

## VI章. 運動開始前の持続的な随意収縮が準備電位に及ぼす影響

### 1. 目的

研究課題 I において安静状況より持続的筋収縮状況において CNV 後期成分が減少することが明らかとなった。しかしながら、CNV 後期成分は警告信号 (WS) に続いて与えられる信号が動作を促す信号ではなくても出現する (Ruchkin et al, 1986; Tecce and Cattanach, 1993; Boxtel and Brunia, 1994) ため、CNV 後期成分には運動の準備に直接関係しない成分も含まれる。従って、研究課題 I において得られた CNV 後期成分の減少が運動の準備と関係したものかどうかは定かでない。そこで研究課題 III では運動の準備とより関係が深いとされる準備電位 (RP) を用いて、持続的な筋収縮が及ぼす影響を検討し、CNV 後期成分との対応を調べた。また、それぞれの状況における運動の諸要素についても検討を加えた。

### 2. 方法

#### 被験者と実験状況

被験者は健常成人 10 名であった。被験者には事前に実験の主旨を説明し、同意を得た上で実験を遂行した。持続的筋収縮の大きさは実験開始前にあらかじめ設定され、大きさは被験者が収縮を楽に維持できるレベルでかつ反応が容易に行える程度の大きさとした。実験に関わるその他の状況は研究課題 II と同様である。

### 実験課題

本実験において設定された課題を図 15 に示した。RP 課題において持続的筋収縮あるいは安静状態から行われる、できるだけ素早い手関節の屈曲動作は主動作と呼ばれた。主動作開始前に持続的な収縮を行うか否かは、ある試行の遂行直後 2s 以内に験者から教示された。被験者は験者から言葉による教示を聞いた後、約 5 s 程度の試行間隔において自発的に教示された課題を遂行した (図 15 上段)。

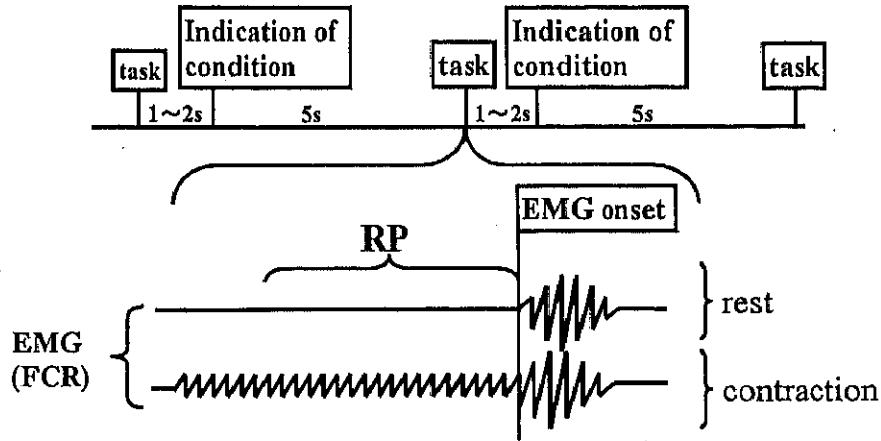
CNV に関しては次のテスト、コントロール及びキャッチ試行が設定された (図 15 下段)。まず、テスト試行に関して、被験者は験者に安静及び収縮状況のいずれかを遂行するように教示されると、あらかじめ設定されたオシロスコープ上のターゲットラインに筋電図の大きさを示すビームを合わせた。被験者は験者が安定した状態になったことを確認してから警告信号 (WS) (ブザー音: 1KHz) とその 2s 後の反応信号 (RS) を与えた。反応動作は研究課題 II と同様だった。コントロールとキャッチ試行は研究課題 II と同様に与えられた。これら 3 つの試行及び各条件は全てランダムに与えられた。RP と CNV 課題の実施順序は被験者間でランダムとした。

