科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号: 1 4 5 0 3 研究種目: 挑戦的萌芽研究

研究期間: 2014~2016

課題番号: 26560351

研究課題名(和文)有限要素シミュレーションによる骨格筋のスポーツバイオメカニクス研究

研究課題名(英文)Sports Biomechanics of skeletal muscles with finite element simulations

研究代表者

小田 俊明 (Oda, Toshiaki)

兵庫教育大学・学校教育研究科・准教授

研究者番号:10435638

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文):本研究では,筋腱複合体の有限要素シミュレーションを用い,筋と腱のもつ生理学的・力学的・解剖学的性質と発揮筋力・パワーとの関係について詳細に検討を加えることを目的とした.改良した生体組織用有限要素シミュレータを活用し,組織のもつ特徴を生理的範囲で増減させることで,それぞれのパラメータの及ぼす影響を推定した.その結果,腱組織のstiffnessが静的・動的筋力の大きな規定因子になっている可能性など,実験では独立して検討することが困難な,それぞれの因子の感度を算出することが可能となった.

研究成果の概要(英文): In experimental study design, one intervention like training experiment would not influence only one parameter. Because there exist interactions of adaptation between tissues (e.g. interaction between muscle and tendon). The aim of this study was to investigate relations between both force and power generations and physiological, mechanical and anatomical characteristics in muscles and tendons using finite element analyses of muscle-tendon complex. Also, the contribution of each parameter was estimated by simulation with changing (increase and decrease) the values in physiological range. As a results in this work, we could get the systems to determine the sensitivity of each parameter, such as the importance of stiffness of tendinous tissues on force-power generation.

研究分野: バイオメカニクス

キーワード: 筋機能 シミュレーション 腱膜 結合組織 有限要素法

1 . 研究開始当初の背景 身体機能の向上のために , リハビリテーションや トレーニングを行い、生理 的・形態的な機能の改善を 図ることが一般的である. しかし,実際のトレーニン グなどでの運動処方では、 神経系,骨格筋の収縮機能, 筋の肥大による形態の変化 などが同時に生じる.その ため、トレーニング効果の 高い部位(筋機能への貢献 度の高い部位)とその貢献 度を実験的に明確にするこ とは困難であった.また, 筋カトレーニングによって 腱組織が影響されるなど, 計測項目となってない部位 ,ある処方が効果を及ぼ に す因子間の相互作用の可能 性については実験的な検討 が難しい場合が多い.本研 究では、このようなこれま での人体筋を対象とした骨 格筋研究の問題点を解決す る方法として,有限要素シ ミュレーションを用いた骨 格筋のスポーツバイオメカ ニクス研究を提案・開始す る.

申請者は、理化学研究所 と東京大学の研究者と共に、 骨格筋の巨視的な構造と機 能とをもつ有限要素シミュ レータを開発した(下図: Alves ら, 2009, 2010: ソ フトウ エ ア 名 称 V-Biomech). このシミュレ - タは , MR I などの医療画像 を元としたマスク情報から 有限要素解析に必要なメッ シュモデルを作成する機能 も 併 せ 持 つ . 示 し た 我 々 の 先行研究では、実際の人体 組織から核磁気共鳴映像装 置 で 撮 像 し た 組 織 形 状 , in vivo 実験により測定した組 織の力学的特性等,可能な 限り人体からの測定パラメ - タを用いており,人体の 発揮する張力,筋の形状変 化等により検証した人体筋 の再現度が非常に高いもの で あ る . 研 究 期 間 内 に は , 最初の課題として,人体筋

対象の実験では独立変数と して検討することが困難で ある力・パワー発揮に大き く影響する形態的・生理 的・力学的因子を同定し, また、感度解析を用いたそ れぞれの因子の機能への貢 献度,他因子との相互作用 を解析する、この研究の結 果 , 競技選手のパフォーマ ンス向上、一般人の身体機 能向上にはどこを、どのよ うに変化させることが効率 的で効果的であるのかを定 量的に示すことが可能であ る.

実験的な骨格筋研究はこ れまでに非常に多くのこと を明らかにしてきたものの 人体を研究対象として扱う 場合には,方法論的・倫理 的観点から、目的変数のみ を操作した実験系をたてる ことが非常に困難であると いう課題がある、従って 目的変数(例えば,筋機能 や怪我の発生リスク)に関 する従属変数(筋線維の腱 膜への配置、筋線維組成 筋や腱の硬さなど)それぞ れの貢献度は明確にならな かった. また, 実験研究で は、主たる計測項目となっ てない部位に効果が及ぶ因 子間の相互作用を検討する ことはできない.加えて 実験的な観察では,画像撮 影面などある限られた部位 の情報か ,筋力のように筋 全体に起こった現象の総和 的な情報を得る事ができる ものの、任意の局所部位に 生じた現象を捉える事が簡 便ではない. 妥当な計算モ デルを用いた今回のシミュ レーション研究では、これ ら実験系の研究が内在して いた問題点の多くを解決で きる有用性をもつ.この研

