

2015年度 青森県立保健大学大学院博士論文

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—50%収縮強度と100%収縮強度による比較—

分野名 理学療法学分野

学籍番号 1392001

氏名 文野 住文

指導教員名 岩月 宏泰 先生

提出日 2016年2月15日

2015年度青森県立保健大学大学院博士論文要旨

「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—50%収縮強度と100%収縮強度による比較—」

分 野 名 理学療法学分野
学 籍 番 号 1392001
氏 名 文野 住文
指 導 教 員 名 岩月 宏泰 先生

I はじめに

近年、運動イメージの運動療法への応用が期待されている。運動イメージは実際の運動実行と同様の神経機構を有するとされ、運動イメージにより運動実行時と類似した脳領域が賦活されるという報告は多い。しかし、運動イメージが脊髄運動神経の興奮性に与える影響に関しては未だ一定の見解が得られていない。我々は先行研究にて、最大努力の10%、30%、および50%収縮強度において、運動イメージは脊髄運動神経の興奮性を増加させるが、運動イメージする収縮強度の違いは、脊髄運動神経の興奮性変化に影響を与えないことを報告した。先行研究では、10%から50%と用いている収縮強度は軽度から中等度であるが、本研究では、最大努力の50%および100%収縮強度における運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性をF波にて検討した。F波は、 α 運動ニューロンに最大上刺激を与えることにより発生した逆行性インパルスが α 運動ニューロンの軸索を上行し、脊髄前角細胞で再発火を起こした後、順行性インパルスとなって下行して支配筋に発生した複合活動電位であることから、F波は脊髄運動神経の興奮性の指標とされる。

また、運動時には交感神経活動が高まる。運動イメージが運動実行と同様の神経機構を有するのであれば、運動イメージでも同様の現象が生じることが予想される。

異なる収縮強度における運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性と自律神経活動の変化を比較検討し、運動イメージ効果を解明する一助としたい。

II 研究方法と対象

対象は、本研究に同意を得た健常者10名、平均年齢 25.3 ± 5.3 歳であった。安静試行①、ピンチメータのセンサーを軽く把持しながら50%収縮強度での母指対立運動イメージした状態（運動イメージ試行①）、運動イメージ直後（安静試行②）、運動イメージ試行②およ

び運動イメージ②直後（安静試行③）の各時点でF波を測定した。F波分析項目は、F波出現頻度、振幅F/M比、立ち上がり潜時とした。またF波測定と同時に、交感神経活動の指標であるLF/HF比を測定した。以上の課題を50%条件とし、100%条件についても同様の流れで行った。

III 結 果

50%および100%条件共に、運動イメージ試行①と運動イメージ試行②時のF波出現頻度が、安静試行①時より有意に増加した。さらに50%条件において、運動イメージ試行①と運動イメージ試行②時の振幅F/M比が、安静試行①時より有意に増加した。立ち上がり潜時は、全試行間で有意差を認めなかった。50%および100%条件共に運動イメージ試行①時のLF/HF比が、安静試行①時より有意に増加した。安静試行①を1としたF波出現頻度相対値、振幅F/M比相対値、立ち上がり潜時相対値およびLF/HF比相対値は、2条件間で有意差を認めなかった。

IV 考 察

50%および100%収縮強度運動イメージにより脊髄運動神経の興奮性および心臓交感神経活動が増加したことについて、運動イメージ時に一次運動野、補足運動野、運動前野、小脳および大脳基底核の活動を認めたとの報告がある。これらは全て、運動の準備企画や制御において重要な役割を担っており、運動イメージによる中枢神経系の興奮性増加が、皮質脊髄路や錐体外路を介して脊髄運動神経の興奮性を増加させたことが考えられる。加えて、ピンチメータセンサー把持時の触圧覚や固有受容感覚が、相乗効果として脊髄運動神経の興奮性増加に寄与した可能性がある。一次運動野への磁気および電気刺激により交感神経活動が増加したという報告がある。一次運動野を刺激すると皮質脊髄路が興奮することから、運動イメージによる心臓交感神経活動の増加には、皮質脊髄路を介した交感神経線維への何らかの投射による影響が考えられる。加えて、運動イメージにより前帯状皮質や島皮質に活動を認めたとの報告から、運動イメージによる自律神経調節に関わる高位中枢の興奮性増加が、視床、視床下部および中脳を介して延髄の交感神経線維に投射し、心臓交感神経活動を増加させたことが考えられる。

運動イメージする収縮強度の違いが脊髄運動神経の興奮性と心臓交感神経活動の変化に影響を与えなかったことについて、運動イメージ時の補足運動野や運動前野の活動にイメージする収縮強度との相関を認めたが、一次運動野の活動において相関を認めなかったとの報告がある。運動イメージは実運動を伴わず運動を想起する心的過程であるとされることから、運動イメージ時に筋活動を抑制する機能が働いた可能性が考えられる。補足運動野と運動前野は運動準備と運動抑制機能を有するとされ、これらが運動準備と同時に収縮強度に応じた筋活動の抑制に働いた結果、一次運動野を含む皮質脊髄路を介した脊髄運動神経の興奮性と心臓交感神経活動の変化に影響を与えなかったと考える。

目次

第 I 章 序論-----	1
1. 研究の背景と目的-----	1
第 II 章 研究の方法と対象-----	3
1. 対象-----	3
2. 方法-----	3
3. 統計学的検討-----	4
第 III 章 結果-----	5
1. 運動イメージによる F 波変化-----	5
1-1) 50%運動イメージ条件-----	5
1-2) 100%運動イメージ条件-----	5
2. 運動イメージによる自律神経活動の変化-----	5
2-1) 50%運動イメージ条件-----	5
2-2) 100%運動イメージ条件-----	5
3. F 波および LF/HF 比相対値による収縮強度間の運動イメージ効果比較-----	5
第 IV 章 考察-----	6
1. 運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性が増加したことについて-----	6
2. 運動イメージする筋収縮強度の違いが脊髄運動神経の興奮性変化に影響を与えなかったことについて-----	7
3. 運動イメージにより心臓交感神経活動が亢進したことについて-----	7
4. 運動イメージする筋収縮強度の違いが心臓交感神経活動の変化に影響を与えなかったことについて-----	8
第 V 章 統括-----	9
謝辞-----	10
参考文献-----	11

図目次

図 1	F 波測定風景と測定条件-----	14
図 2	F 波測定画像-----	15
図 3	F 波出現頻度の分析画面-----	16
図 4	振幅 F/M 比と立ち上がり潜時の分析画面-----	17
図 5	自律神経活動測定風景-----	18
図 6	実験プロトコル-----	19
図 7	50%収縮強度運動イメージによる F 波出現頻度変化-----	20
図 8	50%収縮強度運動イメージによる振幅 F/M 比変化-----	21
図 9	50%収縮強度運動イメージによる立ち上がり潜時変化-----	22
図 10	100%収縮強度運動イメージによる F 波出現頻度変化-----	23
図 11	100%収縮強度運動イメージによる振幅 F/M 比変化-----	24
図 12	100%収縮強度運動イメージによる立ち上がり潜時変化-----	25
図 13	50%収縮強度運動イメージによる LF/HF 比変化-----	26
図 14	100%収縮強度運動イメージによる LF/HF 比変化-----	27
図 15	F 波出現頻度相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較-----	28
図 16	振幅 F/M 比相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較-----	29
図 17	立ち上がり潜時相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較-----	30
図 18	LF/HF 比相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較-----	31

第 I 章 序論

I. 研究の背景と目的

近年、リハビリテーションにおける運動イメージの運動療法への応用が注目されている。運動イメージとは、明らかな運動を伴わず、運動を想起する心的過程であるとされる¹⁾。

Yue ら²⁾は、健常者を対象として、最大筋収縮強度での小指外転運動イメージを行う群（メンタルプラクティス群）、実際に筋力トレーニングを行う群（身体練習群）、コントロール群に分け、4週間後の筋力を比較した。結果、身体練習群で30%、メンタルプラクティス群で22%の筋力増強効果を認めた。Ranganathan ら³⁾は、最大筋収縮強度での小指外転運動イメージを行う群（ABD 群）、肘屈筋運動イメージを行う群（ELB 群）の2群とコントロール群で12週間後の筋力を比較した。結果、ABD 群で35%、ELB 群で13.5%の筋力増強効果を認めた。また Sidaway ら⁴⁾は、メンタルプラクティスによる下肢筋力増強効果について検討した。健常者を対象に最大筋収縮強度での足関節背屈運動イメージを行う群（メンタルプラクティス群）、身体練習群、コントロール群に分け、10回3セットの練習を週3回、4週間行い、訓練後の筋力を比較した。結果、メンタルプラクティス群で17.13%、身体練習群で25.28%の筋力増強効果を認めた。Guillot ら⁵⁾は、水泳選手を対象として、運動イメージ群とコントロール群に分け、週3回、5週間、ハムストリングスや股関節内転筋群、肩関節および足関節周囲筋群をストレッチするイメージを行い、介入前後の柔軟性を比較した。結果、ハムストリングスと足関節周囲筋群において有意な柔軟性の改善を認めた。運動イメージによる筋力や関節可動域の改善に加えて、運動学習効果が得られる⁶⁾とした報告から、運動イメージの運動療法への有効性が示されてきた。実際のトレーニングと比較して、運動イメージによる運動機能の改善効果は少ないものの²⁻⁵⁾、運動療法に運動イメージを併用することで、より運動機能の改善がみられたとの報告⁷⁾もある。また、医学的問題で身体活動が制限されている時や運動実施が困難な場合においても、運動イメージを行うことにより、廃用症候群といった二次的に生じる運動機能の低下を予防できるのではないかと考える。

運動イメージの神経生理学的検討として、様々な手法が用いられている。運動イメージ時の脳活動について、陽電子放射画像撮影法(Positron Emission Tomography: PET)、機能的核磁気共鳴画像撮影法(functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI)、近赤外分光法(Near Infrared Spectroscopy: NIRS)や運動誘発電位(Motor Evoked Potentials: MEPs)を用い検討されている。PET を用いた検討において、Stephan ら⁸⁾は、ジョイスティックを4方向に動かす運動イメージ時に補足運動野、運動前野、体性感覚連合野、帯状皮質の活動を認めたと報告した。fMRI を用いた検討において、Lotze ら⁹⁾は、把握運動イメージ時に一次運動野、補足運動野、運動前野、帯状皮質および小脳の活動を認めたと報告した。Nakano ら¹⁰⁾は、NIRS を用いた検討において、箸動作やハンマー動作運動イメージ時に運動前野、前帯状皮質、一次体性感覚野および背外側前頭前野の活動を認めたと報告した。加えて Luft ら¹¹⁾は、母指と他4指の周期的な対立運動イメージ時に一次体性感覚野の活動を認め、松田ら¹²⁾は、非利き手による箸の先端を合わせる運動イメージ時に大脳基底核の活動を認めたと報告した。また、運動イメージ時に経頭蓋磁気刺激による運動誘発電位(MEPs)振幅が増大することから、運動イメージは皮質脊髄の興奮性を増大することが示された¹³⁾。これら先行研究より、運動実行と運動イメージは、類似した神経基盤を有していることが考えられる。

