

令和 6 年 6 月 5 日現在

機関番号：34441

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K19329

研究課題名（和文）クール・レジスタンス・運動が筋組織内酸素代謝に及ぼす影響と臨床への応用

研究課題名（英文）The effects of cold pack during resistance exercises on intramuscular oxygen metabolism and its clinical application

研究代表者

後藤 昌弘（GOTO, MASAHIRO）

藍野大学・医療保健学部・教授

研究者番号：10449853

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：筋力増大及び筋肥大を目的とするレジスタンス運動でのコールドパック利用が、急性効果として筋組織内低酸素及び電氣的筋活動を、長期効果として筋力増大及び筋肥大を促進するか否か検証した。急性効果については、深部組織温の低下、筋組織内Oxy-Hb/Mbレベルの低下、電氣的筋活動の上昇に作用した。長期効果については有意な筋横断面積の増大が認められた。筋力については8週間レジスタンス運動を行った全対象者の等尺性収縮力と120度/秒等速性収縮力が有意に増加した。これらの結果より、コールドパックを利用したレジスタンス運動は筋横断面積及び筋力増大に有効な方法であることが確認できた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋横断面積及び筋力増大を目的にレジスタンス運動を行う時、筋の直上にコールドパックを利用することで電氣的筋活動が増大し、且つ、筋組織内低酸素が促進した。筋組織内低酸素は筋肥大を促進する主要な代謝刺激の一つであることから、コールドパックの利用はレジスタンス運動の長期効果として生じる筋横断面積増大、筋力増大を促進したと考えられる。ここで得られた知見は健康増進分野だけでなく、筋機能改善やサルコペニア防止とったりハビリテーション分野で活用できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study was to determine the efficacy of using a cold pack during resistance exercises for enhancing muscle strength and muscle hypertrophy. Twenty-four males performed resistance exercises for 8 weeks. Both superficial and deep tissue temperature and the intramuscular oxy-Hb/Mb level during resistance exercise were significantly lower, and the myoelectric activity was significantly higher in cold-pack group (CG) than in regular exercise group (RG). The 8-week resistance exercise intervention increased isometric and 120/second isokinetic contraction force in CG significantly. The muscle cross-sectional area of the triceps brachii muscle increased significantly in CG than in RG. The results of this study suggest that using a cold pack during resistance exercises promotes intramuscular deoxygenation and myoelectric activity, and intramuscular hypoxia, a metabolite produced by resistance exercises, facilitates muscle hypertrophy as a long-term effect.

研究分野：スポーツ健康科学

キーワード：コールドパック 筋力増大 筋肥大 NIRS 筋組織内低酸素

1. 研究開始当初の背景

Goldberg ら¹⁾は、筋収縮力増大を目的とするレジスタンス運動は長期効果として得られる筋横断面積増大を図るには必須であると報告しており、多くの後発研究でも同様の結果が報告されている^{2, 3)}。

レジスタンス運動に伴う急性の代謝ストレスがタンパク質同化を促進し、結果として筋横断面積が増大するという報告がある一方、筋横断面積増大には代謝ストレスの蓄積が重要な鍵となるという報告もある^{4, 5)}。

主動作筋に代謝的ストレスを与えるにはレジスタンス運動により生じる筋組織内低酸素を促進することが一つの方法であり、筋組織内低酸素はレジスタンス運動後の成長ホルモン及びテストステロン分泌量を決定する一つの要因となる⁶⁾。最近、レジスタンス運動中の筋組織内低酸素レベルと、運動の長期効果である筋肥大率の間に正の相関があることが報告された⁷⁾。

運動前の対象筋に寒冷刺激を与えることで速筋線維動員が図られ⁸⁾、電気的筋活動及び等尺性筋収縮力を増大したという報告がある^{9, 10)}。Beelen と Sargeant は、下肢を事前に冷やしてサイクリング運動を行ったところ、運動時の筋組織内 Oxy-Hb/Mb (Oxygenated-Hemoglobin/Myoglobin) 量と血中乳酸濃度が大幅に増加したと報告している。これは運動開始前に対象筋を冷却することにより血管収縮が生じ、これが随意的筋収縮に伴う血管圧迫による血流阻害と重なり、より筋組織内の酸素量が低下した結果であると考えられる¹¹⁾。しかしながら、レジスタンス運動中の筋冷却が筋組織内酸素代謝や電気的筋活動に与える影響についての報告は少なく限られている。

