

区分	課程
----	----

(論文 様式)

下腿の骨格・筋腱形態の発育過程における変化と
ケニアのエリート陸上中長距離選手の特徴

スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻

2 1 4 D 0 3

国 正 陽 子

研 究 指 導

石 川 昌 紀 准教授

Abstracts

The superior success of Kenyan middle- and long-distance runners has stimulated large amount of interest to explore valid reasons for their performance. The purpose of the present study was to examine 1) musculoskeletal characteristics of lower limb in elite Kenyan runners (ELITE) and 2) relationships between their performance and musculoskeletal characteristics, and furthermore, to examine 3) the specificity of the musculoskeletal characteristics in ELITE by comparing the musculoskeletal characteristics of lower-leg between ELITE and other Kenyan runners as well as non-athletic population. World-class elite and national level Kenyan middle- and long-distance runners, national level Japanese runners, and Kenyan and Japanese general population in children and adults participated in this study. Their Achilles tendon (AT) length, its cross-sectional area (CSA_{AT}), the medial gastrocnemius (MG) fascicle length, and pennation angle as well as AT moment arm (MA_{AT}) were measured by using musculoskeletal ultrasonography. The results clearly showed the long AT and MA_{AT} , and the short MG fascicles for ELITE. In addition, the running performance for high level distance runners was positively related to the MA_{AT} . In the comparison between ELITE and other Kenyan runners as well as non-athletic population, however, the significances for these parameters disappeared. In addition, the musculoskeletal characteristics in the late adolescent Kenyan children appeared similar to those in ELITE. When the comparison between Kenyan and Japanese non-athletics, Kenyans showed long AT and MA_{AT} , and short MG fascicle from childhood. In conclusion, the results suggest that specific musculoskeletal characteristics of lower-leg in ELITE can be the racial (physiological) characteristics rather than the results of the training adaptation.

概要

ケニア人陸上中長距離選手の国際大会における活躍は目覚ましい。彼らの高い走能力には多くの研究者が着目し、様々な観点から調査・測定が行なわれているが、彼らの強さの要因は明らかになっていない。そこで本研究では、1) エリートケニア人陸上中長距離選手（エリート選手）を含むケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴を明らかにすること、2) エリート選手の高い走能力に関係する下腿骨格・筋腱形態の特徴を抽出すること、3) エリート選手の下腿骨格・筋腱形態をケニアの一般人と比較し、エリート選手の特徴を抽出することと、4) ケニア人の発育に伴う下腿骨格・筋腱形態の特徴を日本人と比較し、地域性について検討することを目的とした。世界トップクラスから一般レベルのケニア人陸上中長距離選手と日本人陸上中長距離選手、0歳～成人までのケニアと日本の一般男性を対象にアキレス腱と内側腓腹筋形態、足部骨格形態の測定を行なった。その結果、競技力の高いエリート選手ほど、アキレス腱とそのモーメントアームは長く、腓腹筋の筋束は短かった。しかしながら、ケニア人のエリート選手を比較対象として、ケニア人の一般の陸上中長距離選手と一般成人男性の上記の項目について比較した結果、3群間に有意な違いは認められなかった。また、ケニア人と日本人の発育段階における下腿の形態を比較した結果、ケニア人はすべての発育段階でアキレス腱は長く、腓腹筋の筋束は短く、アキレス腱モーメントアームは青年期後期で長かった。以上のことから、エリートケニア人選手の高い走能力に関係していた長いアキレス腱とアキレス腱モーメントアーム、そして短い筋束は、彼らがトレーニングによって獲得した後天的な特徴ではなく、ケニア人の遺伝的または環境による特徴であることが明らかとなった。

本論文は、以下の論文に基づき作成されたものである。

1. Kunimasa Y, Sano K, Oda T, Nicol C, Komi PV, Locatelli E, Ito A, Ishikawa M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports* 24: e269–e274.
2. 国正陽子, 佐野加奈絵, 久野峻幸, 牧野晃宗, 小田俊明, Caroline Nicol, Paavo 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*, 第 55 巻, In press.

目次

1. 緒言-----	p. 6
1.1 東アフリカ地域のランナーの強さの要因に関する先行研究	
1.2 走効率に関係する骨格・筋腱の形態的特性	
2. 目的-----	p. 11
3. 方法-----	p. 12
3.1 被験者と研究デザイン	
3.2 測定・分析項目	
3.2.1 下腿と足部のセグメント長	
3.2.2 内側腓腹筋形態	
3.2.3 アキレス腱形態	
3.2.4 アキレス腱モーメントアーム長	
3.2.5 骨格・筋腱形態の機能的指標の算出	
3.3 統計処理	
4. 結果-----	p. 21
4.1 エリートケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴（研究課題 1）	
4.2 走能力と下腿骨格・筋腱形態の関係（研究課題 1）	
4.3 エリートケニア人陸上中長距離選手とケニアの一般陸上中長距離選手，一般成人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 2）	
4.4 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 3，各年齢群間における人種間の比較）	
4.5 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 3，骨格の大きさを考慮した各下腿骨格・筋腱形態の人種間（ケニア人と日本人）の比較）	

5. 考察-----	p. 39
5.1 エリートケニア人陸上中長距離選手を含むケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴と競技力との関係	
5.2 エリートケニア人陸上中長距離選手とケニアの一般陸上中長距離選手，一般成人の下腿骨格・筋腱形態の違い	
5.3 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い	
5.4 本研究の方法論上の限界点	
6. 結論-----	p. 46
引用文献-----	p. 47
謝辞-----	p. 54

1. 緒言

1960年ローマオリンピックマラソン競技でアベベ・ビキラ選手が東アフリカ勢初の金メダルを獲得して以来、東アフリカ諸国出身の陸上中長距離選手の国際大会における活躍は目覚ましい。彼らの高い走能力には多くの研究者が注目し、強さの要因を探ろうと様々な観点から調査・測定が行なわれてきたが、コンセンサスは得られていない (e.g., Saltin 1995a,b; Saltin, 2003; Larsen & Sheel, 2015; Lieberman et al., 2015; Santos-Concejero et al., 2016; Mooses & Hackney, 2016) .

1.1 東アフリカ地域のランナーの強さの要因に関する先行研究

持久的な運動である長距離走には生理学的な要因が強く影響すると考えられてきたため (Joyner & Coyle, 2008) , 東アフリカの陸上中長距離選手を対象とした研究においても、生理学的アプローチによる研究が先行して行なわれてきた。しかしながら、エリートケニア人選手は、持久力の代表的な指標である最大酸素摂取量、乳酸性作業閾値、血中ヘモグロビン量、骨格筋組成タイプ等において (Saltin & Astrand, 1967; Costill et al., 1973; Joyner, 1991) , 北欧 (Saltin et al., 1995a) や欧州 (Tam et al., 2012; Prommer et al., 2010) , 日本 (榎本ほか, 2009) の陸上中長距離選手と同程度を示している。そのため、これまで持久的運動能力に関係するとされてきたこれらの指標からは、エリートケニア人選手の高い競技力を説明することは出来ていない。一方で、エリート選手を含む東アフリカ諸国出身の陸上中長距離選手は、欧米や日本の選手と比較してランニングエコノミーが高い (同一走速度での走行中の酸素消費量が少ないこと) ことが確認されている (e.g., Saltin et al., 1995a; Weston et al., 2000; Larsen, 2003; Lucia et al., 2006; 榎本ほか, 2009; 吉岡ほか, 2012) . ゆえに、東アフリカ諸国出身の陸上中長距離選手の高いランニングエコノミーが、彼らの強さの要因であると考えら

れてきた (e.g., Larsen & Sheel, 2015) . しかしながら, 最近の研究では, ケニア人選手の競技力とランニングエコノミーには相関関係が認められないとの報告もあり (Mooses et al., 2015) , 東アフリカ諸国出身の陸上中長距離選手の走りの強さに関する議論は決着していない (Santos-Concejero & Tucker, 2016) .

生活・環境に関する調査では, エチオピア人ランナーの 60%以上が子ども時代に走って通学していたことや (Scott et al., 2003) , ケニア人ランナーは一般のケニア人と比較して通学距離が 5 km 以上であった割合が多かったことから (Onywera., 2006) , 生活様式や生活環境の特徴がエリートランナー輩出に関係すると指摘されている. その他にも, 高地環境 (Scott et al., 2003) や栄養素摂取に関する特徴 (Onywera et al., 2004) , 経済的理由などの社会的背景 (Onywera et al., 2006) について調査報告がなされているが, 東アフリカ諸国出身選手の走り強さを直接的に説明することは出来ていない.

