

#### IV章. 運動準備期の持続的な随意収縮が随伴性陰性変動と Hoffman 反射(H 反射)に及ぼす影響—反応動作の主動筋による運動前収縮—

##### 1. 目的

準備期 (PP) の脊髄と脊髄上の中樞神経における準備的な活動性の変化は、随伴性陰性変動 (CNV) と H 反射の経時的変化を用いて様々な状況において個別に調べられてきた。反応信号 (RS) に対する中樞神経系の準備的な過程について詳しく理解するために、両者の関係を調べることは重要な課題と考えられるが、報告は少ない。

これまでの多くの報告において、CNV 後期成分と反応動作の諸要素との間には正の相関が示されてきた。すなわち、力の大きさが大きくなるほど (Rebert et al, 1967 : Low and McSherry, 1968), 運動の速度が速くなるほど (Grunewald et al, 1979 : Deecke et al, 1980), 反応時間 (RT) が短縮すると (Rohrbaugh and Gaillard, 1983 : Brunia, 1980 : 西平ら, 1983), CNV 後期成分は増大した。これに対し、CNV 後期成分が減少して運動要素の成績が上昇する結果を提示した報告はみられない。

持続的な筋収縮の影響によって CNV 後期成分が安静状況より減少することを初めて報告したのは Otto et al, 1977 であった。その後いくつかの報告によって持続的な筋収縮状況下の CNV 後期成分は、筋収縮がない状況と比べて減少するかもしくは増大しないことが報告された (Papakostopoulos and Cooper, 1978 : Papakostopoulos and Jones, 1980 : Gaillrad et al, 1980)。反応時間 (RT) を用いた研究では、予備的な筋緊張が運動開始前に与え

られた場合、反応時間 (RT) が短縮することが Clarke, 1968 によって報告された。その後、Schmidt and Stull, 1970 は予備的な筋緊張が筋電図反応時間 (EMG RT) を短縮させることを明らかにした。上述の CNV を用いた研究では反応時間 (RT) について言及していないので、両者の関係は不明である。従って、両指標が同時に検討され、CNV 後期成分の減少時に筋電図反応時間 (EMG RT) が短縮する結果が得られれば、CNV に関するこれまでの報告と異なる注目すべき知見が提供されることが考えられる。

そこで研究課題 I では、反応信号 (RS) に対して遂行される反応動作の主動筋を対象とし、CNV と H 反射振幅の系時的な変化の対応、及び準備期 (PP) に課された持続的筋収縮が両指標と筋電図反応時間 (EMG RT) にどのような影響を及ぼすかを調べた。

## 2. 方法

### 被験者と反応動作

被験者は実験参加の同意を得た健常成人 11 名 (男子 3 名、女子 8 名) であった。被験者は肘掛け付きの実験用安楽椅子に右の肘関節角度が約  $120^{\circ}$  となるように座り、前腕を肘掛けに固定した。また、等尺性の屈曲運動を行わせるため、手関節はストレインゲージの装着された金属製のプレートに布性のベルトを用いて固定された。拇指は上方を向き、手関節の屈曲による力は内転方向へ発揮された。屈曲力は被験者の前方約 1m に置かれたオシロスコープの画面上にモニターできるようにした (図 2A)。

警告信号 (WS) の 2s 後に提示される反応信号 (RS) に対し

て遂行される反応動作は、あらかじめ設定された力発揮レベル(最大力の約 50%程度)まで、できるだけ素早い手関節の屈曲運動を行い、すぐに安静状態へ戻ることであった。課題の遂行に際して、被験者には正確性よりもスピードを重視するように教示した。

### 実験課題

本実験において設定された課題を図 2B に示した。1)と 2)に関しては H 反射導出のために電気刺激が与えられる条件と、CNV を得るために電気刺激が与えられない条件を設定した。3)は被験者が反応信号 (RS) を予測して反応しないための試行であり、4)はコントロール状況の脳波を得るために、あらかじめ被験者に何もしないことを要求する試行である。本実験では 1)~4)の条件が実験中にランダムに分配されるようにした。試行間隔は 10 s 以上とした。

