

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：13101

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K19998

研究課題名（和文）ヒト生体データに基づく骨格・筋腱の形態と機能の統合的理解

研究課題名（英文）Understanding muscle-tendon architecture and function in-vivo human

研究代表者

国正 陽子（Kunimasa, Yoko）

新潟大学・人文社会科学系・助教

研究者番号：20804355

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の当初の目的は特異的な身体運動能力を示すヒトの骨格・筋腱の形態的特徴と身体運動中の機能との関係を検討することであった。しかしながら、骨格・筋腱形態と運動中の筋力発揮特性や代謝特性との関連を明らかにする上で必要な筋代謝評価法において当初の計画では想定していなかった問題が生じた。そこで、運動中の筋代謝評価を可能にする手法を非侵襲的に皮膚血管収縮剤を経皮的に投与する方法と絶対値と相対値での筋酸素化動態の測定が可能な近赤外線分光解析システムを用いることで開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発された皮膚血流の影響を受けない筋酸素化・脱酸素化評価法によって、安静時だけでなく運動時や暑熱環境下等の熱ストレスが加わる状況においても筋代謝を評価することができるようになった。これによって、これまで困難であった様々な環境下、条件下での運動中の筋の生理学的機能評価が筋間や個人間で比較できるようになり、今後の筋機能研究に大いに貢献することが期待できる。

研究成果の概要（英文）：The initial objective of this study was to investigate the relationship between specific muscle-tendon architecture and their function during human movement. However, some problems arose that were not anticipated in the original plan in the muscle metabolism evaluation method, which is necessary for clarifying the relationship between skeletal and muscle tendon morphology and muscle force production and metabolic characteristics during movement. Therefore, we developed a method to evaluate muscle oxygenation and deoxygenation during exercise by using both a noninvasive skin vasoconstrictor transcutaneous administration and a near-infrared spectroscopy (TRS-NIRS) that can measure absolute and relative values of muscle oxygenation and deoxygenation.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：筋代謝 筋機能 近赤外線分光法 NIRS 皮膚血流

### 1. 研究開始当初の背景

身体運動中の動きや関節で発揮される力は、神経系の調整、筋の力-速度-長さ関係や外力を介した筋腱の相互作用によって生み出される。特にダイナミックな身体運動では、筋量でパフォーマンスが決定されず、神経系の調整による筋・腱の相互作用によって、運動効率やパワー発揮が高まり、その機序の解明が求められている。一方で、関節レベルでの力発揮に影響する筋腱の形態や骨格構造などのヒト身体の形態的要素は、ただちに機能を表すものではないが、進化の過程で圧倒的な運動能力を獲得してきた動物の体つきからも明らかであるように、形態的要素は身体運動能力や運動の機能を説明する必要条件になり得る。研究代表者はその点に着目し、非侵襲的に生体内の筋腱・骨格構造を計測できる超音波イメージング技術を利用し、これまでに約 6000 名のヒト生体の下肢筋腱・骨格構造ビッグデータ構築し、同一種のヒト内においても身体運動能力の異なる母集団によって多様な骨格・筋腱の形態的特徴が存在することを明らかにしてきた。しかしながら、高い身体運動能力に関係する骨格・筋腱の形態的特徴が、機能的に運動パフォーマンスとリンクする形態的特徴であるかは明らかになっていなかった。

### 2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究成果を発展させ、特徴的な形態を有する被験者の身体運動中の生体データから、筋の力発揮効率や弾性利用を明らかにすることで、骨格・筋腱の形態と身体運動中の機能との関係を検討していくことであった。

しかしながら、本研究課題達成に必要な筋の代謝測定評価において、当初の研究計画では想定していなかった問題が生じた。1) 汎用性の高い連続光法による近赤外線分光法 (Continuous-wave near-infrared spectroscopy: CW-NIRS) では、部位間や個人間の比較ができない。2) 運動中に上昇する可能性のある皮膚血流が NIRS 測定に影響する。そこで、これらの問題をまず解決するために、絶対値測定が可能な時間分解分光法 (Time-resolved near-infrared spectroscopy: TRS-NIRS) を取り入れ、されに経皮的に皮膚血管収縮剤 (エピネフリン) が投与できるイオントフォレーシス法を用いることで、皮膚血流の影響がなく筋代謝測定を可能とする手法を作成することとした。

