

寄	贈
谷井克則氏	平成 年月日

D B
837
1992
④

随意運動開始前の末梢性電位変化 と 筋運動の上位中枢性調節との関係

—筋電位変化、脳電位変動および筋収縮様式からの検討—

谷井克則

この論文は以下の論文に、未発表の実験結果を付け加えたものである。

- 1 Tanii, k. (1984): Occurrence of a rhythmic slower wave in
EMG prior to a rapid voluntary movement.
Electroenceph. clin. Neurophysiol., 57:435-440.
- 2 Tanii, K., Sadoyama, T. and Sameshima, M. (1985): Power
spectral analysis of the surface electromyogram before and
after a warning signal in a reaction movement.
Electroenceph. clin. Neurophysiol., 60:532-538.
- 3 Tanii, K. and Kimugasa, T. (1986): Changes in activity of
motor units preceding a rapid voluntary movement.
Electroenceph. clin. Neurophysiol., 63:188-191.
- 4 Tanii, K., Sadoyama, T. and Sameshima, M. (1987): Temporal
relationships of EMG changes preceding voluntary movement to
premovement cortical potential shifts.
Electroenceph. clin. Neurophysiol., 67:412-420.

目次

I	緒言	1
II	先行研究および検討すべき問題	6
	1. 動作前 silent period (P S P)	6
	2. 随意運動開始前の脊髄 α 運動ニューロンの興奮性	11
	3. 随意運動に先行する運動野錐体路ニューロン活動	12
	4. 随意運動の中枢プログラミング	15
	5. 運動関連脳電位とその構成成分	20
	6. 随意運動開始前の表面筋電位の変化	25
	7. 検討すべき問題	25
III	研究目的および研究課題	27
IV	随意運動の開始前における表面筋電位波形 の変化について (実験1)	29
	1. 目的	29
	2. 方法	30
	3. 結果	31
	4. 考察	34
	5. 要約	35
V	随意運動に先行する運動単位活動の変化と 律動的表面筋電図 (R S W) (実験2)	37

1. 目的	．．． 3 7
2. 方法	．．． 3 7
3. 結果	．．． 3 8
4. 考察	．．． 3 9
5. 要約	．．． 4 1

VI 反応運動における予告合図前後の表面筋電位

周波数成分の比較（実験 3）	．．． 4 3
1. 目的	．．． 4 3
2. 方法	．．． 4 3
1) 実験手順および試行数	．．． 4 3
2) 記録	．．． 4 4
3) 周波数分析	．．． 4 4
4) 統計処理	．．． 4 5
3. 結果	．．． 4 5
1) 心電位の筋電位パワースペクトルへの影響	．．． 4 5
2) 予告合図前後の平均周波数の比較	．．． 4 5
3) 予告合図前後の筋電位パワースペクトルの比較	．．． 4 6
4. 考察	．．． 4 7
5. 要約	．．． 4 9

VII 随意運動開始前の表面筋電位変化と運動前

脳電位変動との時間関係（実験 4）	．．． 5 1
1. 目的	．．． 5 1
2. 方法	．．． 5 2

1) 被験者	・ ・ ・ 5 2
2) 実験手順	・ ・ ・ 5 2
3) 記録	・ ・ ・ 5 3
4) 加算平均処理および分析	・ ・ ・ 5 4
3. 結果	・ ・ ・ 5 4
1) 脳電位と表面筋電位の原波形の変化	・ ・ ・ 5 4
2) 平均運動前脳電位の構成成分	・ ・ ・ 5 5
3) 筋電位変化の起始と運動前脳電位構成成分 との時間関係	・ ・ ・ 5 6
4) 脳電位構成成分の有無と相動性放電および 筋力曲線の上昇時間	・ ・ ・ 5 7
5) 脳半球非対称性	・ ・ ・ 5 8
4. 考察	・ ・ ・ 5 9
1) 運動前脳電位構成成分の機能的意義および 構成成分と筋電位変化との時間関係	・ ・ ・ 5 9
2) S N P および T N P	・ ・ ・ 6 1
5. 要約	・ ・ ・ 6 4

VIII 筋収縮様式が随意運動開始前の表面筋電位変化

および脳電位構成成分に及ぼす影響（実験5）	・ ・ ・ 6 6
1. 目的	・ ・ ・ 6 6
2. 方法	・ ・ ・ 6 7
1) 被験者	・ ・ ・ 6 7
2) 筋収縮様式	・ ・ ・ 6 7
3) 実験手順	・ ・ ・ 6 7

4) 記録	．．． 67
5) 加算平均処理および分析	．．． 67
3. 結果	．．． 68
1) S W s および P S P の出現様相	．．． 68
2) 運動前脳電位構成成分と S W s および P S P の出現関係	．．． 68
4. 考察	．．． 70
1) S W s および P S P の機能的役割	．．． 70
2) 末梢性電位変化および中枢性電位変動 と中枢性筋運動調節の関係	．．． 72
5. 要約	．．． 77
IX まとめ	．．． 79
X 総括的考察	．．． 87
XI 結論	．．． 91
謝辞	．．． 94
図および表	
参考文献	

I 緒言

人間の随意的な運動・動作は骨格筋群の収縮によって発現し、神経系によって調節されている。このため筋運動中の神経系の制御過程およびその際の中枢・末梢機序に関心が向けられ、膨大な研究がなされてきた。また随意運動発現のメカニズムに関する研究はFritschとHitzigが1870年に麻酔したイヌの脳表面を電気刺激して運動野を発見したことから始まったのであるが、それは脳を破壊あるいは刺激することによって、随意運動に起こる変化を解析し、間接的に随意運動のメカニズムを推定していたにすぎなかった。このような研究方法に革命的とも言える変化をもたらした研究論文がEvartsによって1964年に発表された。Evarts(1966)はランプの光を見たら手を離すように条件づけたサルの大脳に微小電極を刺入し、運動野ニューロンの活動を記録した。この研究によって随意運動のメカニズムの研究は新しい時代へ移行し、微小電極を脳のいろいろな部位に使用した動物実験が神経生理学の領域において行われるようになった。随意運動の開始と上位中枢における種々のニューロンの活動開始との時間関係の研究から、大脳皮質運動野錐体路細胞^{46), 47), 48), 200)}、前頭前野¹⁰¹⁾、運動前野^{102), 216), 218), 219)}、補足運動野^{199), 201)}、頭頂連合野^{70), 79), 135), 161), 184)}、小脳皮質プルキンエ細胞^{120), 202), 204)}、小脳核である歯状核および中位核^{203), 205), 206)}、大脳基底核の1つである被殻^{32), 33)}および淡蒼球^{31), 32)}などのニューロンが随意運動に先行して活動を始めるという知見が得られた。このほか運動準備期の運動野ニューロン活動についても研究がなされた^{103), 167), 196)}。このように随意運動発現のメカニズムに関する研究が動物実験において行われている現状にある。

随意運動に関する神経情報が脳皮質、脳基底核、小脳などの高位の中枢においてどのような機序によって形成され、統合処理されるかの全貌は明らかにされてはいない。随意運動の発現に際しては、運動・動作を行う意志決定に引続き、筋収縮の強度、速度はもちろんその持続時間、筋活動の順序、運動の方向・範囲、タイミング等々が中枢神経系の種々のレベルで調節され、すなわち運動準備状態（運動の中枢プログラム）が形成され、その神経情報が最終共通経路である脊髄 α 運動ニューロンに伝達されて筋の収縮が起こり、意図とした運動が遂行される。随意運動開始前の運動の調節および運動プログラムに関する神経-筋系の研究は、身体運動の調整能、協調性、敏捷性および巧緻性等の体力要素と深く関係するので運動生理学的に重要であると思われるが、筋力や持久力等のエネルギー的体力の研究と比較して少ないのが現状である。これまでに行われた人間の随意運動の発現に係わる研究として、随意運動に先行する脊髄 α 運動ニューロンの興奮性に関する問題、および運動プログラムと関連した随意運動開始前の準備期における脳皮質活動に関する問題が挙げられる。しかしながら人間の場合には方法論的に微小電極を脊髄および脳皮質に刺入することが困難であるため、運動前および運動中の調節および制御の研究は主に表面筋電図および頭皮上脳電位の記録によって行われている。

人間の随意運動に先行する脊髄 α 運動ニューロンの興奮性に関する研究で注目されるものとして、猪飼(1955b)によって初めて研究の主題とされた動作に先行するsilent period (Premovement Silent Period、PSP)がある。この現象は主働筋が弱い持続性収縮を保った静止状態（予備緊張状態）から急激な随意運動を発現した場合のみに観察される持続性筋放電の一時的な消失現象で、上位中枢の関与した抑制現象と考えら

れており^{74), 224)}、巧緻性との関係において研究されている²²³⁾。P S P 研究は四肢筋を被験筋とした関節伸展運動において主に研究されている^{73), 87), 128), 210), 222)}。P S P の出現に不可欠な要因は主働筋の収縮速度が速いことであるといわれている^{74), 224)}が、報告されている出現頻度^{210), 224)}は速い収縮を行えば必ず出現するものではないことを示している。著者(1983)が行ったP S P の研究はその出現条件として筋収縮速度の他に筋収縮力の考慮の必要性を示唆しているが、この問題の検討はまだ行われていない。要するにP S P の機能的役割はいまだ解明されていないのである。

著者の上記の研究において、P S P のほかに持続性筋放電の徐波化、すなわち鋸歯状の表面筋電図への変化が随意運動の開始に先行して観察された。随意運動の開始前における表面筋電図の徐波化を主題とした研究報告はなく、鋸歯状の表面筋電図はP S P と共に注目すべき現象である。

人間の随意運動における大脳皮質活動の研究は、主働筋の予備緊張を伴わない自発性の随意運動に際しての脳電位を電子計算機などで数10回加算平均して得られる運動関連脳電位により行われている。その研究の多くは医学領域において行われたものであり^{9), 10), 12), 29), 56), 57), 58), 75), 76), 77), 93), 97), 107), 111), 112), 113), 140), 146), 171), 173), 174), 175), 176), 178)}、体育学および運動生理学の領域における研究は数少ない^{142), 143), 144), 145), 227)}。しかしながら医学の領域において運動速度、筋力および巧みさとの関連で行われた研究もある^{14), 15), 96), 106), 215), 217)}。運動関連脳電位のうち特に随意運動開始前のいくつかの脳電位(運動前脳電位)成分は運動準備状態の形成および運動開始命令との関連で検討されており^{7), 27), 57), 58), 171)}、運動開始前の錐体

路細胞活動とどう対応するかが研究されている。随意運動時の脳波とPSPの関連に関しては、 α 波がPSPの出現によってどう変化するかをみた研究⁷³⁾はあるが、脳電位と表面筋電位の同時記録によって運動前脳電位構成成分と鋸歯状の表面筋電図およびPSPとの関係を検討した研究報告は見あたらない。また運動前脳電位成分、鋸歯状の筋電図およびPSPの個別計測結果または同時計測結果を筋収縮様式別に比較検討した研究報告もない。

大脳錐体路細胞の多くの軸索は脊髄において α 運動ニューロンと結合している。それゆえ運動準備状態の形成と共に脊髄 α 運動ニューロン群に興奮性の変化が起こり、表面筋電図上にその変化が出現することが予想される。筋収縮様式と運動の調節との関連において、運動発現準備期における中枢性の運動前脳電位成分と末梢性現象である鋸歯状の筋電図との出現時間関係、および抑制現象であると考えられているPSPと対応した運動前脳電位成分の有無に興味をもたれる。

上肢の動的な随意運動における上腕二頭筋（上腕三頭筋）の活動中に、拮抗筋である上腕三頭筋（上腕二頭筋）には筋電位活動が見られないことはよく知られている。この場合筋電位活動が見られない筋に興奮命令が来ていないのか、もしくはその筋が神経性の抑制を受けているのかが問題となるが、この問題についてはHoffmann(1918)が抑制によるものであることを示唆し、後にTanaka(1983)が神経性の抑制であることを明らかにしている。この抑制は相反性抑制といわれ、運動遂行の際に主働筋の興奮に伴って見られる拮抗筋の抑制現象である。この抑制がないと主働筋の収縮が拮抗筋に伸張反射などを引き起こすために、目的とする運動が抑制され、滑らかで効果的な運動が達成されないことになりかねない。

以上のことを考慮し、かつ運動・動作における運動神経系の興奮と抑制のかかわりあいの重要性を踏まえて、本研究では鋸歯状の筋電図およびPSPと上位中枢性の筋運動調節との関係、並びにそれらの機能的役割を運動生理学的に検討することを目的とした。

II 先行研究および検討すべき問題

1. 動作前 silent period (P S P)

P S P は Stetson と Bouman (1935) が報告した急速反復動作の筋電位記録にみることができる。しかしながらその出現機構については言及されなかった。猪飼 (1955b) は光刺激に対する急速な肘関節の屈曲および伸展反応動作において P S P をみとめ、その出現機構として感覚体肢反射による運動ニューロンの興奮水準の変化を推定した。また、脳幹抑制領域からの抑制性信号の関与も除外することはできないとも考察した。このように P S P の特徴は随意的な反応動作を起こす直前に出現する点であるため、反射動作や電気刺激によって生じる筋収縮中の silent period²⁾ (4), 71), 124), 150) と現象的にも出現機構的にも区別され、P S P の研究はその出現機構の解明から始められた。

猪飼と芝山 (1965) は P S P の出現機構を肘関節伸展反応運動において研究し、主働筋における P S P の出現時に拮抗筋からの筋放電は見られなかったことから、P S P 出現には相反性神経支配の関与はありえないと結論した。また彼らは P S P 出現時の脳波の α 波分析も行ったが、 α 波の消失や波形の変化が起こらなかったため、P S P は大脳皮質ではなく反射機構の関与した抑制現象であると推定した。しかしながらその後、矢部と村地 (1975) は、随意筋収縮の保持中に末梢の運動神経を電気刺激し相動性の筋収縮を誘発した場合には P S P の出現は認められなかったという報告²²⁾ を引用して、P S P は意志による上位中枢の関与なしには発現しない現象であると指摘している。P S P の出現様相およびその機構に関する研究は肘伸展動作に加えて下肢動作 (跳躍およびスタート動作) においても行われ⁷⁴⁾、主働筋および拮抗筋における P S P の同時

出現および上肢・下肢におけるP S Pのほぼ同時出現が報告された。さらに左右肘関節の同時伸展動作を行った際の左右上腕三頭筋および同一の運動神経に支配されている大腿四頭筋における同時期出現も報告され^{222), 224)}、これらの事実からP S Pは脊髄全体の同時抑制によるものであると結論された²²⁴⁾。

川初と秦(1982)はP S P出現に関する脊髄全体の同時抑制説に疑問をいだかせるデータを発表した。それは一回の動作において2つの筋に出現したP S Pの出現時期の相違、および同一の神経に支配される3つの筋におけるP S P出現の試行間の相違の観察である。さらに複数筋にP S Pが出現した際の出現順序は必ずしも相動性の急激な筋収縮開始の順序でなかったことも合わせて報告した。これらの結果はP S Pは脊髄全体の同時抑制によるものでもなく、また中枢における静的予備緊張状態から急激な動的運動への切り替えの時間的配列制御によっても説明できない現象であることを示している。

猪飼ら(1973)および矢部と村地(1975)はP S Pの出現条件として運動準備期における筋緊張と筋の収縮速度を指摘し、筋収縮速度の速い場合の方が、そうでない場合よりもP S Pの出現は容易であると報告した。これら2つの条件のうち予備緊張については、三田ら(1978)が持続性収縮の強さの程度とP S Pの出現しやすさとの関連を研究した。三田らは持続性収縮の程度を最大随意筋力の5%から80%の範囲内で変化させ、P S Pの出現頻度を調べた。その結果、比較的出現しやすい筋力範囲は30%以下であり、最も出現しやすいのは筋力が10%以下の時で、その出現率は31%であったと報告した。KawahatsとMiyashita(1983)は運動準備期において要求される筋張力が低いほどP S Pの出現頻度は高いと報告した。この他、P S Pは静的準備状態から急激に動作を発現する

際に出現するだけではなく、緩徐な筋収縮運動からの急激な動作の開始に際しても出現することが上肢および下肢において示された⁸⁵⁾。このようにP S Pの出現条件に関する研究はいくつか報告されているが、P S Pの出現頻度と筋力の発揮との関係は研究されていない。

P S P出現と反応時間との間に直線的な関係はみられないが、筋収縮速度が速いほどP S Pは出現しやすい^{74), 224)}。この結果は反応動作における反応合図に対する応答条件を指示した研究においても確かめられている²¹²⁾。すなわち、できるだけ動作開始時間を短縮するように努力した試行よりも、できるだけ筋収縮速度を速めるように努めた試行においてP S Pの出現率は高かった。P S P出現率は運動経験年数が長い者ほど高く^{86), 210)}、右肘関節の伸展動作を行ったときの左上腕三頭筋に出現するP S Pの頻度は試行回数の増加すなわち動作の習熟と共に増す²²⁵⁾。これらのことからP S Pは習熟、敏捷性および巧緻性と関係があると考えられている^{86), 224), 225)}。運動習熟度が高くなればP S Pの持続時間（表面筋電図が消失している時間）は長くなることが予想されるが、そうでもないようである。世界的にトップクラスの陸上競技短距離選手におけるP S Pの持続時間は体育系学生におけるよりも短いという結果が報告されている⁸⁶⁾。このような運動習熟度別グループ間の比較を行った研究^{86), 210)}のほかに、P S Pの出現率および持続時間に対するトレーニングの効果が同一個人において研究されている。4人の被験者に反応動作を7～15日間練習させ、巧緻性との関連で練習効果をみた研究⁸²⁾では、P S Pの出現頻度および持続時間は練習の前半で増大し、後半で減少するとしている。脇田ら(1982)は光刺激に応じて素早く肘関節を伸展させる単純反応動作の敏捷性トレーニングを9週間にわたって4人の被験者に行わせ、P S Pの出現率を分析した。その結果、トレ-

ニング開始1週間後にP S P出現率が増加する者と減少する者とに分かれ、2週間後以降の出現率はほぼ一定であった。このようにP S Pの出現に対するトレーニング効果の有無に関しては一致した結果は得られていない。

脇田ら(1981)は被験者に「できるだけ素早い収縮をするように」と教示した上で肘関節を伸展する運動を行わせ、同一個人から得られた力曲線をP S Pの出現試行群とP S Pの非出現試行群に分け、2群間の力曲線様相を比較した。P S Pが出現した試行においては出現しなかった試行と比較して、反応時間は遅いが力曲線の立ち上がりからその頂点までの動作時間は短く、単位時間あたりの筋力上昇率も大きかった。彼らの研究における力曲線は手首支持台に貼布したストレングージによって記録したものであり、算出した筋力上昇率は力曲線の頂点の値を発揮された筋力とし、この筋力値を力曲線から求めた動作時間で除した値である。発揮された筋力の大きさについて全く言及していないため、筋力値がP S Pの出現の有無の影響を受けたかどうかは不明であるが、P S Pの出現試行における動作時間の短縮は発揮された筋力値の増大がなくても、筋力上昇率として計算された値を大きくする。脇田ら(1981)が算出した筋力上昇率は動作時間、すなわち筋収縮速度によって大きく影響され、力曲線に基づいて計算したとしても、単位時間当りの肘関節伸展速度を表していると思われる。青木ら(1985)も脇田ら(1981)と同様に肘関節伸展動作時の筋力曲線を記録し、筋力の立ち上がりから最大筋力に達するまでの時間はP S Pの非出現試行に比べてP S Pの出現試行のほうが速いことから、P S Pには筋力増強効果があると報告している。青木ら(1985)の筋力曲線は重力負荷を巻き上げるチェーンに貼ったストレングージの張力変化曲線であり、青木ら(1985)の論文の図中に示された筋力曲

線のトレースは、最大筋力はP S Pの出現の有無による影響を受けないことを示している。青木らの研究もまたP S Pと肘関節伸展動作速度、すなわち筋収縮速度との関係をもっていると思われる。これらのP S Pの役割を扱った研究は上位中枢における筋運動の調節およびプログラミングの視点から検討した研究ではなく、P S Pの出現の有無と運動成績との関係を同一運動においてかつ同一被験者で比較・検討したものであり、実験条件からみてP S Pの機能的役割を明らかにするには無理があると思われる。なぜならば同一反応運動を繰り返した際の各試行に対する個々の被験者における中枢プログラムは、基本的に同一であるはずだからである。脇田ら(1981)および青木ら(1985)の報告に続いて、永見(1987)はロードセルで記録した張力曲線から最大筋力値に至るまでの時間を計測し、P S Pは筋収縮速度の加速に寄与すると報告している。脇田ら(1981)および青木ら(1985)の2グループによる結論は、猪飼ら(1973)が筋収縮速度が速い場合の方がP S Pは出現しやすいと報告したことと同じである。この2グループにおける実験結果からP S Pは筋力上昇率を高める、もしくは筋力増強効果があると結論するには実験条件等が不十分であり、尚早と考えられる。Conradら(1983)は肘関節の伸展および屈曲動作においてP S Pの持続時間と反応時間、動作速度および肘関節伸展の際の角度変位の大きさとの関係を研究しているが、速い速度の随意運動に先だって運動ニューロンの差し迫った活動と関連した抑制過程があると結論しただけに留まっている。P S Pの機能的役割を論じるにはP S Pがどのように制御された随意筋収縮と係わり、その筋収縮にどう寄与するかを検討する必要があると思われる。

著者は腰部屈伸運動と腰部筋負担に関する人間工学的研究^{192), 193)}の中で、軀幹筋である脊柱起立筋の表面筋電図にP S Pを観察し、この結

果に基づき、立位前屈姿勢から腰部伸展によって錘を急激に挙上する条件のもとで腰部脊柱起立筋のP S Pの出現様相の研究を行った¹⁹⁰⁾。その結果挙上する錘が重くなるほどP S Pの出現頻度は高く、その持続時間も延長する傾向が得られた。これらの結果は異なった重さの錘の挙上に対する「構え」との関連で考察され、P S Pの出現は上位中枢における筋収縮力の調節の影響を受けるらしいことが推察された。すなわちP S Pは関節運動を素早く行うための速い筋収縮とだけよりも、むしろ急激な筋力発揮のための強くて速い筋収縮と関係が深いものと考えられた。P S Pの機能的役割を明らかにするためにはP S Pの出現様相を筋収縮様式別に比較検討する必要があると思われるが、これについての研究はまだ行われていない。

2. 随意運動開始前の脊髄 α 運動ニューロンの興奮性

運動・動作において運動神経系の抑制機構の果たす役割はきわめて大きく、運動神経系の興奮と抑制の係わりあいは、運動・動作の調整能、協調性および巧緻性の指標になると考えられている²²³⁾。人間の随意運動に先行する脊髄 α 運動ニューロンの興奮と抑制に関する研究として、誘発筋電図による研究がある。誘発筋電図は末梢神経を電気刺激したときその支配領域の筋群から得られる収縮応答であり、M波、H波およびF波の3つの誘発波が知られている。H波は電気刺激情報が知覚性の求心性線維(group Ia)を上行して脊髄に至り、単シナプス反射弓を介して脊髄 α 細胞を興奮させ、遠心性線維である脊髄 α 運動ニューロンを経て筋を収縮させることによって生ずるものであり、その電位波形は脊髄 α 運動ニューロンの興奮性の研究に利用される^{20), 30), 43), 81), 91), 123), 134), 153), 155), 159), 179), 186), 187), 188), 220)}。随意運動に先行す

るH波の知見の殆どは予備緊張なしの反応運動において得られており、主働筋のH波の電位波形の分析から反応運動を起こす主働筋の筋電位出現に約80 msec先立って単シナプス反射は促通を受けることが示されている^{39), 59), 95), 126), 180)}。すなわち主働筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンの興奮性は随意運動の開始前に増加する。予備緊張を伴った研究は非常に少なく、笠井と中原(1979)はPSPの出現に先行してH波の振幅が低下すると報告し、三田ら(1982a)はPSP出現の有無による明確な差はないと報告している。Hufschmidt(1962)は随意運動に先行する脊髄 α 運動ニューロンの興奮性を人間において調べている。彼は立位姿勢からの爪先立ちを皮膚刺激による合図後一定の時間間隔で行わせ、爪先立ち動作の前に腓腹筋のH波が記録できるように実験条件を設定して、この状況における主働筋である腓腹筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンの興奮性を研究した。立位姿勢保持のためにわずかに活動していた腓腹筋の筋電位活動は爪先立ち時の相動性活動に先行して休止し、PSPが出現した。上記の実験条件はH波をPSP出現中に記録するためであった。得られた結果から腓腹筋の随意収縮開始の直前にこの筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンは抑制され、この抑制は中枢性由来であると結論された。この報告はPSPの出現メカニズムの解明にまで至っていないが、PSPが脊髄 α 運動ニューロンの上位中枢性の抑制によることを示唆しており、矢部と村地(1975)の推察と一致するものである。以上のことから、予備緊張の有無によって随意運動開始直前の脊髄 α 運動ニューロンに対する中枢性制御は異なると考えられる。

3. 随意運動に先行する運動野錐体路ニューロン活動

骨格筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンと最も直接的な関係にあるの

は大脳運動野の錐体路ニューロン (pyramidal tract neuron、P Tニューロン) であり、運動開始の信号はP Tニューロンから脊髄 α 運動ニューロンに対して送られることが認められている。

Evarts(1964, 1965)は大脳皮質運動野にあるP Tニューロンの電位発射を記録観察することができる新しい方法を用いて、条件学習の訓練をしたサルから光刺激に应答してすみやかに運動を開始させた際のP Tニューロン活動を記録した⁴⁶⁾。この実験においてP Tニューロンの発射頻度は運動開始の50 - 100 msec前に増加し、運動の遂行中もそれは持続することが明らかになった。個々のP Tニューロンの活動は運動の開始および遂行と密接に関連していることが証明されたわけである。その後、Evarts(1968)は随意運動に先行するP Tニューロン活動の増加は運動によって生じる肢位の変化よりも運動の際に生じる筋張力と関連し、筋張力の変化分が大きくなるとP Tニューロンの発射活動も著しく変化すると報告した。この結果は運動野が運動の際に生じる筋の張力の調節系として存在することを示唆している。このようなP Tニューロンの発射と筋力およびその変化分との関連は、変位を伴わない筋収縮すなわち等尺性収縮による動作においても観察されている¹⁸³⁾。Evartsらは1983年に運動野ニューロンの大部分は筋力の変化と深く関係しているという新たなデータを示し、運動野からの出力は随意運動の初期に動員される α 運動ニューロン群を制御するのに特に重要であると報告した。Fromm(1983)はP Tニューロン活動の変化は筋力の強さよりも筋収縮の強さと関係があるかもしれないと報告した。一方、Georgopoulosら(1982)およびSchwartzら(1988)はサルの運動野活動は筋力よりもむしろ運動の方向と関係し、特別に選択された方向に対してP Tニューロン活動は増加するが、他の方向への運動では減少することを示した。運動野活動と筋力お

よび運動の方向との関連で興味深い研究が報告されている。KalaskaとHyde(1985)はサルの運動野活動は運動方向によっても変化するが、負荷に抵抗して等尺性に筋力を発揮したとき、運動野活動は有意に増加したと報告した。

Schmidtら(1974)はサルの運動野ニューロンの発射活動は自発性運動に数100 msec先行して増加もしくは減少したと報告し、運動準備期において運動野ニューロン活動が変化することを示唆した。行おうとしている運動に伴う運動野ニューロンの活動の変化が運動準備期に起こることを疑いなく示したのがTanjiとEvarts(1976)である。彼らは下記の条件で運動を開始するように訓練したサルを使って、運動しようとしている準備状態の際のPTニューロンの活動を調べた。条件とは色の異なる2つのランプによって押しあるいは引きの運動方向の指示を与えるが、ランプ点灯と同時に運動を起こすのではなくそのまま待機させ、数秒後に加えられた外力を契機として運動を開始するものである。サルのPTニューロンの活動は点灯によって運動方向を支持した後200～500 msecしてから(すなわち運動開始前に)増加もしくは減少した。このPTニューロン活動の運動開始前の変化は運動開始に先立ち、どのような運動を行おうとしているかに対応して生じたものであり、ランプ点灯から運動開始までの期間中の筋活動によるものではないことを彼らは実験をとおして確認している。随意運動の準備と関連つけて考えられる運動野ニューロン活動はKubotaとHamada(1979)によっても観察されている。Neafseyら(1978)は前肢の随意運動を行うように訓練したネコを使って実験し、運動開始の500 msec前よりも早い時期に発射活動が変化する運動野ニューロンと運動開始の250 msec前に発射頻度が著しく増加する運動野ニューロンがあることを報告した。以上の運動野ニューロン活動の知見

は動物で得られたものであるが、人間においても同様のことが起こる可能性がある。それゆえ上述の随意運動開始前および準備期における知見は人間における筋運動の調節並びに運動準備状態の形成の視点からみて重要である。前記のEvertsの研究報告(1968)は筋収縮様式によって大脳運動野の活動が異なることを示唆しており、非常に興味深く思われる。

4. 随意運動の中枢プログラミング

随意運動の発現に際して、大脳皮質運動野から脊髄 α 運動ニューロンへ送られる運動プログラムは上位中枢においてどのように形成されるかがサルまたはネコで研究されている。小脳および大脳基底核は大脳皮質運動野とならんで運動の計画およびプログラミングにとって重要な運動中枢であることが分かってきた。

Thach(1970, 1975, 1978)は運動野ニューロン活動を記録する方法⁴⁴⁾・⁴⁵⁾を小脳に応用し、前腕の筋電位開始時間との関連において運動野ニューロン活動および小脳皮質の外側部にある歯状核と小脳皮質の中間部にある中位核の各ニューロン活動を調べた。その結果、運動野と歯状核のニューロン活動は筋電位出現に約100 msec先行して変化し、中位核のニューロン活動の開始は筋電位の出現とほぼ同時であった。ManoとKanazawa(1981)は小脳皮質外側部にあるプルキンエ細胞のスパイク頻度は歯状核と同様に筋電位よりも40~50 msec先行して変化し、小脳皮質中間部にあるプルキンエ細胞のスパイク頻度は中位核と同じタイミングで変化したと報告した。これらのデータは歯状核が運動開始の指令信号形成に関与していることを示唆しているが、大脳運動野における運動開始信号の生成に小脳はいかにかかわっているかの問題が残された。Meyer-Lohmannら(1977)は運動野のニューロン発射を記録しつつ、歯状核を冷

却して一過性に歯状核の機能を停止させる実験を行った。その結果、手の運動開始が遅れると同時に運動野ニューロンの発射頻度の変化も遅れたことから、運動開始の指令信号は歯状核から大脳皮質運動野へと伝達されると結論した。Sasakiら(1981)はサルの歯状核を電気刺激し運動野上肢領域の皮質内で得られた電位が、自発性の手運動に先行して運動野上肢領域の皮質内に出現した電位と同一の分布を示すことをみだし、自発性運動に先行して出現する運動野皮質内電位は歯状核と強い関係をもつことを示唆した。Sasakiら(1979)はこのほかにサルの運動手の反対側の歯状核を含む小脳の半球を切除すると、運動前の運動野皮質内緩電位の振幅が著しく減少することを報告した。運動のパラメータ(運動の方向、速度、力)と小脳との関係については、SmithとBourbonnais(1981)がサルの手指の筋を等尺性に収縮させる実験を行い、プルキンエ細胞の発射頻度は力の変化速度に相関して変化することを発表した。このほか真野(1982)も小脳皮質外側部にあるプルキンエ細胞の発射活動は位置または力の変化速度等の動的パラメータと密接に関連しており、運動の方向や静止している時の位置や力のレベルのような静的パラメータとはあまり関係ないことを示した。YamamotoとOdagiri(1981)はネコに等尺性レバー押し運動をさせた際の歯状核ニューロンの発射頻度は力の変化速度と関係し、中位核ニューロンの発射頻度は力と相関して変化することを報告した。Thach(1978)も中位核ニューロンの発射頻度は力と比例して変化したと発表している。Chapmanら(1986)は歯状核ニューロンを運動と関連したものと反応合図に関連したものとに分類し、運動開始前に放電の変化を示す運動関連歯状核ニューロンは運動の実行の制御に寄与すると結論した。このほかにもサルの実験において、小脳は速い衝撃的な運動のプログラミングおよび開始と関係があることが示唆されている¹⁰⁹⁾。

以上の神経生理学的研究報告から、小脳皮質は運動指令の形成に関与すると共に、運動の正確な時間的パターンおよびタイミングを制御しており、運動の巧緻性や協調性を司っていると考えられている^{117), 118)}。運動のパラメータによってニューロン活動を変化させる機構が小脳に存在することは重要である。

大脳皮質下に存在する基底核が運動と関係があると認められているのは、運動に先行してスパイク発射を示す細胞が、基底核の構成核である淡蒼球および基底核の1つである線条体を構成する被殻にある^{32), 34)}からである。Horeら(1977)は2種類の追跡作業を訓練したサルの淡蒼球冷却を行い次の結果を得た。すなわち自発性に反復する運動は冷却後停止するが、視標を追跡する手の運動はほとんど影響を受けなかった。この所見から、基底核はある程度熟練した運動を自発性に行う際の中枢プログラム形成および自発運動の発現に関与していると解釈されている。Marsden(1982)も基底核は複雑な運動パターンの形成に重要な役割を担っていると考えた。被殻および尾状核からなる線条体が破壊されるハンチントン舞蹈病では、不随意運動が出現する²²⁸⁾。このことから線条体は運動に際して必要な筋を優先的に活動させ、不必要な筋を抑制する機能を有すると推定されている。以上のことから基底核は中枢プログラミングのセンターといわれている²²⁸⁾が、運動皮質内電位との関係を調べた動物実験はまだ発表されていない。

小脳と基底核の視床に対する機能的結合については、基底核から視床への入力は主に抑制性であり、小脳からのものは興奮性であることから、基底核および小脳は運動制御において異なる局面に関与すると推察されている⁸⁹⁾が、基底核および小脳からの運動信号は最終的には運動野に到達し、骨格筋を支配する脊髄 α 運動ニューロンへ伝達されるものと考え

られている。

大脳辺縁系は随意運動の発現に際しての「動機づけ」に重要な役割を果たしており、動機づけから運動・動作への過程を担う神経回路として重要視されているのは辺縁系から基底核への経路である²⁰⁷⁾。辺縁系からの神経インパルスは基底核を構成する淡蒼球を介して運動系の中枢に送られ、随意運動の発現に関与すると考えられている²⁰⁷⁾。

前頭前野¹⁰¹⁾および運動前野^{102), 158)}のニューロンは、運動方向を示す視聴覚信号が与えられてから運動開始信号までの期間に、発射活動の変化を示すことが観察されており、その発射活動の変化は運動開始信号の0.5 sec前から始まると報告されている。前頭前野および運動前野は随意運動のプログラムを形成するために働くと考えられており^{99), 100), 218)}、運動をどのように行うかの神経情報とみてよいであろう。

Kalaskaら(1983)は筋活動に先行して発火する運動関連ニューロンが頭頂連合野にあることを明らかにした。ただし活動の潜時を運動野ニューロンと比較すると約60 msec遅かった。したがって頭頂連合野における前記のニューロン活動は運動野ニューロンから入力を受ける随伴発射である可能性が強いと結論された。このほか、複雑な姿勢パターンに特異的に反応する細胞が頭頂連合野にあることもSakataら(1973)によって報告されている。酒田(1984)は運動前野に体性感覚野ニューロンとよく似た反応を示す細胞があること¹⁵⁷⁾から、運動情報が頭頂連合野において合成的に変換処理された三次元的なパターン情報は、運動前野において随意運動の空間的制御、すなわち目標に合わせて運動の方向や速度を調節する等の視覚的な運動制御に使われている可能性が強いとしている。さらに酒田(1984)は「いったん運動が始まると運動指令のコピー(随伴発射)が頭頂葉に送られる。頭頂連合野ではこの指令と実際に起こって

いる身体運動に関する視覚的ないし体性感覚的な知覚情報とを照合して正確な調節に必要な信号を送り返す。このような情報のやりとりが運動の終了まで続くのであろう」と推察している。

補足運動野ニューロンに関しては、運動に先行した活動は見られるものの運動の遂行そのものに関与しているのではなく、特定の感覚入力を適切な運動へと結びつける過程または運動を制止する過程に関与しているとみられている¹⁹⁵⁾。

随意運動に先行する運動中枢活動を中心に記述したが、運動を開始する際の脳内の神経情報の流れはまだ不明なところが多く極めて複雑なためその記述は簡単ではないが、ある考えにもとづく随意運動の発現に係わる主要な神経信号の流れの模式図がいくつか発表されている。Fig. 1はAllenとTsukahara(1974)の模式図を改変¹³³⁾したものであり、Fig. 2は久保田(1982)によるものである。これらの2つの図においては、随意運動の開始に先行して発火するニューロン、もしくは発射活動が変化するニューロンが見つかっている大脳皮質領野およびそのほかの運動中枢は視床とともに運動野の左側に配されている。久保田(1982)の模式図において視床は描かれていないが、Fig. 1に示されているように、小脳外側部からの出力信号は視床を経由して運動野に達すると神経生理学の領域では認識されている。Fig. 1とFig. 2の違いは「運動の指令」がFig. 2において区分されていることである。Fig. 3はRequinら(1982)が考えた反応運動における運動準備の3段階モデルである。久保田の模式図(Fig. 2)における脳内情報の流れの4段階区分(行動のプログラム、運動のプログラム、運動の指令、運動の実行)は、本研究との関連で非常に興味深い。

随意筋収縮の開始には筋紡錘を支配する γ 運動ニューロンが先ず関与

する^{40), 65)}と考えられた時代があった。しかしながら、筋収縮の開始時の筋紡錘応答を研究したVallbo(1971)は、 γ 運動ニューロン、筋紡錘および求心性のgroup Ia線維からなる紡錘運動系(fusimotor system)は随意収縮の開始に参加せず、骨格筋活動は上位中枢からの下降信号によって始まることを示し、それまでの仮説を否定した。Burkeら(1980)もこれを支持する報告を行っている。Kornhuber(1971)は短時間で終わる衝撃性の随意運動の実行に際し、末梢からの感覚入力によるフィードバックで運動を調整している時間的余裕はないので、あらかじめ準備された中枢プログラムがそのまま実行されると考えた。その後Lamarreら(1978、1980)およびBioulac and Lamarre(1979)は単純で衝撃的な随意運動はフィードバック信号なしに制御されることを証明した。

