



運動が事象関連電位に及ぼす影響

著者	西平 賀昭
雑誌名	日本運動生理学雑誌
巻	11
号	1
ページ	1-21
発行年	2004-04
権利	日本運動生理学会 本文データは学協会の許可に基づきCiNiiから複製したものである
その他のタイトル	Effect of exercise on event related potentials
URL	http://hdl.handle.net/2241/115881

運動が事象関連電位に及ぼす影響

西平賀昭*

Effect of exercise on event related potentials

Yoshiaki NISHIHIRA*

はじめに

運動が継続的に遂行された場合、実際脳の活動にどのような変化が生じているのだろうか。一過性の激しい運動は運動野、大脳基底核線状体そして海馬付近の脳血流量、酸素摂取そして脳の局所グルコース利用が一時的に増加することが知られている。また人間の活動レベル、脳血流量そして認知機能は、それぞれ相関があると考えられている。そして結果的に運動は認知とパフォーマンスを改善する。さらに運動学習を継続すると第一次運動野の活動ばかりではなく、構造さえも変化することが確認されている。代謝面から見ると脳は酸素を取り入れて大量なブドウ糖を消費する器官である。それは脳が大量の血管に覆われている器官であるということからもうなずけることである。運動中に脳の酸素消費量は約2倍以上に増えていて、その酸素はニューロンが働くために利用されているに違いない。従って運動中、脳は安静時のときよりもよけいに働いていると考えられる。おそらく増えた酸素やブドウ糖は運動に関与している脳の運動性皮質（補足運動野、運動前野、運動野）ニューロンの活動の維持、増進のために使われていると思われる。

人間が筋運動するときには目的とする運動をするための意志が必ず働く。その時、前頭連合野で運動を引き起こすために生じた命令は運動性皮質（補足運動野、運動前野、運動野）に伝えられ、脊髄の運動神経系を経て筋が収縮する。運動中でさえも手足の

筋を動かそうとする意志は働いている。言い換えれば手足の運動ニューロンが働かないと手足の筋は絶対に収縮しないのである。運動野が働かないと運動ができないということは人間が運動するときは頭を使っているということである。特に走ることを例にあげると「やる気」の意欲があって、特別の指令ニューロンが働いて、運動野ニューロンを駆動しないと走れないということである。脳の中にはA-10神経という特別な神経があり、ここが快い情動と結びついて快感という報酬をもたらす、価値判断を左右することが報告されている¹⁾。この神経は中脳から出て、生きていく欲求をもたらす視床下部と、情を生み出す大脳辺縁系、高度の判断を生み出す前頭葉に通っていて快さや「やる気」を出させる神経である。このA-10神経が到達する部位の一つに動機づけの中核とされる帯状回がある。帯状回は大脳辺縁系の一番外側にあり大脳皮質との間に大きく広がってある。ここはすべての本能的な価値判断をまとめる部位で、扁桃体が行う刺激に対する満足・不満足といった判断や、視床下部から生まれる、生きる欲求などを受けて、補足運動野へ連絡し随意運動をもたらす行動の意欲を作り出している。「運動すること・走ること」が健康に良いといわれても、意志の力で運動する気をおこさせないと運動することもできないし、走ることもできない。運動野ニューロンというのは指令がきた時しか働かない部位だから手足を動かす時に必ず前頭連合野、補足運動野、

* 筑波大学体育科学系 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1)

Institute of health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1, Ibaraki 305-8574, Japan

運動前野などからの指令が必要である。手足を動かすという強い動機があって毎回手足を動かすという指令を送らない限り運動はできないのである。一度スイッチを入れたらすべて自動的にプログラムが働くように脳はなっていないのである。だからランニングなどの運動では脳が安静時より余分に働き、そのための酸素、ブドウ糖が必要なのである^{20,21,22}。

1. 運動関連脳電位 (Movement-Related Cortical Potential, MRCP) の概論と歴史

随意動作に先行して1~2秒前に頭皮上から記録される漸増的な陰性緩電位変動を運動関連脳電位 (MRCP) という。ヒトで運動関連脳電位を記録するのに成功したのは Kornhuber と Deecke (1965) である¹⁹。彼らは手の随意収縮に伴う筋放電の開始時点でパルスを発生させ、さらのその500msec後にもうひとつのパルスを発生させて脳波を筋電図とともに磁気テープに記録した。そして、その磁気テープを逆方向に再生し、脳波を加算処理した。そうすることによって筋放電の前後の脳波を同時に加算することに成功した。この方法によって彼らは運動開始前1~2秒から陰性緩電位が発現することを見いだした。この電位は他動運動では出現しないことから随意運動の準備状態を反映するものと解釈され、運動準備電位 (Bereitschaftspotential, BP) と呼ばれた。そして運動開始後30~90msec遅れて複雑な波形の陽性電位が出現し、これは他動運動後でも認められることから運動感覚に関する電位と考えた。

Vaughan (1965) らは Kornhuber らとは異なった方法で同様の運動前陰性緩電位を発見した²⁰。すなわち反応時間の計測法を用いて、手の指反応動作に伴う頭皮上電位変化から反応がない場合の電位変化を引き算することによって、運動に伴う電位変化を求め、波形全体を運動電位と呼んだ。しかし、その後 Kornhuber らも Vaughan らも運動前後に4成分を見いだした。Deecke, Kornhuber らは運動開始前に3成分を認め、約1秒前から始まる陰性緩電位を運動準備電位 (Bereitschaftspotential, BP)、約86msec前に始まる陽性電位を pre-motion positivity、約56msec前に始まる陰性波を motor potential と呼んだ⁶ (Fig. 1)。このうち前二者は両側性に分布するが、motor potential のみは反対側中心前野に局限するものであった。Vaughan らは4成分を N_1 、 P_1 、 N_2 、 P_2 と呼び、いずれも運動部位に対応した反対側中心

部に最大であると報告した²⁰。Vaughan らによる N_1 と P_2 は Kornhuber らの Bereitschaftspotential および Reafferente Potentiale にほぼ対応すると考えられるが、 P_1 と N_2 がそれぞれ pre-motion positivity と motor potential に対応するか否かは疑問視されている。 N_2 はむしろ運動開始時点より遅れて出現するという報告もあり見解が一致していない。

Gerbrandt は1977年、運動関連脳電位 (MRCP) に関するこれまでの報告のくい違いを詳細に検討し、少なくとも8成分が識別されることを見いだした¹¹。1980年 Shibasaki らも多チャンネル同時記録を行い、運動開始前後に各4成分の計8成分を同定し、運動関連脳電位 (MRCP) は8成分から構成されていることを確認した²⁰ (Fig. 2)。さらに Barrett らは1985年筋放電開始時点と正確に求め、運動開始前にもう一つ新しい陰性電位を報告した¹⁰ (Fig. 3)。

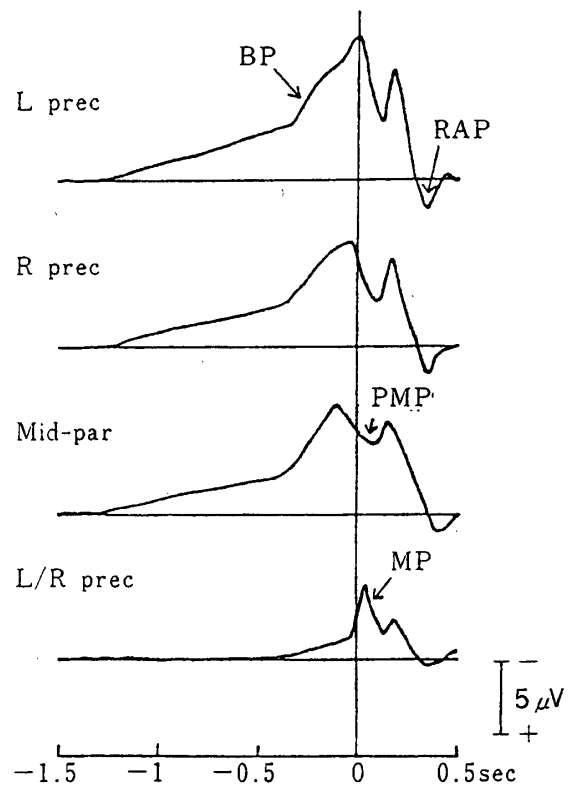


図1. 正常人の右手第二指運動時の運動関連脳電位。
出典: Deecke L and Kornhuber H: Cerebral potentials and the initiation of voluntary movement. In: Desmedt JE, Karger S ed. In progress in clinical Neurophysiology, Vol 1, attention, voluntary contraction and event-related cerebral potentials. Basel, 132-150, 1977. より

2. 運動関連脳電位 (MRCP) の構成成分とその生理学的意義

手の随意運動開始時点の1~1.5秒前から陰性緩電位 (Bereitschaftspotential, BP) が発現する。この電位は中心前部から頭頂部にかけての正中線上で最大振幅を示し、運動側と関係なく左右対称性に出現する。従ってこの電位の発生には補足運動野が大きく関与するものと考えられている。

運動開始前約500msecになるとこの陰性緩電位 (Bereitschaftspotential, BP) は運動と反対側で急速にその勾配を急峻とする。この陰性電位 (Negative potential, NS') は中心前部の運動と反対側の手の運動領域と CZ の中間で最大を示し、頭頂部、さらに

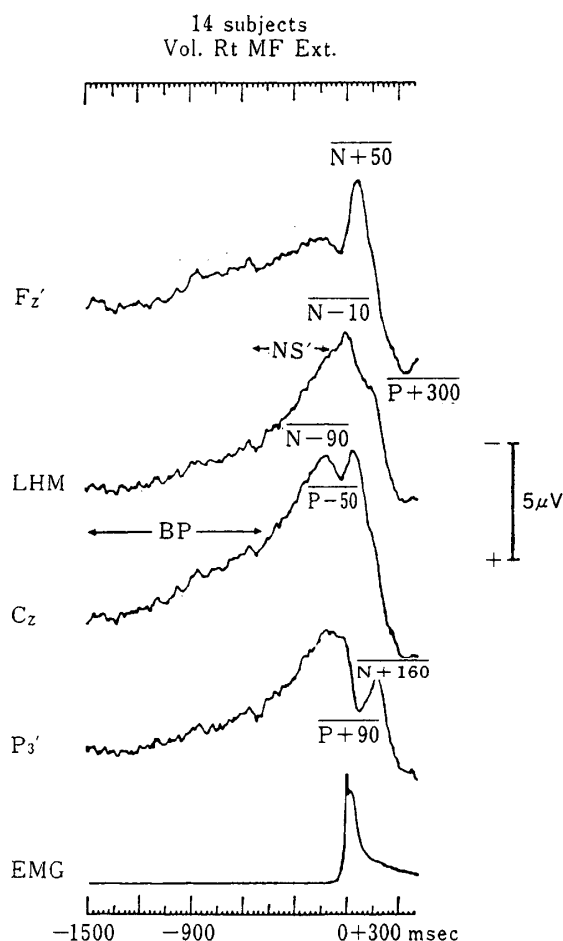


図2. 右手中指伸展運動に伴う運動関連脳電位の各成分の名称。

出典: Shibasaki H, Barrett G, Halliday E and Halliday AM: Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroenceph. Clini. Neurophysiol.* 49: 213-226, 1980.

