

## II. 文献研究

### 1. 随意運動開始前に記録される脳電位

#### (1) 随伴性陰性変動を用いた研究

頭皮上から得られる脳波を警告信号 (WS) の提示時点を基準に加算平均することにより、警告信号 (WS) と反応信号 (RS) の間 (preparatory period : PP) には随伴性陰性変動 (Contingent Negative Variation : CNV) と呼ばれる脳電位が出現する。CNV は Walter, 1964 によって発見されて以来、それがヒトの複雑な情報処理メカニズムの解明に役立つものとの期待に基づき (Tecce et al, 1976), 反応信号 (RS) に対する運動の構え, 準備, 予測, 注意などの生理及び心理的要因との関連について多くの研究が成されてきた。

CNV は準備期 (PP) を少なくとも 3 秒以上とった場合、警告信号 (WS) 後 1 秒以内の前期成分と反応信号 (RS) 前 1 秒以内の後期成分とに分けられる (Rohrbaugh et al, 1978 : 山本ら, 1986)。準備期 (PP) が短い場合、同一の導出部位から二つの成分を判別することは困難となる。しかしながら、CNV の頭皮上分布を観察すると、前頭部では前期成分が優位であり、頭頂部では後期成分が優位に出現するので、CNV が少なくとも二つの成分から構成されていることは明らかである。一般的に、前期成分は警告信号 (WS) の特徴によって変化する定位反応 (Orienting response) と考えられ (Loveless and Sanford, 1974 : Weerts and Lang, 1973 : 池田と柴崎, 1995), 後期成分は反応信号 (RS) に対する課題が動作の場合、運動の準備状態を反映すると考えられてきた (Gaillard

et al,1980 : Rohrbaugh and Gaillard,1983)。

これまでの CNV を用いた研究の対象は、1)形状、構成成分、2) 時間的空間的特徴、3)運動過程や認知過程との関連、4)性格との関連、5)加齢との関連、6)薬理作用や精神疾患との関連、等に分類される(佐久間,1991)。近年ではこれらに加えて、健常者の MEG, PET 研究、動物実験及び疾患者の研究によって、皮質及び皮質下レベルの発生源解明に関する知見が続々と報告されている。本研究の目標は随意運動に関する知見の提供を通して、体育科学へ貢献することであるので、3)に関する問題点を主として扱う。そして、必要に応じて他の問題点に関する知見を参照し、得られた結果を解釈していく。以下に CNV と随意運動に関する報告について取りあげる。

CNV 後期成分が反応信号 (RS) に対して発揮される力の大きさと関係すること (Rebert et al,1967 : Low and McSherry,1968)、速度と関係すること (Grunewald et al,1979 : Deecke et al,1980) 及び、反応時間 (RT) と関係すること (Rohrbaugh and Gaillard,1983 : Brunia,1980 : 西平ら,1983) が報告されてきた。しかしながら、反応時間 (RT) に関しては関連がないとする報告もあり、見解は一致していない(荻野ら,1995)。これらに加えて、近年、CNV 後期成分と様々な運動要素との関連性が調べられている。Bonnet らのグループは頭皮上のいくつかの部位から得られる CNV が、事前にプログラムされる運動の特徴(運動の方向や大きさ、持続時間等)をも反映する可能性を報告した(Mackay and Bonnet,1990 : Franc et al,1995)。また、この可能性を示唆する CNV の変化は選択的に、補足運動野、一次感覚運動野上から得られた。この結果は、硬膜下記録 (Hamano et al,1997)、MEG 記

録 (Elbert et al,1994 : Fenwick et al,1993 : Hultin et al,1996) を用いた最近の研究において、CNV がほぼ皮質の全領野から発生することが示されていることとあわせて考えると、CNV を構成する成分の中でも運動に関するものは中心及び前頭領域に由来する可能性を示唆している。

これまでの報告において、反応信号 (RS) に対して行われる反応動作の成績と CNV 後期成分とは正の相関を示す傾向にあった。すなわち、力が大きくなればなるほど、速度が速くなればなるほど CNV 後期成分は増大した。これに対し、CNV 後期成分の減少に対して反応動作の成績が上昇する報告は見られない。後述するが、反応時間 (RT) 及び筋電図反応時間 (EMG RT) は反応動作開始前の予備的な筋活動により短縮することが知られている

