

第27回身体運動科学公開シンポジウム

新時代における

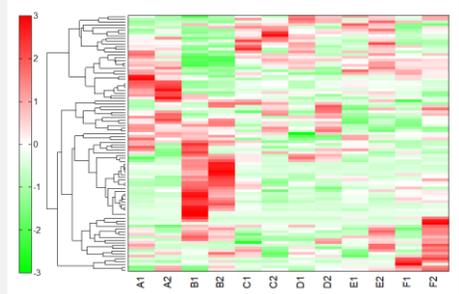
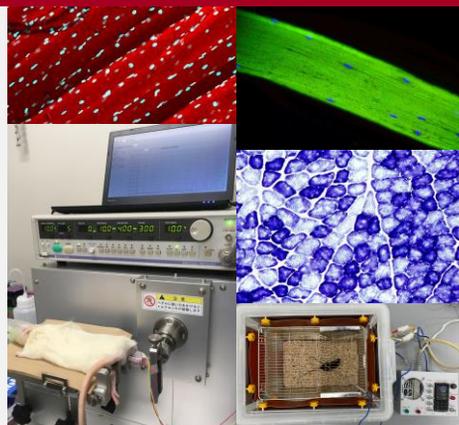
骨格筋とトレーニングの科学

令和元年7月13日（土）

13:00～16:30（ポスターセッション12:00～）

東京大学 駒場キャンパス

21 KOMCEE West レクチャーホール
（京王井の頭線「駒場東大前」下車 徒歩5分）



入場無料

登録不要

プログラム

12:00～ ポスターセッション

13:00～ シンポジウム第1部

基調講演「筋トレーニング研究の未来」

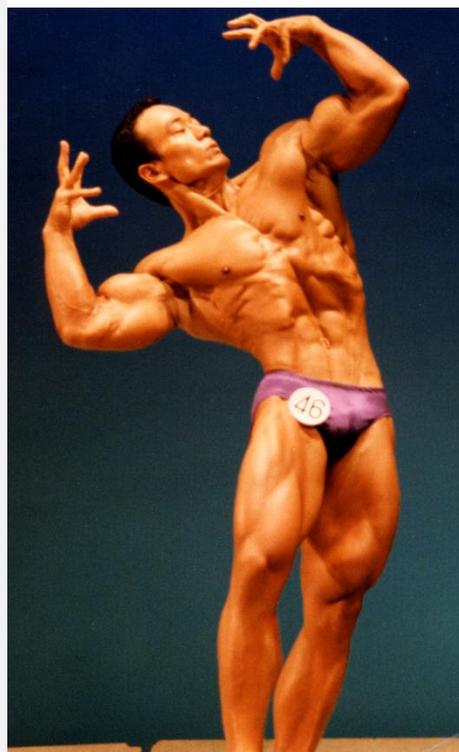
石井 直方（東京大学大学院総合文化研究科/UTSSI 教授/拠点長）

14:10～ ポスターセッション&コーヒーブレイク

14:40～ シンポジウム第2部

健康長寿社会の実現を支える骨格筋の基礎研究

- ・レジスタンス運動のプロトコルと効果の関係性について
小笠原 理紀（名古屋工業大学生命・応用化学専攻 准教授）
- ・筋萎縮の原因とレジスタンス運動を用いた予防について
中里 浩一（日本体育大学保健医療学部 教授）
- ・温熱刺激による骨格筋ミトコンドリアの適応と加齢関連疾患治療への応用可能性
田村 優樹（日本体育大学体育学部 助教）
- ・レジスタンス運動直後における筋疲労度と長期効果の関連
佐々木 一茂（東京大学大学院総合文化研究科/UTSSI 准教授）
- ・総合討論



主催：東京大学 大学院総合文化研究科 身体運動科学研究室
共催：東京大学 スポーツ先端科学研究拠点 (UTSSI)

筋トレーニング研究の未来

石井 直方（東京大学 大学院総合文化研究科/スポーツ先端科学研究拠点）

【はじめに】

筋力の増強や筋サイズの増加を主目的とする筋トレーニング(以後「筋トレ」)は、1980年代までは一部のスポーツ競技やリハビリテーションにのみ有用と考えられていたが、現在では、多くのスポーツ競技の補強のみならず、一般人の健康づくりから高齢者の寝たきり予防に至る広い範囲で重要とみなされるようになってきている。その約30年の間には、主に分子生物学的手法により、筋が健康に及ぼす効果や筋トレによる筋肥大効果のメカニズムの解明も進んできた。ここでは、これまで我々の研究グループで行ってきた研究を中心に、筋トレによる筋肥大効果のメカニズムを概説するとともに、研究成果を社会に還元するために取り組むべき課題について考察する。

【トレーニングによる筋肥大のメカニズム】

我々の研究グループでは、動物の筋トレモデルとヒトを対象としたトレーニング実験の両者を用いて、筋トレによる筋肥大のメカニズムとその応用に関する研究を行ってきた。

筋トレによる筋肥大のメカニズムについては、多くの研究によって、筋線維内のリボソームにおける翻訳過程を調節するシグナル伝達系(mTORC1伝達系)の活性化が中心的役割を果たすことが判明している[1]。一方我々は、mTORC1伝達系の活性化と筋タンパク合成の活性化の程度が必ずしも一致しないこと[2]、リボソーム量の増加(リボソーム生合成)も筋肥大に重要な役割を果たすこと[3]などを示してきた(図)。

