり, 一定条件では反応刺激が呈示されるタイミングを予め特定できる状態で, ランダム条件では刺激呈示のタイミングを予め特定できない状態で選択反応を行う。) Foreperiod は, 250ms, 500ms, 750ms, 1000ms, 1250ms の5種類に設定する。一定条件, ランダム条件共に計 10 ブロックの試行を行う。

### 3.4 分析

被験者ごとに、両条件（一定、ランダム）における反応時間の平均値を求め、各条件での被験者グループ間における反応時間を比較分析する。また、各 Foreperiod における反応時間の平均値を求めることで、Foreperiod の長さとの関係についても検討する。



図 1: 反応時の体勢

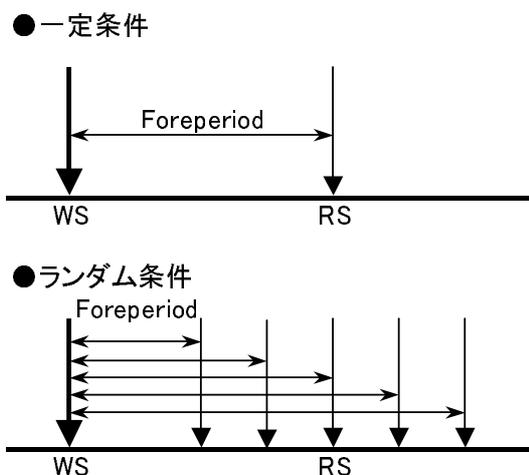


図 2: 刺激呈示条件

## 4. 予想される結果

いずれの被験者グループにも共通する傾向として、一定条件での選択反応時間はランダム条件と比較して刺激呈示のタイミングが特定可能であるため (Los & van den Heuvel, 2001), 短い値を示すことが予想される。また、Foreperiod 一定条件ではバレー群が、ランダム条件では剣道群が、それぞれ他の2群に比べて短い反応時間の値を示す可能性が予想される。本実験課題において両条件における反応時間に被験者グループ間でこのような特徴的な差異が見ら

れたとすると、刺激呈示のタイミングの違いが、各競技特有の視覚情報や反応動作を用いていない単純な選択反応課題においても被験者グループごとに異なる影響を及ぼした可能性が考えられ、各競技に必要とされる運動準備や反応における特性が示唆されると考えられる。

## 参考文献

Kioumourtoglou, E., Kourtessis, T., Michalopoulou, M., & Derri, V. (1998). Differences in several perceptual abilities between experts and novices in basketball, volleyball and water-polo. *Perceptual and Motor Skills*, 86, 899-912.

Los, S. A., & van den Heuvel, C. E. (2001). Intentional and unintentional contributions to non-specific preparation during reaction time foreperiods. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 370-386.

## 平川武仁さんからのコメント

國部さんの実験は、刺激提示タイミングとスポーツ種目による被験者特性を明らかにできそうな研究ですね。これらのことを明らかにすることも大変なことと思いますが、さらに各母集団の反応時間特性にそぐわない選手、例えばバレーボール選手はこれぐらいの反応時間があるほうが望ましい（反応時間の遅い選手）など、それらの選手を対象とした学習実験まで発展できると面白いと思いました。

視覚刺激には素人なため、文章を読んで疑問に思ったことが何点かあるので、教えてください。

### 試行数について

試行数は1ブロック16試行で計10ブロックとありますが、反応する刺激が5種類の場合では計160試行であるため、非常に少ないように思います。全刺激系列のパターンだけでも120種類になり、系列効果を無くすためにもカウンターバランスをすとなると、もっと多くの試行数が必要にならないのでしょうか。

### 予測について

「できるだけ早く正確に」という教示を与えるようですが、被験者によっては準備状態から長く待たされたと感じた場合（例えば、1250msなど）、予測が反応時間の誤差に混入する可能性があるように思いますが、この点に関する処理方法はあるのでしょうか。

### 提示条件について

一定条件での Foreperiod が何 ms に設定されるか記述してありませんが、どのぐらいの長さに設定するのでしょうか。というのも、もし、ランダム条件における 5 種類の Foreperiod を提示するのでしたら、この 5 種類の Foreperiod の特性について、それぞれ一定条件として検証しておくことも必要のように思いました。また、ランダム条件ならば、系列があることを予想しました。一定条件は系列条件とは考え難く、従って必要かどうかについても疑問に思いました。

