

〈特別寄稿〉

筋力増強運動に筋持久力運動が及ぼす影響についての探索的研究

大塚 亮¹⁾, 寺島 拓海²⁾, 大西 寿明³⁾, 辻 尚一朗⁴⁾, 西澤 玲奈⁵⁾, 水谷 友香⁶⁾,
田中 宏明¹⁾, 田中 千陽¹⁾, 柴山 靖¹⁾, 椿井 裕樹¹⁾, 小出 益徳¹⁾

要旨

【背景】臨床においては Muscle strength exercise (MSE) と Muscle endurance training (MET) を併用されているが、その効果は不明である。本研究では、MET と MSE の併用が筋力増強運動に与える影響を検討する。【方法】本学の健常学生 (平均年齢 20.8 ± 0.6 歳) を用い、対象肢は利き足 (ボールを蹴る側) とし、膝関節伸展 (knee extension: 以下 KE) 最大筋力および筋放電量、大腿周径、筋厚を測定した。対象者は、①コントロール (Con) 群、②MSE と MSE の併用 (MSE) 群、③MSE と MET の併用 (MET) 群の 3 群とし、運動介入は、MSE 群、MET 群とも 70% muscle voluntary contraction (MVC) にて 12 回×2 セット実施した。その後、MSE 群は、70% MVC で 12 回×2 セット、MET 群は、30% MVC で 20 回×3 セットとし、これを週 2 回、6 週間実施した。評価測定は、base、2 週目、4 週目、6 週目とし、負荷量を再設定した。【結果】大腿周径 10 cm、15 cm および筋厚において、介入前後と群間比較ともに有意差を認めなかった。KE 最大筋力は、MSE 群と MET 群では介入後に有意に高値を示した。4 週目では、Con 群と MSE 群間で有意差を認め、6 週目では、Con 群と MSE 群、MET 群間で有意差を認めた。一方で、MSE 群と MET 群には有意差を認めなかったが、MSE 群で増加傾向であった。なお、筋放電量は、MSE 群において Vastus medialis (VM) に増加傾向がみられた。【考察】これらより、MSE 群と MET 群の併用は、最大筋出力を抑制することが示唆された。

キーワード: 筋力増強運動, 筋持久力運動, 膝関節伸展筋力

はじめに

筋力トレーニングは、骨格筋における筋出力および筋持久力の向上や筋肥大を目的に実施する。理学療法において多用される筋力増強運動には種々の報告がされている。健常人を対象に、最大筋力の 72–84% の負荷で膝関節伸展動作を 6 週間実施した結果、筋力の増強を認めたと報告されている¹⁾。また、高齢者においても膝関節伸展運動を 10 Repetition Maximum (以下 RM) で 3 セット、週 2 日、6 週間実施

1) ユマニテク医療福祉大学校 理学療法学科 2) 主体会病院 3) 榊原白鳳病院

4) 榊原温泉病院 5) 伊勢慶友病院 6) 市立伊勢総合病院

した結果、筋力が増加したことも報告されている²⁾。一方で、筋持久力運動においては、最大筋力の 1/2 群, 1/3 群, 1/4 群でトレーニングを行った結果、筋持久力増強には最大筋力の 25% の負荷量が効果的であると報告されている³⁾。これら筋出力向上および筋肥大には、性ホルモンや成長ホルモン、成長因子などの関与や phosphatidylinositol-3 kinase (以下 PI3K) / Protein kinase B (以下 Akt) / Mammalian target of rapamycin (以下 mTOR) や PI3K / Akt / GSK3 signaling pathways が極めて重要な役割を示す⁴⁾。一方、筋持久力運動は、 $[Ca^{2+}]_i$ を上昇することで、 Ca^{2+} / Calmodulin (以下 CaM) が活性化する。CaM は、タンパク質である Peroxisome proliferator-activated receptor γ coactivator-1 α (以下 PGC-1) をリン酸化し、筋持久力が増大すると考えられている⁵⁾。しかしながら、筋持久力運動は、 Ca^{2+} 以外にも AMP 活性化プロテインキナーゼ (AMP-activated protein kinase : 以下 AMPK) を放出する。この AMPK は、TSC1/2 促進作用があり、TSC1/2 が過剰発現することにより mTOR を抑制することで筋肥大を抑制することが報告されている⁶⁾。しかしながら、ヒトを対象とした実験においては、筋力増強運動に筋持久力運動を併用した効果は未だ報告されていない。