遺伝学的な調査では, 東アフリカのランナーを対象に持久力と関係すると考えられている遺伝子についていくつか報告されている. 血圧の調節に関与する ACE (Angiotensin Converting Enzyme) 酵素の遺伝子の多型においては, ケニア人のランナーに特徴は認められていない (Scott et al., 2005) . また, 骨格筋の Z 膜の主要な構成成分であり, 速筋線維のみに発現する α -actinin-3 の遺伝子である ACTN3 の多型 (Yang et al., 2007) やミトコンドリアの機能に関する遺伝子 mitochondrial DNA (mtDNA) (Scott et al., 2009) についても, ケニア人ランナーに目立った特徴は認められていない. スポーツパフォーマンスに関する遺伝子研究を幅広く行っている Prof. Pitsiladis らのグループ は, 一連の東アフリカの陸上中長距離選手に関する遺伝学的調査から, 彼らの高い走能力は遺伝学的な背景からは説明できないと結論付けている (Pitsiladis et al., 2013) .

一方、エリートケニア人ランナーの生理学的、遺伝学的、生活環境や生活様式にまでわたって調査し、決定的な要因について明らかにすることが出来なかった Prof. Saltin は、バイオメカニクス研究領域からのアプローチの必要性を以下の2点から提唱している (Saltin et al., 1995a) . ケニア人ランナーは (1) 走運動中、アキレス腱の弾性を効果的に利用し、筋は効率的な力発揮を行なっている可能性、(2) ケニア人ランナーの特徴的な細くて長い下腿 (Saltin, 2003) は体重を支える筋腱のレバーアーム長に影響し、走運動中のエネルギー消費を抑えている可能性があることを指摘している。しかしながら、これらの点については先行研究で十分に検討されていない。

1.2 走効率に関係する骨格・筋腱の形態的特性

近年の欧米の一般ランナーを対象とした先行研究から、ランニングエコノミーに影響する下腿の骨格・筋腱形態が明らかとなってきた。アキレス腱モーメントアーム長 (MA_{AT}) とランニングエコノミーとの関係から、 MA_{AT} が短いランナーほどランニングエコノミーが高いことが報告されている (Scholz et al., 2008; Raichlen et al., 2011; Barnes et al., 2014) . Scholz et al (2008) によると、 MA_{AT} はランニングエコノミーの 56% を説明できると報告している。そして、これまでランニングエコノミーとの関係が認められていた足長 (Anderson, 1996) , Body mass index, 下腿のボリュームや慣性モーメント (Anderson, 1996; Larsen et al., 2004) よりも、 MA_{AT} のランニングエコノミーへの影響がより大きいことを報告している。また、比較的競技レベルの低いケニア人ランナー (IAAF スコア 993 ± 77 点) においても、 MA_{AT} とランニングエコノミーの間に負の相関関係が認められている (Mooses et al., 2015) . そして、これらの先行研究では、短い MA_{AT} の方が足関節トルクを効果的にアキレス腱張力へ変換でき、その力学的エネルギーを弾性エネルギーに変換することで腱の弾性の

利用を高めることができると考察されている (e.g., Scholz et al., 2008; Mooses et al., 2015) . 一方で, MA_{AT} が長いと足関節の τ が小さくなり, 下腿三頭筋が発揮する力を効率的に足関節トルクに変換でき, 関節トルクの発揮効率の点で有利となる. 東アフリカ諸国出身のエリート陸上中長距離選手 ($n=11$, IAAF スコア 1126.9 ± 105.2 点) と日本人の陸上中長距離選手 ($n=11$, IAAF スコア 909.4 ± 130.8 点) の MA_{AT} を比較した Sano et al (2015) の研究では, MA_{AT} と競技力 (IAAF スコア) との間には正の相関関係があることが確認されている. 加えて, 東アフリカのエリート選手は, 走運動接地中の下腿の筋活動量や腓腹筋筋束の短縮量が少ないことから, 長い MA_{AT} によって, 筋による仕事を抑えた効率的な走行を行なっていることが示唆されている (Sano et al., 2015) . このように, 東アフリカの陸上中長距離選手の競技力に関する MA_{AT} 長短についてはコンセンサスが得られていない. これらの先行研究 (Scholz et al., 2008; Mooses et al., 2015; Sano et al., 2015) の問題点として, 先行研究間の対象被験者の競技レベルの違いが考えられる. そのため, 異なる競技レベルのランナーも含めて, MA_{AT} の長短の優位性について, 競技力との関係から検討する必要がある.

腱の弾性エネルギーの貯蔵と再利用によって運動効率が高まることがカンガルーなどの動物実験で報告されていることから (Dowson & Taylor, 1973; Biewener & Robers, 2000) , アキレス腱形態とランニングエコノミーとの関係についても, 一般のランナーを対象に検討されてきた. 腓腹筋アキレス腱長 (腓腹筋とアキレス腱の筋腱移行部から踵骨隆起までの長さ) はランニングエコノミーと有意な負の相関関係にあり (Hunter et al., 2011, 2015) , 長いアキレス腱によって, 走運動中のアキレス腱の伸張・短縮量が増加し, 腱の弾性を利用することで, 効率の良い力発揮が可能になると考えられている (Hunter et al., 2011, 2015) . このように, 短い MA_{AT} や長いアキレス腱によってランニングエコノミーが高まる理由は, いずれもアキレス腱張力や腱の伸張・短縮量の増加に貢献することで, 腱の弾性利用を高めることがそのメカニクスとして考えられている. しかしながら, エリートケニア人陸上中長距離選手

のホッピング運動 (Sano et al., 2013) や走運動 (Sano et al., 2015) 接地中のアキレス腱の伸張量や接地中の下腿三頭筋の筋活動量は小さい。すなわち、東アフリカのエリート選手においては、長いアキレス腱や短い MA_{AT} によって、腱張力や腱の伸張量を増加させ、腱の弾性利用を高めることで、走効率の良い走運動を行なっているとは考え難い。

筋束長や筋厚などの筋形態は筋が張力を発揮する際のエネルギー消費に影響する (Lieber & Friden, 2000)。これまで、一般の陸上長距離選手によって、ランナーの筋形態の特徴が報告されている。陸上長距離選手は短距離選手と比較して、外側広筋と腓腹筋の筋厚が小さく、筋束長は短く、そして羽状角は大きい (Karamanidis & Arampatzis, 2006)。また、陸上長距離選手と一般人と比較した場合、外側広筋の筋形態と腓腹筋の筋束長は同程度を示すが、羽状角は長距離選手の方が大きい (Karamanidis & Arampatzis, 2006)。これらの先行研究から、筋のエネルギー消費量を抑えるために (Fletcher et al., 2013)、一般の陸上長距離選手は短い筋束 (少ないサルコメア数) と大きい羽状角に形態的適応が起こっていると指摘されている (Blazevich, 2006; Murach et al., 2015)。しかしながら、東アフリカのエリート選手については、日本人選手と比較して短い内側腓腹筋の筋束と大きい羽状角が確認されている (Sano et al., 2015)、競技力との関係については十分に検討されていない。

2. 目的

これまでの一連の研究で、東アフリカのエリート選手の高い走能力には下腿の骨格・筋腱の形態的特徴が関係している可能性が示されてきた。しかしながら、これらの形態的特徴とエリート選手の競技力との関係については、コンセンサスが得られていない。また、彼らの特徴的な下腿の骨格・筋腱形態が、東アフリカの地域性に起因するものか、またはエリートランナー選手の特異的なトレーニングなどによってもたらされている特徴かは不明である。

そこで、本研究では以下の点について検討することを目的とした。

- 1) エリートケニア人陸上中長距離選手と日本人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱の形態を比較し、エリートケニア人陸上中長距離選手を含むケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴を明らかにする（**研究課題 1**）。
- 2) 競技力と下腿骨格・筋腱の形態の関係を検討し、エリートケニア人陸上中長距離選手の高い走能力に関係する下腿骨格・筋腱の特徴を抽出する（**研究課題 1**）。
- 3) 下腿骨格・筋腱形態をエリートケニア人陸上中長距離選手、ケニアの一般レベルの陸上中長距離選手と一般成人と比較し、エリート選手の特徴を抽出する（**研究課題 2**）。
- 4) ケニア人と日本人の発育に伴う下腿骨格・筋腱形態の特徴を比較し、地域間の下腿骨格・筋腱形態の違いについて検討する（**研究課題 3**）

