

運動準備電位と筋力発揮の調節

鬼頭伸和 (愛知教育大学)
五木田健 (愛知県立碧南高等学校非常勤講師)
伊藤智式 (愛知教育大学非常勤講師)

Variation in Bereitschaftspotential during different grip strength

Nobukazu KITO (Department of Health and Physical Education)
Ken GOKITA (Hekinan senior high school in Aichi, part-teacher)
Tomonori ITO (Aichi University of Education, part-teacher)

I. はじめに

脳波は、Hans Berger がヒトの自発的な電気現象として1929年に報告して以来、60年あまりの歴史しか経ていない。実用化された年月からいえば、さらに歴史は短い。しかし、1940年代に始まった脳波の定量化の試みは、その技法上の著しい進歩とともに、現在ではさまざまな臨床研究分野で応用されるようになってきており、脳全体の機能や機能統合あるいは機能変化などを知るための、有力な手段の一つとなっている¹⁾。

Kornhuber and Deecke (1965)²⁾は、随意動作前後に頭皮上からいくつかの脳電位を測定する方法を発見した。それは磁気テープに記録してあった脳波を逆方向に再生することによって、随意動作の脳現象を測定することである。この記録法は人間の随意動作の研究を飛躍的に発展させ、人間の随意動作の中核機構の解明に大きく貢献した。運動関連脳電位 (Movement-related cortical potential: MRCP) は、随意運動に特異的な中枢神経機構を直接検討できるという点では欠かせない臨床生理学的手法である。

今日まで多くの研究者^{6,8,9,10)}によって「脳電位と運動制御」との関係について検討し、①手足の動作②随意的、受動的動作③遅速動作④屈曲、伸展動作⑤筋力の強弱⑥片側、両側動作など単純な動作前後の MRCP を測定、検討し運動制御との関係について研究が深まってきている。

そこで、本研究では異なる筋力発揮時の運動準備電位 (準備電位) (Bereitschaftspotential: BP) を測定し、筋力発揮の強弱に伴って出現する電位の時間的経過、最大振幅、総電位量から比較検討を行ない、運動準備電位と筋力発揮の調節との関係を明らかにし、さらに、Topography 法を用いて、筋力発揮時の運動準備電位の頭皮局在を求めることを目的とした。

II. 方法

被検者は年齢19~25才で、右利きの健康的な男子学生6名とした。被検者に対して、本研究に参加するにあ

たって実験の目的および方法を説明し、十分な理解と同意を得た後に測定を実施した。

被検者は、安静椅座位の姿勢で、右手に電子握力計を持ち、さらに、頭部に測定用電極を付けたエレクトロキャップを装着し、両耳の耳朶に基準電極を付けた。また、右前腕屈筋に表面電極を付け、筋電図を導出した。(図1参照)

被検者は、眼前約1.5mに設置されたオシロスコープを凝視した。そして、音刺激は1秒間隔で5回与え、5回目の音刺激と同時にタイミング良く電子握力計を素早く握った。負荷条件は、あらかじめ最大随意筋収縮 (MVC) を測定し、その値をもとに10%MVC と40%MVC の2条件を設定した。また、眼前のオシロスコープには、各被検者の10%MVC、40%MVC 発揮筋力をあらかじめ画面上に横ラインで設定し、被検者には、毎回、そのラインに発揮した筋力ラインが正確に合うように指示をした。なお、その発揮筋力の誤差は毎回モニターでフィードバックして確認できるようにした。被検者にそれぞれの負荷の軽い順に、10%MVC では40回ごと、40%MVC では20回ごとで途中休憩を取り、疲れないようにした。筋力発揮運動を合計80回行なわせた。

脳波 (以下 EEG とする) は、頭皮上から表面導出し、国際式10-20電極配置法に基づき、21個の電極を封入したエレクトロキャップを頭部に装着し、両耳朶結合 (A1-A2) を基準にして、頭皮上の12部位 (Fp1, Fp2, F7, F8, C3, C4, T5, T6, O1, O2, Fz, Pz) から時定数 3 sec で単極導出した。その導出時間は、筋力発揮開始時の筋放電をトリガーにして、その前後 5 秒間として (トリガー前 4 秒, トリガー後 1 秒) 80回の加算平均をして準備電位を記録した。

