

## V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—反応動作開始前の筋収縮レベルの変化—

### 1. 目的

研究課題 I において得られた CNV 後期成分と H 反射の系時期的変化は、全被験者をまとめた結果においては変化の方向性が同様だったが、個々の被験者では異なる傾向が得られた。両指標の関係について詳細に調べるため、研究課題 II では反応動作開始前の持続的筋収縮の大きさを 2 段階に設定し、両指標がどのように影響されるかを調べた。また、筋電図反応時間 (EMG RT) についても検討を加えた。

### 2. 方法

#### *被験者と持続的筋収縮*

被験者は健常成人 10 名 (男子 5 名, 女子 5 名) であった。実験は被験者に対し事前に実験の主旨と内容を説明し同意を得た上で行なわれた。被験者の状況、脳波と眼電図及び筋電図の記録条件、H 反射の導出条件は研究課題 I と同様だった。反応動作は目標の力発揮レベルを設けないことを除いて研究課題 I と同様であった。

被験者が反応動作の開始前に維持する持続的筋収縮の大きさは実験開始前に決定された。すなわち、1) 比較的楽に維持できる手関節の屈曲による力発揮、及び 2) 維持することができる程度の 1) よりも大きな力発揮のレベルが決定された。本実験では 1) を軽度の収縮、2) を中程度の収縮と呼ぶ。これらの筋電図は全波整流後

に積分機を介して平滑化され、ストレージ機能の装着されたオシロスコープにスイープ速度 0.5ms でモニターされた。また、オシロスコープ上には反応信号 (RS) 用のビームと持続的筋収縮レベルを示すラインがマーキングされ、被験者が一定の筋電図を発揮できるようにした (図 9A)。

### 実験課題

本実験の試行条件として次の 3 つが設定された (図 8)。1) のテスト試行において、被験者は験者に安静、軽度及び中程度の収縮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。験者は被験者が安定した状態になったことを確認してからブザー音による警告信号 (WS) とその 2s 後の反応信号 (RS) を与えた。2) のコントロール試行はコントロール状況の脳波とコントロール状況における H 反射を得るための試行だった。この試行では準備期 (PP) に安静、軽度、中程度の収縮のいずれかが維持されるが、被験者は反応信号 (RS) に対して反応動作を行わないように、あらかじめ教示された。3) のキャッチ試行は被験者の反応信号 (RS) への予測を避けるための試行だった。試行の教示はテスト条件と同様に与えられるが、反応信号 (RS) が与えられなかった。本実験では、これら 3 つの試行条件及び各条件に含まれるそれぞれの種類の試行がランダムに与えられた。