3. 方法

3.1 被験者と研究デザイン

研究課題 1

世界トップレベルのエリートケニア人陸上中長距離選手の下腿の形態的特徴と競技力の関係を明らかにするため、エリートケニア人男子陸上中長距離選手 22 名（エリートケニア人選手）と国内トップレベルの日本人男子陸上中長距離選手 22 名（日本人選手）を対象とし（Table. 1），アキレス腱と内側腓腹筋の形態，足部骨格形態を測定し，エリートケニア人選手と日本人選手の骨格・筋腱形態を比較した後，形態と競技力との関係を検討した．なお，エリートケニア人陸上中長距離選手には，オリンピックや世界陸上競技選手権大会等のメジャーな大会にて入賞または出場経験のある者を含んでいる．異なる専門種目の被験者の競技力を評価するために，各専門種目の競技記録を得点に換算できる IAAF スコアリングテーブルシステム（Spiriev, 2011）を用いて，測定日から 1 年以内の被験者のベスト記録を IAAF スコアに変換し，競技記録を点数化した．

Table 1. Physical characteristics and endurance running performance

	Elite Kenyan runners (n=22)	Japanese runners (n=22)
Age (yr)	21.9 ± 4.5	20.2 ± 2.2
Height (cm)	174.0 ± 6.0	173.3 ± 5.4
Body mass (kg)	57.2 ± 4.8	56.9 ± 4.6
Body mass index	18.9 ± 1.5	19.0 ± 0.9
Endurance running performance (IAAF score)	1130.0 ± 91.3	1004.8 ± 49.8**

Values are expressed as mean ± S.D. ** Significant difference between KENYAN and JAPANESE at $p < 0.01$.

IAAF, International Association of Athletics Federations.

研究課題 2

世界一流のエリートケニア人陸上中長距離選手，一般のケニア人陸上中長距離選手とケニア人一般成人の下腿の骨格・筋腱には違いがあるのか明らかにするため，エリートケニア人男子陸上中長距離選手 18 名（ELITE），国内大会出場レベルの一般ケニア人男子陸上中長距離選手 34 名（RUNNERS），競技スポーツを行っていないケニア人一般成人男性 34 名（CTRL）を対象とし（Table 2），下肢の骨格，内側腓腹筋とアキレス腱の形態を測定した．一般のケニア人陸上中長距離選手は，習慣的な陸上中長距離走のトレーニングを行っており，国際大会に出場経験のない者とした．

Table 2. Physical characteristics and endurance running performance.

	ELITE (n=18)	RUNNERS (n=34)	CTRL (n=34)
Age (yr)	24.8 ± 5.2	25.9 ± 4.5	24.3 ± 4.8
Height (cm)	171.8 ± 7.5	172.1 ± 7.3	171.4 ± 7.6
Body mass (kg)	57.0 ± 5.3 **	58.2 ± 5.6 **	63.8 ± 8.5
Body mass index	19.3 ± 1.3 **	19.7 ± 1.8 **	21.7 ± 2.8
Shank length (cm)	39.3 ± 2.6	39.0 ± 2.5	39.1 ± 2.5
Foot length (cm)	26.4 ± 1.1	26.2 ± 1.3	26.6 ± 1.3
Forefoot length (cm)	11.3 ± 1.3	11.6 ± 0.8	11.3 ± 0.7
Endurance running performance (IAAF score)	1207.7 ± 41.6	1043.7 ± 86.7	-

Values are expressed as mean ± S.D.

** shows significant differences between CTRL at $p < 0.01$

IAAF Score, International Amateur Athletic Federation Score (Spiriev, 2011).

研究課題 3

ケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の年齢群別データから，発育過程を横断的にとらえ，ケニア人と日本人の発育段階における下腿の骨格・筋腱形態の違いについて検討した．被験者は，0 歳～成人までのケニア人一般男性（225 名）と日本人一般男性（447 名）とし（Table 3），下腿骨格・筋腱形態を測定した．ケニア人と日本人の被験者はそれぞれ 0-4 歳

群, 5-8 歳群, 9-12 歳群, 13-16 歳群, 17-19 歳群, 20 歳群の年齢群に分類した。20 歳群は 20 歳以上の一般成人とした (Table 3)。

Table 3. Physical characteristics in KENYANS and JAPANESE

	KENYANS				JAPANESE			
	n	Age (yr)	Height (cm)	Body mass (kg)	n	Age (yr)	Height (cm)	Body mass (kg)
0-4 yr	15	2.2 ± 1.7	86.2 ± 18.7	12.6 ± 4.8	56	2.3 ± 1.2	89.2 ± 11.7	13 ± 2.8
5-8 yr	42	6.4 ± 1.1	117.9 ± 8	22.7 ± 5.8	45	6.2 ± 1.1	116.2 ± 8.5	20.5 ± 3.5
9-12 yr	49	10.7 ± 1.2	137 ± 9.7***	31.5 ± 7.7***	42	10.9 ± 1.2	146.3 ± 10.9	39.6 ± 9.6
13-16 yr	47	14.2 ± 1.1	157.5 ± 10.5**	45.7 ± 8.3**	99	14.3 ± 1.1	163.9 ± 7.9	53.5 ± 9.9
17-19 yr	38	17.9 ± 0.9	168.4 ± 5.5	58.4 ± 6.1	98	18.1 ± 0.8	170.1 ± 5.9	58.2 ± 6.3
20- yr	34	24.3 ± 4.8	171.5 ± 7.7	63.8 ± 8.5	107	21.7 ± 2.1	170.9 ± 17.5	65.3 ± 10.7

Values are expressed as mean ± S.D.

** and *** show significant differences between KENYANS and JAPANESE at $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively.

研究課題 1~3 において, 被験者 (未成年の場合は保護者) には本研究の目的や方法などについて十分に説明し, 測定参加への同意を得た後, 測定を実施した。ケニア人への説明は英語または現地コーディネーターがスワヒリ語にて通訳を実施した。また, 本研究はヘルシンキ宣言に従い, 予め大阪体育大学ヒト実験に関する倫理委員会による承認を得て実施した (研究課題 1・2 : 10-21, 11-21, 研究課題 3 : 承認番号 16-1)。

3.2 測定・分析項目

本研究では, 全ての形態測定において被験者に安静立位姿勢を保持させ実施した。なお, 立位が困難な乳幼児については, 仰臥位または伏臥位にて測定した。また, 測定は全て左右両脚にて行い, 各測定項目の左右の平均値を各被験者の各測定項目の代表値とした。

3.2.1 下腿と足部のセグメント長

下腿のセグメント長として、下腿長、足長、前足長を測定した。下腿長は腓骨頭から外果の頂点までの距離とし、皮膚上からメジャーを用いて測定した。足長は踵の後端から最も遠い指の先端までの足軸（踵点と第2指先端を結ぶ直線）に対する投影長とし、フットゲージを用いて測定した。前足長は第5中足骨遠位骨頭から中足骨長軸方向に伸ばした水平線と外果の頂点から垂直に下ろした直線が水平線と直交する交点と、第5中足骨遠位骨頭間の長さとし、L字型定規を用いて測定した。

3.2.2 内側腓腹筋形態

内側腓腹筋の筋束長は、内側腓腹筋の筋腹部における表層部腱膜と深部腱膜を結ぶ筋束の長さとし（Figure 1），羽状角は内側腓腹筋の筋束と深部腱膜の成す角度，筋厚は表層部腱膜と深部腱膜までを垂直に結ぶ距離とした。分析は撮像した超音波縦断画像より画像分析ソフトウェア（Image J version 1.48, NIH, Bethesda, Maryland, USA）を用いて、それぞれ計測した。また、超音波画像を用いた内側腓腹筋筋束長，羽状角，筋厚の繰り返し測定（ $n=9$ ）による験者内誤差 Intraclass correlation coefficients（ $ICC_{1,1}$ ）は、それぞれ 0.980, 0.971, 0.960（内側腓腹筋筋束長，羽状角，筋厚）であった。

3.2.3 アキレス腱形態

本研究では、アキレス腱長を腓腹筋アキレス腱筋腱移行部とヒラメ筋アキレス腱筋腱移行部のそれぞれから踵骨隆起までの長さとし、それぞれ腓腹筋アキレス腱長とヒラメ筋アキレス腱長とした（Figure 1）。腓腹筋アキレス腱長は、腓腹筋内・外側頭間の最もアキレス腱

が長くなる部位から踵骨隆起までとした。踵骨隆起と腓腹筋・ヒラメ筋の遠位筋腱移行部は、超音波装置（Noblus, Hitachi-Aloka. Ltd. Japan）の B モード法を用いて得られる筋腱の横断画像から同定した後、皮膚上にマークし、それぞれの長さはメジャーを用いて実測した。また、被験者間の比較において下腿長の影響を考慮するために下腿長に対する腓腹筋アキレス腱長とヒラメ筋アキレス腱長の割合を算出した。