このように、大脳皮質の運動に関係する部分は、運動野、前頭前野、運動前野、頭頂連合野、補足運動野にまたがり、小脳、大脳基底核はこれらの大脳皮質領野と密接に結合しあい、随意運動の開始に際してはこれら全体が協力しあっている。運動のプログラムは補足運動野、運動前野から直接に、あるいは小脳外側部を介して運動皮質へと伝達されると考えられている。TanjiとKurata(1982)は運動野が脳からの運動指令の出口に位置することを示すデータを発表している。

5. 運動関連脳電位とその構成成分

ここでは運動関連脳電位のうち、特に運動前脳電位について記述する。運動関連脳電位の頭皮上からの記録は基準電極導出(単極導出)によって行われることが多く、双極導出もまれに行われる。

随意運動に伴う人間の脳電位の記録は1951年Batesによって脳波を写真重畳する方法で最初に試みられ、運動開始の20~40 msec後に運動肢

と反対側の脳中心部から陰性電位が記録されたことが報告されている。しかしながら、運動前に特定の脳電位を記録することはできなかった。その後長らくこの方面の研究は進展しなかったが、電子計算機による脳電位の加算平均が可能になってから運動開始前後の脳電位に関する基礎的研究が相次いで行われた^{9), 10), 11), 12), 14), 17), 25), 27), 28), 29), 56), 57), 58), 75), 76), 77), 94), 97), 105), 106), 107), 111), 112), 113), 140), 143), 144), 145), 146), 171), 172), 173), 175), 176), 177), 215), 217)}。

人間の随意運動に先行する脳電位を記録するのに初めて成功したのは、KornhuberとDeecke(1964)であった。彼ら(1965)は随意運動開始の1～1.5 sec前に始まる陰性緩電位と運動開始後30～90 msecしてから始まる複雑な陽性電位を見だし、その後の研究においてDeeckeら(1969, 1973, 1976, 1977)は運動前脳電位が3成分からなることを報告した。3成分とは、運動開始の約1 sec前に始まる陰性緩電位(Bereitschafts potential, readiness potential, BP)、80～90 msec前に始まる陽性電位(promotion positivity, PMP)そして50～60 msec前に出現し始める陰性電位である。三番目の陰性電位は双極導出で記録できる電位であり、運動電位(motor potential, MP)と呼ばれている。BPは頭皮上において運動側に関係なく左右対称性に広汎に出現し、運動開始の400 msec前頃から運動肢と反対側の頭皮上でその振幅がわずかに優位となり、150 msec前になると振幅の対側優位に関する左右差が統計的に有意になったと報告されている²⁷⁾。

GildenとVaughanら(1966)も随意動作に伴って生じる3つの電位成分を報告し、その後、Vaughanら(1968)は運動前脳電位成分としてN1、P1、N2を同定し、運動開始後の成分としてP2を認めた。N1はDeeckeら(1969)のBPに対応する成分と考えられている。Vaughanら(1968)は運動

開始直前の P 1 および N 2 成分のうち、P 1 の出現は不安定で信頼性はないが N 2 は常に出現したと報告した。

このように運動関連脳電位研究の初期においては、運動関連脳電位は 4 成分からなると考えられたが、その後の研究⁵⁶⁾において、少なくとも 8 成分が識別されると報告され、複雑な構成であることが示唆された。Shibasakiら(1980a)は多チャンネル同時記録による頭皮上分布を検討し、運動開始前後にそれぞれ 4 成分の計 8 成分を見いだした。運動開始前の 4 成分についてみると、先ず運動開始時点の 1 ~ 1.5 sec 前から陰性緩電位が左右対称性に出現し (BP 成分)、運動開始時点の約 500 msec 前になると、運動肢と反対側の脳半球 (対側半球) でこの BP の勾配は急峻になる (negative slope, NS' 成分)。運動開始時点の 50 msec 前には小さい陽性電位 (P-50 成分) が運動肢と同側の脳半球 (同側半球) に出現し、さらに 10 msec 前には対側半球に小さい陰性電位 (N-10 成分) が出現する。Deeckeら(1976)は成分としてではないが NS' に相当する電位変化を報告しており、その出現は Kutas と Donchin (1977, 1980)、Libetら(1982)および Barrettら(1986)によっても認められている。Shibasakiら(1980a)は P-50 成分および N-10 成分と Deeckeら(1969, 1976)の運動前陽性電位 (PMP) および運動電位 (MP) とでは出現時間的に少々異なるが、それぞれ相当する成分であると考えた。Vaughanら(1968)が運動開始直前に同定した N 2 に関しては、その出現が運動開始時点よりも遅いとする報告がいくつか出され、N 2 が Deeckeら(1969, 1976)が双極導出した MP と対応するかの議論が交わされた。Arizzo と Vaughan (1980) はサルの大脳皮質内記録による結果から、N 2 電位は筋電位出現の約 90 msec 前に出現する N 2 a 成分と、筋電位出現後に出現する N 2 b 成分に分離することができ、N 2 a は対側半球の中心前

野の狭い領域に限局して現れると報告した。現在、この N 2 a は Deecke ら (1969, 1976) の M P と相当する電位であると考えられている。Vaughan ら (1968) の P 1 成分が Deecke ら (1969, 1976) の P M P と対応するかはまだ明らかにされていない。

これまでに報告されている運動前脳電位の成分を Deecke ら (1976) および Shibasaki ら (1980a) が報告している成分名称を使用すると、第 1 番目の成分として運動開始の約 1 sec 前から出現する B P、次いで約 500 msec 前に出現し始める N S'、そして運動開始直前に出現する P M P および M P の 4 成分ということになる。B P は他動運動では出現しないので、随意運動開始の準備状態を反映していると考えられている^{145), 172)}。サルの大脳皮質の運動野、運動前野および体性感覚野において各領野の表面と深層部に電極を入れ、層的フィールド電位を研究した Sasaki らの研究グループ⁵⁴⁾は、随意運動に約 1 sec 先行して運動前野、運動野、体性感覚野に漸増的に生じる興奮性シナプス電位 (E P S P) は、浅層性視床大脳皮質投射路によって比較的表層部に生じる E P S P が主成分であることを明らかにした。佐々木 (1987) は人間の運動前陰性緩電位 (B P, N S') も浅層性視床大脳皮質投射の活動による皮質錐体細胞尖樹状突起の E P S P が主成分をなすものと考えている。また Sasaki ら (1976) は浅層性視床大脳皮質投射を運動前野と運動野上肢領野へ送る視床 V A - V L 核は小脳外側核 (歯状核) の強い興奮作用を受けることから、手の運動発現に先立って小脳外側部が活動し、運動前野および運動野を賦活していると推察した。最近 Neshige ら (1988) は N S' が頭骸骨下の硬膜下記録でも記録されること、および動かした手指に対応した運動野に非常に限局して出現することを人間において明らかにした。この知見は N S' が運動に特異的な運動皮質の準備状態を反映した電位であ

ることを示唆するものである。Schmidtら(1974)およびTanjiとEvarts(1976)が運動準備期に観察したP Tニューロンの発射活動は、運動前陰性緩電位(B PおよびN S')に相当すると考えられている^{169), 170)}。ネコの運動野ニューロンには運動準備期の早い時期に活動し始めるものと後期になって、すなわち運動開始により近い時期になってから活動するものがある¹³⁹⁾が、B Pはこの早期活動に相当し、N S'は後期活動に相当すると考えられている^{169), 170)}。P M Pはおそらく運動開始と関連した大脳皮質活動を反映しているとみられており、M Pはその出現部位および運動開始との時間関係から、運動皮質の錐体路細胞の興奮を反映していると考えられている²⁷⁾。このように運動関連脳電位の研究は数多くあるが、肢位の変化よりも筋力の発揮に先行してより一層増加するP Tニューロン活動⁴⁷⁾と関連つけて考えられる運動前脳電位成分はまだ報告されていない。このほか、P S Pと出現時間的に対応した脳電位成分も報告されていない。P S Pが上位中枢性の現象であるならば、その出現と対応した脳電位が記録されることが考えられる。

運動関連脳電位(Movement-related cortical potential, M R C P)と類似した頭皮上電位として、Walterら(1964)によって発見された随伴陰性変動(Contingent negative variation, C N V)が知られている。C N Vは種々の生物的・心理的・薬理的・社会的要因によって変動するが、中でも心理的要因(注意、予期、動機づけ等)が重視されており、その記録には反応動作を起こさせる反応合図(または命令刺激)と予告合図(または警告刺激)が必要である¹³⁸⁾。M R C Pは自発性の随意運動に伴って記録される電位であるが、C N Vは上述したように反応運動において記録される電位であり、この点が最も大きな相違点である^{169), 170)}。このほかの相違点として頭皮上分布があり、M R C Pは中心部か

ら頭頂葉前部でその振幅が最大であり、運動直前に対側優位となるのに対し、CNVの振幅は前頭部ないし中心前部で最大であり、左右対称性である^{169), 170)}。また電位の振幅はCNVの方が大きく、CNVの中にMRCP成分が包含されていると考えられている^{169), 170)}。

6. 随意運動開始前の表面筋電位の変化

腰部伸展による錘の挙上運動においてPSPの出現様相を調べていた著者(1983)の実験中に、持続性筋放電に2つの興味ある変化が起こった。1つは相動性筋放電の前における鋸歯状の表面筋電図波形の出現であり、もう1つは反応合図の約400 msec前に始まる持続性筋放電の徐波化であった。この徐波化の初期には鋸歯状の筋電図波形が観察された。鋸歯状の表面筋電図は、ピークとピークの時間間隔が20-30 msecのリズミカルな波形であるため、Rhythmic Slower Wave (RSW)と名付けられた。このような運動開始の数100 msec前における筋電位変化と運動前脳電位成分の1つであるNS'¹⁷¹⁾の関係はまだ研究されておらず、上位中枢における運動の準備との関連において非常に興味深く思われる。鋸歯状の筋電図と非常によく類似した表面筋電図波形は、川初(1979)の表面筋電位記録に見ることができるが、彼は完全に筋電位が消失しなかった不完全PSPの記録例として示しているだけであり、それ以上のことはまったく言及していない。このように持続性筋放電の波形の変化および変化した筋電図波形そのものに関する研究は全く行われていない。

7. 検討すべき問題

上記の文献研究から、末梢性現象であるRSW、PSPが中枢における運動準備状態の形成および運動開始命令並びに筋運動の調節と関連が

あるかどうかを検討するために、今後必要とされる問題点を挙げると次のようになる。

1) R S Wが運動準備との関連で意味のある現象であるか、さらに神経活動を反映した生理現象であるかは明らかでない。

2) R S Wが運動準備と関連性があるならば、R S Wとして表出しなくても表面筋電位の周波数成分に変化の起こる可能性が考えられるが、運動準備期の筋電位周波数成分の変化を検討した研究はない。

3) 自発性随意運動開始前の準備期における持続性放電の徐波化、R S Wへの変化および消失現象であるP S Pと運動前脳電位成分との出現時間関係が明らかにされていない。

4) 末梢性電位変化であるP S P、R S Wおよび中枢性の電位である運動前脳電位成分に筋収縮様式がいかに影響するかは研究されておらず、加えて、P S Pの機能的役割が筋収縮様式との関連で検討されていない。

Ⅲ 研究目的および研究課題

本研究の目的は、筋電位の記録および表面筋電位と運動関連脳電位の同時記録を行い、RSWが脳における特異的な運動準備状態の形成活動の脊髄への投射によって起こる神経活動を反映した現象であるか否か、およびPSPは運動開始命令と関連した上位中枢性の現象であるか否かを検討し、RSWおよびPSPと上位中枢における筋運動調節との関係並びにRSW、PSPの機能的役割を運動生理学的に明らかにすることである。

本研究目的の達成のために、以下の問題を設定して実験を行った。

1) RSWの出現様相

RSWが運動準備と関連した現象であるかを検討するため、RSW出現に及ぼす負荷重量の影響をみると共に、運動に参加する筋群におけるRSW出現の有無、RSWの出現時間およびRSWとPSPの出現関係を分析する。(実験1)

2) RSW出現中の運動単位活動

RSWがどのような運動単位活動によって出現するかを検討する。(実験2)

3) 反応運動における予告合図が筋電位周波数成分に及ぼす影響

予告合図前後の表面筋電図波形および周波数成分を比較し、予告合図から反応合図までの運動準備期に表面筋電位が周波数的におよび波形的に変化するかを検討する。(実験3)

4) 随意運動開始前の表面筋電位変化と運動前脳電位変動との時間関係
自発運動を行わせた際の2つの末梢性電位変化現象(RSWおよびPSP)の出現時間と中枢性の運動前脳電位変動の起始時間の関係を調べ、RSWおよびPSPが運動プログラムと関連した上位中枢性の現象であるかを検討する。(実験4)

5) 筋収縮様式が随意運動開始前の表面筋電位変化および脳電位構成成分に及ぼす影響

外的負荷の無い状態での素早い関節運動および急激な等尺性筋力の発揮を自発性に行うことを条件とした実験を行い、RSWとPSPの出現および運動前脳電位成分に対する筋収縮様式の影響をみると共に、RSWおよびPSPが筋運動調節と関係があるか、およびそれらの機能的役割は何かを検討する。(実験5)

実験2および実験3は予告合図を伴った反応運動で行った。その理由はCNVの中にMRCP成分が含まれていると考えられている^{169), 170)}ところから、RSWが出現しやすいと考察した結果による。

IV 随意運動の開始前における表面筋電位波形の変化について（実験1）

1. 目的

FloydとSilver(1951)は立位姿勢から上体を前屈していき、深屈状態になると脊柱起立筋の筋電位が消失することを認めた。この脊柱起立筋の筋電位消失は骨盤傾斜角度と前屈度が一致し、肩峰点、上前腸骨棘点および転子点を結ぶ線が直線になるときに起こることが明らかにされている^{192), 193)}。このことは深い前屈姿勢における脊柱起立筋の筋電位の消失はその姿勢の保持のために脊柱起立筋の活動を必要としない身体構造的な要因によるものであることを示唆している。一方、著者の研究(1983)において随意運動に先行して観察された脊柱起立筋の筋電位消失はP S Pと呼ばれ、これまで四肢による反応運動において研究されてきた生理的現象である。

著者の研究(1983)におけるP S Pの出現結果は腰を伸展する際に外的負荷を与えなかった条件下よりも与えた条件下において、その出現頻度は高く持続時間も長かった。この結果からP S Pは筋収縮の速度とだけよりもむしろ速くてしかもより強い収縮のための運動準備と関連があると考えられた。このほか、筋電位のピーク間隔が20 - 30 msecである規則的な周期性を持つR S Wおよび徐波化した表面筋電図(slower wave、S W)が腰部伸展運動前に脊柱起立筋から記録されたことが報告された。随意運動開始前の準備期におけるR S Wおよび表面筋電位の徐波化現象については研究されておらず、これらの筋電位現象が運動発現の準備と関連があるならば、負荷条件の影響を受けることおよび脊柱起立筋以外の筋からも記録されることが考えられる。

そこで、本実験は、R S Wが運動準備との関連で意味のある現象であ

るかを検討するために、RSW出現への外的負荷重量の影響をみるとともに、脊柱起立筋以外の筋におけるRSWの出現の有無、RSWの出現時間およびRSWとPSPの出現関係を分析した。

2. 方法

年齢が22～37歳の5名の健康な男子に、立位前屈姿勢から急激に自発的腰部伸展を行わせた（Fig. 4）。この立位前屈姿勢とは膝を伸ばし腰を屈曲（前屈）した状態で脊柱をやや伸ばし、足を肩幅ほどに開いた姿勢である。その際の前屈角度は50度であり、右側肩峰点と右側転子点（股関節）を結ぶ線が右側転子点を通る垂線によって作られる背中側の角度である。前屈度が50度より浅いと、腰を急激に伸展させた際上体が後傾し危険である。また前屈度が深いと、全身的に筋負担が大きく、疲労しやいとともにより速い動作がしにくい。このため、本実験では前屈度を50度とした。このような立位前屈姿勢の保持は脊柱起立筋の非常に弱い持続性筋収縮を伴うので、随意運動の開始前の準備期において予備緊張を課したことになる。

腰部伸展運動は外的負荷の有または無条件のもとで行われた。外的負荷は被験者の前の台に置かれた2.5、5.0、10.0、15.0および20.0kgのいずれかの錘を引き上げることで行った。台の高さは被験者の身長に合わせて調節された。錘は両手で持ち、錘の引き上げに際しては両肘を曲げないようにさせた。この負荷によって、腰部伸展と同時にこの錘の重さが両手を介して急に被験者に加わることになる。腰部伸展運動の試行回数はそれぞれの外的負荷重量ごとに10回であり、外的負荷のない条件においても10回行い、試行数の合計は60回であった。錘の試行順序は無負荷を含めてランダムとし、試行間に休憩を適宜取らせた。

実験中、第1腰椎(L1)および第4腰椎(L4)レベルの右側脊柱起立筋(Erect. sp.)、右側大臀筋(Glut. max.)および右側半腱様筋(Sem itend.)から双極誘導表面筋電位(EMG)を導出し、時定数0.03 secで増幅した。電極間距離は2 cmとした。また、股関節運動曲線(Gonio. out)を右股関節に付けた電気角度計によって記録した(Fig. 4)。

3. 結果

Fig. 5は筋電位ピーク間隔が20-30 msecであるRSWが脊柱起立筋のPSPの前および半腱様筋の相動性放電の前で出現したことを示しており、被験者FSから記録したデータである。半腱様筋の持続性放電のRSWへの変化は非常に鮮明である。L1およびL4レベルの脊柱起立筋におけるRSWは相動性放電の135 msec前に出現した。脊柱起立筋(L4)のRSW出現の約145 msec前に持続性放電が徐波化したSWが観察された。また、準備期における脊柱起立筋(L1)の筋電位は相動性放電の約500 msec前に振幅の増加を伴いながらSW化した。半腱様筋におけるRSWの出現は相動性放電の233 msec前であり、その60 msec前に徐波化が起こった。電気角度計の出力はRSWの出現と同時に変化しなかった。PSPは大臀筋にも出現した。

Fig. 6はRSWが脊柱起立筋(L4)、大臀筋および半腱様筋に出現した代表的な記録であり、被験者SDから記録したものである。RSWの筋電位ピーク間隔は被験者FS(Fig. 5)と同じである。準備期における脊柱起立筋(L4)の表面筋電位は相動性放電の約240 msec前でSWへ変化し、相動性放電の約175 msec前になるとRSWへと移行した。RSWの振幅に増加傾向がみられた。大臀筋のRSWは脊柱起立筋(L4)筋電図のSW化とほぼ同時期に出現し、その振幅は出現と同時

に増加した。半腱様筋の相動性放電はほかの筋のそれよりも早期に出現し、準備期の持続性放電は相動性放電の約140 msec前でRSWへ変化した。半腱様筋の相動性放電のより早期の出現は被験者全員に共通していた。脊柱起立筋(L1)の持続性放電は相動性放電の約500 msec前でRSWへ変化した後、SWへ移行した。その後相動性放電が出現するまでの間に振幅の大きい筋電図ピークが時々出現した。

Fig. 7はRSWの振幅増加の典型的記録を示しており、被験者SMから得たものである。RSWの筋電位ピーク間隔は被験者FS (Fig. 5) および被験者SD (Fig. 6) と同じである。鋭く尖った筋電位ピークが脊柱起立筋(L1)におけるPSPの前に見られる。この筋の持続性収縮中の表面筋電位は相動性放電の約420 msec前で突然RSWへ変化した。大体同時期に脊柱起立筋(L4) および大臀筋の表面筋電位もSWへと徐波化した。脊柱起立筋および大臀筋におけるPSPの出現とほぼ同時に半腱様筋の活動は突然減少した。

Fig. 8は4部位から導出した表面筋電位にPSPが観察された記録例であり、被験者SMから記録したものである。脊柱起立筋と大臀筋におけるPSPの出現は同時であったが、半腱様筋のPSPはそれよりも約40 msec遅れて出現した。しかしながら、半腱様筋の相動性放電の出現はほかの筋の相動性放電よりも早期であった。脊柱起立筋(L4) および半腱様筋の持続性放電はPSP出現の直前にSWへ変化した。脊柱起立筋(L1)の持続性放電は相動性放電の約450 msec前でRSWへ変化した。

Table 1はRSWの出現頻度を被験者毎にまとめたものであり、PSPに先行して出現したRSWを含めた値である。RSWは3名の被験者に観察され、そのうち2名からしばしば記録された。最も多く出現した

のは第4腰椎レベルの脊柱起立筋であり、その頻度のうち、PSPに先行して出現したRSWの頻度は、被験者SDで5回、被験者FNで20回、被験者SMで4回であった。RSWの出現に対する負荷重量の影響はなかった。

Fig. 9はRSWおよびSWの出現時間の度数分布を示している。RSWが出現する形態としては、Fig. 5、Fig. 6およびFig. 7で見たように持続性放電から突然RSWへ変化するほかに、SWに続いてRSWが出現することがあった。この場合のSWは持続性放電がRSWへ移行する過程において出現すると考えられる。それゆえ、RSWに先行してSWが出現した場合、SWの出現時間をFig. 9のデータとして採用した。さらにPSPの出現の有無に係わりなく、RSWを伴わないSWの出現時間もデータとして扱った。このほか、脊柱起立筋(L4)の欄にはRSWだけの出現時間頻度も描かれている。RSWおよびSWが相動性筋放電の500 msec前以前に出現したのはL1レベルの脊柱起立筋だけであり、いずれの筋においても300 msec以内の出現時間が半数以上を占めた。出現率で見ると脊柱起立筋(L1)で67.4%、脊柱起立筋(L4)で85.9%、大殿筋および半腱様筋においてはそれぞれ83.3%および87.2%であった。脊柱起立筋(L4)におけるRSWだけの出現時間も同様で、300 msec以内の占める割合は87.9%であった。脊柱起立筋(L1)の出現時間の大部分は500 msec以内の範囲内に分布し、その割合は93.5%であった。RSWとSWを合わせた出現時間の平均は第1および第4腰椎レベルの脊柱起立筋でそれぞれ293 msecおよび202 msecであり、大殿筋と半腱様筋における平均出現時間は219 msecおよび214 msecであった。

Table 2はRSWの最高出現頻度を示した脊柱起立筋(L4)におけ

る R S W と P S P の各出現率および P S P の平均持続時間を示している。Table 2 における R S W の出現率も P S P に先行して出現した R S W を含む値である。R S W の出現率が最も高かった被験者 S D の P S P の出現率および持続時間は最も小さい値であった。R S W の出現率が次いで高かった被験者 F N の P S P 出現率は被験者 S D よりも高いが、R S W 出現率が非常に低いかあるいはゼロの被験者 3 名 (S M、T N および M D) と比較した場合低かった。さらに被験者 F N の P S P 持続時間は前記の 3 名の被験者よりも明らかに短かった。要するに、Table 2 は R S W の出現率が高い被験者の P S P 出現率は低く、その持続時間も短いこと、およびその逆のこともいえることを示している。

4. 考察

筋電位ピーク間隔が 20 - 30 msec である R S W は 軀幹筋および脚筋から記録され、その筋電位ピーク間隔は被験者間で同一であった。股関節につけた電気角度計の出力が準備期間中に変動しなかったことは、立位前屈姿勢が運動開始前に変化しなかったことを示している。これらの結果から、R S W は生理現象であると考えられる。

R S W の出現は負荷重量の影響を受けなかった。しかしながら R S W および S W の早期出現および被験筋間での R S W の同時出現は R S W および S W が急激な筋運動の中枢性準備と関連があるらしいことを示唆している。

著者の研究(1983)においては、R S W の振幅増加は見られなかったが、本実験においては R S W の振幅の増加が観察され、S W および R S W の出現中に運動単位活動の変化、例えばその活動の同期化が起こったことが推察される。

5名の被験者はRSWが多く出現した群とPSPが多く出現した群に分かれた。このことはPSPとRSWの出現機序が同一であるかもしれないことを示唆している。拮抗筋のない脊柱起立筋および大臀筋におけるPSPの出現はPSPが相反性神経支配による抑制現象でないことを示している。

5. 要約

筋電位ピーク間隔が20-30 msecであるRSWが随意運動の開始の準備と関連があるか否かを検討するために、RSW出現への外的負荷重量の影響、脊柱起立筋以外の筋におけるRSW出現の有無、RSWとPSPの出現関係およびRSWおよびSWの出現時間を調べた。5名の被験者に立位前屈姿勢から急激な腰部伸展運動を自発的に行わせた。運動開始に際して2.5、5.0、10.0、15.0、20.0kgのいずれかの錘を引き上げさせた。腰部伸展運動の試行回数は負荷重量毎に10回であった。このほかに外的負荷のない条件においても10回行った。第1腰椎および第4腰椎レベルの右側脊柱起立筋、右側大臀筋および右側半腱様筋の4部位から双極誘導表面筋電位を導出した。得られた主な結果は次のとおりである。

1) 負荷重量の増大にともなってRSWの出現頻度が増加する傾向はなかったが、RSWは3名の被験者に出現し、その筋電位ピーク間隔は被験者間および被験筋間で同一であった。RSW振幅の増加が観察された。

2) RSWのほかに、徐波化した筋電図(SW)が単独にあるいはRSWに先行して出現した。これらの筋電図は相動性放電の300 msec前の時点を過ぎてから出現することが多かった。

3) R S W は R S W が観察された 3 名の被験者のうち 2 名からしばしば記録されたが、この 2 名の P S P 出現率は非常に低かった。一方、R S W が出現しなかった 2 名の P S P 出現率は高かった。

4) P S P が拮抗筋のない脊柱起立筋および大臀筋から記録されたことは、P S P が相反性抑制によるものでないことを示唆している。

5) R S W への負荷重量の影響はなかったが、R S W、S W の出現時間および筋電位ピーク間隔の結果から、R S W は S W と共に上位中枢レベルにおける随意運動の開始のための準備と関連した脊髄 α 運動ニューロン活動の意味のある変化であると考えられる。R S W はその振幅の増加から考えて運動単位活動の同期化の程度を反映した生理現象であると推察される。R S W と P S P の出現率の関係はこれら 2 つの現象の出現機構が同一である可能性を示唆している。

V 随意運動に先行する運動単位活動の変化と律動的表面筋電図（RSW）（実験2）

1. 目的

実験1においては、RSWの振幅が増加したことから、その出現中に運動単位の同期化活動が起こることが推察された。

本実験は、RSWの20-30 msecの筋電位ピーク間隔が、その時間間隔で起こる運動単位の同期化活動に依存しているか否かを明らかにするために行った。

2. 方法

年齢が23-25歳の3名の健康な男子に、前屈度50度の立位前屈姿勢を保持した状態から反応合図（S2）に応じて急激に腰部を伸展する反応運動を行わせた（Fig. 10）。被験者に腰部伸展運動のための立位前屈姿勢を保持させた後に反応運動の予告合図（S1）を与えた。S2の提示はS1の2秒後に行い、いずれも音合図とした。

反応運動においては、被験者の前の台上に置かれた10 kgまたは15 kgの錘を引き上げさせた。両足の開き方、台の高さおよび錘を引き上げる際の両肘の条件に関しては実験1と同一であった。

第4腰椎レベルの右側脊柱起立筋から双極誘導表面筋電位と運動単位活動を同時に記録した（Fig. 10）。表面電極の間隔を2 cmとし、導出した表面筋電位を時定数0.01 secで増幅した。いくつかの運動単位から活動電位を記録するために、高インピーダンス特性のタングステン針電極を使用した。この針電極を皮膚に装着した一対の表面電極間の中央に刺入し、この場合の基準電極として使用した表面電極を針電極近くの

皮膚に装着した。運動単位の活動電位は差動前置増幅器（W P社製、D A M - 6 A）で増幅した後、直流増幅器でさらに増幅して記録した。表面筋電位および運動単位の活動電位をデータレコーダに収録し、実験後電磁オシログラフに記録した。

3. 結果

Fig. 1 1 は被験者 A からの記録である。R S W は振幅の増加を伴って反応合図の約 2 3 0 msec 前に出現し、この増加した振幅は反応合図の約 1 2 5 msec 前に減少するとともに S W へ移行した。S W 出現中、表面筋電位のピーク間隔は 2 0 - 3 0 msec よりも長くなり、不規則な時間間隔になった。いくつかの運動単位の同期性放電が R S W の筋電位ピークおよび不規則な時間間隔での表面筋電位ピークと対応して観察された。針電極で記録した活動電位における背景放電は R S W 出現とともに減少した。

Fig. 1 2 は相動性放電に先行して記録された持続性放電の様々の変化を示している。Fig. 1 2 A においては、持続性収縮中の表面筋電位が S 2 の提示終了直前に R S W へ変化し、これに続いて相動性放電が出現した。R S W の振幅は増加しなかった。R S W の下向きの 2 つの筋電位ピークは運動単位の同期性放電と対応した。Fig. 1 2 A の筋電図も被験者 A から記録したもので、この被験者の R S W と S W を合わせた出現率は 6 0 % で、P S P のそれは 6 5 % であった。

被験者 B から記録した Fig. 1 2 B においては、1 つの表面筋電位ピークをもった S W の出現後に P S P が出現している。P S P の出現は表面電極および針電極による筋電位記録に同時に観察された。針電極によって記録された背景放電は S W の出現と同時に消失した。S W の筋電位ピ

ークは背景放電の消失後に出現した同期性の運動単位活動と対応した。被験者BのRSWとRSWを合わせた出現率は35%であり、PSPの出現率は55%であった。

Fig. 12Cは被験者Cから得られたデータであり、PSPが表面電極記録および針電極記録の両方に同時に出現したことを示している。持続性放電はPSPの前で変化しなかった。被験者CにおけるPSP出現率およびRSWとSWを合わせた出現率はそれぞれ50%と5%であった。

4. 考察

RSWの筋電位ピーク間隔が20-30 msecであるのは、その時間間隔で起こる運動単位の同期化活動のためであることを得られた結果は示している。RSWの振幅は同期化の程度に依存していると考えられる。

RSWの筋電位ピーク間隔のリズムは、最大筋収縮中の表面筋電図に観察される30-50 Hzの周波数のPiperリズム¹⁾と同じである。Piper波の出現中の運動単位活動電位の不連続バーストはサイズの的にも空間的にもPiper波とよく一致することが示されている¹²⁵⁾。Piper波のリズムおよび振幅はプロカイン麻酔によるγ神経線維のブロックでより遅く、より大きくなることが報告されている¹⁰⁴⁾。

RSW出現中の背景放電の減少および消失はその出現期間における運動単位活動の減少を示唆している。Fig. 12の結果はPSPの出現メカニズムがRSWの出現にも関与している可能性を示唆しており、脊髓α運動ニューロンへの抑制性の入力があるRSWを出現させると考えられる。反応合図前の準備期におけるRSWの出現は、RSWが随意運動を始めるための運動準備と関連があるという考えを一層強くさせる。

動物のRenshaw細胞の研究によると、Renshaw細胞はいくつかの運動中

枢、例えば運動皮質から興奮性および抑制性の制御を受け⁶⁴⁾、またRenshaw細胞を介した反回性抑制は大きな相動性の α 運動ニューロンに対してよりも小さな緊張性の α 運動ニューロンに対してより強く作用する³⁸⁾、⁶¹⁾。筋紡錘の活動を調節する γ 運動ニューロンもまたRenshaw細胞から反回性抑制を受ける⁴¹⁾。これらの知見から、PSPの出現メカニズムとしてRenshaw細胞の関与を考えることができる (Fig. 13)。その理由は、脊柱起立筋の弱い持続性の収縮中に、脊柱起立筋を支配する緊張性の α 運動ニューロンは γ 運動ニューロン→筋紡錘→グループIa線維→緊張性 α 運動ニューロンの経路、すなわち γ 環を介しても動員されていたと考えるれるからである (Fig. 13)。三田ら(1982b)はPSPの出現に先行して筋電位振幅が減少すること、およびPSPの出現がなくても相動性放電の前で筋電位振幅の減少が起こることを報告した。しかしながら本実験結果はRSWおよびPSPが筋活動の減少をもたらす単純な神経制御によって説明されないことを示唆している。

反回性抑制は運動ニューロンの放電に関するsilent periodの初期の部分に寄与することがネコで明らかにされている⁵⁾。逆行性の神経衝撃によって引き起こされた反回性抑制の期間は α 運動ニューロンに対して20-50 msecであり、 γ 運動ニューロンに対しては5-40 msecであることがネコの実験において知られている⁴²⁾。この α 運動ニューロンに対する抑制期間は逆行性神経衝撃によって誘発されたネコのRenshaw細胞の初期高頻度発射の期間¹⁵⁴⁾と一致する。Renshaw細胞が最初の初期発射終了後に興奮性を入力を受けたとき、Renshaw細胞の初期高頻度発射は再び誘発される²⁴⁾、¹⁵⁴⁾。さらにRenshaw細胞への興奮性入力の増加はRenshaw細胞の放電の期間を延長することがネコにおいて示唆されている⁵⁾。ヒトにおいてもRenshaw細胞を介する反回性抑制回路がsilent periodを

生じさせることが示されている¹⁹⁾。ヒトのRenshaw細胞は弱い持続性の随意収縮中、上位中枢活動によって促通を受けること⁶⁹⁾、およびP S Pが最も出現しやすい持続性筋収縮水準は最大筋力の10%以下であること¹²⁸⁾が知られている。これらのことから、人間におけるRenshaw細胞がネコのRenshaw細胞と同じ放電特性をもつならば、R S Wの出現中における運動単位の活動電位の出現間隔はRenshaw細胞の前述の放電特性と関連つけて考えることができるであろう。

前述したRenshaw細胞に関する知見から、Fig. 11における相動性放電の前の表面筋電位の変化は脊髄運動ニューロンに対して次第に増加した抑制効果を表していると思われる。またFig. 12の結果は脊髄運動ニューロン群の抑制の程度によって説明することができる。本実験はR S WおよびS Wの出現中、脊髄運動ニューロンの上位中枢性の抑制があることを示唆している。

5. 要約

本実験は、R S Wが20 - 30 msecの間隔で起こる運動単位の同期化活動によって出現する生理現象であることを明らかにするために行った。実験中、双極誘導表面筋電位とタングステン針電極による筋電位を同時に記録した。運動は音による反応合図に応じて行う急激な腰部伸展であった。その際10 kgまたは15 kgの錘を引き上げさせた。得られた主な結果は次のとおりである。

1) いくつかの運動単位の同期性放電がR S Wの出現中に20 - 30 msecの一定の間隔で記録された。

2) R S Wの表面筋電位ピークは一定間隔での運動単位の同期性放電と時間的に対応した。

3) R S Wの振幅は持続性放電の振幅よりも増加する場合と、変化が見られない場合があった。

4) R S Wが相動性放電に先行して出現した試行と、反応合図前に出現した試行があった。

5) R S Wの出現とともに針電極で導出した筋電位の背景放電の減少および消失が観察された。

6) 以上の結果から、R S Wは一定間隔で起こる運動単位活動の同期化の程度を反映した生理現象であることが明らかになった。S Wは運動単位の同期化活動が十分でない状態の波形と考えられる。R S Wが反応合図の前に出現したことから運動開始の準備と関連がある推察される。R S Wの出現中脊髄 α 運動ニューロンは抑制を受けているとみることができ、R S Wの出現にもP S Pの出現メカニズムが関与している可能性がある。

VI 反応運動における予告合図前後の表面筋電位周波数成分の比較（実験3）

1. 目的

R S Wが運動単位の同期化活動によるもので、運動開始の準備と関連している可能性が実験1および実験2において示唆された。反応運動における予告合図の運動準備に対する効果を考えると、予告合図後にR S Wが出現しなくても表面筋電位の周波数が変化することが考えられる。

本実験においては、上記の考えを確かめるために、随意運動開始前の表面筋電位の周波数分析を行い、予告合図から反応合図までの準備期間中の筋電位周波数成分と予告合図前の筋電位周波数成分の比較を行った。このほか表面筋電図波形の変化の有無も視察によって調べた。

2. 方法

1) 実験手順および試行数

12名の健康な男子大学生に、前屈度50度の立位前屈姿勢から腰部伸展運動を反応音合図（S2）に応じて行わせた（Fig. 14）。S2の2秒前に予告音合図（S1）を与えた。S1は被験者が膝を伸ばし背すじも適度に伸ばした状態で立位前屈姿勢を保持してから約6 sec後に提示した。被験者はS2提示前の準備期間中、立位前屈姿勢を変化させないこと、および重さ10 kgの錘を被験者の前の台から反応運動の開始と同時に速く引き上げることを求められた。台の高さは各被験者の身長に合わせて調節された。

反応運動は30 sec間隔で20回行った。筋電位周波数成分に影響する筋疲労が起きないように、5回目、10回目および15回目の試行終了

後に休憩を取らせた。

2)記録

第4腰椎レベルの右側脊柱起立筋から時定数0.03 secで双極誘導表面筋電位を導出した。電極間距離は2 cmであった。第4腰椎レベルの脊柱起立筋を被験筋として選択したのは、実験1においてRSWが最も多く出現した被験筋であったからである。S1、S2と同期した矩形波を、表面筋電位および股関節に付けた電気角度計の出力と共に、記録紙とデータレコーダに同時に記録した (Fig. 14)。

3)周波数分析

それぞれの試行におけるS1前後の表面筋電位のパワースペクトルを計算するために、ミニコンピュータ (PDP 11/40) を使用した。S1提示前の2 sec間およびS1提示後の2 sec間の表面筋電位をサンプリング周波数500 Hzでサンプリングし、S1前後の筋電位パワースペクトルを5 Hzから250 Hzの周波数帯域について、高速フーリエ変換法により求めた (Fig. 14)。要するに、S1前とS1後のパワースペクトルを一組として20組の筋電位パワースペクトルを各被験者から得た。S1後の表面筋電位の周波数成分の変化をみるために、各筋電位スペクトルの平均周波数 (Mean frequency、MF) を表面筋電位周波数成分全体を代表する周波数として計算した。また筋電位パワースペクトルのピーク周波数 (Peak frequency、PF) も求めた。S1前後それぞれ20個の筋電位パワースペクトルをミニコンピュータで平均し、その平均結果をX-Yプロッターに記録した。

脊柱起立筋からの表面筋電位記録に際し、心電位による障害すなわち

筋電位への心電位の混入は避けられない。心電位の筋電位周波数成分への影響をみるために、脊柱起立筋に貼った表面電極から記録される心電位の周波数分析を行った。この場合の心電位は脊柱起立筋が活動しないリラックスした立位姿勢の保持中に記録した。

4)統計処理

S 1 前後、各 20 個の MF の平均値と標準偏差を計算し、S 1 前後の MF の平均値の差の t 検定を行った。このほか、S 1 前後の各 PF の平均値を計算した。

3. 結果

1)心電位の筋電位パワースペクトルへの影響

心電位の周波数成分は 5 Hz から約 20 Hz にかけてであり、ピーク周波数は約 10 Hz であった。心電位が混入した状態での S 1 前後の筋電位パワースペクトルと心電図パワースペクトルとを視察した結果、心電位は S 1 前後の筋電位パワースペクトルの主成分である 40 ~ 50 Hz に影響しないことを確認することができた。それゆえ表面筋電位の周波数分析は心電位が混入した状態で行った。