## Condition of PP

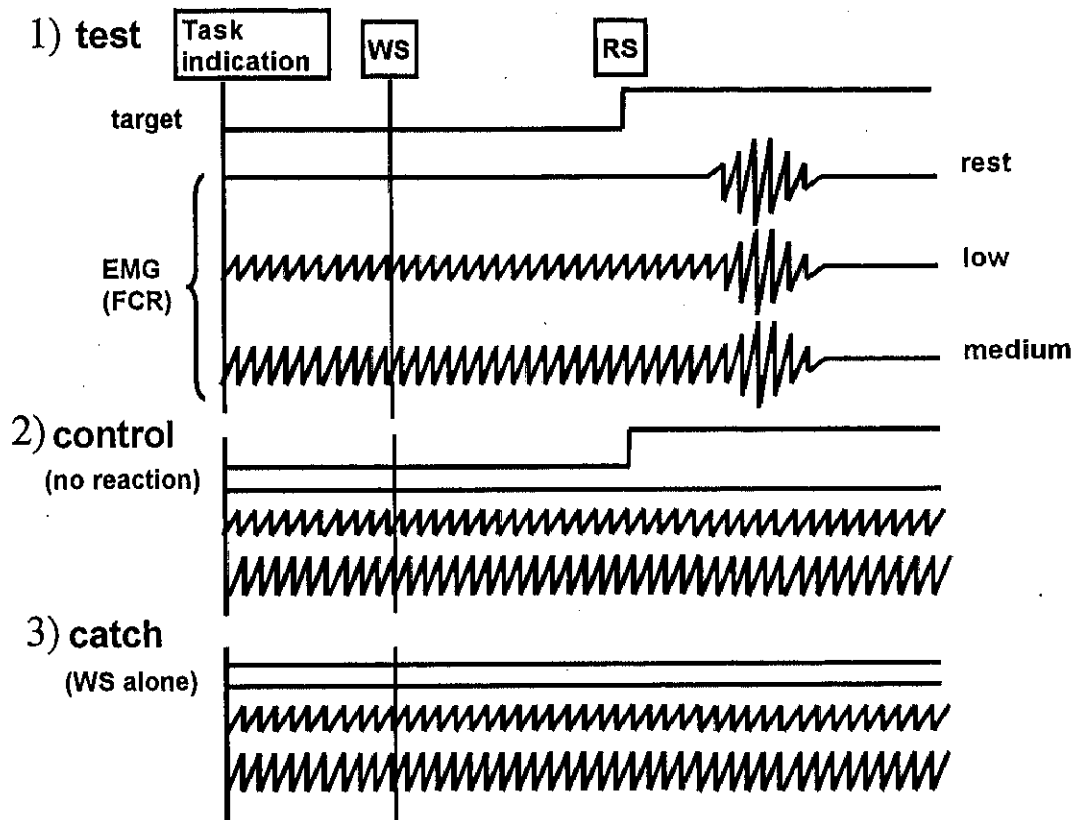


図8. 実験パラダイムの模式図。上段から下段にかけて、1)テスト、2)コントロール、3)キャッチ試行が示されている。それぞれの試行には、安静、軽度、中程度の収縮、の3つの状況がある。試行の開始前（"task indication"の時点）に、験者は被験者にどの状況を行なうかを教示する。1)に関しては、行われるべき状況が教示されてから1~3秒後に、被験者にWSが与えられ、その2s後のRSに集中する。被験者は、RSに反応して、できるだけ素早い手関節の等尺性屈曲運動を行なう。

### 解析と統計

H 反射導出時の背景筋電図 (Back ground EMG) は, H 反射導出時点から 50ms 前までの筋電図を全波整流し, その平均値として算出した。また, 実験に先立ち, 約 3s 間の最大屈曲力発揮に伴う筋電図が記録された。そして, 任意の 50ms 区間の筋電図を全波整流して平均振幅を求め, 10 区間の平均がその被験者の基準となる筋電図 (基準 EMG) として採用された。得られた背景筋電図の大きさはこの基準 EMG のパーセントで示された。

CNV は各条件で約 15 個の脳波を加算することによって得られた。また, H 反射は準備期 (PP) の 3 つの区間 (図 11B 中段参照) からランダムに導出され, それぞれの区間から得られた約 8 個の振幅の平均値が解析の対象とされた。

筋電図反応時間 (EMG RT) は, コンピュータの画面上に提示された原波形, 全波整流波形及びその累積加算波形の 3 つの小画面によって, 一過性に筋電図が増大する時点として視覚的に判定された。本実験では, 動作前不応期はほとんどの試行において観察されなかったが, 筋電図の増大直前に明らかに不応期が認められる試行は除外された。

用いられた統計検定は, 2 要因の分散分析, 1 要因の分散分析及び多重比較であり, 有意水準は 5%未満とした。

### 3. 結果

*背景筋電図 (Back ground EMG) と筋電図反応時間 (EMG RT)*  
背景筋電図は各収縮状況において準備期 (PP) の 3 つの区間 (図

11B 中段参照) に差は見られなかった。これに対し、各区間の背景筋電図は、全ての被験者において中程度の収縮状況の方が大きかった(軽度:  $7.9 \pm 5.6\%$ , 中程度:  $16.0 \pm 6.3\%$ ) (図 9B)。

図 10 は状況の違いによる筋電図反応時間 (EMG RT) の変化を全被験者について示した。軽度の収縮状況の筋電図反応時間

(EMG RT) ( $267 \pm 48\text{ms}$ ) が安静状況 ( $295 \pm 57\text{ms}$ ) より短縮傾向にある被験者は、10 人中 9 人であった。また、中程度の収縮状況の筋電図反応時間 (EMG RT) が安静状況より短縮傾向にある被験者は 6 人であった。さらに、中程度の収縮状況 ( $279 \pm 60\text{ms}$ ) の筋電図反応時間 (EMG RT) が軽度の収縮状況よりも短縮傾向にある被験者は 3 人であった。

#### 随伴性陰性変動 (CNV) と H 反射の全被験者の結果

図 11 は CNV と H 反射の経時的変化について一人の被験者の例を示している。CNV と H 反射のそれぞれのトレースではコントロール試行とテスト試行が一对として提示されている。定量的な解析に際しては、後者から前者を減じたものを用いた。すなわち、テスト試行からコントロール試行を減じることにより、それぞれの状況において準備的な過程のみに関わる成分が抽出され得ると考えられた。

このようにして得られた CNV と H 反射の変化を全被験者についてまとめたものが図 12 である。CNV 後期成分 (反応信号 (RS) 前  $500\text{ms}$  の平均振幅) について、2 要因の分散分析を行った結果、状況と導出部位に関する交互作用が得られた ( $F=3.35$ ,  $P<0.01$ ) ので、各導出部位ごとに一要因の分散分析を実施した。その結果、Fz において主効果が得られた ( $F(2,27)=3.992$ ,  $P<0.05$ )。その後