アキレス腱横断面積は、超音波装置を用いてヒラメ筋遠位直下のアキレス腱横断面を撮像し（Figure 1），その撮像したアキレス腱の超音波横断映像から画像分析ソフトウェア（Image J version 1.48, NIH, Bethesda, Maryland, USA）を用いて算出した。

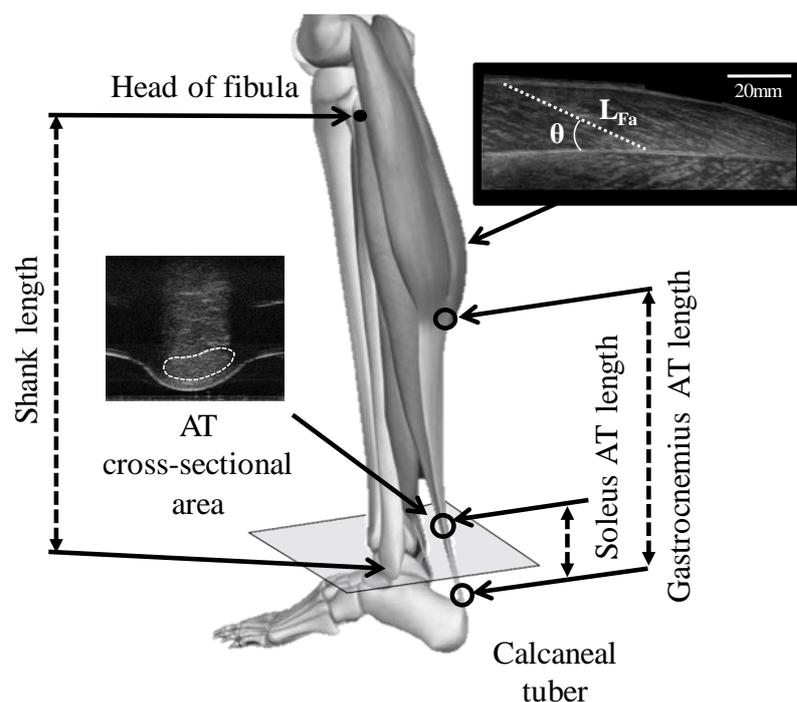


Figure 1. Measurement schema for length of shank, Achilles tendon (AT) length and cross-sectional area. Gastrocnemii and soleus AT lengths as well as AT cross-sectional area were measured by the ultrasound images of both legs. The soleus and gastrocnemii AT lengths were measured from the AT insertion point on the calcaneus to the distal end of soleus muscle and to the end of the proximal point of AT, respectively. The AT cross-sectional area was quantified just below the distal end of soleus muscle. Medial gastrocnemius muscle (MG) fascicle length (L_{Fa}), pennation angle (θ) and muscle thickness were measured from the sagittal calf muscle belly of MG by ultrasonography.

3.2.4 アキレス腱モーメントアーム長

アキレス腱モーメントアームは (MA_{AT}) , 距腿関節回転軸に近似する内・外果の頂点を結ぶ線分 (Lundberg et al., 1989) とアキレス腱張力の作用線を結ぶ最短距離とした (Rugg et al., 1990) . 測定は超音波装置とマルチン式形態測定器の触覚計を用いて行い, 幾何学的手法 (Heron's Formula) によって以下の式を用いてアキレス腱モーメントアームを算出した (Figure 2) .

$$MA_{AT} = \frac{2\sqrt{s(s - L_{mal})(s - L_{med})(s - L_{lat})}}{L_{mal}}$$
$$s = \frac{(L_{mal} + L_{med} + L_{lat})}{2}$$

MA_{AT} はアキレス腱モーメントアーム長, L_{med} はアキレス腱と内果の頂点を結ぶ直線距離, L_{lat} はアキレス腱と外果頂点を結ぶ直線距離, L_{mal} は内・外果の頂点を結ぶ直線距離 (下記に測定方法の詳細を示す) .

L_{med} と L_{lat} は内・外果の頂点とアキレス腱張力の作用点をそれぞれ結ぶ距離であった. 超音波装置を用いてアキレス腱と内・外果それぞれの頂点間の横断映像を撮像し (Figure 2a) , 画像分析ソフトウェア (Image J version 1.48, NIH, Bethesda, Maryland, USA) を用いて, L_{med} と L_{lat} をそれぞれ計測した. また, アキレス腱張力の作用点は, アキレス腱横断面積を 2 等分し, 且つ, それぞれが直交する直線を 2 本引き, その交点とした (Figure 2a) . L_{mal} は内・外果の頂点を結ぶ距離とし, マルチン式形態測定器の触覚計を用いて皮膚上から計測した (Figure 2b) . また, 超音波画像より算出した L_{med} と L_{lat} に加え, 算出された

MA_{AT}の繰り返し測定 (n = 9) による験者内誤差 Intraclass correlation coefficients (ICC_{1,1}) は、それぞれ 0.990, 0.992, 0.980 (L_{med}, L_{lat}, MA_{AT}) であった。

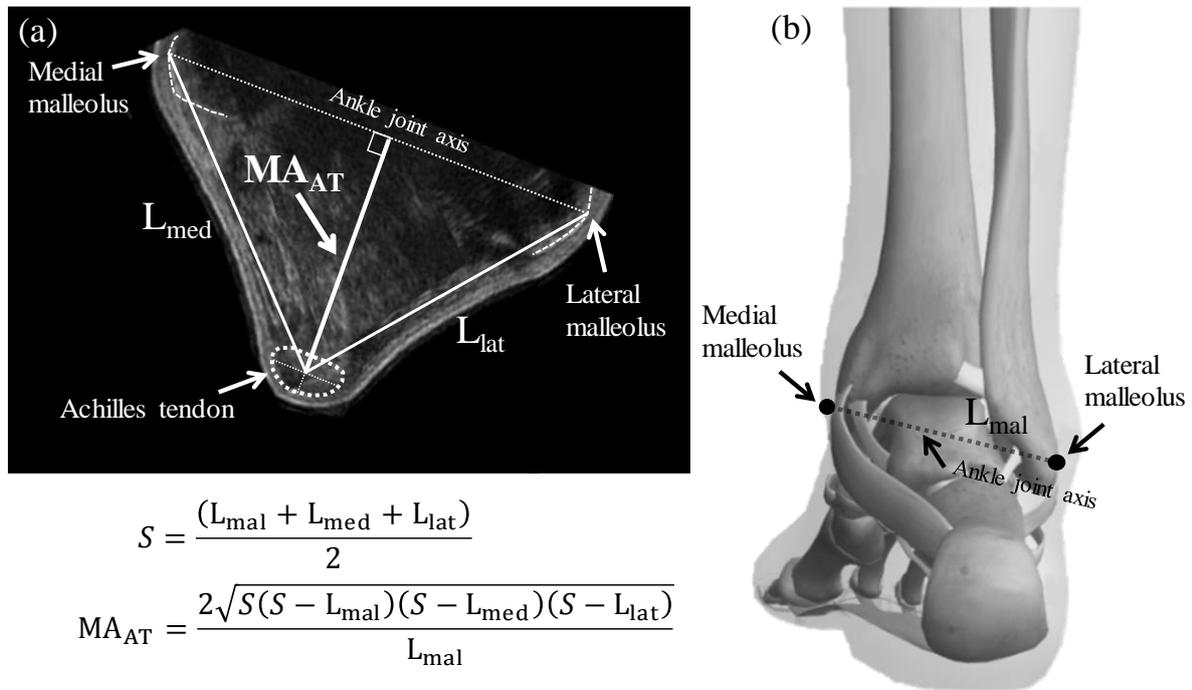


Figure 2. Measurement schema for Achilles tendon moment arm using ultrasound and Martin Breadth Caliper. (a) Ultrasound transverse images of Achilles tendon moment arm (MA_{AT}). The distances from the center of the AT to the tips of the medial (L_{med}) and lateral malleoli (L_{lat}) were measured using ultrasound images. (b) The distance between the tip of medial malleolus and lateral malleolus (L_{mal}) was measured on the skin using a Martin Breadth Caliper.