一方、運動イメージが脊髄運動神経の興奮性に及ぼす影響に関しては、F波やH反射、T反

射を用いて検討されている。ここでF波とは、 α 運動ニューロンに最大上刺激を与えることにより、発生した逆行性インパルスが α 運動ニューロンの軸索を上行し、脊髄前角細胞で再発火を起こした後、順行性インパルスとなって下行して支配筋に発生した複合活動電位であるとされる¹⁴⁻¹⁶⁾。Taniguchiら¹⁷⁾は、3時間の持続的安静とともに左母指外転筋運動イメージを行い、その影響を左母指外転筋より得られるF波を用いて検討した。持続的安静だけであれば、F波出現頻度および振幅F/M比は安静前と比較して有意に低下するが、安静とともに運動イメージを行うと、F波出現頻度および振幅F/M比は安静前のレベルを維持していた。Suzukiら¹⁸⁾は、等尺性収縮での最大努力の50%収縮強度における母指対立運動イメージ時のF波出現頻度、振幅F/M比は、安静時よりも有意に増加したと報告した。さらに、センサーを把持しないで運動イメージを行った場合とセンサーを把持しながら運動イメージを行った場合の脊髄運動神経の興奮性変化を検討したところ、センサーを把持しながら運動イメージを行う方が、把持しないで運動イメージを行った場合よりも脊髄運動神経の興奮性が增大したと報告した。Suzukiら¹⁸⁾は、運動イメージを行う際には、単に運動をイメージさせるだけでなく、獲得させたい運動の肢位を保持しながら目的とする運動をイメージさせることが重要であると述べており、本研究においても、ピンチメータセンサーを把持しながらの運動イメージ課題を用いて検討を行うこととした。Kasaiら¹³⁾は、手関節掌屈運動イメージ時のMEPs振幅は安静時と比較して増加したものの、H反射振幅は安静時と比較して有意な差を認めなかったと報告した。Oishiら¹⁹⁾は、スピードスケート選手に実際の競技をイメージさせ、右ヒラメ筋よりH反射を導出した。H反射振幅の有意な低下を認める場合、変化を認めない場合、有意な増加を認める場合の3通りが観察された。運動イメージにより脊髄運動神経の興奮性が增大するという報告^{17,18)}、変化しないという報告^{13,19)}、さらには低下するという報告¹⁹⁾があり、一定の結果が得られていないのが現状である。著者ら²⁰⁾は、運動イメージする筋収縮強度を変化させた時の脊髄運動神経の興奮性変化をF波により検討した。収縮強度10%、30%および50%において、運動イメージは脊髄運動神経の興奮性を増大させるが、運動イメージする筋収縮強度の違いは脊髄運動神経の興奮性変化に影響を及ぼさなかった。運動イメージによる脊髄運動神経の興奮性変化は様々であり、その機序は未だ明らかでないところが多い。著者らの先行研究では、50%以下の収縮強度でしか検討を行っていないため、50%以上の収縮強度運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性は変化する可能性があった。よって、本研究では、ピンチメータセンサーを把持しながら50%と100%収縮強度での母指対立運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性変化を検討することとした。

ところで、運動時には交感神経活動の亢進による心拍数や血圧の増加反応がみられる^{21,22)}。運動イメージが運動実行と類似する神経基盤を有するのであれば、運動イメージによる自律神経系にみられる変化は、運動実行時と同様もしくは類似したパターンを示すと考えられる。運動イメージが循環応答に及ぼす影響について、運動イメージ時に心拍数や血圧が増加することが報告されている^{19,23-25)}。心拍変動は心臓交感神経と心臓迷走神経の両者により調節され、心臓交感神経の興奮により心拍数、血圧が増大することから、運動イメージは心臓交感神経活動を亢進させると考えられる。しかし、異なる筋収縮強度を用いた運動イメージ時の自律神経系の活動変化を検討した報告はみられない。

そこで本研究では、50%と100%収縮強度における母指対立運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性と自律神経活動の変化も検討した。

第Ⅱ章 研究の方法と対象

1. 対象

対象は、本研究の趣旨を説明し、同意書を得た過去に神経学的既往のない健常成人 10 名（男性 8 名、女性 2 名）、平均年齢 25.3 ± 5.3 歳、平均身長 167.8 ± 4.4 cm、平均体重 65.9 ± 7.4 kg とした。なお、本研究は青森県立保健大学大学院研究倫理委員会（承認番号 1408）および関西医療大学大学院倫理審査委員会（14-18）に承認済みである。

2. 方法

被検者を背臥位とし、左側正中神経刺激による F 波を左母指球筋より導出した。F 波測定は、誘発筋電計 Viking Quest electromyography machine ver9.0 (Natus 社製) を用いて行った。環境設定として、室内温度は 25°C を保つようにした。F 波刺激条件は、刺激頻度 0.5 Hz、刺激持続時間 0.5 ms、刺激強度は M 波最大上刺激（最大 M 波が得られる電気刺激の 1.2 倍の強度）、刺激回数は 30 回とした。被検者には、実験中、上下肢が左右対称の解剖学的基本肢位でピンチメータ Digital indicator F304A (Unipulse 社製) のピンチ力表示部を注視させた（図 1）。F 波記録条件は、振幅の感度を $200 \mu\text{V}$ 、掃引速度は 5 ms に設定した。フィルターの周波数帯域は、20 Hz から 3 kHz に設定した（図 2）。

まず、5 分間リラックスした状態を保持させた (rest1 試行)。次に、ピンチメータを用いて測定された左側母指と示指による対立運動でピンチメータのセンサーを 10 秒間持続して把持できる最大のピンチ力に対し、その 50% の大きさのピンチ力で対立運動を練習させた。ピンチ力の調整は、被検者自身がピンチ力表示部分に表示される実測値を見ながら対立運動を行う、視覚によるフィードバックを用いて行った。十分な休憩後、被検者に「先ほど練習した最大努力の 50% の大きさでの左側母指と示指での対立運動を出来るだけリラックスした状態で頭の中でイメージしてください。」と教示したうえで、ピンチメータのセンサーを軽く把持しながら 5 分間、50% 収縮強度での母指対立運動をイメージさせた (50%image1 試行)。この時、安静試行同様に開眼でピンチ力表示部を注視させ、検者はピンチ力が発揮されていないことを確認した。50%image1 試行終了後、5 分間安静状態を保持させた (rest2 試行)。さらに 5 分間、2 回目の 50% 収縮強度運動イメージを行った (50%image2 試行)。50%image2 試行終了後、5 分間安静状態を保持させた (rest3 試行)。

F 波分析項目は、F 波出現頻度、振幅 F/M 比および立ち上がり潜時の 3 つとした。F 波出現頻度は、30 回の電気刺激のうち、F 波が出現した回数の割合を示しており（図 3）、再発火する脊髄前角細胞数を反映するとされる。振幅 F/M 比は、M 波振幅に対する F 波振幅の割合（F 波振幅を M 波振幅で除した値）を示しており（図 4）、再発火する前角細胞数や細胞個々の運動単位の興奮性を反映する^{14,15)}とされることから、F 波出現頻度と振幅 F/M 比は、脊髄運動神経の興奮性の指標と考えることができる。立ち上がり潜時は、電気刺激から F 波が立ち上がるまでの時間を示しており、神経伝導時間を反映している（図 4）。

F 波測定は、rest1 試行では安静開始 4 分後に 1 分間行った。image1 および image2 試行では、5 分間運動イメージのうち運動イメージ開始直後、2 分後および 4 分後に 1 分間、計 3 回行い、3 回の平均を測定値とした。rest2 および rest3 試行では、F 波を安静開始直後に 1 分間測定した。

自律神経活動は、ハートリズムスキャナー PE (Ark Trading Pacific 社製) を用いて評価し

た。左耳垂に装着した脈波センサーにより脈波を測定し（図 5）、測定された脈波を解析することにより、Low frequency / High frequency 比（LF/HF 比）を得た。LF/HF 比は、心拍変動の周波数解析による低周波領域（LF）と高周波領域（HF）のパワー値の比である。LF は、0.04～0.15 Hz の帯域で、交感神経と副交感神経の両方の活動性を示している。HF は、0.15～0.40 Hz の帯域で、副交感神経の活動を示している。LF を HF で除した LF/HF 比が、心臓交感神経活動を表す指標とされる。自律神経バランステストは、安静状態での 5 分間の心拍記録をもとに行う、短時間心拍変動解析を基準としている²⁶⁾ことから、本研究では、脈波測定を rest1、50%image1、rest2、50%image2 および rest3 試行において 5 分間行った。

上記に示した実験の流れを 50%条件とし、100%条件においても同様に行った。なお、50%と 100%条件は、別の日にランダムに行った（図 6）。

3. 統計学的検討

本研究では、4 つの統計学的検討を行った。測定値の正規性を検討するために、Kolmogorov-Smirnov 検定と Shapiro-Wilk 検定を行った結果、その正規性が棄却されたため、ノンパラメトリック検定法を用いて検討を行った。第 1 に、運動イメージによる F 波変化を個々の条件間で検討した。運動イメージ試行時と運動イメージ直後の F 波変化を検討するために、Dunnnett 検定を用いて、image1、rest2、image2 および rest3 試行における F 波出現頻度、振幅 F/M 比、立ち上がり潜時の 3 つの測定値をそれぞれ rest1 試行時の測定値と比較した。第 2 に、運動イメージによる F 波変化を 2 条件間で比較した。まず、rest1 試行を 1 とした F 波出現頻度、振幅 F/M 比および立ち上がり潜時相対値を求め、Wilcoxon 符号付順位検定を用いて、2 条件間で比較した。第 3 に、運動イメージによる自律神経活動の変化を個々の条件間で比較した。運動イメージ試行時と運動イメージ直後の LF/HF 比変化を検討するために、Dunnnett 検定を用いて、image1、rest2、image2 および rest3 試行における LF/HF 比を rest1 試行時の LF/HF 比と比較した。第 4 に、運動イメージによる自律神経活動の変化を 2 条件間で比較した。rest1 試行を 1 とした LF/HF 比相対値を求め、Wilcoxon 符号付順位検定を用いて、2 条件間で比較した。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% とした。

第三章 結果

1. 運動イメージによる F 波変化

1) 50%運動イメージ条件

50%運動イメージ条件において、rest1 試行に対する 50%image1 および 50%image2 試行時の F 波出現頻度増加率（平均値 ± 標準偏差）は、各々 $128.9 \pm 131.1\%$ 、 $88.8 \pm 84.1\%$ であり、50%image1 および 50%image2 試行時の F 波出現頻度が、rest1 試行時と比較して有意に増加した ($p < 0.01$; 図 7)。

rest1 試行に対する 50%image1 および 50%image2 試行時の振幅 F/M 比増加率（平均値 ± 標準偏差）は、各々 $161.8 \pm 98.4\%$ 、 $141.3 \pm 156.7\%$ であり、50%image1 および 50%image2 試行時の振幅 F/M 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した ($p < 0.05$; 図 8)。