これらのことにより臨床現場で展開されている筋力増強運動と筋持久力運動を併用したアプローチは、筋力増強を目的とするのであれば非効率なものではないかと考え本研究を実施した。

方法

対象は、除外基準を満たした本学の健常学生男女 24 名 (男性 16 名, 女性 8 名, 20.8 ± 0.6 歳, 168.2 ± 9.3 cm, 61.5 ± 11.6 kg) とした。除外基準は、①運動習慣がある者、②現病歴または既往歴に下肢の整形外科的疾患を有する者、③同意が得られなかった者とした。実験の測定に用いる対象肢は、利き足 (ボールを蹴る側) とし、本実験は、膝関節伸展最大筋力、筋放電量測定、筋厚測定、大腿周径測定とした。なお、筋放電量と筋厚の測定においては、対象筋を内側広筋 (Vastus medialis : 以下 VM)、外側広筋 (Vastus lateralis : 以下 VL) とした。

膝関節伸展 (knee extension : 以下 KE) 最大筋力の測定には、Hand-Held Dynamo Meter mobie (以下 HHD, 酒井医療株式会社製) を用い、加藤らの方法に準じて行った⁷⁾。開始姿勢は、膝関節屈曲 (knee flexion : 以下 KF) 60° とし、最大等尺性張力を測定した⁸⁾。計測時間は 3 秒間、計測回数は各 2 回計測し、最大値を採用した。休息時間は 60 秒とする。測定時の代償を防ぐため、両上肢は対側の両肩関節を組むように指示し、体幹は正中位を保持するようにした。HHD 受圧部は、下腿遠位部に装着し、膝窩部にはタオルを用い測定した。

次に、最大等尺性張力時における筋放電量の測定においては、表面筋電図

(electromyography : 以下 EMG) MQ16 (KISSEI COMTEC 社製) とバイタルレコーダー II (KISSEI COMTEC 社製) を用いて測定した。電極の貼付位置は、筋厚測定を実施する際の同部位とするため、VM で大転子から大腿骨外側上顆を結ぶ 70 % の位置とし、VL においては大転子から大腿骨外側上顆を結ぶ中央とし、アースの貼付は膝蓋骨とした⁹⁾(図 1)。なお、最大等尺性張力時の筋放電量の測定は、HHD 測定と同時に実施した。解析には、BIMUTAS® II (KISSEI COMTEC 社製) を用い積分値を算出した。

筋厚測定は、超音波画像診断装置 (ultrasonography : 以下 US) TOSBEE (TOSHIBA 社製) を用い、河上らの方法に準じて実施した¹⁰⁾。測定肢位は、背臥位にて対象筋は弛緩した状態とした。プローブの周波数は 5 MHz として、B (Brightness) モードにて、EMG の電極貼付位置と同部位を測定した⁹⁾。筋厚測定は、VM および VL の表層から骨までの距離を計測した (図 2)。対象者は、①コントロール (Con) 群、②Muscle strength exercise (以下 MSE) と MSE の併用 (MSE) 群、③MSE と Muscle endurance training (以下 MET) の併用 (MET) 群の 3 群をランダムに振り分けた。運動は、端坐位にて抵抗用重錘バンド (株式会社日本メディクス) を下腿遠位部に装着し、MSE 群では、KF90°から 3 秒かけて KE し、3 秒かけて KF90°に戻すように指示した。一方で、MET 群では、KF90°から 5 秒かけて KE し、5 秒かけて KF90°に戻す。MSE 群、MET 群とも 1 RM 70 % muscle voluntary contraction (MVC) にて 12 回 ×2 セット実施した。その後 MSE 群は 12 回 ×2 セット、MET 群は 30 %MVC で 20 回 ×3 セットとし、これを週 2 回、6 週間実施した。それぞれインターバルには、MSE 群で 2 分間、MET 群で 30 秒間とした¹¹⁾。なお、MET 群においては、それぞれ MSE 群と MET 群の順で実施し、MSE 実施から MET 実施までのインターバルは 3 分とした。測定実施および理学療法評価は、1 日目、15 日目、29 日目、43 日目の 2 週間毎に行い (図 3)、評価毎に負荷量は再検討した¹²⁾。