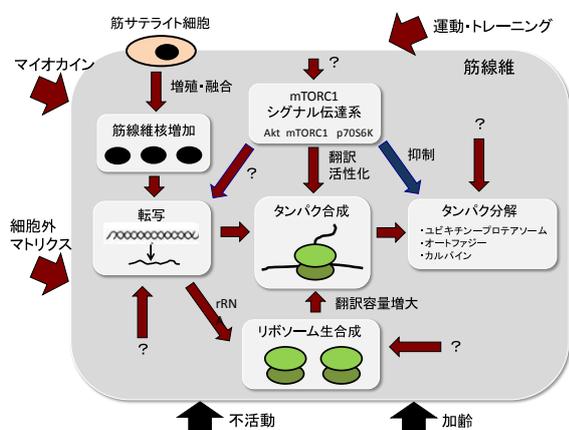


図 骨格筋サイズを調節する因子とトレーニング

また動物モデルを用いた実験からは、mTORC1伝達系の活性化は負荷強度の大きさのみならず、運動速度、筋力発揮時間、力積などに依存することが分かり[4]、ヒトを対象とした研究結果と合わせ「スロートレーニング」という新規トレーニング法の開発と普及につながった[5,6]。これらの研究は、筋トレのプログラムとして、必ずしも負荷強度に依存しない、多様な方略が可能であることを示唆している。

【未来に向けた課題】

以上の研究成果は、環境への適応という生命現象の解明、筋疾患のメカニズムや治療法、新しい筋トレ法やリハビリテーションの開発、筋トレのさらなる普及へとつながることが期待される。そのために、以下のような課題にさらに取り組んで行きたい。

- 筋トレ刺激とシグナル伝達系を結ぶしくみ:実際の筋運動と mTORC1 伝達系・リボソーム生合成を結ぶ過程が十分に解明されていない(図)。
- サルコペニアの予防・改善:加齢に伴う筋萎縮(サルコペニア)は、運動不足による筋萎縮(廃用性萎縮)とは様相が異なり、そのメカニズムの解明と効果的な対処法の開発は、健康長寿社会の実現に向けた喫緊の課題である。
- 筋運動と脳機能:我々は最近、動物モデルを用いて、電気刺激による局所的な筋収縮が、脳海馬における神経栄養因子の発現を増大させることを示した[7]。そのメカニズムを解明することは、認知症予防のための運動プログラムの開発へとつながるものと期待している。

【引用文献】

- [1] Ishii N et al. *J Phys Fitness Sports Med* 1: 83-94, 2012.
- [2] Ogasawara R et al. *J Appl Physiol* 123: 710-716, 2017.
- [3] Kotani T et al. *J Appl Physiol*: in press, 2019.
- [4] Ochi E et al. *J Appl Physiol* 108: 306-313, 2010.
- [5] Tanimoto M. and Ishii N *J Appl Physiol* 100: 1150-1157, 2006.
- [6] Takenami E et al. *J Diabetes Invest* 10: 331-338, 2019.
- [7] Maekawa T et al. *Appl Physiol Nutr Metab* 43: 491-496, 2018.

レジスタンス運動のプロトコルと効果の関係性について

小笠原 理紀 (名古屋工業大学 生命・応用化学専攻)

【はじめに】

大規模な疫学研究によって、骨格筋量・機能の低下は多くの生活習慣病罹患率、死亡率、認知機能低下率を上昇させる独立した因子であるとのエビデンスが蓄積されてきている。運動は、持久性運動のような低強度長時間運動によるエネルギー基質利用能の向上などのマラソンランナーのような適応から、レジスタンス運動のような高強度短時間運動による筋肥大などのボディビルダーのような適応まで、骨格筋においてその負荷強度や刺激時間に応じて幅広い適応を生み出すことができる。したがって、骨格筋がどのようにして運動・筋収縮による様々な刺激を読み取り、刺激に応じた適応を生み出すのか理解することは、運動パフォーマンスの向上のみならず、加齢、がん、糖尿病などによる骨格筋量・機能の低下の予防や治療などに貢献することで我々の健康の維持・増進に大きく貢献すると考えられる。本講演では、運動による筋肥大の概要を紹介するとともに、筋肥大効果を目的とした主要な運動形態であるレジスタンス運動のプロトコルと筋肥大効果の関係性について紹介する。

【レジスタンス運動による筋肥大メカニズム】

骨格筋量は筋タンパク質の合成と分解のバランスによって調節されている。したがって、合成が分解を上回ることによって骨格筋量は増加し、反対に分解が合成を上回ると骨格筋量は減少する。日常生活において、食事摂取後には合成が分解を上回るが、その後の空腹時には分解が合成を上回るといったように、タンパク質代謝は比較的ダイナミックに変動しているが、中長期的には骨格筋タンパク質の出納バランスが保たれているため、骨格筋量は大きくは変化しない。一方、レジスタンス運動は合成と分解の両方を増加させることが知られているが、合成の増加は分解の増加に比べて大きく、長続きし、筋タンパク質の蓄積が生じる。これを適切な頻度で実施することで徐々に筋タンパク質量が増加し、筋肥大が生じる。したがって、レジスタンス運動によっていかに筋タンパク質合成を促進するかが筋肥大効果を得るために重要であると考えられている。

【レジスタンス運動による筋タンパク質合成促進メカニズム】

レジスタンス運動による筋タンパク質合成の促進においてはセリン/スレオニンキナーゼである mechanistic target of rapamycin (mTOR) が重要な役割を果たすことがわかっている[1,2]。mTOR は細胞においてタンパク質複合体として存在することが知られている(少なくとも mTORC1 と mTORC2 の2つの複合体が知られている)。このうち mTORC1 がレジスタンス運動による筋タンパク質合成の促進に重要と考えられてきたが、最近の研究結果は必ずしもその考えを支持していない。現在、mTOR がどのように筋タンパク質合成を促進しているのかは不明な点が多く、また、筋収縮がどのように mTOR を活性化しているのかも不明な点が多い。本講演では mTORC2 や未知の mTOR 複合体の関与の可能性などを含め、最新の知見を紹介する。