究の発展によって,効率的

で効果的なトレーニング, リハビリテーション処方を 科学的根拠をもって示す 骨格筋機能に関す 研究を大きく発展させる

とが可能になると考える 2 . 研究の目的 本研究では、上記の背景を ニング,リハ け トレー ション リテ _ スポーツ 医学での活用を目指した有 限要素シミュレーションを 用いた骨格筋のスポーツバ 1 オ メカニクス研究を提 案 開始する.人体筋対象 の実験 では独立変数として 検 討 す ることが困難である パワー発揮に大きく影 力 鏗 する形態的・生理的・力 学的因子を同定し また . 感度解析を用いたそれぞれ の因子の機能への貢献度、 他因子との相互作用を解析 ることを目指していく. す この研究の結果 競技選手 のパフォーマンス向上や 一般人の身体機能向上には どこ どのように変化さ を るこ せ とが効率的で効果的

あるのかを定量的に示す

とが可能となる、本研究

の応用が可能であり、介入

効果の予測計算に基づくス

ポーツ科学の発展に資する

ものであると考える.

3 . 研究の方法

様々な研究課題へ

で

手法は,

を作成することに着手する (年度毎の研究方法) 平成 26 年度: 本年度 ,上記の有限要素モデル をスポーツバイオメカニク ス研究に活用する最初の段 階として 1) 形状モデル の入出力や境界条件の設定 ポストプロセス等の機能を 持たせた複数ソフトウェア の改良・開発シームレスな 連携により筋腱複合体の有 限要素シミュレーターシス テムを準備すること 2) 簡易形状モデルにおいて ンプルな条件で筋収縮を伴 うシミュレーションを実施

大きく関わる形態的・生理

的・力学的因子を同定し.

そのそれぞれの貢献度を感

作用を定量的に明らかにす

よる多くの計算課題が必要 と な る . 計 算 負 荷 を 抑 え る

ュ数を最適なものとし, 2-

で複数の解析を同時進行さ

選手の MRI 画像から作成し

た3次元の形状モデルをア

フィン変換等で数理的に変

形させ,複数の外部筋形状

また,一般人やスポーツ

5 台の計算機を用いるこ

せることも準備する

形状モデルのメッシ

ることを最終の目的とす

複数のパラ

他因子との相互

メー

タに

度解析し

ため

ため

する

本年度は, 平成 27年度: 昨年度に改良を加えてきた 筋腱複合体の有限要素 シミ ュレーターシステムを使用 1) 任意の単純化した 人工形状において筋収縮挙 動に関わる複数の生理的条 件における解析を発展させ . また , 同 時 に , 2) M R I を用いて取得した実際の人 体筋形状を用いた収縮 動態 の解析を実施する 1にお 筋腱複合体の初期 の長さの異なる条件におい , 力発揮ならびに筋 局所 変形に腱組織の力学的特性 ついて検討 を詳細に加えるなど研究を 進展させる(いわゆる,長

(概要) 第一世代が開発完了した 有限要素モデルをスポーツ バイオメカニクス研究に応 し, 用利用し,プレーポストの解 析設定プロセス, 複数のソ トウェア間のフ フ ァイルや り取りなどを整理し ,効率 的な解析システムを構築す 解析としては , これま で我々の取得してきた人体 からの実験データと先行研 究から入力値の選定を行う いては ととした.また,それら のモデルに入力する力学 て 的・生理的特性のパラメー タの振り幅をこれまでの報 が与える影響に 告データより決定する. 本研究では、シミュレー ションにより骨格筋機能に

さ - 力関係の解析).また, 2 においては , スポーツ外 傷の発生と筋変形との関連 を検討するための解析モデ ル の 作 成 に 着 手 す る . 加 え て, Phase contrast MRI を 用いて、収縮中の人体の変 形情報を取得する.これら のデータはモデルの妥当性 検討と生理・力学的パラメ タの決定のために非常に 重要な実験データである. これら一連の解析により、 動物実験や人体を対象とし た 実 験 で は 困 難 で あ る , 運 動中に人体筋において起こ る力学的負荷や生理的な変 化を精度よく推定すること が可能であり、外傷の予防 **やトレーニング・リハビリ** テーションの方法を考案す る際の重要な一助となるこ とが期待される.