同側にも波及する。このNS'電位は運動と同側の半球では運動開始の90msec前に陰性頂点を形成する。

足の場合も陰性緩電位 (BP) とNS'電位は同様の出現様式であるが、手の随意運動に伴って認められる pre-motion positivity は認められなかった。頭皮上分布に関しては、陰性緩電位 (BP) は手の場合と同様に中心前・頭頂部正中線上で最大で広汎に分布する。NS'電位は手の運動の場合、対側中心前部に、または足の運動では正中線上に限局するので、運動皮質のその運動に直接対応した部位で生ずると考えられている。これらの陰性緩電位はいずれも他動運動の場合には出現しないので、随意運動の準備段階を反映するものであるとされている。陰性緩電位 (BP) は補足運動野における随意運動に対する準備状態を反映し、NS'電位はその運動に特異的な運動皮質の準備状態を反映しているものと解釈されている。

Barrettらは筋電図開始時点を正確に求めることにより陰性緩電位 (BP) とNS'電位の中間に新しい陰性電位を見だし intermediate slope (IS) と名づけた。IS電位は右利きの場合、右手運動では左中心前部に優位であるのに対し、左手運動では右手運動の場合よりも大きく、正中線で最大で左右対称性に分布する。このことからIS電位は運動前野で発生していると考えられている。

随意運動前約50msecに出現する pre-motion positivity はNS'電位に続いて運動と同側の中心前・頭頂部に見られる電位である。Shibasakiとkatoは両手同時運動では本成分が認められないことからこの陽性電位は非運動側の手の共同運動の抑制を反映する仮説を提示したがいまだ証明されてない。これに対してDeeckeらは、この陽性電位は皮質-小脳-運動皮質ループの作動開始を反映し、本来頭頂部に両側性に出現するが、運動と反対側ではすぐ後に生ずる筋放電前10msecに出現する陰性電位に相殺され識別できないと報告している^{5,6,7}。筋放電前10msecに発現する陰性電位は、対側中心前部の手の領域に限局して出現し、足の場合、筋放電と同時に出現しCzに限局している。これはDeeckeらの motor potential に相当し、運動皮質の錐体路細胞の活動を反映している解釈されている。Evartsは錐体路細胞の発射は筋活動の50~100msec前から変化することをみつけた。ArezzoとVaughanもサルを用いて、随意運動に伴って反対側中心前野の手の領域から、運動に先行して85~110msecに出現する陰性電

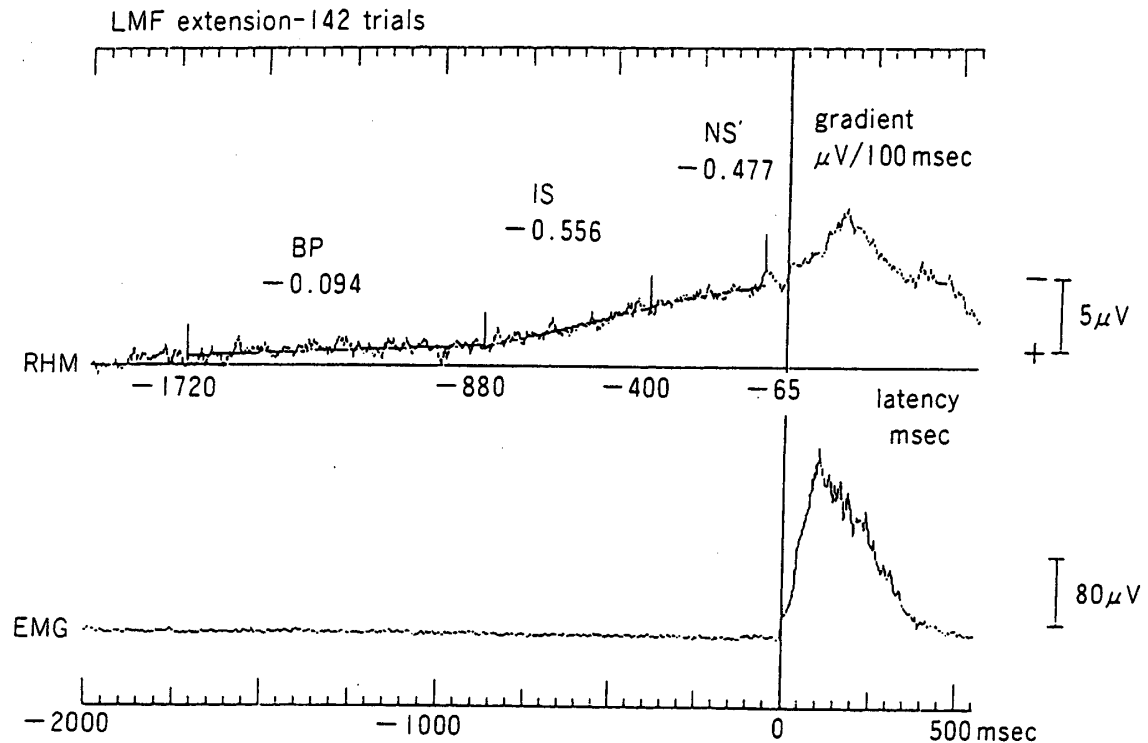


図3. 運動前陰性緩電位の3成分.

出典: Barrett G, Shibasaki H and Neshige R: Cortical potentials preceding voluntary movement: Evidence for three periods of preparation in man. *Electroenceph. Clin. Neurophysiol.* 63: 327-339, 1986.

位を確認した¹⁾. その後、彼らはこの陰性電位はN2aとN2bの2成分から構成されていることを証明した。それゆえ、N2aは運動直前に反対側中心前野の狭い領域に局限して出現することからmotor potentialまたはShibasakiらの筋放電前10msecに出現する陰性電位に相当することが明らかになった。

運動開始後約50msecに出現する陰性電位は反対側前頭部に比較的局限して出現し、運動開始後90msecに出現する陽性電位は反対側頭頂部に局限して出現する。これらの電位の発生メカニズムとしては、筋紡錘からの求心性インパルスによって中心溝の底面(領野3a)に生じた誘発電位が、前方向に陰性、後下方に陽性のdipoleを形成した結果であると解釈され、いずれの電位とも運動感覚を反映したものであると考えられている。さらに運動開始後約160msecに出現する陰性電位は反対側頭頂部に局限して出現し、この電位も運動感覚を反映したものであると考えられている。運動開始後約300msecに出現し、頭皮上の広汎な部位に出現する。この電位は大脳皮質の広汎な部分が関与した求心性機能を反映していると解釈されている。

3. 運動が運動関連脳電位(MRCP)に及ぼす影響

既述したように人間が筋運動するときは目的とする運動をするための意志が必ず働く。その時、前頭連合野で運動を引き起こすために生じた命令は補足運動野、運動前野、運動野に伝えられ、脊髄の運動神経系を経て筋が収縮する。運動中でさえも手足の筋を動かそうとする意志は働いている。言い換えれば手足の運動ニューロンが働かないと手足の筋は絶対に収縮しないのである^{20,21,22)}。特に走ることを例にあげて説明すると、「やる気」の意欲があって、特別な指令ニューロンが働いて運動野ニューロンを駆動しないと走れないということである。脳の中にはA-10神経という特別な神経があり、ここが快い情動と結びついて快感という報酬をもたらす、価値判断を左右する。A-10神経が到達する部位の一つに動機づけの中核とされる帯状回がある。帯状回は大脳辺縁系の一番外側にあり大脳皮質との間に大きく広がってある。ここはすべての本能的な価値判断をまとめる部位で、扁桃体が行う刺激に対する満足・不満足といった判断や、視床下部から生まれる、生きる欲求などを受けて、補足運動野へ連絡し

運動が事象関連電位に及ぼす影響

随意運動をもたらす行動の意欲を作り出している。

運動関連脳電位は運動開始前後に出現し、8つの電位成分から構成されていることが明らかにされている。さらにその電位の主な発生部位も明確になりつつあり、陰性緩電位 (BP) は補足運動野における随意運動に対する準備状態を反映し、NS' 電位はその運動に特異的な運動皮質の準備状態を反映しているものと解釈されている。陰性緩電位 (BP) と NS' 電位の中間に出現する陰性電位、IS 電位は運動前野で発生していると考えられている。

約16年間剣道を継続している群と一般学生群の運動関連脳電位 (BP) を比較し、長期的継続運動が運動関連脳電位 (BP) にいかなる影響をおよぼしているかを調べた (Fig. 4)。その結果、陰性緩電位 (BP) と NS' 電位には16年間剣道を継続している群と一般学生群には差を見いだせなかったが、Deeckeらの motor potential, Shibasakiの筋放電前10msecに相当する陰性電位の振幅が16年間剣道を継続している群において有意に大きいことを認めた (Fig. 5)。さらに、握力発揮による出力量と motor potentialの振幅の間の相関を見てみると、この両者には有意な相関があることがわかる (Fig. 6)。このことは以前にNishihiraらも確認している。この電位がArezzoとVaughanの言うN2a電位に相当するものであるならば、運動と対側の中心前野の狭い領域を反映することから、16年間剣道を継続している群と一般学生群の間には運動を駆動する直接の部位の働きに差があると解釈される。また7年以上専門的に陸上競技のトレーニングを継続してきた群と一般学生群の後期 CNVの比較検討を行った研究によると、反応課題において一般学生群より7年以上専門的に

陸上競技のトレーニングを継続してきた群の方が大きな振幅を示した (Fig. 7)。後期 CNVは運動関連脳電位で言えば、陰性緩電位 (BP) と NS' 電位に相当すると考えられている。陰性緩電位 (BP) は補足運動野における随意運動に対する準備状態を反映し、NS' 電位はその運動に特異的な運動皮質の準備状態を反映しているものと解釈されている。それゆ

自己のペース (self-paced) による握力発揮課題

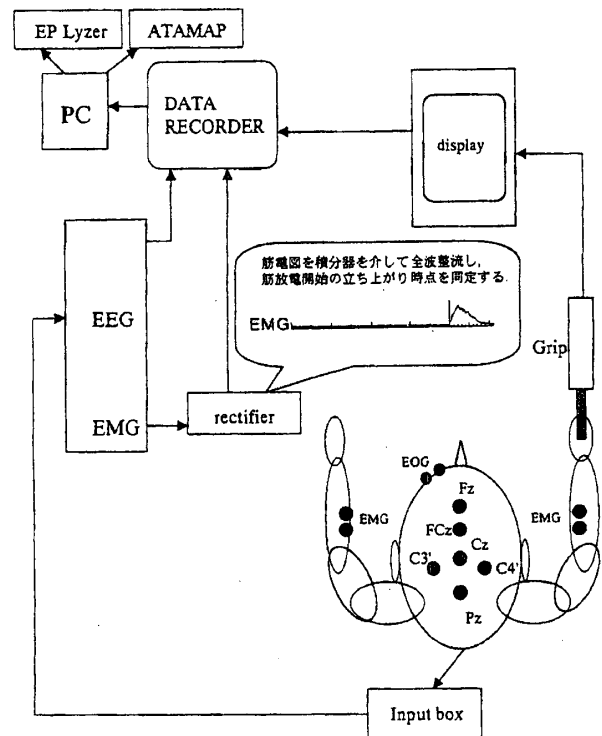


図4. 実験のブロックダイアグラムを示した。

出典：八田有洋：随意運動に伴う中枢内感覚—運動処理系に関する研究。1999年度博士論文 (筑波大学)。

component	GROUP		
	kendo	control	F
BP	-1.25±0.8	-0.98±0.5	1.902
NS'	-1.70±1.2	-1.62±0.9	0.130
MP	-1.03±0.6	-0.75±0.6	4.512 *

図5. 各 MRCP 成分 (BP, NS', MP) の群間の比較。BP, NS' は運動群と一般群では差はえられなかったが、MPにおいて差がえられ、剣道群が有意に大きい値を示した。
*p<0.05

出典：八田有洋：随意運動に伴う中枢内感覚—運動処理系に関する研究。1999年度博士論文 (筑波大学)。

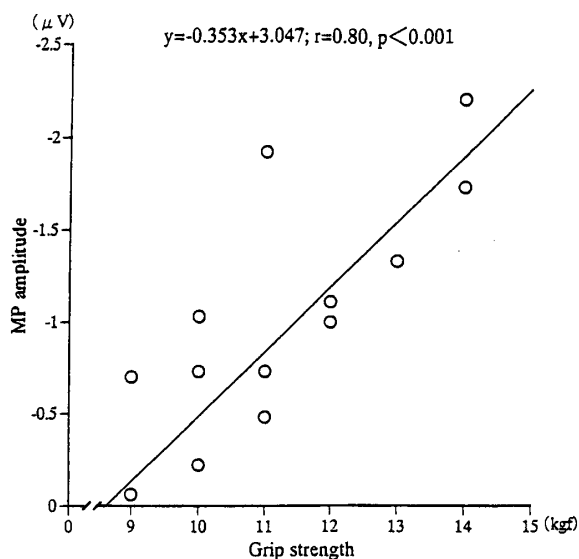


図6. MP振幅と握力発揮量(20% MVC)との相関関係。MP振幅と握力発揮量との間に有意な正の相関関係が認められた。

出典：八田有洋：随意運動に伴う中枢内感覚—運動処理系に関する研究。1999年度博士論文（筑波大学）。

え、7年以上専門的に陸上競技のトレーニングを継続してきた群は、運動遂行前に運動性皮質活動を高め、効率の運動を遂行するために最適な運動準備状態を構築していると考えられる。

さらに随意運動課題を繰り返し行わせ運動関連脳電位の中の陰性緩電位(BP)とNS'電位の変動を調べた研究によると、バリステイック運動課題を繰り返し行わせると運動パラメーターは変動しないが、CNV後期成分は減少する。ターゲットマッチ運動課題では、繰り返し運動課題を行わせるとEMG-RTおよび発揮張力の立ち上がり時間が短縮、発揮張力のばらつきも少なくなり一定の値を示すようになり、後期CNVは増大する(Fig.8)。バリステイック運動課題は急速運動で、フィードフォワードの運動であり、事前に運動プログラミングができている運動である。従ってバリステイック運動課題では、発揮張力は変化せず一定の値を示したと考えられる(Fig.9)。それゆえ、バリステイック運動課題では、既に運動パターンが形成されているために発揮張力は変化せず後期CNVが減少したと解釈され

