

8章 自発的 (self-paced) な随意運動に伴う中枢内情報処理過程 -運動関連脳電位 (MRCP) を用いての検討- (研究課題 5)

1. 目的

ヒトの随意運動は、外的刺激に促されて生じるものと自己のペース (self-paced) で生じるものとに大別できる。研究課題 1 から研究課題 4 を通じて外的刺激に促されて生じる随意運動に伴う情報処理過程について考察してきた。研究課題 1 と研究課題 2 では運動開始前の準備期 (foreperiod) に着目し、中・長潜時 SEPs と CNV を指標に用いて検討したところ、準備期においては中枢の活動状態が活性化されており、脳内で機能局在的に運動開始に対する set が行われている可能性が示唆された。研究課題 3 と研究課題 4 では統合過程に着目し、反応刺激に対して実際に筋運動として動作が出現するまでの情報処理過程について P300 を用いて詳細に検討した結果、P300 は課題遂行のための方略の違いによる影響を受けて変動する一方で、出力系の反応実行過程とは直列的な関係に無く、より刺激の認知情報処理過程を反映するという結論が得られた。つまり、P300 を指標に用いた研究では、出力系の反応実行過程について考察が不十分であるため、残された課題として、出力系の反応実行過程について詳細に検討する必要がある。さらに、自発的な随意運動に伴う中枢内情報処理過程についても併せて検討する必要がある。

そこで研究課題 5 では、出力系に着目して自発的 (self-paced) な随意運動に伴う中枢内情報処理過程について運動関連脳電位 (MRCP) を指標に用いて検討した。

2. 方法

(1)被検者

被検者は右利き健康成人男性 16 名であり、内訳は剣道群 8 名 (23.13 ± 4.7 歳)、一般群 8 名 (25.00 ± 3.5 歳) であった。剣道群の剣道歴は 16.5 ± 3.8 年であった。

(2)課題

被検者は、シールドルーム内の安楽椅子に腰掛け安静を保持し、前方に固定された握力計を握り、自分のペース（self-paced）で最大握力の 20%強度を発揮する課題を行った。課題は 1) 利き手（右手）による握力発揮、2) 非利き手（左手）による握力発揮を各 70 試行行った（図 21）。試行ごとの間隔は 5~10s とし、試行中は瞬きを控えるように指示した。

(3)脳波記録

脳波（EEG）の記録は、国際 10-20 法に基づき Fz, FCz (Fz と Cz の中間), Cz, Pz, C3' (C3 の 2cm 後方), C4' (C4 の 2cm 後方) より基準電極を両耳朶連結で単極導出し、同時に眼電図（EOG）を時定数 5s で記録した。増幅器の周波数応答は 0.05~100Hz に設定し、脳波の sampling rate を 200Hz で A/D 変換し、EEG, EOG の振幅が $100\mu\text{V}$ を超えるものを off-line 分析で除外した。握力発揮開始時点を同定するため、筋電図（EMG）は前腕屈筋群より時定数 0.03s, 高域遮断周波数 1.5kHz で導出し、積分器（rectifier）を介して筋放電開始の立ち上がり時点をトリガーとして 50 試行以上の脳波の加算平均を行った。MRCP の構成成分である筋放電開始（EMG onset）前の 1.5~2.0 s から徐々に陰性方向に増大する BP と EMG onset の約 0.5 s から BP に重畳する形で急峻に陰性方向に増大する NS'（negative slope）、さらには NS'に続き EMG onset の約 50~60ms に出現する最大陰性頂点の MP（motor potential）を分析の対象とした。基線は BP の立ち上がり時点前の 500ms 間の平均電位を用いた。各成分の計測法については図 22 に示す。

3. 統計処理

各成分の振幅について、群（剣道群、一般群）×導出部位（L: FCz, Cz, C3', C4'）×課題条件（利き手動作、非利き手動作）の繰り返し測度の二元配置分散分析を行った。各要因で主効果が得られたときは対比による分析を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。BP と NS'の潜時については、Cz における値を対象として群（剣道群、一般群）×課題条件（利き手動作、非利