【レジスタンス運動のプロトコルと効果の関係性】

レジスタンス運動のプロトコルはバラエティに富むが、主要な変数は強度やセット数(運動量)、トレーニング頻度などであろう。本講演では我々が確立した小動物のレジスタンス運動モデルを用いた成果[3, 4,5]を中心に、これらの変数が mTOR 活性や筋タンパク質合成、筋肥大にどのような影響を及ぼすかを紹介し、効果的なレジスタンス運動のプロトコルについて考察する。

【引用文献】

- [1] Ogasawara R and Suginozawa T. *FASEB J* **32**: 5824-5834, 2018.
- [2] Ogasawara R, Jensen TE, Goodman CA, Hornberger TA. *Exerc Sport Sci Rev* **47**: 188-194, 2019.
- [3] Ogasawara R, Arihara Y, Takegaki J, Nakazato K, Ishii N. *J Appl Physiol* **123**:710-716, 2017
- [4] Takegaki J, Ogasawara R, Tamura Y, Takagi R, Arihara Y, Tsutaki A, Nakazato K, Ishii N. *Physiol Rep* **5**: e13515, 2017
- [5] Ashida Y, Himori K, Tatebayashi D, Yamada R, Ogasawara R, Yamada T. *J Appl Physiol* **124**:341-348, 2018

筋萎縮の原因とレジスタンス運動を用いた予防について

中里 浩一（日本体育大学 保健医療学部）

【骨格筋電気刺激によるレジスタンス運動は多様な筋萎縮予防の福音となりうる】

骨格筋量維持は超高齢社会を迎えた本邦における加齢性筋萎縮の予防のみならず、がんサバイバーのリハビリテーション、悪液質予防、集中治療室入院患者における急速な筋量減少（ICU-acquired weakness）、心臓病罹患者に対する運動療法（心臓リハビリテーション）など様々な臨床現場において重要視されている。この背景には、骨格筋が全身の糖代謝に影響を与えることおよび骨格筋自身が内分泌臓器として多臓器に作用し恒常性に寄与することなどが広く認識されてきたことが挙げられる。

レジスタンス運動は骨格筋萎縮予防に対する有効な対策である。ただし、疾病による不活動を余技なくされている方において運動の実施は難しい。自重運動の実施困難者に対して運動を負荷する方法として、骨格筋電気刺激（EMS）が提唱されている。EMS は、運動を必要とするものの自立歩行もままならない方にとって特に筋タンパク質合成亢進の観点からその効果が示されている。ただし、筋萎縮予防に対するEMS の条件は十分に検討されていない。

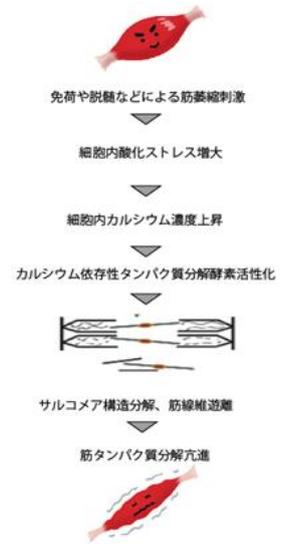
【不活動は細胞内 Ca^{2+} 濃度、骨格筋内サルコリピン発現および全身代謝を亢進させる】

サルコリピン（SLN）は小胞体 Ca^{2+} -ATPase に抑制的に作用して細胞内 Ca^{2+} 濃度を増加させる。我々はごく最近不活動による萎縮骨格筋内にて細胞内 Ca^{2+} 濃度上昇とともにサルコリピン（SLN）が顕著に増加していることを見出した[1]。SLN は非ふるえ熱産生に関与することも知られており、我々は不活動が全身熱産生を亢進することも見出した。がん悪液質においては骨格筋萎縮のみならず体脂肪の著しい減少も観察されており、骨格筋でのSLN増加は全身の異化作用を促進させる可能性がある。以上から萎縮筋において細胞内 Ca^{2+} 濃度恒常性が破綻することとSLN の骨格筋萎縮にとどまらない全身恒常性への関与が示唆された。

【酸化ストレス発生および細胞内 Ca^{2+} 増加が筋萎縮における鍵反応である】

一般に免荷や脱髄などの不活動による筋萎縮の

作用機序として酸化ストレス物質（ROS）増大、細胞内 Ca^{2+} 濃度上昇により惹起される筋タンパク質分解が挙げられている（右図）。萎縮筋でのSLN増加はこれらの反応に関与・助長している可能性がある。



EMS は萎縮筋における筋タンパク質分解のカウンターメジャーとしてタンパク質合成亢進に一定の効果をもつとされる。しかし、ここにあげたROS増大、細胞内 Ca^{2+} 濃度上昇抑制を目的としたEMSの処方についてはこれまで検討されてこなかった。

【単収縮負荷がミトコンドリア機能改善により不活動時の筋萎縮を抑制する可能性がある】

ミトコンドリアはROSの産生および細胞内 Ca^{2+} 濃度の調節に関与する。近年免荷による骨格筋萎縮初期ではミトコンドリア由来タンパク質分解が主であると報告された。すなわちミトコンドリアの量的・質的変化がROS増加および細胞内 Ca^{2+} 増加の要因である可能性がある。

EMSは低周波数により単収縮、高周波数により強収縮がそれぞれ誘発される。従来のEMSを用いたレジスタンス運動は、強収縮を慢性負荷することで筋タンパク質合成亢進を期待するものであった。我々は慢性的な強収縮負荷後の骨格筋におけるミトコンドリア量および呼吸機能を検討したところ、負荷前後で変化は見られなかった。一方、単収縮の慢性負荷を課した場合、ミトコンドリア量の増加および呼吸鎖複合体の呼吸機能亢進を見出した。

萎縮筋に対する適用は今後の課題となるが、単収縮を用いた低周波EMSはミトコンドリア量および呼吸機能改善を介した骨格筋萎縮予防効果が期待できる。

【引用文献】

[1] Tomiya et al, *Am J Physiol*, in revision

温熱刺激による骨格筋ミトコンドリアの適応と加齢関連疾患治療への応用可能性

田村 優樹(日本体育大学 体育学部)