### 3. 研究の方法

対象者は 11 名の健常男性であった。実験は室温 25℃、湿度 50% の人工気象室内で行った。対象者には実験開始 24 時間前以降のアルコールとカフェイン摂取、トレーニング等の運動を避けた状態で実験に参加した。対象者は実験室来訪後、直腸温測定用ディスポサースミスター (401J, Nikkiso-thermo, Tokyo, Japan)、皮膚温度測定サースミスター (ITP082-25, Nikkiso-thermo, Tokyo, Japan)、レーザードップラー血流計プローブ (ALF21, Advance, Tokyo, Japan)、近赤外線分光装置プローブ (TRS-20, Hamamatsu Photonics, Japan) を装着した後、皮膚温度を上昇させるために、全身にチューブが張り巡らされた水循環スーツを着用し、頭まで背もたれのある椅子に座り、端座位の姿勢をとった。その後、水循環スーツに 33℃ の水を流し、15 分間のベースライン (Baseline) の測定を行った後、スーツに環流する水の温度を 47℃ に上昇させ、1 時間かけて対象者の身体を温めた (Heated)。Control 条件と Heating 条件時の最後 10 分間のデータを抽出し、平均値を採用した。なお、ランダムに左右脚いずれかの内側腓腹筋筋腹部を測定対象部位とし、薬剤投与の有無を内側腓腹筋筋腹の内側・外側にランダムに割り当て、いずれかの部位が薬剤投与有条件 (Epinephrine)、薬剤投与無条件 (Control) となるようにした (Figure 1)。

NIRS データから、TRS-NIRS と CW-NIRS 法によって、酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (oxy [Hb+Mb])、脱酸素化ヘモグロビン・ミオグロビン (deoxy [Hb+Mb]) と総ヘモグロビン・ミオグロビン (total [Hb+Mb]) を算出した。加えて、TRS-NIRS 法によって光学係数 (光路長、拡散係数、吸収係数)、CW-NIRS 法によって吸収係数も算出した。

エピネフリンイオントフォレーシスは、エピネフリン塩酸塩 (シナプス後アドレナリン受容体の活性化に参与) の 1:1000 溶液 (Tokyo Chemical Industry, Tokyo, Japan) を用い電流密度 0.15 mA/cm<sup>2</sup> で 20 分間行った。薬剤投与部位は NIRS プローブ用 2 部位とレーザードップラー用 1 部位であった。

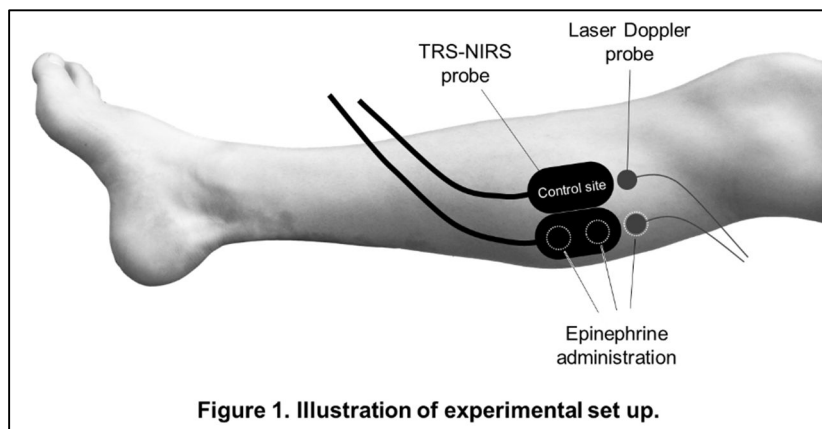
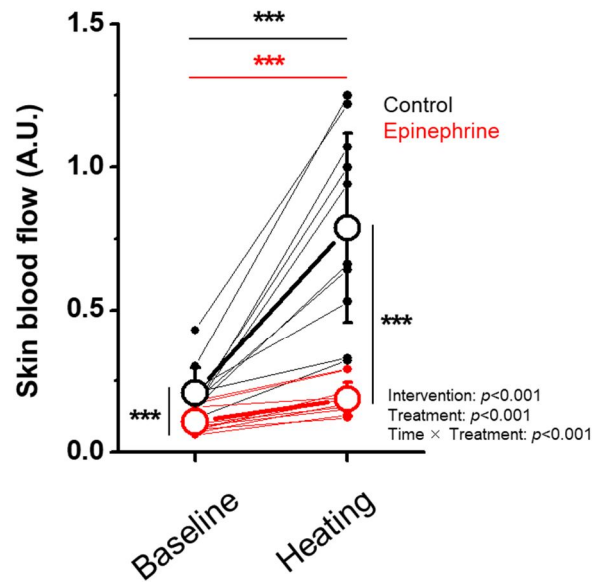


Figure 1. Illustration of experimental set up.

