

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：34411

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2019

課題番号：15KK0261

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（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）Diverse perspectives of human muscle-tendon function during human locomotion
(Fostering Joint International Research)

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） 10,600,000円

渡航期間： 6ヶ月

研究成果の概要（和文）：身体運動における神経・筋・腱組織の制御メカニクスと競技スポーツ種目選手の筋・腱・骨格の形態的な特徴について調査した結果、トップクラスの長距離陸上競技選手の硬い足首は、腱の硬さではなく筋の硬さがランニング効率を高めていた点、逆に、短距離陸上競技選手の筋やアキレス腱の硬さには競技力と関係性が認められず、ハムストリングス近位の大きさが競技力と関係していた点、重力の影響が小さい競泳クロスカントリースキーでは、筋の共縮活動を利用して関節を硬くし腱の弾性エネルギーを利用していた点、パラアスリートの特異的な形態、アキレス腱断裂経験者のアキレス腱の特性など、ヒトの筋腱の形態における可塑性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、衝撃の少ない水泳やスキーにおいても、筋の共縮活動によって腱に弾性エネルギーを蓄え、再利用することで運動効率を高めることがわかり、トレーニングの方向性を示した。また、アキレス腱断裂経験者の再断裂リスクが腱の柔らかさに関係していることが明らかになり、パラアスリートの腱の硬さが後天的な適応で特異的に変化したことから、トレーニングによって腱の硬さを後天的に変えられる可能性があり、リハビリテーションのトレーニングの再考が求められる。低重力環境では、筋が伸び、腱が短くなることが明らかとなり、将来の宇宙環境など長期的な低重力環境による神経・筋腱の適応について、今後の研究の進展が期待される。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this project was to investigate the relationship between neuromuscular system and sport-specific muscle-tendon properties. The results clearly showed that the stiff ankle joints of elite distance runners related to running economy primarily result from the muscle stiffness. Inversely, sprint performance was not related to their muscle and Achilles tendon stiffness but the size of the proximal parts of the hamstring muscles. In the conditions under the low impact contacts like swimming and cross-country ski, the co-activation of the triceps surae muscles can play important roles to enhance the movement efficiency by utilizing the elastic energy. These findings suggest that the sport-specific neuromuscular function and properties can play important roles to enhance their performance and be acquired by the specific adaptation.

研究分野：スポーツ科学

キーワード：アキレス腱 超音波 骨格筋 滑る 泳ぐ 運動効率

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

身体運動能力の可能性と限界についての研究では、スポーツパフォーマンスの極みとなる様々な競技スポーツにおけるトップ選手の身体能力を調査対象とすることが必要不可欠である。各競技種目のトップアスリートの遺伝的特徴についての研究へ暗雲が立ち込める中 (Pitsiladis et al. Br J Sports Med 2013 47:550-5)、“どのような後天的環境要因が、競技スポーツ種目に特化した筋・腱・骨格の形態的特徴の獲得につながるのか”を明らかにする研究の重要性が増している。特に、これまでは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生み出すことが可能な腱の貢献が重要となり、衝撃ダメージや外乱から組織を保護する機能や、身体の安定性の制御など、腱の多様な機能特性の解明が求められる。

身体運動に関する骨格筋研究は、MRI や超音波装置など研究機器の高額化や複雑・高度化によって、研究室単独では、最先端の研究においてイニシアティブを取っていくのは厳しい状況にある。世界的にみても、欧米だけでなく北欧でも、複数の大学研究グループがネットワークを形成し、優れた人材の確保・育成と同時に、組織的に研究課題に対してアプローチすることで成果を挙げている。単科大学である本学においても、境界研究領域の知識や設備の強みを活かしたオリジナリティある戦略的骨格筋研究のネットワーク形成が必要不可欠である。優れた人材の獲得競争が世界的に激化する中、国際的な研究ネットワークの構築は、優秀な国内外の研究者の育成・確保につながることから、2020年の東京オリンピック・パラリンピックで選手やチームをサポートできる研究員の養成が期待できる。