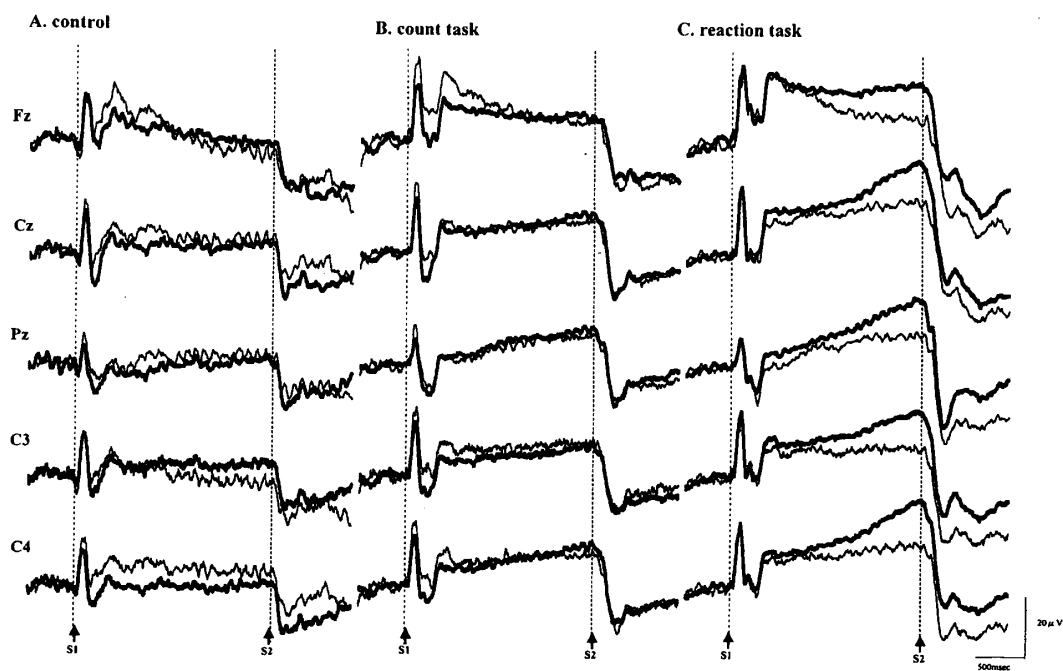


図7. 課題条件(コントロール;A, 計数課題;B, 反応課題;C)ごとに頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出された競技者と非競技者におけるCNVのグランドアベレージ波形。各課題ともに太線は競技者、細線は非競技者を示し、破線はそれぞれ予告刺激(S1)と反応刺激(S2)の呈示時点を示している。

出典：秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 中島 剛：反応課題動作の反復に伴うContingent Negative Variation (CNV)の変動。臨床神経生理学, 31 (5): 2003. を改変

運動が事象関連電位に及ぼす影響

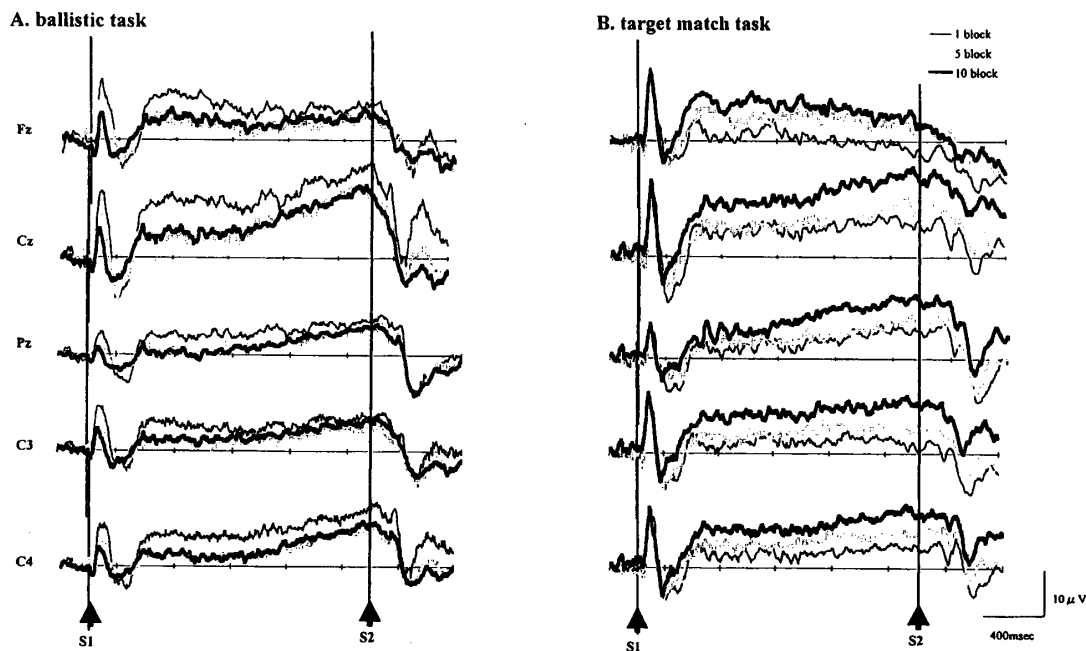


図8. 課題条件 (バリスティック課題;A, ターゲットマッチ課題;B) ごとに頭皮上のFz, Cz, Pz, C3, C4から導出されたCNVの波形. 各課題ともに縦線は予告刺激 (S1) と反応刺激 (S2) の呈示時点を示している. それぞれS1の呈示時点で加算平均した1ブロック目, 5ブロック目および, 10ブロック目の波形を示している. ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴う振幅の増大が認められる.

出典: 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 中島 剛: 反応課題動作の反復に伴う Contingent Negative Variation (CNV) の変動. 臨床神経生理学. 31 (5): 2003. を改変

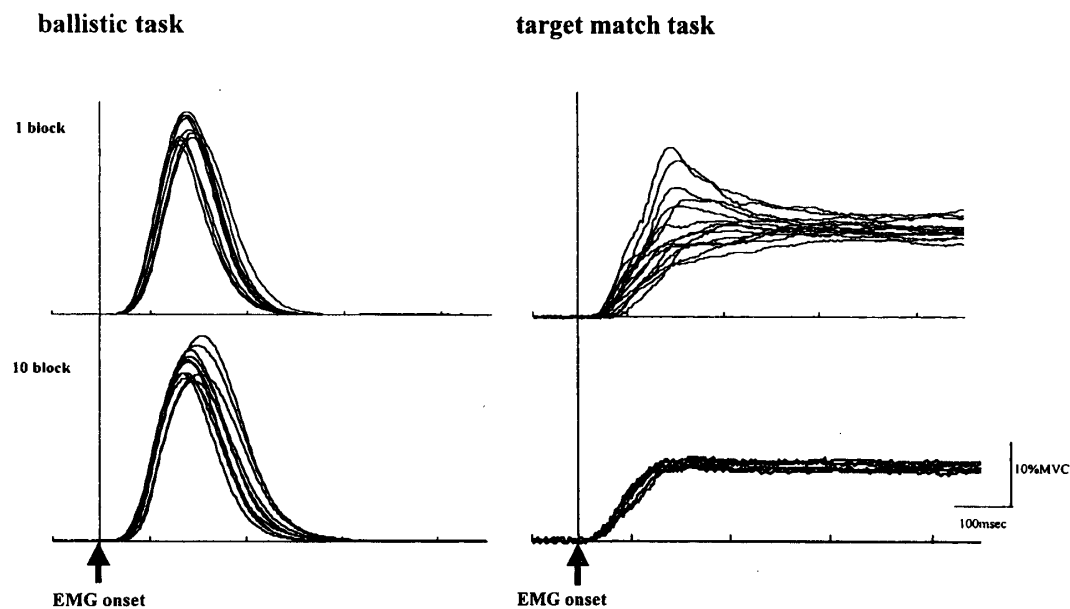


図9. 各課題における力発揮曲線の変化. 各課題ともに一人の被験者において反応に伴う筋電図の立ち上がり時点 (縦線) をオンセットとし, 1ブロック目 (上段) と10ブロック目 (下段) の全試行をプロットしている. 課題の反復に伴い, バリスティック課題では施行ごとの反応動作に変動は認められないが, ターゲットマッチ課題では, 施行ごとのばらつきが減少した.

出典: 秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 金田健史, 中島 剛: 反応課題動作の反復に伴う Contingent Negative Variation (CNV) の変動. 臨床神経生理学. 31 (5): 2003. を改変

る。このような繰り返し課題遂行における反応の減少は、他の事象関連電位においても認められ、P300電位も繰り返し課題遂行においては振幅の減少を示し、潜時や反応時間の延長が生じる。これは集中力や覚醒レベルの低下というよりは、むしろ刺激弁別過程の自動化に伴った影響であると考えられている。

他方、ターゲットマッチ運動課題は、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、運動の習熟過程を短期間に観察できる課題である。その結果、既述したようにEMG-RTおよび発揮張力の立ち上がり時間が短縮し、発揮張力のばらつきも少なく、一定の値を示すようになり、後期CNVは増大した。運動学習の初期には補足運動野や運動前野の活動は増加することが知られている。とりわけ補足運動野は新しい運動プログラムを企画し、確立するのに重要なことが確認されている。既に述べてように運動関連脳電位の中の陰性緩電位(BP)とNS'電位の発生には主に補足運動野や運動前野が関与している。従ってターゲットマッチ運動課題においては、EMG-RTおよび発揮張力の立ち上がり時間が短縮し、発揮張力のばらつきも少なく、一定の値を示すようになり、後期CNVは増大を示したと解釈できる。

Kita et al (2001) の報告によれば¹⁹⁾、全日本のトップレベルの競技者と非競技者の手首の急速な伸

展動作に伴う運動関連脳電位(MRCP)の比較検討を行った結果、運動関連脳電位(MRCP)の中の陰性緩電位(BP)とNS'電位の潜時が全日本のトップレベルの競技者においては短縮するが、運動直前に反対側中心前野の狭い領域に局限して出現するmotor potentialまたはShibasakiらの筋放電前10msecに出現する陰性電位の振幅は増加したということである。これは私の研究室においても確認している。すなわち長期間トレーニングを継続した競技者は、Deeckeらのmotor potential, Shibasakiの筋放電前10msecに相当する陰性電位に変化が生じ、中枢神経系に運動適応が生じていると考えられる。

紙上らは運動強度の違いが脳の覚醒水準に及ぼす影響を及ぼしているか調べている¹⁰⁾(Fig.10)。彼らの報告によれば、心拍数190/分ぐらいの高強度運動においては後期CNVの振幅は低下し、約118/分の心拍数の中程度の運動強度においては後期CNVの振幅は増加することが確認された(Fig.11,12)。心拍数約118/分程度の運動とは軽いジョギング、レクリエーションで円陣を組みバレーボールのパスをしている程度の心拍数であると考えられる。後期CNVは運動関連脳電位(BP)で言えば陰性緩電位(BP)、NS'電位、IS電位、そしてDeeckeらのmotor potential, Shibasakiの筋放電前10msecに相当する陰性電位から構成され、それらの電位は補足運動野、運動前野、局限した運動皮質の活動を反映し

