

2019 年度 青森県立保健大学大学院博士論文

断続的な視覚フィードバックを利用した運動練習後の運動イメージが  
運動の正確さ及び脊髓前角細胞の興奮性変化と自律神経活動に与える影響

領 域 名 基礎研究・実用技術領域  
学 籍 番 号 1793001  
氏 名 福本 悠樹

指 導 教 員 名 岩月 宏泰 先生

提 出 日 2020 年 2 月 12 日

# 断続的な視覚フィードバックを利用した運動練習後の運動イメージが 運動の正確さ及び脊髄前角細胞の興奮性変化と自律神経活動に与える影響

領 域 名        基礎研究・実用技術領域  
学籍番号        1793001  
氏        名        福本悠樹  
指導教員名      岩月宏泰    先生

## I. はじめに

身体障害者の早期社会復帰のために理学療法と自主トレーニングを併用し、運動再学習を目指していく必要がある。日常生活場面での更衣動作でのボタンの留め外しのように母指と示指での正確なつまみ動作(運動の正確さ)は重要であり、これに運動イメージが与える影響について検討してきた。結果、30秒間の連続的な視覚情報付与の中での運動練習後の運動イメージは運動の正確さを維持させると分かったが、向上には至らなかった。運動練習時の視覚情報の提示は連続的よりも断続的であるべきとした報告も見受けられ、運動練習方法の選択により運動イメージ効果が向上できると考えた。そこで本研究では大項目「断続的な視覚情報付与を利用した運動練習後の運動イメージ効果」を検討する。その際、運動イメージ効果を明らかにするため、運動イメージ時にF波を記録し、脊髄運動ニューロンの興奮性変化を捉えることとした。さらに、心拍変動を周波数解析し、交感神経の変動波(LF; Low frequency)と副交感神経の変動波(HF; High frequency)を算出し、このパワーバランスとしてのLF/HF比から心臓交感神経活動も検討することにした。ただし、呼吸相の違いがF波に影響するとして報告が認められ、さらに心臓交感神経活動を評価するにあたって必要となる5分間の運動イメージが実施可能か否かについても報告がないため、小項目「呼吸の各相における運動イメージがF波に与える影響」と「運動イメージの持続時間と脊髄運動ニューロンの興奮性の関係」も設定し、以上3つの実験体系で検討した。

## II. 研究方法と対象

### 研究課題1「呼吸の各相における運動イメージがF波に与える影響」

対象は健常男性10名、安静にて2秒毎に呼気と吸気を繰り返させ同時に左母指球上の筋群からF波を記録した。次に50%最大随意収縮(MVC)のピンチ動作練習後、F波を記録しつつ運動イメージさせた。安静と運動イメージ中の振幅F/M比、F波出現頻度を比較し、さらに運動イメージ中の振幅F/M比とF波の出現頻度から安静のそれぞれの値を引き振幅F/M比・出現頻度変化量を算出、各変化量を呼気と吸気時で比較した。

### 研究課題2「運動イメージの持続時間と脊髄運動ニューロンの興奮性の関係」

内田クレペリン精神検査にて集中力や精神疲労へ問題を認めなかった健常者

13 名(男性 6 名、女性 7 名)に対し、50% MVC にピンチ力を調節させる練習を行わせた。その後、運動イメージを 5 分間実施させ、最初と最後の 1 分間にて F 波を記録、比較した。

### 研究課題 3「断続的な視覚情報付与を利用した運動練習後の運動イメージ効果」

健常者 31 名からのアンケート結果をもとに、全練習時間のうちの 40%で視覚情報付与を行う運動練習を 30 秒間与えた。練習後、運動イメージを実施させ、F 波と LF/HF 比を記録した。また運動イメージ前後には、ピンチ動作課題を与え、視覚情報なしに、ターゲットとするピンチ力を正確に発揮できるか否か検討した。

## III. 結 果

### 研究課題 1「呼吸の各相における運動イメージが F 波に与える影響」

安静と比較して運動イメージ中には、振幅 F/M 比と F 波出現頻度が増加したものの、呼気と吸気時の運動イメージ間で差は認めなかった。呼吸の各相の違いは運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性変化に影響しないことがわかった。

### 研究課題 2「運動イメージの持続時間と F 波の関係」

最初と最後の 1 分間にて F 波を記録し比較した結果、F 波出現頻度と振幅 F/M 比に差は認めなかった。対象者からの報告で、5 分間の連続した運動イメージを行っているケース(2 名)と 5 分間の中で運動イメージを繰り返し実施しているケース(11 名)の混在が明らかとなったが、いずれも運動イメージを実施していたとわかった。

### 研究課題 3「断続的な視覚情報付与を利用した運動練習後の運動イメージ効果」

安静と比較した運動イメージ中に F 波出現頻度と振幅 F/M 比、LF/HF 比は有意に増加したが、運動イメージ前後でピンチ力誤差に有意差を認めなかった。運動イメージ後にピンチ力誤差が減少した者は、安静と比較して運動イメージ中に、出現頻度が+10~34%、振幅 F/M 比が+0.03~0.47%の範囲内で増加する特徴を認めた。

## IV. 考 察

まず運動イメージを 5 分間保持させても、対象者の集中力が途切れることもなく、呼吸の各相の影響を受けないこともわかった。そのうえで、運動イメージ中に F 波出現頻度と振幅 F/M 比、LF/HF 比が増大したことは、運動イメージ中の運動関連領域の賦活が、上位運動ニューロンを介して脊髄運動ニューロンの興奮性を調節すると共に、吻側延髄腹内側部を介して心臓交感神経活動も調節したと考える。また統計学的な差を認めなかったが、過半数の被験者で運動の正確さの向上を認めたことは、先行研究と大きく異なる点であった。断続的な視覚情報付与は連続的なそれよりも有効な練習方法で、適切な運動情報を獲得しやすく、それを基に行う運動イメージも明瞭になりやすかったと考える。明瞭な運動イメージは運動の正確さを向上させやすく、脊髄運動ニューロンの興奮性増大の程度も一定に収束させたと考える。運動イメージを想起できる対象者では、視覚情報の提示方法といった至適条件を明確化することで、理学療法に応用できると思われる。

# **The Effect on Motor Accuracy During a Pinch Force Test after Motor Imagery and Intermittent Motor Practice**

Yuki Fukumoto; Student ID No. 1793001

Academic Supervisor: Professor Hiroyasu Iwatsuki

Department of Public Health Social Welfare Policy

Area of Basic Research and Practical Technique Graduate

School of Health Sciences

Aomori University of Health and Welfare

## **[Objective]**

Motor imagery can be a helpful therapeutic approach for patients who have mobility difficulty. Our previous studies have shown that actual motion can be maintained after motor imagery; however, motor imagery was not quantifiably improved by actual motion. We hypothesize that changing the nature of the motor practice and monitoring F-wave and Low frequency/High frequency ratio (LF/HF) during motor imagery while performing a pinch force test will clarify the motor imagery effect. Previous studies have reported that F-waves have been influenced by respiration. Our device for analyzing heart rate variability needs to record the heart rate for 5minutes. Therefore, we conducted three experiments in order to better understand the level of respiration caused by motor imagery, the effect of the duration of the motor imagery, and the effect of motor imagery after motor practice with intermittent visual feedback.

## **[Method]**

### **Experiment 1: Comparison of two phases of respiration caused by motor imagery**

The participants were 10 healthy subjects. Subjects were instructed to inhale and exhale naturally every 2seconds. F-waves were recorded under these conditions. Next, during a pinch force test, subjects practiced adjusting to 50% maximum voluntary contraction (MVC) of pinch force while receiving visual feedback for 30seconds. F-waves were recorded again under these new conditions.

### **Experiment 2: The effect of the duration of the motor imagery**

First, in order to select subjects able to perform for 5minutes, subjects were evaluated using the Uchida-Klepelin psychiatric examination. Thirteen subjects passed the evaluation and participated in the experiment. After doing exercise to adjust for 50% MVC of the pinch force, motor images of 50%

MVC were taken for 5 minutes, and F-waves were measured in the first and last minute.

### **Experiment 3: The effect of motor imagery after motor practice with intermittent visual feedback**

13 healthy subjects participated. First, F-waves and LF/HF audio were recorded at rest. Second, subjects practiced adjusting pinch force to 50% MVC for 30 seconds while receiving intermittent visual feedback. Third, subjects attempted adjustment pinch force at 50% MVC and the absolute error was assessed. Fourth, F-waves and LF/HF were recorded during motor imagery. Finally, subjects performed the pinch task again.

### **[Results]**

#### **Experiment 1: Comparison of two phases of respiration caused by motor imagery**

The persistence and F/M amplitude ratio increased under motor imagery conditions, more so than under resting conditions. No significant differences were observed in the variation of persistence and F/M amplitude ratio between motor imagery while inhaling nor exhaling.

#### **Experiment 2: The effect of the duration of the motor imagery**

The frequency of F-waves and the amplitude ratio of the F/M were not different in the first and last minute.

#### **Experiment 3: The effect of motor imagery after motor practice with intermittent visual feedback**

F/M amplitude ratio and LF/HF readings significantly increased during motor imagery than while at rest. The absolute error in 50% MVC did not differ before or after motor imagery. However, nine subjects' absolute error in 50% MVC decreased after motor imagery. These subjects shall increase persistence and F/M amplitude ratio during motor imagery compared with those at rest.

### **[Conclusion]**

The excitability of the spinal motor neuron during motor imagery showed no difference in either expiration nor inspiration phases, and motor imagery can be sustained for 5 min. Therefore, we are led to believe that motor imagery after motor practice with intermittent visual feedback might be of benefit in improving actual motion and increasing individual motor imagery ability.

## 目次

### 第1章 序論

I. 研究の背景.....	1
1. 理学療法士にはクライアントの早期社会復帰が求められている.....	1
2. 文献検討.....	1
II. 研究の目的と意義.....	3
III. 倫理的配慮、説明と同意.....	4

### 第2章 問題の所在 1

#### 呼吸の各相における運動イメージが F 波に与える影響

I. 目的.....	4
II. 研究の対象と方法.....	4
1. 対象.....	4
2. 方法.....	4
1) 研究の流れ.....	4
2) 脊髄運動ニューロンの興奮性評価.....	5
III. 統計学的検討.....	6
IV. 結果.....	6
1. 安静と比較した運動イメージ時の F 波変化.....	6
2. 呼気時と吸気時の F 波変化.....	6
V. 考察.....	6
1. 安静試行と比較した運動イメージ試行では脊髄運動ニューロンの興奮性が増大する.....	6
2. 運動イメージ中の呼吸相の差異は脊髄運動ニューロンの興奮性に影響しない.....	7

### 第3章 問題の所在 2

#### 運動イメージの持続時間と F 波の関係

I. 目的.....	8
II. 研究の対象と方法.....	8
1. 対象.....	8
2. 方法.....	8
1) 研究の流れ.....	8
III. 統計学的検討.....	9
IV. 結果.....	9
1. 運動イメージの最初と最後の 1 分間での F 波変化.....	9
V. 考察.....	9
1. 運動イメージの最初と最後の 1 分間で F 波は変化しない.....	9

## 第 4 章 問題の所在 3

### 断続的な視覚情報付与を利用した運動練習後の運動イメージ効果

I. 目的 .....	10
II. 研究の対象と方法 .....	10
1. 対象 .....	10
2. 方法 .....	11
1) 研究の流れ .....	11
2) 運動の正確さの評価 .....	11
3) 自律神経活動の評価 .....	12
III. 統計学的検討 .....	12
IV. 結果 .....	12
V. 考察 .....	13
1. 運動イメージは運動の正確さを維持させる .....	13
2. 運動イメージは脊髄運動ニューロンの興奮性と心臓交感神経活動を 増大させる .....	13
3. 運動イメージの明瞭性と複雑性の個人差が脊髄運動ニューロンの興奮性 変化に影響する .....	14
第 5 章 結論 .....	15
謝辞 .....	16
参考文献 .....	16

## 図目次

図 1: F 波発生 の 機序 .....	22
図 2: 研究 の 関連図 .....	23
図 3: 研究 の 流れ .....	24
図 4: F 波計測機器 と 記録条件 .....	25
図 5: F 波出現頻度 と 振幅 F/M 比 .....	26
図 6: 出現頻度 と 振幅 F/M 比 の 安静試行 と 運動イメージ試行 の 比較 .....	27
図 7: 出現頻度 と 振幅 F/M 比 変化量 の 呼気時 と 吸気時 の 比較 .....	28
図 8: 研究 の 流れ .....	29
図 9: 出現頻度 と 振幅 F/M 比 の 最初 と 最後 の 1 分間 での 比較結果 .....	30
図 10: 質問指標 .....	31
図 11: 研究風景 .....	32
図 12: 研究 の 流れ .....	33
図 13: 運動 の 正確さ の 評価指標 .....	34
図 14: 自律神経活動 の 評価 .....	35
図 15: ピンチ課題間 での 運動 の 正確さ の 比較結果 .....	36
図 16: 出現頻度 と 振幅 F/M 比 の 安静試行 と 運動イメージ試行 の 比較結果 .....	37
図 17: 50%MVC から の 絶対誤差 と 出現頻度 の 関係 .....	38
図 18: 50%MVC から の 絶対誤差 と 振幅 F/M 比 の 関係 .....	39
図 19: LF/HF 比 の 安静試行 と 運動イメージ試行 の 比較結果 .....	40



## 第1章 序論

### I. 研究の背景

#### 1. 理学療法士にはクライアントの早期社会復帰が求められている

2015年版の脳卒中治療ガイドライン<sup>1)</sup>では、不動・廃用症候群を予防し、早期の日常生活動作(Activities of Daily Living; 以下、ADL)向上と社会復帰を図るために、できるだけ発症後早期から積極的なリハビリテーション(以下、リハビリ)を行うことが強く推奨されている。医学的に可能な場合であれば、24～48時間以内に自動運動を開始するべきとしているが、実際には、重度の起立性低血圧や急性心筋梗塞がある場合など、即座に自動運動を行うことが困難であるケースも認められる。さらにリハビリ実施可能であった場合でも、脳卒中急性期では弛緩性麻痺を有する患者が多く、リハビリ実施時以外は積極的に運動を行えていないケースが多い。しかし早期社会復帰を想定した場合には、リハビリ実施時以外も積極的な運動、もしくはそれに代わる自主訓練を行えていることが望ましい。そこで、積極的な運動が困難な患者であっても、さらには理学療法士などの専門指導員がいない場であっても、安全かつ根拠に基づいた自主訓練を提供することができないかという着想に至り、実際の運動を伴わない訓練である「運動イメージ」が有用な治療手段になり得ると考えた。