2. 研究の目的

走・跳・泳を可能とするヒトの筋腱の働きとその神経系の調節機序には、筋腱・骨格の形態的特徴が神経系の調整よりもパフォーマンスに影響を及ぼす可能性が高い。特に、筋の長さや、腱の長さ・硬さ、アキレスモーメントアームの長短による運動動作への影響は大きく、そのメカニクスと、それらの可塑性やトレーナビリティが今後の検討課題となっている。そこで本研究では、衝撃を利用して腱弾性エネルギーを利用する走・跳運動と比較して、衝撃の少ないヒト特有の運動である泳・滑運動において運動効率やパフォーマンス発揮を高める筋腱の機能的特徴とその神経系の調節機序について明らかにする。さらに、それらの機能的な動作特徴と筋腱・骨格の形態的特徴の関係、特異的な環境下である低重力環境における筋腱の形態的な応答、パラリンピアン筋腱・骨格に後天的な形態変化が起きているのかを明らかにし、機能と形態の両面と、特殊環境下による後天的な適応からヒトの骨格筋メカニクスについて解明していく。

3. 研究の方法

トレーニングに関する研究では、一般人を対象とした筋腱のトレーニング研究に精通しているドイツの Arampatzis 教授に協力を仰ぎ、走・跳・泳運動選手の筋・腱の動態特徴を明らかにし、筋・腱のトレーニング介入実験における研究デザイン・解析方法について検討する。この研究を足がかりに、走・跳・泳以外の運動や、発育発達から加齢に対するトレーニング研究などにも応用していく。泳・滑運動に関する研究では、Linnamo 教授のいる Vuokatti Sport Institute の 1.2km の研究用の室内スキートンネルと、寒冷環境下での動作解析や筋電図測定、スキーのキック力の測定が可能なシステムを利用する。我々のポータブル超音波装置を用いた筋腱動態測定をスキー動作測定に導入することで、スキー中の動作、筋活動とキック力測定に加え、筋・腱動態の測定を実施する。また、泳・滑運動では、Komi 教授の協力を仰ぎ、超音波装置を用いて泳者とスキーヤーの筋・腱・骨格の形態測定から泳ぐ・滑るに特化した競技選手の筋腱・骨格の形態的特徴を明らかにする。これらの機能と形態の両面からの測定を通して、泳ぐ・滑る運動における骨格筋メカニクスとその神経系の調節機序の解明に挑む。さらに、重力負荷軽減による神経・筋・腱機能の調整機序の解明を試み、長期の有人宇宙活動の可能性と宇宙から帰還後の効果的な回復トレーニングについて検証する。

4. 研究成果

一連の本研究で得られた成果は以下の通りである：(1) トップクラスの長距離陸上競技選手でみられた硬い足首について、腱の硬さが重要とされてきた従来の研究とは異なり、選手自身の筋の硬さがランニング効率を高める上で重要であることを明らかにし、近年のマラソンの高速化に対応するためのトレーニングの方向性を示すことができた。(2) 一方、短距離陸上競技選手の筋やアキレス腱の硬さには競技力との関係性が認められず、股関節伸展筋であるハムストリングス筋群でみられた近位部の大きさが競技力と関係していたことにより、その効果的なトレーニング方法を示した。(3) 衝撃の小さい競泳や氷上で行うクロスカントリースキーでは、衝撃力を腱の弾性エネルギーとして蓄えて、それを再利用して運動効率を高める地上での運動とは筋の動態が異なり、競泳のドルフィンキックでは、筋の共縮活動で長い筋を短縮させることで関節を硬くし、腱に弾性エネルギーを蓄えて、それを再利用することで運動効率を高めている可能性を示した。また、クロスカントリースキーでは、グリップワックスの抵抗を短時間で大きな筋張力に変換することで腱の弾性エネルギーを蓄えていることを明らかにした。加えて、(4) 片足義足のパラアスリートでは、義足を上手く使いこなすために健常脚よりも義足側の下肢の筋腱に

発達がみられていたことにより、義足利用に対する特異的な筋腱の形態適応が起きている可能性を示すことができた。(5)アキレス腱断裂経験者のアキレス腱の再断裂リスクは、アキレス腱の柔らかさが急激な伸長量の増加を誘発することで高まり、再断裂を生じさせている可能性が示された。(6)牽引による低重力下では、筋が伸長しアキレス腱が短縮する形態変化が確認された。一般的に牽引されると負荷が減少し運動強度が低下すると考えられるが、牽引による低重力下では、衝撃力を利用できない分、筋の仕事量が増加することで運動強度が逆に高まり、運動効率が増加することが示され、身体運動における腱の弾性エネルギーの利用が運動効率を高める上で重要であることが確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件／うち国際共著 4件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 上野薫, 前濱良太, 国正陽子, 牧野晃宗, 佐野加奈絵, 貴島孝太, Paavo V Komi, 石川昌紀	4. 巻 67
2. 論文標題 陸上短距離選手におけるハムストリングス各筋内の筋横断面積の形態分布の特徴と競技力との関係	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 体力科学	6. 最初と最後の頁 383-391
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.7600/jspfsm.67.383	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 新井彩, 石川昌紀, 伊藤章	4. 巻 12
2. 論文標題 Stretch-shortening cycle運動における筋活動特性	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 陸上競技研究	6. 最初と最後の頁 2-11
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 貴嶋孝太, 浦田達也, 石川昌紀	4. 巻 56
2. 論文標題 短距離走選手のための機能的なトレーニングエクササイズ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 大阪体育学研究	6. 最初と最後の頁 77-88
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 貴嶋孝太, 島崎祐里, 福田厚治, 石川昌紀, 伊藤章	4. 巻 219
2. 論文標題 国内女子ジュニア短距離選手の疾走技術検討のための事例的研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of training science for exercise and sport	6. 最初と最後の頁 237-246
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 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	4. 巻 55
2. 論文標題 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.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 大阪体育学研究	6. 最初と最後の頁 1-9
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 該当する