(Clarke,1968 : Schmidt and Stull,1970)。また、反応動作開始前に持続的な筋収縮を行わせて CNV を検討した報告もいくつかある。これらの報告では、CNV 後期成分が変化しないかもしくは減少することが示されている (Otto et al,1997 : Papakostopoulos and Cooper,1978 : Papakostopoulos,1980)。しかしながら、これらの報告では予備的な筋活動を生じさせる動作は持続的なボタン押しの継続であり、反応動作はボタン押しの停止であった。このため、収缩量は規定されず、反応動作の各要素との関連に関しても不明である。

## (2) 準備電位を用いた研究

運動の準備に関係する脳電位のもう一つの代表的な成分として準備電位(Readiness Potential : RP)があげられる。RP は Kornhuber and Deecke,1965 によって発見された。RP は被験者

に自発的に運動課題を遂行させ、運動の開始をトリガーとして、脳波を加算平均処理したとき、トリガー信号の1秒以上前から陰性に変動する成分として得られる。以下に、まず方法的に重要な意義を投じた報告に関して取り上げ、次に随意運動との関連について検討する。

Kutas and Donchin,1977, Shibasaki et al,1980 は自発的に行われた運動に関し、筋電図を全波整流し1試行ごとの筋電図開始時点を視覚的に判断しトリガー時点を決定した。この方法に基づいた場合、RPは早期成分の Beritschaftspotential (BP) とそれに続いてより急峻な傾斜を持つ Negative slope (Ns') に分離される。それまでの報告は筋電図の開始ではなく、力の立ち上がりやボタン押しの開始をトリガーとしていた。このことは筋電図開始から実際の運動が起こるまでの時間的なずれに関する問題点を解決しないまま加算平均が行われていたことを意味する。筋電図開始時点の正確な決定によって得られたBPとNs'それぞれの頭皮上分布は、BPが中心部優位で左右の半球に均等に分布し、Ns'は運動側と対側の中心部優位であった (Shibasaki et al,1980)。また、ヒトの皮質電位の硬膜下記録によって (Neshige et al,1988; Ikeda et al,1992) BPが両側の一次感覚運動野及び補足運動野、Ns'が運動側と対側の一次感覚運動野と両側の補足運動野から記録されることも報告された。これらのことからBPは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、Ns'は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た (Shibasaki, et al,1980 : Neshige et al,1988)。

佐々木らのグループはサルの大脳皮質の様々な領野の浅層と深層に慢性的に電極を埋め込み、準備電位の発生機序を調べた。

その結果、彼らは運動側と対側の運動前野、補足運動野、運動野、体性感覚野、及び同側の運動前野から表面陰性、深部陽性の電位を見いだした (Gemba and Sasaki,1984)。この電位は小脳外側核を刺激したときに同じ電極から記録される電位と酷似しており、連合線維及び脳梁線維などの皮質—皮質間投射線維を刺激したときの表面陽性、深部陰性の電位とは異なっていた (Sasaki et al,1981)。これらの結果から彼らは RP の発生に大脳—小脳連関が重要な役割を果たすと考えた。さらに、小脳遠心性線維の疾患者では CNV は出現しても RP が出現しないことが報告され、ヒトにおいても RP の発生に小脳が重要な役割を果たすことが確かめられている (Ikeda et al,1994)。

RP を用いた研究の対象はその性質上 CNV と類似する点が多い。すなわち、1)注意、構え、動機づけなどの心理学的要因との関連、2)行われる運動の各要素 (運動の速度、力の量) との関連 (正木,1998)、に加えて近年の、3)頭皮上分布 (健常成人の MEG 研究を含む) や波形の特徴、4)動物実験及び疾患者を用いて皮質及び皮質下レベルの発生源に焦点を当てた研究は、運動との関連で得られた結果の解釈にとって有用な知見を多数報告している。

