

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 4 日現在

機関番号：34411

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26702026

研究課題名(和文) ヒト身体運動における多様なアキレス腱の機能特性の解明

研究課題名(英文) Mechanical and functional roles of human Achilles tendon during dynamic movements

研究代表者

石川 昌紀 (ISHIKAWA, MASAKI)

大阪体育大学・体育学部・教授

研究者番号：20513881

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：身体運動でキーとなるアキレス腱張力とその振る舞いの直接測定とシミュレーションから、多様な条件下での筋腱の調整機序の解明を目指した。アキレス腱張力や、その長さ変化の振る舞いを超音波装置と動作分析を組み合わせ、直接測定した。その結果、腱の硬度や荷重量の違いは、接地後の筋活動量とそのタイミングに影響することが明らかとなった。東アフリカの長距離選手の筋腱・骨格の形態的特徴は、トップ選手だけがトレーニングによって獲得したわけではないことが明らかになった。また、断裂経験のあるアキレス腱、高齢者や左右脚で動作の異なるスポーツ競技では、アキレス腱の材質低下が腱断裂のリスク要因になる可能性が確認された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of the present study was to understand the modulation of muscle-tendon complex under variable conditions by direct measurement of Achilles tendon force and its length changes as well as the finite element simulation. The results clearly showed that: (1) tendon stiffness and load adjustments cannot regulate the pre-programmed muscle activation but affect the post-impact activation and its timing; (2) the specific musculoskeletal characteristics of lower-leg for elite-level Kenyan runners, who can utilize tendon elasticity, can be common feature among Kenyans rather than the results of the specific training adaptation of elite-level Kenyan runners; (3) muscle and tendon adapted to specific asymmetric movements and the repaired ruptured Achilles tendon cannot fully modulate functionally during the pre-programmed preparation phase of dynamic movements and this poor modulation to asymmetric muscle-tendon complex may be one of the risk factors for tendon rupture.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：アキレス腱 加齢 長距離走 アキレス腱スティフネス 競泳

1. 研究開始当初の背景

1970年代、動物の腱の弾性が身体運動の効率やパワー発揮に重要な役割を果たすことが発表されて以来、ヒト身体運動中、伸張され蓄えられた腱の弾性エネルギーを筋の短縮活動時にリリースし再利用する Elastic mechanics が提唱されてきた。これまで運動という筋肉の特性に関する研究が中心だったが、よりダイナミックな身体運動では、筋の何十倍もの収縮速度を産み出すことが可能な腱の貢献が重要となり、筋と腱の両面から身体運動の特性を捉えていく必要がある。近年、生体イメージング技術やアキレス腱張力の直接測定方法の進歩によって、摘出筋やシミュレーション研究では明らかにできない生体内部の筋腱の振る舞いが調査でき、多様な身体運動を可能にするヒト身体運動の骨格筋メカニクス研究が注目されている。

2. 研究の目的

本研究では、これまで一連の研究で明らかにしてきた身体運動中の筋肉の役割についての成果を踏まえ、キーとなる腱機能の解明を目指す。アキレス腱張力とその振る舞いを身体運動中の直接測定から、アキレス腱の振る舞いに関する計算モデルを構築する。さらに、多様な身体運動や加齢や外的環境変化に伴うアキレス腱と下腿の筋の振る舞いの調整機序の解明を目的とし、下記の3点について明らかにすることを旨とした：

- (1) 身体運動中、運動強度の変化に伴って神経・筋活動の調整が行われる。運動強度に依存した神経・筋腱の調整機序について明らかにする。
- (2) 様々なスポーツ競技の特異的な動作とそれらの筋腱や骨格などの形態や機能特性の関係、加齢に伴う神経・筋腱の形態や機能変化から、腱の弾性エネルギーの貯蔵と再利用における競技特性や加齢に伴う神経・筋腱の形態や機能低下の予防について検討する。
- (3) 荷重調整の可能な免荷装置を用いて、荷重量の変化に対する神経・筋腱の調整機序、加齢に伴う神経・筋腱の振る舞いの変化とそのメカニクスについて明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、オプティックファイバーを用いたアキレス腱張力の直接測定、その長さ変化の振る舞いを超音波装置と動作分析を組み合わせることで可能にした。

- (1) そこから得られるヒトの身体運動中のアキレス腱張力とその長さ変化の振る舞いから、アキレス腱断裂に関する有限要素シミュレーションによる計算モデルを構築した。
- (2) アキレス腱断裂経験者のアキレス腱の振る舞いの直接測定、そして断裂経験の多