#### 2. 文献検討

運動イメージは様々な定義されており、Decety<sup>2)</sup>は、運動イメージとは、運動を伴わずして脳内で目的とする運動の想起を繰り返し、脳に定着させる過程であると報告している。また Jeannerod<sup>3)</sup>は、運動イメージを運動の意図や準備といった認知過程の活性化であるとし、意識的な運動の表象であると定義した。さらに Farah<sup>4)</sup>は、運動イメージとは記憶の再生を示し、特にワーキングメモリー機能を利用したものであるとしている。この運動イメージがパフォーマンスに与える影響について Yue ら<sup>5)</sup>は、実際に筋力強化練習をおこなう身体練習群、最大筋収縮強度での小指外転運動イメージをおこなう運動イメージ群、およびコントロール群を設け、小指外転筋力に与える影響を検討した。その結果、身体練習群では30%、運動イメージ群でも22%の筋力増強効果を認めたと報告している。また、Page ら<sup>6)</sup>は、5カ月前に脳卒中発症後、片麻痺となった患者を対象に、上肢に対する運動療法と共に運動イメージも行わせたところ、Fugl-Meyer Scale や Stroke Rehabilitation Assessment of Movement といった評価項目の点数が改善し、理学療法と運動イメージの併用が上肢機能を改善させることを報告している。さらに Dickstein ら<sup>7)</sup>は、左片麻痺の患者に対し、歩行の運動イメージをおこなわせたところ、歩行速度が23%改善したと報告した。このように運動イメージがパフォーマンスを向上させる可能性が多く報告されている一方で、運動イメージが母指と示指を用いた対立運動(以下、ピンチ動作)にて発揮する筋出力を調節する能力を向上させるか否かについては報告がされていなかった。このような能力を、本研究では運動の正確さと定義することとするが、早期のADL向上と社会復帰を図るためには、この運動の正確さが重要なものとなる。その理由として、更衣動

作でのボタンの留め外しや、外出時には硬貨の使用、食事場面では箸の使用、読書でもページをめくる際など、多種多様な対象物をその目的に応じて操作するには、単にピンチ動作を行えるだけではなく、運動の中で正確な筋出力の調節が求められているからである。そこで我々は、運動イメージが運動の正確さに及ぼす影響について検討してきた<sup>8-11)</sup>。これまでの検討では、予め行う運動練習の実施時間によって、その後に実施する運動イメージ効果を左右することが明らかとなった。具体的に、連続的な視覚 feedback（以下、VF）を与える中で、30 秒間の運動練習を行わせることで、その後に行う運動イメージの実施が、獲得した運動の正確さの減衰を防ぐと報告した<sup>9)</sup>。これを臨床場面に反映させたとき、理学療法による運動の正確さ向上と、自主訓練としての運動イメージによる運動の正確さ維持、この双方の併用は早期社会復帰に繋がれると考えている。ただし、これまでの検討では運動イメージにより運動の正確さを向上させるには至っていなかった。これに関しては、被験者に対して連続的な VF を付与していたことが要因となっていると考えられた。運動イメージ効果を高めるためには、運動課題に沿った正しい運動情報を予め学習させておく必要があり、Heuer ら<sup>12)</sup>は、運動練習方法として、VF を与える頻度が断続的であるほうが運動学習に有利であることを報告している。そこで、本研究では運動練習方法の選択により運動イメージ効果が向上できると考えた。

運動イメージの実施により運動の正確さが改善した場合、その機序を神経科学的な面からも考察したいと考えた。運動発現に関連する機能的構造<sup>13)</sup>では、運動発現を観念したのち、運動発現に関連する脳部位では両方向性に各部位が関わり合い、その後に脊髄を経由し、最終的に効果器へと至ることで運動が発現される。まず、運動発現に関連する脳部位の賦活に関しては、既に多くの報告がされており、運動イメージが運動発現に関連する脳部位の興奮性を増大させることでほぼ一定の結果が得られている<sup>14-16)</sup>。一方で運動イメージが脊髄運動ニューロンの興奮性に与える影響は、興奮性が増大する<sup>17)</sup>、不変である<sup>18)</sup>、低下する<sup>19)</sup>、維持される<sup>20)</sup>と様々に報告がされており、未だ一定の結果が得られていない。これは、単に運動発現に関わる脳部位が賦活されたとしても、運動実行の最終共通路である脊髄運動ニューロンが興奮しない可能性を示唆しており、運動発現経路上でなんらかの媒介変数(促通または抑制)が存在していると考えられる。さらに我々の先行研究<sup>21)</sup>において、運動イメージによって運動の正確さが向上するケースと、そうでないケースとでは脊髄運動ニューロンの興奮性増大の程度が異なってくることも報告した。この報告では、健常者 44 名（男性 22 名、女性 22 名、平均年齢 20.8 歳）を対象とし、運動練習時間が 10 秒間、30 秒間、1 分間、2 分間の 4 群になるよう、ブロックランダム化にて無作為に群分けした。そして各群では、与えられた運動練習後に 1 分間の運動イメージを実施し、脊髄運動ニューロンの興奮性と運動の正確さに与える影響を検討した。結果、安静と比較した運動イメージ中には、どの群においても脊髄運動ニューロンの興奮性が増大した。運動の正確さは、10 秒間と 2 分間の群で低下したものの、30 秒間・1 分間の群では維持された。また、運動イメージ中から安静の振幅 F/M 比と出現頻度を引いて

振幅 F/M 比と出現頻度変化量を算出し、さらに、運動の正確さの指標であった規定値と実測値との誤差についても、イメージ後からイメージ前の誤差を引いて誤差変化量を算出した。その結果、運動イメージにより運動の正確さが維持される（運動イメージ後に誤差が大きくなる）30 秒間・1 分間の群では、10 秒間・2 分間の群より振幅 F/M 比変化量、出現頻度変化量は有意に減少していた。さらに、運動の正確さが維持・向上される者は、振幅 F/M 比変化量が 0.5～1.1%の範囲内であり、出現頻度変化量も 1.0～1.2%の範囲内であったが、低下する者のほとんどがその範囲外であった。これより、運動イメージが運動の正確さに与える効果を知り得るために、脊髄運動ニューロンでの興奮性変化、及びそれらの関係性について捉えておくことは重要であると考え。脊髄運動ニューロンの興奮性指標としては、F 波や H 反射などが挙げられるが、このうち F 波は、全ての骨格筋から導出でき、本研究にて検討したいピンチ動作での運動の正確さに関わる手部の小さな筋であっても記録が可能である。そこで本研究では、脊髄運動ニューロンの興奮性評価に F 波を採用することとした。この F 波とは、末梢の混合神経線維に最大上の電気刺激を与えることで発生した逆行性のインパルスが軸索を上行し、脊髄前角細胞にて再発火した結果、順行性のインパルスとして軸索を下行し、対応する筋にて記録される複合筋活動電位とされる（図 1）。

さて、運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性変化を捉えるにあたって、自律神経活動を合わせて評価しておくことは重要である。なぜならば、自律神経系は内臓-体性反射のように脊髄運動ニューロンと関連性が深いためである。そして運動イメージ時には、精神・心理的緊張から心拍数などが変動すると報告されている<sup>22-23)</sup>一方で、運動の正確さを向上させるための運動イメージが自律神経活動に与える影響については報告が見当たらない。運動を司る脊髄運動ニューロンは、運動発現に関わる脳部位からの下行性線維だけでなく、自律神経系からも影響されるため、未だ十分な報告を認めない運動イメージ時の自律神経活動について、心臓交感神経活動の指標である Low frequency（以下、LF）と High frequency（以下、HF）の比（以下、LF/HF 比）を用いて検討していく必要があると考えた。

## II. 研究の目的と意義

本研究の最終到達目標は、運動イメージが理学療法士による治療手段となりうるかを神経科学的に検討することである。対象とする運動課題は、一次運動野の体部位局在において多くの領域占め、脳卒中患者においても機能的障害が残存しやすい<sup>24)</sup>とされる「手」に着目した。その中でも、ADL 場面にて広く必要とされるピンチ動作における運動の正確さを運動課題とし、予め行う運動練習方法の観点より運動イメージ効果を検討していく。また、運動イメージ効果を神経科学的に検討するために、脊髄運動ニューロンの興奮性指標となる F 波を記録する必要がある。しかし呼吸相の違いが F 波に関与するという報告<sup>25,26)</sup>が見受けられたため、運動イメージ時の呼吸相の違いが F 波に影響するのかを検討しておく必要がある。また運動イメージ時には、精神・心理的緊張から呼吸数だけでなく心拍数も変動するとされているため、心臓交感神経活動を LF/HF 比にて検討すること

が必要となる。ただし、これの計測は 5 分間の心拍記録をもとに行う短時間心拍変動解析を基準にするとされているため、運動イメージを 5 分間継続して実施することが可能か否かも検討しておく必要がある。

本研究では、問題の所在として【運動発現経路における、脳・脊髄・効果器の関連性を考えた際に呼吸筋が機能的に隣接する手指筋領域にも干渉するのではないか】、【集中力が必要とされる運動イメージは、それ自体が心理的な負荷を及ぼすため、交感神経が変化するのではないか】、【運動練習方法が運動イメージに及ぼす効果を神経生理学からの観点で検討できないか】の 3 つが設定された(図 2)。

### Ⅲ．倫理的配慮、説明と同意

本研究の対象者には、ヘルシンキ宣言に基づいて、本研究の意義・目的を十分に説明し文書で同意を得た。また、青森県立保健大学大学院研究倫理委員会(承認番号；1744)と、関西医療大学大学院研究倫理審査委員会(承認番号；17-44)の承認を得ておこなった。

## 第2章 問題の所在 1

### 呼吸の各相における運動イメージが F 波に与える影響<sup>27)</sup>

#### I．目的

運動イメージと実運動は類似する神経機構を有している。このことから、運動イメージ中に呼吸数や血圧、心拍数の増加反応<sup>7-9)</sup>を認めることが報告されている。運動イメージ効果を神経科学的に検討するために、脊髄運動ニューロンの興奮性指標となる F 波を記録する必要があるが、呼吸相の違いが F 波に関与するという報告<sup>25,26)</sup>が見受けられた。したがって、運動イメージによって脊髄運動ニューロンの興奮性が変化した場合であっても、それは運動イメージの実施に伴う呼吸様式の変化によって副次的に導かれたものではなく、あくまで目的とする動作の実行に関与する筋を支配する脊髄レベルで一次的に興奮性が変化したのか否かを明確にすることが、運動イメージの臨床応用を考えた際に重要と考えた。そのため運動イメージの臨床応用を目指していく立場から、運動機能向上に関わる形で脊髄運動ニューロンの興奮性が増大するか否かを検討しておく必要がある。

#### Ⅱ．研究の対象と方法

##### 1. 対象

呼吸法の練習にて、1:1 で呼気と吸気を繰り返しおこなえた者だけを対象とし、実験中に遂行できない者は除外することと規定した。その結果、対象は神経学的に問題がなく呼吸器疾患も有さない、健常男性 10 名(19.5±0.5 歳)となった。

##### 2. 方法

###### 1) 研究の流れ

安静時の健常者の平均的な呼吸数は 1 分間に 12~18 回である。また、一般に呼気と吸気の時間比は、1.5:1 となっており、若干呼気が時間的に長いものとなっている。従って、呼気と吸気の時間的比率を調節するために、被験者が吸気の後

に息をこらえる瞬間が出現することが予測された。そして吸気や呼気の相は、息をこらえている相と比較して、手指筋に至る皮質脊髓路の興奮性が有意に増大したとの報告<sup>28)</sup>もあることから、本研究では息こらえ相が含まれないよう設定することとした。さらに岩本ら<sup>29)</sup>は、呼吸比率を調節したとしても、自由呼吸に近い呼吸リズムである吸気呼気比 1:1 条件であれば、呼吸努力を増大させることはないと報告している。したがって本研究の被験者には、2 秒毎に呼気と吸気を繰り返すことで、1 分間に 15 回の安静呼吸を自然とおこなえるようになるまでメトロノームを用いて十分に練習させた。そして、本研究中は常にこの呼吸法をおこなえていることを確認するとともに、呼吸を行うこと自体に意識が向きすぎないようにするため、一回換気量などの計測は行なわず、あくまで安静な自由呼吸を 1:1 の時間比で実施するよう指示するに留めた。また、運動イメージ時は、対象となる運動の肢位をとらせた状態でおこなうべきであるとされていることから<sup>17)</sup>、本研究では Thumb Spica Wrist (Bio Skin 社) を常に装着させ<sup>30)</sup>、母指と示指を対立肢位にて固定した。さらに、脳卒中患者は上肢機能を再獲得していかなければならないという背景を踏まえ、本研究では日常的に巧緻的な運動を行わない非利き手を対象肢として設定した。まず被験者は安静背臥位とし (安静試行)、F 波を記録した。次に、先行研究<sup>9)</sup>に従い、運動練習時間を 30 秒間設けると共に、運動イメージ課題となるピンチ力値を 50% MVC に設定した。運動練習後、2 秒毎の呼気と吸気を繰り返している被験者に対し、50% MVC のピンチ力に調節させる運動のイメージを実施 (運動イメージ試行) させ、F 波を記録した (図 3)。なお、本論文にて明記する全ての運動イメージとは、非利き手側にてピンチ動作を実施し、規定値へ力量調節を行う運動のイメージとしている。

## 2) 脊髄運動ニューロンの興奮性評価

脊髄運動ニューロンの興奮性指標である F 波は、誘発筋電計 Viking Quest (Natus Medical Inc.) を用いて記録した。F 波記録条件は、左母指球上の筋群に探查電極を、左第 1 中指骨頭背側に基準電極を、左前腕中央部に接地電極を貼付したうえで、左手関節部にて正中神経を刺激して F 波を記録した (図 4)。次に F 波計測条件は、手関節部にて左側正中神経を持続時間 0.2ms の最大上刺激 (M 波最大振幅の 1.2 倍強度) にて 30 回刺激した。また本研究では、メトロノームの音に合わせて呼気をはじめ、次のメトロノームの音にて吸気に切り替えを繰り返させることで、2 秒毎の呼気と吸気を繰り返すよう指示しており、これに同期するように刺激頻度 0.5Hz にて F 波を記録することで、呼気にて最大 15 個の F 波を、吸気でも同様に最大で 15 個の F 波を記録できるよう設定した。F 波分析項目は、1 試行の刺激回数に対して出現した F 波の個数の割合を百分率にて示す出現頻度と、全ての F 波の頂点間振幅の平均を最大 M 波振幅で除して百分率にて示す振幅 F/M 比の 2 つとした (図 5)。出現頻度に関して、図 5 の左図は実際の計測波形を示しているが、「\*」の波形は、F 波として認められた波形である。そして 30 発の刺激のうち、図内では 8 個の「\*」が認められているため、この場合の出現率は 8/30 個となり、これを百分率に変換し、26% の出現率となる。F 波の認められ

た波形の 1 つを拡大したものが図 5 の右図である。M 波の振幅に対して F 波の振幅の大きさを比率で算出し、百分率に変換すると、これが振幅 F/M 比となる。出現頻度は再発火する脊髄運動ニューロンの筋線維数とその発火頻度に影響される<sup>31)</sup>、振幅 F/M 比は再発火する脊髄運動ニューロンの筋線維数に影響される<sup>32)</sup>。なお F 波の判定は、Eisen らの報告<sup>32)</sup>に基づいて  $35\mu V$  以上とし、測定バイアスも考慮するために、最終的な F 波の判定は F 波記録に精通した者がおこなった。

### Ⅲ．統計学的検討

安静試行と運動イメージ試行で出現頻度と振幅 F/M 比をウィルコクソンの符号順位検定で比較した。また、運動イメージ試行の振幅 F/M 比と出現頻度から、安静試行のそれぞれの値を引き、振幅 F/M 比変化量と出現頻度変化量を正または負の数として算出し、これを呼気時の運動イメージと吸気時の運動イメージ間で、ウィルコクソンの符号順位検定にて比較した。統計解析には、統計解析ソフト SPSS ver.19 を用い、有意水準は 5% とした。