そこで我々は、レジスタンス運動中の主動作筋上にコールドパックをあて冷却することにより、急性効果として皮膚表面温度及び深部組織温の低下、速筋線維動員数増加、筋組織内低酸素レベル及び電気的筋活動が促進され、また、8週間の長期効果として、等尺性収縮力及び筋横断面積増大が得られると仮説を立てた。

2. 研究の目的

この研究の目的は、薄さ 3 mm のコールドパックを主動作筋の直上に貼った状態で行うレジスタンス運動の急性効果として筋組織内低酸素レベル及び電気的筋活動促進、8週間の長期効果として等尺性収縮力及び筋横断面積増大が得られるか否か検証することである。

3. 研究の方法

藍野大学のレジスタンストレーニングサークルに所属し、週に 3 日以上且つ 1 年間以上レジスタンストレーニングを継続している健常男性 24 名を対象とした (Table 1)。少なくとも 1 年以内に病気や怪我でレジスタンス運動を休止した者は除外した。対象者 24 名を Cold pack group (CG) とコールドパックなしの条件でレジスタンス運動を行う Regular exercise group (RG) の 2 群に分けた。対象者に対して、口頭と書面の両方で研究の利点とリスクについて口頭で説明した後、インフォームド Consent 用紙に署名を依頼した。この研究は藍野大学研究倫理委員会の承認を受け (Aino2019-014) 実施した。

対象者はこの研究で行う 4 種類のレジスタンス運動になれるため、事前の準備セッションに参加し、検者の判断により正しいフォームで行えるようになるまで 4 種類の運動を繰り返し実施した。レジスタンス運動開始前、対象者は 10 分間のストレッチをウォームアップとして実施した。ウォームアップの後、対象者はバーベルライイング エルボー エクステンション、ダンベル フレンチ プレス、ダンベル トライセップス キックバック、トライセップス プッシュダウンの 4 種類の上腕三頭筋レジスタンス運動を、8 レップ、4 セット、セット間インターバル 30 秒の条件下で実施した。4 種類の上腕三頭筋レジスタンス運動を Figure 1 に示した。運動強度は、8 回反復できる 8RM (Repetition maximum) とした。

4 種類のレジスタンス運動はバーベル ライイング エルボー エクステンション、ダンベル フレンチ プレス、ダンベル トライセップス キックバック、トライセップス プッシュダウンの順に実施した。対象者は全可動域で運動を実施した。メトロノームを用いて求心性収縮に 1 秒と遠心性収縮に 1 秒の速度で運動を実施した。コールドパックについては、入手しやすく、表面にエタノール ゲルがあるため優れた冷却効果を発揮する冷却パック (50×30 mm、小林ヘルスケア インターナショナル株式会社、大阪、日本) を使用した¹²⁾。コールドパックは使用前に少なくとも 1 日間冷凍庫に保管した。2 つのコールドパックを、深部組織温度計プローブを避け、安静開始から 5 分後に弾性包帯で上腕に固定した。右上腕三頭筋直上の皮膚表面温度と深部組織温度を、安静 5 分後、8 分後、および 4 つの抵抗

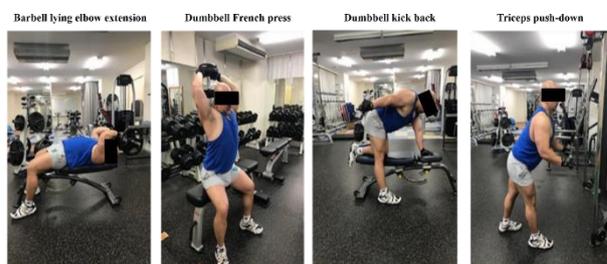


Figure 1. Resistance exercise protocols.

Four kinds of triceps brachii resistance exercises were performed in the following order: barbell lying elbow extension, dumbbell French press, dumbbell triceps kickback, and triceps push-down; 8 repetitions per set and 4 sets, with 30-second intervals between sets.