い剣道家のアキレス腱の振る舞いを測定し、断裂リスク要因について検討した。また、さまざまな競技スポーツ選手の筋腱の形態特徴とそれらの機能的特性について検討した。

- (3) さらに、荷重をコントロールする免荷装置を用いて、外的環境変化に伴うアキレス腱と下腿の筋の振る舞いの応答変化からそれらの調整機序について考察した。
- (4) 高齢者と若年者のダイナミックなホッピング運動中の神経・筋腱の振る舞いの違いについて比較し、高齢者の特異的な神経・筋腱の振る舞いについて明らかにした。

4. 研究成果

本研究によって、腱の弾性利用における形態と機能的特性の役割について下記の点が明らかになった。

- (1) 腱のスティフネスの違いに関わらず、事前筋活動の程度は変わらず、逆に、接地後の短潜時筋活動量とそのタイミングが腱のスティフネスの影響を受け、弾性エネルギーの再利用に重要な影響をおよぼすことが明らかとなった。また、競技種目によって筋腱の形態が異なり、動作特性や弾性エネルギーの利用形態と関係する可能性が示唆された。更に、衝撃の少ない泳運動においても、泳速度の増加に伴い、筋活動を調整し腱の弾性エネルギーの利用を増加させていることが明らかとなった。
- (2) 世界の長距離トップランナーを輩出する東アフリカ地域の人々は、日本人と比較し小学校中学年から、筋腱・骨格の形態に違いが認められ始め、トップランナーだけがトレーニングによって長距離走向きの特別な筋腱・骨格形態を獲得したわけではないことが明らかになった。
- (3) ケニアの長距離トップランナーに見られる筋腱・骨格の形態的特徴が走行中の筋活動を減少させる効果があり、ランニング効率を高めることが示唆された。
- (4) 左右脚で異なる剣道特有の動作やトレーニング経験によって、蹴り足の筋肥大に対し、アキレス腱の材質低下が大きく、アキレス腱断裂のリスク要因になる可能性が確認された。
- (5) 断裂経験のあるアキレス腱は、リハビリ後もそれらの材質が回復しておらず、ダイナミックな運動中、弾性エネルギーの貯蔵量に対して効果的に再利用できないことが明らかとなった。また材質低下している断裂経験のあるアキレス腱の再断裂リスク要因には、過剰なアキレス腱の伸張が関係する可能性があり、運動中、過剰な伸張を認知できていないことと関係しているかもしれない。
- (6) 加齢に伴い柔らかくなる腱によって、ダイナミックな運動における高齢者特有の

神経系の調整活動だけでなく、特異的な筋腱の振る舞いが観察された。また、高齢者のホッピングトレーニングによって、腱の伸び縮みの活動範囲が安定し、若年者と同様な弾性利用が可能になることが示唆された。

- (7) 等尺性筋収縮時のアキレス腱の伸張は個体差に関わらず、近位 20-50%部位に集中することが有限要素シミュレーションによって明らかになり、アキレス腱断裂部位と一致することが確認された。
- (8) 免荷に対して共同筋間で異なる調整がなされていることが明らかとなり、免荷条件の違いによる筋の特異的な調整機序が存在することが示唆されたが、腱の機能との関係性については明らかにできなかった。

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)

[雑誌論文](計 11 件)