### Ⅳ．結果

#### 1. 安静と比較した運動イメージ時の F 波変化

安静試行と比較した運動イメージ試行では、F 波の出現頻度と振幅 F/M 比が有意に増大した。a は振幅 F/M 比、b は出現頻度である（図 6）。

#### 2. 呼気時と吸気時の F 波変化

呼気時と吸気時の運動イメージの比較では、出現頻度と振幅 F/M 比の変化量に有意な差を認めなかった。a は振幅 F/M 比変化量、b は出現頻度変化量である（図 7）。

### Ⅴ．考察

#### 1. 安静試行と比較した運動イメージ試行では脊髄運動ニューロンの興奮性が増大する

本研究では、安静試行と比較して 50% MVC のピンチ力値を発揮する運動のイメージ試行にて、脊髄運動ニューロンの興奮性指標である出現頻度と振幅 F/M 比がともに増大した。運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性について、Suzuki ら<sup>17)</sup>は、上位中枢からの下行性線維に影響されて脊髄運動ニューロンの興奮性が調節されることを報告している。そして、運動イメージ時には、一次運動野や運動前野、補足運動野などが活動することが報告されており<sup>14-16)</sup>、運動の調節および準備に関わる運動前野や補足運動野の賦活が一次運動野へと投射された結果、皮質脊髄路を介して脊髄運動ニューロンの興奮性が増大した可能性がある。ただし霊長類においては、手指の巧緻的な動作に固有脊髄路に関わり<sup>33-35)</sup>、ヒトにも固有脊髄路を介する間接的経路が存在する<sup>36)</sup>。そして、固有脊髄路を介した間接的経路は興奮性と抑制性神経細胞を含んでおり、興奮性と抑制性の双方の作用をもつとされている<sup>37,38)</sup>。つまり、脊髄運動ニューロンの興奮性は、母指

球上の筋群に対応する運動発現に関与する脳領域からの下行性線維の影響だけでなく、固有脊髓路を介した間接的経路においても調節されている可能性がある。以上より、本研究では、運動イメージの実施が運動発現に関与する脳領域を賦活することで、対応する下行性線維の入力が生じ、さらに固有脊髓路を介した間接的経路と複合的に関与しあい、結果的に脊髓運動ニューロンの興奮性が増大した可能性が考えられる。

## 2. 運動イメージ中の呼吸相の差異は脊髓運動ニューロンの興奮性に影響しない

呼吸相の違いによって運動イメージ時の脊髓運動ニューロンの興奮性に变化を与えるか否かを検討した結果、呼気時の運動イメージと吸気時の運動イメージ間で、脊髓運動ニューロンの興奮性指標である出現頻度と振幅 F/M 比の変化量に差異を認めなかった。本研究では被験者の安静呼吸が 2 秒毎におこなえていることを、胸郭および腹部の動きを目視にて注視することで十分に確認している。しかし仮に、刺激のタイミングが呼気と吸気に対応しなかった結果、呼気時の運動イメージと吸気時の運動イメージ間で、脊髓運動ニューロンの興奮性に差異を認めなかったという可能性もある。しかしこの場合であっても、呼気と吸気のそれぞれで、差異なく運動誘発電位が増大したという報告もあり<sup>25)</sup>、本研究の結果は、刺激タイミングのズレによるものではないと考える。

呼吸には、自然とおこなう安静呼吸と、随意的な呼吸が存在する。安静呼吸では、脳幹部の呼吸中枢によって呼吸が調節されている<sup>39)</sup>。一方で、随意的な呼吸時には、大脳皮質レベルの賦活が両側性に認められたことが報告されている<sup>40-43)</sup>。そして、随意的な深呼吸では、直接的に呼吸に関与しない手指筋の MEP 増大を認めたことが報告されており<sup>25,26)</sup>、これには呼吸に関わる体幹領域の活動が、体部位局在の地図において隣接する手指筋領域に促通的な影響を及ぼしたと考察されている。以上より、随意的な呼吸ではなく、あくまで安静呼吸をおこなわせた本研究では、大脳皮質のレベルでの体幹領域に積極的な活動が認められず、隣接する手指領域も促通的な影響を受けなかった結果、呼吸相によって脊髓運動ニューロンの興奮性に差異が生じなかった可能性がある。また、安静呼吸であっても呼気と吸気によって筋活動量に差異があるものと予測される。というのも吸気は横隔膜の収縮による胸腔内圧低下によってもたらされるが呼気はこの横隔膜が弛緩することで受動的に呼気がおこなわれる。したがって横隔膜が収縮するという観点では吸気こそ自動的であるが呼気は受動的であるので吸気でのみ大脳皮質レベルの賦活が認められるような予測がなされる。しかし同じく呼吸筋である肋間筋であれば吸気時のみならず呼気時にも活動が認められる<sup>44)</sup>ので呼吸相を問わず大脳皮質レベルの賦活が認められる。以上より、呼気相と吸気相における肋間筋の活動が、体部位局在の地図において体幹部での活動を賦活し、そこから隣接する手指筋領域に促通的な影響を同程度に及ぼした結果、脊髓運動ニューロンの興奮性変化に差異を認めなかった可能性がある。

### 第3章 問題の所在 2

#### 運動イメージの持続時間と F 波の関係<sup>45)</sup>

##### I. 目的

運動イメージ時には、精神・心理的緊張から呼吸数だけでなく心拍数も変動するとされている<sup>7-9)</sup>。そのため、心臓交感神経活動を LF/HF 比にて検討することにも必要となってくる。ただし、これの計測は 5 分間の心拍記録をもとに行う短時間心拍変動解析が基準とされている<sup>46)</sup>。これまでの先行研究<sup>9)</sup>の中では、運動イメージを 1 分間実施させていた。従って、運動イメージを 5 分間実施させることが、どのような効果を有するののかについては不明確である。さらに運動イメージを治療手段の 1 つとして臨床応用していくために、1 回あたりどの程度の運動イメージを実施させることが適切なのかを明確にしておく必要がある。また、5 分間の運動イメージ課題では、継続的に運動イメージを実施するなかでそれ自体に慣れることが予測される。加えて、5 分間の継続した運動イメージが困難であれば、5 分間のなかで運動イメージを一時中断した後に、再度運動イメージを開始、つまり運動イメージを繰り返し実施する被験者が出現する可能性もある。運動イメージを繰り返すことについて、運動イメージの繰り返しは、運動イメージ効果が加重され運動パフォーマンスを向上させる<sup>47)</sup>とした報告もあることから、これも 1 つの効果的な運動イメージ方法であると考えられる。そこで本研究では、運動イメージを 5 分間継続して実施させた際に、1 分間と比較して脊髄運動ニューロンの興奮性にどのような変化が生じるのかを F 波から検討した。

##### II. 研究の対象と方法

###### 1. 対象

本研究では 5 分間と長い時間の運動イメージを実施させるため、被験者にはある程度の集中力が必要とされることが予測される。運動イメージが実施できていることが必須要件となる本研究では、集中力の欠陥を認める被験者を除外する必要がある。従って当初の対象者は健常者 14 名であったが、内田クレペリン精神検査の結果が U 字型とならず後半に作業量が減少した者は集中力や精神疲労の耐性に問題があると判定し<sup>48-55)</sup>、1 名を除外して解析対象者は医療系大学生 13 名（男性 6 名，女性 7 名，平均年齢  $21.7 \pm 0.5$  歳）となった。

###### 2. 方法

###### 1-1) 研究(本試験)の流れ

本研究での運動課題は、我々の先行研究<sup>9)</sup>に従い、50% MVC のピンチ動作課題とした。まず被験者には、50% MVC にピンチ力を調節させる練習を 30 秒間実施させた。そして、これにより得られた運動情報を糧に運動イメージを 5 分間実施させた。その際、運動イメージ中の初めの 1 分間と最後の 1 分間は共に F 波を記録し、脊髄運動ニューロンの興奮性を比較検討する事とした（図 8）。F 波計測機器や記録条件、刺激条件は先研究<sup>27)</sup>と同様である。



## 1-2) 研究(追加試験)の流れ

運動イメージを出来るだけ長く実施させるよう指示したが、運動イメージが継続できなくなった場合は、挙手を行わせることで、継続的に実施可能な運動イメージ時間も検討した。そして、運動イメージが一時中断するケースに対して、平均実施可能時間を算出し、その値に最も近かった被験者に対して、最初と最後の1分間だけでなく、その間の3分間目と4分間目でもF波の計測を行った。F波記録条件や刺激条件、分析項目は、本試験と同様にした。

## Ⅲ．統計学的検討

本研究では、5分間継続して実施させる運動イメージ中の、最初の1分間と最後の1分間にて記録する出現頻度と振幅F/M比を、ウィルコクソンの符号順位検定で比較した。統計解析には、統計解析ソフトSPSS ver.19を用い、有意水準は5%未満とした。

## Ⅳ．結果

### 1. 運動イメージの最初と最後の1分間でのF波変化

#### 1-1) 本試験の結果

運動イメージの最初の1分間と最後の1分間を比較した際、出現頻度と振幅F/M比は差を認めなかった。aは振幅F/M比、bは出現頻度である(図9)。また内省報告より、5分間の運動イメージを実施可能な被験者は13名中2名であった。

#### 1-2) 追加試験の結果

内省報告より、5分間の継続した運動イメージが困難となった被験者11名の運動イメージ平均実施可能時間は、3分32秒であった。そして、平均実施可能時間に最も近く運動イメージを中断した被験者は、出現頻度が50%(安静)、77%(1分間目)、73%(2分間目)、56%(3分間目)、77%(4分間目)、77%(5分間目)であり、振幅F/Mが、1.2%(安静)、2.2%(1分間目)、2.7%(2分間目)、1.7%(3分間目)、2.2%(4分間目)、2.2%(5分間目)であった。

## Ⅴ．考察

### 1. 運動イメージの最初と最後の1分間でF波は変化しない

運動イメージ開始1分後と5分後の比較において、振幅F/M比と出現頻度の双方が統計学的な差異を認めなかった。これはいずれも5分間の中では継続または繰り返しで5分後も運動イメージを実施できていたためと考える。そして先研究と同様に、運動イメージは、運動発現に関与する脳領域を賦活させ、対応する下行性線維の入力が生じ、さらに固有脊髓路を介した間接的経路と複合的に関与しあい、結果的に脊髓運動ニューロンの興奮性を増大させたと考えられる。

また、本研究では、50%MVCで5分間の運動イメージを指示したが、内省報告より、13名中11名で5分間の運動イメージが継続できず繰り返し実施していた

ことがわかった。そしてこの 11 名から得た運動イメージ平均実施可能時間は 3 分 32 秒であり、運動イメージ中断のタイミングがこれに最も近かった被験者に対して、運動イメージ開始 1 分後と 5 分後だけでなく、その間の 3 分後と 4 分後でも F 波の計測を行った。その結果、出現頻度と振幅 F/M 比は、いずれもが途中 3 分間目に低下し、安静と似た数値となっていた。これに関して、運動イメージ中に脊髄運動ニューロンの興奮性が増大するが、運動イメージが実施されなくなると、すぐにその興奮性が低下する<sup>17)</sup>という報告より、運動イメージ開始 3 分後で、継続した運動イメージが実施出来なくなり、一度中断された後に、最低でも運動イメージ開始 4 分後で運動イメージが再開されていた可能性がある。

## 第4章 問題の所在 3

### 断続的な視覚情報付与を利用した運動練習後の運動イメージ効果<sup>56)</sup>

#### I. 目的

先行研究では、発揮ピンチ力値が数字にて表示されるディスプレイを注視させながら 30 秒間の運動練習を行わせることで、その後に行う運動イメージの実施が、獲得した運動の正確さを維持させると報告した<sup>9)</sup>。しかし向上には至らず、その要因としては、運動練習時の VF の与え方に問題があったのではないかと考えた。我々はピンチ力値が表示されるディスプレイを注視させて運動練習させていたため、被験者に対しては連続的な VF を付与していたこととなる。Heuer ら<sup>12)</sup>は、同様に実運動における運動練習にて、VF を与える頻度が断続的であるほうが運動学習に有利であると報告している。そこで本研究では、運動イメージ実施前に行う実運動での運動練習実施の際に、VF を断続的に付与する形で実施させておくことで、その後に行う運動イメージが運動の正確さを向上させることができるのではないかと考えた。また、ここまでの検討で、運動イメージを 5 分間保持させても、対象者の集中力が途切れることなく、呼吸の各相の影響も受けないことが明らかとなった。そこで本研究では、運動イメージを 5 分間実施させ、脊髄運動ニューロンの興奮性指標である F 波と心臓交感神経活動を反映する LF/HF 比を記録し、運動イメージ効果を神経生理学の観点から検討した。

#### II. 研究の対象と方法

##### 1. 対象

対象は健常者 13 名（男性；9 名、女性；4 名、平均年齢； $21.2 \pm 1.6$  歳）であった。対象者すべてに対して、運動イメージ想起能力を評価する質問指標である The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (以下、KVIQ)<sup>57)</sup>のうち、本研究の運動課題と一致する「項目 5Kd. 母指と他指の対立」を抜粋し適用した。抜粋した項目でのイメージ課題は、母指と他の 4 指とのピンチ動作であり、イメージの感じ方として「運動しているのと同じくらい、しっかりと感じる」であれば判定 5、「しっかりと感じる」は判定 4、「ある程度感じる」は判定 3、「少し感じる」は判定 2、「感じない」は判定 1 として、被検者自身で判定してもらう。この質問指標において高得点の者は、高い運動イメージ想起能力を有すると判断される。ま

た、対象者が運動イメージ内容をどれだけ実際の運動に反映できたかも明らかにするために、官能性尺度を用いた評価指標も作成し用いた（図 10）。

## 2. 方法

### 1-1) 研究(予備試験)の流れ

Ikegami ら<sup>58)</sup>は、正確に標的間を反復して往復させる律動的な運動課題を与えた際に、標的と実際に動作を実行した結果の到達点との間の運動誤差を算出し、これを指標としたうえで、どのような運動学習が運動誤差減少に有効であるかを検討している。この研究では、標的間の 1 往復をもって 1 サイクルとした際に、5 サイクル毎に 1 度の VF を与え続けていくことで、運動誤差は小さくなったことを報告している。これより運動練習時に提示する視覚情報は断続的である方が有利である可能性は明らかとなっているが、本研究とは運動課題が異なっていた。そのため、どのような頻度で断続的に VF を与えるのか、つまり連続的に VF を付与する先行研究と異なり<sup>9)</sup>、どれくらいの頻度で VF を与え、そして VF を遮断するのか、これについて本試験とは異なる健康者 31 名（男性；16 名、女性；15 名、平均年齢； $21.9 \pm 1.7$  歳）に対して予備試験を実施した。具体的に 10 秒間の運動練習時間のうち、VF を 1/5（視覚情報あり：2 秒/視覚情報なし：8 秒）、2/5（視覚情報あり：4 秒/視覚情報なし：6 秒）、3/5（視覚情報あり：6 秒/視覚情報なし：4 秒）、4/5（視覚情報あり：8 秒/視覚情報なし：2 秒）の頻度で与え、その際にどの頻度で VF を提示された場合が、最も運動学習を行いやすいかアンケートを実施した。