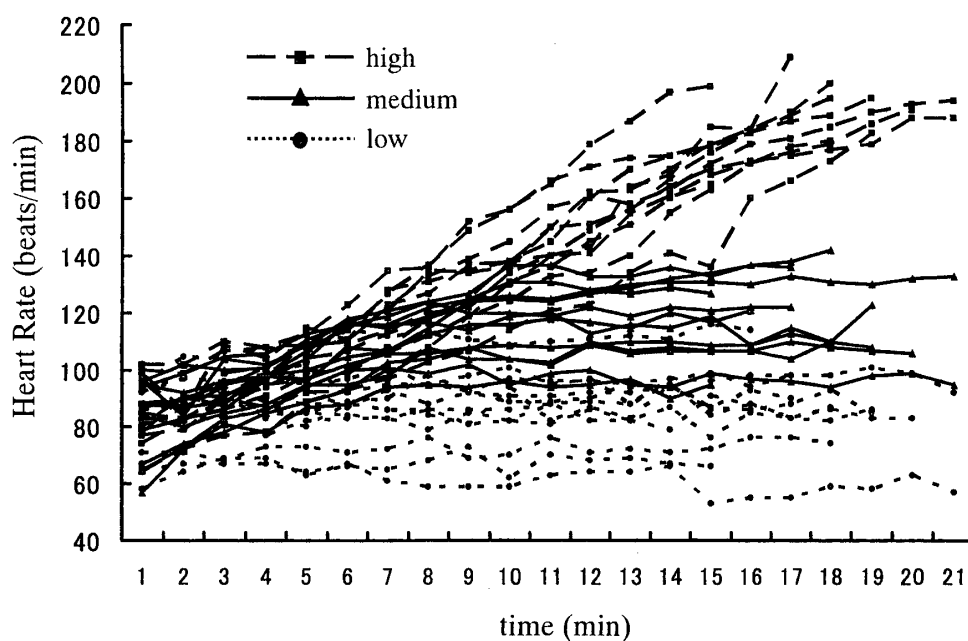


図10. 運動強度の違いによる心拍数の変化。各強度において明らかに心拍数が異なることが視察される。

運動が事象関連電位に及ぼす影響

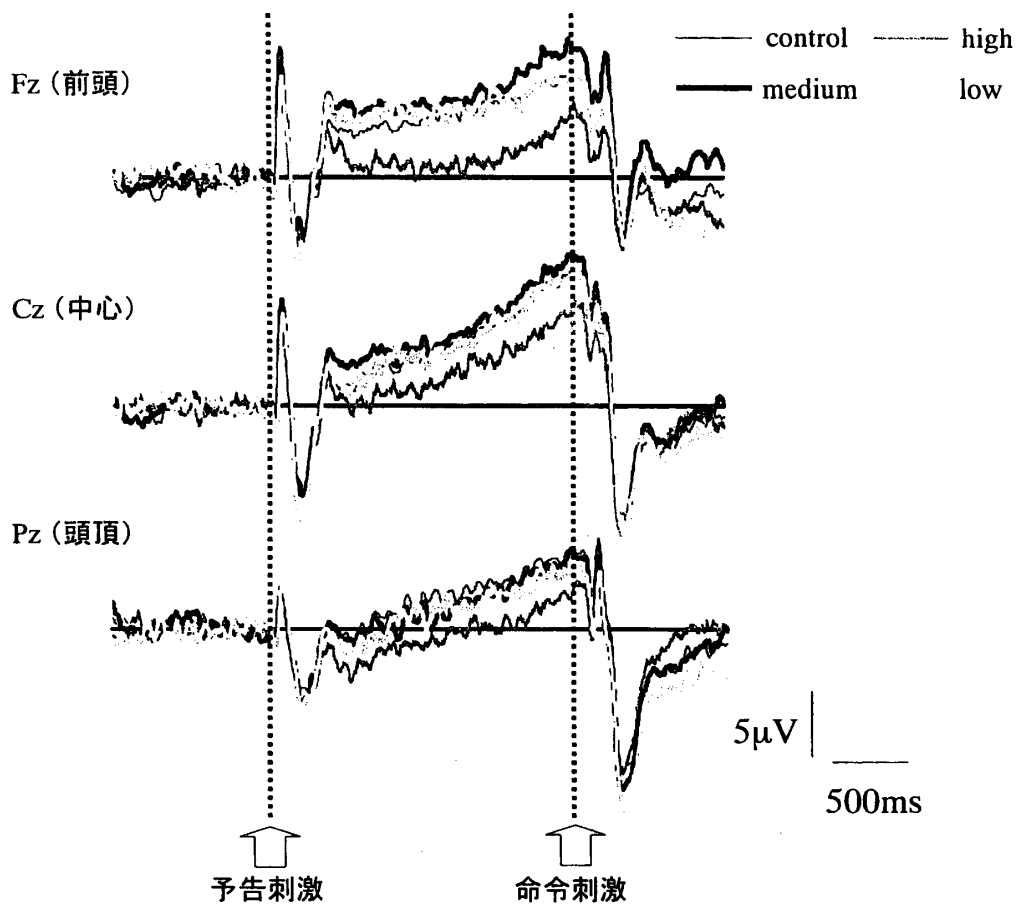


図11. 運動強度の違いによる CNV の変化. 高強度運動後には振幅が低下し, 中強度後には増大している.

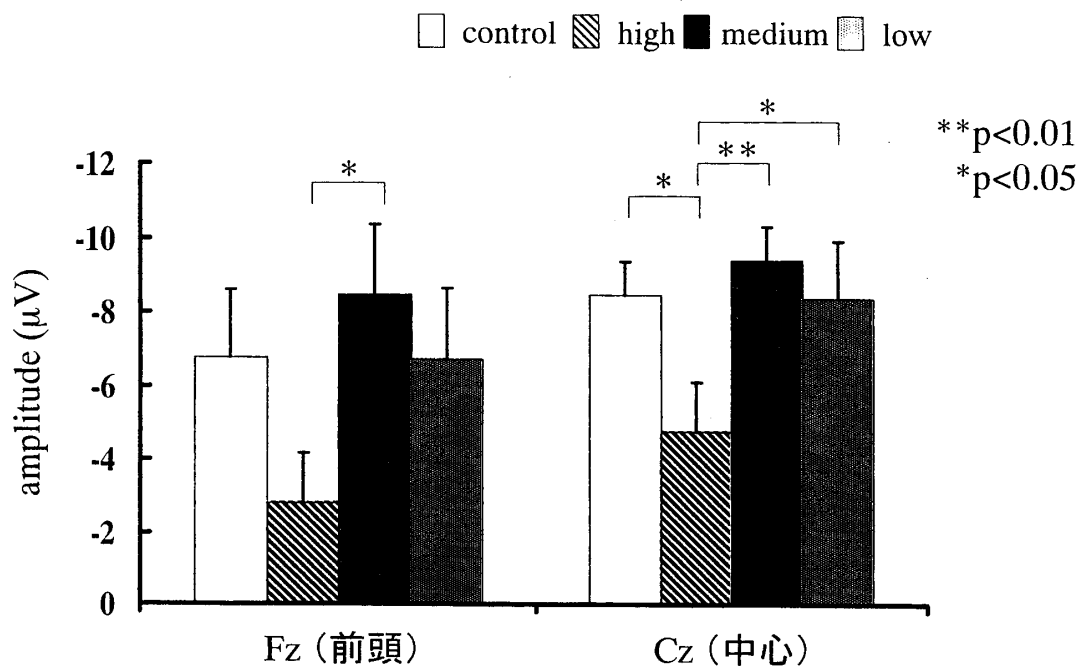


図12. 運動強度の違いによる後期 CNV 振幅の変化. 高強度運動後と中強度運動後の振幅には有意な差が得られた.

ていると考えられていることから、約118/分の心拍数の中程度の運動強度は前頭葉の運動関連領域を効率よく活性化していることが推測される。Johnston et al (2001) は高強度の把持課題を続けると疲労の進行とともに補足運動野、運動肢と対側の運動野の活動が増加することを、運動関連脳電位(MRCP)を用いて確認している¹⁵⁾。

運動野は出力先として感覚野、高次運動野へ向かいながら、大脳基底核や視床にも大量の出力を送り、脳の広範な部分とコミュニケーションを取りながら、どのような運動を行おうかという情報を脳内に配送している。他方脳幹、そこを介して小脳へ出力し、運動の出力情報を送っている。従って運動、特に長期継続的な運動は、これらの脳内の運動中枢に大きな影響を及ぼしているが十分に予想されるが、解明することはこれからである。ただ、今までの研究成果から、運動が運動関連脳電位(MRCP)に影響を与えていることは明らかになったと思われる。今後は運動の種類、質、量、頻度、時間、期間などが脳内の運動中枢にいかなる影響を与えているかを詳細に検討する段階に移るとと思われる。

4. P300の概論と歴史

P300はSuttonら(1965)によって最初に記録された²⁸⁾。彼らは刺激の不確実さと誘発電位との関係を調べていた際、手がかり刺激(第1刺激)を与えた後のテスト刺激(第2刺激)として音か光を呈示し、そのどちらかを予測させる課題を用いて事象関連電位(ERP)記録したところ、テスト刺激がどの刺激かを知らされていない場合にだけ、約300msec潜時の大きな陽性電位が出現することを発見した。Suttonらはその後の実験結果から、P300は情報呈示による不確実さ解決に関連して出現し、刺激の情報内容により変動する内因性電位であると考えた。その後P300に関する多くの研究が行われた。P300の記録に用いられる実験パラダイムには予測課題とオドボール課題(oddball paradigm)がある。オドボール課題とは識別可能な2種類感覚刺激、例えば1000Hzと2000Hzの純刺激(持続時間50~100msec、強度40~60dB SL)をランダム順序で呈示(呈示間隔 inter-stimulus interval, ISIは1.0~2.0secの間でランダム)し、一方の刺激の呈示頻度を他方よりも少なくし、呈示頻度の低いまれな刺激が呈示された時に、それに応じて所定の反応を行わせる課題の

ことである。呈示頻度のまれな刺激を標的刺激(target stimuli)、呈示頻度の高いほうの刺激を標準刺激(非標的刺激, standard stimuli, non-stimuli)と呼ぶ。このようなオドボール課題を負荷して、標的刺激、標準刺激によって誘発される電位をそれぞれ頭皮上から記録すると、いくつかの電位変化が記録できる(Fig.13)。このうちN100, P200電位は狭義の誘発電位、いわゆる外因性電位であり、標的刺激、標準刺激の両方によって誘発される。これに対してN200, P300電位は標的刺激に対してだけ出現する。

5. P300の生理心理学的意義

P300は頭皮上では正中線上の頭頂部で最大の振幅を示すことが明らかにされている。振幅には個人差が大きく、加齢によっても変化する。小児期には振幅は増大し、15歳頃を境に加齢と共に低下する。

P300頂点潜時は250~500msecで、年齢、課題の難易度などによっても異なる。小児期には長く、成長とともに短縮し、以後加齢とともに延長する。

P300は聴覚、視覚、体性感覚などの感覚刺激の種類には関係なく標的刺激に対して出現する。これに対して、同じ種類のパラダイムでも、早期に出現する外因性電位は、感覚の種類によって異なる。P300は被検者が課題遂行中に標的刺激に注意を集中すると出現し、注意をそらせると出現しなくなる。さらに標的刺激の呈示頻度が標準刺激のそれと比べて低

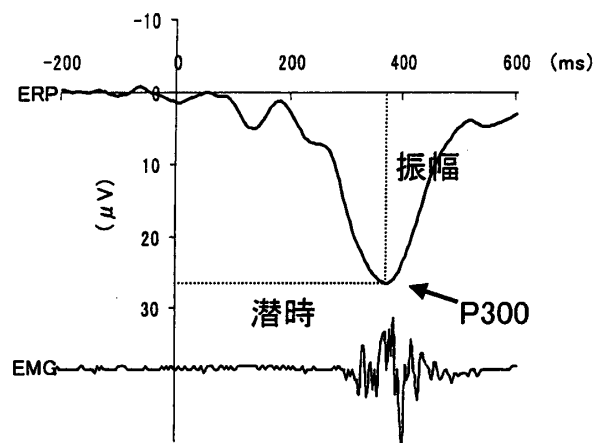


図13. P300の潜時と振幅の同定。P300の同定は刺激呈示後250msから500msの間の最大陽性成分とした。P300振幅は基線から最大陽性頂点(P300)までの電位を測定し、P300潜時は刺激呈示よりP300頂点までの時間とした。

運動が事象関連電位に及ぼす影響

いほど P300 が明瞭に出現する。また標的刺激と標準刺激との提示の仕方が、規則性があればあるほど、また被験者が標的刺激を予測しやすいほど P300 は不明瞭になる。標的刺激を標準刺激の系列の中から識別しにくい場合、P300 潜時は延長する。

P300 が内因性電位であり、心理過程に関連した脳の活動に由来することには異論はない。しかし P300 はどのような脳活動を反映しているかについては必ずしも一致してない。

Donchin (1979) は心理学情報処理モデルの各段階と生理学的事象関連電位 (ERP) のデータとを直接対応づけることに批判的で、P300 は被験者の期待度 (Expectancy) に関連し、刺激評価 (stimulus evaluation) における認知文脈 (context) や図式の更新 (up-dating) 過程を反映すると主張している⁹⁾。例えば、標的刺激、標準刺激という 2 種類の刺激が 1 : 9 の頻度の割合で呈示されるオドボール課題を遂行する場合に、標的刺激を認知し、反応する場合を考えてみると、標的刺激は 10 回に 1 回しか現れないから、被験者が呈示頻度の低い標的刺激を認知した場合、P300 の振幅は大きく、明瞭に出現する。また期待度が低い標的刺激を認知すると、一方ではそれに対応して所定の反応を行うことを決定するという反応選択過程が現れるがそれと同時に、これで課題が終わったので次の課題に備えて再び体制を整えるという認知文脈更新 (context updating) の過程が生じる。P300 は主に後者の過程を反映すると考えられている。

