

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：14503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11413

研究課題名（和文）陸上競技選手の競技力に影響する注目因子：収縮時の筋腱複合体の粘弾性の計測

研究課題名（英文）Key Factors Affecting Athletic Performance in Track and Field Athletes:
Measurement of the Viscoelasticity of Muscle-Tendon Complex During Contraction

研究代表者

小田 俊明 (Oda, Toshiaki)

兵庫教育大学・学校教育研究科・教授

研究者番号：10435638

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,000,000円

研究成果の概要（和文）：振動法により陸上競技選手の筋腱の力発揮時における弾性・粘性係数を計測することを目的とした。143名の短距離走・中長距離走・跳躍の選手を対象とした。また、群内における比較も行った。得られた主要な結果として以下が挙げられる。中距離選手では筋の弾性粘性両係数が競技力と有意に相関したが、長距離選手では粘性係数との関連は認められなかった。短距離選手では、100m選手が400m選手よりも腱の弾性係数が低く、筋の弾性係数の傾きが高いことが明らかとなった。走幅跳選手では弾性係数と競技力に負の相関が見られた。測定の結果、種目による粘弾性特性とその分布が明らかとなり、それらを用いた有限要素解析が実施された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

この研究は、筋と腱との弾性係数と粘性係数とがスポーツの競技力に与える影響についての研究である。得られた競技種目による粘弾性の特徴や分布、トップ選手の測定パラメータは、競技力を高める際の目標指標として使用することが期待できる。また、それらの指標が筋力発揮のどの場面において重要な意味をもつのかをシミュレーションにより明らかにすることで、新しいトレーニング方法の考案に寄与すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study aimed to measure the elastic and viscous coefficients of muscle-tendon in track and field athletes using vibration methods. The subjects included 143 athletes from sprint, middle-distance, long-distance, and jumping events. The major results obtained were as follows: in middle-distance athletes, both elastic and viscous coefficients of the muscle significantly correlated with performance, while in long-distance athletes, there was no significant correlation with the viscous coefficient. In short-distance athletes, it was found that the elastic coefficient of the tendon was lower, and the slope of the elastic coefficient of the muscle was higher in 100m runners compared to 400m runners. In long jumpers, a negative correlation was observed between the elastic coefficient and performance. The results of the measurements revealed the viscoelastic properties and their distribution by event, and finite element analysis was conducted using these data.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：粘弾性 筋 腱 スポーツ科学 競技力 シミュレーション 力学的特性 陸上競技

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、陸上競技の走種目では、日本選手の活躍が聞かれる機会が増えた一方、世界記録も更新されており各種目の日本記録と世界記録との差はなかなか縮まらない現状である。中長距離走、ならびに短距離走における速度維持局面(特にロングスプリント)においては、有酸素、ならびに無酸素系のエネルギー供給能が高いことが高いパフォーマンス発揮に不可欠であるが、近年、特に競技力の高い選手では、筋腱の形態や力学的特性もパフォーマンスに大きく関与することが示されている(Uenoら, 2018; Kunimasaら, 2013; 小田, 2018)。一方で、競技選手を対象とした研究がほとんどないためか、このパラメータの現場でのトレーニングにおける注目度は十分に高いとは言えない。

これらの種目では、一定時間の間、重心がほぼ等速水平運動し、速度の増減やペース変化は小さい。この全体としての等速度維持のためには、一步一步の接地時のブレーキによって微量に減速した重心水平速度を関節パワーの発揮によって再加速する必要がある。また、垂直方向の体重を支える際にも関節パワーが必要となる。

この接地時の関節パワーの発揮には、筋による力発揮だけでなく、筋と腱の働き合い(筋腱相互作用と呼ぶ: 下に図1)が重要となる。腱組織(例えば接地時のアキレス腱)はバネ様の弾性特性をもち弾性エネルギー由来のパワーをカタパルトのように蓄積・解放できる性質をもつ。そして、その腱と直列方向につながった筋では、筋腱全体の長さ変化を腱組織に委ねることで、筋内部の筋線維が力速度長さ関係における張力を発揮しやすい長さや速度で収縮し力発揮を行うことが可能となる(Robertsら, 1997)。従って、筋と腱の特性が個人によって異なった際、あるいは種目、走速度が変化した際には、最適な筋と腱のパワー発揮への貢献度が変化することが演繹される。