2)予告合図前後の平均周波数の比較

Table 3 は S 1 前後の MF の平均値とそれらの間の差の検定結果を示している。5 名の被験者 (Z I, F U, S Z, Y S, N K) の S 1 後の MF は S 1 前の MF よりも小さく、それらの間に有意な差があった。この結果は前述の被験者 5 名の表面筋電位が S 1 後に徐波化したことを示している。

3) 予告合図前後の筋電位パワースペクトルの比較

ここでは、S 1 後に徐波化が起こった被験者のパワースペクトルおよび表面筋電位変化の結果を記述する。

Fig. 1 5 は被験者 Z I から得られた結果である。運動開始前の表面筋電位は S 1 の約 1 0 0 msec 後に R S W へ変化し、その出現は振幅の増加を伴った (Fig. 1 5 A)。S 1 提示後の電気角度計の出力は変化しなかった。S 1 後の平均筋電位スペクトルでは、3 0 Hz から 4 5 Hz までの周波数帯域の筋電位パワーが著しく増加したが、5 0 Hz 以上の周波数帯域の筋電位パワーは減少した (Fig. 1 5 B)。Fig. 1 5 B における S 1 前後の各 P F は 3 8 Hz および 3 5 Hz であった。Fig. 1 6 は被験者 Z I の総試行数 2 0 回のうち前半の 1 0 試行と後半の 1 0 試行について周波数分析した結果であり、Fig. 1 5 B と同じ結果であった。このことは 2 0 試行における S 1 前後の各筋電位周波数成分がほとんど同じであり、S 1 後の成分変化が各試行で同様に起こったことを示している。

Fig. 1 7 は被験者 F U から得られた結果である。Fig. 1 7 A は S 1 後に表面筋電位が変化した記録例であり、S 1 提示の 1. 4 sec 後に表面筋電位の S W 化が始まったことを示している。S W 化に伴った振幅の変化はなかった。Fig. 1 7 B における S 1 後の筋電位パワーは 2 0 Hz から 5 0 Hz までの周波数帯域で増加し、5 5 Hz から 6 5 Hz にかけて減少した。S 1 前の P F の平均値は 3 4 Hz で、S 1 後の平均 P F 値は S 1 前の値と変わらなかった。

Fig. 1 8 も被験者 F U から記録したもので、S 2 前での持続性放電の R S W 化と、これに続く P S P の断続的出現を示している。R S W の出現は S 2 の約 4 4 0 msec 前であり、電気角度計の出力は R S W および断続的 P S P の出現時に変化しなかった。

Fig. 19は被験者YSからの結果である。表面筋電位のSW化の始まりはS1の約0.8 sec後であり、SW化とともに筋電位振幅が幾分増加した。S1前後の平均筋電位スペクトルは、30 Hzから40 Hzにかけての周波数帯域における筋電位パワーがS1後に増加したことを示している。S1前後の各PFの平均値は約43 Hzおよび約36 Hzであった。

被験者SZおよびNKから得られた平均筋電位スペクトルは、Fig. 19Bと類似していた。

被験者SZの持続性放電がS2の提示とともにSW、RSW、PSPへと順に変化することがたびたびあった。Fig. 20はその代表的なパターンであり、SW化はS2の提示中に始まり、RSWはS2提示の終了直前に出現している。PSPの出現は相動性放電の約50 msec前であった。

4. 考察

筋電位スペクトルのS1後の変化はRSWおよびSWがS1後に出現した被験者にみられた。この結果は観察された筋電位スペクトルの変化がS1後の準備期間中の表面筋電位そのものの周波数変化であることを示している。本実験と類似した研究にOshimaとShinozaki(1979)の報告がある。彼らは生体アンプの増幅度をかなり上げることによって表面筋電位を分析し、予告合図と反応合図の間の筋電位活動が微細に変動することを報告した。

骨格筋が疲労した時、表面筋電位の振幅は増加し、徐波が出現することが知られている^{23), 115), 194)}。さらに筋疲労は表面筋電位の低周波数成分を増加させることが知られている^{90), 127), 136), 152), 191)}。しかしながら、予告合図後の徐波化は筋疲労に伴う筋電位変化と異なると思わ

れる。脊柱起立筋(L4)の持久能を調べたOkadaら(1970)は、最大筋力の30%レベルの筋力を持久させた場合、表面筋電位の徐波化は持久開始後2分を経過してから起こったことを示している。本実験の立位前屈姿勢における脊柱起立筋(L4)の活動レベルは、Okada(1972)の報告を参照して推定すると、最大筋電位振幅の20%以下であったと思われる。静的筋力レベルと表面筋電位振幅の関係は必ずしも1対1ではないが、直線関係にあり^{114), 189)}、上記の最大筋力の30%レベルと最大筋電位振幅の20%レベルは、ほぼ同レベルの筋負担であるとみることができるといえる。また電気角度計の出力からみて、準備期の前屈姿勢の変化によるものでもない。佐藤(1964)は関節の固定角度の相違による筋長の変化が周波数成分に影響することを認め、筋が伸張された状態での収縮ほど徐波成分の比率が高いことを確かめた。岡田(1987)は筋長が表面筋電図波形に及ぼす影響を上腕二頭筋と上腕三頭筋で調べ、筋長の増加に伴い明らかに徐波化の進行が認められたと報告している。脊柱起立筋の筋長は脊柱の前屈時に伸張し、前屈度が大きくなると共に伸張の度合は増すと考えられるが、本実験における立位前屈姿勢は背すじを適度に伸ばした状態であり、準備期間中の姿勢の変化は許されなかった。それゆえ脊柱起立筋の筋長は自然立位時よりも伸張されていたかもしれないが、波形および周波数成分に影響するほど伸張されていなかったと推察され、S1後の筋電位周波数成分の徐波化も脊柱起立筋の伸張によるものでないと考えられる。以上のことから、S1後の表面筋電位の周波数成分の変化は予告合図によって始まった運動準備と関連した運動単位活動の変

化のためであると考えられる。

本実験においては、RSWに続いて起こったPSPの断続的出現、および持続性放電がSW、RSWそしてPSPへと順に変化する様相が観察された。これらの筋電位変化はSW、RSWおよびPSPが同一メカニズムによって出現する生理現象であり、実験2でも考察したように、脊髄 α 運動ニューロンの受ける抑制が強められる過程を反映していると考えられる。持続性放電の変化の始まりとその変化の程度は上位中枢性の抑制機構の動員時期およびその際の抑制の強さの程度によると思われる。筋電位スペクトルの変化が起こった被験者と起こらなかった被験者に関しては、実験1で観察されたPSPとRSWの出現頻度の個人差とも関連すると考えられる。これらの個人差は、抑制機構の働きに運動技能の優劣に係わる個人差があるとすれば、それによって説明できると思われる。谷井(1983)はPSPを速くて、強い筋収縮と関連つけて考えている。急激な筋収縮における張力の上昇は、筋収縮開始時の個々の運動単位の初期高頻度発射によってもたらされることが知られている¹⁹⁷⁾。RSWおよびPSPを出現させる抑制機構は急激な筋張力の上昇との関連において、運動単位をいかに動員するかの神経性制御と関連があるのかもしれない。

5. 要約

本実験の目的は、持続性筋放電を保った状態から反応運動を行った際、持続性筋放電の周波数成分が予告合図(S1)後に変化するという考えを確かめることである。12名の被験者に立位前屈姿勢を保持させ、S1の2sec後に提示した反応合図(S2)に応じて腰部を急激に伸展させた。この急激な運動は被験者1名につき20回行った。第4腰椎レベル

の脊柱起立筋から双極誘導表面筋電位を記録した。S 1 提示前の 2 秒間および S 1 提示後の 2 sec間の表面筋電位のパワースペクトルを 1 試行毎にミニコンピュータで計算し、各筋電位スペクトルから平均周波数 (M F) を算出した。20 試行で得られた筋電位スペクトルを S 1 前後毎に平均した。S 1 後の表面筋電位の変化を視察によって調べた。得られた主な結果は次のとおりである。

1) S 1 前後の M F の平均値間に有意な差がみられた被験者 5 名の S 1 後の M F の平均値は、S 1 前の M F のそれよりも低い値であった。

2) 上記の被験者の S 1 後の筋電位パワーは、S 1 前と比べて 30 Hz から 50 Hz にかけての低い周波数帯域で増加した。

3) 前述の被験者の表面筋電位は S 1 から S 2 までの準備期間中に徐波化し、その前後で姿勢が変化したことを示す結果は得られなかった。

4) 以上の結果から、予告合図後の持続性放電の波形および周波数成分の変化は、予告合図によって始まった随意運動の準備と関連した運動単位活動の変化のためであると考えられる。

VII 随意運動開始前の表面筋電位変化と運動前脳電位変動との時間関係 (実験4)

1. 目的

随意運動開始前における持続性放電の波形の変化は、運動開始の準備と関連している可能性が実験1から実験3までの研究で示唆された。

PSPは筋収縮速度が速いほど出現しやすく^{74), 224)}、敏捷性および巧緻性と深い関係があると考えられている^{86), 223), 224)}。谷井(1983)は負荷重量のPSP出現率への影響からみてPSPは筋収縮速度とよりもむしろ速くて強い筋収縮すなわち急激な筋力の発揮と関係が深いと考えた。このようにPSPが急激に動作を起こす相動性筋活動に対しどのような機能的役割を果たしているかは十分明らかにされていない。PSPは上位中枢性の現象であると考えられており²²⁴⁾、その出現が相動性筋放電に先行することから、運動開始命令との関連が考えられる。

随意運動と関連した脳電位を頭皮上から記録することができる。この運動関連脳電位は主働筋をリラックスさせた状態から自発性随意運動を発現する条件のもとで記録され、研究されている。運動関連脳電位のうち運動前脳電位の構成成分については、Deeckeら(1969, 1976, 1977)およびVaughanら(1968)は3成分を報告し、Shibasakira(1980a)は4成分を同定している。随意運動開始の400-500 msec前に出現する陰性脳電位は運動の準備と特異的に関連した成分であることが示唆されている¹⁴⁰⁾。また相動性筋放電の直前に出現する陽性電位と陰性電位は運動開始と関連した大脳皮質活動および運動野錐体路細胞の興奮との関連で考えられている²⁷⁾。

運動関連脳電位は持続性筋放電を保った状態から自発性随意運動を開

始する条件下で研究されていないので、持続性筋放電の保持が運動前脳電位成分にどう影響するかは不明である。しかしながら、上位中枢性の現象であると考えられるSW、RSWおよびPSPの出現と対応して、運動前脳電位が変動することが予想される。本実験においては、末梢性電位の変化現象であるRSWおよびPSPが運動準備状態の形成および運動開始命令と関係があるか否かを明らかにするために、末梢性電位変化と運動前脳電位変動との時間関係を検討した。また表面筋電位および脳電位の原波形の変化の様子を調べた。このほかPSPの相動性筋放電に対する効果についても検討した。

2. 方法

1) 被験者

右利きの健康な男子7名が実験に参加し、うち6名が大学生で、残りの1名は著者であった。利き手は被験者の報告で決めた。

2) 実験手順

運動の際の姿勢は、右上腕がほぼ垂直で、右肘角度が110度の椅座位姿勢であり、右手掌は適度に開いた状態であった。この姿勢で、弾力性のない幅4cmの硬いバンドを右手首でできるだけ急激にしかも強く押させることによって右肘伸展力を等尺性に発揮させ、筋力発揮後直ちにその筋力を減少させた(Fig. 21)。その結果、急激な自発性の右肘伸展力の発揮は、主働筋である右上腕三頭筋の速くて強い短時間の等尺性収縮を伴った。発揮する筋力の強さは任意とし、軀幹を利用せず上肢帯だけで発揮できる程度とした。肘伸展力発揮前の準備期間中、右上腕三頭筋に弱い持続性収縮を保たせるために、最大肘伸展力の20%のレベ

ルを保持させた。準備期間の長さは4 sec以上とした。

被験者が最大肘伸展力の20%水準を表示したディスプレイを見てその筋力を保持してから被験者の両眼を閉じさせ、この状態で急激な右肘伸展力を発揮させた。眼球運動およびそのほかのアーティファクトによって原データが影響を受けた場合、その試行を分析から除外した。分析用の試行数として50試行のデータを収集した。データの記録に入る前に、急激な肘伸展力発揮の練習を行わせた。実験中、次の試行が始まるまでの間、被験者は右上腕三頭筋を弛緩させた。さらに、疲労の出現を回避するために5分以上の休憩を3回与えた。

筋力はストレンゲージを備えたトルクメータと歪増幅器から構成された筋力計で電気信号に変換された。肘伸展力発揮のために準備されたバンドは、トルクメータの軸に直角に取り付けられた長い金属性のレバーの端に固定された。椅子の高さは右肘とトルクメータの軸端との高さが合うように調節された。トルクメータの軸からバンドまでの距離は被験者毎に調節された。

3)記録

脳電位を記録するために単極導出法を用い、両側の耳朶を連結したものを基準電極とした。Ag/AgCl電極を国際電極配置法(10-20法)に基づきCz(頭頂)、C3(運動肢と反対側の左脳半球(略して対側脳半球)の中心野)およびC4(運動肢と同側の右脳半球(略して同側脳半球)の中心野)に固定し、頭皮上脳電位を記録した。眼球電位図(EOG)は左の眼窩の上下に貼った電極で記録した。脳電位および眼球電位を導出するための時定数を3.0 secとし、30 Hz以上の高域周波数を遮断した。右上腕三頭筋から双極誘導表面筋電位を時定数0.03 secで記録し

た (Fig. 21)。データは記録紙とデータレコーダに同時に記録した。

4) 加算平均処理および分析

ミニコンピュータでデータを加算平均するために、相動性放電の積分曲線の立ち上がりトリガーとして使用した。トリガー前 3.5 sec とトリガー後 0.5 sec のデータをサンプリング周波数 500 Hz でサンプリングし、50 試行における各サンプリングデータをミニコンピュータによって平均し、その結果を X-Y プロッターに記録した。加算平均前の相動性放電の出現を基準として、SW、RSW および PSP の出現時間を計測した。運動準備期の加算平均脳電位 (運動前脳電位) の構成成分の出現時間は、脳電位の勾配が変化した時点から加算平均された相動性放電までの時間とした。運動前脳電位の振幅はそれが最初に陰性変動した時点の電位を基準値として計測された。Student の t 検定を用いて、C3 および C4 から得られた運動前脳電位振幅の比較をした。さらに平均相動性放電の立ち上がりからピークに達するまでの時間を平均相動性放電の上昇時間として計測した。このほか、平均筋力曲線の立ち上がりからピークまでの時間も計測した。

3. 結果

1) 脳電位と表面筋電位の原波形の変化

Fig. 22 は脳電位の原波形が右肘伸展力発揮の前で陰性変動した記録例である。C3 および C4 から記録した脳電位の波形は Cz から記録したものと非常によく類似していた。陰性電位変動は相動性放電出現の 0.9 sec 前に始まり、相動性放電出現の約 400 msec 前になると陰性方向への電位変動が急に大きくなった。その後急峻な勾配をもった陰性脳電位

が P S P の出現とほぼ同時に出現し、相動性放電の出現と同時に陽性電位へと変動した。Fig. 2 2 は被験者 T S から記録したものである。

Fig. 2 3 は被験者 K Z から得られた記録である。S W は相動性放電の約 7 0 0 msec 前に出現した。S W と脳電位の時間関係においては、S W の出現は陰性脳電位の変動開始の約 5 0 0 msec 後であった。P S P の出現と同時に急峻な陰性脳電位変動が起こった。

Fig. 2 4 も被験者 K Z から得られた結果である。持続性放電が相動性放電の 2 6 0 msec 前で R S W へ変化すると同時に陰性変動が起こった。

視察によって識別できる陰性脳電位変動は 4 名の被験者 (T S , K Z , S I , Y S) に観察されたが、特に被験者 T S および K Z における陰性脳電位変動の識別は容易であった。

本実験においては S W と R S W とを区別せずに S W s として扱い、S W s および P S P の出現頻度および出現時間を計測し、出現率および平均出現時間を算出した。結果は Table 4 に示されている。R S W および S W は 5 名の被験者に観察され、P S P は全ての被験者から記録された。被験者 K Z および T S の S W s の出現率は他の被験者よりも高かった。

2) 平均運動前脳電位の構成成分

Fig. 2 5 に示したデータは被験者 T S から得られた加算平均結果である。運動肢と反対側の C 3 および同側の C 4 から記録した平均脳電位の波形は C z から記録した平均波形とよく類似していた。運動前脳電位は波形の勾配の変化およびその変化が始まる時間によって 3 つの陰性電位成分に識別することができた。最初の成分である緩やかな勾配の陰性電位 (First negative potential、F N P) は相動性放電の 1. 1 6 4 sec 前に出現し、この F N P 成分は相動性放電の 4 8 8 msec 前になってその

勾配を急に増加させた (second negative potential、SNP)。SNPに続いて、急峻な陰性波 (Third negative potential、TNP) が相動性放電に 51 msec 先行して出現した。典型的な TNP は Fig. 26 に示されている。Fig. 26 も 3 成分を容易に同定できた記録例であり、被験者 KZ から得られた結果である。

FNP、SNP および TNP の 3 成分は容易に見分けることができるほどの十分な大きさであった。Cz から記録した運動前脳電位で計測した 3 つの陰性電位成分の出現時間は被験者間で大きな違いはなかった (Table 4)。被験者 YS の FNP 成分の出現時間を同定することは出来なかった。また被験者 MR および NI においては、三番目の成分 TNP を同定することができなかった。各成分の出現時間をまとめると、FNP は相動性放電の 0.9 - 1.2 sec 前に出現し、その平均は $1.14 \text{ sec} \pm 0.11$ であった。SNP は相動性放電の 330 - 510 msec 前に出現し、平均出現時間は $440 \text{ msec} \pm 65.92$ であった。TNP の出現は相動性放電の 30 - 60 msec 前で、平均は $47 \text{ msec} \pm 14.22$ であった。

Fig. 25 および Fig. 26 に代表されるように、TNP は急峻な相動性放電の出現と同時かもしくはその直後に陰性頂点に達し、続いて急峻な陽性電位 (abrupt positive potential、APP) が出現した。APP の陽性頂点の出現は Fig. 25 および Fig. 26 に見られるように相動性放電の出現後であった。TNP 成分が出現しなかった被験者 MR および NI の運動前陰性電位は相動性放電の出現直後に陰性頂点に達し、APP 成分へ移行した。

3) 筋電位変化の起始と運動前脳電位構成成分との時間関係

S W s および P S P と運動前脳電位成分の出現時間関係はTable 4 に要約されている。S W s の平均出現時間はS N P の平均出現時間よりも遅いかもしくは同じであった。P S P の出現は被験者N Gを除いて、T N P の出現中であった。これらの出現時間関係を、S W s が高頻度出現した被験者2名について具体的に示したのがFig. 25 およびFig. 26 である。相動性放電の前で持続性放電の振幅が減少しているのはP S P 出現のためであり、同時期にT N P が出現している。Fig. 25 におけるS W s の総出現頻度は12回であり、そのうち11回がS N P 相で出現し、出現率にして92%であった。Fig. 26 では、S N P 相におけるS W s の出現率は61%（総出現頻度23回のうち14回）であった。

4)脳電位構成成分の有無と相動性放電および筋力曲線の上昇時間

Table 5 は加算平均した相動性放電および筋力曲線の上昇時間を示している。相動性放電の立ち上がりから頂点までの上昇時間は、T N P の出現した被験者（S I, K Z, Y S, T S およびN G）の方がT N P の出現しなかった被験者（M R およびN I）よりも短かった。また、筋力曲線の立ち上がりから頂点に達するまでの時間も同様であった。相動性放電および筋力曲線の上昇時間がより短く、速かった上記の被験者5名のP S P 出現率は、それらの上昇時間が遅かった2名の被験者のP S P 出現率よりも高かった（Table 4 参照）。ところで、T N P が出現した被験者N G の相動性放電の上昇時間は同じくT N P の出現したほかの被験者よりも遅かった。これは被験者N G の相動性放電の立ち上がりが、T N P が出現したほかの被験者よりも幾分遅いためであった。Fig. 27 はその立ち上がりの遅さの様子を示しており、T N P の陰性頂点の出現は相動性放電の出現後まもなくして始まるその振幅の急峻な上昇と同時

であった。被験者 NG の P S P 出現率は、T N P が出現した被験者の中で最も低かった (Table 4 参照)。

5) 脳半球非対称性

Table 6 は C 3、C z および C 4 の 3 箇所 の 記録電極位置から記録された運動前脳電位成分 F N P、S N P および T N P の振幅を、T N P が出現した 5 名の被験者について示している。F N P、S N P および T N P の振幅は C z で最大であった。C 3 (対側脳半球) における F N P 振幅は C 4 (同側脳半球) におけるそれよりも大きかったが、有意な差はみられなかった ($t = 2.61, P > 0.05$)。C 3 と C 4 の S N P 振幅に関しては、やはり C 3 の方が大きく、両者の差に統計的有意差がみられた ($t = 3.39, P < 0.05$)。C 3 と C 4 の T N P 振幅の間にも統計的有意差があった ($t = 3.69, P < 0.05$)。この場合も C 3 の振幅が C 4 の振幅よりも大きかった。これらの結果は運動前脳電位の非対称性は S N P の出現とともにより鮮明になることを示している。T N P の出現しなかった被験者における運動前陰性電位の振幅はやはり C 3 の方が C 4 よりも大きかった。

Table 7 は T N P の陰性頂点から A P P の陽性頂点までの頂点間垂直振幅を示している。C 3 における振幅は C z および C 4 における振幅よりも大きく、C 3 と C z および C 3 と C 4 の間に統計的有意差がみられた ($t = 2.46, P < 0.05$ および $t = 2.76, P < 0.05$)。Fig. 28 は相動性放電の出現からその頂点に達するまでの時間と相動性放電の出現から A P P の陽性頂点までの時間の関係を示している。相関係数は 0.78 で、危険率 5% で有意な相関関係が認められた。Fig. 28 は相動性放電の立ち上がりの速かった人は A P P の陽性頂点の出現も速

かったこと、および相動性放電の振幅が上昇している間にA P Pが出現したことを意味している。

4. 考察

1) 運動前脳電位構成成分の機能的意義および構成成分と筋電位変化との時間関係

本実験においては全体として3つの運動前脳電位成分が同定された。すなわち①相動性放電の約1 sec前に始まるF N P、②相動性放電の平均440 msec前に出現するS N P、③相動性放電の平均47 msec前に始まるT N Pの3成分であった。相動性の筋電図に先行して出現したと報告されている小さな陽性電位^{27), 29), 171), 209)}は本実験では同定することができなかった。

F N Pの対側脳半球優位性はS N Pの出現と共に明瞭になり、C3とC4におけるS N Pの振幅間に有意差が認められた。この結果はS N PがF N Pと機能的に異なること、および筋収縮を実行するための特別な準備過程と関連つけて考えられることを示唆している。T N Pの振幅も対側脳半球の方が同側脳半球より大きく、これらの差は統計的に有意であった。T N Pの脳半球非対称性および出現時間から、T N Pと運動開始命令との関連が考えられる。T N Pに続いて出現したA P Pの振幅はC3において最も大きかったことは、A P Pが相動性放電の影響によるものではなく、その起源が大脳皮質であり、運動と関連した電位であることを示唆している。このことは運動開始とほとんど同時に人間の運動皮質から陽性電位が記録される⁶³⁾ことから支持される。

本実験において同定された運動前後の4成分であるF N P、S N P、T N PおよびA P Pを、Fig. 2に示した久保田(1982)による随意運動を

発現させるときの脳内情報の流れの4段階区分（行動のプログラム、運動のプログラム、運動の指令および運動の実行）とそれぞれ対応させ、さらに第2章第4節において記述した脳内の各器官の神経生理学的知見と役割に基づき、各脳電位成分の機能的役割を考察すると次のようになる。FNPは急激な筋運動をどう行うかの神経情報の合成的処理段階を反映し、SNPはその筋運動の要素、例えば方向、速度、力およびタイミング等の運動指令情報の形成に関する中枢プログラミングと主に関連した電位であり、TNPが出現しなかった被験者においては運動開始命令を含むものと思われる。TNPは急激な筋収縮を実行するための運動開始命令と何らかの関連があり、相動性放電の急激な上昇の始まりとTNP成分の陰性頂点出現との時間関係から、その機能的役割は相動性放電を急激に上昇させる大脳運動野活動と深い係わりがあると考えられる。TNPの出現しなかった被験者の相動性放電の上昇時間がより遅かったことを考えると、TNP出現の有無は速く、強く筋を収縮させるための運動単位の相動性活動を制御する運動野活動に係わる個人差によるためとみることができる。APPは中枢プログラムの実行と主に関連していると考えられる。

SNPおよびTNPは脳半球非対称性であった。SNP相におけるSWsの高頻度出現および脳電位の原波形の陰性変動を伴ったSWsの出現から、SWsは運動指令情報の形成段階と関連があると考えられる。相動性放電および筋力曲線の上昇時間とPSP出現率の関係から、PSPの機能的役割は、筋運動を衝撃的に行うために相動性放電の上昇を速めることと関係があると考えられ、各被験者のPSP出現頻度はその上昇速度の調節能に依存するものと思われる。実験2はRSWの出現中に脊髄 α 運動ニューロンの抑制があることを示唆しており、SWsおよび

P S P は脊髄錐体路系からの脊髄 α 運動ニューロンの抑制を表している
とみて間違いないと思われる。興奮現象である S N P および T N P を出
現させる脳活動は S W s および P S P を直接引き起こさないであろう。
S W s および P S P の出現には、S N P および T N P を出現させる機構
と連動して活動するある運動中枢が関与していると推察される。そうで
あるならば、S W s が S N P 相において多く出現し、P S P が T N P 相
で出現したことを理解することができる。

2) S N P および T N P

F N P は Kornhuber と Deecke (1964、1965) によって初めて記述された準
備電位 (Bereitschaftspotential、B P) と対応するとみてよいであろう。

S N P は先行研究において報告されている非対称性成分と対応すると思
われる。Deecke ら (1973、1976) および Kutas と Donchin (1974) は B P は
運動開始の 400 - 500 msec 前になると対側脳半球でより大きくなり、
非対称になることに注目した。その後 Kutas と Donchin (1977、1980) は脳
半球非対称性は運動に 1 sec 先行して始まり、運動開始の 500 msec 前
になると明瞭になると報告した。Shibasaki ら (1980a) および Neshige ら (19
88) も筋電図出現の 500 - 600 msec 前に始まる非対称性成分を同定し、
N S' 成分と呼んでいる。この成分は Libet ら (1982) によっても報告され
た。S N P についての結果は上記の先行研究における結果と一致した。

Deecke ら (1969、1976) は T N P と出現時間的にも波形的にもよく類似
した陰性脳電位を人間の左右の中心前野を結ぶ双極導出で記録した。こ
の陰性電位は運動電位 (motor potential、M P) と呼ばれている。彼らは
M P は主働筋の最初の活動に 50-60 msec (平均 54 msec) 先行して始まり、
運動指と反対側の手の運動野に限局して出現したと報告した。その後 De

eckeら(1980)は自発的な手指の屈曲および伸展運動におけるMPの振幅を比較し、手指伸展運動の方が手指屈曲運動よりも大きいことを見だし、この結果はMPが運動皮質活動と関係があるという考えをより一層支持するものであると記述している。この支持の根拠としてFetzとCheney(1979)の研究結果を引用している。それは屈曲力および伸展力をそれぞれ同じ割合で増加させたとき、伸展と関連した運動皮質細胞の発射頻度の増加は屈曲と関連した運動皮質細胞の発射頻度の2倍であるという結果である。以上のDeeckeらの研究結果および運動開始の50-100 msec前に始まる運動野錐体路(P T)ニューロン活動の増加⁴⁶⁾から、TNPもMPと同様に運動皮質活動を反映した電位である可能性がある。TNPが出現した被験者の相動性放電および筋力曲線の上昇時間は短く、速かった。この結果とP Tニューロン活動が肢位の変化よりも筋力の発揮と関連があるという知見^{47), 49), 80)}から、TNPは外的負荷の無い状態での関節の素早い屈曲および伸展よりも、関節の屈曲・伸展運動を伴わない急激な筋力の発揮とより関連が深い可能性が考えられる。PSPについても同様の可能性がある。

急峻な勾配をもった陰性脳電位が相動性放電の出現後に出現したことが報告されている。Gerbrandtら(1973)は、振幅が漸増する脳電位に続いて出現した急峻な勾配の陰性脳電位は相動性放電後に観察されたと報告している。同様にJonesとBeck(1975)は相動性放電の急激な振幅増加は非常に大きな陰性電位の出現前に観察されたと報告している。このほか、ゆっくりとした随意的肘伸展運動中に脳電位を記録したWilkeとLansing(1973)は、相動性放電前の脳電位変動は振幅が緩やかに増加する陰性電位を除いて観察されず、最も振幅の大きい陰性電位の出現は相動性放電の少なくとも400 msec後であったと報告している。以上の研究者らは

S N P に対応する陰性脳電位成分の出現を報告していない。単極導出法を用いて非対称性成分を研究した Kutas と Donchin (1974、1977、1980)、Shibasaki ら (1980a) および Libet ら (1982) は、T N P に対応する脳電位を記録できなかつた。また運動速度および手指の発揮筋力の大きさと運動前脳電位の関連を調べた研究^{14)、15)}、および筋力の増加速度を訓練した条件下で運動前脳電位を検討した研究²¹⁵⁾においても、T N P は出現しなかつた。T N P と対応する脳電位成分は、前述したように双極導出法で記録されているが、単極導出法ではまだ報告されていない成分である。

S N P および T N P と対応する脳電位の有無に関する上記の矛盾は筋収縮様式の違い、すなわち脳における中枢プログラミングの相違のためであると思われる。ヒトの随意運動開始の運動指令の形成のされ方は、速くて激しい衝撃的収縮 (ballistic contraction) と直線的に筋張力を増加させる収縮 (ramp contraction) とでは異なり、ballistic contraction と 0.5 sec で目標筋力に達するような速い ramp contraction とでも異なると報告されており^{35)、37)}、運動単位の研究からも示されている³⁶⁾。筋収縮強度および筋収縮速度と運動単位活動のについての研究は、運動単位を2つのタイプに分類して行われることが多く、1つは疲労抵抗性はあるが収縮力が弱い緊張性の運動単位であり、もう1つは疲労抵抗性は無いが収縮力が強い相動性の運動単位である。Grimby と Hannerz (1977) は短時間の筋収縮を持続性収縮を保った状態から急激に起こさせた際、相動性の運動単位の選択的活性化が起こったと報告した。これに対し、Desmedt (1981) は、等尺性の衝撃的な収縮に際し相動性の運動単位が優先的に活性化されることはなく、その参加は緊張性の運動単位の活動参加の後であったと報告した。運動単位の活動参加順序はともかく、上記の運動単位の研究は急激な筋力の発揮時には相動性の運動単位が動員される

ことを示している。急速な収縮における筋力の強さは運動単位の活動参加数と各運動単位の放電頻度に依存し、急激な収縮がより強く行われる時には、運動単位の放電頻度の増加が重要な役割を果たすことが知られている^{36), 197), 198)}。SNPおよびTNPに対応する脳電位の有無は、運動単位の放電頻度および相動性運動単位の動員に関する上位中枢性調節が筋運動様式によって異なることと関係があると考えられる。また本実験におけるTNPの有無に関する個人差も、相動性運動単位の動員および運動単位の放電頻度に関する中枢性調節能の個人差によると考えられる。

5. 要約

自発性随意運動における運動前脳電位は運動の準備および開始と関連づけて考えられている^{27), 171)}。本実験においては、随意運動の開始前に出現する末梢性電位変化現象のSW、RSW（以下、これらの総称してSWsという）およびPSPが中枢における運動準備状態の形成および運動開始命令と関係があるか否かを明らかにするために、上記の筋電位変化と運動前脳電位変動との時間関係を調べた。さらに、相動性放電および筋力曲線の上昇時間を脳電位構成成分およびPSPとの関連で分析した。運動負荷は弱い持続性収縮を保った状態から右肘伸展力をできるだけ速くしかも強く発揮させることで行い、分析用の試行数として50試行を収集した。右上腕三頭筋から双極誘導表面筋電位を記録し、脳電位は左右の中心前野（C3およびC4）および頭頂（Cz）から記録した。各試行で記録した原データの視察とそのデータの加算平均を行った。得られた主な結果は次のとおりである。

1) 脳電位の原波形の陰性変動をともなったSWsの出現が観察され

た。

2) 加算平均した運動前脳電位は3成分に分かれ、全て陰性電位であった。最初の電位(FNP)は相動性放電の約1sec前に出現した。二番目の電位(SNP)は相動性放電の330-510msec前に出現し、SWsの多くはこのSNP相で出現した。PSPの出現は相動性放電の30-60msec前に出現した三番目の電位(TNP)と時間的に対応した。

3) 3つの脳電位成分の振幅は運動肢と同側の脳半球よりも反対側の脳半球で大きく、その差はSNPおよびTNP成分において統計的に有意であった。

4) TNPの陰性頂点は相動性放電の急激な増加とほぼ同時に出現した。

5) TNPが出現した被験者の相動性放電の振幅の上昇時間および筋力曲線の上昇時間は、TNPが出現しなかった被験者よりも短かく、またPSPの出現率はTNPが出現した被験者の方が高かった。

6) PSPの高出現頻度を示した被験者の相動性放電および筋力曲線の上昇は、PSPの出現頻度の低い被験者よりも速かった。

7) 以上の結果から、SWsおよびPSPは急激な筋運動の中枢プログラムの形成およびその筋運動の開始命令とそれぞれ関係があると考えられる。また、TNPおよびPSPは相動性放電の上昇を速め、結果的に筋力の急激な増加に寄与している可能性が考えられる。TNPおよびPSPの出現に関する個人差は急激な筋力の発揮に係わる筋収縮の制御に関する調節能に依存すると推察される。

Ⅷ 筋収縮様式が随意運動開始前の表面筋電位変化および脳電位構成成分に及ぼす影響（実験5）

1. 目的

実験4においてSWsおよびPSPが随意運動の中枢プログラミングのための上位中枢活動と関連があることが示唆され、PSPはTNPと共に外的負荷の無い状態での関節の素早い屈曲・伸展とよりも急激な等尺性筋力の発揮と関連が深い可能性が推察された。

本実験においては、SWsおよびPSPと筋運動の中枢性調節との係わりの有無およびそれらの機能的役割を明らかにすることを研究の目的とした。そのため、外的負荷の無い状態での肘関節の素早い伸展および急激な等尺性肘伸展力の発揮を条件として、SWs、PSPの出現および実験4において同定された運動前脳電位成分に対する筋収縮様式の影響を検討するとともに、実験4において観察されたSWsおよびPSPと運動前脳電位成分の出現時間関係が筋収縮様式の違いによって異なるかを検討した。大脳皮質運動野のPTニューロンの発射頻度は肢位の変化よりも筋張力と関連深いことが知られている^{47), 49)}。PTニューロンの発射活動と筋力およびその変化分との関連は、変位を伴わない筋収縮すなわち等尺性収縮による動作においても観察されている^{80), 183)}。TNPが随意運動と関連した運動野のPTニューロン活動を反映しているならば、素早い肘伸展運動においてはTNPは出現しないと考えられる。またSWsが運動の準備状態の形成と関係し、PSPがTNPと共に運動開始命令に関する中枢活動と密接に係わっているならば、肘関節伸展条件におけるSWsおよびPSPの出現頻度は低いと仮定される。

2. 方法

1) 被験者

被験者は右利きの健康な男子大学生 8 名であり、全員が実験 4 に参加しなかった者であった。

2) 筋収縮様式

1 つは実験 4 と同じで、等尺性の右肘伸展力をできるだけ急激に発揮し、筋力発揮後すぐに筋力レベルを減少させる筋収縮様式であり、もう 1 つは外的負荷の無い状態で右肘関節をできるだけ素早く伸展させる関節運動であった (Fig. 29)。これらの筋運動における右肘の関節角度は 110 度であった。右上腕三頭筋に弱い持続性収縮を保たせるために、最大肘伸展力の 20% レベルの筋力を保持させた。本実験で使用した運動負荷装置は実験 4 と同一であった。肘関節の素早い伸展は、硬いバンドを手首で少し押すことによって最大肘伸展力の 20% レベルの筋力を保持した状態から、手首をバンドの上で前方へ滑らせながら行わせた。

3) 実験手順

2 種類の筋収縮様式の条件のもとでの実験を同一日に行い、分析用として各筋収縮様式毎に 50 試行のデータを収集した。このほかは実験 4 と同一であった。

4) 記録

実験 4 と同一であった。

5) 加算平均処理および分析

加算平均処理に関しては実験4と同一であった。S W s および P S P の出現頻度および出現時間の筋収縮様式間の比較を行うため、Studentの t 検定を使用した。また、上記の t 検定は C 3 および C 4 から得られた運動前脳電位構成成分の振幅の比較のためにも使った。脳電位の振幅の計測方法は実験4と同じであった。

3. 結果

本実験においても R S W のほかに S W が出現した。これらを S W s として実験4と同様に分析した。

1) S w s および P S P の出現様相

Table 8 は S W s および P S P の出現率および出現時間を筋収縮様式別に示している。S W s および P S P の出現率は関節伸展条件下よりも筋力発揮条件下において有意に高かった ($t = 3.59$, $P < 0.01$ および $t = 5.12$, $P < 0.01$)。関節伸展条件下における P S P 出現率は 6 ~ 52 % で、50 % 前後の値を示したのが被験者 K I と W A の 2 人だけであったのに対し、筋力発揮条件下における P S P 出現率は 26 ~ 98 % であり、6 人の被験者が 50 % 以上の出現率を示した。筋力発揮条件下における P S P の非常に高い出現率が注目される。相動性放電の立ち上がり時点を基準として計測した P S P の出現時間は持続時間でもある。この持続時間も肘伸展力発揮条件下において有意に長かった ($t = 4.00$, $P < 0.01$)。筋力発揮条件下における S W s の出現時間は関節伸展条件下よりも長かったが、有意な差はみられなかった。