他方、平松らは、事象関連電位 (ERP) 記録に用いられる認知課題を遂行する過程において、刺激処理系 (stimulus processing system) とこれを制御する組織制御系 (organizing system) とを考え、P300 は、主として刺激処理系に対する制御プロセスを反映するものであり、組織制御系を通じた刺激処理システムの再編成を反映すると考えている^{13,14)}。

反応時間と P300 の潜時との関係を検討した結果によれば、P300 潜時は反応時間よりわずかに長い場合と短い場合がある。被験者に正確性を重視した課題と反応速度を重視した課題を遂行させると P300 潜時と反応時間の関係は、正確性を重視した課題の方が、相関が高いことが知られている。これは正確さを重視した条件では刺激の評価を完全に終えてから反応したために、刺激の評価が不完全なままで反応を開始した反応重視速度条件よりも相関が高く

なつたと考えられ、P300 は刺激評価時間を反映していると考えられている。一方 Desmedt (1980) は意志決定から反応開始までの時間を考慮し、P300 の立ち上がり潜時が意志決定に常時先行することは困難であるため、P300 は意志決定後の電位であると考えている⁸⁾。これらのことは 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は直列的ではないことを意味している。

P300 の脳内発生機構については、P300 の頭皮上分布から考えると、大脳皮質頭頂・側頭連合野に由来すると推測されている³⁰⁾。また大脳皮質から直接記録からすると、側頭葉説 (Halgren ら、1980)、海馬と側頭葉連合野の 2 カ所にあるという説、皮質・皮質下連絡系 (例えば前頭葉・中脳網様体系) を重視する説 (Desmedt & Debecker 1979)、動物実験によるとアセチルコリン作動性前脳基底部・海馬投射系を発生源とする説³¹⁾などがあるがいまだ一定の結論には達してない。

6. 運動が P300 に及ぼす影響

既述したとおり、P300 は課題が終了すると、次の課題に備えて再び体制を整えるという認知文脈更新 (context updating) の過程を反映する電位であり、主として刺激処理系に対する制御プロセスを反映するものであると考えられている。さらに P300 の脳内発生機構については、P300 の頭皮上分布から考えると、大脳皮質頭頂・側頭連合野に由来する説 (Vaughan & Ritter 1979)。また大脳皮質直接記録からすると、側頭葉説¹²⁾、海馬と側頭葉連合野の 2 カ所にあるという説、皮質・皮質下連絡系 (例えば前頭葉・中脳網様体系) を重視する説 (Desmedt & Debecker 1979)、動物実験によるとアセチルコリン作動性前脳基底部・海馬投射系を発生源とする説³¹⁾などがある。

被験者に左手第 II 指と左手第 V 指にそれぞれ 2 : 8 の割合でランダムに刺激を与え、左手第 II 指を標的刺激して随意動作課題を行わせ、その時の P300 を測定した実験によると (Fig. 14)、P300 潜時は標的課題 (ターゲット)、すなわち課題を課したほうが延長することが知られた。P300 潜時は刺激評価過程を反映すると考えられていることから、課題の難易度によって P300 潜時が変動することがわかった。脳の活動状態、資源分配量を反映していると考えられている P300 振幅は、今回課した課題の相違に

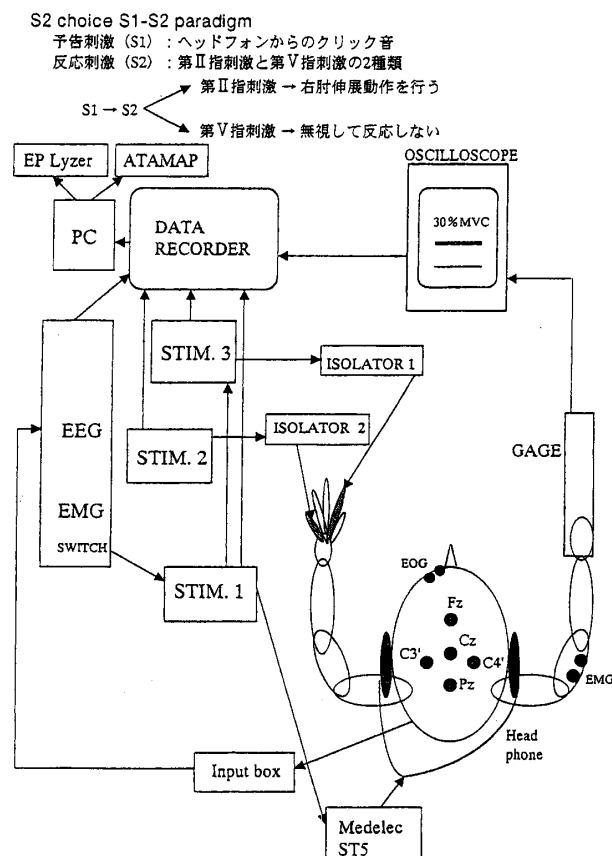


図14. 実験のブロックダイアグラムを示した。

出典：八田有洋, 西平賀昭, 麓 正樹, 宮 達夫, 下田政博：課題遂行のための戦略の違いが事象関連電位に及ぼす影響。脳波と筋電図。27 (6) : 510-517, 1999. を改変

よっては変動が確認されてない。次に課題の種類を変え、スポーツ場面で時折考慮される正確性重視とスピード性重視の比較を見てみると、P300振幅は正確性重視よりスピード性重視のほうが高い値を示した (Fig. 15)。すなわち正確性重視よりスピード性重視のほうが刺激評価処理系は効率的に機能していることが知られた。

ただ P300潜時は課題間では差が見られなかった。しかし、EMG-RT (筋電図反応時間) 課題では、スピード性重視のほうが正確性重視より短縮している。これらの結果は、P300は刺激処理系に依存し、反応処理系とは直列的には関係ないという考えを裏づけるものである。

運動関連脳電位 (MRCP) を指標に観察した結果では長期的な運動は、脳の運動関連領域に明確な変化を与えていることが確認された。では脳内の刺激処理系を反映していると考えられている P300につ

いてはどうであろうか。Polich (1986) は視覚刺激と聴覚刺激を用いて、競技者の P300を調べると P300振幅は非競技者より競技者のほうが大きな値を示したと報告した²⁹⁾。私の研究室で調べた結果によると、7年以上長距離と短距離競技を継続している者と一般学生の聴覚刺激による P300を比較検討してみると、一般学生に比べて競技者の P300潜時は有意に短縮を示した。さらに P300振幅を比較すると、競技者の方が大きな値を示した (Fig. 16)。

また6年以上継続的にバスケットボール競技を行っている競技者と一般学生を比較してみると、EMG-RT (筋電図反応時間) においては、単純反応時間は差が認められなかったが、選択反応時間になると競技者の方が有意に短縮した (Fig. 17)。その時の P300を比較すると、競技者において P300潜時は短縮し、P300振幅は大きな値を示した (Fig. 18)。次に長期野球経験者 (8年以上の継続的野球経験) と未検経験者に次のような予測課題を与えた時の P300を調べた。予告刺激 (S1) と反応刺激 (S2) の2種類を含む S1-S2課題においては、被検者は聴覚刺激を用いて与えられた S1後に赤・緑のどちらかのランプが点灯するかをあらかじめ予測する。すなわち S1刺激後5秒後に呈示される S2刺激を手がかりに、眼前に用意された赤・緑のどちらかのランプが点灯するかを予測する。赤・緑の呈示確率は1:1に設定し、反応はできるだけ速く反応するよう指示した (Fig. 19)。また間違えたときはその旨報告するように指示した。その結果、P300潜時は野球経験者の方が有意に短縮した。また反応時間は P300潜時に先行していた。この反応課題は単純なために刺激処理系と並行して反応処理系が機能したためであると解釈される。P300の振幅については、野球経験者の方の P300が大きな値を示した (Fig. 20)。これらのことから長期的な運動は、運動性皮質ばかりではなく、刺激を認知し、処理する過程にも大きな影響を及ぼしていることがわかる。

今までのデータは既に長期運動経験を経た者を対象に調べた結果であるが、実際に現在、ある運動プログラムを獲得するために運動を遂行している場合はどうであろうか。今度は運動刺激を与え続けた場合に、P300はどう変化するか調べた結果を紹介する。健常成人10名に次のような2つの課題を遂行させた (Fig. 21)。①パリスティック課題：ヘッドホンから呈示される予告刺激の後に反応刺激を与え、左

運動が事象関連電位に及ぼす影響

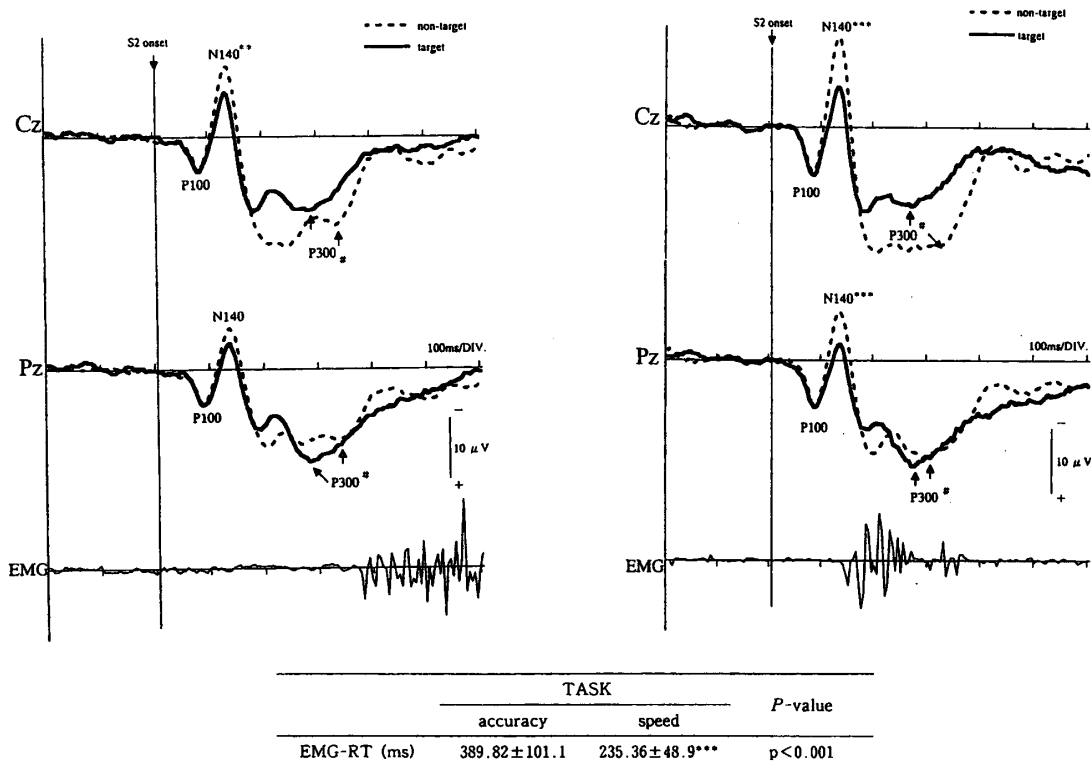


図15. accuracy task (左図) と speed task (右図) における事象関連電位の総加算平均波形ならびに EMG-RT の結果。accuracy task では、P300 潜時が EMG-RT よりも遅いが、speed task では速いことが視察される。EMG-RT には task 間で有意差がみられた。
 出典：八田有洋, 西平賀昭, 麓 正樹, 宮 達夫, 下田政博：課題遂行のための戦略の違いが事象関連電位に及ぼす影響。脳波と筋電図。27 (6): 510-517, 1999. を改変