運動の終了3分後に測定した。皮膚表面温度は、右肩峰と肘頭を結ぶ線上の右上腕三頭筋長頭筋の皮膚にあらかじめ印をつけ、その点から垂直に10cmのところから赤外線温度計を置いて測定した。深部組織温度計(Coretemp CM-210、テルモ株式会社、東京、日本)は、右上腕三頭筋長頭筋上の皮膚に固定した¹³⁾。CGについては、座位安静姿勢開始から5分後に最初の表面皮膚温度と深部温度を測定し、その直後にコールドパックを皮膚上に固定した。2回目の温度は安静から8分後に、3回目の温度はレジスタンス運動終了3分後に測定した。

電氣的筋活動量は表面筋電図(EMG)システム(Myosystem 1200、Noraxon U.S.A. Inc.、スコッツデール、アリゾナ州、米国)を使用して、1,000 Hzのサンプルレートで記録した。双極表面EMG電極(モデル:M-150Ag/AgCl、日本光電株式会社、東京、日本)を使用し、運動中の上腕三頭筋長頭筋からのEMG信号を測定した。表面筋電図法(SENIAM)に基づき1組のEMG電極を筋肉の正中線に沿って、2電極の中心間距離が2.5 cmになるように配置した。市販のソフトウェア(MyoResearch XP、Noraxon U.S.A. Inc.、米国アリゾナ州)を使用して記録した波形を整流、バンドパスフィルタリング処理を行った。最大等尺性収縮(MVC)時の振幅に対する各レジスタンス運動時の%MVC-RMSをグループ間で比較した。

組織酸素計(NIRS:HB14-2、株式会社アステム、神奈川)を用いて安静時およびレジスタンス運動中の上腕三頭筋長頭筋の酸素化ヘモグロビン/ミオグロビン(Oxy-Hb/Mb)を測定した。安静時からレジスタンス運動終了時までの上腕三頭筋長頭筋におけるOxy-Hb/Mb動態の典型例を図2に示した。放射された光の波長は750~850 nmであり、標的組織におけるoxy-Hb/Mbの相対濃度は、Beer-Lambertの法則¹⁴⁾に従って定量化した。放射された光の入射点と検出器の間の距離は30 mmであった。レーザーエミッターと検出器は粘着テープで固定し、NIRS信号はパソコンに保存した。運動中に記録されたNIRS信号は必ずしも筋肉内の酸素化の絶対レベルを反映するとは限らないため、運動中の骨格筋の酸素化の変化は、動脈閉塞法¹⁵⁾に従って測定した値に対する相対値として表した。本研究では、安静時に観察されたoxy-Hb/Mbレベルを100%と定義し、動脈閉塞を行った時の最小oxy-Hb/Mbプラトーレベルを0%と定義した。上腕近位部に圧迫カフを巻き、oxy-Hb/Mbの最小プラトーレベルが得られるまで手動で250 mmHgまで膨らませた¹⁶⁾。抵抗運動中のoxy-Hb/Mbレベルをグループ間で比較し、設定された間隔の回復期における筋肉の酸素化の半回復時間(T1/2再酸素化時間)を測定した¹⁷⁾。T1/2再酸素化時間は、酸素化ヘモグロビン/メトホルミンが枯渇状態から100%レベルまで50%再酸素化するのに要する時間として計算した。T1/2再酸素化時間の計算方法を、図2に示した。

上腕三頭筋の筋横断面積は超音波測定器(Nobulus; Hitachi Medical Inc., Tokyo, Japan)を用いた筋厚と、肩峰と上腕骨外顆を結ぶ線の60%部位で測定した上腕周径の積から求めた¹⁸⁾。全ての測定は同一の検者が実施した。

肘関節伸展の等尺性収縮力及び120°/sec及び200°/secでの等速性収縮力は等速運動測定器(Cybex 770-NORM; Cybex International, MA, U.S.A.)を用いて測定した。等尺性収縮力は肘関節90°で、他の角速度測定については肘関節伸展0°~90°の範囲で測定した。それぞれについて3度測定し、3回のうち最大平均トルク値をデータとして採用した。