【温熱療法のエビデンス】

温熱療法は古典的な物理療法として整形外科で広く利用されている。また、医師の指導に基づく温泉療法は医療費控除の対象となることが厚生労働省により定められている。しかし、これらの温熱療法の効果を裏付ける生物医学的根拠は十分に得られていない。このような状況は、温熱療法の適応可能範囲の見誤りや新しい適応症の見逃しなどの諸問題が生じさせる恐れがある。

【温熱刺激による骨格筋ミトコンドリアの適応と機序】

ミトコンドリアは、細胞内のエネルギー産生や恒常性維持を担う細胞小器官である。骨格筋においてミトコンドリアの量・機能の上昇は、持久的運動能力の向上に貢献する。一方で、骨格筋ミトコンドリアの量・機能の低下は骨格筋萎縮の原因のひとつとなることが明らかにされている。したがって、骨格筋のミトコンドリアの量・機能を保持・向上させることは、健康的な生活をおくる上で重要な観点となる。

我々は、温熱刺激が骨格筋のミトコンドリアの量を上昇させることを明らかにした[1]。また、ミトコンドリア量の増加だけではなく、ミトコンドリアの機能が向上することを見出した(例:電子伝達系の酵素活性の上昇、酸素消費速度の上昇、酸素消費に伴う活性酸素種の産生が抑制)。ミトコンドリア生合成ならびに酸化系エネルギー代謝は、転写共役因子 PGC-1 α によって強力に制御される。そこで、温熱刺激によるミトコンドリアの適応に PGC-1 α が関与するか否かを検討した。一過性の温熱刺激により PGC-1 α が核内へ移行すること(≒活性化)、いくつかの PGC-1 α アイソフォームの遺伝子発現が上昇することが明らかとなった[2]。さらに、PGC-1 α の発現抑制は、温熱刺激によるミトコンドリアの量・機能の適応を減弱または消失させた。これらの知見から、温熱刺激によるミトコンドリア適応のメカニズムとして、少なくとも部分的には PGC-1 α の経路が関与すると考えられる。

温熱刺激は、廃用性筋萎縮を部分的に抑制することが明らかとなっているが、その詳細なメカニズムは明らかではない。上述の通り、骨格筋ミトコンドリアの減少・機能不全は、骨格筋萎縮の原因のひとつとなる。そこで、温熱刺激による骨格筋ミトコンドリアの

量・機能の向上が潜在的なメカニズムとなる可能性を検討した。予想通り、温熱刺激は実験的な筋不活動によるミトコンドリアの減少と骨格筋萎縮を部分的に抑制することが明らかとなった[3]。興味深いことに、その分子メカニズムとして PGC-1 α の経路の可能性は支持されなかった。一方で、不活動によるミトコンドリアの分解機構の活性化が、温熱刺激により抑制されることが明らかとなった。温熱刺激による適応の機序は生体内環境に依存する可能性が示唆された。

【老齢モデルへの温熱刺激の介入と課題】

近年では、加齢に伴う骨格筋のミトコンドリアの機能不全は、サルコペニアや他臓器の加齢関連疾患の原因となりうることを示唆されつつある。そこで、温熱刺激によって骨格筋ミトコンドリアの量・機能を回復させることができれば、サルコペニアや加齢関連疾患の発症リスクの低下に寄与できる可能性が期待できる。しかし、老齢マウスに温熱刺激を与えても骨格筋ミトコンドリアの適応性は、若齢マウスと比較して低値を示した[4]。温熱刺激による骨格筋ミトコンドリアの適応に関わる細胞内の情報伝達が老齢により負に修飾された可能性が示唆される。

我々は、老齢によるミトコンドリア適応性の減弱のメカニズムの解明と薬剤・栄養素材による克服を目指して現在研究を進めている。特に「熱応答性の転写因子 HSF1 を中心とした遺伝子発現調節機構の加齢変化」と「加齢による代謝機構の変調・付随する代謝産物の変化」のクロストークを潜在的なメカニズム候補として着目している。本講演では、我々が現在得ている最新の知見の一部を紹介したい。

【引用文献】

- [1] Tamura Y et al. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol* **307**: R931-R943, 2014.
- [2] Tamura Y and Hatta H. *J Phys Fitness Sports Med* **6**: 151-158, 2017.
- [3] Tamura Y et al. *J Physiol* **593**: 2707-2720, 2015.
- [4] Tamura Y et al. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci* **72**: 299-308, 2017.

レジスタンス運動直後における筋疲労度と長期効果の関連

佐々木 一茂(東京大学 大学院総合文化研究科/スポーツ先端科学研究拠点)

【はじめに】

近年の研究により、低負荷(最大挙上重量 1RM の 30~50%)を用いたレジスタンス運動であっても、動作をゆっくりとする、反復回数を増やすなどの工夫をすることで、高負荷(1RM の 80% 前後)を用いた運動と同等の長期効果(トレーニングとして継続した場合の筋力増強・筋肥大効果)をもたらすことが示されている[1,2]。このメカニズムに関して、Burd ら[3,4]は一回のレジスタンス運動実施後の筋タンパク質合成速度を負荷・反復回数・動作速度の異なる条件間で比較し、その結果について「低負荷を用いた場合でも、筋が疲労するまで運動を続けることで最終的にほぼ全ての筋線維(筋肥大効果の高い速筋線維を含む)が動員され、そのことにより高負荷運動と同程度に筋タンパク質合成が刺激される」と考察している。このことから、レジスタンス運動の直後における筋疲労の程度は、その運動でどれだけ筋タンパク質合成が刺激されたかを表す指標として、長期効果の予測にもつながる有用な情報を含んでいる可能性がある。