### H 反射誘発刺激

H 反射は、正中神経を上腕二頭筋の腱に対してやや内側の肘レベルにおいて、1ms の矩形波を用いて経皮的に刺激することにより導出された。刺激は警告信号 (WS) から 200ms ごとの、9 つの時点にランダムに与えられた (図 2B)。一試行ごとの H 反射及び M 波は、刺激時点をトリガーとしてストレージ機能を備えたオシロスコープにモニターされた。電気刺激効率を一定にするため、小さな M 波 (M 波最大振幅の約 5%程度) が指標とされた。刺激強度は必要に応じて試行間に調節され、M 波振幅が一定となるようにした。

## 記録と解析

脳波は国際 10-20 法に従い図 2A に示したような配置により、両耳朶を基準として単極導出された（時定数：3.2s，研究課題 II，III 及び IV の CNV 課題は 5s，high cut：120Hz）。筋電図は橈側手根屈筋（Flexor Carpi Radiaris：FCR）と橈側手根伸筋（Extensor Carpi Radiaris：ECR）より、表面双極法により導出された（時定数：0.03s，high cut：1.5kHz）。筋電図反応時間（EMG RT）として、筋電図の原波形とその全波整流波形から、分解能 1ms のマウスシステムを用いて、反応信号（RS）から一過性の筋電図が出現するまでの時間が算出された。

計測された全ての現象はデータレコーダーに記録された。筋電図はデータレコーダーへの記録と同時に on line で、脳波は off line で、それぞれ 5kHz と 200Hz のサンプリング周波数を用いてコンピュータのハードディスク装置に記録された。筋電図については電気刺激の提示前 50ms から提示後 150ms が、また脳波については警告信号（WS）の提示前 1s から提示後 3s が記録の対象とされた。

CNV は約 20 回程度の脳波を加算平均することによって得られた。加算に関しては H 反射の誘発されない試行及び眼電図等のアーチファクトの混入しない試行が対象とされた。H 反射に関しては各刺激時点における約 9 個の振幅の平均値が求められた。

## 統計

安静状況と収縮状況における CNV の比較は、反応信号（RS）の前 500ms までの平均振幅からコントロール状況の振幅を減算したもののについて、対応のある t 検定を用いて行われた。安静状況