3.2.5 骨格・筋腱形態の機能的指標の算出

足関節のてこ比：足関節のてこ比は前足長を MA_{AT} で除した値とした（下記の式を参照）。前足長は第 5 中足骨遠位骨頭から中足骨長軸方向に伸ばした水平線と外果の頂点から垂直に下ろした直線が水平線と直交する交点と、第 5 中足骨遠位骨頭間の長さとし、L 字型定規を用いて計測した。

$$FLR = L_{\text{forefoot}} / MA_{AT}$$

FLR は Foot lever ratio（足関節のてこ比）， L_{forefoot} は前足長， MA_{AT} はアキレス腱モーメントアーム長。

筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比：内側腓腹筋筋束長をアキレス腱モーメントアーム長で除すことによって算出した。

3.3 統計処理

研究課題 1

全ての測定項目の値は，平均 ± 標準偏差で示した。エリートケニア人選手と日本人選手の各測定項目の平均値の差の比較には対応のないスチューデント t 検定（両側検定）を用いた。正規分布しない項目はマン・ホイットニーのランクサム検定を行なった。各測定項目と競技力との関係の検討には，ピアソンの積率相関係数を用いた。なお，統計処理には，IBM SPSS Statistics version 21（IBM 社製）を用い，全ての項目において危険率 5% を有意水準とした。

研究課題 2

ELITE，RUNNERS，CTRL の各測定項目の平均値の比較には，繰り返しのない一要因分散分析を行い，群間に有意な効果が認められた場合には，Tukey 法による多重比較検定を用

いて各群間の有意差検定を行った。統計処理には、IBM SPSS Statistics version 21 (IBM 社製) を用い、全ての項目において危険率 5% を有意水準とした。

研究課題 3

発育過程のケニア人と日本人の横断的調査における、人種間 (ケニア人と日本人) および各年齢群間 (0-4 歳群, 5-8 歳群, 9-12 歳群, 13-16 歳群, 17-19 歳群, 20 歳群) の各測定項目の平均値の差の比較には、繰り返しのない二要因 (人種×年齢群) の分散分析を用いた。主効果または交互作用が認められた場合は、年齢群の比較については Bonferroni 法により多重比較検定を行なった。加えて、骨格の大きさを考慮した各下腿骨格・筋腱形態の人種間 (ケニア人と日本人) の比較を行なうため、骨格の大きさ (身長, 下腿長, 足長) と下腿骨格・筋腱形態の関係をピアソンの積率相関係数を用いて検討し、回帰の有意性の検定を行なったうえで、交互作用が棄却されて平行性が保証された場合には、骨格指標 (身長, 下腿長, 足長) を共変量として、各下腿骨格・筋腱形態の人種間 (ケニア人と日本人) の比較を共分散分析 (analysis of covariance: ANCOVA) を用いて行なった。統計処理には、IBM SPSS Statistics version 21 (IBM 社製) を用い、全ての項目において危険率 5% を有意水準とした。

4. 結果

4.1 エリートケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴（研究課題 1）

身長、体重と BMI のいずれにおいてもエリートケニア人選手と日本人選手で有意な差は認められなかったが、競技力の指標である IAAF スコアはエリートケニア人選手が有意に高い値を示した（11.1%, $t(42) = -5.64, p < 0.01$ ）（Table 1）。下肢骨格の形態データでは、エリートケニア人選手が日本人選手と比較して大腿長（7.3%, $t(42) = -3.27, p < 0.01$ ），下腿長（8.4%, $t(42) = -4.42, p < 0.01$ ）と足長（5.3%, $t(42) = -4.51, p < 0.05$ ）で有意に長い値を示し、前足長（6.9%, $t(42) = 2.42, p < 0.05$ ）では有意に短い値を示した（Table 4）。

Table 4. Body segments for KENYAN and JAPANESE

	Elite Kenyan runners (n=22)	Japanese runners (n=22)
Thigh length (cm)	42.6 ± 3.4	39.8 ± 2.8 **
Shank length (cm)	39.7 ± 3.0	36.5 ± 1.7 **
Foot length (cm)	26.7 ± 1.2	25.2 ± 1.1 *
Forefoot length (mm)	11.1 ± 1.3	11.9 ± 0.75 *

All parameters are averaged values from right and left sides. Values are expressed as mean ± S.D. *, ** Significant differences between KENYAN and JAPANESE at $p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively.

アキレス腱の形態では、アキレス腱長は絶対値と相対値の両方でエリートケニア人選手が有意に大きな値を示した（Figure 3a,b）。絶対値においては、エリートケニア人選手が腓腹筋アキレス腱長で 14.4% 長く（ $t(42) = -4.75, p < 0.001$ ），ヒラメ筋アキレス腱長では 24.3%（ $t(42) = -2.98, p < 0.01$ ）長かった（Figure 3a）。下腿長に対するアキレス腱長の割合（相対値）では、腓腹筋アキレス腱長が 6.7%（ $t(42) = -2.54, p < 0.05$ ），ヒラメ筋アキレス腱長が 17.1%（ $t(42) = -2.13, p < 0.05$ ）高い値を示した（Figure 3b）。アキレス腱横断面積は、エリートケニア人選手が 11.4% 大きい値を示した（ $t(42) = -2.39, p < 0.05$ ）（Figure 3c）。

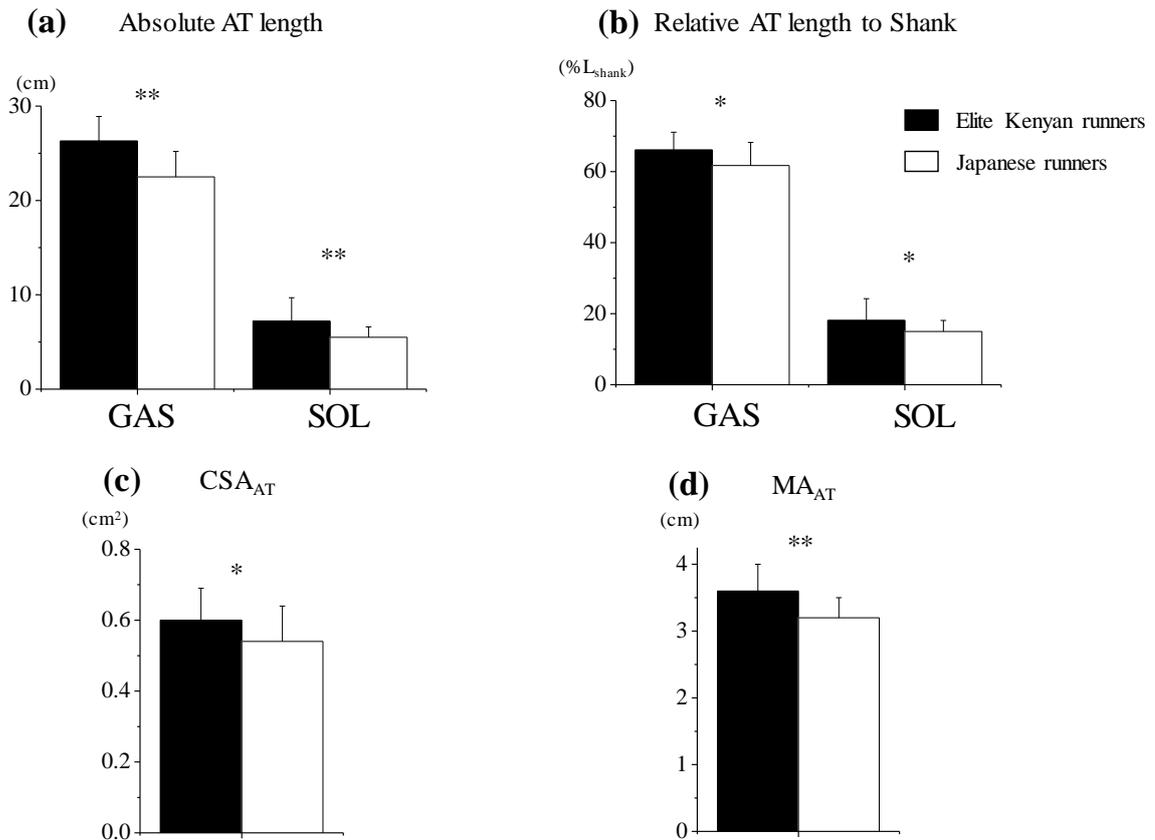


Figure 3. Comparison of lower-leg parameters between Kenyan and Japanese runners.

(a) Absolute gastrocnemii (GAS) and soleus (SOL) Achilles tendon (AT) lengths, (b) Relative GAS and SOL AT lengths relative to the shank length (L_{shank}), (c) AT cross-sectional area (CSA_{AT}), (d) Achilles tendon moment arm (MA_{AT}). * and **: significant differences between Elite Kenyan runners and Japanese runners ($p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively). Adapted with permission from Kunimasa Y, Sano K, Oda T, Nicol C, Komi PV, Locatelli E, Ito A, Ishikawa M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. *Scand J Med Sci Sports*. 24: e269–e274. With permission from Wiley.