実際、中長距離選手を対象に競技力に幅のある選手群を比較した研究では、競技力が高く、走効率が高い選手は筋の受動 stiffness が高いこと(Uenoら, 2018)、また、腱組織で大きなパワーを発揮する身体の使い方をしており、接地時の筋活動が減少(Sanoら, 2015)することで筋収縮によるエネルギー消費を小さくすることが可能となっていることが示唆されている。また、東アフリカの中長距離選手と日本選手の比較において、筋や腱の形態の差(Kunimasaら, 2013など)や stiffness の差が示されている。

しかし、選手を対象とした筋の stiffness に関しては、これまでは、ほとんどの報告において安静時における計測がなされてきた。筋を急速伸長する方法や alpha 法(Kuboら, 2014)などを用いた筋収縮中の報告結果も散見されるが、大掛かりな測定器が必要とされる。また、人体組織における粘性の測定報告は少ない。これは組織における力学的エネルギーの出入りや、運動の効率を考える際には重要な指標であるが、従来の測定においては、実験の難しさや再現性の低さもあり報告は多くない。一方、振動法を用いた報告では、測定機器を小規模化することが可能であり、再現性高く stiffness に加え粘性の測定が可能となる。Fukashiroら(2002)は、振動法における人体組織の粘弾性手法を確立し、NCAAにおける黒人選手と白人選手の筋腱の力学的性質の差異を報告している。一方で、競技力の差異や、種目差、個人差の検討を行う方向への研究の発展は以降報告されていない。

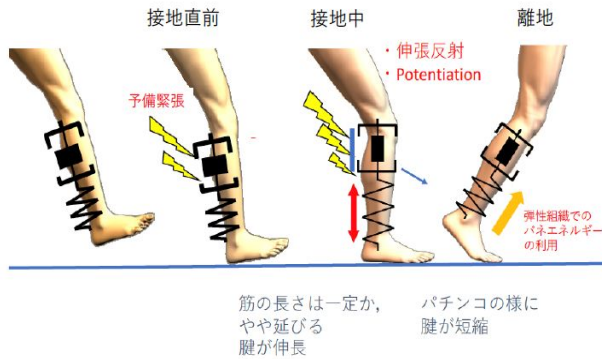


図 1

ランニングの接地中、腱組織（例えば接地時のアキレス腱）は弾性エネルギー由来のパワーをカタパルトのように蓄積・解放し、筋では、筋腱全体の長さ変化を腱組織に委ねることで、筋内部の筋線維が力 速度 長さ関係における張力を発揮しやすい長さや速度で収縮し力発揮を行う

2. 研究の目的

本研究では、陸上競技における競技力の高い、短距離、中距離、長距離選手を対象として、筋腱の力発揮時、すなわち競技時の粘弾性特性を明らかにし、それらと競技力との関係を明らかにすることを目的とした。また、実験的に計測したパラメータの筋腱のパワー発揮に与える影響の詳細検討には有限要素法など計算機シミュレーションを併用した。

3. 研究の方法

(1)測定方法

本研究では、振動実験と有限要素法を用いた計算機シミュレーションを実施した。振動実験では、フォースプレート上において、筋腱組織に異なった負荷を与えた状態で等尺性収縮の状態を作る。そこに外部から振動を与え、システムにおける力の周波数と減衰波形から筋と腱の力発揮時の弾性と粘性を算出する（Fukashiro ら、2002 の方法：図 2）。この手法により、力発揮時の筋腱全体のシステムとして、ならびに、筋と腱のそれぞれの粘性係数と弾性係数を算出することが可能である。

計算機シミュレーションでは、計測した形状を基に所有する有限要素モデル（Yamamura ら、2014）を用い、実験的に得られた系としての粘弾性のパラメータが筋線維の局所挙動や力発揮特性に与える影響について推定することも行った。

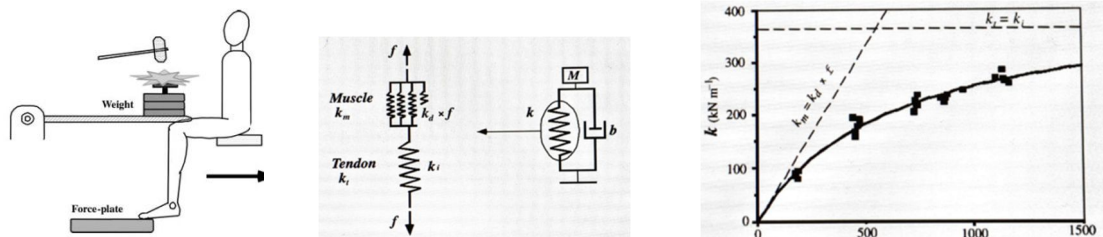


図 2 振動系の実験系（左）、筋腱モデル（中）と筋と腱のパネ定数の分離（右）

(2)被験者

3 年間の研究期間において、それぞれの群の被験者は、全国大会入賞から出場レベルの大学生を中心として各群 30 名以上を目標とした。実際、この 3 年間に計測した被験者数は、男子選手が中心であり、男子では短距離走選手 63 人、中長距離走選手 50 人、跳躍選手 30 人を実施した。この中には日本記録保持者やオリンピック選手など競技力が高い選手を多く含むが、各地区インカレ出場レベルの選手もあり比較的競技力に幅のある被験者層からの測定を実施した。