実験の最後に、約 3 s 間の最大屈曲力の発揮を 3 セット行わせた。得られたデータは、被験者の持続収縮の大きさを標準化するために用いられた。

### 記録

脳波と筋電図の記録状況は研究課題 I, II と同様だった。

### RP acquisition



### Condition of PP

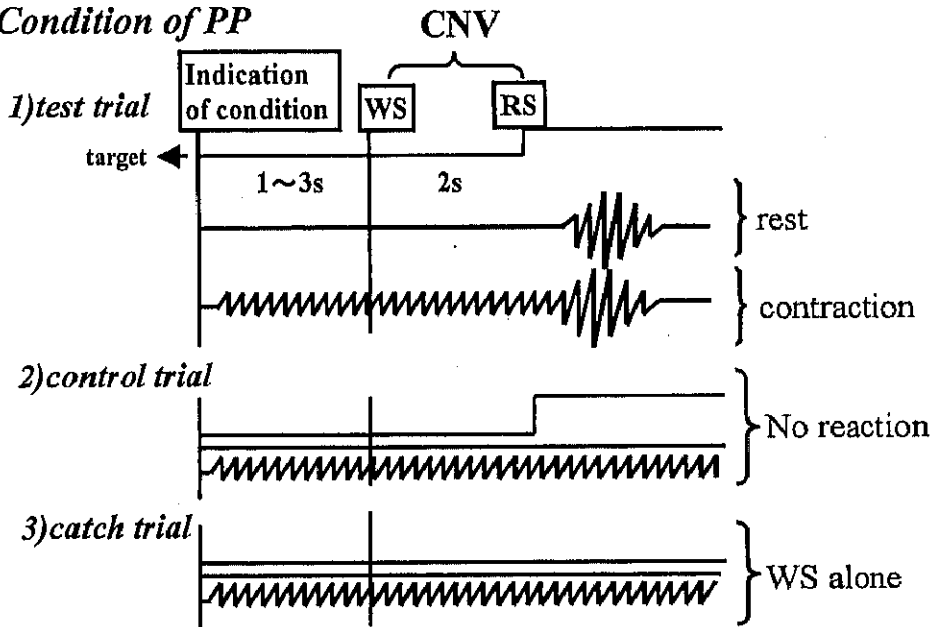


図15. 実験課題の模式図。上段がRP, 下段がCNVを得るための試行の種類及び状況である。RPの獲得過程において被験者が行う試行は1種類であり、それは2つの状況 (restとcontraction) から構成された。ある試行 ("task") の直後1~2sの間に、言葉によって ("indication of condition"), 次に行うべき状況が験者から被験者に伝えられた。被験者はその約5s後に自発的に主動作を遂行した。CNV獲得過程における試行は3種類であり、それぞれに安静と収縮状況があった。テスト試行では被験者は"indication of task"の時点で、安静か収縮、いずれかの状況を験者から教示され、その1~3秒後にWS, さらにその2s後にRSを与えられた。コントロール試行は"indication of condition"の時点で、反応動作を伴わずに、安静か収縮どちらかの状況を維持するように教示された試行であった。Catch trialは、状況の教示はテスト試行と同様に与えられるが、RSが提示されない試行であった。

RP に関しては筋電図開始前 3s から後 1s, CNV に関しては警告信号 (WS) 提示前 1s から提示後 3s までが記録の対象とされた。RP は 60 回, CNV は 30 回程度の脳波を加算平均することによって得られた。

被験者ごとの持続的筋収縮に伴う筋電図の大きさは次のように処理された。RP 課題に関しては筋電図開始前 1000~1500ms 区間, CNV に関しては反応信号 (RS) 前 500ms 区間の筋電図を全波整流し, その平均値として算出した。これらは実験の最後に得られた最大力の発揮に伴う筋電図によって標準化された。最大力の発揮に伴う筋電図は次のように処理された。すなわち, 任意の 50ms 区間における筋電図を全波整流して平均振幅を求め, 同様の手順で得られた約 5 区間の平均値から, 各被験者の基準となる筋電図 (基準 EMG) の大きさが求められた。本実験の収縮状況における筋電図の大きさは RP 及び CNV 試行がそれぞれ, 基準 EMG の  $7.4 \pm 2.3\%$  及び  $6.4 \pm 3.3\%$  であり, 両者に統計的な差はなかった ( $t=1.41$ ,  $P=0.19$ )。

### 解析と統計

RP は早期成分である Beritschaftspotential (BP) とそれに続いてより急峻な傾斜を持つ Negative slope (Ns') に分けて解析することが重要である (Kutas and Donchin, 1977; Shibasaki et al, 1980)。研究課題 III の各被験者には安静状況において BP と Ns' が区別され, RP を両成分に分けて検討した (図 16)。BP 成分は筋電図開始前 750~1250ms 区間の平均振幅とした。Ns' 成分に関しては Cz から得られた RP をコンピュータ上にモニターし, 視覚的にその出現時点を確認し振幅が最大となる時点までの平均値を

算出した。解析対象となった区間の全被験者の平均値は、安静状況が筋電図開始前 468～114ms、収縮状況が筋電図開始前 508～97ms であった。これらの時点は、近年の他の報告とほぼ一致した結果であった。

CNV 後期成分は、テスト試行からコントロール試行を減じた波形（図 17 及び図 19 参照）に関して、反応信号（RS）の前 500ms の平均振幅として算出した。

筋電図反応時間（EMG RT）の計測は研究課題 II と同様の手順で行われた。RP 試行の主動作及び CNV 試行の反応動作に伴う力の軌跡に関しては、最大振幅と最大に達するまでの力の傾斜が求められた。力の傾斜は、立ち上がりから最大に達するまでの区間において、斜度が最大となる区間を視覚的に判定し、その区間のサンプリングポイントに基づいた近似直線の傾きとして算出された。

用いられた統計的手法は次の通りである。RP 及び CNV の各成分に関しては、導出部位と状況（安静状況と収縮状況）による 2 要因の分散分析を行い、その後、導出部位ごとに安静と収縮状況について t 検定を行った。筋電図反応時間（EMG RT）、力の最大値、力の傾斜に関しては、各被験者の平均値を代表値とした場合と、各被験者の 1 試行の値を代表値とした場合について、t 検定を行い安静状況と収縮状況が比較された。

