

2025年度 修 士 論 文

筋力トレーニングのセット間の休息時間の違いが  
運動単位活動に及ぼす影響

主査 渡邊 航平 教授

副査 大家 利之 教授

副査 吉田 毅 教授

中京大学大学院スポーツ科学研究科

スポーツ生理学系

学籍番号 J12405M

氏名 唐木 茉里乃

## 目次

第1章 緒言.....	1
第2章 方法.....	6
2.1 参加者.....	6
2.2 実験概要.....	8
2.2.1 高密度表面筋電図.....	10
2.2.2 近赤外分光法.....	14
2.2.3 血中乳酸濃度.....	15
2.3 統計解析.....	15
第3章 結果.....	16
3.1 筋酸素動態.....	16
3.2 最大随意筋力.....	19
3.3 血中乳酸濃度.....	21
3.4 運動単位活動.....	21
3.4.1 参加者毎の平均の動員閾値および発火頻度.....	21
3.4.2 動員閾値毎の動員閾値と発火頻度の変化.....	25
3.4.3 Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の動員閾値および発火頻度の変化量の相関.....	31
3.4.4 ARV.....	34
第4章 考察.....	37
4.1 セット間の休息時間が筋酸素動態、血中乳酸濃度、MVC に与える影響.....	37
4.2 セット間の休息時間が運動単位活動全体に与える影響.....	40
4.3 疲労要因の時間特性と本研究プロトコル.....	42
4.4 運動単位の動員閾値依存的な変化.....	44

4.5 實踐的示唆 .....	47
結論.....	48
参考文献 .....	49
謝辭.....	58

## 第1章 緒言

筋力トレーニングは、筋力や筋量の増加、筋持久力の向上に加え、2型糖尿病や心血管疾患などの慢性疾患のリスクを軽減することが示されている[1]。こうした筋力トレーニングによる効果は、運動強度や反復回数、頻度、セット間の休息时间などのトレーニング変数に大きく影響を受けるため、目的に応じた適切なトレーニングプログラムを設定することが重要である[2-4]。筋力の増加の重要な要因として、高い張力を発揮できる速筋線維の動員が挙げられる。速筋線維は単一線維あたりの発揮張力が大きいことが知られており[5]、筋力トレーニングのような繰り返しの収縮刺激によって効果的に発揮張力が向上する[6]。また肥大しやすい速筋線維に、筋の収縮や伸長によって筋線維に生じる張力のような機械的ストレスが加わることによって、効果的に筋量が増加する[7]。高強度での筋収縮によって速筋線維が繰り返し動員されることは、筋肥大を誘発する上で重要な要素であり、先行研究では機械的ストレスを高めることが筋横断面積の増加に寄与し、特に高強度の筋力トレーニングによって動員される速筋線維の肥大に重要であることを示している[8]。また、筋力トレーニングを複数セット行うことは機械的ストレスを増加させ、筋肥大や筋力増加の効果を高められる[9,10]。加えて、筋収縮によって筋内に代謝産物が蓄積することによって生じる代謝性ストレスは筋肥大に大きく影響する要因であり[8,11]、代謝性ストレスを高める方法として、筋力トレーニングのセット間の休息時間を短く設定する方法が有効とされる[1,12,13]。短いセット間の休息時間は、筋内に乳酸や水素イオン、無機リン酸などの代謝産

物が蓄積し、筋出力が低下する[14]。そのため、同じ筋出力を維持するために追加的に速筋線維のような新たな筋線維の収縮が必要になる[11,15]。多くの場合、この追加的に活動が始まる筋線維は速筋線維であるため、筋力トレーニングの効果を左右する重要な生理応答であると推察される。

骨格筋の活動は、それを支配する運動単位によって制御される。運動単位は、脊髄前角に存在する運動神経細胞( $\alpha$ 運動ニューロン)と、それに支配される筋線維群から構成される。これらの運動ニューロンは、サイズの原理に従って動員され、まず遅筋線維を支配するようなサイズの小さい運動ニューロンが動員され、発揮筋力が増加するにつれて速筋線維を支配するようなサイズの大きな運動ニューロンが動員される。筋出力は、運動単位の動員数や発火頻度の調整によって制御される[16]。また筋疲労が生じると、筋出力を維持するために動員閾値の高い運動単位の追加的な動員や、既に動員されている運動単位の発火頻度の増加が起こる[15]。しかし、このような運動単位の追加的な動員は、過剰な代謝性ストレス下では阻害される可能性が示唆されている[14,17]。筋収縮によって筋内に蓄積した代謝産物は、グループ III・IV 求心性線維を刺激し、この求心性フィードバックが中枢性運動ドライブを抑制することが報告されている[18,19]。グループ III・IV 求心性入力は、脊髄レベルでの運動ニューロン興奮性の低下や皮質内抑制回路の増強を介して、中枢神経系からの出力を抑制し、運動単位活動を変化させる可能性が示唆されている[18]。したがって、筋力トレーニングにおいて極端に短いセット間の休息時間を設定する場合には、筋収縮によって生

じた代謝産物の血流による除去が不十分となり、過剰な代謝性ストレスが生じる。その結果、中枢神経系への抑制が強まり、運動単位の動員や発火頻度に影響を及ぼす可能性が考えられる。このような中枢神経系への抑制下では、本来、疲労に伴って観察される動員閾値の高い運動単位における動員閾値の低下から推測される運動単位の追加動員が制限され、その代償として既に動員されている運動単位の発火頻度を増加させる可能性がある。

筋力トレーニングにおけるセット間の休息時間の違いが、筋力増加、筋肥大および代謝性ストレスに及ぼす影響については、これまでに複数の先行研究で検討されている。急性的な反応として、60秒未満の短い休息時間では、筋内の代謝性ストレスが大きく増加する一方、120秒以上の休息時間では、疲労回復が促進され、結果として総仕事量が増加することが示唆されている[1]。慢性的な適応については、休息時間の長短が筋力増加や筋肥大に及ぼす影響について研究間で必ずしも一致した見解は得られておらず、議論されている。米国スポーツ医学会は、中強度・高反復の筋力トレーニングにおいて、120秒以下程度の休息時間を推奨しており[1]、本研究で設定した30秒、60秒、120秒の休息時間は、これらの先行研究および推奨範囲に基づいて設定した。筋肥大や筋力増加といった筋の適応は、活動する筋線維の種類が関与している。そのため、セット間の休息時間の違いがどのような種類の筋線維を動員するかを検討することは、神経系および形態的適応を理解する上で重要である。

これまでの多くの研究において、骨格筋の活動を評価するためには、表面筋電図が用いられてきた[20,21]。代謝性ストレスが運動時の骨格筋の活動に与える影響に関しても、加圧

トレーニングを用いた研究で検討されている[22]。加圧トレーニングは低負荷であっても、高負荷のトレーニングと同程度の筋肥大や筋力向上が得られることが報告されており[23]、その生理学的背景として、血流制限によって対象とする筋内の代謝性ストレスが高い条件を惹起し、与えられた低負荷の運動では動員および活動していなかった運動単位や筋線維の活動を促すことができると考えられている。このような推測は、血流制限下で表面筋電図振幅が増大するという結果を、動員閾値の高い運動単位がより多く動員されている可能性がある[24,25]、と解釈していることによるものであり、表面筋電図の信号を形成する生理学的要因を考慮すると[26,27]、正しい解釈とはいいがたい。表面筋電図の干渉波形に含まれる振幅値や周波数特性は、運動単位の動員数や発火頻度、活動電位の形状、筋線維伝導速度などの複数の生理学的要因の影響を受けるため、表面筋電図は筋全体の電気活動の総和を捉えることができるが、個々の運動単位レベルでの活動は評価できない[28]。

近年、非侵襲的な高密度表面筋電図法の発展により、複数の電極を用いて皮膚表面から筋電図を高い空間分解能で記録し、個々の運動単位の動員閾値や発火頻度を同定することが可能となった。これにより疲労[29]やトレーニング介入[30]、サプリメント摂取[31]などの条件の違いによる運動単位活動を詳細に解析できる。例えば、若齢者と高齢者を対象に単回の筋力トレーニング前後で外側広筋の運動単位活動を評価した先行研究では、筋力トレーニング後に運動単位の発火頻度が低下すること、さらに高齢者において動員閾値の低い運動単位ほど発火頻度の低下が大きいことが報告されている[29]。これは、疲労に伴う運動単

位の発火頻度の変化が動員閾値によって異なることを、個々の運動単位レベルで示した研究であり、高密度表面筋電図を用いることで従来の表面筋電図では得られない個々の運動単位の詳細な変化を評価できることを示す。

近赤外分光法 (Near-Infrared Spectroscopy: NIRS) は、筋内の酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (Oxy-[Hb+Mb]) および脱酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン (Deoxy-[Hb+Mb]) の変化を連続的に測定することで、局所の酸素供給と酸素消費のバランスを非侵襲的に評価できる。特に Deoxy-[Hb+Mb] の増加は活動筋での酸素抽出や低酸素状態を反映し、代謝性ストレスの指標として用いられている [32,33]。実際に、最大挙上重量の 20% の強度で膝伸展運動を異なるカフ圧 (動脈閉塞圧の 40%、60%、80%) で実施した研究では、動脈閉塞圧が 60%、80% の条件において、Deoxy-[Hb+Mb] がより顕著に増加し、セット間の回復も抑制されることで、代謝性ストレスが増加することが示されている [32]。このように NIRS は、筋酸素動態を経時的に定量化する上で有効である。

これまで筋力トレーニングを模した条件下で、セット間の休息時間の違いに着目して、運動単位活動を直接的に検討した研究は行われていない。したがって、高密度表面筋電図による運動単位活動と NIRS による筋酸素動態の評価を組み合わせることで、セット間の休息時間の違いが神経筋応答および筋代謝動態に及ぼす影響を詳細に明らかにできると考えた。本研究の目的は、筋力トレーニングのセット間の休息時間が運動単位活動および筋酸素動態に及ぼす影響を明らかにすることであった。短いセット間の休息時間は、代謝性ストレス

が増加すること、セットを重ねると動員閾値の高い運動単位で動員閾値の低下が起きず追加的な動員がないため筋出力を補うために既存の運動単位の発火頻度が増加すること、筋力トレーニング終了後の最大随意筋力(maximal voluntary contraction: MVC)の低下および血中乳酸濃度の増加が短いセット間の休息時間でより大きくなることを仮説とした。

## 第2章 方法

### 2.1 参加者

13名の若齢者(男性11名、女性2名)が本実験に参加した。予備実験で得られた、異なるセット間の休息时间における筋酸素動態に基づき、G\*Power(Heinrich-Heine-University, Dusseldorf, Germany)を用いて検出力分析を行い、本研究に必要な参加者数を算出した。その結果、必要サンプルサイズは $N > 9$ と算出された。表1に参加者の特徴を示す。参加者はいずれも競技的なスポーツ活動を行っておらず、循環器系、筋骨格系、神経系疾患の既往歴もなかった。また、加齢に伴う神経筋機能の影響を最小限にするために、対象者は20代の若年健常成人とした。すべての参加者に対して、研究の目的、予想される利益およびリスクについて十分な説明を行い、書面によるインフォームドコンセントを得た。本研究はヘルシンキ宣言の原則に則り、中京大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会の承認を受けて行われた(承認番号:2024-042)。参加者には測定の前24時間前から高強度の身体活動を避け、カフェインを含む食品および飲料の摂取を控えるよう指示した。

表1 参加者特性 (n=13)

	平均值 ± 標準偏差
年齢 [歳]	22.8 ± 2.4
身長 [cm]	167.2 ± 7.7
体重 [kg]	61.2 ± 5.2
筋肉量 [kg]	47.3 ± 6.7
体脂肪量 [kg]	11.8 ± 2.8
BMI [kg/m <sup>2</sup> ]	22.0 ± 1.4

BMI:Body Mass Index

## 2.2 実験概要

参加者は、約 1 週間の間隔を空けて別日に 3 回の測定を行い、それぞれの測定日にセット間の休息時間の異なる 3 条件（30 秒休息、60 秒休息、120 秒休息）の筋力トレーニングを実施した。各条件の実施順序はランダムに行われた。

参加者は実験に関する説明を受けた後、生体インピーダンス法(Inbody430;インボディ・ジャパン, 東京, 日本)によって、体重、骨格筋量、体脂肪率の測定をした。その後、膝伸展筋力測定器(竹井機器工業,新潟,日本)に着座し、股関節と膝関節の角度を内角 90 度に保持した状態で、腓骨外果と水平になるように力センサー(共和電業, 愛知, 日本)がベルトによって固定された。膝関節中心から力センサーまでの鉛直距離をモーメントアームとして、発揮筋力をトルクに換算した。高密度表面筋電図電極および NIRS のプローブが右の外側広筋上に貼付され、測定を実施した。

図 1 に本実験プロトコルの概要を示す。参加者は実験室に到着後、座位で 5 分以上安静を保った後、安静時 (PRE) の血中乳酸濃度を測定した。本研究では、発揮筋力を 0 から 70%MVC まで漸増させ、70%MVC に達した後、5 秒間そのレベルを維持する課題を Ramp 課題とした。1 セット目開始前を Ramp1、2 セット目開始時を Ramp2、3 セット目開始時を Ramp3、全セット終了後を Ramp4 と定義した。最大努力の 50%、70%、90%の強度で、練習を兼ねたウォーミングアップを実施した後、MVC および Ramp1 実施中の高密度表面筋電図を記録した。筋力トレーニングを模した運動として 70%MVC の等尺性収縮膝伸展を