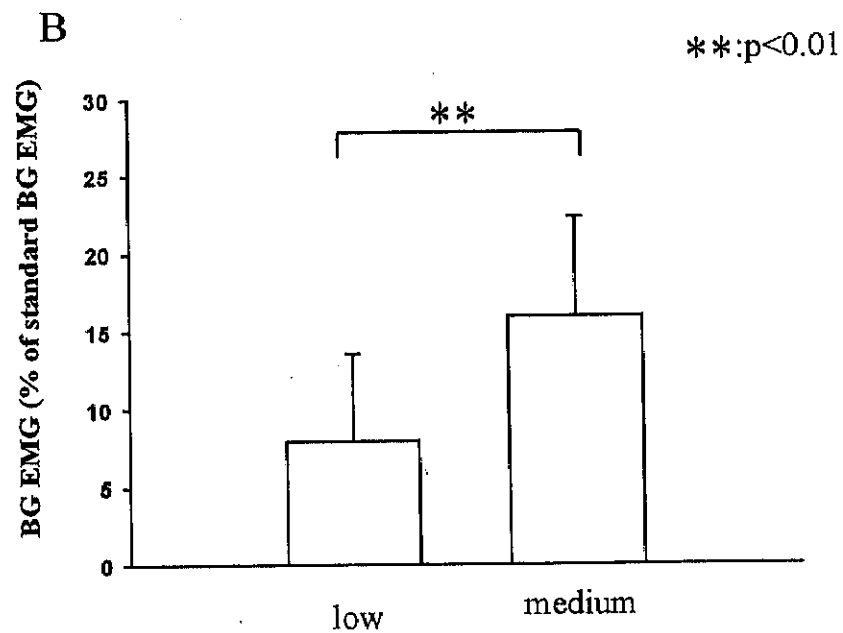
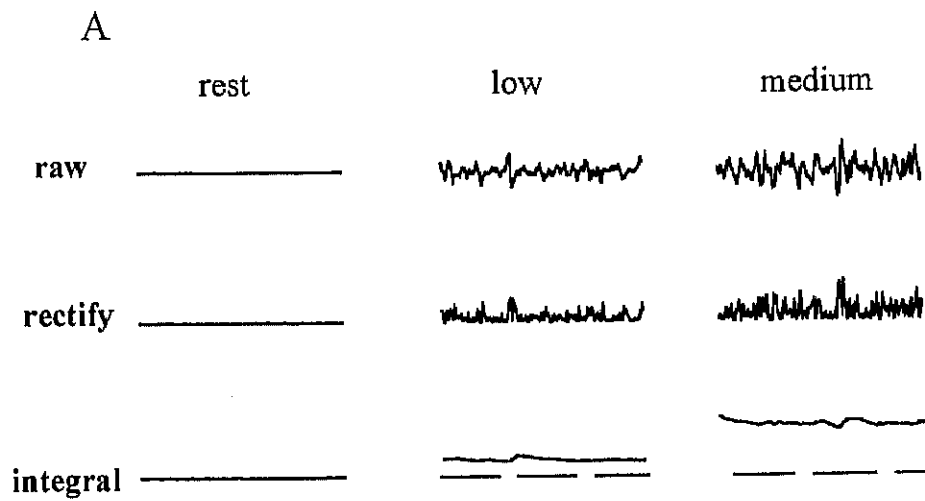


図9. 運動開始前の持続収縮に伴う FCR EMG。A, FCR EMG の波形。左から順に安静, 軽度, 中程度の収縮状況が示されている。上段, 中段, 下段のトレースはそれぞれ, EMG の原波形, 全波整流波形, 積分された EMG を示している。B, 軽度 (左の棒) と中程度 (右の棒) の収縮状況における BG EMG 量。縦軸は BG EMG 量を基準 EMG のパーセントとして示している。