### 分析方法について

二元配置の分散分析、もしくは比較群が 2 群 (剣道選手とバレーボール選手など) でしたら判別分析を用いて Foreperiod の時間によるタイプ分けの線引きができるように思いますが、序と目的を読んでいると、スポーツ選手の刺激提示のタイミングによる反応時間を知りたいのか、それとも種目別の特性を知りたいのか、ちょっと悩んでしまいました。スポーツ選手の刺激提示タイミングでしたらバレーボール選手と剣道選手の群分けはあまり必要でないように思いますし、選手の特性でしたら非競技選手はあまり必要でないようにも思いました。

## 平川さんコメントへのリプライ

### 試行数について

ご指摘のとおり、試行数はもっと多くする必要があると思います。呈示する Foreperiod の系列効果を完全になくすようにできればと思うのですが、試行数が膨大になってしまうので、ある Foreperiod の試行に対する一つ前の試行において、5 種類の Foreperiod が等しい確率で呈示されるように設定することで、呈示確率の偏りによる影響を少しでも減らそうと思えます。

### 予測について

一般的に、反応刺激呈示の正確な予測を生み出すための要素は反応時間を短縮させるということが、先行研究で報告されています。ランダム条件で数種類の Foreperiod を一様な確率分布で設定した場合には、WS からの時間が経過するにつれて、その時刻からある一定時間後に RS が呈示される確率が高くなっていくため、被験者は Foreperiod が長い刺激に対して早く反応できることとなります (例えば Niemi & Näätänen, 1981)。今回の実験設定においても、これと同様のことが考えられます。こういったランダム条件において、予測が反応時間に与える

影響を省く方法の一つとして、ハザード関数の考え方をを用いることが挙げられています (Luce, 1986)。WS の呈示を 0 (基準) とし、ある時刻  $t (>0)$  まで進んだとして、そこから時刻  $t+$  までの間に RS が呈示される確率 (ハザード関数) が一定となるように、Foreperiod の確率分布を指数分布にすることで、予測が反応時間に与える影響を除去できると考えられています。しかし、今回は一定条件での反応時間との比較を行うという実験設定上、この考え方は用いず、長い Foreperiod での刺激に対する反応時間の短縮をある程度予想した上でグループ間比較を行おうと思っています。

### 提示条件について

図中や文中には記してありませんでしたが、一定条件の Foreperiod としてはランダム条件で用いたものと同じ 5 種類を用いる予定です。ご指摘の通り、一定条件はランダム条件と違って、系列条件ではありません。このような一定条件においては、Foreperiod が長いほど、正確に呈示時刻を予測することが難しくなることが先行研究によって調べられており、5 つの Foreperiod における反応時間の値はそれぞれ異なると予想されます。したがって一定条件は 5 種類の Foreperiod を設定しようと考えています。

### 分析方法について

今回の実験では、主に競技種目群別の特性のほうを調べたいと考えています。したがって、非競技選手のデータについては参考として取るつもりです。非競技選手群を設定したのは、早くて正確な反応が要求される競技経験を積むことがどの程度反応時間の短縮に寄与しているかを、対照群の設定を通して横断的に検討したかったためです。

## 古田久さんからのコメント

同じバレーボールを研究の題材にしている者として興味深く発表を聞かせて頂きました。研究計画としての発表でしたので、それに対する質問と「こうしたら面白いかな～」というような個人的な意見をコメントとして 4 点ほど述べさせて頂きます。

### 「早さ」か? 「速さ」か?

文章全体に認められる反応の「早さ」という記述は「速さ」の方が一般的だと思うのですが、(こまかい点ですが...) どのようなのでしょうか?

### 反応の正確性の検討を

多くのスポーツや武道で求められるのは「速く」

かつ「正確な」反応であるので、単に反応の速さだけを問題にするのではなく、反応の正確性も合わせて検討する必要があるのではないのでしょうか。また、そうすることによって、速さと正確性のトレードオフの観点からの分析も可能となり、バレーボール選手と剣道選手の反応の仕方の違いがより明らかになると思います。

#### 競技場面における WS と RS

Foreperiod はバレーボールでは一定であるのに対して剣道ではランダムである、という前提が研究計画から窺えるのですが本当にそうでしょうか？Foreperiod は予告刺激 (WS) と反応刺激 (RS) があって初めて成立する概念であるので、まずバレーボールと剣道における WS と RS とは何なのかを明確にする必要があると思います。それを踏まえて、先述の前提を検討し、さらに実際に行う実験とうまく対応付ける必要があると思います。