### 1-2) 研究(本試験)の流れ

安静状態を 5 分間与え、脊髄運動ニューロンの興奮性と自律神経活動を評価した（安静試行）。次に、断続的に VF を与える中で運動練習を行わせた。運動練習時間は、先行研究<sup>9)</sup>において、運動イメージ前に実施する運動練習時間が 30 秒間で充分と報告したことから、本研究においても 30 秒間とした。視覚情報の付与は、予備試験結果に従い、それを 3 セット繰り返すことで 30 秒間の運動練習時間を設定した。また、視覚情報の提示は、ピンチメーター Digital indicator F340A (Unipulse Inc.) のピンチ力表示部を注視させ付与した（図 11）。運動練習直後、視覚情報を完全に遮断し、発揮ピンチ力を 50% MVC に調節するよう指示し、運動の正確さを評価した（ピンチ課題 1 回目）。その後、50% MVC へとピンチ力値を調節させる運動イメージを 5 分間実施し、脊髄運動ニューロンの興奮性と自律神経活動を評価した（運動イメージ試行）。運動イメージ後、ピンチ課題 1 回目と同様の課題を与え、運動の正確さを再評価した（ピンチ課題 2 回目）（図 12）。

### 2) 運動の正確さの評価

対象者の運動の正確さを評価する指標として、測定された値との差を絶対値で示した 50% MVC からの絶対誤差 (kgf) を採用した。この指標は、対象者の発揮ピンチ力値から規定値として設定している 50% MVC 値を引くことで算出される誤差の値を、絶対値に変換することで算出した。絶対値に変換することに関して、

厳密には発揮ピンチ力が規定値を上回り「正の誤差」が生じた場合と、発揮ピンチ力が規定値に至らずに「負の誤差」が生じた場合では意味合いが異なるものと考えるが、本研究では発揮ピンチ力が規定値に調節できる能力がイメージ前後どのように変化をするかを検討している。従って本研究では、「正の誤差」も「負の誤差」も双方が発揮ピンチ力を規定値に調節できる能力を反映していると考えている。毎度の計測データのバラつきも考慮して計測は3度行うこととし、この中で最も成績の良かったものを採用した。ピンチ課題1回目と2回目のピンチ力は、筋電図収録ソフト Vital Recorder2 (KISSEI COMTEC Inc.)にて計測し、その後、多用途生体解析システム BIMUTAS-Video (KISSEI COMTEC Inc.)を用いてピンチ力値を解析した。運動イメージ前に実施するピンチ課題1回目の成績と、運動イメージ後に実施するピンチ課題2回目の成績を比較することで、運動イメージに伴う運動の正確さの変化を評価した。また、ピンチ課題2回目から1回目の50%MVCからの絶対誤差を引くことで、50%MVCからの絶対誤差変化量を算出し、脊髄運動ニューロンの興奮性変化との関係も確認した。

### 3) 自律神経活動の評価

心拍変動の周波数解析において、LFは低周波領域を表し、0.02~0.15Hzの帯域で交感神経と副交感神経の両方の活動を示している。一方で、HFは高周波領域を表し、0.15~0.50Hzの帯域で副交感神経の活動を示す。従ってLFをHFで除すことで求まるLF/HF比は、LFとHFのパワー値の比であり、心臓交感神経活動を表す指標とされている。このLF/HF比は、ハートリズムスキャナーPE (Ark Trading Pacific 社製)を用いて、脈波センサーを左耳垂に装着することで、記録し評価した(図14)。また、自律神経バランステストは安静状態での5分間の心拍記録をベースとする短時間心拍変動解析を基準としている<sup>59)</sup>ため、それを採用した。また、これらパワー値には時刻依存性の変動がみられるとされており、LF/HF比は起床後の1から2時間は急激な上昇を認める可能性が報告されている<sup>59)</sup>。従って、計測は午前中を避け、午後に実施することとし、さらに対象者には、計測直前には、激しい運動や喫煙及び飲食なども避けるよう指示した。

## Ⅲ. 統計学的検討

50%MVCからの絶対誤差は、ピンチ課題1回目と2回目の2群間にウィルコクソン符号順位検定を用いて比較した。出現頻度及び振幅F/M比とLF/HF比は、安静試行と運動イメージ試行の2群間にウィルコクソン符号順位検定を用いて比較した。有意水準はいずれも5%未満とし、統計学的解析ソフトにSPSS ver.19を用いた。

## Ⅳ. 結果

### 1-1) 予備試験の結果

運動練習を行いやすいVFの付与頻度に関して、2/5の割合が良いとするものが、全体の約74%(23/31名)であったため、10秒間に対して4秒間の視覚情報提

示を行い、それを 3 セット行わせることで、合計で 30 秒間の運動練習を設定することとした。

## 1-2) 本試験の結果

運動イメージ前に実施したピンチ課題 1 回目と、運動イメージ後に実施したピンチ 2 回目との間で、50% MVC からの絶対誤差に差を認めなかった (図 15)。そして、運動イメージ後に 50% MVC からの絶対誤差が小さくなる者を、運動の正確さが向上したと定義したときに、運動の正確さが向上する者は 9 名 (全体の 69%) であった。運動の正確さが向上する者は、運動イメージ想起能力の指標である KVIQ が 3~5 であり、運動イメージ内容の実運動への反映度を示す官能性尺度が、4.7~9.7cm であった。一方で運動の正確さが低下する者の KVIQ は 3 以下で、運動イメージ内容の実運動への反映度を示す官能性尺度が、2.6~6.9cm であった。次に、F 波出現頻度と振幅 F/M 比は、安静試行と比較した運動イメージ中にて有意に増加を認めた (図 16)。また運動の正確さが向上する者に限って、出現頻度変化量が +10~34% (図 17)、振幅 F/M 比変化量が +0.03~0.47% (図 18) となる特徴を認めた。一方で、運動の正確さが低下する者に関しては、出現頻度・振幅 F/M 比変化量が共に、上記の増加幅から逸脱する特徴を認めた。最後に、LF/HF 比は、安静試行と比較した運動イメージ中にて増加を認めた (図 19)。

## V. 考察

### 1. 運動イメージは運動の正確さを維持させる

本研究の運動課題は、等尺性収縮にて目標値に発揮ピンチ力を調節することである。しかし、この課題特性として、等尺性収縮における力の強さの情報は、その情報を保持しようとしても 5 秒程が限界であり、それ以降は自然減衰していくとされている<sup>60)</sup>。従って、運動の正確さは時間経過と共に低下していくものと予測される。しかし、本研究では、運動イメージ後に運動の正確さの低下を認めず、これは我々の先行研究<sup>9)</sup>と同様に、運動イメージの実施が運動の正確さの低下を防いだものと考ええる。ただし、我々の先行研究<sup>9)</sup>との違いは、有意差こそ認めなかったものの、被験者の過半数で運動の正確さが向上する特徴を認めたことである。先行研究<sup>9)</sup>では、運動イメージ実施前に予め行う運動練習にて、連続的に視覚情報を付与していた。従って、Heuer ら<sup>12)</sup>の報告通り、断続的な VF は連続的な VF よりも有効な運動練習方法であって、適切な運動情報を獲得しやすく、それを基に行う運動イメージも、明瞭なものとなりやすかった結果、本研究では過半数の被験者にて、運動イメージが運動の正確さを向上させたと考ええる。

### 2. 運動イメージは脊髄運動ニューロンの興奮性と心臓交感神経活動を増大させる

安静試行と比較した運動イメージ中では、脊髄運動ニューロンの興奮性変化の指標である F 波出現頻度と振幅 F/M 比が有意に増加していた。いずれの指標も安静試行と比較した運動イメージ中にて増加をしていたが、これには実運動後で

あったことが影響しているとも考えることができる。本研究と同様に、運動イメージ時の脊髄運動ニューロンの興奮性変化を F 波にて検討している報告<sup>61,62)</sup>では、実運動の影響を取り除くために 3 分間から 5 分間の休息を挟み、運動イメージを実施させている。本研究でも、実運動の影響を取り除くため、5 分間の休息を与え、その後に運動イメージへと移行していたため、実運動からの影響ではなく、運動イメージの実施が F 波出現頻度と振幅 F/M 比に影響を与えたものと考ええる。また、連続的な VF を与えた先行研究<sup>9)</sup>と本研究とでは、脊髄運動ニューロンの興奮性変化の指標である F 波出現頻度と振幅 F/M 比の変化の仕様は同様に、どちらも安静試行と比較した運動イメージ中にて増大を認めている。これに関しては、先述した 2 論文と同様に、運動発現に関与する脳領域を賦活することで、対応する下行性線維の入力が生じ、さらに固有脊髄路を介した間接的経路と複合的に関与しあい、結果的に脊髄運動ニューロンの興奮性が増大した可能性が考えられる。

次に、安静試行と比較した運動イメージ中では、心臓交感神経活動の指標である LF/HF 比も増加していた。これに関して、運動イメージ時に運動関連領域が賦活する<sup>14-16)</sup>ことに加え、吻側延髄腹内側部は網様体脊髄路の一部であるとした報告<sup>63)</sup>がある。さらに、Kerman ら<sup>64)</sup>は、吻側延髄腹内側部は交感神経活動と運動調節の双方に関与するとし、文野ら<sup>65)</sup>はピンチ動作の運動イメージ時に LF/HF 比が増加すると報告している。また運動イメージ中の LF/HF 比の増加についても、実運動が影響していた可能性が考えられる。これに関して野村ら<sup>66)</sup>は、長時間の運動負荷後の自律神経活動の変動について心拍変動の観点より検討を行っている。その中で、運動負荷直後であっても LF/HF 比は運動負荷前と統計学的な差異を認めなかったとしている。5 分間の休息を設けている本研究では、安静試行と比較した運動イメージ中の LF/HF 比の増加は、実運動からの影響ではなく、やはり運動イメージにより誘発されたものと考えられる。従って、運動イメージの実施による運動関連領域の賦活は、皮質脊髄路を介して脊髄運動ニューロンの興奮性を高めるだけでなく、延髄にある心臓交感神経線維へも投射し、心臓交感神経活動の指標である LF/HF 比も増加させたのではないかと推察している。

### 3. 運動イメージの明瞭性と複雑性の個人差が脊髄運動ニューロンの興奮性変化に影響する

今回、運動の正確さが向上する者の多くは、F 波出現頻度が 10～34%増加し、振幅 F/M 比が 0.03～0.47%増加する特徴があった。一方で、運動の正確さが向上しない者の多くは、増加幅がその範囲外であった。このように運動イメージ効果を認めるケースと、認めないケースによって脊髄運動ニューロンの興奮性変化が異なっていた。運動イメージ内容を実運動へ反映できたか否かを官能性尺度にて評価した結果、運動の正確さが向上する者において、著明に低値を示す者は認められなかった。従って、運動イメージ効果を有するか否かを分けたのは、運動イメージの実施状況に左右されたのではないかと考えた。そもそも運動イメージ効果には個人差があるとされ、その効果に違いを認めることや、時には効果を認め

ない場合も報告されている<sup>67)</sup>。そのため、運動イメージ効果を媒介する変数があることが予測され、この媒介変数として運動イメージの明瞭性や統御可能性などが挙げられている<sup>68)</sup>。明瞭性とは、学習者が課題についていかに鮮明なイメージを描けるかであり、統御可能性とは、描いたイメージをいかに操作・変換できるかである。本研究では、運動の正確さが向上する者の KVIQ は 3~5 と高く、運動の正確さが低下する者は 3 以下と低い結果であった。これより運動の正確さが向上する者は、より明瞭な運動イメージを行えていた可能性がある。大石ら<sup>18)</sup>は、鮮明なイメージ想起が可能なスピードスケート選手では、安静試行と運動イメージ中の H 反射振幅に差異を認めなかったとしている。さらに、野村ら<sup>69)</sup>は、運動イメージの明瞭性が高い者では、安静試行と運動イメージ中において振幅 F/M 比に差異を認めなかったが、明瞭性の低い被験者では、安静試行と比較した運動イメージ中に振幅 F/M 比が増加したとしている。以上より、運動イメージの実施が効果を有し、運動の正確さが向上した者は、明瞭な運動イメージを実施出来たので、脊髄運動ニューロンの興奮性が高まりすぎずにある程度の興奮性に収束し、一方で明瞭に運動イメージを実施できなかった者は、脊髄運動ニューロンの興奮性が高まりすぎてしまったのではないかと考える。本研究では、安静と比較した運動イメージ中にて、脊髄運動ニューロンの興奮性が有意に増大しているが、これは明瞭な運動イメージを実施できた者だけでなく、それ以外の者も対象者として含まれていたことが一因と考える。また、運動の正確さを向上できなかった者の一部で、脊髄運動ニューロンの興奮性があまり増加しないケースも認めた。これに関して、前田ら<sup>70)</sup>は、運動イメージをおこなう際、その運動イメージの難易度が高く、想起することが難しい場合には、脊髄運動ニューロンの興奮性は変化しない可能性を示唆している。従って、本研究での運動課題を想起するにあたり、その課題が被験者にとって難易度の高すぎる運動イメージであったがために、脊髄運動ニューロンの興奮性は増加せず、運動の正確さを向上させるにも至らなかった可能性がある。

## 第 5 章 結論

運動イメージの実施はその運動に関与する筋に対応する脊髄レベルの興奮性増大をもたらす。運動イメージの実施による脊髄運動ニューロンの興奮性増大の程度は安静呼吸における呼吸相によっては変化しなかった。したがって運動イメージの実施に伴う脊髄レベルでの興奮性増大は呼吸様式の変化によって副次的に導かれたものではなく一次的な要因によって動作に関与する筋に対応する脊髄レベルの興奮性が高まった可能性がある。また、運動イメージにより脊髄運動ニューロンの興奮性増大を求めていく場合には、5 分間の運動イメージ実施が、1 分間の運動イメージ実施と同程度に神経機能の賦活が得られる可能性がある。しかし、あくまで 5 分間の継続した運動イメージを実施出来ている者は少なく、不可能な者は繰り返し運動イメージを実施している可能性がある。そして、5 分間の継続した運動イメージが不可能であった場合でも、最初と最後の 1 分間では運動イメージを実施出来ていたことがわかった。いずれにしても、運動イメージを継

続または繰り返し実施する際には、対象者にはある程度の集中力や精神疲労への耐性が必要とされる可能性があり、内田クレペリン精神検査などで、対象者を予め評価・把握しておく必要がある。さらに運動イメージの実施は、脊髄運動ニューロンの興奮性のみならず心臓交感神経活動を高める可能性も認められた。そして、運動イメージによって運動の正確さが向上した者は、出現頻度が10～34%増大し、振幅F/M比が0.03～0.47%増大する特徴を認めていた。運動イメージ前に運動練習を実施させておくことは有効で、特に視覚情報の提示を断続的にする中で運動練習を実施させることで、継続的に視覚情報の提示を行う場合よりも、運動課題を明瞭にイメージしやすくなり、明瞭にイメージできたケースでは、運動イメージが効果を有し、運動の正確さを向上させる可能性がある。

## 謝辞

本論文の作成にあたり、青森県立保健大学大学院 健康科学研究科 基礎研究・実用技術領域の岩月宏泰教授には、格段たるご指導とご鞭撻を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

また、青森県立保健大学大学院 健康科学研究科 基礎研究・実用技術領域の尾崎勇教授、神成一哉教授には、主査・副査として懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りましたこと、心より感謝申し上げます。

最後に、本研究の遂行にあたり、多大なるご協力を賜りました青森県立保健大学の教職員の皆様に深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本脳卒中学会脳卒中ガイドライン委員会：脳卒中治療ガイドライン 2015 急性期リハビリテーション理論と応用，協和企画，277-278，2015.
- 2) Decety J: The neurophysiological basis of motor imagery, Behavioural Brain Research, 77, 45-52, 1996.
- 3) Jeannerod M: The representing brain: neural correlates of motor intention and imagery, Behav Brain Sci, 17, 187- 245, 1994.
- 4) Farah MJ: The neural basis of mental imagery, Trends Neurosci, 12, 395-399, 1989.
- 5) Yue G, Cole KJ: Strength highers from of motor program: comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions, Journal of Neurophysiology, 67, 1114-1123, 1992.
- 6) Page SJ, Levine P, Sisto SA, Johnston MV: Mental practice combined with physical practice for upper-limb motor deficit in subacute stroke, Journal of Physical Therapy, 81, 1455-1462, 2001.
- 7) Dickstein R, Dunskey A, Marcovitz E: Motor imagery for gait rehabilitation in post-stroke hemiparesis, Journal of Physical Therapy, 84, 1167-1177, 2004.



