

9章 討論

随意運動は、自発的に行われるものと外的刺激に促されて生じるものの2つに大きく分類される(池田と柴崎, 1995)。ヒトの随意運動は種々の感覚刺激を知覚後、それらを認知・判断し、実行の意志決定を行うといった一連の情報処理過程を経て実行される。この情報処理過程は、感覚刺激が脳の感覚(皮質)野に到達するまでの入力系と刺激処理から実行の意志決定を行う統合過程、筋放電として動作が出現するまでの出力系の3つに分けて考えることができる。つまり、入力系・統合過程・出力系といった一連の中枢内情報処理過程が、運動出力の結果やパフォーマンスに重大な影響を及ぼすと考えられる。しかし、体育・スポーツ科学の分野では、運動と脳の活動状態に関する研究(Nishihira et al., 1999; 麓ら, 1999)が少ないのが現状である。そこで本研究では、誘発電位(EP)と事象関連電位(ERPs)を指標に用いてヒトの随意運動に伴う中枢内情報処理過程について検討した。

随意運動開始前の準備期(foreperiod)においては、その運動開始に向けて必要な情報の修正や確認が行われる(Bocker et al., 1993)。準備期における中枢系の指標としてCNVと準備電位(BP)がある。CNVは外的刺激によって促された随意運動の準備状態を反映するのに対して、BPは自己のペースによる自発的な随意運動の準備状態を反映すると考えられている(池田と柴崎, 1995)。一方、体性感覚誘発電位(SEPs)を指標に用い、随意運動と入力系との関係についても古くから研究されてきた。特に、運動中に刺激後20~30msまでの短潜時成分の振幅が、安静時よりも顕著に減少するgatingが報告されている(Angel et al., 1984; Kakigi et al., 1995; Nishihira et al., 1996)。運動中に生じるSEPsの変動は、その運動に関連する上行性の求心性インパルスと下行性の遠心性インパルスとの干渉作用によるものと考えられている(Angel et al., 1984; Starr and Cohen, 1985)。しかし、刺激後50ms以降の中・長潜時成分に関する報告は極めて少なく、研究の必要性があると考えられる。そこで本研究では、準備期におけるCNV出現期間中に正中神経刺激を行い、中・長潜時SEPsについて検討したところ、N60以降の中・長潜時成分の振幅は安静時よりも顕著な増大を示した。中・長潜時成分は、一次体性感覚野由来の外因性成分に

加えて、被検者の注意レベルや精神活動といった他の皮質からの影響を受けて変動すると考えられることから、準備期においては中枢の活動状態が活性化されていることが示された。また、準備期における SEPs 振幅は、出力系の大小による影響を受けないことから、準備期における SEPs の変動は、中枢系の要因に起因する可能性を示唆している。一方、本研究における CNV は、前頭部で平坦な持続型 CNV を示し、中心領野から頭頂部にかけては、反応刺激に向かって徐々に増大する漸増型 CNV を示した。前頭部は、注意機能に関して重要な役割を担っていると考えられており (Desmedt and Tomberg, 1989; Corbetta et al., 1993)、前頭部における持続型 CNV は、注意機能の持続を反映すると考えられる。このことは、CNV 振幅が注意と直線的な正の相関を示すという Tecce ら (1976) の報告からも裏づけられる。さらに、脳波周波数解析の結果から、CNV 出現期間中の前頭部において、 δ 成分と θ 成分が顕著な増大を示した。計算中や他の精神活動中に前頭部を中心に δ 成分が増大すること (Kakizaki, 1985; Fernandez et al., 1993) が報告されている。Fernandez ら (1993) は、課題遂行中の δ 成分の増大は、被検者の集中レベルの増加に関連すると考察している。また、CNV 出現期間中の前頭部における θ 成分の増大は、精神作業中に前頭部正中部に見られる $F_m \theta$ (Ishihara and Yoshii, 1972) が出現していた可能性を示唆している。Ishihara と Yoshii (1972) は、 $F_m \theta$ の出現は精神作業に対する一定の注意集中状態と密接に関係があると指摘している。したがって、CNV 出現期間中の前頭部における δ 成分と θ 成分の増大は、入眠期に出現する徐波成分の増大とは明らかに異なる。つまり、準備期においては、前頭部で注意集中レベルを持続するためのはたらきが行われていると考えられる。また、中心領野においては漸増型 CNV を示したため、CNV 後期成分に BP が重畳している可能性が示唆された。さらに、脳波周波数解析の結果から、CNV 出現期間中の中心領野において β 成分の顕著な減少 (β -ERD) がみられた。 β -ERD は、その運動に関連した感覚運動野 (sensorimotor area) の活動を反映すると考えられている (Stancak and Pfurtscheller, 1995)。さらに、Yingling (1980) は、中心部 (Cz) における β 律動は脳における運動のプランニングや運動制御を反映すると考察している。中心領野は、運動のプログラミングやすべての随意運動の発現中枢と考えられ