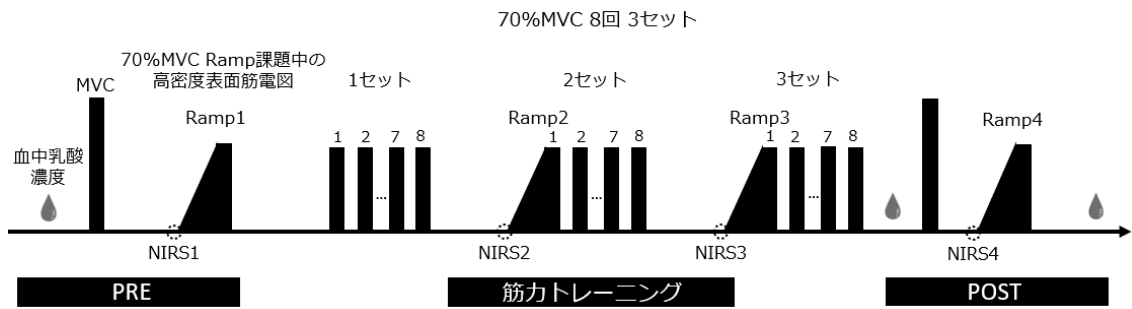


図1 実験プロトコルの概要

筋力トレーニングを模した運動課題およびその前後の測定(PRE、POST)から構成された。Ramp1:1セット目開始前の70%MVC Ramp課題、Ramp2:2セット目開始時の70%MVC Ramp課題、Ramp3:3セット目開始時の70%MVC Ramp課題、Ramp4:全セット終了後の70%MVC Ramp課題を示す。また、NIRS1:Ramp1直前のNIRS、NIRS2:Ramp2直前のNIRS、NIRS3:Ramp3直前のNIRS、NIRS4:Ramp4直前のNIRSを示す。

5 秒間収縮・5 秒間弛緩する試行を 8 回繰り返すものを 1 セットとし、計 3 セット実施した。2 セット目と 3 セット目では、それぞれのセット開始時に Ramp2 および Ramp3 を実施し、セットを重ねることによる運動単位活動の変化を評価した。3 セット終了直後に血中乳酸濃度(POST0)、MVC および Ramp4 を行った。さらに、血中乳酸濃度は運動終了後 5 分後(POST5)にも測定した。

### 2.2.1 高密度表面筋電図

運動単位活動は、高密度表面筋電図および CKC 法 (Convolution Kernel Compensation 法) を用いて測定した(図 2)。参加者は Ramp 課題を実施し、課題中はモニターにより発揮筋力と目標筋力を提示して視覚的フィードバックを行った (図 3)。70%MVC の Ramp 課題はゆっくりとした漸増で比較的高い強度でも安定した筋力発揮が可能であり、運動単位の分離精度を向上させるため、この課題を採用した。

高密度表面筋電図信号は、直径 1mm、電極間距離 8mm の 64 個 (13 行、5 列、遠位端の 1 個が欠損) からなる電極シート (GR08MM1305, OT Bioelettronica, Torino, Italy) を用いて外側広筋から記録された。電極の貼付位置は、大転子から膝蓋骨の外側上顆の midpoint とした。基準電極 (WS2, OT Bioelettronica, Torino, Italy) は脛骨近位端に貼付した。筋電図信号は単極誘導によって記録し、発揮筋力の信号と同期して高密度表面筋電図記録装置 (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) でデジタルデータに変換した。これらの信号は、2,048 Hz でサンプリングされ、増幅された後 ( $\times 150$ )、バンドパスフィルタ (10

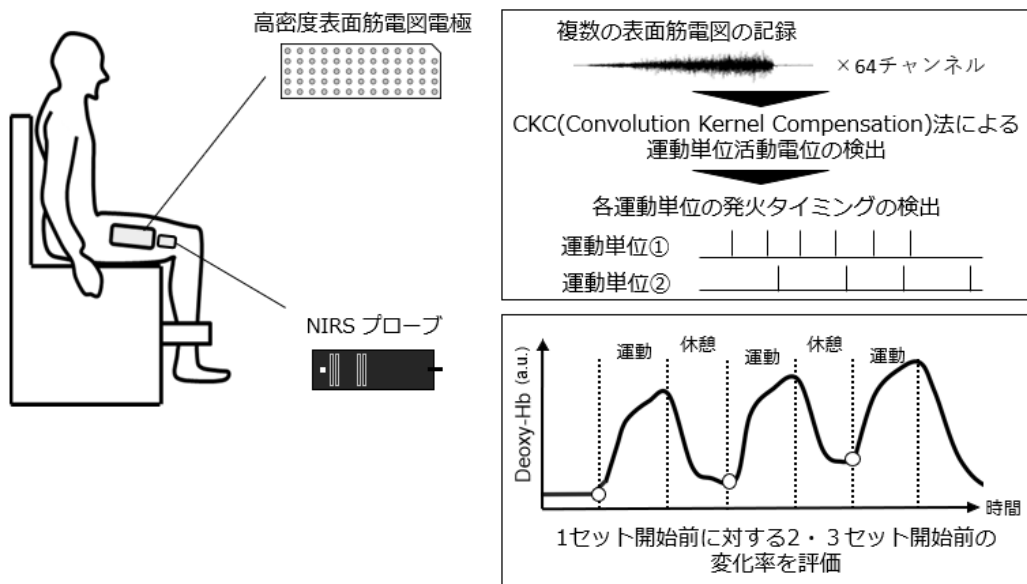


図2 高密度表面筋電図法と近赤外分光法を用いた測定のモデル図

複数の表面筋電図が記録され、特殊な解析アルゴリズムにより、各運動単位の発火タイミングが算出された。また、近赤外分光法により筋内の酸素動態を測定し、1セット目開始前に対する各セット開始前の変化率が算出された。

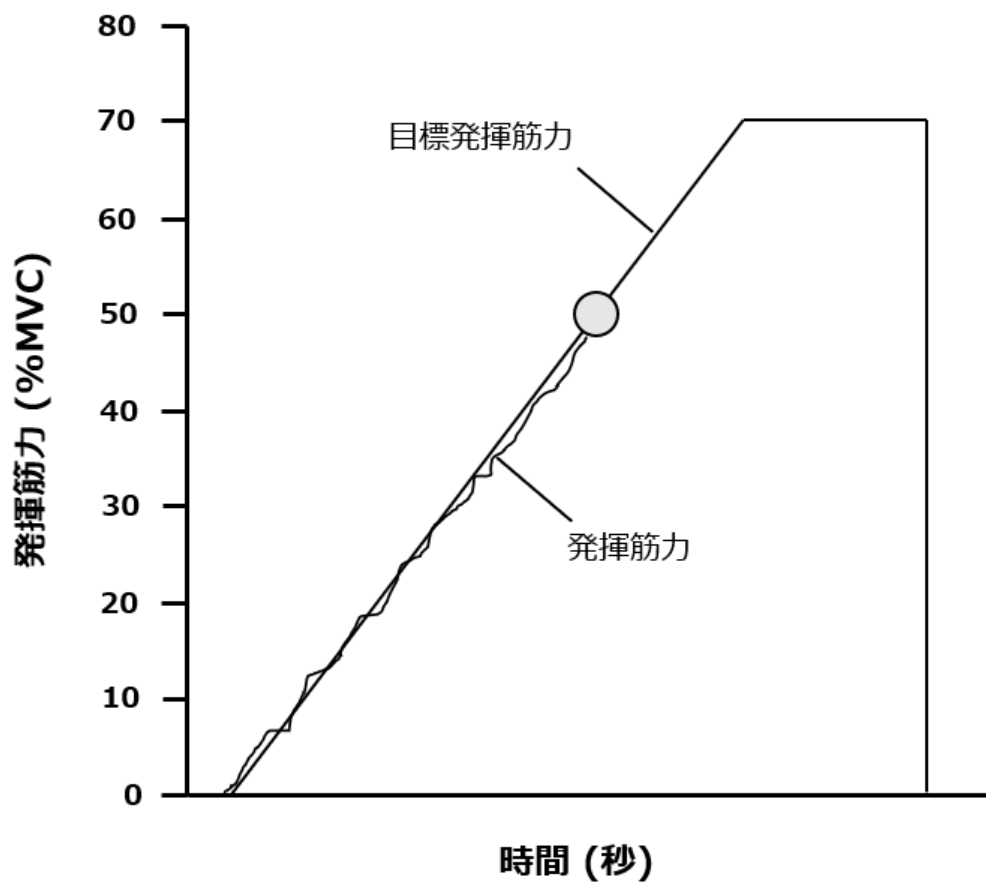


図 3 70%MVC の Ramp 課題中のフィードバック画面のモデル図

発揮筋力と目標発揮筋力を示し、参加者は目標発揮筋力を追従するように指示された。

～500 Hz) によって平滑化を行い、付属ソフトウェア (OTBioLab+, OT Bioelettronica, Torino, Italy) にて記録した。DEMUSE ソフトウェア (ver.5.01) (MATLAB R2019a; MathWorks GK, 東京, 日本) を用いて、記録した表面筋電図信号を CKC 法により個々の運動単位活動に分離・同定した[34,35]。

測定された高密度表面筋電図信号から、筋力トレーニングを模した運動課題中における各運動単位の活動電位波形を抽出した[36]。その後、筋力発揮中の各運動単位の活動電位波形を基準として、Ramp 1 から Ramp 4 の筋力発揮中の各運動単位の活動電位波形と照合し、類似した活動電位波形を持つ運動単位を同一の運動単位とした[30]。解析ソフトウェアで同定された各運動単位の発火タイミングは、視覚的に妥当性を確認し、各運動単位のパルスノイズ比を高める発火を採用し、低下させる発火を除外した。Ramp 課題中に、各運動単位が最初に発火した運動強度を各運動単位の動員閾値とした。また、各運動単位の発火タイミングから算出される発火間隔の中央値から各運動単位の発火頻度を算出した。筋活動の全体的な大きさを定量化する指標として、平均整流値 (average rectified value: ARV) を算出した。64 個の電極を用いて、高密度表面筋電図を列方向に差動し、59 チャンネルの表面筋電図信号を導出した。ARV は Ramp 課題中の発揮筋力が 65%MVC に達した時点の前後 0.5 秒の 1 秒間の区間を抽出して、59 チャンネルの平均値として算出した。

本研究では、2 つの解析を実施した。まず、条件および時間の変化を参加者毎に一般化して評価することを目的として、各参加者に対して、各セット間の休息时间において同定され

た複数の運動単位の動員閾値および発火頻度を参加者毎に平均して、解析を行った。加えて、疲労や代謝性ストレスの影響が運動単位の動員閾値に依存して異なる可能性を検討するため、動員閾値毎の解析を行った。各参加者の各セット間の休息时间毎に取得されたすべての運動単位をそれぞれの動員閾値および発火頻度を持つ、個別のサンプルとして解析に用いた。その後、個々の運動単位を動員閾値(すべての運動単位、動員閾値 0-20%MVC の運動単位、動員閾値 20-40%MVC の運動単位、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位)に分類し、平均値では相殺され得る動員閾値毎の解析を行った。また、Ramp1、Ramp2、Ramp3 を対象とした解析により、各セット開始前の運動単位活動を比較し、各休息时间条件においてセットを重ねる過程で生じる運動単位活動の変化を検討した。また、Ramp1 と Ramp4 の比較により、トレーニング全体で生じた変化を評価した。

### 2.2.2 近赤外分光法

骨格筋の酸素動態の評価は、近赤外分光法装置 (Hb14; ASTEM, 神奈川, 日本) を用いた。波長 770 および 830 nm の光吸収の変化から、Oxy-[Hb+Mb]、Deoxy-[Hb+Mb]、および総ヘモグロビン/ミオグロビン (Total-[Hb+Mb]) を算出した。またこれらの値から、組織酸素飽和度 (StO<sub>2</sub>) を  $\text{Oxy-[Hb+Mb]} \div \text{Total-[Hb+Mb]}$  により算出した。データは Bluetooth 経由で転送し、1~2 Hz でサンプリングした。プローブは、高密度表面筋電図電極の横に位置する外側広筋上に装着した。超音波装置 (Logiq e Premium, GE Healthcare, 日本) を用いて装着部位の皮下脂肪厚が 10 mm 以下であることを確認した。皮下脂肪厚は、

皮膚表面から筋膜直前までの組織厚として測定し、解析時の信号補正に用いた。測定は運動開始前から終了後まで連続的に実施した。分析は、各 Ramp 課題開始直前の 5 秒間のデータを平均して、各セット開始直前の値として評価した(図 2)。NIRS は、1 セット目開始前を NIRS1、2 セット目開始前を NIRS2、3 セット目開始前を NIRS3、全セット終了後を NIRS4 として、筋酸素動態の変化を比較した。

### 2.2.3 血中乳酸濃度

血中乳酸濃度は、乳酸酸化酵素法を用いた自動分析装置 (Lactate Pro 2; アークレイ, 京都, 日本) により測定した。指先から採取した 2 つの 5  $\mu$ L の血液サンプルから得られた測定値を平均し、その値を解析に用いた [37,38]。

## 2.3 統計解析

MVC の解析には、PRE と POST および各セット間の休息時間を要因とする二元配置反復測定分散分析を用いた。また血中乳酸濃度は PRE、POST0 および POST5 と各セット間の休息時間を要因とする二元配置反復測定分散分析を用いた。NIRS により得られた Oxy-[Hb+Mb]、Deoxy-[Hb+Mb]、Total-[Hb+Mb]、StO<sub>2</sub>、参加者毎の平均として算出した運動単位の動員閾値および発火頻度、ARV は、休息条件 (30 秒休息、60 秒休息、120 秒休息) および時間 (Ramp1~Ramp4) を要因とする二元配置分散分析を行った。これらの反復測定データは、Mauchly の球面性検定により球面性の仮定を検証し、球面性が棄却された場合には Greenhouse-Geisser 係数を用いて補正した。すべての分散分析において、主効果また