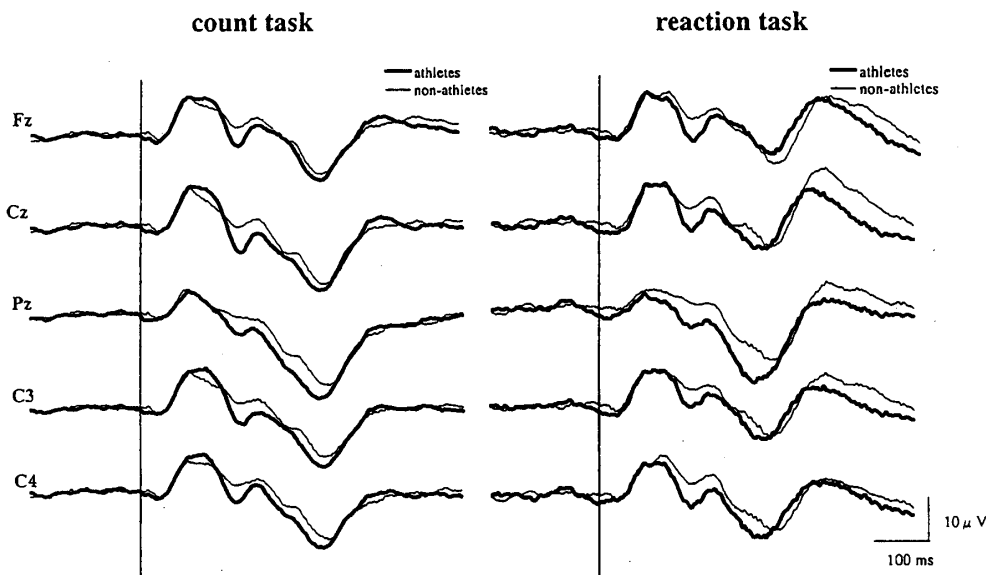


図16. 標的刺激において頭皮上の Fz, Cz, Pz, C3, C4 から導出された競技者と非競技者の ERP グラウンドアベレージ波形。各課題ともに太線は競技者、細線は非競技者を示し、縦線は刺激の呈示時点を示している。
 出典：秋山幸代, 西平賀昭, 八田有洋, 麓 正樹, 金田健史, 時任真一郎, 下田政博：長期的な運動経験が事象関連電位に及ぼす影響。体力科学。49巻2号:267-276, 2000. を改変

手関節の素早い屈曲動作を行わせた。②ターゲットマッチ課題：被検者はS2提示後、オシロスコープ画面上に設定された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屈曲動作を行わせた。両課題ともにS1の音刺激呈示は、2000Hz、持続時間50msec、強度65dBとした。S2の

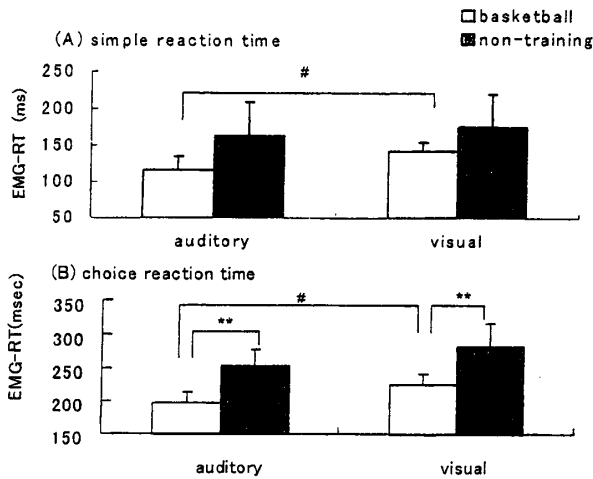


図17. 聴覚刺激および視覚刺激における単純反応課題 (A) と選択反応課題 (B) の EMG-RT の結果。それぞれバスケット選手、非競技者の EMG-RT と標準偏差を示している。

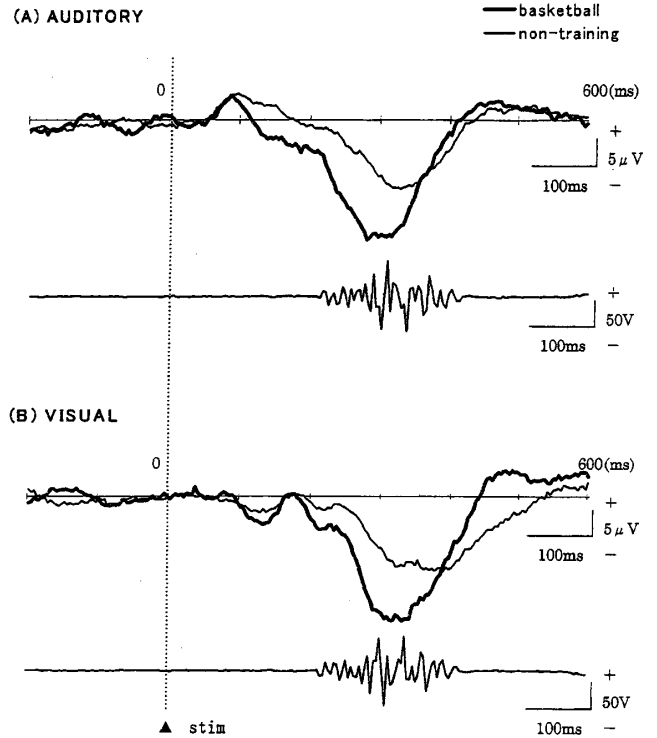


図18. 聴覚課題および視覚刺激において頭皮上の Fz, Cz, Pz, C3, C4 から導出された ERP グラウンドアベレージ波形 (バスケット選手と非競技者)。縦線は刺激の呈示時点を示す。最下段は反応動作に伴う筋電図の一例。刺激呈示時点からの潜時と極性から、それぞれ N100 と P300 成分を同定した。

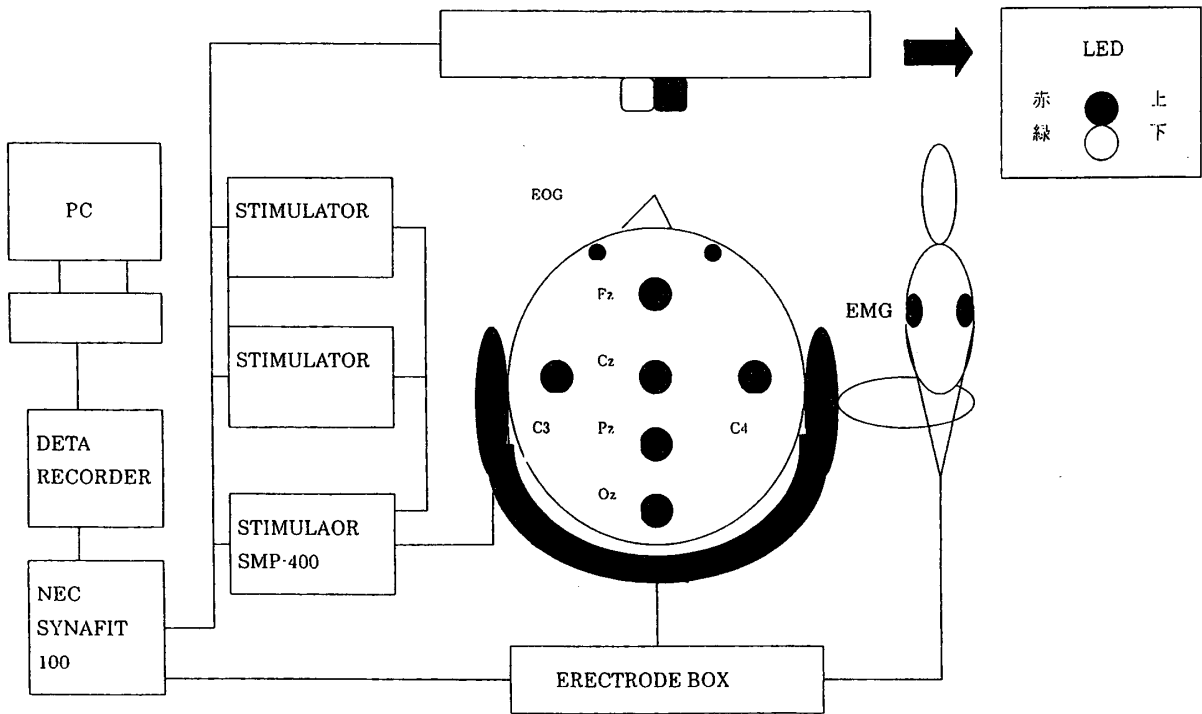


図19. 実験のブロックダイアグラムを示した。

運動が事象関連電位に及ぼす影響

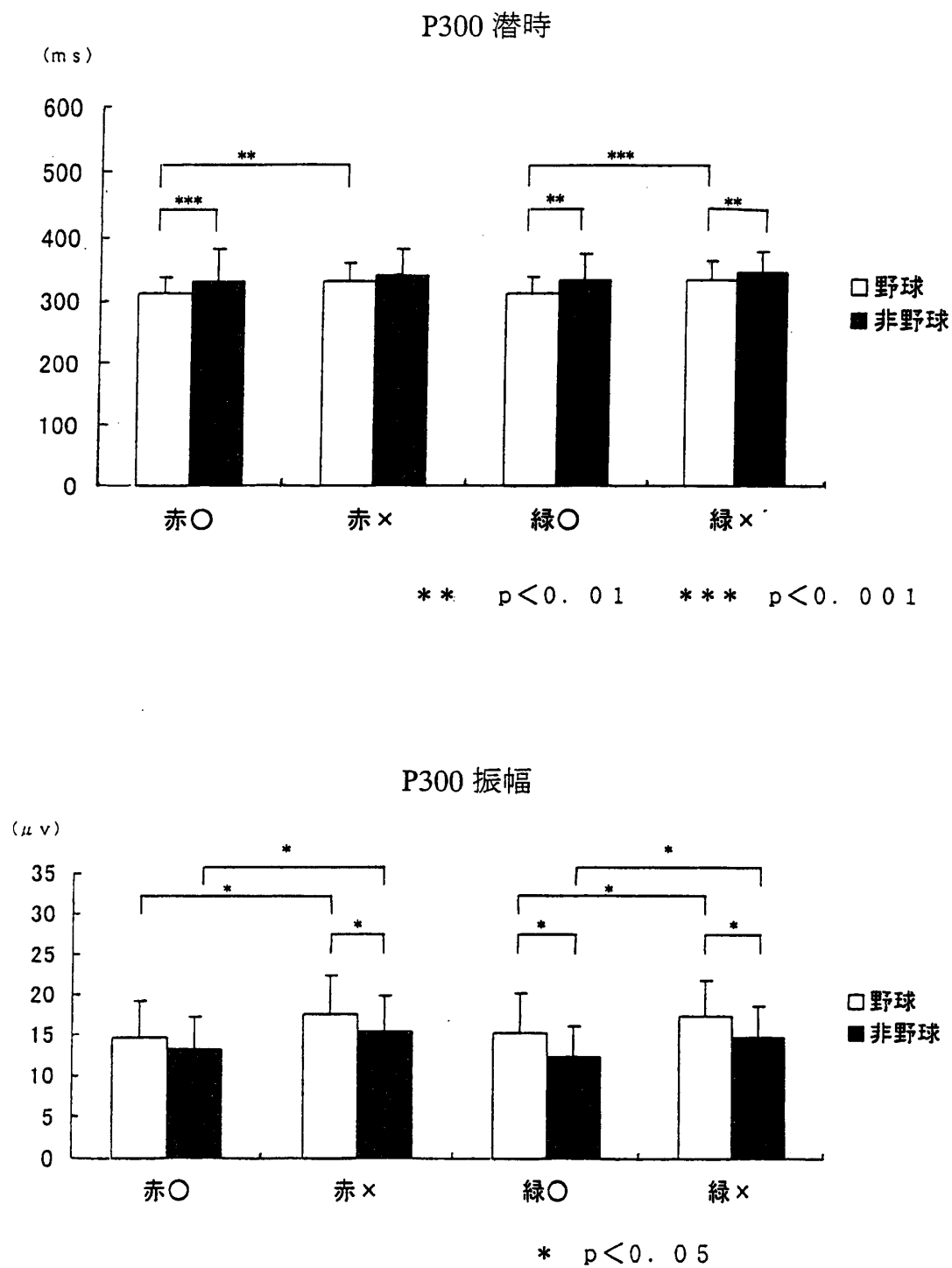


図20. 予測の「あたり」, 「はずれ」から得られた P300の潜時 (上) および振幅 (下). (上図) 野球群において予測が「あたり」の際の P300潜時が「はずれ」に対して有意に短縮した. また, 野球群の P300潜時は非野球群よりも短縮する傾向がみられ, 三条件では有意に短縮した.