RP は、上述した筋電図開始時点の正確な決定による加算平均に基づき、BP と Ns' に分けて調べることが重要である。随意運動との関連においてもそれぞれの成分がどのように影響されるかは大きな問題である。運動の速度に関しては、速度が遅くなると、BP 成分に差は見られないものの、Ns' の角度が減少することが報告されている (鷲見と柳沢,1988)。また、力の大きさに関しては、発揮する力の増大に伴う RP の増大を示した報告と (Hink et al, 1983 : Kristeva et al,1990)、増大が無いとする報告 (Wilke and

Lansing,1973) があり，見解は一致していない。これらの研究では，RP が BP と Ns' に分けて検討されている報告が少ない点が問題である。また，これまでの研究ではボタン押しのような比較的単純な運動課題が多く，他の運動課題についての報告は少ない。この問題点に対して Terada et al,1995 は橈側手根伸筋による持続的な収縮を自発的に終了させる課題を用いて，運動終了時の RP について調べた。その結果彼らは，中心部優位の陰性変動に加えて前頭部に陽性の電位変動を観察し運動終了の準備と関連した皮質活動の存在を示唆した。しかしながら，この現象が真に運動の終了に関連するものであるかどうかについては，同様の状態から動作を行わせる課題についても調べる必要があると思われる。

### (3) 体性感覚誘発電位を用いた研究

体性感覚誘発電位 (somatosensory evoked potential : SEP) は末梢の体性感覚受容器あるいはそれに連なる神経線維を刺激して頭皮上から記録される脳波を加算平均することによって得られる脳電位である。その刺激方法は実験の目的によって様々であるが，電気刺激，機械的な伸展刺激，振動刺激を用いる場合などがある。電気刺激を用いる場合，被験神経としては正中神経を手首のレベルで刺激する方法が最も多く用いられている。この方法を用いて頭皮上から記録した SEP の比較的早期の成分は，求心性入力によって生じた，体性感覚皮質由来の成分であると考えられている。すなわち，Allison et al,1991 は，MEG，疾患者及び動物実験によって，SEP 成分のうち 20~40ms までの成分は体性感覚皮質に限局された成分であるとし，また，Desmedt et al,1977 は覚醒や注意は SEP の 55ms 以後の成分に影響すると報告している。

随意運動に関係した SEP 研究の対象とする大きな問題の 1 つは、様々な運動中に比較的早期の成分が減少する (gating) ことである。これまでに、持続的 (Huttunen and Homberg, 1991 : Nishihira et al, 1991, 1997a), 動的 (Araki et al, 1990 : Huttunen and Homberg, 1991 : Nishihira et al, 1991, 1996, 1997b : Staines et al, 1997a : Brooke et al, 1996), 受動的 (Huttunen and Homberg, 1991 : Nishihira et al, 1996 : Staines et al, 1997ab : Brooke et al, 1996), 運動速度の変化を加えた場合 (Staines et al, 1997b) の SEP の減少が報告されてきた。この減少の原因は、運動課題が能動的に行われる場合は、運動自身が伴う感覚受容器の放電による末梢からの影響 (centripetal effect) とより上位の中樞からの影響 (centrifugal effect) の両者であり、受動的に行われる場合は前者のみに原因があると考えられている。

これに対し、近年、次に示すような運動課題では SEP が運動中に減少しないことも報告されている。Knecht et al, 1993 と Staines et al, 1997a はいずれも、能動的あるいは受動的運動時に減少する SEP 成分が、体性感覚入力を必須とする運動課題の場合は減少しないことを報告した。これらは、各種運動時に SEP 成分が減少するとしたこれまでの見解に対し、課題の要求によってはこの減少が生じない可能性を示した。すなわち、歩行や走行時の H 反射の変化 (Capadey and Stein, 1986, 1987) において示されたような、課題に応じた中樞への感覚経路の柔軟な調節が、大脳皮質への体性感覚経路においても生じている可能性を示唆するものと考えられる。