は交互作用が有意であった場合には、Bonferroni 法による多重比較を実施した。個々の運動単位の解析には、線形混合効果モデルを用いた。固定効果として休息条件（30 秒休息、60 秒休息、120 秒休息）と時間（Ramp1～Ramp4）およびそれらの交互作用を含め、参加者および運動単位をランダム効果として設定した。誤差分散・共分散構造については、複数のモデルを比較し、赤池情報量規準(AIC)が最も小さい構造を採用した。固定効果の主効果または交互作用が有意であった場合、Bonferroni 法により補正した事後検定を行った。さらに、Ramp1 における運動単位の動員閾値と Ramp2、Ramp3 および Ramp4 における同一の運動単位の動員閾値および発火頻度との関連を検討するため、休息条件ごとに Spearman の順位相関係数を算出した。統計的有意水準は 0.05 未満とし、統計分析は SPSS 21.0（日本アイ・ビー・エム，東京，日本）を用いた。

### 第 3 章 結果

本研究では、セット間の休息時間の違いにより生じる筋内の代謝環境の変化を踏まえて運動単位活動を検討したため、結果では先に筋酸素動態および血中乳酸濃度を示し、続いて運動単位活動の結果を示す。

#### 3.1 筋酸素動態

図 4 に示すように、NIRS1、NIRS2 および NIRS3 を比較し、セット間の休息時間(条件)毎のセットの進行(時間)に伴う筋酸素動態の変化を検討した。Oxy-[Hb+Mb]は、条件およ

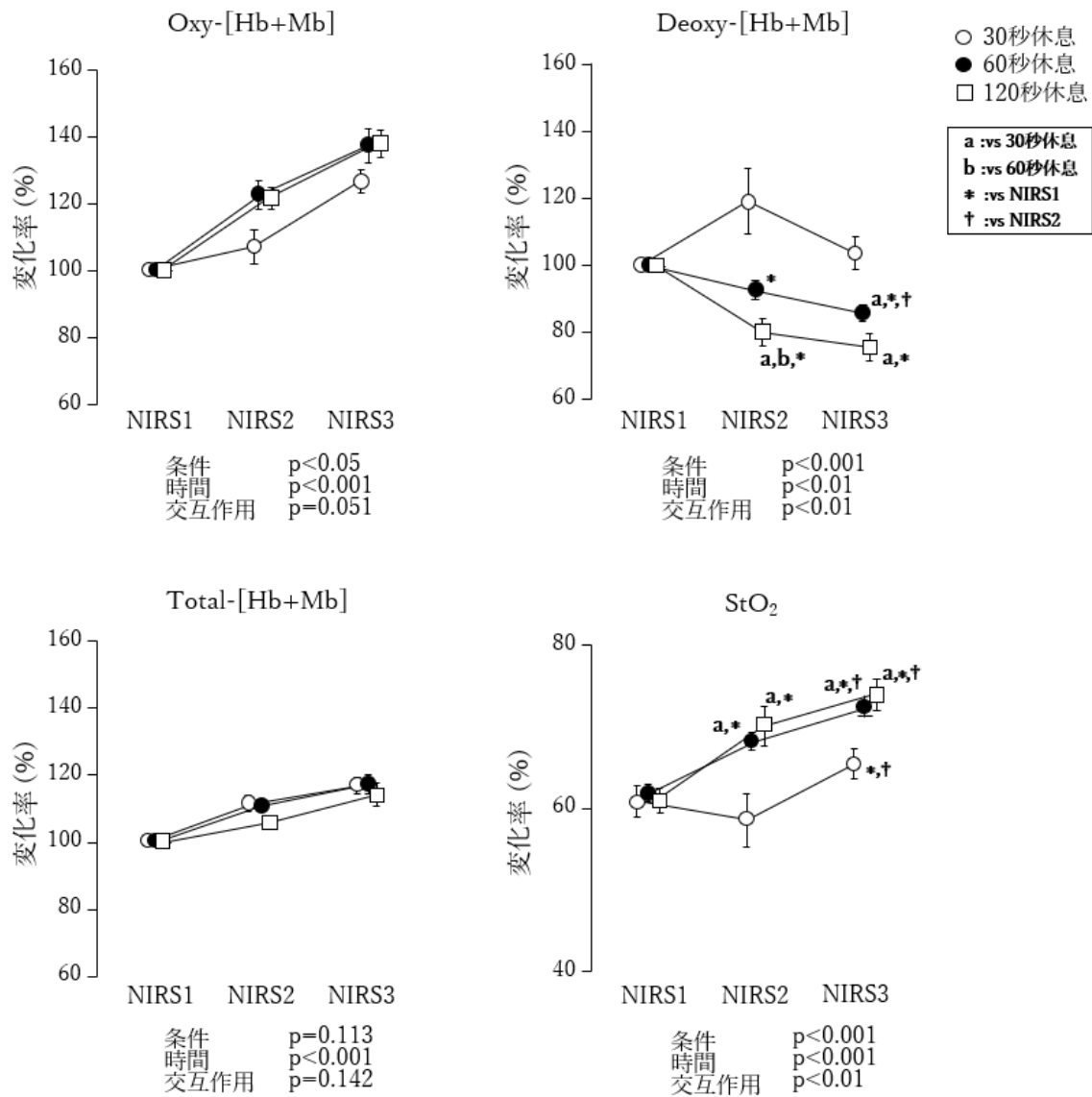


図4 筋酸素動態の変化

Oxy-[Hb+Mb]：酸素化ヘモグロビン／ミオグロビン、Deoxy-[Hb+Mb]：脱酸素化ヘモグロビン／ミオグロビン、Total-[Hb+Mb]：総ヘモグロビン／ミオグロビンの変化率およびStO<sub>2</sub>：組織酸素飽和度の変化を示す。Oxy-[Hb+Mb]、Deoxy-[Hb+Mb]、Total-[Hb+Mb]は1セット目開始前のNIRS1を100%とした相対値として算出した。○は30秒休息、●は60秒休息、□は120秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれ休息時間、セット、交互作用の有意性を示す。

び時間の主効果があり、交互作用は有意ではなかった（条件： $p=0.015$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.051$ ）。条件の主効果に関する事後検定の結果、NIRS2 および NIRS3 において 60 秒および 120 秒休息は 30 秒休息と比較して有意に高値を示した（すべて  $p<0.001$ ）。時間の主効果は、すべての条件で NIRS1 と比較して NIRS2 および NIRS3 で有意に増加し、さらに NIRS2 と比較して NIRS3 で有意に増加した（すべて  $p<0.001$ ）。Deoxy-[Hb+Mb] は、条件および時間の主効果に加えて、交互作用が有意であった（条件： $p<0.001$ 、時間： $p=0.002$ 、交互作用： $p=0.002$ ）。条件の主効果に関する事後検定の結果、NIRS2 においては、30 秒休息と比較して 120 秒休息で Deoxy-[Hb+Mb] が有意に低く（それぞれ  $p=0.005$ ）、さらに 60 秒休息と比較して 120 秒休息も有意に低かった（ $p=0.044$ ）。NIRS3 においては、30 秒休息と比較して 60 秒および 120 秒休息で有意に低かった（それぞれ  $p=0.006$ 、 $p<0.001$ ）。交互作用が有意であったため、条件毎に時間に対する単純主効果を検定した結果、30 秒休息では有意な影響はなかった（すべて  $p>0.05$ ）。60 秒休息では、NIRS1 と比較して NIRS2 および NIRS3 で有意に低下し（それぞれ  $p=0.026$ 、 $p<0.001$ ）、さらに NIRS2 から NIRS3 にかけて有意に低下した（ $p=0.011$ ）。120 秒休息では、NIRS1 と比較して NIRS2 および NIRS3 で有意に低下した（すべて  $p<0.001$ ）。Total-[Hb+Mb] は、条件の主効果および交互作用はいずれも有意ではなかったが（条件： $p=0.113$ 、交互作用： $p=0.142$ ）、時間の主効果は有意であった（時間： $p<0.001$ ）。いずれの条件においても NIRS1 と比較して NIRS2 および NIRS3 で有意に増加し、さらに NIRS2 と比較して NIRS3 で有意に増加した（すべて  $p<0.001$ ）。

StO<sub>2</sub>は、条件および時間の主効果に加えて、交互作用も有意であった（条件：p<0.001、時間：p<0.001、交互作用：p=0.005）。事後検定の結果、各時間において60秒および120秒休息は30秒休息と比較して有意に高値を示した（それぞれp=0.010、p=0.014）。時間の主効果では、すべての条件において時間経過に伴いStO<sub>2</sub>が有意に増加した（すべてp<0.01）。単純主効果検定の結果、30秒休息ではNIRS1からNIRS3、およびNIRS2からNIRS3でStO<sub>2</sub>が有意に増加した（それぞれp=0.017、p=0.036）。60秒および120秒休息では、いずれも時間経過に伴いStO<sub>2</sub>が有意に増加した（すべてp<0.05）。さらに、各時間における条件間の比較では、NIRS2およびNIRS3で、30秒休息は60秒および120秒休息と比較して有意に低値を示した（すべてp<0.05）。

またNIRS1とNIRS4を比較することで、3セットのトレーニング全体を通じて生じた筋酸素動態の変化を評価した。Oxy-[Hb+Mb]、Deoxy-[Hb+Mb]、Total-[Hb+Mb]およびStO<sub>2</sub>は、いずれも条件と時間の交互作用および条件の主効果はなかった（すべてp>0.05）。一方、時間の主効果はいずれも有意であり（p<0.001）、事後検定の結果、NIRS1と比較してNIRS4においてDeoxy-[Hb+Mb]は有意に低下し（p<0.001）、Oxy-[Hb+Mb]、Total-[Hb+Mb]およびStO<sub>2</sub>は有意に増加した（すべてp<0.001）。

### 3.2 最大随意筋力

表2にMVCの結果を示す。条件の主効果および交互作用は有意でなかった（条件：p=0.372、交互作用：p=0.575）。一方、時間の主効果は有意であり（時間：p<0.001）、PRE

表2 各セット間の休息时间条件における最大随意筋力 (MVC) の変化

	PRE	POST
30秒休息 [Nm]	217.8 ± 41.7	179.4 ± 33.5 *
60秒休息 [Nm]	217.3 ± 41.1	184.5 ± 31.0 *
120秒休息 [Nm]	220.9 ± 43.7	183.9 ± 28.2 *

値は平均値±標準偏差で示した。MVC: Maximum Voluntary Contraction

\*vs.PRE p<0.05.

と比較して POST において MVC は有意に低下した ( $p<0.05$ )。

### 3.3 血中乳酸濃度

表 3 に血中乳酸濃度の結果を示す。条件の主効果および交互作用は有意でなかった (条件： $p=0.909$ 、交互作用： $p=0.139$ )。一方、時間の主効果は有意であり (時間： $p<0.001$ )、PRE と比較して POST0 および POST5 において血中乳酸濃度は有意に増加した (すべて  $p<0.001$ )。

### 3.4 運動単位活動

#### 3.4.1 参加者毎の平均の動員閾値および発火頻度

図 5 に示すように、Ramp1 から Ramp3 における参加者毎の平均の動員閾値は、時間の主効果のみが有意であり、条件の主効果および交互作用はいずれも有意な影響はなかった (条件： $p=0.216$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.454$ )。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp2 において動員閾値が有意に高まった ( $p<0.001$ )。同様に、Ramp1 から Ramp3 における参加者毎の平均の発火頻度では、時間の主効果のみが有意であり、条件の主効果および交互作用はいずれも有意ではなかった (条件： $p=0.331$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.462$ )。事後検定の結果、Ramp2 と比較して Ramp3 において発火頻度が有意に増加した ( $p=0.002$ )。

図 6 に示すように、Ramp1 と Ramp4 における参加者毎の平均の動員閾値では、時間の主効果のみが有意であり、条件の主効果および交互作用はいずれも有意でなかった

表3 各セット間の休息時間における血中乳酸濃度の変化

	PRE	POST 0	POST 5
30秒休息 [mmol/L]	1.4±0.3	3.3±0.7 *	3.3±0.8 *
60秒休息 [mmol/L]	1.3±0.3	3.2±0.6 *	3.6±1.1 *
120秒休息 [mmol/L]	1.3±0.3	3.4±0.9 *	3.2±1.1 *

値は平均値±標準偏差で示した。POST 0：運動直後、POST 5：運動終了5分後。

\*vs.PRE p<0.05.