EEG, 筋力発揮時の筋電図 (EMG) および運動反応としての MVC 荷重曲線を、同時記録した。電極はすべて、銀塩化銀電極を使用した。

身体の動揺や、まばたきや眼球運動による artifact が混入しないように、被検者には脳波測定中は他動作や瞬目、眼球運動などを極力しないようにあらかじめ

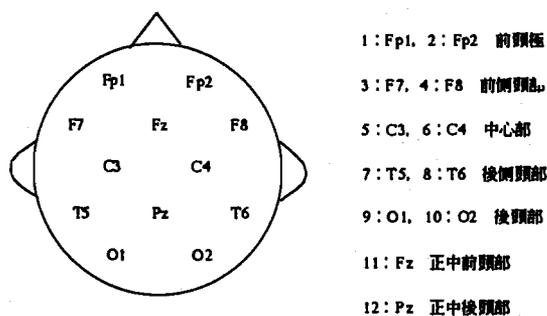
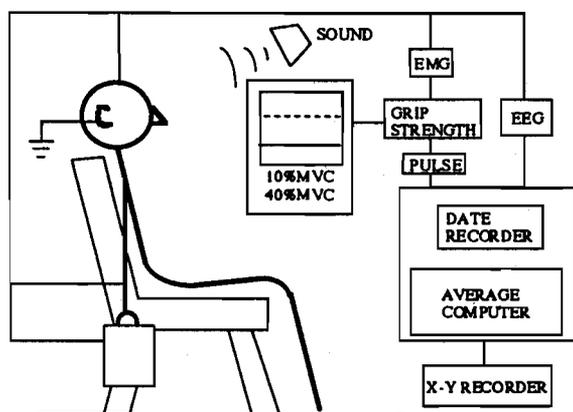


図1 実験概略図と脳波導出12部位名

電位分布の4項目について行った。

統計処理は、被検者の異なる筋力発揮時のBPの開始時間、最高電位、総電位量の平均値および標準偏差を求めた。そして、各筋力発揮条件の平均値の有意差検定は、対応のあるt検定により行ない、いずれの場合も有意差水準5%未満をもって有意とした。

III. 結果及び考察

(1) 異なる筋力発揮時の運動準備電位の出現開始時間、最高電位、総電位量

異なる筋力発揮時の準備電位の開始時間の変化は、表1に示した。BPは、C3部位、Fz部位においては、10%MVC、40%MVCともに早期に陰性方向に出現した。C3部位、Fz部位のBPの開始時間は、10%MVCより40%MVCの方が各々0.3msec、0.76msec早く、統計的に有意な差が得られた。また、他の部位において、BPの開始時間はばらつきがみられ、筋力発揮の増加に伴って、早期に現れるとはいえないと考えられる。

岩瀬⁹⁾は、BPと運動速度との関係を調べ報告している。彼の報告によれば、速い運動を行なわせると、BPの立ち上がりは遅く、緩徐な速度で運動を行なわせると、BPの立ち上がりは早期に立ち上がるということである。このことから、10%MVCと40%MVC条件

表1 異なる筋力発揮時における運動準備電位の開始時間

筋力発揮	人数	10%MVC (msec)	人数	40%MVC (msec)
導出部位				
Fp1	3	1.16±0.43 (-)	6	1.43±0.68
Fp2	3	1.11±0.42 (-)	6	1.58±0.67
F7	5	1.04±0.37 (-)	5	1.26±0.47
F8	5	1.12±0.34 (-)	5	1.37±0.72
C3	5	1.33±0.57 (*)	5	1.63±0.53
C4	5	1.37±0.47 (*)	5	1.83±0.61
T5	2	1.19±0.14 (-)	4	1.08±0.19
T6	2	1.03±0.06 (-)	3	1.36±0.23
O1	1	0.80±0.00 (-)	2	0.87±0.04
O2	2	0.97±0.06 (-)	2	1.62±0.08
Fz	6	1.26±0.42 (*)	6	2.02±0.68
Pz	1	1.21±0.42 (-)	3	1.71±0.47
means±SD	6	1.19±0.29 (*)	6	1.68±0.50

* P<0.05 ** P<0.01 *** P<0.001 - n.s.