大脳皮質への体性感覚入力と脊髄運動ニューロンへの体性感覚入力による影響を同時に調べる試みが最近になって行われるよ

うになった。Staines et al,1997ab は SEP 誘発刺激によって H 反射を同時記録し、SEP の比較的早期の成分が課題によって異なった変化を示すのに対し、H 反射の変化は課題に依存しないことを報告した。また、Morita et al,1998 は、運動開始前（筋電図開始直前）に SEP と同時に記録される H 反射の系時的変化を調べ、SEP の比較的早期の成分における減少は、H 反射の変化に先行することを示した。これらの結果は、運動中及び運動開始直前の体性感覚性入力の処理に関して、脊髓レベルとより上位の中枢では機能的な役割に違いのあることを示唆している。しかしながら、H 反射と SEP を同時に誘発して両者の関連を調べた報告は非常に少なく、この仮説を支持するためにはさらに多くの知見が集約される必要があると思われる。また、上述の報告は後脛骨神経刺激によって下肢の H 反射と SEP を同時に調べたものであり、上肢に関する報告は少ない。さらに、準備期（PP）に SEP と H 反射を同時記録し、検討した報告も非常に少ない。

#### (4) 随伴性陰性変動と準備電位の関係

CNV と RP それぞれの指標が対象とする問題に関しては先述したが、CNV 後期成分が RP と同様か否かに関しては両指標の性質及び発生源を研究する上で特に大きな問題の一つであった(Ikeda et al,1994 : Boxtel and Brunia,1994)。上述したように、準備期（PP）を十分長くとった場合に CNV 後期成分が前期と後期に分けられること(Brunia,1980 : Rohrbaugh and Gillard,1983)は、CNV が RP と同様であることの根拠として提唱された。これに対し、CNV 後期成分は反応課題が運動でない場合にも得られること(Klorman and Ryan,1980 : Ruchkin et al,1986 : 西平ら,1978)か



ら、CNV 後期成分と RP は異なるものである可能性が提唱された。また、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。彼らはこの電位はある信号に対する期待や予測を反映する陰性変動

(Stimulus preceding negativity : SPN) と考えた。そして、CNV 後期成分にも SPN が含まれることを指摘し、CNV 後期成分は RP と SPN の総和であるとした。

サルの大脳皮質に慢性的に電極を埋め込んで CNV 課題遂行時の電位を記録した (Gemba and Sasaki,1990) 報告では、前頭前野に埋め込まれたいくつかの電極から警告信号 (WS) と反応信号 (RS) の間持続する表面陰性、深部陽性の電位が得られた。また、運動野と体性感覚野からは RP と同様の漸増型の表面陰性、深部陽性電位が得られた。さらに彼らは、小脳の切除後には、運動野と体性感覚野の漸増型の電位のみが消失し、他の領野から得られた電位は同様に存在する結果を得た。そのとき、反応運動は小脳の切除前と比べて、力の大きさと立ち上がりが減少したことを除いては、同様に行われた。さらに近年、Ikeda et al,1997 はパーキンソン氏病の疾病者において、症状が軽度である場合には CNV と RP の両者が観察されるものの、重度の場合には RP が明らかに出現するのに対し、CNV が減少するかもしくは全く観察されない

ことを報告している。逆に CNV の出現に対する RP の減少が、小脳遠心性線維の疾患による実験において報告されている (Ikeda et al,1994)。また, Jinnai et al,1993 は, サルの大脳皮質, 線状体, 淡蒼球及び視床に電極を埋め込み, 微少電流刺激及び Go/No-go 課題遂行に伴う細胞活動を記録した。彼らはまず, 微少電流刺激に対する応答から, 皮質-線状体-淡蒼球-視床-皮質と連なる circuit が存在する可能性を示し, 次に, その circuit に含まれる淡蒼球内節の吻側部及び視床前腹側部の細胞が, Go/No-go 課題の準備期 (PP) にのみ持続的な放電を維持することを確認した。

これらの動物及び疾患の結果をまとめると, 両指標の発生源は, 皮質領野に関しては共通する (これまでの報告に共通するのは一次感覚運動野, 補足運動野 (Ikeda et al,1997 : Hamano et al,1997)) 可能性があるものの, 皮質下の領域に関しては異なる可能性が考えられる。

## 2. 随意運動開始前の脊髓運動ニューロンの興奮性変化

### (1) 伸張反射と H 反射の関係

伸張反射は, 外力による筋伸張などによって当該筋に含まれる筋紡錘の伸展により起始する。筋紡錘の一次終末に生じた求心性のインパルスは Ia 線維を伝わって脊髓に到達し, Ia 線維と単シナプス性に結合した運動ニューロンを発火させる。運動ニューロンが発火すれば, その支配下にある筋線維群は同期的に収縮する。伸張反射はこの一連の過程を含み, その機能として, 姿勢保持に関係した筋の長さ調節や (Gottlieb et al,1971), 筋張力発生の補助的な役割 (servo-mechanism) (Marsden et al,1972) 等が知られて