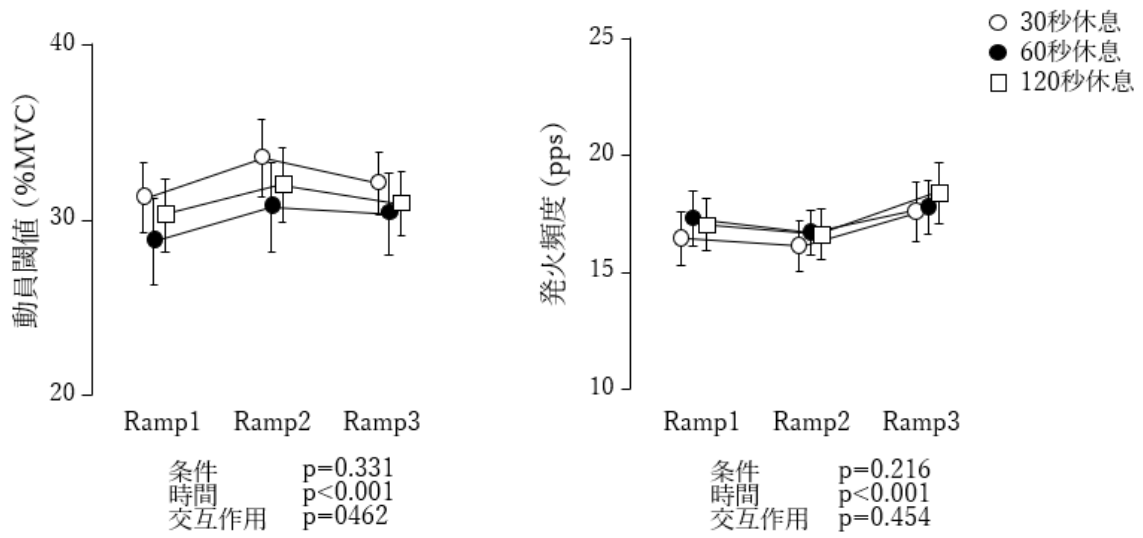


図5 Ramp1 から Ramp3 の参加者毎の平均の運動単位の動員閾値および発火頻度  
 動員閾値および発火頻度の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息  
 を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休  
 息時間、セット、交互作用の有意性を示す。

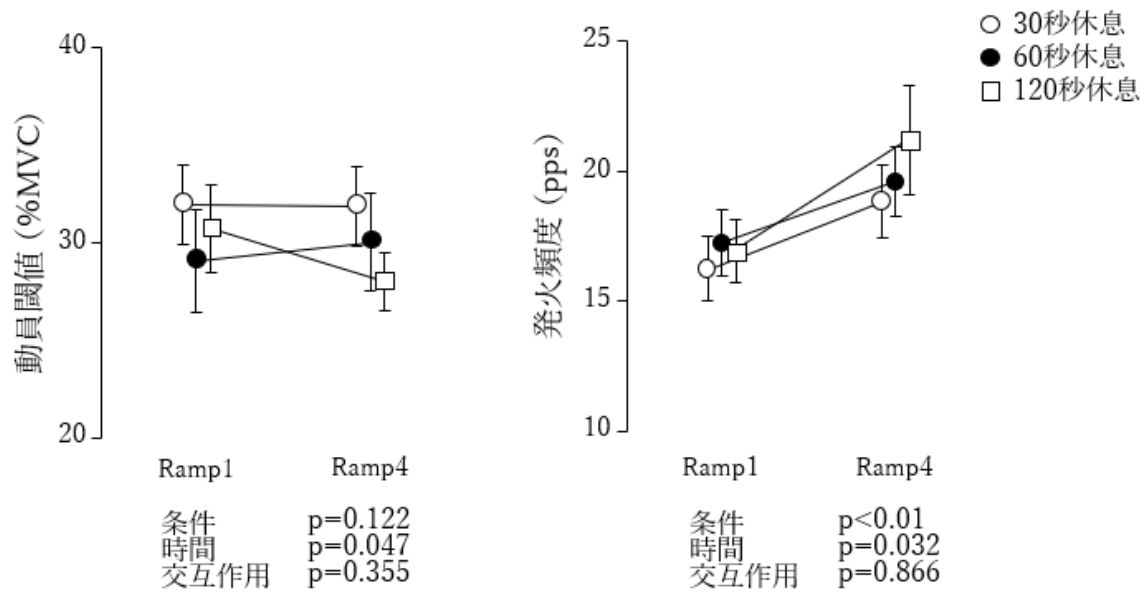


図 6 Ramp1 と Ramp4 の参加者毎の平均の運動単位の動員閾値および発火頻度

動員閾値および発火頻度の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休息時間、セット、交互作用の有意性を示す。

(条件： $p=0.122$ 、時間： $p=0.047$ 、交互作用： $p=0.355$ )。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp4 において動員閾値が有意に低下した。一方、Ramp1 および Ramp4 における参加者毎の平均の発火頻度では、条件および時間の主効果はいずれも有意であり、交互作用は有意ではなかった (条件： $p=0.002$ 、時間： $p=0.032$ 、交互作用： $p=0.866$ )。事後検定の結果、Ramp4 における発火頻度はいずれの条件においても、Ramp1 と比較して有意に増加した。また条件間の比較では、30 秒休息と比較して 60 秒および 120 秒休息で発火頻度が有意に高く(それぞれ  $p=0.034$ 、 $p=0.007$ )、さらに 60 秒休息と比較して 120 秒休息においても有意に高かった ( $p=0.026$ )。

#### 3.4.2 動員閾値毎の動員閾値と発火頻度の変化

図 7 に示すように、Ramp1 から Ramp3 における動員閾値の変化を Ramp1 の動員閾値毎に分けて検討した。すべての運動単位を対象とした解析では、条件および時間の主効果、交互作用はいずれも有意な影響はなかった (条件： $p=0.821$ 、時間： $p=0.072$ 、交互作用： $p=1.000$ )。動員閾値 0-20%MVC の運動単位では、条件および時間の主効果、交互作用はいずれも有意ではなかった (条件： $p=0.884$ 、時間： $p=0.148$ 、交互作用： $p=0.913$ )。動員閾値 20-40%MVC の運動単位では、時間の主効果のみ有意であり (条件： $p=0.322$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.984$ )、Ramp1 と比較して Ramp2 および Ramp3 で動員閾値が有意に高まった(それぞれ  $p<0.001$ 、 $p=0.005$ )。動員閾値 40%MVC 以上の運動単位では、条件の主効果および交互作用はいずれも有意でなく (条件： $p=0.599$ 、交互作用： $p=0.114$ )、

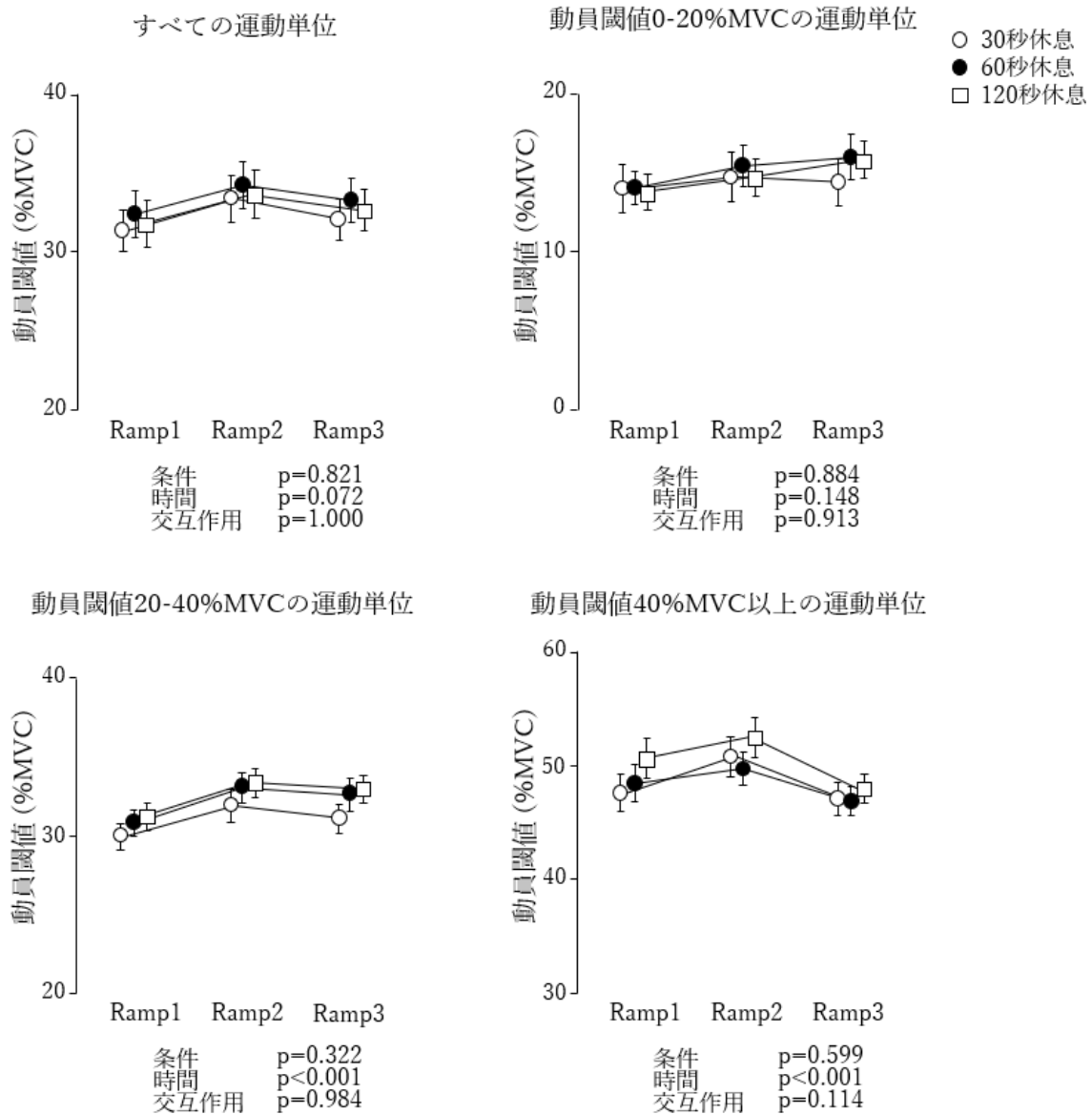


図7 Ramp1 から Ramp3 における動員閾値毎の動員閾値の変化

Ramp1 の動員閾値（すべての運動単位、動員閾値 0-20%MVC の運動単位、動員閾値 20-40%MVC の運動単位、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位）に分けて、各 Ramp 課題における動員閾値の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休息时间、セット、交互作用の有意性を示す。

時間の主効果のみ有意であった（時間： $p < 0.001$ ）。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp2 で動員閾値が有意に増加し（ $p < 0.001$ ）、Ramp3 では Ramp2 と比較して有意に低下した（ $p < 0.001$ ）。さらに Ramp1 では Ramp3 と比較して有意に低下した（ $p = 0.009$ ）。

図 8 に示すように、Ramp1 と Ramp4 における動員閾値の変化は、すべての運動単位を対象とした分析では、条件および時間の主効果は有意ではなかった一方で、交互作用は有意であった（条件： $p = 0.352$ 、時間： $p = 0.209$ 、交互作用： $p < 0.001$ ）。単純主効果の検定の結果、120 秒休息では Ramp1 と比較して Ramp4 の動員閾値が有意に低下した（ $p = 0.023$ ）が、30 秒および 60 秒休息では Ramp1 と Ramp4 の間に有意な差はなかった。動員閾値 0-20%MVC の運動単位は、時間の主効果は有意であったが、条件の主効果および交互作用は有意ではなかった（条件： $p = 0.918$ 、時間： $p = 0.023$ 、交互作用： $p = 0.523$ ）。事後検定の結果、Ramp4 の動員閾値は Ramp1 と比較して有意に高まった（ $p = 0.023$ ）。動員閾値 20-40%MVC の運動単位では、時間の主効果および交互作用はいずれも有意であり、条件の主効果は有意ではなかった（条件： $p = 0.414$ 、時間： $p = 0.014$ 、交互作用： $p = 0.001$ ）。単純主効果検定の結果、60 秒休息において、Ramp1 と比較して Ramp4 の動員閾値が有意に高まった（ $p < 0.001$ ）が、30 秒および 120 秒休息では有意差はなかった。動員閾値 40%MVC 以上の運動単位では、時間の主効果および交互作用はいずれも有意であり、一方で条件の主効果は有意ではなかった（条件： $p = 0.226$ 、時間： $p < 0.001$ 、交互作用： $p < 0.001$ ）。単純主効果検定の結果、120 秒休息条件においてのみ Ramp4 の動員閾値が Ramp1 と比較して有意に低下し

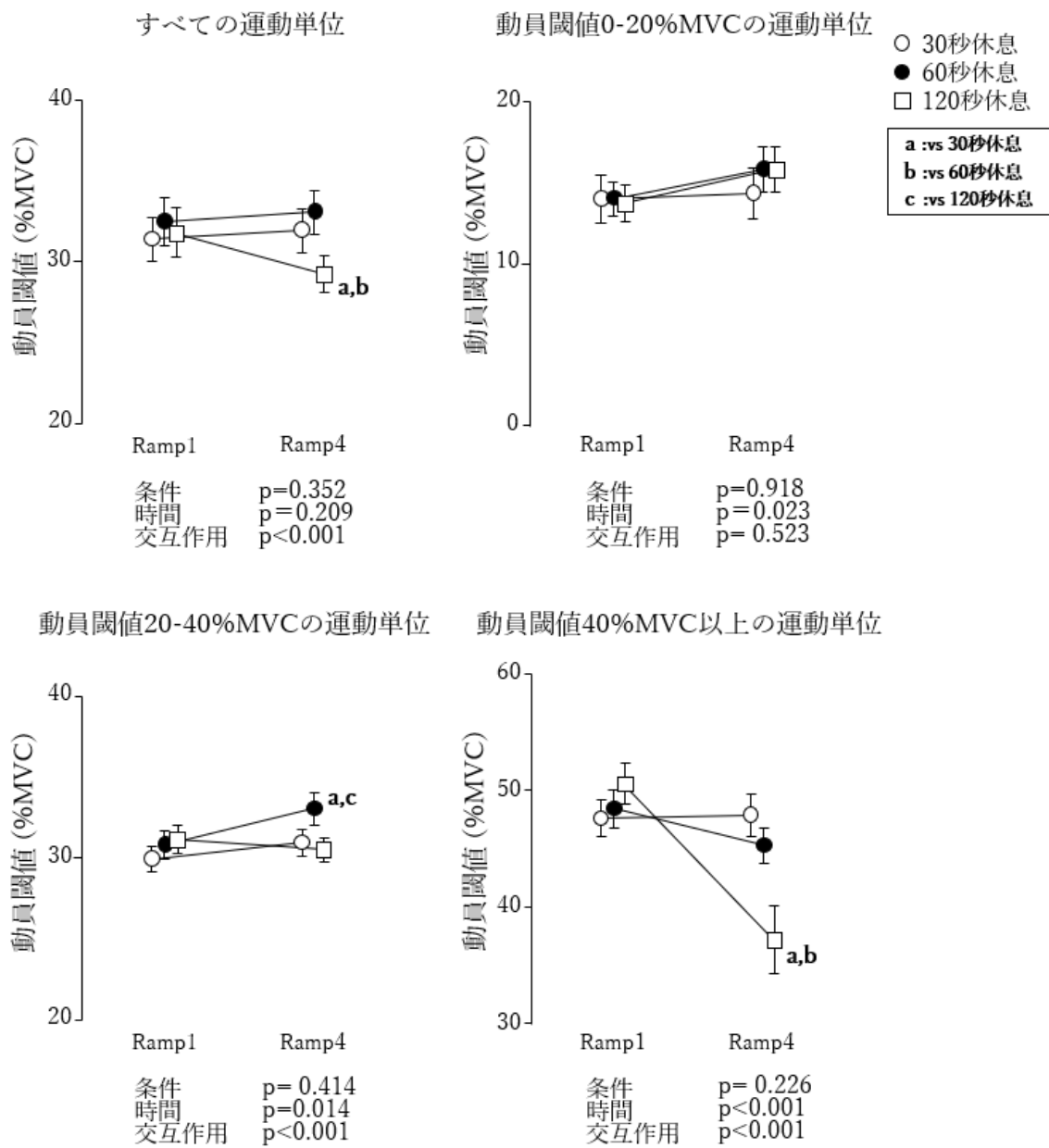


図8 Ramp1 と Ramp4 における動員閾値毎の動員閾値の変化

Ramp1 の動員閾値毎（すべての運動単位、動員閾値 0-20%MVC の運動単位、動員閾値 20-40%MVC の運動単位、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位）に分けて、Ramp4 における動員閾値の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休息时间、セット、交互作用の有意性を示す。