統計解析には、EZR (Saitama Medical Center, Jichi Medical University [埼玉, 日本], The Foundation for Statistical Computing, version 2.13.0) [Vienna, Austria, URL: [http:// www.R-project.org/](http://www.R-project.org/)] を使用し、経時変化についてはフリードマン検定である Bonferroni 法を用い、各群間比較には、one-way ANOVA を用い、統計学的優位水準は 5 % とした。

なお、倫理的配慮として、被検者には研究の趣旨および実験方法を対象者に十分に説明し、文章にて同意を得た。

結果

膝関節最大伸展筋力は、Con 群において base で 37.7 ± 10.0 kg / N, 2 週目で

36.5 ± 9.4 kg / N, 4 週目で 36.5 ± 8.7 kg / N, 6 週目で 35.3 ± 9.7 kg / N であり, 変化量はそれぞれ -1.16 ± 4.1 kg / N, 0.26 ± 3.5 kg / N, -2.43 ± 4.2 kg / N と筋出力に変化を認めなかった ($P>0.05$). MET 群においては, base で 40.5 ± 12.4 kg / N, 2 週目で 41.6 ± 10.0 kg / N, 4 週目で 43.8 ± 10.8 kg / N, 6 週目で 46.0 ± 10.7 kg / N であり, 変化量はそれぞれ 2 週目で 0.99 ± 2.9 kg / N, 4 週目で 3.3 ± 2.6 kg / N, 6 週目で 5.5 ± 3.0 kg / N であった ($P<0.05$). MSE 群においては, base で 45.8 ± 11.8 kg / N, 2 週目で 47.1 ± 11.8 kg / N, 4 週目で 49.2 ± 12.3 kg / N, 6 週目で 54.7 ± 14.1 kg / N であり, 変化量は 2 週目で 1.94 ± 2.6 kg / N, 4 週目で 5.93 ± 2.8 kg / N, 6 週目 7.4 ± 3.1 kg / N と筋出力は増大した ($P<0.01$). MSE 群と MET 群の比較においては, 変化量に差は認めなかったものの ($P>0.05$), MSE 群でのみ 4 週間目より有意差を認めた ($P<0.05$) (図 4).

VM の筋放電量は, Con 群において base で 421.9 ± 136.6 mV, 2 週目で 564.1 ± 244.4 mV, 4 週目で 530.0 ± 197.3 mV, 6 週目で 570.6 ± 216.8 mV であり, MET 群においては, base で 462.7 ± 212.5 mV, 2 週目で 364.9 ± 224.4 mV, 4 週目で 504.2 ± 248.2 mV, 6 週目で 486.9 ± 138.5 mV であり, MSE 群においては, base で 437.9 ± 74.7 mV, 2 週目で 459.8 ± 96.2 mV, 4 週目で 574.2 ± 161.3 mV, 6 週目で 730.8 ± 287.8 mV であった. 一方で, VL の筋放電量は, Con 群において base で 406.2 ± 110.7 mV, 2 週目で 549.5 ± 145.5 mV, 4 週目で 484.1 ± 106.3 mV, 6 週目で 472.3 ± 167.5 mV であり, MET 群においては, base で 360.3 ± 113.8 mV, 2 週目で 367.9 ± 167.0 mV, 4 週目で 390.9 ± 126.9 mV, 6 週目で 469.9 ± 164.3 mV であり, MSE 群においては, base で 442.0 ± 94.3 mV, 2 週目で 479.8 ± 87.8 mV, 4 週目で 594.7 ± 290.4 mV, 6 週目で 591.7 ± 143.0 mV であった. VM と VL を比較すると, 統計学的解析は実施していないものの MSE 群の VM に主として活動している傾向がみられた (図 5).