自己のペース (self-paced) による握力発揮課題

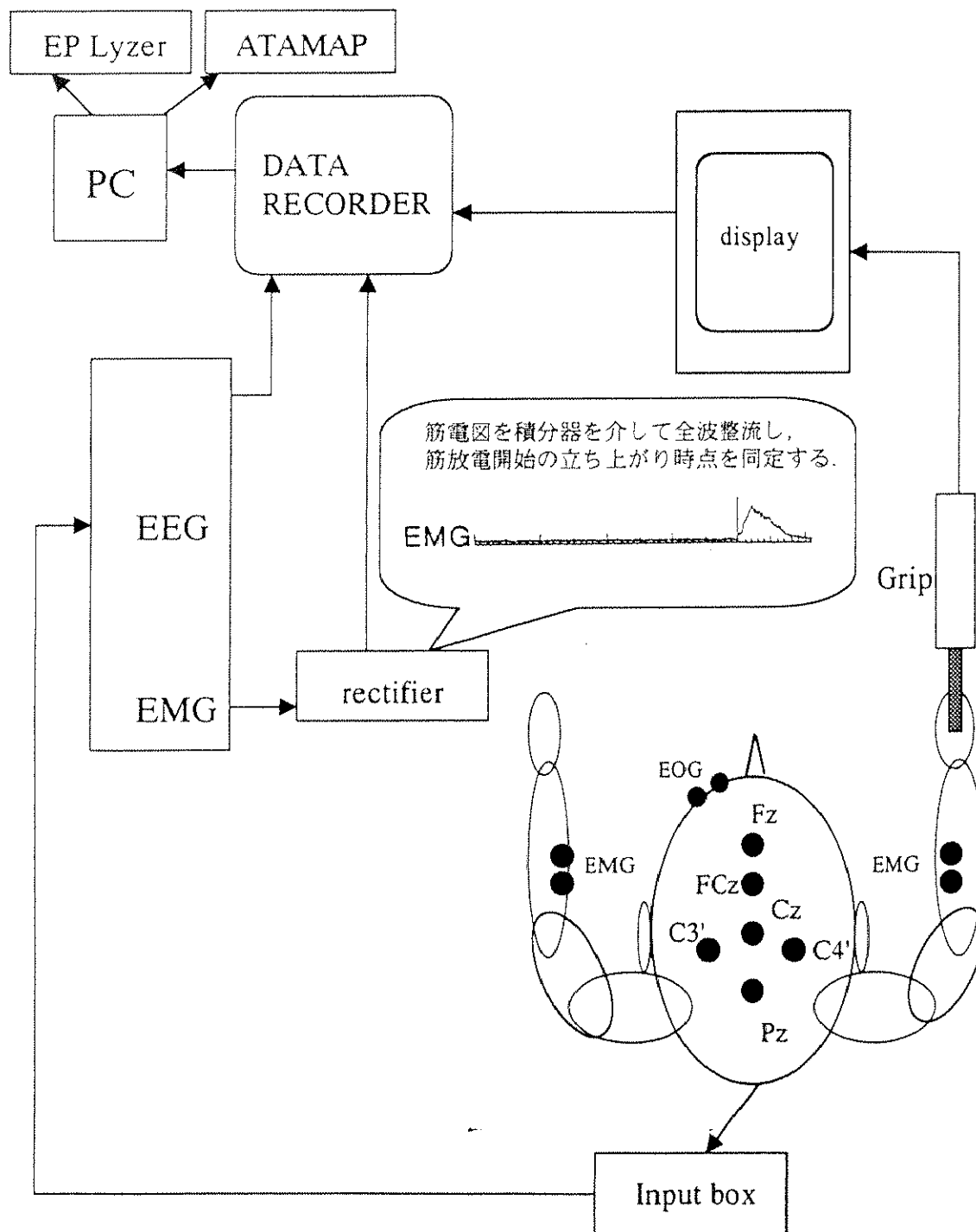


図21 実験のブロックダイアグラム

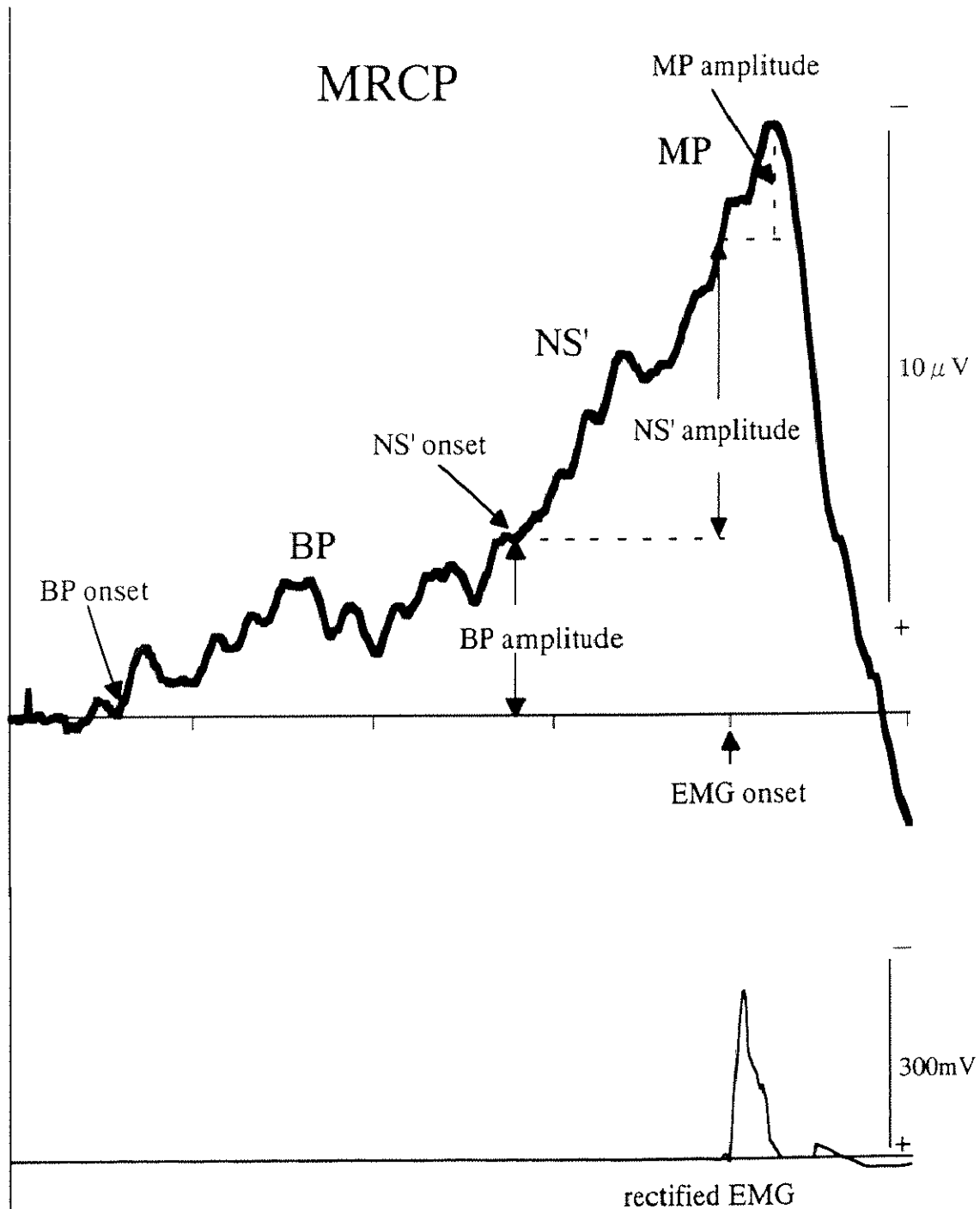


図22 運動関連脳電位 (MRCP) の計測法

BPは筋放電開始 (EMG-onset) の約1.5~2.0s前から陰性方向に徐々に増大する成分.
 NS'はBPに重畳するかたちでEMG-onsetの約500ms前からさらに急峻に陰性方向に
 増大する成分. MPはEMG-onsetの約50~60ms前から出現し, 陰性最大頂点を示す成分.

き手動作)の繰り返し測度の一元配置分散分析を行い、各要因で主効果が得られたときは対比を行い、交互作用が認められたときは下位検定を行った。分散分析を実施する際にはGreenhouse & Geisser法(G-G)による自由度の修正を行い、有意水準は5%以下とした。

4. 結果

図23に剣道群8名と一般群8名の総加算平均したMRCP波形を示す。

BP

(1)BP 振幅

BP振幅については各群で出現が確認できた6名分、つまり12名について分析を行った。BP振幅は群(剣道群, 一般群), 導出部位(L: FCz, Cz, C3', C4'), 課題(利き手動作, 非利き手動作)の各要因で差が得られず、また交互作用も認められなかった。

(2)BP 潜時

BP潜時については、群(剣道群, 一般群), 課題(利き手動作, 非利き手動作)の各要因で差が得られず、交互作用も認められなかった。

NS'

(1)NS' 振幅

NS'振幅については、群(剣道群, 一般群), 導出部位(L: FCz, Cz, C3', C4'), 課題(利き手動作, 非利き手動作)の各要因に差は得られず、また、交互作用も認められなかった。