立ち上がり潜時については、全試行間で差は認められなかった (図 9)。

2) 100%運動イメージ条件

100%運動イメージ条件において、rest1 試行に対する 100%image1 および 100%image2 試行時の F 波出現頻度増加率（平均値 ± 標準偏差）は、それぞれ $123.1 \pm 193.5\%$ 、 $96.1 \pm 158.0\%$ であり、100%image1 および 100%image2 試行時の F 波出現頻度が、rest1 試行時と比較して有意に増加した ($p < 0.01$; 図 10)。

rest1 試行に対する 100%image1 および 100%image2 試行時の振幅 F/M 比増加率（平均値 ± 標準偏差）は、各々 $126.7 \pm 150.8\%$ 、 $142.0 \pm 218.9\%$ であったが、有意差は認められなかった (図 11)。

立ち上がり潜時については、全試行間で差は認められなかった (図 12)。

2. 運動イメージによる自律神経活動の変化

1) 50%運動イメージ条件

rest1 試行に対する 50%image1 および 50%image2 試行時の LF/HF 比増加率（平均値 ± 標準偏差）は、各々 $153.7 \pm 317.0\%$ 、 $123.0 \pm 193.5\%$ であり、50%image1 試行時の LF/HF 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した ($p < 0.05$; 図 13)。

2) 100%運動イメージ条件

rest1 試行に対する 100%image1 および 100%image2 試行時の LF/HF 比増加率（平均値 ± 標準偏差）は、各々 $97.8 \pm 119.8\%$ 、 $173.7 \pm 208.1\%$ であり、100%image1 試行時の LF/HF 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した ($p < 0.05$; 図 14)。

3. F 波および LF/HF 比相対値による収縮強度間の運動イメージ効果比較

F 波出現頻度、振幅 F/M 比、立ち上がり潜時および LF/HF 比相対値全てにおいて、2 条件間に有意差は認められなかった (図 15-18)。

第IV章 考察

1. 運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性が増加したことについて

本研究は、50%および 100%収縮強度運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性と自律神経系活動の変化を検討した。50%および 100%収縮強度運動イメージ時に F 波出現頻度および振幅 F/M 比の増大を認めた。よって、運動イメージは、脊髄運動神経の興奮性を増大させることが示唆された。

運動イメージにより脊髄運動神経の興奮性が増加したことについて、大脳皮質より母指球筋に対応する下行性線維の影響が考えられる。大脳皮質からの下行性線維として、まず皮質脊髄路が考えられる。運動イメージ中に賦活する脳領域として、一次運動野、一次体性感覚野、補足運動野、運動前野、小脳および大脳基底核がある^{8~12)}。補足運動野、運動前野、小脳および大脳基底核は、運動準備や計画または運動制御において重要な役割を担っている。これらの部位は一次運動野に投射し、皮質脊髄路を介して脊髄運動神経の興奮性を増加させた可能性が考えられる。さらに、脊髄運動神経には錐体外路を介した投射をもつことから、運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性増大には、皮質脊髄路と錐体外路の関与が考えられる。

また、ピンチメータセンサーを軽く把持しながら運動イメージを行っていることから、ピンチメータセンサー把持時の触圧覚や固有受容感覚の影響が考えられる。先行研究において Mizuguchi ら^{27,28)}は、物体を用いた運動イメージ中の中樞神経系の興奮性が、物体に触れることで影響を受けるかどうかを運動誘発電位 (MEPs) と体性感覚誘発電位 (Somatosensory Evoked Potentials: SEPs) により検討した。物体を用いた運動イメージ中の皮質脊髄の興奮性は、単に触覚刺激だけでなく、実際に物体を把持した時の触覚と固有受容覚の両方の入力により調節されるとしている。触圧覚の伝導路には、前脊髄視床路と後索内側毛帯路がある。後索内側毛帯路は固有受容感覚の伝導路でもある。前脊髄視床路と後索内側毛帯路より視床に伝えられた触圧覚および固有受容感覚は、視床から内包後脚をとおりブロードマン 1、2、3 野である一次体性感覚野に投射する。また、体性感覚の中継点である視床より直接、運動野に投射する線維もある。ブロードマン 3 野は大きく 3a 野と 3b 野に分かれており、3a 野には関節、筋からの固有受容感覚が、3b 野には皮膚からの触圧覚が投射される。ブロードマン 3a、3b 野では比較的局所感覚情報が処理される。ブロードマン 3a、3b 野から直接一次運動野への投射はなく、ブロードマン 1、2 野でより複雑な情報が処理され、触圧覚と固有受容感覚が統合される。ブロードマン 1、2 野には、刺激の方向や方位に感度の高いニューロンがみられ、刺激の複雑な性質を認識している。末梢からの体性感覚情報は、ブロードマン 3、1、2 野の順で階層的に処理された後、一次運動野に投射する。加えて、固有受容感覚の伝導路には脊髄小脳路がある。脊髄小脳路より小脳核に伝えられた固有受容感覚は、さらに小脳核から赤核、視床核を経由して運動野に投射する。さらに Suzuki ら¹⁸⁾は、ピンチメータセンサーを把持しながらの運動イメージによる脊髄運動神経の興奮性の促通効果は、ピンチメータセンサー把持無しでの運動イメージ時よりも大きかったと報告している。ピンチメータセンサー把持時の触覚や固有受容感覚の入力のみでも脊髄運動神経の興奮性は増大するが、センサーを把持しながら運動イメージを行うことで、より脊髄運動神経の興奮性は増大することが考えられる。

2. 運動イメージする筋収縮強度の違いが脊髄運動神経の興奮性変化に影響を与えなかったことについて

本研究において、50%収縮強度と100%収縮強度、2つの収縮強度において、運動イメージする筋収縮強度の違いによる脊髄運動神経の興奮性変化には差を認めなかった。

運動実行時の皮質脊髄の興奮性変化について、Woldag ら²⁹⁾は、5%、10%、50%および100%収縮強度の示指外転、ピンチおよびグリップ動作時のMEPs変化を検討した。3つの動作全てにおいて、収縮強度の増加に伴い、MEPs振幅が増加した。また、Suzuki ら³⁰⁾は、25%、50%、75%および100%収縮強度を用い、等尺性母指対立運動時の脊髄運動神経の興奮性変化をF波により検討した。F波出現頻度および振幅F/M比は、収縮強度の増加に伴い増加した。これより、運動実行時の中枢神経系と脊髄運動神経の興奮性は、筋収縮強度の増加に伴い増加することが考えられる。

しかし、運動イメージする筋収縮強度の違いによる脊髄運動神経の興奮性変化について、Hale ら³¹⁾は、最大努力の40%、60%、80%および100%収縮強度の足関節背屈運動イメージ時のH反射の振幅変化に全収縮強度間で有意差を認めなかった。Aoyama ら³²⁾も、最大努力の50%と100%収縮強度の足関節底屈運動イメージ時のH反射の振幅変化に2収縮強度間で有意差を認めなかった。本研究も先行研究と同様に、50%と100%収縮強度運動イメージによる脊髄運動神経の興奮性変化に差を認めなかった。よって、運動イメージする筋収縮強度の違いは、脊髄運動神経の興奮性変化に影響を与えない可能性が考えられる。

先行研究と本研究の結果について、中枢神経系の関与が考えられる。運動イメージする筋収縮強度の違いによる中枢神経系の興奮性変化について、Park ら³³⁾は、10%、20%、30%、40%、50%および60%収縮強度を用いた手指屈曲、伸展運動イメージによりMEPsは安静時と比較して増加するが、収縮強度間に有意差を認めなかった。またRomero ら³⁴⁾は、事象関連電位を用いた検討において、指屈曲運動実行時の一次運動野、補足運動野および運動前野の活動は、力発揮量の増加に伴い増加した。しかし、運動イメージ時の補足運動野と運動前野の活動は、力発揮量の増加に伴い増加するが、一次運動野の活動は、力発揮量に依存しないことを認めた。異なる筋収縮強度を用いた運動実行時と運動イメージ時の一次運動野の活動の相違点について、運動イメージ時に一次運動野の活動を抑制する作用が働いた可能性が考えられる。運動イメージは、実際の運動を伴わない脳内の心的リハーサルといわれていることから、運動の準備過程と同時に、運動実行を抑制する機能が関与した可能性が考えられる。Nakata ら³⁵⁾やWatanabe ら³⁶⁾は、GO/NO-GO課題時の脳活動をfMRIで計測した。これは、GO刺激が提示されると、運動課題を実行し、NO-GO刺激が提示されると、その運動課題を中止するというもので、NO-GO刺激時の脳活動を計測することで、運動抑制に関与する脳領域が測定できる。結果、補足運動野と運動前野は、運動準備過程と運動抑制の2つの機能を有することを認めた。これら報告をふまえて、補足運動野と運動前野が、運動準備と同時に収縮強度に応じた筋活動の抑制に機能した結果、異なる筋収縮強度を用いた運動イメージが、一次運動野を含む皮質脊髄の興奮性変化に影響を及ぼさなかったのではないかと考える。

3. 運動イメージにより心臓交感神経活動が亢進したことについて

本研究では、50%および100%収縮強度運動イメージ時にLF/HF比が増大したことから、運動イメージは、心臓交感神経活動を亢進させることが示唆された。

運動イメージにより心臓交感神経活動が亢進した機序に関して、セントラルコマンドが考

えられる。セントラルコマンドは、中枢神経系から生じる運動指令と並行して起こり、上位中枢を介して循環調節を行うフィードフォワード調節機構であるとされる³⁷⁾。Silber ら³⁸⁾は、運動野への磁気刺激により皮膚交感神経活動の亢進を認め、Clancy ら³⁹⁾は、一次運動野への経頭蓋直流刺激により LF/HF 比の増加を認めた。これらの結果から、運動野と循環調節中枢の連絡に関して、皮質脊髄路を介した投射が関与する可能性がある。延髄の吻側延髄腹外側および内側部には、交感神経線維が存在するとされている。よって、皮質脊髄路を介した、延髄にある心臓交感神経線維への投射により、心臓交感神経活動を亢進させた可能性が考えられる。運動イメージにより、島皮質⁴⁰⁾や前帯状皮質^{10, 41)}の活動を認めた報告がある。これら領域は、自律神経活動を調節する上位中枢とされる。運動イメージによる島皮質や前帯状皮質の活動が、視床、視床下部、中脳を介して、延髄にある心臓交感神経線維に投射し、心臓交感神経活動を亢進させたと考える。また Kerman ら⁴²⁾は、交感神経活動と運動調節の両方に関与する脳領域として、吻側延髄腹内側部があるとされている。さらに Allen ら⁴³⁾は、吻側延髄腹内側部は網様体脊髄路の一部であるとし、運動イメージによる心臓交感神経活動の調節には、脊髄運動神経の興奮性と同様に、皮質脊髄路と網様体脊髄路両方の関与が考えられる。