### 3. 結果

#### 準備電位 (RP)

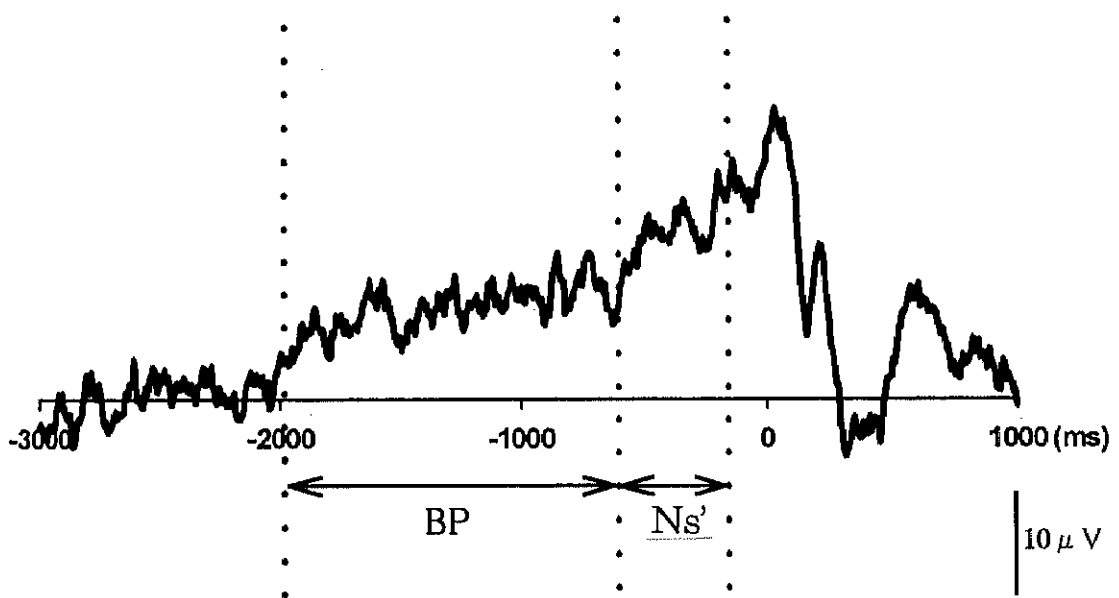


図16. 一人の被験者の RP の例。この被験者においては EMG onset (0ms の時点)前, 約 2s から陰性の電位が出現, 漸増し (BP), 約 600ms 前からその傾斜は急峻となり (Ns'), EMG onset 直前で最大となった。

先述したように RP が早期成分である BP とそれに続いてより急峻な傾斜を持つ Ns' に分離されることは重要である (Kutas and Donchin, 1977; Shibasaki et al, 1980)。前者は中心部優位で左右の半球に均等に分布することから、自発運動における動作の一般的な準備状態を反映する成分とされ、後者は運動側と反対側の中心部優位に出現するため、行われる運動に特異的な準備状態を反映すると考えられている (Shibasaki et al, 1980; Neshige et al, 1988)。図 16 に安静状況において得られた一人の被験者の RP を示した。

全被験者の安静状況における BP の開始時点は筋電図開始前 1820(±340)ms であった。また、収縮状況における BP の開始時点は、ほとんどのデータが収縮の影響を受けて振幅を減少させるか消失し、開始時点を判別することが困難であったため、解析の対象とされなかった。Ns' の開始時点は安静状況と収縮状況がそれぞれ、筋電図開始前 468(±114)ms と 508(±97)ms であった。

BP 振幅は、導出部位と状況による 2 要因の分散分析の結果、状況の違いが及ぼす影響は有意であった ( $F=47.36$ ,  $P<0.01$ )。安静状況の BP 振幅の頭皮上分布に関しては、Cz がもつとも振幅が大きくなる傾向があり、半球間の差は観察されなかった (図 17A 上段)。導出部位ごとに安静状況と収縮状況の BP 振幅を比較したところ、全導出部位において収縮状況が振幅を減少させる傾向があり、Fz と C4' 以外の全ての部位において振幅は有意に減少していた。また、この減少は Cz において最も顕著であった ( $t=3.7$ ,  $P<0.01$ ) (図 18A)。

Ns' 振幅は 2 要因の分散分析の結果、導出部位と状況の両者に関して Ns' 振幅への影響は有意であった (導出部位:  $F=12.4$ ,  $P<0.01$ ,