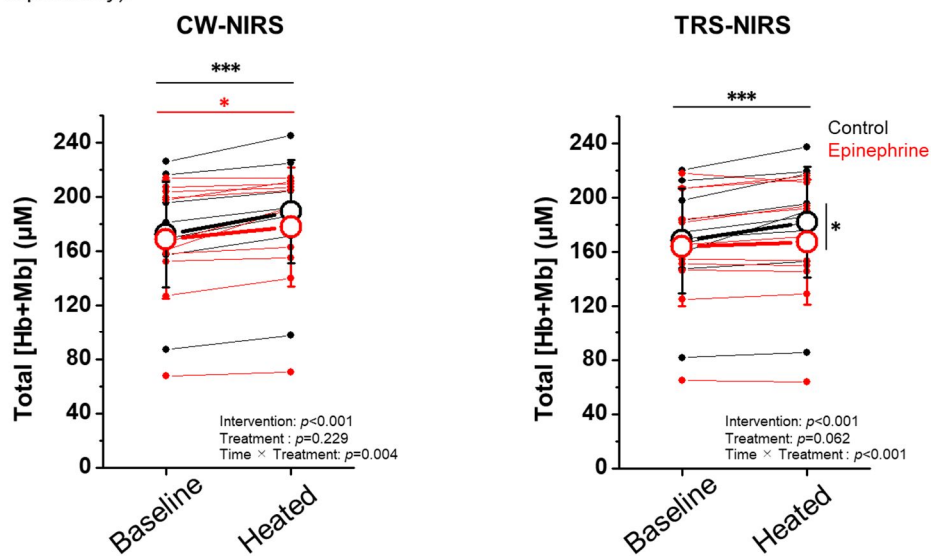
#### 4. 研究成果

本研究は、TRS-NIRS と CW-NIRS の両方の方法を用いて、皮膚血管収縮が筋の酸素化 / 脱酸素化に及ぼす影響を明らかにした初めての研究である。全身を受動的に加温することにより、皮膚血流が有意に増加し (Figure 2), CW-NIRS と TRS-NIRS で評価される oxy [Hb+Mb] および total [Hb+Mb] が有意に増大した (Figure 3, 4)。一方、皮膚血管収縮剤であるエピネフリンを経皮的に投与することにより、皮膚血流の上昇が抑制された (Figure 2)。これによって、TRS-NIRS では、加温中の oxy [Hb+Mb] および total [Hb+Mb] の上昇を抑えられた (Figure 3, 4)。しかしながら、CW-NIRS においては、エピネフリンを投与した場合でも oxy [Hb+Mb] および total [Hb+Mb] の上昇を抑えることができなかった (Figure 3, 4)。

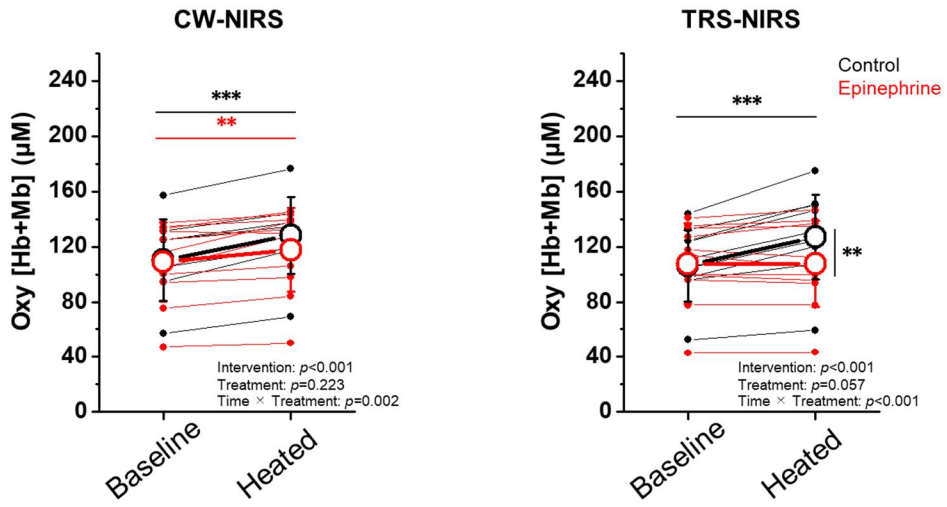
本研究により、エピネフリンの経皮的投与により、全身加温による皮膚血流循環が明らかに減弱し、筋酸素動態の測定法が改善されることが示された。さらに、エピネフリン投与と TRS-NIRS を併用することで、皮膚血流の影響がなくなり、より正確に oxy [Hb+Mb] および total [Hb+Mb] の測定が可能となった。したがって、TRS-NIRS 法とエピネフリンの経皮的投与を併用することは、皮膚血流が増加する条件においても筋酸素化の評価を行うことができることが示された。これらの成果は暑熱下や高強度運動下等、皮膚血流の増加が起こりうる条件における筋の代謝測定において有益な知見となった。



**Figure 2. Epinephrine iontophoresis attenuates skin blood perfusion during whole-body heating.** \*\*\*, \*\*, and \*; significant difference between baseline and heated condition ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.05$ , respectively).