4. 運動イメージする筋収縮強度の違いが心臓交感神経活動の変化に影響を与えなかったことについて

2つの収縮強度間で、運動イメージによる心臓交感神経活動の変化に差がみられなかった。このことは、本研究における2つの収縮強度間での運動イメージによる脊髄運動神経の興奮性変化と類似している。運動イメージによる心臓交感神経活動の変化が、皮質脊髄路を介した交感神経線維への投射によるものだとすると、Park ら³³⁾による運動イメージする筋収縮強度の違いが皮質脊髄の興奮性変化に影響しないという報告から、運動イメージする筋収縮強度の違いが心臓交感神経活動の変化に影響を及ぼさなかったものと推察する。

第V章 統括

近年、リハビリテーションにおける運動イメージの運動療法への応用に関して、様々な神経生理学的な手法を用いて検討がなされている。運動イメージによる中枢神経系の活動においては、一次運動野、補足運動野、運動前野、小脳や大脳基底核といった、運動の準備や企画に関与する脳領域が賦活されることがわかってきた。しかし、運動イメージが脊髄運動神経の興奮性に与える影響に関しては、未だ一定の見解が得られていないのが現状である。我々は、最終的に運動イメージにより筋機能を改善させることを目的としているが、その際、中枢神経系だけではなく、脊髄運動神経の興奮性も変化しなければならないと考えている。本研究では、等尺性収縮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に与える影響を検討し、さらに、課題を異なる筋収縮強度でイメージすることにより脊髄運動神経の興奮性にどのような影響を及ぼすのかを検討した。あわせて、運動イメージ時の自律神経活動の変化についても検討した。

運動イメージは脊髄運動神経の興奮性と心臓交感神経活動を増加させることが示唆された。しかし、50%と100%収縮強度においては、運動イメージする筋収縮強度の違いによる脊髄運動神経の興奮性と心臓交感神経活動の変化には差がないことが示唆された。これより、100%という高強度の収縮強度運動イメージを用いずとも、50%という中等度の収縮強度の運動イメージを行うことで、脊髄運動神経の興奮性と心臓交感神経活動の増大効果が得られる可能性が示唆された。本研究では、運動イメージ時の脊髄運動神経の興奮性と自律神経活動の変化について検討しているが、今後は、異なる筋収縮強度運動イメージによる筋力強化練習の効果比較検討など、具体的な運動イメージの効果について検討を行っていきたいと考えている。

謝辞

青森県立保健大学大学院健康科学研究科理学療法学分野教授である岩月宏泰先生には、本研究の実施の機会を与えて頂き、またその遂行にあたり終始、懇切丁寧にご指導・ご鞭撻を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

青森県立保健大学大学院健康科学研究科教授である尾崎勇先生、ならびに関西医療大学大学院保健医療学研究科教授である鈴木俊明先生には、副査としてご指導・ご鞭撻を賜りましたことを心より感謝申し上げます。

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

参考文献

- 1) Guillot A, Rienzo FD, MacIntyre T, Moran A, Collet C : Imagining is not doing but involves specific motor commands : a review of experimental data related to motor inhibition, *Front Hum Neurosci*, 6 (1), 247, 2012
- 2) Yue GH, Cole KJ : Strength increases from of motor program : Comparison of training with maximal voluntary and imagined muscle contractions, *J Neurophysiol*, 67 (5), 1114-1123, 1992
- 3) Ranganathan VK, Siemionow V, Liu JZ, Sahgal V, Yue GH : From mental power to muscle power-gaining strength by using mind, *Neuropsychologia*, 42 (7), 944-956, 2004
- 4) Sidaway B, Trzaska A : Can mental practice increase ankle dorsiflexor torque?, *Phys Ther*, 85 (10), 1053-1060, 2005
- 5) Guillot A, Tolleran C, Collet C : Does motor imagery enhance stretching and flexibility?, *J Sports Sci*, 28 (3), 291-298, 2010
- 6) Jackson PL, Lafleur MF, Malouin F, Richards C, Doyon J : Potential Role of Mental Practice Using Imagery in Neurologic Rehabilitation, *Arch Phys Med Rehabil*, 82 (8), 1133-1141, 2001
- 7) Page SJ, Levine P, Sisto P, Johnston MV : A randomized efficacy and feasibility study of imagery in acute stroke, *Clin Rehabil*, 15 (3), 233-240, 2001
- 8) 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
- 9) Lotze M, Montoya P, Erb M, Hülsmann E, Flor H, Klose U, Birbaumer N, Grodd W : Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements : an fMRI study, *J Cogn Neurosci*, 11 (5), 491-501, 1999
- 10) Nakano H, Ueta K, Osumi M, Morioka S : Brain activity during the observation, imagery, and execution of tool use : an fNIRS/EEG study, *J Nov Physiother*, S1-009, 1-7, 2012
- 11) Luft AR, Skalej M, Stefanou A, Klose U, Voigt K : Comparing motion- and imagery-related activation in the human cerebellum : A functional MRI study, *Hum Brain Mapp*, 6 (2), 105-113, 1998
- 12) 松田雅弘, 渡邊修, 来間弘展, 村上仁之, 渡邊壘, 妹尾淳史, 米本恭三 : 非利き手による箸操作の運動時, イメージ時, 模倣時の脳内機構の比較-機能的MRI-, *理学療法科学*, 26 (1), 117-122, 2011
- 13) Kasai T, Kawai S, Kawanishi M, Yahagi S : Evidence for facilitation of motor evoked potentials (MEPs) induced by motor imagery, *Brain Res*, 744 (1), 147-150, 1997
- 14) 鈴木俊明, 才藤栄一 : 誘発筋電図検査 (F 波、H 波) の検査方法に関するガイドライン, *理学療法科学*, 15 (4), 187-192, 2000
- 15) Mesrati F, Vecchierini MF : F-waves neurophysiology and clinical value, *Clin Neurophysiol*, 34 (5), 217-243, 2004
- 16) Fisher MA : F-Waves-Physiology and Clinical Uses-, *Scientific World Journal*, 7 (1), 144-160, 2007

- 17) Taniguchi S, Kimura J, Yamada T, Ichikawa H, Hara M, Fujisawa R, Shimizu H, Tani H : Effect of motion imagery to counter rest-induced suppression of F-wave as a measure of anterior horn cell excitability, *Clin Neurophysiol*, 119 (6), 1346-1352, 2008
- 18) Suzuki T, Bunno Y, Onigata C, Tani M, Uragami S : Excitability of spinal neural function during several motor imagery tasks involving isometric opponens pollicis activity, *NeuroRehabilitation*, 33 (1), 171-176, 2013
- 19) Oishi K, Kimura M, Yasukawa M, Yoneda T, Maeshima T : Amplitude reduction of H-reflex during mental movement simulation in elite athletes, *Behav Brain Res*, 62 (1), 55-61, 1994
- 20) Bunno Y, Yurugi Y, Onigata C, Suzuki T, Iwatsuki H : Influence of motor imagery of isometric opponens pollicis activity on the excitability of spinal motor neurons : a comparison using different muscle contraction strengths, *J Phys Ther Sci*, 26 (7), 1069-1073, 2014
- 21) Saito M, Mano T, Abe H, Iwase S : Responses in muscle sympathetic nerve activity to sustained hand-grips of different tensions in humans, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 55 (5), 493-498, 1986
- 22) Seals DR : Influence of force on muscle and skin sympathetic nerve activity during sustained isometric contractions in humans, *J Physiol*, 462 (1), 147-159, 1993
- 23) Beyer L, Weiss T, Hansen E, Wolf A, Seidel A : Dynamics of central nervous activation during motor imagination, *Int J Psychophysiol*, 9 (1), 75-80, 1990
- 24) Decety J, Jeannerod M, Germain M, Pastene J : Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort, *Behav Brain Res*, 42 (1), 1-5, 1991
- 25) Bolliet O, Collet C, Dittmar A : Autonomic nervous system activity during actual and mentally simulated preparation for movement, *Appl Psychophysiol Biofeedback*, 30 (1), 11-20, 2005
- 26) 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
- 27) Mizuguchi N, Sakamoto M, Muraoka T, Kanosue K : Influence of touching an object on corticospinal excitability during motor imagery, *Exp Brain Res*, 196 (4), 529-535, 2009
- 28) Mizuguchi N, Sakamoto M, Muraoka T, Nakagawa K, Kanazawa S, Nakata H, Moriyama N, Kanosue K : The modulation of corticospinal excitability during motor imagery of actions with objects, *PLoS One*, 6 (10), e26006, 2011
- 29) Woldag H, Lukhaup S, Renner C, Hummelsheim H : Enhanced motor cortex excitability during ipsilateral voluntary hand activation in healthy subjects and stroke patient, *Stroke*, 35 (11), 2556-2559, 2004
- 30) Suzuki T, Fujiwara T, Takeda I : Excitability of the spinal motor neuron pool and F-waves during isometric ipsilateral and contralateral contraction, *Physiother Theory Pract*, 9 (1), 19-24, 1993

- 31) Hale BS, Raglin JS, Koceja DM : Effect of mental imagery of a motor task on the Hoffmann reflex, *Behav Brain Res*, 142 (1-2), 81-87, 2003
- 32) Aoyama T, Kaneko F : The effect of motor imagery on gain modulation of the spinal reflex, *Brain Res*, 2011, 1372 (1), 41-48, 2011
- 33) Park WH, Li S : No graded responses of finger muscles to TMS during motor imagery of isometric finger forces, *Neurosci Lett*, 494 (3), 255-259, 2011
- 34) Romero DH, Lacourse MG, Lawrence KE, Schandler S, Cohen MJ : Event-related potentials as a function of movement parameter variations during motor imagery and isometric action, *Behav Brain Res*, 117 (1-2), 83-96, 2000
- 35) Nakata H, Sakamoto K, Ferretti A, Gianni Perrucci M, Del Gratta C, Kakigi R, Luca Romani G : Somato-motor inhibitory processing in humans : An event-related functional MRI study, *Neuroimage*, 39 (4), 1858-1866, 2008
- 36) Watanabe J, Sugiura M, Sato K, Sato Y, Maeda Y, Matsue Y, Fukuda H, Kawashima R : The human prefrontal and parietal association cortices are involved in N0-G0 performances : an event-related fMRI study, *Neuroimage*, 17 (3), 1207-1216, 2002
- 37) Hajduczuk G, Hade JS, Mark AL, Williams JL, Felder RB : Central command increases sympathetic nerve activity during spontaneous locomotion in cats, *Circ Res*, 69 (1), 66-75, 1991
- 38) Silber DH, Sinoway LI, Leuenberger UA, Amassian VE : Magnetic stimulation of the human motor cortex evokes skin sympathetic nerve activity, *J Appl Physiol*, 88 (1), 126-134, 2000
- 39) Clancy JA, Johnson R, Raw R, Deuchars SA, Deuchars J : Anodal transcranial direct current stimulation (tDCS) over the motor cortex increases sympathetic nerve activity, *Brain Stimul*, 7 (1), 97-104, 2014
- 40) Mizuguchi N, Nakata H, Hayashi T, Sakamoto M, Muraoka T, Uchida Y, Kanosue K : Brain activity during motor imagery of an action with an object : a functional magnetic resonance imaging study, *Neurosci Res*, 76 (3), 150-155, 2013
- 41) Tyszka JM, Grafton ST, Chew W, Woods RP, Colletti PM : Parceling of mesial frontal motor areas during ideation and movement using functional magnetic resonance imaging at 1.5 tesla, *Ann Neurol*, 35 (6), 746-749, 1994
- 42) Kerman IA, Enguist LW, Watson SJ, Yates BJ : Brainstem substrates of sympatho-motor circuitry identified using trans-synaptic tracing with pseudorabies virus recombinants, *J Neurosci*, 23 (11), 4657-4666, 2003
- 43) 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