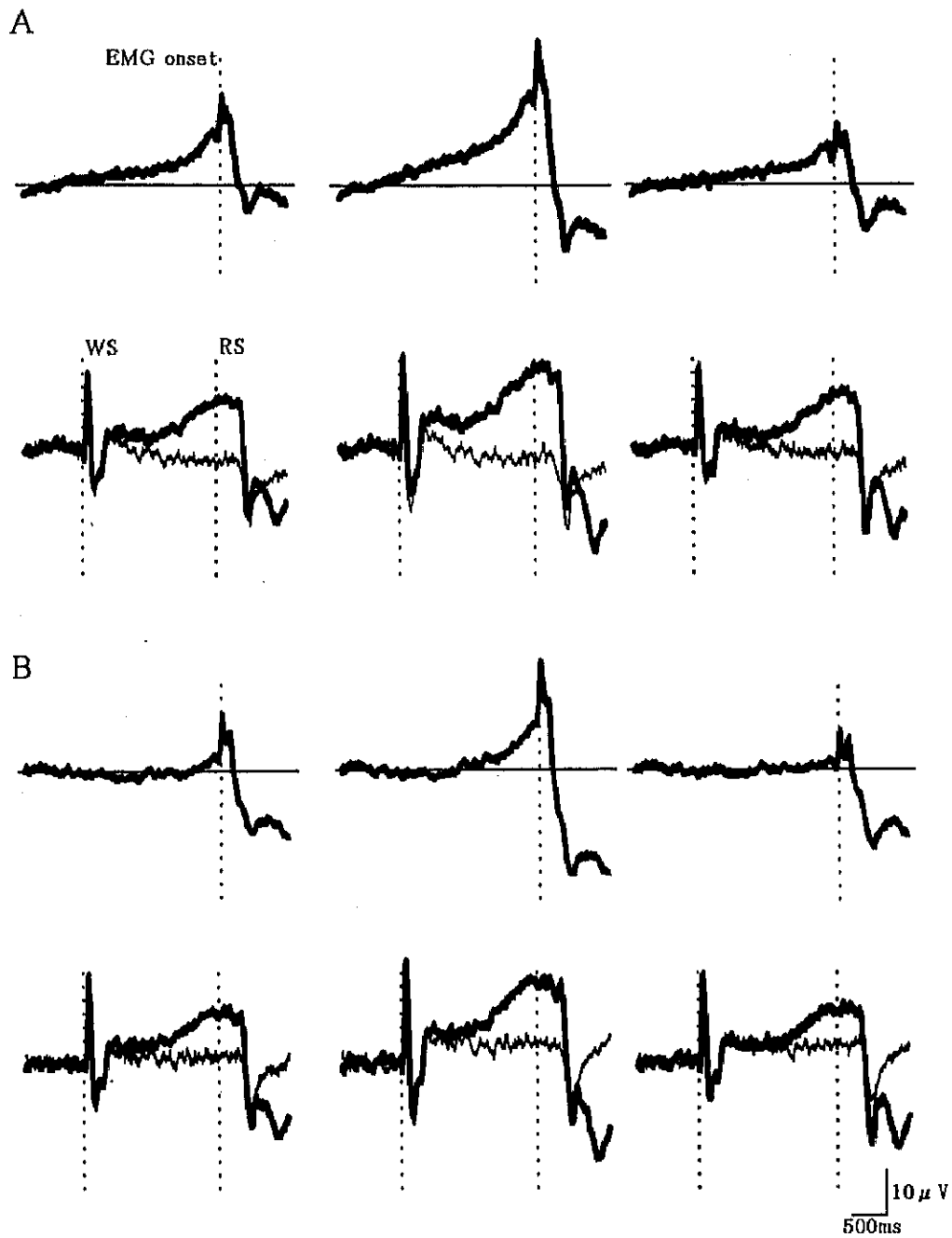


図17. RPとCNVのgrand average。Aは安静状況，Bは収縮状況におけるRPとCNVである。それぞれ，上段がRP，下段がCNVである。それぞれの列は左から，C3，Cz，C4から記録されたものである。RPにおける点線はEMG onsetを示し，CNVにおける点線の左はWS，右はRSを示している。CNVにおける細線はコントロール試行，太線はテスト試行である。



状況： $F=11.34$ ， $P<0.01$ )。頭皮上分布に関しては  $C_z$  で最大となり，運動側と反対側の半球において振幅が大きくなる傾向があった (図 17A, B 上段)。導出部位ごとの  $t$  検定ではどの部位においても，状況の違いによる有意な差は得られなかった。

### 随伴性陰性変動 (CNV)

CNV 後期成分の振幅は 2 要因の分散分析の結果，導出部位と状況の両者に関して CNV 後期成分への影響は有意であった (導出部位： $F=2.51$ ， $P<0.05$ ，状況： $F=13.51$ ， $P<0.01$ )。頭皮上分布に関しては  $C_z$  で最大となり，半球間の差は観察されなかった (図 17A, B 下段)。次に，導出部位ごとに  $t$  検定を行ったところ，全導出部位において収縮状況が安静状況に対して振幅を減少させる傾向にあり， $C_z$  ( $t=2.67$ ， $P<0.05$ ) と  $C3''$  ( $t=2.21$ ， $P<0.05$ ) において有意に収縮状況の方が振幅を減少させた (図 18B に  $C_z$  の結果を示した)。

### 準備電位 (RP) と随伴性陰性変動 (CNV) の関係

図 19 において，RP と CNV に対する持続的な収縮の影響を個々の被験者について調べることを試みた。A は収縮の影響を受けて RP, CNV ともに振幅を減少させる傾向を有する 3 人の被験者の両指標を加算平均したもの。B は収縮の影響を受けて RP の振幅は減少するが，CNV 振幅は収縮の影響を受けない 4 人の被験者の加算結果。C に関しては，RP は収縮の影響を受けないが，CNV は収縮の影響を受けて振幅を減少する 1 人の被験者の例。D は両指標ともに収縮の影響を受けない被験者 2 人の加算結果である。これらの結果から，収縮状況における RP と CNV 減少のパターンは

