

A
F5
02
19

博士論文

運動が感覚－運動処理過程に及ぼす影響

平成 14 年 度

筑波大学大学院 体育科学研究科

秋 山 幸 代

寄贈
火山幸代氏

03006696

目次

用語の説明および定義	…5
第Ⅰ章 緒言	…10
第Ⅱ章 研究小史	
第1節 感覚－運動系の情報処理過程に関する先行研究	…15
1. 反応時間 (reaction time : RT) を用いた研究	…15
2. 脳波 (electroencephalogram : EEG) を用いた研究	…16
3. 事象関連電位 (event-related potential : ERP) を用いた研究	…18
4. RT と ERP からみた感覚－運動系の情報処理過程	…24
第2節 運動トレーニングや活動に伴う神経系の変化に関する 先行研究	…25
1. 神経・筋の変化に関する研究	…25
2. 脳の可塑的变化に関する研究	…26
第3節 運動トレーニングと感覚－運動系の情報処理過程 に関する先行研究	…27
1. 認知機能テストを用いた情報処理過程に関する研究	…27
2. 電気生理学的指標を用いた情報処理過程に関する研究	…28
第Ⅲ章 研究の目的と構成	…30
第1節 研究の目的	…30
第2節 研究の方法	…30
第3節 研究の構成	…31

第IV章 長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程に及ぼす影響（研究課題1）

第1節 長期的な有酸素運動が感覚刺激処理過程に及ぼす影響

1. 目的	…34
2. 方法	…35
3. 結果	…37
4. 考察	…40
5. 要約	…46
図表	…47

第2節 競技種目の相違と感覚モダリティ間への影響

1. 目的	…56
2. 方法	…56
3. 結果	…59
4. 考察	…62
5. 要約	…65
図表	…66

第V章 長期的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響（研究課題2）

1. 目的	…77
2. 方法	…78
3. 結果	…80
4. 考察	…82
5. 要約	…88
図表	…89

第VI章 随意運動の反復が感覚刺激処理過程に及ぼす影響（研究課題3）	
1. 目的	…98
2. 方法	…98
3. 結果	…101
4. 考察	…103
5. 要約	…108
図表	…109
第VII章 随意運動の反復が運動準備過程に及ぼす影響（研究課題4）	
1. 目的	…115
2. 方法	…115
3. 結果	…118
4. 考察	…121
5. 要約	…125
図表	…126
第VIII章 総括	
第1節 総括的考察	…135
第2節 要約と結論	…142
第3節 今後の課題	…145
第IX章 謝辞	…147
第X章 文献	…148

この研究計画書は、以下の原著論文および学会発表を加筆修正し、さらに未発表の研究結果を加えてまとめたものである。

学術論文

1. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 麓正樹, 金田健史, 時任真一郎, 下田政博: 長期的な運動経験が事象関連電位に及ぼす影響, 体力科学, 49 (2): 267-276, 2000
2. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 中島剛: 反応動作課題の反復に伴う Contingent Negative Variation (CNV) の変動, 臨床神経生理学, 31 (5), 2003 (掲載予定)
3. Akiyama S, Nishihira Y, Hatta A, Kaneda T, Kuroiwa K, Kida T, Nakajima T: Modulation of P300 during repetition of reaction task. (執筆中)

学会発表

1. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 麓正樹, 宮達夫, 時任真一郎, 金田健史: 聴覚刺激 oddball 課題に伴う事象関連電位 - 長期運動経験者を対象として -, 第 54 回日本体力医学会大会.1999.10.
2. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋: 運動種目の相違が事象関連電位に及ぼす影響, 日本運動生理学会第 8 回大会.2000.7.
3. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 黒岩一雄, 中島剛, 和坂俊昭, 木田哲夫: matching task の反復に伴う事象関連電位, 第 56 回日本体力医学会大会.2001.9.
4. 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 中島剛: 反応動作課題の反復に伴う随伴性陰性変動 (Contingent Negative Variation: CNV) の変動, 第 10 回日本運動生理学会.2001.7.

用語の説明および定義

本研究で用いる主な略語と用語の説明は以下のとおりである。

脳波 (electroencephalography : EEG)

大脳皮質の自発的な電気活動を頭皮上から記録したもの。脳内の神経細胞同士が電気信号として情報を伝達する時に発生する活動電位であり、興奮性、および抑制性シナプス電位の総和を反映する。電極を国際基準に従った配列 (国際 10-20 法) で頭皮上に置くことにより、電極各位置の電位分布から解剖学的意味をもった皮質の活動パターンを検出できる。

事象関連電位 (event-related potential : ERP)

ある刺激入力や、それに伴う課題を被験者に課したとき種々の精神作業の負荷によって脳波上に生じる一過性の脳電位変化の総称。脳内に発生する種々の情報処理過程に関連して誘発されるが、背景脳波の振幅に比べ小さいため、加算平均することによって測定される。時間分解能が高く、ヒトの高次脳機能を非侵襲的に調べる有効な指標である。

N100

ERP の 1 成分であり、刺激提示後約 100 msec にピークをもって出現する陰性電位成分。刺激に対する注意や準備状態を反映する内因性成分と、単に刺激が脳に入力されたために自動的に起こった外因性成分とを合わせ持った成分である。

P300

ERP の 1 成分であり、刺激提示後約 300 msec にピークをもって出現する陽性電位成分。感覚モダリティに関係なく頭頂部優位に出現する内因性電位。振幅は、生体における情報処理容量を反映し、注意資源 (処理容量) の再分配に関わり、心的努力、確信度、認知的予期、被験者にとっての刺

激の持つ意味や誘因価、疲労、覚醒度などにも関連して変動し、潜時は、刺激評価時間を反映する。

随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV)

予告刺激 (S1) の呈示後、命令刺激 (S2) に対して何らかの課題を遂行する際に S1 と S2 の間に出現する緩徐な陰性電位変動。S2 に対する注意や期待、準備などの過程を反映する。S1 と S2 間を一定以上にすることにより、発生源や出現の特性上、早期成分と後期成分に分けられ、特に後期成分は S2 に対する課題が動作を伴う場合、運動の準備状態を反映する。

運動関連脳電位 (movement-related cortical potential : MRCP)

随意運動の開始時点を基準にして脳波を加算平均することにより、随意筋収縮の 1~2 sec 前から出現する陰性緩電位。早期成分である Readiness potential (RP) もしくは Bereitschaftspotential (BP) とそれに続く Negative slope (NS') は随意運動の準備状態を反映し、さらに運動開始の直前には motor potential (MP) が出現する。

ポジトロン放射断層撮影法 (positron emission tomography : PET)

脳神経細胞が活動すると局所の脳血流が上昇する。この脳血流の変化を放射性同位元素で標識した薬剤を静脈注入して測定することにより、活動に関与する脳部位を同定することが可能となる。

機能的磁気共鳴画像撮影法 (functional magnetic resonance imaging : fMRI)

PET と同様に脳局所の血流増加を測定することによって活動部位を画像化できる。脳の活動により毛細血管などの酸素化ヘモグロビンが増加し、それを磁気共鳴画像法で測定すると高信号になるという原理に基づいている。PET と異なるのは放射線被曝がないことである。

経皮的磁気刺激法（transcranial magnetic stimulation : TMS）

蓄電器に強いエネルギーを蓄え、それから強い電流を瞬間的にコイルに流して磁場の変化を生じさせるとの近辺の組織に電場を惹起する。この電流を利用して深部神経組織を刺激する方法。

運動誘発電位（motor evoked potential : MEP）

TMS によって頭蓋外から大脳皮質運動野を刺激した際に、支配筋から誘発される筋電位。大脳皮質から運動経路を下降するインパルスの伝導状態とその伝導時間を評価できる。

脳磁図（magnetoencephalogram : MEG）

神経興奮によって生じるごくわずかな磁界を検出する。信号の起源は神経細胞の興奮であるから脳波と同等の意義をもつが、脳波が細胞外の電流を反映しているのに対し、MEG は細胞内を流れる電流を反映したものである。

筋電図（electromyography : EMG）

筋線維が興奮する際に発生する活動電位を記録したもの。ヒトにおいて非侵襲的に筋の活動を検討する場合、筋全体の活動を反映する表面筋電図法が用いられる。得られる記録は、多数の運動単位が種々の頻度で発射した干渉波であるが、電氣的に積分した値は、一定範囲で、その筋収縮によって発生する張力に比例する。

反応時間（reaction time : RT）

反応刺激提示から実際の反応が出現するまでの時間。提示刺激の認知から、反応開始までの一連の情報処理に必要とされる時間的な側面の解析に用いられる。

筋電図反応時間 (electromyography-reaction time : EMG-RT)

反応刺激提示から動作に伴う筋電図が出現するまでの時間。主に中枢の情報処理、および神経伝導速度に関わる時間の遅速を反映する。

運動時間 (motor time : MT)

筋電図の出現開始から実際の反応が出現するまでの時間。抹消の筋活動に関わる遅速を反映する。

運動プログラム

動作開始前に構成され、末梢からのフィードバック情報の影響を受けずに動作の全系列の遂行を可能にする筋への指令セット。Keele (1973) によって提唱された運動の神経生理学的な制御機構に基づいた概念であり、運動処方などで用いられるような実際の運動手順や組み合わせとは異なる。遂行される動作の速度、方向、大きさといった変化する性質を運動のパラメータという。

感覚－運動処理過程

ヒトは、生体内外の感覚情報を受容器で捉え、その情報を脳内の処理機構に伝達し、知覚、識別、認知、判断という処理を行うとともに、その結果を体の各器官に伝え、環境や状況に応じた反応を起こすという情報処理を行っている。本研究では、課題を遂行する際に呈示された感覚刺激の受容から、反応として運動を出力するといった運動制御までの一連の情報処理過程を感覚－運動処理過程とした。

反応課題

ERP を誘発するために用いられる実験パラダイム。指定された刺激が呈示されたとき、筋活動を伴った反応動作を行う。RT や EMG-RT といった行動学的指標が同時に得られることから、各刺激に対する反応の正誤を知

ることが可能であり、感覚刺激の呈示から運動出力までの一連の情報処理過程を評価できる。

計数課題

ERPを誘発するために用いられる実験パラダイム。指定された刺激が呈示されたとき、その出現回数を数える。その際、声を出したり指を使ったりしないよう指示する。課題終了後に報告させ、呈示刺激数との誤差から課題遂行能力について評価する。運動要素含まない感覚刺激の情報処理過程について評価できる。

バリスティック課題

反応動作として急峻に筋放電が増大し、減少するといった非常に短時間（運動時間が約200 msec以内）の急速運動（ballistic movement）（Brooks, 1981）を用いた反応課題。運動は、脳内であらかじめ準備された運動プログラムによって発現すると考えられる（Forget and Lamarre, 1987）。

ターゲットマッチ課題

反応動作として設定されたターゲットに対し素早くかつ正確に動作指標を合わせる反応課題。本研究では、運動の習熟過程について経時的に観察するため、ターゲットを最大随意収縮の10%という低強度で微細なコントロールが必要とされる張力量に設定した。

キャッチ試行

一定条件の試行の連続中に突然異なる条件の試行を提示する試行。本研究では、刺激呈示間隔が一定である課題条件の際、次の刺激を予測して反応することを防ぐため、課題中にランダムに挿入した。

第1章 緒言

我々の日常生活やスポーツ活動は、自分の意志で骨格筋を収縮させることにより生じる身体活動、すなわち随意運動を媒介として、自分を取りまく環境に意図的に働きかけることにより成り立っている。しかし、現代社会における高度経済成長や、技術の進歩に伴った「自動化・機械化」の波は、日常生活を便利で豊かなものにする一方で、我々から身体活動の機会を奪ってしまった。その結果、知らず知らずのうちにその環境に身体を適応させ、心臓血管系、骨格筋系などの機能を低下させている。このような身体活動の減少に対する適応が、成人病の罹患率を高めていることは疫学的にも実験的にも示されている。さらに、発育期の幼児や児童の運動不足、高齢化社会の実態など、心身の発育発達や加齢問題を考える時、身体活動の減少による様々な弊害を防ぐためには、日常生活において積極的に運動を行う以外解決策はないと思われる。したがって、運動効果の理論的根拠を解明しようとする体育科学の研究は、ますます重要な役割を果たすと考えられる。では、運動は生体にどのような適応変化をもたらすのであろうか。

適応とはヒトのもつ形態や行動などの諸要素が、その環境のもとで生活していくのに都合よくできていること、またはそのような状態に変化していく過程を意味している。運動に対する適応とは、長期間にわたり一定のインターバルをおいて断続的に運動を繰り返すことによって、目的とする運動を効率的に遂行するための能力を獲得することである。このような運動の反復によって生体は機能的、形態的に大きく変化する。そしてこの変化は、トレーニングの強度、持続時間、頻度などによって異なることも明らかにされており、持久的トレーニングでは最大酸素摂取量は増大し、安静時における心臓の徐脈化、一回拍出量の増加、心筋の肥厚などが認められ、筋力トレーニングでは骨格筋が肥大し、最大発揮筋力は増大する。このように運動トレーニングによる適応変化については、特に心臓血管系、

呼吸循環器系、骨格筋系において体育科学の分野でも多くの知見が得られてきた (Huston et al., 1985; 森谷と吉武, 1999; Narici et al., 1996; 西平, 1998)。

しかしながら、骨格筋のみならず、心臓や血管などの各器官の活動を調節、制御しているのは脳を中心とした中枢神経系であるにもかかわらず、その運動適応による変化についてはいまだ明らかでない。したがって、脳における運動の影響を明らかにすることは、運動効果の理論的背景を確実なものにするためにも必要であって、その機能の解明は重要な課題であると考えられる。

脳と運動に関する一連の研究では、随意運動の発現やその制御に脳が大きく関与していることが明らかにされている。一方で広義の運動の中には、例えば膝蓋腱を叩くと下肢が前に跳ね上がる反射的な運動のように、脳がなくとも脊髄さえあれば運動は発現することも確かである。しかし、この反射運動は、随意運動とは異なり脳の指令に従ったわけではなく、意志も認知も感情も伴わない不随意的な運動反応であり、脊髄の運動ニューロンが末梢からの入力によって活動変化をきたしたために誘発された運動ではない。つまり、脊髄のレベルにおいては刺激に対する応答は既存の統合された反射経路に依存するだけで、脳が担っているより高次の機能を発現することはない。さらに、この反射運動は上位中枢からの制御を受けており、反射の疎通動態が状況に応じて変動ことも知られている。これは、文脈によって生じた上位中枢での興奮状態が、最終共通路としての脊髄運動ニューロンの興奮レベルに影響を与えることによって、より円滑な運動の遂行を可能としていると考えられる。すなわち、運動の発現に関与する脳の機能には、脊髄とは異なる脳に特異的な運動の遂行や制御、獲得を可能としている機能が存在し、円滑で効率的な運動の遂行に脳の果たす役割は大きい。この脳の機能の一つとして、「感覚情報の処理」があげられる。

ヒトにおける随意動作の発現には、視覚や聴覚、体性感覚などの感覚受容器を介して外界からの感覚情報を脳に取り込んで処理し、意図した動作の反応情報に変換された運動プログラムを骨格筋などの効果器へ指令する

ことによって起こる (Schmidt, 1988; 甘利と酒井, 1994)。特に、スポーツ場面においては、瞬間的に多数の感覚情報から多様な反応動作を選択しなければならず、正確で、素早い感覚情報の認知・判断が要求される。この一連の感覚情報の処理過程を経ることにより、状況に応じた適切な意思決定のもと運動指令が発せられる。例えば、陸上競技のスタートダッシュではスタートの合図という音の認知とともに、できるだけ素早く加速に効率的な1歩目を踏み出すことがパフォーマンスに大きく影響する。またテニスや野球などにおいては、ボールの軌道や相手の位置、空間情報などといった視覚情報の素早い認知によって効果的な運動を選択することが可能となる。このように、目的とする運動の遂行には感覚情報の処理過程が非常に重要である。

一方、複雑巧緻なスポーツ動作はもちろんのこと、単純な随意動作においても、意図する動作を遂行する場合、あらかじめ目的とした運動の企画・準備がなされており、この「運動準備過程」もまた、円滑で効果的な動作の遂行に重要である。さらに、この運動準備期にはすでに予定された動作の遂行に関与する中枢神経系内のインパルスパターン、すなわち運動プログラムが決定されており、この統合された電気的活動が頭皮上から記録される。スポーツ場面における例としては、陸上競技や水泳のスタート時や、バスケットボールやサッカーでシュートを打つ時など、相手チームのディフェンスの動きを予測し、目標とするゴールまでの位置関係からボールを放つ時の力の大きさ、スピード、方向といった次に起こす動作についての運動要素が運動プログラムとして動作遂行前の運動準備期に決定される。この運動準備期にヒトの脳から電位が出現することを発見したのは、Walter et al. (1964) と Kornhuber and Deecke (1965) であり、それぞれ随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV)、運動関連脳電位 (movement-related cortical potential : MRCP) と名づけられ、今なおヒトの運動、行動のメカニズムを探る有効な指標として盛んに用いられている。

このように随意運動の発現や、制御に関与する脳には幾段にも積み重な

った階層的な制御構造が存在していることは近年の研究から明らかにされている。また、随意運動を制御している脳の領域は一ヶ所だけではなく、いくつかの領域が平行して運動を制御している。運動制御の機構はこれらの領域が相互に連絡しながら並列処理を行いつつ、多階層処理で筋支配を行っている（松村, 1998）。さらに、脳は非常に柔軟性に富み、経験や学習、反復刺激に応じて適応的な変化が生じるといった性質を持つことが、近年明らかとなりつつある。したがって、随意運動の反復、すなわち運動トレーニングによっても、生体の各器官と同様に脳にも適応的な変容をもたらすと考えられる。

これまでに運動トレーニングと脳との関連を調べた研究では、実験動物が用いられ、長期間の有酸素運動は脳における毛細血管や樹状突起の密度の増加、新たなシナプスの形成、神経機能のための栄養や代謝物質の輸送に重要であるグリア細胞の肥大や増殖といった形態的变化をもたらすこと、また、細胞の可塑性に重要である神経栄養因子や神経成長因子の発現増加、神経伝達物質やレセプターの変化といった機能的変化を引き起こすことが報告されている（Anderson et al., 1994; Dustman et al., 1994; Gómez-Pinilla et al., 1997; Turner and Greenough, 1985）。しかし、ヒトにおいて脳の働きや変化を知るためには非侵襲的な方法を用いて行わなければならない。体育科学の分野において運動トレーニングと脳との関係については、反応時間（reaction time : RT）を用いた研究が盛んに行われてきた。また、運動と脳の認知機能においては 1960 年代より心理学の分野で認知機能テストを用いた報告がなされている。しかし、これらの指標はあくまでも最終的に出力された結果であり、それに要した時間と正確さという 2 つの指標に基づいて、ヒトの脳内で進行している情報処理過程について推測するに過ぎなかった。

近年では、脳の機能局在を非侵襲的に検討することが可能である事象関連電位（event-related potential : ERP）や、大脳誘発電位（evoked potential : EP）を用いて、より実体的に中枢神経系の高次機能について調べられ、さ

さまざまな知見が集約されつつある（柴崎と米倉, 1994）。これらの指標は時間的分解能に優れ、脳内活動の変化をミリ秒単位で記録できることから人間行動の解明に貢献する重要な手法である。

これらの指標を用い本研究では、運動による適応的变化が脳内で生ずる一連の感覚－運動処理過程にいかなる影響を及ぼしているか、特に随意運動の発現に重要である感覚情報処理と運動準備に着目し、脳レベルでの検討をするとともに、行動レベルでの指標を同時に検討することによって明らかにすることを目的とする。

第Ⅱ章 研究小史

第1節 感覚－運動系の情報処理過程に関する先行研究

1. 反応時間（reaction time：RT）を用いた研究

反応時間（reaction time：RT）という用語は、1873年にウィーンの生理学者 Exner が初めて使用したと言われている。RTとは刺激が提示されてから反応が生起するまでの時間を意味しており、脳機能の指標の一つとして19世紀から研究が行われてきた。RTが実験の従属変数として盛んに利用されている理由は、全ての活動は時間を要し、概して時間は客観的に測定でき、反応時間は精神活動の系統的観察のための客観的手段を提供してくれるからである。最も速いRTは、1つの刺激に対して1つの反応をする場合であり、これを単純反応時間と呼ぶが、反応を行う刺激に先立ち、予告する刺激が呈示されるとさらにRTは短縮する（Sanders, 1965）。これに対し、いくつかの刺激に対してそれぞれに対応した反応を選ばせるという課題（選択反応課題）でのRTは、選択反応時間と呼ばれ、反応の選択肢が多くなるほど延長することが知られている（Hyman, 1953）。また、この選択反応時間を規定する重要な要因として、刺激と反応の整合性（S-R整合性）がある。これは一般に「刺激とそれによって生じる反応が自然な方法で結びついている程度」と定義されており、S-R整合性が高いとRTは短縮する。実験心理学の分野では、このような性質を持つRTを指標として、ヒトの認知情報処理について盛んに研究が行われた。その手法は、ヒトの情報処理の各段階に対応する心理的事象の変数を操作することで、その処理に要した時間を解析し、情報処理過程全体の時間的構造や、機能状態を評価しようとするものであり、メンタルクロノメトリーと呼ばれた（忠井ら, 1987）。

20世紀前半にはRTの変動がセット（被験者の構え、予告から刺激呈示までの時間間隔の操作など）や動機づけなどによるという議論が多くなさ

れ、それとの関連で筋緊張の有無が問題にされた。1910年代に筋電図が記録されるようになり、この問題の解決に利用された。そして、刺激直前の筋活動のレベルが高いと RT は速くなることから、RT の促通は末梢で起こることが仮定された。しかし、セットや動機づけなどによる RT の変動を中枢過程と理解する立場も強く、この問題から 1960年代になると RT は直接筋電図で測定されるようになる (Weiss, 1965; Botwinick and Thompson, 1966)。その結果、RT は刺激の呈示から反応動作における主動筋の筋活動開始までの潜時 (premotor time : PMT) あるいは筋電図反応時間 (EMG-RT) と、筋活動開始から実際の運動開始までの潜時 (motor time : MT) あるいは EMG-summation time に分けられるようになった。その後の研究で、EMG-RT と MT には個体間で相関のないこと、RT の遅れは主に EMG-RT によること、MT には個体差があまりないことなどが報告された。このように RT を EMG-RT と MT に分ける利点は、中枢と末梢の過程をある程度弁別できることにある。

1970年代になると、この RT から上位中枢による随意運動の制御が論じられた。例えば、刺激前に予告が与えられると短縮するという RT の性質は、その遅速に随意動作前の構え、すなわち準備状態の相違が反映されると考えられた (中村, 1988)。しかしながら、このような上位中枢の RT へ及ぼす影響に関する考察は、人間の情報処理の進行状況を直接的に観察することはできないことから、RT の遅速と反応の正確さという 2つの指標に基づいて人間の脳内で進行している過程を推測するにすぎず、脳内情報処理過程の指標として、詳細に検討するには問題が多かった。

2. 脳波 (electroencephalogram : EEG) を用いた研究

脳の機能の研究には、主として 1) 破壊、2) 刺激、3) 記録の 3つの手法が使われてきた。1) の破壊は、脳の一部が障害されたときに見られる症状 (脱落症状) からその部位の機能を調べる方法であり、2) の刺激は、脳を刺激したときに何が起こるかを観察し、その結果から刺激した部位の機

能を調べる方法である。3) の記録は、脳の活動を何らかの物理的手段によって記録することによってその機能を調べる方法であり、1929年に Berger によってヒトの脳波が初めて記録されて以来、脳の機能の研究では最もよく用いられ、医学領域を中心に脳波研究が発展してきた。

Jasper and Penfield (1949) は、随意運動開始前に感覚運動野におけるリズムカルな活動が脱同期化あるいは、ブロックされることを報告した。また、EEG は注意や覚醒水準によって変動し、脳波周波数成分と RT との間に高い相関があることが報告された (Surwillo, 1963)。すなわち、EEG に速波 (β 波) 成分が多いと RT も速いことになる。さらに、Groves and Eason (1969) は、覚醒水準 (vigilance) と注意 (attention) の要因が視覚誘発脳波と RT に及ぼす影響について検討し、最適な覚醒水準の時に RT が短縮すると報告した。

Yingling (1980) は、頭皮上中心部における β 律動が運動行動に関連していることから、その活動は脳における初期のプランニングや運動行動の制御を反映すると考察している。Pfurtscheller (1981) は、手の随意運動中に α 帯域と β 帯域の活動が抑制される脱同期化 (event-related desynchronization : ERD) が生じることを報告した。この運動に関連する α -ERD は、運動開始に対する注意や期待を反映し (Pfurtscheller et al., 1996)、 β -ERD はその運動に関連する感覚運動野の活動を反映すると考えられている (Stancák and Pfurtscheller, 1995)。また、ERD は、手指だけでなく足の運動においても感覚運動野で生じることが報告されている (Toro et al., 1994)。一方、Nashmi et al. (1994) は、手の運動に対する準備期や注意状態では、感覚運動野における β 波が有意に増大すると報告している。最近では、運動前と随意運動中には β 波は脱同期化して振幅が低下するが、運動終了後には同期化して振幅が増大するという見解で一致しているようである (Salmelin and Hari, 1994; Stancák and Pfurtscheller, 1995; Stancák et al., 1997)。

また、体育科学の領域でも随意運動に伴う EEG の変化について研究が行

われている (Hatta et al., 1995; Nishihira et al., 1994, 1995, 1997)。萩原と調枝 (1975) は、運動学習時における EEG の変動動態について調べ、1) 安静時における EEG 周波数パターンは、 α 帯域をピークとして速波 (β 波) と徐波 (θ 波) 帯域が左右に分散したヒストグラムを呈するのに対し、運動時には α 帯域が顕著に減少し、速波成分と徐波成分が相対的に増加すること、2) 運動を繰り返し行わせると、徐波成分と速波成分に分別されたパターンが再び α 帯域をピークとして徐波、速波成分に分散された安静時のパターンになることを報告している。さらに、運動学習の初期における EEG は、速波パターンが主体であり脳の活動水準が高いが、学習により α 波も出現し、活動水準は低下していくといった、運動の習得に伴う変動も観察している。

3. 事象関連電位 (event-related potential : ERP) を用いた研究

種々の外部刺激に対して頭皮上から記録される脳電位には、波形の出現する潜時によって 2 種類の成分に大別することができる。1 つは体性感覚刺激や音刺激などにより直接的に誘発される誘発電位 (evoked potential : EP) であり、視覚誘発電位 (visual evoked potential : VEP) や体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential : SEP) の短潜時成分や脳幹聴覚誘発電位 (brainstem auditory evoked potential : BAEP) の各成分などである。これらは、一定の外的、物理的な刺激で誘発されるため、外因性電位 (exogenous potential) とも呼ばれ、波形の出現潜時は一般に 100 msec 以下と短い。他の一つの成分が事象関連電位 (event-related potential : ERP) と呼ばれているもので、その潜時は 100 msec 以上と EP に比べて長いのが特徴である。ERP は、体性感覚刺激や音刺激、光刺激などにより直接的に誘発される EP とは異なり、脳内に発生する種々の情報処理過程に関連して誘発されるものであるため、内因性電位とも呼ばれる。このような ERP は、自発的な脳波に比べて非常に小さな電位であるため、少なくとも 1 回の刺激提示では自発脳波に隠れてしまい観察が困難であった。しかし、1960 年代初頭に未

完成ながら加算技術が開発されたことによって、ヒトの頭皮上から ERP を記録することができるようになり、当時、脳波研究に従事していた欧米の心理学関係者の多くが盛んに研究した。現在では、臨床心理学領域でも、精神心理的疾患の予知や診断、処置後の判定などにも応用されている。これら ERP の頭皮上記録に PET や MRI といった脳内部の非侵襲的観察技術を組み合わせた感覚－運動系の情報処理過程の研究では、ERP の発生源の究明などにも焦点が当てられ、重要な示唆に富む数々の結果が得られている。

3-1. P300

P300 は、Sutton et al. (1965) が刺激の不確かさに関する電位として初めて報告した。P300 は、被験者にとって有用な情報を含む刺激、いわゆる課題関連刺激を、呈示頻度の高い非標的刺激と呈示頻度の低い標的刺激の形で与え、誘発される潜時 250～500 msec の長潜時陽性電位（潜時 300 msec 付近に出現する陽性電位）である。

一般に標的刺激に対する P300 の振幅は提示確率が低いほど大きくなる。被験者の課題には、標的刺激を数えさせる課題（計数課題）や、ボタン押しのような運動反応を求める課題（反応動作課題）が多く用いられる。このようにして記録される P300 はどのような感覚モダリティでも頭頂部優位な頭皮上分布を示し（Snyder et al., 1980）、大脳半球全体を覆うように両側性に広がり、体性感覚刺激の受容野とは無関係である。刺激の識別が困難なときや難易度の高い課題を要求すると P300 の潜時が延長すること（Goodin et al., 1983）、また、被験者の確信度が高いほどその振幅が大きくなり（Squires et al., 1975）、刺激が被験者にとって意味を持つときや被験者の注意・集中度が高いときに振幅が大きくなること（Campbell et al., 1979; McCarthy et al., 1989）から、これが刺激の認知に関する情報処理過程を反映すると考えられている。そして、P300 を記録するために様々な課題が考案、工夫される中で、用いられた課題の性格から意思決定 (decision-making)

(Duncan-Johnson and Donchin, 1982)、刺激評価 (stimulus evaluation) (Kutas et al., 1977)、意思決定の終了 (post-decision closure) (Desmedt, 1980) など多様な性格付けがなされている。

P300 振幅は、種々の課題自体での結果から、文脈あるいは作業記憶の更新 (Donchin and Coles, 1986) や課題遂行に必要な処理資源の分配量 (Wickens et al., 1983) を反映すると考えられている。標的刺激の呈示確率と反比例し、呈示確率が低いほど大きくなる。しかし、同じ確率であっても課題関連刺激に対しては増大する (Duncan-Johnson and Donchin, 1977)。また、直前の刺激系列を反映することが知られている (Squires et al., 1976)。標準刺激の呈示がない条件、すなわち提示された全ての刺激に対して反応する課題 (単純反応課題) においても P300 は出現し、標的刺激確率と刺激間隔を操作すると 2 音 oddball の P300 と同様の振る舞いを示すことから同じ成分であり (Polich et al., 1994)、P300 振幅を決定するのは刺激呈示確率ではなく、刺激間隔であると考えられる (Picton., 1992)。また、標的でない低頻度刺激にも P300 様成分が出現し (P3a)、これと標的に対する P300 (P3b) は区別されること (Squires et al., 1975)、さらに標的ではない低頻度の新奇 (novel) な刺激に対しても P300 様成分が出現し、novelty P300 と呼ばれている (Courchesne et al., 1975)。P3a や novelty P300 は、中心部から前頭部にかけて優位で、頭頂部優位な P300 (P3b) とは異なる頭皮上分布を示す。

P300 の発生源に関しては、様々な報告があり見解は一致していない。Halgren et al. (1980) は、てんかん患者について深部電極を用いた記録で、極性の反転した P300 の波形を海馬で観察した。さらに、Okada et al. (1983) は、ERP と同時に脳磁図 (magnetoencephalogram : MEG) を記録し、その結果から P300 の発生源を海馬と推定し、以来、海馬が重要な役割を果たしていることがその後の研究で指摘されてきた (McCarthy et al., 1989; Picton, 1992)。これに対して、Yingling and Hosobuchi (1984) は、慢性疼痛患者の視床 (VPL) から ERP 記録を行い、頭皮上の P300 に対応する陰性電位を

報告し、P300の発生源を視床、あるいはそれより背側の皮質下であると考
えている。また、Desmedt and Debecker (1979)は、標的刺激の処理が終了
すると前頭前野が一過性に中脳網様体を抑制し、それまで中脳網様体の持
続的活動によって出現していた大脳皮質全体の陰性偏位が消失することに
よってP300が出現すると考え、前頭葉・中脳網様体の皮質・皮質下の連絡
系を重視している。さらにYamaguchi and Knight (1991)は、体性感覚刺激
を用いたERP記録で、P300 (P3b) および novelty P3の発生源が側頭－頭
頂連合野であるが、novelty P3に関しては前頭野背側が優位に貢献してい
るとも述べている。以上のように、頭蓋内の様々な部位でP300が記録され
ることから、P300の発生源が1つではなく、複数の部位が関与しているとい
う説が現在では有力で (Yamaguchi and Knight, 1991; 中島ら, 1994)、P300
には刺激の感覚モダリティにより異なる発生源が関与するという見解
(Johnson, 1988)もあることから、P300に対応する神経回路は、個々の実
験課題により変異しうると考えられる。

Desmedt and Robertson (1977)は、標的刺激を与えた指に隣接した指に
課題を課さない課題を与えた場合、認知機能の中で短期記憶の前段階にあ
たる分類 (classification)、同定 (identification) の指標であるN140は明ら
かに出現したが、P300は出現しなかったと報告した。N140の潜時が振幅
に比べてさほど変動しないのに対し、P300の振幅のみならず潜時も課題に
よって容易に変化することは、P300がそれ以前のERP成分とは明らかに
区別されることを意味する、そこで、P300は意思決定とどのような関係に
あるかが興味の対象となり、前述のRTとの関係について検討された。そ
れらの結果、P300潜時はRTよりわずかに長いか、時には短いこともある
と報告された (Ritter et al., 1972; Kutas et al., 1977; Pfefferbaum et al., 1986; 平
松ら, 1985)。Kutas et al. (1977)の結果では、被験者に正確さを重視するよ
う教示したときにP300とRTの相関係数は $r = 0.61$ であったのに対し、正
確さよりも反応速度を重視するよう教示したときには、 $r = 0.26$ であった。
これについてKutas et al.は、正確さ重視条件では被験者が刺激の評価を完

全に終えてから反応したため、刺激の評価が不完全なまま反応を開始した反応速度重視条件よりも相関が高くなったと考察し、P300 は刺激評価時間を反映する成分であるとした。一方、Desmedt (1980) は、意思決定から反応開始までに運動指令の開始、錐体路での伝導、筋収縮に要する合計時間を約 100 msec として考察すると、P300 の立ち上がり潜時が意思決定に常時先行することは困難と考えられるため、P300 は意思決定後の成分であるとしている。これらのことから、P300 の発現タイミングを制御する機構と反応を制御する機構が直列的に関連しているわけではないと考えられている。

3-2. 随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV)

Walter et al. (1964) によって報告された随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV) は、予告刺激 (warning signal : WS) と命令刺激 (imperative signal : IS) を 1 組にして、IS に対して反応を行わせるときに WS と IS の間の準備期で頭皮上に出現する緩徐な陰性変動である。Walter et al. (1964) は、期待や反応に対する準備に関係しているという意味で期待波 expectancy wave と呼んだ。しかしながら、CNV と心理要因の関係について、Low and McSherry. (1968) は意欲 (conation)、Irwin et al. (1966) は動機づけ (motivation)、そして Tecce and Scheff (1969) は注意 (attention) と解釈しており、意見は一致していないが、CNV と心理要因との間に密接な関連のあることは異論がない。

CNV の波形全体が被験者や実験条件により陰性シフトの傾斜が異なる点に着目されていたが (Weerts and Lang, 1973)、明白に波形成分を区分したのは Loveless and Sanford (1973) であった。2 秒以上の刺激間隔で記録される CNV は、WS 後 400~800 msec までの前頭部優勢で左右対象に出現する早期成分と、IS 呈示の約 1 sec 前から中心部優勢に徐々に増大する後期成分とに分けられる。早期成分は WS の強度や持続時間、感覚モダリティなどの特性に依存していることから、WS に対する定位反応を反映し

(Loveless and Sanford, 1974; Weerts and Lang, 1973)、後期成分は IS によって要求される課題内容に依存して変動することなどから、IS に対する期待を反映する成分 (stimulus preceding negativity : SPN) と反応動作が求められる場合では動作に対する準備を反映する成分、すなわち運動準備電位 (bereitschaftspotential : BP) が重畳していると考えられている (Chwilla and Brunia, 1991; van Boxtel et al., 1993; Damen and Brunia, 1994; van Boxtel and Brunia, 1994)。また、後期成分はこれまでに様々な運動要素との関連性が調べられており、発揮される力の大きさ (Rebert et al., 1967; Low and McSherry, 1968) や速度 (Grünewald et al., 1979; Deecke et al., 1980)、運動の方向、持続時間など事前にプログラムされる運動の特徴を反映すること (Mackay and Bonnet, 1990; Franck et al., 1995)、また、RT やエラー率との関連が報告されている (Brunia and Vingerhoets, 1980; Wascher et al., 1996)。

CNV と反応動作との関連は、注意水準などの心理的要因や実験条件の因子によってともに対応して変動する場合 (Hillyard and Galambos, 1967; Irwin et al., 1966; 西平ら, 1983; Waszak and Obrist, 1969) と、両者が異なった変動をする場合 (荻野ら, 1995) が報告されている。しかし全体としては、CNV と RT とは負の相関関係があり、CNV の振幅が大きいほど RT が速いことを示している。一方、Tecce et al. (1976) は CNV と覚醒水準はおそらく逆 U 字関係を示すものと推測し、CNV と反応動作との直接的関連性を否定している。このように、現在では、CNV と反応動作との関連は両者に影響を与えやすい実験パラダイムのもとで関連しているにすぎず、多くの因子を媒介としたもので、広くは関連性を示しながらも間接的な過程であることも考えられている。

発生過程としては、皮質に視床から興奮性の入力となされる事によって表層陰性－深層陽性の電位が出現し、頭皮上から記録されると考えられている。また、被核や淡蒼球、視床の神経細胞において“behaviorally contingent activity” が示されており、“皮質－大脳基底核－視床回路” が CNV の発生における役割を果たしている (Brunia and van Boxtel, 2001)。皮質において

は、広い範囲の領野が関与し、異なる起源や機能をもった多皮質電位の総和である事が示されている (Hamano et al., 1997)。なかでも期待や非特異的な準備は前頭前野、判断・決定は内側前頭前野、そして運動準備に直接関わる電位は一次運動野、体性感覚野、補足運動野、運動前野から発生する (Hamano et al., 1997; Ikeda et al., 1994)。

4. RT と ERP からみた感覚－運動系の情報処理過程

ERP が人間の情報処理過程の研究に導入される以前、つまり、RT を用いた研究において、外部環境から入力された刺激は、特徴抽出、同定、反応選択、反応プログラミング、運動調節、反応というような直列的情報処理モデル (Sternberg, 1969) で処理されると考えられていた。反応系の最初の段階である反応選択過程に影響を及ぼすと考えられている S-R 整合性は、P300 の潜時には影響しない (Duncan-Johnson and Kopell, 1981; McCarthy and Donchin, 1981; Magliero et al., 1984) が、P300 潜時は刺激の弁別性などの知覚・認知機能に関連する変数の操作に対して敏感に変動することが知られており、これらの点から P300 潜時は反応処理系 (behavior process) の活動は反映せず、反応選択の前になされているであろう刺激評価、認知過程といった刺激処理系 (cognitive process) の活動を反映する指標であると考えられてきた。

しかし、人間の情報処理は何かの刺激に注意を向けたとき、それが何であるか “what is it?” という反応と、何をすべきか “what is to be done?” という反応の両者が同時に賦活され、この刺激処理系 (stimulus processing system) と反応処理系 (response processing system) が並列して進行しうると考えられる。このような並列情報処理モデルを採用すると、RT が P300 潜時にしばしば先行するという事実も矛盾なく説明できる。また、P300 の発見当初から報告されてきた主観的確信度や覚醒度、注意といった変動要因は、この 2 つの処理系を上位レベルで支配する組織制御系 (organizing process) の存在を示唆するものである (平松ら, 1985)。

第 2 節 運動トレーニングや活動に伴う神経系の変化に関する 先行研究

1. 神経・筋の変化に関する研究

1951 年すでに De Lorme と Watkins はトレーニングによる筋力増加の時間的過程の中で、少なくとも 2 つの要因が関与していると仮説を立てた。彼らは、初期の筋力増加が筋の横断面積のような形態学的変化以上に早くから認められることから、運動学習効果が筋力発揮に大きな影響を及ぼすとした。その後、超音波法や、核磁気共鳴映像 (magnetic resonance imaging : MRI) を用いて測定したトレーニング初期に筋横断面積には変化が認められないことが示され (Ikai and Fukunaga, 1970; Ploutz et al., 1994)、トレーニング初期の筋力増加は筋の発揮能力の変化によるものであり、これは神経系の適応現象であることが明らかにされた (Narici et al., 1996; Sale and MacDougall, 1981)。これまでの筋電図学的研究では、この神経的要因が神経細胞の興奮水準、運動単位の動員様式や発火頻度、同期的な活動の増加などの改善によるものであることがあげられている (森谷と吉武, 1999)。

短期間の運動学習効果においても筋電図学的、運動力学的に検討されている。それらの研究においては、運動学習後に力発揮の加速度や平均周波数 mean power frequency (MPF) の増加、および筋放電量が減少することなどから、より少ない運動単位の動員と、速筋線維の選択的な動員で運動が遂行されるといった効率的な神経的要因の適応変化が認められている (Flament et al., 1999; Moritani, 1993)。

また、最大随意収縮 (maximal voluntary contraction : MVC) は、催眠状態や、かけ声、薬物などにより変化し、電気刺激などで筋を支配する神経を刺激すると随意最大筋力の 30% 以上も強い力が発揮されることが報告されている (猪飼と石井, 1961b)。このことは、脱制止現象による神経・筋の興奮水準の変化に依存している可能性を示唆しており、平常では筋を最大限収縮させるための脳の興奮水準が 100% に満たないことを示している。

これらの差は筋力トレーニングによってなくなることから、トレーニングは、最大筋力発揮時の脳の興奮水準をも高めることを示している。

2. 脳の可塑的变化に関する研究

大脳皮質の機能的モジュールは、運動や特定の動作を繰り返すことで、一次感覚運動野に構築されるものと考えられる。そして、それは固定的ではなく、運動トレーニングやリハビリテーションで繰り返し使用する筋の支配領域は拡大し、逆に使わないとその領域は縮小、あるいは使う筋の領域に置き換わるといった経験や環境に応じて柔軟に脳が変化する性質、すなわち脳の可塑性をもつ。この脳の可塑性は、学習や記憶の細胞レベルにおける基礎過程と考えられ、これを土台とした学習や記憶のメカニズムの解明に関心が集められている。

近年、脳画像法を用いた測定技術の発達により、感覚運動野に再編成が起こるという報告がなされ、動物実験 (Jenkins et al., 1990; Nudo et al., 1996) だけでなく、ヒトにおいても機能的磁気共鳴画像撮影法 (functional magnetic resonance imaging : fMRI) や、経皮的磁気刺激法 (transcranial magnetic stimulation : TMS) によって示されている (Karni et al., 1995; Pascual-Leone et al., 1994, 1995)。これらの報告では一貫して、特定の運動の組み合わせや共同筋が頻繁に使われることにより、感覚運動野の再現領域が特異的に拡大することを示している。また、体育科学の分野においてもスポーツ活動と脳の可塑性については興味もたれ、Pearce et al. (2000) は、ラケット競技選手における運動野の興奮性ならびに機能的再現領域について競技レベルで検討したところ、利き手においてのみ興奮性の増加とトポグラフィーの変化が認められたことから、複雑で高度なスキルの獲得や保持に関係した運動野もしくは皮質運動経路に長期的な可塑的变化が生じたことが示唆されている。

このような可塑的变化の機序には出生直後の発育段階における変化と、成人とでは異なる。すなわち、成長発達に伴う可塑性は、細胞の移動や分

化、軸索の成長、樹状突起の分岐形成、神経伝達物質の合成、シナプス形成、退行現象などの構造的変化に大きく依存している。一方、成人においては、運動や特定の動作に依存した、大脳皮質細胞の興奮性やシナプス結合の強固変化といった伝達効率の変化によることが大きいと考えられている(松村, 2002)。しかしながら大脳皮質に起こるこれらの部分的な変化が、ヒトの高次脳機能にどのように関与しているかは明らかでない。

第 3 節 運動トレーニングと感覚—運動系の情報処理過程に関する先行研究

1. 認知機能テストを用いた情報処理過程に関する研究

ヒトにおいて、運動による情報処理過程への影響は、主に認知機能テストや RT を用いた研究が心理学の分野で盛んに行われてきた。これらの研究においては、運動が気分や情動といった心理学的変化をもたらす(Folkins and Sime, 1981; Morgan, 1974)、課題遂行に伴う情報処理過程にも影響するであろうという考えから、一過性の運動の影響として、さまざまな運動強度や持続時間が設定され、運動中や運動の前後のテストパフォーマンスが検討されてきた。その結果は、それぞれの条件において一致しておらず、運動遂行中、運動後ともに認知能力を促進する(Gutin, 1972; Moya -Albiol et al., 2001)、もしくは認知能力には影響はない(Fery et al., 1997)といった矛盾した見解であった。これは、運動による覚醒水準の変化や疲労といった影響や(Pllip, 1986)、個人の身体機能の差異(Gutin, 1966; Gutin and DiGennaro, 1968)などが複雑に関与していることが要因としてあげられた。

長期間の運動による影響では高齢者を対象として、それぞれ有酸素運動、無酸素運動を実施したグループと、行わなかったグループを比較したところ、認知機能テストのパフォーマンスは、有酸素運動を行ったグループでのみ改善が認められたことから、有酸素運動能と認知機能との関係が示さ

れている (Dustman et al., 1984)。いづれにしても、これらの方法からだけでは、運動が認知機能について及ぼす影響について明らかにすることはできず、より実体的に調べることの必要性が提案された。

2. 電気生理学的指標を用いた情報処理過程に関する研究

脳機能における運動の影響をより理解するために、認知機能テストのみによる評価から、電気生理学的研究が行われるようになった。初期の研究では皮質覚醒の一つの指標として考えられる EEG 活動が調べられ、身体能力の高い被験者で α パワーの増大を示すというような、身体トレーニングが電気生理学的データを変容させることが観察された。さらに、電気生理学的研究は ERP や EP の成分に注目し調べられた。EP を用いたより早期の感覚処理過程の検討では、ラケット競技者における視覚誘発電位 (visual evoked potential : VEP) の P100 潜時が非競技者より速いことから、トレーニングによる速い視覚-空間情報の処理能力の向上を反映していると示唆している (Delpont et al., 1991)。一方、Thomas and Mitchell (1996) は、体操選手と長距離選手、非競技者の体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential : SEP) を比較し、体性感覚経路に長期間の運動による影響はないことを報告している。

ERP を用いたより高次の脳機能に関する検討では、Bashore (1989) や Dustman et al. (1990, 1994) によって、運動を行っている高齢者では、加齢とともに起こる P300 潜時の遅延がみられないことが示された。この結果は、運動が中枢神経系の機能と優れた認知能力に貢献していることを意味している。さらに近年、Polich and Lardon (1997) は、身体運動の経験のある成人では、P300 振幅が増大することを示し、身体運動が脳血流の増進によって ERP に影響を及ぼすと結論した。しかし彼らが対象とした被験者は、競技種目や競技レベルなどが統一されていないことが問題とされた。その後 Magnie et al. (2000) は、自転車競技者と非競技者では、安静時の P300 に違いはないが、一過性の自転車運動後に測定された P300 は競技者で振幅は

大きく、潜時は短いことが示された。このような一過性の運動負荷による ERP の変動についても、いくつか報告がみられるが、結果は運動強度により大きく異なり一貫した知見が得られていない (Nakamura et al., 1999; Nishihira et al., 1999)。