【レジスタンス運動直後の筋疲労を測る】

筋疲労は運動生理学的に「運動により引き起こされる筋力(あるいはパワー)発揮能力の低下」と定義される[5]。通常は運動の前後に随意最大筋力を測定してその低下率を筋疲労度とするが、電気刺激による誘発筋力(単収縮力など)の低下も同時に測定することで末梢性疲労(筋自体の疲労)と中枢性疲労とを区別した詳細な評価が可能となる。また、近年 Froyd ら[6]は高強度運動終了後数分において筋疲労の急速な回復が起こることを実験的に示し、これまでの多くの研究が筋疲労(特に末梢性疲労)を過小評価していると指摘した。そこで我々は、運動後直ちに筋疲労を評価するために、膝伸展筋力計に運動器具としての機能をもたせた独自の系を構築し、これを用いて数種類の運動プログラム実施前後における随意最大筋力・誘発筋力の低下とその回復過程を詳細に比較した。

【筋疲労度と長期効果は関連するか?】

図に示すように、低負荷低速度(いわゆるスロートレーニング法)の運動条件では、伝統的な高負荷運

動条件と同程度の筋疲労が認められた。一方で、同じ低負荷でも動作速度と反復回数を高負荷運動条件と同一にした場合の筋疲労はわずかであり、限界まで反復した場合には高負荷運動条件を上回る筋疲労が認められた。これらの結果は、低負荷レジスタンス運動が筋力増強・筋肥大をもたらさないとする従来の説と、工夫次第で高負荷運動と同等の効果をもたらすという近年の研究結果[1,2]を矛盾なく説明できるものである。そこで我々は筋疲労度と長期効果の関連について検討すべく、約 150 編の英語原著論文からレジスタンス運動のプロトコル(負荷、回数、頻度、期間など)および長期効果のデータベースを作成し、そこから典型例として抽出した数種類のレジスタンス運動プロトコルについて筋疲労度を実験的に測定した。その結果、筋疲労度と長期効果(上述のデータベースより筋力増強・筋肥大の効果量を算出)との間にいくつかの関連を見出すことができたので本講演で紹介したい。

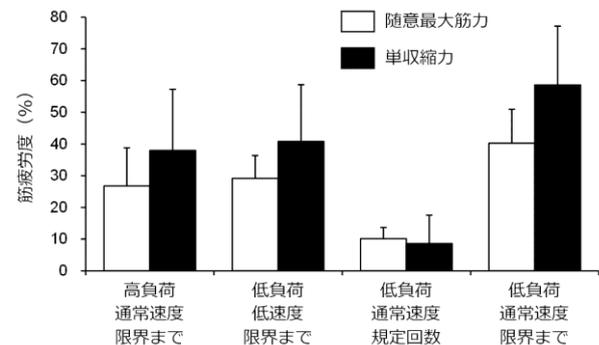


図 レジスタンス運動直後における筋疲労度

平均±標準偏差(n=8)。各条件とも3セットの運動を実施し、各セット終了直後における測定値の平均から疲労度(初期値を基準とした低下率)を求めた。

【引用文献】

- [1] Tanimoto M and Ishii N. *J Appl Physiol* **100**: 1150-1157, 2006.
- [2] Mitchell CJ et al. *J Appl Physiol* **113**: 71-77, 2012.
- [3] Burd NA et al. *PLoS One* **5**: e12033, 2010.
- [4] Burd NA et al. *J Physiol* **590**: 351-362, 2012.
- [5] Gandevia SC. *Physiol Rev* **81**: 1725-1789, 2001.
- [6] Froyd C et al. *J Physiol* **591**: 1339-1346, 2013.

繰り返しのレジスタンス運動が筋タンパク質合成に及ぼす影響 —mTORC1 活性とリボソーム量の変化に着目して—

小谷鷹哉^{1,2}、加藤光¹、中里浩一²、石井直方¹

¹東京大学大学院総合文化研究科、²日本体育大学

繰り返しのレジスタンス運動 (RET) による骨格筋肥大には、タンパク質の翻訳過程 (翻訳効率×翻訳容量) の活性化による筋タンパク質合成 (MPS) の上昇が重要になる。翻訳効率は主に mammalian target of rapamycin complex 1 (mTORC1) の活性化により決定され、翻訳容量はリボソームの量により決定される。RET 日数の増加により mTORC1 の活性とリボソーム量は変化するが、これらの変化が MPS に及ぼす影響は不明である。本研究ではラットの腓腹筋を経皮的電気刺激により収縮させる RET モデルを用いて、RET による mTORC1 とリボソーム量の変化が MPS に及ぼす影響を検討した。群分けは RET を行わない SED 群、RET を 1 日行う 1B 群、1 日おきに 3 日行う 3B とし、最後の RET から 6 時間後の腓腹筋を解析した。その結果、mTORC1 活性の指標となる p70S6K は RET により活性化したが、3B は 1B と比較して活性化の程度が有意に減弱した。一方で、リボソーム量は 3B が SED および 1B と比較して有意に増加した。次に SUnSET 法により MPS を検討した結果、RET により MPS は有意に上昇したが、1B と 3B の間に差は見られなかった。これらの結果より、RET 日数の増加により MPS の上昇の程度は変化しないが、RET 毎に翻訳効率を顕著に上昇させるのではなく、翻訳容量を高めることで MPS を高めるといったようなシフトが起こると考えられる。