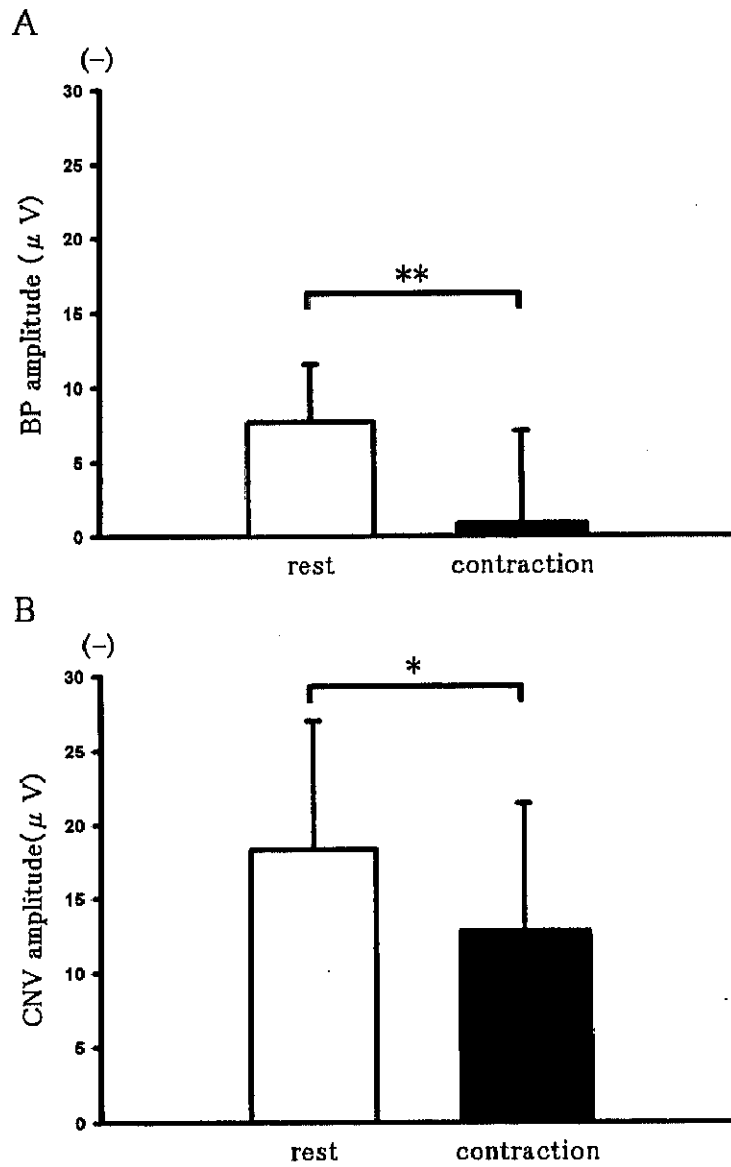


図18. Czから得られたBPとCNV後期成分の安静状況と収縮状況における比較。AがBP, BがCNV後期成分の振幅である。それぞれグラフの左はrest, 右はcontraction状況における全被験者の結果を平均と標準偏差によって示した。\*:  $P < 0.05$  \*\*:  $P < 0.01$

被験者によって異なること、及び CNV よりも RP の方が振幅を減少させやすいことが明らかとなった。

#### 運動要素について

RP 課題の主動作及び CNV 課題の反応動作に伴う、力の軌跡における最大値は収縮状況の方が大きくなる傾向があった。各被験者の平均値を代表とした場合、RP 課題では有意な差は得られなかったが ( $t=0.56$ ,  $P=0.58$ ), CNV 課題では有意に収縮状況が大きかった ( $t=-4.56$ ,  $P<0.01$ ) (図 20A)。被験者ごとに状況間の差を調べた場合、RP 課題においては 10 人中 2 人、CNV 課題においては 10 人中 7 人において有意に収縮状況の方が大きかった。

主動作及び反応動作に伴う力の軌跡が最大に達するまでの傾斜は、安静と収縮状況間に差は得られない傾向があった。各被験者の平均値を代表とした場合、RP 及び CNV 課題の両者において有意な差は観察されなかった (RP:  $t=0.06$ ,  $P=0.94$ , CNV:  $t=-2.00$ ,  $P=0.07$ ) (図 20B)。被験者ごとに状況間の差を調べた場合、RP 課題に関しては 1 人の被験者において収縮状況の方が大きかった。CNV 課題に関しては 4 人の被験者において安静状況が、1 人の被験者では収縮状況の方が有意に大きかった。

CNV 課題の反応動作に伴う筋電図反応時間 (EMG RT) は、各被験者の平均値を代表とした場合、有意に収縮状況の方が短縮した ( $t=1.82$ ,  $P<0.05$ ) (図 20C)。被験者ごとに状況間の差を調べた場合、3 人の被験者において有意に収縮状況の方が短縮した。