(2)NS' 潜時

NS'潜時は課題(利き手動作, 非利き手動作)の要因で差が得られ、非利き手動作によるNS'潜時が利き手のそれよりも有意な延長を示した($F=15.906, p<0.01$, 表12)。しかし、群(剣道群, 一般群)の要因には差が得られず、ま

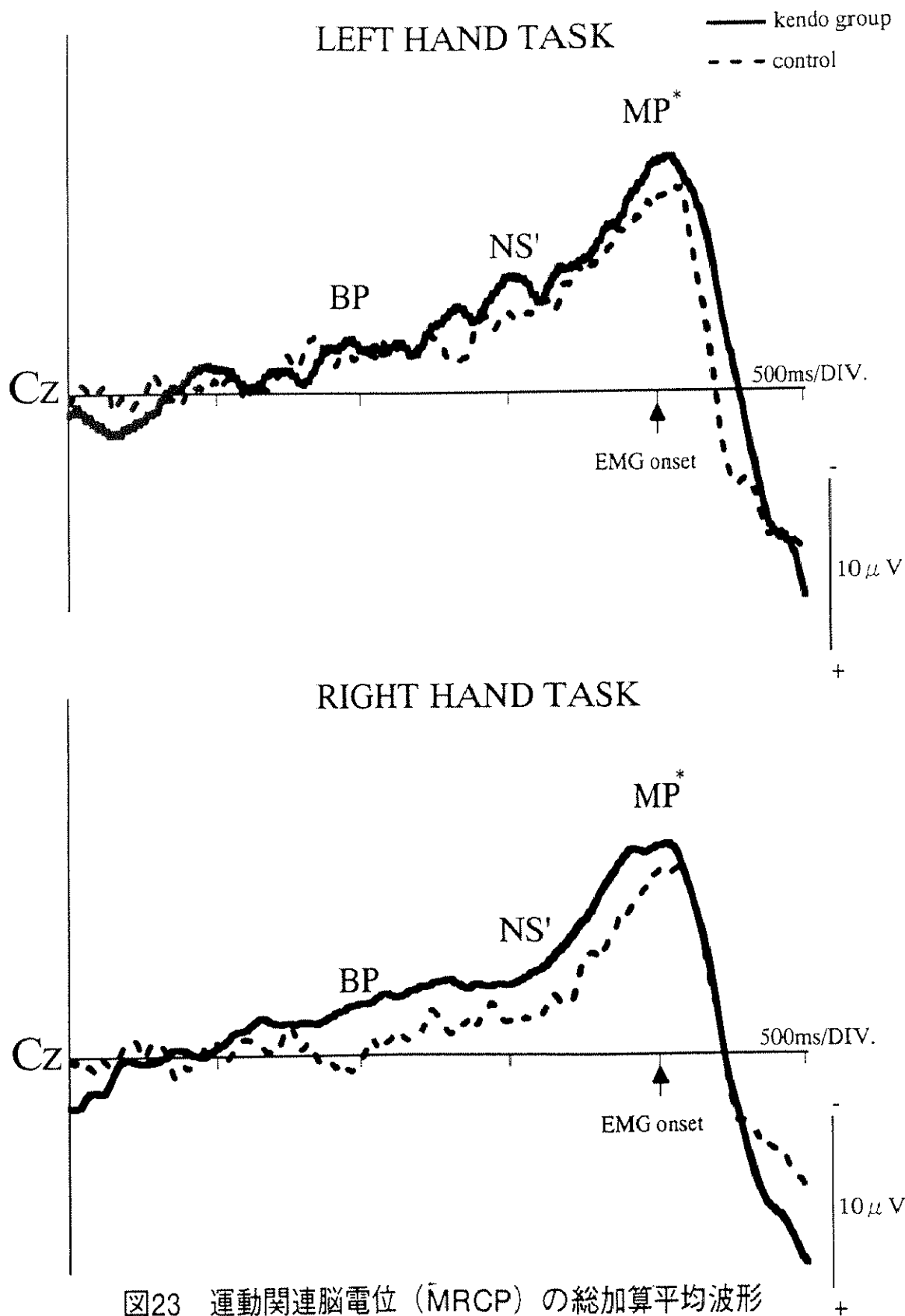


図23 運動関連脳電位 (MRCP) の総加算平均波形
 実線が剣道群 (kendo group), 点線が一般群 (control) を示す。
 EMG-onsetは筋放電開始時間を示す。MPは剣道群において有意に
 大きい値を示したが、BPとNS'に関しては剣道群と一般群との間
 に差は得られなかった。 * $p < 0.05$