10 cm の大腿周径は, Con 群において base で 41.7 ± 2.2 cm, 2 週目で 41.9 ± 2.2 cm, 4 週目で 42.3 ± 2.7 cm, 6 週目で 42.6 ± 2.5 cm と変化は認めなかった ($P>0.05$). MET 群においては, base で 45.5 ± 2.7 cm, 2 週目で 45.6 ± 2.7 cm, 4 週目で 45.6 ± 2.5 cm, 6 週目で 46.1 ± 2.6 mm と変化は認めなかった ($P>0.05$). MSE 群においては, base で 44.5 ± 3.8 cm, 2 週目で 45.1 ± 3.4 cm, 4 週目で 44.9 ± 3.3 kg / N, 6 週目で 45.3 ± 4.0 cm と変化は認めなかった ($P>0.05$). 一方で, 15 cm の大腿周径は, Con 群において base で 45.3 ± 4.4 mm, 2 週目で 45.9 ± 2.5 mm, 4 週目で 49.4 ± 3.2 mm, 6 週目で 46.2 ± 4.6 mm と変化は認めなかった ($P>0.05$). MET 群においては, base で 49.3 ± 2.5 mm, 2 週目で 49.3 ± 2.5 mm, 4 週目で 49.4 ± 3.2 mm, 6 週目で 49.6 ± 3.2 mm と変化は認めなかった ($P>0.05$). MSE 群においては, base で 48.8 ± 2.8 mm, 2 週目で 48.9 ± 3.2 mm, 4

週目で 48.9 ± 2.8 kg / N, 6 週目で 49.1 ± 3.2 mm と変化は認めなかった ($P > 0.05$) (図 6).

VM の筋厚は, Con 群において base で 26.1 ± 5.0 mm, 2 週目で 27.2 ± 3.7 mm, 4 週目で 26.1 ± 2.6 mm, 6 週目で 26.3 ± 3.8 mm であり, 変化を認めなかった ($P > 0.05$). MET 群においては, base で 29.0 ± 4.1 mm, 2 週目で 29.5 ± 4.6 mm, 4 週目で 30.0 ± 4.5 mm, 6 週目で 30.2 ± 4.2 mm と筋厚に差を認めなかった ($P > 0.05$). MSE 群においては, base で 28.6 ± 4.0 mm, 2 週目で 28.9 ± 3.8 mm, 4 週目で 29.7 ± 4.0 kg / N, 6 週目で 30.2 ± 3.3 mm と筋厚に差を認めなかった ($P > 0.05$). 一方で, VL の筋厚は, Con 群において base で 32.9 ± 5.9 mm, 2 週目で 32.7 ± 5.4 mm, 4 週目で 32.5 ± 4.9 mm, 6 週目で 33.2 ± 4.8 mm と変化は認めなかった ($P > 0.05$). MET 群においては, base で 36.5 ± 6.3 mm, 2 週目で 36.8 ± 6.2 mm, 4 週目で 37.4 ± 6.3 mm, 6 週目で 37.6 ± 6.1 mm と筋厚に差を認めなかった ($P > 0.05$). MSE 群においては, base で 40.3 ± 7.6 mm, 2 週目で 40.2 ± 7.6 mm, 4 週目で 40.8 ± 7.7 kg / N, 6 週目で 40.9 ± 7.7 mm と筋厚に差を認めなかった ($P > 0.05$) (図 7).