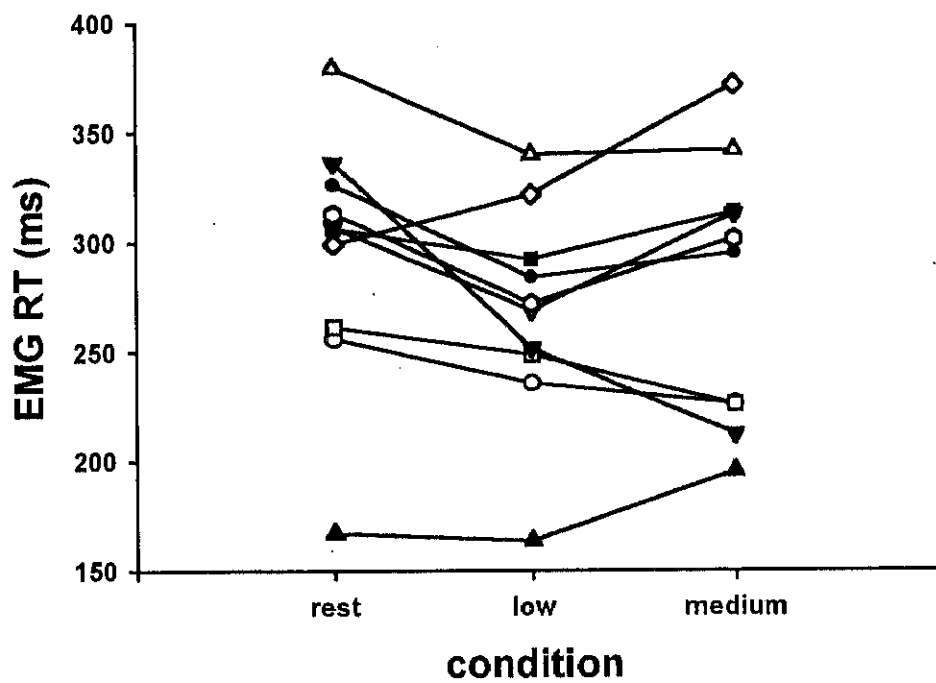


図10. 全被験者のEMG RT。左から順に、安静、軽度、中程度の収縮状況が示されている。それぞれのシンボルは個々の被験者を意味する。

の多重比較においては、安静状況よりも中程度の収縮状況が有意に増大した ( $P < 0.05$ )。同様の傾向は C4' においても観察された。また、軽度の収縮状況の CNV 後期成分は Cz と Pz において安静状況よりも減少傾向にあった (図 12A)。

H 反射の経時的な変化に対しては、どの区間でもコントロールレベルからの有意な変化は得られなかった。しかしながら、準備期 (PP) の後半においては、安静状況では他の区間に比べてばらつきが大きく (SD, early:  $\pm 2.9$ , middle:  $\pm 2.4$ , late:  $\pm 4.6$ )、軽度と中程度の収縮状況のばらつきは安静状況よりも少なく (SD, low\_late:  $\pm 3.4$ , medium\_late:  $\pm 3.2$ )、振幅はコントロールレベルよりも減少する傾向があった (図 12B)。

#### *随伴性陰性変動(CNV)とH反射の個々の被験者における傾向*

CNV 後期成分と準備期 (PP) 後半における H 反射振幅との対応関係をさらに詳細に検討することを図 13 において試みた。図 13 は Fz における CNV 後期成分が中程度の収縮条件において顕著な増大を示す被験者 6 人とそれ以外の 4 人の被験者について、H 反射振幅との対応を調べたものである。前者の被験者群において、H 反射振幅は軽度と中程度の収縮状況には、ほぼ同様にコントロールレベルから減少したが (図 13B)、CNV 後期成分は安静及び軽度の収縮状況よりも中程度の収縮状況において振幅が大きくなる傾向があった (図 13A)。