注意をし、さらに、artifactに関わる運動をした場合はその後3~4秒おいてから運動を行なうように指示した。

運動準備電位の波形の分析は、1)異なる筋力発揮時の準備電位の開始時間。2)異なる筋力発揮時の準備電位の最高電位。3)異なる筋力発揮時の準備電位の総電位量。4)異なる筋力発揮時の準備電位の頭部

での筋力発揮時の運動速度によりBPの開始時間に関係してくると考えられる。

異なる筋力発揮時のBPの最高電位は、表2に示した。その電位は、Control、10%MVC、40%MVCの順にC3、C4、Fz部位で高い値であった。西平によれば⁹⁾、「握力の強弱と運動準備電位の振幅の関係を調べてみると、運動準備電位の振幅は握力の値が増大する

表2 異なる筋力発揮時における運動準備電位の最高電位

筋力発揮 人数	Control(μV)		10%MVC(μV)		40%MVC(μV)	
	6		6		6	
導出部位	Fp1	4.09 \pm 1.34 (*)	9.81 \pm 2.58 (**)	19.18 \pm 5.38		
	Fp2	4.23 \pm 1.14 (**)	9.47 \pm 2.42 (-)	16.24 \pm 6.34		
	F7	4.02 \pm 1.48 (*)	10.30 \pm 5.14 (-)	15.07 \pm 4.65		
	F8	2.62 \pm 1.17 (*)	9.33 \pm 5.65 (**)	11.11 \pm 3.95		
	C3	3.54 \pm 1.06 (***)	13.71 \pm 3.59 (**)	18.38 \pm 4.42		
	C4	3.32 \pm 1.23 (**)	9.38 \pm 2.73 (-)	12.86 \pm 1.83		
	T5	3.67 \pm 1.05 (*)	7.64 \pm 3.43 (-)	9.98 \pm 5.17		
	T6	2.89 \pm 1.23 (-)	9.66 \pm 5.73 (-)	10.76 \pm 2.38		
	O1	4.50 \pm 1.05 (-)	4.47 \pm 2.98 (-)	8.57 \pm 3.81		
	O2	3.54 \pm 1.52 (*)	8.18 \pm 4.80 (-)	10.78 \pm 2.07		
	Fz	3.80 \pm 1.25 (**)	15.99 \pm 4.99 (**)	24.07 \pm 4.28		
	Pz	3.52 \pm 0.85 (*)	9.43 \pm 4.36 (-)	11.70 \pm 3.30		
	means \pm SD	3.52 \pm 0.85 (***)	9.42 \pm 2.31 (*)	13.33 \pm 1.19		

* P<0.05 ** P<0.01 *** P<0.001 - n.s.

に連れて増加する傾向であった。」と示している。このことから、Control, 10%MVC, 40%MVCへと筋力発揮が増加するに連れて、BPの最高電位も増加していったと考えられる。

異なる筋力発揮時の運動関連脳電位の総電位量は、表3に示したように、各被検者でばらつきが見られたが、C3部位とFz部位においては、力発揮に伴い被検者全員において増加を示し、頭皮上で前頭部より脳電位総量が有意に増加した。BPは他の運動では出現しないので、随意運動の準備状態を反映していると考えられると報告されている⁹⁾。このことから40%MVCの筋力発揮における、BPの総電位量はC3部位、Fz部位、Pz部位の中心頭頂領で出現が見られ、脳電位総量が10%MVCに比べ増えていることから筋力発揮増加によるものと考えられる。

