

2章 文献研究

1. ヒトの運動制御に関する末梢レベルの研究

(1)反応時間 (reaction time: RT) を指標に用いた研究

意志決定の速さとその有効性を示す重要なパフォーマンスの測度の 1 つが反応時間 (RT) であり、刺激が呈示されてから反応が開始されるまでの時間間隔を指す。この RT は、予告刺激があるときには無いときよりも短縮し、選択肢が多くなり複雑になればなるほど単純反応よりも RT が延長することが知られている (Hyman, 1953)。また、刺激と反応の整合性が重要な要因として RT に影響を及ぼしており、刺激と反応の空間的な位置関係が一致するとき、つまり、刺激と反応が整合な関係にあるときに RT が短縮することも知られている (McCarthy and Donchin, 1981; Stoffel, 1996)。実験心理学の分野では、この RT を指標として心的計時 (mental chronometry) という方法を用い、ヒトの認知情報処理について盛んに研究が行われた。mental chronometry は、ヒトの情報処理を時間的側面に注目して研究する方法であり、情報処理の各段階に対応する心理的事象の変数を操作することでその処理に要した時間を解析し、情報処理システム全体の時間的構造や機能状態を評価しようとするものである (忠井ら, 1987)。mental chronometry では、課題遂行とそれに関わる情報処理過程の指標として RT が用いられ、1970 年代までにヒトの情報処理過程について多くの成果が得られてきた。

体育科学の分野においても、猪飼ら (1961) や Asami ら (1964) の研究報告がある。猪飼ら (1961) は、運動選手群と一般群の反射時間と RT を測定し、運動選手群では反射時間と RT の間に統計的に有意な正の相関を示したと報告している。また、Asami ら (1964) は、陸上競技オリンピック候補選手のステッピングと全身反応時間の 3 年間にわたる推移について研究し、短距離群と跳躍群では RT と筋収縮時間の両方が有意に短縮したため、神経系と筋系の両要因が RT を規定し、両要因にトレーニング効果が生じることを示唆する結果が得られたと結論づけている。このように、RT を指標とした研究は主として末梢レベルの研究が中心であり、RT の遅速に及ぼす中枢レベルの影響に関しては推察する以外になかった (竹内と丹羽, 1997)。

(2)筋電図反応時間 (EMG-RT) を指標に用いた研究

RT を筋電図で測定する方法は 1960 年代に完成する (Botwinick and Thompson, 1966). その結果, RT は刺激から主動筋の筋収縮時間までの潜時 (premotor time: PMT, EMG-RT) と筋活動開始から実際の運動開始までの潜時 (motor time: MT) に分けられるようになった. 筋電図は生体力学的変数 (変位, 速度, 加速度などの運動学的変数, 外部抵抗や筋張力などの運動力学的変数) と生理学的過程とを結びつける手段である. つまり, 筋電図を用いることによって心理学的過程と身体運動との間に生理的過程を介在させることが可能になる (中村, 1988). そして, RT を EMG-RT と MT とに分けることにより, 中枢と末梢の過程をある程度弁別することが可能となった.

1970 年代後半になると, 運動の準備状態や運動プログラムの概念が研究の中心になり, 出力系の反応の結果だけでなく, 反応までの過程も変数として分析の対象に取り上げられるようになり, 大築らは EMG-RT を用い, ヒトの運動制御について検討している. 河辺と大築 (1982) は, 刺激の位置と発生時刻に規則性をもたせたパラダイムと規則性がないパラダイムを用いて予測と RT の関係について調べ, 規則性がある場合の EMG-RT と RT が, 規則性がないときよりも有意に短縮したため, 刺激に対する予測が成立していたと考察している. また, Ohtsuki (1981) は, 左右の両手で同時に最大努力で握力を発揮させると, 片手でそれぞれ握力を発揮しているときと比較して低下することを見いだした. さらに, 大築 (1988) は, 両側同時作業による低下は筋力だけでなく, 動作速度や一定時間内におけるタッピング回数にも低下が見られると報告し, 一つの筋が働くときに別の筋が抑制されるという大脳皮質起源の機能周辺抑制の効果が, 二つの筋を同時に働かせることによって互いに重なり合ってしまうため, 両側同時作業による活動低下現象が生じると考察している. 以上の研究と平行して, 課題遂行に伴う行動指標として EMG-RT の変動と ERPs の変動とを合わせて検討することによって, 中枢内の情報処理過程をより詳細にとらえようとする試みが様々な研究領域において行われるようになってきた.