( $p < 0.001$ )、30 秒および 60 秒休息条件では有意な影響はなかった (それぞれ  $p > 0.05$ )。

図 9 に示すように、Ramp1 から Ramp3 における発火頻度の変化を、Ramp1 の動員閾値に分けて検討した。すべての運動単位を対象とした解析では、条件および交互作用の主効果はいずれも有意でなかった一方で、時間の主効果は有意であった (条件： $p = 0.709$ 、時間： $p < 0.001$ 、交互作用： $p = 0.126$ )。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp2 では発火頻度が有意に低下し ( $p < 0.001$ )、Ramp3 では有意に増加した ( $p < 0.001$ )。また、Ramp3 の発火頻度は Ramp1 と比較して有意に増加した ( $p < 0.001$ )。動員閾値 0-20%MVC の運動単位では、条件および交互作用の主効果はいずれも有意ではなかった一方で、時間の主効果は有意であった (条件： $p = 0.933$ 、時間： $p = 0.003$ 、交互作用： $p = 0.409$ )。事後検定の結果、Ramp2 と比較して Ramp3 で発火頻度が有意に増加した ( $p = 0.003$ )。動員閾値 20-40%MVC の運動単位では、条件および交互作用の主効果はいずれも有意ではなかった一方で、時間の主効果は有意であった (条件： $p = 0.509$ 、時間： $p < 0.001$ 、交互作用： $p = 0.452$ )。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp2 で発火頻度は有意に低下し ( $p < 0.001$ )、その後 Ramp3 で有意に増加した ( $p < 0.001$ )。さらに、Ramp1 と比較して Ramp3 では発火頻度が有意に増加した ( $p < 0.001$ )。動員閾値 40%MVC 以上の運動単位では、条件および交互作用の主効果はいずれも有意でなかった一方で、時間の主効果は有意であった (条件： $p = 0.920$ 、時間： $p < 0.001$ 、交互作用： $p = 0.066$ )。事後検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp2 で発火頻度が有意に低下し ( $p < 0.001$ )、Ramp3 では増加した ( $p < 0.001$ )。

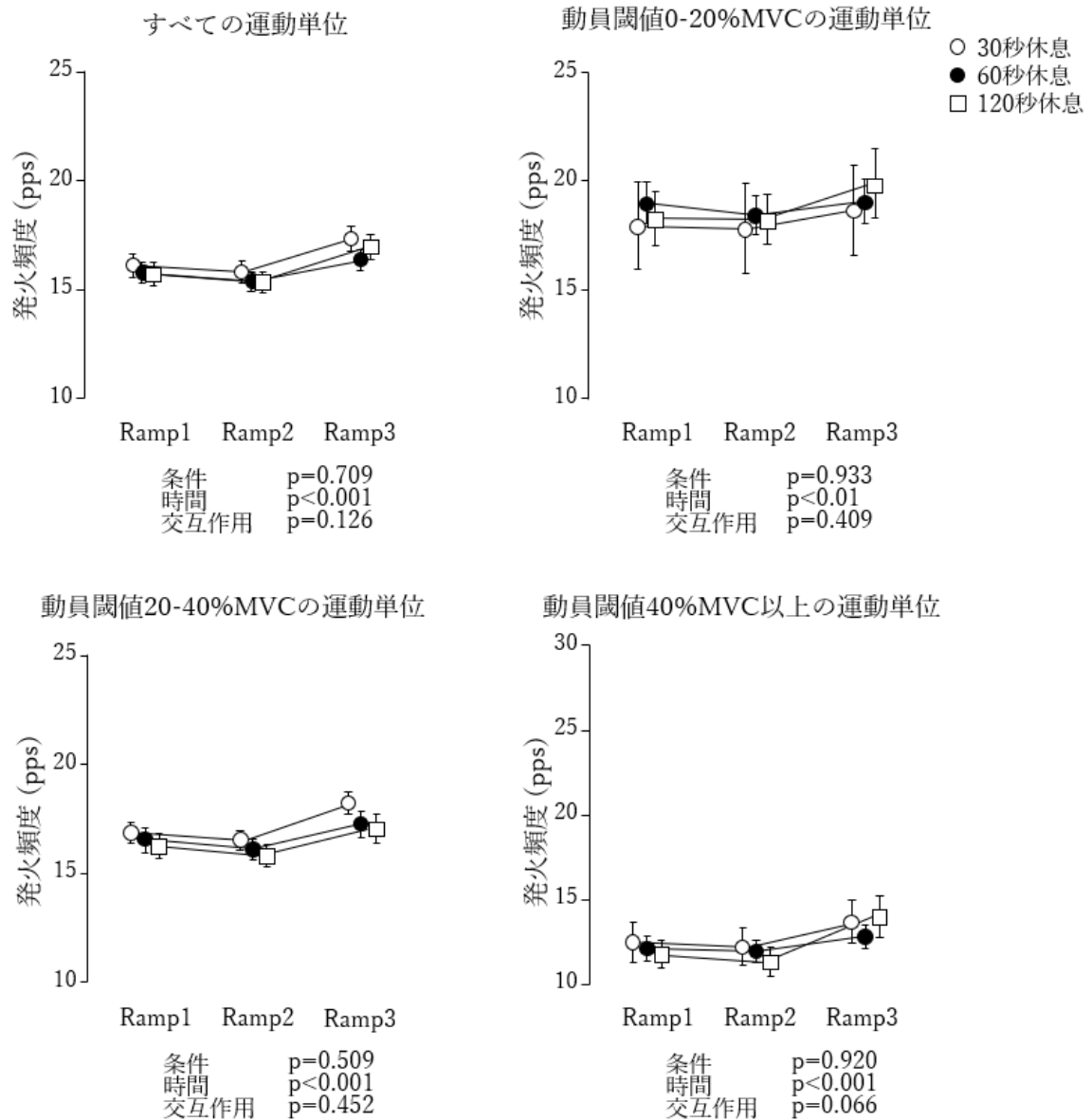


図9 Ramp1 から Ramp3 における動員閾値毎の発火頻度の変化

Ramp1 の動員閾値毎（すべての運動単位、動員閾値 0-20%MVC の運動単位、動員閾値 20-40%MVC の運動単位、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位）に分けて、各 Ramp 課題における発火頻度の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休息时间、セット、交互作用の有意性を示す。

図 10 に示すように、Ramp1 と Ramp4 における発火頻度の変化は、すべての運動単位を対象とした解析では、時間および交互作用の主効果はいずれも有意であり、条件の主効果は有意ではなかった（条件： $p=0.459$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.025$ ）。単純主効果検定の結果、いずれの条件においても Ramp4 の発火頻度は Ramp1 と比較して有意に高く（すべて  $p<0.001$ ）、その増加は 120 秒休息で最も大きかった。動員閾値 0-20%MVC の運動単位および動員閾値 20-40%MVC の運動単位では、時間の主効果のみ有意であり、条件および交互作用の主効果はいずれも有意ではなかった（条件： $p=0.650$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.631$  および条件： $p=0.829$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.365$ ）。主効果検定の結果、Ramp1 と比較して Ramp4 の発火頻度が有意に増加した（すべて  $p<0.001$ ）。動員閾値 40%MVC 以上の運動単位は、時間および交互作用の主効果はいずれも有意であり、条件の主効果は有意ではなかった（条件： $p=0.157$ 、時間： $p<0.001$ 、交互作用： $p=0.023$ ）。主効果検定を行った結果、120 秒休息では Ramp1 と比較して Ramp4 の発火頻度が有意に増加し（ $p<0.001$ ）、30 秒および 60 秒休息では Ramp1 と Ramp4 の間に有意な差はなかった。

### 3.4.3 Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の動員閾値および発火頻度の変化量の相関

図 11 に示すように、Ramp1 の動員閾値と各 Ramp における動員閾値の変化量との関連について検討した。Ramp1 から Ramp2 の変化量は、30 秒休息においてのみ有意な正の相関があり（ $r=0.358$ 、 $p<0.01$ ）、動員閾値の高い運動単位ほど Ramp2 で動員されにくい傾向が

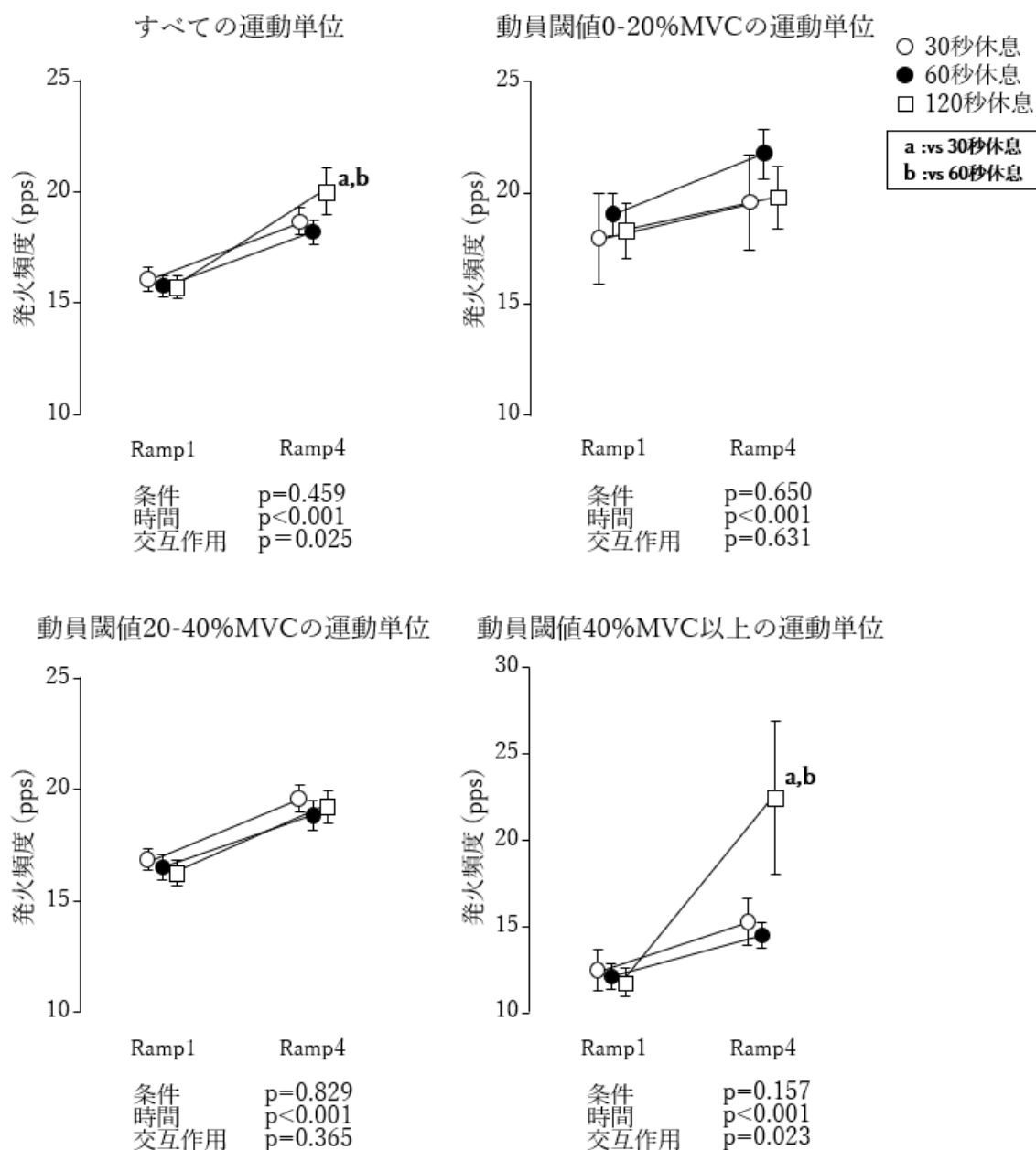
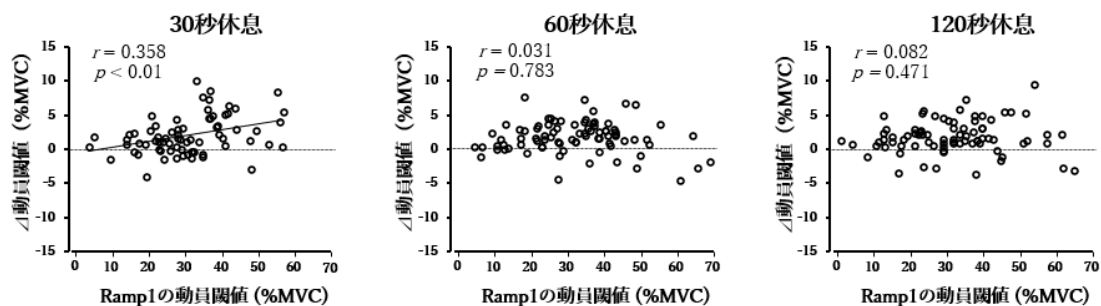