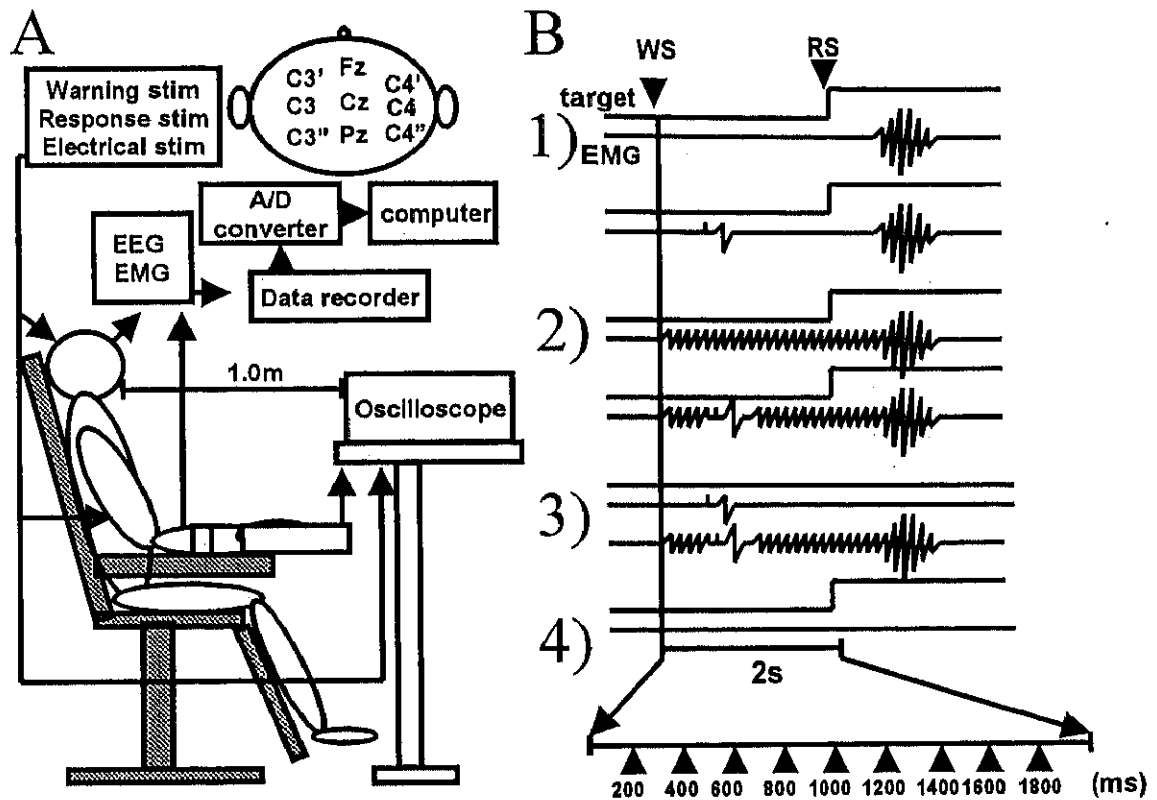


図2. 実験状況と課題の種類。A: EEGの記録電極の位置について, C3'(C4') and C3''(C4'')は C3(C4)からそれぞれ約2cm前方と後方に位置する。B: 1)は安静状況。WSにおける低いピープ音(500Hz, 200ms duration)に対して被験者は安静状態を維持する。2)は収縮状況。WSにおける高いピープ音(2kHz, 200ms duration)に対して, 被験者は軽い収縮(手関節の最大屈曲力の約5%)を維持する。3)は被験者が正確にRSに反応するための条件。WSは提示されるがRSは提示されない。4)はコントロール状況のEEGを得るための条件。WSもRSも提示されるが, あらかじめ被験者に何もしないことを要求する。

と収縮状況の筋電図反応時間 (EMG RT) における違いに対しても対応のある  $t$  検定が用いられた。準備期 (PP) における H 反射の経時的変化に対しては、一元配置の分散分析が用いられ、有意な差が得られた場合、対比検定が実施された。有意水準は 5%未満であった。

### 3. 結果

#### 被験者全体の結果について

一人の被験者における CNV と FCR に誘発された H 反射の経時的変化の記録例が図 3 に示された。本実験では全被験者において CNV が得られ、また、H 反射振幅の変化に対して M 波振幅に大きな変化は見られなかった。

このようにして得られた全被験者の結果(N=11)をまとめたものが図 4 である。各導出部位から得られた CNV(図 4A)において、コントロール状況に対する CNV 前半(警告信号 (WS) 後 400~900ms) の振幅は、Pz, Cz, Fz の順に、後半はその逆の順に大きくなる傾向を示した。また、Fz と C3'における CNV 後期成分(警告信号 (WS) 後 1500~2000ms)は、安静に比して収縮状況で減少する傾向があり、C3'においては統計的に有意な差が得られた ( $t=2.46$ ,  $P<0.05$ )。

H 反射振幅 (図 4B) は、準備期 (PP) 前半 (警告信号 (WS) ~800ms) において安静及び収縮両状況ともコントロールレベルから有意に増大した。後半 (警告信号 (WS) 後 800~2000ms) の振幅は、安静状況では前半と同様だったが、収縮状況ではコントロールレベルまで減少した。