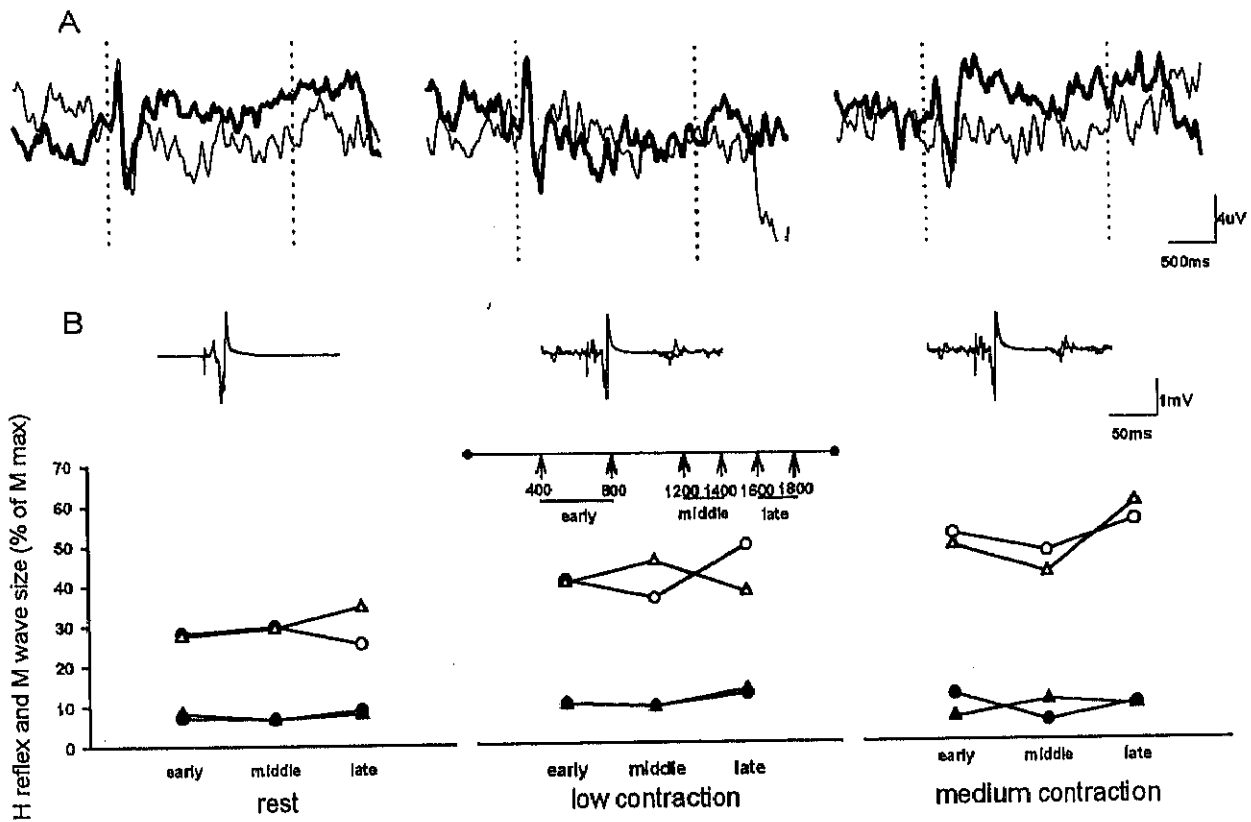


図 1 1. 一人の被験者における CNV (A) と H 反射 (B)。左から順に安静、軽度、中程度の収縮状況が示されている。A, 左と右の点線は WS と RS を示している。薄線と太線はそれぞれコントロールとテスト試行である。B, 上段は WS と RS の間に誘発された H 反射の波形の重ね書き。中段のトレースには H 反射が誘発された時点が示され、その M 波と H 反射の peak-to-peak 振幅が下段のトレースに Mmax のパーセントでプロットされた。白と黒のシンボルはそれぞれ H 反射と M 波を示している (O : コントロール, Δ : テスト試行)。