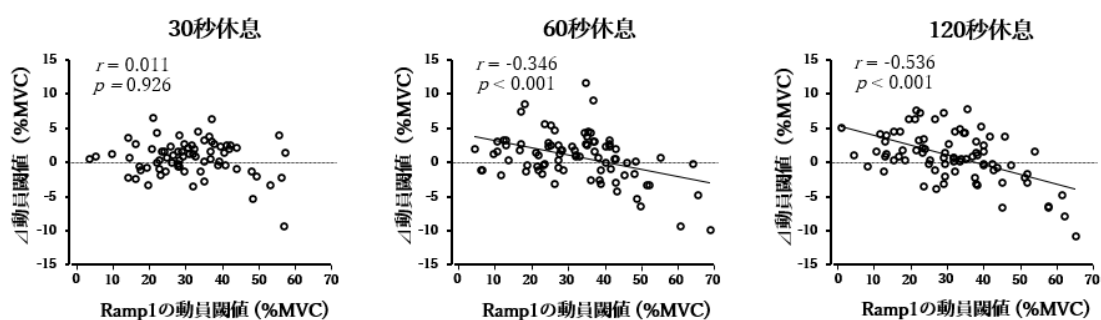
図 10 Ramp1 と Ramp4 における動員閾値ごとの発火頻度の変化

Ramp1 の動員閾値毎（すべての運動単位、動員閾値 0-20%MVC の運動単位、動員閾値 20-40%MVC の運動単位、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位）に分けて、Ramp4 における発火頻度の変化を示す。○は 30 秒休息、●は 60 秒休息、□は 120 秒休息を示す。値は平均値±標準偏差で示した。条件・時間・交互作用は、それぞれセット間の休息时间、セット、交互作用の有意性を示す。

I. Ramp1からRamp2の動員閾値の変化



II. Ramp1からRamp3の動員閾値の変化



III. Ramp1からRamp4の動員閾値の変化

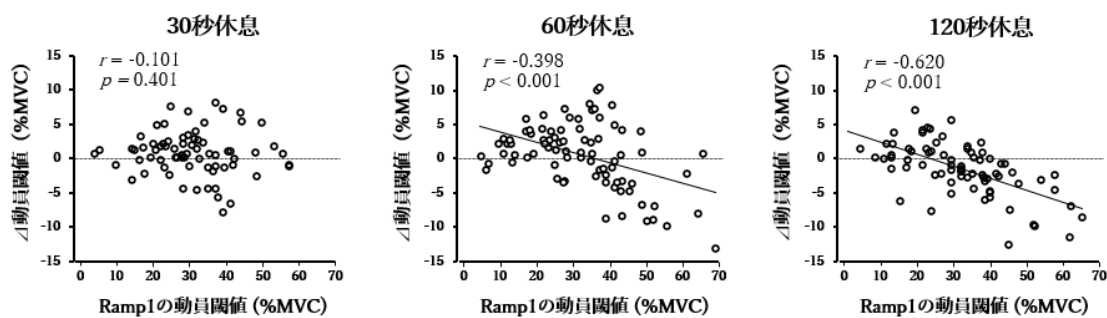


図 11 Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の動員閾値の変化量の相関

各セット間の休息時間における Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の動員閾値の変化量の相関分析。黒の実線は有意な相関( $p < 0.05$ )および回帰直線を示す。

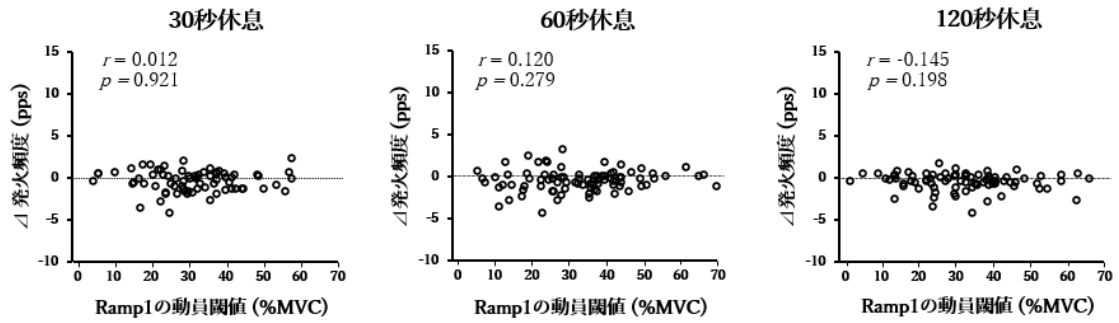
示された。一方、60秒および120秒休息では有意な相関はなかった。次に、Ramp1からRamp3の変化量では、30秒休息では有意な相関がなかったが、60秒休息 ( $r=-0.346$ ,  $p<0.001$ ) および120秒休息 ( $r=-0.326$ ,  $p<0.001$ ) で有意な負の相関があり、動員閾値の高い運動単位ほどRamp3で動員されやすく、動員閾値の低い運動単位は動員されにくい傾向が示された。Ramp1からRamp4の変化量も、30秒休息では有意な相関がなかった一方、60秒休息 ( $r=-0.398$ ,  $p<0.001$ ) および120秒休息 ( $r=-0.620$ ,  $p<0.001$ ) において負の相関があった。

次にRamp1の動員閾値と各Rampにおける発火頻度の変化量との関連について検討した(図12)。30秒休息、60秒休息、120秒休息のいずれの条件においても、Ramp2およびRamp3の発火頻度の変化量との間に有意な相関はなかった。また、Ramp1とRamp4における発火頻度の変化量との関連についても、いずれのセット間の休息时间においても有意な相関関係はなかった。

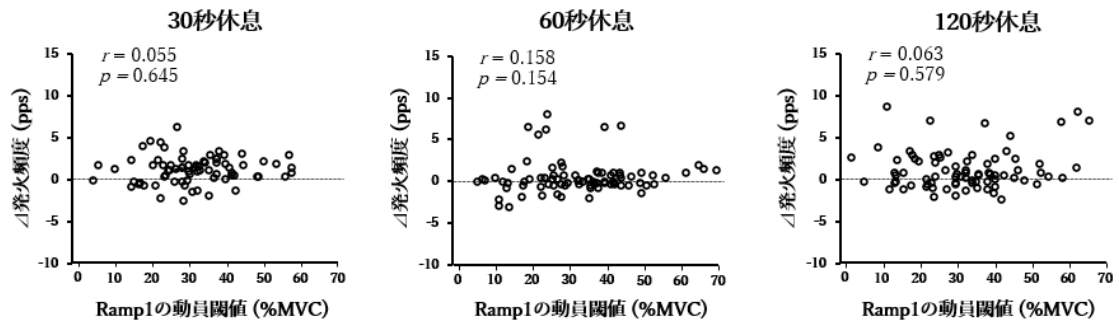
#### 3.4.4 ARV

表4に示すように、Ramp1、Ramp2およびRamp3におけるARVの変化について、条件の主効果および交互作用は有意でなかった(条件： $p=0.480$ 、交互作用： $p=0.086$ )。一方、時間の主効果は有意であり(時間： $p=0.018$ )、事後検定の結果、Ramp2と比較してRamp3は増加する傾向を示した( $p=0.065$ )が、有意な差はなかった(すべて $p>0.05$ )。Ramp1とRamp4では、条件の主効果および交互作用は有意でなかった(条件： $p=0.223$ 、

IV. Ramp1からRamp2の発火頻度の変化



V. Ramp1からRamp3の発火頻度の変化



VI. Ramp1からRamp4の発火頻度の変化

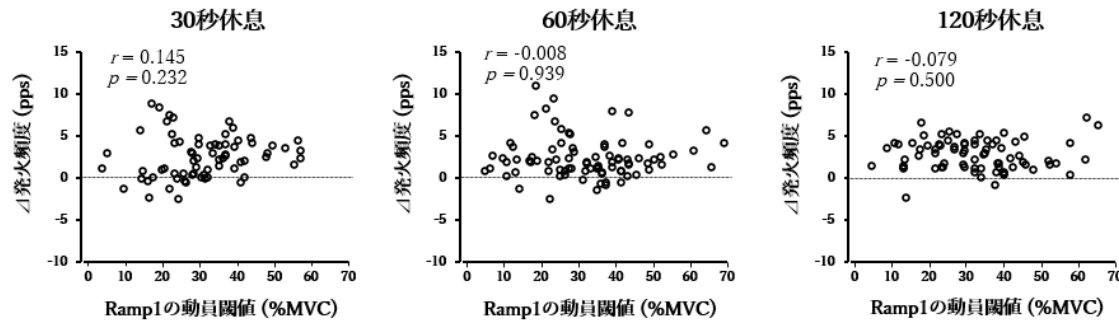


図 12 Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の発火頻度の変化量の相関  
各セット間の休息時間における Ramp1 の動員閾値と各 Ramp の発火頻度の変化量の相関分析。

表4 各セット間の休息时间および各Rampにおける平均整流値（ARV）の変化

	Ramp1	Ramp2	Ramp3	Ramp4
30秒休息 [mV]	82.8±25.9	82.2±25.5	92.5±32.5	95.3±37.0
60秒休息 [mV]	80.1±23.1	81.9±24.1	85.3±28.7	88.6±32.5
120秒休息 [mV]	86.4±28.1	81.9±24.9	87.4±29.7	96.5±33.3

値は平均値±標準偏差で示した。ARV: Average Rectified Value

Ramp1：1セット目開始前、Ramp2：2セット目開始前、Ramp3：3セット目開始前、

Ramp4：全セット終了後。

交互作用： $p=0.577$ )。一方、時間の主効果は有意であり（時間： $p=0.019$ ）、事後検定の結果、Ramp4 は Ramp1 と比較して有意に増加した ( $p=0.005$ )。

#### 第4章 考察

本研究では、筋力トレーニングのセット間の休息時間が運動単位活動および筋酸素動態に及ぼす影響を検討した。筋酸素動態はセット間の休息時間の違いによって異なる反応を示し、30 秒休息では、セットを通じて Deoxy-[Hb+Mb]が低い値を持続したのに対し、60 秒および 120 秒休息では減少し、セット間の休息時間によって回復の仕方が異なることが示された。また、Ramp 課題から得られた運動単位の動員閾値および発火頻度は、セット毎に変化したものの、セット間の休息時間による違いはなかった。しかし、動員閾値の違いに着目すると、30 秒休息では動員閾値の高い運動単位で動員閾値の低下が見られない一方、60 秒および 120 秒休息では動員閾値の高い運動単位で動員閾値の低下が見られた。これらの結果から、短いセット間の休息時間は代謝性ストレスを高め、運動単位の動員に影響を及ぼす可能性が示唆された。

##### 4.1 セット間の休息時間が筋酸素動態、血中乳酸濃度、MVC に与える影響

本研究で、代謝性ストレスを変化させるために設定したセット間の休息時間の違いが、筋酸素動態に及ぼす影響を確認するため、NIRS を用いて各セット間の休息時間における Ramp 課題直前の Oxy-[Hb+Mb]、Deoxy-[Hb+Mb]、Total-[Hb+Mb]および StO<sub>2</sub>の変化を

評価した。その結果、セット間の休息时间やセット毎によって、筋酸素動態が異なることが明らかになった(図 4)。

Oxy-[Hb+Mb]は、2 セット目開始直前の NIRS2 において 30 秒休息が 120 秒休息より低く(図 4)、短いセット間の休息时间では筋内の酸素供給が十分に回復しないことが示唆された。一方で、いずれのセット間の休息时间においても Oxy-[Hb+Mb]は NIRS1 から NIRS3 にかけて増加しており、これは繰り返しの収縮による血管拡張や筋収縮に伴う機能的充血によって活動筋への血流が増加し、酸素供給が増加したと考えられる[39]。StO<sub>2</sub>も同様に、30 秒休息は 60 秒および 120 秒休息と比較して低かった(図 4)。活動筋の酸素飽和度は、酸素供給と需要のバランスを示す指標であり、StO<sub>2</sub>の減少は酸素消費量が酸素供給量を上回っていることを示す[40]。そのため、30 秒休息では相対的に酸素不足の状態でのセットを開始していた可能性がある。Deoxy-[Hb+Mb]は、30 秒休息ではセットを通じて高い値が続いた一方、60 秒および 120 秒休息ではセットを重ねるごとに低下した(図 4)。Deoxy-[Hb+Mb]の上昇は、筋代謝と血流の両方に影響される酸素抽出の増加を反映し[41]、酸素消費の増加や酸素供給の低下によって生じる。30 秒休息では代謝産物が十分に除去されず、酸素供給が相対的に追いつかない状態で次のセットを開始した結果、代謝性ストレスの高い状態が持続したと考えられる。一方、60 秒および 120 秒休息での Deoxy-[Hb+Mb]の低下は、酸素供給と代謝産物の除去が進んだ状態で各セットを開始できたと考えられる。Total-[Hb+Mb]はセット間の休息时间にかかわらず、セットを重ねるごとに増加した(図 4)。

この増加は機能的充血による血流量の増加を反映しており[39]、セットが進むにつれて活動筋への血液量が全体として増加したと考えられる。ただし、Total-[Hb+Mb]が増加してもStO<sub>2</sub>が低値であったことは、酸素供給が需要を下回っていたと考えられる。よって本研究では、セット間の休息時間は筋内の酸素動態に影響し、30秒休息では酸素供給が不十分な代謝性ストレスが高い状態で次のセットを開始し、60秒および120秒休息では酸素供給が十分な代謝性ストレスが相対的に低い状態で次のセットを開始していたと考えられる。

血中乳酸濃度は、すべてのセット間の休息時間においてPREと比較してPOST0およびPOST5に有意に上昇したが、条件間には有意な影響がなかった(表3)。このことから、強度および反復回数を一致させた場合、本研究で設定した範囲内のセット間の休息時間の違いは、血中乳酸濃度には影響を与えない可能性がある。短いセット間の休息時間により、筋内の酸素供給が不十分になると、酸化的代謝が低下して解糖系への依存が高まるため、血中乳酸濃度の上昇が大きくなる可能性が考えられる。しかし、本研究ではセット間の休息時間による影響は見られなかった。これは、血中乳酸濃度が活動筋のみで規定されるのではなく、全身における乳酸の利用や除去など全身バランスによって決まるため[42,43]、活動筋の酸素動態の差があっても血中乳酸値では相殺された可能性が考えられる。また、すべての条件においてMVCはPREと比較してPOSTに有意に低下した一方で、条件間で有意な影響がなかった(表2)。先行研究でも、総負荷量を一定にした条件下でセット間の休息時間を変化させても、筋力トレーニング直後の最大随意筋力の低下が同程度となることが報告されて