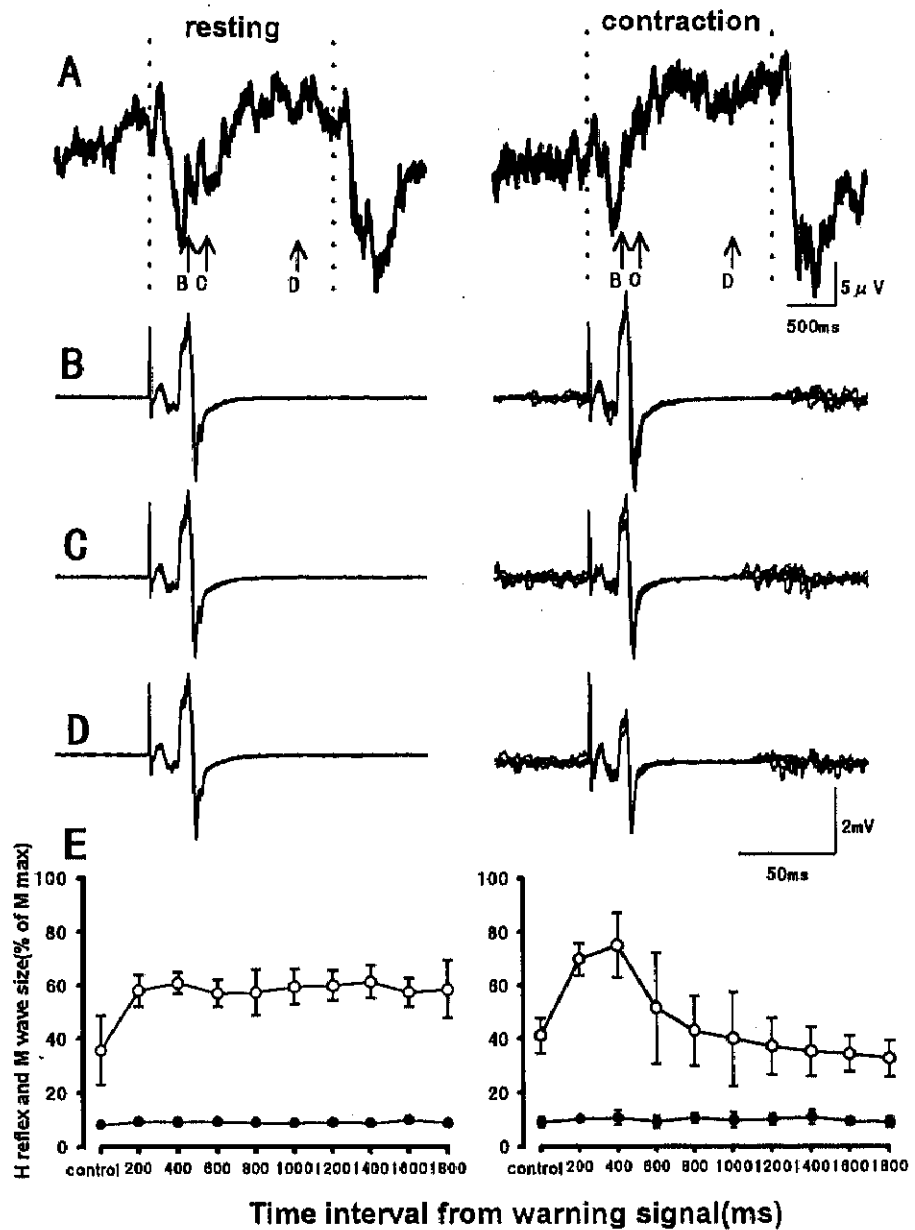


図3. 一人の被験者における CNV と H 反射の記録例。図の左と右はそれぞれ安静と収縮状況に相当する。A: CNV の例。点線は WS と RS を示す。B~D: FCR H 反射の記録例であり、これらは A の図の矢印で示したような時点から導出された。E: PP における H 反射と M 波振幅の時間経過を、標準偏差とともに示した。縦軸: Mmax のパーセントで示した H 反射と M 波の大きさ。横軸: WS からの時間経過。