内側腓腹筋筋形態では、エリートケニア人選手が、筋束長では 11.2% 短く ($t(42) = 3.42$, $p < 0.01$) (Figure 4e), 羽状角は 11.1% 大きく ($t(42) = -4.43$, $p < 0.001$) (Figure 4f), 筋厚は 7.2% 小さかった ($t(42) = 2.49$, $p < 0.05$) (Figure 4g). MA_{AT} は、エリートケニア人選手が 3.6 ± 0.4 cm, 日本人選手が 3.2 ± 0.3 cm でエリートケニア人選手が有意に長い値を示した ($t(42) = -3.95$, $p < 0.001$) (Figure 3d). 足関節でのこ比はエリートケニア人選手が有意に低い値を示した (3.1 ± 0.4 vs 3.7 ± 0.4 , $t(42) = 5.10$, $p < 0.001$) (Figure 5h). 筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比はエリートケニア人選手が有意に小さい値を示した (1.4 ± 0.2 vs 1.8 ± 0.3 , $t(42) = 5.43$, $p < 0.001$) (Figure 5i).

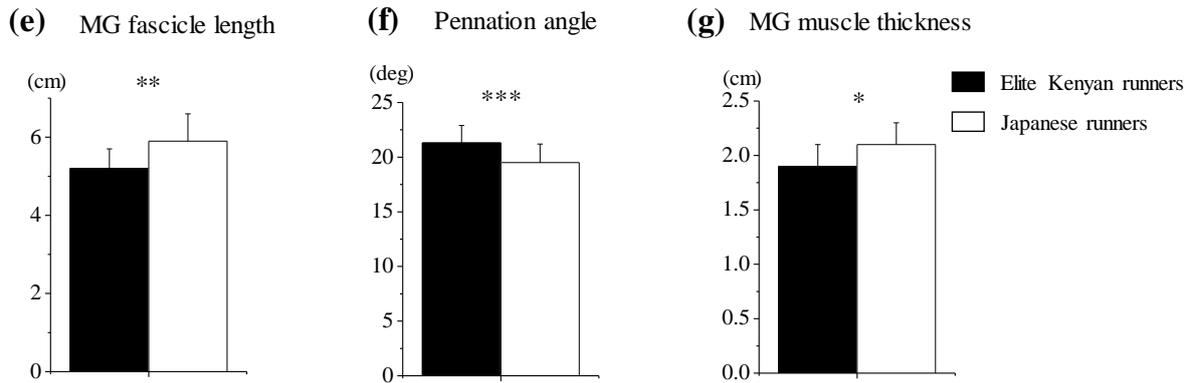


Figure 4. Comparison of muscle parameters of the medial gastrocnemius muscles (MG) between Kenyan and Japanese runners.

(e) Medial gastrocnemius muscle (MG) fascicle length, (f) MG pennation angle, (g) MG muscle thickness. *, ** and ***: significant differences between Elite Kenyan runners and Japanese runners ($p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively).

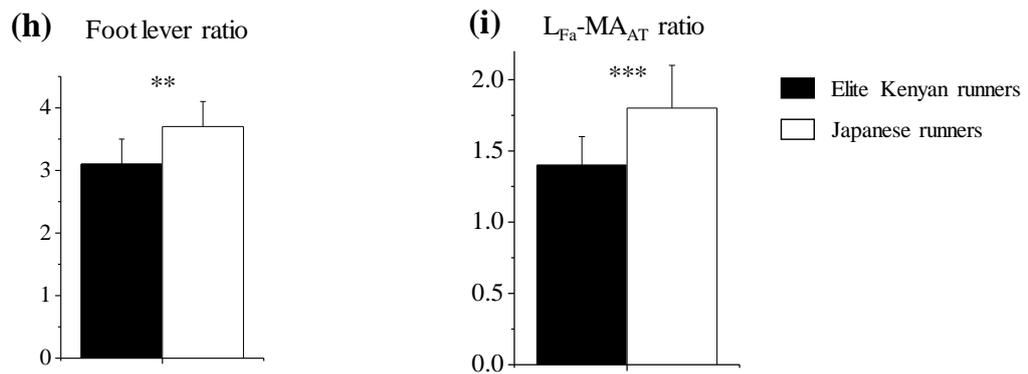


Figure 5. Comparison of functional parameters of lower-leg parameters between Kenyan and Japanese runners.

(h) Foot lever ratio was defined as the ratio of the forefoot length divided by MA_{AT} , (i) Medial gastrocnemius muscle fascicle length (L_{Fa})- MA_{AT} ratio was defined as the ratio of L_{Fa} divided by MA_{AT} . *, ** and ***: significant differences between Elite Kenyan runners and Japanese runners ($p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$, respectively). Adapted with permission from Kunimasa Y, Sano K, Oda T, Nicol C, Komi PV, Locatelli E, Ito A, Ishikawa M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. *Scand J Med Sci Sports*. 24: e269–e274. With permission from Wiley.

4.2 走能力と下腿骨格・筋腱形態の関係（研究課題 1）

全ての被験者において競技力（IAAF スコア）と下腿骨格・筋腱形態の関係について検討したところ、次のように MA_{AT} と足関節のてこ比、筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比のみ、競技力と有意な中程度以上の相関関係を示した。競技力に対し MA_{AT} は有意な正の相関関係を示し ($r = 0.55, p < 0.001$)（Figure 6 LEFT），足関節のてこ比は負の相関関係を示した ($r = -0.51, p < 0.001$)（Figure 6 RIGHT）。筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比では、有意な負の相関関係を示した ($r = -0.56, p < 0.001$)（Figure 7）。

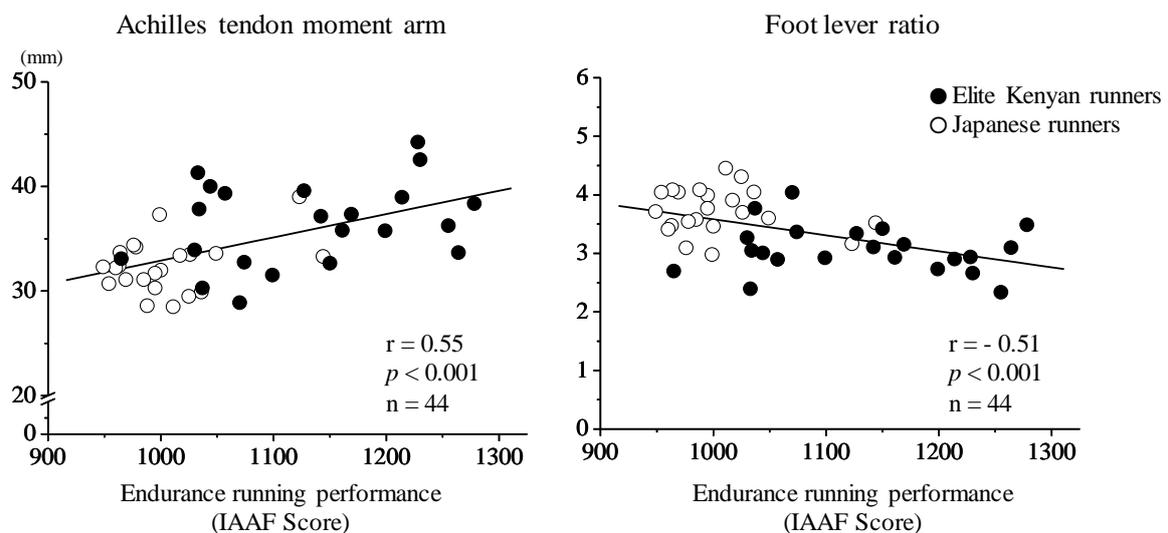


Figure 6. Relationship between endurance running performance and Achilles tendon moment arm for all subjects (LEFT). Relationship between endurance running performance and foot lever ratio for all subjects (RIGHT).

Adapted with permission from Kunimasa Y, Sano K, Oda T, Nicol C, Komi PV, Locatelli E, Ito A, Ishikawa M. (2014) Specific muscle-tendon architecture in elite Kenyan distance runners. *Scand J Med Sci Sports*. 24: e269–e274. With permission from Wiley.