#### 対照群を設けることの意味

実験デザインにおいて対照群を設けることの意味についての説明がなかったので教えてください。

#### 古田さんコメントへのリプライ

「早さ」か？「速さ」か？

早さは時間、速さは速度の概念であると考えています。今回検討したいと考えているのは、視覚刺激が呈示されてから実際の反応動作が開始されるまでの時間（潜時）であり、筋の短縮速度や動作の速度（Velocity）および動作時間（Movement Time）などといった要素については今回は見ていません。課題が例えばある地点への到達運動であれば、反応時間に加えて動作時間や速度を見ることができますが、今回は単純なキー離し反応を用いています。したがって、今回は反応の「速さ」ではなく、「早さ」という記述をしています。

#### 反応の正確性の検討について

課題がキー離し反応であるので、正確性を検討する指標としては、エラー率を用いようと考えていま

す。エラー試行としては、要求された指とは異なる指で（あるいは両指で）反応してしまった試行と、尚早反応あるいは遅延反応の起こった試行と定義します。このことより、Speed-Accuracy Trade-off についても検討しようと思います。

#### 競技場面における WS と RS について

今回の実験での WS の呈示は、実際の競技場面においては、プレイヤーが運動準備を開始する地点と捉えています。また RS は「反応の選択が要求される、相手の動作開始地点」と捉えています。

バレーボールでは、運動準備中に、相手スパイカーがボールを打つタイミングを視覚情報によって事前に把握し、打たれた瞬間のボールに対して左右あるいはフェイントといった選択反応をしています。一方、剣道では、運動準備中に、相手がどのタイミングで動作を開始するかについての視覚情報が与えられない状態で準備しています。このように、運動準備時の「待ち方」が競技によって異なり、その特性が一定条件・ランダム条件における反応時間に現れるのではないかと、いう仮説です。実際の競技場面の動作とは異なる今回のような単純な反応課題においても競技種目間で差が見られるとしたら面白いと考えています。

ご指摘のとおり、実際に行う実験のプロトコルについてはさらに検討する必要があると思います。

#### 対照群を設けることの意味について

今回の実験の主たる目的は、各競技種目における反応特性について、反応時間を指標に検討するというものでした。それに加えて、早く正確な反応が要求される競技経験を積むこと自体が反応時間を短縮させているのかということについての検討を行いたいと思い、対照群を設けました。

最後になりましたが、研究計画という段階の発表にも関わらず、様々なアドバイスを頂いたことに感謝いたします。今後の参考にしたいと思います。ありがとうございます。

## 事象関連電位による非反応処理過程の検討 荒木雅信（大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科）

刺激を受容しても反応しないあるいは出来なかった場合、どのような情報処理を行なっているのだろうか。運動のような連続する刺激系列に対しては、反応 - 非反応処理を繰り返す必要がある。このような処理過程のメカニズムについては、これまで十分な検討がなされて来なかった。この点を明らかにするために、本研究では、伝統的な二重課題パラダイムを用い、連続する2つの刺激に対する反応 - 非反応処理過程の検討を試みた。ここでは、呈示された刺激を受容しても反応をしないという非反応条件であっても、受容した刺激に対して反応を行う反応条件と同様の処理を脳内で実行している。換言すれば、実運動を伴わずイメージによって、刺激処理を行っていると仮定し、事象関連電位を指標として、ワーキングメモリからの検討を試みた。

### ワーキングメモリからの検討の試み

通常、連続する刺激に反応する場合、各々の刺激に対して情報の処理と保持がなされる。連続する刺激に対する反応 - 非反応処理過程にはワーキングメモリ（作業記憶・作動記憶）の機能が付加されていると仮定した場合、記憶様式との関係が最初に問題となる。短期記憶について、長期記憶との構造的区分への疑問、处理的観点の欠如、言語理解や推論などの日常的認知活動における役割の不明確さという、概念の欠点（Atkinson & Shiffrin, 1968）を補うために、ワーキングメモリという概念が出された（Baddeley & Hitch, 1974；Baddeley, 1986, 1992）。短期記憶は、主に言語的情報の音声的符号による一時的貯蔵庫という、受動的な捉え方をする。一方、ワーキングメモリは情報の保持機能と同時に、それに対する積極的処理機能を強調し、