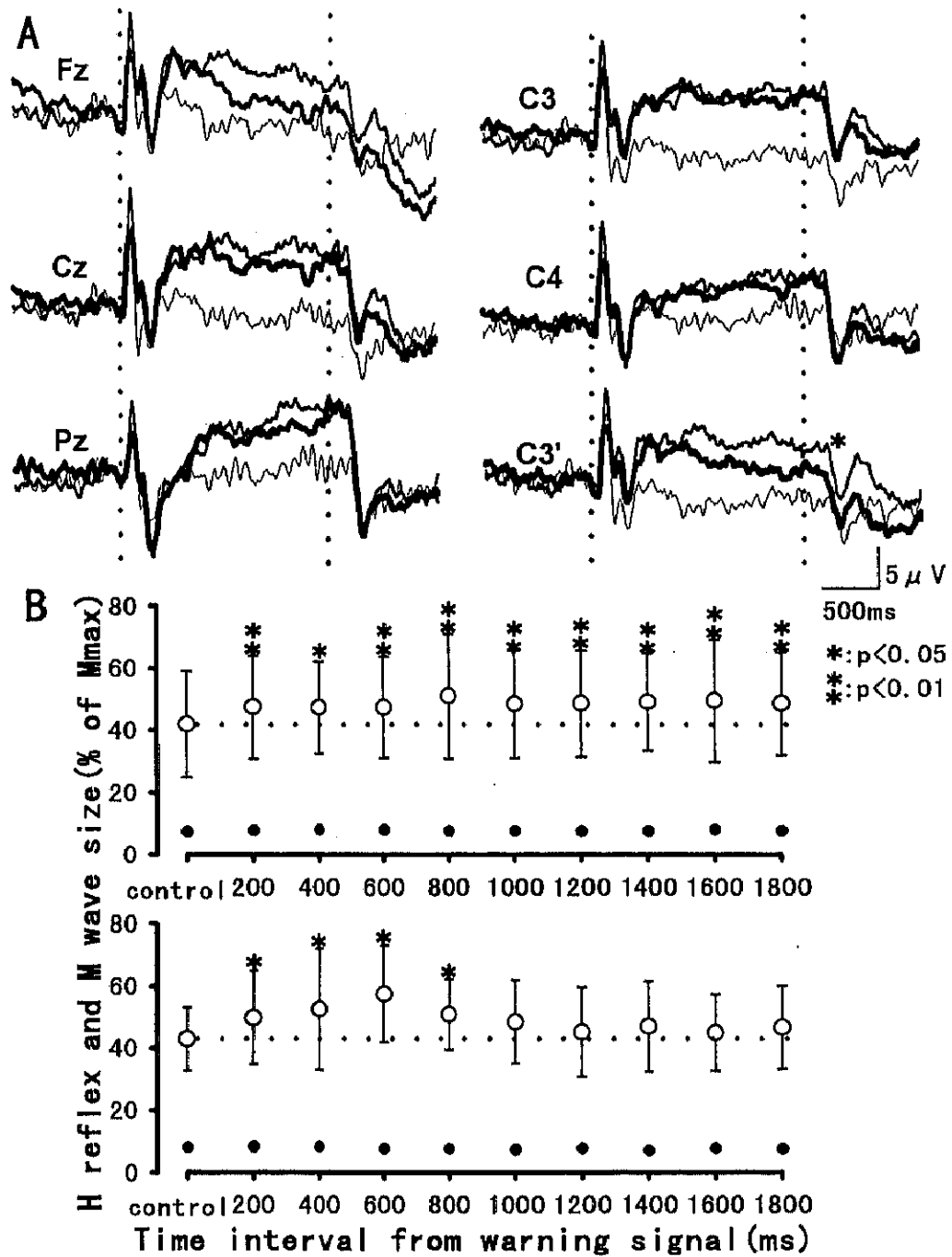


図4. 全被験者による CNV の総平均と FCR H 反射をまとめたもの。A: 図に示したような導出部位から得られた CNV の結果。点線は WS と RS を示す。線の太さの違いは、細い順にコントロール、安静、収縮状況を示す。B: H 反射と M 波振幅の大きさの時間経過。白丸と黒丸はそれぞれ H 反射と M 波を標準偏差とともに示した。



### 個々の被験者について

個々の被験者の CNV と H 反射の系時的变化に注目すれば、両指標の関係における詳細な検討が可能となる。

図 5 は個々の被験者の CNV と H 反射の変化パターンを、H 反射の変化に基づいて分類したものである。図 5A は H 反射振幅の経時的变化において収縮状況が安静状況に比して減少傾向を示す場合 (n=4)、図 5B はコントロールレベルに対して両状況ともに同程度の増大傾向を示す場合 (n=4)、図 5C は両状況とも変化を示さない場合 (n=2) である。図 5D は一名の被験者で、収縮状況と安静状況の振幅は準備期 (PP) 後半に同様だが、コントロールレベルは安静状況が収縮状況より大きい場合である。それぞれの場合について CNV を再び加算平均したところ図 5 の右側のような CNV が得られた。