いる。伸張反射経路は単シナプス性結合を含むため、他の多シナプス性の反射経路と比べて経路の伝達性という点ではるかに安定して機能する(時実,1976)と考えられている。しかしながら、この経路は、筋紡錘を支配する $\gamma$ 運動ニューロン、Ia 終末に作用するシナプス前抑制、求心性 Ia 入力以外の興奮及び抑制性シナプス後入力など、いくつかの神経機序によって調節可能である。

H 反射は今世紀初頭 Hoffman,1918 によって発見された。彼が発見した H 反射の基本的性質は 1950 年代に Eccles ら (Brock et al,1952) のグループによってより直接的な運動ニューロンの細胞内記録を用いて確認され、その重要性が認められた。H 反射は求心性 Ia 線維の経皮的な電気刺激によって得られ、その出現潜時及び出現閾値の特徴等から単シナプス性の反射成分が主であることは明らかである。したがって、H 反射は Hoffman 自身が示唆したように、電氣的に誘発された伸張反射と考えることができる。H 反射は求心性 Ia 線維の電気刺激が可能であれば、理論的にはどのような筋においても導出できる(田中,1986)。

これまでの報告の多くは最も H 反射の誘発されやすい下肢の筋(特にヒラメ筋)を用いた報告が多く、上肢の筋に関する報告は少ない (Burke et al,1989)。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 繊維からの入力に対して感度が良い。これに対して上肢の筋は姿勢調節に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 (Hasbroucq et al,1997)。従ってこれまでにヒラメ筋で得られてきた結果を単純に上肢に対して一般化することは困難であると思われる。このような理由により本研究では H 反射を主として手首の屈筋である橈側手根屈筋から誘発した。

H反射の出現を橈側手根屈筋を例にとつて説明すると、肘レベルにおける正中神経の電気刺激を次第に増大させると、まず、潜時約20ms程度で上述のような経路を通過したと考えられるH反射が現われ、さらに強度を上げると、潜時約5ms程度で遠心性線維の直接的な刺激によると考えられるM波が出現する。M波の増大に伴いH反射は次第に減少する。これは、M波の逆行性インパルスが、運動線維上でH反射出現のための順行性インパルスと衝突するためである。この特徴はまた、出現した反応をH反射として同定するための基準の一つとなる(田中,1986)。

M波は随意運動遂行中にH反射を用いる場合、刺激効率を安定させるための指標として重要である(Capaday and Stein,1986,1987; Staines et al,1997a,b)。また、体性感覚誘発電位(SEP)を用いる場合も、電気刺激効率が大きな問題となる。SEPに関しても表面 neurography (Gandevia et al,1982; Httunen and Homberg,1991) とともに近年、M波(Brooke et al,1996; Nishihira et al,1997b; Staines et al,1997ab; Morita et al,1998)も重要な指標として用いられている。H反射法は手技が比較的容易であり、被験者に実際の運動課題を与えて、その遂行過程での運動ニューロンの機能状態を探ることが可能であるため(田中,1986)、随意運動の遂行に伴う反射研究におけるモデルとして、最も有用な一つと考えられる。

## (2) 随意運動開始前のH反射の変化

運動開始前の様々な時間にH反射を誘発し随意運動の開始に向けた脊髄運動ニューロンの興奮性変化を探るアプローチはこれまでに多く成されてきた。それらは警告信号(WS)と反応信号(RS)

の間 (preparatory period : PP), 及び反応信号 (RS) から筋電図開始までの時間に分けて考えることができる。おそらく前者は CNV に, 後者は RP の出現時間に対応させることが可能である。