表12 各MRCP成分の課題間の比較

COMPONENT	TASK		F
	LEFT	RIGHT	
BP	835.00 ± 131.8	793.21 ± 139.1	0.677
NS'	394.69 ± 141.6	286.56 ± 110.1	15.906 **

BPには利き手と非利き手による差は得られなかったが、NS'には差が得られ、非利き手動作におけるNS'潜時が利き手のそれよりも有意に延長する結果を示した。 ** $p < 0.01$

表13 各MRCP成分の群間の比較

COMPONENT	GROUP		F
	kendo	control	
BP	-1.25 ± 0.8	-0.98 ± 0.5	1.902
NS'	-1.70 ± 1.2	-1.62 ± 0.9	0.130
MP	-1.03 ± 0.6	-0.75 ± 0.6	4.512 *

BP, NS' は運動群と一般群で差は得られなかったが、MPにおいて差が得られ、剣道群が有意に大きい値を示した。 * $p < 0.05$

た，交互作用も認められなかった。

MP

(1)MP 振幅

MP 振幅については，群 ($F=4.512, p<0.05$, 表 13) と部位 ($F=3.670, p<0.05$, 表 14) の要因において主効果が得られ，剣道群が一般群よりも有意に大きい値を示した。また，部位の要因に関して対比を行った結果，MP は FCz において最大振幅を示し，他の部位よりも有意に大きい値を示した。

(2)MP 振幅と出力量との相関

利き手動作課題における出力量と MP 振幅との間に有意な正の相関関係が得られた ($r=0.800, p<0.001$, 図 24)。しかし，非利き手動作課題における出力量と MP 振幅との間には相関が得られなかった。

表14 各MRCP成分の導出部位間の比較

COMPONENT	LOCATION				F
	FCz	C3'	Cz	C4'	
BP	-1.06 ± 0.8	-1.01 ± 0.7	-1.32 ± 0.6	-1.06 ± 0.8	0.503
NS'	-1.62 ± 1.2	-1.34 ± 0.9	-2.17 ± 1.1	-1.50 ± 0.9	2.515
MP	-1.22 ± 0.8	-0.75 ± 0.5	-0.93 ± 0.6	-0.67 ± 0.4	3.670 *

BP, NS'は導出部位で差は得られなかったが, MP は補足運動野に相当するFCzで最大振幅を示し, 他の部位よりも有意に大きい値を示した. * $p < 0.05$