- 8) Fukumoto Y, Bunno Y, Suzuki T: Effect of motor imagery on excitability of spinal neural function and its impact on the accuracy of movement-considering the point at which subjects subjectively determine the 50%MVC point, *J phys ther*, 28, 3416-3420, 2016.
- 9) Fukumoto Y, Bunno Y, Suzuki T: Effect of Motor Imagery After Motor Learning for 30 sec on Excitability of Spinal Neural Function and its Impact on Accurate Control of Muscle Force, *J Nov Physiother*, 7(2), 339, 2017.
- 10) Fukumoto Y, Bunno Y: The Effects of Motor Imagery After a Variety of Motor Learning Times on Excitability of Spinal Motor Neurons and Accurate Motion, *INTECH*, 71-94, 2017.
- 11) 福本悠樹：最大随意収縮の50%強度にピンチ力値を合わせる練習を2分間行わせた後の筋収縮のイメージは筋収縮の正確性を保持させ脊髄前角細胞の興奮性も増加させる，*関西医療大学大学院修士論文集 2016年度*，57-82, 2017.
- 12) Heuer H, Hegele M: Constraints on visuo-motor adaptation depend on the type of visual feedback during practice, *Exp Brain Res*, 185, 101-110, 2008.
- 13) 中村隆一，齋藤宏，長崎浩：基礎運動学 第6版，医歯薬出版株式会社，141, 2011.
- 14) Lotze M, Montoya P, Erb M, Hülsmann E: Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: an fMRI study, *J Cogn Neurosci*, 11(5), 491-501, 1999.
- 15) Roland PE, Larsen B, Lassen NA, Skinhøj E: Supplementary motor area and other cortical areas in organization of voluntary movements in man, *J Neurophysiol*, 43, 118-136, 1980.
- 16) Stephan KM, Fink GR, Passingham RE, Silbersweig D, Ceballos-Baumann AO, Frith CD, Frackowiak RS: Functional anatomy of the mental representation of upper extremity movements in healthy subjects, *J Neurophysiol*, 73(1), 373-386, 1995.
- 17) Suzuki T, Bunno Y, Onigata C, Tani M, Uragami S: Excitability of spinal neural function by motor imagery with isometric opponens pollicis activity: Influence of vision during motor imagery, *Neurological Rehabilitation*, 34, 725-729, 2014.
- 18) 大石和夫，木村瑞生，安川通雄，前嶋孝：イメージによる動作遂行中の生理的パラメータの変化，*体育学研究*，36, 303-312, 1992.
- 19) Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, Yahagid S: Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery, *Brain Research*, 744, 147-150, 1997.
- 20) Taniguchi S, Kimura J, Yamada T, Ichikawa H, Hara M, Fujisawa R, Shimizu H, Tani T: Effect of motion imagery to counter rest-induced

- suppression of F-wave as a measure of anterior horn cell excitability, *Clinical Neurophysiology*, 119, 1346-1352, 2008.
- 21) 福本悠樹, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 練習時間の違いによって運動イメージが運動の正確さと脊髄前角細胞の興奮性に与える影響は異なる, *臨床神経生理学*, 47(2), 82-92, 2019.
- 22) Beyer L, Weiss T, Hansen E, Wolf A, Seidel A: Dynamics of central nervous activation during motor imagination, *Int J Psychophysiol*, 9, 75-80, 1990.
- 23) Bolliet O, Collet C, Dittmar A: Autonomic nervous system activity during actual and mentally simulated preparation for movement, *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 30, 11-20, 2005.
- 24) Yavuzer G, Selles R, Sezer N, Sütbeyaz S, Bussmann JB, Köseoğlu F, Atay MB, Stam HJ: Mirror therapy improves hand function in subacute stroke, A randomized controlled trial, *Arch Phys Med Rehabil*, 89, 393-398, 2008.
- 25) Ozaki I, Kurata K: The effects of voluntary control of respiration on the excitability of the primary motor hand area, evaluated by end-tidal CO<sub>2</sub> monitoring, *Clinical Neurophysiology*, 126, 2162-2169, 2015.
- 26) Sparing R, Dafotakis M, Buelte D, Meister IG, Noth J: Excitability of human motor and visual cortex before, during, and after hyperventilation, *Journal of Applied Physiology*, 102, 406-411, 2007.
- 27) 福本悠樹, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 運動イメージの実施は脊髄前角細胞の興奮性を増加させるが呼吸の各相はその程度に影響しない可能性がある, *理学療法科学*, 34(2), 239-344, 2019.
- 28) Li S, Rymer WZ: Voluntary breathing influences corticospinal excitability of nonrespiratory finger muscles, *Journal of Neurophysiology*, 105, 512-521, 2011.
- 29) 岩本えりか, 岩田美和子, 関川清一, 高橋 真, 稲水 惇: 歩行時の吸気呼吸比の調節が運動-呼吸同調に与える影響, *日本生理人類学会誌*, 15, 1-8, 2010.
- 30) 前田章裕, 福本悠樹, 文野住文, 鈴木俊明: 装具を用いて母指と示指を対立肢位に固定した時の運動イメージが脊髄神経機能の興奮性に与える影響, *関西理学*, 17, 97-103, 2017.
- 31) 小森哲夫, 高橋良輔, 広瀬和彦, 椿忠雄: F波の波形と出現頻度, *臨床脳波*, 30, 1-6, 1988.
- 32) Eisen A, Odusote K: Amplitude of the F-wave: a potential means of documenting spasticity, *Neurology*, 29, 1306-1309, 1979.
- 33) Kinoshita M, Matsui R, Kato S, Hasegawa T, Kasahara H, Isa K, Watakabe A, Yamamori T, Nishimura Y, Alstermark B, Watanabe D, Kobayashi K, Isa T: Genetic dissection of the circuit for hand dexterity in primates, *Nature*, 487, 235-238, 2012.

- 34) Takei T, Seki K: Spinal interneurons facilitate coactivation of hand muscles during a precision grip task in monkeys, *Journal of Neuroscience*, 30, 17041-17050, 2010.
- 35) Takei T, Seki K: Spinal premotor interneurons mediate dynamic and static motor commands for precision grip in monkeys, *Journal of Neuroscience*, 33, 8850-8860, 2013.
- 36) Alstermark B, Isa T, Ohki Y, SAITO Y: Disynaptic pyramidal excitation in forelimb motoneurons mediated via C3-C4 propriospinal neurons in the *Macaca fuscata*, *J. Neurophysiol*, 82, 3580-3585, 1999.
- 37) Pauvert V, Pierrot-Deseilligny E, Rothwell JC: Role of spinal premotoneurons in mediating corticospinal input to forearm motoneurons in man, *J Physio (Lond)*, 508, 301-312, 1998.
- 38) Pierrot-Deseilligny E: Propriospinal transmission of part of the corticospinal excitation in humans, *Muscle Nerve*, 26, 155-172, 2002.
- 39) Guz A: Brain breathing and breathlessness, *Respir Physiol*, 109, 197-204, 1997.
- 40) Colebatch JG, Adams L, Murphy K, Martin AJ, Lammertsma AA, Tochon-Danguy HJ, Clark JC, Friston KJ, Guz A: Regional cerebral blood flow during volitional breathing in man, *J Physiol*, 443, 91-103, 1991.
- 41) Gandevia SC, Rothwell JC: Activation of the human diaphragm from the motor cortex, *J Physiol*, 384, 109-118, 1987.
- 42) Maskill D, Murphy K, Mier A, MOWEN M, Guz A: Motor cortical representation of the diaphragm in man, *J Physiol*, 443, 105-121, 1991.
- 43) Sharshar T, Hopkinson NS, Jonville S, Prigent H, Carlier R, Dayer MJ, Swallow EB, Lofaso F, Moxham J, Polkey MI: Demonstration of a second rapidly conducting cortico-diaphragmatic pathway in humans, *J Physiol*, 560, 897-908, 2004.
- 44) Green JH, Howell JB: The correlation of intercostal muscle activity with respiratory air flow in conscious human subjects, *Journal of Physiology*, 149, 471-476, 1959.
- 45) 福本悠樹, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 運動イメージにおける持続時間と脊髄運動ニューロンの興奮性の関係, *理学療法科学*, 34(6), 811-816, 2019.
- 46) Malik M, Bigger JT, Camm AJ, Kleiger RE, Malliani A, Moss AJ, Schwartz PJ: Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use, *Eur Heart J*, 17(3), 354-381, 1996.
- 47) 梅野和也, 中村浩一, 井元淳, 白澤浩太郎, 石田猛流, 加来謙治, 土井康太: 運動イメージ想起能力とメンタルプラクティスの効果との関係-属性の異なる運動イメージ評価法を用いた研究-, *理学療法科学*, 33, 313-317, 2018.
- 48) 松本啓, 川池浩二, 吉田修二・他: 高温と疲労の精神作業に及ぼす効果, 九

州神経精神医学, 17, 80-84, 1971.

- 49) 篠原一光, 神田幸治, 白井伸之助, 中村隆宏, 太刀掛俊之, 小高恵: 注意制御に係る日常的経験と内田クレペリン精神検査の関連性の検討, 人間工学, 40, 442-443, 2004.
- 50) 喜岡恵子, 宮地由芽子, 山内香奈: 鉄道における運動適性検査の研究(4)-作業性検査と注意力(注意配分・集中・持続)との関連性-, 日本教育心理学会総会発表論文集, 45, 187, 2003.
- 51) 三隅ニ不ニ, 白樫三四郎, 安藤延男, 黒川正流: 内田・クレペリン精神検査の妥当性に関する研究, 教育・社会心理学研究, 2, 139-159, 1961.
- 52) 木下玲子, 中島宣行: スポーツ選手のメンタルローテーション能力に及ぼすトレーニングの影響, 順天堂大学スポーツ健康科学研究, 7, 91-93, 2003.
- 53) Rozand V, Lebon F, Stapley PJ, Papaxanthis C, Lepers R: A prolonged motor imagery session after imagined and actual movement durations: Potential implications for neurorehabilitation, Behav Brain Res, 297, 67-75, 2016.
- 54) 鷺野嘉映, 西田弘之: 計算負荷の非浸襲的ストレス評価への影響, Bulletin of Gifu Shotoku Gakuen University Junior College, 43, 51-57, 2011.
- 55) 海外移住事業団: 内田クレペリン精神検査法実施の手引(人柄類型と曲線の判定), 国際協力事業団, 11-34, 1973.
- 56) 福本悠樹, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 断続的な視覚フィードバックを利用した運動練習後の運動イメージが運動の正確さ及び脊髄前角細胞の興奮性変化と自律神経活動に与える影響, 臨床神経生理学(impress).
- 57) Malouin F, Richards CL, Jackson PL, Lafleur MF, Durand A, Doyon J: The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (KVIQ) for Assessing Motor Imagery in Persons with Physical Disabilities A reliability and Construct Validity Study, Journal of Neurologic Physical Therapy, 31, 20-29, 2007.
- 58) Ikegami T, Hirashima M, Osu R, Nozaki D: Intermittent visual feedback can boost motor learning of rhythmic movements: evidence for error feedback beyond cycles, J Neurosci, 32(2), 653-657, 2012.
- 59) Tochikubo O, Kawano Y, Miyajima E, Nagura T, Ishii M: Circadian Variation of Hemodynamics and Baroreflex Functions in Patients with Essential Hypertension, Hypertens Res, 20(3), 157-166, 1997.
- 60) 大橋ゆかり: 等尺性筋収縮におけるピンチ力値情報の保持特性について, 理学療法学, 20(6), 355-359, 1993.
- 61) 黒部正孝, 文野住文, 福本悠樹, 鈴木俊明: 非練習側上肢での母指対立運動イメージが脊髄神経機能の興奮性に与える影響-F波による検討-, 理学療法科学, 33(3), 439-442, 2018.
- 62) 溝端直人, 西僚太, 大熊菜央子, 山野晶夫, 佐々木英文, 鈴木俊明: 触圧覚刺激を与えた母趾屈曲運動の運動イメージが脊髄神経機能の興奮性に及ぼす影響, 関西理学, 18, 47-50, 2018.

- 63) Allen GV, Cechetto DF: Serotonergic and nonserotonergic neurons in the medullary raphe system have axon collateral projections to autonomic and somatic cell groups in the medulla and spinal cord, *J Comp Neurol*, 350(3), 357-366, 1994.
- 64) Kerman IA, Enquist LW, Watson SJ, Yates B: Brainstem substrates of sympatho-motor circuitry identified using transsynaptic tracing with pseudorabies virus recombinants, *J Neurosci*, 23(11), 4657-4666, 2003.
- 65) 文野住文, 鈴木俊明, 岩月宏泰: 異なる筋収縮強度を用いた母指対立運動イメージが脊髄運動神経の興奮性と自律神経活動に及ぼす影響, *理学療法科学*, 31(1), 117-125, 2016.
- 66) 野村昌弘, 岸史子, 由岐中道子, 近藤幸, 斎藤憲, 大木崇, 伊東進, 中屋豊: 長時間運動負荷後の回復過程のエネルギー代謝と自律神経活動の検討 呼気ガス分析と心拍変動解析による検討, *心臓*, 29(4), 73-75, 1997.
- 67) 長谷川浩一: スポーツに生かす心理技法-行動的心理技法と認知的心理技法, 杏林書院, 790-794, 1993.
- 68) 西田保, 勝部篤美, 猪俣公宏, 小山哲, 岡沢祥訓, 伊藤政展: 運動イメージの明瞭性に関する因子分析学的研究, *体育学研究*, 26, 190-205, 1981.
- 69) 野村真, 前田剛伸, 嘉戸直樹, 鈴木俊明: 運動イメージの明瞭性の個人差が脊髄神経機能の興奮性に及ぼす影響, *理学療法科学*, 32(2), 195-199, 2017.
- 70) 前田剛伸, 嘉戸直樹, 鈴木俊明: 複雑性の異なる手指対立運動の運動イメージが上肢脊髄神経機能の興奮性に及ぼす影響, *臨床神経生理学*, 43(1), 10-13, 2015.