1. Oda H, Sano K, Kunimasa Y, Komi PV, Ishikawa M. Neuromechanical modulation of Achilles tendon during bilateral hopping in unilateral Achilles tendon ruptured subject over 1 year after surgery. Sports Medicine, In Press. DOI: 10.1007/s40279-016-0629-3 (査読有)
2. 国正陽子, 佐野加奈絵, 久野峻幸, 牧野晃宗, 小田俊明, Nicol C, Komi PV, 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 55: 1-9, 2017. (査読有)
3. 牧野晃宗, 岩崎正徳, 国正陽子, 久野峻幸, 佐野加奈絵, 村元辰寛, 村上雷多, 神崎浩, 小田俊明, 石川昌紀. 剣道経験年数の違いに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 61:639-649, 2016. <http://doi.org/10.5432/jjpehss.16012> (査読有)
4. Sano K, Akiyama M, Hoffrén-Mikkola M, Ito A, Komi PV, Ishikawa M. Age-specific neuromuscular interaction during elderly habitual running. Acta Physiol. 215(2):79-88, 2015. DOI: 10.1111/apha.12550 (査読有)
5. 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(1):2-10, 2015. (査読有)
6. Sano K, Nicol C, Akiyama M, Kunimasa Y, Oda T, Ito A, Locatelli E, Komi PV, Ishikawa M. Can measures of muscle-tendon interaction improve our understanding of the superiority of Kenyan endurance runners? Eur J Appl Physiol. 115(4):849-859, 2015. DOI: 10.1007/s00421-014-3067-7 (査読有)
7. Hoffrén-Mikkola M, Ishikawa M, Rantalainen T, Avela J, Komi PV. Neuromuscular mechanics and hopping training in elderly. Eur J Appl Physiol. 115(5):863-877, 2015. DOI: 10.1007/s00421-014-3065-9 (査読有)
8. 新井彩, 石川昌紀, 浦田達也, 国正陽子, 佐野加奈絵, 田中ひかる, 伊藤章. 陸上短距離選手と競泳選手のドロップジャンプ接地前後の筋束長と筋活動の変化. 体力科学 64(1):165-172, 2015. DOI: 10.7600/jspfsm.64.165 (査読有)
9. 小田啓之, 佐野加奈絵, 国正陽子, 石川昌紀. 立位での異なる足関節底屈位におけるヒラメ筋外部アキレス腱伸張率の算出. 大阪体育学研究 53: 1-9, 2015. (査読有)
10. 石川昌紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 小田俊明, Komi PV. 肉体的特徴から東アフリカ陸上競技選手の走りの特徴を探る. ランニング研究 26:75-80, 2015. (査読有)
11. 石川昌紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 小田俊明. 中・長距離走に活かす筋腱のメカニクスとトレーニングの可能性. 特集「トレーニングに活かすバイオメカニクス知見」バイオメカニクス研究 18(3):170-175, 2014. (査読有)

[学会発表](計 35 件)

1. Oono N, Sano K, Kunimasa Y, Makino A, Nicol C, Komi PV, Ishikawa M. Neuromuscular responses to unweighting at standing. XXXI Congress of the International Society of Biomechanics, 2017 年 7 月 23-27 日, Brisbane, Australia.
2. Kijima K, Ishizuka H, Okamoto D, Karasuno R, Urata T, Ishikawa M, Ito A. Muscle activity pattern in specific exercise for sprint runners. 22nd Annual Congress of European College of Sport Science, 2017 年 7 月 5-8 日,

Metropolis Ruhr, Germany.