随意的に調節して筋力を発揮する前後に出現する運動準備電位波形の出現開始時間、最高電位、総電位量は、発揮筋力の出力が高くなるとその値が有意に増大した。また、その波形が出現する頭皮上の部位は、動作肢と反対側運動野、中心領野、同側の運動野であった。Kornhuber and Deecke (1965)⁴⁾、Vaughan et al (1968)、Gerbrandt et al (1973)、岩瀬 (1974)²⁾、および柴崎(1975)⁹⁾は、「随意動作に先行して頭皮上に出現する脳運動関連電位の中の準備電位は、ほとんどの結果が動作肢と反対側の運動野相当部位上で有意を示した。」と報告した。また、Kornhuberとその共同研究者ら⁴⁾は、手指動作ではBPが主に頭頂、中心領野上に有意に出現することを明らかに示している。また、西平⁷⁾が「準備電位は、ほとんど動作肢と反対側の運動野相当部位で有意を示した。そして、頭皮上全体からみれば、準備電位は中心領野で有意を示し、動作肢と反対側の運動野と頭皮上全体からみれば、準備電位は中心領野から運動皮質ニューロンの活動を反映してい

るのではないかと考えられ、さらに、運動に關与する皮質ニューロンが中心前回及び後回付近に多く限局していることが詳細にわかっている。」と述べているように、C3部位、Fz部位、Pz部位の中心領野での脳電位総量の増加は、運動皮質ニューロンの活動による影響と考えられる。

本研究は上記の報告と同様の結果が得られ、それらの結果を支持するものである。これらのことから、運動準備電位は筋力発揮の調節と深く関係する電位であり、運動皮質ニューロンの活動によって影響されると考えられる。

(2) 異なる筋力発揮時の運動準備電位の頭部電位分布

異なる筋力発揮時の準備電位の頭部電位分布変化は、Controlにおいて、図2に示したように局在を示す変化はみられなかった。10%MVC, 40%MVCでの頭皮分布は、Fz部位、C3部位を中心とした、前頭中心部と動作肢と反対側の前部において高い電位の局在分布を示し、10%MVCに比べ40%MVCはより高い電位の局在分布を示した。

Topography法によって、解析した頭部電位分布図は、ほとんどの被検者において、Control, 10%MVC, 40%MVCと筋力発揮の増加に伴って、脳電位が増え、C3部位、Fz部位を中心に電位分布が広がっている。このことは、随意動作に先行して頭皮上に出現する脳運動関連電位の中のBPは、ほとんど動作肢と反対側の運動野相当部位上で優位を示すことから、頭皮分布図のC3部位、また、Fz部位を中心に顕著に高い電位の分布を示したと考えられる。

力発揮の増加に対して、脳電位が広く、高くなり頭皮上に出現するのは、運動皮質ニューロンの活動が反映しているからと考えられる。もしも、自発動作に先行して、または動作駆動の準備状態において、運動野

表3 異なる筋力発揮時における運動準備電位の脳電位総量

筋力発揮	人数	10%MVC (arbitrary unit)	人数	40%MVC (arbitrary unit)
導出部位				
Fp1	6	13.8±8.8 (-)	6	31.7±21.9
Fp2	6	13.3±10.1 (*)	6	30.5±21.5
F7	6	15.7±12.0 (-)	6	20.5±11.1
F8	6	12.3±8.0 (-)	6	24.3±18.5
C3	6	24.8±8.6 (*)	6	35.5±15.3
C4	6	17.0±11.2 (*)	6	36.2±14.4
T5	6	6.7±5.6 (-)	6	15.0±7.1
T6	5	5.4±2.3 (**)	5	12.8±2.5
O1	6	5.3±2.8 (-)	6	11.8±9.7
O2	5	6.0±2.7 (*)	5	24.8±12.2
Fz	6	24.5±10.7 (*)	6	50.7±19.3
Pz	6	11.8±7.2 (*)	6	28.2±13.1
means±SD	6	13.3±6.0 (**)	6	27.0±8.5

* P<0.05 ** P<0.01 *** P<0.001 - n.s.