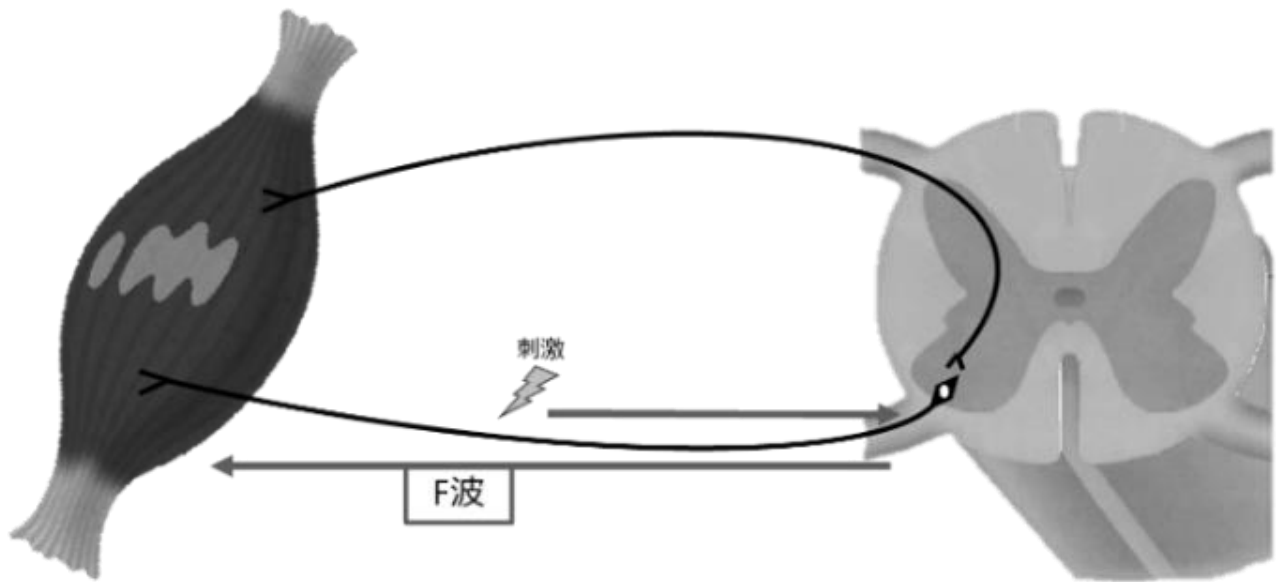


図 1： F 波発生 の 機序

F 波とは、末梢の混合神経線維に最大上の電気刺激を与えることで発生した逆行性のインパルスが軸索を上行し、脊髓前角細胞にて再発火した結果、順行性のインパルスとして軸索を下行し、対応する筋にて記録される複合活動電位とされる。

### 問題の所在 3

運動イメージの練習方法が運動イメージに及ぼす効果を神経生理学からの視点で検討できないか？

### 問題の所在 2

集中力が必要とされる運動イメージは、それ自体が心理的な負荷を及ぼすため、交感神経活動が変化するのは？

### 問題の所在 1

運動発現経路における、脳・脊髄・効果器の関連性を考えた際呼吸筋が機能的に隣接する手指筋領域にも干渉するのは？

#### 3つの研究の流れ

問題の所在1から3を段階的に検討し  
運動イメージが理学療法士による治療手段となりうるかを神経生理学的に検討する

図 2: 研究の関連図

本研究では、問題の所在として【運動発現経路における、脳・脊髄・効果器の関連性を考えた際に呼吸筋が機能的に隣接する手指筋領域にも干渉するのではないか】、【集中力が必要とされる運動イメージは、それ自体が心理的な負荷を及ぼすため、交感神経が変化するのではないか】、【運動練習方法が運動イメージに及ぼす効果を神経生理学からの観点で検討できないか】の3つが設定された。

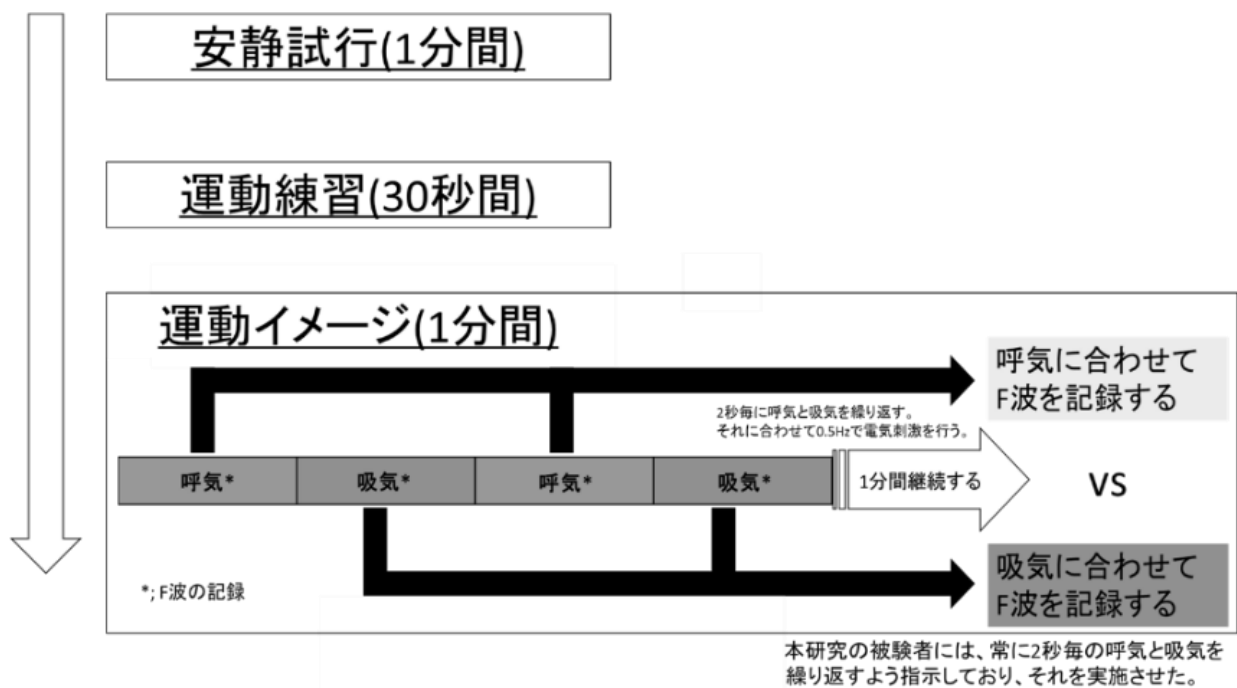


図 3: 研究の流れ

被験者は安静背臥位とし（安静試行）、F波を記録した。次に、先行研究<sup>9)</sup>に従い、運動練習時間を30秒間設けると共に、運動イメージ課題となるピンチ力値を50%MVCに設定した。運動練習後、2秒毎の呼気と吸気を繰り返している被験者に対し、50%MVCのピンチ力に調節させる運動のイメージを実施（運動イメージ試行）させ、F波を記録した。



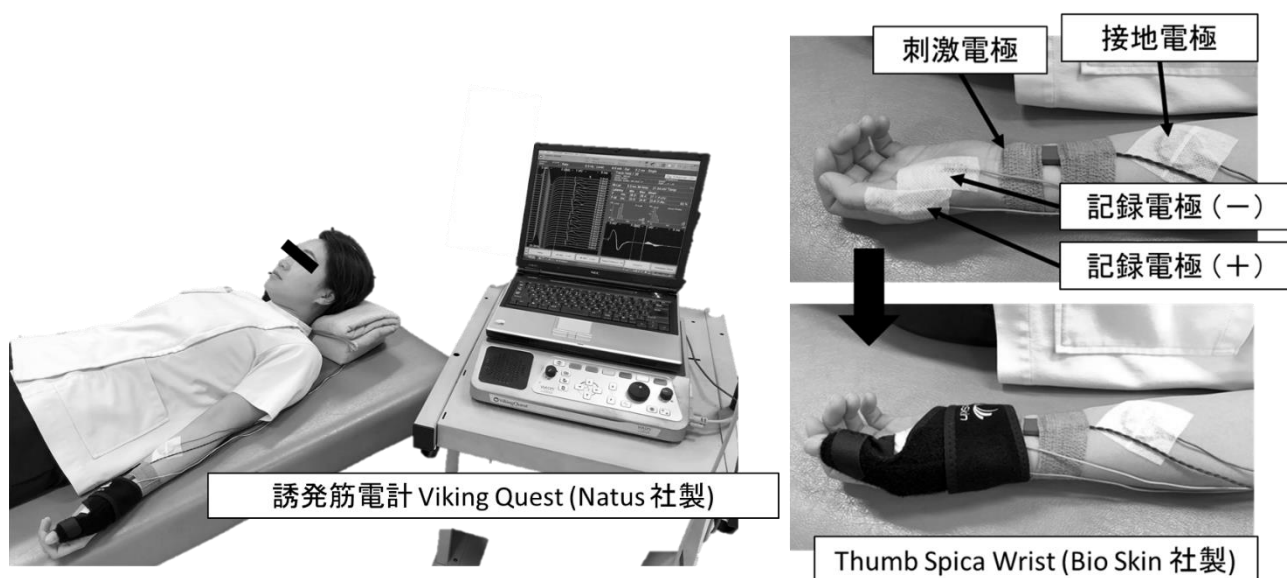


図 4: F 波計測機器と記録条件

F 波は、誘発筋電計 Viking Quest (Natus Medical Inc.)を用いて記録した。F 波記録条件は、左母指球上の筋群に探索電極を、左第 1 中指骨頭背側に基準電極を、左前腕中央部に接地電極を貼付したうえで、左手関節部にて正中神経を刺激して F 波を記録した。

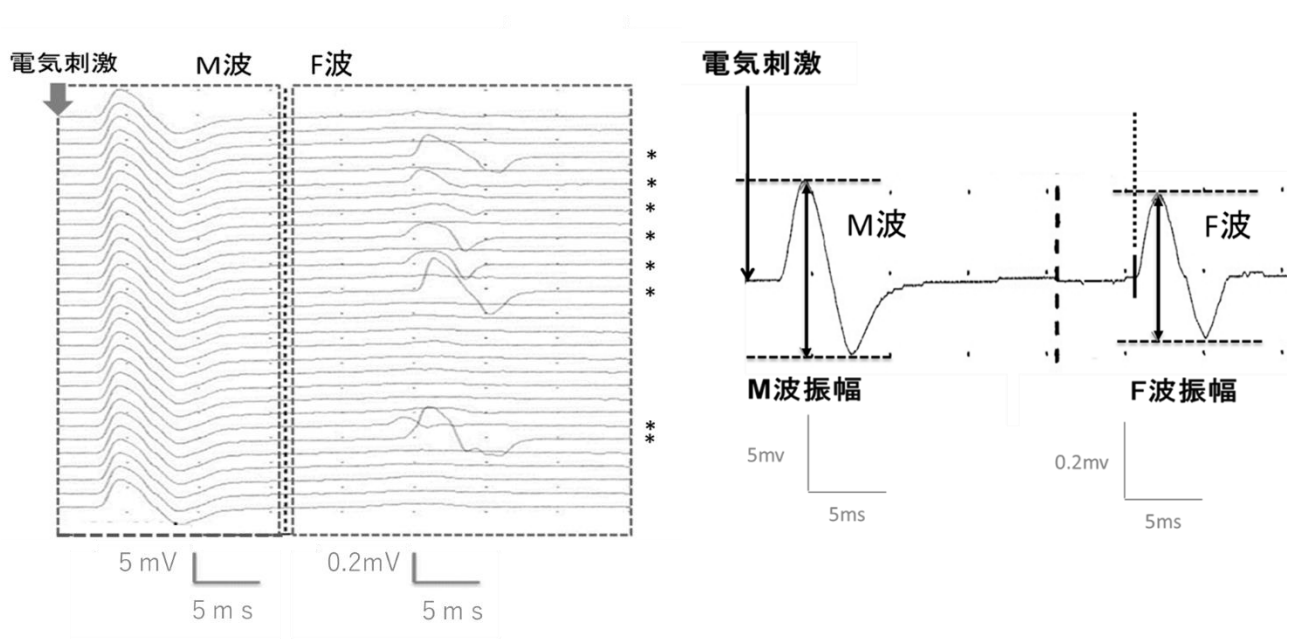


図 5: F 波出現頻度と振幅 F/M

F 波分析項目は、1 試行の刺激回数に対して出現した F 波の個数の割合を百分率にて示す出現頻度と、全ての F 波の頂点間振幅の平均を最大 M 波振幅で除して百分率にて示す振幅 F/M 比の 2 つとした。