1. 著者名 Oda H, Sano K, Kunimasa Y, Komi PV, Ishikawa M	4. 巻 47
2. 論文標題 Neuromechanical modulation of Achilles tendon during bilateral hopping in unilateral Achilles tendon ruptured subject over 1 year after surgery.	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Sports Medicine.	6. 最初と最後の頁 1221-1230
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s40279-016-0629-3	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 兒玉友, 久野峻幸, 佐野加奈絵, 石川昌紀, 小田俊明	4. 巻
2. 論文標題 日本代表候補パラバドミントン立位クラス男子選手の形態特性	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 アダプテッド・スポーツ科学	6. 最初と最後の頁 In press
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 Sano K, Sakamoto T, Nishimura R, Danno Y, Komi PV, Ishikawa M	4. 巻
2. 論文標題 Muscle-tendon interaction during human dolphin-kick swimming.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Front. Physiol	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fphys.2019.01153	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30件(うち招待講演 8件/うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Ishikawa M, Kunimasa Y, Makino A, Kitano Y, Sano K
2. 発表標題 Specific musculoskeletal characteristics for runners with and without running-specific prostheses
3. 学会等名 International Research Forum on Biomechanics of Running-specific Prostheses (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石川昌紀
2. 発表標題 柔軟性の受難
3. 学会等名 第12回関西アスレティックトレーナーフォーラム(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ishikawa M
2. 発表標題 Neuromuscular modulation and musculoskelton specifics for sport athletes.
3. 学会等名 International Symposium of Sports Medical Science for Persons with Impairments in Wakayama (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018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 国正陽子, 佐野加奈絵, 牧野晃宗, 上野薫, 貴嶋孝太, 村上雅俊, 石川昌紀.
2. 発表標題 競技特異的な動作によるヒトの腱形態適応の可能性
3. 学会等名 日本体育学会第69回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Oda T, Hisano T, Akihara Y, Kusumoto K, Kodama Y, Ishikawa M
2. 発表標題 Change in mechanical properties of triceps surae muscle-tendon unit and race performance after 1 year in well trained distance runners.
3. 学会等名 36th International society of biomechanics in sports conference (国際学会)
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kunimasa Y, Sano K, Makino A, Kamino K, Ohnuma H, Suzuki Y, Ishikawa M.
2 . 発表標題 Characteristics of musculoskeletal properties of the lower limb related to running economy and performance in highly-trained Japanese long-distance runners.
3 . 学会等名 8th World Congress of Biomechanics, (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Sano K, Danno Y, Ishikawa M
2 . 発表標題 Neuromuscular characteristics during dolphin-kick swimming and its functional implication of elastic utilization.
3 . 学会等名 23rd annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Kamino K, Kunimasa Y, Makino A, Sano K, Kijima K, Komi PV, Ishikawa M.
2 . 発表標題 Specific distribution of hamstring muscles for sprint runners and its functional implication for performance improvement.
3 . 学会等名 23rd annual Congress of the European College of Sport Science (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 Ishikawa M, Komi PV.
2 . 発表標題 Functional and neuromuscular characteristics with advancing age and disuse.
3 . 学会等名 4th International Autumn School on Movement Science (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1. 発表者名 Nicol C, Komi PV, Ishikawa M
2. 発表標題 The adaptive SSC: From the fatiguing runs on earth to the rebounds on mars.
3. 学会等名 35th International Conference on Biomechanics in Sports (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ishikawa M, Sano K, Kunimasa Y, Nicol C, Komi PV
2. 発表標題 Musculoskeletal characteristics and function during running for top level endurance runners
3. 学会等名 22th annual Congress of the European College of Sport Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kunimasa Y, Sano K, Hisano T, Makino A, Oda T, Nicol C, Komi PV, Ishikawa M