考察

我々は, 筋力増強運動に筋持久力運動が与える影響を検討した. 膝伸展最大筋力は, 介入前と比較し MSE 群では 4 週間後以降で増大し, MET 群は 6 週間後で増大した. その変化量は, 6 週間目で MSE 群 = MET 群 > Con 群であったものの, 4 週間目で MSE 群にのみ有意差を認めたことから, MSE 群においては, MET 群と比較して増大傾向にあった. 一般的に筋出力の向上は, 開始初期の短期効果と長期効果で, その特徴は異なり, 短期効果は神経系の賦活, 長期効果は, 筋肥大によるものとされる¹³⁾. 神経因子に関する生理学的機序として, ①運動単位の活動様式変化, ②拮抗筋の抑制, ③運動パターン学習などが挙げられる¹⁴⁾. 一方で, 筋肥大の因子としては, PI3K / Akt / mTOR signaling pathways や PI3K / Akt / GSK3 signaling pathways が関与することが報告されているが, 本実験においては, 10 cm および 15 cm の大腿周径ならびに筋厚測定には差を認めなかった. すなわち本実験の結果は, 筋肥大の要素およびその割合は少ないものと考ええる. レジスタンストレーニングに伴う筋肥大は, トレーニング開始後 8 週目より増加し, それ以前の効果は神経学的要因の影響であるとの報告も散見されることから¹⁵⁾, 筋肥大の因子を確認するためには, 12 週間といったさらなる長期的な検討を考慮する必要がある. 一方で, 健常成人による高負荷での自転車エルゴメーターによるペダリング動作において, 超音波における筋厚測定において増加傾向を認め, 周径が増大したことや電気刺激を大腿四頭筋に与え, 拮抗筋を随意収縮することで生じる遠心性収縮を筋力トレーニングした結

果、周径が増大したと 4 週から 6 週間で筋力増強を認めるとの報告もあり^{16,17)}、筋肥大を詳細に検討するためには、筋生検分析による組織学的検査や Computed tomography (CT) による画像解析なども評価項目として実施する必要がある。ヒトの膝関節伸展動作の 1RM では、 $MSE > MSE+MET > MET$ であり¹⁾、本実験のデータと類似した結果となっている。さらに、6 週間および 12 週間の MSE と MET の併用効果は、ヒト外側広筋で筋生検を実施した結果、Myosin heavy chine (以下 MHC) II d を MHC II a への蛋白質発現の偏移することを報告している¹⁸⁾。また、ラットを用いた動物実験においては、10 週間のトレッドミルエクササイズは、MHC_{2a}、MHC_{2a}、intermediated isomyosin (IM) の上昇と、MHC_{2b}、MLC_{3F}、fast isomyosin (以下 FM) 2 および FM1 が減少すると報告されている¹⁹⁾。しかしながら、これらの報告は、トレッドミルなどの有酸素運動との併用効果を検証したものであり、MET そのものとの刺激入力の効果とは異なることが考えられる。Lin らは、骨格筋において、PGC-1 が骨格筋の遅筋線維化を示すと報告している²⁰⁾。PGC-1 は PPAR や myocyte enhance factor-2 (Mef2) と協働することによって遅筋線維化に関わる遺伝子発現を調整している。すなわち、我々の結果は、TSC1/2 の発現により mTOR を抑制し、また筋線維組成の変化が起こったのではないかと示唆される。

これらより、本実験では MSE と MET の併用は、MET が MSE の効果を抑制することが示唆されたため、今後は、理学療法プログラムの組み合わせの検討と病態による筋組成の変化が起こった際の効果の検証が必要となると考える。

研究限界

本研究は、分子生物学的観点より臨床に繋げるための研究であり、対象筋より遺伝子やタンパク質発現を確認する必要があるが、本実験では困難である。

謝辞

本論文を作成するにあたり、ご指導、ご助言を賜りました先生方、ならびに本研究にご協力賜りました被検者の方々に深謝致します。

参考文献

- 1) Bell GJ, Syrotuik D, Martin TP et al: Effect of concurrent strength and endurance training on skeletal muscle properties and hormone concentrations in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2000; 81: 418-427
- 2) Engardt M, Knutsson E, Jonsson M, et al: Dynamic muscle strength training in stroke patients: effects on knee extension torque, electromyography activity, and motor function. *Arch Phys Med Rehabil.* 1995; 76 (5): 419-425