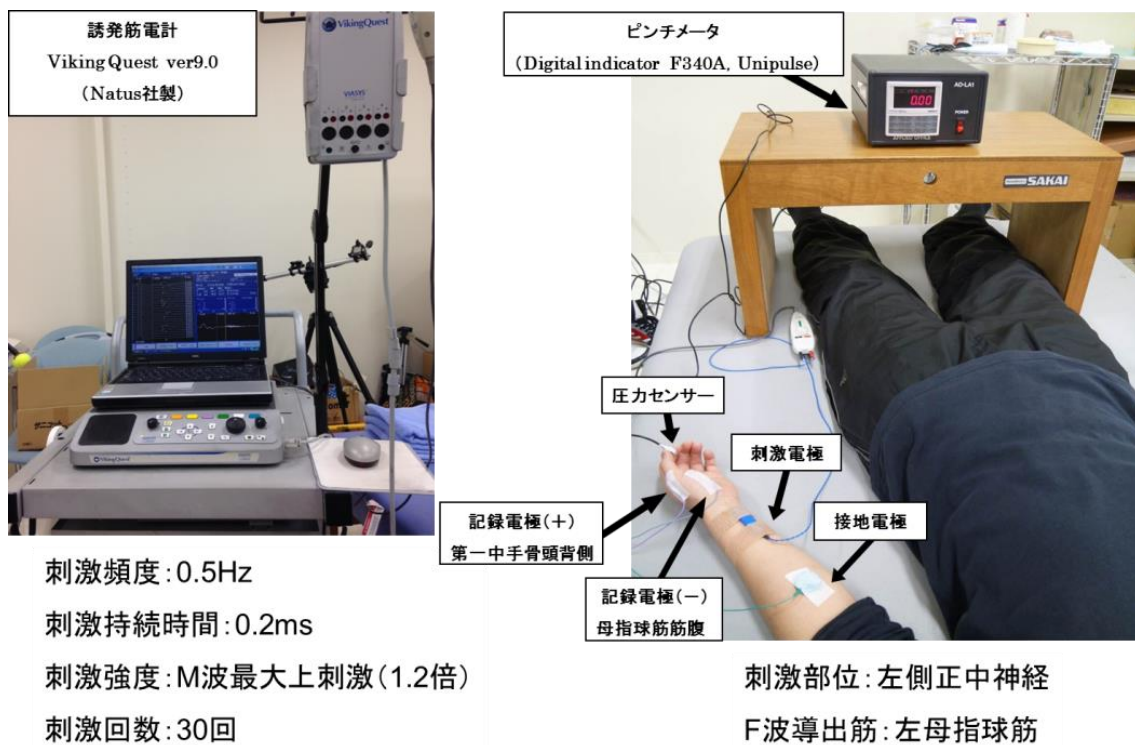


図1 F波測定風景と測定条件

被検者を背臥位とし、左側正中神経刺激によるF波を左母指球筋より導出した。F波測定は、Viking Quest electromyography machine ver9.0 (Natus社製) を用いて行った。F波刺激条件は、刺激頻度 0.5Hz、刺激持続時間 0.5ms、刺激強度はM波最大上刺激 (最大M波が得られる電気刺激の1.2倍の強度)、刺激回数は30回とした。被検者には、実験中、上下肢が左右対称の解剖学的基本肢位でピンチメータ (Unipulse社製 Digital indicator F304A) のピンチ力表示部を注視させた。

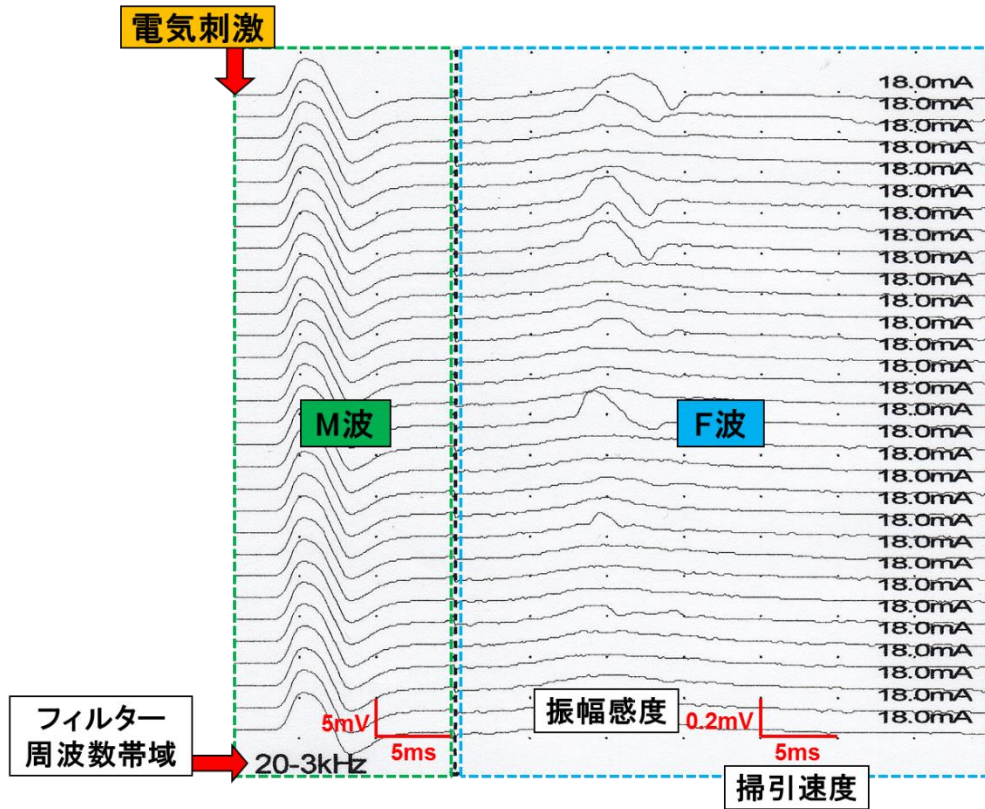


図2 F波測定画像

F波振幅感度は200 μ V、掃引速度は5 msに設定した。フィルター周波数帯域は、20 Hz から3 kHzに設定した。

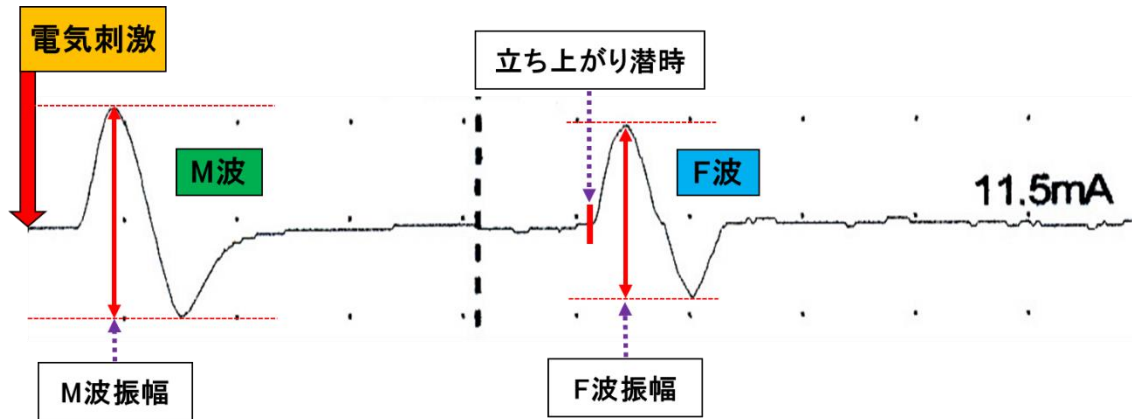


図4 振幅F/M比と立ち上がり潜時の分析画面

振幅F/M比はF波振幅をM波振幅で除した値であり、認められたF波の個数分の振幅F/M比合計の平均値を本研究での振幅F/M比とした。振幅F/M比は、再発火する脊髄前角細胞数と脊髄前角細胞個々の興奮性をあらわしている。立ち上がり潜時は電気刺激からF波が立ち上がるまでの時間であり、神経伝導速度をあらわしている。