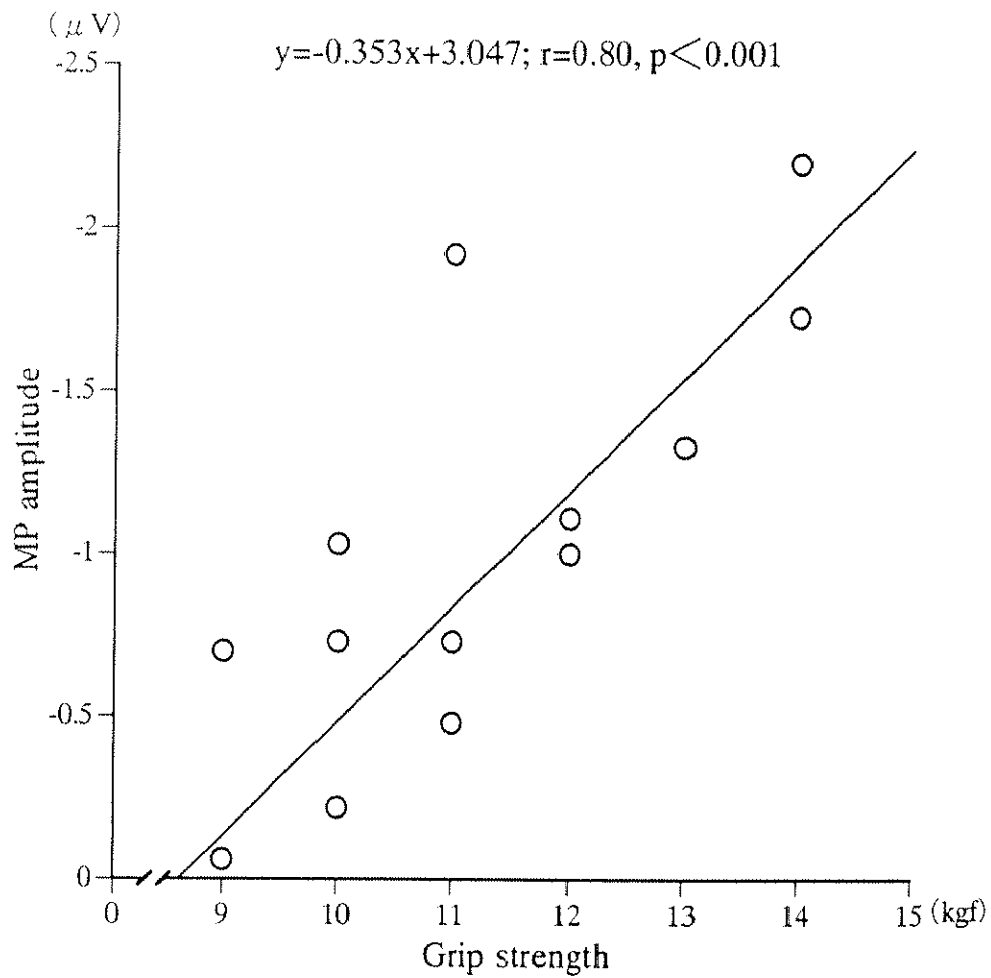


図24 MP振幅と握力発揮量（MVC20％）の相関

MP振幅と握力発揮量との間に有意な正の相関関係が認められた。

5. 考察

研究課題 5 では出力系に着目し、長期剣道鍛錬者と一般健康成人を対象に MRCP を指標に用いて自発的 (self-paced) な随意運動に伴う中枢内情報処理過程について検討した。MRCP は、随意運動開始の約 1.5~2.0 s 前から緩徐に立ち上がる BP (Kornhuber and Deecke, 1965) と運動開始の 500ms 前から BP に重畳する形でより急峻な陰性電位を示す NS'(Shibasaki et al., 1980), さらに NS'に続いて運動開始前約 150 ms に出現する運動前陽性電位 (premovement positivity: PMP, Deecke et al., 1969), 運動開始前約 50-60 ms に出現する陰性の運動電位 (motor potential: MP, Deecke et al., 1969) の 4 成分を総称して定義されている。しかし、PMP は不安定であり必ずしも出現しない (Deecke et al., 1969) といわれており、本研究においても確認できなかった。

本研究における BP 振幅と NS'振幅は、剣道群と一般群との群間、各導出部位による部位間、利き手動作と非利き手動作による課題間の各要因で差は得られなかった。BP は頭皮上に広く分布し、随意運動開始に対する中枢内準備過程を反映し (Kornhuber and Deecke, 1965), NS'は中心領野から動作肢と反対側の運動領野優位に分布し、その運動に特異的な準備過程を反映する (Shibasaki et al., 1980) と考えられている。また、BP と NS'は、運動の出力量 (Hink et al., 1983; Kristeva et al., 1990) や運動の複雑性 (Simonetta et al., 1991), 注意 (Taylor, 1978; Elbert et al., 1985) や構え (Ford et al., 1972), 動機づけ (McAdam and Seales, 1969; 岩瀬, 1973) などの心理的要因においても変動することが知られている。さらに、利き手動作と非利き手動作による BP と NS'の変動について調べた研究によると、利き手動作による NS'振幅が非利き手動作のそれよりも増大するという報告 (Kutas and Donchin, 1980; Boschert and Deecke, 1986) とそうでないとする報告 (Shibasaki et al., 1980; Tarkka and Hallett, 1990) があり、見解は一致していない。本研究では、BP 振幅と NS'振幅に関しては差が得られなかったが、非利き手動作における NS'潜時は、利き手動作のそれよりも有意な延長を示した。非利き手動作による NS'潜時が利き手動作のそれよりも延長することが先行研究において確認されており、その理由として非利き手動作の場合、早い段階から運動開始に対する準備が必要であるという見解 (Tarkka and Hallett, 1990) でほぼ一致している。

本研究の結果とこれまでの先行研究から、剣道群と一般群は運動開始前の準備期 (foreperiod) においては、同じように注意レベルを維持しながら運動開始に対する準備を行っていた可能性が考えられる。また、本研究における動作課題の内容も自発的 (self-paced) に握力発揮を行う単純な課題であり、出力量も各個人の最大握力の 20% レベルとほとんど差はないため、課題の難易度や出力量の影響も除去できると考えられる。以上のことから、準備期における中枢内準備過程の指標である BP と NS' に関しては、剣道群と一般群には差が得られなかったと考えられる。