- 3) 石河利寛, 竹宮隆・他: 持久力の科学. 株式会社 杏林書院. 1997: pp143-178
- 4) Rommel C, Bodine SC, Clarke BA, et al: Mediation of IGF-1-induced skeletal myotube hypertrophy by PI (3) K / Akt / mTOR and PI (3) K /Akt / GSK3 pathways. *Nat Cell Biol.* 2001; 3 (11): 1009-1013
- 5) Subbotina E, Sierra A, Zhu Z, et al: Musclin is an activity-stimulated myokinase that enhances physical endurance. *PPNAS.* 2015; 12 (29): 16042-16047
- 6) Hawley JA: Molecular responses to strength and endurance training: are they incompatible?. *Appl Physiol Nutr Metab.* 2009; 28 (9): 2486-2490
- 7) 加藤宗規, 山崎裕司, 終 幸伸・他: ハンドヘルドダイナモメーターによる等尺性膝伸展筋力の測定ー固定用ベルトの使用が検者間再現性に与える影響ー. *総合リハ.* 2001 ; 29 (11) : 1047-1050
- 8) Krevolin JL, Pandy MG, Pearce JC : Moment arm of the patellar tendon in the human knee. *J Biomech,* 2004; 37 (5): 785-788
- 9) 福元喜啓, 池添冬芽, 山田陽介・他: 超音波画像診断装置を用いた骨格筋の量的・質的評価. *理学療法学.* 2015 ; 42 (1) : 65-71
- 10) 河上敬介: 筋厚の測定法. *理学療法.* 2012 ; 29 (12) : 1411-1418
- 11) 池田健二, 青柳陽一郎, 椿原彰夫: 特集 筋力と筋持久力低下 概念. *総合リハ.* 2008 ; 36 (7) : 625-629
- 12) McKendry J, Pérez-López A, McLeod M, et al: Short inter-set rest blunts resistance exercise-induced increases in myofibrillar protein synthesis and intracellular signalling in young males. *Exp Physiol.* 2016 ;101 (7): 866-882
- 13) 横山茂樹: 筋力トレーニングの効果・神経因子の改善と筋肥大効果-. *理学療法ジャーナル.* 2018 ; 52 (5) : 447-451
- 14) 市橋則明, 池添冬芽: 筋力増強のメカニズム. *理学療法.* 2004 ; 21 (3) : 468-475
- 15) Kramer WJ, Fleck SJ, Evans WJ et al: Strength and power training: physiological mechanism of adaptation. *Exerc. Sports. Sci. Rev.* 1996; 24: 363-397
- 16) 市橋則明, 池添冬芽, 大畑光司・他: 高負荷での自転車エルゴメーターによるペダリングトレーニングが筋機能に与える影響. *理学療法科学.* 2002 ; 17 (2) : 101-106
- 17) 河戸誠司, 千住秀明, 浜出茂治: 大腿四頭筋に対する電氣的遠心性収縮の筋力増強効果に関する研究. *理学療法科学.* 2010 ; 25 (3) : 333-336
- 18) Putman CT, Xu X, Gillies E et al: Effect of strength, endurance and combined training on myosin heavy chain content and fiber-type distribution in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2004; 92: 376-384
- 19) Wada M, Inashima S, Yamada T et al: Endurance training-induced changes in alkali light chain patterns in type IIB fibers of the rat. *J Appl Physiol.* 2003; 94

(3): 923-929

20) Lin J, Wu H, Tarr PT et al: Transcriptional co-activator PGC-1 alpha drives the formation of slow-twitch muscle fibres. Nature. 2002; 418: 797-801