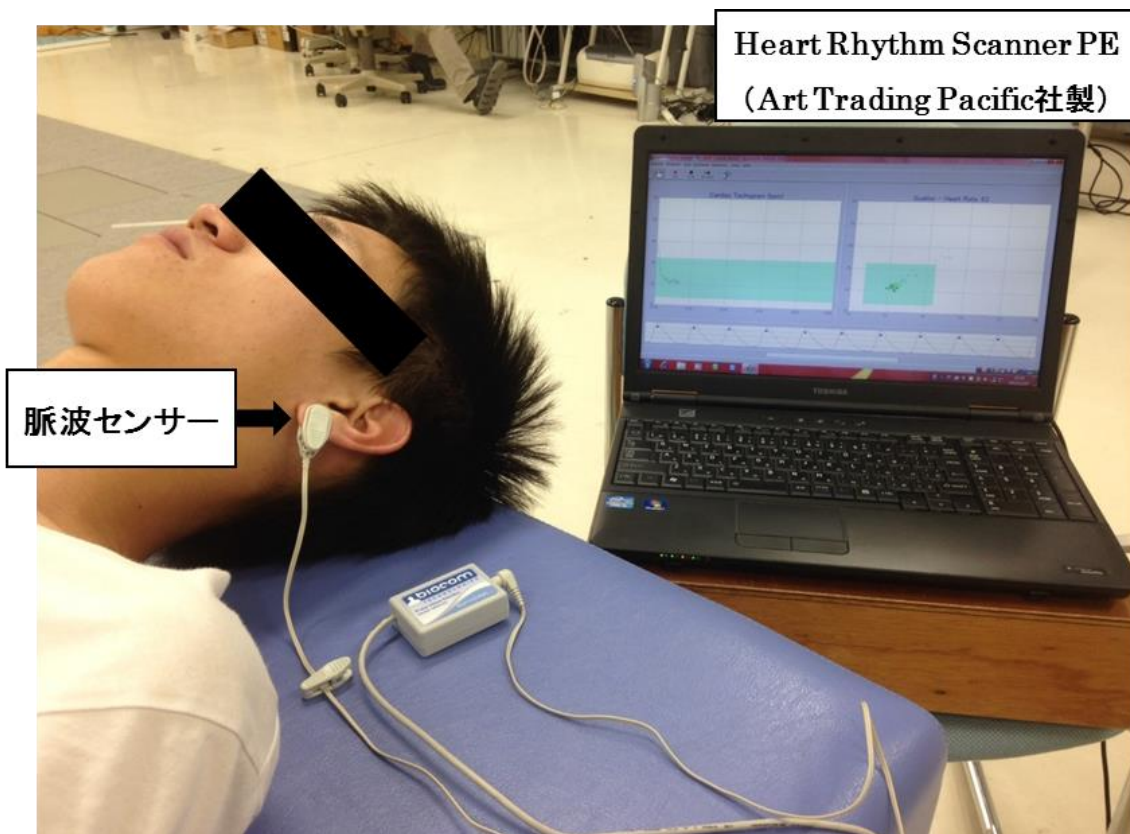


図5 自律神経活動測定風景

自律神経活動は、ハートリズムスキャナーPE（Ark Trading Pacific 社製）を用いて評価した。脈波センサーを左耳垂に装着し、脈波を測定した。

■: F波測定

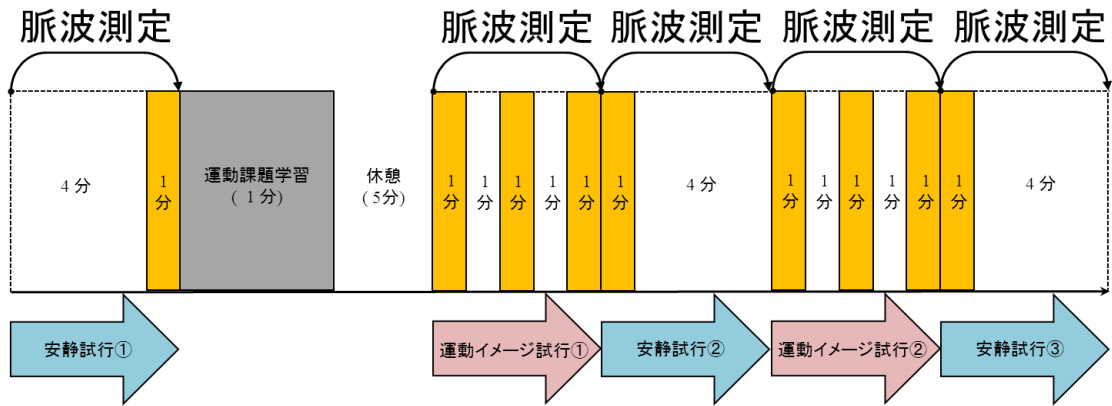


図6 実験プロトコル

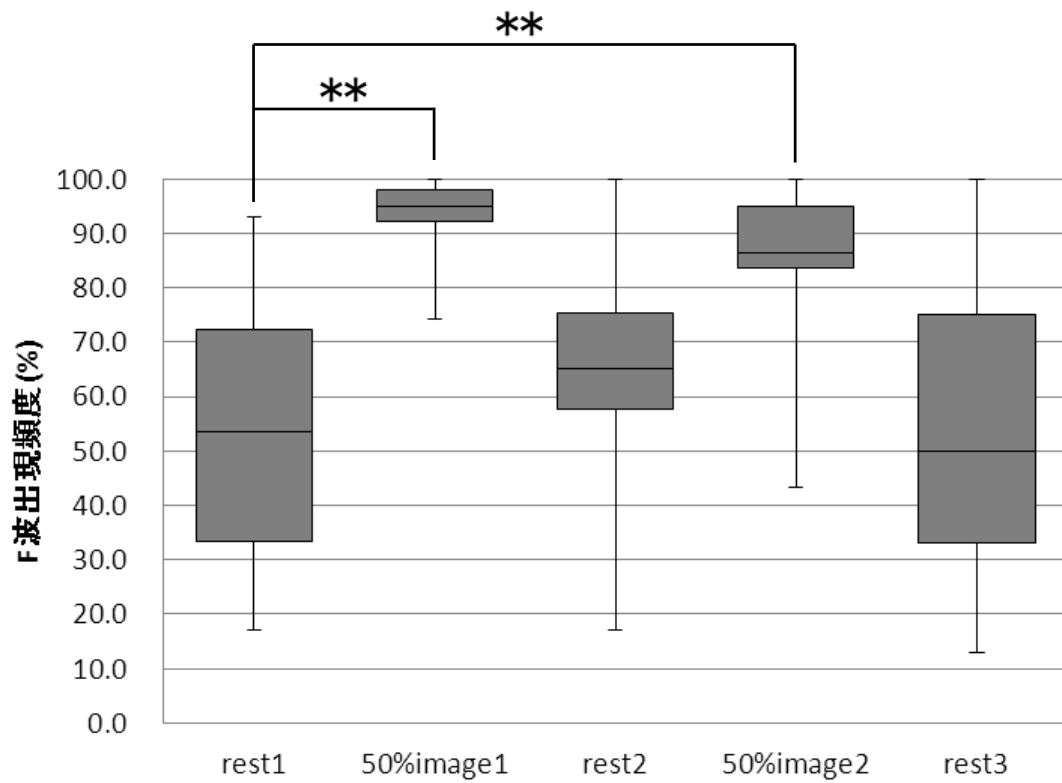


図7 50%収縮強度運動イメージによるF波出現頻度変化

50%image1 および 50%image2 試行時のF波出現頻度が、rest1 試行時と比較して有意に増加した (**: $p < 0.01$)。

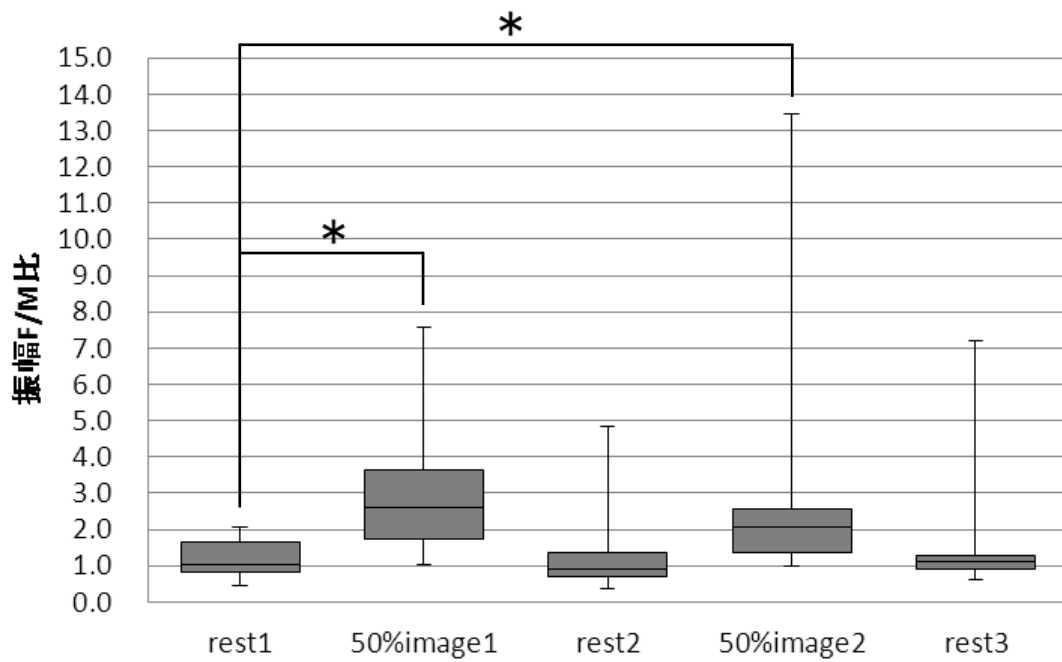


図8 50%収縮強度運動イメージによる振幅 F/M 比変化

50%image1 および 50%image2 試行時の振幅 F/M 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した (*: $p < 0.05$)。