- 言語的・音声の情報、
- 視覚イメージを含む視覚的符号、
- 意味的・概念的符号

という機能を付加した。ワーキングメモリとは、「目的志向的な課題や作業の遂行に関わるアクティブな記憶」と定義され、容量制限的な環境ではたらし、そこには情報が時間的制約のなかで統合されるはたらしが含まれる。また、そのなかでも保持を重視する立場と保持と処理の両者を重視する立場に分かれ

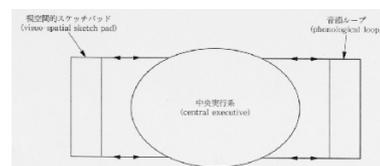


図 1: Baddeley(1986) によるワーキングメモリのモデル。A. Baddeley: Working memory, Science, vol, 255 (1992), p.557 Fig.1 を改変。

ている。保持を重視する立場は、一時的に提示された情報の表象を課題処理のために必要とされる一定時間だけアクティブに保持する。保持の必要がなければ消去されるとするものであり、保持と処理の両者を重視する立場は、アクティブに保持した情報を柔軟に処理すること、あるいは両者のダイナミックな相互作用にWMのはたらしがあるとする立場である。ただし、処理と保持の切り分けは難しいが、両者を自転車の両輪のはたらしにたとえると、目的達成に向かって、バランスをとりながらアクティブに回転する。保持と処理のワークスペースを共有し、目的を達成すると保持は消去される。保持と処理のはたらしによって、判断や推論などの高次処理が行われる。

ワーキングメモリのモデル（Baddeley 1986, 1992，図1）は、中央実行系と2つの下部従属機構（音韻ループ・視空間スケッチパッド）を想定し、音韻ループは、会話や文章の理解など言語的な情報処理に関わる。内的な言語の反復により情報を保持する。視空間スケッチパッドは、視覚イメージなど言語化できない情報の処理に関わる。言語化できない情報は、視覚イメージとして保持する。中央実行系は、二つのシステムの働きを調整し、協調的に機能させる。意識的処理において、どのような情報が利用されるかを決定する。

次に、中央実行系の基本的な制御機能と長期・短期記憶との関わりについてみていく。中央実行系の制御機能は、

- WM 内の活動の調整
- 認知処理における情報のやり取り
- 音韻ループと視空間スケッチパッドへの入力への制御

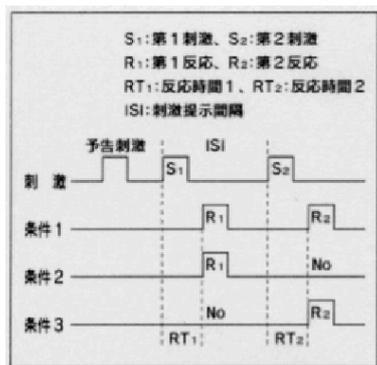


図 2: 実験パラダイム

### ● 長期記憶の情報の検

を挙げることができる。このような機能と、短期記憶との関わりをみると、短期記憶は、リハーサルによって長期記憶へ転送されるが、WMは、消去される利点を強調している。一方、長期記憶との関わり十分な議論はされていない。長期記憶から意識的・意図的に想起された情報がアクティブに保持されるとWMとなり、WMは、長期記憶の一部が活性化されたものともいえる。加えて、ワーキングメモリと注意についてみると、このようなWM機能を実行するために、中央実行系内の処理資源を使用するが、処理資源の容量に限界を想定し、同時に実行しうる処理活動は限られると仮定した。これらの機能特性からの推察されるように、中央実行系はNorman & Shallice (1980) の監視的注意システムとの関連が深く、WMにおける注意機構とみることができる。その働きは注意の維持と切り換え、方略の選択と実施などであり、WMにおける制御機能と注意の関係は、重要な検討課題である(三宅, 2000)

### 方法

**被験者** 健康的な大学生、男子5名(18歳~22歳、右利き)であった。被験者には、実験の目的と方法を詳細に説明し、実験同意書の署名を求めた。

**課題** 音刺激に対するキー押し反応課題であった。予告刺激(2000Hz)が呈示され、その500ms後に呈示される第1刺激(500Hz)に続く、刺激間隔(ISI)500msの後に呈示される第2刺激(1500Hz)のそれぞれに対して、右手中指と左手中指で出来るだけ速く反応するものであった(図2)。