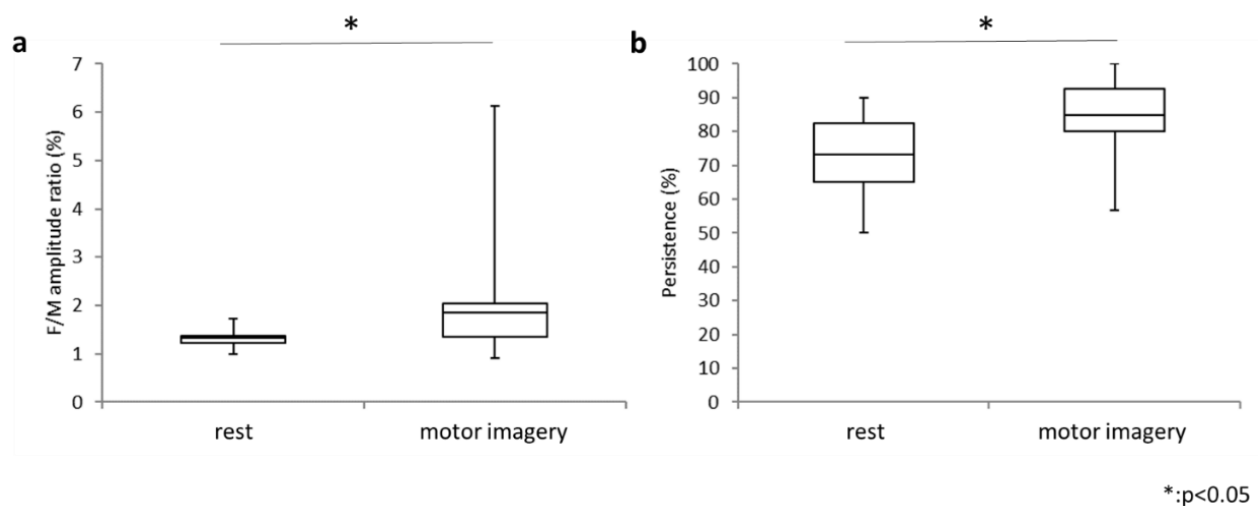


図 6: 出現頻度と振幅 F/M 比の安静試行と運動イメージ試行の比較

安静試行と比較した運動イメージ試行では、F 波の出現頻度と振幅 F/M 比が有意に増大した。a は振幅 F/M 比、b は出現頻度である。

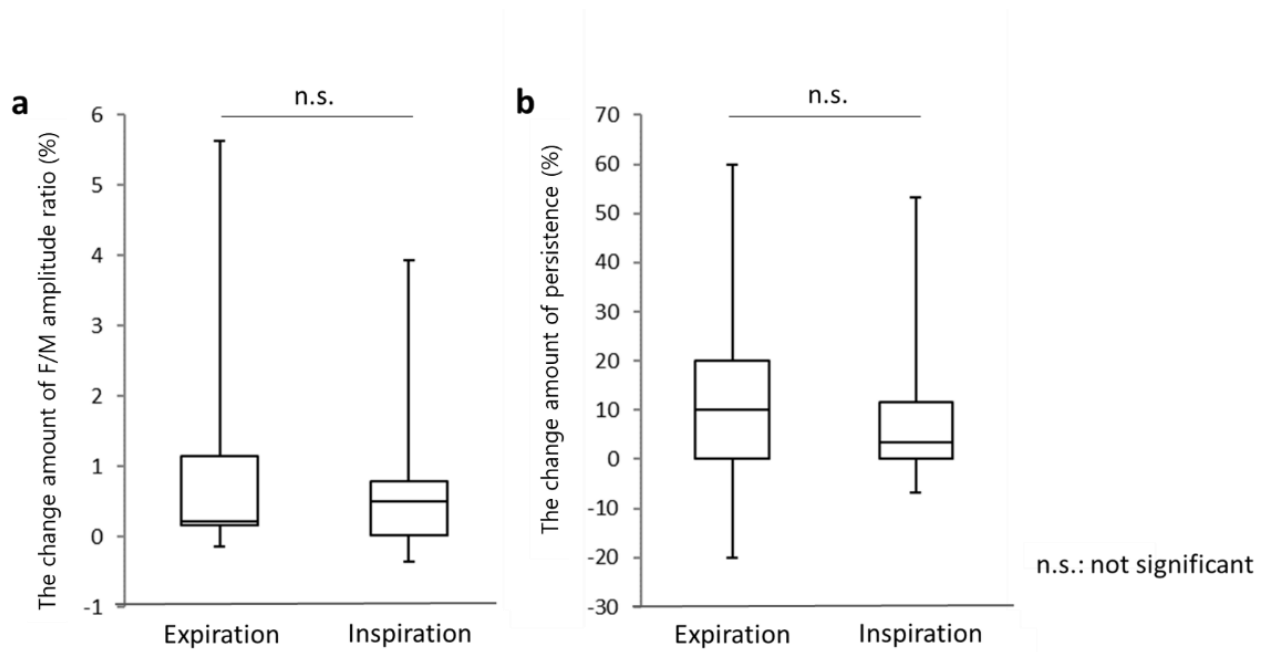


図 7: 出現頻度と振幅 F/M 比変化量の呼気時と吸気時の比較

呼気時と吸気時の運動イメージの比較では、出現頻度と振幅 F/M 比の変化量に有意な差を認めなかった。a は振幅 F/M 比変化量、b は出現頻度変化量である。



図 8: 研究の流れ

被験者には、50%MVC にピンチ力を調節させる練習を 30 秒間実施させた。そして、これにより得られた運動情報を糧に運動イメージを 5 分間実施させた。その際、運動イメージ中の初めの 1 分間と最後の 1 分間は共に F 波を記録し、脊髄運動ニューロンの興奮性を比較検討する。

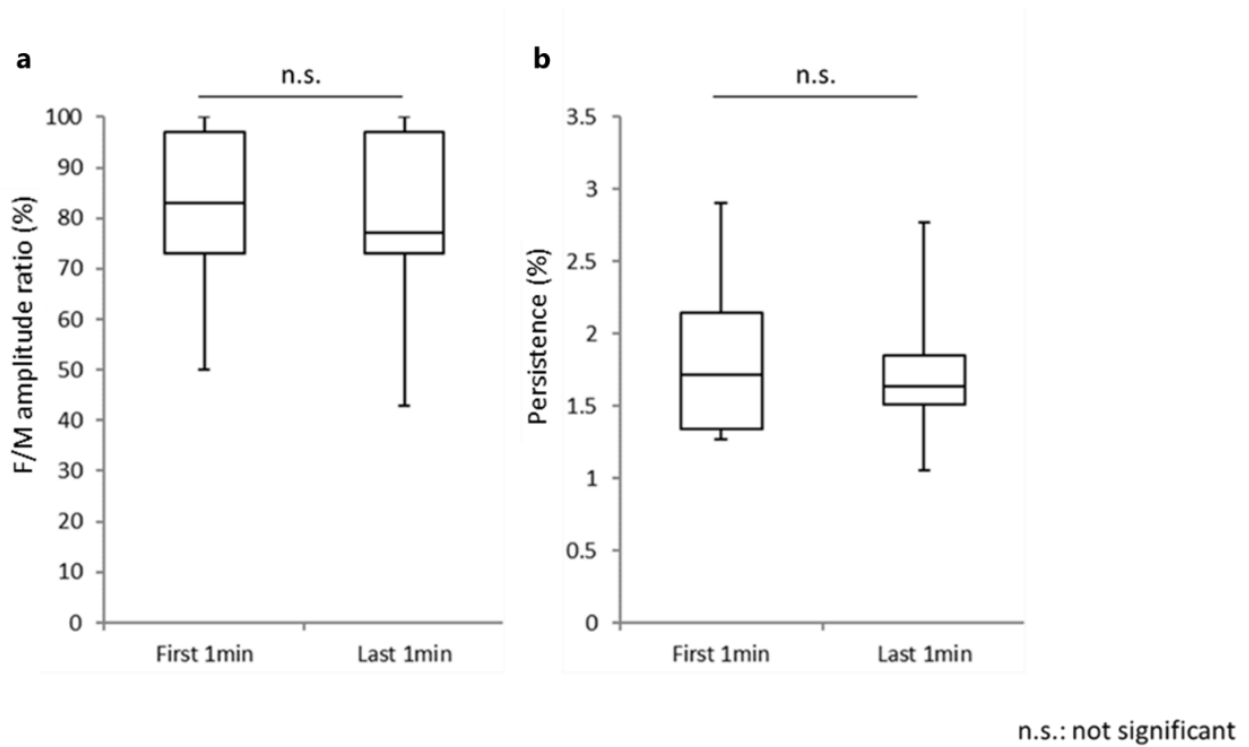


図 9: 出現頻度と振幅 F/M 比の最初と最後の 1 分間での比較結果

運動イメージの最初の 1 分間と最後の 1 分間を比較した際、出現頻度と振幅 F/M 比は差を認めなかった。a は振幅 F/M 比、b は出現頻度である。

KVIQ を一部抜粋し、  
被験者の運動イメージ想起能力を評価

**運動感覚イメージスケール**

5	4	3	2	1
運動を行っているのと同じくらい、しっかりと感じる	しっかりと感じる	ある程度感じる	少し感じる	感じない

項目 5Kd. 母指と他指の対立

運動イメージ内容を  
どれだけ実運動に反映できたかを評価

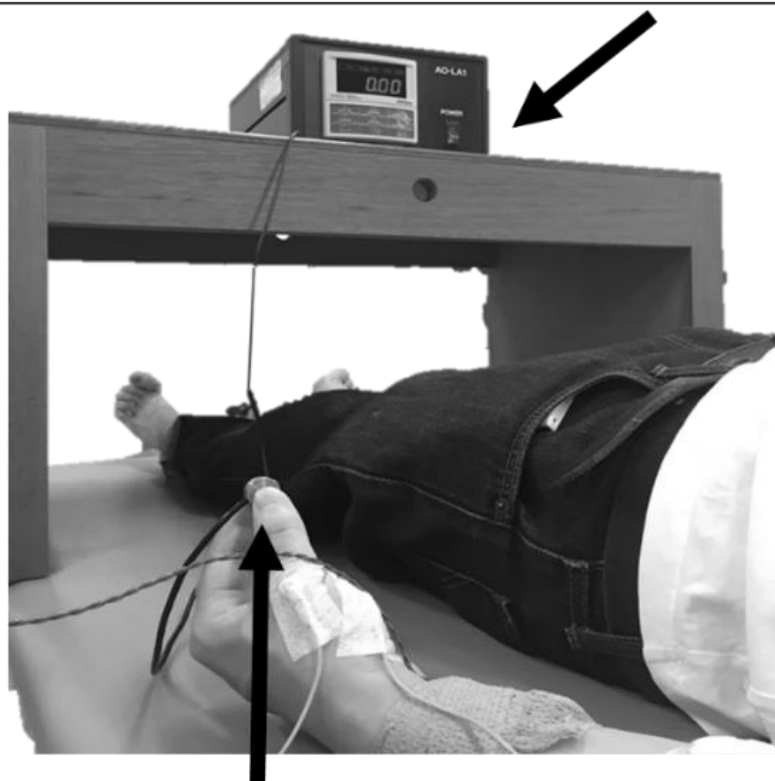
イメージした内容を実運動に 全く反映出来なかった最悪の状態	イメージした内容を実運動に 正確に反映出来た最良の状態
----------------------------------	--------------------------------

先ほどイメージした内容を、どれだけ実運動に反映できましたか？  
その程度を縦線を加筆することで示して下さい。

図 10: 質問指標

運動イメージ想起能力を評価する質問指標である The Kinesthetic and Visual Imagery Questionnaire (以下、KVIQ)<sup>57)</sup>のうち、本研究の運動課題と一致する「項目 5Kd. 母指と他指の対立」を抜粋し適用した。抜粋した項目でのイメージ課題は、母指と他の4指とのピンチ動作であり、イメージの感じ方として「運動しているのと同じくらい、しっかりと感じる」であれば判定5、「しっかりと感じる」は判定4、「ある程度感じる」は判定3、「少し感じる」は判定2、「感じない」は判定1として、被検者自身で判定してもらう。

Pinch meter Digital indicator F340A (Unipulse Inc.)



Pressure sensor of pinch meter

図 11: 研究風景

視覚情報の提示は、ピンチメーターDigital indicator F340A (Unipulse Inc.)のピンチ力表示部を注視させ付与した。



**【②本試験】断続的なVFによる運動練習後の運動イメージが運動の正確さ及びF波と脈波に与える影響**

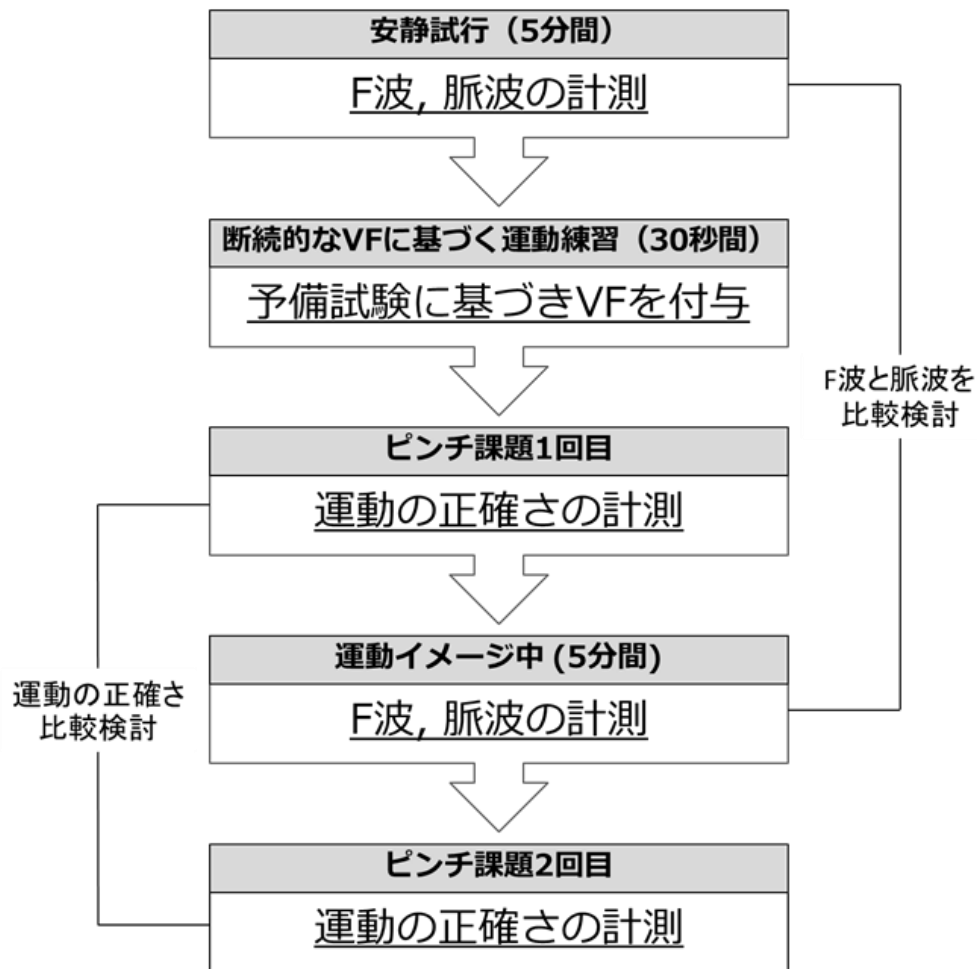


図 12: 研究の流れ

安静状態を5分間与え、脊髓運動ニューロンの興奮性と自律神経活動を評価した（安静試行）。次に、断続的にVFを与える中で運動練習を行わせた。運動練習直後、視覚情報を完全に遮断し、発揮ピンチ力を50%MVCに調節するよう指示し、運動の正確さを評価した（ピンチ課題1回目）。その後、50%MVCへとピンチ力値を調節させる運動イメージを5分間実施し、脊髓運動ニューロンの興奮性と自律神経活動を評価した（運動イメージ試行）。運動イメージ後、ピンチ課題1回目と同様の課題を与え、運動の正確さを再評価した（ピンチ課題2回目）。

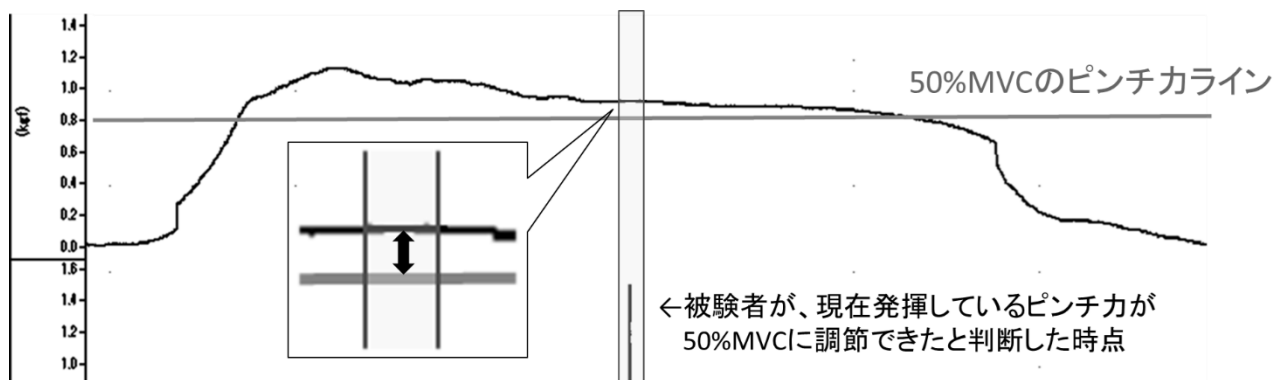


図 13: 運動の正確さの評価指標

対象者の運動の正確さを評価する指標として、測定された値との差を絶対値で示した 50% MVC からの絶対誤差 (kgf) を採用した。この指標は、対象者の発揮ピンチ力値から規定値として設定している 50%MVC 値を引くことで算出される誤差の値を、絶対値に変換することで算出した。