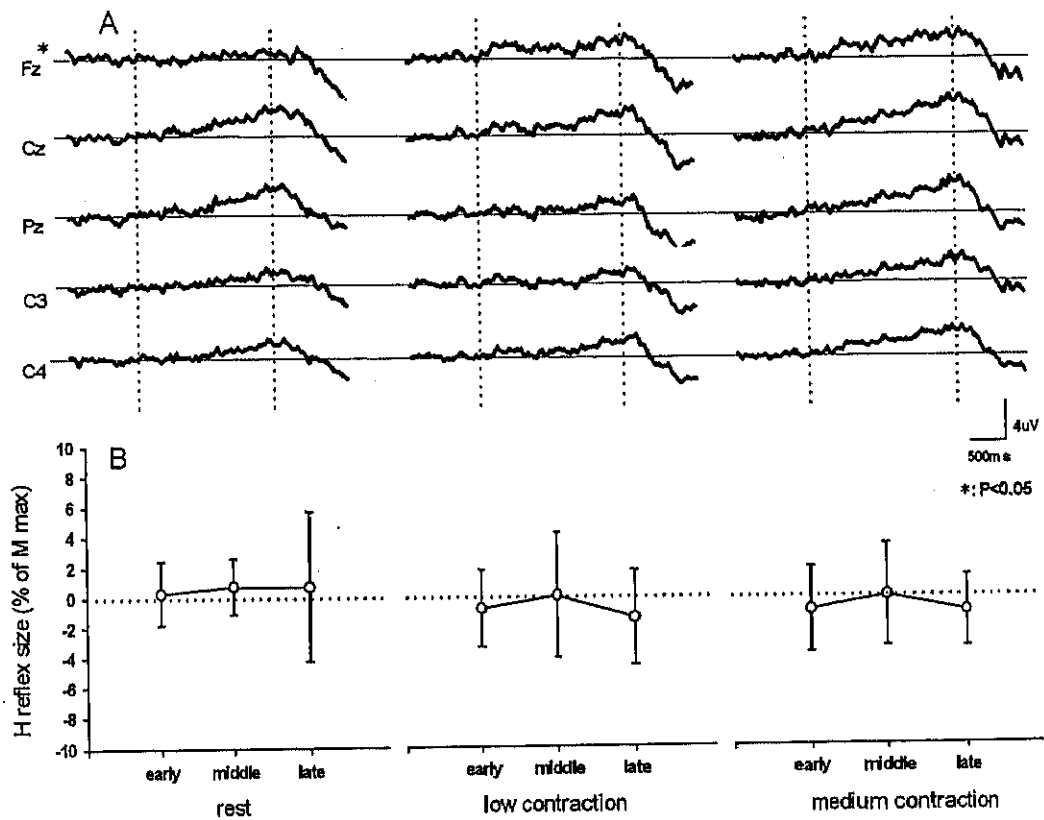


図12. 全被験者の CNV (A)と H 反射の時間経過 (B)。左から順に安静, 軽度, 中程度の収縮状況が示されている。A, それぞれの被験者の, テストからコントロール試行を減じた CNV 波形が, 加算された。左と右の点線はそれぞれ, WS と RS を示している。B, テスト試行からコントロール試行を減じた H 反射 peak-to-peak 振幅がプールされ, 平均値が標準偏差とともにプロットされた。

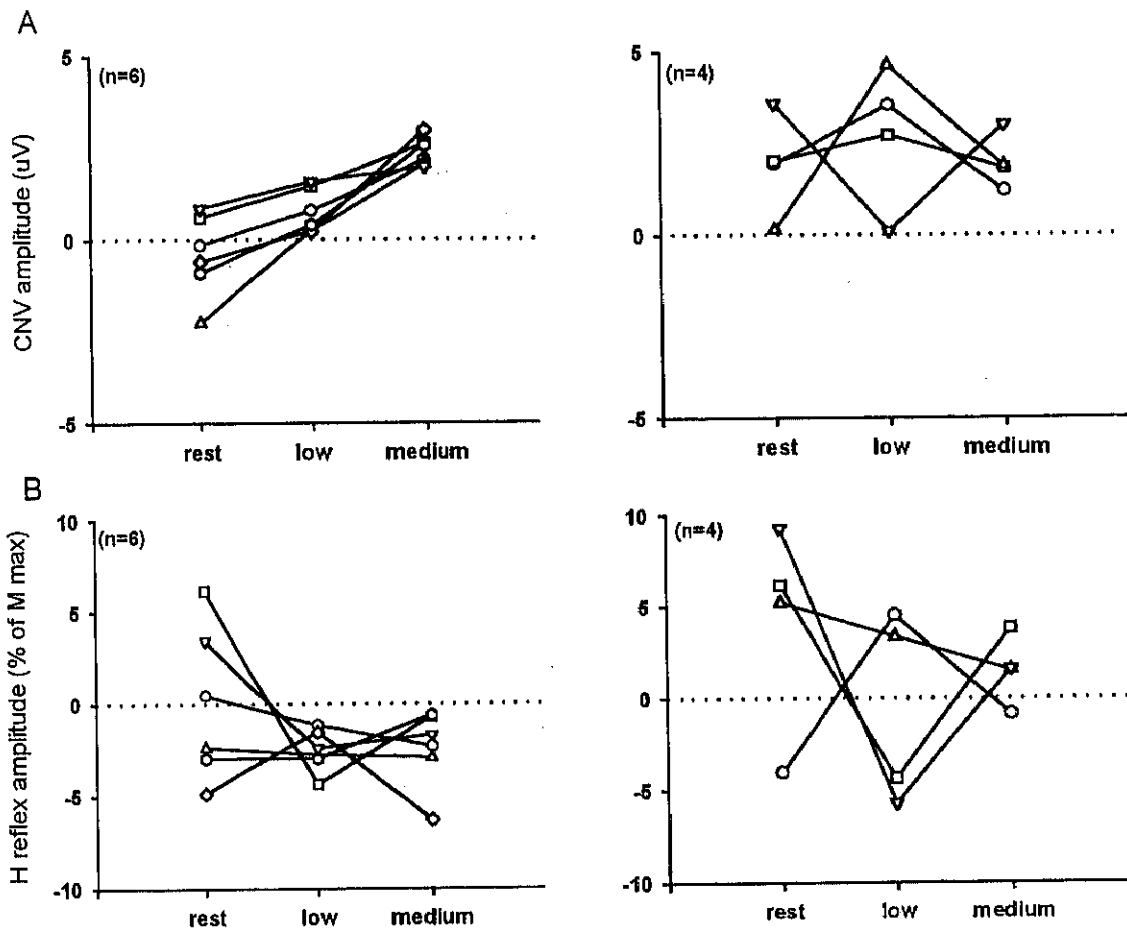


図13. CNV (A) と H 反射 (B) の分類。Fz からの CNV 振幅 (WS 後 1500~2000ms : A の上段のトレース) と late period (図 3 の中段) に誘発された H 反射振幅が対象とされた (図 5 に示されたような引き算データから計測された)。左側は, CNV 振幅が収縮状況に応じて直線的に増大する傾向を有する, 6 人の被験者における, 両パラメータの変化を示している。右はその他の被験者の結果を示している。