**実験システム** 2台のパーソナルコンピュータと定電圧器を使用して、図3に示すように被験者の前方に配置した。また、ERPの測定・記録を行うために事象関連電位測定器(synaxs2100; GE マルケット社製)を用いた。予告刺激であるトリガ信号と3

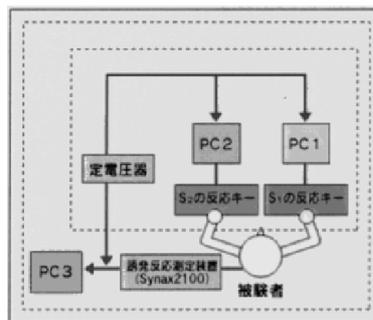


図 3: 実験システム

部位(Fz, Cz, Pz)から導出されたEEGは、中継ボックスを介して、A/D変換し分析用パーソナルコンピュータに記録した。記録されたデータは、生体情報分析プログラムによって加算平均処理を行った(図3)。

**手続き** 実験は、電氣的にシールドされた本学スポーツ心理学実験室で行った。予め実験内容の説明を受けた被験者は、2台のパーソナルコンピュータのディスプレイから約100cm離れて着座した。実験条件は、図2に示すような3条件を設定した。実験に先立ち5試行の練習試行を行わせた。試行間隔は約15秒とし、各条件内で15試行終了後に3分間の休憩をとった。各実験条件を30試行行ない、合計90試行行った。また、3実験条件の実施に際して、条件間の順序効果を相殺するために、被験者間でカウンターバランスを行なった。また課題遂行中は、眼球運動を制限するために、2台のパーソナルコンピュータの間に設置した直径5cmの黒マルに視点を固定するように教示した。なお、実験終了後、被験者に内省報告を求めた。

**記録および分析方法** EEGは、両側耳朶結合を基準として、Fz, Cz, Pzから、Ag/AgCl電極を用いて単極導出した。EEGは時定数5秒、高周波遮断周波数100Hzで増幅した。これらの生体信号は刺激パルスと共にサンプリング周波数250HzでA/D変換し、分析用パーソナルコンピュータに記録し、オフライン処理を行った。ERPを得るために、予告刺激呈示から始まる2000ms間をサンプリングし、被験者、条件、部位毎に、30回の加算平均処理を行った。なお、予告刺激呈示点のトリガを用いて500ms後を第1刺激呈示点、さらにその時点から500ms後を第2刺激呈示点とし、刺激処理過程を反映する指標とした。