すべての統計分析には、SPSS for Windowsバージョン27.0(SPSS Statistics 21.0、IBM、東京、日本)を使用した。2×3[2つの介入(CG vs. RG)×時間]反復測定分散分析(ANOVA)をHuynh-Feldt補正およびBonferroniのペアワイズ比較とともに使用した。筋組織内Oxy-Hb、T1/2再酸素化時間、電氣的筋活動量の差を比較するために、対応のあるt検定を使用した。結果は平均値と標準偏差として示した。有意性の判定には0.05のアルファレベルを使用した。

4. 研究成果

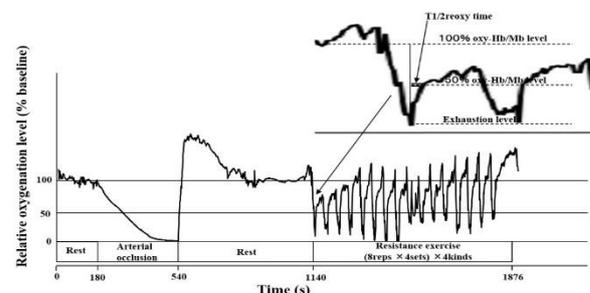


Figure 2. Typical kinetics of oxy-Hb/Mb and method of evaluating T1/2reoxy time.

1) 皮膚表面温度及び深部組織温度

座位での安静開始から5分及び8分、またレジスタンス運動終了後3分時の皮膚表面温度、深部組織温度をTable 2.に示した。レジスタンス運動終了後3分時の深部組織温度についてのみ有意差が認められ、CGがRGより低値を示した($p < 0.001$)。レジスタンス運動時の筋活動によって発生する筋温の上昇がコールドパックの利用によって抑制されたと考えられる。

この結果より、コールドパックを主動作筋直上に貼ることにより、レジスタンス運動に伴って発生する深部組織温上昇を抑制することができることが確認された。

Table 2. Superficial skin and deep tissue temperature at rest and 3-min after resistance exercise. Values are given as means (95% confidence interval) with p-value and Cohen's η effect size for difference between groups. † = statistically significant difference.

	CG (n = 12)	RG (n = 12)	p value	Effect size (η)	
Superficial skin temperature	5-min rest	29.8 (29.4-30.3)	29.9 (29.5-30.3)	0.87	0.001
	8-min rest	29.9 (29.5-30.3)	30.2 (29.8-30.6)	0.29	0.05
	3-min after ex.	30.1 (29.0-31.2)	31.5 (30.4-32.6)	0.07	0.14
Deep tissue temperature	5-min rest	30.4 (29.8-31.0)	30.2 (29.6-30.7)	0.58	0.014
	8-min rest	31.3 (30.7-31.9)	31.0 (30.3-31.6)	0.472	0.024
	3-min after ex.	30.4 (29.5-31.3)	32.8 (31.9-33.7)	<0.001†	0.436

2) 筋組織内 Oxy-Hb/MB 率、運動後 Oxy-Hb/MB 復帰速度、電気的筋活動量

レジスタンス運動中の筋組織内酸素代謝について以下の結果を得た。安静時に対するレジスタンス運動時 Oxy-Hb/MB 率はCGがRGより有意に低値を示した($p < 0.05$)。また、レジスタンス運動終了後 Oxy-Hb/MB が安静時の値に戻る時間はCGがRGより有意に長い時間を要した($p < 0.05$)。レジスタンス運動時の上腕三頭筋電気的筋活動量はCGがRGより有意に高値を示した($p < 0.05$)。

上記結果より、レジスタンス運動時のコールドパック利用はその急性効果として筋活動を促進し、深部組織温度を低下させる。これらが理由となり、筋組織内低酸素が促進され、また、レジスタンス運動終了後の筋組織内低酸素状態が延長することが確認された。

Table 3. Relative oxygenation level, T1/2reoxtime, and muscle activity of the long head of the right triceps brachii muscle during resistance exercise. Values are given as mean (95% confidence interval) with p-value and Cohen's d effect size for between groups. * = statistically significant difference. Oxy-Hb/MB: oxygenated Hemoglobin/ Myoglobin. T1/2reox time: the half-recovery time of oxygenated Hemoglobin/ Myoglobin. MVC-RMS of EMG: Maximum voluntary contraction - root-mean-square of electromyography.