2) 運動前脳電位構成成分と S W s および P S P の出現関係

Table 9 は同定された運動前脳電位成分の出現時間を筋収縮の様式別

に示している。筋力発揮の条件下においては、実験4において観察された3つの運動前脳電位構成成分(FNP、SNPおよびTNP)が、被験者KUを除いて、出現したが、関節伸展条件下においては、TNP成分は出現しなかった。筋力発揮の条件下においてTNPが同定されなかった被験者KUのその条件下におけるPSP出現率は、ほかの被験者と比べて明らかに低かった(Table 8)。また、この被験者のSNP成分は関節伸展の条件下で出現しなかった。Fig. 30は異なった筋収縮様式で得られた運動前脳電位の加算平均結果の代表例であり、被験者NMから記録したものである。関節伸展条件下におけるSNP成分は平均相動性放電の立ち上がりの後に頂点に達し、続いて陽性電位が出現した。Table 8およびTable 9のデータはSNP相でSWsが出現したこと、およびTNPがPSPと時間的に対応して出現したことを示しており、これらの結果は実験4と同一であった。筋力発揮条件下においてTNPが出現した被験者の平均PSP出現時間は相動性放電の57 msec前であり、彼らのTNPの平均出現時間は相動性放電の58 msec前であった。SNPの平均出現時間は筋力発揮条件下で485 msec、関節伸展条件下で446 msecであった。FNPの平均出現時間は筋力発揮条件下で1.36 sec、関節伸展条件下で1.32 secであった。

Table 10は各運動前脳電位構成成分の振幅を被験者毎に示している。各筋収縮条件下におけるFNP、SNPおよびTNPの振幅は両条件下ともにCzで最大であり、C3における各成分の振幅はC4よりも大きかった。筋力発揮条件下でTNPが出現した被験者においては、C3とC4の3成分の振幅に有意な差がみられた(FNP: $t = 3.12$, $P < 0.05$ 、SNP: $t = 3.11$, $P < 0.05$ 、TNP: $t = 4.357$, $P < 0.01$)。関節伸展条件下で、FNPおよびSNPの2成分が

出現した被験者においても、C3とC4の各成分の振幅に有意な差があった（FNP： $t = 2.892$ ， $P < 0.05$ 、SNP： $t = 4.09$ ， $P < 0.01$ ）。

4. 考察

1) S W s および P S P の機能的役割

S W s は関節伸展の条件下よりも筋力発揮の条件下において多く出現し、各筋収縮条件下における出現率の間に有意な差が認められた。P S P の出現率もやはり関節伸展条件下よりも筋力発揮条件下において非常に高く、その差は有意であった。さらにP S P の持続時間も筋力発揮の条件下において有意に長かった。これらの結果はS W s およびP S P は外的負荷の無い状態での素早い関節運動とよりも、急激な等尺性筋力の発揮と関係が深いことを示唆している。P S P の出現頻度の高い被験者の相動性放電および筋力曲線の上昇は速かった（実験4）。以上のことから、P S P の機能的役割は弱い筋収縮を保った状態から等尺性の筋力を急激に発揮する状況下において、発揮筋力の増加速度を速めるために相動性放電の上昇速度を速めることにありと結論することができる。

随意収縮が急激に行われるときの筋張力の上昇は、個々の運動単位の発射頻度の一過性の増加によりもたらされ¹⁹⁷⁾、それぞれの運動単位の発射頻度は収縮力とともに増加する¹⁹⁸⁾。したがって活動に参加する運動単位数および個々の運動単位の一過性の発射頻度が増せば、筋力の増加速度もより一層速まると考えられる。速くて強い筋収縮に際しての個々の運動単位の高頻度発射は、それぞれの運動単位の同期発射をもたらすであろう。P S P の出現すなわち脊髄運動ニューロンの一瞬の抑制は抑制後の運動単位の動員調節およびその発射頻度の増加に寄与し、結果

的に筋力の増加速度を速めるための運動単位活動の同期化を促進させるものと考えられる。事実、急激な肘運動を被験者に行わせてP S Pを研究したConradら(1983)は、運動開始に先行する抑制の程度とその抑制に続く相動性の神経活動との間に正の関係があることを示している。

健常成人の単純反応における肘関節伸展動作において報告されているP S P出現率²²⁴⁾は、右上腕三頭筋で14%である。反応運動の前の持続性収縮の程度とP S P出現率の関係を右上腕三頭筋において調べた三田ら(1978)は、最も出現しやすい持続性収縮レベルでのP S P出現率は31%であったと報告している。また、運動部活動の経験の有無が右上腕三頭筋のP S P出現率に及ぼす影響を研究した脇田ら(1979)は、中学校から大学まで運動部に所属した経験のない被験者群で12%、中学校から大学まで継続して運動部に所属していた群では36%であったと報告している。本実験の関節伸展の条件下におけるP S P出現率は、2人の被験者を除いて上記先行研究におけるP S P出現率の範囲内であった。ところで、猪飼ら(1973)はP S Pの発現機構を検討した研究論文の緒言の中で、「これまで随意動作に先行するsilent periodの観察は、おもに上肢に関するものであり、しかもその発現を恒常的にとらえることは困難であった。しかし、膝関節を屈曲した状態から跳躍動作を行った場合、下肢の筋群から導出した筋電図にそのsilent periodが容易に出現することを見出した。そこで本研究の目的は ～ 下肢の跳躍動作、およびスタート動作を対象として ～」と記述している。しかしながら残念なことにP S P出現率は示されなかった。その後、Yabe(1976)も反応合図に応じる跳躍動作を取り上げ、下肢筋で観察されたP S P出現率は大腿直筋で53%、外側広筋で72%であったと報告した。この報告は上記の猪飼ら(1973)の記述を裏付けるものであるが、ではなぜ肘関節伸展動

作よりも跳躍動作においてP S P出現率が高いのであろうか。この問題の研究は行われていないが、前述したP S Pの機能的役割に基づいて次のように説明することができる。すなわち跳躍動作を行うには、身体を重力に抗して地上から空中へと移動させるエネルギーが必要であるため、膝関節の伸展に参加する筋群は速くしかも強く収縮しなければならない。しかしながら、肘関節伸展動作は跳躍動作に比べて上腕三頭筋の抗重力活動を必要としないので、肘関節の素早い伸展に際しての収縮の強さはさほど重要な要素ではない。このような筋活動の調節の違いが肘関節伸展動作と跳躍動作におけるP S Pの観察の容易さ、すなわちその出現率に影響したものとみることができる。また反応時間が短ければ短いほどP S Pの持続時間も短いこと²²⁾、および反応合図後の動作開始時間をできるだけ短縮するように努力するとP S Pの出現率は減少する²¹²⁾ことが知られている。これらのことは、主働筋を支配する脊髄運動ニューロンの強い抑制は運動ニューロンの活性化を減少させるため、運動を早期に開始するには不都合であることを示唆している。このことと抗重力活動の必要性の無さが、肘関節伸展動作におけるP S P出現率を低くしていると思われる。

2)末梢性電位変化および中枢性電位変動と中枢性筋運動調節の関係

F N P、S N PおよびT N Pの出現時間は実験4で得られた結果とほぼ同様であった。S N P、T N Pの振幅はC3すなわち運動肢と反対側の左脳半球において有意に大きかった。F N Pの振幅については実験4では左右の脳半球間に有意な差はなかったが、本実験においては左脳半球において有意であった。F N P振幅の計測時点はS N Pの出現時点でもあり、その平均出現時間は筋力発揮条件下で485 msec、関節伸展条

件下で446 msecであった。この結果は運動前脳電位は運動開始の400 - 500 msec前になると運動肢と反対側の脳半球において大きくなり、非対称になるという報告^{27), 107), 113), 140), 171)}と一致する。SNPが大脳皮質運動野の活動を反映した電位であることは、Neshigeら(1988)が人の硬膜下から記録した運動前脳電位から明らかである。

鷲見(1987)は発揮する筋力の大きさを一定とし、筋力の増加速度を3段階とした条件のもとで、筋力発揮速度の運動前脳電位に及ぼす影響を人間において検討し、運動開始の約500 msec前に出現する運動前脳電位成分の傾きは筋力の増加速度と相関して変化すると報告した。サルの大脳-小脳連関の研究¹⁶³⁾は、手と対側の運動野上肢領域の皮質内電位は手運動の1 sec前から0.7 sec前にかけて出現し、手運動の500 msec前から250 msec前までの期間中に勾配がより急峻な陰性電位が出現することを示している。この皮質内電位は小脳外側部にある歯状核と強い関係をもつと報告されている¹⁶⁴⁾。これらの報告をそのままヒトの運動前脳電位と対応させるのは早計であるが、より急な勾配の皮質内陰性電位はその出現時間からみて、実験4および本実験で記録されたSNP成分と関連が強いと考えられる。運動前脳電位と小脳出力系の関係は人間においても研究されている。Shibasakiら(1978, 1986)は小脳失調症患者の頭皮上の運動前脳電位を検討し、歯状核を系統的に変性させるRamsay Hunt症候群では運動前脳電位の振幅は著しく減少することをみいだした。SNPは2つの異なった筋収縮様式の条件下で出現した。これらのことから、SNPは筋収縮様式と特異的な関係をもたないが、異なった筋収縮様式毎に必要なとされる神経情報(運動パラメータ)のプログラム形成に係わる運動野活動の変化を反映した電位であり、この運動野活動の変化は小脳外側部の影響を受けているものと推察される。本研究にお

ける「できるだけ急激に、もしくはできるだけ素早く」という運動発現条件が、運動発現に対する「動機」に影響したかもしれないことを考えると、辺縁系－基底核経路からの情報が運動野を賦活し、SNP出現に関与したとも考えられる。また随意運動のプログラムを形成するために働くと考えられている運動前野⁹⁹⁾もSNP出現に係わった可能性が考えられる。

TNPも運動野の活動を反映した電位であることを示唆する報告がある。運動開始の50－100 msec前に増加する運動野のPTニューロンの発射頻度は、運動によって生じる肢位の変化よりも運動の際に生じる筋張力と関連し、その変化の割合が大きくなるとPTニューロンの発射頻度も増加する^{46), 47), 49)}。また運動野活動は運動方向によっても変化するが、負荷に抵抗して等尺性に筋力を発揮したとき、運動野活動は有意に増加する⁸⁰⁾。PTニューロンには、より高い筋力水準で活動し始める相動性のものと、外的負荷が無くても放電頻度を維持するために低い発火閾値をもつ緊張性のものがあり^{45), 49)}、運動野の出力は運動の開始に際し初期に動員される α 運動ニューロンの放電頻度を制御するのに重要であると考えられている⁴⁹⁾。これらのサルを使った研究との関連で、興味深い研究が人間において行われている。三浦(1986)はTNP成分に相当する電位を急増陰性電位と呼び、本実験と同様の実験条件のもとで発揮筋力の強弱がこの電位の出現および振幅に与える影響を比較検討した。その結果、強い筋力の発揮条件下においては、全ての被験者から急増陰性電位を記録することができたが、弱い筋力の発揮条件下においてその電位を記録できたのは2人だけであった。上記のPTニューロンに関する論文^{46), 47), 49), 80)}および三浦(1986)の研究結果はTNPと関連が強いと考えられ、本実験の条件下におけるTNP出現の有無は相動

性の P T ニューロンの動員およびその放電頻度、換言すれば相動性の運動単位の動員およびその放電頻度に関する上位中枢性の調節と関係があると考えられる。以上のことから、T N P は急激な筋力発揮の開始命令と密接に関連した運動皮質活動を反映した脳電位と結論することができる。T N P も P S P と同様に筋力を急激に発揮する際の運動単位活動と関係深い現象であると考えられる。T N P に対応する成分は出現しなかったが、運動前脳電位の振幅が、発揮する筋力の増大に伴って大きくなることが報告されており^{15), 141)}、筋運動の激しさおよび強さは運動前脳電位の大きさと関連していると思われる。

小脳は衝撃的な運動のプログラミングおよび開始と関係があることが示唆されており¹⁰⁹⁾、運動野と歯状核のニューロン活動は筋電図の開始に約 100 msec 先行して変化することが知られている²⁰⁶⁾。小脳プルキンエ細胞の発射頻度は力の変化速度に相関して変化する¹⁸²⁾。Yamamoto と Odagiri (1981) は本研究と関連深い論文を発表している。彼らは弱い等尺性筋力と強い等尺性筋力を交互に発揮するレバー押し運動をネコに行わせ、弱い筋力から強い筋力へ移行した時、歯状核ニューロンの発射頻度は相動性に増加したと報告した。また、サルの小脳歯状核を電気刺激し運動野上肢領域の皮質内で得られた電位は、自発性の手運動に先行して運動野上肢領域の皮質内に出現した電位と同一の分布を示すこと¹⁶³⁾、および小脳歯状核を切除すると、運動前の運動野皮質内緩電位の振幅が著しく減少すること¹⁶⁴⁾が知られている。実験 4 においては、T N P が出現した被験者の筋力曲線の上昇時間は短かった。これらの知見と本実験結果である T N P 出現の有無と筋収縮様式の間関係を考え合わせると、T N P 成分は小脳外側部の影響を強く受けた運動皮質活動を反映した電位であると推察され、力の変化速度それ自身と密接に関連していると考え

えられる。

本実験においても S W s が S N P 相で出現し、P S P が T N P と時間的に対応して出現したことは、これらの筋電図変化現象が運動準備状態（運動の中枢プログラム）の形成および運動開始命令と関連した上位中枢性の現象であることを示唆している。S W s および P S P の出現率が肘伸展力発揮条件において有意に高く、P S P の持続時間もまた肘伸展力発揮条件において有意に長かった。以上のことから、S W s は筋力の発揮速度を速めるための中枢プログラムの形成過程と深く関連し、P S P は急激な筋力の発揮の開始命令と密接に関連した現象であるといえる。

Renshaw細胞の放電による運動ニューロンの反回性抑制作用が小脳の刺激で増強あるいは減弱すること⁶⁰⁾および大脳皮質運動野の刺激でRenshaw細胞が発火すること¹¹⁶⁾から、S W s および P S P の出現には、S N P および T N P と同様に、小脳が係わっている可能性が考えられる。S W s および P S P が抑制現象であることは実験2の結果から明らかである。一方、S N P および T N P は興奮性現象である。これらの神経制御的に相反する末梢性現象と中枢性現象の出現時間の対応は、これらの現象の起源が小脳にあるためであると推察される。S W および R S W の出現は、P S P を出現させる神経機構が、意図した筋活動を達成するための運動準備状態の形成と連動して活動したためであると考えられる。

バドミントンにおける重要な技術であるオーバーヘッド・ストローク・プロダクション動作における熟練者と未熟連者のインパクト時の筋活動を比較した実験¹⁸¹⁾は、前腕筋のP S P は熟練者ではほとんどの試行で出現したが、未熟連者ではそうでなかったことを示している。この違いはシャトルとラケットとのインパクト時にラケットを急激にしっかりと握るかそうでないかの相違によるためと思われる。このことから、P

S P は筋力の衝撃的発揮を必要とする運動およびスポーツにおける巧緻性と強い関係があると考えられる。

5. 要約

S W s および P S P と上位中枢性の筋運動調節の関係の有無およびそれらの機能的役割を明らかにするため、外的負荷の無い状態での肘関節のできるだけ素早い伸展およびできるだけ急激な等尺性肘伸展力の発揮を行わせ、S W s、P S P および運動前脳電位成分の出現に及ぼす筋収縮様式の影響を検討すると共に、実験4において観察されたS W s および P S P と運動前脳電位構成成分の出現時間関係が筋収縮様式の違いによって異なるか否かを検討した。被験者は実験4における被験者と異なった。得られた主な結果は次のとおりである。

1) S W s および P S P は各筋収縮様式の条件下で出現したが、これらの出現率は肘関節伸展条件下よりも肘伸展力発揮条件下において明らかに高く、有意な差が見られた (S W s および P S P 共に $P < 0.01$)。

2) 肘伸展力発揮条件下における P S P の持続時間と肘関節伸展条件下におけるそれとの間に有意な差がみられ、肘伸展力発揮条件下において長かった ($p < 0.01$)。

3) 肘伸展力発揮条件下においては、実験4で観察された F N P、S N P および T N P の3つの運動前脳電位成分が同定された。これら3成分の振幅は運動肢と反対側の左の脳半球において有意に大きかった (それぞれ $P < 0.05$ 、 $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$)。F N P、S N P および T N P の各平均出現時間は、1.36 sec、485 msec、および58 msecであった。

4) 肘関節伸展条件下においてはTNP成分は出現せず、FNPとSNPの2成分が同定された。これら2成分の振幅はやはり左の脳半球において有意に大きかった(それぞれ $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$)。2つの成分の出現時間はFNPの場合、1.32 secで、SNPの場合、446 msecであった。

5) SWSはSNP相で出現し、PSPはTNPと対応して出現した。

6) 以上の結果から、SWSおよびPSPは随意筋運動の中枢調節と関連があり、筋力を急激に発揮するための中枢プログラムおよびその筋運動の開始命令の形成を背景として出現すると結論することができる。また本実験結果と実験4で得られた結果から、PSPの機能的役割は弱い筋収縮を保った状態から筋力を急激に発揮する状況下において、発揮する筋力の増加速度を速めるために、相動性放電の上昇を速めることにあるといえる。

IX まとめ

人間の随意運動は骨格筋の収縮によって発現し、運動の速さ、強さ、方向、持続性および正確さを決定するのが神経系の働きである。神経系は運動に参加する筋の活動順序、収縮の強さと速さおよび収縮持続時間などを調節するとともに、筋活動の興奮および抑制を巧妙に上位中枢レベルと脊髄レベルで調節する。筋活動の興奮・抑制の神経制御は、目的とする運動の達成に非常に重要で、筋収縮中における相反性神経支配による拮抗筋の抑制はその代表である。この相反性抑制現象は表面筋電図上でsilent periodとして見ることができる。このほか、相動性筋放電に先行して出現するsilent periodがある⁷²⁾。これは運動肢主働筋に随意的な緊張を加えた準備状態から随意運動を急激に発現させると、相動性筋放電に先行して出現する持続性筋放電の一時的な消失のことで、動作前silent period (premovement silent period、P S P) と呼ばれており、上位中枢性の抑制現象と考えられている²²⁴⁾。P S Pは筋収縮速度が速いほど出現しやすく、敏捷性および巧緻性と深い関係があると考えられている^{86), 223)}。しかしながら、報告されているP S Pの出現頻度^{210), 224)}は速い収縮を行えば必ず出現するものではないことを示しており、負荷重量のP S P出現率への影響からみてP S Pは筋収縮速度とよりも、むしろ速くて強い筋収縮すなわち急激な筋力の発揮と関係が深いとも考えられている¹⁹⁰⁾。このようにP S Pがどのような筋収縮様式と関連深いのか、さらに随意運動を急激に起こす相動性筋活動に対しどのような機能的役割を果たしているかは十分に研究されていない。

相動性筋放電に先行して持続性筋放電が特徴ある筋電図波形に変化することが報告されている¹⁹⁰⁾。その波形の特徴は鋸歯に類似している点

であり、筋電位のピークとピークの時間間隔が20 - 30 msecと一定であるため、脊柱起立筋から記録されたこの筋電図は律動的筋電図 (rhythmic slower wave、RSW) と名付けられた。しかしながらRSWは全く研究されておらず、神経系がもたらす生理現象であるかどうかも明らかでない。このほか、RSWほどに律動的ではないが、持続性筋放電が徐波化した波形 (slower wave) も記録されたことが報告されている¹⁹⁾。

本研究では、脊柱起立筋以外の筋におけるRSW出現の有無、RSW出現中の運動単位活動、反応運動における予告合図前後の筋電位周波数成分、PSPの相動性筋活動に対する効果、RSWおよびPSPと運動前脳電位成分の出現関係、筋収縮様式がRSWおよびPSPの出現並びに運動前脳電位構成成分に及ぼす影響などに関して知見を得ることを目的とした。

RSWが生理現象であるならば脊柱起立筋以外の骨格筋からも記録できるはずであり、筋電位ピーク間隔が20 - 30 msecであるという時間間隔は被験者間で同一であるはずである。これを確認するために立位前屈姿勢から急激な腰部伸展動作を自発的に発現させ、この動作に参加する複数の筋から導出した表面筋電図を調べた結果、RSWは脊柱起立筋のほかに半腱様筋および大臀筋からも記録され、同一試行において複数の筋の筋電位記録に観察できることもあった。RSWの筋電位ピーク間隔は被験者間で同一であった。これらの結果からRSWは生理現象であることが確かめられた。また、RSWは振幅の増加をともなって出現したことから、RSW出現中に運動単位の同期化活動が起こっている可能性が示唆された。RSWは相動性筋放電の300 msec前の時点を過ぎてから出現することが多かったことから、運動開始の準備と関連づけて考

えられた。RSWの出現頻度の高い被験者のPSP出現率は低く、逆にRSWの出現頻度が低いか、もしくは出現しなかった被験者のPSP出現率は高かった。PSPはRSWに続いて出現することがあった。RSWほど律動的ではない波形(slower wave、SW)も観察され、SWに続いてRSWが出現することがあった。このSWはRSWが出現する過程において出現するものと考えられたため、SWとRSWとを合わせた総称を本研究ではSWsと呼ぶことにした。

次にRSWの筋電位ピーク間隔が20-30 msecであるのは、その時間間隔で起こる運動単位の同期化のためであるか否かを研究するために、表面電極および針電極による筋電位を同時に記録した。運動はやはり立位前屈姿勢からの急激な腰部伸展で、反応合図に応じて開始させた。RSWの出現中、いくつかの運動単位の同期性放電がRSWの筋電位ピークと対応して観察された。この事実からRSWは間違いなく神経性の生理現象であり、その筋電位ピーク間隔は20-30 msecの間隔で起こる運動単位の同期化活動に依存していることが確認された。RSWの振幅は持続性放電の振幅よりも大きくなる場合と、変化がみられない場合があったことから、運動単位活動の同期化の程度がRSWの振幅に影響したと思われる。RSWは反応合図の230 msec前に出現することがあった。この結果はRSWが運動開始の準備と関連があるという考えをさらに強めさせた。相動性筋放電がPSPに続いて出現するパターンのほかに、持続性筋放電のRSWへの変化に続いて相動性筋放電が出現するパターン、および持続性放電が1つの筋電位ピークをもったSWに変わり、続いてPSPへと変化し、その後相動性筋放電が出現するパターンが観察された。これらの相動性筋放電に先行した持続性筋放電の様々な変化様相から、RSWはPSPと同様に上位中枢性の抑制現象である

と考えられ、その出現メカニズムはP S Pと同一であると推察された。

R S Wが運動の準備と関連があるならば、反応運動における予告合図の運動準備に対する効果を考えると、R S Wが出現しなくても持続性筋放電の周波数成分が変化することが考えられる。12名の被験者に立位前屈姿勢から腰部伸展運動を20回行わせ、各試行から得られた予告合図前後の平均周波数を比較検討した。5名の被験者が予告合図前の平均周波数よりも予告合図後の平均周波数の方が有意に低い値を示し、これらの被験者の予告合図後の持続性放電は視覚的に十分識別できる徐波へ変化した。予告合図後の平均周波数の低下および徐波の出現は上位中枢における運動の準備と関連があると考えられた。

随意運動と関連した脳電位を頭皮上から記録することができる。この運動関連脳電位は主働筋をリラックスさせた状態から、自発性随意運動を発現する条件のもとで研究されている。運動関連脳電位のうち運動前の脳電位の構成成分については、Deeckeら(1969, 1977)およびVaughanら(1968)は3成分から構成されると報告し、Shibasakira(1980a)は4成分を同定している。随意運動開始の400-500 msec前に出現する陰性脳電位(NS'成分)は運動の準備状態の形成を反映することが示唆されている^{140), 171)}。また相動性筋放電の直前に出現する陽性電位と陰性電位は運動開始と関連した大脳皮質活動および運動野錐体路細胞の興奮との関連で考えられている²⁷⁾。

運動関連脳電位は持続性筋放電を保った状態から、自発性随意運動を開始する条件下で研究されていないので、持続性筋放電の保持が運動前脳電位成分にどう影響するかは不明であるが、R S WおよびP S Pが上位中枢性の現象であるならば、R S WおよびP S Pの出現と対応した運動前脳電位成分が出現する可能性がある。またP S Pは相動性筋放電の

直前に出現することから運動の開始命令との関連が考えられる。そこで、R S WおよびP S Pと上位中枢における運動準備状態の形成および運動開始命令との関係を明らかにするため、これらの持続性放電の変化と運動前脳電位変動との時間関係を検討した。また表面筋電位および脳電位の原波形の変化も調べた。このほか、P S Pの相動性筋放電に対する効果も検討した。右利きの男子被験者に等尺性の右肘伸展力を急激に発揮させ、頭頂および左右の中心野から脳電位を単極導出法で記録し、右上腕三頭筋から表面筋電位を導出した。脳電位の原波形が陰性変動するとともにS W sが出現した試行があった。加算平均した運動前脳電位は3つの陰性脳電位成分に分かれた。最初の成分(F N P)は相動性筋放電の約1 sec前に出現し、二番目の成分(S N P)の出現は相動性筋放電の平均440 msec前であった。三番目の成分として同定された非常に急峻な勾配の陰性電位(T N P)は、運動関連脳電位成分としてまだ報告されていない成分であり、相動性筋放電の平均47 msec前に出現した。この3成分の振幅は運動肢と同側の右脳半球よりも運動肢と反対側の左脳半球において大きく、S N PおよびT N Pの各振幅の左右差は有意であった。このことはS N PおよびT N Pは運動と特異的な関係を有する脳電位であることを示唆している。S N Pは運動皮質の準備状態を反映していると認められているN S' (140), (171)と対応する成分であると考えられる。S W sはS N P相が出現している時期に出現した。このことはS W sは脳における運動の準備状態の形成を反映した現象である可能性を示唆している。T N Pと対応して出現したP S Pは、運動の開始命令と関連があることが十分考えられる。相動性筋放電の振幅の上昇時間はT N P成分が出現しなかった被験者よりもT N Pが出現した被験者において短かく、筋力曲線の上昇時間も同様であった。さらにP S Pの出現頻

度の高い被験者における相動性筋放電および筋力曲線の上昇時間は、P S P の出現頻度の低い被験者よりも速かった。これらの結果はT N P およびP S P 共に筋力の急激な発揮と関連した中枢性および末梢性の現象であり、これらの出現は筋運動調節の影響を受ける可能性を示唆している。

上記の脳電位と表面筋電位の同時記録の実験において、S W s およびP S P が上位中枢における運動の準備並びに開始と関連した末梢性現象である可能性が示唆された。このことから、次にS W s およびP S P と筋運動の中枢性調節との関係の有無およびそれらの機能的役割を明らかにするために、外的負荷の無い状態での肘関節の素早い伸展および急激な等尺性肘伸展力の発揮を被験者の利き腕で行わせ、S W s、P S P の出現および運動前脳電位成分の出現に対する筋収縮様式の影響を検討した。このほか、これらの末梢性の筋電位現象と中枢性現象である脳電位変動の出現時間関係も検討した。被験者は全員右利きの男子大学生であり、頭皮上の3箇所（頭頂、左右の中心野）から脳電位を記録すると同時に、右上腕三頭筋から表面筋電位を記録した。この実験においても、肘伸展力発揮の条件下においてF N P、S N P およびT N P の3つの運動前脳電位成分が同定されたが、肘関節伸展の条件下においては、T N P 成分は出現せず、F N P とS N P の2成分が同定された。肘伸展力発揮の条件下において出現した3成分の振幅は運動肢と反対側の左脳半球において有意に大きく、肘関節伸展条件において出現した2成分の振幅もやはり左脳半球において有意に大きかった。S N P は2つの異なった筋収縮様式の条件下で出現したことから、この成分は筋活動様式と特異的な関係をもたない成分であり、随意運動の準備状態（運動の中枢プログラム）の形成と関係した運動皮質活動を反映した電位であると考えら

れる。脳電位と表面筋電位を同時に記録した2つの実験の結果から、TNPは急激な筋力の発揮命令と特異的に関係した運動皮質活動を反映した電位であるといえる。SWsおよびPSPは各筋収縮様式の条件下で出現したが、これらの出現率は肘関節伸展条件よりも肘伸展力発揮条件において明らかに高く、有意な差がみられた。肘伸展力発揮の条件下におけるPSPの持続時間は、肘関節伸展の条件下よりも有意に長かった。これらの結果はSWsおよびPSPが筋活動様式の影響を受けることを示唆している。肘伸展力発揮の条件下では、SWsはSNP相で出現し、PSPはTNPと対応して出現した。以上のことから、SWsおよびPSPは筋運動の中枢調節と関連があり、急激な筋力の発揮のための上位中枢における運動プログラムの形成および運動開始命令の形成を背景として出現する現象であると結論することができる。PSPがTNPと対応して出現したことは、PSPが上位中枢性の抑制現象であることを示唆している。また脳電位と表面筋電位を同時記録した2つの実験の結果から、PSPの機能的役割は弱い持続性筋収縮を保った状態から筋力を急激に発揮する状況下において、発揮する筋力の増加速度を速めるために、相動性放電の上昇を速めることにあるといえ、このような状況下における巧緻性との関係があると考えられる。異なった筋収縮様式の条件下におけるPSPの出現頻度および持続時間の結果は、できるだけ素早い関節伸展運動の開始直前の脊髄 α 運動ニューロン群の抑制はその運動の開始にとって効果的ではないことを示唆している。

バドミントンにおける重要な技術であるオーバーヘッド・ストローク・プロダクション動作における熟練者と未熟連者のインパクト時の筋活動を比較した実験¹⁸¹⁾は、前腕筋のPSPは熟練者ではほとんどの試行で出現したが、未熟連者ではそうでなかったことを示している。この違

いはシャトルとラケットとのインパクト時にラケットを急激にしっかりと握るかそうでないかの相違によるためと思われる。このことはP S Pの出現頻度は筋力の衝撃的発揮を必要とする運動の熟練の度合および巧緻性の指標になりえることを示唆している。

X 総括的考察

持続性筋収縮を保った静止状態から随意筋収縮を急激に行った際、急激な筋収縮に先行して持続性の表面筋電位が一時的に消失することが知られている⁷²⁾。動作前silent period(premovement silent period、P S P)と呼ばれるこの筋電位消失現象は四肢筋を被験筋とした関節伸展運動において主に研究されている^{73), 87), 128), 210), 222)}。P S Pの出現に不可欠な要因は主働筋の収縮速度が速いことであるといわれている^{74), 224)}が、報告されている出現頻度^{210), 224)}は速い収縮を行えば必ず出現するものではないことを示している。著者(1983)が行ったP S Pの研究はその出現条件として筋収縮速度の他に筋収縮力の考慮の必要性を示唆しているが、この問題の検討はまだ行われていない。要するにP S Pの機能的役割は解明されていないのである。

著者の上記の研究において、P S Pのほかに持続性の表面筋電図(持続性放電)の徐波化、すなわち筋電位ピーク間隔が20-30 msecの鋸歯状の表面筋電図(rhythmic slower wave、R S W)への変化が急激な随意運動の開始に先行して観察された。このほかR S Wほど律動的ではないが持続性放電の徐波(slower wave、S W)への変化が随意運動の数100 msec前に起こり、その徐波化への初期にR S Wが出現した。随意運動の開始前における表面筋電位の徐波化を主題とした研究報告はなく、R S WおよびS WはP S Pと共に注目すべき現象である。

本研究の目的は、随意筋運動の準備期に出現するR S Wが脳における特異的な運動準備状態の形成活動の脊髄への投射によって起こる神経活動を反映した現象であるか否か、およびP S Pは運動開始命令と関連した上位中枢性の現象であるか否かを検討し、R S WおよびP S Pと上位

中枢における筋運動調節との関係並びに R S W、P S P の機能的役割を運動生理学的に明らかにすることであった。この目的を達成するために、表面電極および針電極による筋電位と運動関連脳電位を記録した。

腰部伸展運動を急激に発現させて R S W の出現様相を検討した結果、筋電位ピーク間隔が 20 - 30 msec である表面筋電図 (R S W) が腰部伸展運動に関与する脊柱起立筋、大臀筋および半腱様筋から記録された。R S W の特徴である 20 - 30 msec の筋電位ピーク間隔は被験者間で同一であった (Fig. 5、Fig. 6、Fig. 7)。針電極と表面電極による筋電位を同時記録したところ、いくつかの運動単位の同期性放電が R S W の出現中に 20 - 30 msec の一定な間隔で記録され、R S W の筋電位ピーク間隔と対応した (Fig. 11、Fig. 12)。これらの結果から R S W は神経活動を反映した生理現象であることが確認された。自発性運動における R S W および S W (S W s) の出現時間の多くは相動性筋放電出現の 300 msec 前以内であった。また反応運動における予告合図から反応合図までの準備期間にも出現したことから、R S W は上位中枢における運動準備と関係した現象であると推察される。

運動関連脳電位のうち運動前の脳電位は運動の準備および運動開始と関連した大脳皮質活動を反映すると認められている^{27), 171)}。P S P は上位中枢性の現象であると考えられている^{74), 224)}。それゆえ S W s および P S P の出現と対応して運動前脳電位が変動することが予想される。そこで表面筋電位と脳電位を同時に記録し、表面筋電位変化と運動前脳電位変動との時間関係を検討した。その結果、運動前脳電位は 3 成分に識別され、最初の成分 (first negative potential、F N P) の出現は相動性筋放電の平均約 1 秒前であった。二番目の成分 (second negative potential、S N P) は相動性筋放電の平均 440 msec 前に出現し、S W s

の多くはこの S N P 相で出現した (Fig. 2 5、Fig. 2 6)。三番目の成分 (third negative potential、T N P) は P S P と時間的に対応して出現し (Fig. 2 5、Fig. 2 6)、その出現時間は相動性筋放電の平均 4 7 msec 前であった。T N P はこれまでに報告されていない運動関連脳電位成分である。T N P が出現した被験者の P S P 出現率は T N P が出現しなかった被験者よりも高かった。S N P および T N P の振幅は運動肢と同側の脳半球におけるよりも反対側の脳半球の方で大きく、その差は統計的に有意であった。このことは S N P および T N P が随意運動の準備および開始命令と関係があることを示唆するものである。以上の結果から、S W s および P S P は急激な随意筋運動の中枢プログラムの形成および運動開始命令とそれぞれ関係があると考えられる。

P S P の出現率が高かった被験者の相動性放電および筋力曲線の立ち上がり速度は、P S P 出現率が低かった被験者よりも速かった。また前述したように T N P 出現者の P S P 出現率は高かった。Table 1 1 はこれらの結果を要約したものであり、P S P は T N P と共に素早い動作とよりも急激な筋力の発揮とより関係が深いことを推察させる。そこで S W s および P S P と筋運動の中枢性調節との係わりの有無およびそれらの機能的役割を明らかにするために、外的負荷の無い状態での肘関節の素早い伸展および急激な等尺性肘伸展力の発揮を条件として、S W s および P S P の出現および上記の運動前脳電位構成成分に対する筋収縮様式の影響を検討した。結果は Table 1 2 に要約されている。P S P および S W s の出現率は肘関節伸展条件下でよりも肘伸展力発揮条件下で有意に高く、P S P の持続時間もまた肘伸展力発揮条件下で有意に長かった。肘伸展力発揮条件下においては、上記の F N P、S N P および T N P の 3 つの運動前脳電位成分が同定されたが、肘関節伸展条件下では T

N P を同定することはできなかった。以上の結果は、S W s および P S P が随意筋収縮のパラメータ（力および速度等）の中枢調節と関係があり、筋力を急激に発揮するための中枢プログラムおよびその筋運動の開始命令の形成を背景として出現することを示唆しており、P S P は T N P と密接な関係のある生体電気現象であるといえる。異なった筋収縮様式の条件下における P S P の出現頻度および持続時間の結果は、できるだけ素早い関節伸展運動の開始直前の脊髄 α 運動ニューロンの抑制はその運動の開始にとって効果的ではないが、急激な筋力の発揮に際してはその抑制は効果的であることを示唆している。

以上を総括すると、R S W および P S P は上位中枢性の影響を受け、素早い関節運動とよりも急激な筋力の発揮とより密接に関係し、急激な筋力発揮運動の準備状態の形成および開始命令の生成を行う運動中枢活動の脊髄投射によって出現する上位中枢性の現象である。また P S P の機能的役割は弱い持続性筋収縮を保った状態から筋力を急激に発揮する状況において、発揮する筋力の増加速度を速めるために、相動性筋放電の上昇速度を速めることにあるといえる。

本研究は随意筋運動の神経性調節が筋収縮様式によって異なることを示唆しており、体力要素と深く関係する巧緻性、敏捷性、協調性およびパフォーマンスを問題とするとき、その研究で扱われる筋運動の神経-筋系の調節様式を考慮する必要があるといえる。随意運動制御の神経性要素の研究は、筋力や持久力等のエネルギー的体力の研究と同様に運動生理学上、非常に重要であると考えられる。

XI 結論

1. 表面筋電位のピークとピークの間隔が20-30 msecである律動的筋電図(RSW)は神経活動を反映した生理現象であり、その時間間隔は運動単位の間欠的な同期性放電によるものである。
2. RSWほど律動的ではないが、徐波化した筋電図(SW)およびRSW(これらの総称をSWsと呼ぶ)は自発性運動開始の数100 msec前に出現するほかに、反応運動における反応合図前にも出現した。
3. SW、RSWおよび動作前silent period(PSP)は同一の神経機序によって生じる上位中枢性の抑制現象であり、上位中枢性の脊髄運動ニューロンの抑制の程度を反映しているものと推察される。
4. 急激な等尺性筋力の発揮運動において同定された運動前脳電位成分は、運動開始の1.1-1.3 sec前に出現する第一成分FNP、同じく400-500 msec前に出現する第二成分SNP、および30-70 msec前に出現する第三成分TNPの3つであった。外的負荷の無い状態での素早い関節伸展運動においては、FNPおよびSNPは同定されたが、TNPは出現しなかった。
5. SWsおよびPSPの出現頻度は素早い関節伸展運動における

よりも、急激な筋力発揮運動において非常に高く、P S Pの持続時間も急激な筋力発揮運動においてより長かった。

6. S W s は S N P 相で出現し、P S Pの出現はT N Pの出現と対応した。
7. S N P および T N P の振幅は運動肢と反対側の脳半球において大きかった。
8. S N P および T N P の生理学的意義は次のように推察される。
 - 1) 第二成分 (S N P) は随意的筋運動の準備状態の形成と関連した運動皮質活動を反映する。
 - 2) 第三成分 (T N P) は急激な筋力の発揮を開始するための運動皮質活動を反映する。
9. 相動性筋放電および筋力曲線の上昇はT N Pが出現しなかった被験者よりもそれが出現した被験者において速かった。
10. P S Pの出現頻度の高い被験者における相動性放電および筋力曲線の上昇はP S Pの出現頻度の低い被験者よりも速かった。

以上のことから、S W s および P S P は随意筋収縮の上位中枢性調節の影響を受け、外的負荷の無い状態での素早い関節運動とよりも急激な等尺性筋力の発揮とより密接に関係し、急激な筋力発揮運動の準備状態の形成および開始命令の生成を行う運動中枢活動の脊髄投射によって出