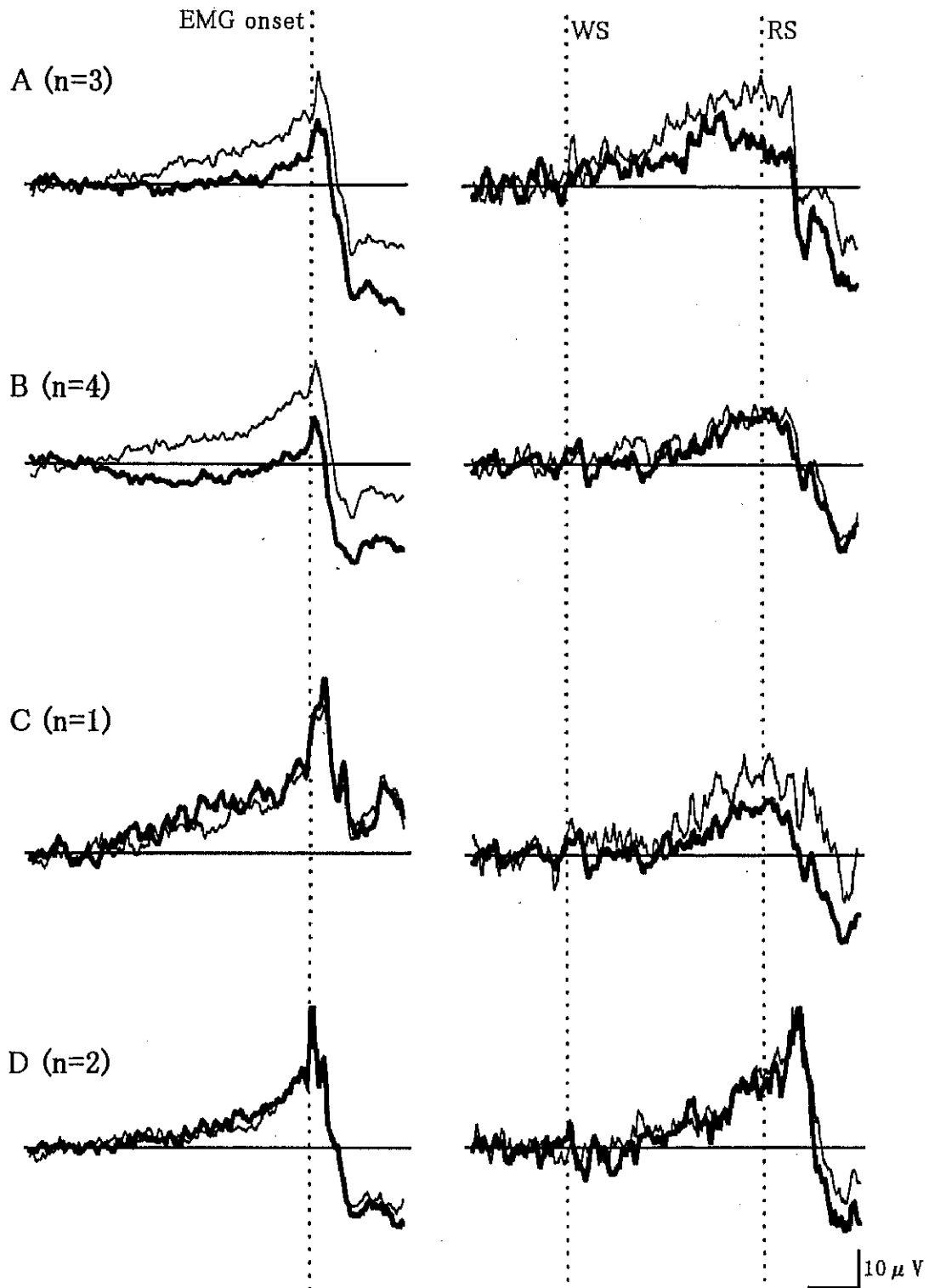


図19. 持続収縮がRPとCNVに及ぼす影響のパターン。左がRP, 右がCNVである。両者ともに, 薄線が安静状況, 太線が収縮状況である。A~Dに示されたCNVは, 個々の被験者のテスト試行からコントロール試行を減じた波形を再加算したものである。AはRP, CNVともに収縮状況が安静状況に比べて減少する例 (n=3)。BはRPは収縮状況において減少するが, CNVは安静と収縮状況で同様となる例 (n=4)。CはRPは変化しないが, CNVは収縮状況において減少する例 (n=1)。DはCNVとRPの両者が, 安静と収縮状況で同様となる例である (n=2)。