**Figure 3. CW-NIRS and TRS-NIRS derived total [Hb+Mb] changes during whole-body heating.** \*\*\*, \*\*, and \*; significant difference between baseline and heated condition ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.05$ , respectively).



**Figure 4. CW-and TRS-NIRS derived oxy (Hb+Mb) changes during whole-body heating.**  
 \*\*\*, \*\*, and \*; significant difference between baseline and heated condition ( $p < 0.001$ ,  $p < 0.01$ , and  $p < 0.05$ , respectively).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Santuz Alessandro, Ekizos Antonis, Kunimasa Yoko, Kijima Kota, Ishikawa Masaki, Arampatzis Adamantios	4. 巻 6
2. 論文標題 Lower complexity of motor primitives ensures robust control of high-speed human locomotion	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Heliyon	6. 最初と最後の頁 e05377 ~ e05377
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.heliyon.2020.e05377	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 Nobue Ayaka, Kunimasa Yoko, Tsuneishi Hiromu, Sano Kanae, Oda Hiroyuki, Ishikawa Masaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Limb-Specific Features and Asymmetry of Nerve Conduction Velocity and Nerve Trunk Size in Human	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fphys.2020.609006	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 -
1. 著者名 Macchi Robin, Vercruyssen Fabrice, Hays Arnaud, Aubert Gaetan, Exubis Gaetan, Chavet Pascale, Goubert Emmanuelle, Souron Robin, Kunimasa Yoko, Nicol Caroline	4. 巻 12
2. 論文標題 Sex Influence on the Functional Recovery Pattern After a Graded Running Race: Original Analysis to Identify the Recovery Profiles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Physiology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fphys.2021.649396	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 Kunimasa Y. Sano K, Nicol C, Barthelemy J, Ishikawa M	4. 巻 42
2. 論文標題 Is the muscle-tendon architecture of non-athletic Kenyans different from that of Japanese and French males?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Physiological Anthropology	6. 最初と最後の頁 9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1186/s40101-023-00326-3.	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

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Tsuneishi H, Ohashi R, Kitano Y, Kunimasa Y, Okamoto T, Hirashima, Kijima, Ngahara R, Ishikawa M.
2. 発表標題 Application of assisted sprint with and without assisted loads.
3. 学会等名 25th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Santuz A, Ekizos A, Kunimasa Y, Kijima K, Ishikawa M, Arampatzis A.
2. 発表標題 Lower complexity of motor primitives ensures robust control of high-speed human locomotion.
3. 学会等名 25th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ishikawa M, Oda H, Sano K, Kunimasa Y
2. 発表標題 Neuromechanical modulation during bilateral hopping in patients with unilateral Achilles tendon rupture
3. 学会等名 XXVII Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunimasa Y, Iwasaki M, Ishikawa M
2. 発表標題 Characteristics of lower limb tendons and their relationships with the javelin throw performance
3. 学会等名 24th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kitano Y, Makino A, Arai A, Kunimasa Y, Sano K, Ishikawa M
2. 発表標題 Characteristics of sprint running with the horizontal resisted loads
3. 学会等名 24th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kijima K, Kishizawa H, Kataoka S, Kunimasa Y, Makino A, Ishikawa M, Ito A
2. 発表標題 Mechanics of effective propulsion movements for the wheelchair sprint start
3. 学会等名 24th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kunimasa Y, Macchi R, Corcelle, Michel CP, Hostin MA, Bendahan D, Nicol C.
2. 発表標題 Reliability of ultrasound-based muscle cross-sectional area in lower-limb: A comparative analysis between ultrasound and MRI.
3. 学会等名 XXIX Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kunimasa Y, Amano T, Okushima D, Koga S.
2. 発表標題 Cutaneous blood flow modulates assessments of muscle oxygenations: comparisons of continuous-wave and time-resolved near-infrared spectroscopy.
3. 学会等名 29th annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------	---------