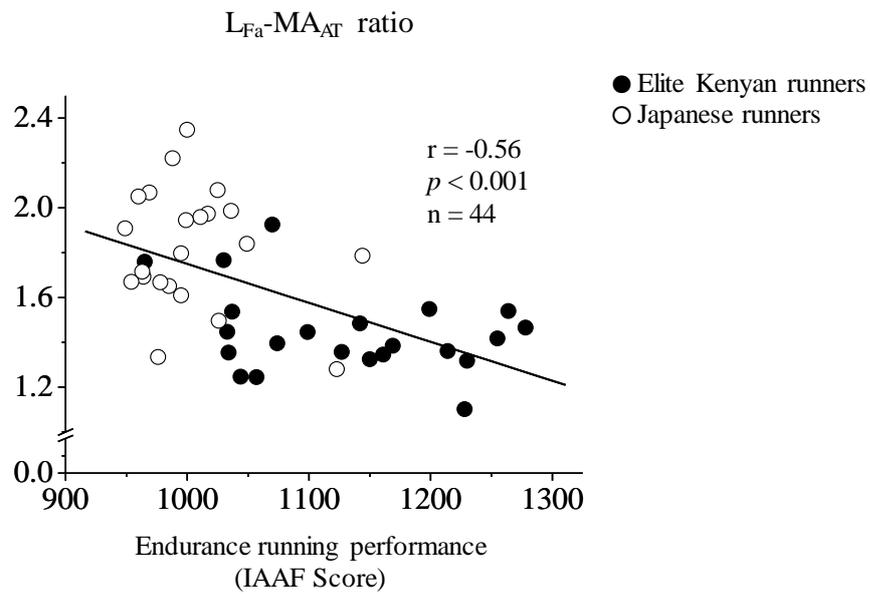


Figure 7. Relationship between endurance running performance and medial gastrocnemius fascicle length (L_{Fa})- Achilles tendon moment arm (MA_{AT}) ratio for all subjects.

4.3 エリートケニア人陸上中長距離選手とケニアの一般陸上中長距離選手，一般成人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 2）

年齢 ($F(2,83) = 0.941, p = 0.39$) と身長 ($F(2,83) = 0.06, p = 0.937$) は ELITE, RUNNERS と CTRL で有意な違いは認められなかったが，体重 ($F(2,83) = 8.01, p < 0.05$) と BMI ($F(2,83) = 9.56, p < 0.05$) はいずれも CTRL が ELITE (体重: $p < 0.01$, BMI: $p < 0.01$) と RUNNERS (体重: $p < 0.01$, BMI: $p < 0.01$) より有意に大きい値を示した (Table 2) .

下腿の骨格・筋腱形態において，下腿長 ($F(2,83) = 0.07, p = 0.93$) ，足長 ($F(2,83) = 0.71, p = 0.49$) ，前足長 ($F(2,83) = 1.86, p = 0.16$) ， MA_{AT} ($F(2,83) = 1.61, p = 0.20$) と足関節のてこ比 ($F(2,83) = 2.61, p = 0.08$) のいずれにおいても 3 群間で有意な違いは認められなかった．また，腓腹筋・ヒラメ筋アキレス腱長は絶対値 (腓腹筋アキレス腱: $F(2,83) = 0.75, p = 0.47$, ヒラメ筋アキレス腱: $F(2,83) = 0.14, p = 0.86$) (Figure 8a) と相対値 (腓腹筋アキレス腱: $F(2,83) = 1.16, p = 0.31$, ヒラメ筋アキレス腱: $F(2,83) = 0.09, p = 0.90$) (Figure 8b) ともに，3 群間で有意な違いは認められなかった．一方で，アキレス腱横断面積 ($F(2,83) = 6.06, p < 0.01$) においては，CTRL が ELITE ($p < 0.05$) と RUNNERS ($p < 0.01$) と比べて有意に大きい値を示したが (Figure 8c) ，体質量あたりのアキレス腱横断面積では，各群で有意な差は認められなかった (ELITE: $1.09 \pm 0.18 \text{ mm}^2/\text{kg}$, RUNNERS: $1.04 \pm 0.15 \text{ mm}^2/\text{kg}$, CTRL: $1.09 \pm 0.15 \text{ mm}^2/\text{kg}$, $F(2,83) = 0.86, p = 0.42$) . 内側腓腹筋の筋形態において，羽状角 ($F(2,83) = 5.34, p < 0.01$) では，RUNNERS が CTRL と比べて有意に大きい値を示したが ($p < 0.01$) (Figure 9f) ，筋束長 ($F(2,83) = 0.53, p = 0.59$) (Figure 9e) と筋厚 ($F(2,83) = 2.66, p = 0.07$) (Figure 9g) においては 3 群間に有意な違いは認められなかった．また，筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比は 3 群間に有意な違いは認められなかった ($F(2,83) = 2.38, p = 0.09$) (Figure 10i) .

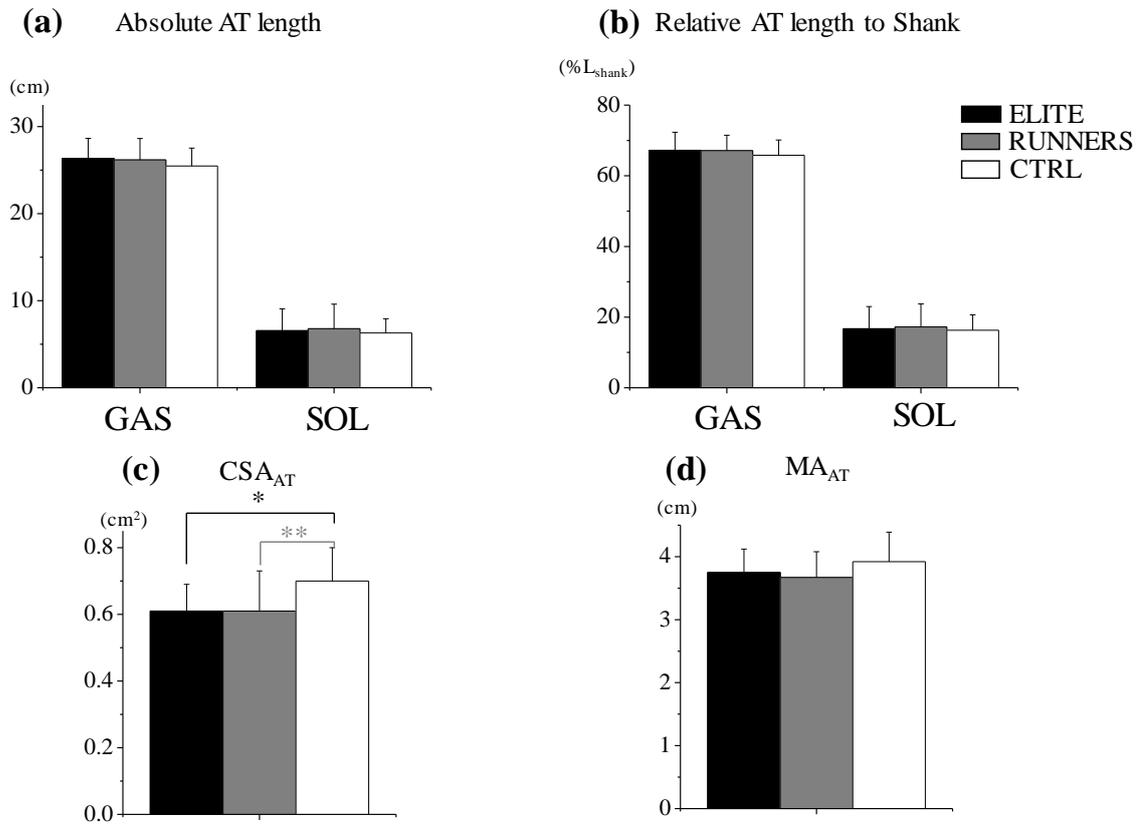


Figure 8. Comparisons of lower-leg parameters for elite runners (ELITE), trained runners (RUNNERS) and control subjects (CTRL).

(a) Absolute gastrocnemii (GAS) and soleus (SOL) Achilles tendon (AT) lengths, (b) Relative GAS and SOL AT lengths relative to the shank length (L_{shank}), (c) AT cross-sectional area (CSA_{AT}), (d) Achilles tendon moment arm (MA_{AT}). * and **: significant differences vs CTRL ($p < 0.05$ and $p < 0.01$, respectively).