	CG (n = 12)	RG (n = 12)	p value	Effect size (d)
%baseline oxy-Hb/MB (%)	31.3 (29.1-33.4)	38.1 (36.0-40.1)	$p < 0.05^*$	0.89
T1/2reox time (s)	6.1 (5.9-6.2)	5.4 (5.3-5.6)	$p < 0.05^*$	0.92
%MVC-RMS of EMG (%)	72.5 (70.1-74.9)	64.1 (61.4-66.7)	$p < 0.05^*$	0.91

3) 8週間のレジスタンス運動介入による等尺性及び等速性筋収縮力増加

上腕三頭筋を主動作筋とする4種類のレジスタンス運動を8週間継続した結果、CG($p < 0.001$)とRG($p < 0.05$)の等尺性筋収縮力と、CGの120°等速性筋収縮力($p < 0.001$)が有意に増加した。群間では、等尺性筋収縮力についてのみCGがRGより有意に増加した($p < 0.05$)。

両群での等尺性筋収縮力増加については筋横断面積の増大に起因するものだと考えられる。遠心性筋収縮力については、8週間のレジスタンス運動に用いた運動速度が求心性1秒、遠心性1秒であったため、その運動速度より速い200°遠心性筋収縮力が影響を受けなかったことは容易に理解できる。120°等尺性筋収縮力については、コールドパックによる深部組織温度の低下が筋収縮力増加に作用した可能性はあるが、今後更に追究する必要がある。

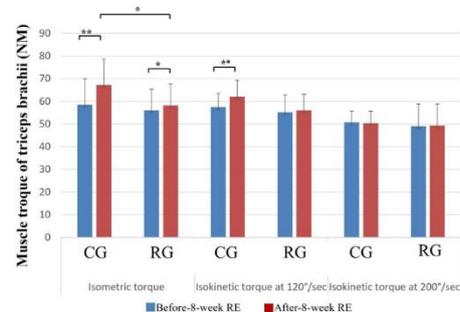


Figure 3. Muscle torque of triceps brachii muscle

4) 8週間のレジスタンス運動介入による筋横断面積増加

上腕三頭筋の筋横断面積は有意にCG, RG共増加し($p < 0.001$)、群間比較では、CGがRGより有意に増加を示した($p < 0.05$)。過去の研究がレジスタンス運動時の筋組織内酸素量が低値を示すほど筋に対する代謝刺激が大きくなり筋肥大を生じやすいことを説いていることより⁷⁾、RGと比較した時のCGの筋組織内低酸素がこの筋横断面積の差に影響したと考えられる。

レジスタンス運動時のコールドパック利用が筋組織温度低下、筋活動量増加に作用し、その結果生じた筋組織内低酸素が筋に対する代謝刺激となり、成長ホルモン、テストステロン、IGF-Iといったホルモン分泌量が増加し、CGで有意な筋肥大が生じたものと考えられる。

この研究により健常若年者を対象とするレジスタンス運動にコールドパックを利用することが、特に凍傷のリスクなく、安全

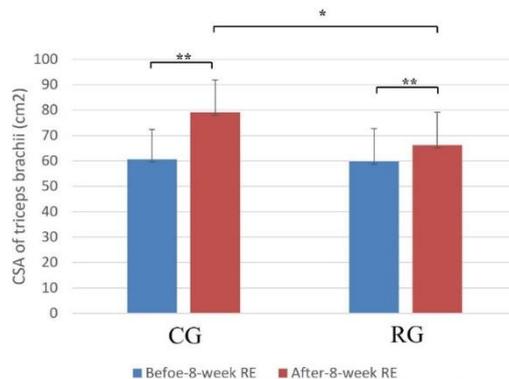


Figure 4. Cross-sectional area of triceps brachii muscle before and after 8-week resisgance exercises

に、効果的に、筋横断面積の増大と等尺性筋収縮力の増大を図れることが確認できた。ここで得られた結果はスポーツや健康増進活動に利用できる。今後は中高齢者を対象に、コールドパックがレジスタンス運動による筋力増大、筋肥大を促進するか否か検証する予定である。