(3)H 反射 (H-reflex) を指標に用いた研究

H 波は求心性線維が刺激され、その興奮によって脊髄の α 運動ニューロンが興奮し、骨格筋を収縮させることによって出現する刺激後 25~30ms の成分である。この H 反射が筋の運動ニューロンプールの興奮性の指標として利用されている。Tanaka (1974) は、H 反射を用いて相反性神経反射が実際の随意運動の遂行に参与していることをヒトを対象とした実験で明らかにした。また、随意運動開始前の準備期 (foreperiod) において、主動筋と拮抗筋の H 反射が増大することが報告され (Brunia et al., 1982)、準備期において脊髄レベルの興奮性が増大している可能性が示唆された。さらに、Komiyama と Tanaka (1990) は、WS-IS 課題を用いて準備期における脊髄の興奮性を調べ、H 反射は警告刺激 (WS) に対する定位反応と被検者の命令刺激 (IS) に対する期待や運動に対する構え方の違いによって変動することを見出し、準備期における H 反射は上位中枢レベルの影響を受けると報告している。一方、麓ら (1999) は運動開始前における随意収縮が、CNV と H 反射振幅の経時的変化に及ぼす影響について研究し、随意収縮のない安静状況では H 反射振幅の経時的変化は CNV と同様であったが、随意収縮を行う収縮状況では H 反射振幅の経時的変化が安静状況とは異なり、上位中枢と脊髄レベルにおける運動準備状態が、持続的な収縮の影響を受けて変化すると報告しており、準備期においては脊髄レベルと上位中枢レベルの両方が運動準備に関する影響を受けている可能性が考えられる。

2 ヒトの運動制御に関する中枢レベルの研究

(1)脳波を指標に用いた研究

Berger (1929) がヒトの脳波を初めて記録して以来、医学領域を中心に脳波研究が盛んに行われてきた。そして、随意運動開始前に感覚運動野におけるリズムカルな活動が脱同期化 (desynchronization)、あるいはブロックされることが Jasper と Penfield (1949) によって報告されている。また、脳波は注意や覚醒水準によって変動し、脳波周波数成分と RT との間に高い相関があることが報告されている (Surwillo, 1963)。つまり、速波 (β 波) 成分が多い

者は RT も速いということになる。さらに、Groves と Eason (1969) は、覚醒水準 (vigilance) と注意 (attention) の要因が視覚性誘発脳波と RT に及ぼす影響について研究し、最適覚醒水準のときに RT が短縮したと報告している。

体育科学の分野においても、運動に伴う脳波の研究が盛んに行われるようになった。萩原と調枝 (1975) は、運動学習時における脳波の変動様式をまとめ、1) 安静時における脳波周波数パターンは、 α 帯域をピークとして速波 (β 波) と徐波 (θ 波) 帯域が左右に分散したヒストグラムを呈するのに対して、運動時には α 帯域が顕著に減少し、速波成分と徐波成分が相対的に増加する。また、2) 運動学習を繰り返し行わせると、徐波成分と速波成分に分別されたパターンが再び α 帯域をピークとして徐波、速波成分に分散された安静時のパターンになると報告している。そして、萩原と調枝 (1975) は、運動学習の初期における脳波は速波パターンが主体であり、大脳の活動水準が高いが、学習の進行につれて α 波も出現し、活動水準が低下していくと考察している。

一方、ERPs を評価する上で ERPs 試行中の背景脳波活動 (background EEG) が有効であり、先行研究において P300 試行中の背景脳波 α 成分と刺激前 (pre-stimulus) α 成分が P300 振幅と関連があるという報告 (Jasuiukaitis and Hakerem, 1988; Price, 1997) がある。最近の研究では、脳波と P300 は複雑な記憶課題中の情報処理に関連する心的事象 (mental event) を反映することが報告されている (Mecklinger et al., 1992)。つまり、個々の被検者の脳波の多様性が P300 に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

Jasper と Penfield (1949) は、運動開始の準備期に α 帯域と β 帯域の活動が抑制される現象を見いだした。Pfurtscheller (1981) は、手の随意運動開始前に α 帯域と β 帯域の活動が抑制される脱同期化 (event-related desynchronization: ERD) が生じることを報告した。この運動に関連する α -ERD は、運動による影響と運動開始に対する注意や期待を反映し (Pfurtscheller et al., 1996)、 β -ERD はその運動に関連する感覚運動野 (sensori-motor area) の活動を反映すると考察している (Stancak and Pfurtscheller, 1995)。さらに Yingling (1980) は、中心部における β 律動は運動行動に関連しているため、その活動は脳における初期のプランニングや運動行動の制御を反映すると考察

している。一方、Nashmi ら (1994) は、手の運動開始前の準備期や注意状態にあるときには、感覚運動野における β 帯域が有意に増大すると報告しており、見解は一致しないため、さらに研究を進める余地がある。