現する上位中枢性の抑制現象であると結論される。これらの機能的役割、特に P S P の果たす役割は弱い持続性筋収縮を保った状態から等尺性の筋力を急激に発揮する状況において、発揮する筋力の増加速度を速めるために、相動性放電の上昇を速めることにあるといえ、P S P はこの状況における運動、スポーツの巧緻性の良さと関係があると考えられる。

謝辞

本論文をまとめるにあたって、ご多忙にもかかわらず懇切なご指導ご教示を賜った筑波大学体育科学系 池上晴夫教授、藤田紀盛教授、岡田守彦教授に深謝し厚く御礼申し上げます。また、本論文の執筆を始めるにあたり、ご教示ご鞭撻をいただいた日本人間工学会長 大島正光博士、筑波大学体育科学系 竹宮 隆教授に厚く御礼申し上げます。

本研究の遂行にあたって、ご教示とご支援をいただいた東京学芸大学特殊教育学科 鮫島宗弘教授、製品科学研究所基礎人間工学部生理情報工学課長 佐渡山亜兵氏、生理情報工学課主任研究官 増田 正氏、および筑波大学医療技術短期大学部 衣笠 隆助教授に御礼申し上げます。

本論文をまとめるにあたって、ご教示いただいた筑波大学体育科学系の諸先生に御礼申し上げます。

本研究をまとめるにあたって、ご支援とご鞭撻をいただいた製品科学研究所前所長 西原主計神奈川工科大学教授、製品科学研究所長 飯田健夫博士、基礎人間工学部長 永村寧一氏に御礼申し上げます。

本研究の推進にあたり、被験者としてご協力いただいた方々に感謝の意を表します。

平成4年9月

谷井克則

☒ および表

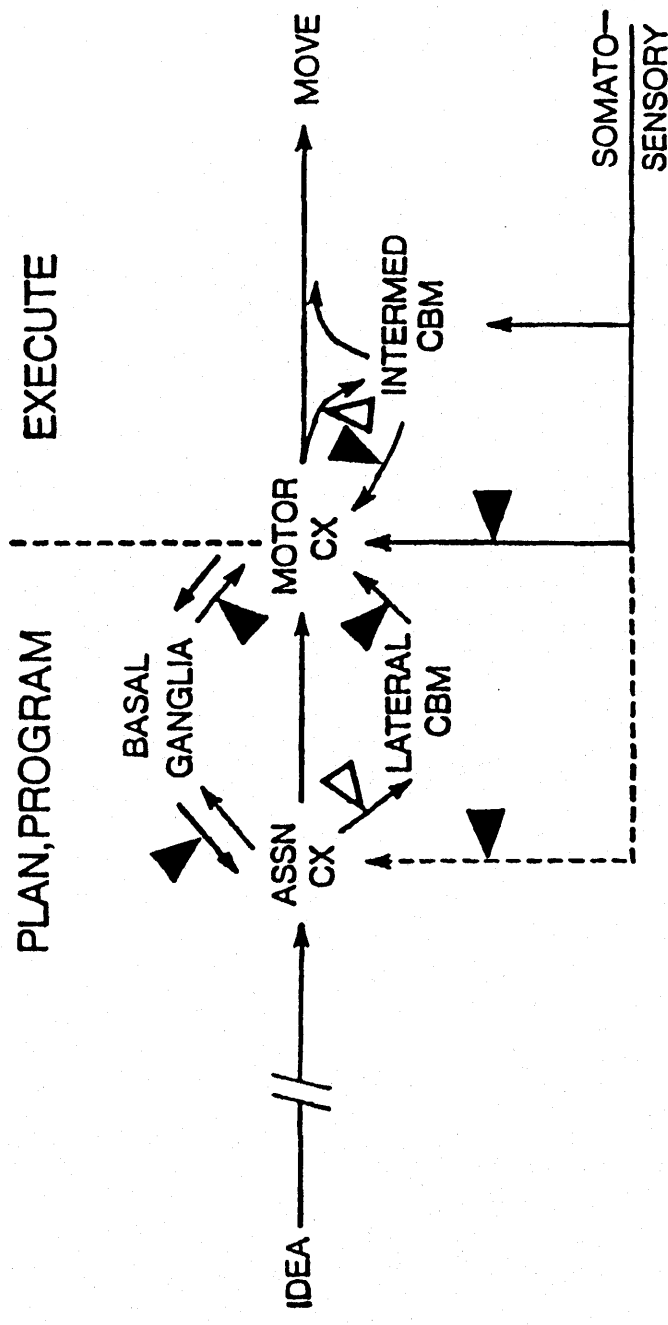


Fig. 1. 随意運動の発現に係わる神経信号の流れ
 MOTOR CX (運動皮質)、LATERAL CBM (外側小脳)、ASSN CX (大脳連合野)、BASAL GANGLIA (大脳基底核)、INTERMED CBM (中間小脳)、SOMATOSENSORY (体性感覚入力)。黒い矢印は視床でのシナプス連絡を、白い矢印は小脳前核群でのシナプス連絡を意味する。

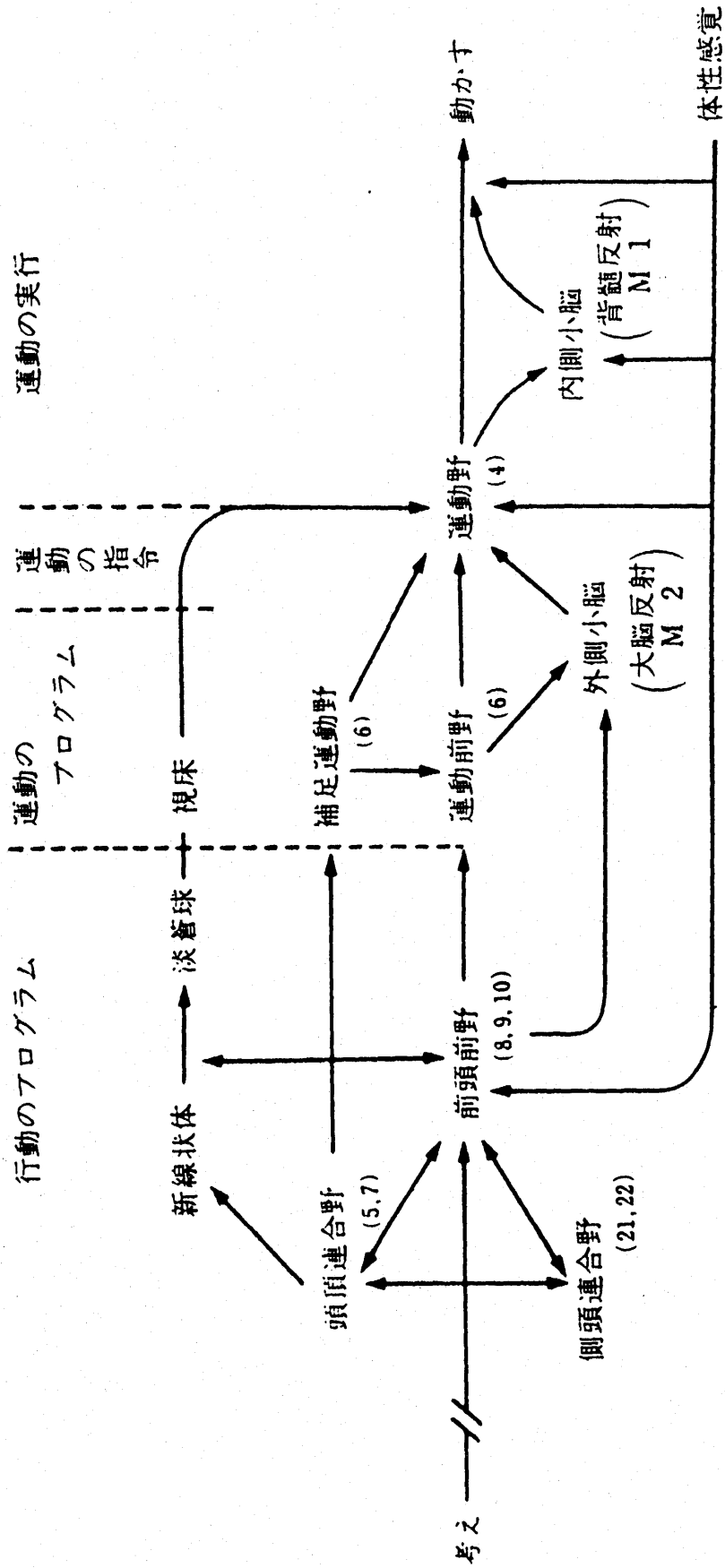


Fig. 2. 随意運動の発現に係わる脳内情報の流れ

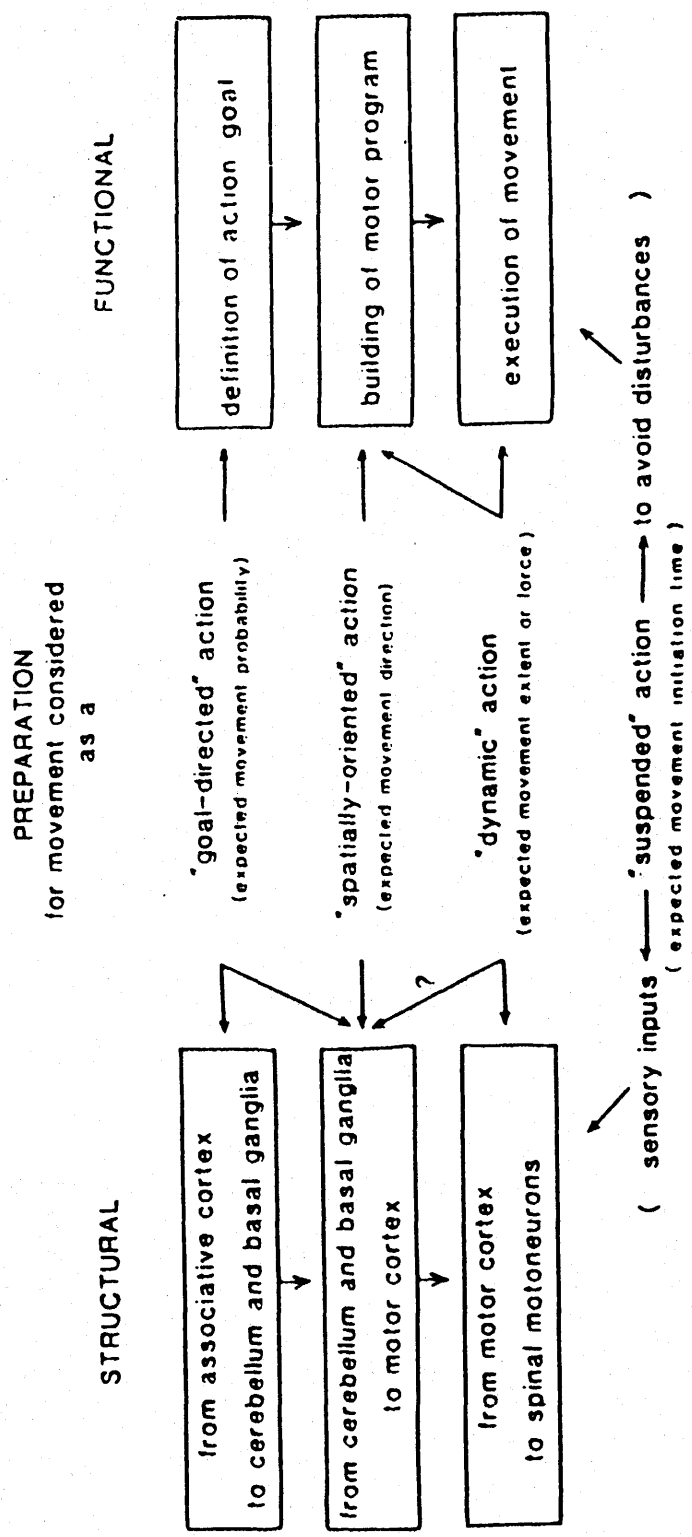


Fig. 3. 運動準備の3段階モデル

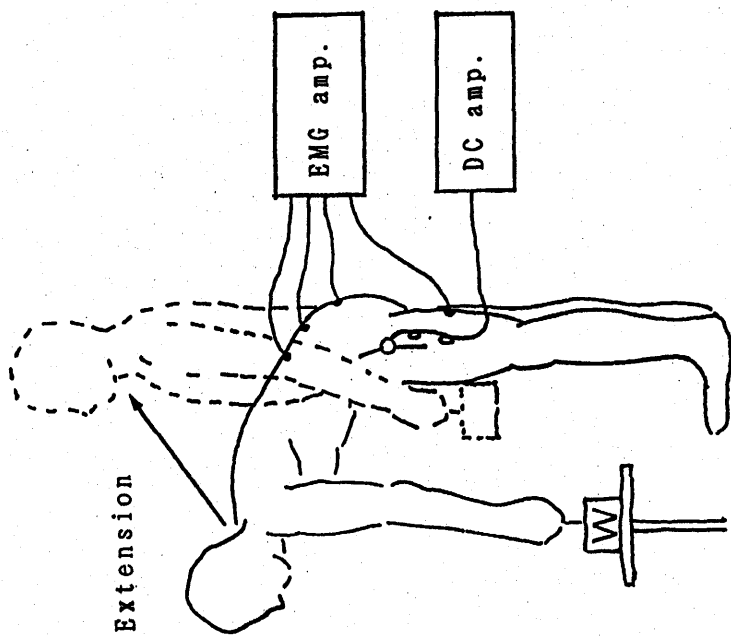


Fig. 4. Experimental diagram.

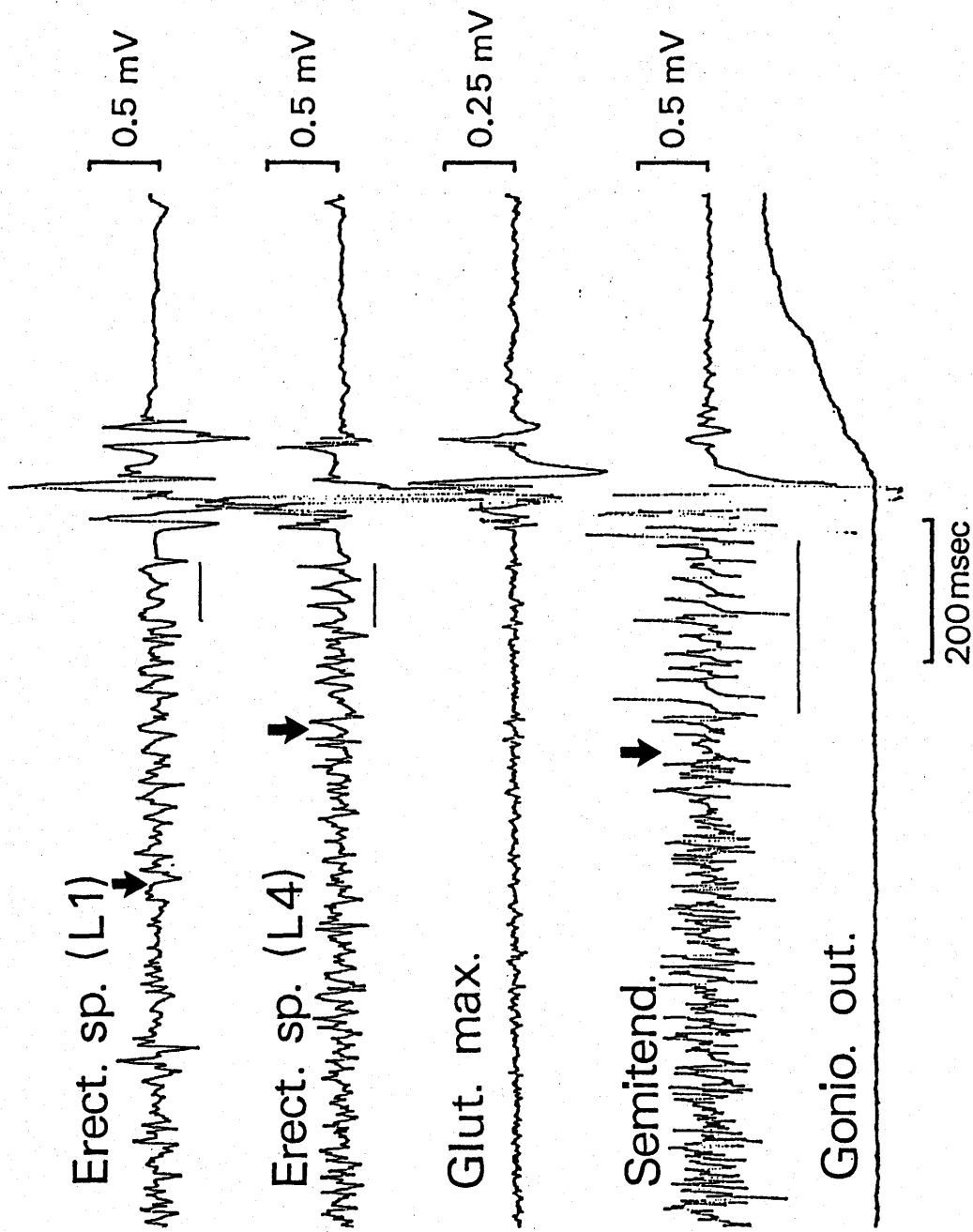


Fig. 5. Change of surface EMG in the preparatory phase to the rhythmic slower wave (underlined) before the movement. The large arrows above the EMG tracing show the appearance of the slower wave. The small arrows above the EMG tracing show the premovement silent period. PD means the phasic discharge. The deflection of the bottom line indicates the beginning of the movement. This chart was obtained from subject FS while straightening up under no external load conditions.

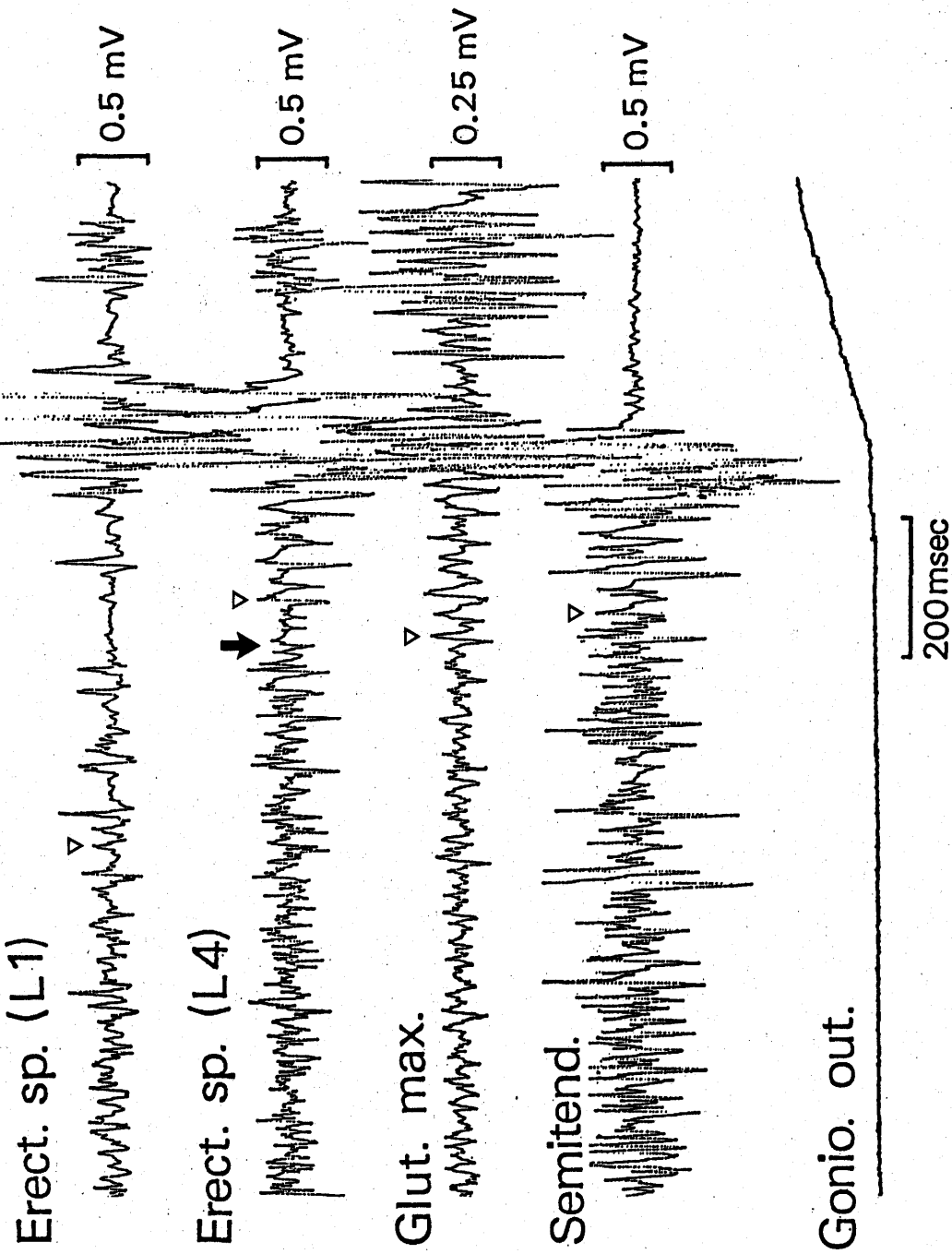


Fig. 6. Appearance of the rhythmic slower wave in the erector spinal muscle (L4), the gluteus maximus muscle and the semitendinosus muscle and change of the surface EMG in the erector spinal muscle (L1) to the slower wave. The white triangles show the appearance of the rhythmic slower wave. The black arrow shows the appearance of the slower wave. Oscillograph traces were obtained from subject SD while he was lifting a 10 kg weight.

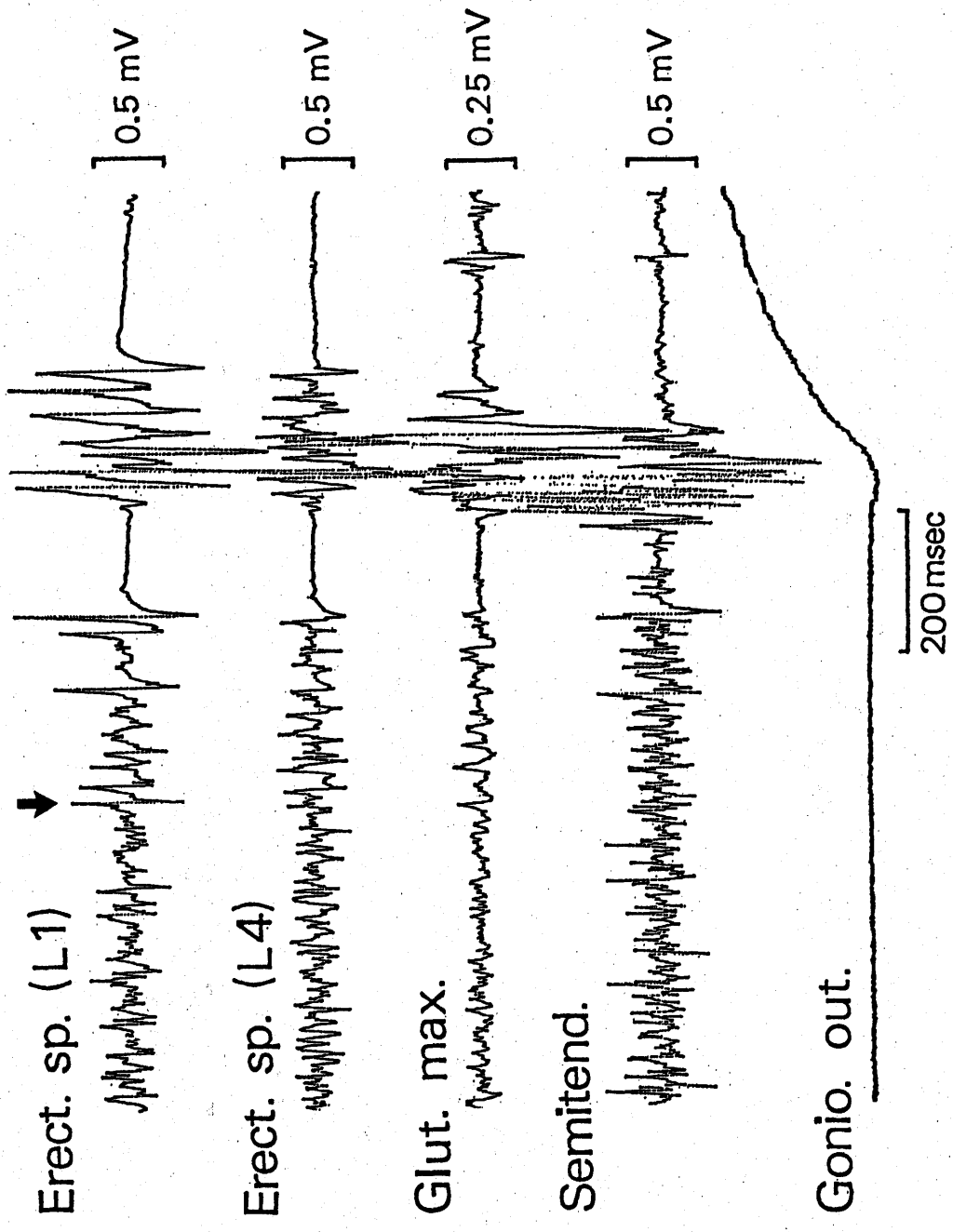


Fig. 7. Increase of the amplitude of the slower wave which was observed in the erector spinal muscle at the L1 level. The arrow above the top EMG trace shows the sudden change of the activity of the erector spinal muscle (L1) in the preparatory phase. EMG traces were recorded from subject SM while he was lifting a 10 kg weight.

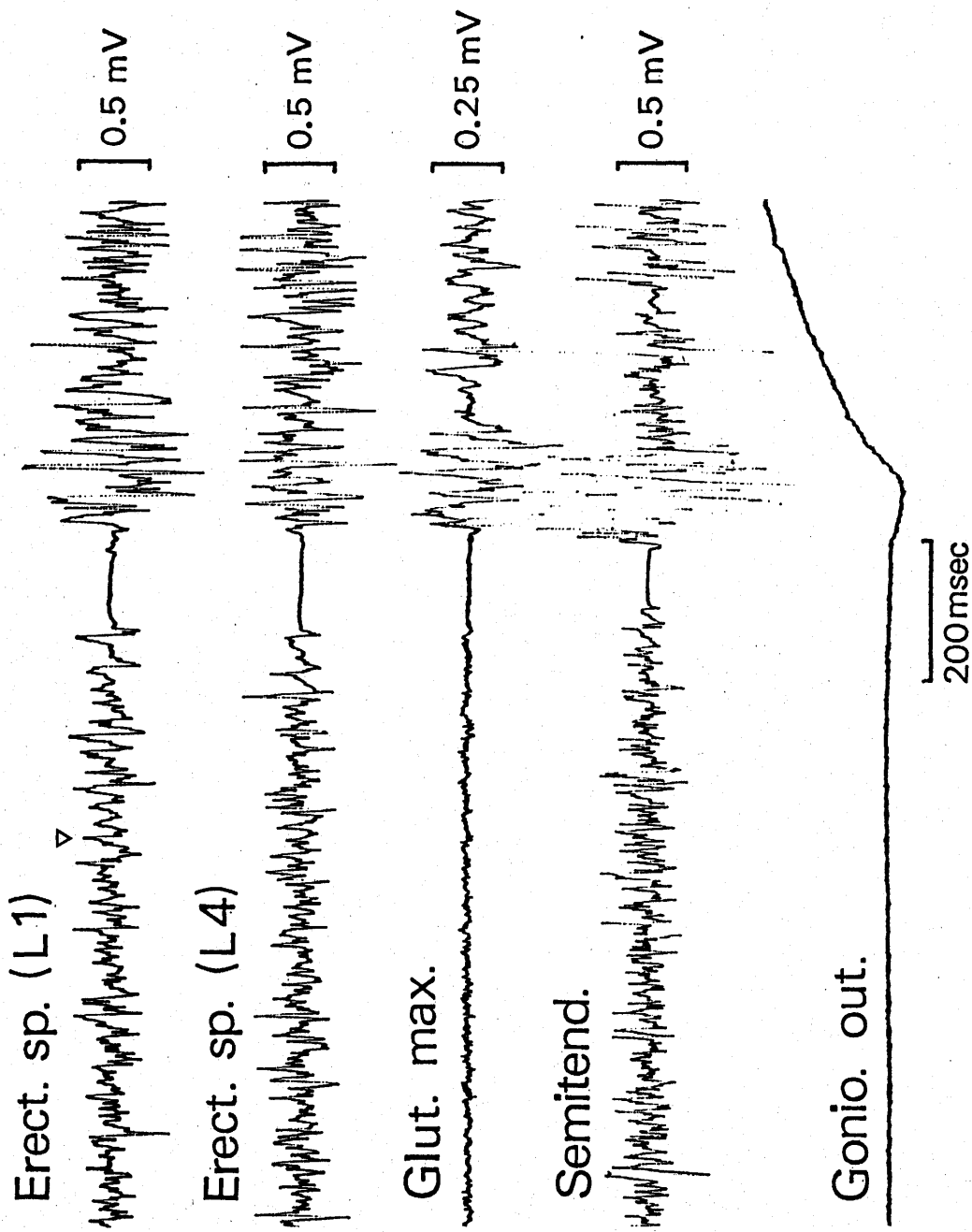


Fig. 8. Later appearance of the premovement silent period in the semitendinosus muscle than the appearance of premovement silent period in the erector spinal muscles. The white triangle above the top EMG trace shows the appearance of the rhythmic slower wave. EMG traces were recorded from subject SM while he was lifting a 20 kg weight.

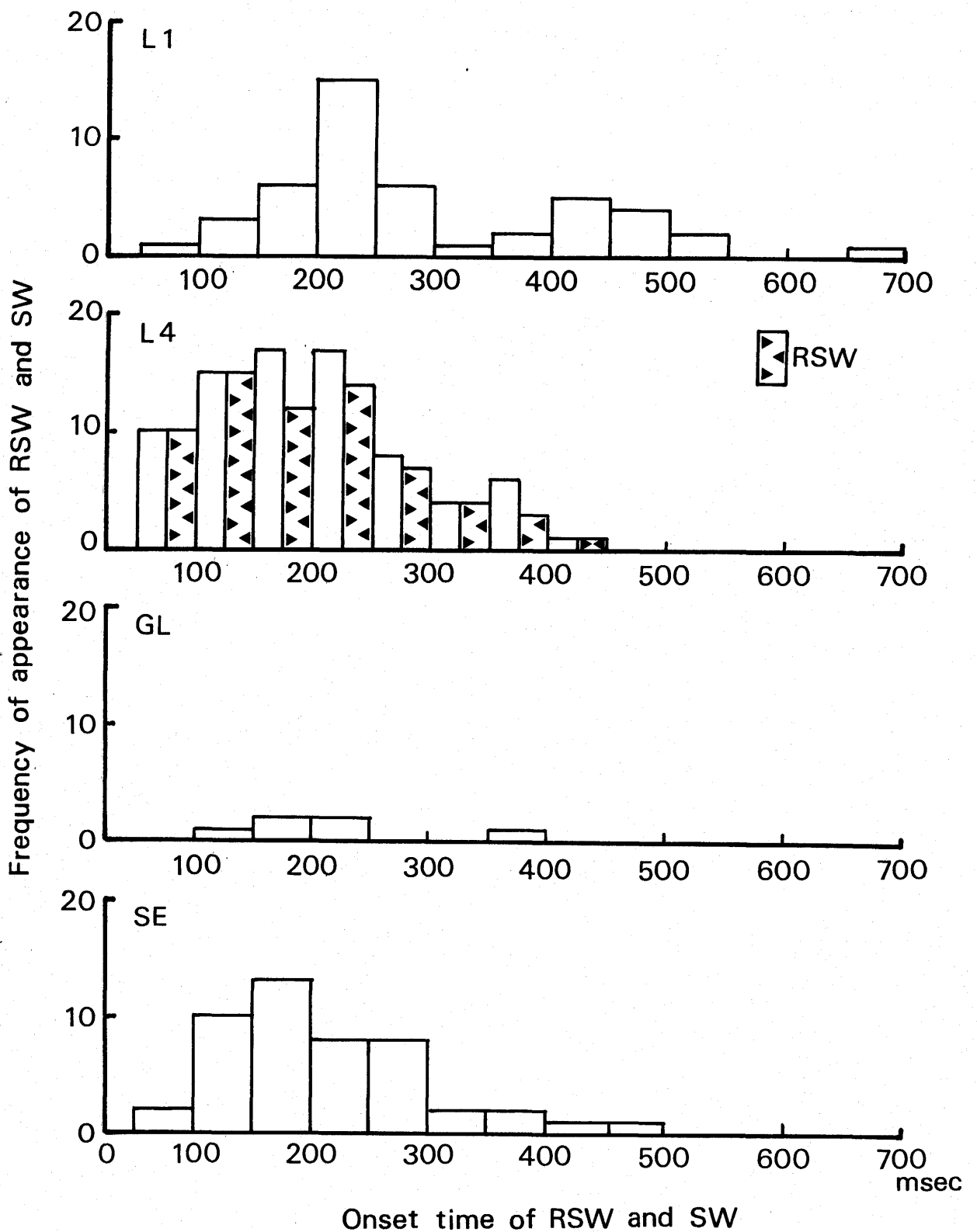


Fig. 9. Distribution of the onset times of the rhythmic slower wave and slower wave. Bars with a design show the distribution of the onset times of the rhythmic slower wave.

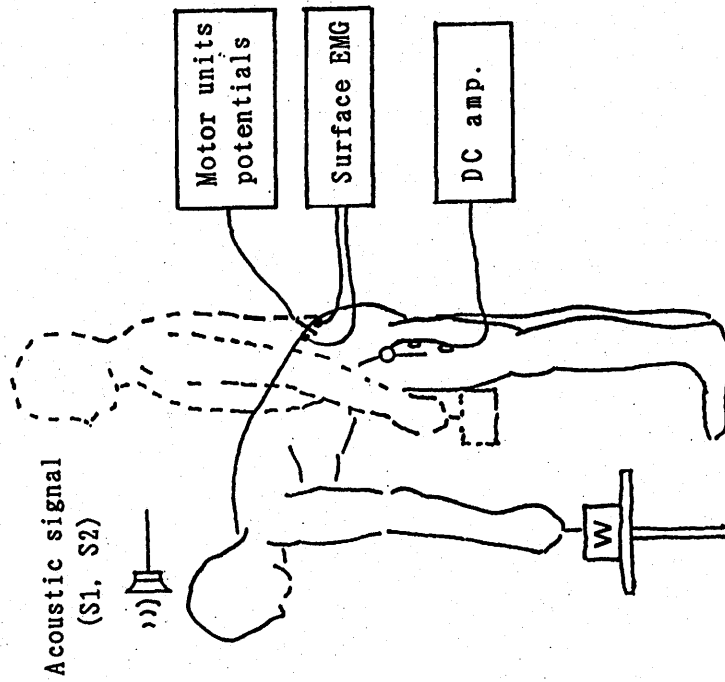


Fig. 10. Experimental diagram.

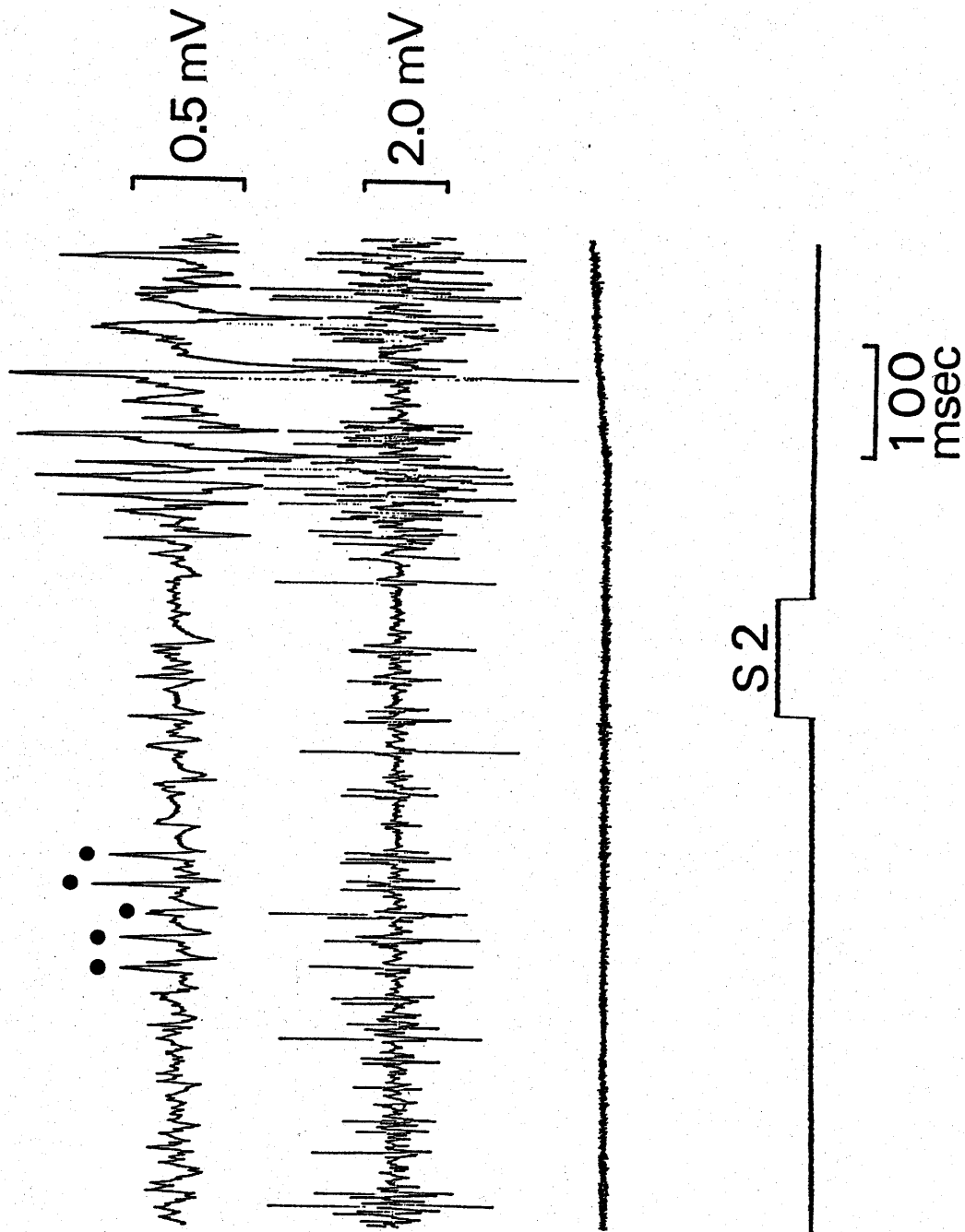


Fig. 1 1. Correspondence of synchronous motor unit discharges with EMG peaks in the rhythmic slower wave and slower wave. Top trace, surface EMG. Second trace, motor unit potentials. Third trace, signal from the hip-joint goniometer. Bottom trace, reaction signal (S2). Filled circles above the surface EMG show EMG peaks in the rhythmic slower wave with large amplitude. The upward deflection of the third trace indicates the onset of the trunk extension.