3. **Ishikawa M**, Sano K, Kunimasa Y, **Nicol C**, **Komi PV**. Musculoskeletal characteristics and function during running for top level endurance runners. 22th annual Congress of the European College of Sport Science, 2017年7月5-8日, Metropolis Ruhr, Germany. (招待講演)
4. Kunimasa Y, Sano K, Hisano T, Makino A, Oda T, **Nicol C**, **Komi PV**, **Ishikawa M**. Musculoskeletal characteristics for elite distance runners and non-competitive Kenyans. 22th Annual Congress of European College of Sport Science, 2017年7月5-8日, Metropolis Ruhr, Germany.
5. **Nicol C**, **Komi PV**, **Ishikawa M**. The adaptive SSC: From the fatiguing runs on earth to the rebounds on mars. 35th International Conference on Biomechanics in Sports, 2017年6月14-18日, Koln, Germany. (招待講演)
6. 大野直紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗, **石川昌紀**. 免荷後の再荷重時における神経筋腱の応答. 第52回日本理学療法学会大会, 2017年5月12-14日, 幕張メッセ, 東京ベイ幕張ホール.
7. 佐野加奈絵, **石川昌紀**. 水中ドルフィンキックにおける推進力獲得のための筋腱動態の解明. 大阪体育学会第55回大会, 2017年3月12日, 関西大学, 大阪.
8. 国正陽子, 佐野加奈絵, 久野峻幸, 牧野晃宗, 小田俊明, **Nicol C**, **Komi PV**, **石川昌紀**. 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. 第71回日本体力医学会大会, 2016年9月23-25日, 盛岡市民文化ホール・いわて県民交流センター, 岩手.
9. 大野直紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 久野峻幸, 牧野晃宗, **石川昌紀**. 荷重量変化に対する神経筋腱の応答. 日本体育学会第67回大会, 2016年8月25日, 大阪体育大学.
10. **Ishikawa M**, Kunimasa Y, Sano K, Hisano T, Makino M, Oda T, Toyooka J, **Nicol C** and **Komi PV**. Musculoskeletal characteristics for East-African top distance runners. 34th International conference on Biomechanics in Sports, 2016年7月18-22日, Tsukuba, Japan.
11. Cabri J, **Nicol C**, **Ishikawa M**, Chavet P. Lower body positive pressure running: a tool for early return to sport? 21st annual Congress of the European College of Sport Science, 2016年7月6-9日, Vienna, Austria. (招待講演)
12. **Ishikawa M**, Sano K, Kunimasa Y, Makino A, **Komi PV**. Short-term influence of unweighting on muscle fascicle loading. 21st annual Congress of the European College of Sport Science, 2016年7月6-9日, Vienna, Austria. (招待講演)
13. Sano K, Makino A, Kunimasa Y, Hiroishi T, Ozaki R, Miyashita A, Sakamoto T, **Ishikawa M**. Knee hyperextension caused by the up-beat dolphin-kick movement. 21st annual Congress of the European College of Sport Science, 2016年7月6-9日, Vienna, Austria.
14. 牧野晃宗, 上野薫, 国正陽子, 佐野加奈絵, 貴嶋孝太, **石川昌紀**. 統括的パフォーマンス研究・サポート拠点センターの取り組み. 第13回JISSスポーツ科学会議, 2016年11月29日, 味の素ナショナルスポーツセンター, 東京.
15. **Ishikawa M**. Neuro-Musculoskeletal characteristics for East-African top distance runners. Denmark-Japan symposium JISS, 2016年5月12日, Japan Institute of Sports Sciences, Japan. (招待講演)
16. 田中ひかる, 新井彩, 浦田達也, 国正陽子, 佐野加奈絵, **石川昌紀**. 異なるスポーツ競技選手における腱の弾性利用. 大阪体育学会第54回大会, 2016年3月13日, 和歌山大学.
17. 牧野晃宗, 国正陽子, 久野峻幸, 佐野加奈絵, 神崎浩, **石川昌紀**. 競技スポーツ選手の腓腹筋・アキレス腱の力学的特性. 大阪体育学会第54回大会, 2016年3月13日, 和歌山大学.
18. 佐野加奈絵, 国正陽子, **石川昌紀**. クロスカントリースキー運動における滑動作中の筋腱動態の解明. 大阪体育学会第54回大会, 2016年3月13日, 和歌山大学.
19. **石川昌紀**, 信江彩加, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗. 身体運動中の筋機能を探るBモード超音波イメージング法. オーガナイズドセッション【可視化され