(2) 誘発電位 (evoked potential: EP)・事象関連電位 (event-related potentials: ERPs) を指標に用いた研究

Davis (1939) は音, flash, 指への電気刺激に対する大脳誘発電位 (vertex potential) をヒトで初めて記録した。また、大脳誘発電位は睡眠中の音刺激に対しても出現する (K-complex) ことも確認されている (Davis et al., 1939)。Dawson (1947) は、誘発電位成分を背景脳波から識別する方法として重畳法 (superposition method) を開発し、その後、コンピュータを用いた平均加算法に引き継がれ今日に至っている。

動作遂行中に体性感覚誘発電位 (SEPs) の振幅が、安静時よりも減衰すること (Angel et al., 1984; Starr and Cohen, 1985; Nishihira et al., 1996) が報告され、この現象は振幅減少 (gating) と呼ばれている。gating は、受動的な動作遂行中 (Staines et al., 1996) や動作開始前の準備期 (Chapman et al., 1988; Bocker et al., 1993; Hoshiyama and Sheean, 1998)、そして、筋活動を伴わない精神課題中 (Hamalainen et al., 1990) においても生じることが報告されている。動作遂行中に生じる 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; Nishihira et al., 1996)。しかし、運動開始前数 100ms に生じる SEPs の変動は、中枢神経系の要因によるものと考えられており (Starr and Cohen, 1985; Bocker et al., 1993)、随意運動の開始前から遂行中にかけては、中枢レベルだけでなく末梢レベルにおいても変動が生じていると考えられている。

1960 年代、随伴陰性変動 (CNV) や P300、運動関連脳電位 (MRCP) などの新しい知見が続々と発見された。CNV や P300 は、従来の EP のように外界の感覚刺激に依存する受動的、外因的な脳の電位変動とは異なり、外界の刺激に対する被検者の認知的態度を反映して変動する内因性の電位として注目された。Walter ら (1964) によって報告された 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、準備電位（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）。特に CNV は、予告刺激後 400～800ms までの前頭部優位で左右対称に出現する前期成分と反応刺激呈示の約 1s 前から中心部優位に緩徐に増大する後期成分に大別できる。前期成分は予告刺激に対する定位反応を反映し（Loveless and Sanford, 1974）、後期成分は反応刺激に対する期待（stimulus preceding negativity: SPN）や反応刺激に対する反応が運動課題であれば、運動に対する準備（motor preparation）を反映すると考えられている（van Boxtel and Brunia, 1994; Hultin et al., 1996）。

Kornhuber と Deecke（1965）は、随意運動開始前 1～3s から出現し始め、運動発現前約 100ms で最大陰性となる BP について報告して以来、MRCP に関する研究が盛んに行われるようになった。CNV と BP はともに随意運動の開始前に出現するため、両者の関連について今日に至っても議論されている（Elbert et al., 1994; Hultin et al., 1996; Hamano et al., 1997）。頭皮上分布では、CNV 振幅は前頭部から中心前野で最大であるのに対して、BP は運動直前で動作肢と反対側で優位を示す。

体育科学の分野においては、西平ら（1978）が動作駆動を伴わない CNV について、頭皮上分布と波形の特性から CNV と BP の比較について検討した。その結果、動作駆動を伴わない精神課題によって誘発された CNV は両側性分布を示したのに対して、自発動作に先行して出現した BP は動作肢の反対側中心領野において優位であると報告している。また、荒木ら（1981）は、単純反応動作において、予告刺激に伴う脳波の α 帯域の減少（ α -blocking）と BP との関連性を明らかにするために、平均加算法によって得られた α 包絡曲線と緩電位変動の頭皮上分布について検討し、 α -blocking は感覚入力系だけでなく、運動の影響も関与していると報告している。

P300 は、Sutton ら（1965）が刺激の不確かさに関する電位としてはじめて報告し、刺激の識別が困難なときや難易度の高い課題を要求すると P300 潜時が延長すること（Goodin et al., 1983）、また、被検者の確信度が高いほど P300 振幅が大きくなり（Squires et al., 1975）、刺激が被検者にとって有意性を持つときや被検者の注意・集中度が高いときに P300 振幅が高くなること（Campbell

et al., 1979; McCarthy et al., 1989) から、P300 は刺激の認知処理に関する情報処理過程を反映すると考えられている。P300 の変動は、これらの要因の操作によってその心理的意味に対応した情報処理過程に変化が生じた結果であると考えられる。そこで、ERPs の変動と課題遂行に伴う行動指標の変動を合わせて検討することによって、ヒトの随意運動に伴う中枢内情報処理過程をより詳細に検討することが可能となった。