第III章 研究の目的と構成

第1節 研究の目的

運動トレーニングとは、一定のインターバルをおいて断続的に運動を繰り返すことであり、1回の運動刺激が長期間にわたって生体に与えられる。1回の運動の刺激により生体の各器官は、それに応じた機能の促進や抑制を促すがこれが適切な程度でかつ繰り返されることにより、生体の諸機能が運動に適応した状態となり、トレーニングをされた身体となる。当然、このトレーニングの効果は一過性の運動による影響とは異なるため、これらを明確に区別して運動の効果を論じる必要がある。

本研究の目的は、長期間および短期間の運動と脳内情報処理過程との関係を検討することにより、運動の反復による中枢神経系の合目的な適応変化が、感覚－運動処理過程と運動制御機構にいかに関与しているかという機能的意義を明らかにするとともに、運動効果における理論的背景のさらなる理解を示唆することである。

第2節 研究の方法

本研究は、前節の目的を達成するために実験室的に統制された条件で研究を進めていくものとする。本研究では、中枢神経系における感覚－運動処理過程を反映する指標としてERPとEMG-RTを用いた。ERPはEMG-RTとともに古くから研究が非常に多く、行動指標と同時に記録することによって課題遂行中におけるヒトの高次脳機能を非侵襲的に評価でき、時間分解能に優れていることから、神経生理学や臨床研究など複数の分野で用いられており、一般的な知見が得られていることから選んだ。ERPのなかでも特にP300やCNVは、感覚－運動処理過程における高次脳機能（注意、期待、予測、意思決定、運動準備など）をとらえる有効な指標であるとされている。さらにEMG-RTは、反応のパフォーマンスを行動レベルで評価

することができ、ERP と同時に記録することによって、より実体的にヒトの情報処理過程を非侵襲的にとらえる有効な指標である。

各研究課題で被験者に賦課する随意動作には、上肢の屈曲動作を選んだ。これは、これまでの ERP に関する研究において上肢を対象にしたものが多いこと、正確な運動を素早く行うには上肢の動作を対象とすると被験者が遂行しやすいこと、さらに、ERP と同時に測定するためのアーチファクトの影響が少ないことなどから決定された。

各研究課題で行われたすべての実験は、あらかじめ被験者に実験の主旨および方法について十分説明し、実験参加の同意を得たうえで行われた。また、ERP に影響を及ぼす因子として考えられる睡眠やアルコール類、刺激物（カフェイン、たばこ等）の摂取については、被験者間において統制し、実験前の生活状況に関して内省報告によるアンケートを実施した。

第3節 研究の構成

本研究では、本章第1節における目的を達成するため、文献研究にもとづいて4つの研究課題を設定した。最初にスポーツ競技者と非競技者を比較することにより、長期的な運動の継続が感覚-運動処理過程に及ぼす影響について2つの研究課題で検討した。続く2つの研究課題において、随意運動の反復による影響を検討した。以下に各研究課題の構成について簡略に示す。

1. 長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程に及ぼす影響（研究課題1）
 - 1-1. 長期的な有酸素運動が感覚刺激処理過程に及ぼす影響
 - 1-2. 競技種目の相違と感覚モダリティ間への影響
2. 長期的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響（研究課題2）
3. 随意運動の反復が感覚刺激処理過程に及ぼす影響（研究課題3）
4. 随意運動の反復が運動準備過程に及ぼす影響（研究課題4）

研究課題 1 では、呈示された感覚刺激に対して反応を行う際の処理過程に、長期的な運動の継続が及ぼす影響について検討するため 2 つの実験を行った。先行研究において有酸素運動による脳機能への変化が示唆されていることから、実験 1-1 では、陸上長距離選手と非競技者を比較し、随意運動を伴う感覚刺激処理過程について検討した。実験 1-2 では、競技種目の特性と感覚モダリティ間の関係について検討した。これらの結果から、感覚刺激の処理過程および随意運動の遂行に長期的な運動の継続が及ぼす影響について明らかにしようとした。

さらに、円滑な随意運動の遂行には呈示された感覚刺激の認知処理過程だけでなく、運動開始前の準備状態が重要であり、パフォーマンスを大きく左右すると推察される。そこで**研究課題 2** では、随意運動を伴う課題と伴わない課題における準備過程について、競技者と非競技者を比較し検討した。この結果から、長期的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響について明らかにしようとした。

研究課題 1、2 において、長期的な運動の継続が反応時間だけでなく、感覚刺激の処理過程および運動準備過程にも影響を及ぼすことが明らかとなったが、このような横断的研究では、運動の反復による経時的な変化を明らかにすることはできない。また、実際の行動やスポーツ場面などにおいては、これまでの課題の反応動作として要求した「素早さ」だけでなく、「正確さ」も重要である。従来、このような課題には、ターゲットに素早く正確に運動指標を合わせるターゲットマッチ課題が用いられている。

そこで、**研究課題 3** では、随意運動を繰り返し反復することによって、パフォーマンスの変動とともに感覚刺激の処理過程がどのように変動するか、また、遂行する運動の相違によって異なる変動動態を示すのかについてバリスティック課題とターゲットマッチ課題を比較し検討した。この結果から、随意運動の習熟過程と感覚刺激処理過程の関係について明らかにしようとした。

研究課題 4 では、研究課題 2 で明らかにされた随意運動の遂行と運動準

備過程の関係および、研究課題 3 で検討された課題に依存した情報処理過程の変動から、運動を繰り返し反復することによるパフォーマンスと運動準備過程の経時的変動について検討した。この結果から、随意運動の習熟過程と運動準備過程の関係について明らかにしようとした。

第Ⅳ章

長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程に及ぼす影響

(研究課題 1)

第 1 節 長期的な有酸素運動が感覚刺激処理過程に及ぼす影響

1. 目的

運動トレーニングと中枢神経系との関連については、実験動物を用いた研究がなされており、長期間の有酸素運動によって脳の構造的なものや神経伝達物質、血管系など根本的な神経系の変化を引き起こすことが報告されている (Dustman et al., 1994)。しかし、ヒトにおいて脳の働きや変化を知るためには非侵襲的な方法を用いて行わなければならない。非侵襲的に研究する手段には脳波 (electroencephalogram : EEG) や事象関連電位 (event related potential : ERP)、脳磁図 (magnetoencephalogram : MEG)、ポジトロン放射断層撮影法 (positron emission tomography : PET) などがあり、特に EEG や ERP は時間的分解能に優れ、脳内活動の変化をミリ秒単位で記録できることから人間行動の解明に貢献する重要な手法である。EEG は特定の事象に関係なく常に揺らいでいる自発的な電位であり、覚醒水準といった持続的な脳の状態を表すのに対し、ERP は何等かの事象の生起に関連して出現する一過性の脳電位変化である。EEG に重畳して観察される ERP の振幅はごく小さいが、パラダイム施行中の EEG を加算し EEG から ERP を分離する平均加算法を用いることにより、ERP は臨床検査に応用されるとともに、ヒトの注意・認知といった高次脳機能を研究する有用な手段として注目されている。ERP を構成する成分のうち、刺激呈示後 75~150 msec に出現する N100 は刺激に対する注意を反映し (Hillyard et al., 1973)、また、刺激呈示後 250~500 msec に出現する P300 は、Sutton et al. (1965) の報告以来、認知機能を反映する電位と考えられており、これらから脳内の情報処理系列を明らかにしようとする研究が行われている。

ヒトにおいて脳内の情報処理過程と長期的な運動トレーニングに関する

研究では、古くから反応時間 (reaction time : RT) を指標に調べられてきた。RT は一般人と比較しスポーツ競技者で明らかに速く、これは神経系・筋肉系の発達を促す身体トレーニングによるものであると考えられている。さらに RT は、スポーツ経験の程度や競技種目に特有なトレーニング内容による差異も報告されている。この RT は、主に反応刺激呈示後から筋放電開始までの中枢内の処理時間 (筋電図反応時間 : EMG-RT) と、筋放電開始から実際の運動開始までの時間に分けられ、RT の遅速は EMG-RT に大きく左右される。したがって、競技者における RT の短縮機構は、長期間のトレーニングが中枢神経系に影響を与えた結果である事が推察される。

そこで研究課題 1 では、競技者と非競技者を比較し、長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程に及ぼす影響について、ERP の N100 および P300 と行動指標とされる EMG-RT を同時に記録することにより検討することを目的とする。

2. 方法

2-1. 被験者

被験者は、7年以上競技を目的とした運動トレーニングを継続しており、陸上競技の長距離を専門種目としている競技者 13 名 (平均年齢 19.8 ± 0.8 歳) および、習慣的に運動を行っていない健康成人 13 名 (平均年齢 20.9 ± 2.6 歳) であった。(表 1-1-1) 被験者はいずれも神経疾患に関する既往歴はなく、右利きであった。被験者には事前に実験の主旨および方法について十分説明したうえで実験参加の同意を得た。実験中、被験者は 23~25 度に空調されたシールドルーム内の安楽椅子に腰掛け、安静を保つよう指示された。被験者は右の前腕を回内位、肘関節角度が約 120 度となるよう実験装置に固定された (図 1-1-1)。

2-2. 刺激呈示

ERP の測定は聴覚刺激による選択反応課題を用いた。音刺激は開眼にて

ヘッドホンから両耳同時に呈示した。標的刺激は 2,000 Hz、非標的刺激は 1,000 Hz とし、呈示確率は 2 : 8 でこれらがランダムに出現する刺激系列を用いた。刺激間隔は 2 sec とし、いずれも持続時間は 50 msec、立ち上がり／立ち下がり時間は 5 msec、強度 65dB とした。

2-3. 課題

次の 2 つの課題を行った (図 1-1-2)。

計数課題

2,000 Hz の標的刺激の呈示回数を数えさせ、課題終了後にその数を報告させた。なお、数える時に口や指を動かして数えないように、また非標的刺激は無視するよう指示した。

反応課題

2,000 Hz の標的刺激に対してできるだけ素早く利き腕の肘関節を伸展させる反応動作を行い、非標的刺激は無視するよう指示した。課題施行前に十分練習を行い、正確に反応できることを確認し、課題を開始した。

2-4. 記録・データ処理

ERP

ERP の記録は国際 10-20 法に従い、Fz、Cz、C3、C4、Pz の頭皮上 5 部位より両耳朶連結を基準として Ag/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。記録条件は高周波フィルター 100 Hz、時定数 0.3 sec とし、電気抵抗はすべて 5k Ω 以下とした。同時に、眼球運動に伴うアーチファクト混入を検出するため、眼電図 (electro-oculogram : EOG) を左眼窩上下縁から導出記録した。得られたアナログデータは DAT テープに記録し、A/D 変換ボードを介した後、刺激前 200 msec から刺激後 600 msec を分析区間として、サンプリング周波数 250 Hz で波形解析ソフト (EPLIZER, キッセイコムテック) を用

いて解析を行った。眼球運動が分析区間内に認められたときはその区間を分析の対象外とし、15回以上の加算平均処理を行った後、ERPを求めた。分析の対象としたN100とP300は、それぞれ誘発された波形の潜時と極性からN100（刺激呈示後75～150 msecに生じる最大陰性電位）、P300（刺激呈示後250～500 msecに生じる最大陽性電位）と同定して、潜時と振幅の測定を行った。振幅は刺激前100 msecの平均電位を基線として計測した。

EMG-RT

反応動作に伴う筋電図は、動作肢の上腕三頭筋に表面電極を装着し、高周波フィルター1500 Hz、時定数0.03 secで導出した。EMG-RTは、加算の対象とした試行の刺激開始から急激な筋放電の始まる時点までとして計測した。

2-5. 統計処理

ERP各成分の振幅、潜時についてはそれぞれ、グループ（競技者、非競技者）×課題条件（反応課題、計数課題）×導出部位（Fz, Cz, Pz, C3, C4）の3要因による混合型分散分析（1要因が被験者間要因、2要因が被験者内要因）を行った。EMG-RTは、グループ（競技者、非競技者）による1要因の分散分析を行った。主効果が認められたときはFisher's Protected LSDによる多重比較を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。また、分散分析の結果はGreenhouse-Geisser法による自由度の修正を行い、有意確率を再計算した。有意差検定での有意水準は5%未満とした。

3. 結果

3-1. 波形

図1-1-3は全被験者を各課題、グループごとに総加算平均したERPの波形と反応課題にともなう筋電図の一例を示している。本研究では、すべての被験者、すべての条件でN100、P300を確認できた。

3-2. EMG-RT

反応課題における競技者群の EMG-RT は、非競技者群よりも有意に速かった ($p < 0.001$, 図 1-1-4, 表 1-1-2)。

3-3. N100

N100 潜時は、課題とグループの両要因において交互作用 ($F = 5.722$, $p < 0.05$) が認められたので下位検定を行った結果、非競技者群において N100 潜時が、計数課題よりも反応課題で有意に延長した ($p < 0.001$, 表 1-1-3)。しかし、いずれの課題においても競技者群と非競技者群の間に差は認められなかった。

N100 振幅は、導出部位において主効果が認められ ($F = 6.799$, $p < 0.001$)、前頭-中心優位の頭皮上分布であった ($Pz < Fz, Cz, C3, C4$)。また、課題とグループの両要因において交互作用 ($F = 4.866$, $p < 0.05$) が認められたので下位検定を行った結果、非競技者群において Cz と C4 における N100 振幅が計数課題よりも反応課題で有意に大きな値を示した(表 1-1-4, 図 1-1-5)。しかし、いずれの課題においても競技者群と非競技者群の間に差は認められなかった。

3-4. P300

P300 潜時は、課題とグループの両要因において交互作用 ($F = 4.989$, $p < 0.05$) が認められたので下位検定を行った結果、計数課題において競技者群の P300 潜時は非競技者群よりも有意に速い結果が得られた ($p < 0.001$, 表 1-1-5)。また、非競技者群においては P300 潜時が計数課題よりも反応課題で有意に短縮した。

P300 振幅は、課題と導出部位の両要因において交互作用 ($F = 3.294$, $p < 0.05$) が認められたので下位検定を行った結果、競技者群で Fz、Cz、C3 における P300 振幅は計数課題よりも反応課題で有意に減少した。非競技者

群においては Cz、C3 で同様に減少した。さらに、競技者群では計数課題と反応課題の両課題において Pz の振幅が他の全ての導出部位より有意に大きな値を示した（表 1-1-6, 図 1-1-6）。いずれの課題においても競技者群と非競技者群の間には統計的に有意な差は得られなかったが、反応課題において Fz、Cz、C3、C4 では非競技者群より競技者群でより小さな値を示しているのに対し、Pz のみ競技者群でより大きな値を示すという特徴的な頭皮上分布の傾向にあった。

4. 考察

本研究では、脳内情報処理過程の時間的指標とされる ERP の構成成分である N100 と P300、同時に行動的指標とされる EMG-RT を記録し、競技者群と非競技者群を比較することにより、長期的な運動トレーニングが感覚刺激処理過程におよぼす影響について検討した。

我々は、外界からの様々な刺激情報に反応しながら生活している。Hillyard et al. (1973) は、注意を向けていない刺激情報についても何らかの処理が行われていることに着目し、N100 と P300 が情報処理過程においてそれぞれ異なる注意効果をもつことを主張している。すなわち、ヒトは刺激情報として知覚できたもののみを受容し、処理しているだけでなく、知覚できない刺激情報も無意識的に処理をしている。そしてさらに情報処理過程が進行すると、受容した刺激情報から必要な情報を自ら選択的に知覚し認知、判断している。

本研究において、N100 潜時、振幅ともにどちらの課題においても競技者群と非競技者群間に有意な差は認められなかった。Polich and Landon (1997) は、競技者と非競技者との比較から、標的刺激に対する N100 に差は認めおらず、本年研究と同様の結果であった。N100 は、注意を向けていなかった刺激よりも注意を向けている刺激で増大し、“刺激に対する構え” (stimulus-set) を反映するものと考えられている。すなわち、この N100 における注意効果は、刺激の物理的特徴に基づいて刺激処理初期段階で注意チャンネル入力を受容し、非注意チャンネル入力を阻止する単純な弁別が行われ、この情報選別でなされる結果であると解釈されている (Broadbent, 1958)。しかし、課題を課さなくとも刺激を呈示することによって誘発される電位であり、この段階では「刺激がそこにある」という刺激の存在は知覚しているが、その細かな特徴まではまだ識別していない。つまり、N100 は刺激に対する注意過程を反映する内因性成分と、単に刺激が脳に入力されたために自動的に起こった外因性成分とを合わせ持った成分であると考えられる (丹羽, 1997)。Näätänen and Picton (1987) は、この

二つの成分について聴覚刺激による ERP および MEG を用いた検討から、6 種類のサブコンポーネントが抽出できるとしている。すなわち、上側頭部の聴覚皮質起源の成分、外側側頭・頭頂連合野皮質起源の成分、運動・前運動野皮質起源の成分、ミスマッチ陰性電位、処理陰性電位の側頭成分、処理陰性電位の前頭成分の計 6 成分であり、前三者が外因性の N100 成分、後三者が内因性成分であると述べている。本研究では、グループ間に差が認められなかったことから、刺激に対する外因的および内因的要因、すなわち感覚入力における物理的な影響や刺激に対する注意・集中度のどちらも競技者と非競技者で同様であったものと考えられる。

一方、課題間の比較において、競技者の N100 振幅および潜時は計数課題と反応課題に差が認められなかったのに対し、非競技者の N100 振幅は計数課題より反応課題で有意に増大し、潜時は Cz、C4 で有意に延長するといった随意運動の遂行に伴う変動が認められた。計数課題と反応課題において、呈示された刺激系列、すなわち標的刺激と非標的刺激の呈示順序は異なるものの、標的刺激の物理的特徴は同様であるため、非競技者における課題間の N100 の変化は、内因的な要因によるものが大きいと考えられる。N100 に重畳していると考えられる内因性成分は、Näätänen and Michie (1979) が示した 3 つの成分他にもいくつかの陰性電位の影響が考えられている。Hansen and Hillyard (1980) は、N100 の注意による振幅の変化に、選択的注意効果に関する成分とされる注意関連電位 (negative difference : Nd) が関与していることを示している。Nd は課題に無関連な刺激処理を積極的抑制、排除し、処理の効率化をはかる過程を反映し、聴覚では刺激呈示後約 60 msec 頃より前頭-中心優位に出現する。本研究における N100 の頭皮上分布は、前頭-中心優位でありこれと一致する。さらに Nd は、早期成分と後期成分に分けて論じられており (Näätänen and Picton, 1987)、特に後期 Nd は最初の選択で受容された刺激の引き続きの処理、あるいは選択的注意の維持を反映し、課題が容易なとき面積が減少する (林田ら, 1990; Näätänen, 1982)。これらのことから、非競技者では反応動作が必要な

課題と必要ではない課題では、刺激に対する注意過程が異なり、随意運動を伴うことによって反応課題ではより困難性が増したと考えられるが、競技者では、注意過程や困難性は課題間で同様であったと推察される。

また、増村と四宮（1992）は、N100 振幅と課題遂行中脳波の $\beta 2$ パワーとの間に正の相関を認め、 $\beta 2$ パワーの増大は元来緊張の高いヒト、または検査時の緊張を反映し、このような状態は N100 振幅の増大をもたらすと報告している。このことから、非競技者では計数課題よりも反応課題でより緊張していたことが考えられる。さらに、反応課題では標的刺激に動作を伴う出力が必要とされるため、刺激情報の認知処理過程において音刺激に対する準備とともに、反応動作という運動準備状態もつくらなければならない。したがって、素早い反応動作を要求される反応課題において非競技者の N100 振幅と潜時は、この運動準備状態の影響を受けて変化したが、競技者ではその影響を受けていなかったことが考えられる。本研究において、N100 潜時、振幅ともにどちらの課題においてもグループ間に有意な差は認められなかったが、課題の違いによる中枢の準備状態は、競技者と非競技者では異なっていることが推察される。

一方、刺激呈示後、約 300 msec に出現する P300 は刺激のモダリティに関係なく頭頂部優位な頭皮上分布を示し（Snyder et al., 1980）、大脳半球全体を覆うように両側性に広がる。刺激の識別が困難なときや難易度の高い課題を要求すると潜時が延長すること（Goodin et al., 1983）、また、被験者の確信度が高いほどその振幅が大きくなり（Squires et al., 1975）、刺激が被験者にとって意味を持つときや被験者の注意・集中度が高いときに振幅が大きくなること（McCarthy et al., 1989）から、情報処理過程において刺激の認知を反映する内因性成分と考えられている。P300 の認知に関する意義は、刺激の評価、および文脈の更新を反映するものであると理解されている（Donchin-Johnson and Donchin, 1982）。本研究では、P300 振幅に競技者と非競技者の差は認められなかった。Polich（1986）は、視覚刺激と聴覚刺激による競技者の P300 振幅は、非競技者よりも大きな値を示したと報告し

ており結果は一致していない。この理由として、先行研究ではテニスやバレーボール、バスケットボールなど被験者の運動種目やレベルは統一されていないのに対し、本研究では全被験者が競技を目的とした高レベルの有酸素トレーニングを行っている長距離選手であり、運動トレーニングの特性の違いが考えられる。ERP の振幅と情報処理を対応づけることに関しては、ERP を構成する各成分の発生機序が正確に解明されていないことに加えて、各段階における処理活動そのものが ERP 成分を形成した証拠はないために疑問視されている。各段階における処理過程そのものを直接反映しているというよりは、その処理の実行に随伴する活動を反映したものとも考えられるからである。Mulder のモデル (1995) によると、種々の ERP 成分の潜時は各情報処理段階に合致するが、振幅の変化は一連の情報処理過程で要求されるエネルギー資源を反映したものと解釈されている。さらに、Picton (1992) は、P300 の振幅は課題に対する処理資源の分配量に依存すると主張している。つまり今回のように比較的簡単な課題である場合、長期間にわたる高レベルの運動トレーニングにより、一連の情報処理過程で要求される処理資源の分配量、すなわち刺激の処理に関わる注意の分配量が少なくても課題が遂行可能であったのではないかと推察される。

Barrett et al. (1987) は、動作課題と計数課題の課題間による比較で、計数課題における P300 振幅は動作課題のそれよりも大きい値を示し、P300 潜時に関しては計数課題より動作課題で有意に短い値を示したと報告している。本研究においても同様に P300 振幅は反応課題よりも計数課題で大きい値を示し、P300 潜時は計数課題よりも反応課題で短縮した。これについては、動作課題の場合、随意筋収縮に先行して記録される運動関連脳電位 (movement-related cortical potential : MRCP) の影響が考えられる。MRCP のなかでも、その運動に部位特異性をもった準備状態を反映する陰性電位 NS' (negative slope) は手の運動の場合、反対側中心部に最大となる。本研究において動作肢と反対側の左半球優位に NS' が生じ、P300 に重畳するため P300 振幅ばかりか頂点潜時も短縮する (Barrett et al., 1987; 音成ら、

1986) 可能性が考えられる。

本研究において、計数課題での競技者の P300 潜時は非競技者よりも有意に短縮した。したがって、長期的な運動トレーニングにより刺激の評価時間は短縮し、さらに、次にくるあらたな刺激の情報処理に備える準備状態が速くつくられていることが推察される。しかしながら、運動トレーニングの効果は計数課題のみならず反応課題においても認められるべきではないかと考えられるが、本研究の結果、反応課題にはグループ間に P300 潜時の有意な差は認められなかった。これについては、反応課題における競技者の P300 振幅が非競技者と異なる特徴的な頭皮上分布を示した影響が考えられる。すなわち、競技者において計数課題と反応課題のどちらの課題においても Pz の振幅が他の全ての導出部位より有意に大きな値を示したが、計数課題での P300 振幅では全ての部位において競技者が非競技者よりも大きい値を示したのに対し、反応課題では Pz 以外の導出部位では非競技者より小さな値を示した。頭頂部で振幅が優位の P300 (posterior P300) は積極的にその刺激に関連する課題を行うことで生じると考えられている (下河内ら, 1988)。ヒトがある目的を持った場合その目的に大切な信号をフレームアップして他の信号を遮断し、たくさんある情報の中から一部の情報を選択する。これは“gating”理論といわれ、皮質下も大きく関与していると考えられる。これらのことはヒトが長期にわたって繰り返し練習を行う際、生体にとって不必要な情報を効率良く処理し、運動を円滑に遂行するプログラムを形成しヒトの脳神経系の運動調節能を精微に行うことができる理由である (西平, 1998)。つまり、本研究において反応課題における競技者の posterior P300 が特に顕著に認められたことは、刺激の入力から反応動作出力までを効率良く処理するためであると考えられる。このことは、反応課題における競技者の EMG-RT が非競技者よりも速かったことから明らかである。

反応時間は一般人に比べて競技者で明らかに速く、神経系・筋肉系の発達を促すようなトレーニングを行っているためであることが考えられてい

る (Ando et al., 2001; 猪飼ら, 1961a; Lee et al., 1999; Prince et al., 1977; 与那ら, 1990)。それは競技の経験程度と競技種目に特有なトレーニング内容とが反応時間の速さと関連していることによる (Fontani et al., 1999; Meckel et al., 1995; Olsen, 1956; Pierson, 1956)。この理由としては、大脳-小脳間のループの動員、シナプス効率の変化、ならびに大脳皮質性の興奮レベルの増加などが推測されており (Nishihira et al., 1991)、反応の速さは中枢神経系の働きに非常に影響される。さらに、Groves and Eason (1969) は覚醒水準と注意の要因が視覚性誘発脳波と反応時間に及ぼす影響について検討し、最適な覚醒水準にある時反応時間が短縮すると報告している。しかし、反応課題における P300 潜時は、競技者で速い傾向を示したものの、グループ間に有意な差は認められなかった。人間の情報処理は何かの刺激に注意を向けたとき、「それが何であるか」と評価する感覚・刺激処理系と、「何をすべきか」と反応を行う運動・反応処理系の両者が同時に賦活され、並列して進行しうると考えられている (音成ら, 1986)。P300 は刺激評価という感覚・刺激処理系を反映する指標であり、一方の運動・反応処理系の指標として EMG-RT は、その運動出力の結果である。本研究において反応課題に伴う EMG-RT は、P300 と同時もしくは先行して出現しており、この並列的情報処理モデルを支持する結果であった。

これらより、競技者と非競技者では N100-P300 間に起こる感覚刺激処理過程に違いがあり、その結果として反応動作出力である EMG-RT が短縮したと考えられる。すなわち、競技者は課題遂行時に最適な覚醒水準を保ちつつ、刺激情報に対してその処理の効率化をはかるという合目的性を有することが示唆される。

5. 要約

本研究は、脳内情報処理過程の時間的指標とされる ERP の構成成分である N100 と P300、同時に行動的指標とされる EMG-RT を記録し、競技者と非競技者を比較することにより、長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程におよぼす影響について検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) N 100 は、振幅、潜時とも競技者と非競技者の差は認められなかったが、P300 は計数課題において競技者の P300 潜時が非競技者より短縮した。競技者では N100－P300 間に起こる感覚刺激の処理時間が速いことが示唆された。

(2) 非競技者では計数課題より反応課題で N 100 潜時は延長し、振幅は大きい値を示し課題間の差が認められたが、競技者では認められず、反応動作出力を必要とする課題においても早期の感覚刺激処理は変わらないことが示唆された。

(3) 反応課題における EMG-RT は、非競技者より競技者で有意に速かったが、P300 潜時に差は認められなかったことから、長期的な運動は感覚・刺激処理系よりも運動・反応処理系に影響を及ぼしている可能性が示唆された。また、長距離選手という競技者の種目特性が関与している可能性が示唆される。

表1-1-1. 被験者の特徴とトレーニング頻度

	athletes (n=13)	non-athletes (n=13)
Age (years)		
Mean	19.80	20.90
S.D.	0.80	2.60
Height (cm)		
Mean	169.10	169.50
S.D.	5.20	5.40
Weight (kg)		
Mean	58.00	61.10
S.D.	5.20	7.20
Exercise (h/week)		
Mean	17.30	0.28
S.D.	5.90	0.60
HR (beet/sec)		
Mean	53.80	68.90
S.D.	6.30	9.80

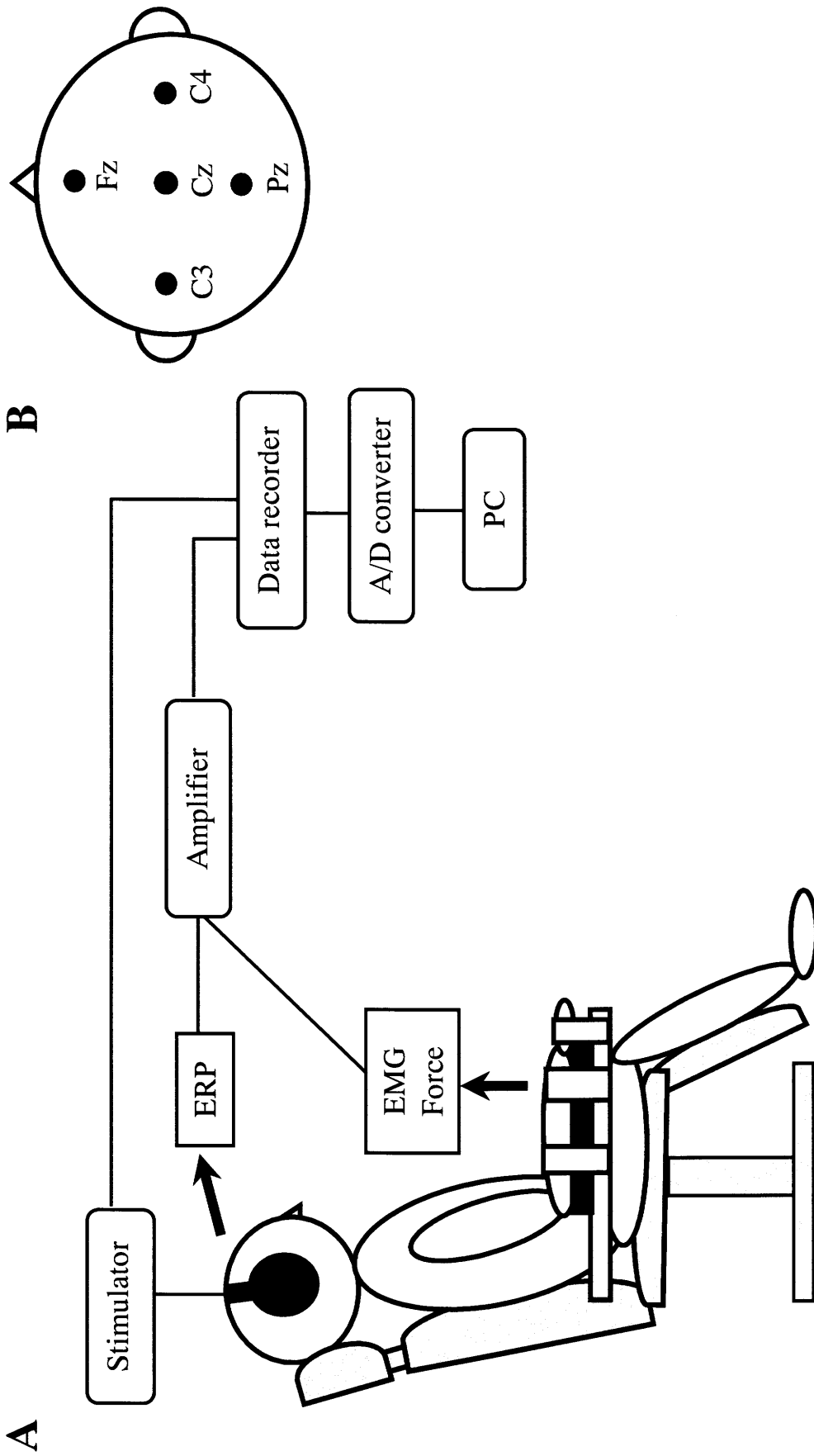
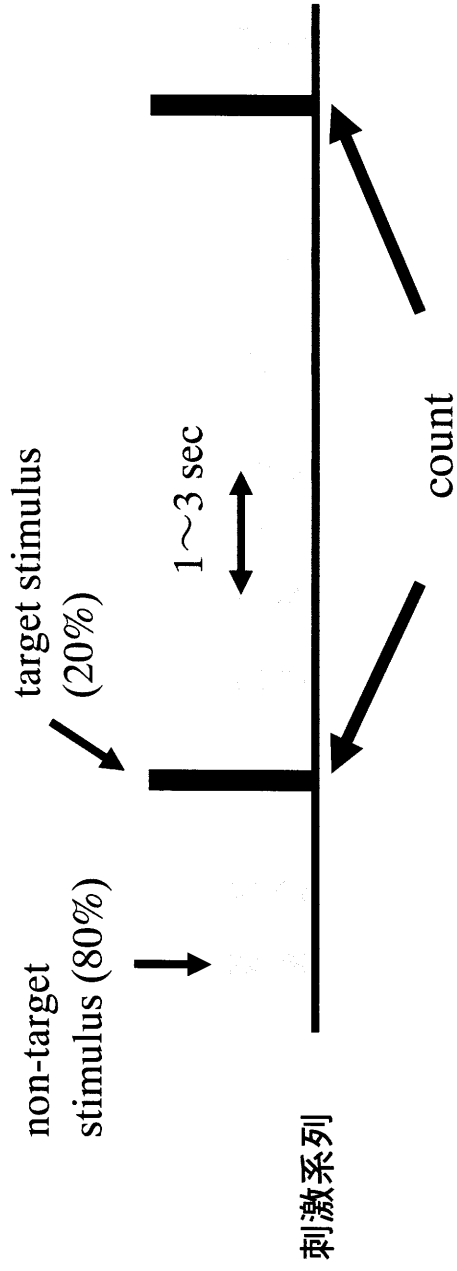


図1-1-1. 実験状況 (A)、およびEEGの記録電極の位置 (B) についての模式図。被験者の右前腕は、ストレインゲージの装着されたプレート上に固定した。また、音刺激を呈示するためヘッドホンを装着させた。記録電極は、国際10-20法にもとづき、被験者ごとに頭皮上の位置が決定された。

A. 計数課題



B. 反応課題

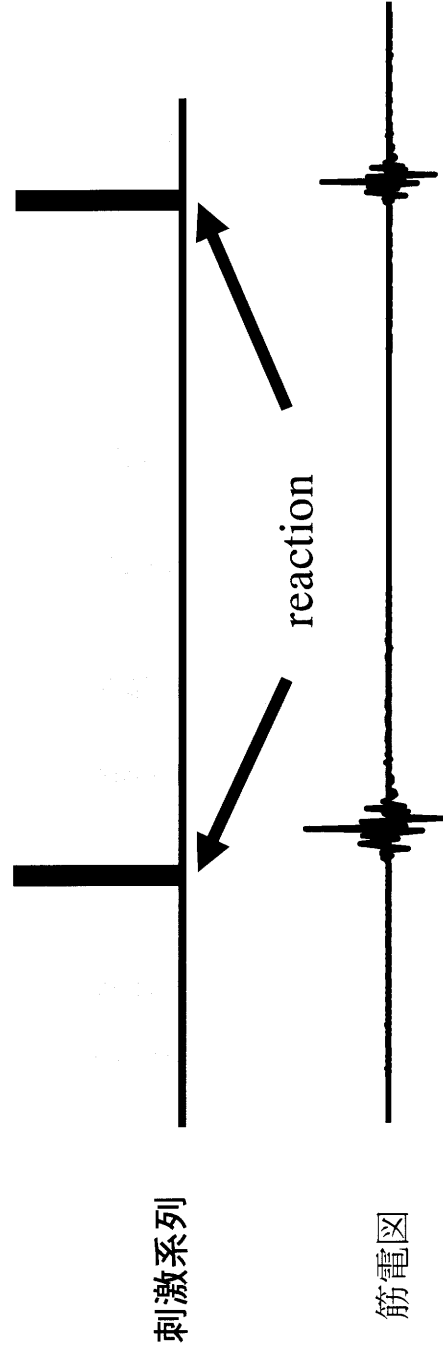
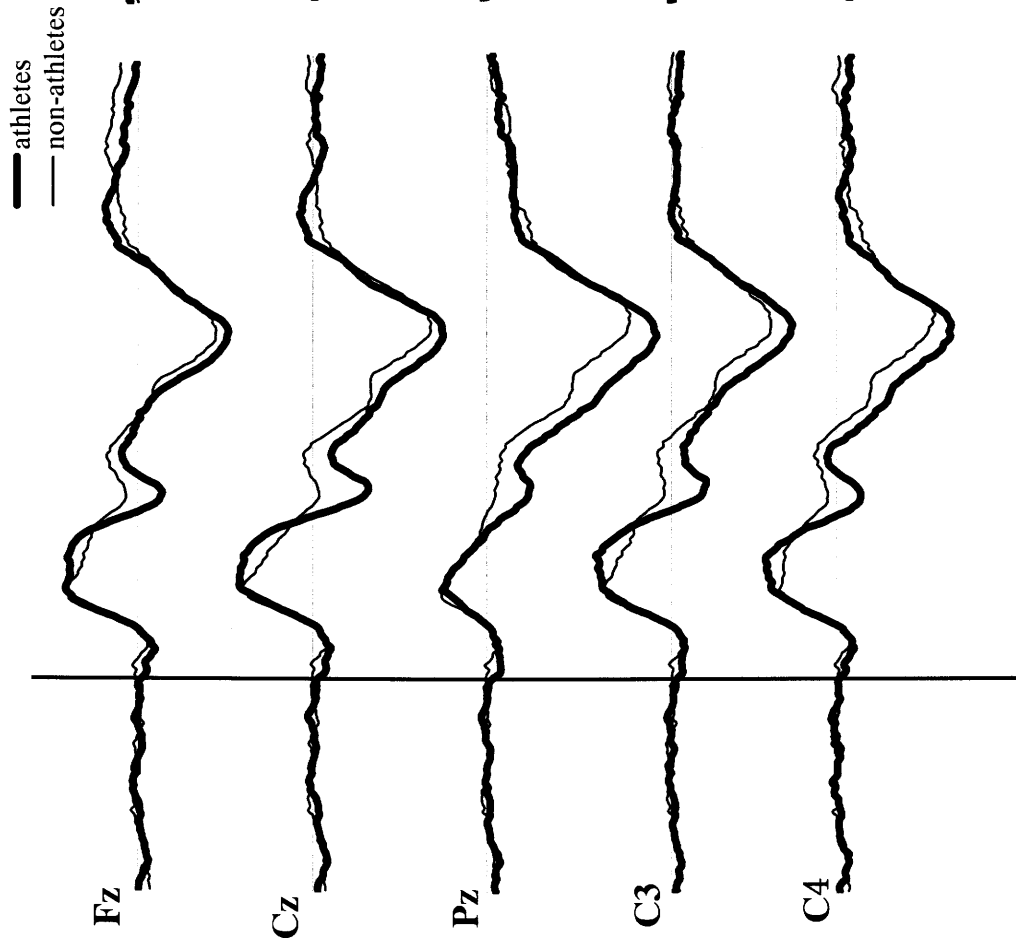


図1-1-2. 実験課題の模式図。計数課題 (A) は標的刺激 (target stimulus; 黒) の呈示回数を数え、反応課題 (B) は標的刺激が呈示されたら素早く反応する課題である。非標的刺激 (non-target stimulus; 灰色) は無視する。実験ではこれらの刺激が2:8の刺激確率で、1~3秒の間隔でランダムに呈示される。最下段は、反応課題において反応動作を行った際の腕三等筋から導出された筋電図を示している。

count task



reaction task

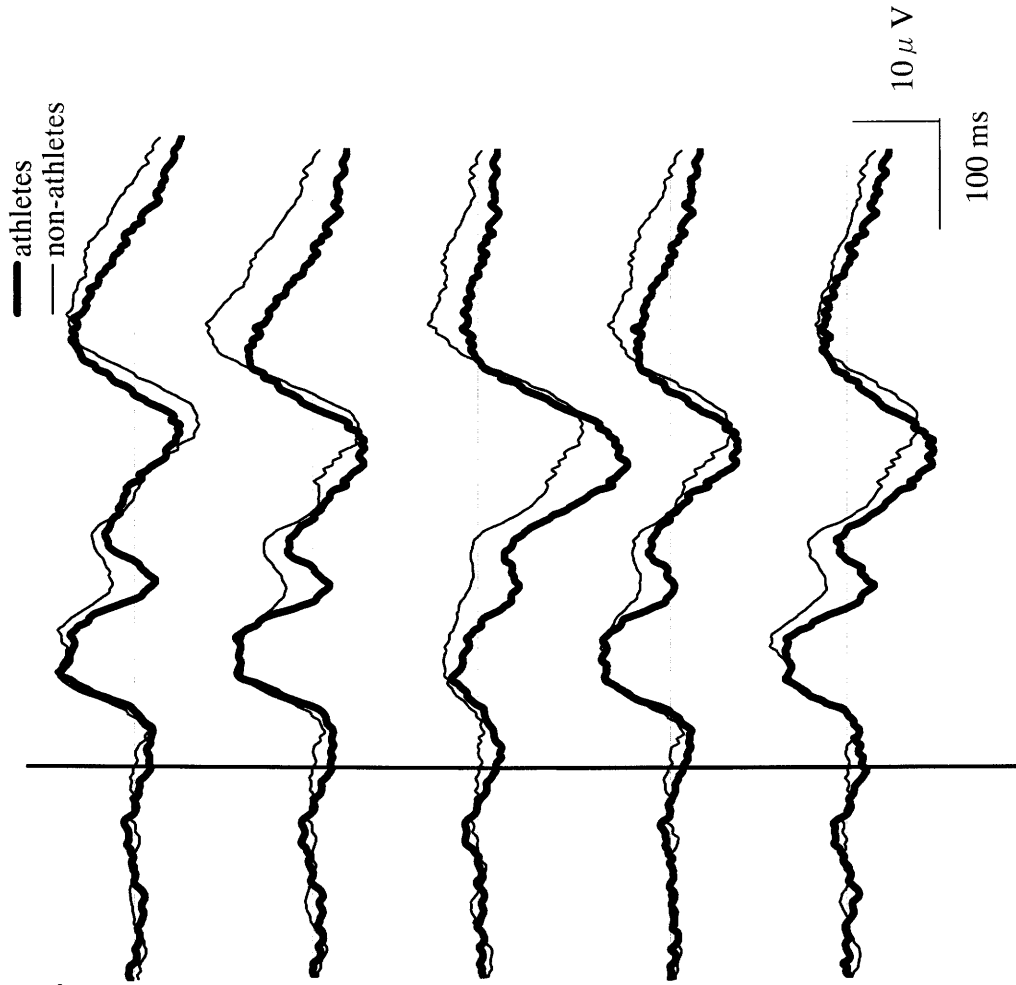


図1-1-3. 標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者のERPグラウンドアベレージ波形。各課題ともに太線は競技者、細線は非競技者を示し、縦線は刺激の呈示時点を示している。刺激呈示時点からの潜時と極性から、それぞれN100 とP300成分を同定した。

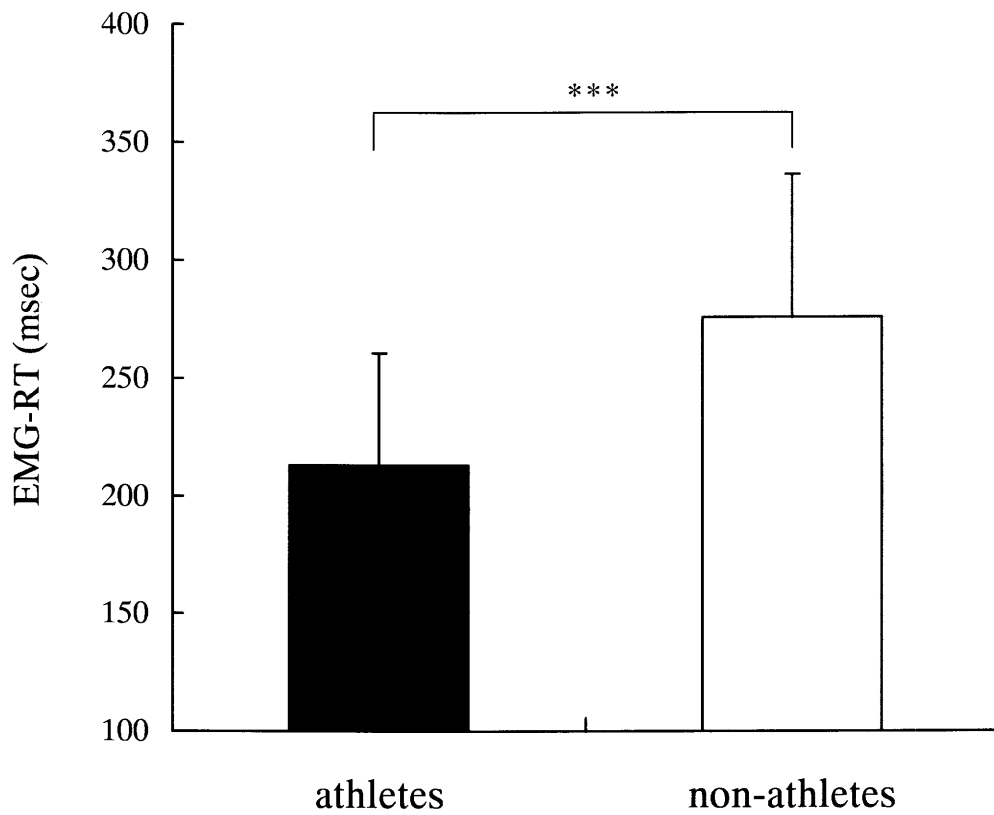


図1-1-4. 反応課題におけるEMG-RTの結果。黒と白の棒はそれぞれ競技者と非競技者のEMG-RTと標準偏差を示している。

*** $p < 0.001$, athletes vs. non-athletes

表1-1-2. 反応課題におけるEMG-RTの結果。非競技者より競技者で有意に速い。

	athletes	non-athletes
EMG-RT (msec)		
Mean	213.10 ***	276.00
S.D.	47.6	60.4

*** $p < 0.001$, athletes vs. non-athletes

表1-1-3. 課題条件ごとに標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者のN100潜時。グループおよび導出部位に主効果はなく、非競技者においてのみ計数課題より反応課題で潜時が延長した。

	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
N100 latency (msec)				
Fz	117.23 ± 24.4	97.85 ± 20.0	108.92 ± 20.0	111.08 ± 21.3 #
Cz	107.69 ± 24.4	96.92 ± 17.4	111.69 ± 19.7	109.23 ± 20.7 #
Pz	90.46 ± 14.2	95.38 ± 18.3	106.15 ± 22.7	106.77 ± 22.2
C3	108.00 ± 23.1	98.15 ± 20.4	105.54 ± 16.0	113.85 ± 22.5 #
C4	102.77 ± 21.8	104.92 ± 22.3	114.15 ± 15.1	116.31 ± 20.3 #

Values are mean ± S.D.

p<0.05, count vs. reaction for non-athletes

表1-1-4. 課題条件ごとに標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者のN100振幅。グループに主効果はなく、非競技者においてのみ計数課題より反応課題で振幅が増大した。

	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
N100 amplitude (μ V)				
Fz	-7.96 ± 4.0 *	-7.92 ± 2.1 **	-8.12 ± 3.8 **	-8.76 ± 2.9 ***
Cz	-7.91 ± 3.8 *	-7.27 ± 2.6 *	-8.89 ± 4.3 ***	-8.18 ± 2.9 **#
Pz	-4.49 ± 3.2	-5.07 ± 2.5	-3.59 ± 3.0	-4.95 ± 2.3
C3	-7.29 ± 3.9	-7.03 ± 1.5 *	-7.49 ± 3.8 **	-7.72 ± 1.4 **##
C4	-6.93 ± 3.0	-6.15 ± 2.5	-6.38 ± 3.4	-7.66 ± 2.8 **

Values are mean ± S.D.