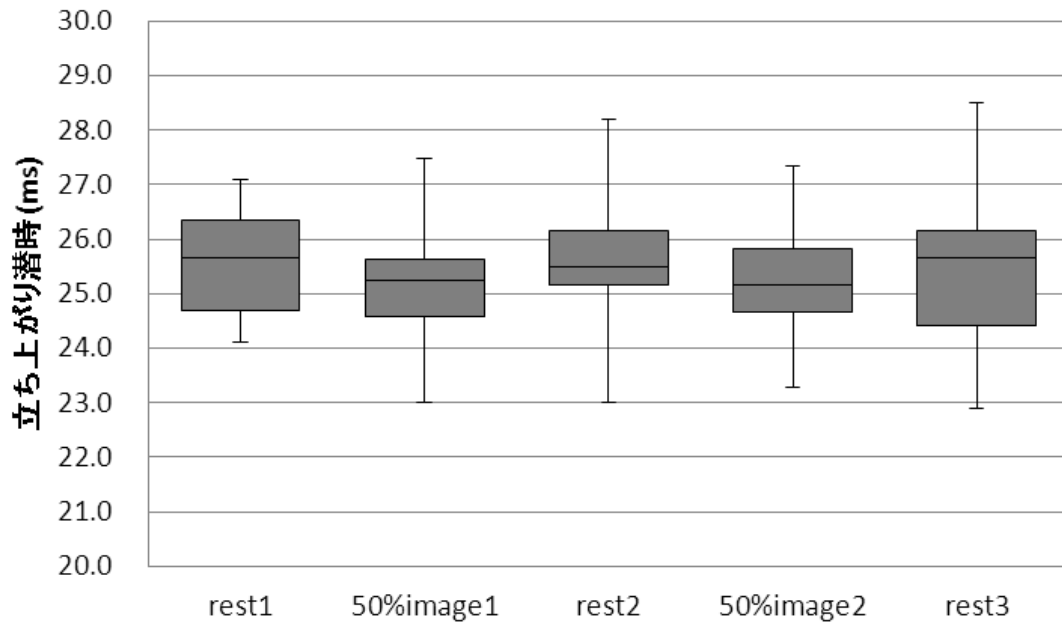


図9 50%収縮強度運動イメージによる立ち上がり潜時変化
立ち上がり潜時においては、全試行間で有意な差は認められなかった。

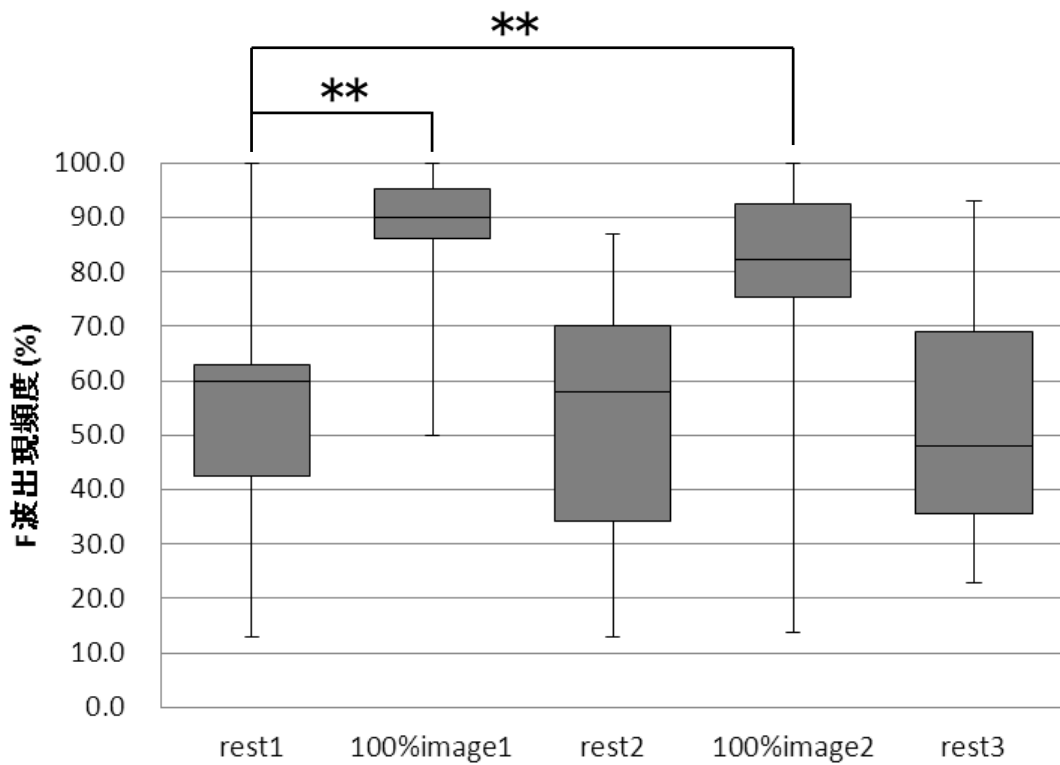


図 10 100%収縮強度運動イメージによる F 波出現頻度変化
 100%image1 および 100%image2 試行時の F 波出現頻度が、rest1 試行時と比較して有意に増加した (**: $p < 0.01$)。

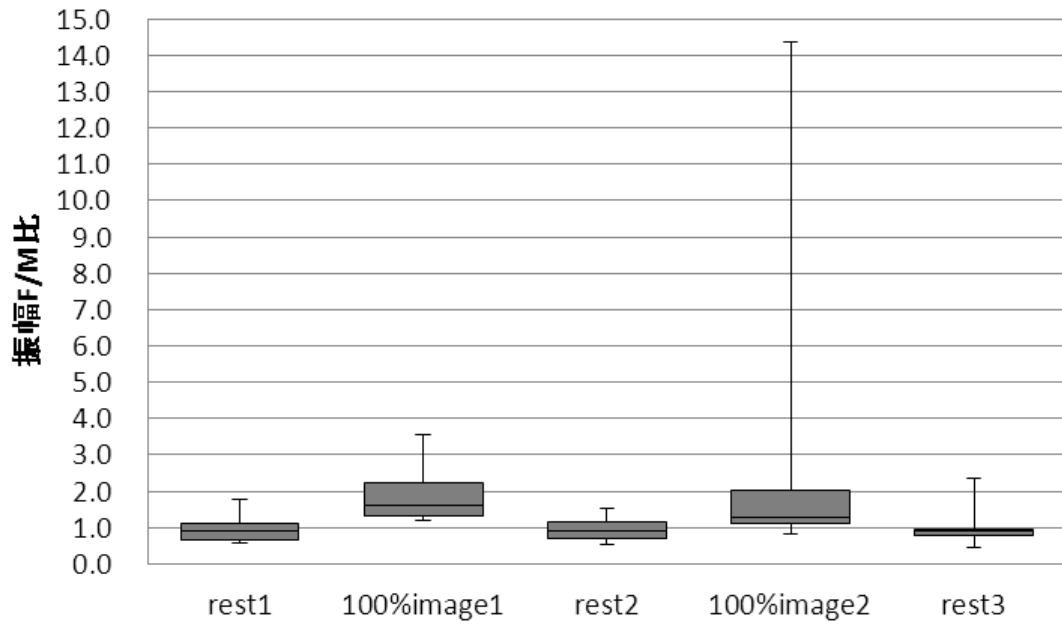


図 11 100%収縮強度運動イメージによる振幅 F/M 比変化
 振幅 F/M 比変化においては、全試行間で有意な差は認められなかった。

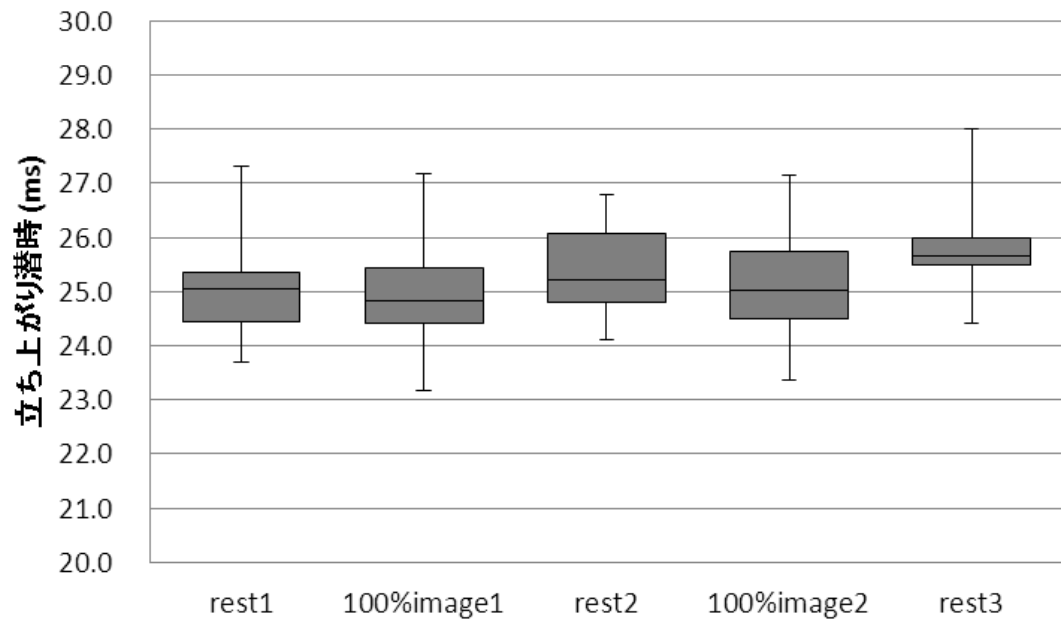


図 12 100%収縮強度運動イメージによる立ち上がり潜時変化
立ち上がり潜時においては、全試行間で有意な差は認められなかった。

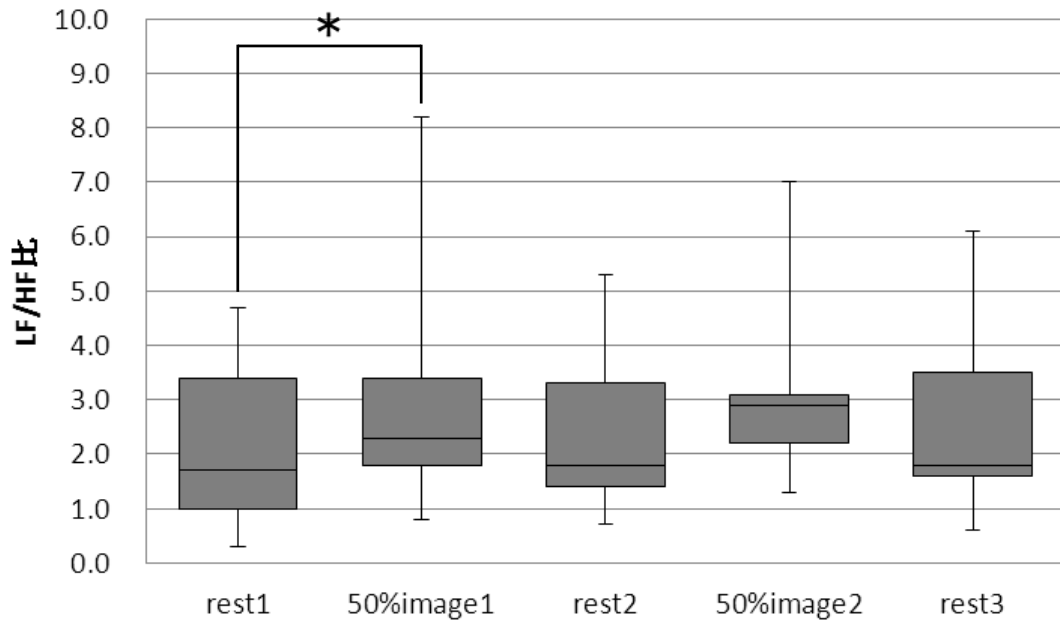


図 13 50%収縮強度運動イメージによる LF/HF 比変化
 50%image1 試行時の LF/HF 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した (*: $p < 0.05$)。

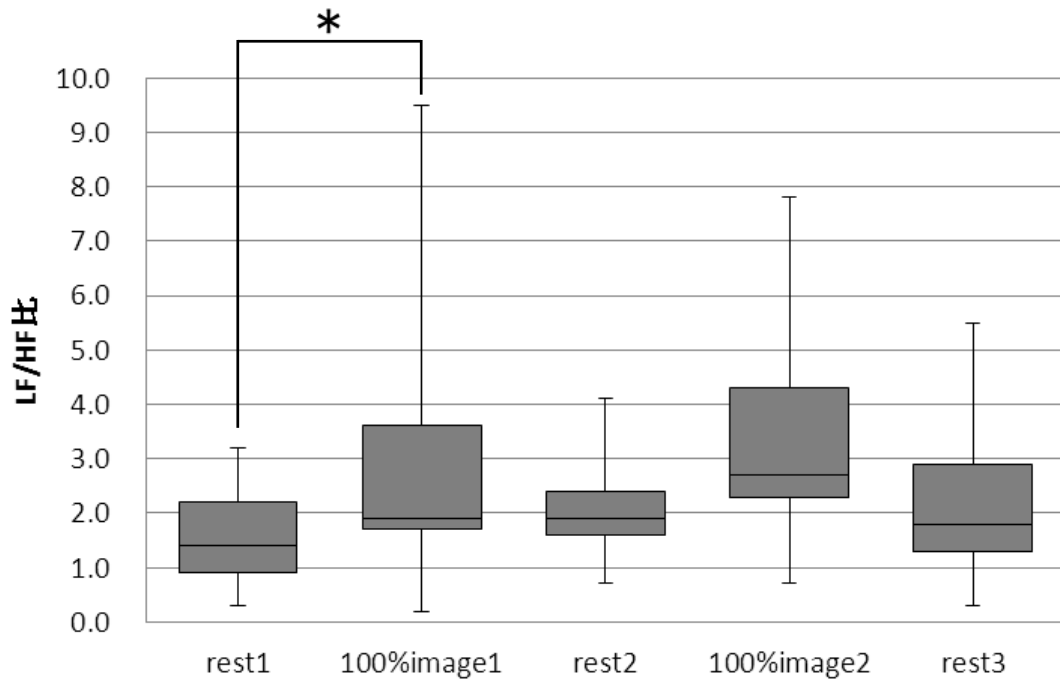


図 14 100%収縮強度運動イメージによる LF/HF 比変化
 100%image1 試行時の LF/HF 比が、rest1 試行時と比較して有意に増加した (*: $p < 0.05$)。