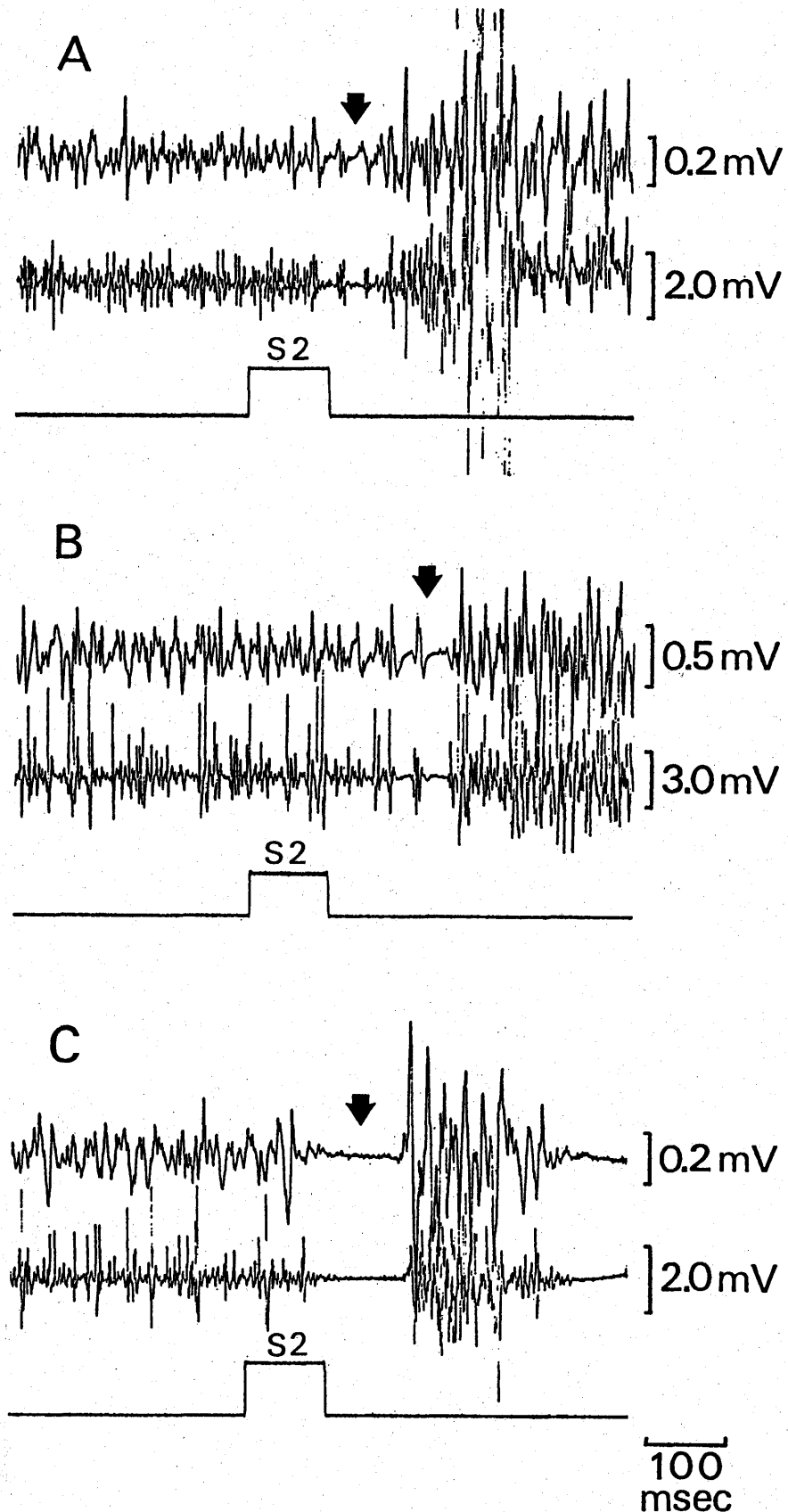


Fig. 12. Various changes of the surface EMG preceding the phasic discharge (arrows). A: the rhythmic slower wave. B: the slower wave followed by the premovement silent period. C: the premovement silent period. Top trace in each recording, the surface-recorded EMG. Second trace in each recording, the needle-recorded motor unit activity. Bottom trace in each recording, reaction signal (S2).

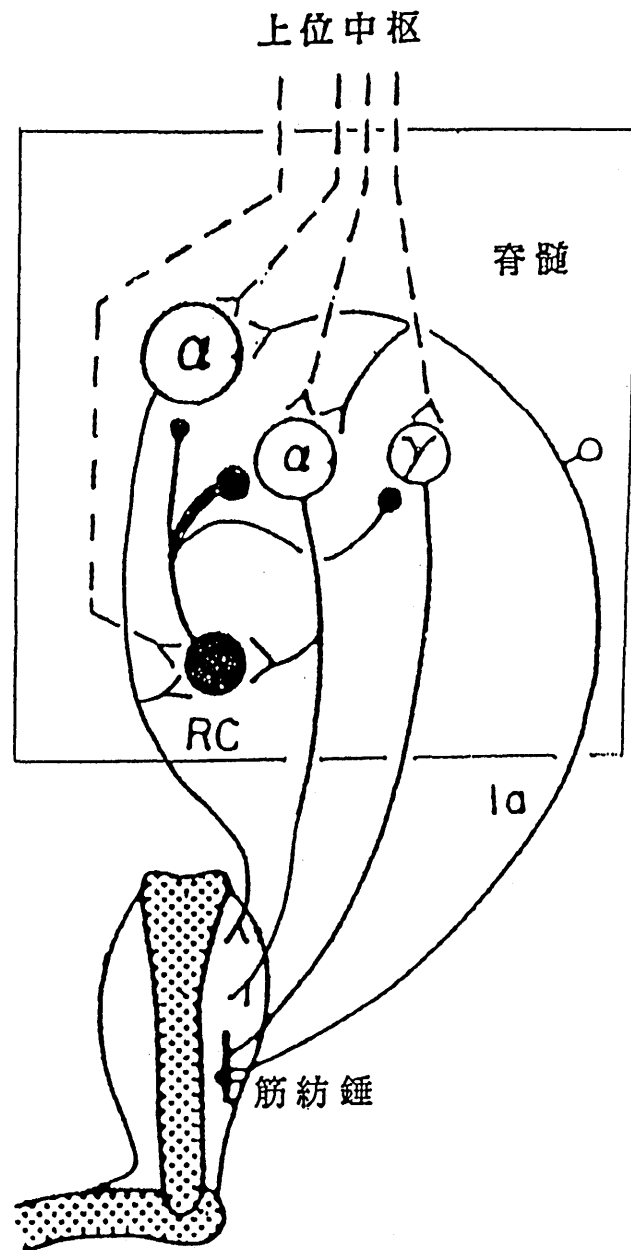


Fig. 13. 反回性抑制機構と γ 環

RCはRenshaw細胞を意味する。

大きい丸で囲まれた α は相動性の脊髄 α 運動ニューロンを表し、
 小さい丸で囲まれた α は緊張性の脊髄 α 運動ニューロンを表す。
 γ は γ 運動ニューロンであり、IaはグループIa線維である。
 相反性神経支配に関する神経回路は省略されている。

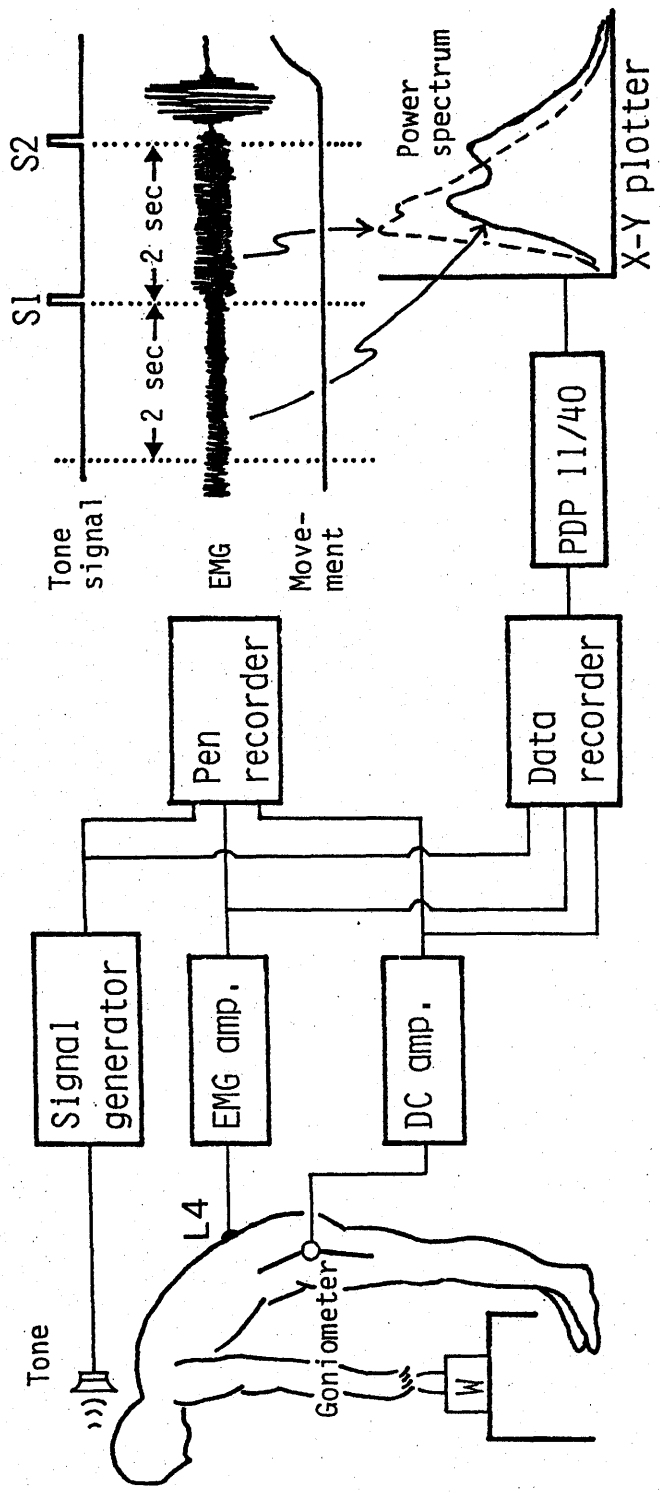


Fig. 1 4 . Experimental diagram.

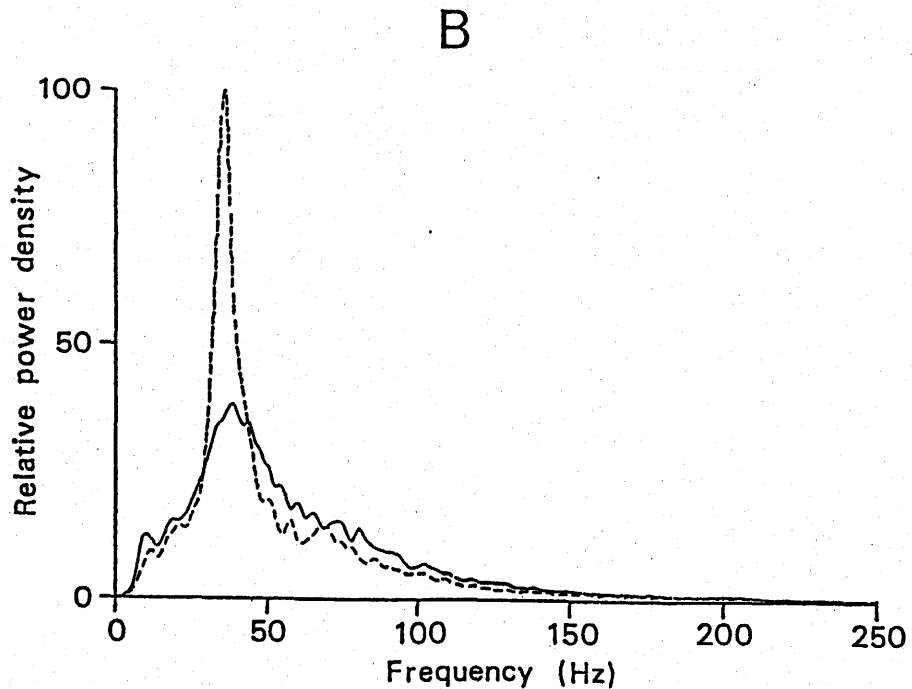
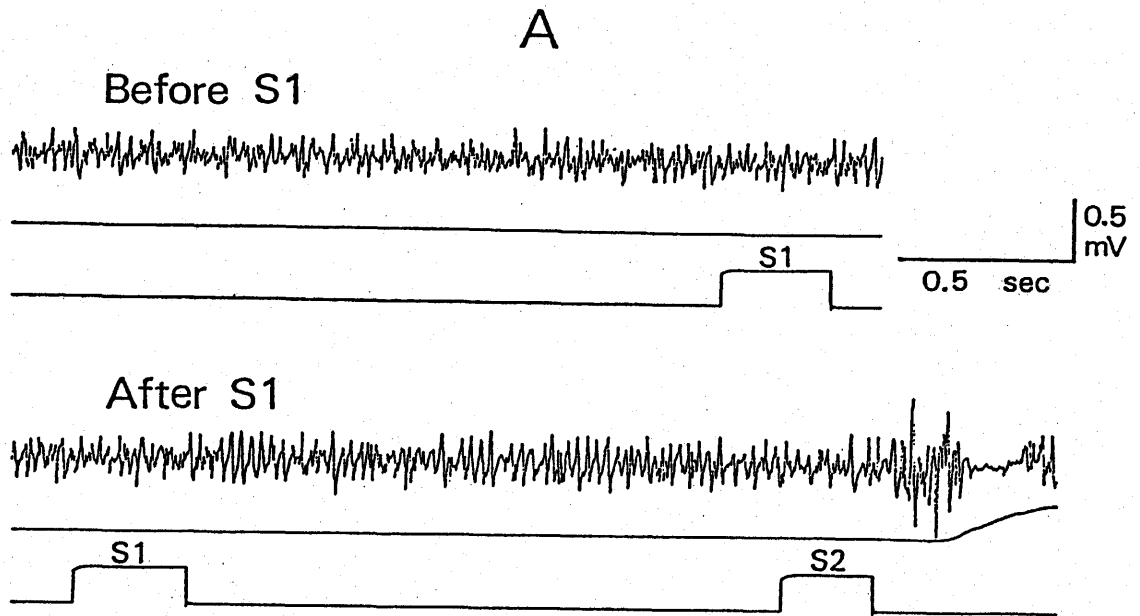


Fig. 15. The surface EMG and the EMG spectra before and after the warning signal (S1). A: the surface EMG before the movement is separated into two figures. Upper figure, before S1. Lower figure, after S1. Middle line in each figure shows the signal from the hip-joint goniometer. B: averaged EMG spectra for 2 sec before S1 (solid line) and 2 sec from S1 until the reaction signal (S2) (dashed line). The EMG spectra are shown for the relative power density as a proportion of the maximum power of the EMG spectrum after S1. A small peak at about 10 Hz in each averaged EMG spectrum is due to the ECG signal.

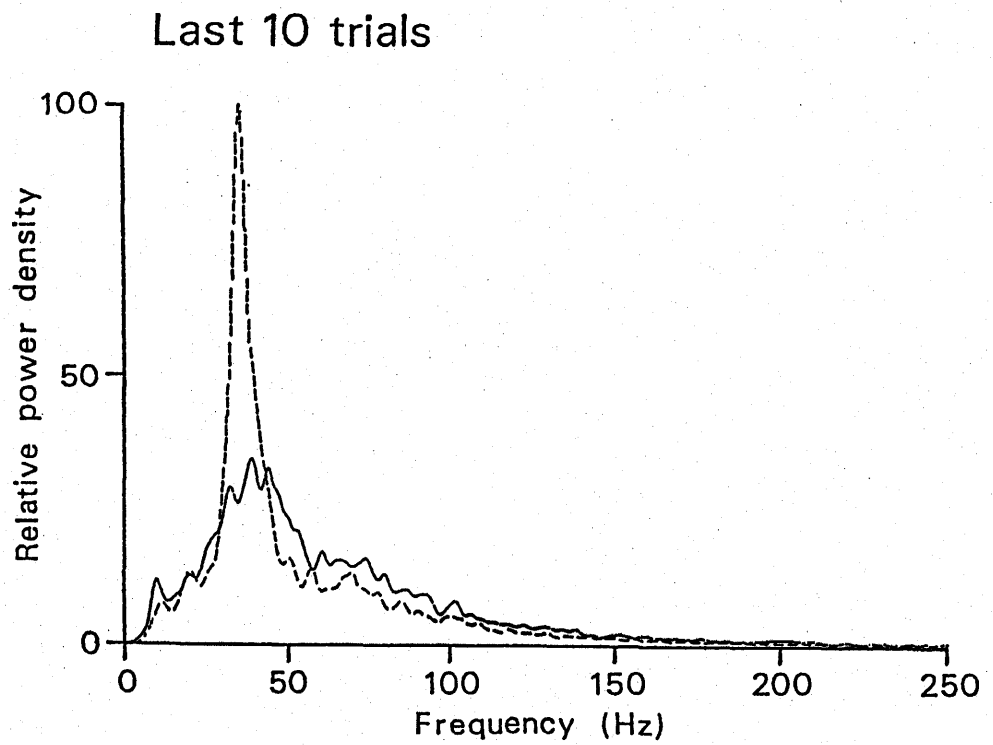
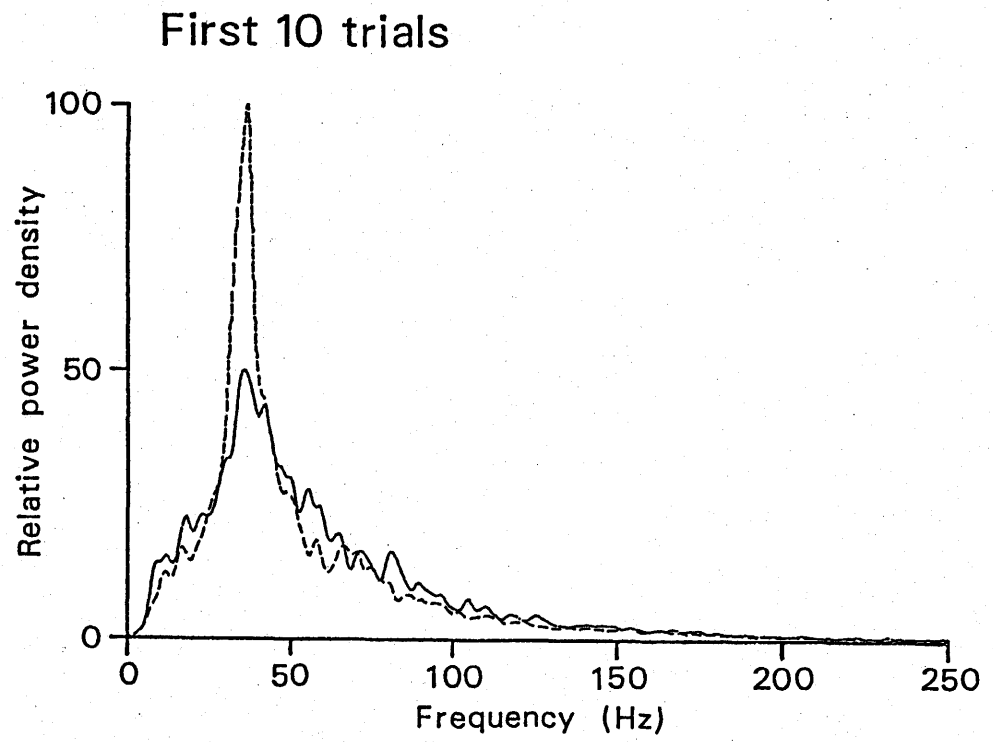


Fig. 16. Averaged EMG spectra before and after S1 in the first 10 trials and the last 10 trials of the total of 20 trials.

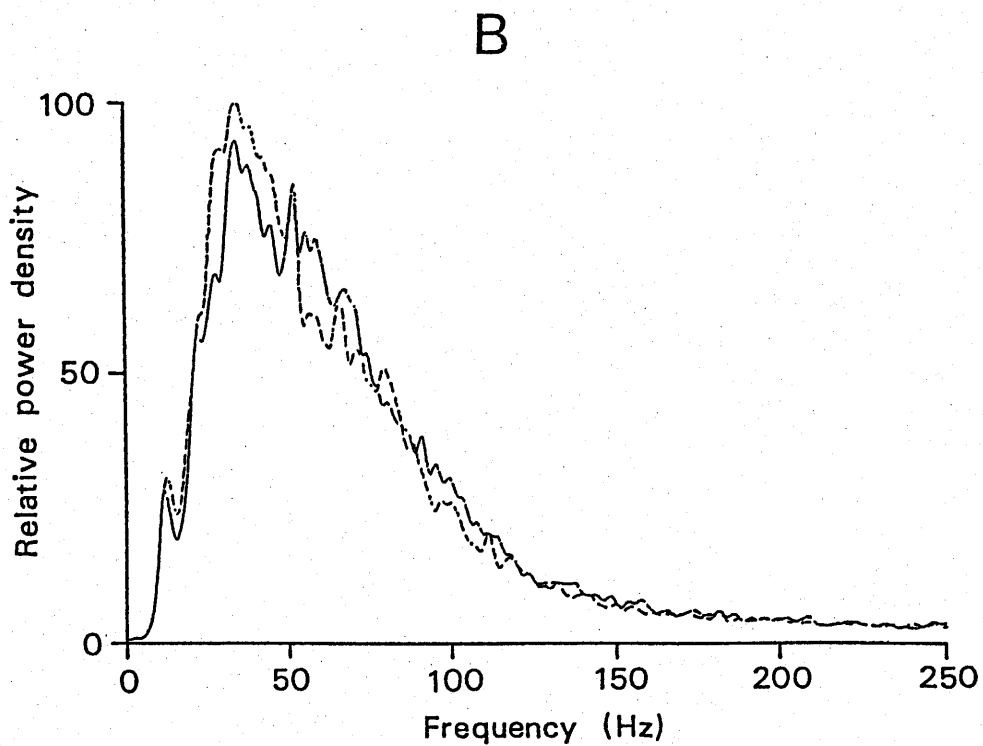
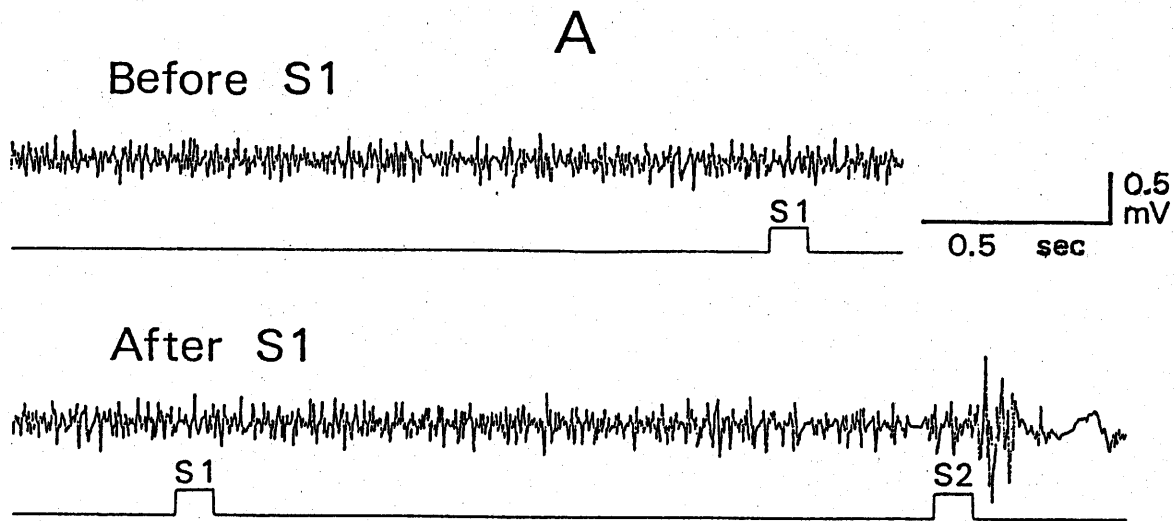


Fig. 17. The surface EMG and the EMG spectra before and after S1. A small peak at about 10 Hz in each averaged EMG spectrum is due to the ECG signal. The format is the same as in Fig. 15.

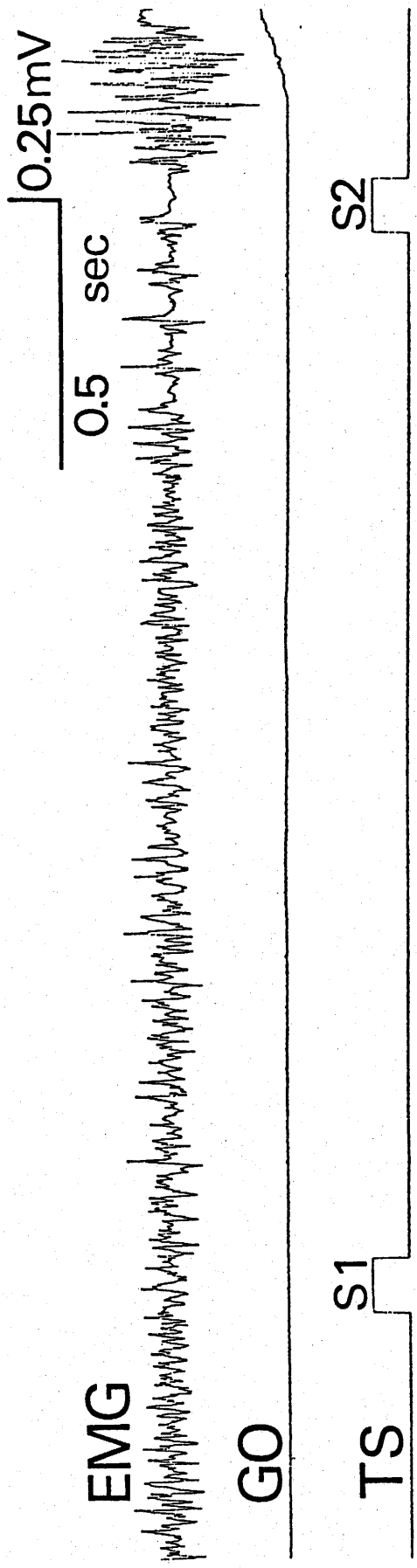


Fig. 1 8. Intermittent silent period following a change of the surface EMG to the rhythmic slower wave before S2. Top trace: surface electromyogram of the erector spinal muscle (EMG). Second trace: signal from the hip-joint goniometer (GO). Third trace: tone signals (TS).

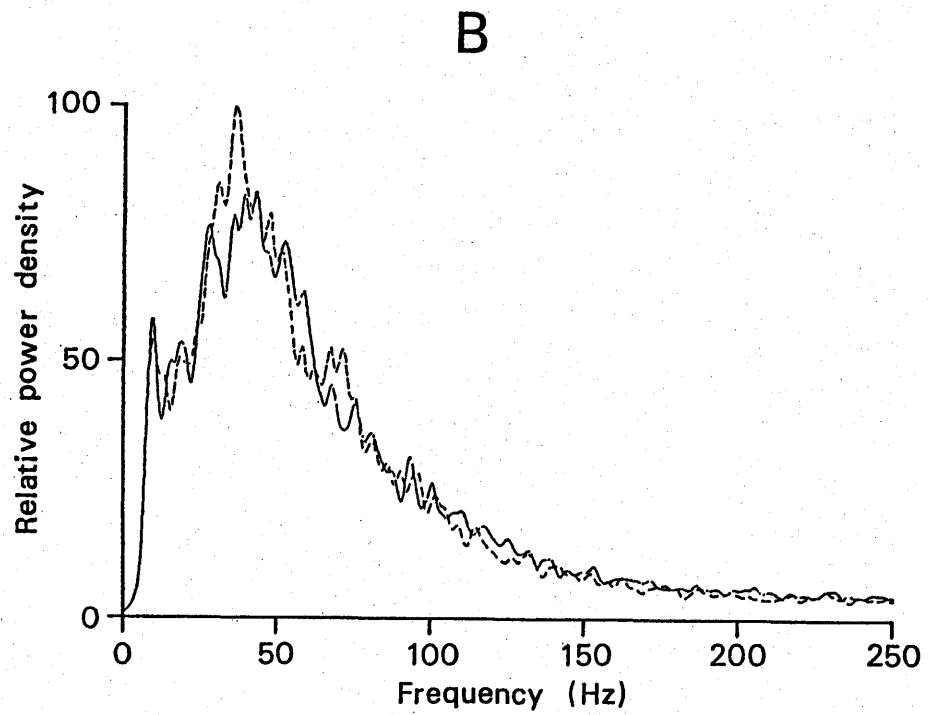
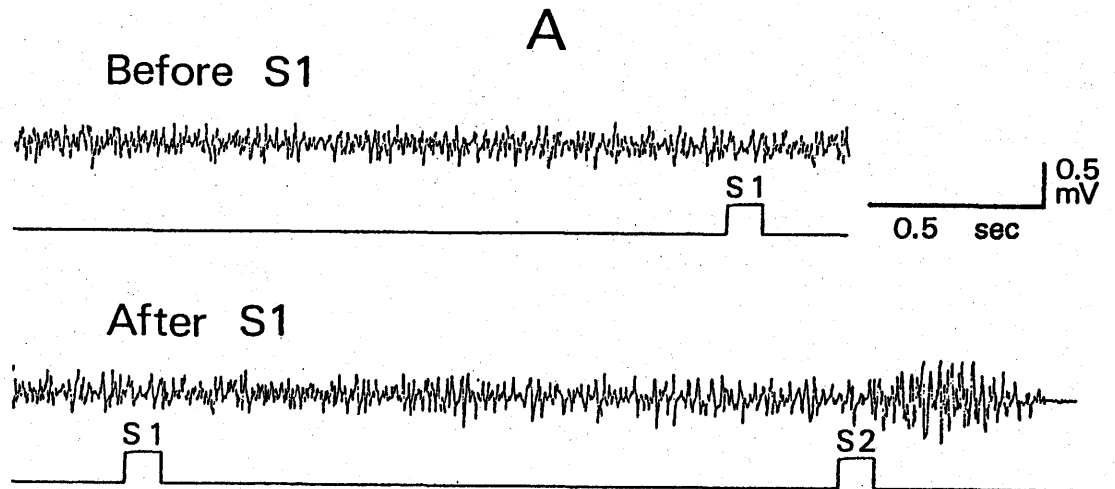


Fig. 19. The surface EMG and the EMG spectra before and after S1. A small peak at about 10 Hz in each averaged EMG spectrum is due to the ECG signal. The format is the same as in Fig. 15.

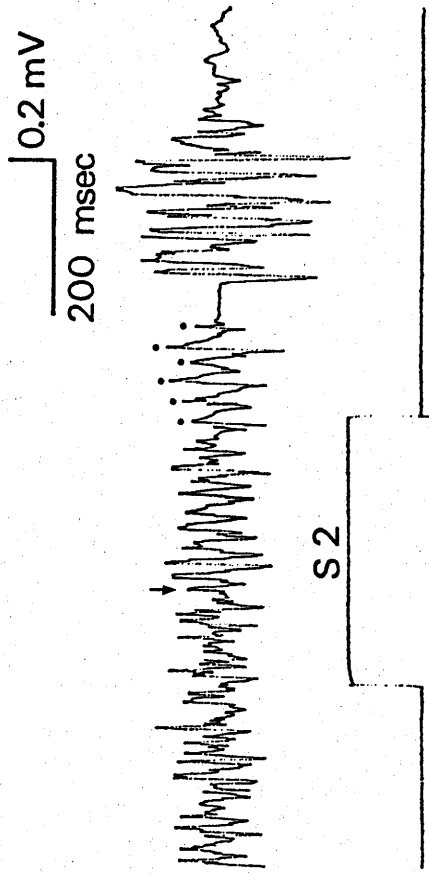


Fig. 20. Change of the surface EMG after start of the reaction signal (S2). The filled circles above the EMG trace show the rhythmic slower wave. The arrow shows the onset of the slower wave.

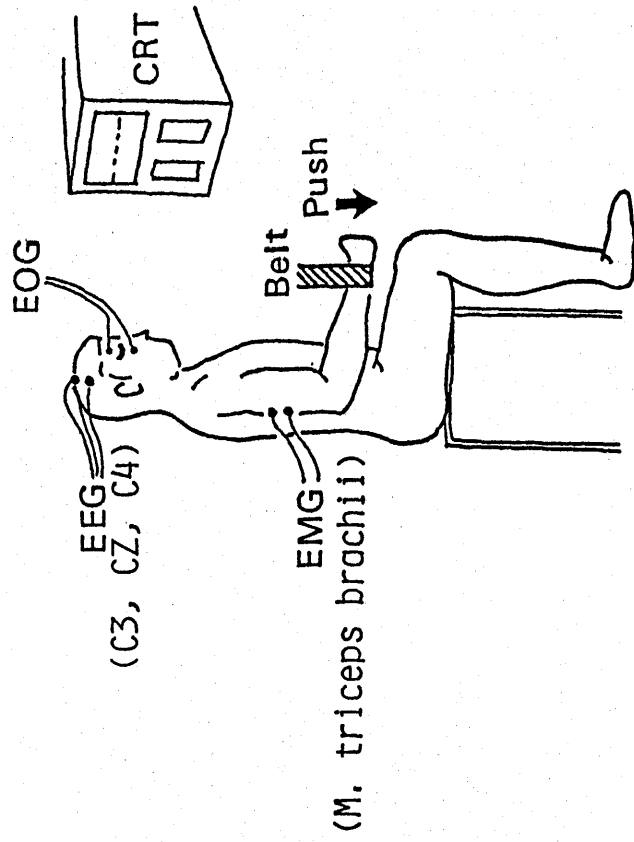


Fig. 2 1. Experimental diagram.

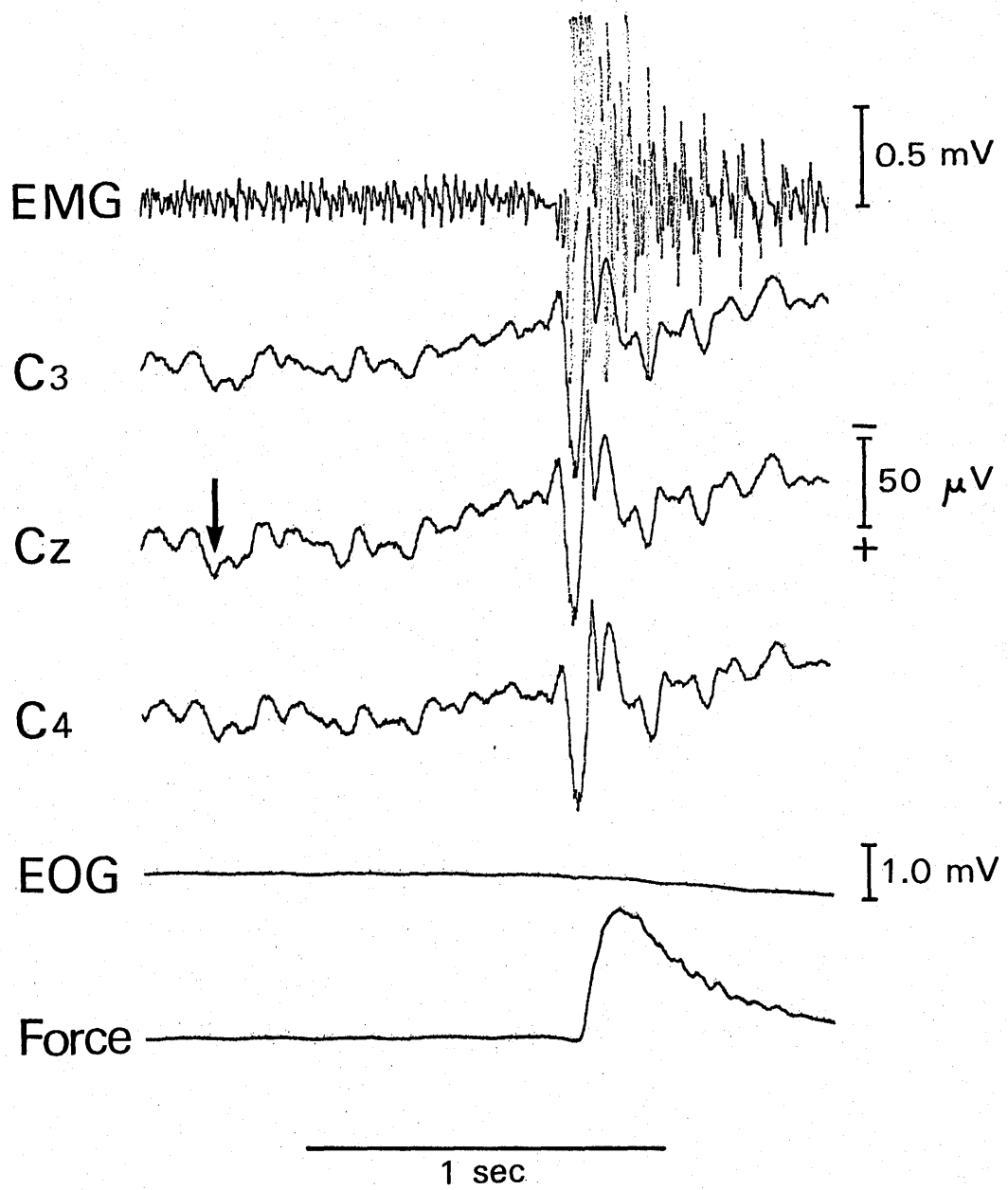


Fig. 2 2. Typical example of a negative deflection of raw EEG potentials preceding movement. Arrow indicates the onset of the potential deflection.