図 5A, C の場合、CNV 振幅に状況間の違いは見られなかった。しかし、図 5B, D の場合、収縮状況の CNV 振幅は安静状況より減少する傾向があった。これらの結果は、個々の被験者における CNV と H 反射の経時的变化のパターンが、全被験者をまとめた結果と必ずしも同様でない可能性を示している。

### 筋電図反応時間 (EMG RT)

筋電図反応時間 (EMG RT) に関して、その差は若干ではあるものの、ほぼ全被験者で収縮状況が安静状況よりも短縮し、統計的にも有意であった ( $t=2.82$ ,  $P<0.05$ ) (図 6)。

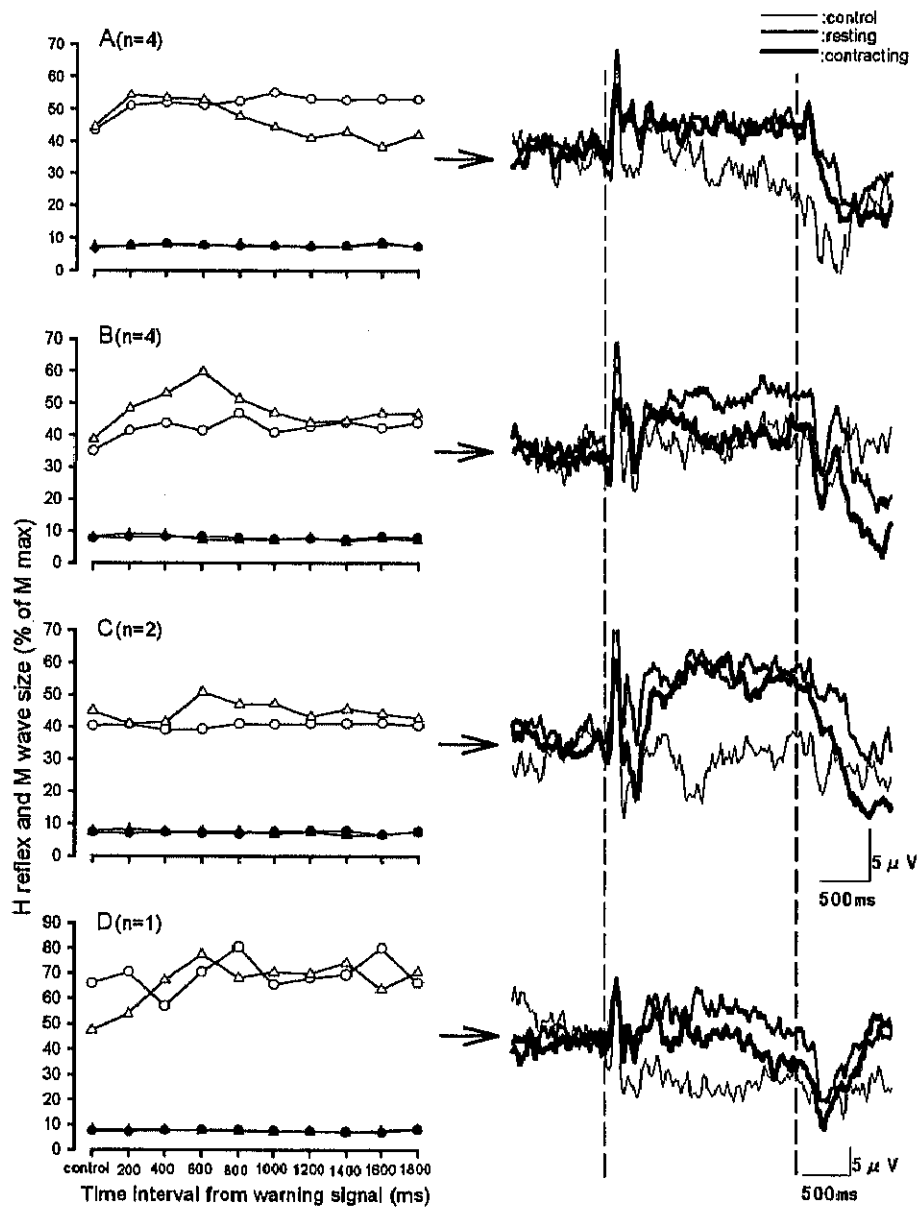


図5. CNVとH反射の個々の被験者の傾向。A~D: PP後半の安静状況と収縮状況におけるH反射の変容パターンが類似する被験者の、CNVとH反射をまとめたもの。丸と三角はそれぞれ安静状況と収縮状況を示す。