おり[44]、セット間の休息時間が必ずしも最終的な MVC 低下に寄与しない可能性が考えられる。一方、休息時間の違いによって反復回数が増えることで総負荷量が増加すると、MVC 低下が大きくなることも報告されている[45]。そのため、本研究でセット間の休息時間によって有意な影響がなかったことは、条件間で総負荷量を統一したことで、筋力トレーニング直後の MVC の低下が同程度になったと考えられる。

#### 4.2 セット間の休息時間が運動単位活動全体に与える影響

本研究では、参加者毎の平均値の運動単位の動員閾値および発火頻度に対して、セット間の休息時間による違いが見られなかった(図5)。一方で、セット毎に運動単位活動の変化があることが明らかになった(図5)。

Ramp1 から Ramp3 の比較では、Ramp2 で動員閾値が上昇し、発火頻度が低下した。これは、運動初期には活動後増強 (post-activation potentiation: PAP) に伴う筋収縮効率の向上により、同一の力を発揮するために必要な神経入力が一時的に減少し、その結果として動員閾値の上昇が生じた可能性を示している。PAP は強い随意収縮後に筋線維のカルシウム感受性が一時的に高まることで、より大きな張力が得られる現象とされている[46]。この収縮効率の向上は、同一の力を発揮するために必要な中枢からの運動ドライブを低下させ、運動単位の動員閾値の上昇や発火頻度の低下として現れることが先行研究で報告されている[47]。一方、Ramp3 では発火頻度が増加したことは(図5)、PAP による収縮効率の向上よりも、興奮収縮連関の低下や代謝産物の蓄積、膜興奮性および脊髄運動ニューロン興奮性の

低下といった疲労要因[48,49]が優位となったと考えられる。その結果、低下した筋線維の張力を補償するために発火頻度が増加したと考えられる[50]。トレーニング全体の変化をみるために比較した Ramp1 と Ramp4 では、動員閾値は低下し、発火頻度は増加した(図 6)。先行研究でも、最大下の収縮を疲労困憊まで反復して行くと、運動単位の動員閾値が低下することや発火頻度が増加することが報告されており、本研究でも筋力トレーニングによる筋の疲労により、動員閾値の低下から推察される運動単位の追加動員や、発火頻度の増加が起きたと考えられる[50]。Ramp4 における発火頻度は、120 秒休息で 30 秒および 60 秒休息と比較して有意に増加した(図 6)。短いセット間の休息時間は代謝性ストレスが相対的に増加しやすいことが報告されている[51,52]。代謝性ストレスによって活性化されるグループ III・IV 筋求心性線維からのフィードバックは、運動ニューロン出力を抑制し、運動単位の発火を抑制することが報告されている[53]。そのため、120 秒休息では代謝性ストレスによる抑制が相対的に軽減され、より高い頻度で発火できた可能性が考えられる。

ARV は、セット間の休息時間による違いはなかったが、Ramp2 から Ramp3 にかけて増加する傾向があり、Ramp1 から Ramp4 では ARV が有意に増加した(表 4)。ARV の増加は、疲労の進行に伴い運動単位の追加的動員や発火頻度の上昇が生じ、筋全体としての電気的活動が増大したことを反映していると考えられる。先行研究でも、筋疲労に伴い表面筋電図の振幅が増大することが報告されており[54]、本研究の結果はこれと一致する。ARV にはセット間の休息時間の違いによる差がなかったことから、セット間の休息時間の違いは筋

全体の活動に大きな影響がなかったと考えられる。一方で、ARV は筋全体の電氣的な活動の総和を表す指標であり、個々の運動単位レベルでの動員閾値や発火頻度の変化が相殺されやすい[28]。そのため、本研究ではセット間の休息時間の違いによって生じた運動単位毎の変化を、ARV のみでは十分に検出できなかった可能性がある。

#### 4.3 疲労要因の時間特性と本研究プロトコル

筋疲労は、末梢性疲労と中枢性疲労に分けられる。末梢性疲労には、興奮収縮連関の低下、代謝産物の蓄積、膜興奮性の低下などがあり、中枢性疲労には、随意収縮力の低下、代謝産物の蓄積などによるグループ III・IV 求心性線維の活動増大に伴う抑制性入力の増加、脊髄運動ニューロンの興奮性低下などがある[55]。一方で疲労とは逆に、短時間の高強度収縮後には PAP といった活動後増強による一過性の筋出力の増大が生じることも知られている[56]。先行研究によると、筋力トレーニングのような疲労を伴う収縮課題後、興奮収縮連関の低下は数時間持続し[55]、膜興奮性の変化は 5 分程度持続すると報告されている[57]。そのため、これらの要因は、本研究のいずれのセット間の休息時間でも影響していたと考えられる。これらと比較して、代謝産物の蓄積や血流の再灌流は、より短い時間で起こることが知られている。先行研究では、筋力トレーニング後に  $StO_2$  がベースラインの約 75%まで回復するのに 30~40 秒程度を要し、完全な回復にはより長い時間がかかることが示されている[58]。このことから、本研究のプロトコルにおいては 30 秒休息では酸素供給が不十分で代謝性ストレスが高い状態であり、120 秒休息では酸素供給が十分で代謝性ストレスが低い

状態であったと考えられる。グループⅢ・Ⅳ求心性線維の活動は、筋内に蓄積した代謝産物によって増加し、中枢神経系に抑制性フィードバックを送ることが報告されている[59]。したがって、本研究の30秒休息では代謝産物の蓄積により求心性入力が相対的に高くなり、大脳皮質や脊髄レベルでの運動ニューロンに抑制的に作用した可能性がある。一方、120秒休息では代謝性ストレスが弱まったことで、これらの抑制が弱まり、より高い頻度で発火できた可能性がある。随意収縮力の低下は、運動様式や研究間の違いはあるものの、筋力トレーニングのような短時間の収縮では、2分以内に回復することが報告されている[55]。また先行研究では、脊髄運動ニューロンの興奮性を反映するH反射が、随意収縮後に抑制され、その抑制の持続時間は個人差があり、10秒から1分程度で消失する場合がある一方で、2～3分持続することも報告されている[60]。これらのことから本研究では、30秒および60秒休息では中枢性疲労や脊髄運動ニューロンの興奮性低下が十分に回復していない状態で次のセットを行っていた一方、120秒休息では相対的に回復した状態で行っていた可能性が考えられる。一方、PAPは高強度の収縮直後に最大となり、30秒程度の半減期をもって急速に減衰し、数分以内にほぼ消失する短時間の現象である[61]。また、高強度の収縮後はPAPと疲労が生じ、増強効果は両者のバランスによって決まるため、疲労が大きくなるとPAPは相対的に小さくなることが示されている[62]。したがって、本研究の30秒、60秒、120秒休息のいずれのセット間の休息時間でも、各セット開始時にPAPの影響が残っていた可能性があるが、セットを重ねるにつれて興奮収縮連関や膜興奮性の低下、脊髄運動ニューロ

ン興奮性の低下といった疲労要因[48]が、PAP による収縮効率の向上よりも上回っていたと考えられる。

#### 4.4 運動単位の動員閾値依存的な変化

一般に、動員閾値の低い運動単位は遅筋線維、動員閾値の高い運動単位は速筋線維を支配していると考えられているが、本研究では筋線維タイプを直接同定してしないため、動員閾値に基づいて考察する。

本研究では運動単位の動員閾値に依存して、セット間の休息时间および Ramp1 に対する各 Ramp における動員閾値の変化量が異なることが明らかになった。Ramp1 から Ramp3 の比較では、動員閾値 20–40%MVC の運動単位の動員閾値が Ramp2 で上昇した(図 7)。この結果から、Ramp2 では同一の相対強度において運動単位の動員が起こりにくくなった可能性が推察される。一方、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位の動員閾値は、Ramp2 において Ramp1 と比較して上昇したが、Ramp3 では Ramp1 よりも低下した(図 7)。また、Ramp1 と Ramp4 の比較でも、動員閾値 0–20%MVC の運動単位は Ramp4 で動員閾値が上昇した(図 8)。さらに、セット間の休息时间に着目すると、動員閾値 20–40%MVC の運動単位では、Ramp1 から Ramp4 にかけて、60 秒休息で動員閾値の上昇がみられ、動員閾値 40%MVC 以上の運動単位では 120 秒休息でのみ動員閾値が低下した(図 8)。これらのことから、動員閾値の低い運動単位と動員閾値の高い運動単位では動員閾値毎に異なる変化をすることが示唆された。これらの動員閾値依存的な変化は、疲労時の運動単位の動員パター

ンを報告した先行研究[63]と一致する。この研究では、第一背側骨間筋で、50%MVCで等尺性収縮を反復して実施し、疲労に伴う運動単位活動を記録した。その結果、動員閾値の低い運動単位 (<25%MVC) は動員閾値が変化しないまたは上昇する一方、動員閾値の高い運動単位 (>25%MVC) では動員閾値が低下するというように、疲労による動員閾値の変化が閾値によって異なることや、一部の動員閾値の高い運動単位の活動が途中で消失することが報告されている。これは、疲労時の代謝性ストレスに起因するグループIII・IV求心性線維を介した抑制が、動員閾値の低い運動単位と動員閾値の高い運動単位で異なる影響を及ぼし、特に動員閾値の高い運動単位は抑制の影響を受けやすい可能性を示唆している。

さらに、Ramp1の動員閾値と各Rampにおける動員閾値の変化量の相関を検討した結果、30秒休息ではRamp1からRamp2の変化量との間に正の相関があり、動員閾値の高い運動単位ほどRamp2で動員されにくくなる傾向が示された(図11)。短いセット間の休息時間では代謝産物の蓄積に起因するグループIII・IV求心性線維の活性が、中枢神経系の抑制に繋がった可能性が考えられる[18]。本研究における30秒休息では、このような代謝性ストレスに起因する抑制性フィードバックにより、とくに動員閾値の高い運動単位の動員が抑制された可能性を示唆する。一方、60秒および120秒休息では、Ramp1からRamp3およびRamp4の変化量において負の相関があり、動員閾値の高い運動単位ほど動員閾値が低下し、疲労に伴う筋出力低下を補うため、運動単位が追加的に動員される可能性が示唆された(図11)。また、60秒および120秒休息でのRamp1からRamp3およびRamp1からRamp4の

変化量において、Ramp1 での動員閾値が低い運動単位で、動員閾値の変化量が正方向に位置し、相対的に動員されにくくなる傾向がみられた(図 11)。サイズの原理から考えると、動員閾値の低い運動単位が動員されにくくなる現象を解釈することは難しい。しかし、疲労によって動員閾値が一様に変化するとは限らず、動員閾値の低い運動単位でも疲労によって、動員閾値が上昇するものと低下するものがあることが報告されている[64]。さらに、先行研究では疲労によって、動員閾値の高い運動単位の動員閾値は低下する一方で、動員閾値の低い運動単位の動員閾値は変わらないまたは上昇することが示されており、PAP による単収縮力の増加や筋の硬さなどの変化が、動員閾値を一時的に上昇させる可能性を示唆している[63]。また、本研究の解析手法の影響も考慮する必要がある。本研究では Ramp1 から同一波形として同定できた運動単位のみを解析対象としており、疲労に伴って途中で脱動員した運動単位は解析には含まれていない。そのため、本研究の結果は追従可能であった一部の運動単位に基づくものであり、運動単位全体の活動を完全には捉えられていない可能性がある。

発火頻度は Ramp1 から Ramp3 および Ramp1 から Ramp4 で動員閾値に依存せず増加した(図 9、10)。一方、発火頻度の変化量は、いずれのセット間の休息时间においても、Ramp1 の動員閾値との間に有意な相関はなかった(図 12)。発火頻度は、運動単位の動員閾値よりも、各運動に共通して加わる中枢からの神経入力大きさに大きく影響を受けると考えられている[65]。また、疲労は発火頻度と動員閾値の関係を表す回帰直線の傾きや切片を変化

させることが報告されており、これは動員閾値依存的な変化ではなく、全体の変化であると  
考えられる[66]。そのため、本研究でも、疲労に伴う発火頻度の変化は、動員閾値依存的な  
変化として見られなかったと考えられる。

これらの結果から、30秒の短いセット間の休息時間では代謝性ストレスが増加し、運動  
単位の動員を抑制した可能性が示唆された。したがって、短いセット間の休息時間は代謝  
性ストレスを増加させ、動員閾値の低下から推測される運動単位の追加動員の抑制という  
点では、仮説が支持された。一方で、発火頻度の変化やMVC、血中乳酸濃度については  
仮説通りの結果は得られなかった。特に、短いセット間の休息時間では、セットを重ねる  
と動員閾値の高い運動単位で動員閾値の低下が起きず追加的な動員がないため筋出力を補  
うために既存の運動単位の発火頻度が増加するという仮説は、30秒休息の発火頻度が、60  
秒および120秒休息と比較して増加しなかったことから、本研究の仮説と一致しなかつ  
た。これは、代謝性ストレスに起因する抑制的な作用が、運動単位全体の発火頻度にも影  
響を及ぼした可能性がある。セット間の休息時間の違いが運動単位の動員様式に影響を与  
えることが明らかになったが、本研究では運動単位活動の全ては説明できず、今後さらな  
る研究が必要である。

#### 4.5 実践的示唆

本研究の結果から、運動単位の追加的な動員を狙う場合には、60秒以上のセット間の休  
息時間を用いたトレーニングが効果的である可能性が示唆された。一方、30秒程度の短い

セット間の休息時間は代謝性ストレスの増加を目的とする場合には効果的であることが明らかになった。これらのことから、目的に応じて適切にセット間の休息時間を選択することで、筋力トレーニングを効果的に行うことができると考えられる。

## 結論

筋力トレーニングにおけるセット間の休息時間の違いは、運動単位活動および筋酸素動態に影響を及ぼす。30秒休息では筋酸素動態から示唆される代謝性ストレスが高い状態で、動員閾値の高い運動単位において動員閾値の低下はみられなかった。一方、60秒および120秒休息では代謝性ストレスが低く、動員閾値の高い運動単位の動員閾値が低下した。

## 参考文献

1. American College of Sports M. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 2009; 41:687-708.
2. Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36:674-688.
3. Kraemer WJ, Adams K, Cafarelli E, Dudley GA, Dooly C, Feigenbaum MS, et al. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc* 2002; 34:364-380.
4. Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE. Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness: a review of the acute programme variables. *Sports Med* 2005; 35:841-851.
5. Bottinelli R, Reggiani C. Human skeletal muscle fibres: molecular and functional diversity. *Prog Biophys Mol Biol* 2000; 73:195-262.
6. Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med* 2004; 34:663-679.
7. Adams GR, Bamman MM. Characterization and regulation of mechanical loading-induced compensatory muscle hypertrophy. *Compr Physiol* 2012; 2:2829-2870.
8. Schoenfeld BJ. The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance

training. *J Strength Cond Res* 2010; 24:2857-2872.