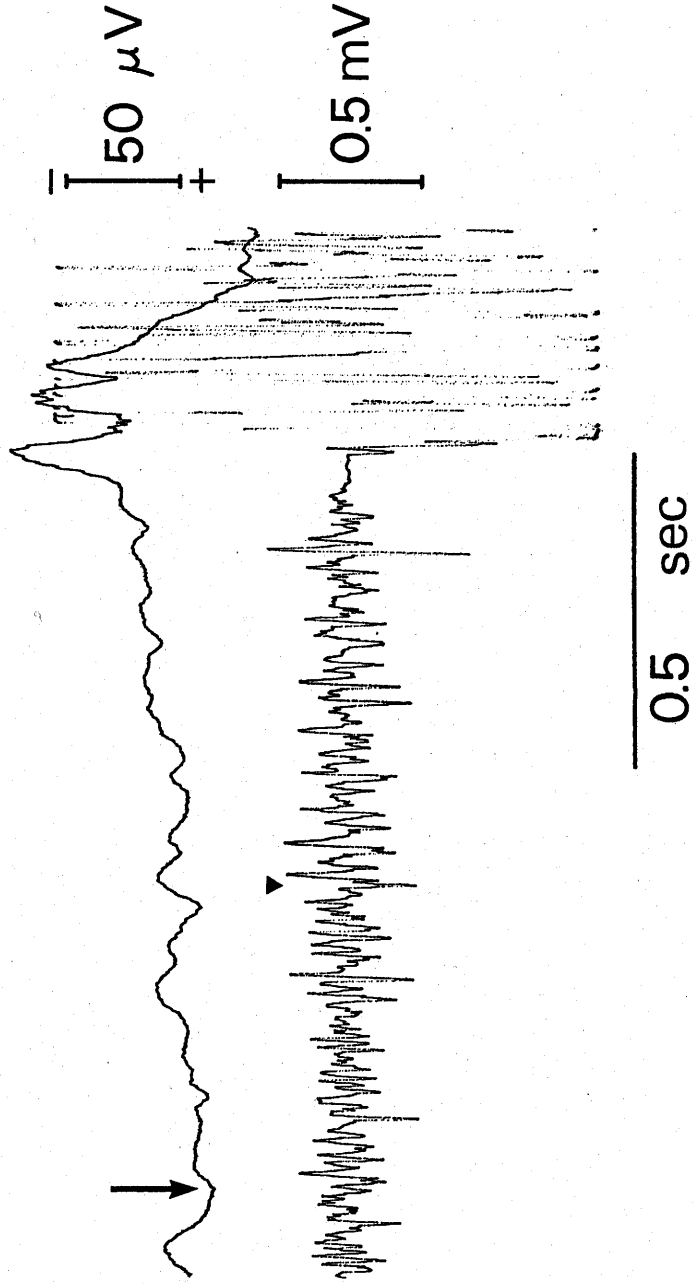


Fig. 23. Negative deflection of raw EEG potentials preceding movement and slowing of the surface EMG during slightly sustained contraction. Arrow above the EEG indicates the onset of the negative deflection. Black triangle above the EMG indicates the onset of the slowing.

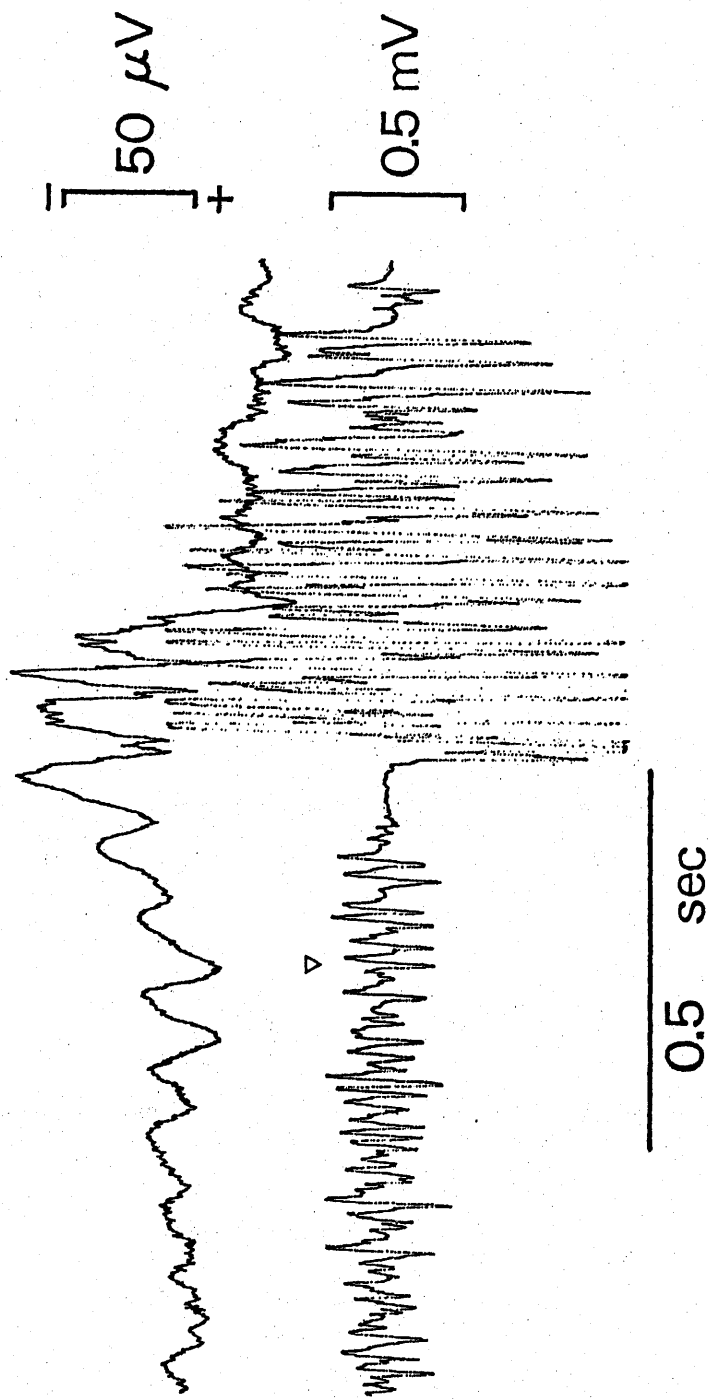


Fig. 2 4 . Simultaneous negative deflection of raw EEG potentials with appearance of the rhythmic slower wave. White triangle above the EMG indicates the onset of the rhythmic slower wave.

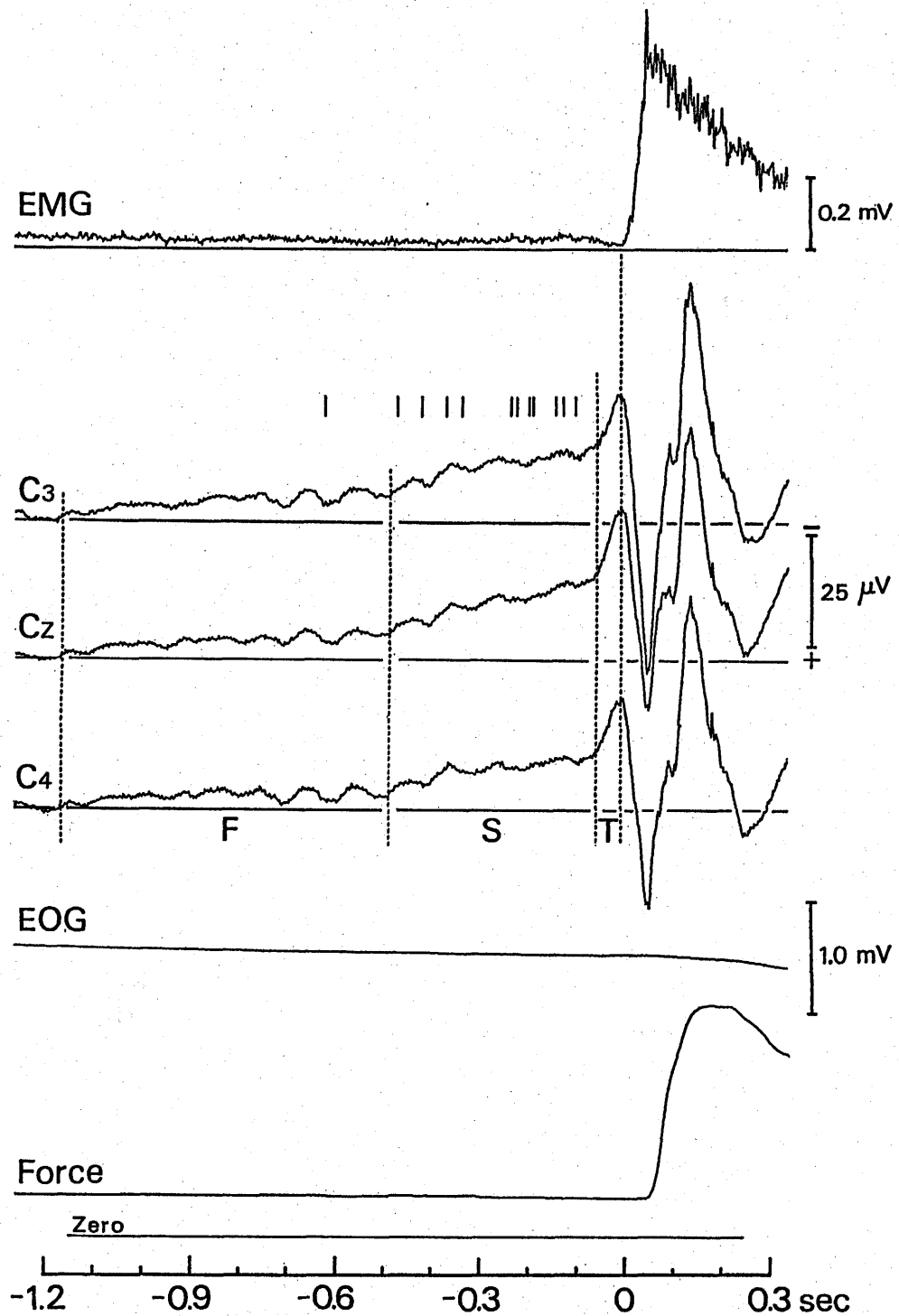


Fig. 25. Typical averaged records of the premovement cortical potential shifts. The onsets and offsets of 3 different negative potentials preceding the onset of the phasic discharge are indicated by vertical dashed lines. F, S and T mean FNP, SNP and TNP, respectively. The offsets of FNP and SNP coincide with the onsets of the following potential shifts. The right dashed line indicates also a temporal relationship of the offset of the TNP to the onset of the phasic discharge. Time 0 sec corresponds to the onset of the phasic discharge. Vertical bars above the EEG wave form measured at C3 indicate the onset times of the rhythmic slower wave and the slower wave (slower waves).

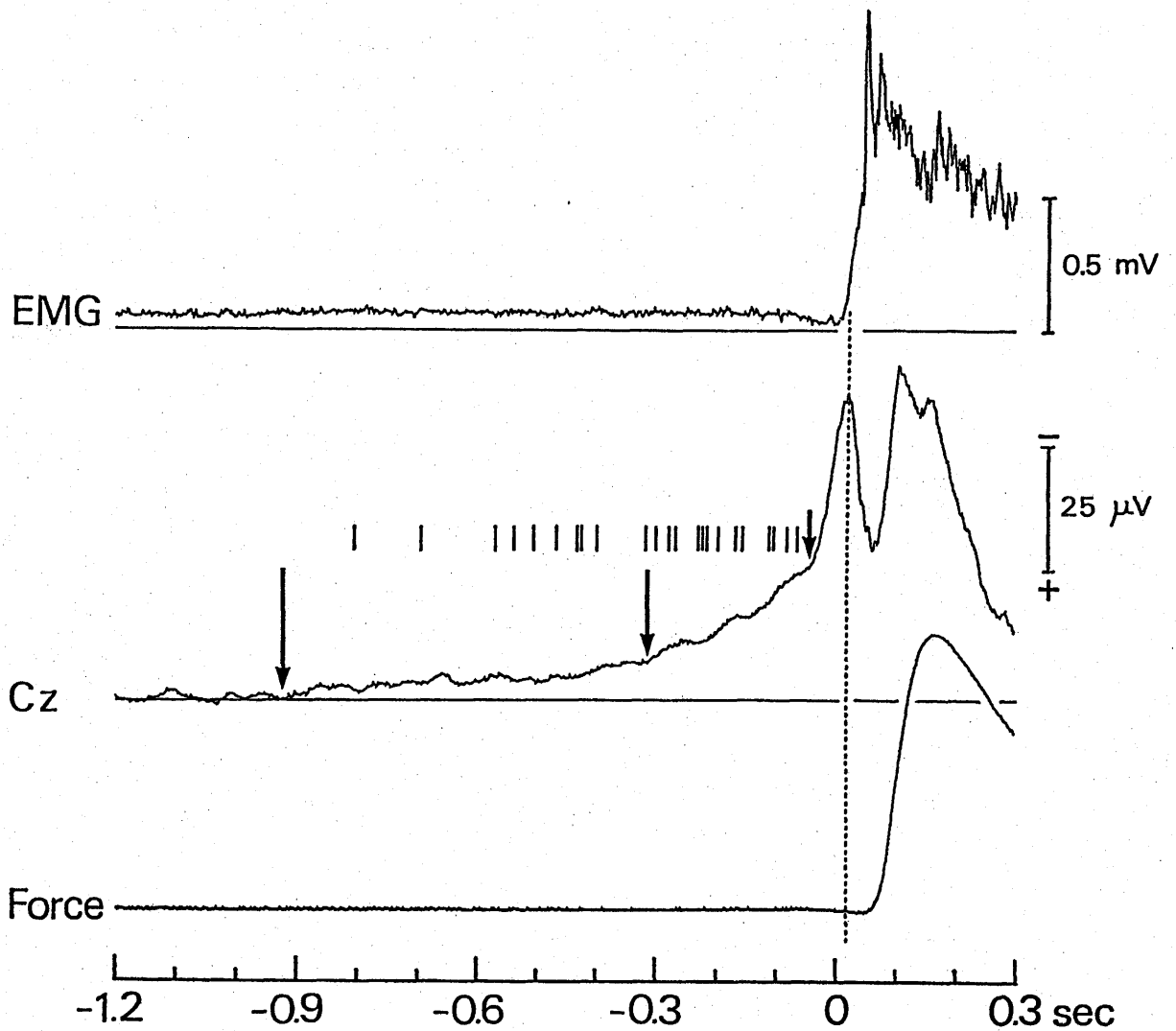


Fig. 2.6. Temporal relationships between the onset of the EMG slower waves and the 3 cortical potential shifts preceding movement. Arrows indicate the onset of each potential. Vertical bars above the averaged EEG wave form indicate the onset times of the slower waves. Vertical dashed line indicates temporal relationship of the TNP offset to the onset of the phasic discharge.

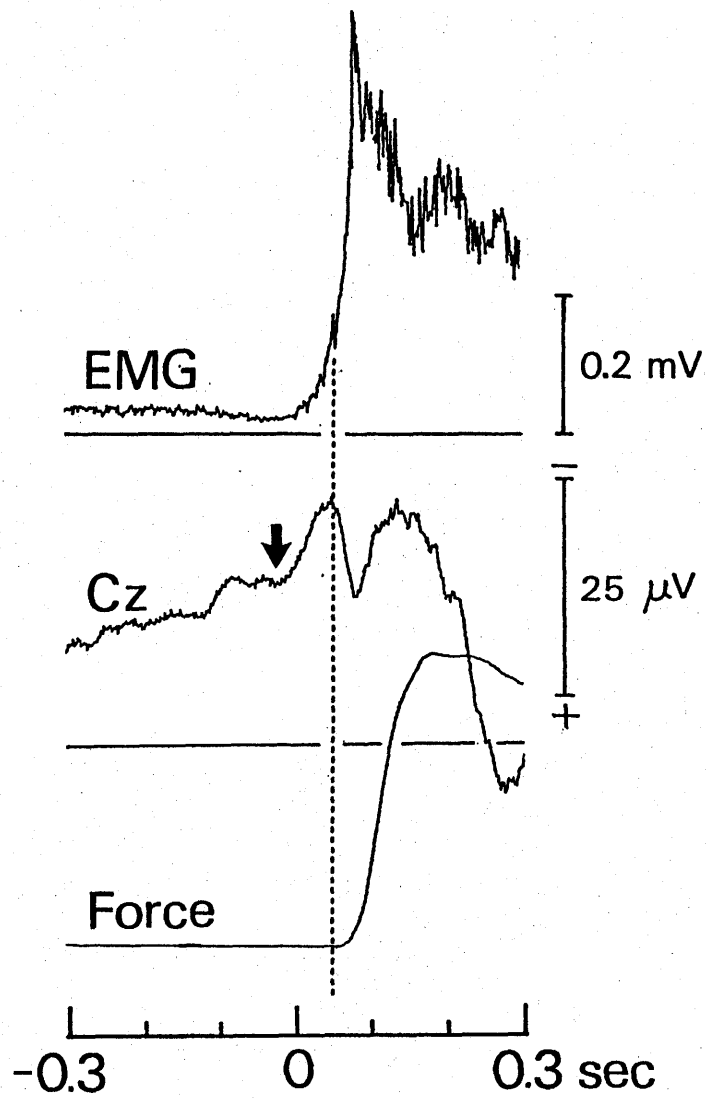


Fig. 2 7 . Temporal relationship of the onset and offset of the TNP to both the onset of the phasic discharge and beginning of the steepest rise of the phasic discharge. Arrow indicates the onset of the TNP. The dashed line is drawn at the TNP offset.

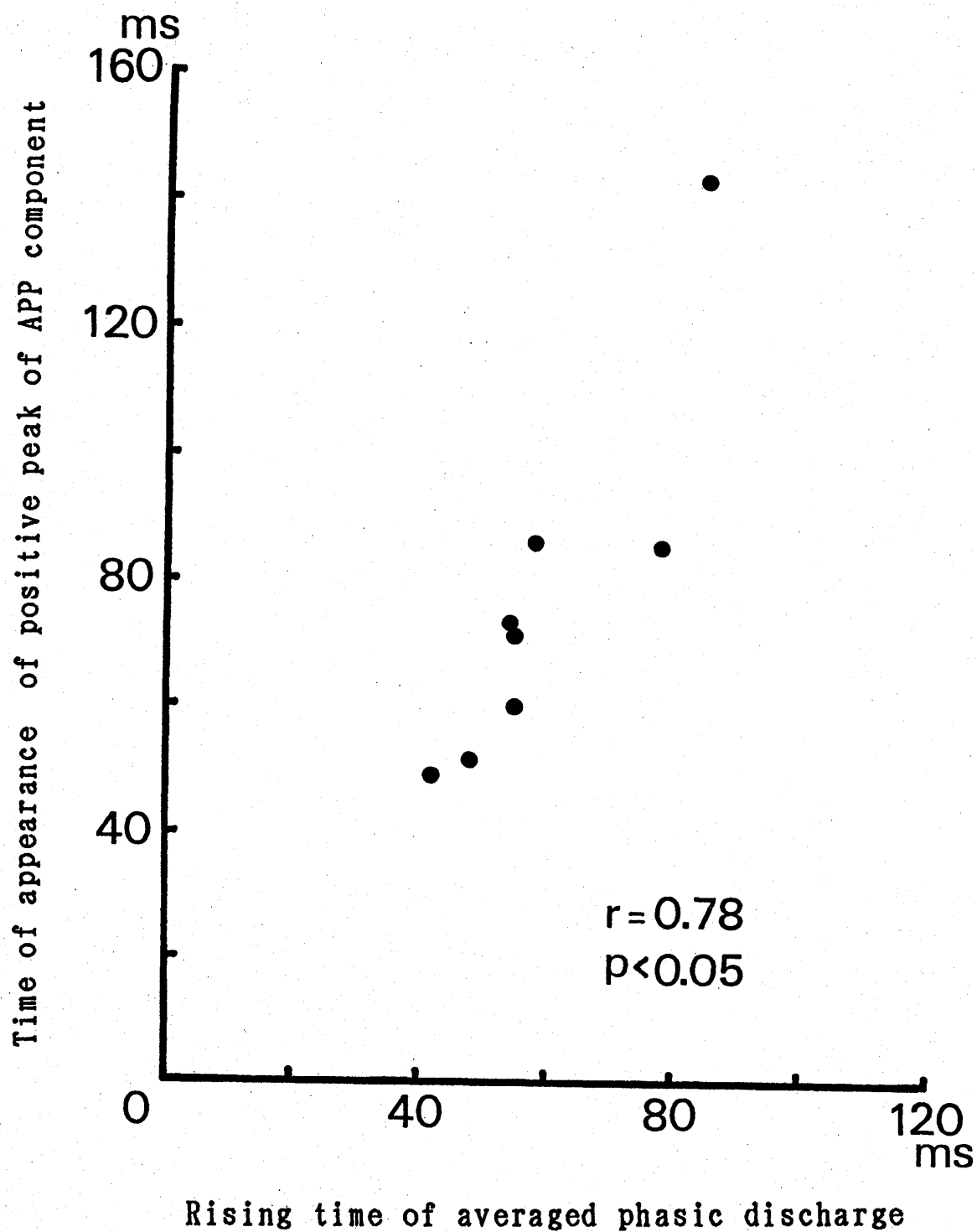


Fig. 28. Relationship between the rising time of the phasic discharge and the time of appearance of culminating positive peak of APP component. Each time was measured with respect to the onset of the phasic discharge.

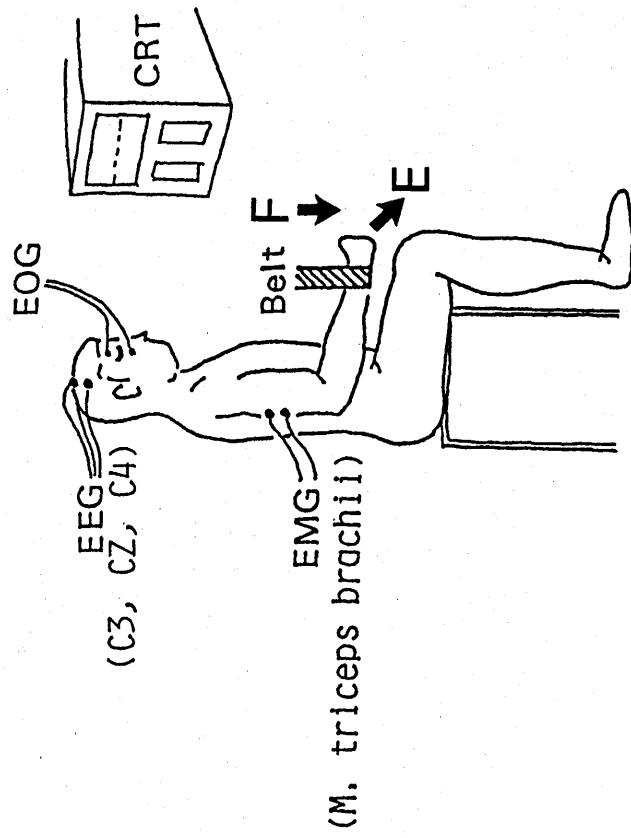


Fig. 29. Experimental diagram.

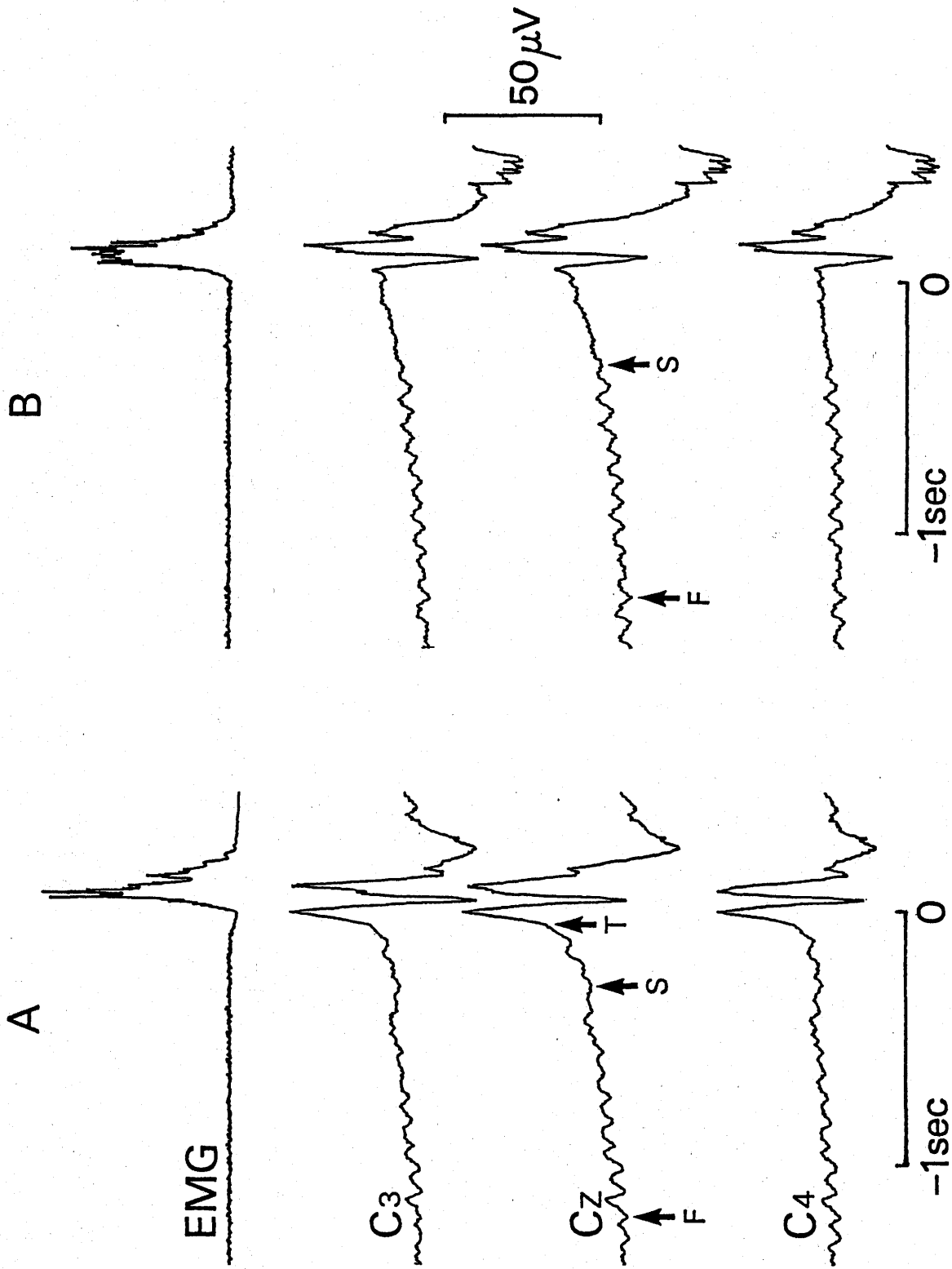


Fig. 3 0 . Typical averaged records recorded during deployment of elbow extension force (A) and extension of elbow joint (B). F, S and T show the onset of FNP, SNP and TNP, respectively.

Table 1. Frequency of appearance of the rhythmic slower wave.

Subject	L1	L4	GL	SE
SD	0	34	1	11
FN	4	26	0	13
SM	3	6	0	0
TN	0	0	0	0
MD	0	0	0	0

L1: Erector spinae muscle at the level of the first lumbar vertebrae

L4: Erector spinae muscle at the level of the fourth lumbar vertebrae

GL: Gluteus maximus muscle

SE: Semitendinosus muscle

Table 2. Frequency (%) of the rhythmic slower wave and premovement silent period and averaged duration (msec) of the premovement silent period.

Subject	Frequency		Duration
	RSW	PSP	PSP
SD	56.7	20.0	43.3
FN	43.3	73.3	57.2
SM	10.0	93.3	97.2
TN	0.0	91.7	86.7
MD	0.0	100.0	92.7

Table 3. Comparison of the mean values of the mean power frequency before and after the warning signal.

Subjects	Before SI (Hz)(mean±S.D.)	After SI (Hz)(mean±S.D.)	Mean difference (Hz)	t value
ZI	62.06 ± 3.91	54.95 ± 2.70	7.11	$\underline{t}=10.305$ $\underline{p} < 0.001$
FU	70.24 ± 4.28	67.73 ± 4.19	2.51	$\underline{t}= 4.034$ $\underline{p} < 0.001$
SZ	88.63 ± 6.90	85.31 ± 6.06	3.32	$\underline{t}= 3.235$ $\underline{p} < 0.01$
YS	70.85 ± 4.69	68.12 ± 2.62	2.73	$\underline{t}= 2.825$ $\underline{p} < 0.05$
NK	79.13 ± 2.66	77.40 ± 2.52	1.73	$\underline{t}= 2.208$ $\underline{p} < 0.05$
NM	71.26 ± 2.41	71.92 ± 2.72	-0.66	$\underline{t}=-0.992$ n.s.
MA	62.89 ± 4.06	62.94 ± 3.65	-0.05	$\underline{t}=-0.050$ n.s.
KN	73.52 ± 3.84	74.31 ± 2.67	-0.79	$\underline{t}=-1.021$ n.s.
MU	69.93 ± 4.03	69.87 ± 4.46	0.06	$\underline{t}= 0.109$ n.s.
HR	78.91 ± 2.93	79.21 ± 4.29	-0.30	$\underline{t}=-0.276$ n.s.
AR	98.94 ± 3.32	97.87 ± 2.44	1.07	$\underline{t}= 1.149$ n.s.
MB	86.84 ± 4.20	85.67 ± 3.38	1.17	$\underline{t}= 1.372$ n.s.

Table 4. Averaged onset time (msec) and frequency (%) of the SWS and PSP and onset time (msec) of the 3 negative components occurring preceding the phasic discharge. All onset times were measured with respect to the onset of the phasic discharge.

Subject	SWS		PSP			Component		
	onset time	frequency	onset time	frequency	FNP	SNP	TNP	
SI	-333	8	-24	50	-1217	-475	-32	
KZ	-332	46	-54	76	-931	-329	-59	
YS	-239	18	-39	36	—	-420	-60	
TS	-286	24	-37	40	-1164	-488	-51	
NG	—	—	-62	30	-1111	-416	-31	
MR	-204	8	-52	28	-1227	—	—	
NI	—	—	-16	4	-1183	-510	—	

Table 5. Rising time (msec) of the phasic discharge and time interval (msec) from onset of the force to peak force.

Subject	EMG burst	Force
SI	55	116
KZ	42	120
YS	58	128
TS	48	137
NG	78	145
MR	85	165
NI	109	249

Table 6. Amplitude (μ V) of the 3 negative components occurring before the phasic discharge.

Subject	FNP			SNP			TNP		
	C3	CZ	C4	C3	CZ	C4	C3	CZ	C4
SI	6.67	6.67	6.67	20.94	20.94	18.69	32.73	34.12	30.76
KZ	5.48	6.99	3.66	19.24	24.62	15.80	46.53	57.25	39.37
YS	—	—	—	8.32	14.22	7.90	18.01	25.95	15.19
TS	5.32	5.85	3.30	16.71	19.47	13.73	27.32	32.97	25.19
NG	5.21	7.87	4.26	15.64	20.96	9.79	20.63	31.02	14.23

The amplitudes were measured at offset of each component.

Table 7. Amplitude (μV) of the APP occurring after the onset of the phasic discharge.

Subject	APP			
	C3	CZ	C4	
SI	13.33	12.01	12.12	
KZ	27.33	25.39	17.44	
YS	27.66	18.70	23.03	
TS	60.53	43.40	45.55	
NG	13.41	11.60	13.23	
MR	33.50	27.60	29.92	
NI	48.12	45.70	43.81	

Table 8. Comparison of frequencies (%) of the SWs and PSP which appeared in deployment of elbow extension force and extension of elbow joint and averaged onset time (msec) of the SWs and PSP. All onset times were measured with respect to the onset of the averaged phasic discharge.

Subject	SWs				PSP			
	Force		Extension		Force		Extension	
	Onset time	Frequency	Onset time	Frequency	Onset time	Frequency	Onset time	Frequency
NM	-146	16	-101	4	-53	78	-22	6
MR	-218	26	-154	8	-42	42	-42	28
KI	-	-	-	-	-67	92	-51	48
MA	-125	4	-	-	-43	64	-41	32
WA	-247	24	-225	16	-75	98	-57	52
TK	-120	18	-116	2	-52	88	-40	14
SU	-	-	-	-	-67	68	-44	8
KU	-223	18	-210	4	-56	26	-25	16

Table 9. Comparison of presence and absence of components consisting of the premovement cortical potentials recorded in deployment of elbow extension force and extension of elbow joint and onset time (msec) of the 3 negative components identified. All onset times were measured with respect to the onset of the phasic discharge.

Subject	FNP		SNP		TNP	
	Force	Extension	Force	Extension	Force	Extension
NM	-1182	-1265	-269	-335	-48	-
MR	-1350	-1517	-548	-455	-43	-
KI	-1470	-1248	-628	-544	-77	-
MA	-1392	-1140	-517	-562	-56	-
WA	-1190	-1398	-291	-227	-40	-
TK	-1381	-1269	-501	-472	-65	-
SU	-1503	-1321	-511	-528	-69	-
KU	-1441	-1398	-612	-	-	-

Table 10. Amplitude (μV) of the 3 negative components occurring before the phasic discharge.
The amplitudes were measured at offset of each component.

Subject	Condition	FNP			SNP			TNP		
		C3	Cz	C4	C3	Cz	C4	C3	Cz	C4
NM	Force(F)	7.06	12.68	6.85	17.17	26.67	14.73	43.42	54.41	40.56
	Extension(E)	8.83	9.80	4.89	19.59	25.12	10.55	—	—	—
MR	F	4.53	5.95	2.37	13.98	21.23	10.65	24.14	34.46	21.99
	E	5.33	5.79	3.67	23.49	29.72	20.79	—	—	—
KI	F	6.25	7.58	5.78	17.89	23.62	17.28	31.55	37.34	27.48
	E	5.36	7.49	4.94	14.31	19.45	13.37	—	—	—
MA	F	5.16	7.26	4.17	10.52	13.41	7.37	20.75	26.89	17.62
	E	4.64	6.44	3.86	9.44	11.36	6.52	—	—	—
WA	F	3.19	4.61	3.07	12.46	15.75	11.64	15.02	19.52	14.47
	E	2.62	5.38	1.93	12.18	13.52	8.69	—	—	—
TK	F	5.93	8.49	5.29	14.01	18.74	11.54	30.46	32.36	28.64
	E	4.77	9.50	3.72	14.25	18.41	10.11	—	—	—
SU	F	4.51	8.80	3.11	14.62	18.71	6.28	33.57	36.83	27.38
	E	3.39	3.83	2.60	13.26	14.73	6.00	—	—	—
KU	F	5.16	5.32	4.40	12.83	14.19	8.28	—	—	—
	E	8.15	11.49	6.52	—	—	—	—	—	—

Table 1 1. PSP出現頻度およびTNPの出現の有無
と相動性放電および筋力曲線の立ちがり速度と
の関係

		相動性放電	筋力曲線
PSP出現頻度	多	速	速
TNP出現	有		

PSP出現頻度	少	遅	遅
TNP出現	無		

Table 1 2. 筋収縮様式がTNP, PSPおよび
SWsの出現に及ぼす影響

	T N P	P S P	S W s
筋力発揮条件下	有	多	多
関節伸展条件下	無	少	少

「有」および「無」はTNPの出現の有無を意味し、「多」および「少」はPSPの出現頻度が多い、少ないを意味する。

参 考 文 献

- 1) Adrian, E.D. (1947): General principles of nervous activity. Brain, 70:1-17.
- 2) Agarwal, G.C. and Gottlieb, G.L. (1972): The muscle silent period and reciprocal inhibition in man. J. Neurol. Neurosurg. Psychiat., 35:72-76.
- 3) Allen, G. and Tsukahara, N. (1974): Cerebrocerebellar communication systems. Physiol. Rev., 54:957-1006.
- 4) Alston, W., Angel, R.W., Fink, F.S. and Hofmann, W.W. (1967): Motor activity following the silent period in human muscle. J. Physiol., 190:189-202.
- 5) Anastasijević, R. and Vučo, J. (1980): Renshaw cell discharge at the beginning of muscular contraction and its relation to the silent period. Exp. Neurol., 69:589-598.
- 6) 青木 久, 塚原玲子, 矢部京之助(1985): 動作前 silent period の動的筋力増強効果. 臨床脳波, 27:650-655.
- 7) Arezzo, J., Vaughan, Jr., H.G. and Koss, B. (1977): Relationship of neuronal activity to gross movement-related potentials in monkey pre- and postcentral cortex. Brain Res., 132:362-369.
- 8) Arezzo, J. and Vaughan, Jr., H.G. (1980): Intracortical sources and surface topography of the motor potential and somatosensory evoked potential in the monkey. Prog. Brain Res., Vol. 54, Motivation, Motor and Sensory Processes of

the Brain: Electrical Potentials, Behaviour and Clinical Use
, edited by Kornhuber, H.H. and Deecke, L., pp. 77-83,
Elsevier, Amsterdam.

- 9)馬場義美(1981a): 運動準備電位に関する研究 第1編 健康人および不随意運動症患者における運動準備電位. 岡山医学会雑誌, 93: 31-50.
- 10)馬場義美(1981b): 運動準備電位に関する研究 第2編 閉塞性脳血管障害患者における運動準備電位. 岡山医学会雑誌, 93:53-62.
- 11)Barrett, G., Shibasaki, H. and Neshige, R. (1985): A computer-assisted method for averaging movement-related cortical potentials with respect to EMG onset. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 60:276-281.
- 12)Barrett, G., Shibasaki, H. and Neshige, R. (1986): Cortical potentials preceding voluntary movement: Evidence for three periods of preparation in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 63: 327-339.
- 13)Bates, A.V. (1951): Electrical activity of the cortex accompanying movement. *J. Physiol.*, 113:240-257.
- 14)Becker, W., Iwase, K., Jürgens, R. and Kornhuber, H.H. (1976): Bereitschaftspotential preceding voluntary slow and rapid hand movements. *The Responsive Brain*, edited by McCallum, W.C. and Knott, J.R., pp. 99-102, Wright, Bristol.
- 15)Becker, W. and Kristeva, R. (1980): Cerebral potentials prior to various force deployments. *Prog. Brain Res.*, 54:189-194.