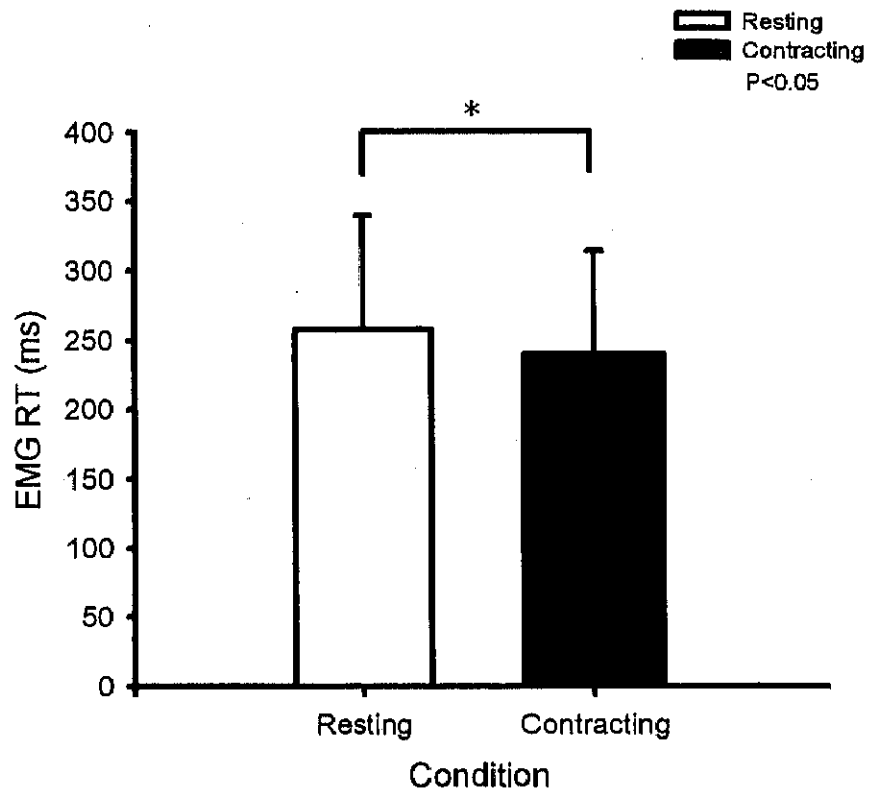


図6. EMG RT。白と黒の棒はそれぞれ安静状況と収縮状況における EMG RT を標準偏差とともに示している。

#### 4. 考察

全被験者をまとめた結果（図4）では、CNV後期成分は安静状況よりも収縮状況において減少した。また、収縮状況におけるH反射振幅の経時的変化は安静状況とは異なり、準備期（PP）後半にコントロールレベルまで減少した。さらに、筋電図反応時間（EMG RT）は安静状況よりも収縮状況において短縮した。

Papakostopolos and Cooper, 1973はCNV出現中にH反射振幅が経時的な増大を示す結果を得た。彼らは、その増大のピークがCNV振幅のそれよりも速いため、両者には因果関係がないと考えた。後に彼らは、警告信号（WS）と反応信号（RS）の間ボタンを押し続け、反応信号（RS）でボタン押しをやめる課題を設定し、CNVとH反射の経時的変化を調べた（Papakostopoulos and Cooper, 1978）。その結果、CNV振幅はボタン押しがない状況（本実験の安静条件に相当）よりも減少し、H反射は増大する結果を得た。彼らは両指標の変化の方向性が異なることと、上記の実験結果から両指標には因果関係がないことを強調した。本実験の全被験者をまとめた結果では、収縮状況のCNV後期成分は安静状況より減少し、収縮状況のH反射の系時的な変化は安静状況とは異なり、コントロールレベルから変化しなかった。すなわち、両指標の変化の方向性は同様であり、因果関係の存在を示唆している。しかしながら、図5に示した個々の被験者に関する結果では変化の方向性は必ずしも一致しなかった。したがって、本実験のCNVとH反射の系時的変化からも、両者に因果関係がない可能性が考えられた。