図 1. HHD 測定と EMG の電極貼付位置

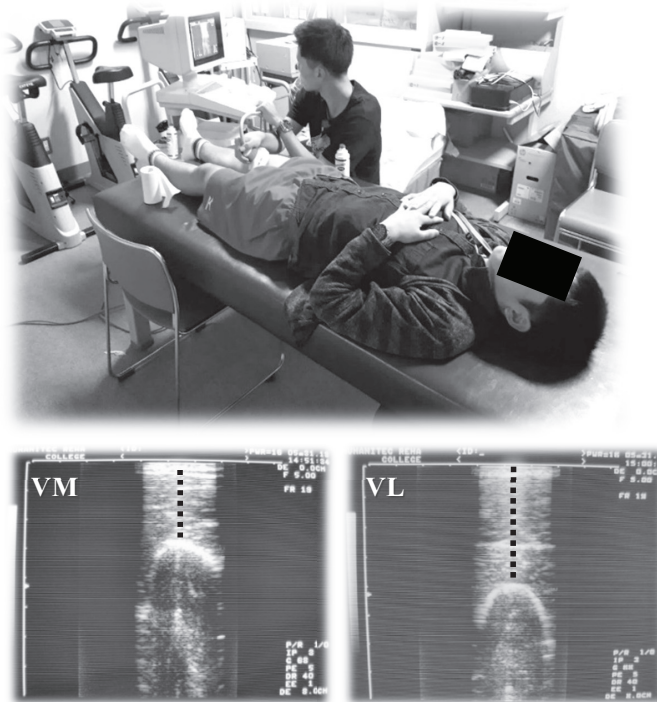


図 2. 筋厚測定方法

超音波画像診断装置を用いた筋厚測定位置を黒点に示した。

A.



B.

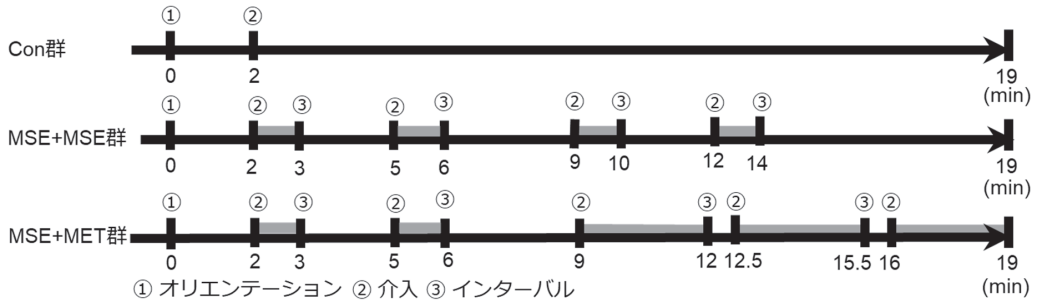
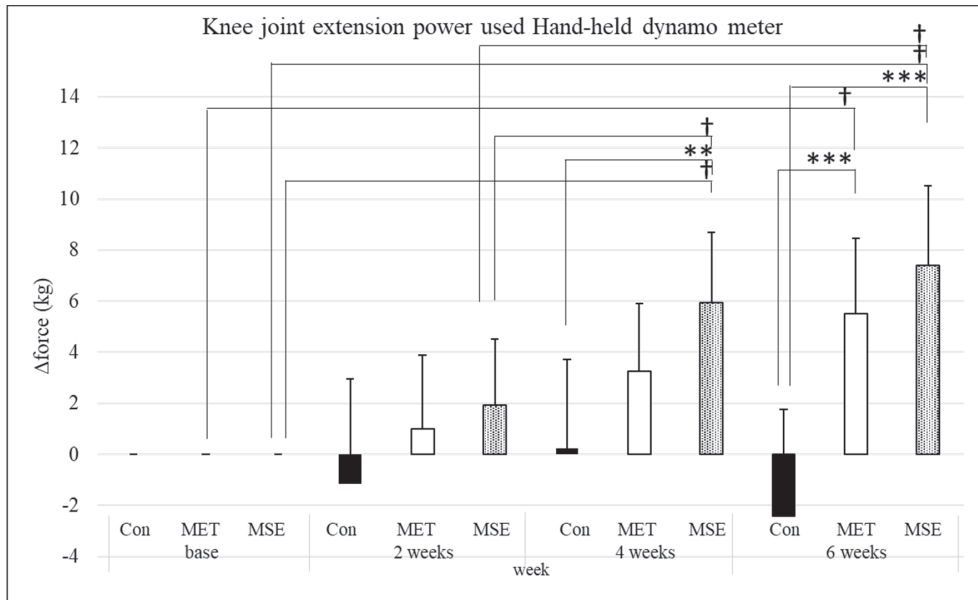


図 3. 実験プロトコル

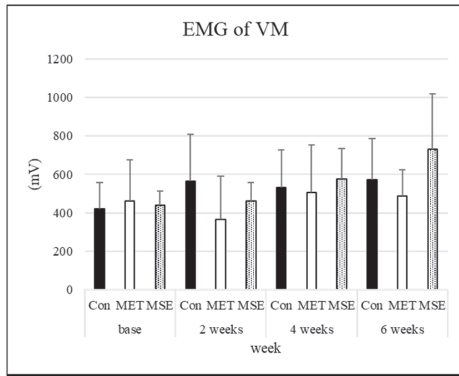
A: 全日を示した実験プロトコル, B: 各群間でのプロトコルを表した.