* p<0.05, ** p< 0.01, *** p< 0.001, significant difference between Pz and each other position

p<0.05, ## p<0.01, count vs. reaction for non-athletes

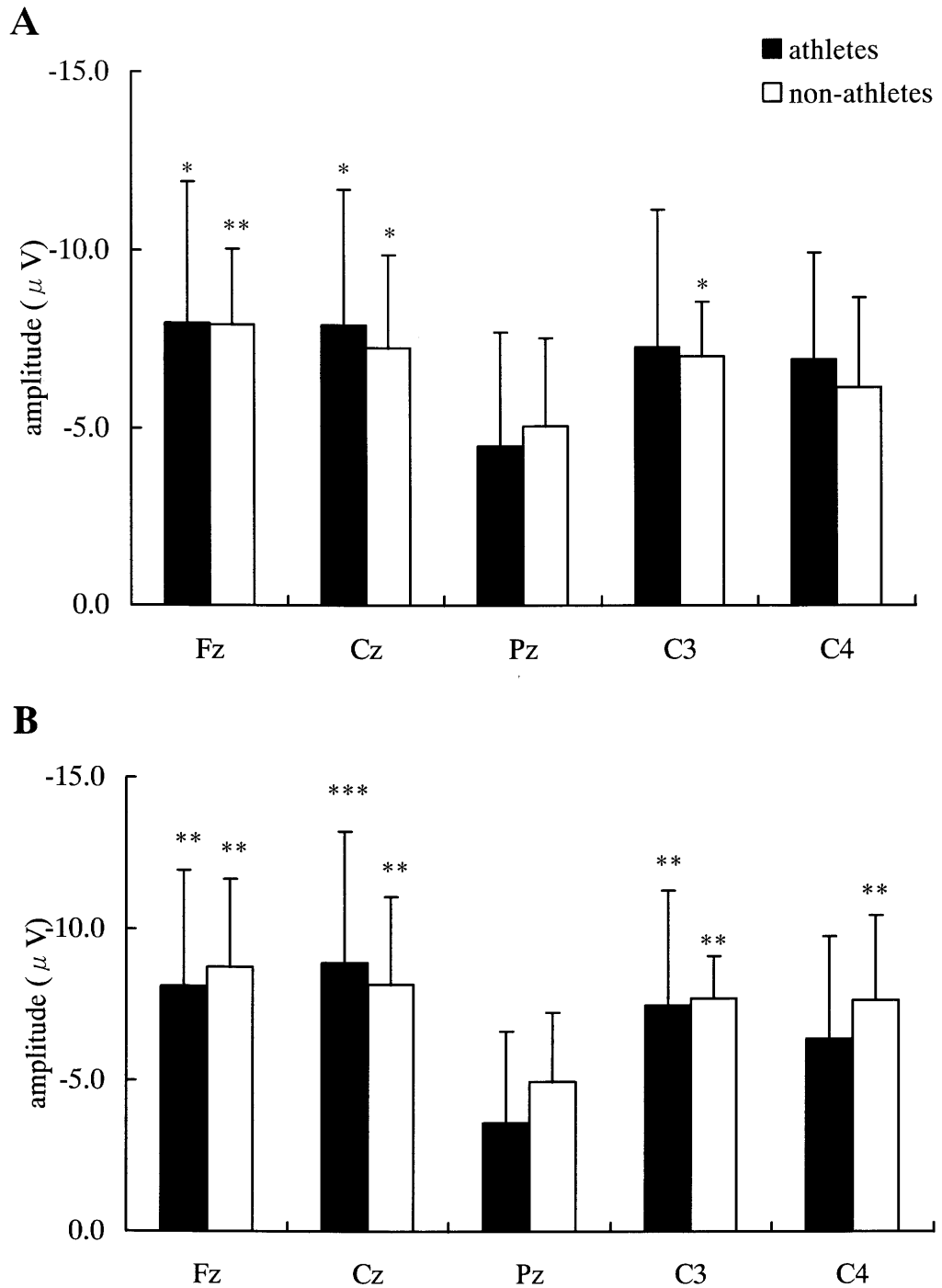


図1-1-5. 各課題条件（計数課題; A, 反応課題; B）におけるN100の頭皮上分布を、競技者（黒）と非競技者（白）ごとに平均振幅および標準偏差で示す。両課題、グループともに前頭-中心優位の頭皮上分布を示した。

** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, significant difference between Pz and each other position

表1-1-5. 課題条件ごとに標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者のP300潜時。導出部位に主効果はなく、計数課題において非競技者より競技者で速い。

	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
P300 latency (msec)				
Fz	332.62 ± 28.0 **	348.62 ± 25.8	328.31 ± 38.0	330.77 ± 24.1 ##
Cz	325.85 ± 35.2 **	348.92 ± 25.5	337.54 ± 70.4	317.85 ± 35.8 ##
Pz	331.38 ± 35.4 **	348.62 ± 24.3	308.62 ± 22.7	320.31 ± 28.8 ###
C3	332.62 ± 29.4 **	346.46 ± 24.0	324.31 ± 39.3	326.77 ± 31.0 ##
C4	334.77 ± 33.6 **	355.08 ± 22.6	314.46 ± 22.5	327.38 ± 30.4 ##

Values are mean ± S.D.

** p<0.01, athletes vs. non-athletes for count task

p<0.01, ### p<0.001, count vs. reaction

表1-1-6. 課題条件ごとに標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者のP300振幅。グループに主効果はなく、計数課題より反応課題で振幅が減少した。

	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
P300 amplitude (μ V)				
Fz	8.79 ± 4.1 ***	8.58 ± 4.2 **	4.88 ± 4.0 ***##	7.65 ± 4.9 *
Cz	12.35 ± 3.9 *	12.05 ± 4.9	5.40 ± 3.5 ***###	6.45 ± 4.9 ***##
Pz	15.63 ± 4.5	14.13 ± 5.3	13.60 ± 3.8	11.39 ± 4.7
C3	10.84 ± 3.8 **	9.91 ± 4.3 *	6.37 ± 3.4 ***##	6.78 ± 3.9 **
C4	10.42 ± 3.6 **	9.77 ± 4.7 *	7.62 ± 3.7 ***	7.86 ± 3.7

Values are mean ± S.D.

* p<0.05, ** p<0.01, *** p<0.001, significant difference between Pz and each other position

p<0.01, ### p<0.01, count vs. reaction

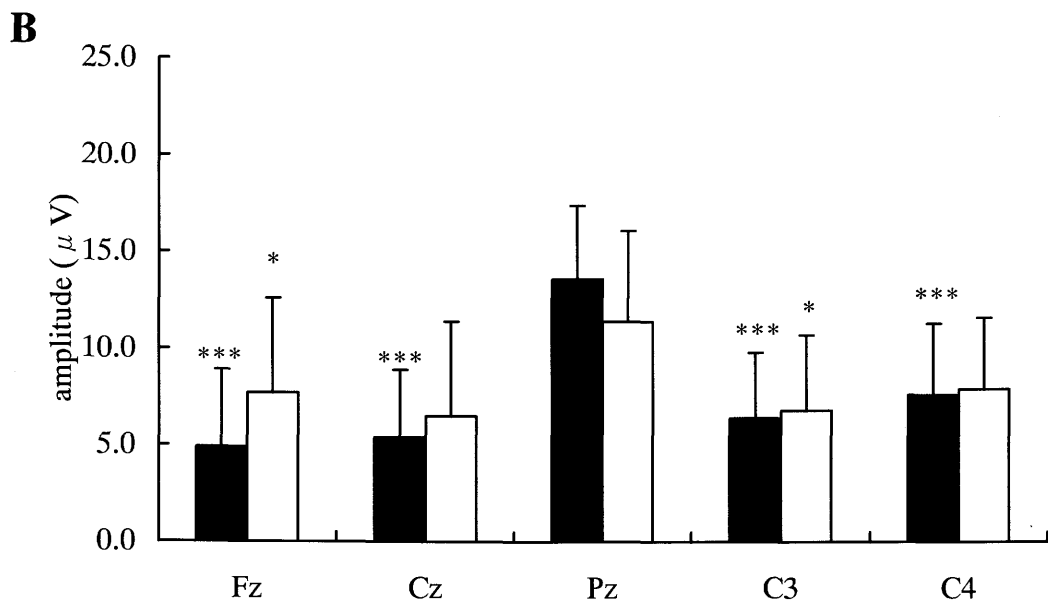
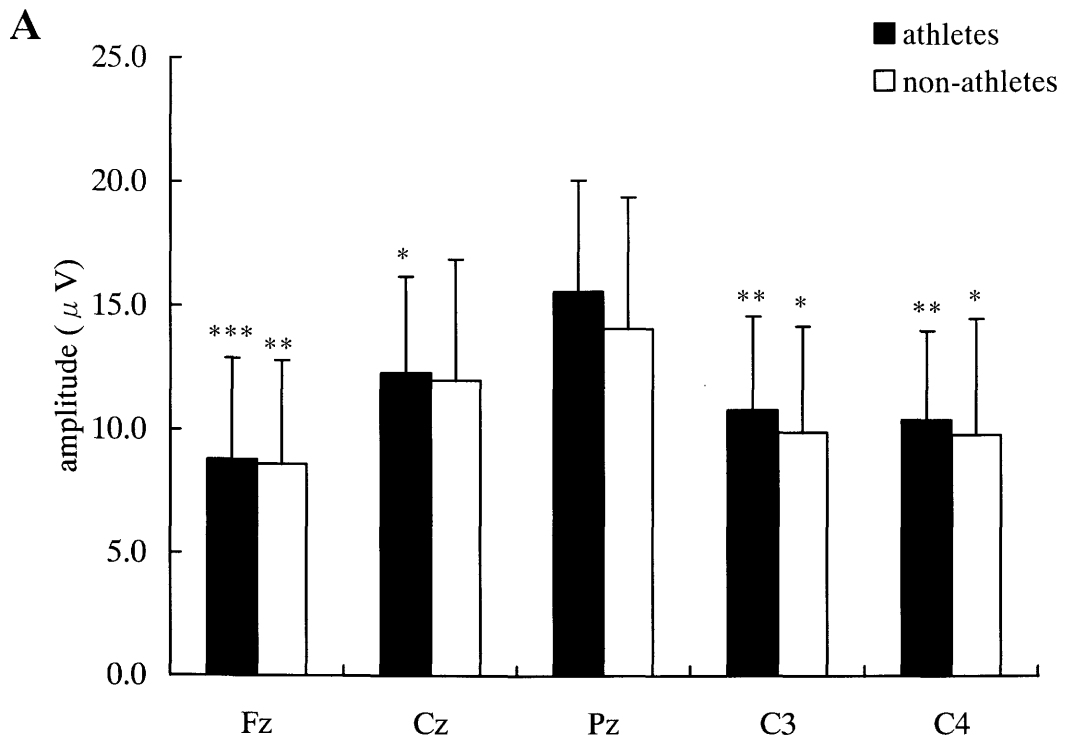


図1-1-6. 各課題条件（計数課題;A, 反応課題;B）におけるP300の頭皮上分布を、競技者（黒）と非競技者（白）ごとに平均振幅および標準偏差で示す。両課題、グループともに頭頂部優位の頭皮上分布を示した。

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, significant difference between Pz and each other

第2節 競技種目の相違と感覚モダリティ間への影響

1. 目的

研究課題 1-1 において、競技者の EMG-RT は非競技者よりも速いことおよび反応刺激によって誘発された ERP 成分が非競技者と異なることから、長期間の運動トレーニングが刺激の処理過程に影響を及ぼすことが示唆された。しかしながら、競技者として対象にしたのが長距離選手のみであったことから、運動トレーニングによる速い EMG-RT と、脳内における情報処理過程との関係については十分明らかにはできなかった。スポーツ競技は、それぞれの種目により重要となる感覚情報に相違があることが考えられ、それに応じてトレーニングの特性も異なる。

そこで研究課題 1-2 では、競技種目の相違によるトレーニング特性が感覚モダリティ間の情報処理過程に及ぼす影響について、聴覚刺激に対して瞬発的な反応動作が必要とされる短距離選手、プレー中に正確で素早い視覚情報の認知・判断が要求されるバスケットボール選手、さらに長距離選手、非競技者を比較し検討した。

2. 方法

2-1. 被験者

被験者は、運動群として4年以上にわたり各専門競技・種目において、競技を目的とした運動トレーニングを継続しており、陸上競技の短距離を専門種目としている男性9名、長距離を専門種目としている男性9名、バスケットボールを専門競技とする男性9名であった。非運動群は、習慣的に運動を行っていない男性6名であった（表 1-2-1）。

被験者はいずれも右利きであり、実験の主旨および方法について十分説明したうえで実験参加の同意を得た。被験者には23～25度に空調されたシールドルーム内の安楽椅子に腰掛け、安静を保つよう指示した（図 1-2-1）。

2-2. 刺激

課題遂行のための刺激に呈示には、聴覚刺激および視覚刺激による 2 種類の刺激条件を設定した。聴覚刺激は、強度 65 dB の音刺激としてヘッドホンから両耳同時に呈示した。視覚刺激は、光刺激として光ダイオード light-emitting diodes (LED) を用い、被験者の眼前約 1.7 m から呈示した。各刺激ともに持続時間は 50 msec、立ち上がり／立ち下がり時間は 5 msec とし、刺激呈示間隔は 1~3 sec のランダムとした。

2-3. 課題

聴覚刺激および視覚刺激に対してそれぞれ以下の 2 つの課題を行った (図 1-2-2)。

単純反応課題

呈示された全ての刺激に対して反応する課題であり、被験者にはできるだけ素早く利き腕の肘関節を伸展させる動作を行うよう指示した。聴覚刺激条件では 2,000 Hz の音を、視覚刺激条件では赤色 LED の光を呈示刺激とした。

選択反応課題

標的刺激に対してのみ反応し、非標的刺激は無視する課題であり、被験者には標的刺激に対してできるだけ素早く利き腕の肘関節を伸展させる動作を行うよう指示した。聴覚刺激条件では、標的刺激を 2,000 Hz、非標的刺激を 1,000 Hz とした。視覚刺激条件では、標的刺激を赤色 LED、非標的刺激を青色 LED とした。いずれの刺激条件においても標的刺激と非標的刺激の呈示確率は 2 : 8 で、これらがランダムに出現する刺激系列を用いた。また、課題施行前に十分練習を行い、正確に反応できることを確認し、課題を開始した。

2-3. 記録・データ処理

EMG-RT

反応動作に伴う筋電図は、動作肢の上腕三頭筋に表面電極を装着し、高周波フィルター1500 Hz、時定数 0.03 sec で導出した。EMG-RT は、加算の対象とした試行の刺激開始から急激な筋放電の始まる時点までとして計測した。

ERP

ERP の記録は国際 10-20 法に従い、Fz、Cz、C3、C4、Pz の頭皮上 5 部位より両耳朶連結を基準として Ag/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。記録条件は高周波フィルター100 Hz、時定数 0.3 sec とし、電気抵抗はすべて 5k Ω 以下とした。同時に、眼球運動に伴うアーチファクト混入を検出するため、眼電図 (electro-oculogram : EOG) を左眼窩上下縁から導出記録した。得られたアナログデータは DAT テープに記録し、A/D 変換ボードを介した後、刺激前 200 msec から刺激後 600 msec を分析区間として、サンプリング周波数 250 Hz で波形解析ソフト (EPLIZER, キッセイコムテック) を用いて解析を行った。眼球運動が分析区間内に認められたときはその区間を分析の対象外とし、15 回以上の加算平均処理を行った後、ERP を求めた。分析の対象とした N100 と P300 は、それぞれ誘発された波形の潜時と極性から N100 (刺激呈示後 75~150 msec に生じる最大陰性電位)、P300 (刺激呈示後 250~500 msec に生じる最大陽性電位) と同定して、潜時と振幅の測定を行った。振幅は刺激前 100 msec の平均電位を基線として計測した。

2-4. 統計処理

EMG-RT については、グループ (バスケットボール選手, 短距離選手, 長距離選手, 非競技者) \times 刺激条件 (聴覚刺激, 視覚刺激) \times 課題 (単純反応課題, 選択反応課題) の 3 要因による混合型分散分析 (1 要因が被験者間要因, 2 要因が被験者内要因) を行った。ERP 各成分の振幅、潜時について

はそれぞれ、グループ（バスケットボール選手、短距離選手、長距離選手、非競技者）×刺激条件（聴覚刺激、視覚刺激）×導出部位（Fz, Cz, Pz, C3, C4）の3要因による混合型分散分析（1要因が被験者間要因、2要因が被験者内要因）を行った。主効果が認められたときは Fisher's Protected LSD による多重比較を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。また、分散分析の結果は Greenhouse-Geisser 法による自由度の修正を行い、有意確率を再計算した。有意差検定での有意水準は5%未満とした。

3. 結果

3-1. EMG-RT

EMG-RT は、グループ間 ($F=41.122, p<0.001$)、課題間 ($F=521.895, p<0.001$) および、刺激条件間 ($F=17.404, p<0.001$) の主効果が認められた。下位検定の結果、全てのグループにおいて選択反応課題より単純反応課題で有意に速く、視覚刺激条件より聴覚刺激条件で有意に速かった。グループ間の比較においては、単純反応課題で両刺激条件ともに短距離選手とバスケットボール選手が非競技者より有意に速く、選択反応課題では全ての競技者グループが非競技者より有意に速かった。さらに短距離選手はすべての条件において最も速い値を示した（図 1-2-3, 表 1-2-2）。

3-2. ERP 波形

図 1-2-4, 5 は、聴覚刺激条件および視覚刺激条件における選択反応課題の標的刺激から得られた全被験者の ERP を刺激条件、グループごとに総加算平均した波形と反応にともなう筋電図の一例を示している。本研究では、すべての被験者およびすべての条件で N100、P300 を確認できた。

3-3. N100

N100 潜時は、刺激条件に主効果が認められ ($F=818.590, p<0.001$)、聴覚

刺激より視覚刺激で有意に延長した（表 1-2-3）。どちらの刺激条件においてもグループ間に差は認められなかった。

N100 振幅は、グループ間 ($F=8.967, p<0.001$)、刺激条件間 ($F=119.882, p<0.001$) および、導出部位間 ($F=6.069, p<0.001$) の主効果が認められた。また、グループと刺激条件 ($F=4.838, p<0.01$) および、刺激条件と導出部位 ($F=2.840, p<0.05$) において交互作用が認められた。下位検定の結果、聴覚刺激では前頭-中心部優位の頭皮上分布を示したのに対し ($F=8.201, p<0.001$)、視覚刺激では導出部位に差は認められなかった。また、グループ間においては、視覚刺激でのみ有意な差が認められ ($F=11.079, p<0.001$)、短距離選手で大きな値を示した（表 1-2-4, 図 1-2-6）。

3-4. P300

P300 潜時は、刺激条件間に主効果が認められ ($F=18.374, p<0.001$)、聴覚刺激より視覚刺激で有意に延長した。また、グループ間にも主効果が認められ ($F=25.854, p<0.001$)、両刺激条件ともに非競技者および長距離選手よりバスケットボール選手、短距離選手で有意に速かった（表 1-2-5）。

P300 振幅は、グループ間 ($F=22.532, p<0.001$)、刺激条件間 ($F=5.422, p<0.05$) および、導出部位間 ($F=20.365, p<0.001$) に主効果が認められた。刺激条件では、聴覚刺激より視覚刺激で有意に大きく、頭皮上分布は聴覚刺激、視覚刺激条件ともに頭頂部優位であった ($F_z, C_z, C_3, C_4 < P_z, p<0.001$)（表 1-2-6, 図 1-2-7）。また、両刺激条件ともにグループ間においては非競技者より競技者で有意に大きく（非競技者 $<$ バスケットボール選手、短距離選手、長距離選手, $p<0.01$ ）、さらに視覚刺激条件では、バスケットボール選手が他の競技者グループよりも有意に大きかった ($p<0.01$)。

3-4. P300 と EMG-RT の相関

P300 潜時と EMG-RT との間には、聴覚刺激および視覚刺激条件ともに有意な正の相関が認められた（聴覚刺激: $r=0.42, p<0.05$; 視覚刺激: $r=0.40,$

p<0.05)。しかしながら、P300 振幅と EMG-RT との間に相関関係は認められなかった (図 1-2-8)。

4. 考察

本研究は、競技種目特性の相違が感覚刺激処理過程に及ぼす影響について、長期間にわたり専門的なトレーニングを行っているバスケットボール選手、短距離選手、長距離選手と非競技者を対象とし、感覚モダリティ間の比較によって検討した。その結果、得られた主な知見は、1) EMG-RT は聴覚・視覚刺激ともに短距離選手で最も速く、非競技者より競技者で有意に速いこと、2) N100 潜時にグループ間の差はないが、P300 潜時ではバスケットボール選手、短距離選手で有意に速く EMG-RT と正の相関が認められたこと、3) P300 振幅は非運動群より競技者で有意に大きかったが、EMG-RT との相関間はみとめられなかったことである。

本研究における EMG-RT の結果は、感覚モダリティに関わらず、非競技者よりすべての競技者で有意に速いというトレーニングの影響が認められ、研究課題 1 の結果を支持するものであった。さらに、競技者間においては、短距離選手で最も速く、バスケットボール選手、長距離選手の順であり、種目特性が認められた。これまでの競技者に関連した RT 研究では、競技者と一般人の比較 (Ando et al., 2001; Lee et al., 1999)、競技種目間の比較 (Olsen, 1956; Pierson, 1956)、技術水準間の比較 (Fontani et al., 1999; Meckel et al., 1995) といった長期間のトレーニングの影響が数多く調べられており、競技者の RT が非競技者より速く、競技種目別ではトレーニングの特性によって差異があること、競技種目によって RT の重要性の占める割合が異なることなどが明らかにされている。本研究の結果は、トレーニングの影響は認められたものの、視覚刺激でバスケットボール選手の競技特性が見られなかった。これについては、反応課題として与えられた刺激が単純な色弁別であったことが考えられる。一方、短距離選手は全ての条件で最も速かったことから、短距離種目に特有である運動開始前における準備状態の影響が推察される。すなわち、次にくる刺激に対して、素早く反応できるよう常に適切な準備状態が形成されていたと考えられる。このことは、EMG-RT と P300 潜時との間に認められた正の相関関係からも説明できる。

しかし P300 潜時は、意思決定の結果から生じた RT との間に何らかの相関を持つはずであるが、実際には相関が認められる場合と認められない場合があり、両者は別々の情報処理過程であると考えられている(McCarthy & Donchin,1981)。つまり、P300 潜時は刺激評価時間の指標であり、反応の選択・実行からは独立している (Kutas et al.,1977)。一方、刺激評価には認知文脈の更新 (context updating) も含めていることから (Picton, 1992)、短距離選手では、素早く呈示された刺激を処理し、次にくる刺激に対する十分な準備状態を形成していると考えられる。これは、バスケットボール選手においても同様に考えられるが、長距離選手においては、習慣的に外的な刺激に対して瞬発的な力を発揮するようなトレーニングは行ってはいないためトレーニングの影響はみとめられなかったと考えられる。

P300 の振幅は競技者で非競技者より大きな振幅を示した。競技者と非競技者ではトレーニングによって形態学的、組織学的に大きな差があり、大脳皮質の周辺構造の形態学的な相違が P300 の振幅に影響を及ぼしている可能性が考えられる。Frodal et al. (2001) は、P300 振幅と大脳皮質の周辺構造の形態学的影響について検討した結果、皮膚や皮質下組織、筋などは影響しないことを示している。したがって、トレーニングによる影響が明らかにされている皮質下組織や筋といった形態学的な相違は、本研究の P300 振幅に影響はないものと考えられる。しかしながら、側頭-頭頂における頭蓋骨の厚さは P300 振幅に影響を及ぼし、1 mm 増えるごとに 1.14 μ V 減少することも示している。長期間のトレーニングが頭蓋骨の厚さなどのような変化をもたらすか明らかではないが、N100 の振幅にグループ間の差が認められなかったことから、このような形態学的要因は排除できると考えられる。

P300 振幅は種々の課題事態での結果から、文脈あるいは作業記憶の更新 (Donchin and Coles, 1988) や課題遂行に必要な処理容量 (Wickens et.al., 1983) を反映すると考えられている。また、課題関連刺激に対しては増大する (Duncan-Johnson and Donchin, 1977)。このことから、競技者では非競

技者よりも課題に対してより注意が向けられていたことが推察される。しかしながら、P300 振幅と EMG-RT との相関はなく、短距離選手で必ずしも大きい値を示さなかった。

また、N100 潜時については、競技者と非競技者との差は認められず、研究課題 1 の結果を支持するものであった。これらのことから、運動トレーニングは、感覚刺激処理過程のなかでも N100-P300 間に起こるであろう刺激の判断や弁別といった感覚刺激の処理速度 (Picton, 1992)、及び、反応の実行系へ影響に及ぼすことが示唆された。また、外的な刺激に対して瞬発的な力を発揮することが要求される競技種目でより顕著であることが示唆された。

5. 要約

本研究は、長期的な運動の継続が感覚刺激処理過程におよぼす影響について競技種目の特性に着目し、感覚モダリティ間を比較することにより検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) 本研究における EMG-RT は、すべての競技者で非競技者より速かったことから運動トレーニングの影響が認められた。また感覚モダリティに関わらず短距離選手で最も速く、P300 潜時と正の相関を示したことから、次の刺激に対する運動の準備状態との関係が示唆された。

(2) 本研究において N100 潜時に競技者と非競技者の差は認められなかったが、P300 潜時は非競技者より競技者で速かったことから、競技者では N100-P300 間に起こる感覚刺激の処理時間が速いことが示唆された。

(3) 本研究における、P300 振幅は非競技者より競技者で大きくより課題に対する注意を向けていることが示唆されたが、感覚モダリティによる種目特性は認められなかった。

表1-2-1. 被験者の特徴とトレーニング頻度

	Basketball (n=9)	Sprinter (n=9)	Long (n=9)	non-athletes (n=6)
Age (years)				
Mean	21.0	20.5	19.9	22.2
S.D.	1.2	1.0	1.3	2.1
Height (cm)				
Mean	181.0	174.9	171.0	175.5
S.D.	2.8	3.7	3.5	5.1
Weight (kg)				
Mean	79.0	67.4	56.6	62.3
S.D.	1.4	3.1	3.5	3.4
Exercise (h/week)				
Mean	15.0	15.0	17.5	—
S.D.	0.5	1.5	0.7	—

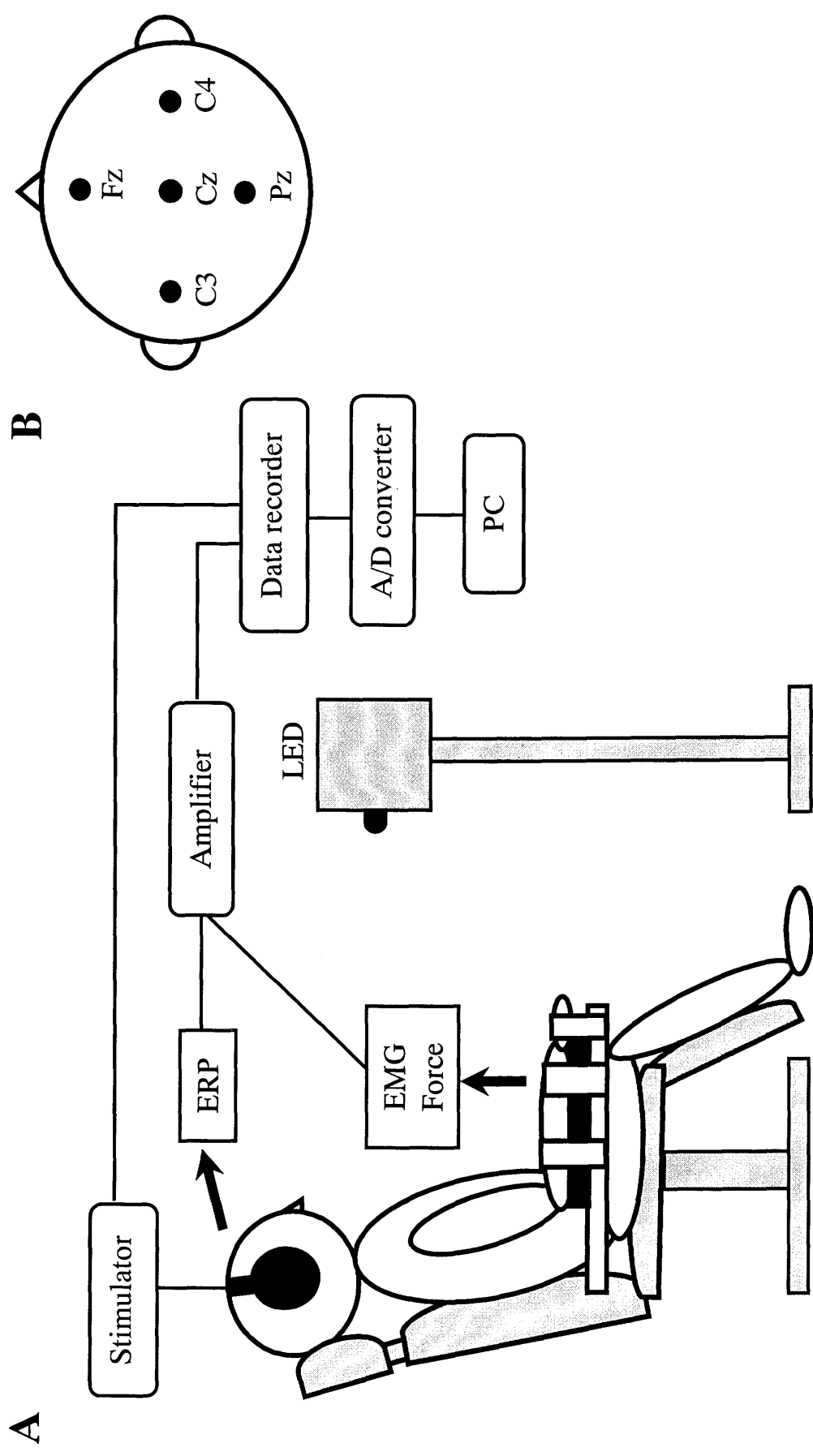
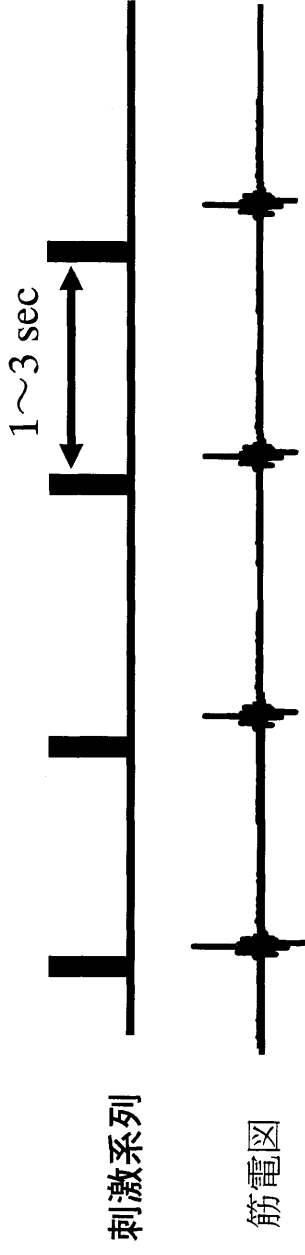


図1-2-1. 実験状況 (A)、およびEEGの記録電極の位置 (B) についての模式図。被験者の右前腕は、ストレインゲージの装着されたプレート上に固定した。聴覚刺激はヘッドホンからの音刺激として、視覚刺激は被験者に眼前に設置された赤色と青色のLEDによる光刺激として呈示した。記録電極は、国際10-20法にもとづき、被験者ごとに頭皮上の位置が決定された。

A. simple reaction task



B. choice reaction task

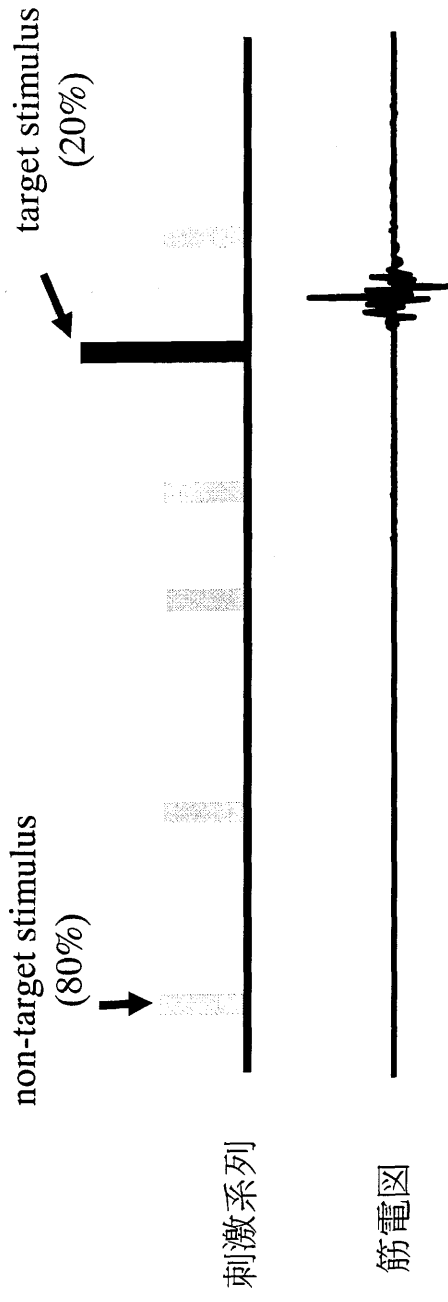
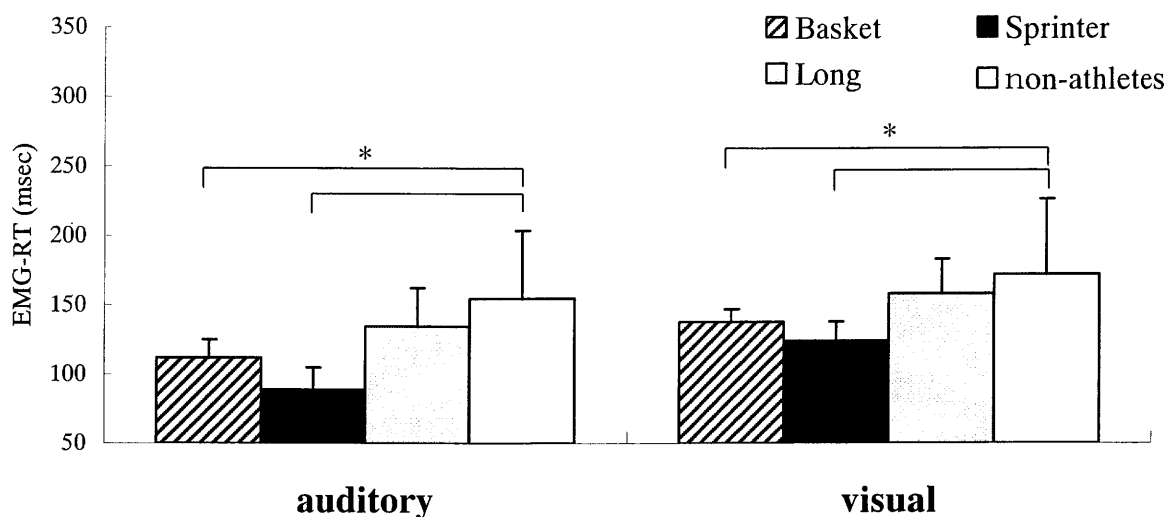


図1-2-2. 実験課題の模式図。単純反応課題 (A) は呈示される全ての刺激に対して反応する課題である。選択反応課題 (B) は、標的刺激 (target stimulus; 黒) が呈示されたら素早く反応し、非標的刺激 (non-target stimulus; 灰色) は無視する課題である。標的刺激と非標的刺激の呈示確率は2:8である。両課題ともに刺激間隔は、1~3秒のランダムであった。それぞれ、上段は刺激系列、下段は反応動作を行った際の上腕三頭筋から導出された筋電図を示している。

A. simple reaction task



B. choice reaction

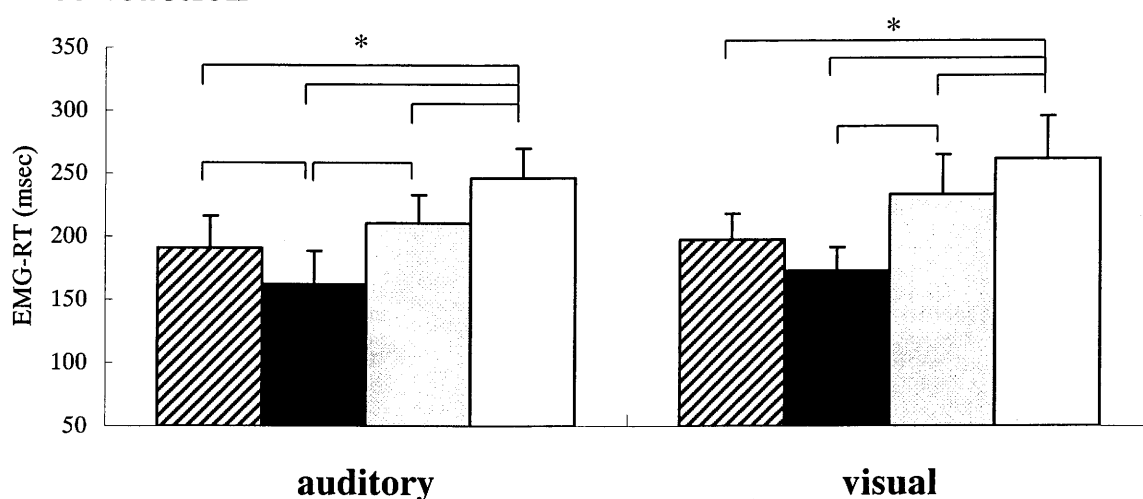


図1-2-3. 聴覚刺激および視覚刺激における単純反応課題 (A) と選択反応課題 (B) のEMG-RTの結果。それぞれの棒はバスケット選手(斜線)、短距離選手(黒)、長距離選手(灰色)、非競技者(白)のEMG-RTと標準偏差を示している。 * $p < 0.05$

表1-2-2. 聴覚刺激および視覚刺激における単純反応課題と選択反応課題のEMG-RTの結果。両刺激条件ともに非競技者より競技者で速く、選択反応課題では競技種目間の差も認められた。

	Basket	Sprinter	Long	non-athletes	
simple reaction task (msec)					
auditory	111.8 ± 13.3	88.9 ± 16.0	134.5 ± 27.8	154.8 ± 49.0	*
visual	137.6 ± 9.3	124.1 ± 13.9	158.0 ± 25.0	171.8 ± 54.3	*
choice reaction task (msec)					
auditory	190.8 ± 25.5	162.3 ± 26.3	210.7 ± 22.2	246.8 ± 23.6	* # †
visual	197.3 ± 20.8	172.8 ± 18.6	233.3 ± 31.7	261.7 ± 33.9	* #

Values are mean ± S.D.

* $p < 0.05$, non-athletes vs. Basket, Sprinter; # $p < 0.05$, Long vs. Sprinter; † $p < 0.05$, Basket vs. Sprinter

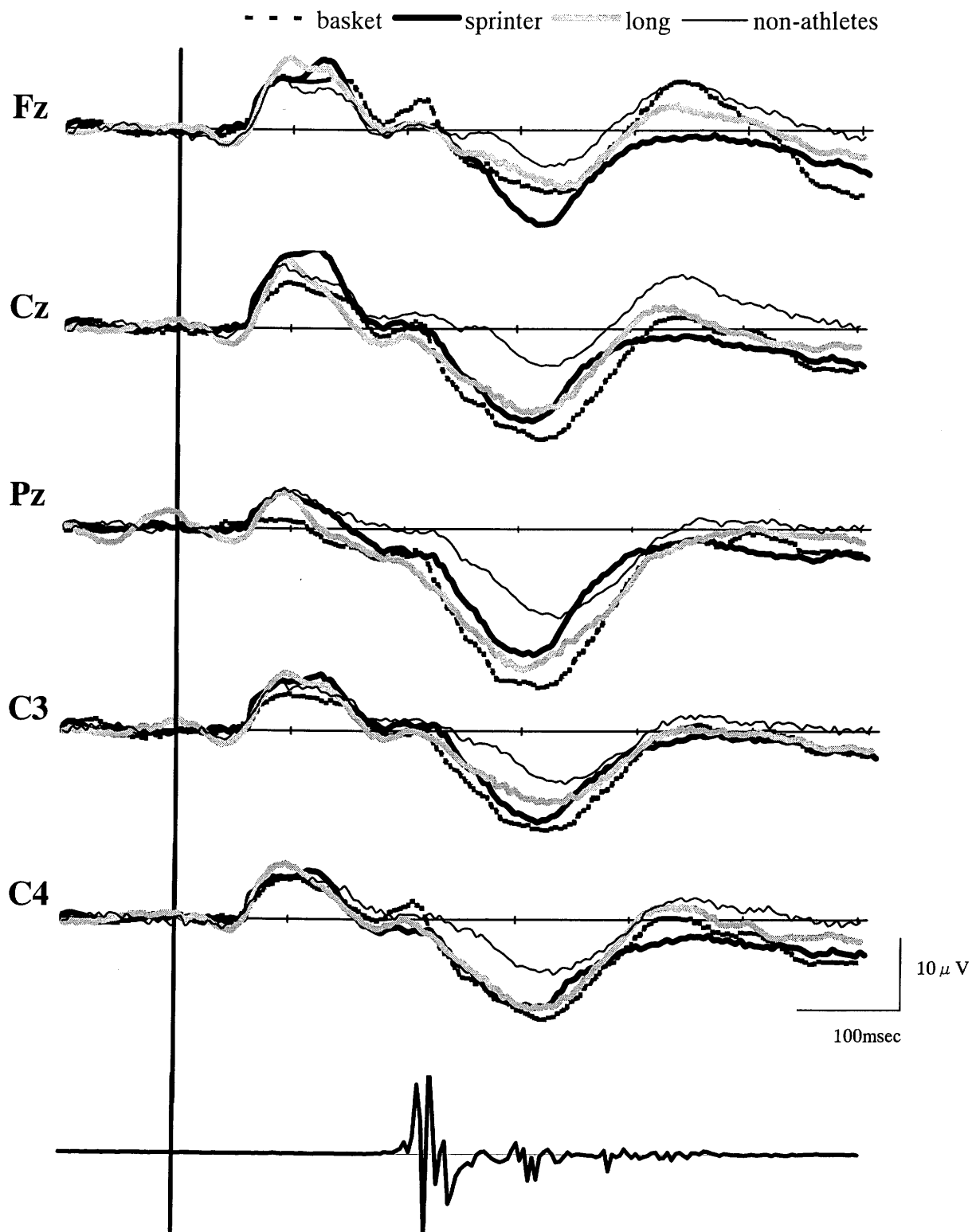


図1-2-4. 聴覚課題において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された各被験者グループごと（バスケットボール選手、短距離選手、長距離選手、非競技者）のグラウンドアベレージ波形。縦線は刺激の呈示時点を示す。最下段は反応動作に伴う筋電図の一例。刺激呈示時点からの潜時と極性から、それぞれN100とP300成分を同定した。

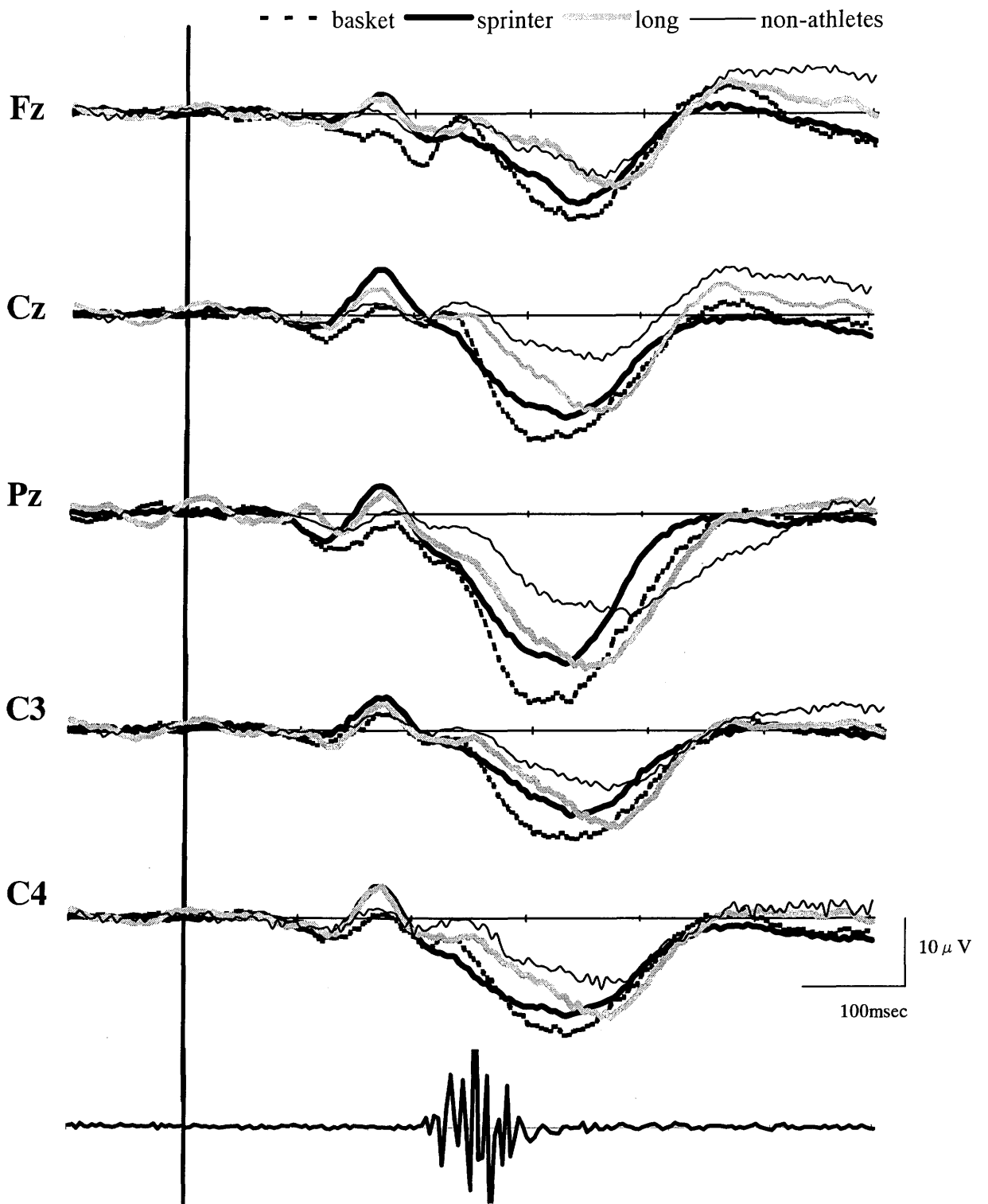


図1-2-5. 視覚課題において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された各被験者グループごと（バスケットボール選手、短距離選手、長距離選手、非競技者）のグランドアベレージ波形。縦線は刺激の呈示時点を示す。最下段は反応動作に伴う筋電図の一例。刺激呈示時点からの潜時と極性から、それぞれN100とP300成分を同定した。

表1-2-3. 聴覚刺激および視覚刺激の標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出されたN100潜時。グループおよび導出部位に主効果はなく、聴覚刺激より視覚刺激で潜時が延長した。

N100 latency (msec)	auditory				visual			
	Basket	Sprinter	Long	non-athletes	Basket	Sprinter	Long	non-athletes
	Fz	100.0 ± 24.3	96.9 ± 10.3	95.1 ± 8.4	90.0 ± 6.1	145.3 ± 27.1	169.8 ± 8.7	161.3 ± 22.2
Cz	99.6 ± 23.9	103.6 ± 6.1	94.7 ± 7.7	93.3 ± 7.4	149.8 ± 23.9	169.3 ± 10.2	160.9 ± 21.0	172.0 ± 36.0
Pz	99.1 ± 30.1	96.0 ± 7.5	91.6 ± 10.1	95.3 ± 10.6	155.6 ± 28.5	168.9 ± 8.2	163.6 ± 22.6	172.0 ± 48.3
C3	101.8 ± 27.3	97.3 ± 11.0	95.1 ± 9.5	96.0 ± 9.5	153.9 ± 27.7	170.7 ± 8.7	168.4 ± 10.3	170.7 ± 38.0
C4	102.2 ± 26.4	104.0 ± 7.2	90.2 ± 8.5	96.0 ± 9.5	152.4 ± 27.7	168.4 ± 8.1	167.6 ± 6.5	174.7 ± 35.1

Values are mean ± S.D.