9. Krieger JW. Single versus multiple sets of resistance exercise: a meta-regression. *J Strength Cond Res* 2009; 23:1890-1901.

10. Krieger JW. Single vs. multiple sets of resistance exercise for muscle hypertrophy: a meta-analysis. *J Strength Cond Res* 2010; 24:1150-1159.

11. Schoenfeld BJ. Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med* 2013; 43:179-194.

12. Senna G, Salles BF, Prestes J, Mello RA, Roberto S. Influence of two different rest interval lengths in resistance training sessions for upper and lower body. *J Sports Sci Med* 2009; 8:197-202.

13. de Salles BF, Simao R, Miranda F, Novaes Jda S, Lemos A, Willardson JM. Rest interval between sets in strength training. *Sports Med* 2009; 39:765-777.

14. McKenna MJ, Harmer AR, Fraser SF, Li JL. Effects of training on potassium, calcium and hydrogen ion regulation in skeletal muscle and blood during exercise. *Acta Physiol Scand* 1996; 156:335-346.

15. Contessa P, Adam A, De Luca CJ. Motor unit control and force fluctuation during fatigue. *J Appl Physiol* (1985) 2009; 107:235-243.

16. Henneman E, Somjen G, Carpenter DO. Functional Significance of Cell Size in Spinal

Motoneurons. *J Neurophysiol* 1965; 28:560-580.

17. Hammer SM, Alexander AM, Didier KD, Barstow TJ. Influence of blood flow occlusion on muscular recruitment and fatigue during maximal-effort small muscle-mass exercise. *J Physiol* 2020; 598:4293-4306.

18. Amann M, Blain GM, Proctor LT, Sebranek JJ, Pegelow DF, Dempsey JA. Group III and IV muscle afferents contribute to ventilatory and cardiovascular response to rhythmic exercise in humans. *J Appl Physiol* (1985) 2010; 109:966-976.

19. Amann M, Wan HY, Thurston TS, Georgescu VP, Weavil JC. On the Influence of Group III/IV Muscle Afferent Feedback on Endurance Exercise Performance. *Exerc Sport Sci Rev* 2020; 48:209-216.

20. De Luca CJ. The use of surface electromyography in biomechanics. *Journal of Applied Biomechanics* 1997; 13:135-163.

21. Farina D, Enoka RM. Evolution of surface electromyography: From muscle electrophysiology towards neural recording and interfacing. *J Electromyogr Kinesiol* 2023; 71:102796.

22. Centner C, Wiegel P, Gollhofer A, Konig D. Effects of Blood Flow Restriction Training on Muscular Strength and Hypertrophy in Older Individuals: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med* 2019; 49:95-108.

23. Takarada Y, Takazawa H, Sato Y, Takebayashi S, Tanaka Y, Ishii N. Effects of resistance

exercise combined with moderate vascular occlusion on muscular function in humans. *J Appl Physiol* (1985) 2000; 88:2097-2106.

24. Olmos AA, Montgomery TR, Jr., Sears KN, Dinyer TK, Hammer SM, Bergstrom HC, et al. Blood flow restriction increases necessary muscle excitation of the elbow flexors during a single high-load contraction. *Eur J Appl Physiol* 2024; 124:1807-1820.

25. Richardson L, Olmos A, Montgomery T, Burleson K, Succi P, Lubiak SM, et al. Blood Flow Restriction Accelerates Recruitment During a High-Intensity Non-Volitional Task. *Int J Sports Med* 2025; 46:1061-1067.

26. Farina D, Merletti R, Enoka RM. The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J Appl Physiol* (1985) 2004; 96:1486-1495.

27. Vigotsky AD, Halperin I, Lehman GJ, Trajano GS, Vieira TM. Interpreting Signal Amplitudes in Surface Electromyography Studies in Sport and Rehabilitation Sciences. *Front Physiol* 2017; 8:985.

28. Del Vecchio A, Negro F, Felici F, Farina D. Associations between motor unit action potential parameters and surface EMG features. *J Appl Physiol* (1985) 2017; 123:835-843.

29. Nishikawa T, Takeda R, Hirono T, Okudaira M, Ohya T, Watanabe K. Differences in acute neuromuscular response after single session of resistance exercise between young and older adults. *Exp Gerontol* 2024; 185:112346.

30. Del Vecchio A, Casolo A, Negro F, Scorcelletti M, Bazzucchi I, Enoka R, et al. The increase in muscle force after 4 weeks of strength training is mediated by adaptations in motor unit recruitment and rate coding. *J Physiol* 2019; 597:1873-1887.
31. Nishikawa T, Takeda R, Karaki M, Igawa K, Watanabe K. Effects of quercetin ingestion on neuromuscular system following single session of resistance exercise at differing intensities in older adults. *Appl Physiol Nutr Metab* 2025; 50:1-13.
32. Reis JF, Fatela P, Mendonca GV, Vaz JR, Valamatos MJ, Infante J, et al. Tissue Oxygenation in Response to Different Relative Levels of Blood-Flow Restricted Exercise. *Front Physiol* 2019; 10:407.
33. Biazon T, Ugrinowitsch C, Soligon SD, Oliveira RM, Bergamasco JG, Borghi-Silva A, et al. The Association Between Muscle Deoxygenation and Muscle Hypertrophy to Blood Flow Restricted Training Performed at High and Low Loads. *Front Physiol* 2019; 10:446.
34. Holobar A, Farina D, Gazzoni M, Merletti R, Zazula D. Estimating motor unit discharge patterns from high-density surface electromyogram. *Clin Neurophysiol* 2009; 120:551-562.
35. Holobar A, Zazula D. Correlation-based decomposition of surface electromyograms at low contraction forces. *Med Biol Eng Comput* 2004; 42:487-495.
36. Martinez-Valdes E, Negro F, Laine CM, Falla D, Mayer F, Farina D. Tracking motor units longitudinally across experimental sessions with high-density surface electromyography. *J*

Physiol 2017; 595:1479-1496.

37. Watanabe K, Takada T, Kawade S, Moritani T. Effect of exercise intensity on metabolic responses on combined application of electrical stimulation and voluntary exercise. *Physiol Rep* 2021; 9:e14758.

38. Watanabe K, Yoshimura A, Nojima H, Hirono T, Kunugi S, Takada T, et al. Physiological adaptations following vigorous exercise and moderate exercise with superimposed electrical stimulation. *Eur J Appl Physiol* 2023; 123:159-168.

39. Osada T, Mortensen SP, Radegran G. Mechanical compression during repeated sustained isometric muscle contractions and hyperemic recovery in healthy young males. *J Physiol Anthropol* 2015; 34:36.

40. McCully KK, Hamaoka T. Near-infrared spectroscopy: what can it tell us about oxygen saturation in skeletal muscle? *Exerc Sport Sci Rev* 2000; 28:123-127.

41. DeLorey DS, Kowalchuk JM, Paterson DH. Relationship between pulmonary O<sub>2</sub> uptake kinetics and muscle deoxygenation during moderate-intensity exercise. *J Appl Physiol* (1985) 2003; 95:113-120.

42. Brooks GA. Lactate production under fully aerobic conditions: the lactate shuttle during rest and exercise. *Fed Proc* 1986; 45:2924-2929.

43. Brooks GA. Cell-cell and intracellular lactate shuttles. *J Physiol* 2009; 587:5591-5600.

44. Marshall PW, Robbins DA, Wrightson AW, Siegler JC. Acute neuromuscular and fatigue responses to the rest-pause method. *J Sci Med Sport* 2012; 15:153-158.
45. Jambassi Filho JC, Gurjao ALD, Prado AKG, Gallo LH, Gobbi S. Acute Effects of Different Rest Intervals Between Sets of Resistance Exercise on Neuromuscular Fatigue in Trained Older Women. *J Strength Cond Res* 2020; 34:2235-2240.
46. Sale DG. Postactivation potentiation: role in human performance. *Exerc Sport Sci Rev* 2002; 30:138-143.
47. Zero AM, Rice CL. Inducing postactivation potentiation alters human motor unit behavior of the elbow extensors during unconstrained velocity contractions. *J Neurophysiol* 2024; 132:1704-1716.
48. Gandevia SC. Spinal and supraspinal factors in human muscle fatigue. *Physiol Rev* 2001; 81:1725-1789.
49. Allen DG, Lamb GD, Westerblad H. Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev* 2008; 88:287-332.
50. Contessa P, De Luca CJ, Kline JC. The compensatory interaction between motor unit firing behavior and muscle force during fatigue. *J Neurophysiol* 2016; 116:1579-1585.
51. Rogatzki MJ, Wright GA, Mikat RP, Brice AG. Blood ammonium and lactate accumulation response to different training protocols using the parallel squat exercise. *J Strength Cond Res*

2014; 28:1113-1118.

52. Fink J, Kikuchi N, Nakazato K. Effects of rest intervals and training loads on metabolic stress and muscle hypertrophy. *Clin Physiol Funct Imaging* 2018; 38:261-268.

53. Taylor JL, Amann M, Duchateau J, Meeusen R, Rice CL. Neural Contributions to Muscle Fatigue: From the Brain to the Muscle and Back Again. *Med Sci Sports Exerc* 2016; 48:2294-2306.

54. Kallenberg LA, Schulte E, Disselhorst-Klug C, Hermens HJ. Myoelectric manifestations of fatigue at low contraction levels in subjects with and without chronic pain. *J Electromyogr Kinesiol* 2007; 17:264-274.

55. Carroll TJ, Taylor JL, Gandevia SC. Recovery of central and peripheral neuromuscular fatigue after exercise. *J Appl Physiol (1985)* 2017; 122:1068-1076.

56. Taylor JL, Gandevia SC. A comparison of central aspects of fatigue in submaximal and maximal voluntary contractions. *J Appl Physiol (1985)* 2008; 104:542-550.

57. Rodriguez-Falces J, Place N. Different recoveries of the first and second phases of the M-wave after intermittent maximal voluntary contractions. *Eur J Appl Physiol* 2017; 117:607-618.

58. Davis PR, Yakel JP, Anderson DJF. Muscle Oxygen Demands of the Vastus Lateralis in Back and Front Squats. *Int J Exerc Sci* 2020; 13:734-743.

59. Laurin J, Pertici V, Dousset E, Marqueste T, Decherchi P. Group III and IV muscle afferents:

- role on central motor drive and clinical implications. *Neuroscience* 2015; 290:543-551.
60. Trimble MH, Harp SS. Postexercise potentiation of the H-reflex in humans. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30:933-941.
61. Blazevich AJ, Babault N. Post-activation Potentiation Versus Post-activation Performance Enhancement in Humans: Historical Perspective, Underlying Mechanisms, and Current Issues. *Front Physiol* 2019; 10:1359.
62. Tillin NA, Bishop D. Factors modulating post-activation potentiation and its effect on performance of subsequent explosive activities. *Sports Med* 2009; 39:147-166.
63. Carpentier A, Duchateau J, Hainaut K. Motor unit behaviour and contractile changes during fatigue in the human first dorsal interosseus. *J Physiol* 2001; 534:903-912.
64. Farina D, Holobar A, Gazzoni M, Zazula D, Merletti R, Enoka RM. Adjustments differ among low-threshold motor units during intermittent, isometric contractions. *J Neurophysiol* 2009; 101:350-359.
65. Farina D, Negro F, Dideriksen JL. The effective neural drive to muscles is the common synaptic input to motor neurons. *J Physiol* 2014; 592:3427-3441.
66. Stock MS, Beck TW, Defreitas JM. Effects of fatigue on motor unit firing rate versus recruitment threshold relationships. *Muscle Nerve* 2012; 45:100-109.

## 謝辞

本修士論文の作成にあたり、多くの方々のご指導ならびにご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。

指導教員の渡邊航平教授には、修士課程の2年間にわたり、終始熱心な指導を賜りました。研究室の活動を通して、多くの貴重な経験をさせていただき、心より感謝しております。また副査を務めていただいた大家利之教授、吉田毅教授に深く感謝の意を表します。

本修士論文は、多くの方々のお力添えにより完成いたしました。実験方法や解析など多岐にわたり貴重なご助言をくださった、竹田良祐特任助教、井川快斗氏に心より御礼申し上げます。また、実験の実施にあたってサポートをしていただいた能嶋宏弥氏、高木日菜乃氏に深く感謝いたします。さらに、様々な面で支えてくださいました、渡邊航平研究室の川上陽子氏、國木壮大氏、上田彩笑子氏、栖村和志氏、中阪太軌氏に感謝申し上げます。

最後に、学部3年生からスタートした研究生活を長きにわたり支えてくれた家族に心から感謝いたします。