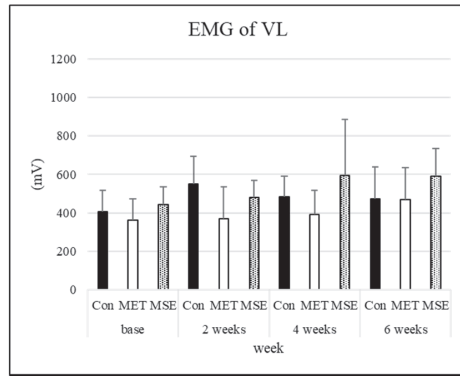
** P<0.01, *** P<0.001 vs control by one-way ANOVA. † P<0.05 vs base and 2 weeks by Bonferroni's method. データは mean ± SD (n=8, n=8, n=8) で表した.

図 4. HHD 測定を用いた膝伸展最大筋力の変化量

A.



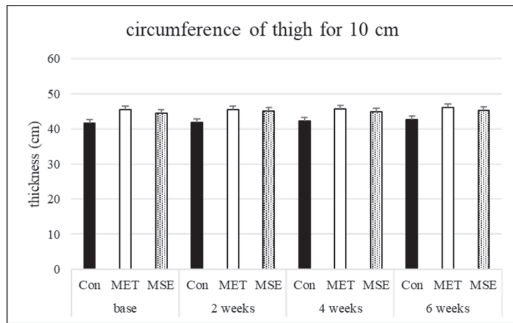
B.



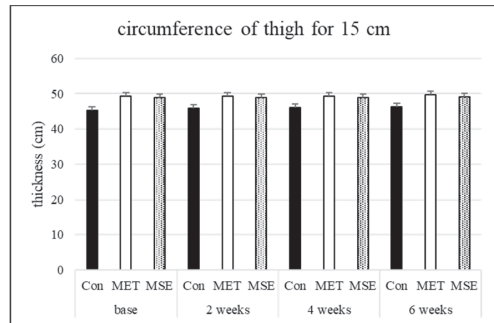
データは mean ± SD (n=8, n=8, n=8) で表した.

図 5. VM および VL における筋放電量測定

A.



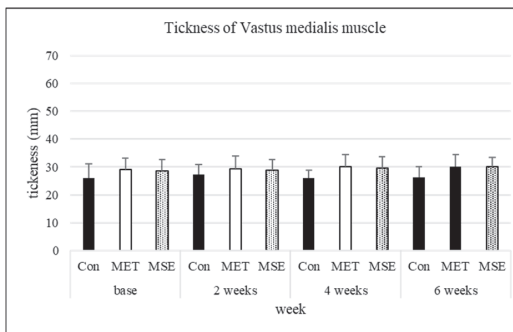
B.



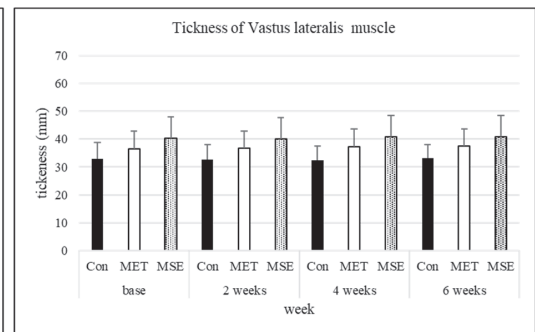
統計学的検定は Bonferroni's method および one-way ANOVA を使用した. データは mean ± SD (n=8, n=8, n=8) で表した.

図 6. 大腿周径 10 cm, 15 cm の結果

A.



B.



統計学的検定は Bonferroni's method および one-way ANOVA を使用した. データは mean ± SD (n=8, n=8, n=8) で表した.

図 7. VM および VL における筋厚測定