#### 4. 考察

本実験の持続的筋収縮における大きさの変化は、CNV 後期成分と準備期 (PP) 後半の H 反射振幅に異なった影響を与えた。これは、研究課題 I で得られた被験者全体をまとめた結果と異なり、個々の被験者の傾向を支持する結果と考えられる。すなわち、研究課題 I の全被験者の結果では、CNV 後期成分と H 反射の変化の方向は同様だったが、個々の被験者では異なる傾向を示した。本実験の結果と研究課題 I の個々の被験者の傾向から、CNV 後期成分と H 反射の経時的変化の間に単純な因果関係がある可能性は少ないと考えられた。

では、このような H 反射と CNV 後期成分における個別の変化は何を意味するのだろうか？運動課題と用いられる指標は異なるものの、Stains et al, 1997 は次のような実験を行なっている。彼らは、片側の足関節の受動的な屈曲、伸展運動を、視覚的なフィードバック無しに、対側肢によって追跡する課題（追跡課題）を設定した。そして、受動運動側のヒラメ筋から H 反射を、頭皮上から体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential : SEP) を記録した。その結果、SEP 早期成分の振幅は単純な受動的運動課題時よりも追跡課題において増大するが、H 反射振幅は両状況で同様に減少する結果を得た。彼らはこの結果を、追跡課題時に脊髄レベルでは求心性入力の一般的な制限 (gating) が、より上位のレベルでは課題の要求に応じた高度な求心性入力の処理が行われていると推察した。本実験の半数以上の被験者において、H 反射振幅は2つの収縮状況下で同様の減少傾向にあり、CNV 後期成分は軽度より中程度の収縮状況において増大する傾向があった。この結果の解釈の1つとして、上記の報告と類似した、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における役割の違いを反映することが考えられた。

本実験において CNV 後期成分が持続的な筋収縮の大きさに依存して直線的な増大傾向にあった部位は Fz と C4'であった。これに対し、他の部位では安静と軽度の収縮状況は同様かもしくは減少傾向 (特に Cz と Pz) にあった (図 1 2 A 参照)。近年の報告では、CNV 後期成分を構成する要素として、反応信号 (RS) に対する予測や期待を反映する成分 (stimulus preceding negativity : SPN) と運動の準備を反映する成分 (readiness potential:RP) の 2 つが考えられている (Boxtel et al,1993:Boxtel and Brunia,1994)。また、これらの成分の頭皮上分布は、前者が前頭部と右側の中心部優位で、後者は中心部優位であった。したがって、本実験の前頭部と中心部における異なる変化の傾向は、持続的筋収縮が、運動の準備とは直接的に関係しない成分と、運動の準備に関係する成分とに、それぞれ異なった影響を与えた結果と考えられた。

Schmidt and Stull,1970 は、筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮は持続収縮の大きさに依存せず、比較的軽度の場合に最も短縮することを示した。彼らは、この結果から彼ら自身が設定した仮説を否定した。すなわち、持続的な筋収縮を反応動作プログラムの部分的な放出と見なし、反応動作プログラムの複雑さが減少して RT が短縮するという考えであった。本研究の結果も、筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮傾向は軽度の収縮状況に顕著であり、中程度の収縮状況における筋電図反応時間 (EMG RT) の安静及び軽度の収縮状況との違いは上記の仮説では説明されないと考えられた。

Schmidt,1991 は 2 つの異なる情報処理課題が実行されると、両方の課題が乱されるが、いずれか一方の過程が自動的に行われれば他方の処理課題が乱されない可能性を指摘している。本実験の持続的筋収縮状況下では収縮の維持と反応信号 (RS) に対する準備的な過程の形成の両者が並列して進行すると考えられる。また、中程度の収縮状況の筋電図反応時間 (EMG RT) は、軽度の収縮状況よりも 7 人の被験者において延長傾向にあった。このことは、中程度の収縮状況では、軽度の収縮状況よりも収縮の維持が自動的に行われていなかった可能性を考えさせる。また、意識的な課題の処理に前頭連合野が関係する可能性が、サルの学習過程における大脳皮質活動の記録から明らかにされ (Sasaki and Gemba,1982)、本実験の中程度の収縮状況における CNV 後期成分の増大が前頭部で得られたことと対応し得る。しかしながら安静状況では、反応信号 (RS) までに処理される課題は軽度及び中程度の収縮状況より少なく、最も短縮することが予想されるが、本実験では軽度の収縮状況の筋電図反応時間 (EMG RT) が最も短い傾向にあった。