4. 研究成果

得られた計測データを競技別や競技力別に解析し、筋腱の粘弾性係数と競技力との関係を調べた。以下に主要な結果を述べる。

- (1) 競技力に幅をもつ中距離選手においては、筋腱複合体の弾性(800Nの力発揮条件など)、ならびに粘性と競技力との間に高い有意な相関が観察された。また、筋と腱を分離して弾性を解析した結果、筋の弾性が競技力と高い相関を示すことが明らかとなった。一方で、中距離と傾向が近いと考えられる長距離選手においては弾性については同様の傾向が観察されたが、粘性係数との間に有意な相関はなかった。
- (2) 競技力の高い短距離選手の中で、100m選手と400m選手の比較をすると、筋腱複合体全体の弾性は、収縮強度が低いところでは100m選手の弾性係数が高かった。一方、収縮強度が増加するとその差はなくなった。また、筋と腱の弾性を分離すると、100m選手は400m選手よりも、腱の弾性係数が有意に低く、筋の弾性係数の傾きが有意に大きかった(図3)。粘性係数に差はなかった。また、競技力と上記の変数との間に有意な相関はなかった。
- (3) 水平跳躍種目である走幅跳と三段跳の選手の筋腱の粘弾性係数を比較した。競技力に幅があり、かつ群間において競技力に統計的な差のない集団において検討した。粘弾性係数にも、形態的な差もなかったが、走幅跳のみにおいて弾性係数と競技力とに有意な負の相関が観察された。
- (4) 実験的に得られた筋や腱の特徴的な粘弾性係数が、骨格筋の収縮機能に与える影響の詳細検討のため、腓腹筋を模した有限要素シミュレーションにて解析を進めている。