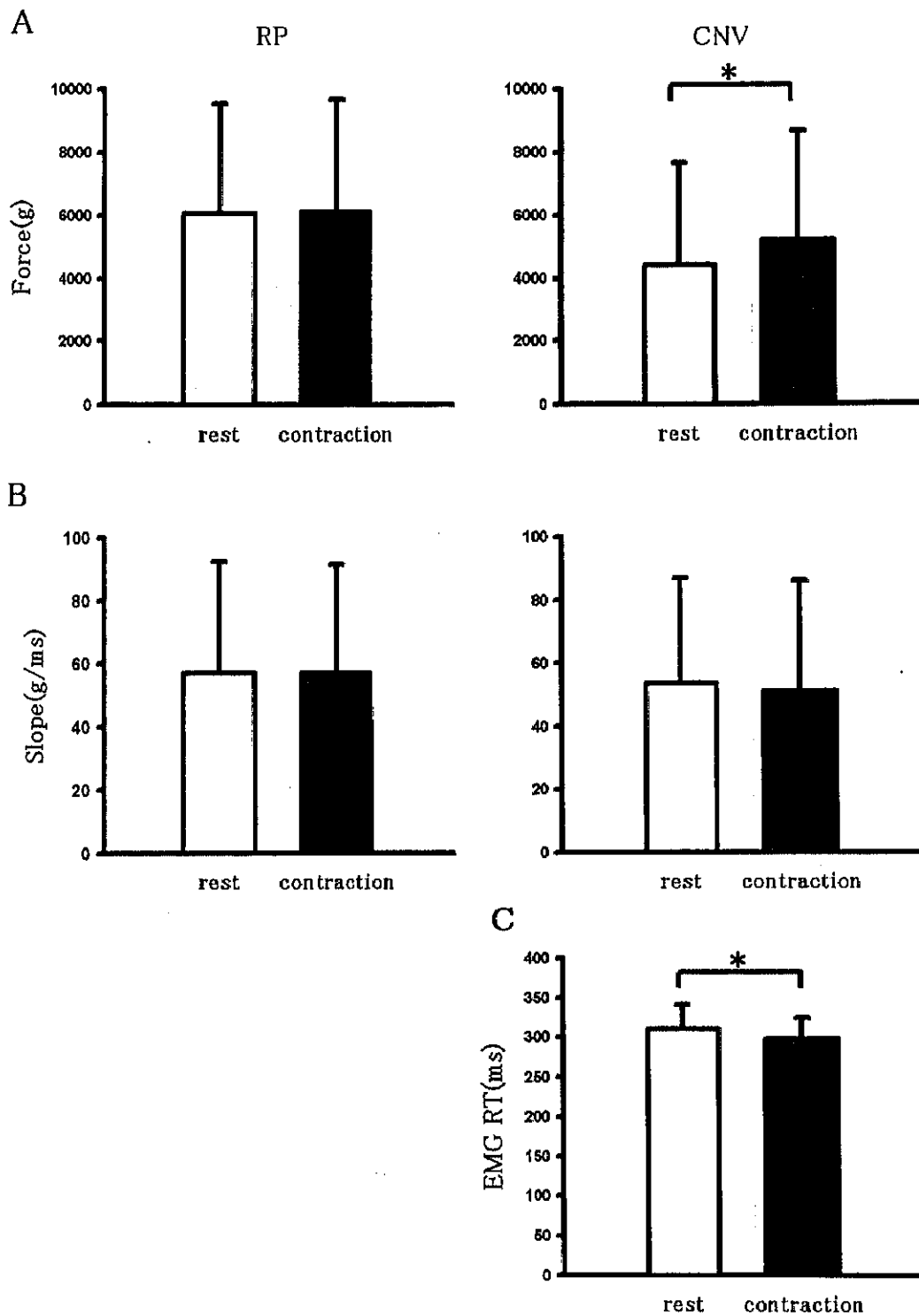


図20. 各種運動パラメータ。左の列はRP試行の主動作、右の列はCNV試行の反応動作に伴う力の軌跡及びEMG放電から測定された。Aは発揮された力のpeak amplitude, Bは力がpeakに達するまでの斜度, CはCNVセッションにおけるEMG RTを全被験者についてまとめ、平均値と標準偏差によって示した。\*:  $P < 0.05$

#### 4. 考察

本実験のBPとCNV後期成分は持続的筋収縮の影響により減少した。また、振幅の減少はBPにおいてより顕著であった。近年、Bruniaのグループは、CNV後期成分の構成要素には、RPと刺激前陰性変動（Stimulus preceding negativity : SPN）が含まれることを提唱した（Boxtel and Brunia,1994）。すなわち彼らは、警告信号（WS）において反応動作の条件が与えられる場合（S1-choice）（Boxtel and Brunia,1994 ; Boxtel et al,1993）、あるいは、行われた反応運動の結果に関する成績を示す信号が運動後に提示される場合（Brunia and Damen,1988）、それらの刺激前にも陰性の電位変動が観察されることを報告した。本実験のCNV後期成分の減少がBPほど顕著でなかったことはCNV後期成分に運動準備以外の要素が含まれる可能性を示唆する。

上述の議論はヒトを対象に、硬膜下からの皮質の電気的な活動（Ikeda et al,1994 ; Neshige et al,1988 ; Hamano et al,1997）及び皮質活動に伴う磁場（magnet encephalography : MEG）の記録（Hultin et al,1996 ; Fenewick et al,1993）を用いた報告からも支持される。すなわち、BPが記録されるのが両側の一次感覚運動野及び補足運動野であるのに対し、CNVは先述の領野を含め、前頭、側頭、後頭皮質からも記録されている。従って、仮にCNVの構成要素としてのBPが収縮の影響を受けたとしても、BPを構成する以外の要素がより大きく貢献すれば、CNV後期成分は減少しない可能性もあり得る。実際に、CNV振幅を減少させた導出部位はBP振幅のそれよりも顕著に少なかった。