前段までに、筋電図反応時間 (EMG RT) の変化を説明するために、持続的筋収縮の自動化仮説と動作プログラムにおける部分的放出仮説を挙げたが、全ての状況を説明することはできなかった。しかし、軽度の収縮では持続的筋収縮が自動的に行われ、これに反応動作プログラムの部分的な放出が加われば、安静よりも軽度の収縮状況において筋電図反応時間 (EMG RT) が短縮する傾向を説明できる可能性がある。また、中程度の収縮状況では、反応動作プログラムの複雑さが減少しても、筋収縮の維持が意識的に行われ、反応動作プログラムの機能を乱すように働けば、軽

度より中程度の収縮状況における筋電図反応時間(EMG RT)の延長傾向を説明できる可能性がある。

準備期 (PP) の H 反射を調べた報告のほとんどでは下肢の伸筋 (ヒラメ筋) が対象とされてきた。しかしながら, 得られた結果を上肢に対して一般化することは, 両者の機能的及び解剖学的な違いのため, 困難と思われる。すなわち, ヒラメ筋は抗重力筋として姿勢の維持に大きく関与し, それを支配する運動細胞も比較的小さなものが多く, Ia 線維からの入力に対しての感度が良い。これに対し, 上肢の筋は姿勢調節にはあまり関与せず, 動的で目的的な運動に関与することが多い (Hasbrouq et al,1997)。橈側手根屈筋 (FCR) は上肢の筋の中では, 安静状況において比較的容易に H 反射が誘発されている (Burke et al,1989 : 研究課題 I 参照)。本実験の 10 人の被験者に関しても, M 波最大振幅の 30% 以上の H 反射が FCR から記録された (図 11B 参照)。本実験で得られた安静状況の H 反射の経時的変化は, 基本的には下肢で得られた結果と同様である。すなわち, 安静状況の準備期 (PP) 後半の H 反射振幅には, 大きなばらつきが観察された (図 12B 及び図 13B 参照)。この傾向は既に Komiyama and Tanaka,1990 がヒラメ筋から得られる H 反射を用いて示したように, 反応信号 (RS) に対する被験者個々の構え (set) の違いを反映するものと考えられる。

## 5. 要約

研究課題 II では, 反応動作開始前に課された持続的筋収縮の大きさにおける違いが準備期 (PP) に得られる CNV と H 反射及び

筋電図反応時間 (EMG RT) にどのような影響を与えるかを調べ、次のような結果が得られた。

1. Fz における CNV 後期成分は安静状況よりも中程度の収縮状況において増大した。
2. H 反射振幅は安静状況ではコントロールとほぼ同様の大きさでばらつきが大きかったが、軽度と中程度の収縮状況ではコントロールからほぼ同様の減少傾向があり、ばらつきは安静状況よりも小さい傾向にあった。
3. 筋電図反応時間 (EMG RT) は軽度の収縮状況ではほぼ全被験者において安静状況より短縮傾向にあったが (10 人中 9 人)、中程度の収縮状況では安静状況より短縮する被験者は少なく (10 人中 6 人)、多くの被験者は軽度の収縮状況より延長傾向にあった (10 人中 7 人)。

以上の結果から、脊髄と脊髄上の中樞神経系の準備的な過程はそれぞれ個別の役割を担い、持続的筋収縮の大きさの変化は脊髄上の中樞に異なる影響を与えることが考えられた。



**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。

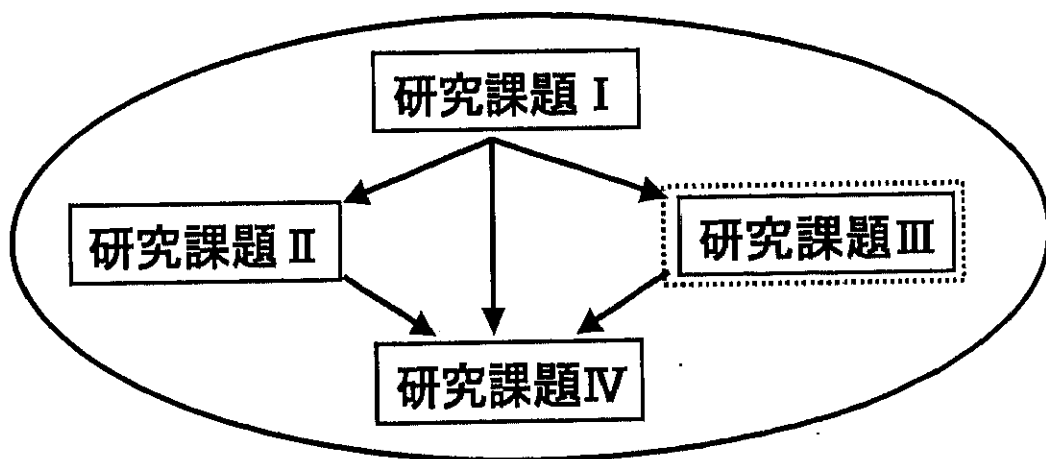


図 14 本研究における課題のフローチャート