後者に関する研究対象の重要な一つは, 脳から脊髄に対して発せられる随意運動開始の下降性指令の到着時点についてであった。この問題は筋電図開始前後の様々な時点に H 反射を誘発し, 促通が開始する時点を判別することによって調べられた。初期の研究では, H 反射の促通開始時点が運動開始前 20~200ms とかなりのばらつきがあった (Eichnberger and Ruegg, 1984 : Gottlieb et al, 1970 : Demaire et al, 1989 : Ruegg and Drews, 1991)。このばらつきの第 1 の原因は運動の開始を力の立ち上がりとするか筋電図の開始時点とするかにあった。また, 2 番目は筋電図の開始を運動開始時点として, H 反射が筋電図開始直前に誘発された場合, H 反射自身が持つ数十 ms にわたって継続する不応期 (Ashby, 1995) によって, 筋電図出現時点を謝って判断している可能性が考えられることであった (Kagamihara et al, 1992 : 小宮山と笠井, 1993 : 河合ら, 1994)。Kagamihara et al, 1992 はこの問題点に対し, 被験者に両側同時動作を習熟させ, 筋電図反応時間 (EMG RT) の差が 10ms 以内になってからテストを行い, 対側の筋電図開始を基準に H 反射をプロットした。以後, この方法を採用した H 反射の促通開始時点は筋電図開始前 60ms 以内であった。さらにこの後, H 反射の促通開始時点が発揮すべき筋収縮力の大小 (小宮山と笠井, 1993), 運動速度の変化 (Kagamihara et al, 1992 : 河合ら, 1994), 単純反応と選択反応課題 (小宮山と笠井, 1993), 反応課題と自己ペース課題 (河合ら, 1994), などの課題の変化によって影響されることが報告されている。

次に、反応信号 (RS) 前に得られた H 反射に関する報告を取りあげると、準備期 (PP) 前半における H 反射の増大に対しては、警告信号 (WS) 自身の性質に依存した定位反応 (Komiyama and Tanaka, 1990) として見解がほぼ一致するものの、準備期 (PP) 後半に関しては結果が大きく二つに分けられる。すなわち、H 反射の経時的変化がコントロールレベルから減少するもの (Requin, 1969 : Hayes and Clarke, 1978 : Sullivan, 1980 : Gerilovsky et al, 1983) と、増大するもの (Gurfinkel and Pal'tsev, 1965 : Kots, 1977 : Brunia and Vister, 1979 : Brunia, 1980) である。その相違については未だ明らかではないが、Komiyama and Tanaka, 1990 は、上述の報告が被験者全体の平均に基づいているのに対し、個々の被験者に注目し、その相違の説明を試みた。すなわち彼らは、準備期 (PP) 後半に H 反射の促進を示す被験者と抑圧を示す被験者の両者を得た。彼らは、これらの変化は個々の被験者の反応信号 (RS) に対する構え (set) の違いと推測している。

準備期 (PP) 後半における H 反射の系時的変化の神経機序として、Requin, 1969 は H 反射振幅低下に対して Ia 終末に作用するシナプス前抑制の関与を、Brunia, 1980 は H 反射振幅増大に対して錐体路細胞の活動性増大に伴う運動ニューロンへの直接的な興奮性入力及びシナプス前抑制の減弱を、Komiyama and Tanaka (1990) は H 反射振幅の減少に関しては、相反性 Ia 抑制も関与する可能性を主張した。

### 3. 随意運動開始前の準備期における大脳皮質活動と脊髄運動ニューロン活動の関係

#### (1) 随伴性陰性変動と H 反射の関係

準備期 (PP) における CNV と H 反射の時間経過との関連を調べることは、反応信号 (RS) に向けた準備的な過程において、大脳皮質と脊髄運動ニューロンの機能的な関わりを知る上で重要と考えられるが、報告は非常に少ない。Brunia, 1980 は 4 秒の準備期 (PP), 足関節の底屈運動を反応課題として用い、CNV とヒラメ筋から得られた H 反射の変化を調べた。その結果、CNV と H 反射の経時的な変化が類似していることから両者の関連性を示唆した。Papakostopoulos and Cooper, 1973 は 2 秒の準備期 (PP), 反応課題にボタン押を用い、CNV とヒラメ筋から得られる H 反射の経時的な変化を調べた。その結果、CNV 出現時に H 反射が増大することを示した。しかしながら、彼らは H 反射増大のピークが CNV のそれに先行するため、両者に因果関係のないことも主張した。その後、Papakostopoulos and Cooper, 1978 は、準備期 (PP) の間ボタンを押しつづけ、反応信号 (RS) に対してボタン押しを止める課題を設定し、CNV と H 反射の経時的変化を調べた。その結果、準備期 (PP) が安静の時と比べて、CNV には減少が観察されるものの、H 反射には増大が見られ、両者の変化の方向性が異なることを示した。この結果から彼らは、CNV と H 反射の経時的変化に因果関係のないことをさらに強調した。この実験は持続的筋活動時には安静状況より CNV が減少する結果であり興味深い。