の錐体路細胞が他の領野に比して、相対的により活性化及び活動しているならば、その領野の活動状態がその領野に相当していると考えられている頭皮部位上に装着した電極に反映する可能性は少なからずあるものとする。もちろん、動作の準備及び動作の駆動において、運動野の錐体路ニューロンのみが活性化及び活動するのではなく、大脳皮質全体、大脳基底核系、視床、小脳などの中枢系内が活性化及び活動していることは当然考えられる。このため、頭皮上に電位分布として現われると考えられる。

また、1秒間隔で5回聞こえる音刺激に合わせるといった、リズム性を含んでおり、運動がより複雑になる状況となった。また、筋力発揮では、目標ラインに合わすという課題をもち、被検者が試技ごとに確認していけるような状況であり、これは脳内において課題遂行のためにフィードバックを行なうことになると考えられる。MRCPでは、運動開始直後の数十ミリ秒においてN+50あるいは front peak of MP : fpMP が前頭部にみとめられる。これは補足運動野等での短潜時の運動感覚フィードバックを反映すると考えられるとされている⁹⁾。このリズム性とフィードバックの両方の要因によっても脳電位の振幅が増大していくものと考えられる。

本研究において、MRCPのBPは、音刺激による予測、そこから動作開始までの運動の計画、そして、力発揮による運動コントロールとこの一連の流れを80回行なう試技で、フィードバックを繰り返し行なうという要因から脳電位の振幅が増加が見られたとも考えられる。

IV. 結 論

本研究は、男子6名を被検者として、異なる筋力発揮時における運動関連脳電位(MRCP)を測定し、そ

の波形の開始時間、最大振幅、および総電位量を分析して、運動関連脳電位と筋力発揮の調節との関係を明らかにすることを目的とした。さらに、筋力発揮時における、運動準備電位の頭皮上脳電位分布を Topography で確認し、以下のような結果を得た。

- (1) 異なる筋力発揮時において、運動準備電位の開始時間は、運動野(C3部位)、前頭頂野(Fz部位)で筋力発揮の増加に伴い有意に早く出現した。また、他の頭部部位では、異なる筋力発揮時での準備電位の開始時間に変化は見られなかった。
- (2) 異なる筋力発揮時において、運動準備電位の最高電位は、筋力発揮の増加に伴い高くなった。特に、運動野(C3部位)、前頭頂野(Fz部位)において有意に高い値が得られた。
- (3) 異なる筋力発揮時において、運動準備電位の総電位量は、筋力発揮の増加に伴いC3, Fz, Pz 部位で有意に増加した。
- (4) 異なる筋力発揮時における、運動準備電位の頭皮上脳電位分布は、動作肢と反対側の運動野相当部位上から前頭中心領にかけて相対的に有意に出現した。

