

# 脊髄神経機構へのオペラント条件づけを用いた運動機能向上法の開発

身体運動科学研究領域

5017A032-8 末澤 摩里奈

研究指導教員：彼末 一之 教授

## 【緒言】

運動学習や運動スキルの獲得には、その学習過程によって生じる脳-神経系の適応現象や可塑的変化が必要不可欠であり、末梢感覺受容器由来の感覺情報が重要であると考えられる。皮膚反射は、皮膚感覺に由來した運動修正反応として、状況や運動課題に依存して変化し、発現する複数の筋活動は機能的かつ協働的に制御されている。本研究では、脊髄反射の一つである皮膚反射に対してオペラント条件づけを行い、1. 自発的な皮膚反射の制御が可能かどうか、さらにそれを継続した場合、2. 皮膚反射経路の興奮性に可塑的変化が生じるのかを検討した。

## 【方法】

被験者は18歳から41歳までの男性12名、女性5名を対象とした。被験者は椅子に座り、肘の角度を約90度に合わせ、右前腕部を専用の固定具で固定した。眼前70cmの位置に、フィードバックを確認するためのパソコン用モニターを設置した。EMGを右前腕部の浅指屈筋(FDS)と総指伸筋(EDC)から一対のディスポーバブル電極により、単極表面誘導法にて低域遮断周波数150Hz、高域遮断周波数3kHzにより生体アンプシステムで増幅して記録した。皮膚反射を誘発させるため、浅橈骨神経(superficialis radial nerves:SR)に約1cmの電極間距離をおいた一対の電気刺激用のディスポーバブル電極(陽極；遠位部、陰極；近位部)を貼りつけ、パルス幅200μsecで電気刺激をした。刺激強度は感覚閾値の3.5～4倍であった。

実験課題は、オペラント条件づけ(OP)セッションとコントロール(CTL)セッションの2つに分けられ、それぞれ別の日に行われた。各セッションは予備(PRE)タスク、OPタスク/CTLタスク、事後(POST)タスクで構成された(図1)。

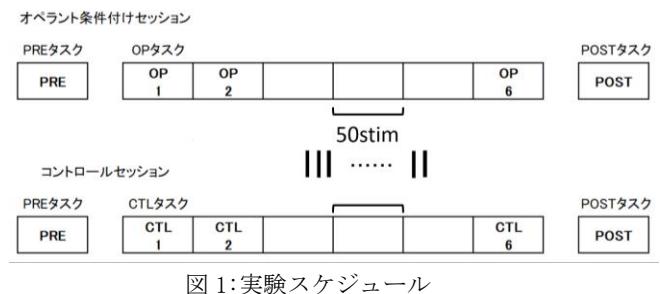


図1:実験スケジュール

PRE/POSTタスクは4.5～8秒おきに1回、合計50回刺激が加えられた。PREタスクは、対照となりうる皮膚反射振幅を記録するだけでなく、OPタスクで使用する報酬信号や背景EMGの基準振幅を定義するためにも用いられた。

OP/CTLタスクでは、予告信号の2秒後、SRに単発の電気刺激を与えた。OPタスクでは、被験者に対して、背景EMG活動が基準を超えない範囲で、反射反応を増大させるための何かしらの努力を行わせ、電気刺激から20～40ミリ秒後の皮膚反射振幅が基準値(PREのSR刺激後20～40ミリ秒間、単発刺激による振幅50回分の中央値)よりも増大するよう努力するよう指示した。その結果は、モニターにて被験者にフィードバックし、皮膚反射振幅の増大に成功した場合は1回につき10円の報酬として与えられると伝えた。各タスク終了後、被験者はアンケートに回答し、どのような努力を行ったか、と反射振幅の増大の有無とその成否に関わる自己評価を行った。

OPセッション後、3日～1週間以上の期間をあけてCTLセッションを実施した(図1参照)。CTLタスクでは、背景EMG活動を一定に保つことだけを指示した。

## 【解析】

各タスクで測定したFDSの皮膚反射振幅は、FDS EMGを全波整流し、SRへの電気刺激をトリガーに50回の加算平均処理を行った(Spike2

version 7.05、CED、UK、サンプリング周波数6kHz)。皮膚反射は、刺激後20~40ミリ秒間におけるピーク値を計測し、平均背景EMG活動を除した値を皮膚反射振幅とした。皮膚反射振幅は、PREタスクにおける皮膚反射振幅を基準に標準化した(% of PRE value)。データは平均値と標準偏差で示した。2つのセッション間での筋電図振幅の変化に対して、対応のある2要因による2元配置分散分析(Two-way ANOVA)を行った。セッション間に主効果と交互作用の両方( $p<0.005$ )があったため、各タスクにおけるセッション間の違いに対して、対応のある $t$ 検定( $p<0.05$ )を行った。