平 成 28 年度: 本年度は、 昨年度に続き、筋腱複合体 の有限要素シミュレーター システムを使用し、 特に、 任意の単純化した人工形状 において筋収縮挙動に関わ る解析を引き続き進める. まず ,生体内に多数存在す る単羽状筋の筋腱複合体モ デルを作成し、初期長の異 なる等尺性条件と収縮速度 を変化させる条件にて、い わゆるカー長さ関係とカー 速度関係を多数の初期条件 でシミュレートする.次に, それらの関係に結合組織 (腱組織と筋を包む腱膜) 学 力 的 な 性 質 (stiffness)が , 発揮される 最大筋力に与える影響につ いて検討する. また、上記に加え、シミ ュレーションでの解析に今 後使用していくことを念頭

4 . 研 究 成 果 平 成 26 年 度 に , 形 状 モ デ ル の 入 出 力 や 境 界 条 件 の 設 定 , ポ ス ト プ ロ セ ス 等 の 機

に , M R I や 写 真 撮 影 を 通 じ トップ ア ス リ ー ト の 腱 腱 の 形

態特性の測定を実施する.

能を持たせた複数ソフトウ ェアの改良・開発・シーム レスな連携により筋腱複合 体の有限要素シミュレー ーシステムを準備すること ができた . 具体的にはシミ ュレーションの各種条件設 定を行う機能は、理化学研 究 所 の 有 限 要 素 解 析 Pre-post ソフト V-Femis を用いることとした.この ソフトウェアでは,我々が 人工形状を用いる際に形状 モデル作成に用いる CAD 系 のフォーマット, ならびに 医療画像から形状モデルを 作成した場合に使用するモ デルフォーマットの両者か らメッシュモデルを作成で きる. また, V-Femis から V-biomech の計算に必要な 条件ファイルを出力し,計 算に使用することが可能と なった、次にこれらの計算 システムを用いて、簡易形 状モデルにおける筋収縮を 伴うシミュレーションを実 施した、先行研究での報告 値を用いて解析をしたとこ ろ,これまでの生理実験に おいて報告された等尺性収 縮の結果の傾向を再現する ことができた.具体的には, 力の時系列変化,腱組織の 弾性による筋線維の internal shortening,羽 状 角の変化などである. 平成 27 年度と 28 年度に は単純形状のモデルを用い て,力ー長さ関係とカー速 度関係を多数の初期条件で シミュレートし,特に,結 合組織(腱組織と筋を包む 腱膜)の力学的な性質 (stiffness)が , 発揮される 最大筋力に与える影響につ いて検討した.その結果, 筋腱複合体の力 - 長さ関係 では、腱膜の硬いモデルに おいて最大収縮力が増加し その影響は筋腱複合体長が 変化しても維持された、ま た,腱膜が柔らかい場合, ピーク筋力が筋腱複合体長 の長い方へ移動し、最大筋 力に近い筋力を発揮可能な operating rangeが広くなっ た.力・速度関係では,腱 膜が硬いほど,同一短縮・

伸長速度において大きな筋

力が発揮される傾向が観察 された、これらの原因は、 柔らかい腱膜では、全体的 に収縮時の筋線維長が短く なり (短 縮 量 が 多 く な り), 筋線維の力・長さ関係の上 向脚における力発揮ポテ シャルが小さいことで概ね 説明された.一方,力・速 度関係では、筋線維の長さ 分布の違いに加え、収縮速 度の増加による力発揮ポテ ンシャルの変化も影響し いた、本研究の結果は筋腱 複合体の形状が同一であっ ても , トレーニング・リハ ビリテーション等により腱 膜の stiffness を高めるこ とで筋腱複合体の機能に有 利な影響を与える可能性が 高いこと,ならびに腱膜の stiffness が筋腱複合体の 静的・動的筋力の規定因子 として重要な要素の一つで ある可能性を示唆していた. なお、この研究内容は、日 本トレーニング科学会にお いて学会奨励賞を受賞する ととなった. アスリートを含む、医用 画像を用いた実形状でのシ ミュレーションは現在計算 準備を進めている段階であ る.

5 . 主 な 発 表 論 文 等 (研 究 代 表 者 、 研 究 分 担 者 及 び 連 携 研 究 者 に は 下 線)

〔雜誌論文〕(計 7 件)

国正陽子,佐野加奈絵,久 野 峻 幸 , 牧 野 晃 宗 , 小 田 俊 明 , C Nicol , P V Komi , 石 川昌紀.下腿の骨格・筋腱形 態に東アフリカ地域の陸上 中長距離選手特有の特徴は あるのか、大阪体育学研究、 印刷中 2016. 査読あり. 国正 牧野晃宗,岩崎正徳, 陽子 久野峻幸,佐野加奈 絵 , 村 元 辰 寛 , 村 上 雷 多 , 神崎浩,小田俊明,石川昌 . 剣道経験年数の違いに 紀 よる左右脚のアキレス腱の 形態と力学的特性について 体育学研究.印刷中201.查 読 あ り . 小田俊明,岡田守彦,山本 忠志,楠本一樹.長距離走 時の効果的接地スタイルは