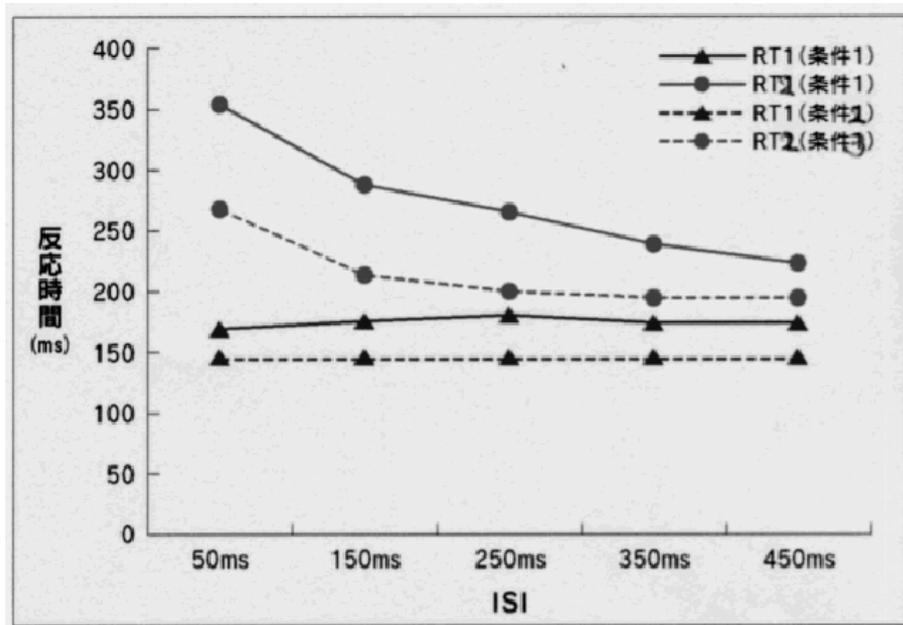


図 4: 条件別に見た反応時間

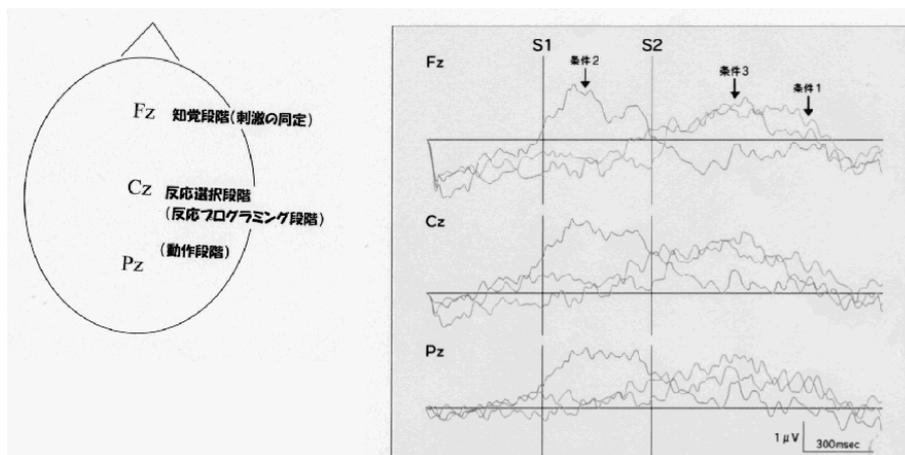


図 5: 反応-非反応処理過程の事象関連電位

## 結果と考察

二重課題パラダイム下において、反応過程である条件1では、ISIの短縮化に伴って心理的不応に起因する第2刺激に対する反応時間の遅延がみられ(図4)、そして、ERPを指標としてみた実験では、予告刺激と第1刺激・第1刺激と第2刺激の間に緩徐な陽性変動がみられた。また、第2刺激の提示後、陰性波(N300)を惹起した。非反応処理過程では、条件2の場合、条件1での第1刺激に対する反応時間の変化と同様のパターンを示し、ERPを指標としてみた場合、第1刺激に対する反応の処理過程で、大きな電位の陰性波(N100)が惹起し、第2刺激に対する非反応処理過程では緩徐な陽性変動がみられた。また、条件3の場合、ISIの短縮化に伴って心理的不応に起因する第2刺激に対する反応時間の遅延がみられ、条件1と同様のパターンを示した。ERPを指標としてみた場合、第1刺激に対する非反応処理過程では緩徐な陽性変動がみられ、反応処理を行う第2刺激の呈示後、陰性波(N400)を惹起した(図5)。

## まとめ

二重課題における反応処理過程(条件1)では、連続する2つの刺激に対する「反応処理」の反映を示すN300がみられ、反応非反応処理過程(条件2)では、選択的注意ではなく、一般的注意の反映を示すN100がみられ、非反応反応処理過程(条件3)では、先行する刺激に対する「非反応処理」の効果を示すN400がみられた。これらのことは、非反応処理課題であっても、通常反応処理課題と同様の脳内処理を行っていることを示すものと考えられる。つまり、実運動を伴わないイメージによる反応処理を行っているものであろう。

注) 「反応時間を指標とした反応非反応処理過程の検討(2002)」日本スポーツ心理学会発表

## 来田氏のコメント

私も野球選手を中心にGo/Nogo反応時間を測定していたので、反応をしないことの研究には非常に興味があり、興味深く聞いていました。非反応、すなわち「反応しない反応」とは、見た目には何もしていないのですが、脳内の処理としてはかなりの負担になっていると想像します。早速ですが、何点か質問・コメントさせていただきます。

1. 刺激呈示に対して動作を行わない「条件2の刺激2」と「条件3の刺激1」では、Nogo電位と呼ばれる陰性電位が生じるのではないかと予想しました。しかし、緩徐な陽性変動と記されており、予想は外

れました。今回の実験では刺激呈示に対して「非反応の選択」が行われたのではなく、あらかじめ選択しておいた(指示された)「非反応の実行(?)」が行われたのが原因なのかなと考えたのですが、いかがでしょうか? また、陰性電位つながりで恐縮ですが、非反応課題中に生じたN100やN300はNogo電位と関係はあるのでしょうか?