<引用文献>

1. Goldberg AL, Etlinger JD, Goldspink DF, et al.: Mechanism of work-induced hypertrophy of skeletal muscle, *Med Sci Sports*, 7, 1975, 185–198.
2. Spangenburg EE, Le Roith D, Ward CW, et al.: A functional insulin-like growth factor receptor is not necessary for load-induced skeletal muscle hypertrophy, 586, *J Physiol*, 2008, 283–291.
3. Hornberger TA, Chien S: Mechanical stimuli and nutrients regulate rapamycin-sensitive signaling through distinct mechanisms in skeletal muscle, 97, *J Cell Biochem*, 2006, 1207–1216.
4. Tesch PA, Colliander EB, Kaiser P: Muscle metabolism during intense, heavy-resistance exercise, 55, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1986, 362–366.
5. Suga T, Okita K, Morita N, et al.: Intramuscular metabolism during low-intensity resistance exercise with blood flow restriction, 106, *J Appl Physiol*, 2009, 106: 1119–1124.
6. Kraemer WJ, Ratamess NA: Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training, 35, *Sports Med*, 2005, 339–361.
7. Goto M, Maeda C, Hirayama T, et al.: Partial range of motion exercise is effective for facilitating muscle hypertrophy and function via sustained intramuscular hypoxia in young trained men, 33, *J Strength Cond Res*, 2019, 1286–1294.
8. Yona M, Muro M: Effects of the turning points of decreasing skin temperature on the threshold force of motor units during slow ramp contraction, 52, *Jpn J Phys Fit Sports Med*, 2003, 525–532.
9. Winkel J, Jørgensen K: Significance of skin temperature changes in surface electromyography, 63, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1991, 345–348.
10. Vieira A, Oliveira AB, Costa JR, et al.: Cold modalities with different thermodynamic properties have similar effects on muscular performance and activation, 34, *Int J Sports Med*, 2013, 873–880.
11. Beelen A, Sargeant AJ: Effect of lowered muscle temperature on the physiological response to exercise in men, 63, *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 1991, 387–392.
12. Sessler DI, Sessler AM, Hudson S, et al.: Heat loss during surgical skin preparation, 78, *Anesthesiology*, 1993, 1055–1064.
13. Matsukawa T, Kashimoto S, Ozaki M, et al.: Temperatures measured by a deep body thermometer (Coretemp) compared with tissue temperatures measured at various depths using needles placed into the sole of the foot, 13, *Eur J Anaesthesiol*, 1996, 340–345.
14. Chance B, Dait MT, Zhang C, et al.: Recovery from exercise-induced desaturation in the quadriceps muscles of elite competitive rowers, 262, *Am J Physiol*, 1992, C766–C775.
15. Hamaoka T, McCully KK, Quaresima V, et al.: Near-infrared spectroscopy/imaging for monitoring muscle oxygenation and oxidative metabolism in healthy and diseased humans, 12, *J Biomed Opt*, 2007, 062105.
16. Bae SY, Hamaoka T, Katsumura T, et al.: Comparison of muscle oxygen consumption measured by near infrared continuous wave spectroscopy during supramaximal and intermittent pedalling exercise, 21, *Int J Sports Med*, 2000, 168–174.
17. McCully KK, Halber C, Posner JD: Exercise-induced changes in oxygen saturation in the calf muscles of elderly subjects with peripheral vascular disease, 49, *J Gerontol*, 1994, B128–B134.
18. Akagi R et al., Establishing a new index of muscle cross-sectional area and its relationship with isometric muscle strength. *J Strength Cond Res*, 22, 2008, 82-87.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 MASAHRO GOTO	4. 巻 34
2. 論文標題 The use of a cold pack during resistance exercises is effective for reducing intramuscular oxygenation and increasing myoelectric activity	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physical Therapy Science	6. 最初と最後の頁 335-340
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1589/jpts.34.335	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 MASAHIRO GOTO	4. 巻 8
2. 論文標題 Effects of cool resistance exercise on oxygen metabolism in muscle tissue and clinical application	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Impact journal	6. 最初と最後の頁 41-43
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21820/23987073.2021.8.41	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 MASAHIRO GOTO
2. 発表標題 Intramuscular hypoxia and muscle hypertrophy induced by resistance exercises with a cold pack
3. 学会等名 16th Asian Confederation for Physical Therapy Congress 2023（国際学会）
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------