ラットレジスタンスエクササイズモデルにおいて1レップあたりの収縮時間の違いが筋タンパク質同化応答に及ぼす影響

加藤光¹、小谷鷹哉^{1,2}、田村優樹²、鴻崎香里奈²、中里浩一²、石井直方¹

¹東京大学大学院総合文化研究科、²日本体育大学

【背景】レジスタンストレーニングは競技力向上・サルコペニア予防に対し有効である。レジスタンストレーニングにおける筋タンパク質同化応答を最大化する 1 レップあたりの筋収縮時間は不明である。またラットレジスタンスエクササイズモデルにおいては、力積が筋タンパク質同化応答を左右することが知られている。【目的】力積が揃っている条件下で、1 レップあたりの収縮時間が異なるレジスタンスエクササイズの筋タンパク質同化応答を調べる。【方法】Sprague-Dawley ラット (雄性・10 週齢) の右脚腓腹筋に経皮電気刺激により等尺性最大収縮 (セット当たり 10 レップ) を惹起させた。1 レップの収縮時間が 3 秒の群 (3s 群) と 9 秒の群 (9s 群) を設けた。各群のセット数を 3s 群は 5 セット、9s 群は 3 セットとすることで、群間での力積を揃えた。筋タンパク質同化応答の評価として SUnSET 法を、また mTOR シグナル活性の評価としてウェスタンブロッティング法を用いた。【結果】レジスタンスエクササイズ 3 時間経過後において、筋タンパク質合成量・mTOR シグナル活性ともに 9s 群より 3s 群の方が高くなった。レップ進行に伴う発揮トルクの減少量は 3s 群より 9s 群の方が高くなった。【結論】力積を揃えた条件下において、1 レップあたりの収縮時間を極度に長くすることで、発揮筋力の低下により一過性の筋タンパク質同化応答が低下することが示唆された。

触覚および視覚情報が自重スクワット動作の左右対称性および安定性に及ぼす効果

田丸博朗^{1,2}、福崎千穂²、石井直方^{1,2}

¹ 東京大学大学院総合文化研究科、² 東京大学大学院新領域創成科学研究科

【目的】 自重を用いたスクワット運動(SQ)中に触覚および視覚情報を付与することで、動作の左右対称性や安定性が変化するかどうかについて検討することを目的とした。【方法】 健康な成人 11 名(男性 8 名/女性 3 名)が、「触覚情報あり/なし」(T/NT) × 「視覚情報あり/なし」(V/NV) × 「通常速度/低速度」(通常/スロー)の 8 つの条件で SQ を行った。なお、T 条件は被験者が前に置かれたラックに両手で軽く触れている状態とし、NT 条件は何も触れていない状態とした。また、V 条件は被験者が目の前に置かれた鏡を見ている状態とし、NV 条件は鏡を撤去して壁を見ている状態とした。SQ 中の右脚と左脚それぞれの床反力と身体に貼り付けたマーカーの座標から、右脚と左脚の関節トルクと身体の重心動揺を求めた。条件間の比較は下降局面と上昇局面に分けて行った。【結果と考察】 通常 SQ では、触覚情報を付与することによって膝関節トルクの左右差と重心動揺の外周面積のどちらも減少することが示されたが、視覚情報の付与により重心動揺の外周面積が増大するという好ましくない変化が観察された。一方、スローSQ では、触覚情報および視覚情報を付与することによって、重心動揺の外周面積が減少することが示された。

Muscle Strength and Bone Strength Assessed with Osteo-sono Assessment Index Among Recreationally Athletic Japanese Women

Takahisa Ohta^{1,2}, Junzo Nagashima¹, Haruhito Aoki¹, Takeshi Yoshihisa¹, Yasunori Imagawa¹, Nobuyoshi Ono¹, Wataru Fukuda¹, Reo Konagi¹, Susumu S. Sawada³, Hiroyuki Sasai², Naokata Ishii²

¹Yokohama Sports Medical Center, ²The University of Tokyo, ³Waseda University

Low muscle strength is an independent risk factor for low bone strength, which is a well-established predictor of osteoporotic fracture. However, the association between muscle strength and bone strength remains unclear among recreationally athletic Asian women. PURPOSE: To investigate the association between muscle strength and bone strength among recreationally athletic Japanese women. METHODS: Cross-sectional data from 7,091 Japanese women who had undergone medical checkup, which including bone strength at right calcaneal with quantitative ultrasound (QUS), which showed osteo-sono assessment index (OSI), and a maximal voluntary knee extension test with an isokinetic dynamometer (Nm/kg) during 1998-2016. RESULTS: Muscle strength had a positive association with OSI($\times 10^6$) score after adjustment for after adjustment for age, systolic blood pressure, smoking, drinking, prevalence of diabetes, and body mass index (B=0.17, 95% confidence interval; 0.15–0.19, p <0.001) Furthermore, age-stratified analysis (< or ≥ 50 yrs) showed similar patterns of association. CONCLUSION: Our results, including age-stratified analysis, suggest a dose-response association between muscle strength and bone strength after adjustment for potential confounding factors.

乳酸摂取が骨格筋ミトコンドリアに与える影響

高橋謙也¹、北岡祐²、山本健¹、八田秀雄¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科、² 神奈川大学人間科学部

【背景・目的】乳酸はミトコンドリアを増加させる因子である可能性が報告されている。そこで本研究では、乳酸摂取が骨格筋ミトコンドリアに与える影響について検討した。

【方法】8週齢の雄性ICRマウスを対照群、乳酸群、トレーニング群、乳酸+トレーニング群の4群に分類した。生理食塩水または乳酸ナトリウム(5 mg/g BW)を経口投与し、投与の30分後にトレッドミルを用いた走運動(20 m/min, 30 min)を週5回行った。4週間のトレーニング期間終了後、組織を摘出し分析を行った。また、一過性の乳酸投与がミトコンドリアの適応に関与する細胞内シグナル経路に与える影響について検討した。【結果】実験終了時の体重および筋湿重量、実験期間中のエネルギー摂取量に有意な差は認められなかった。ヒラメ筋および足底筋におけるクエン酸合成酵素およびシトクロムC酸化酵素(COX)の最大活性において、トレーニングの正の主効果が認められた($p < 0.01$)。また、ヒラメ筋および心筋のCOX最大活性において、乳酸投与の正の主効果が認められた($p < 0.05$)。しかしながら、一過性の乳酸投与は細胞内シグナル伝達経路に影響を与えなかった。【結論】乳酸摂取は、酸化的な筋組織においてミトコンドリアの適応を引き起こす可能性が示唆された。