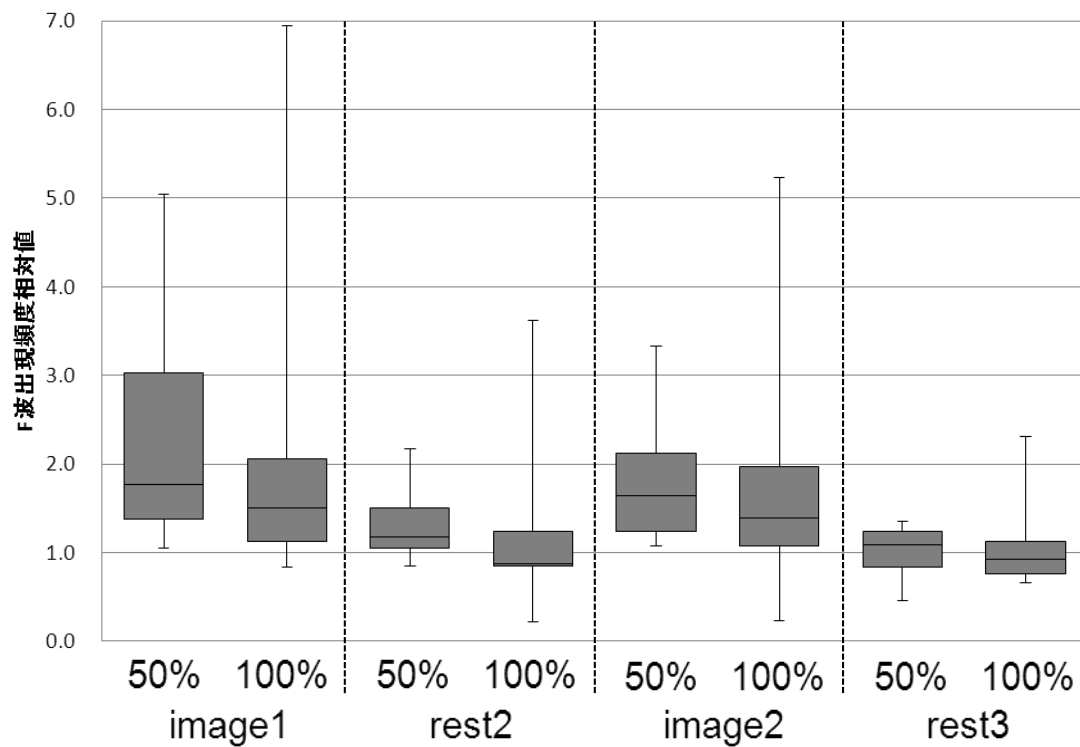


図 15 F 波出現頻度相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較
 F 波出現頻度相対値において、2 収縮条件間で有意な差は認められなかった。

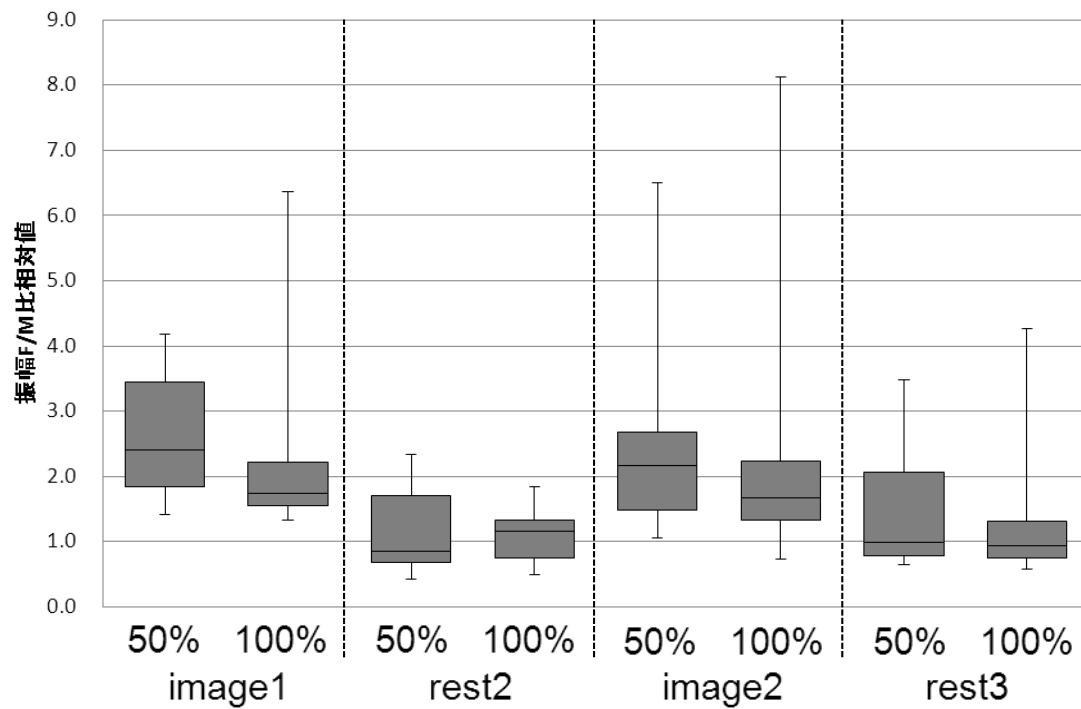


図 16 振幅 F/M 比相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較
 振幅 F/M 比相対値において、2 収縮条件間で有意な差は認められなかった。

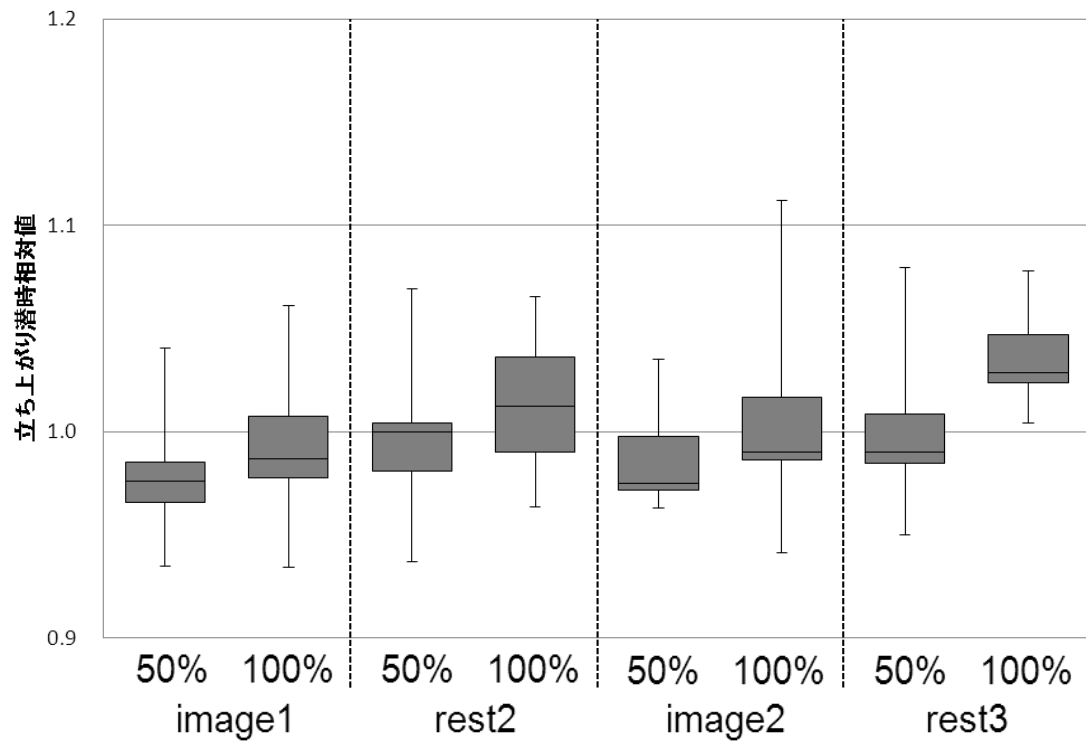


図 17 立ち上がり潜時相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較
立ち上がり潜時相対値において、2 収縮条件間で有意な差は認められなかった。

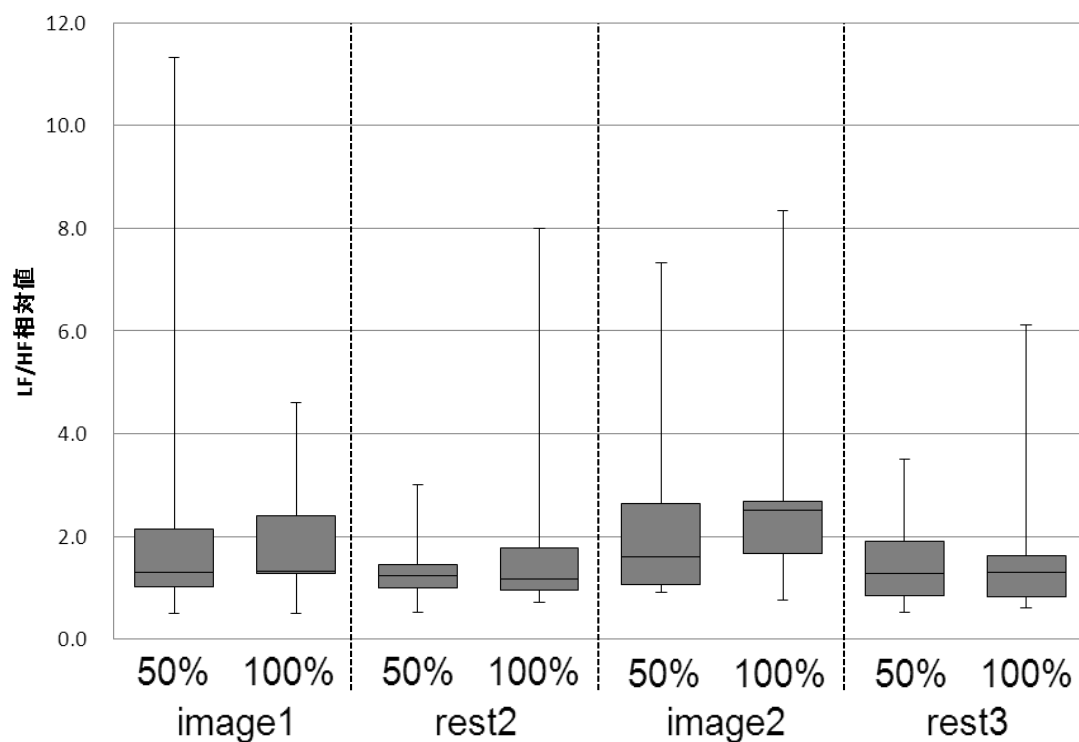


図 18 LF/HF 比相対値による 2 収縮条件間の運動イメージ効果比較
 LF/HF 比相対値において、2 収縮条件間で有意な差は認められなかった。