## (2) 体性感覚誘発電位と H 反射の関係

運動開始前の脊髄レベルにおける準備状態を探る試みについては上述した。これらの研究は、脊髄運動ニューロンに対する感覚性入力を、生体は運動開始前にどのように処理しようとしているかについて調べていることを含むと考えられる。これに対し、体性感覚誘発電位 (SEP) の比較的早期の成分に焦点を当てれば、それは大脳皮質レベルへの体性感覚入力に対する、運動開始前の処理過程の検討と同義であると思われるが、報告は非常に少ない。

Bocker et al,1993 は単純反応課題を用い、指神経の刺激によって反応信号 (RS) 前 500ms の時点で誘発された SEP の変動を調べた。彼らは SEP 成分のうち 46ms 以後の振幅に減少を観察した。Hoshiyama and Sheean,1998 は Go-No go パラダイムを用いて、正中神経刺激によって反応信号 (RS) 前 150ms に誘発された SEP 各成分の変動を調べたが、彼らはいずれの成分にも変化を認めていない。これらの報告は刺激部位、解析対象となった SEP 成分、課題等が異なるため、その相違については明らかでない。上述したように、運動中の SEP における比較的早期の成分は課題依存性に変化することが報告されている。したがって、準備期 (PP) に誘発された SEP の比較的早期の成分が課題の操作によって変化する可能性は否定できない。さらに、上述したように筋電図開始直前と筋電図開始後に SEP と H 反射を同時記録した報告には Staines et al,1997a と Morita et al,1998 の報告があるが、準備期 (PP) に H 反射と SEP を同時記録した報告はほとんどない。

#### 4. 主動作及び反応動作開始前の予備的な筋活動が運動要素及び生理学的指標に及ぼす影響



## 要素及び生理学的指標に及ぼす影響

### (1) 予備的な筋活動が主動作の諸要素及び反応時間に及ぼす影響

予備的な筋活動を用いた研究は体育科学の分野において重要な研究対象とされてきた。主動筋を軽度に収縮した状態から急速な動作を重畳すると、重畳直前に筋放電の休止期が出現することが知られている。これは、猪飼（猪飼 1955）によって見いだされ、運動前不応期（pre-motion silent period : psp）と呼ばれている。psp の出現する試行では出現しない試行よりも、力の立ち上がりの上昇率が增大することから、発揮力が最大に達する以前の筋力発揮初期に、一過性に筋力を高めることに貢献していると考えられている（青木ら,1982）。しかしながら、この現象の出現率は動作条件によって大きく影響を受け、等尺性収縮における関節角度や、持続性放電の大きさなどによって、出現率が変化することも調べられている（三田ら,1978,1980）。また、その機序に関しては、psp が主動筋と同時に拮抗筋にも出現すること（猪飼と矢部,1973）、対側の非運動肢の同名筋にも psp と同期して休止期が見られること等から（矢部,1976）、脊髄より上位の中樞が psp の出現に関与して脊髄全体の同時抑制が出現すると考えられている。

予備的な筋活動の状態を、isometric, eccentric, concentric などに変化させ、主動作における力の大きさや速度を調べた報告も見られる。そして、いずれの状態を用いても、その影響は主動作前半の変位速度が増大すること（高松ら,1991）及び力の立ち上がり速度が増大すること（阿江ら,1979）であった。これに対し、予備緊張そのものが反応時間（RT）に及ぼす影響について調べた報告