表1-2-4. 聴覚刺激および視覚刺激の標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出されたN100振幅。視覚刺激においてのみグループ間の差が認められた。

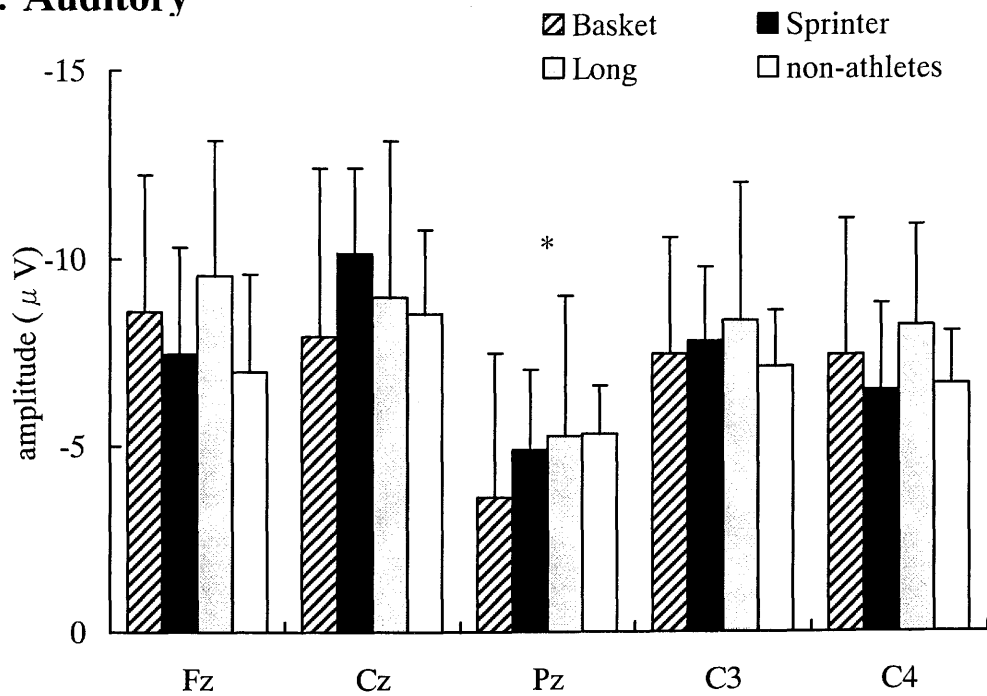
N100 amplitude (μ V)	auditory				visual			
	Basket	Sprinter	Long	non-athletes	Basket	Sprinter	Long	non-athletes
	Fz	-8.6 ± 3.6	-7.5 ± 2.8	-9.6 ± 3.6	-7.0 ± 2.6 *	-0.1 ± 4.3	-3.1 ± 3.9	-3.2 ± 4.0
Cz	-7.9 ± 4.5	-10.1 ± 2.3	-9.0 ± 4.2	-8.5 ± 2.2 *	-1.3 ± 3.7	-7.2 ± 3.9 #	-4.5 ± 4.7	-3.3 ± 3.3
Pz	-3.6 ± 3.9	-4.9 ± 2.1	-5.3 ± 3.7	-5.3 ± 1.3	-0.9 ± 2.7	-4.4 ± 3.5 #	-4.0 ± 4.3 #	-2.3 ± 1.5
C3	-7.5 ± 3.1	-7.8 ± 2.0	-8.3 ± 3.7	-7.1 ± 1.5 *	-2.5 ± 2.2	-5.3 ± 3.4	-4.1 ± 4.8	-3.1 ± 3.4
C4	-7.4 ± 3.6	-6.5 ± 2.3	-8.2 ± 2.7	-6.6 ± 1.4 *	-1.2 ± 2.8	-5.4 ± 2.9	-4.5 ± 5.5	-2.7 ± 3.0

Values are mean ± S.D.

* p<0.05, significant difference between Pz and each other position

p<0.05, Basket vs. each group

A. Auditory



B. Visual

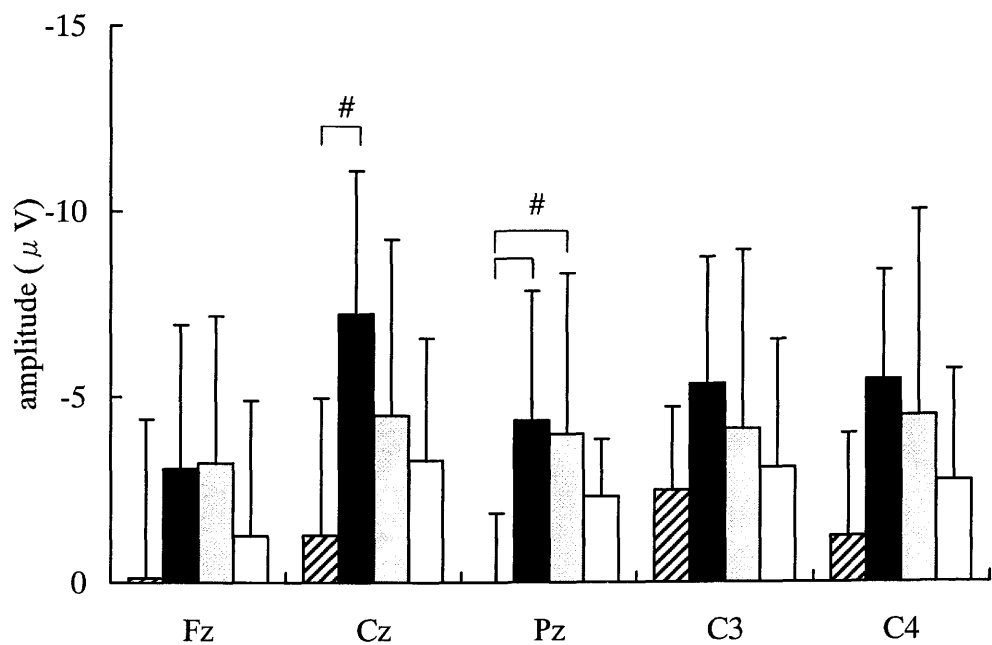


図1-2-6. 聴覚刺激課題 (A)、視覚刺激課題 (B) におけるN100の頭皮上分布を、各被験者グループごとに平均振幅および標準偏差で示す。

* $p < 0.05$, significant difference between Pz and each other position

$p < 0.05$, significant difference between groups

表1-2-5. 聴覚刺激および視覚刺激の標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出されたP300潜時。全てのグループにおいて聴覚刺激より視覚刺激で潜時が延長した。また、グループ間の差も認められた。

	auditory			visual		
	Basket	Sprinter	Long	Basket	Sprinter	Long
P300 latency (msec)						
Fz	309.8 ± 31.7 #	316.4 ± 24.8 #	351.6 ± 24.9	323.6 ± 69.6 #	331.6 ± 21.8 #	365.3 ± 23.2
Cz	302.7 ± 32.9 #	300.9 ± 24.6 *#	336.5 ± 21.9	316.0 ± 28.1	333.3 ± 46.9	350.7 ± 23.5
Pz	306.7 ± 29.6 *#	305.3 ± 23.2 *#	332.0 ± 23.0	312.4 ± 18.8 *#	308.4 ± 13.3 *#	345.8 ± 27.7
C3	305.8 ± 26.2 *#	310.7 ± 21.3 *#	344.4 ± 30.0	317.3 ± 29.7 #	336.4 ± 14.5	354.7 ± 26.8
C4	313.8 ± 28.7	305.8 ± 23.7 *#	337.8 ± 25.2	322.7 ± 35.3 #	321.3 ± 25.1 #	353.8 ± 27.5

Values are mean ± S.D.

* p<0.05, non-athletes vs. each group; # p<0.05, Long vs. each group

表1-2-6. 聴覚刺激および視覚刺激の標的刺激において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出されたP300振幅。両刺激条件ともに頭頂部優位の頭皮上分布であった。また、グループ間の差も認められた。

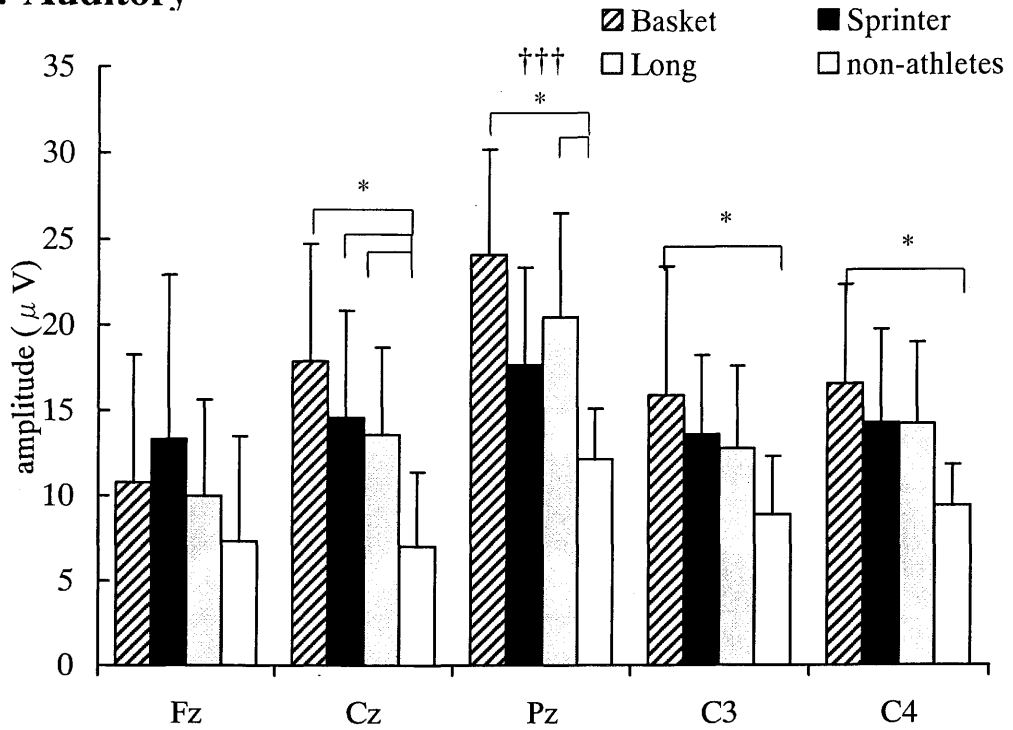
	auditory			visual		
	Basket	Sprinter	Long	Basket	Sprinter	Long
P300 amplitude (μ V)						
Fz	10.8 ± 7.5	13.3 ± 9.6	10.0 ± 5.6	14.8 ± 6.0	12.0 ± 5.2	10.8 ± 4.0
Cz	17.9 ± 6.8 *	14.6 ± 6.2 *	13.6 ± 5.1 *	20.0 ± 6.4 *	15.6 ± 3.3 *	15.0 ± 3.7 *
Pz	24.1 ± 6.1 *	17.7 ± 5.7 *	20.4 ± 6.1 *	26.1 ± 6.5 *	18.2 ± 4.4	21.2 ± 5.1
C3	15.9 ± 7.5 *	13.6 ± 4.6	12.8 ± 4.8	17.5 ± 6.2 *	13.1 ± 2.0	14.5 ± 3.5
C4	16.6 ± 5.8 *	14.3 ± 5.4	14.2 ± 4.7	19.0 ± 6.5 *	15.2 ± 2.6	15.4 ± 2.7

Values are mean ± S.D.

††† p<0.001, significant difference between Pz and each other position

* p<0.05, non-athletes vs. each group

A. Auditory



B. Visual

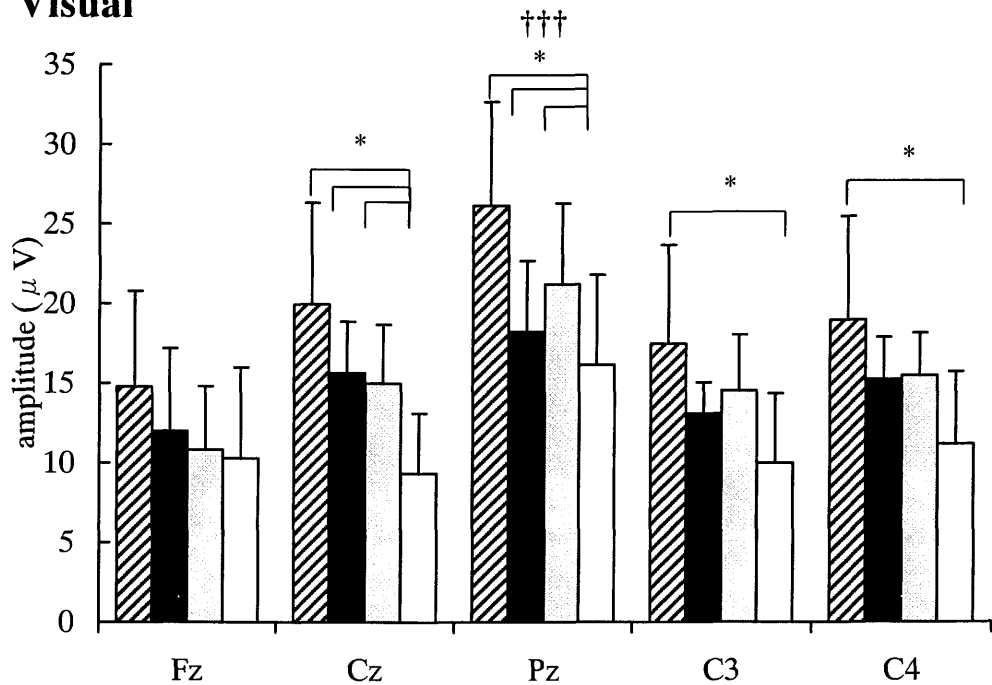


図1-2-7. 聴覚刺激課題 (A)、視覚刺激課題 (B) におけるP300の頭皮上分布を、各被験者グループごとに平均振幅および標準偏差で示す。両刺激条件ともに頭頂部優位の頭皮上分布であった。

††† $p < 0.001$, significant difference between Pz and each other position

* $p < 0.05$, significant difference between groups

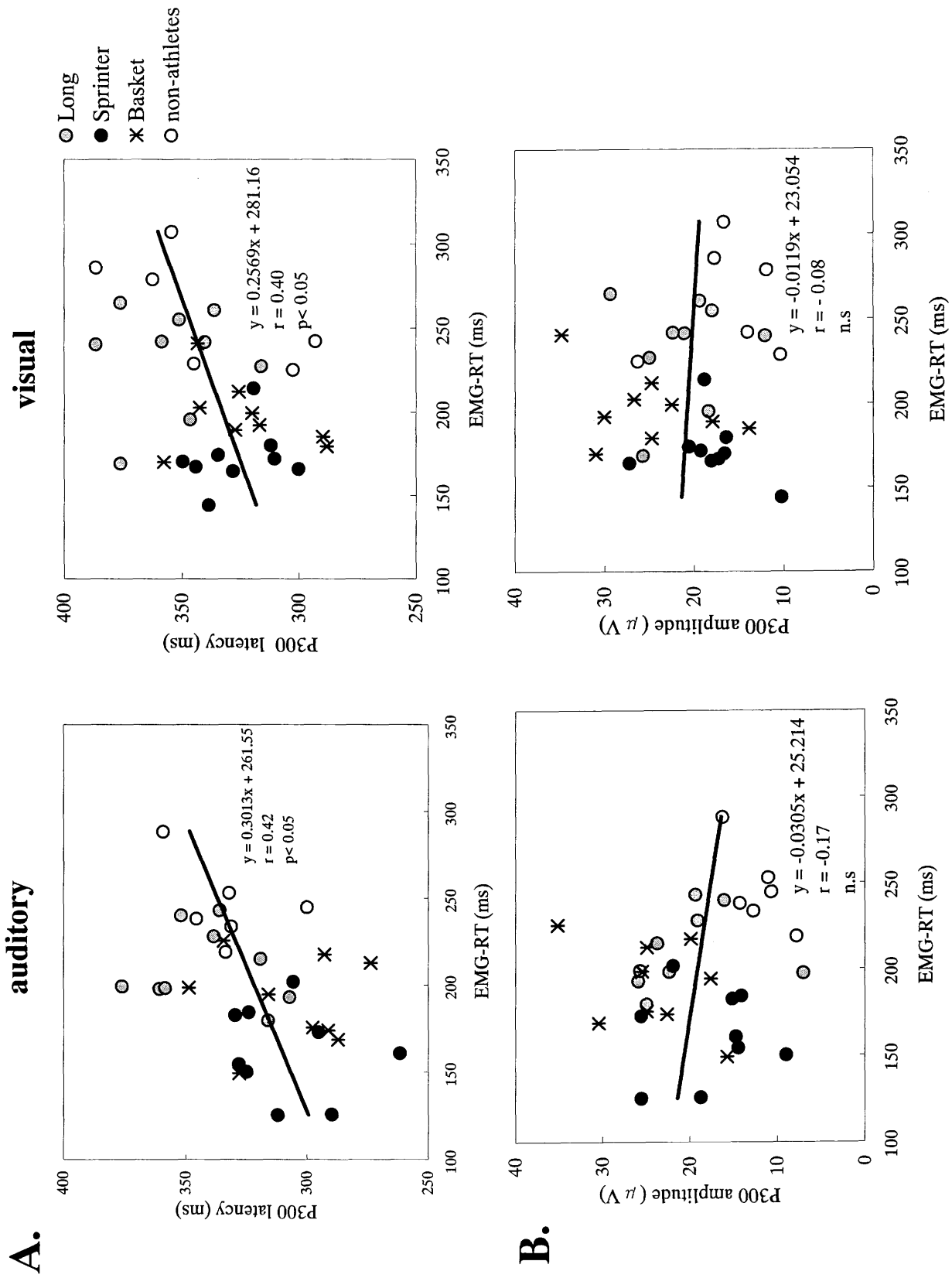


図1-2-8. EMG-RTとP300潜時(A)および、EMG-RTとP300振幅(B)の相関関係。左側が聴覚刺激課題であり、右側が視覚刺激課題を示し、それぞれ横軸にEMG-RT、縦軸にそれぞれP300振幅と潜時をプロットした。各シブは全被験者をグループ別に示した。EMG-RTとP300潜時に相関関係が認められる。

第V章

長期間的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響

(研究課題 2)

1. 目的

研究課題 1 では、競技者の速い EMG-RT には、長期的な運動の継続によって生じた感覚刺激処理過程の適応変化による影響が関与している可能性が示唆された。さらに、競技種目間の相違によるトレーニング特性の影響も認められた。このような EMG-RT の遅速に影響を及ぼす要因としては、命令刺激として呈示された感覚情報の処理過程の他に、命令刺激が呈示される以前における運動の準備過程もまた重要であると考えられる。この運動の準備といった脳機能を評価する指標として、随伴陰性変動 (contingent negative variation : CNV) がある。CNV は予告刺激 (S1) の呈示後、命令刺激 (S2) に対して何らかの課題を与えた場合、その間に頭皮上から記録される脳電位であり、刺激に対する予測や期待、注意、運動の準備などのより高次の準備過程を反映する。CNV は少なくとも 2 つの成分の合成電位であることが明らかにされている (Loveless and Sanford, 1984; Rohrbaugh, 1976, 1978)。一般的に早期成分は S1 の特徴によって変化する定位反応 (Loveless and Sanford, 1974; Weerts and Lang, 1973) と考えられ、後期成分は S2 に対する期待や注意、さらに、課題が反応動作の場合は運動の準備状態を反映する (Gaillard et al., 1980; Rohrbaugh et al., 1976)。したがって、準備過程に誘発される CNV と、その結果として遂行された反応動作から得られる行動指標とを同時に記録することにより、運動の準備過程を実体的に捉えることが可能である。

そこで研究課題 2 では CNV を指標とし、動作を伴う課題と伴わない課題の比較から長期的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響について検討することを目的とした。

2. 方法

2-1. 被験者

被験者は、7年以上競技を目的とした運動トレーニングを継続しており、陸上競技の短距離を専門種目としている競技者13名（男性13名、平均年齢 20.7 ± 1.1 歳）および、習慣的に運動を行っていない健康成人13名（男性9名、女性4名、平均年齢 19.7 ± 1.3 歳）であった（表2-1）。被験者はいずれも右利きであり、事前に実験の主旨および方法について十分説明したうえで実験参加の同意を得た。

2-2. 課題

実験中、被験者は23～25度に空調されたシールドルーム内の安楽椅子に腰掛け、安静を保つよう指示された。被験者は左の前腕を回内位、肘関節角度が約120度となるよう実験装置に固定された。被験者の前方約1mには、視覚刺激を呈示するためのオシロスコープを設置した。課題は以下の3つの条件で行った（図2-1, 2）。

反応課題

ヘッドホンから呈示される予告刺激（S1）の2 sec後、命令刺激（S2）としてオシロスコープ画面上にターゲットビームを呈示した。被験者にはできるだけ素早い左手関節の屈曲動作を行うよう指示した。

計数課題

刺激の呈示は反応課題と同様であり、S1呈示後S2としてオシロスコープ画面上にターゲットビームが呈示される。被験者はS2の呈示回数を数える課題であった。被験者には、数える際に口や指を動かさないように指示し、課題終了後にその数を報告させた。

コントロール

反応課題および計数課題と同様に、S1 と S2 が呈示されるが、被験者は課題を行わずに安静状態を維持した。

全ての課題において S1 の音呈示は、2,000 Hz、持続時間は 50 msec、立ち上がり／立ち下がり時間は 5 msec、強度 65 dB とした。また、S2 の持続時間は 1 sec であった。試行間間隔は 10 sec であり、被験者が S2 を予測して反応することを防ぐため、S1 は呈示されるが S2 が呈示されない試行（キヤッチ試行）を全試行回数の 10% の頻度でランダムに挿入した。

2-3. 記録・データ処理

EEG

EEG の記録は国際 10-20 法に従い、Fz、Cz、C3、C4、Pz の頭皮上 5 部位より両耳朶連結を基準として Ag/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。記録条件は高周波フィルター 100 Hz とし、電気抵抗はすべて 5 k Ω 以下とした。同時に、眼球運動に伴うアーチファクト混入を検出するため、眼電図を左眼窩上下縁から導出記録した。得られたアナログデータは DAT テープに記録し、A/D 変換ボードを介した後、予告刺激前 1 sec から命令刺激後 1.5 sec を分析区間として、サンプリング周波数 250 Hz でコンピュータのハードディスクに記録された。眼球運動が分析区間内に認められたときはその区間を分析の対象外とし、ブロックごとに 20 回以上の加算平均処理を行った後、CNV を求めた。CNV は S1 前 500 msec の平均電位を基線として、早期成分（S1 後 400~900 msec）と後期成分（S1 後 1500~2000 msec）とに分け平均振幅を算出した。

Behavioral データ

反応課題において、反応動作に伴う EMG は、動作肢の橈側手根屈筋（flexor carpi radialis: fcr）と橈側手根伸筋（extensor carpi radialis: ecr）の各

筋に表面電極を装着し、高周波フィルター1500 Hz、時定数 0.03 sec で双極導出し、コンピュータのハードディスクに記録した。EMG-RT は、加算の対象とした試行において命令刺激の呈示から急激な筋放電の始まる時点までとして計測した。また、反応動作に伴って得られた力曲線からは、試行ごとに発揮された張力の最大値 (peak force) を計測し、被験者ごとにあらかじめ測定した最大随意収縮 (maximum voluntary contraction : MVC) から課題遂行時の平均発揮力を相対値化した。さらに、力曲線の立ち上がりから最大に達するまでの時間と発揮張力からその区間における近似直線の傾きを算出した。

2-4. 統計処理

CNV は、早期成分と後期成分ごとにそれぞれ、グループ (競技者, 非競技者) × 課題 (反応課題, 計数課題, コントロール) × 導出部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) の 3 要因による混合型分散分析 (1 要因が被験者間要因, 2 要因が被験者内要因) を行った。主効果が認められたときは Fisher's Protected LSD による多重比較を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。また、分散分析の結果は Greenhouse-Geisser 法による自由度の修正を行い、有意確率を再計算した。EMG-RT および発揮力、力の傾斜は、グループ間 (競技者, 非競技者) について t 検定を行った。有意差検定での有意水準は 5% 未満とした。

3. 結果

3-1. Behavioral データ

反応課題における EMG-RT は、非競技者より競技者で有意に速かった ($F=8.885, p<0.01$) (図 2-3. A)。また、反応動作に伴う力の発揮量にグループ間の差は認められなかったが (図 2-3. B)、力曲線が最大に達するまでの傾斜は、非競技者より競技者で有意に速かった ($F=6.567, p<0.05$, 図 2-3.

c)。

3-2. CNV

図 2-4 は、各課題において得られた CNV を競技者と非競技者ごとに加算平均した波形を示している。

本研究では、すべての被験者において、計数課題および反応課題条件で S1 呈示後から S2 に向けて緩徐な陰性電位が、早期成分は前頭優位、後期成分は中心部優位の頭皮上分布で確認された。また、コントロール条件ではそのような電位変動は認められなかった。

早期 CNV の振幅に関して反復測度の分散分析を行った結果、導出部位と課題条件に主効果が認められ ($F=4.544, p<0.01$; $F=51.094, p<0.001$)、グループと課題間に交互作用が認められた ($F=8.066, p<0.001$)。導出部位を多重比較した結果、前頭-中心部優位 ($F_z>P_z, C3, C4, p<0.05$; $C_z>P_z, p<0.05$) の頭皮上分布が得られた。また、下位検定の結果、非競技者では課題間の差は認められなかったが、競技者では、コントロールおよび計数課題より反応課題で有意に増大した (表 2-2, 図 2-5)。各課題におけるグループ間の有意な差は認められなかった (図 2-6)。

後期 CNV の振幅に関して反復測度の分散分析を行った結果、グループと課題条件に主効果が認められ ($F=5.994, p<0.05$; $F=122.026, p<0.001$)、グループと課題間に交互作用が認められた ($F=16.475, p<0.001$)。下位検定の結果、非競技者ではコントロールより反応課題で有意に増大したが、計数課題との差は認められなかったのに対し、競技者では全ての導出部位においてコントロール、計数課題より反応課題で有意に増大した (表 2-3, 図 2-5)。また、反応課題においては非競技者より競技者で有意に大きな振幅を示した ($F=19.763, p<0.001$, 図 2-7)。

4. 考察

研究課題 2 では、長期的な運動の継続が運動準備過程に及ぼす影響について、CNV を指標とし、課題に随意運動が要求される反応課題と、必要としない計数課題とを比較することにより検討した。研究課題 2 で得られた主な知見は、1) 反応課題において、反応動作に伴う発揮筋力はグループ間に差はないが、EMG-RT は非競技者より競技者で速く、力曲線の傾斜は競技者で急峻であること、2) コントロール条件および、計数課題での CNV は競技者と非競技者で差はないが、反応課題においては競技者の後期 CNV が非競技者より大きいこと、3) 非競技者では CNV の振幅に計数課題と反応課題の差が認められないのに対し、競技者では反応課題で増大し、随意動作を伴う課題に競技者と非競技者の準備状態が異なることである。

CNV は覚醒や動機づけ、命令刺激に対する予測や期待、注意、運動の準備などの生理的、心理的要因を反映し、Loveless and Sanford (1973) によって、CNV が少なくとも 2 つの成分に分離されることが示されて以来多くの研究が行われ、早期成分については、予告刺激 (S1) の強度や持続時間、感覚モダリティーの特性に依存していること、後期成分は命令刺激 (S2) によって要求される課題内容に依存して変動すること等から、早期成分は入力系に依存した定位反応の成分に相当し (Loveless and Sanford, 1974; Weerts and Lang, 1973)、後期成分は動作駆動系と関連することが明らかにされてきた (Gaillard et al., 1980; Rohrbaugh et al., 1976)。

本研究において、早期 CNV の振幅は全ての課題条件で競技者と非競技者の間に有意な差は認められず、前頭-中心部優位に出現する同様の頭皮上分布を示した。早期成分は中脳網様体や、視床賦活系の賦活状態を反映する定位反応であるとされており (Picton and Low, 1971)、この定位反応は、CNV と直線的関係を示す注意や、覚醒状態をも反映することが示唆されている。早期成分と覚醒水準との関係については、Gaillard (1977) によって示されたように前頭部優位の早期成分が脳の覚醒水準を反映し、振幅の増加は覚醒水準の上昇と対応するという正の相関関係にあることが考えられ

ている (Janssen et al., 1978; Wilkinson and Haines, 1970)。同様に前頭の局所血流とも相関関係が認められている (Oishi and Mochizuki, 1998)。一方、CNV と覚醒水準が負の関係にあること (Tecce and Scheff, 1969; Tecce et al., 1976; Weerts and Lang, 1973)、さらに Tecce (1972) は、覚醒水準が低すぎても高すぎても CNV は低い振幅を示し、中程度で最適なときに CNV は高い振幅を示すという覚醒水準と CNV 振幅との間に逆 U 字型の関係があることを推察している。このような早期 CNV に関する意見に相違はあるものの、本研究の結果から課題に対する注意や覚醒状態は、競技者と非競技者で同様であったことが示唆される。

一方、後期 CNV はコントロールと計数課題では競技者と非競技者に差は認められなかったが、随意運動を伴う反応課題で非競技者より競技者の振幅が大きかった。さらに、課題間の比較では非競技者の後期 CNV は計数課題と反応課題との間に差は認められなかったが、競技者では反応課題で有意に増大した。これまでに競技者における CNV が一般人と比較して大きいという結果が Arito and Oguri (1990) によって報告されている。彼らは複雑さの異なる 3 つの反応課題を行った結果、CNV の早期成分および後期成分ともに競技者で大きな振幅を示し、課題間とグループ間の交互作用はなかったことから、競技者では S1 から S2 間に払われた注意がより多いことを示唆している。しかしながら、CNV の波形は個人差があることも示されており、その出現パターンから A 型 (初期優勢)、B 型 (後期優勢)、FD 型 (後期欠如)、P 型 (平坦)、M 型 (初期、後期解離) に分類される (中村, 1997)。したがって、彼らによって認められた競技者での CNV 増大には、個人特性による影響が関与している可能性も考えられ、競技者特有の結果であることは明確でない。一方、本研究では競技者における大きな後期 CNV は反応課題のみに特異的に認められたこと、課題間における変動がグループ間で異なること、さらに早期成分にはグループ間に差は認められなかったことなどから、競技者が元来から CNV が大きい、もしくは、後期 CNV 優勢である被験者を特異的に抽出したわけではなく、競技者にお

ける長期間のトレーニングが、随意運動遂行前の運動準備過程に影響を及ぼした結果であることが推察される。

CNV の発生源における研究では、両側の前頭前野、運動前野、補足運動の広範な皮質領野において S1 呈示後約 200~300 msec から始まって S2 まで持続する持続型 CNV 様電位と、持続型 CNV 様電位より少し遅れて始まり、S2 に向かって徐々に増大する漸増型 CNV 様電位が、運動肢と対側の運動野および体性感覚野で記録されている (Gemba et al., 1990)。これまでに報告されているように (Gemba & Sasaki, 1984)、自発運動の際に出現する運動準備電位 (Bereitschaftspotential : BP) は運動に約 1 秒先行して出現する漸増型緩電位であり、漸増型 CNV 様電位の発生源や形状に類似性が認められる。このことから、漸増型 CNV 様電位は S2 に応じて運動を行うための準備機能に対応する皮質活動であり、BP が重畳していることも示されている (Brunia and Vingerhoets, 1980)。これらのことから、反応課題における競技者の後期 CNV の増大の一つの要因として、BP も含む漸増型 CNV 様電位の増大が考えられる。すなわち、競技者では反応動作遂行前に皮質の活動をより高め、効率の良い運動を遂行するために最適な準備状態を構築していることが推察される。

Kita et al. (2001) は自発的な手関節の運動開始前に出現する陰性電位 (movement related cortical potential : MRCP) の出現様式が、手関節の素早い切り替えし動作が必要とされる剣道選手と体操選手では一般人と比較して異なることを示している。彼らは、競技者でその出現が遅く急峻に増大し、活動部位は運動肢と対側の運動野に局限していることから、長期間のトレーニングによって運動の遂行に関与する皮質活動がより効率化した結果であることを示唆しており、本研究の結果を支持する。また、このような運動準備状態におけるグループ間の差は、反応課題におけるパフォーマンスの結果からも明らかである。

反応課題において、競技者では非競技者よりも EMG-RT は速く、発揮張力の傾斜はより急峻であった。後期 CNV はこれまでに様々な運動要素と

の関連性が調べられており、発揮される力の大きさ (Rebert et al., 1967; Low and McSherry, 1968) や速度 (Grünewald et al., 1979; Deecke et al., 1980)、運動の方向、持続時間など事前にプログラムされる運動の特徴を反映すること (Mackay and Bonnet, 1990; Franck et al., 1995)、また、反応時間やエラー率との関連が報告されている (Brunia and Vingerhoets, 1980; Wascher et al., 1996)。特に後期 CNV の発生源の一つである運動野のニューロン活動は、力の大きさと相関関係にあり発火頻度を増大させること (Cheney and Fetz, 1980)、さらに代謝活動も盛んになり、局所血流量も増加することから (Dettmers et al., 1995)、後期 CNV の増大にその影響が考えられる。しかし、本研究において発揮張力量にグループ間の差は認められなかったことから、発揮力の影響は考えられない。むしろ EMG-RT や発揮張力の傾斜の結果から、後期 CNV は速度に感受性が強いと考えられる。同じく Arito and Oguri (1990) も競技者の RT 大きな CNV には速い反応動作が関与していることを示し、その理由として準備過程中、反応動作を遂行する指において、支配している運動野領域の神経活動が競技者でより大きい可能性を示唆している。

このような長期間のトレーニングやスキルの獲得による運動野の可塑的な変化は、近年ヒトにおいても fMRI や TMS、MEG などのイメージング法を用いた研究で報告されている。Pearcer et al. (2000) は、TMS を用いて競技レベルの高いバドミントン選手と一般レベルのバドミントン選手、一般人を比較した結果、競技レベルの高い選手ではラケットを握る手で TMS によって誘発された MEP の振幅が大きく、運動が誘発される閾値が低下していたこと、運動野における支配領域の分布が異なることを示している。さらに、ピアニストなどにおいても類似した結果が報告されており、長期間のトレーニングや活動に依存して活動筋を支配する運動領域の興奮性が上昇すること、皮質の運動野における体部位局在性に再構築が生じることが明らかにされている (Karni et al., 1995; Pascual-Leone et al., 1994)。このような皮質の可塑的な変化は、長期間にわたり特定の運動パターンを繰り返

返し行うことによって、その運動に関与する脳内の神経回路に変化が起こった結果であると考えられる。すなわち、本研究で対象とした競技者では長期間の運動トレーニングによって心臓血管系や骨格筋系などの器官が形態的、機能的に適応変化するのと同じく、脳内の神経回路においてもそのニューロン間のシナプスの構造や機能に変化が生じていることが想像される。実際、ニューロンの樹状突起には多数のシナプスが棘状に配列しているが、神経活動の伝達を阻害するとシナプスは退化するのに対し、トレーニング状況のように高い頻度で神経活動に刺激を与えるとシナプスの肥大（終末発芽）や新しいシナプスの出現（側枝発芽）、樹状突起の先端に位置していたシナプスがより細胞体近くに移動するといったことが認められている（塚原, 1998）。さらにシナプスが肥大、増加することにより、伝達物質の貯蔵や放出量も増加し、受けとる側であるシナプス後膜の受容体はその感受性を高めてより信号を伝えやすくするため、そこに起こる電氣的反応も増大する。このようなシナプスの効率化は海馬や脳幹部の赤核などで詳細に検討されてきたが、近年、感覚運動野においても認められており、この領域は前にも述べたように後期 CNV の発生源である。これらのことから、競技者では長期間にわたるトレーニングによって皮質に可塑的な変化が起こっており、それが後期 CNV の増大の要因となっていると考えられる。

後期 CNV はその発生源が皮質だけでなく皮質下でも認められており、大脳基底核に異常のあるパーキンソン病やジストニアなどでは重症度と関連して振幅が減少する（Kaji et al., 1995; Oishi et al., 1995; Ikeda et al., 1997）。また、小脳の切除によって持続型 CNV 様電位には影響が見られないが、運動野に出現していた漸増型 CNV 様電位が消失する（Sasaki et al., 1990）。これらの皮質下領域は円滑な運動の遂行に重要な役割を果たしており、運動の学習や習得された運動記憶の保存とも関係している。つまり、長期間のトレーニングは皮質下にも影響を及ぼし、後期 CNV を増大させたとともに効率のよい運動が遂行されたと考えられる。

さらに、後期 CNV は反応動作を伴わなくても出現することなどから、前に述べた BP だけでなく、S2 に対する期待や予測を反映する刺激前陰性変動 (stimulus preceding negativity : SPN) が重畳していることも示されている (van Boxtel et al., 1993; van Boxtel and Brunia, 1994)。このことから、競技者において認められた計数課題と反応課題との差には、最適な運動準備状態の構築だけでなく、より反応課題で S2 に対し注意が向けられていた可能性も推察される。しかしながら、SPN が出現していると考えられる計数課題において、グループ間の差は認められていないことから、反応課題で認められた競技者における後期 CNV の増大は、主に運動準備に参与する皮質および皮質下活動の増大を示していると考えられる。

以上のことから、長期的な運動の継続は運動準備過程に影響を及ぼし、その結果として効率の良い運動が遂行されていることが示唆された。

5. 要約

本研究は、反応動作遂行前の運動準備過程に長期的な運動の継続が及ぼす影響について、スポーツ競技者と非競技者を比較し、パフォーマンスとの関係から検討した。得られた結果は以下の通りである。

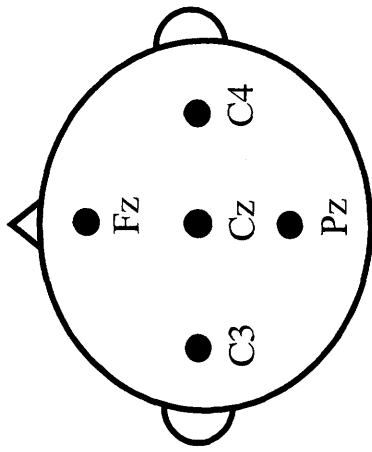
(1) 反応動作に伴う発揮張力量に競技者と非競技者の差は認められなかったが、発揮張力の立ち上がりは非競技者より競技者で急峻であり、EMG-RTは競技者で速かったことから、長期間の運動トレーニングは効率の良い反応動作の遂行に影響を及ぼすことが示唆された。

(2) 計数課題では競技者と非競技者に CNV の振幅に差は認められなかったが、反応課題では競技者の CNV 後期成分が非競技者より大きかったことから、競技者における効率の良い反応動作の遂行には、動作開始前から脳の興奮水準を高め、適切な運動の準備状態の構築が関与していることが示唆された。

表2-1. 被験者の特徴とトレーニング頻度

	athletes (n=13)	non-athletes (n=13)
Age (years)		
Mean	20.77	19.69
S.D.	1.12	1.25
Height (cm)		
Mean	173.46	169.69
S.D.	5.34	9.58
Weight (kg)		
Mean	66.23	60.62
S.D.	4.27	13.93
Exercise (h/week)		
Mean	14.28	—
S.D.	3.40	—
Male / Female		
Male	13	9
Female	—	4

B



A

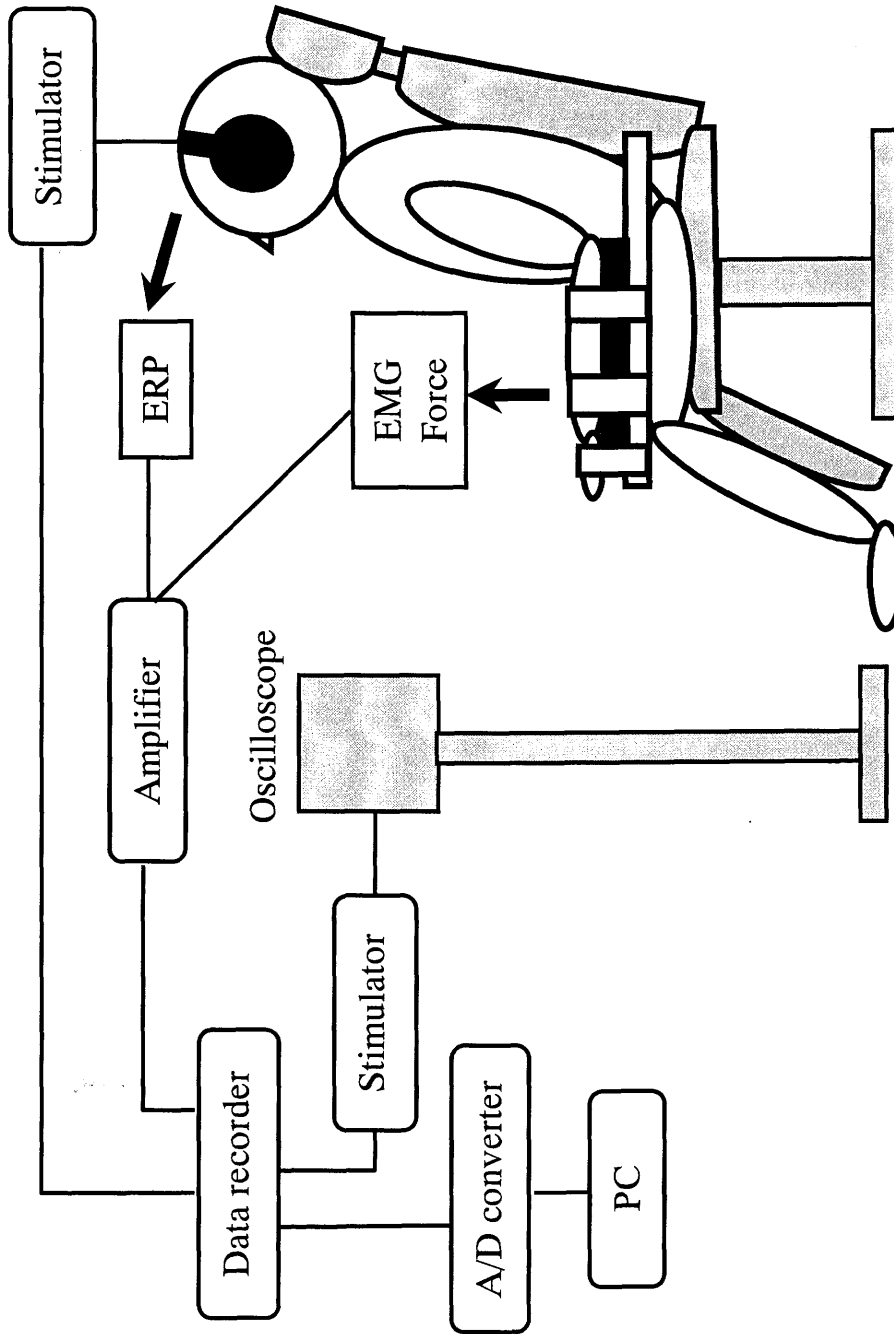
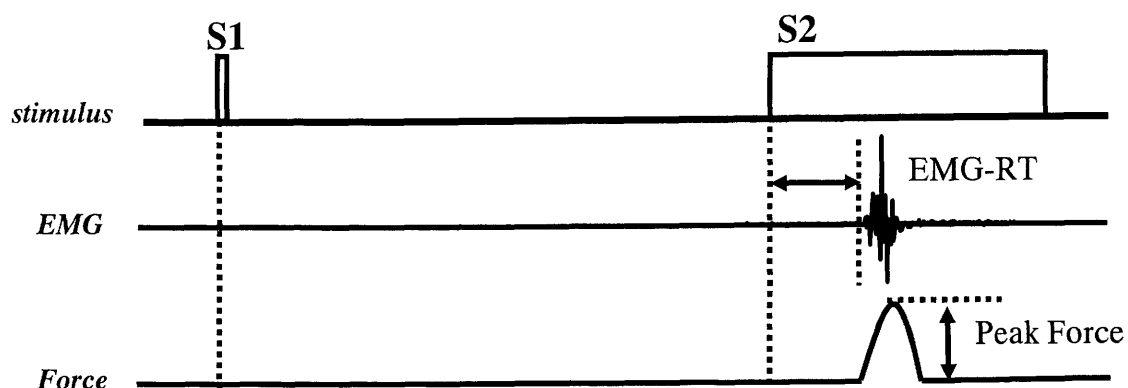
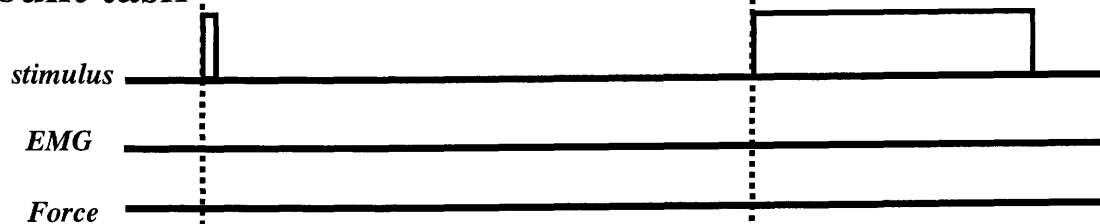


図2-1. 実験状況 (A)、およびEEGの記録電極の位置 (B) についての模式図。被験者の前腕は、ストレインゲージの装着されたプレート上に固定した。聴覚刺激はヘッドホンからの音刺激として、視覚刺激は被験者の眼前約1.7 mに設置されたオシロスコープ画面上にターゲットビームとして呈示した。記録電極は、国際10-20法にもとづき、頭皮上の5部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) を被験者ごとに決定した。