多くの研究が、CNV及びRPの変化が結果として生じた運動の特徴と関連することを報告してきた。すなわち、CNV後期成分と

RP (特に Ns') の両者は、主動作及び反応動作の力の大きさが大きいほど(CNV : Low and McSherry,1968 ; Rebert et al,1967, RP : Becker and Kristeva,1980 ; Hink et al,1983), 速度が速いほど(CNV : Loveless and Sanford,1974 ; Gaillard et al,1980, RP : Becker et al,1980 ; Deeke and Kornhuber,1977), 振幅を増大することが報告された。また, CNV 後期成分に関しては反応時間が短いほど(Brunia,1980 ; Rohrbaug et al,1976), 振幅が増大することも報告されている。しかしながら, 本実験の指標の変化と運動の諸要素との対応は上述の報告とは異なっていた。

まず, RP 課題の主動作に伴う力の最大値及び傾斜は両状況で同様であった。これに対し, BP は収縮状況において明らかに減少し, Ns'では状況間の差は得られない傾向があった。次に, CNV 課題の反応動作に伴う力の最大値は収縮状況の方が大きく, 最大に達するまでの傾斜に差は見られなかったが, CNV 後期成分は収縮状況において減少した。また, 筋電図反応時間 (EMG RT) に関しても収縮状況の方が短縮する傾向にあった。これらの結果は, 本実験で得られた CNV 後期成分と BP の減少が結果として発揮された運動の要因によるものではなく, 主動作開始前の持続的な収縮の影響による可能性を改めて示唆するものである。

CNV は注意と正の相関を有し, 覚醒と逆 U 字の相関を有することが知られている (Tecce et al,1976)。今回の CNV 試行では, 収縮状況において筋電図反応時間 (EMG RT) が短縮し, 力の軌跡におけるピーク振幅が増大したことからまず, CNV 後期成分の減少が心理要因の減少によることは考えにくい。また, 安静状況と収縮状況は CNV 及び RP 課題の両者においてランダムに提示されたので, 実験に対する意欲や注意が実験中に変化したとしても,

その影響は両条件に同様に及ぶことが予想される。したがって、本実験において得られた CNV 後期成分及び RP の変化に対し、心理的な要因の効果が及ぼす影響は少ないと考えられる。

## 5. 要約

研究課題Ⅲでは、研究課題Ⅰにおいて得られた CNV 振幅の減少についてより詳しく調べるため、反応動作及び主動作開始前の持続的筋収縮が RP に及ぼす影響を調べて CNV との対応を検討すると同時に、行われた運動の諸要素についても検討を加え、以下の結果を得た。

1. RP は BP と Ns' に区別できた。
2. BP 振幅と CNV 後期成分は安静状況より収縮状況において有意に減少した。また、BP の方がより明らかに振幅を減少させる傾向にあった。
3. CNV 課題の収縮状況は安静状況と比べて、反応動作の力の軌跡における振幅は増大し、筋電図反応時間 (EMG RT) は短縮した。また、力の軌跡が最大に達するまでの傾斜に関して CNV, RP 課題とも状況間の差は得られなかった。

以上の結果から、CNV 後期成分の減少はその構成要素である RP の減少と関係すること、及びこの減少は行われた運動の諸要素や心理的要因の効果と直接的に関係しないことが考えられた。



**研究課題 I** : CNVとH反射を同時記録して両者の関係を調べるとともに、持続的筋収縮が両者にどのように影響するかを調べる。

**研究課題 II** : CNVとH反射に対して、異なる大きさの持続的筋収縮がどのように影響するかを調べる。

**研究課題 III** : 研究課題 I で得られたCNVの変化について詳しく調べるために準備電位 (RP) とCNVを調べる。

**研究課題 IV** : 研究課題 I ~ III までに得られた結果について詳しく調べるため体性感覚誘発電位 (SEP) とCNV及びH反射を調べる。

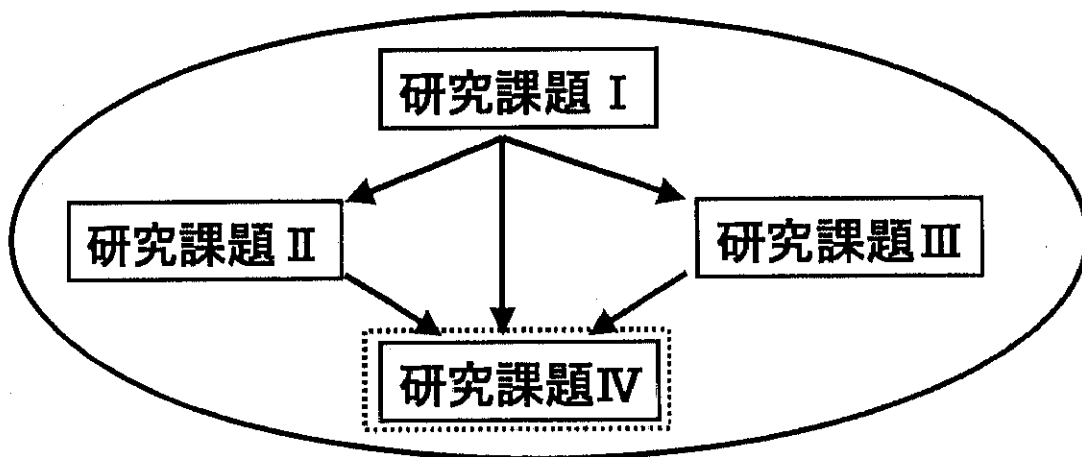


図 2 1 本研究における課題のフローチャート