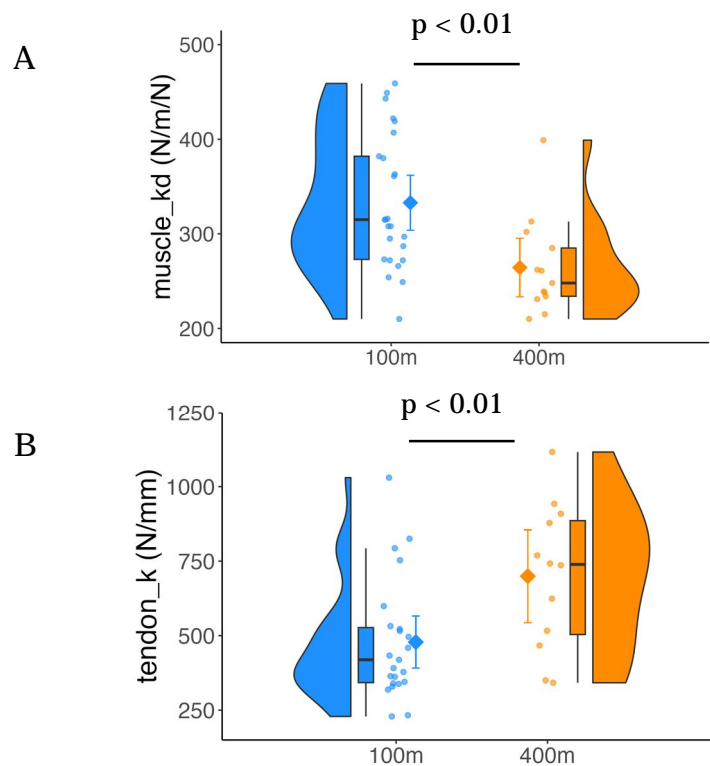


図3 筋と腱の弾性指標。ダイヤモンドが平均値を示す。Aは筋の弾性係数の傾き、Bは腱組織の弾性係数を示す。

引用文献（掲載順）

- Ueno, H., Suga, T., et al. (2018). *International Journal of Sports Medicine*, 39(3), 204–209.
- Kunimasa, Y., Sano, K., Oda, T., et al. (2013)., *Scand. J. Med. Sci. Sports* 1–6.
- 小田俊明 . (2018), *スプリント研究* 27, 19-25.
- Roberts, T. J., Marsh, R. L., Weyand, P. G., & Taylor, C. R. (1997). *Science (New York, N.Y.)*, 275(5303), 1113–1115.
- Sano, K., Nicol, C., Akiyama, M., Kunimasa, Y., Oda, T., Ito, A., ... Ishikawa, M. (2015). *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115(4).
- Kubo, K. (2014) *J. Appl. Physiol.* 117, 1020–1026.
- Fukashiro, S., Abe, T., Shibayama, a, & Brechue, W. F. (2002). *Acta Physiologica Scandinavica*, 175(3), 183–187.
- Yamamura, N., Alves, J. L., Oda, T., Kinugasa, R., & Takagi, S. (2014). *J. Biomech. Eng.*, 9(3).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12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 Enomoto Shota, Oda Toshiaki | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Estimation of the Effects of Achilles Tendon Geometry on the Magnitude and Distribution of Local Strain: A Finite Element Analysis | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Biomechanics | 6. 最初と最後の頁 583 ~ 595 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/biomechanics3040047 | 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 Enomoto Shota, Shibutani Tomonari, Akihara Yu, Yamada Kazunori, Oda Toshiaki | 4. 巻 10 |
| 2. 論文標題 Acute and Prolonged Effects of Dermal Suction on Joint Range of Motion and Passive Muscle Stiffness: A Preliminary Study | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Healthcare | 6. 最初と最後の頁 2241 ~ 2241 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/healthcare10112241 | 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 Kunimasa Yoko, Sano Kanae, Oda Toshiaki, Nicol Caroline, Komi Paavo?V., Ishikawa Masaki | 4. 巻 235 |
| 2. 論文標題 Muscle tendon architecture in Kenyans and Japanese: Potential role of genetic endowment in the success of elite Kenyan endurance runners | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Acta Physiologica | 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) 10.1111/apha.13821 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 齋藤壮馬, 小田俊明 | 4. 巻 31 |
| 2. 論文標題 陸上競技短距離選手における最大疾走局面のマーク走の効果: 異なるマーク間隔による速度と動作の相違 | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 スプリント研究 | 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) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------|
| 1. 著者名 齋藤壮馬, 藤林献明, 小田俊明 | 4. 巻 20 |
| 2. 論文標題 ピッチとストライドの改善を目的とした短時間・低頻度のスプリントトレーニングが疾走速度に及ぼす影響 - スポーツ専攻学生を対象として - | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 陸上競技学会誌 | 6. 最初と最後の頁 57-67 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 小田俊明, 山村 直人, 高木 周 | 4. 巻 34 |
| 2. 論文標題 骨格筋の力 長さ関係に変形の拘束条件が及ぼす影響 -有限要素シミュレーション- | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌 | 6. 最初と最後の頁 122-127 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5687/iscie.34.122 | 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 野上 展子, 小田 俊明, 山本 忠志 | 4. 巻 15 |
| 2. 論文標題 競技エアロビック選手における弾み (バウンス) 動作の 出来栄えに関する運動学的特徴 片足で行うはずみ動作の遊脚に着目して | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 体操研究 | 6. 最初と最後の頁 1~11 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4107/gym.15.1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-----------------------|
| 1. 著者名 齋藤 壮馬, 小田 俊明, 高橋 佳三 | 4. 巻 67 |
| 2. 論文標題 加速局面のピッチの増加を目的としたマーク走の効果 及び通常疾走との比較 | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 教育医学 | 6. 最初と最後の頁 111~122 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32311/jsehs.67.2_111 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Enomoto Shota, Oda Toshiaki, Sugisaki Norihide, Toeda Misaki, Kurokawa Sadao, Kaga Masaru | 4. 巻 32 |
| 2. 論文標題 Muscle stiffness of the rectus femoris and vastus lateralis in children with Osgood?Schlatter disease | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Knee | 6. 最初と最後の頁 140 ~ 147 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.knee.2021.08.001 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|---------------------------|