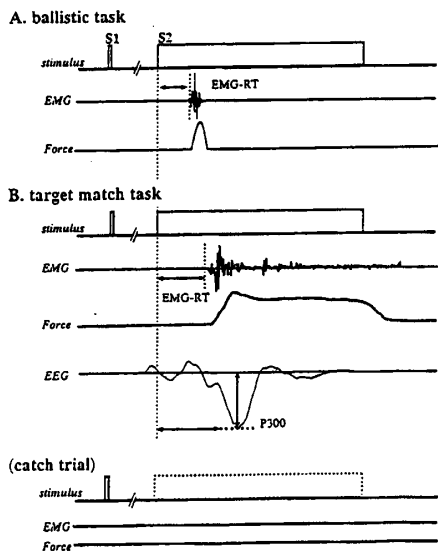
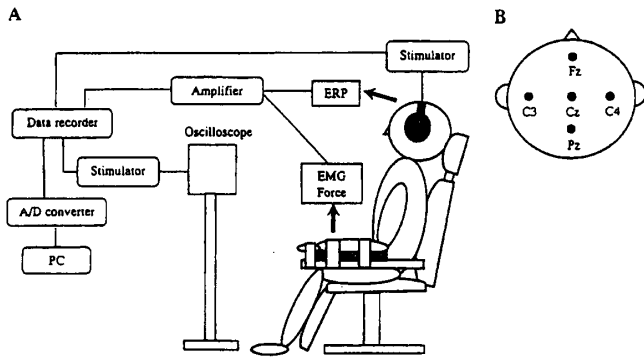


図21. 実験のブロックダイアグラム（上図）および実験課題の模式図（下図）を示した。A, 予告刺激（S1）の2秒後、反応刺激（S2）としてターゲットラインが呈示されたら素早く反応する（バリスティック課題）。B：S2として最大随意収縮の10%の張力に相当するターゲットラインが呈示され、素早くかつ性格にライン上に合わせるように反応する（ターゲットマッチ課題）。またS1後にS2が呈示されないキャッチ試行を各課題ともに全試行の10%の確率でランダムに挿入した。それぞれ課題毎に上段から呈示刺激系列、EMG、力発揮曲線を示している。A, BにおいてはS2呈示後、誘発されたERPからP300を同定し、振幅と潜時を計測した。
出典：秋山幸代：運動が感覚—運動処理過程に及ぼす影響。2002年度博士論文（筑波大学）。

持続時間は1 secであった。試行間隔は10secで30試行を1ブロックとし、10ブロック行われた。その結果、バリスティック課題では運動反復に伴うパ

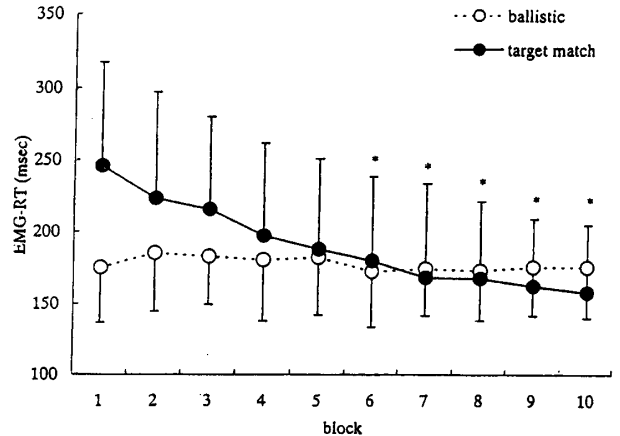
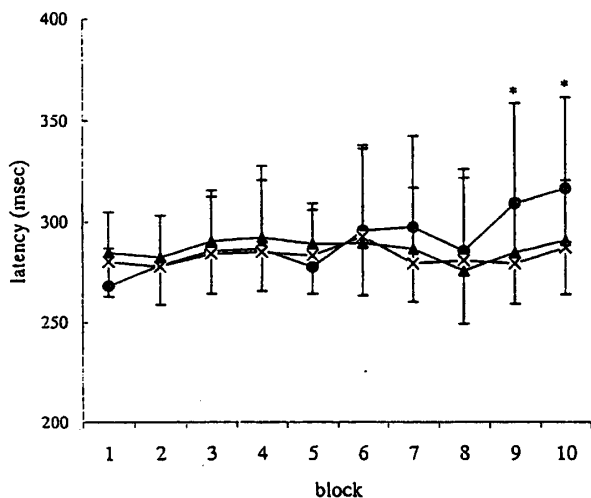


図22. バリスティック課題（黒、実線）および、ターゲットマッチ課題（白、破線）におけるEMG-RTの変動。それぞれのシンボルは各課題、ブロックごとの平均値と標準偏差を示している。バリスティック課題においてのみ課題の反復に伴いEMG-RTが短縮した。* $p < 0.05$, 1 block vs each other block for target match task
出典：秋山幸代：運動が感覚—運動処理過程に及ぼす影響。2002年度博士論文（筑波大学）。

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（Fig. 22）。また、バリスティック課題では運動の反復に伴うP300に変動は見られなかったが、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（Fig. 23, 24）。今までの研究によれば、P300は課題の難易度が高・低いに依存して変動することが知られている。また長期運動経験者のP300は潜時が短縮し、振幅が高い値を示した。これらは長期運動刺激が刺激弁別過程に参与する神経回路網の効率を高め、十分なエネルギーを配分できる状態を脳内に作り上げている結果であると推測できる。しかし、この原則もすべての運動課題に当てはまるのではなく、運動課題によっては、例えば動けばよいという課題、反応速度を問題にしたい場合の課題、正確性を重視した課題によってP300の出現様式が変動すると思われる。本研究によれば、課題の繰り返し効果は、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の相違は、命令刺激の提示後に行う反応動作後の違いであり、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が速さの他に、正確性が要求される巧緻性のある課題であるということ

運動が事象関連電位に及ぼす影響

A. ballistic task



B. target match task

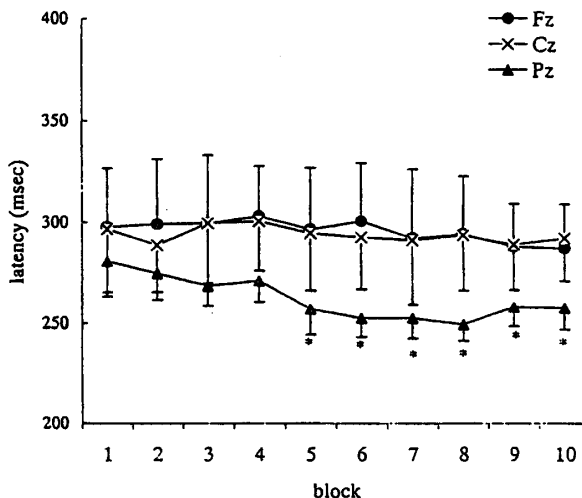
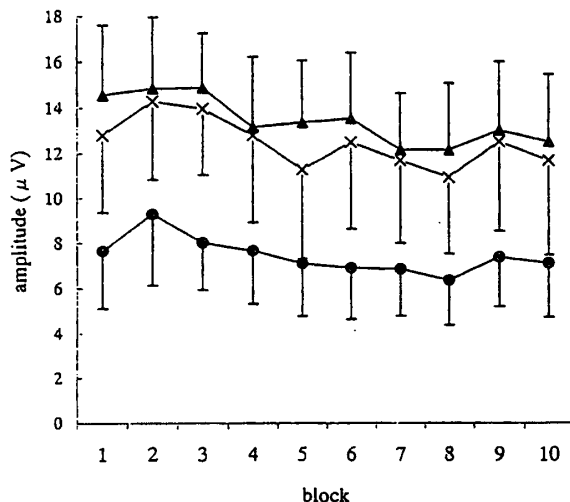


図23. バリスティック課題 (A) および、ターゲットマッチ課題 (B) における P300潜時の変動。各課題ともにそれぞれのシンボルは、頭皮上の Fz, Cz, Pz, から導出されたブロックごとの平均値と標準偏差を示している。ターゲットマッチ課題では、課題の反復に伴い潜時が短縮した。* $p < 0.05$, 1 block vs each other block for target match task

出典：秋山幸代：運動が感覚—運動処理過程に及ぼす影響。2002年度博士論文（筑波大学）。

A. ballistic task



B. target match task

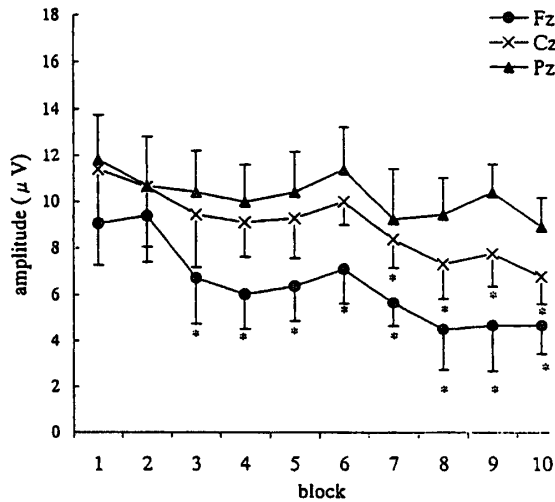


図24. バリスティック課題 (A) および、ターゲットマッチ課題 (B) における P300振幅の変動。各課題ともにそれぞれのシンボルは、頭皮上の Fz, Cz, Pz, から導出されたブロックごとの平均値と標準偏差を示している。ターゲットマッチ課題では課題の反復に伴い振幅が減少した。* $p < 0.05$, 1 block vs each other block for target match task

出典：秋山幸代：運動が感覚—運動処理過程に及ぼす影響。2002年度博士論文（筑波大学）。

ある。ターゲットマッチ課題では、課題の反復によるEMG-RT（筋電図反応時間）の短縮とともに、P300潜時も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るということは、本研究で用いている視覚刺激と視覚の情報処理の中樞経路が関係していると思われる。つまりP300潜時が頭頂部で有意に短縮したということは、視覚刺激による脳内の処理効率が運動の獲得とともによくなり、短縮したことが考えられる。EMG-RT（筋電図反応時間）とP300潜時の短縮を比較してみると、時間的にはP300潜時の短縮が若干早く、遅れてEMG-RT（筋電図反応時間）の短縮が生じている。すなわちターゲットマッチ課題のような学習を要する課題では、まず刺激処理過程に変化が起こり、その後運動実行過程に変化が起こったと解釈される。Staines (2002) は、視覚刺激に対する運動追跡課題においては、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-前頭葉に活動部位が変化するためと考えている²⁹⁾。Sakai (1998) は指の運動学習に関与する皮質活動の変化をfMRIを用いて検討した結果、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報告している²⁹⁾。

前頭葉の個々の回路が新しく課題に取りかかるとその課題に関連する周辺のニューロンは現在の活動を停止し、新しい課題解決に参加し、おびたたく

流入してくる感覚情報を処理し、学習領域を拡大していく。課題を反復していったん習得してしまえば発火パターンはゆるぎないものとなり、行動も自動化してもはや意識的に注意が向けられることはない。そしてその情報は脳の奥にある皮質領域（大脳基底核、小脳など）に送られ、将来の呼び出しに備えて貯蔵される。一方、その課題に関連する周辺のニューロンも次の新たな学習に向けて待機する。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刺激処理過程も変化する。

紙上らは(2003)運動の種類、時間を一定にし、運動強度のみを操作することによって、運動強度の違いがP300に及ぼす影響を調べた¹⁰⁾。自転車エルゴメーター駆動の運動時間は、平均18分であった。高強度運動の場合は心拍数約190拍/分、中強度運動では約118拍/分、低強度運動では約84拍/分であった。また血中乳酸値は高強度運動では運動前約1.92mmol/l、運動後約12.192mmol/l、中強度運動では運動前約1.76mmol/l、運動後約3.77mmol/l、低強度運動では運動前約1.85mmol/l、運動後約1.8mmol/lであり(Fig.25)、これらの状況での運動前後のP300の変化を測定した。その結果、高強度運動後のP300振幅は、他の運動強度と比較して、著明に減少した。また中強度運動後の振幅は他の運動強度と比較して大きな値を示した(Fig.26)。ただP300潜時にはどの運動強度においても有意な差は認められなかった。