ている補足運動野 (SMA) が位置するため、CNV 出現期間中の中心領野における β -ERD は、その運動に関連した運動のプランニングを反映する可能性を示唆するものであると考える。したがって、準備期においては前頭部で注意集中レベルの維持を、SMA や運動野が位置する中心領野では運動開始に向けての準備や運動プランニングに関する情報処理が行われている可能性が示唆された。

統合過程の中でも、反応刺激に対して実際に筋放電として動作が出現するまでの情報処理過程については、ミリ秒オーダーの高い時間分解能を有する P300 を指標に用いて研究を行った。本研究では、すべての被検者とすべての課題で P100, N140, P300 の 3 成分を同定できた。P100 は体性感覚刺激に特有な刺激モダリティに依存する成分であり、聴覚刺激に対して出現する N100 に相当する成分であると考えられている (Desmedt et al., 1983)。本研究においても、P100 は体性感覚刺激に対して顕著に出現し、頭皮上に広く分布する結果を示したため、P100 は体性感覚刺激の知覚を反映すると考えられる。P100 に続いて生じる陰性電位の N140 は前頭部の Fz で最大振幅を示し、反応課題における N140 潜時が計数課題のそれよりも有意な短縮を示した。また、動作を行わない non-target N140 振幅が、実際に動作を行う target N140 のそれよりも有意に大きい値を示した。さらに、target N140 の加算波形から non-target N140 のそれを引き算した差分 (subtraction) 波形からも N140 に相当する陰性成分が認められ、speed task においてより顕著であったことから、N140 は動作遂行に関連し、とりわけ反応を積極的に抑制するときに出現する NoGo 電位との関連性が示唆された。P300 は、反応動作を行う標的 (target) 刺激だけでなく刺激を無視して反応を行わない非標的 (non-target) 刺激においても出現した。target P300 は頭頂部の Pz 優位を示したのに対して、non-target P300 は中心領野の Cz で最大振幅を示した。P300 は、頭皮上分布と潜時の違いから、非標的刺激に対して中心部から前頭部優位に出現し、比較的潜時の早い P3a と標的刺激に対して頭頂部優位に出現する P3b に大別できる (Squire et al., 1975)。さらに最近では、前頭部優位の anterior P300 と頭頂部優位の posterior P300 の 2 つに分類され、anterior P300 は posterior P300 の前方への単なるシフトではなく、それ自体が独立したものであり、課題遂行を担う並

列された2つの系 (Pribram and McGuinness, 1975), すなわち, 感覚・刺激処理系と運動・反応処理系の双方において P300 が生じると考えられている(斉藤と豊嶋, 1997). 通常, 刺激の識別や課題が困難でないときには non-target P300 は, target P300 よりも潜時が短く振幅も小さいことが知られている (Starr et al., 1995). そして, その頭皮上分布は中心部から前頭部 (fronto-central) 優位を示す. よって, 本研究における target P300 は posterior P300 を, non-target P300 は anterior P300 と同様の特徴を示す成分である可能性が考えられる. 一方, P300 は被検者の精神状態や課題条件の違いによって変動するため, 課題条件や実験条件を細かく設定する必要がある. さらに, よりスポーツ・運動の場面に応じた環境のもとでの詳細な検討も必要であると考えられる. 例えば, 同じ様な動作であっても反応のスピード性を重視するときとそれよりもむしろ正確性を重視するときがある. 本研究では, この課題条件の違いを方略の違い (speed vs. accuracy task) と仮定して検討したところ, speed task における P300 振幅が accuracy task のそれよりも有意に大きい値を示した. しかし, P300 潜時に関しては課題条件の違いに差は得られなかった. また, speed task における EMG-RT が accuracy task のそれよりも有意な短縮を示した. P300 潜時と RT の相関を調べた研究では, ほとんどの報告 (Kutas et al., 1977; Pfefferbaum et al., 1983; 平松ら, 1985) で正の相関が認められている. これらの報告は, 課題遂行に伴う情報処理過程の一部が P300 と深く関連している可能性を示唆しているが, P300 潜時と RT との相関係数が比較的小さいことや, RT が P300 に先行する場合とそうでない場合があり, 両者の関連性については不明確である. 本研究においても, P300 潜時と EMG-RT との間に関連性を見いだせなかった. P300 は運動を伴わない課題においても出現し (Picton, 1992), P300 潜時が課題条件の違いによる影響を受けないため, P300 は反応動作の出現機構に対して直列的に関連しておらず, 刺激処理系をより強く反映する成分であると考えられる. さらに, S-R 適合性を操作した先行研究においても, 刺激の識別の困難さや刺激と反応の不適合性の両方の影響を受けて変動するのは反応時間 (RT) であり, P300 潜時には有意な変動が見られないとする報告 (McCarthy and Donchin, 1981; Magliero et al., 1984) からも, P300 は刺激処理系に依存し, 反応実行過程とは直列的な関係にないと考えられる. また,