以上のことから、運動準備電位は筋力発揮の調節との関係があることが考えられた。

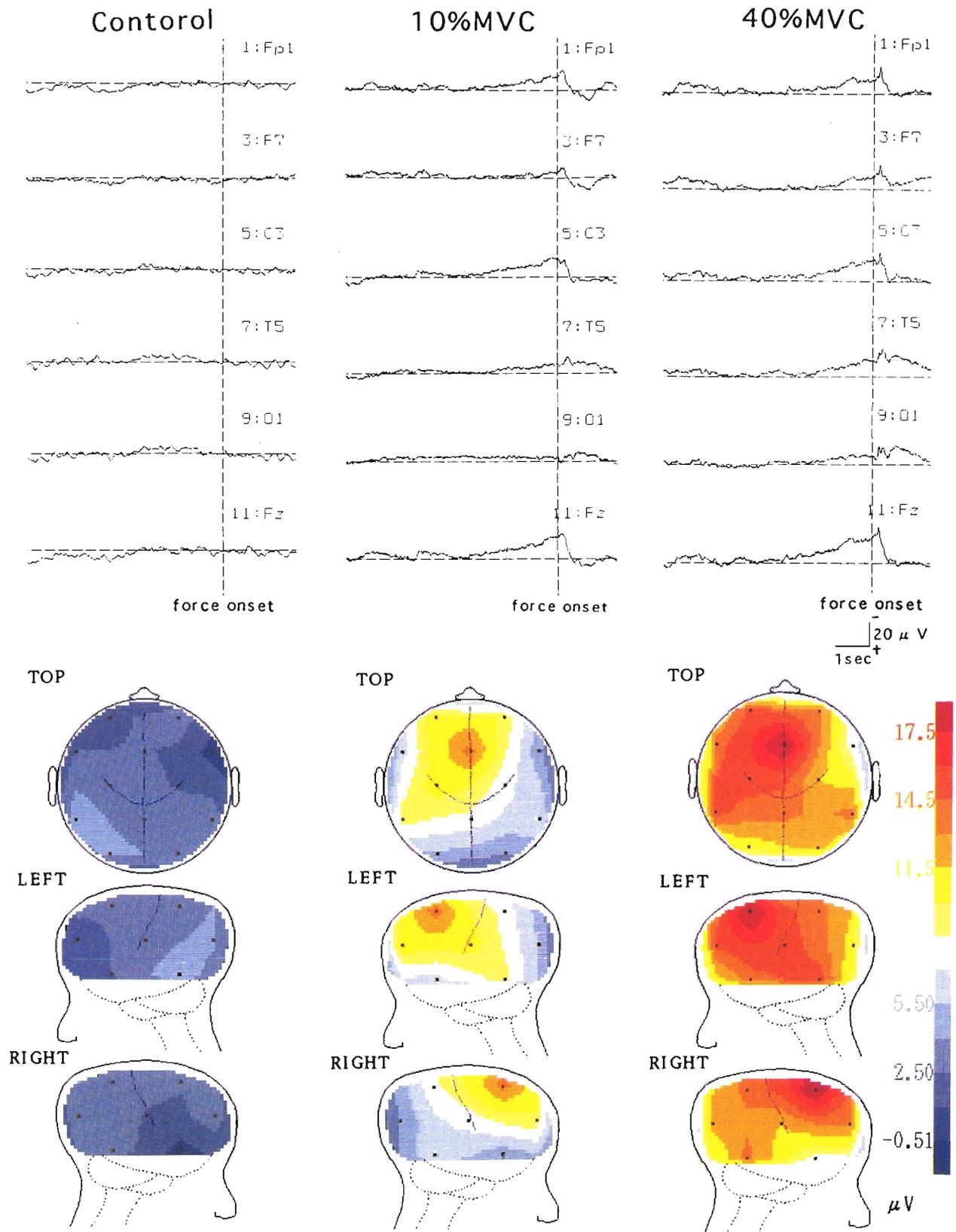


図2 調節された筋力発揮時の運動準備電位 Topography 法による運動準備電位の頭皮上分布の変化

引用・参考文献

- 1) 伊藤正男ほか：脳と運動，平凡社：1-6，207-247，1983.
- 2) 岩瀬勝彦：準備電位と運動，臨床脳波，16：242-246，1974.
- 3) 岩瀬勝彦：準備電位と随意運動の速度，臨床脳波，16：

- 300-303, 1974.
- 4) Kornhuber, H. H., and Deecke, L.: Hirn-potentialänderungen bei Willkurbewegungen und Passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. Pflugers, Arch. ges. Physiol., 284: 1-17, 1965.
 - 5) 正木宏明, 高澤則美, 山崎勝男: 脳の準備電位—その運動学習への適応—. ヒューマンサイエンスリサーチ, 3: 107-125, 1994.
 - 6) 西平賀昭: 運動準備電位, 10. Japanese Journal of SPORTS SCIENCES: 540-545, 1991.
 - 7) 西平賀昭: 随意動作に先行する脳運動関連電位. 体力科学, 27: 140-148, 1978.
 - 8) 柴崎浩, 池田昭夫, 寺田清人: 随意的筋弛緩の調節機構. 体育の科学, 46: 464-471, 1996.
 - 9) 柴崎浩: 脳運動関連電位. 記録法ならびにその意義に関する知見の総括. 臨床脳波, 17: 275-285, 1975.
 - 10) 島村宗夫, 中村隆一: 運動の解析—基礎と臨床応用—医歯薬出版株式会社: 237-244, 1980.
 - 11) 白山正人, 永田晟: スポーツと脳電図. Jpn. J. Sports Sci, 10: 526-535, 1991.
 - 12) Y. NISHIHARA, H. ARAKI, A. ISHIHARA: Cerebral motor potential preceding grip strength movement. THE JOURNAL OF SPORTS MEDICINE AND PHYSICAL FITNESS, 29: 297-303, 1989.

(平成9年9月11日受理)