筋と腱の力学的特性と関連

- ケニア選手を 含むトップアスリートから - 般 ラ ン ナ - ま で を 含 む 検 討 - . デサントスポーツ科 学 2016. 査読あり. 久野峻幸,楠本一樹,栗原 俊之,石川昌紀,川上泰雄, 小田俊明.個人のアキレス 腱形状と筋力データを用い た有限要素シミュレーショ ンによる運動時のアキレス 腱局所変形の推定.バイオ メカニクス研究.19, 2015. 査読あり. <u>T Oda</u>, T Hisano, DC Hay, R Kinugasa, N Yamamura, T Komatsu, H Yokota, S Takagi. Anatomical Geometry and Thickness of Aponeuroses in Human Cadaver Triceps Surae Muscles. Advanced Biomedical Engineering. 4, pp12-15,2015 . 査 読 あ り . K Sano, C Nicol, M Akiyama, Y Kunimasa, <u>T Oda</u>, A Ito, E Locatelli, PV. Komi, M Ishikawa. Can measures of muscle-tendon interaction improve our understanding of the superiority of Kenyan endurance runners? European Journal of Applied Physiology 115, pp 849-859, 2015. 査読あり. N Yamamura, JL Alves, <u>T Oda</u>, R Kinugasa, S Takagi. Effect of tendon stiffness on the generated force at the Achilles tendon - 3D Finite Element Simulation of a Human Triceps Surae Muscle during Isometric Contraction. Journal of Biomechanical Science and Engineering. 9, 2014

[学会発表](計 8 件)

小田俊明, 久野峻幸,衣笠竜太.腱膜のstiffnessが筋腱複合体の力発揮特性ならびに変形に及ぼす影響 - 有限要素シミュレーション
- 日本トレーニング科学会, 2016, 11月14日. (学会奨励賞受賞) . 横浜桐蔭大学(神奈川).査読あり.
M Ishikawa, Y Kunimasa, K Sano, T Hisano, A Makino, T Oda, J Toyooka, CNicol,

DOI:10.1299. 査読あり.

PV Komi. MUSCULOSKELETAL CHARACTERISTICS FOR EAST-AFRICAN TOP DISTANCE RUNNERS. International Society of Biomechanics in Sports, Tsukuba (Ibaraki), 18th on Aug. 2016. 査読あり. 国正陽子、佐野加奈絵、久 野峻幸,牧野晃宗,小田俊 <u>明</u>, Nicol C Komi PV, Ishikawa M . ケニア人トッ プランナーの特徴的な下腿 形態の獲得機序. 体力医学 会 2016.岩手大学(岩手). 9月23日.査読あり. T Oda, Y Toyoda, T Hisano, K Kusumoto, Y Kunimasa, K Sano, C Nicol, PV Komi, M Ishikawa. Mechanical properties of triceps surae muscle-tendon unit in Kenyan distance runners.European College of Sport Science, Amsterdam (Netherland) 2014. 6th on July. 査読あり. T Oda, Y Toyoda, T Hisano, Y Akihara, Y Kunimasa, K Sano, K Kusumoto, C Nicol, PV Komi, M Ishikawa. Mechanical properties of triceps surae muscle-tendon unit in Kenyan and Japanese distance runners. Asia Pacific Conference on Coaching Sciences, Sapporo(Hokkaido), 2014. 12nd on Jul. 査読あり. T Hisano, K Kusumoto, Y Akihara, M Iwasaki, C Edamatsu, M Ishikawa, <u>T</u> Oda. Morphological Characteristics of Lower Limb in College Track and Field Athletes. Asia Pacific Conference on Coaching Sciences, Sapporo(Hokkaido), 2014. 12nd on Jul. 査読あり. Y Akihara, T Oda, T Hisano. Relationship between thickness of thigh muscles and competition performances in male high school and college weightlifters. Asia Pacific Conference on

Coaching Sciences,
Sapporo (Hokkaido), 2014.
12nd on Jul. 査読あり.
小田俊明,豊田洋平, 久野峻幸,楠本一樹,石川長郎,
ケニア人陸上競技中長距の形態の・カ学の下腿部筋腱の形態の・カヴ会の14,5月31日.兵庫教育大学(兵庫).査読あり.

6 . 研究組織 (1)研究代表者 小田 俊明(0DA, Toshiaki) 兵庫教育大学・学校教育研究科・准教授 研究者番号: 10435638

(4)研究協力者

高木 周 (TAKAGI, Shuu) 東京大学大学院・工学研究 科・教授 山村 直人

(YAMAMURA, Naoto) 東京大学大学院・工学研究 科・研究員

Shantanu Sinha University of California, San Diego, Department of Radiology, Professor.