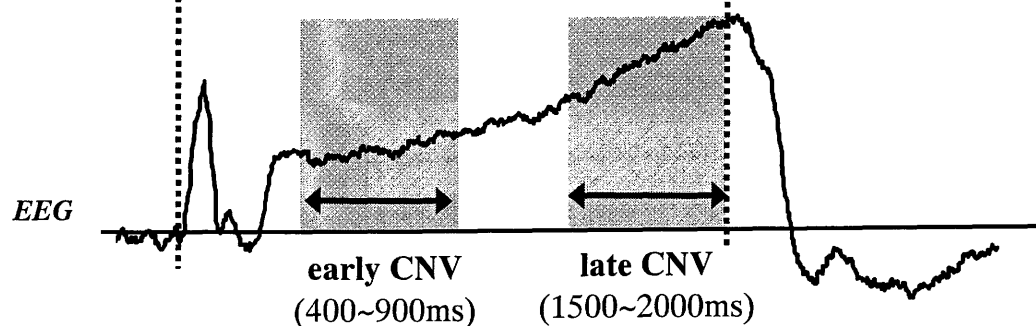
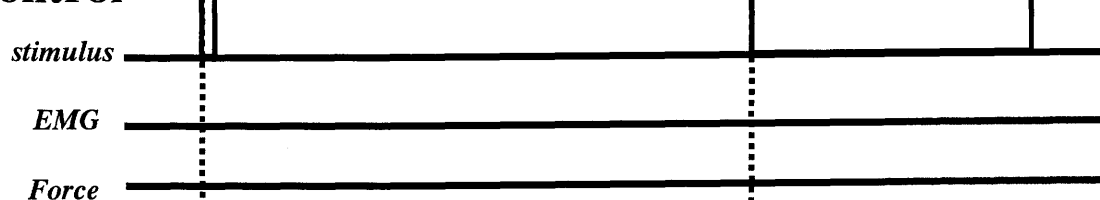
A. reaction task



B. count task



C. control



(catch trial)

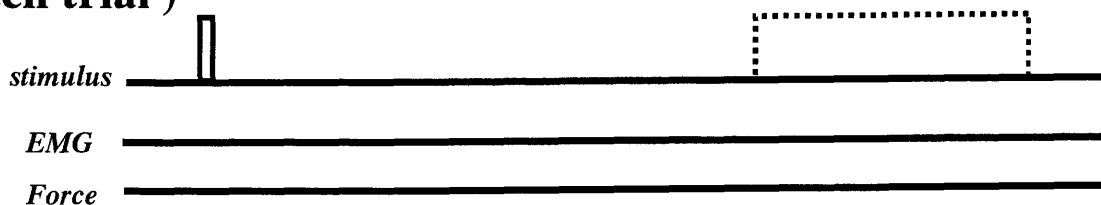
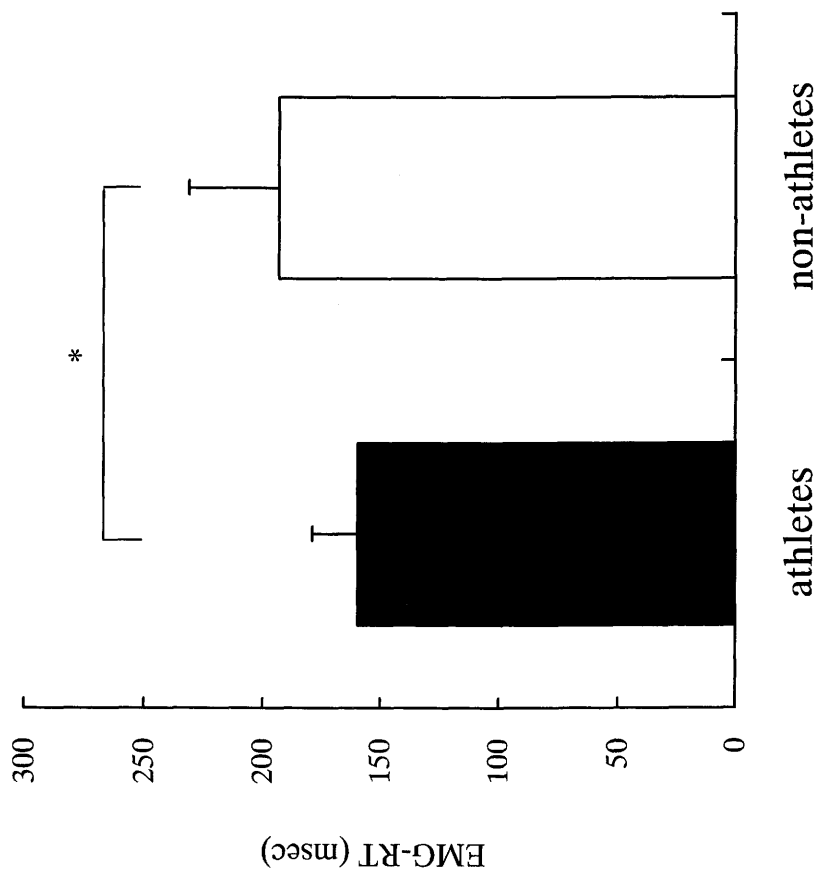
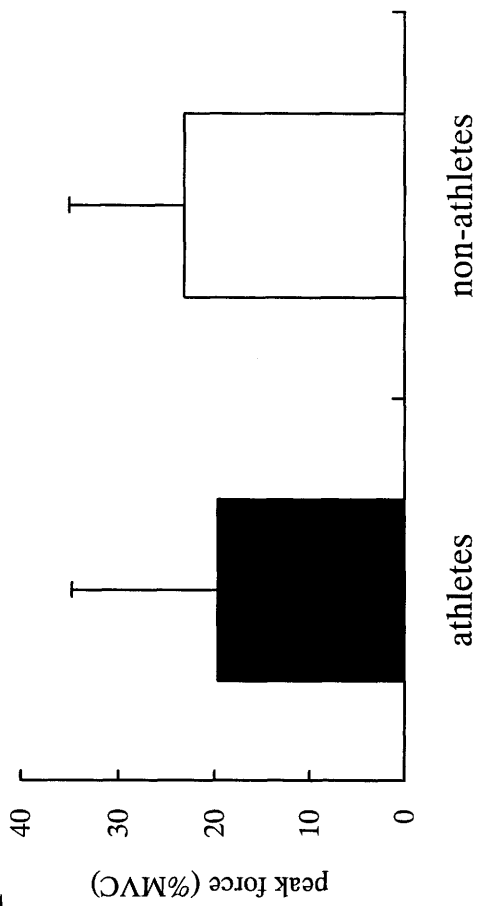


図2-2. 実験課題の模式図。各課題（反応課題：A、計数課題：B、コントロール：C）とも、聴覚刺激による予告刺激（S1）の2秒後、反応刺激（S2）としてオシロスコープ画面上に視覚刺激が呈示される。A:反応課題ではS2呈示後、素早く反応動作を行う。B:計数課題ではS2の呈示回数を数える。C:コントロールでは呈示される刺激に注意を向けない。各課題とも、S1後にS2が呈示されないキャッチ試行を全試行の10%の確率でランダムに挿入した。それぞれ上段から呈示刺激、EMG、力発揮曲線を示す。また、A,B,Cにおいては課題遂行に伴って得られたCNV波形から、早期CNVおよび後期CNVを分析の対象区間とした。

A. EMG-RT



B. peak force



C. slope

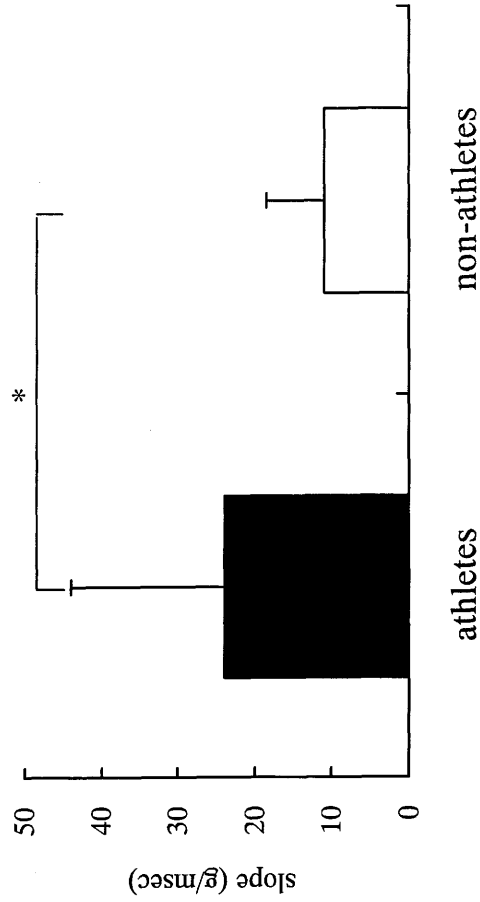


図2-3. 反応課題における各運動パラメータ (A: EMG-RT, B: 発揮力, C: 力がピークに達するまでの傾斜) の結果。黒と白の棒はそれぞれ競技者と非競技者のEMG-RTおよび最大発揮力の平均値と標準偏差を示している。

* $p < 0.05$

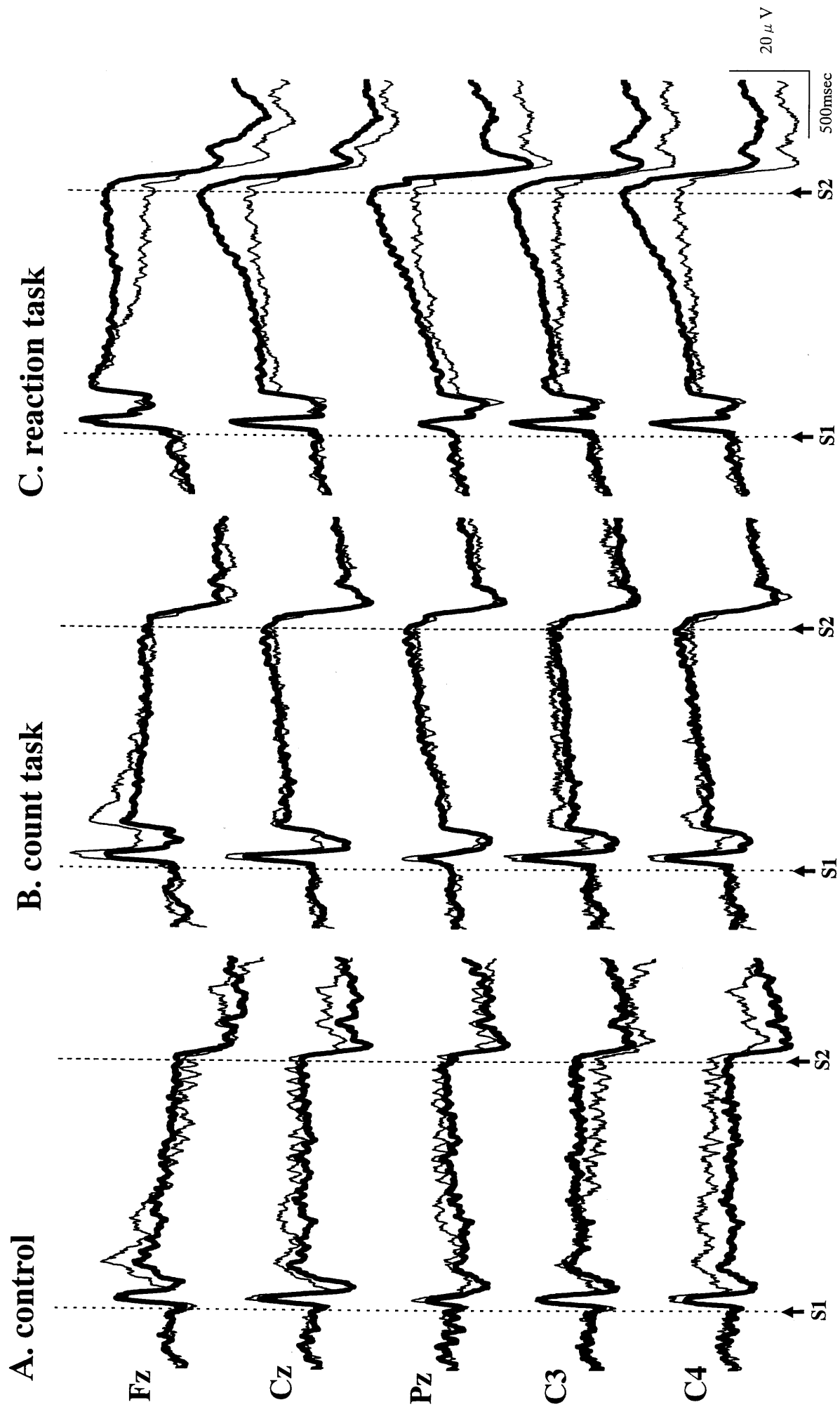


図2-4. 課題条件 (コントロール; A, 計数課題; B, 反応課題; C) ごとに頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者におけるCNVのグラインドアベレージ波形。各課題ともに太線は競技者、細線は非競技者を示し、破線はそれぞれ予告刺激(S1)と反応刺激(S2)の呈示時点を示している。

表2-2. 計数課題および反応課題において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者の早期CNV。競技者においてのみ計数課題より反応課題で振幅が増大した。

	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
early CNV amplitude (μ V)				
Fz	-3.82 \pm 4.5	-5.65 \pm 7.5	-8.55 \pm 6.3	-7.98 \pm 8.0
Cz	-2.48 \pm 2.9	-3.14 \pm 4.7	-6.29 \pm 4.6 *	-5.25 \pm 5.8
Pz	-1.23 \pm 2.1	-1.21 \pm 3.3	-2.44 \pm 2.9 *	-1.36 \pm 4.2
C3	-1.92 \pm 2.6	-3.47 \pm 4.9	-4.59 \pm 3.8 *	-4.02 \pm 6.3
C4	-2.10 \pm 2.6	-3.37 \pm 4.9	-4.73 \pm 4.0 *	-4.38 \pm 4.6

Values are mean \pm S.D.

* $p < 0.05$, count vs. reaction for athletes

表2-3. 計数課題および反応課題において頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者の後期CNV。計数課題にグループ間の差は認められないが、反応課題において非競技者より競技者で振幅が大きかった。

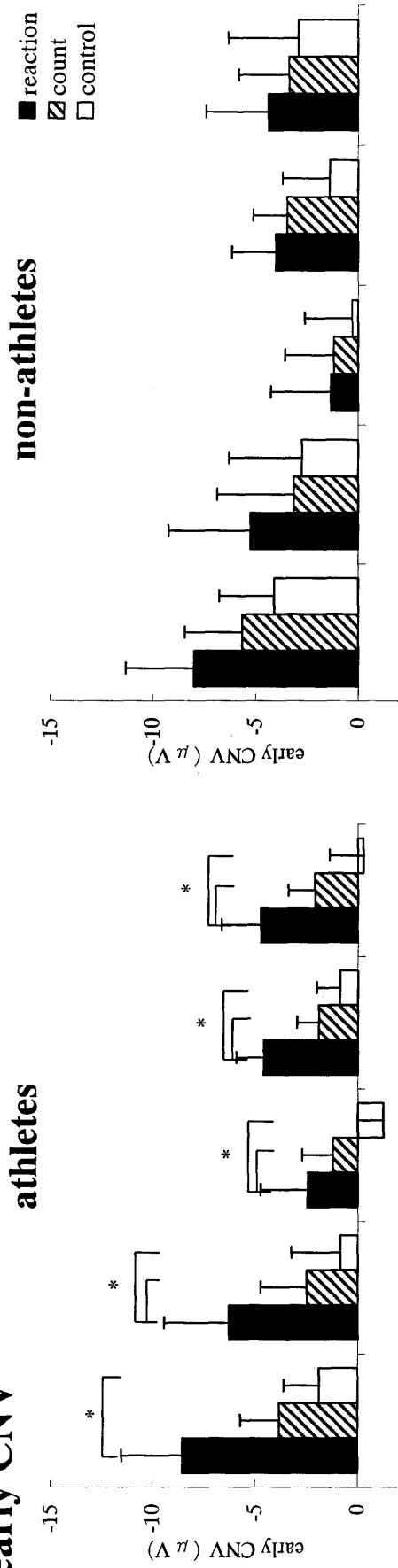
	count		reaction	
	athletes	non-athletes	athletes	non-athletes
late CNV amplitude (μ V)				
Fz	-3.82 \pm 4.4	-5.65 \pm 7.5	-8.55 \pm 6.3 *	-7.984 \pm 8.0 #
Cz	-2.48 \pm 2.9	-3.14 \pm 4.7	-6.29 \pm 4.6 *	-5.251 \pm 5.8 #
Pz	-1.23 \pm 2.1	-1.21 \pm 3.3	-2.44 \pm 2.9 *	-1.357 \pm 4.3
C3	-1.92 \pm 2.6	-3.47 \pm 4.9	-4.59 \pm 3.8 *	-4.02 \pm 6.0 #*
C4	-2.10 \pm 2.6	-3.37 \pm 24.9	-4.73 \pm 4.0 *	-4.383 \pm 4.6 #*

Values are mean \pm S.D.

* $p < 0.05$, count vs. reaction

$p < 0.05$, athletes vs. non-athletes for reaction task

A. early CNV



B. late CNV

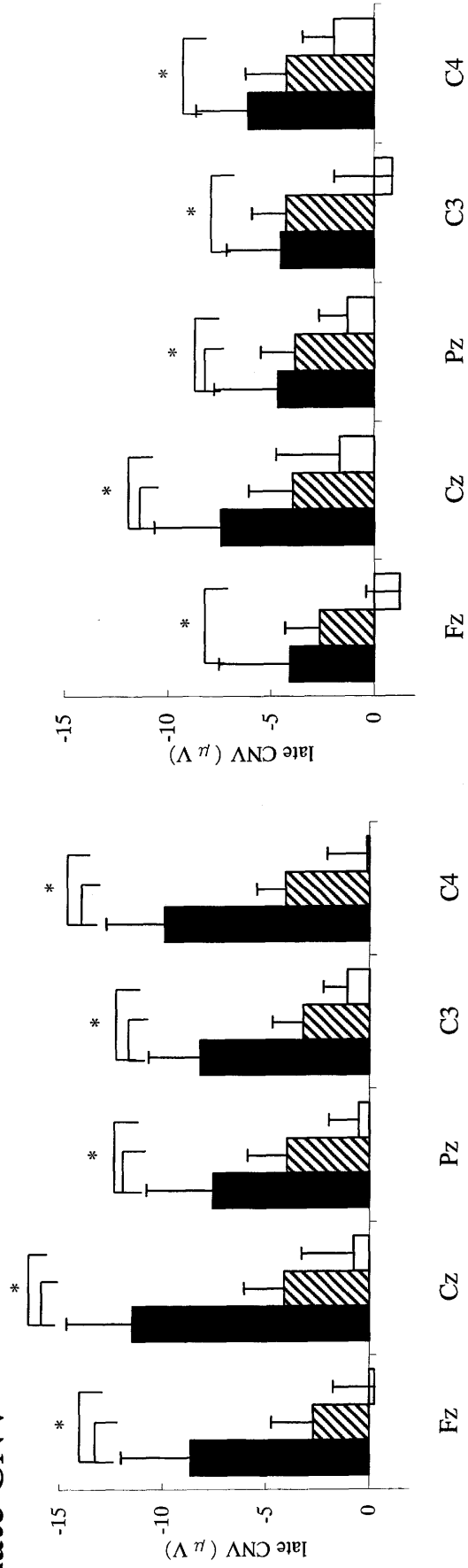


図2-5. 各課題から得られた早期CNV(A)および後期CNV(B)の振幅について、頭皮上分布および課題間を比較して示した。左側が競技者、右側は非競技者を示し、それぞれの棒は黒が反応課題、斜線が計数課題、白がコントロール条件での平均振幅および標準偏差である。競技者ではコントロールおよび計数課題より反応課題で大きな振幅を示した。
* $p < 0.05$

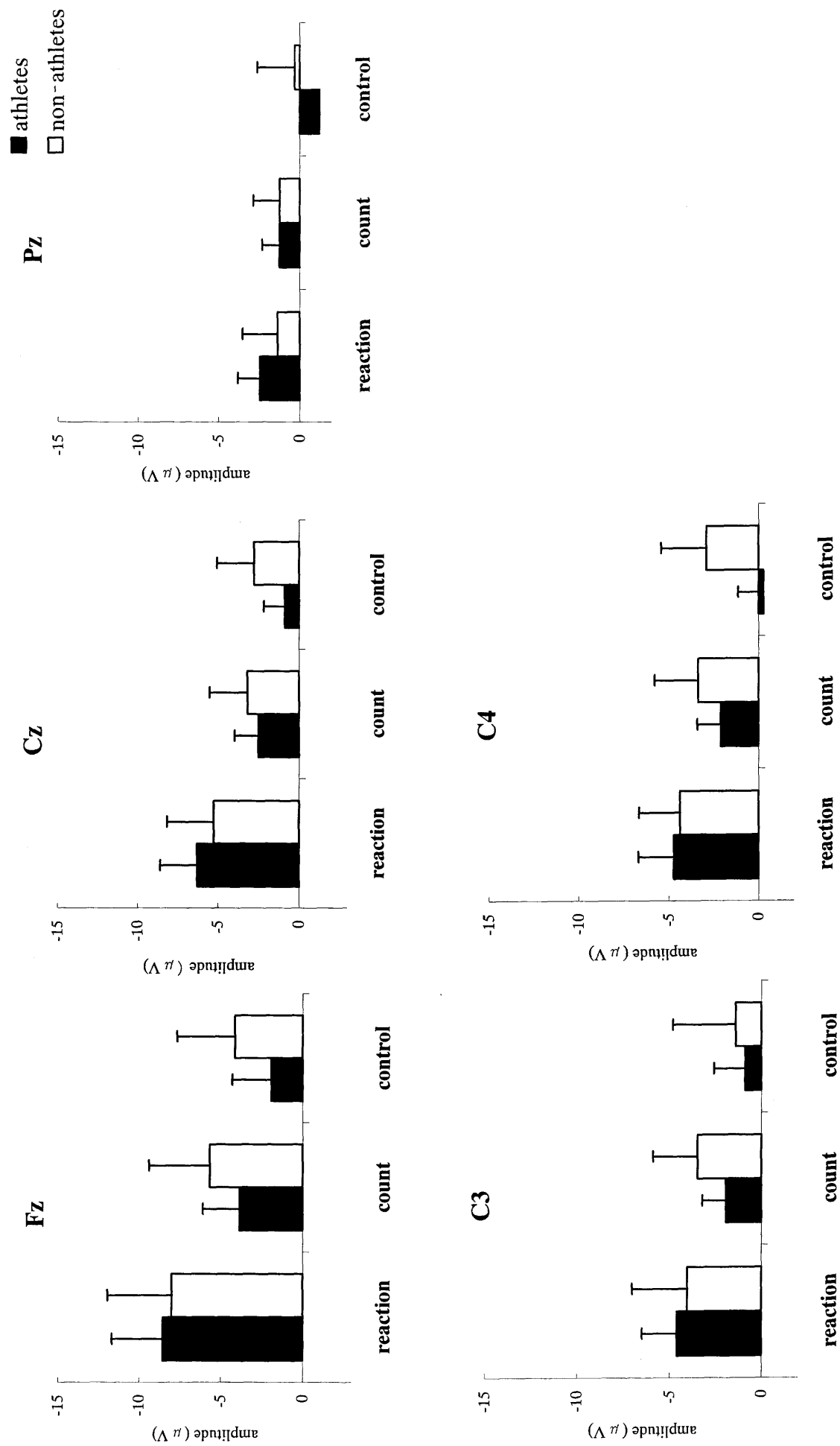


図2-6. 各課題から得られた早期CNVの振幅について、導出部位ごとにグループ間を比較して示した。それぞれの棒は黒が競技者、白が非競技者における平均振幅および標準偏差である。

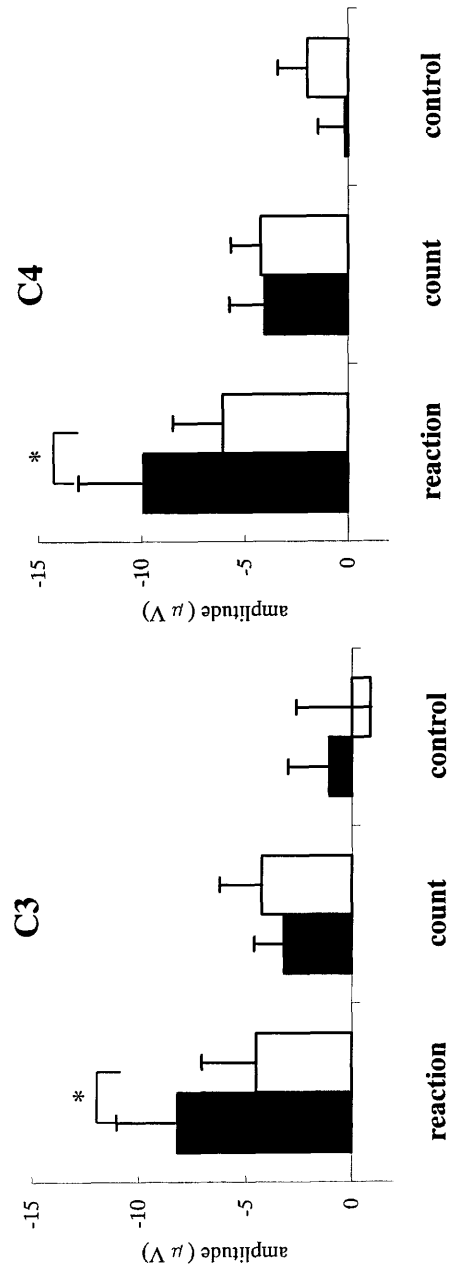
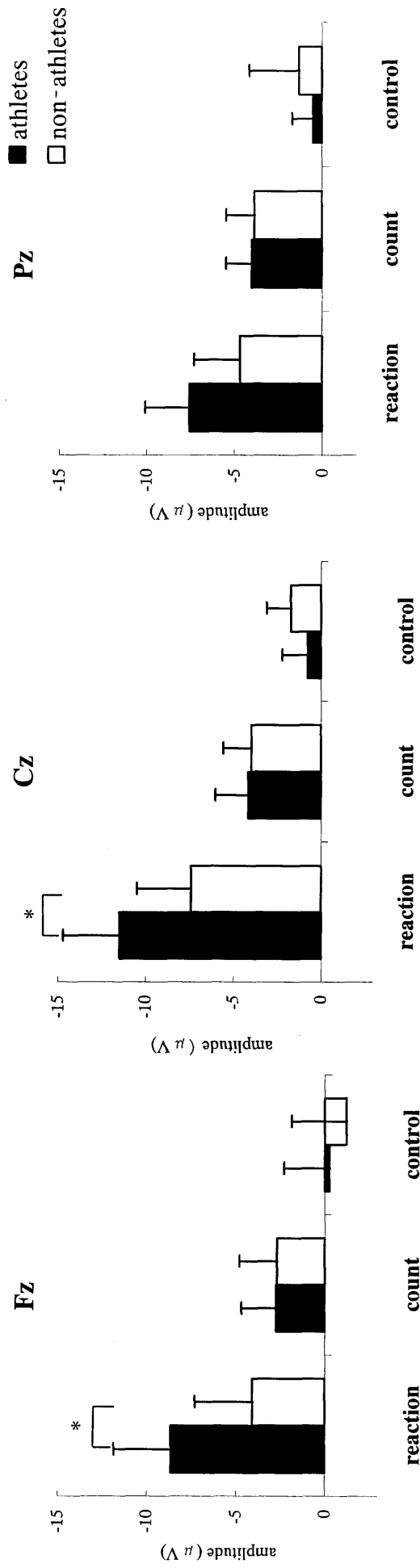


図2-7. 各課題から得られた後期CNVの振幅について、導出部位ごとにグループ間を比較して示した。それぞれの棒は黒が競技者、白が非競技者における平均振幅および標準偏差である。反応課題においてのみ非競技者より競技者で大きな振幅を示した。
* p<0.05

第VI章

随意運動の反復が感覚刺激処理過程に及ぼす影響

(研究課題3)

1. 目的

研究課題1、2では、長期的な運動トレーニングの反復によって起こる適応変化が、反応時間およびそれに関与する脳内での感覚情報の処理過程や運動準備過程にも生じていることが示唆された。しかし、個人間を比較した横断的研究のみでは、トレーニングの反復やスキルの獲得による脳内の変化を十分明らかにすることはできない。近年、このような長期間の活動に依存して起こる脳の可塑的な変化は、短期間の運動の反復においても論じられている (Classen et al., 1998; Staines et al., 2002)。すなわち、短期間の変化が長期間にわたり繰り返し行われることによって定着し、より効率的で合目的的な制御へと変容した結果であると考えられる。

そこで、研究課題3では、随意運動の反復による感覚刺激処理過程の変動について、単純な運動課題と、巧緻な制御が必要となる運動課題とを比較し、パフォーマンスとの関連から検討することを目的とした。

2. 方法

2-1. 被験者

被験者は、健常成人10名(男性9名, 女性1名, 平均年齢 25 ± 2.4 歳)であった。被験者はいずれも右利きであり、事前に実験の主旨および方法について十分説明したうえで実験参加の同意を得た。実験中、被験者は23~25度に空調されたシールドルーム内の安楽椅子に腰掛け、安静を保つよう指示した。被験者の左前腕は回内位、肘関節角度が約120度となるよう実験装置に固定し、前方約1mには、視覚刺激を呈示するためオシロスコープを設置した(図3-1)。

2-2. 課題

次の2つの課題を行った（図 3-2）。

バリスティック課題

ヘッドホンから呈示される予告刺激（S1）の2 sec 後、反応刺激（S2）としてオシロスコープ画面上にターゲットビームを呈示した。被験者にはできるだけ素早い左手関節の屈曲動作を行うよう指示した。この際、オシロスコープ上には、被験者が発揮する力をモニターできないようにした。

ターゲットマッチ課題

バリスティック課題と同じく S1 後に S2 が呈示されるが、ターゲットマッチ課題では S2 としてオシロスコープ画面上に最大随意収縮（maximum voluntary contraction : MVC）の10%に相当するターゲットラインが呈示された。被験者には S2 呈示後、ターゲットラインにできるだけ素早く、かつ正確に発揮張力を合わせる左手関節の屈曲動作を行い、画面上からビームが消えるまで力を維持するよう指示した。

両課題ともに S1 の音提示は、2,000 Hz、持続時間は 50 msec、立ち上がり/立ち下がり時間は 5 msec、強度 65 dB とした。S2 の持続時間は 1 sec であった。試行間隔は 10 sec で 30 試行を 1 ブロックとし、10 ブロックが行われた。被験者が S2 を予測して反応することを防ぐため、試行回数の 10% をキャッチ試行としてランダムに呈示した。ブロック間隔は 3~4 分であった。

2-3. 記録・データ処理

Behavioral データ

反応動作に伴う筋電図は、動作肢の橈側手根屈筋（flexor carpi radialis: fcr）と橈側手根伸筋（extensor carpi radialis: ecr）の各筋に表面電極を装着し、

高周波フィルター1500 Hz、時定数 0.03 sec で双極導出し、コンピュータのハードディスクに記録した。EMG-RT は、加算の対象とした試行の反応刺激の呈示から急激な筋放電の始まる時点までとして計測した。

EEG

EEG の記録は国際 10-20 法に従い、Fz、Cz、C3、C4、Pz の頭皮上 5 部位より両耳朶連結を基準として Ag/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。記録条件は高周波フィルター100 Hz、時定数 0.3 sec とし、電気抵抗はすべて 5k Ω 以下とした。同時に、眼球運動に伴うアーチファクト混入を検出するため、眼電図を左眼窩上下縁から導出記録した。得られたアナログデータは DAT テープに記録し、A/D 変換ボードを介した後、刺激前 200 msec から刺激後 600 msec を分析区間として、サンプリング周波数 250 Hz でコンピュータのハードディスクに記録された。眼球運動が分析区間内に認められたときはその区間を分析の対象外とし、15 回以上の加算平均処理を行った後、ERP を求めた。分析の対象とした P300 は、誘発された波形の潜時と極性から刺激呈示後 250~500 msec に生じる最大陽性電位として同定し、潜時と振幅の測定を行った。振幅は刺激前 100 msec の平均電位を基線として計測した。

2-4. 統計処理

P300 の振幅および潜時は、課題（バリスティック課題, ターゲットマッチ課題） \times 導出部位（Fz, Cz, Pz, C3, C4） \times ブロック（1-10）の 3 要因による反復測度の分散分析を行った。EMG-RT は、課題（バリスティック課題, ターゲットマッチ課題） \times ブロック（1-10）の 2 要因による反復測度の分散分析を行った。主効果が認められたときは Fisher's Protected LSD による多重比較を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。また、分散分析の結果は Greenhouse-Geisser 法による自由度の修正を行い、有意確率を再計算した。有意差検定での有意水準は 5%未満とした。

3. 結果

3-1. Behavioral データ

EMG-RT に関して反復測度の分散分析を行った結果、ブロック間の主効果 ($F=8.406, p<0.001$) および、課題とブロック間に交互作用 ($F=6.88, p<0.001$) が認められた。下位検定の結果、バリステック課題においてはブロック間に変動が認められなかったのに対し、ターゲットマッチ課題では、有意に短縮した ($1 > 6-8$ ブロック, $p<0.05$; $1 > 9, 10$ ブロック, $p<0.01$) (図 3-3)。

3-2. P300

図 3-4 は、各課題の反応刺激から誘発された全被験者の ERP をブロックごとに加算平均した波形を示している。本研究では、すべての被験者、ブロックにおいて P300 成分が確認された。

P300 潜時に関して反復測度の分散分析を行った結果、ブロックと課題に交互作用 ($F=2.226, p<0.05$) が認められた。下位検定の結果、反復に伴うブロック間の変動には課題で異なる結果が得られ、バリステック課題ではブロック間の変動が認められなかったのに対し、ターゲットマッチ課題では有意に短縮した ($F=3.006, p<0.01$) (図 3-5)。さらに、ターゲットマッチ課題の変動には導出部位で異なる結果が得られ、Pz においてのみ有意な短縮が認められた ($1>5-10$ ブロック, $p<0.05$)。

P300 振幅に関して反復測度の分散分析を行った結果、課題 ($F=51.078, p<0.001$)、導出部位 ($F=2.833, p<0.05$)、ブロック ($F=7.401, p<0.001$) に主効果が認められた。また、課題とブロックに交互作用 ($F=2.306, p<0.05$) が認められた。導出部位を多重比較した結果、頭頂部優位 ($Pz > Fz, Cz, C3, C4, p<0.01$) の頭皮上分布が得られた (図 3-6)。さらに下位検定の結果、反復に伴うブロック間の変動には課題で異なる結果が得られ、バリステック課題ではブロック間の変動が認められなかったのに対し、ターゲットマ

ツチ課題では前頭－中心部で有意な振幅の減少が認められた (Fz : 1>3-10
ブロック, $p<0.05$; Cz : 1>7-10 ブロック, $p<0.05$)。

4. 考察

研究課題 3 では、反応動作課題の反復による感覚刺激の情報処理過程の変動とパフォーマンスの変動との関係について、P300 と EMG-RT を指標とし、異なる動作課題を比較することによって検討した。本研究で得られた主な知見は、1) バリスティック課題では反応動作の反復に伴う EMG-RT、P300 潜時および振幅に変動は認められないこと、2) ターゲットマッチ課題では、反応動作の反復に伴い EMG-RT および P300 潜時は短縮し、P300 振幅は前頭-中心部で減少したことである。

研究課題 1 および 2 では、長期間における運動が感覚-運動処理過程に影響を及ぼすことが示唆された。このような長期間の運動効果は、日々繰り返し行うトレーニングの積み重ねによる結果である。また、新しい運動を獲得しようとしたとき、我々は繰り返し何度もその運動パターンを練習する。このような状況下、すなわち、運動が反復して行われる最中において、そのパフォーマンスの変動に伴う高次脳機能の変動動態を明らかにすることは、ヒトの日常行動にも大きく関与する運動学習のメカニズムの解明として重要である。

本研究では、反応動作の異なる課題を比較して検討した結果、課題の反復効果はターゲットマッチ課題においてのみ認められた。ターゲットマッチ課題とバリスティック課題間の相違は、命令刺激の呈示後に行う反応動作の違いであり、バリスティック課題が「素早さ」のみが要求された比較的単純な動作であるのに対して、ターゲットマッチ課題では「素早さ」と「正確さ」が要求されたより巧緻な制御が必要とされる動作であった。

本研究において、EMG-RT はターゲットマッチ課題で課題の反復に伴い有意に短縮した。課題の反復に伴うパフォーマンスの変動はこれまでも報告されており、動作の正確性は向上し RT は短縮する (Corcos et al., 1993; Flament et al., 1999)。しかしながら、バリスティック課題において変動が認められなかったことについては、本研究が命令刺激の前に予告刺激が呈示されていること、全ての命令刺激に反応する課題であること、遂行された

運動のフィードバックがなかったことが推察される。バリスティック課題の反応動作として要求されたような急速運動 (ballistic-movement) は、持続時間が短く、末梢のフィードバックがなくても遂行されることから事前にプログラミングされた運動であることが知られている (Forget and Lamarre, 1987)。この急速運動については、Brooks (1981) が運動終了までの時間が 200 msec 程度のできるだけ素早く行う運動を急速運動と分類している。本研究におけるバリスティック課題での運動時間は、ほぼ 200 msec で終了していたことから、Forget and Lamarre (1987) が示したように事前にプログラミングされた運動であったと考えられる。したがって、課題の反復に伴うパフォーマンスの変動はみられなかったものと考えられる。一方、ターゲットマッチ課題での変動は、視覚刺激と運動を連合する認知学習や刺激に応じて迅速に、かつ正確な運動するようになるような運動の獲得プロセスをたどった結果であることを示している。これは、本研究で設定した発揮張力が、最大発揮張力の 10% という非常に小さな力であり、より中枢神経系における巧緻な制御が必要とされる運動であったことから説明できる。このような発揮張力量の制御は、脊髄における運動単位の動員や活動電位の発射頻度を主に皮質からの指令によって巧みに変化させ、行っている。したがって、ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴い、その運動に対応した選択的な運動単位の動員・抑制や活動電位の発射様相が行われるように皮質の制御動態が変動したものと推察される。

ターゲットマッチ課題では、課題の反復による EMG-RT の短縮とともに、P300 潜時が頭頂部で有意に短縮した。P300 潜時の変動が頭頂部で認められたことについては、反応刺激として呈示した視覚刺激と、視覚の情報処理経路が関係していることが考えられる。本研究における視覚刺激はオシロスコープ上に呈示されるターゲットビームであり、被験者はそのターゲットビームに対して正確に、かつ素早く自分の反応動作によって移動する発揮張力曲線を合わせなければならない。したがって、被験者は呈示された視覚刺激の色や形状という情報の処理よりむしろ、位置情報の認知や判断

が重要となる。これまでの研究において、色・形と位置という視覚情報はそれぞれ脳の別系統によって処理されていることが報告されている (Mishkin, 1983)。すなわち、眼の網膜で受容された視覚情報は、視床の外側膝状体で中継され、大脳皮質の後頭葉に位置する一次視覚野に到達するが、その後情報の流れは側頭方向と頭頂方向という2つの経路に大きく分かれる。側頭方向では色や形の認知のための情報処理がなされ、頭頂方向では空間的な位置や動きが処理される。したがって、本研究において被験者に呈示した視覚刺激の処理は特に頭頂葉が関与していると考えられ、処理に要する時間が運動の獲得とともに短縮したことが示唆される。しかしながら、EMG-RTの短縮が6ブロック目以降から認められたのに対し、P300潜時の短縮は7ブロック目以降と遅れて認められたことから、運動実行過程および感覚刺激処理過程に関与する時間へ反復の影響は異なることが示唆された。

P300振幅は、課題の反復に伴いターゲットマッチ課題において前頭-中心部で減少した。P300振幅は、刺激の処理に要する注意の分配量を含む認知機能を反映していることから (Donchin and Coles, 1988; Kutas et al., 1977)、ターゲットマッチ課題では反復に伴い少ない注意で課題遂行が可能になったことが考えられる。これは、EMG-RTの短縮からも説明できる。つまり、ターゲットマッチ課題では要求された反応動作に巧緻な制御が必要とされるためにブロックの初期ではより多くの注意が必要であったが、反復することによって反応動作がほとんど自動化され、もはや意識的に注意を向ける必要がなくなったため、P300振幅も減少したと考えられる。また、本研究では前頭-中心で振幅の減少が認められたことからこれを支持する。前頭皮質は注意機能に深く関与しており、定位反応との関連性も推察されている。この定位反応の重要な特徴は慣れ *habituation* を示すことであり、これは刺激にかなった反応・行動が学習されたことを表すとも言える。P300における *habituation* の影響についてはこれまでも報告されており、これらの結果は、一貫して振幅の減少を示している (Lammers and Badia, 1993;

Lew and Polich, 1993; Pan et al., 2000; Romero and Polich, 1996; Rose et al., 2001; Staines et al., 2002)。しかしながら、遂行される課題やそのパフォーマンス、P300 潜時などの結果は一致しておらず、P300 振幅の減少の要因として、P300 潜時や反応時間の延長を伴う場合、集中力やモチベーション、疲労などの覚醒レベルの低下による注意維持機能の低下を推察しており、一方、潜時や反応時間が短縮したり変動がない場合、刺激処理過程が自動化し、より少ない注意で課題が遂行可能となったことによることを示唆している (Ravden and Polich, 1998; Staines et al., 2002)。本研究の結果から P300 潜時、EMG-RT とともに短縮したことから、後者の主張を支持するものであり、P300 振幅の減少が覚醒レベルなどの低下に起因するものではなく、運動の反復による効果であると示唆される。

Staines et al. (2002) は、視覚刺激に対する運動追跡課題において、前頭部での P300 様電位の減少を認めており、運動学習の初期では感覚刺激と運動の統合に注意が必要とされるため前頭の活動が促進するが、運動の獲得に伴い前頭の活動は減少し中心-頭頂葉に活動部位が変化することを結論している。同様に、Sakaki et al. (1998) は、指の運動学習に関与する皮質活動の変化を fMRI を用い検討した結果、運動獲得後、前頭前野の活動が減少し、頭頂へシフトしたことを示している。このようなイメージング法を用いた脳研究では、時間分解能の限界から運動獲得と皮質活動領域の時間関係について厳密に対応しているとはいえないが、短期間の運動の反復に伴って前頭皮質の活動が減少することは明らかである。

本研究において、このような電位の変動が、ターゲットマッチ課題においてのみ認められたことについては、命令刺激として提示された視覚刺激に含まれる情報の重要性の相違が考えられる。P300 振幅はこのように被験者にとってより有用な情報を含む刺激で出現するとされている。本研究でのバリスティック課題では視覚刺激が単なる反応のスタートとしての意味しか持っていないのに対し、ターゲットマッチ課題ではスタート合図とともにそのラインに正確に合わせるという運動目標でもあった。視覚刺激に

対する変動が課題で異なると考えられる。さらに、運動の反復による皮質活動の変化は、単純な動作の反復よりも、より複雑で精密な制御が必要である運動の習得に依存して起こることも fMRI を用いた検討で示されている (Karni et al., 1995)。

これらのことから、運動の反復によって反応動作のパフォーマンスは向上するとともに感覚刺激の処理過程は変動するが、その反復効果は課題に依存して異なり、より巧緻な制御が必要である運動において認められることが明らかとなった。

5. 要約

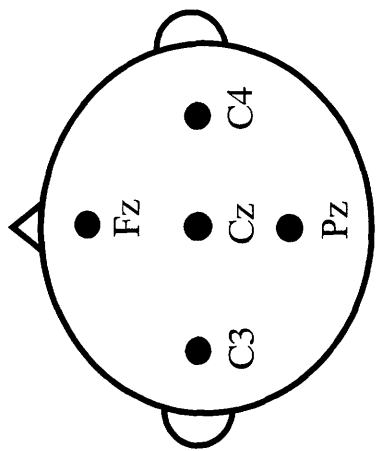
本研究は、随意運動の反復によるパフォーマンスの変動と感覚刺激の処理過程の経時的変動について、バリスティック課題とターゲットマッチ課題を比較し検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) バリスティック課題では、運動の反復に伴うパフォーマンスの変動は認められなかったが、ターゲットマッチ課題では EMG-RT が短縮した。

(2) バリスティック課題では、運動の反復に伴う P300 に変動はなかったが、ターゲットマッチ課題では P300 の潜時が短縮し、振幅は前頭-中心部で減少した。

これらのことから、運動の反復によって反応動作のパフォーマンスは向上するとともに感覚刺激の処理過程は変動するが、その反復効果は課題に依存して異なり、より巧緻な制御が必要である運動において認められることが示唆された。