## Heart Rhythm Scanner PE (Ark Trading Pacific Inc.)

図 14: 自律神経活動の評価

LF/HF 比は、LF と HF のパワー値の比であり、心臓交感神経活動を表す指標とされている。この LF/HF 比は、ハートリズムスキャナー PE（ArkTrading Pacific 社製）を用いて、脈波センサーを左耳垂に装着することで、記録し評価した。

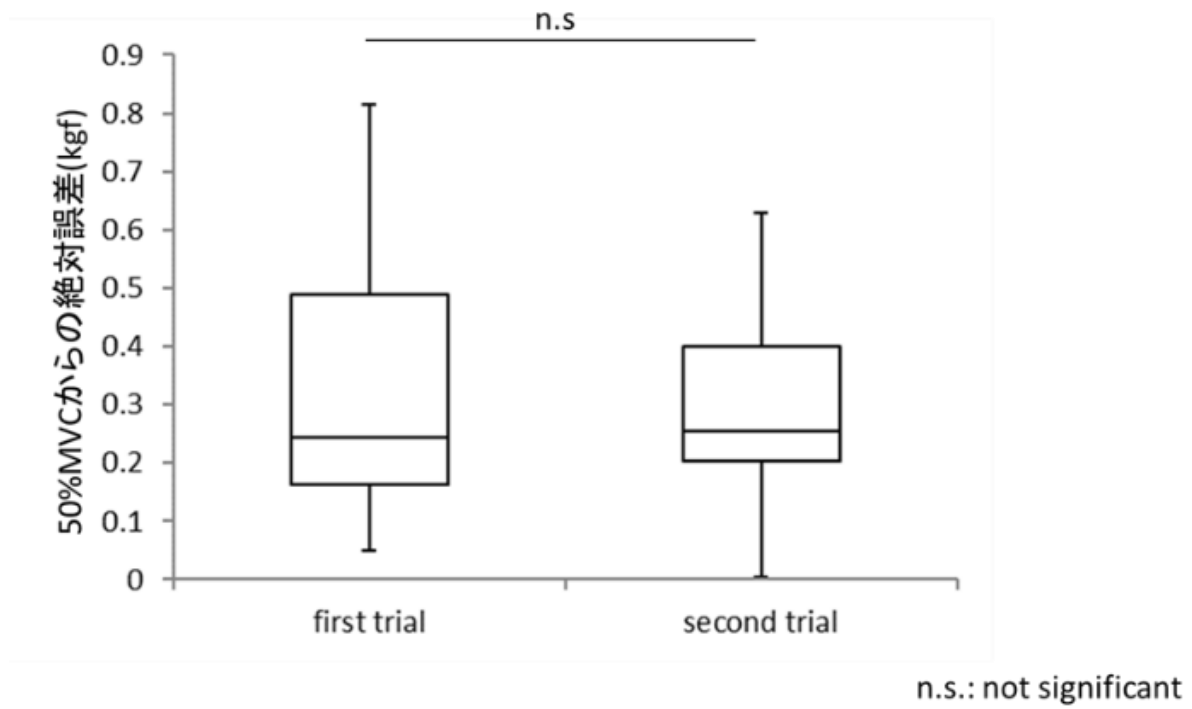
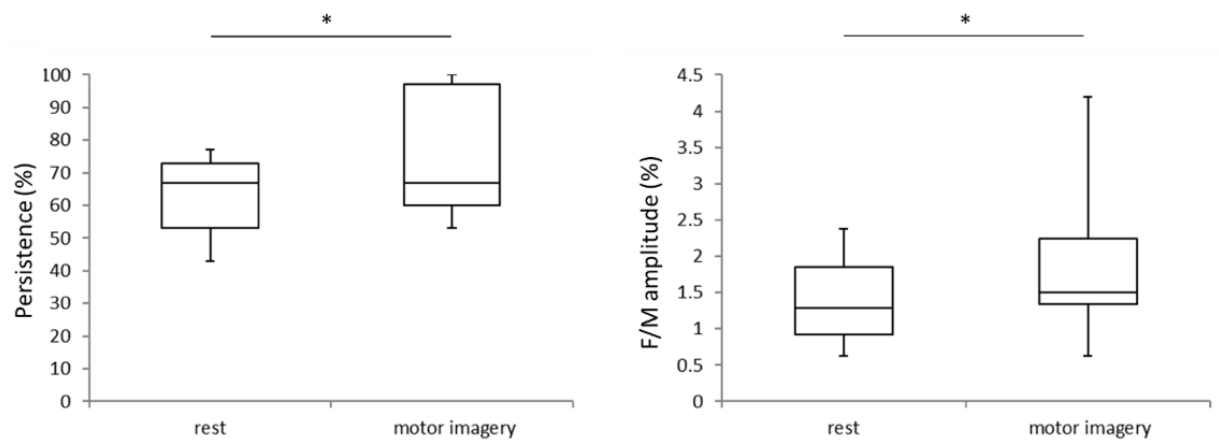


図 15:ピンチ課題間での運動の正確さの比較結果

運動イメージ前に実施したピンチ課題 1 回目と、運動イメージ後に実施したピンチ 2 回目との間で、50% MVC からの絶対誤差に差を認めなかった。



\*:  $p < 0.05$

図 16:出現頻度と振幅 F/M 比の安静試行と運動イメージ試行の比較結果

F 波出現頻度と振幅 F/M 比は、安静試行と比較した運動イメージ中にて有意に増加を認めた。

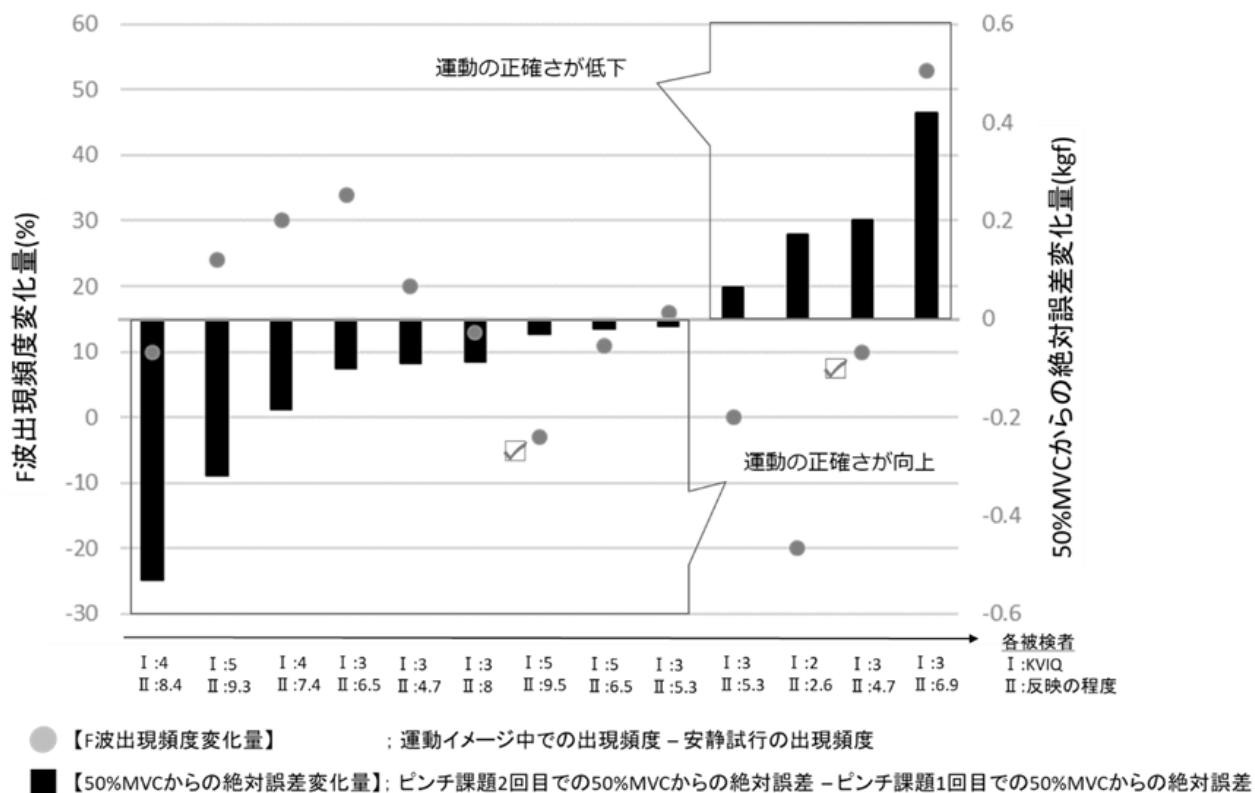


図 17: 50%MVC からの絶対誤差と出現頻度の関係

運動の正確さが向上する者は、出現頻度変化量が+10～34%の増加を認め、増加の程度に収束を認めた。

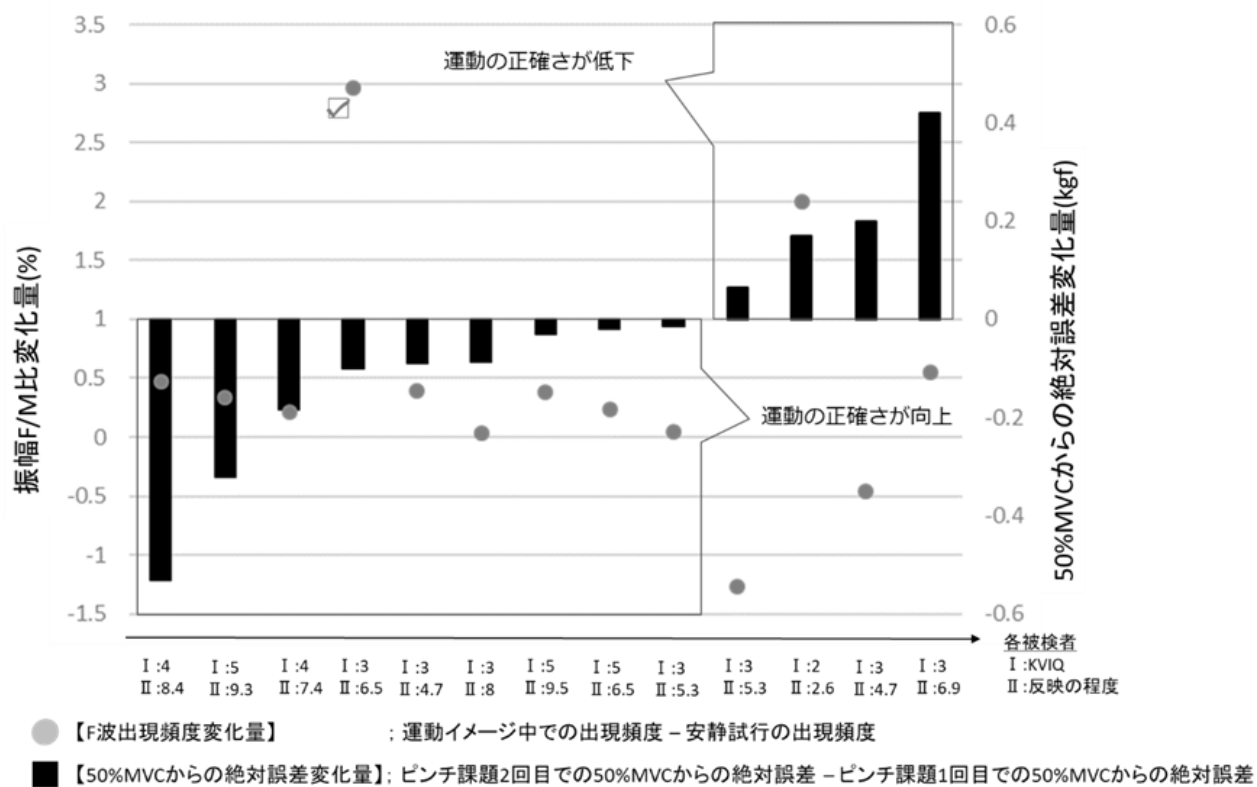
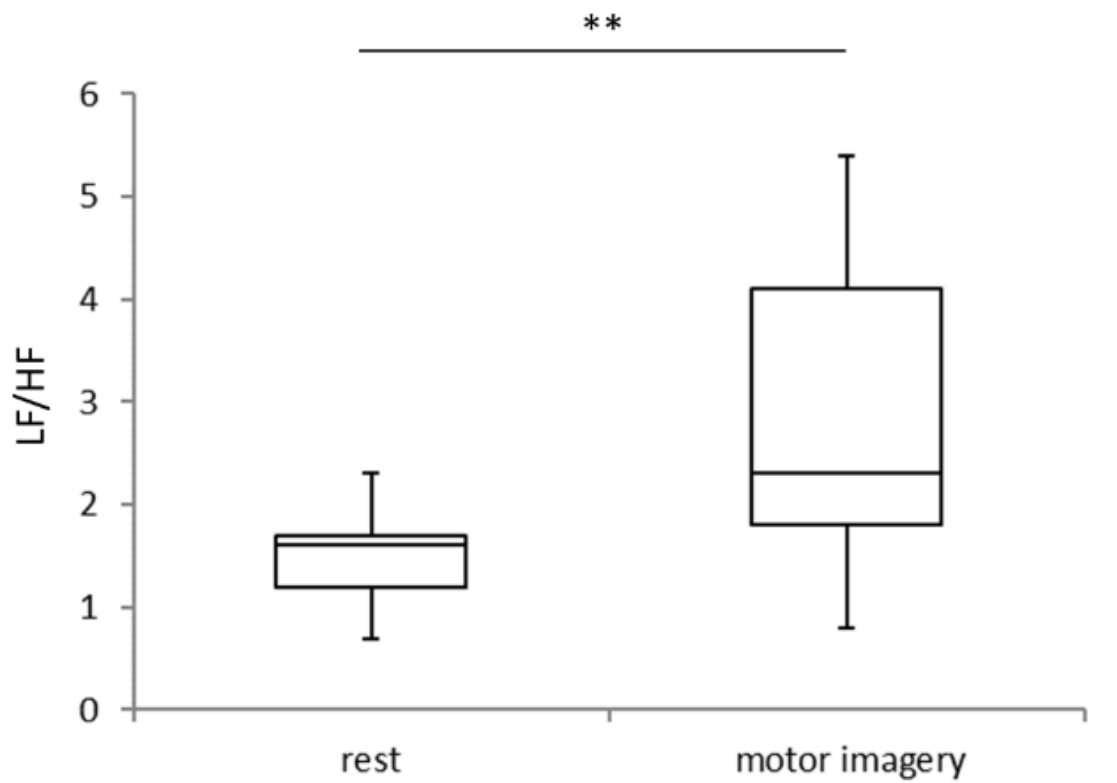


図 18: 50%MVC からの絶対誤差と振幅 F/M 比の関係

運動の正確さが向上する者は、振幅 F/M 比変化量が +0.03～0.47% の増加を認め、増加の程度に収束を認めた。



\*\* :  $p < 0.01$

図 19: LF/HF 比の安静試行と運動イメージ試行の比較結果

LF/HF 比は、安静試行と比較した運動イメージ中にて増加を認めた。