2. 発表標題 Musculoskeletal characteristics for elite distance runners and non-competitive Kenyans.
3. 学会等名 22th Annual Congress of European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐野加奈絵, 石川昌紀
2. 発表標題 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
3. 学会等名 大阪体育学会第55回大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐野加奈絵, 牧野晃宗, 国正陽子, 上野薫, 水野沙洸, 後藤一成, 石川昌紀
2. 発表標題 ランニング中の3軸加速度変化による下肢の振動衝撃変化
3. 学会等名 第72回日本体力医学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上野薫, 石川昌紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗
2. 発表標題 競技種目によるハムストリングス筋群の特徴 競泳・陸上選手に着目して
3. 学会等名 第68回日本体育学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 国正陽子, 佐野加奈絵, 牧野晃宗, 上野薫, 石川昌紀
2. 発表標題 陸上短距離選手と競泳選手におけるアキレス腱の形態的・力学的特性
3. 学会等名 第68回日本体育学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大野直紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗, 石川昌紀
2. 発表標題 免荷後の再荷重時における神経 筋腱の応答
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ono N, Sano K, Kunimasa Y, Makino A, Nicol C, Komi PV, Ishikawa M
2. 発表標題 Neuromuscular responses to unweighting at standing.
3. 学会等名 XXXI Congress of the International Society of Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kijima K, Ishizuka H, Okamoto D, Karasuno R, Urata T, Ishikawa M, Ito A
2. 発表標題 Functional swing-support leg strength exercises for sprint runners
3. 学会等名 22nd Annual Congress of European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kunimasa Y, Sano K, Hisano T, Makino A, Oda T, Nicol C, Komi PV, Ishikawa M.
2. 発表標題 Musculoskeletal characteristics for elite distance runners and non-competitive Kenyans
3. 学会等名 22th Annual Congress of European College of Sport Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 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
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第71回 日本体力医学会大会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Nicol C, Ishikawa M
2. 発表標題 Neural inhibition versus damage effects: how can they be distinguished
3. 学会等名 24th annual Congress of the European College of Sport Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019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 European College of Sport Science (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 常石大夢, 大橋廉, 北野友梧, 国正陽子, 貴嶋孝太, 石川昌紀
2. 発表標題 アシステッド走による超高速疾走中の走メカニクス
3. 学会等名 大阪体育学会第58回大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北野友梧, 常石大夢, 大橋廉, 国正陽子, 石川昌紀
2. 発表標題 等張性負荷装置を用いた高速での牽引負荷走の有用性
3. 学会等名 大阪体育学会第58回大会
4. 発表年 2020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 上野薫, 石川昌紀, 佐野加奈絵, 国正陽子, 牧野晃宗
2. 発表標題 陸上・競泳選手のハムストリングス筋群の特異的な太さについて
3. 学会等名 大阪体育学会第55回大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 征矢 英昭、本山 貢、石井 好二郎（編集）、石川昌紀、佐野加奈絵（分担）	4. 発行年 2017年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 208
3. 書名 もっとなっとく 使えるスポーツサイエンス	

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 Vibration device and Body stimulation method using same technical field	発明者 Ouchi S, Ishikawa M, Makino A	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、JP-P2019-039241	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

ひらめき ときめきサイエンス～ようこそ大学の研究室へ～KAKENHI (2017, 2019, 2020年度)

石川昌紀 令和元年度 トップアスリートのサポート・測定から考えるヒトの身体能力の可能性と限界について 2010年1月13日。大阪体育大学 教員免許状更新講習会

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
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	(Arampatzis Admmantios)	フンボルト大学・Training & Movement Sciences・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	(Komi Paavo)	ユバスキュラ大学・Likes Research Center・Professor	
主たる渡航先の主たる海外共同研究者	(Nicol Caroline)	マルセイユ大学・Faculte des Sciences du Sport・Associate Professor	
その他の研究協力者	佐野 加奈絵 (Sano Kanae) (30762273)	森ノ宮医療大学・講師 (34448)	
その他の研究協力者	国正 陽子 (Kunimasa Yoko) (20804355)	大阪体育大学・助手 (34411)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
その他の研究協力者	貴嶋 孝太 (Kijima Kota) (90585366)	大阪体育大学・准教授 (34411)	