B



A

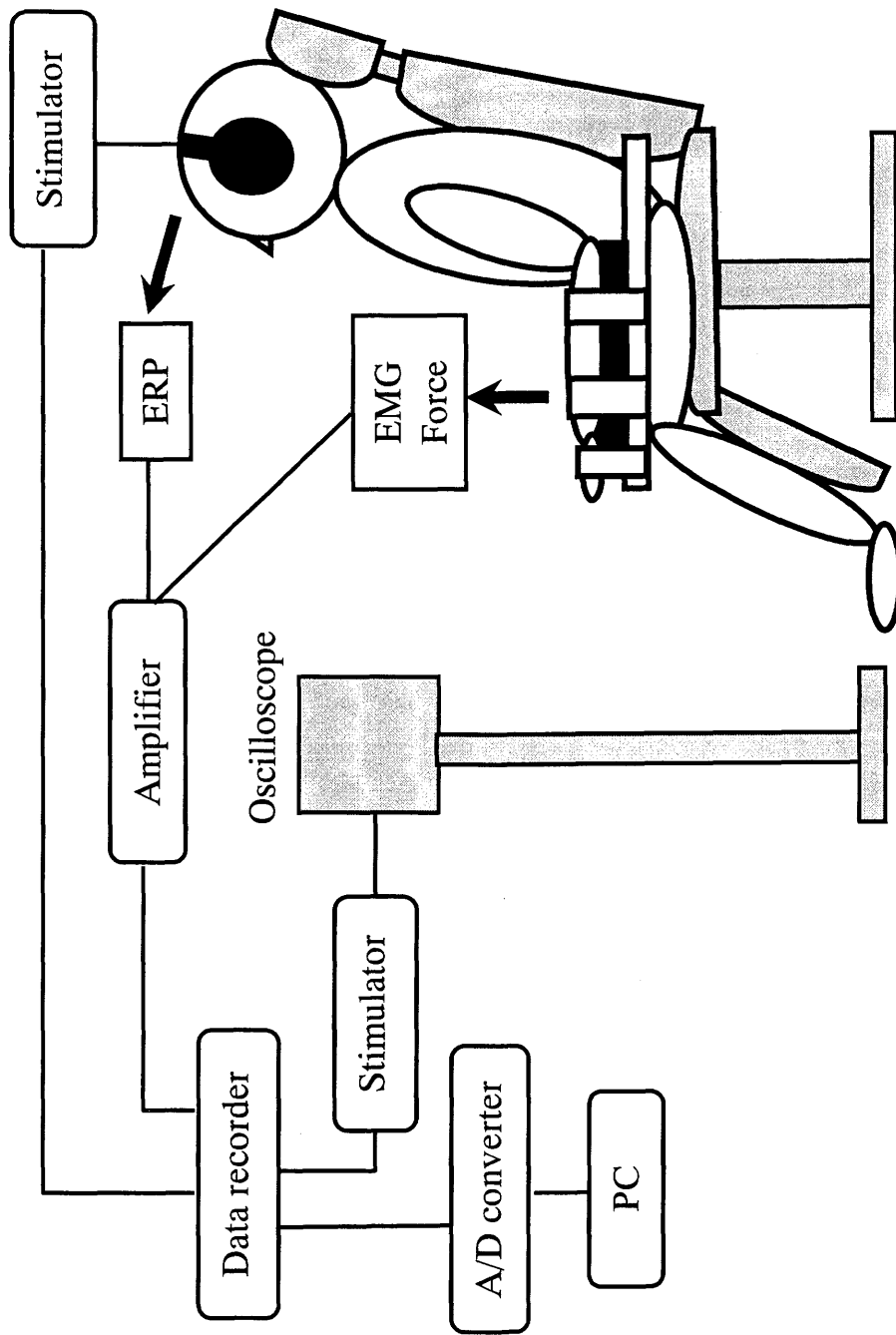
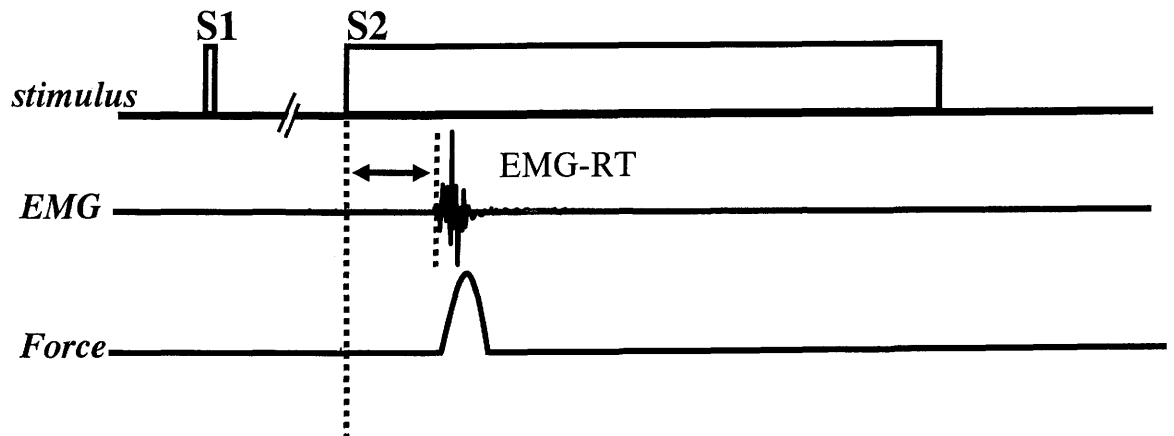
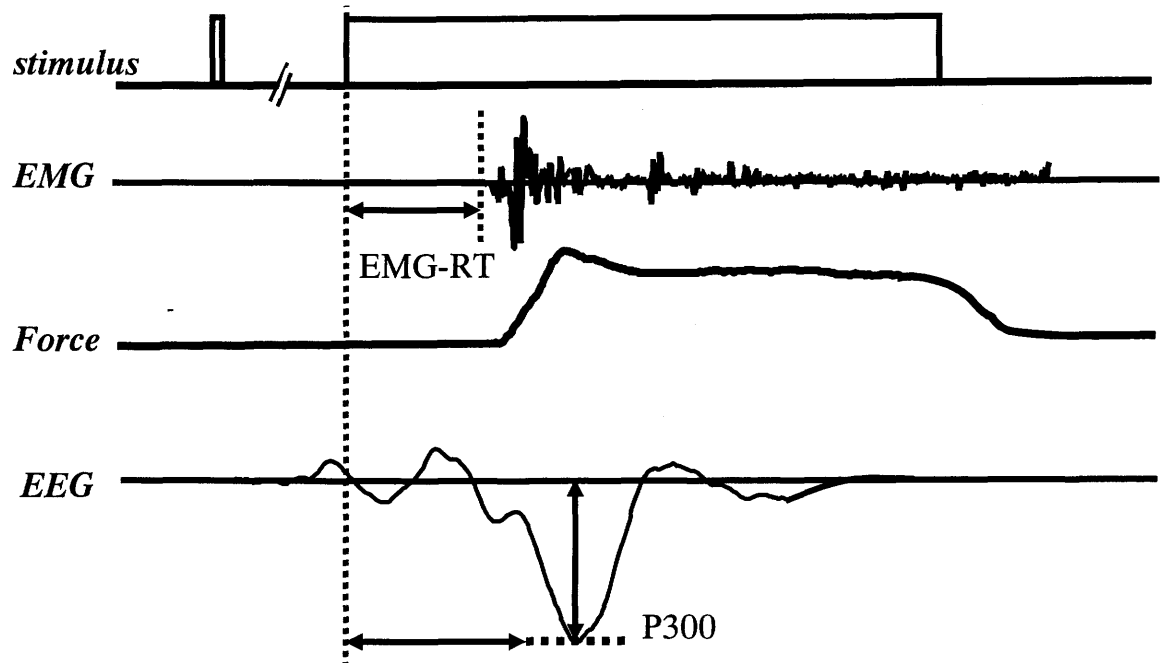


図3-1. 実験状況 (A)、およびEEGの記録電極の位置 (B) についての模式図。被験者の前腕は、ストレイレンジの装着されたプレート上に固定した。聴覚刺激はヘッドホンからの音刺激として、視覚刺激は被験者の眼前約1.7 mに設置されたオシロスコープ画面上にターゲットビームとして呈示した。記録電極は、国際10-20法にもとづき、頭皮上の5部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) を被験者ごとに決定した。

A. ballistic task



B. target match task



(catch trial)

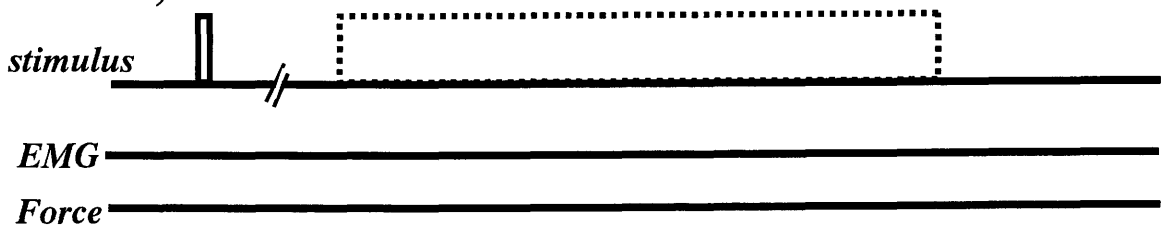


図3-2. 実験課題の模式図。A：予告刺激 (S1) の2秒後、反応刺激 (S2) としてターゲットラインが呈示されたら素早く反応する(パリスティック課題)。B：S2として最大随意収縮の10%の張力に相当するターゲットラインが呈示され、素早くかつ正確にライン上に合わせるように反応する(ターゲットマッチ課題)。また、S1後にS2が呈示されないキャッチ試行を各課題とともに全試行の10%の確率でランダムに挿入した。それぞれ課題ごとに上段から呈示刺激系列、EMG、力発揮曲線を示している。A、BにおいてはS2呈示後、誘発されたERPからP300を同定し、振幅と潜時を計測した。

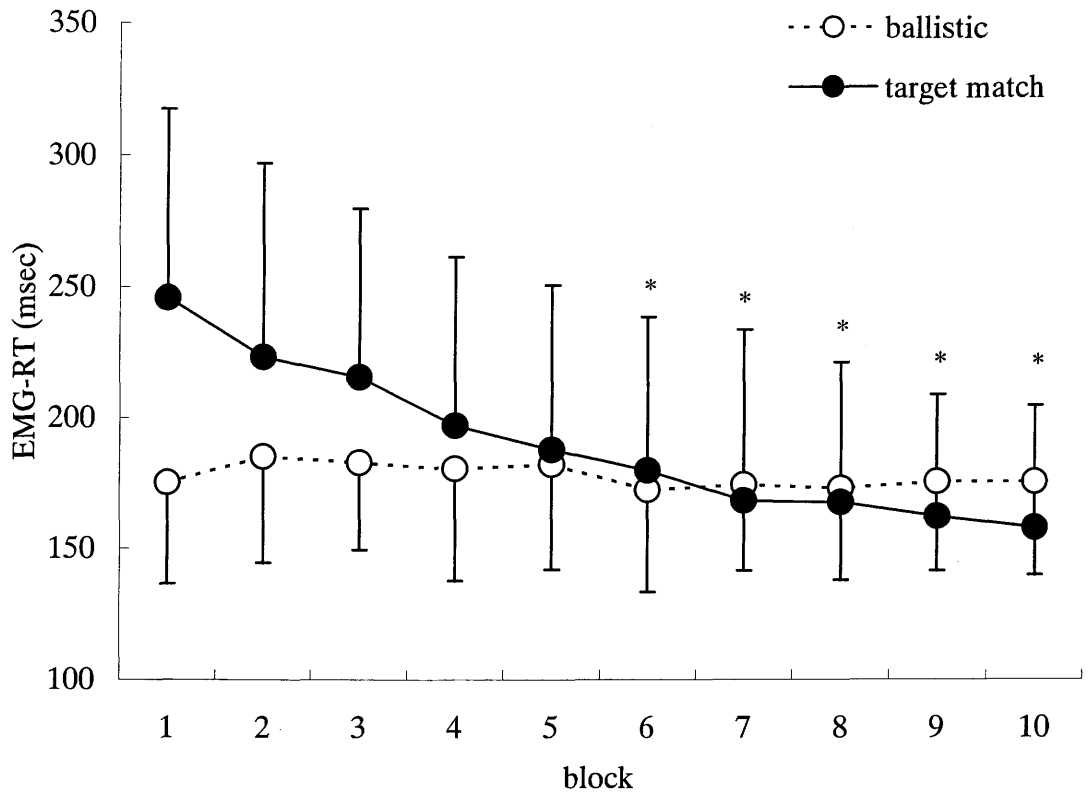
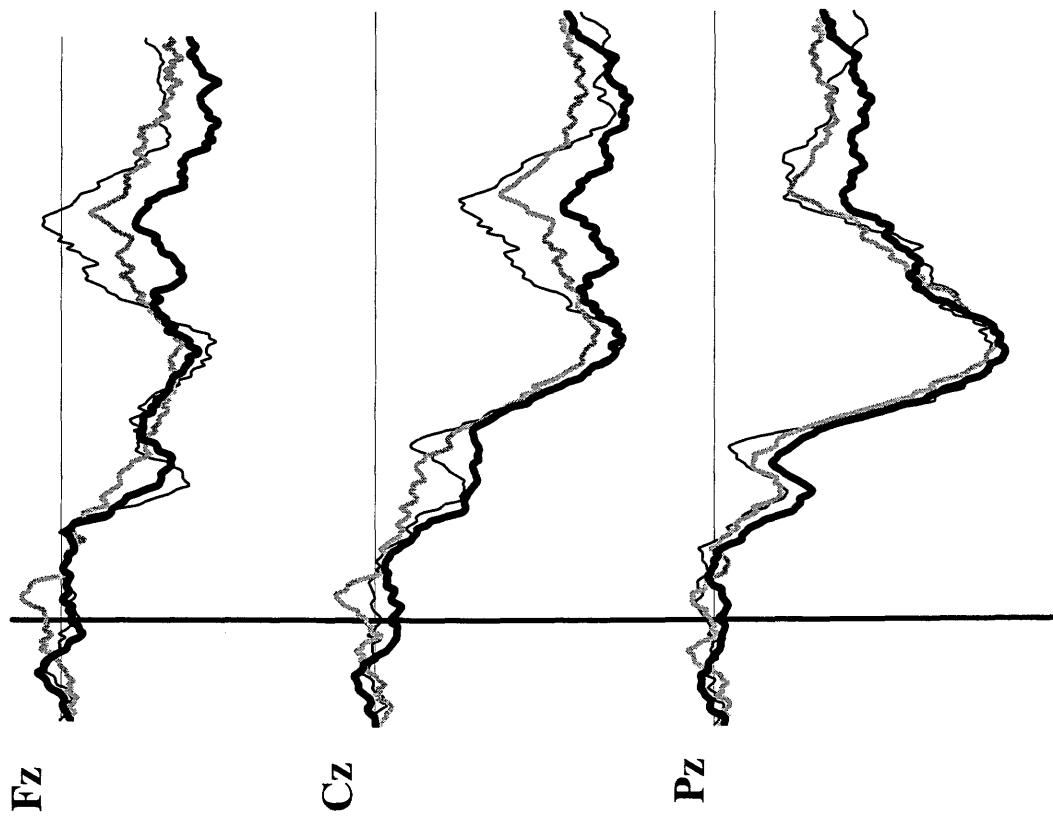


図3-3. バリスティック課題（黒、実線）および、ターゲットマッチ課題（白、破線）におけるEMG-RTの変動。それぞれのシンボルは各課題、ブロックごとの平均値と標準偏差を示している。バリスティック課題においてのみ課題の反復に伴いEMG-RTが短縮した。

* $p < 0.05$, 1 block vs each other block for target match task

A. ballistic task



B. target match task

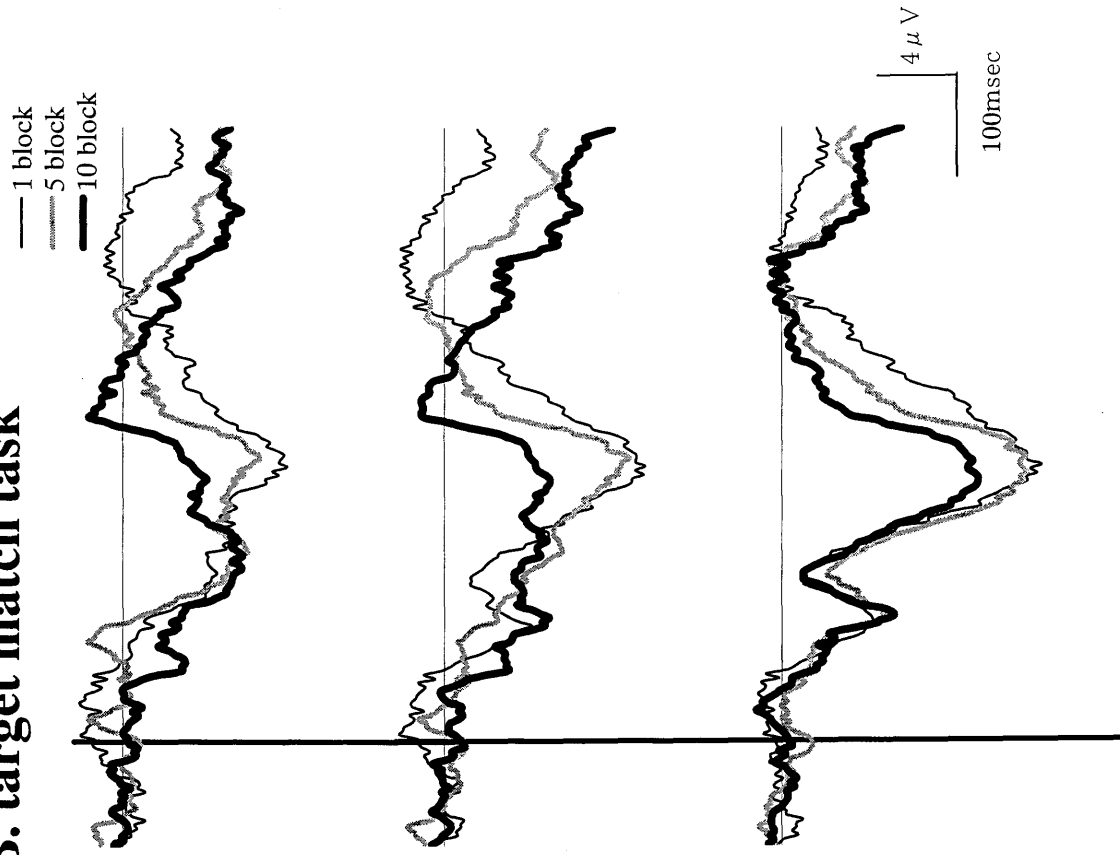
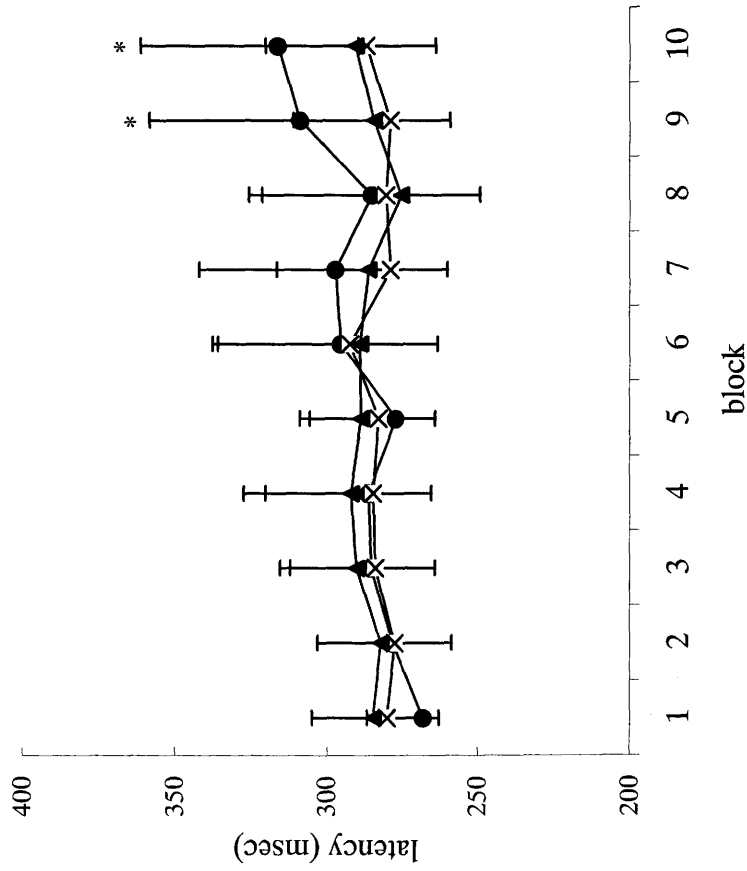


図3-4. 課題条件（バリステイック課題;A、ターゲットマッチ課題;B）ごとに頭皮上のFz、Cz、Pzから導出されたERPの波形。各課題ともに反応刺激の呈示時点（縦線）で加算平均した1ブロック目、5ブロック目、10ブロック目の波形を示している。ターゲットマッチ課題においてのみ課題の回復に伴いP300振幅が減少した。

A. ballistic task



B. target match task

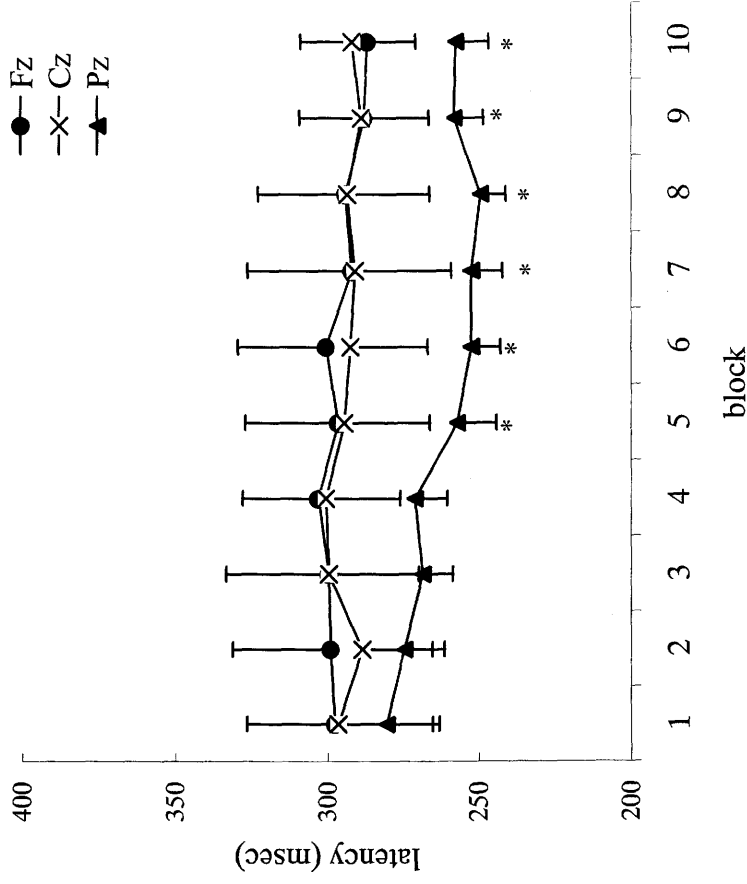
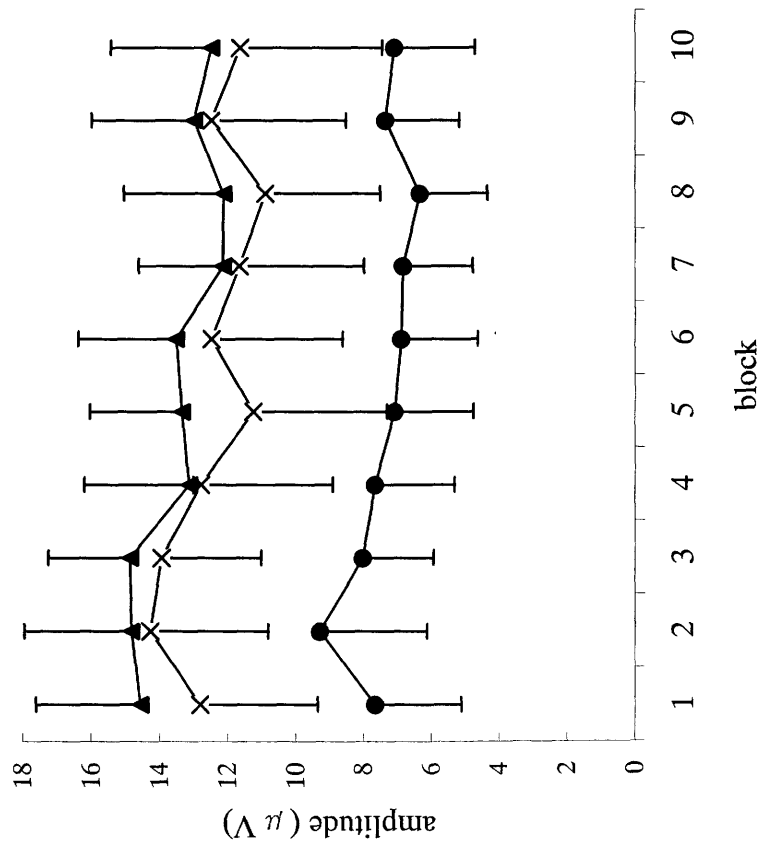


図3-5. バリスティック課題 (A) および、ターゲットマッチ課題 (B) におけるP300潜時の変動。各課題ともにそれぞれのシンボルは、頭皮上のFz、Cz、Pz、から導出されたブロックごとの平均値と標準偏差を示している。ターゲットマッチ課題では、課題の反復に伴い潜時が短縮した。

* $p < 0.05$, 1 block vs each other block for target match task

A. ballistic task



B. target match task

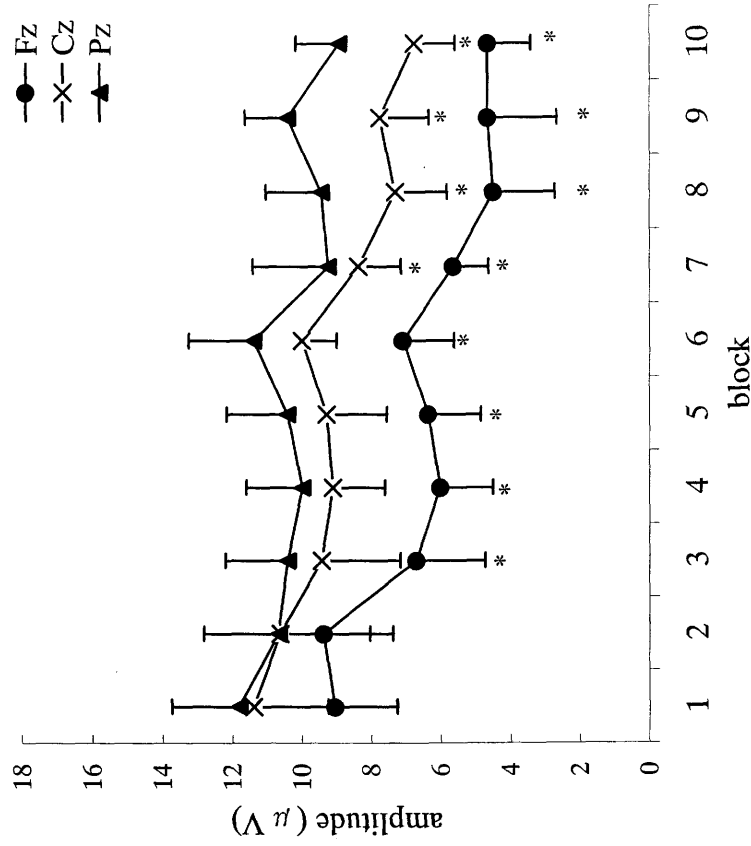


図3-6. バリステック課題 (A) および、ターゲットマッチ課題 (B) におけるP300振幅の変動。各課題ともにそれぞれのシンボルは、頭皮上のFz、Cz、Pz、から導出されたブロックごとの平均値と標準偏差を示している。ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴い振幅が減少した。
* p < 0.05, 1 block vs each other block for target match task

第Ⅶ章

随意運動の反復が運動準備過程に及ぼす影響

(研究課題 4)

1. 目的

研究課題 3 では、随意運動を繰り返し反復することにより、EMG-RT は短縮し、反応刺激に対する刺激の処理過程が変動することが示唆された。さらに、その変動は単純な動作では起こらず、複雑な動作にのみ認められたことから、複雑な動作における運動プログラムの変化が推察された。また、研究課題 2 の結果から速い EMG-RT と運動準備過程は密接に関係していることから、動作の反復に伴うパフォーマンスの向上は、運動のパラメータの変動とともに CNV の構成成分にも何らかの影響を及ぼすことが考えられる。

そこで研究課題 4 では、随意運動を反復することによる運動準備過程の変動について、単純な運動課題と、精密な制御が必要となる運動課題とを比較し、運動パラメータとの関連から検討することを目的とする。

2. 方法

2-1. 被験者

被験者は、健常成人 10 名（男性 9 名、女性 1 名、平均年齢 25 ± 2.4 歳）であった被験者はいずれも右利きであり、事前に実験の主旨および方法について十分説明したうえで実験参加の同意を得た。実験中、被験者は 23～25 度に空調されたシールドルーム内の安楽椅子に腰掛け、安静を保つよう指示した。被験者の左前腕は回内位、肘関節角度が約 120 度となるよう実験装置に固定し、前方約 1m には、視覚刺激を呈示するためオシロスコープを設置した（図 4-1）。

2-2. 課題

次の2つの課題を行った（図4-2）。

バリスティック課題

ヘッドホンから呈示される予告刺激（S1）の2 sec 後、反応刺激（S2）としてオシロスコープ画面上にターゲットビームを呈示した。被験者にはできるだけ素早い左手関節の屈曲動作を行うよう指示した。この際、オシロスコープ上には、被験者が発揮する力をモニターできないようにした。

ターゲットマッチ課題

バリスティック課題と同じく S1 後に S2 が呈示されるが、ターゲットマッチ課題では S2 としてオシロスコープ画面上に最大随意収縮（maximum voluntary contraction : MVC）の10%に相当するターゲットラインが呈示された。被験者には S2 呈示後、ターゲットラインにできるだけ素早く、かつ正確に発揮張力を合わせる左手関節の屈曲動作を行い、画面上からビームが消えるまで力を維持するよう指示した。

両課題ともに S1 の音提示は、2,000 Hz、持続時間は 50 msec、立ち上がり／立ち下がり時間は 5 msec、強度 65dB とした。S2 の持続時間は 1 sec であった。試行間隔は 10 sec で 30 試行を 1 ブロックとし、10 ブロックが行われた。被験者が S2 を予測して反応することを防ぐため、試行回数の 10% をキャッチ試行としてランダムに呈示した。ブロック間隔は 3 から 4 分であった。

2-3. 記録・データ処理

Behavioral データ

反応動作に伴う筋電図は、動作肢の橈側手根屈筋（flexor carpi radialis: fcr）と橈側手根伸筋（extensor carpi radialis: ecr）から記録した。各筋に表面電

極を装着し、高周波フィルター1500 Hz、時定数 0.03 sec で双極導出し、コンピュータのハードディスクに記録された。加算の対象とした試行における反応動作によって得られた EMG と発揮張力から各ブロックごとに (1) EMG-RT、(2) 発揮張力の立ち上がり時間、(3) 発揮張力の分散、(4) 最大発揮張力、(5) 最大加速度、(6) 加速度の持続時間、を計測した。EMG-RT は反応刺激の呈示から急激な筋放電の始まる時点までとした。また、発揮張力の分散は、発揮張力における最初の変化点での振幅の標準偏差、発揮張力の立ち上がり時間はそれぞれ発揮張力の立ち上がりから最大発揮張力までの時間 (バリスティック課題) と発揮張力が安定するまでの時間 (ターゲットマッチ課題) として算出した。最大発揮張力はバリスティック課題における発揮張力の最大値とした。

EEG

EEG の記録は国際 10-20 法に従い、Fz、Cz、C3、C4、Pz の頭皮上 5 部位より両耳朶連結を基準として Ag/AgCl 皿電極を用いて単極導出した。記録条件は高周波フィルター100 Hz とし、電気抵抗はすべて 5k Ω 以下とした。同時に、眼球運動に伴うアーチファクト混入を検出するため、眼電図を左眼窩上下縁から導出記録した。得られたアナログデータは DAT テープに記録し、A/D 変換ボードを介した後、予告刺激前 1sec から反応刺激後 1.5sec を分析区間として、サンプリング周波数 250 Hz でコンピュータのハードディスクに記録された。眼球運動が分析区間内に認められたときはその区間を分析の対象外とし、ブロックごとに 20 回以上の加算平均処理を行った後、CNV を求めた。CNV は S1 前 500 msec の平均電位を基線として、早期成分 (S1 後 400~900 msec) と後期成分 (S1 後 1500~2000 msec) とに分け平均振幅を算出した。

2-4. 統計処理

CNV は、早期成分と後期成分ごとにそれぞれ課題 (バリスティック課題、

ターゲットマッチ課題) × 導出部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) × ブロック (1-10) の3要因による反復測度の分散分析を行った。各運動パラメータの指標は、課題 (バリスティック課題, ターゲットマッチ課題) × ブロック (1-10) の2要因による反復測度の分散分析を行った。主効果が認められたときは Fisher's Protected LSD による多重比較を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。また、分散分析の結果は Greenhouse-Geisser 法による自由度の修正を行い、有意確率を再計算した。有意差検定での有意水準は5%未満とした。

3. 結果

3-1. Behavioral データ

各運動パラメータに関して反復測度の分散分析を行った結果、EMG-RT では、ブロック間の主効果 ($F=8.406, p<0.001$) および、課題とブロック間に交互作用 ($F=6.88, p<0.001$) が認められた。下位検定の結果、バリスティック課題においてはブロック間に変動が認められなかったのに対し、ターゲットマッチ課題では有意に短縮した (図 4-3.A)。また、バリスティック課題における最大発揮張力には課題の反復に伴う有意な変化は認められなかった (図 4-3.B)。

図 4-4 は、それぞれの課題における一人の被験者の1ブロック目と10ブロック目の各運動パラメータを示している。各運動パラメータは、EMG をオフラインで全波整流したのち、EMG の立ち上がり時点をオンセットとして再加算した。ターゲットマッチ課題においてのみ課題遂行に伴う EMG 活動のパターンおよび、発揮張力、加速度の変動が認められる。また、図 4-5 は、それぞれの課題における一人の被験者の1ブロック目と10ブロック目における力曲線の変化を示している。各ブロックとも EMG の立ち上がり時点をオンセットとして全試行をプロットした。

発揮張力の立ち上がり時間において、課題間 ($F=225.093, p<0.001$) とブロック間 ($F=53.743, p<0.001$) の主効果および課題とブロック間に交互作

用 ($F=59.03, p<0.001$) が認められ、バリスティック課題ではブロック間に変動が認められなかったのに対し、ターゲットマッチ課題では短縮した ($F=59.532, p<0.001$) (図 4-6.A)。force 振幅の標準偏差には、課題とブロック間に交互作用 ($F=59.03, p<0.001$) が認められ、ターゲットマッチ課題で有意に減少した (図 4-6.B)。最大加速度は、ターゲットマッチ課題において増大し (図 4-6.C)、加速度の持続時間は、課題間の主効果 ($F=6.281, p<0.05$) および課題とブロック間に交互作用 ($F=3.148, p<0.05$) が認められ、ターゲットマッチ課題で有意に短縮した ($F=3.344, p<0.05$) (図 4-6.D)。

3-2. CNV

図 4-7 は、各課題における CNV 波形をブロックごとに加算平均した一人の被験者の波形を示している。本研究では、両課題ともにすべての被験者において、S1 呈示後から S2 に向けて緩徐な陰性電位が早期成分は前頭優位、後期成分は中心優位で確認された。

早期 CNV の振幅に関して反復測度の分散分析を行った結果、導出部位 ($F=3.688, p<0.01$) に主効果が認められ、課題とブロックに交互作用 ($F=8.882, p<0.001$) が認められた。導出部位を多重比較した結果、前頭-中心部優位 ($Fz>Pz, p<0.001$; $Cz>Pz, p<0.01$) の頭皮上分布が得られた。また、下位検定の結果ブロック間の変動には課題によって異なる結果が得られた。ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴う振幅の変動は認められなかったのに対し、バリスティック課題では、Fz で有意に振幅が減少した (図 4-8)。

後期 CNV の振幅に関して反復測度の分散分析を行った結果、導出部位 ($F=3.830, p<0.01$)、ブロック ($F=4.526, p<0.001$)、に主効果が認められ、課題とブロックに交互作用 ($F=9.819, p<0.001$) が認められた。導出部位を多重比較した結果、中心優位 ($Cz>Fz, Pz, C3, C4, F=4.190, p<0.01$) の頭皮上分布が得られた。また、課題によってブロック間の変動は異なり、バリスティック課題では課題の反復に伴い振幅は有意に減少した ($F=11.243,$

p<0.001) のに対し、ターゲットマッチ課題では有意に増大した (F=4.788, p<0.01) (図 4-9)。

4. 考察

本研究は、随意運動を反復することによる運動準備過程の変動について、CNV を指標とし、運動パラメータとの関連から検討した。本研究で得られた主な知見は、1) バリスティック 課題では課題の反復に伴った運動パラメータの変動はなく、CNV は早期および後期成分ともに減少すること、2) ターゲットマッチ課題では、反復に伴い EMG-RT および発揮張力の立ち上がり時間は短縮し、発揮張力のばらつきは減少するとともに、後期 CNV は増大することである。

バリスティック 課題の反応動作として要求されたような急速運動は、持続時間が短く、末梢のフィードバックがなくても遂行されることから事前にプログラミングされた運動であることが知られている (Forget and Lamarre, 1987)。本研究の結果においても、バリスティック 課題では発揮筋力は設定せず、出力した発揮張力のフィードバックも与えなかったにもかかわらず、各ブロック間の発揮張力は最大随意収縮の 30% 付近で安定しており、各運動パラメータの変動は観察されなかった。つまり、バリスティック 課題では発揮すべき運動パターンが形成されており、複雑な制御を必要としない単純な運動であったため反復による影響が関与しなかったと考えられる。

一方、ターゲットマッチ課題における反応動作は、ターゲットラインに対して急速かつ正確に発揮張力を合わせるという巧緻な制御が要求される運動であり、さらにそのターゲットは最大随意収縮の 10% という非常に低強度でより微細なコントロールが必要とされる張力量に設定した。これは、本研究の目的が短期間の課題の反復に伴う運動の習熟過程について経時的に観察するためであり、このような課題の設定にすることによって、ターゲットマッチ課題では課題遂行に対する困難性が増し、課題の反復に伴う効果が顕著に観察されることが推測される。その結果、ターゲットマッチ課題においては EMG-RT の短縮や発揮張力の分散減少といった反応のスピードや正確性の向上が認められた。随意運動は繰り返し練習することによ

り、効率的な運動へと適応的に変化し、より単純化そして自動化することが運動学・運動力学的変数や EMG 活動の変化として報告されている (Flament et al., 1999)。したがってターゲットマッチ課題において認められた変動は、試行とエラー間の誤差を認知することにより動きを調整し、さらに反復することによって正確で効率的な運動パターンが獲得されたためであると考えられる。

このような課題間における行動レベルの変動の相違には、上位中枢における制御動態が影響している可能性が推察される。さらに運動をプログラミングしていると考えられる運動準備期が、その変化に大きく関与していると考えられることから、本研究では CNV を用い準備期における運動制御動態について検討した。その結果、注目すべき点はバリスティック課題における CNV は早期および後期成分ともに減少したのに対し、ターゲットマッチ課題では後期 CNV が増大するという課題に依存した変動を示したことである。

刺激を繰り返し与えることにより応答が減少する現象、すなわち慣れ (habituation) は原始的な学習形態としての生体反応であり、神経系における何らかの抑制機構が考えられている。また、生体にとってその刺激がもはや注意に値しない、無意味な情報になったためと解釈することもできる。本研究においてもバリスティック課題では、課題の反復による CNV 振幅の減少が認められた。このような反復刺激の呈示による反応の減少は、CNV と同じく課題の遂行に伴って記録されるその他の ERP の成分においても報告されている。P300 を指標とした振幅の減少は、その潜時や反応時間の延長を伴うことから、集中力やモチベーションなどの覚醒レベルの低下による影響があげられているが、Ravden and Polich (1998) は、むしろ刺激弁別過程の自動化に伴う注意分配量の減少による影響であることを強調している。また、Hultin et al. (1996) は、S1-S2 課題において S2 で反応すべきことが明確化すると刺激-反応の自動的処理が発達し、被験者は S2 を受動的に待つようになるため、受動課題条件で CNV が減少するのと同じく、

運動学習の段階に応じて CNV が減少することを示唆している。類似した結果が Rose et al. (2001) によっても示されており、反復により準備すべき運動要素が減少し、課題に向けられる注意が少なくなることを主張している。これらのことからバリスティック 課題での CNV の減少は、パフォーマンスに変動は認められなかったことから、より少ない注意の分配で課題の遂行が可能となったことによるものと考えられる。

一方、ターゲットマッチ課題においては運動パラメータと関連した変動が後期 CNV に認められた。このような反復に伴う ERP の増大に関しては、Staines et al. (2002) の視覚運動課題の反復練習による報告で示されており、反応の正確性の向上とともに運動に先行して出現する陰性電位、すなわち準備電位が増大することが認められている。この電位は CNV と同様の成分ではないが、後期 CNV に重畳している可能性が議論されている (Brunia and van Boxtel, 2001; Ikeda et al., 1994)。準備電位は、発揮される運動要素と密接に関係しており、一般的に発揮張力や EMG 活動とは正の相関を示す。さらに後期 CNV ではエラー率や RT と負の相関が示されており、Hohnsbein et al. (1998) は、低いエラー率と大きな CNV の関係が次の試行に対する準備が十分できているためであることを示唆している。これは CNV が事前にプログラムされる運動の特徴をも反映しており (Gaillard et al., 1980)、より複雑な課題で減少すること (Kramer et al., 1986) から明らかである。これらのことから、ターゲットマッチ課題で後期 CNV が増大した要因として、初期のブロックでは発揮すべき運動の準備が十分ではなかったため CNV は低振幅を示したが、反復することによって運動が獲得され、適切な準備状態が形成されたことが考えられる。さらに、バリスティック 課題と比較しても精密な制御が必要とされる課題であったため、素早くかつ正確な運動を獲得、遂行するためにより注意が必要であったことも影響していると推察される。そして、このような運動準備期の変化が EMG-RT の短縮や、正確性の向上にも影響を及ぼし、後期 CNV と関連した変化を示したと考えられる。

さらに、本研究で認められたような課題に依存した皮質の変動は、運動野に生ずるマッピングや興奮性の変化としても報告されており、単純な動作と比較してより精密な制御が必要である動作に生じ (Karni et al.,1995)、獲得されると元のレベルに戻ることが示されている (Pascual-Leone et al.,1994)。イメージング法を用いた研究においても、遂行する運動がランダムな課題と比較し、ターゲットが設定された課題において、学習の初期に運動前野の活動が増加すること (Shadmehr and Holcomb, 1997) や、より複雑で不慣れな運動や獲得された運動企画の変更時に補足運動野で活動増加が認められている (Petersen et al., 1998)。また、補足運動野が損傷されると、単純な運動は影響されないが、新奇の感覚運動課題の学習は不可能になること (Ackermann, 1996) などから、前頭運動関連領野とりわけ補足運動野は複雑な運動を企画するのに重要であり、新しい運動プログラムが確立されるときにのみ、あるいはその代わりとして以前に学習されたプログラムが調整されるときに活性化されることが指摘されている (Petersen et al.,1998; Staines et al., 2002)。このような補足運動野を含む前頭運動関連領野は CNV の発生源の一つであることから、本研究におけるターゲットマッチ課題での後期 CNV の増大は、新たな運動を獲得するために前頭運動関連領野の活動が増大したことによるものと考えられる。

以上の結果から、短期間の運動の反復に伴い、行動レベルおよびより上位中枢での準備過程は、機能的な変動を示すが、その変動動態は課題に要求される運動要素に依存して異なることが示唆された。

5. 要約

本研究は、随意運動の反復によるパフォーマンスの変動と運動準備過程の経時的変動について、バリスティック課題とターゲットマッチ課題を比較し検討した。得られた結果は以下の通りである。

(1) バリスティック課題では、運動の反復に伴うパフォーマンスの変動は認められなかったが、ターゲットマッチ課題では反応動作のスピード、および正確性が向上した。

(2) バリスティック課題では、運動の反復に伴い CNV 振幅は減少したが、ターゲットマッチ課題では増大した。

これらのことから、運動の反復に伴うパフォーマンスの向上には、運動準備過程の変動が関与していることが示唆され、この運動準備過程の変動は課題に依存して異なることが示唆された。

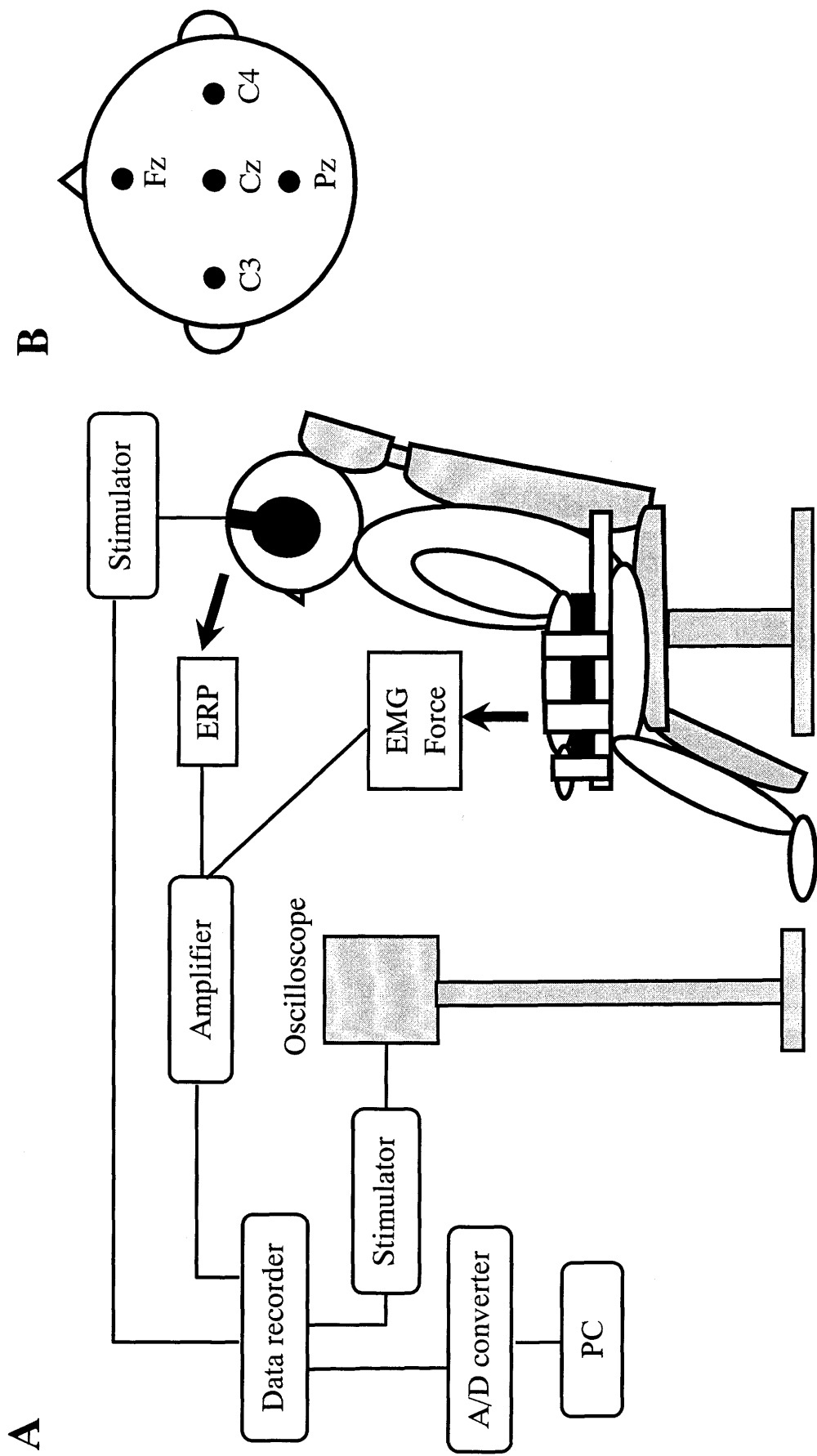
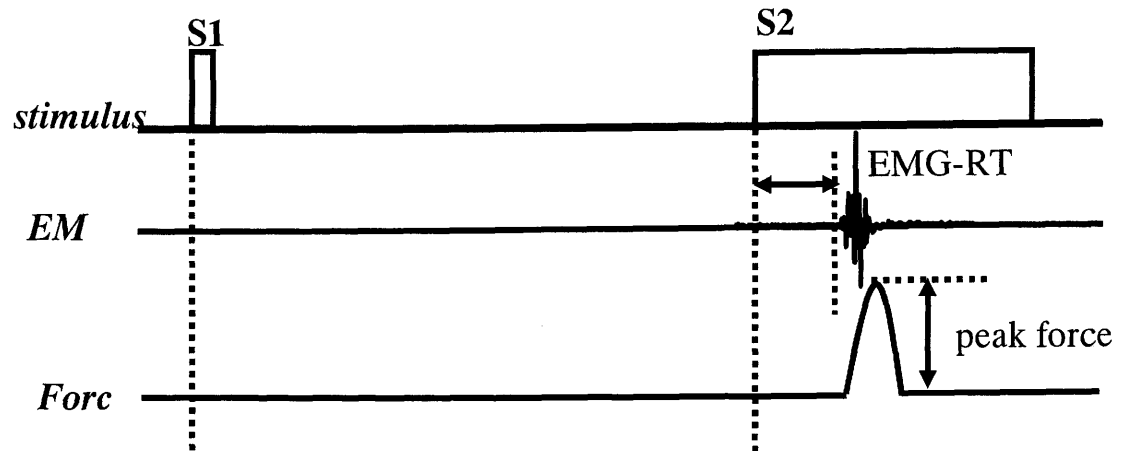
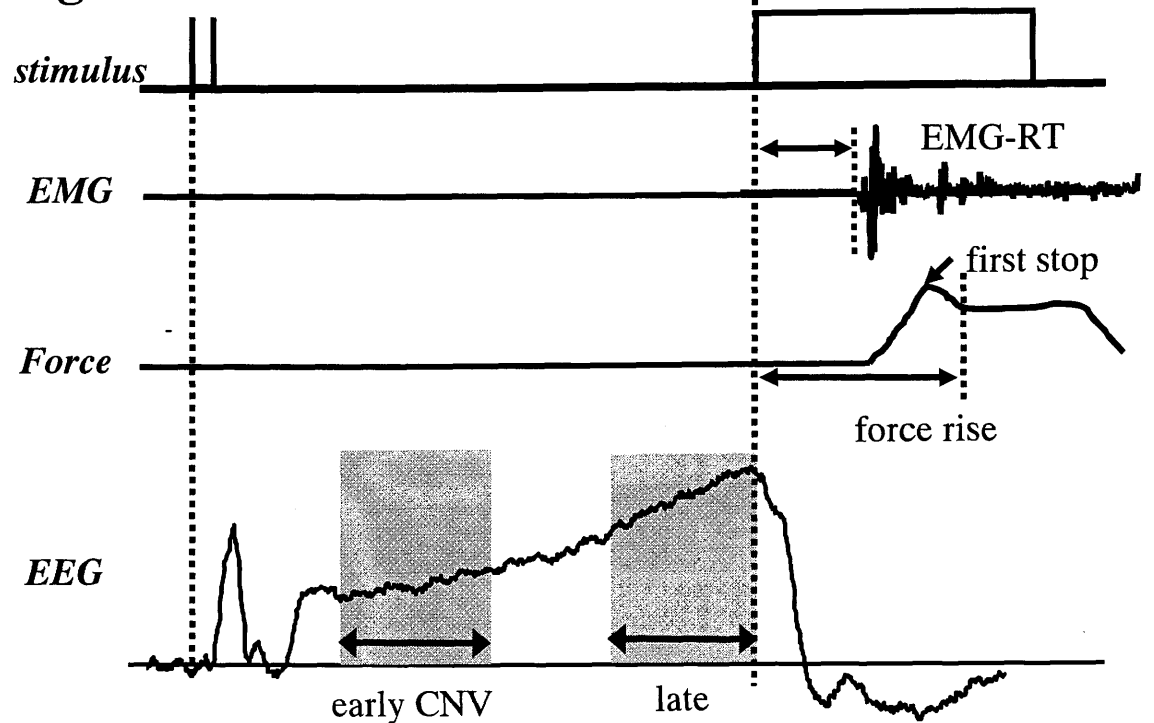