## 【結果】

図2は1名の被験者から得られたOPセッションでのFDSの皮膚反射の典型例である。標的となる20~40ミリ秒間の短潜時皮膚反射振幅は、PREタスクに比して、OP2付近から増大していることがわかる。

図3は全ての被験者から得られたOP/CTLセッション時における皮膚反射の平均振幅(標準偏差)である。OP2、OP6、POSTにおいて、有意差が認められた( $p<0.003$ 、 $p<0.016$ 、 $p<0.000$ )。また、背景EMGにおいて同様の解析を行ったが、有意な差は認められなかった( $p>0.05$ )。アンケートの回答をもとに、反射反応を増大させる努力を動作系、イメージ系、その他の3つに分類した。その結果、動作系の努力や、試した種類が多いほど、変化率が大きい傾向が見られた。

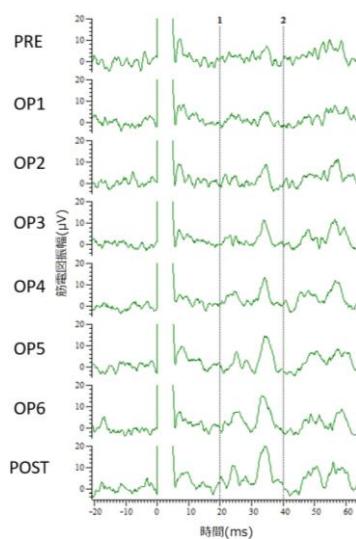


図2：筋電図振幅(皮膚反射)の波形推移

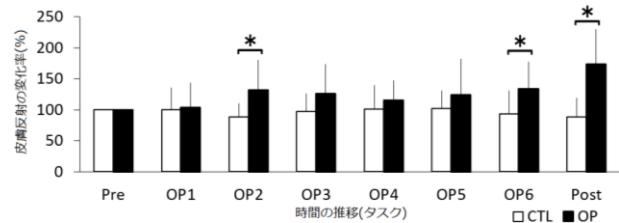


図3:各セッションにおける皮膚反射(筋電図振幅)の変化率

動作系	イメージ系
身体に力を入れる(全身、前腕etc...)	身体を動かす(ジャンプ・単純動作)イメージ
身体を一瞬回転させる	スポーツ(競技)をしているイメージ
足を動かす	手に力を入れるイメージ
音や刺激のタイミングに合わせて動く	音や刺激のタイミングに合わせて動くイメージ
画面を注視する	人に見られているイメージ
目をつぶる	ゲームでお金を取るイメージ
力を抜く・リラックスする	音楽を流すイメージ
呼吸を合わせる	など
その他	
音や刺激のタイミングに合わせて身体のある部分を意識する	
指・手を意識する	
波形が大きくなるように感じる	
背景筋電図が一定になるよう意識する	
ぱーっとする	
反応がよかったですを思い出しながらやるなど	

図4:反射反応を増大させるための努力の分類と代表例

## 【考察】

本研究で標的とした20~40ミリ秒に誘発されるFDSの短潜時帯における皮膚反射は、手指神経刺激によって誘発されるE1成分(Nakajima et al. 2006)や短潜時成分(Nielsen and Pierrot-Deseilligny 1991)と一致する反射反応であり、伝導速度やそれに関わる伝導時間等を考えても、脊髄性多シナプス反射であることが推察される(Nakajima et al. 2014)。よってSR刺激に由来する脊髄反射経路内の構成要素、例えば脊髄介在ニューロン群、運動ニューロン群およびそれに神経結合するシナプス伝達効率等において増強効果が生じたと類推できる。今後は、本研究で言及できなかった長期的な効果についての検証していく必要性がある。このオペラント条件づけによる自発的な皮膚反射の制御は、運動スキルの獲得といった運動学習や、運動機能向上、脊髄損傷者に対する神経リハビリテーションの新たなアプローチに繋がる可能性がある。

## 【結論】

脊髄介在ニューロン系を含めた皮膚反射系は、1)被験者の意思によって随意的に制御する事が可能であり(OPタスク内変化)、2)それを繰り返すことで、反射回路網に可塑的変化が生じる(POSTタスクでの変化)ことが示された。