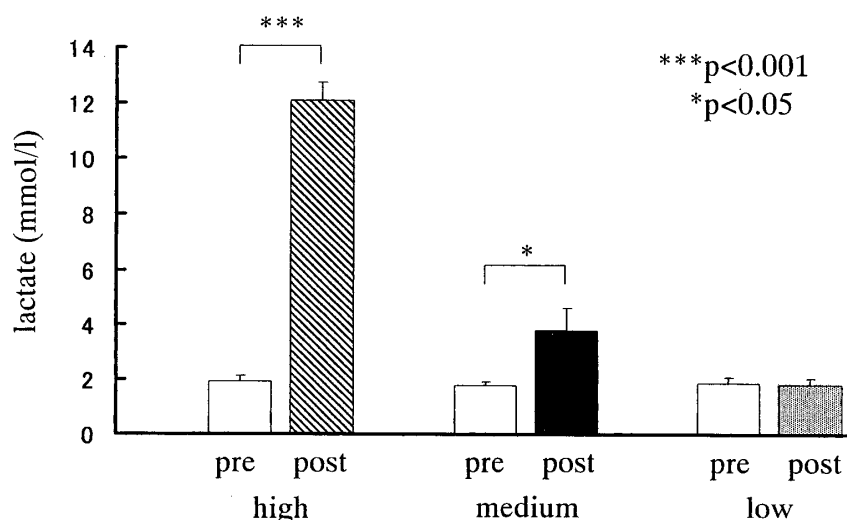


図25. それぞれの運動課題前後での血中乳酸値の変化。中強度、高強度において運動前後で有意差がみられた。

運動が事象関連電位に及ぼす影響

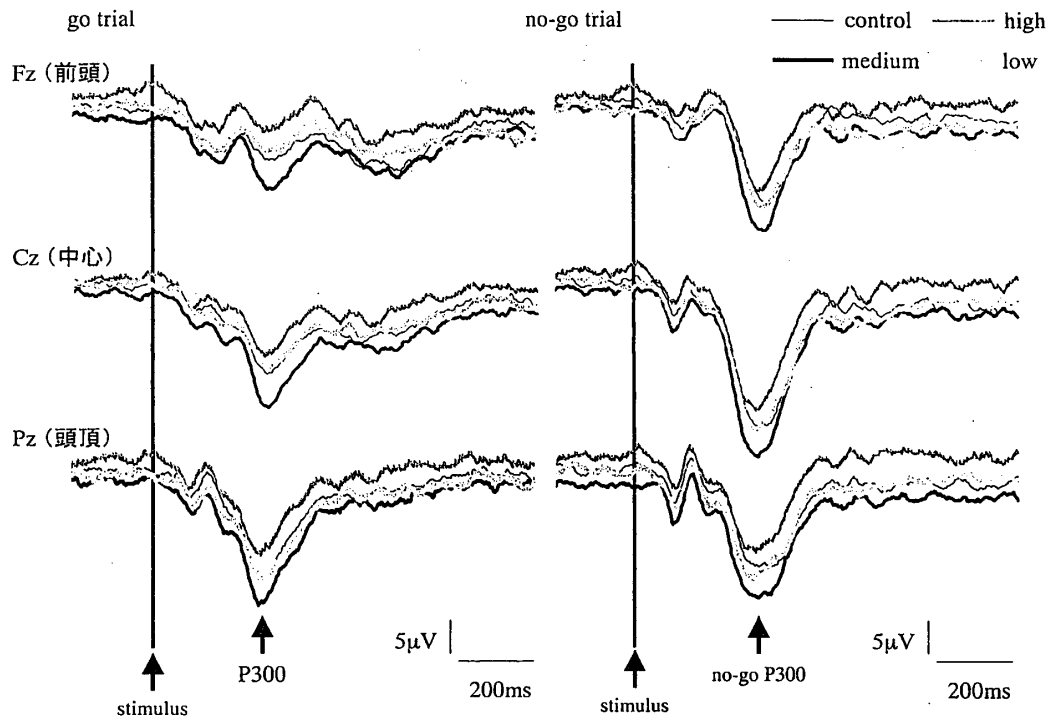


図26. コントロールと運動後 (high, medium, low) における標的刺激と非標的刺激へのグランドアベレージ波形。

P300の振幅は呈示された刺激に対する評価・判断の確実性に依存して変化する。刺激出現頻度が高くなったり、刺激間隔が大きくなったり、反応する刺激を判断することが難しくなる状況ではP300振幅は低下する。よって高強度運動後では脳内の刺激処理過程の困難度が増加し、刺激処理効率が低下したと考えられる。またP300は刺激に対する注意力にも影響され、刺激の持つ主観的情報量が小さいほどP300振幅は低下することが知られている。さらに夜間業務や断眠を課した場合も、P300振幅は低下する。Kasedaらも疲労状態におけるP300変化を引き起こす要因の一つには注意力の低下を指摘している¹⁷⁾。一方、中強度運動後のP300振幅は増加した。P300は刺激が被検者にとって意味を持つ時や注意・集中度が高い時に大きくなることが確認されている。中強度運動後のP300振幅が増加するという事は、脳内の認知処理過程が促進状態にあることが推察される。

黒岩ら²⁰⁾はBigland-Ritchie (1986)ら²¹⁾や矢部(1990)²²⁾が提唱した仮説、局所運動は末梢性の疲労だけではなく、脳の疲労にも影響を与えるということを実証するために高強度運動負荷後のP300の変動を検討した。ここでの高強度運動負荷とは、40%

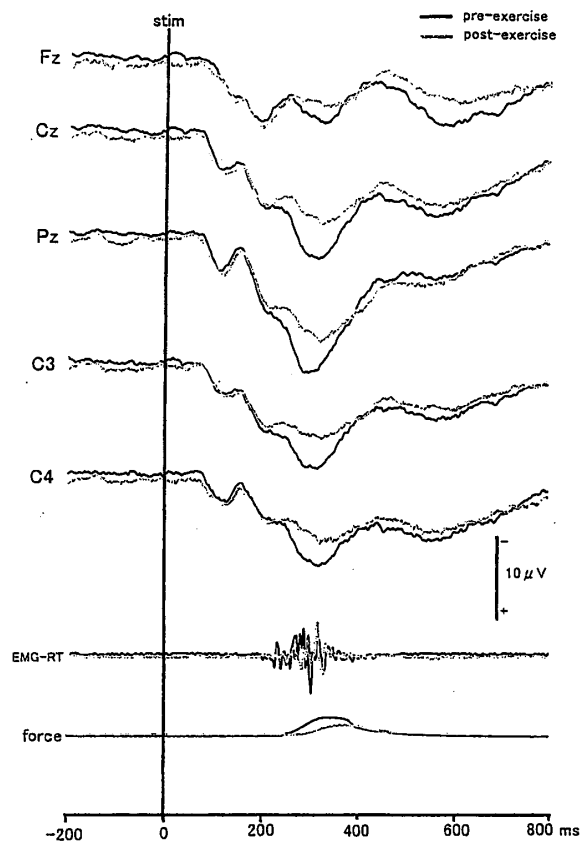


図27. 高強度運動前後におけるERP波形 (S1-S2課題)。

MVC 把持運動を2度続けて遂行することが不可能な状態まで、運動負荷を与えることである。その結果、P300の振幅は低下し、P300潜時は延長した(Fig. 27)。これらの結果は、高強度運動負荷は脳内の刺激弁別処理過程の効率を低下させると考えられる。

以上のことから運動(種類, 質, 量, 頻度, 時間, 期間)は、脳内の刺激認知, パターン認知, 意味判断, 記憶照合などの刺激弁別過程に大きな影響を及ぼしていることが推察される

文献

- 1) Arezzo J, Vaughan HG Jr and Koss B: Relationship of neuronal activity to gross Movement-related potentials in monkey pre- and postcentral cortex. *Brain Res.* 132: 362-369, 1977.
- 2) Bigland-Ritchie B, Furbush F and Woods JJ: Fatigue of intermittent submaximal voluntary contractions: central and peripheral factors. *J Appl Physiol.* 61: 421-429, 1986.
- 3) Buchwald F, Tabachnik AL, Ermolin GA, Zhidkova NI and Kotelianskii VE: Comparative study of the binding of human blood plasma fibronectin with clinical strains of staphylococci. *Zh Mikrobiol Epidemiol Immunobiol.* Dec; (12): 28-33, 1987.
- 4) Courchesne E: Chronology of postnatal human brain development: event-related potential, positron emission tomography, myelinogenesis and synaptogenesis studies In: Rohrbaugh JW, Parasuraman R, Johnson R Jr. eds. *Event-related brain potentials: basic issues and applications.* Oxford university press, New York, pp210-241, 1990.
- 5) Deecke L, Scheid P and Kornhuber H: Distribution of readiness potential, Premotion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements. *Exp. Brain Res.* 7: 158-168, 1969.
- 6) Deecke L and Kornhuber H: Cerebral potentials and the initiation of voluntary movement. In: Desmedt JE, Karger S ed. *In progress in clinical Neurophysiology, Vol 1, attention, voluntary contraction and event-related cerebral potentials.* Basel, 132, 1977.
- 7) Deecke L, Niesser A and Ziller B: Modality (visual and tactile) and stimulus predictability influence contingent negative variation and reaction time. In Kornhuber and Deecke, pp301-308, 1980.
- 8) Desmedt JE: P300 in serial tasks: an essential post-decision closure mechanism. *Prog. Brain Res.* 54: 682-686, 1980.
- 9) Donchin, E: Event-related brain potential: A tool in the study of human information processing, In Begleiter, H: *Evoked Potentials and Behavior, Vol.2,* pp13-88, Plenum Press, New York, 1979.
- 10) Gaillard AWK, Perdok J and Vary CA: Motor preparation at a cortical and at a peripheral level. *Prog. Brain Res.* 54: 214-218, 1980.
- 11) Gerbrandt LK, Eckardt MJ, Davis JL and Cherkin A: Retrograde enhancement of memory with fluor-thyl: lectrophysiological effects in chicks. *Physiol Behav.* Dec: 19 (6): 729-34. 1977.
- 12) Halgren E, Squires NK, Wilson CL, Rohrbaugh JW, Babb TL and Crandall PH: Endogenous potentials generated in the human hippocampal formation and amygdala by infrequent events. *Science* 210: 803-805, 1980.
- 13) 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.
- 14) 平松謙一, 秋本 優, 丹羽真一: 選択反応課題における分裂病患者の反応時間とP300潜時-適応形相関フィルタを用いた1試行毎のP300成分の推定-. *精神医*27: 1055-1063, 1985.
- 15) Johnston J, Rearick M and Slobounov S: Movement-related cortical potentials associated with progressive muscle fatigue in a grasping task. *Clin. Neurophysiol.* 112: 68-77, 2001.
- 16) 紙上敬太: 運動強度の違いが感覚-運動処理過程に及ぼす影響. 筑波大学 修士論文
- 17) Kaseda Y, Jiang C, Kurokawa K, Minori Y and Nakamura S: Objective evaluation of fatigue by event-related potentials. *J Neurol Sci.* 158: 96-100
- 18) Kida T, Nishihira Y, Hatta A, Wasaka T, Nakata H and Sakamoto M: Stimulus context affects P300 and reaction time during a somatosensory discrimination task. *Adv. Exer. Sports Physiol.* 9: 105-110, 2003.
- 19) Kita Y, Mori A, Nara M: Two types of movement-related cortical potentials preceding wrist extension in humans. *Neuroreport.* Jul 20; 12 (10): 2221-5, 2001.
- 20) Kornhuber HH and Deecke L: Hirnpotentialänderungen bei Willkurbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen. *Bereitschaftspotential*

運動が事象関連電位に及ぼす影響

- und reafferente potentiale. *Pflugers Arch. Ges. Physiol.* 284: 1-17, 1965.
- 21) 久保田競: スポーツと脳のはたらき. 築地書館, 1984.
- 22) 久保田競: ランニングと脳. 朝倉書店, 1982.
- 23) 久保田競: 手と脳. 紀伊国屋書店, 1982.
- 24) 黒岩一雄, 西平賀昭, 中島 剛, 八田有洋, 麓 正樹: 局所的筋疲労に伴う脳電位成分の変動. *日本運動生理学雑誌*. 9-2: 67-76, 2002.
- 25) Polich J: Normal variation of P300 from auditory stimuli. *Electroenceph clin. Neurophysiol.* 65: 236-240, 1986.
- 26) Sakai K, Hikosaka O, Miyauchi S, Takino R, Sasaki Y, P_tz B: Transition of brain activation from frontal to parietal areas in visuomotor sequence learning. *J. Neurosci.* 18: 1827-1840, 1998.
- 27) Shibasaki H, Barrett G, Halliday E and Halliday AM: Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroenceph. Clini. Neurophysiol.* 49: 213-226, 1980.
- 28) 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.
- 29) Sutton S, Braren M and Zubin J: Evoked potential correlates of stimulus uncertainty. *Science.* 150: 1187-1188, 1965.
- 30) Vaughan Jr HG, Costa LD, Gildea L and Schimmel H: Identification of sensory and motor components of cerebral activity in simple reaction-time tasks. *Proc 73rd Conv. Am. Psychol Assoc.* 1: 179-180, 1965.
- 31) Vaughan H.G., Jr and Ritter W: The sources of auditory evoked responses recorded from the human scalp. *Electroencephalogr. Clin. Neurophysiol.* 28: 360-367, 1979.

(平成15年12月1日受理)