図4-1. 実験状況 (A)、およびEEGの記録電極の位置 (B) についての模式図。被験者の前腕は、ストレンゲージの装着されたプレート上に固定し、聴覚刺激はヘッドホンからの音刺激として、視覚刺激は被験者の眼前約1.7 mに設置されたオシロスコープ画面上にターゲットビームとして呈示した。記録電極は、国際10-20法にもとづき、頭皮上の5部位 (Fz, Cz, Pz, C3, C4) を被験者ごとに決定した。

A. ballistic task



B. target match task



(catch trial)

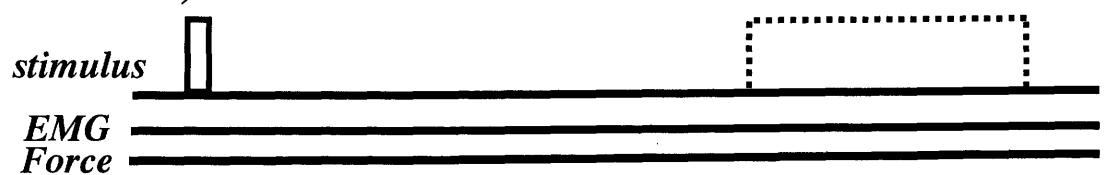
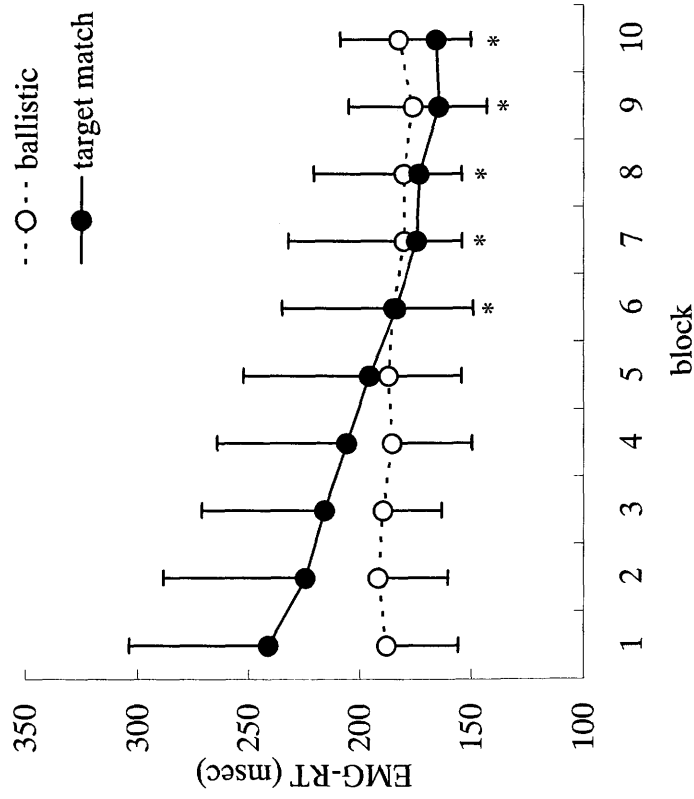


図4-2. 実験課題の模式図。A：予告刺激 (S1) の2秒後、反応刺激 (S2) としてターゲットラインが呈示されたら素早く反応する (バリスティック課題)。B：S2として最大随意収縮の10%の張力に相当するターゲットラインが呈示され、素早くかつ正確にライン上に合わせるように反応する(ターゲットマッチ課題)。また、S1後にS2が呈示されないキャッチ試行を各課題ともに全試行の10%の確率でランダムに挿入した。それぞれ課題ごとに上段から呈示刺激系列、EMG、力発揮曲線を示している。A、Bにおいては課題遂行に伴って得られたCNV波形から、早期CNVおよび後期CNVを分析の対象区間とした。

(A) EMG-RT



(B) peak force

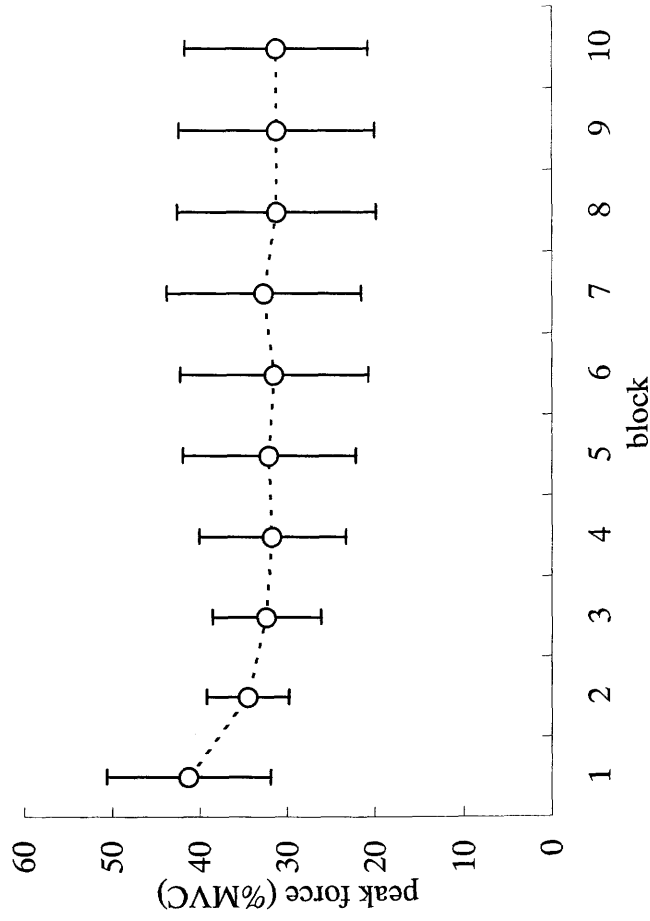
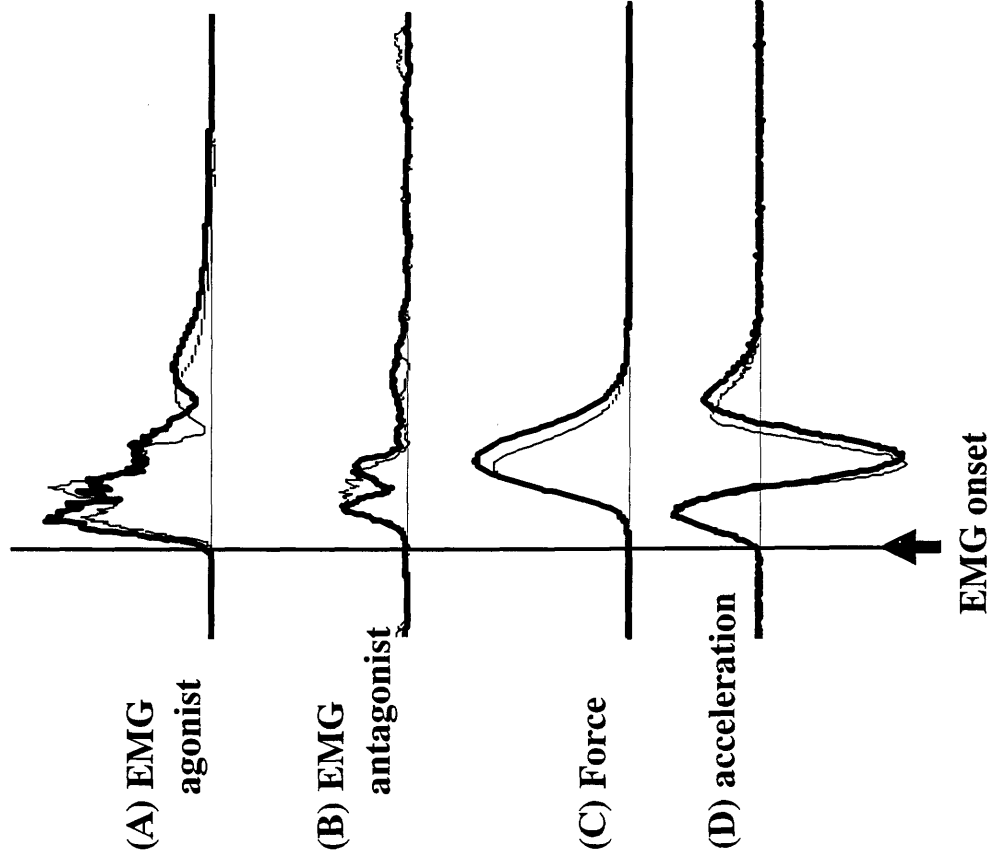


図4-3. A: バリスティック課題(白、破線)および、ターゲットマッチ課題(黒、実線)におけるEMG-RTの変動。B: バリスティック課題における反応時の平均発揮張力。それぞれのシボルはブロックごとの平均値と標準偏差を示している。課題の反復に伴い、EMG-RTはターゲットマッチ課題に老いてのみ短縮した。バリスティック課題における発揮張力は、反復に伴い変動は認められなかった。

* $p < 0.05$ vs 1st block for target match task

ballistic task



target match task

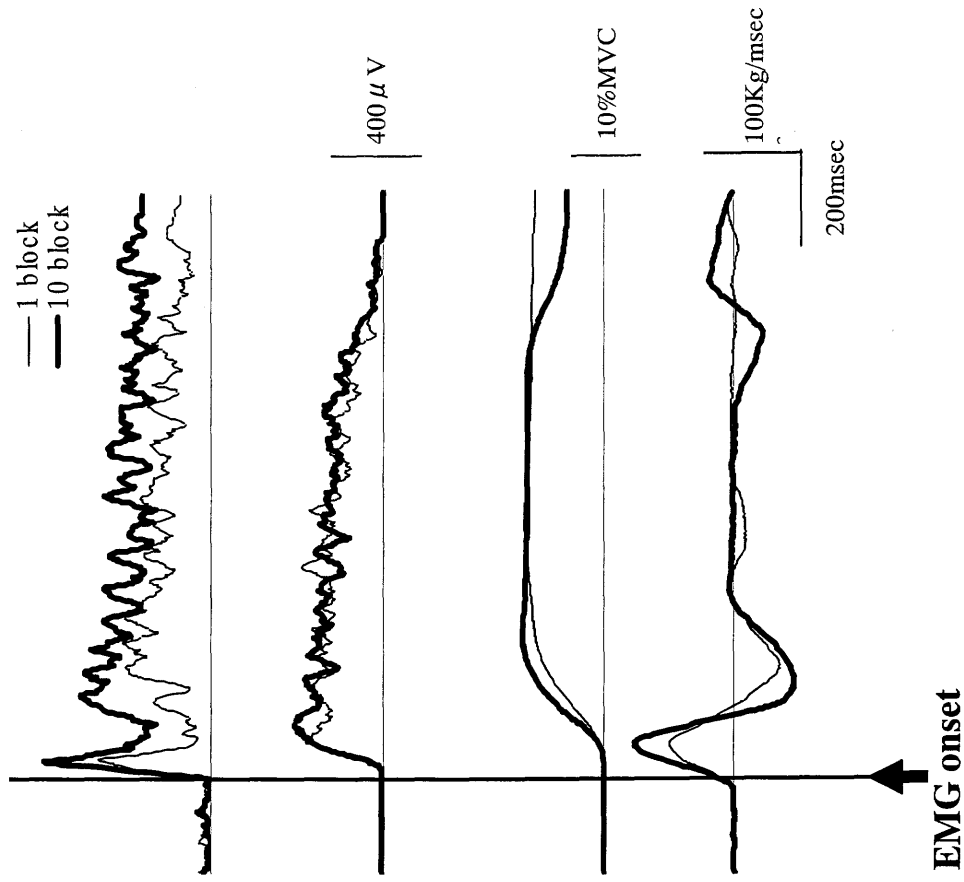


図4-4. 各課題における運動パラメータの変化。各課題とも反応に伴う筋電図の立ち上がり時点で加算平均した1ブロック目(細線)と10ブロック目(太線)の結果を示している。それぞれ一人の被験者における主動筋(橈側手根屈筋:A)、および拮抗筋(橈側手根伸筋:B)の筋活動、発揮張力(C)、加速度曲線(D)の結果を示す。

ballistic task

target match task

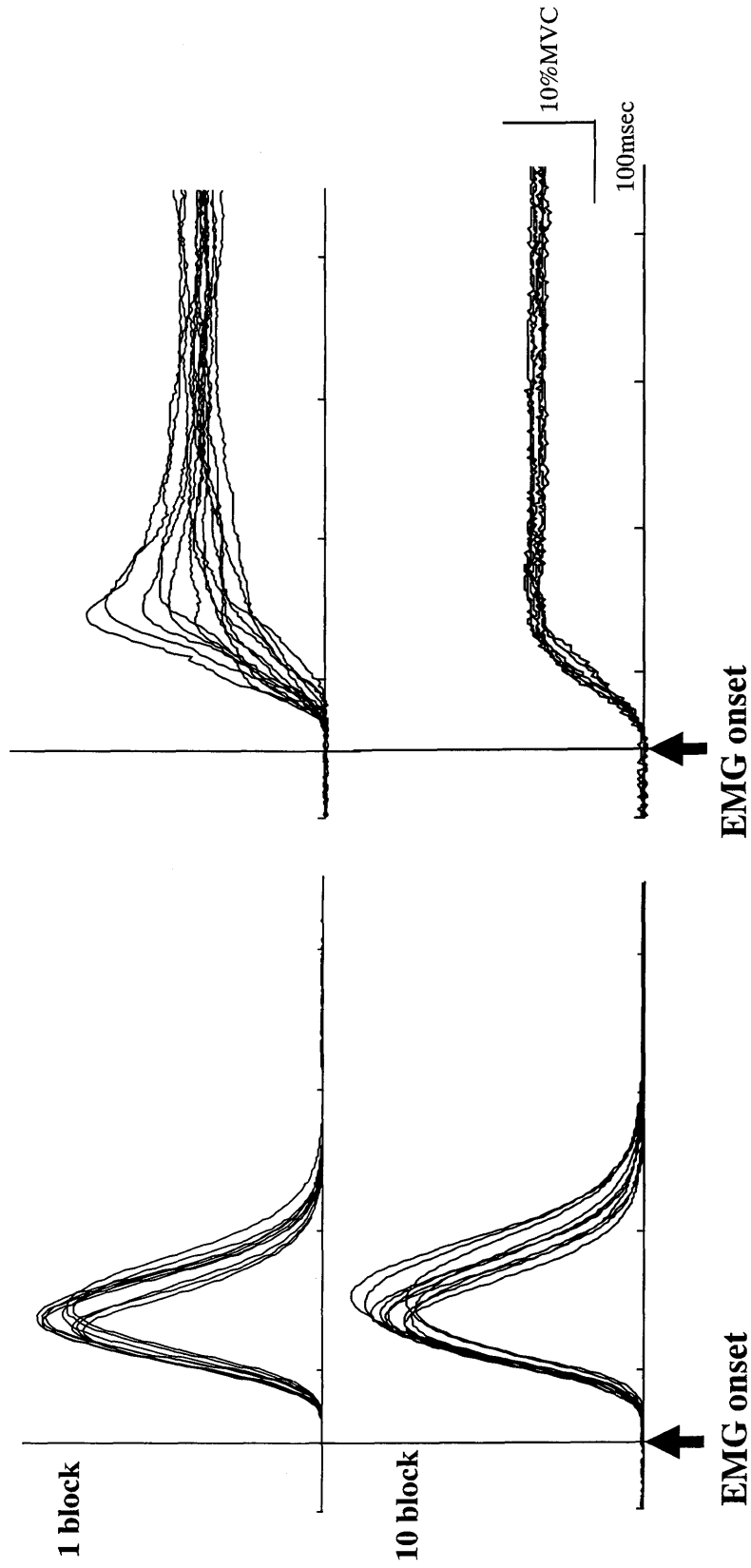
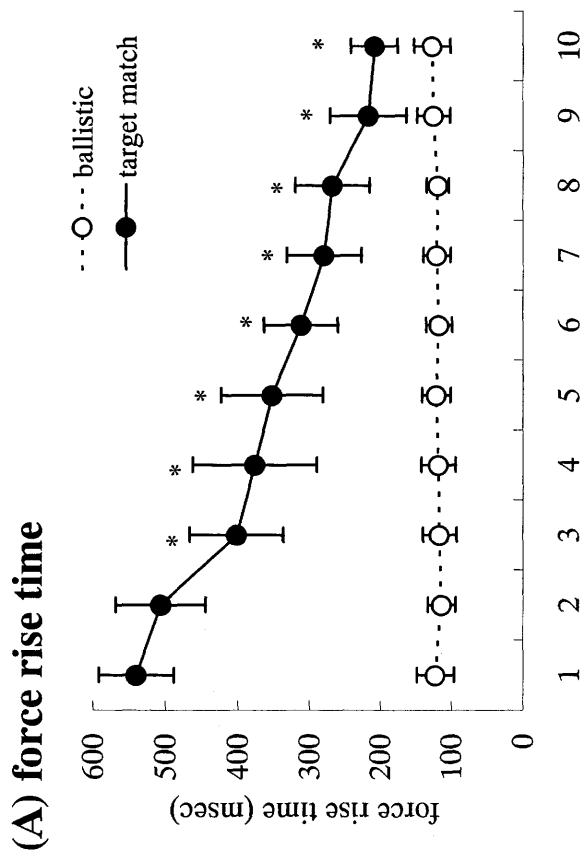
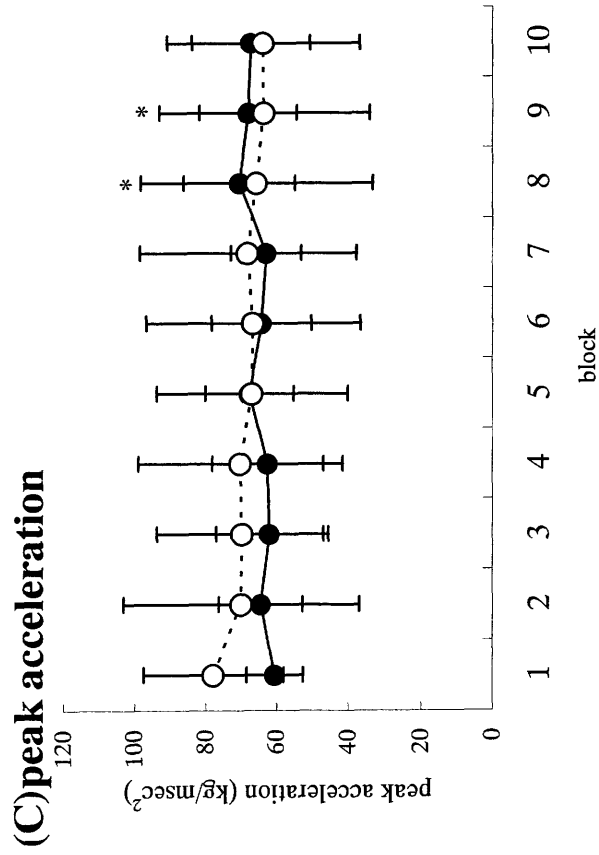
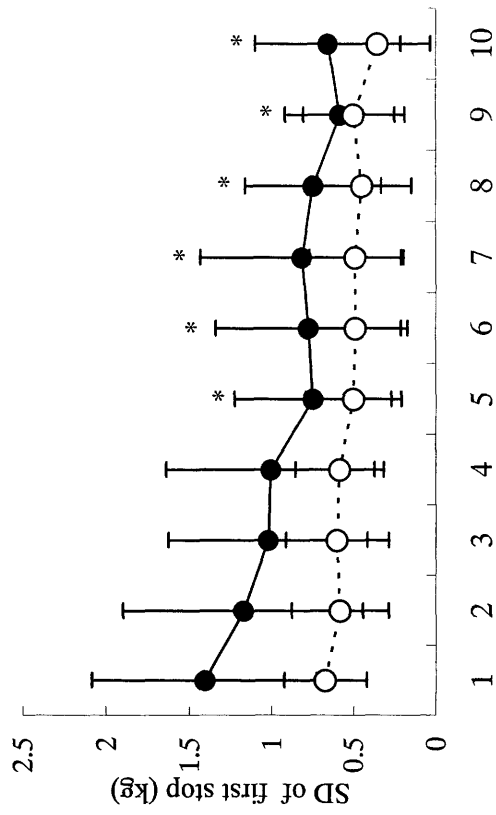


図4-5. 各課題における力発揮曲線の変化。各課題とも一人の被験者において反応に伴う筋電図の立ち上がり時点(縦線)をオンセットとし、1ブロック目(上段)と10ブロック目(下段)の全試行をプロットしている。課題の反復に伴い、バリスティック課題では施行ごとの反応動作に変動は認められないが、ターゲットマッチ課題では、施行ごとのばらつきが減少した。



(B) SD of force



(D) duration of acceleration

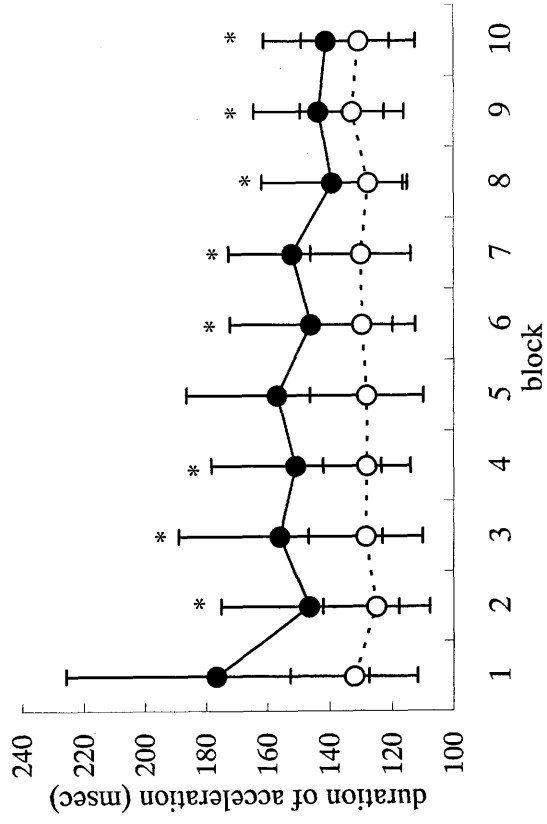
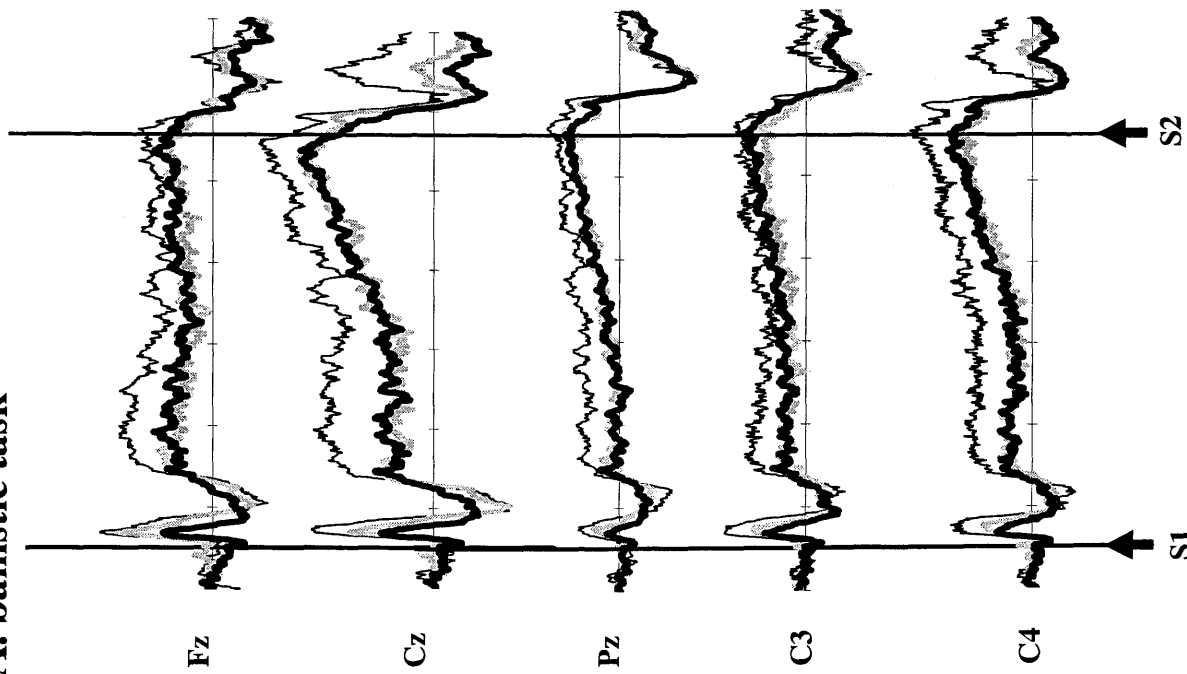


図4-6. バリステイク課題(白、破線)および、ターゲットマッチ課題(黒、実線)における各運動パラメータの変動。それぞれのシブはブロックごとの平均値と標準偏差を示している。ターゲットマッチ課題においてのみ課題の反復による変動が認められる。

* $p < 0.05$ vs 1 block for target match task

A. ballistic task



B. target match task

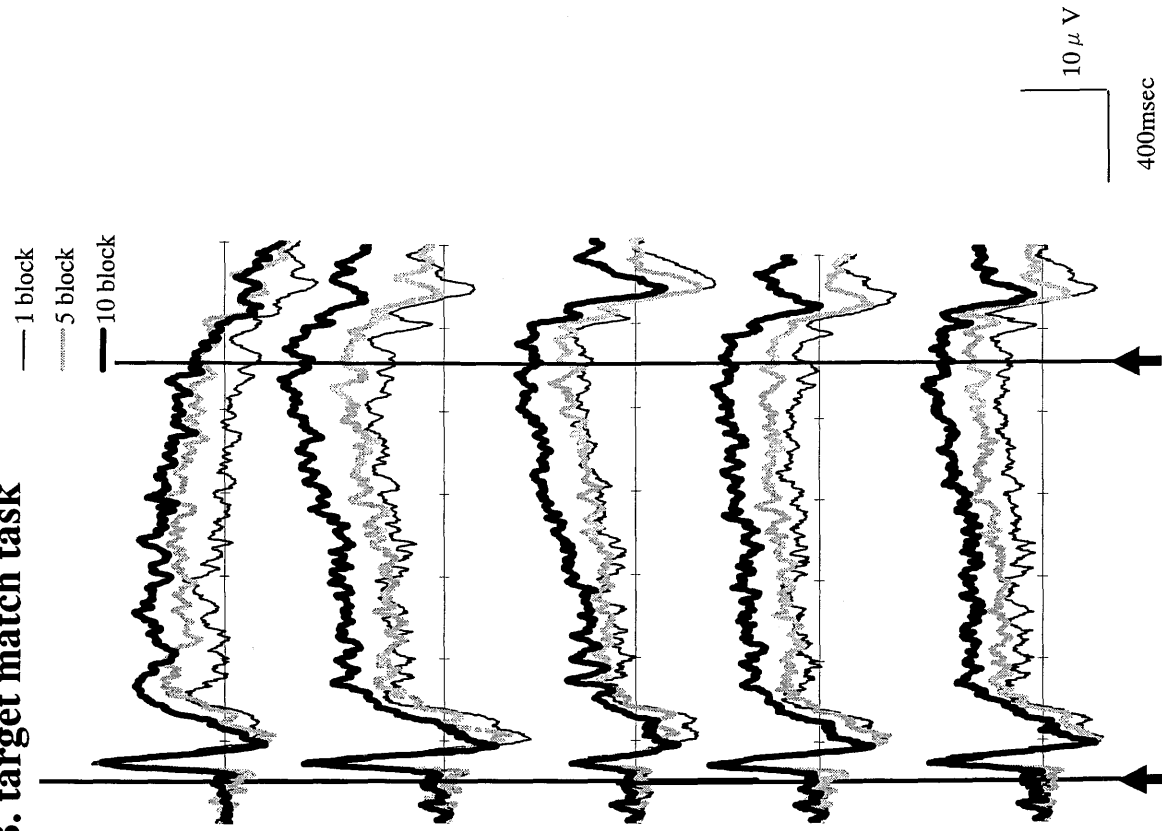


図4-7. 課題条件 (パリスティック課題;A、ターゲットマッチ課題;B) ごとに頭皮上のFz、Cz、Pz、C3、C4から導出されたCNVの波形。各課題ともに縦線は予告刺激 (S1) と反応刺激 (S2) の呈示時点を示している。それぞれS1の呈示時点で加算平均した1ブロック目、5ブロック目および、10ブロック目の波形を示している。ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴う振幅の増大が認められる。

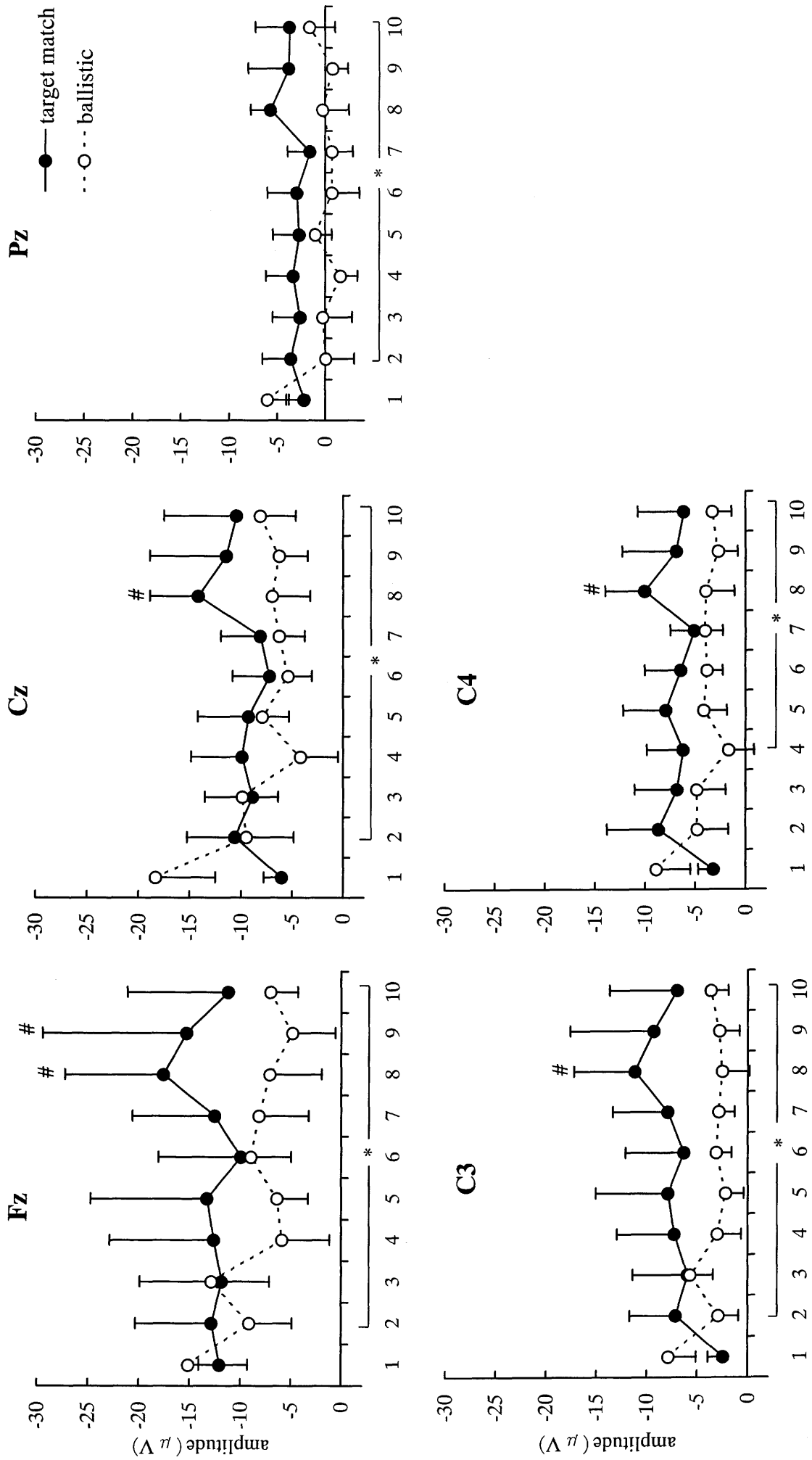


図4-8. 課題の反復による早期CNVの変動。頭皮上のFz、Cz、Pz、C3、C4から導出された早期CNVを、各課題ごと（バリステイック課題；黒、ターゲットマッチ課題；白）に平均値と標準偏差で示す。横軸は試行ブロックを示している。

* $p < 0.05$, vs 1 block for ballistic task # $p < 0.05$, vs 1 block for target match task

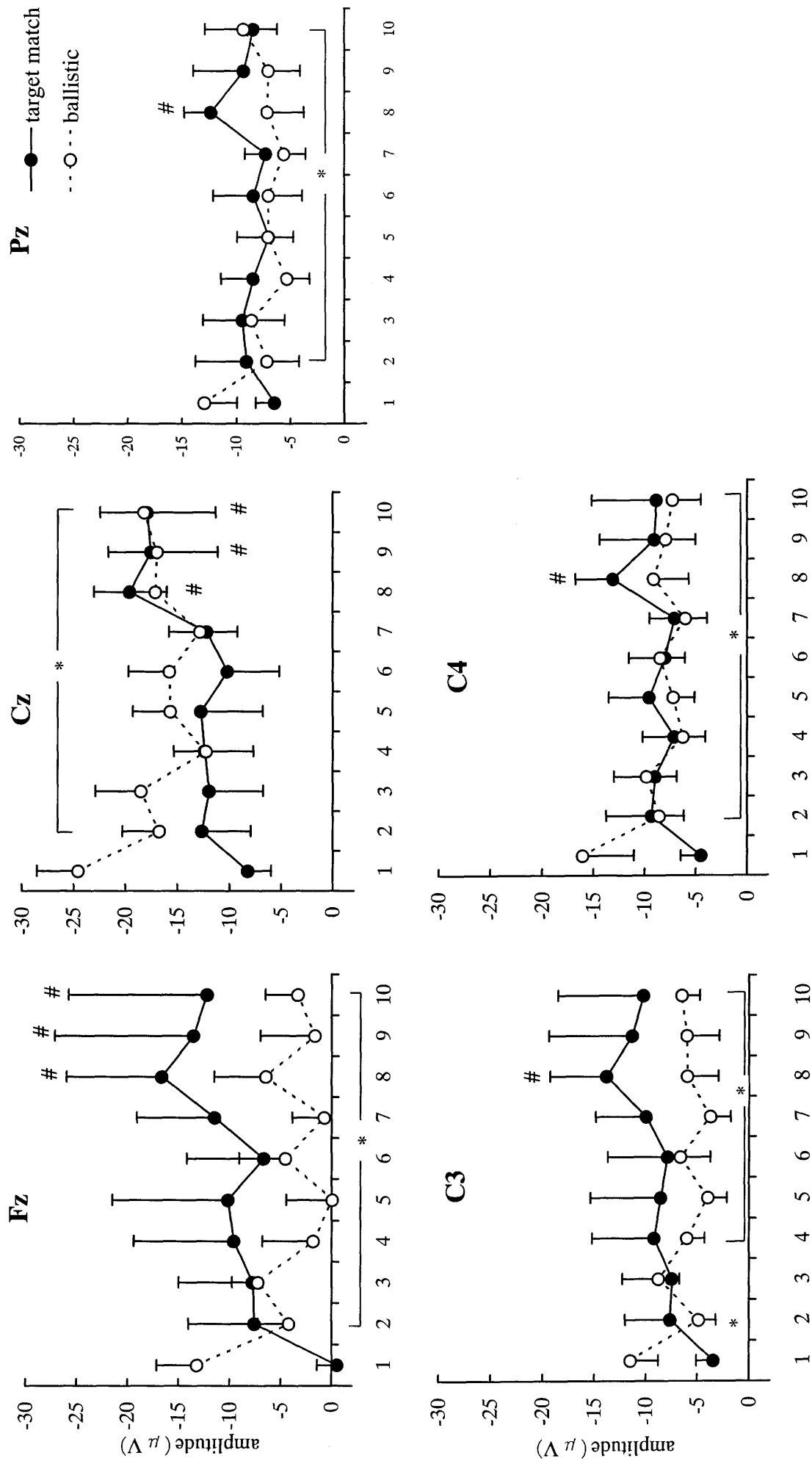


図4-9. 課題の反復による後期CNVの変動。頭皮上のFz、Cz、Pz、C3、C4から導出された後期CNVを、各課題ごと（パリスティック課題; 黒、ターゲットマッチ課題; 白）に平均値と標準偏差で示す。横軸は試行ブロックを示している。

* p < 0.05, vs 1 block for ballistic task # p < 0.05, vs 1 block for target match task

第Ⅷ章 総括

第1節 総括的考察

我々の日常生活やスポーツ活動は、自分の意志で骨格筋を収縮させることによって生じる身体活動、すなわち随意運動を媒介として、自分を取り巻く環境に意図的に働きかけることにより成り立っている。このようなヒトにおける随意運動で特筆すべきことは、経験や繰り返し練習の積み重ねによって、新しい運動を獲得し、より速く正確で円滑な運動を実現できる適応能力が備わっていることである。目的に沿った効率的な運動の遂行を可能とするためには、それに付随する呼吸循環器系や骨格筋系、神経系といった生体の器官組織の適応なしには起こり得ず、これらの形態的、機能的な変化については、体育科学の分野において示されている。なかでも運動の発現や制御に大きく関与している脳は、非常に柔軟性に富んだ可塑性の高い器官であり、近年、経験や学習、反復刺激に応じて適応的な変化が生じる性質を持つことが、ヒトにおいても明らかにされつつある。したがって、随意運動の反復、すなわち運動トレーニングによって、脳機能にも適応的な変容をもたらすと考えられるが、十分明らかにされていない。

脳に特有の機能とは、視覚、聴覚等の感覚系から入力された情報を、分析・統合し、知識として脳に貯蔵し、それに基づいて外界の環境や事物を認知し、目的に応じて手足の運動を計画し実行するといった複雑な精神活動を営むのに必要な一連の脳の働きのことであり、知覚・注意・学習・記憶・概念形成・推論・判断・言語活動などが含まれる。なかでも円滑で効率の良い運動を遂行するためには、感覚情報を正確にかつ素早く認知・判断するといった感覚情報の処理が重要となる。さらに運動を開始する前にあらかじめ適切な準備状態を構築しておくこともまた重要である。したがって、運動の反復刺激は身体諸機能に適応的な変化をもたらすのと同様に、このような脳機能にも合目的な適応変化を引き起こすことが推察される。

そこで本研究は、運動が脳内の感覚－運動処理過程にどのような影響を

及ぼすかを検討することにより、運動による中枢神経系の合目的な適応変化が、その情報処理過程と運動制御機構にいかに関与しているかという機能的意義を明らかにするとともに、運動効果における理論的背景のさらなる理解を示唆することを目的とした。

本研究で明らかとなった主な知見は、1) 競技者の筋電図反応時間 (EMG-RT) は非競技者より速く、P300 潜時と相関関係が認められたこと、2) 随意運動を伴う課題において競技者の後期 CNV が増大し、非競技者より大きな振幅を示したこと、3) 随意運動の反復により、単純な運動課題と比較し巧緻な制御が必要な課題では EMG-RT の短縮と伴に P300 潜時も短縮すること、4) P300 振幅は、パフォーマンスの向上と伴に前頭-中心部で減少すること、5) 随意運動の反復により、単純な運動課題では CNV が早期および後期成分ともに減少するが、巧緻な制御が必要な課題ではパフォーマンスの向上とともに後期 CNV が増大することである。

研究課題 1, 2 では長期的な運動の継続が感覚-運動処理過程に及ぼす影響について、すでに長期間にわたって運動トレーニングを積んでおり、身体諸機能に適応変化が起こっていると考えられるスポーツ競技者と非競技者を比較し確認した。その結果、競技者では感覚刺激の呈示から運動の出現までの時間、すなわち、脳内において情報処理に要した結果である EMG-RT が非競技者より速く、運動の継続による効果が認められた。さらにその遅速は、競技種目間で異なり、より外的な感覚刺激に対して素早い反応動作が要求される場面の多いと考えられる陸上短距離やバスケットボールの選手では、比較的そのような感覚入力に応じて動作を開始するトレーニングを行っていない陸上長距離の選手よりも速かった。これまでの一連の研究においても、競技者では一般人より反応時間 (reaction time : RT) が早く、トレーニングによって RT は短縮すること、トレーニング特性の異なる競技種目間においても差が認められることなどが示されており (Ando et al., 2001; Fontani et al., 1999; Lee et al., 1999; Olsen, 1956; Pierson, 1956; Meckel et al., 1995)、これらを支持する結果であった。さらに、本研

究では EMG-RT を用いたことによって、このような競技者の速い RT がより中枢要因における運動適応の影響を反映していることを示している。つまり、感覚刺激の呈示から運動の出現までの間に競技者と非競技者では、脳内で行われている処理に何らかの差があることが推察される。

研究課題 1 において、N100 成分にグループ間の差は認められなかったが、P300 の潜時は競技者で非競技者より早く、EMG-RT と相関関係が認められた。N100 は刺激に対する注意状態に感受性のある内因性成分と、単に刺激が脳に入力されたために誘発された外因性成分とを合わせ持った成分であると考えられている（丹羽, 1997）。したがって、グループ間で課題に対する注意状態に相違はなく、感覚刺激の入力に関する物理的要因は同様であったことが推察される。一方、P300 は競技者と非競技者に差が認められ、競技者でその潜時が速かった。P300 潜時は刺激の識別が困難なときや難易度の高い課題を要求すると潜時が延長すること（Goodin et al., 1983）などから、刺激の認知・判断といった刺激評価時間を反映する（Kutas et al., 1977）。つまり、競技者では N100 から P300 までに行われる刺激の処理に要する時間が速いことが示唆された。さらに、P300 潜時は EMG-RT と正の相関関係が認められ、競技種目による差も認められた。Polich and Landon（1997）は競技者の P300 振幅が非競技者よりも大きいことを示しているが、潜時には差を認めておらず、本研究の結果とは一致しない。この要因として、彼らは対照とした競技者は、種目特性を考慮していないことが考えられる。これらのことから、より外的刺激に対して素早い動作を要求される運動の継続によって、感覚刺激の処理に関与する脳内の神経回路に変化が起こった結果、N100-P300 間に行われる刺激の処理時間に影響を及ぼし、これが反応動作遂行のパフォーマンスにも影響していることが示唆された。これについては、反応課題の反復により、EMG-RT が短縮すると共に P300 潜時も短縮した研究課題 3 の結果からも支持される。

一方、P300 振幅は競技者で大きかったものの、最も EMG-RT の速かった短距離選手と非競技者間に有意な差は認められず、EMG-RT と振幅に相

関関係は認められなかった。Polich and Landon (1997) は、競技者の P300 振幅が非競技者より大きいことを示し、この差について運動による α 波帯域活動の増加や、脳血流の促進によって説明している。しかしながら、実際に測定しているわけではなく推察に過ぎない。P300 振幅は、運動の実行に関与する脳の活動を反映しているというより、むしろ刺激に含まれる情報の重要性や刺激の処理に要する注意の分配量を反映すると考えられている (Donchin and Coles, 1988; Kutas et al., 1977)。つまり、優れたパフォーマンスの発揮と、刺激の認知機能に関与する脳の活動量とは直接的な関係はないかもしれない。このことについては、研究課題 3 において、EMG-RT が反応課題の反復によって短縮しているにもかかわらず、P300 振幅が減少していることから明らかである。

さらに、競技者と非競技者では反応動作におけるパフォーマンスにおいて、その発揮張力量に差は認められないが、ピークに達するまで時間が早く、発揮張力の立ち上がりが急峻であった (研究課題 2)。このことから、競技者では運動の出現までの時間が速いだけでなく、効率の良い運動が遂行されていることが示唆される。このような競技者における効率的な力の発揮には、運動単位を同期的に活動させていること、また、素早い運動を遂行するために選択的に運動単位を動員・抑制しているといったより上位中枢での運動制御が非競技者と異なっている可能性が考えられる。このような巧みな運動の制御には、運動開始前の準備状態が重要であり、あらかじめ適切な運動準備状態を構築しておく必要がある。準備状態を反映する CNV の振幅は競技者と非競技者で異なり、反応動作を伴う課題において競技者の後期 CNV が増大した。

後期 CNV は、運動に約 1 秒先行して出現する運動準備電位 (Bereitschaftspotential : BP) と発生源や形状に類似性が認められることから、BP が重畳した運動を行うための準備機能に対応する皮質活動であること (Brunia, 1980)、さらに、命令刺激に対する期待や予測を反映する刺激前陰性変動 (stimulus preceding negativity : SPN) の影響も示されている (Boxtel

et al., 1993; Boxtel and Brunia, 1994)。本研究では、計数課題にグループ間の差が認められなかったことから、競技者ではより運動の準備過程において命令刺激に注意を向けているとともに、運動関連領野の興奮性を高めていることが示唆される。

研究課題 1、2 に認められた競技者と非競技者の ERP 成分の相違は、長期的な運動の継続によって生じた脳の可塑的な変化によるものであると考えられる。近年、このような長期間のトレーニングやスキルの獲得による皮質の可塑的な変化は、fMRI や TMS、MEG などのイメージング法を用いた研究でも報告されており、競技者やピアニスト、盲人では、長期間のトレーニングや活動に依存して活動筋を支配する運動領野の興奮性が上昇すること、感覚運動野における体部位局在性に再構築が生じることが示されている (Karni et al., 1995; Pascual-Leone et al., 1994; Pearce et al., 2000)。このような皮質の可塑的な変化は、長期間にわたり特定の運動パターンを繰り返し行うことによって、その運動に関与する脳内の神経回路におけるニューロン間のシナプス構造や機能に変化が起こった結果であると考えられる。ERP は、このシナプス間に生じる電位の総和であるため、競技者と非競技者との間に認められた P300 および CNV の相違、すなわち、競技者における感覚刺激の処理時間の短縮や、適切な運動準備状態の構築には、長期的な運動の継続によって起こった脳の可塑的な変化が要因であると考えられる。