本研究では、剣道群の MP 振幅が一般群のそれよりも有意に大きい値を示した。Deecke ら (1969) は、MP は動作肢と反対側の運動皮質上にのみ局在すると報告し、MP は運動皮質活動を反映すると結論づけている。また、Arezzo ら (1977) は、MP は皮質脊髄路細胞の活動を反映すると報告している。本研究では、利き手動作、非利き手動作ともに補足運動野 (SMA) に相当する FCz で最大振幅を示し、利き手 (右手) 動作においては、動作肢と反対側の運動皮質に相当する C3' における MP 振幅が、同側の C4' のそれよりも有意に大きい値を示した。したがって、MP 出現には動作肢と対側の運動皮質だけでなく、SMA などの運動連合野も幅広く関与している可能性が示唆された。また、利き手動作における MP 振幅と握力発揮による出力量との間に有意な正の相関関係が認められたが、非利き手動作においては相関が得られなかった。Nishihira ら (1989) は、運動課題の種類を変えることによって MP 振幅と潜伏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報告している。本研究の結果と先行研究より、剣道群は一般群よりも運動出力発揮時に運動皮質活動が活性化されており、MP は運動出力系の出力量と密接な関係にある可能性が示唆された。さらに、非利き手動作による出力量と MP 振幅が相関を示さなかったことから、MP は、正確にまたはスムーズに遂行できる運動の出力量と密接な関係にあると考えられる。

複雑な運動課題に対す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) の神経活動が増大するという報告がある。さらに Jenkins ら (1994) も、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を PET を用いた研究で報告しており、SMA における剣道群の有意な MP 振幅の増大は、長期的なトレーニングによる中枢神経系の運動適応 (Hikosaka et al., 1996; Fattapposta et al., 1996; 西平, 1998) が生じた可能性を示唆している。

ヒトの SMA は、解剖学的には Brodmann の 6 野の内側面に位置し、少なくとも 2 つの領域に分けられ (Luppino et al., 1991; Tanji, 1994)、運動野とは明らかに異なる機能局在を示す。Orgogozo と Larsen(1979)は、xenon を用いてヒトの随意運動に伴う脳血流について検討し、運動の種類にかかわらず、さらには運動の遂行を想像しただけでも SMA 領域は常に脳血流の有意な増加を示したと報告し、SMA はすべての随意運動の発現の中核、あるいは運動野よりも上位の運動中枢とみなす考えが支持されるようになった (Orgogozo and Larsen, 1979; Shibasaki et al., 1993)。特に近年、PET (Shibasaki et al., 1993; Kawashima et al., 1998) や f-MRI (Hikosaka et al., 1996; Wildgruber et al., 1997)、BP (Keller and Heckhausen, 1990; Ikeda et al., 1993) の研究により、ヒトの SMA は随意運動のプログラミングの特異的な中枢ではなく、単純な運動の際にも運動野とほぼ同等に運動準備にかかわることが明らかとなり、むしろ単純な反復運動や運動方向の自由選択といった状況において、SMA はよりその活動が増加すること (池田と柴崎, 1996) が報告されている。つまり、SMA は自発的な随意運動の運動制御に重要な役割を果たしており (Cunnington et al., 1996)、MRCP 発現に寄与していると考えられる。

本研究の結果と先行研究から、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 や運動野を含む運動連合野も積極的に関与して出現する電位である可能性が示唆された。また、運動学習によって SMA の活動が活性化すると同様に、剣道群の MP 振幅増大は、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。

6. 要約

本研究では出力系に着目し、長期剣道鍛錬者と一般健康成人を対象に運動関連脳電位（MRCPs）を指標に用いて自発的な随意運動に伴う中枢内情報処理過程について検討した。得られた結果は次の通りである。

(1)BP と NS'は、振幅、潜時ともに剣道群と一般群との間で差は得られなかった。

(2)NS'潜時は、非利き手動作において有意な延長を示した。

(3)MP 振幅は、剣道群が一般群よりも有意に大きい値を示した。

(4)MP 振幅は、SMA に相当する FCz で最大振幅を示した。

以上より、自発的な随意運動の運動開始に対する中枢内準備過程は、剣道群も一般群も同様に行われていると考えられる。一方、非利き手動作においては、NS'潜時が有意に延長することから、利き手動作よりも早期から運動開始に対する準備が行われていることが分かった。MP は、動作肢と対側の運動皮質にのみ限局するのではなく、SMA を含む運動連合野も幅広く関与して出現する可能性が示唆された。さらに、剣道群における MP 振幅が一般群よりも有意に大きい値を示したことは、長期的な運動経験による中枢神経系の運動適応が生じる可能性を示唆している。