運動後の筋グリコーゲン回復のための最適な牛乳の組成の検討

深澤歩¹、横田悠天¹、木村典代²、寺田新¹

¹ 東京大学大学院総合文化研究科、² 高崎健康福祉大学健康福祉学部健康栄養学科

我々はこれまでに、運動後のマウスに対して糖質溶液を単独で摂取させた場合と比べて、糖質と牛乳の混合溶液を摂取させた場合に、高い筋グリコーゲン回復効果が得られることを報告している。本研究では、このような筋グリコーゲン回復効果において、牛乳中の乳脂肪分が重要な役割を果たしているという仮説の下、糖質と同時に摂取する牛乳中の乳脂肪分の濃度が、運動後の筋グリコーゲン回復に及ぼす影響について検討を行った。その結果、運動後のマウスに対して、糖質溶液、糖質+無脂肪牛乳、糖質+有脂肪牛乳の混合溶液のいずれかを摂取させた場合、糖質溶液と比較して、糖質+有脂肪牛乳を摂取させた場合にのみ有意に高い筋グリコーゲン回復効果を得ることができた。このことから、糖質と牛乳の混合溶液の摂取による運動後の筋グリコーゲン回復促進効果には、牛乳中の乳脂肪分の存在が重要な役割を果たしている可能性が示唆された。

Unique excitation of the ipsilateral motor pathway in an elite high jumper with below-knee amputation

Tomoya Nakanishi^{1,2}, Atsushi Sasaki^{1,2}, Kento Nakagawa³, Kimitaka Nakazawa¹

¹Graduate School of Arts and Science, The University of Tokyo;

²Japan Society for the Promotion of Science; ³Faculty of Sport Sciences, Waseda University

In this study, we focused on an elite Paralympic high jumper with below-knee amputation who holds the Asia record of high jump. His brain might be reorganized to manipulate his prosthesis skillfully. The objective of this study was to clarify whether the elite high jumper shows bilateral activation using fMRI. Moreover, motor evoked potential (MEP) was measured to test if the excitability of ipsilateral cortico-spinal pathway would be specifically enhanced in the stump muscle by using transcranial magnetic stimulation (TMS). In the results, The world class high jump athlete with below-knee amputation showed existence of both the ipsilateral and contralateral motor pathways innervating the stump muscle which directly controls his prosthesis. This result is likely due to the long-term motor practice to develop enough control skills for manipulating prosthesis for his superior high jump. We confirmed this phenomenon using both MRI and TMS for a top athlete with amputation. This specific brain reorganization would support his superior sport performance.

小脳梗塞に伴う歩行失調機序の解明のためのシナジー解析

酒井隆太郎¹、船戸徹郎²、鴻巣暁¹、藤木総一郎³、浅香明子¹、青井伸也⁴、柳原大¹

¹東京大学大学院総合文化研究科、²電気通信大学大学院情報理工学研究科、

³獨協医科大学医学部、⁴京都大学大学院工学研究科

ヒトや動物の筋骨格系は四肢の運動に対して非常に大きな運動自由度を有する。この運動の冗長性の問題を扱うために、ヒトや動物は協調的な運動パターンを利用することで冗長性を減少させていると考えられてきた。中枢神経系の障害は協調運動の構造を変化させることが知られており、特に小脳の病変は二足歩行運動を不安定にする。しかし、協調運動の制御と学習に対する小脳の役割は未だ明らかではない。小脳の局所領域と歩行中の協調運動の関係にアプローチするために、我々は後肢による二足歩行を Wistar ラットに学習させ歩行中の関節運動を計測できる実験系を構築し、小脳中間部の脳梗塞前後の後肢運動の協調パターンを運動学的に解析した。その結果、(1) 片側の小脳中間部の梗塞は主として後肢歩行中の関節運動の時間的な協調要素に影響を及ぼし、また(2) 協調運動は短期間の内に回復する傾向が見られる、ということが確認された。

Interrelationship between joint movements to maintain precision of performance in baseball throwing

Arata Kimura, Leon Omura, Shinsuke Yoshioka, Senshi Fukushima
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

We aimed to examine which interrelationships between joint movements are important to maintain the precision of performance during baseball throwing. The participants threw a ball to a target in the sitting throws and these throwing motions were recorded by the motion capture system. Variabilities of the vertical hand velocity in the case each kinematic parameter was made independent from the other kinematic parameters were calculated by using computer simulation. In some participants, the variability of the vertical hand velocity was higher than that obtained in the experiment when the shoulder internal/external rotation angle or shoulder horizontal flexion/extension velocity was made independent. This result indicates that the precision of the vertical hand velocity decreases when the other kinematic parameters do not covary appropriately with these two kinematic parameters. Therefore, interrelationships of the other kinematic parameters that counterbalance the variability of vertical hand velocity derived from these two kinematic parameters are important to maintain the precision of the vertical hand velocity. Concerning other participants, the shoulder internal/external rotation angle and elbow flexion/extension velocity were the kinematic parameters that should be counterbalanced to maintain the precision of the vertical hand velocity.