本研究において最も重要な結果は、随意運動の反復に伴って、パフォーマンスおよび、ERP は変動するが、単純な運動と巧緻な制御が必要である運動ではその変動動態が異なることである (研究課題 3、4)。研究課題 1、2 において、長期的な運動の継続がパフォーマンスだけでなく、感覚刺激の処理過程および運動準備過程にも影響を及ぼすことが示唆されたが、このような横断的研究では、運動の反復による経時的な変化を明らかにすることはできない。また、このような長期間の運動効果は、日々繰り返し行うトレーニングの積み重ねによる結果であり、我々は新しい運動を獲得し

ようとしたとき、繰り返し何度もその運動パターンを練習する。このような状況下、すなわち、運動が反復して行われる最中においても感覚－運動処理過程が経時的に変動することを明らかにしたことは、ヒトの日常行動にも大きく関与する運動学習のメカニズムの解明として重要である。

これまでに、課題の反復に伴って ERP 成分が変化するという報告はいくつかあったが、遂行する運動課題を操作し、運動の獲得に伴う ERP の変動をパフォーマンスとの関連から検討した研究はなかった。実際の行動やスポーツ場面などにおいては、研究課題 1、2 の反応動作として要求した「素早さ」だけでなく、「正確さ」も重要である。研究課題 3、4 の結果から、「素早さ」と「正確さ」が反応動作として要求されたターゲットマッチ課題において、課題の反復に伴い EMG-RT は短縮し、発揮張力のばらつきは減少するといったパフォーマンスの向上がみとめられた。一方、「素早さ」のみが要求されたバリスティック課題に変動は認められず、課題の反復に伴う変動は遂行する運動に依存して異なった。本研究において、ターゲットマッチ課題で設定したターゲットは、最大随意収縮の 10% という非常に低強度でより中枢神経系における微細なコントロールが必要とされる張力量であると考えられる。一方のバリスティック課題での反応動作は、末梢のフィードバックがなくても遂行されることから事前にプログラミングされた運動であることが知られている (Forget and Lamarre, 1987)。したがって、ターゲットマッチ課題では、パフォーマンスの変動と同様に中枢でも変動が起きていることが推察される。

研究課題 3 の結果、ターゲットマッチ課題においてのみ P300 潜時は頭頂部で短縮し、振幅は前頭－中心部で減少した。P300 潜時の変動が頭頂部において認められたことについては、脳内における視覚の情報処理経路が関係していることが考えられる。本研究で反応刺激として呈示した視覚刺激はオシロスコープ上に呈示されるターゲットビームであり、被験者はそのターゲットビームに自分の反応動作によって移動する発揮張力曲線を合わせなければならいため、その位置情報の認知が重要となる。視覚の情報処

理経路は、空間的な位置や動きは頭頂方向へ向かう背側経路によって処理され、色や形が処理される側頭方向へ向かう腹側経路とは別の系統であることが報告されている (Mishkin, 1983)。このように導出部位によって潜時に異なる変動が認められたことは、その情報処理に関与する神経回路網に変化が起こっていることを強く示唆する。つまり、課題の反復に伴い膨大なニューロンをつなぐ複雑な神経回路のうち、その処理に関わるより効率の良い神経回路のみが選択的に選ばれ、その結果、処理に関わる時間が短縮したと考えられる。これは、EMG-RT も短縮したことや、P300 振幅の減少が頭皮上の部位で異なったことから明らかである。

さらに、随意運動の反復に伴い EMG-RT および P300 潜時が短縮するという結果は、研究課題 1 で認められた競技者の EMG-RT および P300 潜時が、非競技者よりも速いことを説明するものと考えられる。すなわち、競技者では日頃から素早い運動を繰り返し練習していることによって、素早く運動を遂行する能力が定着し、このような適応変化が感覚刺激処理過程にも影響を及ぼした結果であると考えられる。

P300 振幅の減少については、これまでにその要因として、潜時や反応時間の延長を伴うことから、集中力やモチベーションなどの覚醒レベルの低下があげられているが、Ravden and Polich (1998) は、むしろ刺激弁別過程の自動化に伴う注意分配量の減少による影響であることを強調しており、本研究においてはターゲットマッチ課題の P300 潜時および EMG-RT は短縮していることから、後者を支持する結果であった。さらに、P300 振幅が減少した前頭領野は、特に注意機能に深く関与しており、P300 振幅は、刺激の処理に要する注意の分配量を含む認知機能を反映していることから (Donchin and Coles, 1988; Kutas et al., 1977)、ターゲットマッチ課題では反復に伴い反応動作がほとんど自動化され、もはや意識的に注意を向ける必要がなくなったため、少ない注意で課題遂行が可能になったことが考えられる。しかしながら、EMG-RT と P300 の変動が時間的に必ずしも一致していないことから、運動の遂行過程と感覚刺激の処理過程に及ぼす随意運

動の反復効果は異なる可能性も示唆される。

このような課題に依存した脳内の変動の相違は運動準備状態においても認められ、後期 CNV はバリスティック課題において課題の反復に伴い減少したのに対し、ターゲットマッチ課題では増大した(研究課題 4)。Staines et al. (2002) は、運動課題の反復練習により反応の正確性の向上とともに運動に先行して出現する準備電位が増大することを示している。この電位は CNV と同様の成分ではないが、後期 CNV に重畳している可能性が議論されている (Brunia and van Boxtel, 2001; Ikeda et al., 1994)。つまり、研究課題 2 の結果からも、後期 CNV の増大は特に運動の準備に関与する運動関連領域における興奮性の増大が考えられる。また、近年のイメージング法を用いた研究では、新たな運動の獲得時に運動前野の活動が増加すること (Shadmehr and Holcomb, 1997) や、補足運動野が損傷されると、単純な運動は影響されないが、新奇の運動課題の学習は不可能になることなどから (Ackermann, 1996)、前頭運動関連領域は複雑な運動を企画するのに重要であり、新しい運動プログラムが確立されるときにのみ、あるいはその代わりとして以前に学習されたプログラムが調整されるときに活性化されることが指摘されている (Petersen et al., 1998; Staines et al., 2002)。このような補足運動野を含む前頭運動関連領域は CNV の発生源の一つであることから、本研究におけるターゲットマッチ課題での後期 CNV の増大は、新たな運動を獲得するために前頭運動関連領域の活動が増大したことによるものと考えられる。

第 2 節 要約と結論

新しい動作の獲得や、円滑で効率的な動作を遂行するという目的をもった随意運動の反復、すなわち運動トレーニングにより、生体の器官組織に形態的、機能的な適応変化をもたらすことについて多くの知見が得られている。脳機能においても同様に合目的的な変容をもたらすことが考えられるが、明らかにされていない。この運動に伴う脳機能の適応変化について

明らかにすることは、運動制御の解明および運動効果における理論的背景を理解する上で意義深く、体育科学にとって重要性の高い問題の一つである。

そこで、本研究は、随意運動の反復が脳内で生ずる一連の感覚－運動処理過程にいかなる影響を及ぼしているか、さらに、運動が習慣化することによりヒトの脳にどのような機能的適応変化をもたらすかを明らかにし、運動効果における理論的背景のさらなる理解を示唆することを目的とした。そのため本研究では、脳機能の中でも特に随意運動の発現に重要である感覚刺激処理過程と運動準備過程に着目し、ヒトの情報処理過程における脳機能を実体的に、かつ非侵襲的に評価するのに有効な事象関連電位 event related potential (ERP) を指標に用いて脳レベルでの検討をするとともに、行動レベルでの指標を同時に検討することにより、一連の感覚－運動処理過程における随意運動の関与について4つの研究課題を設定し調べた。各研究課題の要約と得られた結論を下記に示す。

1. 感覚刺激に対して反応を行う際、呈示された感覚刺激の処理過程と反応パフォーマンスに長期的な運動の継続が及ぼす影響について、スポーツ競技者と習慣的な運動を行っていない非競技者を比較し検討した。(研究課題1)

(1) 筋電図反応時間 (EMG-RT) は非競技者より競技者で速く、競技種目間においては、陸上競技短距離選手とバスケットボール選手で陸上競技長距離選手より速かったが、感覚モダリティ間の競技特性は認められなかった。

(2) 感覚情報の処理過程における早期成分 (N100) に競技者と非競技の差は認められなかったが、後期成分 (P300) の潜時は非競技者より競技者で速く、EMG-RT との相関関係が認められた。

これらのことから、長期的な運動の継続は N100 - P300 間に行われる感覚情報の認知に関わる処理時間に影響を及ぼし、これが反応動作遂行のパフォーマンスにも影響していることが示唆された。また、外的刺激に対し

て素早い動作を要求される競技種目において、より顕著であることが明らかとなった。

2. 反応動作遂行前の運動準備過程に長期的な運動の継続が及ぼす影響について、スポーツ競技者と非競技者を比較し、パフォーマンスとの関係から検討した。(研究課題 2)

(1) 反応動作に伴う発揮張力量に競技者と非競技者の差は認められなかったが、発揮張力の立ち上がりは非競技者より競技者で急峻であり、EMG-RT は競技者で速かった。

(2) 感覚刺激呈示前の準備期に出現する成分 (CNV) において、反応動作を伴わない課題 (計数課題) では競技者と非競技者に差は認められなかったが、反応動作を伴う課題 (反応課題) では競技者の CNV 後期成分の振幅が非競技者より大きかった。

これらのことから、長期的な運動の継続は、感覚刺激の処理過程だけでなく適切な運動準備状態の構築にも影響を及ぼし、これが効率の良いパフォーマンスの発揮に関与していることが示唆された。

3. 随意運動の反復によるパフォーマンスの変動と感覚刺激の処理過程の経時的変動について、単純な反応動作課題 (バリスティック課題) と巧緻な制御を要する反応動作課題 (ターゲットマッチ課題) を比較し検討した。

(研究課題 3)

(1) バリスティック課題では、運動の反復に伴うパフォーマンスの変動は認められなかったが、ターゲットマッチ課題では EMG-RT が短縮した。

(2) バリスティック課題では、運動の反復に伴う P300 に変動はなかったが、ターゲットマッチ課題では P300 の潜時が短縮し、振幅は前頭-中心部で減少した。

これらのことから、より巧緻な制御が必要である運動の反復は、動作のパフォーマンスの向上とともに感覚刺激の処理過程に影響を及ぼすことが

示唆され、運動の反復効果には課題に依存して異なる変動を示すことが明らかとなった。

4. 随意運動の反復によるパフォーマンスの変動と運動準備過程の経時的変動について、バリスティック課題とターゲットマッチ課題を比較し検討した。(研究課題 4)

(1) バリスティック課題では、運動の反復に伴うパフォーマンスの変動は認められなかったが、ターゲットマッチ課題では反応動作のスピード、および正確性が向上した。

(2) バリスティック課題では、運動の反復に伴い CNV 振幅は減少したが、ターゲットマッチ課題では増大した。

これらのことから、より巧緻な制御が必要である運動の反復によるパフォーマンスの向上には、運動準備過程の変動が関与していることが示唆された。

本研究における一連の結果より、長期的な運動トレーニングが反応動作の実行だけでなく感覚刺激処理過程および、運動準備過程に変容をもたらし、それが素早く効率の良い反応動作の遂行に関与していることが示唆された。さらに、このような感覚-運動処理過程の変化は短期間の運動の反復によっても生ずるが、単純な運動と巧緻な制御が必要な運動では、その変動動態が異なることが示唆された。以上のことから、運動トレーニングは、円滑で効率の良い運動を遂行するため、適切な運動準備状態の構築および感覚情報の認知処理といった高次脳機能に影響を及ぼすものと考えられる。

第3節 今後の課題

今後に残された研究課題として、主に以下の3つが考えられる。

1. 運動の定量化: 運動によって脳機能が増加することは明らかとなったが、

より具体的な運動の質、量、頻度について明らかにすることは、実際の運動処方などの場面において重要であると考えられる。

2. 運動の種類：本研究で用いた反復運動課題は、脳波と同時に計測する方法論上の制限、および関与する影響をできるだけ少なくするため単関節運動であったが、多関節による運動においても同じような効果が認められるのか、さらに、四肢の障害に対するリハビリテーションへの効果として、能動的運動だけでなく受動的運動による影響を明らかにしていくことも重要であると考えられる。

3. 発育発達期や加齢への効果：発達段階や加齢に伴ってパフォーマンスの変動と共に、事象関連電位の各成分も変動することは明らかにされている。そのような変動に対し、運動の効果が及ぼす影響を明らかにすることは、脳機能の発達促進や機能低下の抑制といった効果を理解する上で重要であると考えられる。

第IX章 謝辞

本論文の作成にあたり、懇切丁寧なご指導を賜りました筑波大学体育科学系西平賀昭教授に心より感謝をいたします。また、有益なるご助言およびご指導を賜りました筑波大学体育科学系田中喜代次助教授、武政徹講師、に深厚なる謝意を表します。

最後に、本論文の作成に対し、貴重なご協力、ご助言をいただいた筑波大学運動生理学研究室の皆様にご心からお礼を申し上げます。

第X章 文献

Ackermann H, Daum I, Schugens M M, Grodd W: Impaired procedural learning after damage to the left supplementary motor area (SMA) . J Neurol Neurosurg Psychiatry 60: 94-97, 1996

甘利俊一, 酒井英夫 (編) : 脳とニューラルネット. 朝倉書店, 東京, 1994

Anderson BJ, Li X, Alcantara AA, Isaacs KR, Black JE, Greenough WT: Glial hypertrophy is associated with synaptogenesis following motor-skill learning, but not with angiogenesis following exercise. Glia 11: 73-80, 1994

Ando S, Kida N, Oda S: Central and peripheral visual reaction time of soccer players and nonathletes. Percept Mot Skills 92: 786-794, 2001

Arito H, Oguri M: Contingent negative variation and reaction time of physically-trained subjects in simple and discriminative tasks. Ind Health 28: 97-106, 1990

跡見順子: 100年を生きるための脳と身体を育てる. 科学 71: 739-742, 2001

Barrett G, Neshige R, Shibasaki H: Human auditory and somatosensory event-related potentials: effects of response condition and age. Electroenceph clin Neurophysiol 66, 409-419, 1987

Bashore TR: Age, physical fitness, and mental processing speed. Annu Rev Gerontol Geriatr 9: 120-144, 1989

Bignall KE, Imbert M: Polysensory and cortico-cortical projections to frontal lobe of squirrel and rhesus monkeys. Electroenceph clin Neurophysiol 26: 206-215, 1969

Botwinick J, Thompson LW: Premotor and motor components of reaction time. J Exp Psychol 71: 9-15, 1966

Broadbent DE: Perception and communication. Pergamon Press, London, 1958

Brooks VB, Thach WT: Cerebellar control of posture and movement. Handbook of physiology, The nervous system, vol I, part 2, Brooks VB (Ed), American physiological Society, Bethesda, 1981

Brunia CH, Vingerhoets AJ: CNV and EMG preceding a plantar flexion of the foot. Biol Psychol 11: 181-191, 1980

- Brunia CH, van Boxtel GJ: Wait and see. *Int J Psychophysiol* 43: 59-75, 2001
- Campbell KB, Courchesne E, Picton TW, Squires KC: Evoked potential correlates of human information processing. *Biol Psychol* 8: 45-68, 1979
- Cheney PD, Fetz EE: Functional classes of primate corticomotoneuronal cells and their relation to active force. *J Neurophysiol* 44: 773-791, 1980
- Chwilla DJ, Brunia CH: Event-related potentials to different feedback stimuli. *Psychophysiology* 28: 123-132, 1991
- Classen J, Liepert J, Wise SP, Hallett M and Cohen LG: Rapid Plasticity of Human Cortical Movement Representation Induced by Practice. *J Neurophysiol* 79: 1117-1123, 1998
- Corcos DM, Jaric S, Agarwal GC, Gottlieb GL: Principles for learning single-joint movements. I. Enhanced performance by practice. *Exp Brain Res* 94: 499-513, 1993
- Courchesne E, Hillyard SA, Galambos R: Stimulus novelty, task relevance and the visual evoked potential in man, *Electroenceph clin Neurophysiol* 39: 131-143, 1975
- Damen EJ, Brunia CH: Is a stimulus conveying task-relevant information a sufficient condition to elicit a stimulus-preceding negativity?. *Psychophysiology* 31: 129-139, 1994
- Deecke L, Niesser A, Ziller B: Modality (visual and tactile) and stimulus predictability influence contingent negative variation and reaction time. *Prog Brain Res* 54: 301-308, 1980
- Delpont E, Dolisi C, Suisse G, Bodino G, Gastaud M: Visual evoked potentials: differences related to physical activity. *Int J Sports Med* 12: 293-298, 1991
- Desmedt JE, Robertson D: Differential enhancement of early and late components of the cerebral somatosensory evoked potentials during forced-paced cognitive tasks in man. *J Physiol* 271: 761-782, 1977
- Desmedt JE, Debecker J: Slow potential shifts and decision P350 interactions in tasks with random sequences of near-threshold clicks and finger stimuli delivered at regular intervals. *Electroenceph clin Neurophysiol* 47: 671-679, 1979
- Desmedt JE: P300 in serial tasks: an essential post-decision closure mechanism.

Prog Brain Res 54: 682-686, 1980

Dettmers C, Fink GR, Lemon RN, Stephan KM, Passingham RE, Silberswei, D, Holmes A, Ridding MC, Brooks DJ, Frackowiak RSJ: Relation between cerebral activity and force in the motor areas of the human brain. *J Neurophysiol* 74: 802-815, 1995

Donchin E, Coles MGH: Is the P300 component a manifestation of context updating? *Behav Brain Sci* 11: 357-374, 1988

Duncan-Johnson CC, Kopell BS: The Stroop effect: brain potentials localize the source of interference. *Science* 214: 938-940, 1981

Duncan-Johnson CC, Donchin E: On quantifying surprise: the variation of event-related potentials with subjective probability. *Psychophysiology* 14: 456-467, 1977

Duncan-Johnson CC, Donchin E: The P300 component of the event-related brain potential as an index of information processing, *Biol Psychol* 14: 1-52, 1982

Dustman RE, Ruhling RO, Russell EM, Shearer DE, Bonekat HW, Shigeoka JW, Wood JS, Bradford DC: Aerobic exercise training and improved neuropsychological function of older individuals. *Neurobiol Aging* 5: 35-42, 1984

Dustman RE, Emmerson RY, Ruhling RO, Shearer DE, Steinhilber LA, Johnson SC, Bonekat HW, Shigeoka JW: Age and fitness effects on EEG, ERP, visual sensitivity, and cognition. *Neurobiol Aging* 11: 193-200, 1990

Dustman RE, Emmerson RY, Shearer DE: Physical activity, age, and cognitive-neuropsychological function. *J Aging Phys Activ* 2: 143-181, 1994

Flament D, Shapiro MB, Kempf T, Corcos DM: Time course and temporal order of change in movement kinematics during learning of fast and accurate elbow flexions *Exp Brain Res* 129: 441-450, 1999

Folkens CH, Sime WE: Physical fitness training and mental health. *Am Psychol* 36: 373-389, 1981

Fontani G, Maffei D, Cameli S, Polidori F: Reactivity and event-related potentials during attentional tests in athletes. *Eur J Appl Physiol* 80: 308-317, 1999

Forget R, Lamarre Y: Rapid elbow flexion in the absence of proprioceptive and cutaneous feedback. *Hum Neurobiol* 6: 27-37, 1987

Franck V, Bonnet M, Macar F: Programming the duration of a motor sequence: Role of the primary and supplementary motor areas in man. *Exp Brain Res* 106: 339-350, 1995

麓正樹, 西平賀昭, 下田政博, 宮達夫, 八田有洋: 運動準備期の持続的な随意収縮が CNV と H 反射に及ぼす影響 — 反応動作の主導筋による運動前収縮—. *脳波と筋電図* 27: 258-267, 1999

麓正樹, 西平賀昭, 宮達夫, 八田有洋, 下田政博: 運動準備期の持続的な随意収縮が CNV と H 反射に及ぼす影響 — 反応動作の収縮量の変化—. *体力科学* 48: 569-582, 1999

Gaillard AW: The late CNV wave: preparation versus expectancy. *Psychophysiology* 14: 563-568, 1977

Gaillard AW, Perdok J, Varey CA: Motor preparation at a cortical and at a peripheral level. *Prog Brain Res* 54: 214-218, 1980

Gemba H, Sasaki K: Distribution of potentials preceding visually initiated and self-paced hand movements in various cortical areas of the monkey. *Brain Res* 306: 207-214, 1984

Gemba H, Sasaki K, Tsujimoto T: Cortical field potentials associated with hand movements triggered by warning and imperative stimuli in the monkey. *Neurosci Lett* 113: 275-280, 1990

Gómez-Pinilla F, Dao L, So V: Physical exercise induces FGF-2 and its mRNA in the hippocampus. *Brain Res* 764: 1-8, 1997

Goodin DS, Squires KC, Starr A: Variations in early and late event-related components of the auditory evoked potential with task difficulty. *Electroenceph clin Neurophysiol* 55: 680-686, 1983

Groves PM, Eason RG: Effects of attention and activation on the visual evoked cortical potential and reaction time. *Psychophysiology* 5: 394-398, 1969

Grünewald G, Grünewald-Zuberbier E, Netz J, Hömberg V, Sander G: Relationships between the late component of the contingent negative variation and the Bereitschaftspotential. *Electroenceph clin Neurophysiol* 46: 538-545, 1979

Gutin B: Effect of increase in physical fitness on mental ability following physical and mental stress. *Res Q* 37: 211-220, 1966

Gutin B, DiGennaro J: Effect of one-minute and five-minute step-ups on performance of simple addition. Res Q 39: 81-85, 1968

Gutin B: Exercise-induced activation and human performance. A review Res Q 44: 256-268, 1972

萩原 仁, 調枝孝治: 人間の知覚－運動行動. 不昧堂, 東京, 1975

Halgren E, Squires NK, Wilson CL, Rohrbaugh JW, Babb TL, Crandall PH: Endogenous potentials generated in the human hippocampal formation and amygdala by infrequent events. Science 210: 803-805, 1980

Hamano T, Luders H O, Ikeda A, Collura T F, Comair Y G, Shibasaki H: The cortical generators of the contingent negative variation in humans: a study with subdural electrodes. Electroenceph clin Neurophysiol 104: 257-268, 1997

Hansen JC, Hillyard SA: Endogenous brain potentials associated with selective S auditory attention. Electroenceph Clin Neurophysiol 49: 277-290, 1980

Hatta A, Nishihira Y, Fumoto M, Miya T, Shimoda M, Tokitou S and Kaneda T: Modulation of Contingent Negative Variation (CNV) and EEG frequency Band in Difference of Task Condition. Adv Exerc Sports Physiol 5: 9-17, 1999

林田征起, 斉藤正男, 丹羽真一, 平松謙一, 福田正人, 斉藤治, 岩波明, 佐々木司, 中込和幸: シラブル弁別課題の後期要請成分: 選択的注意と刺激間隔の効果. 脳波と筋電図 18: 454, 1990

Hillyard SA, Galambos R: Effects of stimulus and response contingencies on a surface negative slow potential shift in man. Electroenceph clin Neurophysiol 22: 297-304, 1967

Hillyard SA, Hink RF, Schwent VL, Picton, TW: Electrical signs of selective attention in the human brain. Science 182: 177-80, 1973

平松謙一, 秋本優, 丹羽真一: 健常者における P300 潜時と選択反応時間の相関 適応形相関フィルタによる P300 潜時の推定. 臨床脳波 27: 237-242, 1985

Hohnsbein J, Falkenstein M, Hoormann J: Performance differences in reaction tasks are reflected in event-related brain potentials (ERPs) . Ergonomics 41: 622-633, 1998

Hultin L, Rossini P, Romani G, LHögstedt P, Tecchio F, Pizzella V:

Neuromagnetic localization of the late component of the contingent negative variation. *Electroenceph clin Neurophysiol* 98: 435-448, 1996

Huston TP, Puffer JC, Rodney WM: The athletic heart syndrom. *New England J Med* 313: 24-32, 1985

Hyman R: Stimulus information as a determinant of reaction time. *J Experimental Psychology* 45: 188-196, 1953

猪飼道夫, 浅見孝明, 柴山秀太郎: 全身反応時間の研究とその応用. *Olympia* 7: 210-219, 1961a

猪飼道夫, 石井喜八: 筋力の生理学的限界と心理学的限界の心電図学的研究. *体育学研究* 6: 154-165, 1961b

Ikai M, Fukunaga T: A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *Internationale Zeitschrift Fur Angewandte Physiologie, Einschliesslich Arbeitsphysiologie* 28: 173-180, 1970

Ikeda A, Shibasaki H, Kaji R, Terada K, Nagamine T, Honda M, Kimura J: Dissociation between contingent negative variation (CNV) and Bereitschaftspotential (BP) in patients with parkinsonism. *Electroenceph clin Neurophysiol* 102: 142-151, 1997

Ikeda A, Shibasaki H, Nagamine T, Terada K, Kaji R, Fukuyama H, Kimura J: Dissociation between contingent negative variation and Bereitschaftspotential in a patient with cerebellar efferent lesion. *Electroenceph clin Neurophysiol* 90: 359-364, 1994

Irwin DA, Knott JR, McAdam DW, Rebert CS: Motivational determinants of the "contingent negative variation". *Electroenceph clin Neurophysiol* 21: 538-543, 1966

Ito M: Fractionated reaction time as a function of magnitude of force in simple and choice condition. *Percept Mot Skills* 85: 435-444, 1997

Janssen RH, Mattie H, Plooij-Van Gorsel PC, Werre PF: The effects of a depressant and a stimulant drug on the contingent negative variation. *Biol Psychol* 6: 209-218, 1978

Jasper HH, Penfield W: Electroocorticograms in man: Effects of voluntary movement upon the electrical activity of precentral gyrus. *Arch Psychiat Neurol* 183: 163-174, 1949

Jenkins WM, Merzenich MM, Ochs MT, Allard T, Guíc-Robles E: Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation. *J Neurophysiol* 63: 82-104, 1990

Johnson R Jr: Scalp-recorded P300 activity in patients following unilateral temporal lobectomy. *Brain* 111: 1517-1529, 1988

Kaji R, Ikeda A, Ikeda T, Kubori T, Mezaki T, Kohara N, Kanda M, Nagamine T, Honda M, Rothwell JC: Physiological study of cervical dystonia. Task-specific abnormality in contingent negative variation, *Brain* 118: 511-522, 1995

Karni A, Meyer G, Jezzard P, Adams MM, Turner R, Ungerleider LG: Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature* 377: 155-158, 1995

Kita Y, Mori A, Nara M: Two types of movement-related cortical potentials preceding wrist extension in humans. *Neuroreport* 12: 2221-2225, 2001

Kornhuber HH, Deecke L: Hirnpotentialänderungen bei willkürbewegungen und passiven bewegungen den menschen: bereitschaftspotential und reafferente potentiale. *Pflügers Arch ges Physiol* 284: 1-17, 1965

Kramer A, Schneider W, Fisk A, Donchin E: The effects of practice and task structure on components of the event-related brain potential. *Psychophysiology* 23: 33-47, 1986

Kutas M, McCarthy G, Donchin E: Augmenting mental chronometry: the P300 as a measure of stimulus evaluation time. *Science* 197: 792-795, 1977

Lammers W J, Badia P: Changes in event-related potentials during classical conditioning. *Int J Psychophysiol* 14: 134-135, 1993

Lee JB, Matsumoto T, Othman T, Yamauchi M, Taimura A, Kaneda E, Ohwatari N, Kosaka M: Coactivation of the flexor muscles as a synergist with the extensors during ballistic finger extension movement in trained kendo and karate athletes. *International Journal of Sports Medicine* 20: 7-11, 1999

Lew GS, Polich J: P300, habituation, and response mode. *Physiol Behav* 53: 111-117, 1993

Loveless NE: The contingent negative variation related to preparatory set in a reaction time situation with variable foreperiod. *Electroenceph clin Neurophysiol* 35: 369-374, 1973

Loveless NE, Sanford AJ: Slow potential correlates of preparatory set. *Biol Psychol* 1: 303-314, 1974

Low MD, McSherry JW: Further observations of psychological factors involved in CNV genesis. *Electroenceph clin Neurophysiol* 25: 203-207, 1968

MacKay WA, Bonnet M: CNV, stretch reflex and reaction time correlates of preparation for movement direction and force. *Electroenceph clin Neurophysiol* 76: 47-62, 1990

Magliero A, Bashore TR, Coles MG, Donchin E: On the dependence of P300 latency on stimulus evaluation processes. *Psychophysiology* 21: 171-186, 1984

Magnie MN, Bermon S, Martin F., Madany-Lounis M, Suisse G, Muhammad W, Dolisi C: P300, N400, aerobic fitness, and maximal aerobic exercise. *Psychophysiology* 37: 369-377, 2000

増村年章, 四宮雅博: 青年期健常者の事象関連電位と脳波活動の関連についての研究. *脳波と筋電図* 20: 72-82, 1992

松村道一: サイエンス入門, サイエンス社, 東京, 1998

松村道一, 森田敏夫, 小田伸午 (監訳): ヒトの動きの神経科学, 市村出版, 東京, 2002

松波謙一: 脳・神経機能の可塑性. 森田敏夫 (編): 運動と生体諸機能, ナップ, 東京, 1999

McCarthy G, Donchin E: A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science* 211: 77-80, 1981

McCarthy G, Wood CC, Williamson PD, Spencer DD: Task-dependent field potentials in human hippocampal formation. *J Neurosci* 9: 4253-4268, 1989

McCarthy G, Donchin E: A metric for thought: a comparison of P300 latency and reaction time. *Science* 211: 77-80, 1981

Meckel Y, Atterbom H, Grodjinovsky A, Ben-Sira D, Rotstein A: Physiological characteristics of female 100 metre sprinters of different performance levels. *J Sports Med Phys Fitness* 35: 169-175, 1995

見正富美子, 林達也, 柴田真志, 吉武康栄, 西嶋泰史, 森谷敏夫: 有酸素運動における脳波・血中 β -エンドルフィンの動態. *体力科学* 45: 519-526,

1996

Mishkin M, Ungerleider LG, Macko KA: Object vision and spatial vision: Two cortical pathways. *Trends Neurosci* 6: 414-417, 1983

宮下栄三: 大脳皮質運動野のシナプス可塑性. 西野仁雄, 柳原大 (編): 運動の神経科学, ナップ, 東京, 2000

Morgan WP: Exercise and mental disorders. In Ryan AJ, Allman FL (Eds): *Sports medicine*, Academic press, New York, 1974

森谷敏夫, 吉武康栄: 神経・筋システムの適応. 森田敏夫 (編): 運動と生体諸機能, ナップ, 東京, 1999

Moritani T: Neuromuscular adaptations during the acquisition of muscle strength, power and motor tasks. *J Biomech* 26: 95-107, 1993

Moya-Albiol L, Salvador A, Costa R, Martinez-Sanchis S, Gonzalez-Bono E, Ricarte J, Arnedo M: Psychophysiological responses to the Stroop Task after a maximal cycle ergometry in elite sportsmen and physically active subjects. *Int J Psychophysiol* 40: 47-59, 2001

Mulder G, Wijers AA, Lange JJ, Buijink BM, Mulder LJM, Willemsen ATM, Paans AMJ: The role of neuroimaging in the discovery of processing stages. *Acta Psychol* 90: 63-79, 1995

Näätänen R, Michie PT: Early selective-attention effects on the evoked potential: a critical review and reinterpretation. *Biol Psychol* 8: 81-136, 1979

Näätänen R: Processing negativity: an evoked-potential reflection of selective attention, *Psychological Bulletin* 92: 605-640, 1982

Näätänen R, Picton T: The N1 wave of the human electric and magnetic response to sound: a review and an analysis of the component structure, *Psychophysiology* 24: 375-425, 1987

中島八十一, 宮本啓一, 菊地正史: 双極子追跡法による事象関連電位 P300 の電源推定. *脳と神経* 46: 1059-1065, 1994

中村隆一: 筋電図反応時間による運動発現の影響. *臨床脳波* 30: 566 - 572, 1988

中村道彦, 安田究: CNV. 丹羽真一, 鶴紀子, 事象関連電位, 新興医学出版

社, 東京, 1997

Nakamura Y, Nishimoto K, Akamatu M, Takahashi M, Maruyama A: The effect of jogging on P300 event related potentials. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 39: 71-74, 1999

Narici MV, Hoppeler H, Kayser B, Landoni L, Claassen H, Gavardi C, Conti M, Cerretelli P: Human quadriceps cross-sectional area, torque and neural activation during 6 months strength training. *Acta Physiol Scand* 157: 175-186, 1996

Nashmi R, Mendonca AJ, MacKay WA: EEG rhythms of the sensorimotor region during hand movements. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 91: 456-467, 1994

西平賀昭, 荒木秀夫: 感覚-運動統合過程の遅速について-体性感覚大脳誘発電位, 運動電位, CNVからの考察. *体力科学* 32: 141-150, 1983

Nishihira Y, Araki H, Ishihara A: Cerebral motor potential preceding grip strength movement. *J Sports Med Phys Fitness* 29: 297-303, 1989a

Nishihira Y, Araki H, Ishihara A: Comparison among various movement tasks of cerebral motor potential preceding voluntary movement. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 29: 179-184, 1989b

Nishihira Y, Araki H, Ishihara A: Attenuation of somatosensory evoked potentials immediately following rapid reaction movement. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 31: 15-20, 1991

Nishihira Y, Lee C, Funase K, Imanaka K, Araki H, Shimoda M and Takemiya T: Changes in power spectral analysis of EEG-Alpha bands during a sustained voluntary contraction to fatigue. *Adv Exerc Sports Physiol* 1: 39-43, 1995

Nishihira Y, Araki H, Funase K, Imanaka K: Changes in central motor-sensory system following voluntary movement of stimulated finger. *J Sports Med Phys Fitness* 37: 65-71, 1997

西平賀昭: 神経系の運動調節適応能. 竹宮 隆, 石河利寛 (編): 運動適応の科学, 杏林書院, 東京, 1998

Nishihira Y, Ohno T, Hatta A, Fumoto M, Kaneda T, Tokitou S, Imanaka K, Funase K: P300 before and after transient hard exercise *Adv Exerc Sports Physiol* 15: 49-54, 1999

西平賀昭, 宮達夫, 八田有洋, 麓正樹, 金田健史, 時任真一郎, 秋山幸代,

和坂俊昭: 事象関連電位の早期成分の変化が反応時間に及ぼす影響. 日本運動生理学雑誌 7: 65-74, 2000

西平賀昭: 随意動作習熟過程解析のための事象関連電位早期成分の重要性. 体力科学 50: 159-164, 2001

Nudo RJ, Wise BM, SiFuentes F, Milliken GW: Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct. *Science* 272: 1791-1794, 1996

荻野宏文, 倉知正佳, 金 英道, 桜井芳雄, 斉藤治: 青年健常者における随伴性陰性変動と反応時間の関連について. 脳波と筋電図 27: 258-267, 1995

Oishi M, Mochizuki Y, Du C, Takasu T: Contingent negative variation and movement-related cortical potentials in parkinsonism. *Electroenceph clin Neurophysiol* 95: 346-349, 1995

Oishi M, Mochizuki Y: Correlation between contingent negative variation and regional cerebral blood flow. *Clin Electroencephalogr* 29: 124-127, 1998

Okada YC, Kaufman L, Williamson SJ: The hippocampal formation as a source of the slow endogenous potentials. *Electroenceph clin Neurophysiol* 55: 417-426, 1983

Olsen NA: Relationship between psychological capacities and success in college athletes. *Res Q* 27: 79-89, 1956

音成龍司, Barrett G, 柴崎浩: 大脳誘発電位後期陽性成分 (P300) の正常所見および加齢の影響. 脳波と筋電図 14: 177-183, 1986

Pan J, Takeshita T, Morimoto K: P300 habituation from auditory single-stimulus and oddball paradigms. *Int J Psychophysiol* 37: 149-153, 2000

Pascual-Leone A, Grafman J, Hallett M: Modulation of cortical motor output maps during development of implicit and explicit knowledge. *Science* 263: 1287-1289, 1994

Pascual-Leone A, Nguyet D, Cohen LG, Brasil-Neto JP, Cammarota A, Hallett M: Modulation of muscle responses evoked by transcranial magnetic stimulation during the acquisition of new fine motor skills. *J Neurophysiol* 74: 1037-1045, 1995

Pearce AJ, Thickbroom GW, Byrnes ML, Mastaglia FL: Functional reorganisation

of the corticomotor projection to the hand in skilled racquet players. *Exp Brain Res* 130: 238-243, 2000

Petersen SE, van Mier H, Fiez JA, Raichle ME: The effects of practice on the functional anatomy of task performance. *Proc Natl Acad Sci USA* 95: 853-860, 1998

Pfefferbaum A, Christensen C, Ford JM, Kopell BS: Apparent response incompatibility effects on P3 latency depend on the task. *Electroenceph clin Neurophysiol* 64: 424-437, 1986

Pfurtscheller G: Central beta rhythm during sensorimotor activities in man. *Electroenceph clin Neurophysiol* 51: 253-264, 1981

Pfurtscheller, G, Stancák A Jr, Neuper C: Post-movement beta synchronization. A correlate of an idling motor area ? *Electroenceph clin Neurophysiol* 98: 281-293, 1996

Picton TW, Low MD: The CNV and semantic content of stimuli in the experimental paradigm: effects of feedback. *Electroenceph clin Neurophysiol* 31: 451-456, 1971

Picton TW: The P300 wave of the human event-related potential. *J Clin Neurophysiol* 9: 456-479, 1992

Pierson WR: Comparison of fencers and nonfencers by psychomotor, spaceperception and anthropometric measures. *Res Q* 27: 90-96, 1956

Pllip DT, Norman RE: Effects of exercise on cognitive processes: a review. *Psychol Bull* 99: 338-346, 1986

Ploutz LL, Tesch PA, Biro RL, Dudley GA: Effect of resistance training on muscle use during exercise. *J Appl Physiol* 76: 1675-1681, 1994

Polich J: Normal variation of P300 from auditory stimuli. *Electroenceph clin Neurophysiol* 65: 236-240, 1986

Polich J, Eischen SE, Collins GE: P300 from a single auditory stimulus. *Electroenceph clin Neurophysiol* 92: 253-261, 1994

Polich J, Landon MT: P300 and long-term physical exercise. *Electroenceph clin Neurophysiol* 103: 493-498, 1997

Prince FP, Hikida RS, Hagerman FC: Muscle fiber types in women athletes and non-athletes. *Pflugers Archiv: Eur J Physiol* 371: 161-165, 1977

Ravden D, Polich J: Habituation of P300 from visual stimuli. *Int J Psychophysiol* 30: 359-365, 1998

Rebert CS, McAdam DW, Knott JR, Irwin DA: Slow potential change in human brain related to level of motivation. *J Comparative and Physiological Psychology* 63: 20-23, 1967

Ritter W, Simson R, Vaughan HG Jr: Association cortex potentials and reaction time in auditory discrimination. *Electroenceph clin Neurophysiol* 33: 547-555, 1972

Rohrbaugh JW, Syndulko K, Lindsley DB: Brain wave components of the contingent negative variation in humans. *Science* 191: 1055-1057, 1976

Rohrbaugh JW, Syndulko K, Lindsley DB: Cortical slow negative waves following non-paired stimuli: effects of task factors. *Electroenceph clin Neurophysiol* 45: 551-567, 1978

Romero R, Polich J: P3(00) habituation from auditory and visual stimuli. *Physiol Behav* 59: 517-522, 1996

Rose M, Verleger R, Wascher E: ERP correlates of associative learning. *Psychophysiology* 38: 440-450, 2001

齊藤治, 豊嶋良一: 歴史と概論. 丹羽真一, 鶴紀子, 事象関連電位, 新興医学出版社, 東京, 1997

Sakai K, Hikosaka O, Miyauchi S, Takino R, Sasaki Y, Pütz B: Transition of Brain Activation from Frontal to Parietal Areas in Visuomotor Sequence Learning. *J Neurosci* 18: 1827-1840, 1998

Sale D, MacDougall D: Specificity in strength training: a review for the coach and athlete. *Canadian Journal of Applied Sport Sciences Journal Canadien Des Sciences Appliquees Au Sport* 6: 87-92, 1981

Salmelin R, Hari R: Spatiotemporal characteristics of sensorimotor neuromagnetic rhythms related to thumb movement. *Neuroscience* 60: 537-550, 1994

Sanders AF: Prewarning signal activity and RT as a function of foreperiod. *Percept Mot Skills* 21: 405-406, 1965

Sasaki K, Gemba H, Tsujimoto T: Cortical field potential associated with hand movement on warning-imperative visual stimulus and cerebellum in the monkey. *Brain Res* 519: 343-346, 1990

Schmidt RA: *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (2nd ed) Champaign IL, Human Kinetics, 1988

Shadmehr R, Holcomb HH: Neural correlates of motor memory consolidation. *Science* 277: 821-825, 1997

柴崎 浩, 米倉義晴: 脳のイメージングー脳のはたらきはどこまで画像化できるか. 共立出版, 東京, 1994

下河内稔, 投石保広, 楊井和彦, 小山幸子: P300 の基礎. *神経進歩* 32, 149-161, 1988

Snyder E, Hillyard SA, Galambos R: Similarities and differences among the P3 waves to detected signals in three modalities. *Psychophysiology* 17: 112-122, 1980

Spinell DN, Pribram KH: Changes in visual recovery functions and unit activity produced by frontal and temporal cortex stimulation. *Electroenceph clin Neurophysiol* 22: 143-149, 1967

Squires KC, Squires NK, Hillyard SA: Decision-related cortical potentials during an auditory signal detection task with cued observation intervals. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1: 268-279, 1975

Squires KC, Wickens C, Squires NK, Donchin E: The effect of stimulus sequence on the waveform of the cortical event-related potential. *Science* 193: 1142-1146, 1976

Staines W, Richard, Padilla Mayra, Knight Robert T: Frontal-parietal event-related potential changes associated with practising a novel visuomotor task. *Brain Res Cogn Brain Res* 13: 195-202, 2002

Stancák A Jr, Pfurtscheller G: Desynchronization and recovery of beta rhythms during brisk and slow self-paced finger movements in man. *Neurosci Lett* 196: 21-24, 1995

Stancák A Jr, Riml A, Pfurtscheller G: The effects of external load on movement-related changes of the sensorimotor EEG rhythms. *Electroenceph clin Neurophysiol* 102: 495-504, 1997

Stein R, Medeiros CM, Rosito GA, Zimmerman LI, Ribeiro JP: Intrinsic sinus and atrioventricular node electrophysiologic adaptations in endurance athletes. *J Am Coll Cardiol* 39: 1033-1038, 2002

Surwillo WW: The relation of simple response time to brain wave frequency and the effect of age. *Electroenceph clin Neurophysiol* 15: 105-114, 1963

Sutton S, Braren M, Zubin J: Evoked-potential correlaters of stimulus uncertainty. *Science* 150: 1187-1188, 1965

忠井俊明, 福井義久, 上月清司, 井爪尚, 加藤光彦, 村田伸文, 中嶋照夫: 分裂病の情報処理障害 - 事象関連電位による情報処理モデルからの検討 -. *精神医学* 29: 817 - 828, 1985

竹宮 隆: 運動適応について. 竹宮 隆, 石河利寛 (編): 運動適応の科学, 杏林書院, 東京, 1998

竹内賢, 丹羽真一: 課題遂行と事象関連電位 - 反応時間を含めて -. 丹羽真一, 鶴紀子, 事象関連電位, 新興医学出版社, 東京, 1997

Tecce JJ, Scheff NM: Attention reduction and suppressed direct-current potentials in the human brain. *Science* 164: 331-333, 1969

Tecce JJ: Contingent negative variation (CNV) and psychological processes in man. *Psychological Bulletin* 77: 73-108, 1972

Tecce JJ, Savignano-Bowman J, Meinbresse D: Contingent negative variation and the distraction-arousal hypothesis. *Electroenceph clin Neurophysiol* 41: 277-286, 1976

Thomas NG, Mitchell D: Somatosensory-evoked potentials in athletes. *Med Sci Sports Exerc* 28: 473-481, 1996

Toro C, Deuschl G, Thatche, R, Sato S, Kufta C, Hallett M: Event-related desynchronization and movement-related cortical potentials on the ECoG and EEG. *Electroenceph clin Neurophysiol* 93: 380-389, 1994

塚原伸晃: 脳の可塑性と記憶, 紀伊国屋書店, 東京, 1998

Turner AM, Greenough WT: Differential rearing effects on rat visual cortex synapses. I. Synaptic and neuronal density and synapses per neuron. *Brain Res* 329: 195-203, 1985

van Boxtel GJ, Geraats LH, Van den Berg-Lenssen MM, Brunia CH: Detection of EMG onset in ERP research. *Psychophysiology* 30: 405-412, 1993

van Boxtel GJ, Brunia CH: Motor and non-motor aspects of slow brain potentials. *Biol Psychol* 38: 37-51, 1994

Verleger R: On the utility of P3 latency as an index of mental chronometry. *Psychophysiology* 34: 131-156, 1997

Walter WG, Cooper R, Aldridge VJ, MacCillum WC and Winer AL: Contingent negative variation: an electrical sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature* 203: 380-384, 1964

Wascher E, Verleger R, Jaskowski P, Wauschkuhn B: Preparation for action: an ERP study about two tasks provoking variability in response speed. *Psychophysiology* 33: 262-272, 1996

Waszak M, Obrist WD: Relationship of slow potential changes to response speed and motivation in man. *Electroenceph clin Neurophysiol* 27: 113-119, 1969

Weerts TC, Lang, PJ: The effects of eye fixation and stimulus and response location on the contingent negative variation (CNV). *Biol Psychol* 1: 1-19, 1973

Weiss AD: The locus of reaction time change with set, motivation, and age. *J Gerontol* 20: 60-64, 1965

Wickens C, Kramer A, Vanasse L, Donchin E: Performance of concurrent tasks: a psychophysiological analysis of the reciprocity of information-processing resources. *Science* 221: 1080-1082, 1983

Wilkinson RT, Haines E: evoked response correlates of expectancy during vigilance. *Acta Psychol* 33: 402-413, 1970

Yahagi S, Shimura K, Kasai T: An increase in cortical excitability with no change in spinal excitability during motor imagery. *Percept Mot Skills* 83: 288-290, 1996

Yamaguchi S, Knight RT: P300 generation by novel somatosensory stimuli. *Electroenceph clin Neurophysiol* 78: 50-55, 1991

Yingling CD: Cognition, action and mechanisms of EEG asymmetry. In: Pfurtscheller G, Buser FH, Lopes da Silvia and Petsche (Eds.) , *Rhythmic EEG activities and cortical functioning*. Elsevier/North Holland, Amsterdam: 79-90, 1980

Yingling CD, Hosobuchi Y: A subcortical correlate of P300 in man.
Electroenceph clin Neurophysiol 59: 72-76, 1984

与那正栄, 室増男, 下敷領光一, 永田晟: 筋力トレーニングに伴う反応時間
の変化. 体力科学 39: 307-314, 1990