は少ない。

反応時間 (RT) は、反応信号 (RS) の認知、運動プログラムの作成と放出、脊髄運動ニューロンの興奮性上昇と発火、筋放電の開始、力発揮という一連の神経生理学的過程に要する時間を反映すると考えられる。現在では、従来の反応時間 (RT) に加えて、反応信号 (RS) から筋電図出現までの時間を用いた筋電図反応時間 (EMG RT) (Weiss,1965 : Botwinick and Thompson,1966) が多く用いられるようになった。その利点は、反応時間 (RT) と筋電図反応時間 (EMG RT) の差分(motor time : MT)が、筋電図開始から筋張力の発生に要する時間の解析を可能にしたことである。すなわち、反応課題遂行時の反応時間 (RT) の変動が、運動ニューロン以降の末梢性の要因か、もしくは中枢神経系の要因によって生じたものかどうかを知ることができる。

Clarke,1968 は、反応信号 (RS) 前の予備的な筋活動が反応時間 (RT) を短縮することを系統的に初めて報告した。彼はこの短縮の原因を、筋自身の予備的な収縮が、骨につながる腱などの直列弾性要素を伸展させ、反応信号 (RS) に応答した筋収縮張力の発生を容易にしたためと推察した。これに対し Schmidt and Stull,1970 は筋電図反応時間 (EMG RT) を用いて、上述の反応時間 (RT) の短縮が真に収縮機構の影響のみによるものかどうかを調べた。その結果、彼らは Clarke の結果とは逆に MT が延長し、筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮が生じていることを確認した。後者の結果から彼らは、事前の筋活動が筋電図反応時間 (EMG RT) を短縮させることに対し、中枢神経系の影響が含まれていることを示唆した。しかしながら、この筋電図反応時間 (EMG RT) の短縮に対する中枢神経系の関与の詳細については不明である。

## (2) 持続的な筋活動が H 反射に及ぼす影響

H 反射が力発揮時に増大することは定性的ではあるが H 反射の発見当初から知られていた。Gottlieb and Agarwal,1971 は、初めて力発揮と H 反射の関係を定量的に解析し、持続的な力発揮の増大とともに H 反射も増大することを示した。また、Burke et al,1989 も上肢、及び下肢のいくつかの筋から持続的な力発揮時の H 反射を記録し、安静時に明確な H 反射が出現しない筋においても、収縮時には比較的安定して H 反射が記録されることを報告している。しかしながら、Ruegg et al,1990 は目標発揮力の増大に対して H 反射振幅が変化しないことを報告している。この相違については未だ明らかでないが、近年、Funase et al,1999 は持続的な力発揮時の H 反射振幅に対して、その直前の筋電図量が影響することを報告している。従って同様の力発揮を行わせても、H 反射誘発直前の筋電図量によっては振幅が増大しない可能性も考えられる。しかしながら、この問題に関しては報告が少なく、今後の知見の集約を待たなければならない。また、準備期 (PP) に持続的な力発揮を行わせて H 反射を記録した報告は見られない。

## (3) 予備的な筋活動が随伴性陰性変動と準備電位に及ぼす影響

CNV が運動開始前の持続的な力発揮の影響を受けて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、Papakostopoulos and Cooper,1978 は同様のパラダイムを用いて CNV とヒラメ筋 H 反射の系時的変化の関連性を調べ、収縮状況では安静状況に比べて CNV は減少し、H 反射は増大することを報告した。準備期 (PP) に持続的な収縮を課したときに CNV が

増大しない(Papakostopolos and Cooper,1978 : Papakostopolos and Jones,1980)ことは、CNVが運動出力ではなく、あくまで反応信号に対する準備的な過程を反映することを示唆している(Gaillard et al,1980)。

先述したように、予備的な筋活動によって反応動作の各種運動要素の成績が上昇することを考慮すると、CNVの減少傾向が注意の減少と関連する可能性は少ない。しかしながら、これまでの研究は行われた運動の要素について解析していないため、この点については不明である。また、上述したように、これまでの実験における持続的な力発揮に続く反応動作はボタン押しの停止であり、異なる反応動作に関してはほとんど知られていない。さらに、予備的な筋活動に伴ってCNVが減少するとしても、CNV後期成分はRPとSPNの総和であるとする先述の報告(Boxtel et al,1993 : Boxtel and Brunia,1994)を考慮すると、どの成分が影響されているかは明らかでない。