- た生体内情報のヘルス&スポーツサイエンス応用】スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015. 日本機械学会, 2015年10月30日-11月1日, 立命館大学。(招待講演)
20. **石川昌紀**, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗, 久野峻幸, 小田俊明, Komi PV. 身体運動における東アフリカランナーの優れた筋骨格系について. 第 69 回日本人類学会大会, 2015年10月13日, 産業技術総合研究所, 東京.
 21. **石川昌紀**, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗, 秋山真信, 信江彩加, 小田俊明, Komi PV. マスターズ陸上競技選手の神経・筋機能の特徴. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015年9月18-20日, 和歌山県民文化会館・ホテルアパローム紀の国, 和歌山.
 22. 貴嶋孝太, 福田厚治, **石川昌紀**, Komi PV, 伊藤章. マスターズ陸上競技選手のスタートダッシュ能力. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015年9月18-20日, 和歌山県民文化会館・ホテルアパローム紀の国, 和歌山.
 23. 福田厚治, 貴嶋孝太, 伊藤章, **石川昌紀**, Komi PV. 加齢に伴うマスターズ陸上競技選手の疾走速度と走動作の変化. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015年9月18-20日, 和歌山県民文化会館・ホテルアパローム紀の国, 和歌山.
 24. 佐野加奈絵, **石川昌紀**, Hoffrén-Mikkola M, Komi PV. ダイナミックなジャンプ運動の介入による高齢者の神経筋動態の変化. 第 70 回日本体力医学会大会, 2015年9月18-20日, 和歌山県民文化会館・ホテルアパローム紀の国, 和歌山.
 25. 新井彩, **石川昌紀**, 浦田達也, 国正陽子, 佐野加奈絵, 田中ひかる, 伊藤章. ドロップジャンプの筋-腱の振る舞いに影響を及ぼす筋活動の役割. 第 66 回日本体育学会大会, 2015年8月25-27日, 国士舘大学, 東京.
 26. 国正陽子, 佐野加奈絵, 久野峻幸, 牧野晃宗, 小田俊明, **石川昌紀**. 東アフリカのトップランナーの下腿の形態は日本人と異なるのか? 第 66 回日本体育学会大会 2015年8月25-27日, 国士舘大学, 東京.
 27. 牧野晃宗, 佐野加奈絵, 秋山真信, 信江彩加, 国正陽子, 久野峻幸, **石川昌紀**. アキレス腱長の可塑性について. 第 66 回日本体育学会大会, 2015年8月25-27日, 国士舘大学, 東京.
 28. Komi PV, **Ishikawa M**, Nicol C, Havas E. Neuromuscular biomechanics, a good partner of motor control? The ISB Biomechanics and Motor Control Working Group 2nd Annual Meeting, 2015年7月12日, Glasgow, UK. (招待講演)
 29. Kunimasa Y, Sano K, Makino A, Akiyama M, Ito A, Komi PV, **Ishikawa M**. Characteristics of muscle and tendon mechanical properties for sprinters and swimmers. 20th Annual Congress of European College of Sport Science, 2015年6月24-27日, Malmö, Sweden.
 30. Hisano T, Kusumoto K, Sano K, Makino A, Maitani A, Kunimasa Y, Akihara Y, Oda T, **Ishikawa M**. Musculotendinous mechanical properties and lower limb morphology in track and field athletes. 20th Annual Congress of European College of Sport Science, 2015年6月24-27日, Malmö, Sweden.
 31. Oda T, Toyoda Y, Hisano T, Akihara Y, Kunimasa Y, Sano K, Kusumoto K, Nicol C, Komi PV, **Ishikawa M**. Mechanical properties of triceps surae muscle-tendon unit in Kenyan and Japanese distance runners. The 1st Asia-Pacific Conference on Coaching Science, 2014年7月11-13日, Sapporo, Japan.
 32. Hisano T, Kusumoto K, Akihara Y, Iwasaki M, Edamatsu C, **Ishikawa M**, Oda T (2014) Morphological characteristics of lower limb in college track and field athletes. The 1st Asia-Pacific Conference on Coaching Science, 2014年7月11-13日, Sapporo, Japan.
 33. **Ishikawa M**, Sano K, Kunimasa Y, Nicol C, Oda T, Ito A, Komi PV. Tendon elastic energy utilization in elite African runners. 7th World Congress of Biomechanics, 2014年7月6-11日, Massachusetts, USA.
 34. 久野峻幸, 楠本一樹, 秋原悠, 米谷綾, 小田俊明, **石川昌紀**. 身体形態および腱形状が長距離走パフォーマンスに及ぼす影響. 第 25 回兵庫体育・スポーツ科学学会大会, 2014年5月31日, 兵庫教育大学神戸ハーバーランドキャンパス.
 35. 小田俊明, 豊田洋平, 久野峻幸, 楠本一

樹, **石川昌紀**. ケニア人陸上競技中長距離ランナーの下腿部筋腱の形態的・力学的特徴. 第 25 回兵庫体育・スポーツ科学学会大会, 2014 年 5 月 31 日, 兵庫教育大学神戸ハーバーランドキャンパス.

〔図書〕(計 1 件)

1. **石川昌紀**, 佐野加奈絵. “マスタース競技者のトレーニングは若い選手と同じで良いか?” もっとなっとく使えるスポーツサイエンス. 征矢 英昭, 本山 貢, 石井 好二郎 (編集), 講談社. (2017/4/21), p52-53. ISBN-13: 978-4062806640

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況 (計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

日本学術振興会

石川昌紀

「ひらめき ときめきサイエンス」平成 29 年度プログラム「走りを科学する。自分の筋骨格の特徴を調べ、短・長距離走能力アップ!」平成 29 年 8 月 5 日開催

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石川 昌紀 (ISHIKAWA Masaki)
大阪体育大学大学院スポーツ科学研究科・教授
研究者番号: 20513881

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者

KOMI V Paavo
University of Jyväskylä, Finland, Ph.D.
Prof.

NICOL Caroline
Aix-Marseille University, France, Ph.D.
Prof.

佐野加奈絵 (SANO Kanae)
大阪体育大学大学院
助手
研究者番号: 30762273

牧野晃宗 (MAKINO Akitoshi)
大阪体育大学
研究員

国正陽子 (KUNIMASA Yoko)
大阪体育大学大学院
研究員

小田俊明 (ODA Toshiaki)
兵庫教育大学
准教授
研究者番号: 10435638

竹内秀樹 (TAKEUCHI Hideki)
東京大学大学院工学系研究科
特任研究員

佐々木明 (SASAKI Akira)
東京大学大学院工学系研究科
特任研究員

森北育宏 (MORIKITA Ikuhiro)
大阪体育大学
教授