筋の力-速度関係のパラメータが歩行中の下肢の筋活動レベルに及ぼす影響

飯野要一、吉岡伸輔、深代千之
東京大学大学院総合文化研究科

本研究の目的は、下肢の各筋群の力-速度関係における最大等尺性筋力と最大短縮速度が、歩行中の下肢の筋活動レベルに及ぼす影響を明らかにすることであった。被験者は、健常な若年成人男性4名であった。被験者の課題は、自然な速度で直線歩行することであった。モーションキャプチャーシステムを用いてマーカ3次元座標を収集し、床反力データを収集した。OpenSimとLai et al. (2017)の筋骨格モデルを用いて分析を行った。このモデルの下肢の各筋群の最大等尺性筋力を±50%、最大短縮速度を $4L_0s^{-1}$ と $14L_0s^{-1}$ に(L_0 は筋の至適長)変化させた場合にStatic Optimization Toolを用いて推定される下肢の筋活動レベルがどのように変化するかを調べた。歩行中の下肢筋の活動レベルは、足関節屈筋だけでなく股関節外転筋や股関節内旋筋の最大筋力を減少させた場合に同程度に大きく増加することが示唆された。なお、この内容は、第25回日本バイオメカニクス学会大会で発表されたものである。

逆上がりの上肢関節トルクを規定する要因

鴻巣暁、吉岡伸輔、深代千之
東京大学大学院総合文化研究科

【背景と目的】逆上りの達成には上肢関節周りの大きな筋力（上肢関節トルク）の発揮が必要であると考えられ、助走および踏切により獲得される離地瞬間の身体の鉛直速度や角運動量はこの必要筋力を低下させていると考えられる。本研究では、逆上りの達成に必要な上肢関節トルクを規定する要因を明らかにすることを目的とした。【方法】①遊脚期（両脚離地から腹部と鉄棒の接触まで）における身体重心の鉛直運動をモデル化することで、鉛直鉄棒反力 F 、身体重心の鉛直移動距離 h 、離地瞬間の重心の鉛直速度 v 、および遊脚期の時間 T の関係を定式化した。②健常成人男性 10 名に 5 段階の高さ条件（身長比 65、75、85、95、105%）で逆上がりを行わせ、モーションキャプチャおよび鉄棒反力の測定により上記のパラメータを算出した。③4 セグメントの身体モデルを用いた最適化シミュレーションにより、最小の上肢関節ピークトルクで逆上りを達成する動作パターンを探索した。【結果】方法①より、 $vT=2h$ が満たされるときに鉄棒反力 F が最も効率的に低下することが示唆された。方法②の結果、身長比 75% 以上の全ての鉄棒高条件においてこの関係式に近い鉛直速度 v および時間 T の組み合わせが選択されていた。方法③より、肩関節伸展ピークトルクと離地の全身の運動エネルギーの間の相補性が観察された。

Complimentary motor planning between onset timing and movement velocity in reaching toward a moving target

Ryoji Onagawa, Kazutoshi Kudo
Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo

How to deal with redundant degrees of freedom is one of the fundamental questions in motor control. Previous studies about ball throwing to a static target has revealed that humans reduce the variability by complementarily coordinating release parameters (position, velocity, and direction). In this study, we investigated the relationship among movement onset timing and movement execution parameters such as movement velocity or direction by introducing the extra redundancy using reaching task towards a moving target. Fourteen participants were required to pass the cursor through the circular moving target within the range of 60° to 120° . The target moved with constant velocity around the starting position of the cursor, allowing participants to plan when to start and in which direction and velocity they move by themselves. The results showed that there was significant positive correlation between onset timing and movement velocity and no significant correlation between onset timing and movement direction. These results suggest that, when humans are required to pass through the moving target, they control complementarily only limited variables in initial phase of learning, rather than modulate all variables. Additionally, the effective correlation indicates that the spatiotemporal coordination to minimize the effects of sensorimotor noise on the outcome is formed when planning the movement beforehand.

時間制約に応じた速度—正確性トレードオフの調節におけるリスク回避行動

女川亮司、進矢正宏、太田啓示、工藤和俊
東京大学大学院総合文化研究科

多くのスポーツにおいて、厳しい時間制約の中で、複数の行動選択肢から一つの行動を選び実行することが求められる。そのような状況では、速度と正確性の相反性を考慮に入れる必要がある。本研究では、この要素を抽出した心理物理実験課題を作成し、価値の減少を引き起こす要素の違いが応答方略選択に与える影響を検討した。12名の参加者が、2つの選択肢から片方の選択肢を選択する課題を行った。2つの選択肢は各々100・200点の初期価値を持ち、その価値が時間経過につれて線形に減少し、同時刻 τ で0点になる。 τ を500 msから1500 msの間で、試行間で変化させた。価値の減少を引き起こす条件として、利得減少条件（得点が減少する）、確率減少条件（初期価値を得られる確率が減少する）の2条件を設定した。利得と確率は選択肢の価値を決める主要因である。報酬期待値の観点においては、条件間で同等であるものの、結果の変動性の観点から見ると、条件間で異なる性質を持つ。選択された応答方略を条件間で比較した結果、利得減少条件に比べ、確率減少条件において、有意に短い反応時間が確認された。この結果は、参加者が結果の変動性を回避するような応答方略選択を行ったことを示した。

Individual-specific leaning dynamics in bimanual coordination

Kae Mukai¹, Akito Miura², Kazutoshi Kudo^{1,3}, Seijiro Tsutsui⁴

¹Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo;

²Faculty of Human Sciences, Waseda University;

³Graduate School of Interdisciplinary Information Studies, The University of Tokyo;

⁴The Faculty of Wellness, Tokai Gakuen University

Previous research on bimanual coordination by dynamical systems approach has reported that there are individual-specific learning dynamics in coordination learning. We investigated this in bimanual coordination task by cross-correlation function. In the experiment, 18 participants practiced the bimanual coordination task with the relative phase of 90°. The duration of one trial was 10 seconds. Each participant performed a total of 135 trials. We calculated cross-correlation function between displacements of both hands, and accessed time evolution of the peak cross-correlation value and the lag at the peak value across trials as parameters that characterize learning dynamics. As a result, we observed individual-specific learning processes. One was that initially the peak cross-correlation value was relatively high and the lag at the peak was distant from the relative phase of 90°, and through learning the lag at the peak approached gradually the relative phase of 90°. The other one was that initially the peak cross-correlation value was relatively low but the lag at the peak clustered around the relative phase of 90°, and through learning the peak value gradually increased. These results suggest that in the bimanual coordination, there are multiple but distinct learning processes to solve the motor problem consisting of multiple sub-problems.