反応時間（RT）とCNV後期成分の関係については、多くの報告があるが一致した見解は得られていない（荻野ら, 1995）。しかし

ながら、少なくとも反応時間 (RT) の短縮時に CNV 後期成分の減少を観察した報告はなく、本研究の結果は CNV 後期成分と反応時間 (RT) の関係についての、重要な知見と考えられる。

安静状況よりも持続的筋収縮状況下において反応時間 (RT) が短縮するとした報告の中で、Schmidt and Stull, 1970 は筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮には、持続的筋収縮にともなう末梢からのフィードバック入力による、覚醒水準の上昇が関与する可能性を指摘した。しかし、Tecce et al, 1976 は CNV 後期成分は注意と正の相関を有し、覚醒と逆 U 字の相関を有すると報告した。もし、持続的筋収縮の影響によって覚醒水準が上昇し、筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮に影響したなら、CNV 振幅は安静状況より増大することが予想されるが、本実験の結果は逆であった。本実験の結果から、実験状況の違いによっては CNV 後期成分が減少して筋電図反応時間 (EMG RT) が短縮する状況が存在することが示された。持続的筋収縮状況下での筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮に関係する要因に関しては他にも仮説が提示されており、研究課題 II において再び考察を加える。CNV 後期成分の減少に関しては研究課題 II ~ IV までの異なる状況での結果を含めながら検討を加える。

## 5. 要約

研究課題 I では準備期 (PP) に得られる CNV と FCR から誘発される H 反射振幅の経時的変化、及び筋電図反応時間 (EMG RT) が、持続的筋収縮にどのように影響されるかを調べ、以下のことが明らかとなった。

1. 全被験者をまとめた結果について、C3'から得られた CNV 後期成分(反応信号前 500ms)の平均振幅は安静状況よりも収縮状況において有意に減少した。また、準備期 (PP) 後半の H 反射振幅は、安静状況ではコントロールレベルから増大したが、収縮状況では変化しなかった。
2. 準備期 (PP) における持続的筋収縮が CNV と H 反射に及ぼす影響は、個々の被験者については必ずしも同様でなかった。
3. 筋電図反応時間 (EMG RT) は安静状況よりも収縮状況において短縮した。

これらの結果は、脊髄とより上位の中樞の反応信号 (RS) に対する準備的な過程が、持続的筋収縮に伴う様々な生理学的変化に対し、柔軟に応答する可能性を示すものと考えられた。

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。

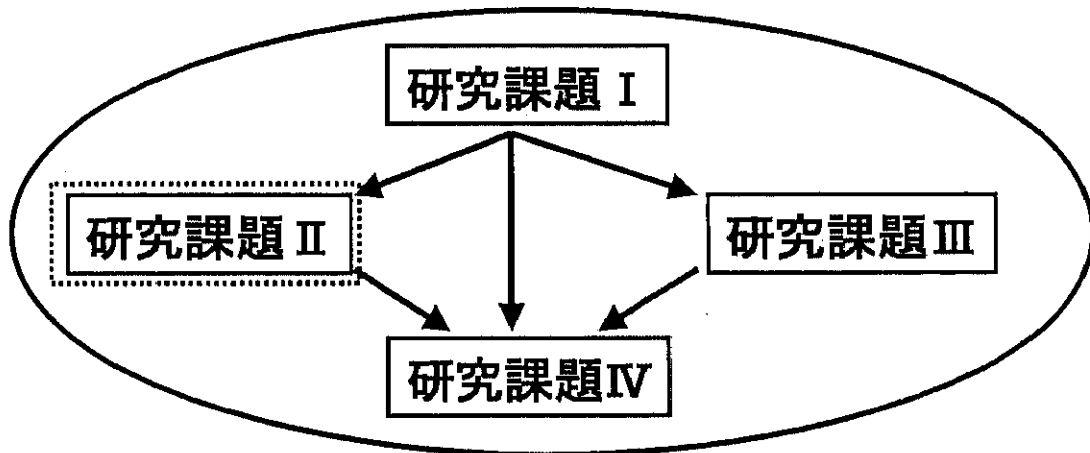


図 7 本研究における課題のフローチャート