2. キー押しの反応時間は200ms程度であり、陰性電位のN300とN400はキー押し動作が終了してからピークに達しているように思われます。N100やN300、N400成分の立ち上がりのタイミング、あるいは陰性電位の振幅値や潜時が条件によってどのように変化するかという観点からの分析も有効ではないかと考えますが、いかがでしょうか? また、N400はターゲット信号との比較に関係し、差異を認識するときに生じる波形であるという報告もありますが、それぞれの陰性電位がどのような脳内情報処理を反映しているのか非常に興味があります。

3. 刺激呈示を基準として脳波加算をおこない事象関連電位を求めてはありますが、キー押し反応を基準として加算を行い、運動関連の電位を抽出することは有効でしょうか? また、キー押しの瞬間や筋電図開始を基準に脳波加算をおこない、運動の実行に直接関連した電位を求める方法が開発されていますが、「動作の実行」だけでなく、「動作の停止」も1試行ごとに出現時刻にばらつきが生じる可能性を感じます。したがって(実際には不可能ですが)動作の抑制あるいは非反応が実行された瞬間を基準に加算することで、非反応に関係する脳波をよりクリアにできると思います。しかし、非反応がいつ生じたのが同定されないという根本的な問題が非常に惜しまれます。運動関連電位ならぬ非反応関連電位を抽出できたら非常に面白いなと思いました。

4. 主題である非反応過程ではありませんが、条件1と条件2ではどちらも最初の刺激に反応しているにもかかわらず、反応時間が異なることに興味を持ちました。この違いは事象関連電位からはどのような違いといえるのでしょうか? 結果では、緩徐な陰性電位(条件1)とN100(条件2)の違いとなっていますが、どのような処理過程を反映していると考えられますか? また、もう1点、心理的不応期について、刺激間隔に対応して事象関連電位がどう異なるか非常に興味があります。この結果より、心理的不応期の生理学的意味がよりはっきりするのではないかと楽しみにしています。

5. 最後に、スポーツ場面での非反応をいくつか考えてみました。サッカーのスループスは今回の課題に非常に似ているように思います。その他にも、野

球の打者の見逃し、同じく野球で三塁ランナーが内野ゴロでホームにスタートを切れなかったなどなど。反応を行わない、見るだけ、行わないことを決断するなどの要素がスポーツ場面では連続しているのだなと気づき、非反応過程の研究のおもしろさを感じわくわくしてきました。このような処理とワーキングメモリの関係についてどのように考えればよいか教えて頂けませんか？ また、ワーキングメモリといえば前頭前野を中心とする前頭連合野が目まわっているように聞きますが、部位による活動の違いはみられたのでしょうか？

### 来田コメントへのリプライ

示唆に富んだコメントをありがとうございました。大変な宿題を与えられたと、ちょっと真剣に悩んでいます。できるだけお答えしようと思いましたが、これからの問題が多いので分かる範囲で考えて来ました。

今回の実験では指摘されている通り、刺激呈示に対して「非反応の選択」が行われたのではなく、あらかじめ選択しておいた（指示された）「非反応の実行（？）」が行われたと考えた方が、妥当です。この点を踏まえて、今、行なっている実験では、3つの条件を予備刺激の音色の違いで判断・選択し、反応する Go/Nogo 課題を用いています。また、非反応課題中に生じた N100 や N300 は、Nogo 電位と考えたいです。

N100 や N300, N400 成分の立ち上がりのタイミング、あるいは陰性電位の振幅値や潜時が条件によってどのように変化するかという観点からの分析は、確かにやってみる価値はあると思います。最初は、キー押し反応を基準として加算を行い、運動関連の電位を抽出し基本的な反応傾向を把握する必要があると思います。判断の基準作りと考えて下さい。

条件1と条件2ではどちらも最初の刺激に反応しているにもかかわらず、反応時間が異なる結果で、緩徐な陰性電位（条件1）と N100（条件2）の違いと考えましたが、これも最初の指摘通り課題が、非反応の選択になっておらず、決められたを実行した結果だと思います。つまり、条件1では、心理的不応がおこり、条件2では単純反応が行なわれたと考えています。ただ、心理的不応期の問題は、事象関連電位から検討したいと思っています。

反応・非反応処理とワーキングメモリの関係については、一時的に情報を保持する必要がある、スポーツでは不可欠と思っています。したがって、運動ワーキングメモリの機能については詳細に検討すべきでしょう。言語などの処理に使うワーキングメモリといえば前頭前野を中心とする前頭連合野での働きが考えられますが、運動ワーキングメモリは、運動野を中心に想定した方が妥当かと思っています。これは運動イメージにも関係すると考えています。