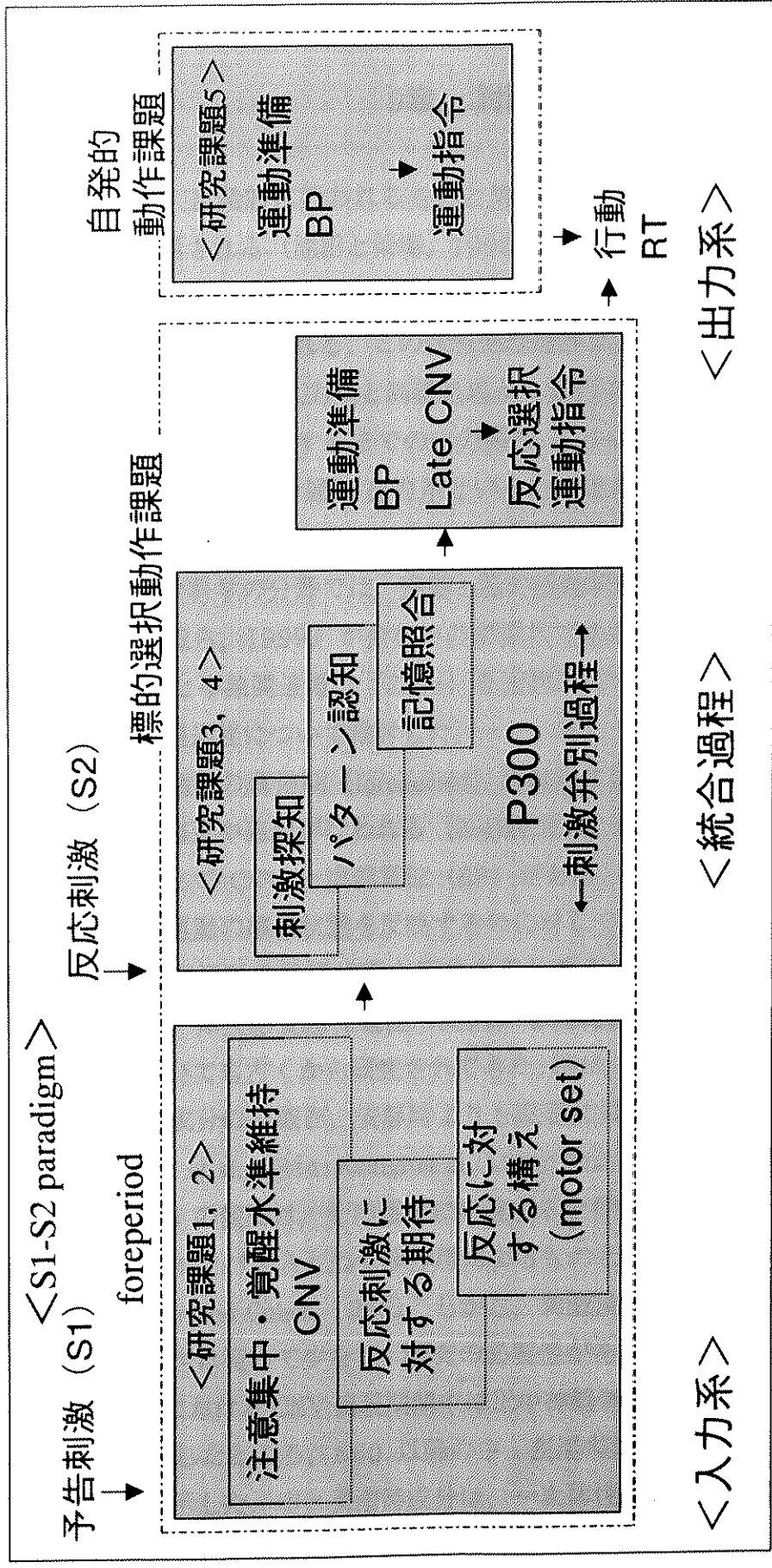


図25 本研究における研究課題のフローチャート

研究課題1から研究課題5を通じてヒトの随意運動に伴う中枢内情報処理過程について誘発電位と事象関連電位、脳波周波数解析を指標に用いて非侵襲的に検討した。準備期においては中枢の活動状態が活性化されており、脳内で機能局在的に情報処理が行われている可能性が示唆された。また、随意運動に伴う中枢内情報処理過程は、課題遂行のための方略の違いによる影響を受けて変動することが示され、さらに、長期的な運動経験によって中枢神経系において