| 1. 著者名 Enomoto Shota, Shibutani Tomonari, Akihara Yu, Nakatani Miyuki, Yamada Kazunori, Oda Toshiaki | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Acute Effects of Dermal Suction on Passive Muscle and Joint Stiffness | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Healthcare | 6. 最初と最後の頁 1483 ~ 1483 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/healthcare9111483 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Oda Toshiaki, Malis Vadim, Finni Taija, Kinugasa Ryuta, Sinha Shantanu | 4. 巻 11 |
| 2. 論文標題 Dynamics of Quadriceps Muscles during Isometric Contractions: Velocity-Encoded Phase Contrast MRI Study | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Diagnostics | 6. 最初と最後の頁 2280 ~ 2280 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/diagnostics11122280 | 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 Yoko, Sano Kanae, Oda Toshiaki, Nicol Caroline, Komi Paavo?V., Ishikawa Masaki | 4. 巻 235 |
| 2. 論文標題 Muscle tendon architecture in Kenyans and Japanese: Potential role of genetic endowment in the success of elite Kenyan endurance runners | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Acta Physiologica | 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) 10.1111/apha.13821 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshiaki Oda, Takeru Matsumoto, Satoshi Mikata, Soma Saito, Hiroyasu Tsuchie |
| 2. 発表標題 DIFFERENCES IN VISCO-ELASTIC PROPERTIES OF MUSCLE AND TENDON BETWEEN 100M AND 400M SPRINTERS |
| 3. 学会等名 International Society of Biomechanics (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Toshiaki Oda, Takumi Ueno, Soma Saito, Fumiya Tanji, Hiroshi Yamada |
| 2. 発表標題 Relationship between Athletic Performance and Visco-elasticity of the Plantar Flexor Muscles Revealed by the Vibration Method in Long-Distance Runners |
| 3. 学会等名 European College of Sports Sciences (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--------------------------------|
| 1. 発表者名 小田俊明 |
| 2. 発表標題 シン・骨格筋のバイオメカニクス |
| 3. 学会等名 岡山スポーツ医科学研究会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 榎本翔太, 小田俊明 |
| 2. 発表標題 膝蓋腱の部位特異的な材料特性が局所応力とその分布に与える影響 |
| 3. 学会等名 岡山スポーツ医科学研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Shantanu Sinha, Ryan Hernandez, Vadim Malis, T Oda, Usha Sinha |
| 2. 発表標題 Isometric Contractions of the Quadriceps muscle: Strain and Strain Tensor Mapping using Velocity Encoded Phase Contrast Imaging. |
| 3. 学会等名 International Society for Magnetic Resonance in Medicine (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 曾我部晋哉, 秋原悠, 小田俊明 |
| 2. 発表標題 中学生における膝アライメントの学年別・性別横断的比較 |
| 3. 学会等名 日本体力医学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 屋嘉部真央, 浦田達也, 齋藤壮馬, 松本壮流, 小田俊明 |
| 2. 発表標題 3歳5歳児における30m疾走の特徴 |
| 3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 三方怜, 齋藤壮馬, 松本壮流, 屋嘉部真央, 小田俊明 |
| 2. 発表標題 陸上競技跳躍選手における下腿の筋腱複合体の粘弾性 - 走幅跳選手と三段跳選手を比較して - |
| 3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 齋藤壮馬, 屋嘉部真央, 三方怜, 小田俊明 |
| 2. 発表標題 陸上競技短距離選手における力発揮時の筋腱複合体の粘弾性とステップ変数の関係 |
| 3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小西 康基, 上野 拓海, 齋藤 壮馬, 秋原 悠, 竹下 大介, 小田 俊明 |
| 2. 発表標題 高校生女子長距離走選手の力発揮時の下腿三頭筋における粘弾性と競技力との関係 |
| 3. 学会等名 日本体育学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 小田俊明, 上野拓海, 齋藤壮馬, 小西康基, 大沼勇人, 林陵平, 竹下大介 |
| 2. 発表標題 陸上競技 短距離ならびに中長距離の選手の 力発揮時における筋腱複合体の粘弾性 |
| 3. 学会等名 日本バイオメカニクス学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|----------------------------------|
| 1. 発表者名 小田俊明 |
| 2. 発表標題 筋腱複合体の粘弾性と中距離走パフォーマンス |
| 3. 学会等名 ランニング学会 (招待講演) |
| 4. 発表年 2021年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 小田俊明 | 4. 発行年 2023年 |
| 2. 出版社 メディカル・サイエンス・インターナショナル | 5. 総ページ数 480 |
| 3. 書名 スポーツと運動のバイオメカニクス (担当 並進運動学, 並進運動力学) | |

〔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 | | | |
|---------|-------------------------------------|--|--|--|
| フィンランド | Juvaskyla University | | | |
| フランス | Aix-Marseille Universite | | | |
| 米国 | University of California, San Diego | | | |