- 16) Bioulac, B. and Lamarre, Y. (1979): Activity of postcentral cortical neurons of the monkey during conditioned movements of a deafferented limb. *Brain Res.*, 172:427-437.
- 17) Brunia, C.H.M. and Van den Bosch, W.E.J. (1984): Movement-related slow potentials. I. A contrast between finger and foot movements in right-handed subjects. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 57:515-527.
- 18) Burke, D., McKeon, B., Skuse, N.F. and Westerman, R.A. (1980): Anticipation and fusimotor activity in preparation for a voluntary contraction. *J. Physiol.*, 306: 337-348.
- 19) Bussel, B. and Pierrot-Deseilligny, E. (1977): Inhibition of human motoneurons, probably of Renshaw origin, elicited by an orthodromic motor discharge. *J. Physiol. (Lond.)*, 269:319-339.
- 20) Cavallari, P., Fournier, E., Kats, R., Pierrot-Deseilligny, E. and Shindo, M. (1984): Changes in reciprocal Ia inhibition from wrist extensors to wrist flexors during voluntary movement in man. *Exp. Brain Res.*, 56:574-576.
- 21) Chapman, C.E., Spidalieri, G. and Lamarre, Y. (1986): Activity of dentate neurons during arm movements triggered by visual, auditory, and somesthetic stimuli in the monkey. *J. Neurophysiol.*, 55:203-226.
- 22) Conrad, B., Benecke, R. and Goehmann, M. (1983): Premovement silent period in fast movement initiation. *Exp. Brain Res.*, 51:310-313.

- 23) Cobb, S. and Forbes, A. (1923): Electromyographic studies on muscular fatigue in man. *J. Physiol. (Lond.)*, 65:234-251.
- 24) Curtis, D.R. and Ryall, R.W. (1966): The synaptic excitation of Renshaw cells. *Exp. Brain Res.*, 2:81-96.
- 25) Deecke, L., Becker, W., Grözinger, B., Scheid, P. and Kornhuber, H.H. (1973): Human brain potentials preceding voluntary limb movements. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, Suppl., 33: 87-94.
- 26) Deecke, L., Eisinger, H. and Kornhuber, H.H. (1980): Comparison of Bereitschaftspotential, pre-motion positivity and motor potential preceding voluntary flexion and extension movements in man. *Prog. Brain Res.*, 54:171-176.
- 27) Deecke, L., Grözinger, B. and Kornhuber, H.H. (1976): Voluntary finger movement in man: cerebral potentials and theory. *Biol. Cybernet.*, 23:99-119.
- 28) Deecke, L. and Kornhuber, H.H. (1977): Cerebral potentials and the initiation of voluntary movement. *Prog. clin. Neurophysiol.*, Vol. 1, Attention, Voluntary Contraction and Event-Related Cerebral Potentials, edited by Desmedt, J.E., pp. 132-150, Karger, Basel.
- 29) Deecke, L., Scheid, P. and Kornhuber, H.H. (1969): Distribution of readiness potential, pre-motion positivity, and motor potential of the human cerebral cortex preceding voluntary finger movements. *Exp. Brain Res.*, 7:158-168.
- 30) De Graaf, R.J., Visser, S.L. and De Rijke, W. (1988): H

reflex latency as an adequate predictor of the spinal evoked potential latency. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 70: 62-67.

- 31) DeLong, M.R. (1971): Activity of pallidal neurons during movement. *J. Neurophysiol.*, 34:414-427.
- 32) DeLong, M.R. (1972): Activity of basal ganglia neurons during movement. *Brain Res.*, 40:127-135.
- 33) DeLong, M.R. (1973): Putamen: Activity of single units during slow and rapid arm movements. *Science* 179:1240-1242.
- 34) DeLong, M.R. and Strick, P.L. (1974): Relation of basal ganglia, cerebellum, and motor cortex units to ramp and ballistic limb movements. *Brain Res.*, 71:327-335.
- 35) Desmedt, J.E. (1980): Patterns of motor commands during various types of voluntary movement in man. *Trends Neurosci.*, 3:265-268.
- 36) Desmedt, J.E. (1981): The size principle of motoneuron recruitment in ballistic or ramp voluntary contractions in man. *Prog. clin. Neurophysiol.*, Vol. 9, Motor Unit Types, Recruitment and Plasticity in Health and Disease, edited by Desmedt, J.E., pp. 97-136, Karger, Basel.
- 37) Desmedt, J.E. and Godaux, E. (1979): Voluntary motor commands in human ballistic movements. *Ann. Neurol.*, 5:415-421.
- 38) Eccles, J.C., Eccles, R.M., Iggo, A. and Ito, M. (1961): Distribution of recurrent inhibition among motoneurons.

- J. Physiol. (Lond.), 159:479-499.
- 39) Eichenberger, A. and Rüegg, D.G. (1984): Relation between the specific H reflex facilitation preceding a voluntary movement and movement parameters in man. J. Physiol. (Lond), 347:545-559.
- 40) Eldred, E., Granit, R. Merton, P.A. (1953): Supraspinal control of the muscle spindles and its significance. J. Physiol. (Lond.), 122:498-523.
- 41) Ellaway, P.H. (1971): Recurrent inhibition of fusimotor neurones exhibiting background discharges in the decerebrate and the spinal cat. J. Physiol. (Lond.), 216:419-439.
- 42) Ellaway, P.H. and Murphy, P.R. (1980): A comparison of the recurrent inhibition of α - and γ -motoneurones in the cat. J. Physiol. (Lond.), 315:43-58.
- 43) El-Tohamy, A. and Sedgwick, E.M. (1983): Spinal inhibition in man: Depression of the soleus H reflex by stimulation of the nerve to the antagonist muscle. J. Physiol., 337:497-508.
- 44) Evarts, E.V. (1964): Temporal patterns of discharge of pyramidal tract neurons during sleep and waking in the monkey. J. Neurophysiol., 27:152-171.
- 45) Evarts, E.V. (1965): Relation of discharge frequency to conduction velocity in pyramidal tract neurons. J. Neurophysiol., 28:216-228.
- 46) Evarts, E.V. (1966): Pyramidal tract activity associated

- with a conditioned hand movement in the monkey.
J. Neurophysiol., 29:1011-1027.
- 47) Evarts, E.V. (1968): Relation of pyramidal tract activity to force exerted during voluntary movement. J. Neurophysiol., 31:14-27.
- 48) Evarts, E.V. (1973): Motor cortex reflexes associated with learned movement. Science 179:501-503. 31:14-27.
- 49) Evarts, E.V., Fromm, C., Krölller, J. and Jennings, V.A. (1983): Motor cortex control of finely graded forces. J. Neurophysiol., 49:1199-1215.
- 50) Fetz, E.E. and Cheney, P.D. (1979): Muscle fields and response properties of primate corticomotoneuronal cells. Prog. Brain Res., Vol. 50, Reflex control of posture and movement, edited by Granit, R and Pompeiano, O., pp. 137-146, Environmental protection agency, Washington, D.C.
- 51) Floyd, W.F. and Silver, P.H. (1951): Function of the erectores spinae in flexion of the trunk. Lancet, 260:133-134.
- 52) Fritsch, G. and Hitzig, E. (1870): Über die elektrische Erregbarkeit des Grosshirns. Arch. Anat. Physiol. Wiss. Med., 37:300-322.
- 53) Fromm, C. (1983): Changes of steady state activity in motor cortex consistent with the length-tension relation of the muscle. Pflüegers. Arch., 398:318-323.
- 54) Gemba, H., Hashimoto, S. and Sasaki, K. (1979): Slow

- potentials preceding self-paced hand movements in the parietal cortex of monkeys. *Neuroscience Lett.*, 15:87-92.
- 55) Georgopoulos, A.P., Kalaska, J.F., Caminiti, R. and Massey, J.T. (1982): On the relations between the direction of two-dimensional arm movements and cell discharge in primate motor cortex. *J. Neurosci.*, 2:1527-1537.
- 56) Gerbrandt, L.K. (1977): Analysis of movement potential components. *Prog. clin. Neurophysiol.*, Vol. 1, Attention, Voluntary Contraction and Event-Related Cerebral Potentials, edited by Desmedt, J.E., pp. 174-188, Karger, Basel.
- 57) Gerbrandt, L.K., Goff, W.R. and Smith, D.B. (1973): Distribution of the human average movement potential. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 34:461-474.
- 58) Gilden, L., Vaughan, Jr., H.G. and Costa, L.D. (1966): Summated human EEG potentials with voluntary movement. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 20:433-438.
- 59) Gottlieb, G.L., Agarwal, G.C. and Stark, L. (1970): Interactions between voluntary and postural mechanisms of the human motor system. *J. Neurophysiol.*, 33:365-381.
- 60) Granit, R., Haase, J. and Rutledge, L.T. (1960): Recurrent inhibition in relation to frequency of firing and limitation of discharge rate of extensor motoneurons. *J. Physiol. (Lond.)*, 154:308-328.
- 61) Granit, R. and Rutledge, L.T. (1960): Surplus excitation in reflex action of motoneurons as measured by recurrent

- inhibition. *J. Physiol. (Lond.)*, 154:288-307.
- 62) Grimby, L. and Hannerz, J. (1977): Firing rate and recruitment order of toe extensor motor units in different modes of voluntary contraction. *J. Physiol.*, 264:865-879.
- 63) Groll-Knapp, E., Ganglberger, J.A. and Haider, M. (1977): Voluntary movement-related slow potentials in cortex and thalamus in man. *Prog. clin. Neurophysiol.*, Vol. 1, Attention, Voluntary Contraction and Event-Related Cerebral Potentials, edited by Desmedt, J.E., pp. 164-173, Karger, Basel.
- 64) Haase, J., Cleveland, S. and Ross, H.-G. (1975): Problems of postsynaptic autogenous and recurrent inhibition in the mammalian spinal cord. *Rev. Physiol. Biochem. Pharmacol.*, 73:73-129.
- 65) Hammond, P.H. (1956): The influence of prior instruction to the subject on an apparently involuntary neuromuscular response. *J. Physiol.*, 132:17-19P.
- 66) Hoffmann, P. (1918): Über die Beziehungen der Sehnenreflexe zum willkürlichen Bewegungen und zum Tonus. *Z. Biol.*, 68:351-370.
- 67) Hore, J., Meyer-Lohmann, J. and Brooks, V.B. (1977): Basal ganglia cooling disables learned arm movements of monkeys in the absence of visual guidance. *Science* 195: 584-586.
- 68) Hufschmidt, H.-J. (1962): Über einen supraspinalen Hemmungsmechanismus. *Elektromyographische Untersuchungen am*

- Tibialis-Gastrocnemius- System des Menschen. Pflügers
Arch. ges. Physiol., 275:463-471.
- 69) Hultborn, H. and Pierrot-Deseilligny, E. (1979): Changes in recurrent inhibition during voluntary soleus contractions in man studied by an H-reflex technique. J. Physiol. (Lond.), 297:229-251.
- 70) Hyvärinen, J. and Poranen, A. (1974): Function of the parietal associative area 7 as revealed from cellular discharges in alert monkeys. Brain, 97:673-692.
- 71) 猪飼道夫 (1955a): 健康人における体肢の交叉性反射. 日本生理誌, 17:253-262.
- 72) 猪飼道夫 (1955b): 動作に先行する抑制機構. 日本生理誌, 17: 292-298.
- 73) 猪飼道夫, 芝山秀太郎 (1965): 動作の敏捷性 - その生理学的背景 -. 体育の科学, 15:149-156.
- 74) 猪飼道夫, 矢部京之助, 山本高司, 川初清典, 渡部和彦, 手塚政孝 (1973): 随意動作に先行する Silent period の発現機構. 体育学研究, 18:127-133.
- 75) 岩瀬勝彦 (1973): 準備電位と意欲. 臨床脳波, 15:702-706.
- 76) 岩瀬勝彦 (1974): 準備電位と運動. 臨床脳波, 16:242-246.
- 77) 岩瀬勝彦 (1974): 準備電位と随意運動の速度. 臨床脳波, 16:300-303.
- 78) Jones, J.G. and Beck, C.H. (1975): Motor potentials and the timing of muscular activity. Electroenceph. clin Neurophysiol., 38:273-279.

- 79) Kalaska, J.F., Caminiti, R. and Georgopoulos, A.P. (1983):
Cortical mechanisms related to the direction of two-
dimensional arm movements: relations in parietal area 5 and
comparison with motor cortex. *Exp. Brain Res.*, 51:247-260.
- 80) Kalaska, J.F. and Hyde, M.L. (1985): Area 4 and area 5:
differences between the load direction-dependent discharge
variability of cells during active postural fixation. *Exp.
Brain Res.*, 59:197-202.
- 81) 笠井達哉 (1983): 先行抑制の運動パターン presetting 依存性の検討
. *体力科学*, 32:278-284.
- 82) 笠井達哉, 館山 昭 (1980): 動作開始前 Silent period の出現頻度
とその持続時間に与える練習の影響. *体育の科学*, 30:745-749.
- 83) 笠井達哉, 中原凱文 (1979): 随意動作開始直前の H 波の変化. *体
力科学*, 28:299-306.
- 84) 川初清典 (1979): 急激動作前筋放電休止時の出現様相 - 不完全サイ
レントピリオドの存在とその特徴 -. *体育の科学*, 29:361-367.
- 85) 川初清典 (1981): 緩徐 - 敏速切替運動における急激動作前筋放電休
止期. *体育の科学*, 31:629-632.
- 86) Kawahats, K. (1983): Switching mechanism of neuromuscular
activity in top world athletes. *Biomechanics VIII-A*, edited by
Matsui, H. & Kobayashi, K., pp. 289-293. Human Kinetics
Publishers, Illinois
- 87) 川初清典, 秦 優子 (1982): 筋の作用機序からみた急激動作前筋放
電休止期の出現様相. *体力科学*, 31:1-9.
- 88) Kawahats, K. and Miyashita, M. (1983): Electromyogram

premotion silent period and tension development in human muscle. *Exp. Neurol.*, 82:287-302.

89)北井孝一(1987): 基底核とその関連諸核. 脳の構造と機能 下巻, 大村 裕・島津 浩・伊藤正男編, pp. 100-113, 医学書院, 東京.

90)Kogi, K. and Hakamada, T. (1962): Slowing of surface electromyogram and muscle strength in muscle fatigue. *Rep. Inst. Sci. Lab. Tokyo*, 60:27-41.

91)Komiyama, T. and Tanaka, R. (1990): The differences in human spinal motoneuron excitability during the foreperiod of a motor task. *Exp. Brain Res.*, 79:357-364.

92)Kornhuber, H.H. (1971): Motor functions of cerebellum and basal ganglia: the cerebellocortical saccadic (ballistic) clock, the cerebellonuclear hold regulator, and the basal ganglia ramp (voluntary speed smooth movement) generator. *Kybernetiks*, 8:157-162.

93)Kornhuber, H.H. und Deecke, L. (1964): Hirnpotentialänderungen beim Menschen vor und nach Willkürbewegungen, dargestellt mit Magnetbandspeicherung und Rückwärtsanalyse. *Pflügers Arch. ges. Physiol.*, 281:52.

94)Kornhuber, H.H. und Deecke, L. (1965): Hirnpotentialänderungen bei Willkürbewegungen und passiven Bewegungen des Menschen: Bereitschaftspotential und reafferente Potentiale. *Pflügers Arch. ges. Physiol.*, 284:1

- 95)Kots, Y.M. (1977): The Organization of Voluntary Movement.
Neurophysiological Mechanisms, pp. 61-119, Plenum Press, New
York.
- 96)Kristeva, R. (1984): Bereitschaftspotential of pianists.
Annals New York Academy of Sciences, 425:477-482.
- 97)Kristeva, R., Keller, E., Deecke, L. and Kornhuber, H.H.
(1979): Cerebral potentials preceding unilateral and
simultaneous bilateral finger movements. Electroenceph.
clin. Neurophysiol., 47:229-238.
- 98)久保田 競(1982): 前頭葉と運動・行動. Jap. J. Sports Sci.,
1:4-19.
- 99)久保田 競(1984): 随意運動メカニズムの特集にあたって. 神経進
歩, 28:3-6.
- 100)久保田 競(1984): 前頭前野と随意運動. 神経進歩, 28:103
-111.
- 101)Kubota, K. and Funahashi, S. (1982): Direction-specific
activities of dorsolateral prefrontal and motor cortex
pyramidal tract neurons during visual tracking.
J. Neurophysiol., 47:362-376.
- 102)Kubota, K. and Hamada, I. (1978): Visual tracking and neuron
activity in the post-arcuate area in monkeys. J. Physiol.
(Paris), 74:297-312.
- 103)Kubota, K. and Hamada, I. (1979): Preparatory activity of
monkey pyramidal tract neurons related to quick movement
onset during visual tracking performance. Brain Res., 168:

435-439.

- 104) Kubota, K. and Oshima, T. (1959): Effects of gamma blocking on muscular activity and their relation to myasthenic state. *Neurol. Med.-chir.*, 1:171-179.
- 105) Kutas, M. and Donchin, E. (1974): Studies of squeezing: Handedness, responding hand, response force, and asymmetry of readiness potential. *Science*, 186:545-548.
- 106) Kutas, M. and Donchin, E. (1977): The effect of handedness, of responding hand, and of response force on the contralateral dominance of the readiness potential. *Prog. clin. Neurophysiol.*, Vol. 1, Attention, Voluntary Contraction and Event-Related Cerebral Potentials, edited by Desmedt, J.E., pp. 189-210, Karger, Basel.
- 107) Kutas, M. and Donchin, E. (1980): Preparation to respond as manifested by movement-related brain potentials. *Brain Res.*, 202:95-115.
- 108) Lamarre, Y., Bioulac, B. and Jacks, B. (1978): Activity of precentral neurones in conscious monkeys: Effects of deafferentation and cerebellar ablation. *J. Physiol. (Paris)*, 74:253-264.
- 109) Lamarre, Y. and Jacks, R. (1978): Involvement of the cerebellum in the initiation of fast ballistic movement in the monkey. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, Suppl. 34: 441-447.
- 110) Lamarre, Y., Spidalieri, G., Busby, L. and Lund, J.P. (1980)

- : Programming of initiation and execution of ballistic arm movements in the monkey. *Prog. Brain Res.*, 54:157-169.
- 111) Libet, B. (1985): Unconscious cerebral initiative and the role of conscious will in voluntary action. *Behav. Brain Sci.*, 8:529-566.
- 112) Libet, B., Gleason, C.A., Wright, E.W. and Pearl, D.K. (1983): Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). *Brain*, 106:623-642.
- 113) Libet, B., Wright, E.W., Jr. and Gleason, C.A. (1982): Readiness potentials preceding unrestricted 'spontaneous' vs. pre-planned voluntary acts. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 54:322-335.
- 114) Lippold, O.C.J. (1952): The relation between integrated action potentials in a human muscle and its isometric tension. *J. Physiol. (Lond.)*, 117:492-499.
- 115) Lippold, O.C.J., Redfearn, J.W.T. and Vučo, J. (1960): The electromyography of fatigue. *Ergonomics*, 3:121-131.
- 116) MacLean, J.B. and Leffman, H. (1967): Supraspinal control of Renshaw cells. *Exp. Neurol.*, 18:94-104.
- 117) 真野 範一 (1988): 随意運動と小脳のニューロン活動. 新生理科学大系 10, 運動の生理学, 佐々木和夫・本郷利憲編, pp. 167-181, 医学書院, 東京.
- 118) 真野 範一 (1982): タイミングを制御する小脳. *Jap. J. Sports Sci.*, 1:20-29.

- 119) Mano, N. and Kanazawa, I. (1981): Localization of cerebellar Purkinje cells related to wrist tracking movement in the rhesus monkey. *J. Physiol. Soc. Japan*, 43:316.
- 120) Mano, N., Kanazawa, I. and Yamamoto, K. (1986): Complex-spike activity of cerebellar Purkinje cells during visually guided wrist tracking movements in the monkey. *J. Neurophysiol.*, 56:137-158.
- 121) Marsden, C.D. (1982): The mysterious motor function of the basal ganglia: The Robert Wartenberg Lecture. *Neurology* 32: 514-539.
- 122) Meyer-Lohmann, J., Hore, J. and Brooks, V.B. (1977): Cerebellar participation in generation of prompt arm movements. *J. Neurophysiol.*, 40:1038-1050.
- 123) McIlroy, W.E. and Brooke, J.D. (1987): Within-subject reliability of the Hoffmann reflex in man. *Electromyogr. clin. Neurophysiol.*, 27:401-404.
- 124) Merton, P.A. (1951): The silent period in a muscle of the human hand. *J. Physiol.*, 114:183-198.
- 125) Merton, P.A. (1981): Neurophysiology on man. *J. Neurol. Neurosurg. Psychiat.*, 44:861-870.
- 126) Michie, P.T., Clarke, A.M., Sinden, J.D. and Glue, L.C.T. (1976): Reaction time and spinal excitability in a simple reaction time task. *Physiol. & Behav.*, 16:311-315.
- 127) Mills, K.R. and Edwards, R.H.T. (1984): Muscle fatigue in myophosphorylase deficiency: power spectral analysis of the

- electromyogram. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 57:330-335.
- 128) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1978): 随意動作に先行する silent period の出現と静的準備状態との関係. *医用電子と生体工学*, 16:18-23.
- 129) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1980): 随意動作に先行する silent period の出現条件の検討. *体力科学*, 29:169-176.
- 130) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1982a): 反応動作開始前における運動ニューロンの興奮水準の変化過程. *医用電子と生体工学*, 20:162-169.
- 131) 三田勝巳, 青木 久, 矢部京之助(1982b): 反応動作開始前における筋活動水準の変化. *体力科学*, 31:234-241.
- 132) 三浦真弘(1986): 肘関節伸展動作に伴う運動関連電位 - 特に筋力の大小が準備電位に及ぼす影響について - .
筑波大学大学院修士論文.
- 133) 水野 昇(1983): 随意運動の神経機構. *脳と運動*, 伊藤正男編, pp. 207-227, 平凡社, 東京
- 134) Mizuno, Y., Tanaka, R. and Yanagisawa, N. (1971): Reciprocal group I inhibition on triceps surae motoneurons in man. *J. Neurophysiol.*, 34:1010-1017.
- 135) Mountcastle, V.B., Lynch, J.C., Georgopoulos, A., Sakata H. and Acuña, C. (1975): Posterior parietal association cortex of the monkey: command functions for operations within extrapersonal space. *J. Neurophysiol.*, 38:871-908.
- 136) Naeije, M. and Zorn, H. (1982): Relation between EMG power

spectrum shifts and muscle fibre action potential conduction velocity changes during local muscular fatigue in man.

Europ. J. appl. Physiol., 50:23-33.

137)永見邦篤(1987): 動的筋収縮前の一過性の張力低下について. 体力科学, 36:116-127.

138)中村道彦: C N V の精神生理. 脳波, 門林岩雄・井上 健・中村道彦編著, pp. 168-169, 金芳堂, 京都.

139)Neafsey, E. J., Hull, C. D. and Buchwald, N. A. (1978): Preparation for movement in the cat. I. Unit activity in the cerebral cortex. Electroenceph. clin. Neurophysiol., 44:706-713.

140)Neshige, R., Luders, H. and Shibasaki, H. (1988): Recording of movement-related potentials from scalp and cortex in man. Brain, 111:719-736.

141)西平賀昭(1979): 運動制御に関する脳電位、誘発筋電位および筋電位からの研究. 筑波大学大学院博士論文.

142)西平賀昭, 荒木秀夫(1983): 感覚-運動統合過程の遅速について- 体性感覚刺激大脳誘発電位, 運動電位, C N V からの考察 -. 体力科学, 32:141-150.

143)Nishihira, Y. and Araki, H. (1986): Scalp distribution of movement associated cerebral potentials preceding voluntarily, self-paced movement. J. Physical Fitness Jap., 35:11-21.

144)西平賀昭, 荒木秀夫, 藤田紀盛(1979): 随意動作に先行する脳運動関連電位-単極導出法を用いての検討-. 体育の科学, 29:733-

738.

- 145) 西平賀昭, 荒木秀夫, 藤田紀盛(1981): 随意動作に伴う脳運動関連電位—特に運動電位, 運動後陽性電位について—. 体育学研究, 26:43-56.
- 146) 及川俊彦, 藤谷嘉子(1972): ヒトの脳運動電位—とくに付随陰性変動(CNV)との関係—. 脳波と筋電図, 1:3-7
- 147) Okada, M. (1972): An electromyographic estimation of the relative muscular load in different human postures. *J. Human Ergol.*, 1:75-93.
- 148) 岡田守彦(1987): 等張等尺性収縮において筋長が表面筋電図波形に及ぼす影響. 脳波と筋電図, 15:171
- 149) Okada, M., Kogi, K. and Ishii, M. (1970): Enduring capacity of the erector spinae muscles in static work. *J. Anthrop. Soc. Nippon*, 78:99-110.
- 150) 小野三嗣, 大和 真, 尾谷良行, 坪田修三, 倉田 博, 岩垣丞恒, 高橋泰光(1968): 動的収縮中に発現する silent period について. 日本生理誌, 30:86-95.
- 151) Oshima, T. and Shinozaki, K. (1979): Electromyographic analysis of the readiness state conditioned by a warning signal preceding phasic voluntary contraction of hands. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 47:5P.
- 152) Petrofsky, J.S. and Lind, A.R. (1980): Frequency analysis of the electromyogram during sustained isometric contractions. *Europ. J. appl. Physiol.*, 43:173-182.
- 153) Pierrot-Deseilligny, E. and Lacert, P. (1973): Amplitude and

variability of monosynaptic reflexes prior to various voluntary movements in normal and spastic man. *New Developments in Electromyography and Clinical Neurophysiology*, edited by Desmedt, J.E., Vol. 3, pp. 538-549.

- 154) Renshaw, B. (1946): Central effects of centripetal impulses in axons of spinal ventral roots. *J. Neurophysiol.*, 9:191-204.
- 155) Requin, J. (1969): Some data on neurophysiological processes involved in the preparatory motor activity to reaction time performance. *Acta Psychol.*, 30, *Attention and Performance II*, edited by Koster, W.G., pp. 358-367.
- 156) Requin, J., Lecas, J.-C. and Bonnet, M. (1982): Some experimental evidence for a three-step model of motor preparation. *Preparatory states & processes, Proceedings of the Franco-American Conference*, edited by Kornblum, S. and Requin, J., pp. 259-284, Lawrence Erlbaum Associates, New Jersey.
- 157) Rizzolatti, G., Scandolara, C., Matteli, M. and Gentilucci, M. (1981): Afferent properties of periarculate neurons in macaque monkeys. I. Somato-sensory responses. *Behav. Brain Res.*, 2:125-146.
- 158) Romo, R. and Schultz, W. (1987): Neuronal activity preceding self-initiated or externally timed arm movements in area 6 of monkey cortex. *Exp. Brain Res.*, 67:656-662.

- 159) Rüegg, D.G., Krauer, R. and Drews, H. (1990): Superposition of H reflexes on steady contractions in man. *J. Physiol.*, 427:1-18.
- 160) 酒田英夫(1984): 頭頂連合野と随意運動. *神経進歩*, 28:112-122.
- 161) Sakata, H., Takaoka, Y., Kawarasaki, A. and Shibutani, H. (1973): Somatosensory properties of neurons in the superior parietal cortex (area 5) of the rhesus monkey. *Brain Res.*, 64:85-102.
- 162) 佐々木和夫(1987): 大脳-小脳連関. *脳の構造と機能 下巻*, 大村 裕・島津 浩・伊藤正男編, pp. 59-70, 医学書院, 東京.
- 163) Sasaki, K., Gemba, H. and Hashimoto, S. (1981): Premovement slow cortical potentials on self-paced hand movements and thalamocortical and corticocortical responses in the monkey. *Exp. Neurol.*, 72:41-50.
- 164) Sasaki, K., Gemba, H., Hashimoto, S. and Mizuno, N. (1979): Influences of cerebellar hemispherectomy on slow potentials in the motor cortex preceding self-paced hand movements in the monkey. *Neurosci. Lett.*, 15:23-28.
- 165) Sasaki, K., Kawaguchi, S., Oka, H., Sakai, M. and Mizuno, N. (1976): Electrophysiological studies on the cerebellocerebral projections in monkeys. *Exp. Brain Res.*, 24:495-507.
- 166) 佐藤方彦(1964): 双極表面誘導筋電図の周波数成分. *人類誌*, 72

:92-106.

- 167) Schmidt, E.M., Jost, R.G. and Davis, K.K. (1974): Cortical cell discharge patterns in anticipation of a trained movement. *Brain Res.*, 75:309-311.
- 168) Schwartz, A.B., Kettner, R.E. and Georgopoulos, A.P. (1988): Primate motor cortex and free arm movements to visual targets in three-dimensional space. I. Relations between single cell discharge and direction of movement. *J. Neurosci.*, 8:2913-2927.
- 169) 柴崎 浩 (1988): 人の運動関連脳電位. 新生理科学大系 10, 運動の生理学, pp. 102-112, 医学書院, 東京.
- 170) 柴崎 浩 (1990): 運動関連脳電位. 神経生理を学ぶ人のために, 柳沢信夫・柴崎 浩著, pp. 248-267, 医学書院, 東京.
- 171) Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E. and Halliday, A.M. (1980a): Components of the movement-related cortical potential and their scalp topography. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 49:213-226.
- 172) Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E. and Halliday, A.M. (1980b): Cortical potentials following voluntary and passive finger movements. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 50:201-213.
- 173) Shibasaki, H., Barrett, G., Halliday, E. and Halliday, A.M. (1981): Cortical potentials associated with voluntary foot movement in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 52:507-516.

- 174) Shibasaki, H., Barrett, G., Neshige, R., Hirata, I. and Tomoda, H. (1986): Volitional movement is not preceded by cortical slow negativity in cerebellar dentate lesion in man. *Brain Res.*, 368:361-365.
- 175) 柴崎 浩, 加藤元博(1974): 脳運動関連電位の基礎的および臨床的研究. I. 一側手運動に伴う脳運動関連電位の各成分の検討. *臨床神経*, 14:844-849.
- 176) 柴崎 浩, 加藤元博(1974): 脳運動関連電位の基礎的および臨床的研究. II. 両手同時運動とP1成分の意義. *臨床神経*, 14:850-854.
- 177) Shibasaki, H. and Kato, M. (1975): Movement-associated cortical potentials with unilateral and bilateral simultaneous hand movement. *J. Neurol.*, 208:191-199.
- 178) Shibasaki, H., Shima, F. and Kuroiwa, Y. (1978): Clinical studies of the movement-related cortical potential (MP) and the relationship between the dentatorubrothalamic pathway and readiness potential (BP). *J. Neurol.*, 219:15-25.
- 179) Shindo, M., Harayama, K., Kondo, N., Yanagisawa, N. and Tanaka, R. (1984): Changes in reciprocal Ia inhibition during voluntary contraction in man. *Exp. Brain Res.*, 53:400-408.
- 180) Simoyama, M. and Tanaka, R. (1974): Reciprocal Ia inhibition at the onset of voluntary movements in man. *Brain Res.*, 82:334-337.
- 181) 白松千加子(1983): バドミントンのオーバーヘッド・ストローク・

プロダクションに関する筋電図学的研究. 筑波大学体育学群卒業論文 (指導: 藤田紀盛教授)

- 182) Smith, A.M. and Bourbonnais, D. (1981): Neuronal activity in cerebellar cortex related to control of prehensile force. *J. Neurophysiol.*, 45:286-303.
- 183) Smith, A.M., Hepp-Reymond, M.-C. and Wyss, U.R. (1975): Relation of activity in precentral cortical neurons to force and rate of force change during isometric contractions of finger muscles. *Exp. Brain Res.*, 23:315-332.
- 184) SoSo, M.J. and Fetz, E.E. (1980): Responses of identified cells in postcentral cortex of awake monkeys during comparable active and passive joint movements. *J. Neurophysiol.*, 43:1090-1110.
- 185) Stetson, R.H. and Bouman, H.D. (1935): The coordination of simple skilled movement. *Arch. Neerl. de Physiol.*, 20:177-254.
- 186) Tanaka, R. (1974): Reciprocal Ia inhibition during voluntary movements in man. *Exp. Brain Res.*, 21:529-540.
- 187) Tanaka, R. (1983): Reciprocal Ia inhibitory pathway in normal man and in patients with motor disorders. *Advances in Neurology*, Vol. 39, Motor Control Mechanisms in Health and Disease, edited by Desmedt, J.E., pp. 433-441, Raven Press, New York.
- 188) 谷口光太郎, 福島菊郎, 丹治 順, 加藤正道 (1976): ヒトの随意運動開始時およびその準備状態における Ia 相反抑制. 臨床脳波.

18:486-492.

- 189) 谷井克則(1981): 等尺性筋収縮形態における発揮しやすい筋力. 労働科学, 57:93-100.
- 190) 谷井克則(1983): 急速な腰のばし動作に先行して脊柱起立筋に出現する Electromyographic silent period. 人類誌, 91:11-24.
- 191) Tanii, K., Kogi, K. and Sadoyama, T. (1972): Spontaneous alternation of the working arm in static overhead work. J. Human Ergol., 1:143-155.
- 192) Tanii, K. and Masuda, T. (1985a): A study by EMG stick diagrams of the muscular activities in the trunk flexion and extension movement. Ergonomics, 28:895-904.
- 193) Tanii, K. and Masuda, T. (1985b): A kinesiologic study of erector spinae activity during trunk flexion and extension. Ergonomics, 28:883-893.
- 194) Tanii, K., Sadoyama, T., Sanjo, Y. and Kogi, K. (1973): Appearance of effort-depending changes in static local fatigue. J. Human Ergopl., 2:31-45.
- 195) 丹治 順(1984): 補足運動野と随意運動. 神経進歩, 28:67-76.
- 196) Tanji, J. and Evarts, E.V. (1976): Anticipatory activity of motor cortex neurons in relation to the direction of an intended movement. J. Neurophysiol., 39:1062-1068.
- 197) Tanji, J. and Kato, M. (1972): Discharges of single motor units at voluntary contraction of abductor digiti minimi muscle in man. Brain Res., 45:590-593.
- 198) Tanji, J. and Kato, M. (1973): Firing rate of individual

- motor units in voluntary contraction of abductor digiti
minimi muscle in man. *Exp. Neurol.*, 40:771-783.
- 199) Tanji, J. and Kurata, K. (1979): Neuronal activity in the
cortical supplementary motor area related with distal and
proximal forelimb movements. *Neuroscience Lett.*, 12:201-
206.
- 200) Tanji, J. and Kurata, K. (1982): Comparison of movement-
related activity in two cortical motor areas of primates.
J. Neurophysiol., 48:633-653.
- 201) Tanji, J. and Taniguchi, K. (1978): Does the supplementary
motor area play a part in modifying motor cortex reflexes ?
J. Physiol. (Paris), 74:317-318.
- 202) Thach, W.T. (1968): Discharge of Purkinje and cerebellar
nuclear neurons during rapidly alternating arm movements in
the monkey. *J. Neurophysiol.*, 31:785-797.
- 203) Thach, W.T. (1970): Discharge of cerebellar neurons related
to two maintained postures and two prompt movements. I.
Nuclear cell output. *J. Neurophysiol.*, 33:527-536.
- 204) Thach, W.T. (1970): Discharge of cerebellar neurons related
to two maintained postures and two prompt movements. II.
Purkinje cell output and input. *J. Neurophysiol.*, 33:537-
547.
- 205) Thach, W.T. (1975): Timing of activity in cerebellar dentate
nucleus and cerebral motor cortex during prompt volitional
movement. *Brain res.*, 88:233-241.

- 206) Thach, W.T. (1978): Correlation of neural discharge with pattern and force of muscular activity, joint position, and direction of intended next movement in motor cortex and cerebellum. *J. Neurophysiol.*, 41:654-676.
- 207) 宇野正威: 大脳基底核と辺縁系. 新生理科学体系 10, 運動の生理学, pp. 215-224, 医学書院, 東京.
- 208) Vallbo, Å.B. (1971): Muscle spindle response at the onset of isometric voluntary contractions in man. Time difference between fusimotor and skeletomotor effects. *J. Physiol.*, 318:405-431.
- 209) Vaughan, Jr., H.G., Costa, L.D. and Ritter, W. (1968): Topography of the human motor potential. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 25:1-10.
- 210) 脇田裕久, 水谷四郎, 東海政義, 三田勝巳, 青木久, 矢部京之助(1979): 随意動作に先行する silent period の出現率について. *体育学研究*, 24:227-236.
- 211) 脇田裕久, 長井健二, 八木規夫, 矢部京之助(1981): 反応動作におよぼす動作前 silent period の影響. *体育学研究*, 26:119-128.
- 212) 脇田裕久, 矢部京之助(1984): 指示条件の違いによる動作前 silent period の出現について. *体力科学*, 33:192-200.
- 213) 脇田裕久, 八木規夫, 矢部京之助(1982): 「動作前 silent period の出現率について」 第2報 単純反応動作のトレーニングによる効果. *三重大学教育学部研究紀要*, 33:125-132.
- 214) Walter, W.G., Cooper, R., Aldridge, V.J., McCallum, W.C. and Winter, A.L. (1964): Contingent negative variation: an

- electric sign of sensorimotor association and expectancy in the human brain. *Nature*, 203:380-384.
- 215) 鷺見幸彦(1987): 正常人における運動関連電位-随意運動パラメータの運動準備電位に対する影響. *信州医誌*, 35:793-806.
- 216) Weinrich, M. and Wise, S.P. (1982): The premotor cortex of the monkey. *J. Neurosci.*, 2:1329-1345.
- 217) Wilke, J.T. and Lansing, R.W. (1973): Variations in the motor potential with force exerted during voluntary arm movements in man. *Electroenceph. clin. Neurophysiol.*, 35:259-265.
- 218) Wise, S.P. (1984): 運動前野と随意運動. *神経進歩*, 28:58-66.
- 219) Wise, S.P., Weinrich, M. and Mauritz, K.-H. (1983): Motor aspects of cue-related neuronal activity in premotor cortex of the rhesus monkey. *Brain Res.*, 260:301-305.
- 220) Wolpaw, J.R. and Lee, C. (1989): Memory traces in primate spinal cord produced by operant conditioning of H-reflex. *J. Neurophysiol.*, 61:563-572.
- 221) 矢部京之助(1966): 最大筋力と疲労. *体育学研究*, 11:77-85.
- 222) Yabe, K. (1976): Premotion silent period in rapid voluntary movement. *J. Appl. Physiol.*, 41:470-473.
- 223) 矢部京之助(1980): 先行抑制. *運動の解析*. 島村宗夫, 中村隆一編, pp. 230-237, 医歯薬出版, 東京.
- 224) 矢部京之助, 村地俊二(1975): 随意動作に先行する silent period の役割. *日本生理誌*, 37:91-98.
- 225) 矢部京之助(1976): 対側肢にみられる silent period の発現機構.

体育学研究, 21:11-17.

226) Yamamoto, K. and Odagiri, M. (1981): Discharge pattern differences between cat interpositus and dentate neurons during isometric lever pressing. *Exp. Brain Res.*, 43:104-106.

227) 山本高司, 矢部京之助, 猪飼道夫(1972): 調整力の中枢機構〔Ⅱ〕
- 随意運動に先行する脳の電位変化 -. *体育の科学*, 22:127-133.

228) 吉田充男(1982): 大脳基底核と運動. *Jap. J. Sports Sci.*, 1:30