non-target P300 は中心領野の Cz で最大振幅を示し、その潜時は target P300 のそれよりも有意な延長を示した。反応を積極的に抑制することによって出現する NoGo P300 潜時は、実際に反応を行う Go P300 のそれよりも延長すること (Simson et al., 1977) が報告されている。非標的刺激に対して頭皮上の前方に出現する anterior P300 は運動・反応処理系、とりわけ抑制過程に関連していると考えられている (齊藤と豊嶋, 1997)。さらに、target P300 の加算波形から non-target P300 のそれを引き算(subtraction)した差分波形から P300 に相当する陽性成分が認められ、speed task においてより顕著であった。つまり、スピード性を重視した運動課題では、非標的刺激に対しては積極的に反応を抑制しようとする NoGo P300 と同様の特徴を示す P300 が出現する可能性が示唆された。これらのことから、被検者の課題遂行のための方略の違いや刺激に対する注意の向け方、努力の違いによって、RT を指標とする反応実行過程だけでなく、中枢内情報処理過程も影響を受ける可能性が考えられる。さらに、反応のスピード性を重視する運動においては、反応を積極的に抑制する機能も同時にはたらいっていることが推察された。

本研究において、出力系の指標である MP 振幅は、頭皮上の補足運動野 (SMA) に相当する FCz で最大振幅を示し、剣道群が一般群よりも有意に大きい値を示した。したがって、MP は動作肢と反対側の運動皮質にのみ限局するのではなく、SMA や運動前野などの運動連合野が関与して出現する可能性が示唆された。また、長期的な運動経験を有する剣道群は、単純な握力発揮においても運動皮質活動が一般群よりも活性化している可能性が考えられる。運動学習が進むにつれて、基底核 (Seitz and Roland, 1992) や SMA (Grafton et al., 1992) の神経活動が増大し、反復練習によるパフォーマンスの向上に伴い SMA の活動が活性化すること (Jenkins et al., 1994) から、剣道群の有意な MP 振幅の増大は、長期的な運動経験による中枢神経系の運動適応を示唆するものであると考える。優秀なスポーツ競技者は、長期にわたるトレーニングによって呼吸循環機能や骨格筋レベルにトレーニング効果があらわれることが知られているが、中枢神経系においても同様のトレーニング効果が生じる可能性が考えられる (Tomporowski and Ellis, 1986; Fattapposta et al., 1996; Polich and Lardon, 1997)。我々は、あるスポーツ動作パターンを獲得し、自動的にかつ

円滑にその動作を遂行するためには繰り返し何度も練習を行いその技術を習得する。しかし、このような運動プログラムを作り上げる背景には繰り返し行われるトレーニングが必要であり、その時期にヒトは多種多様な情報を効率よく処理し、目標としている運動パターン獲得に必要な情報を中枢神経系に貯蔵しなければならない（西平，1998）。つまり、反復練習することによって得られる‘身体で覚える’といった運動記憶は、目的に合った運動をスムーズに行うために重要である。このような長期的な反復練習によって、パフォーマンスの向上と運動開始に対するプログラミングの効率化が図られることが MRCP を用いた研究（Fattapposta et al., 1996）から報告されており、このことも中枢系の運動適応の一つと考えられる。また、Deeckeら（1969）は、MP は動作肢と対側の運動皮質にのみ局在し、運動皮質活動を反映すると報告している。Nishihiraら（1989）も、運動課題の種類を変えることによって MP 振幅と潜時が変動することを見だし、MP は運動出力系と密接な関係にあり、とりわけ出力量とスピードに関連性があると結論づけている。本研究においても、利き手動作による運動出力量と MP 振幅が正の相関を示したため、MP は運動出力系の出力量との関連性が示唆された。特に、非利き手動作においては、MP 振幅と出力量との間に相関が認められないことから、MP は運動出力系の中でも正確性、あるいはスムーズに力を発揮できる出力系と密接な関連性があると考えられる。

したがって、以上のことから、ヒトの随意運動は入力系-統合過程-出力系といった中枢内情報処理過程を経て行われるが、本研究ではその過程を誘発電位（EP）と事象関連電位（ERPs）を指標に用いて推察することができた。特に、個々の被検者の課題遂行のための方略の違いや注意の向け方の違いによって、反応実行過程だけでなく中枢内情報処理過程も影響を受けて変動する可能性が示された。さらに、長期的な運動経験によって中枢神経系にも運動に対応した変容が生じる可能性が示唆された。