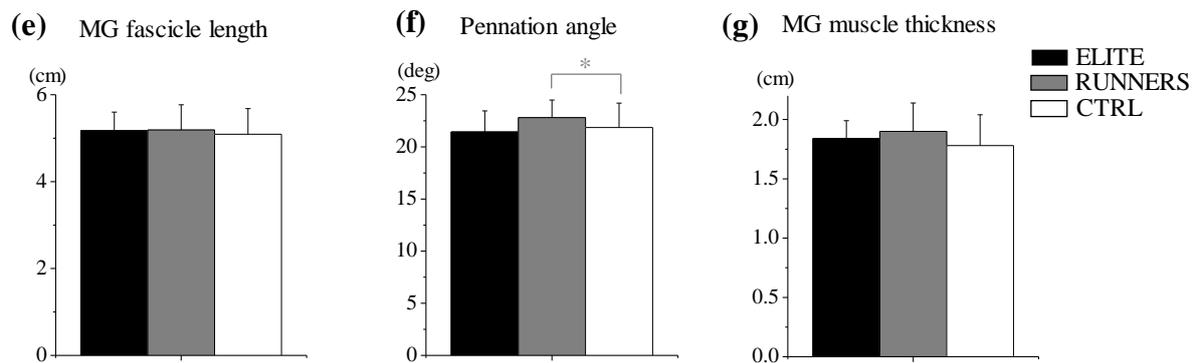


Figure 9. Comparisons of muscle parameters of the medial gastrocnemius muscles (MG) for elite runners (ELITE), trained runners (RUNNERS) and control subjects (CTRL).

(f) MG muscle fascicle length, (f) MG pennation angle, and (g) MG muscle thickness were measured by ultrasonography. * shows significant differences from CTRL ($p < 0.05$).

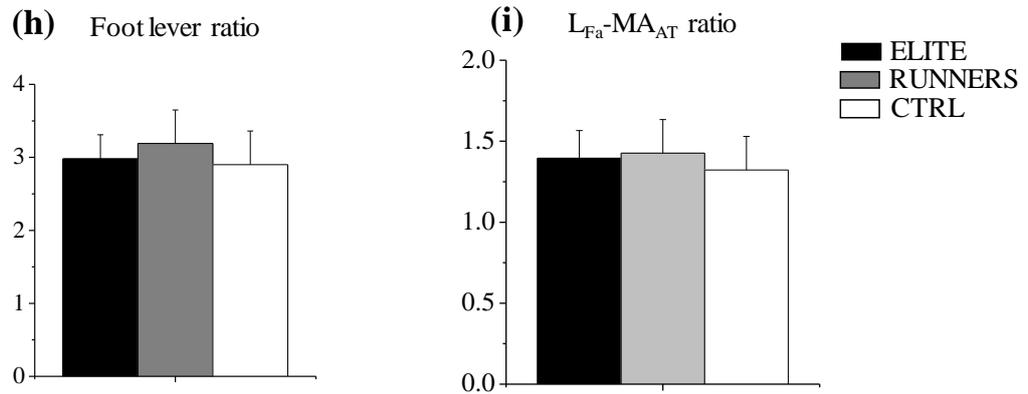


Figure 10. Comparisons of functional parameters of lower limb for elite runners (ELITE), trained runners (RUNNERS) and control subjects (CTRL).

(h) Foot lever ratio was defined as the ratio of the forefoot length divided by MA_{AT}, (i) Medial gastrocnemius muscle fascicle length (L_{Fa})-MA_{AT} ratio was defined as the ratio of L_{Fa} divided by MA_{AT}.

4.4 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 3，各年齢群間における人種間の比較）

Table 3 にケニア人と日本人の各年齢群（0-4 歳群，5-8 歳群，9-12 歳群，13-16 歳群，17-19 歳群，20 歳群）の年齢，身長，体質量の平均値と標準偏差を示す。

Figure 11 は下腿長，アキレス腱長，アキレス腱横断面積を年齢群別・人種別に示したものである。下腿長 ($F(5,643) = 7.24, p < 0.001, \eta^2 = 0.05$)，腓腹筋アキレス腱長（絶対値： $F(5,643) = 6.58, p < 0.001, \eta^2 = 0.04$ ，相対値： $F(5,643) = 2.59, p < 0.05, \eta^2 = 0.02$ ），ヒラメ筋アキレス腱長（絶対値のみ： $F(5,643) = 4.83, p < 0.001, \eta^2 = 0.03$ ），アキレス腱横断面積 ($F(5,643) = 3.69, p < 0.01, \eta^2 = 0.02$) において，人種×年齢群の 2 要因に交互作用が認められた。下腿長に対するヒラメ筋アキレス腱長（相対値： $F(5,643) = 2.08, p = 0.06, \eta^2 = 0.01$ ）においては，人種×年齢群の 2 要因に交互作用は認められなかった。

Table 5 に下腿長, アキレス腱長, アキレス腱横断面積の人種別, 各年齢群間の平均値の比較結果を示す. 下腿長はケニア人, 日本人ともに 0-4 歳群から 17-19 歳群にかけて, 大きい年齢群ほど有意に長い値を示した. 腓腹筋アキレス腱長はケニア人と日本人ともに 0-4 歳群から 9-12 歳群にかけて, 大きい年齢群ほど有意に長い値を示した. ヒラメ筋アキレス腱長においては, 日本人は 5-8 歳群から 9-12 歳群にかけて大きい年齢群ほど有意に長い値を示したが, ケニア人は各年齢群間に有意な違いは認められなかった. 下腿長に対する腓腹筋アキレス腱長の割合ではケニア人では 5-8 歳群が 0-4 歳群と比べて有意に大きい値を示し, 日本人では 0-4 歳群から 9-12 歳群にかけて大きい年齢群ほど有意に大きい値を示した. 下腿長に対するヒラメ筋アキレス腱長の割合では, 日本人は 9-12 歳群が 5-8 歳群より有意に大きい値を示したが, ケニア人は各年齢群間で有意な違いは認められなかった. アキレス腱横断面積は, ケニア人では 0-4 歳群から 13-16 歳群にかけて, 日本人では 0-4 歳群から 9-12 歳群にかけて, 大きい年齢群ほど有意に大きい値を示した.

ケニア人と日本人の違いを年齢群別で検討したところ, 下腿長は 5-8 歳群, 13-16 歳群, 17-19 歳群, 20 歳群で, 腓腹筋アキレス腱長は 0-4 歳群を除く全ての群で, ヒラメ筋腱長は 5-8 歳群, 17-19 歳群, 20 歳群でケニア人が日本人と比較して有意に長い値を示した

(Figure 11). 下腿長に対する腓腹筋・ヒラメ筋アキレス腱長の割合において, 腓腹筋アキレス腱では全ての年齢群でケニア人が有意に大きい値を示す一方で, ヒラメ筋アキレス腱は 20 歳群でのみケニア人が日本人より有意に大きい値を示した (Figure 11). アキレス腱横断面積は 13-16 歳群, 17-19 歳群でケニア人が日本人と比較して有意に大きい値を示した (Figure 11).

	L_{shank}							CSA_{AT}					
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr		0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		a	a	a	a	a	0-4yr		a	a	a	a	a
5-8yr	a		a	a	a	a	5-8yr	a		a	a	a	a
9-12yr	a	a		a	a	a	9-12yr	a	a		a	a	b
13-16yr	a	a	a		a	a	13-16yr	a	a	n.s.		n.s.	n.s.
17-19yr	a	a	a	b		n.s.	17-19yr	a	a	n.s.	n.s.		n.s.
20yr	a	a	a	a	n.s.		20yr	a	a	c	n.s.	n.s.	
	L_{AT-GAS}							Relative L_{AT-GAS}					
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr		0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		a	a	a	a	a	0-4yr		b	b	a	c	n.s.
5-8yr	a		a	a	a	a	5-8yr	n.s.		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
9-12yr	a	a		a	a	a	9-12yr	a	b		n.s.	n.s.	n.s.
13-16yr	a	a	a		n.s.	n.s.	13-16yr	a	a	n.s.		n.s.	n.s.
17-19yr	a	a	a	n.s.		n.s.	17-19yr	a	b	n.s.	n.s.		n.s.
20yr	a	a	a	n.s.	n.s.		20yr	a	b	n.s.	n.s.	n.s.	
	L_{AT-SOL}							Relative L_{AT-SOL}					
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr		0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		b	a	a	a	a	0-4yr		n.s	n.s	n.s	n.s	n.s
5-8yr	n.s.		n.s.	a	a	a	5-8yr	c		n.s	n.s	n.s	n.s
9-12yr	a	a		n.s.	a	a	9-12yr	n.s.	n.s.		n.s	n.s	n.s
13-16yr	a	a	n.s.		n.s.	n.s.	13-16yr	a	n.s.	n.s.		n.s	n.s
17-19yr	a	a	n.s.	n.s.		n.s.	17-19yr	a	n.s.	n.s.	n.s.		n.s
20yr	a	a	n.s.	n.s.	n.s.		20yr	a	n.s.	b	n.s.	n.s.	

Table 5. Significance level of differences in mean values of shank length and Achilles tendon parameters in Kenyan (bold) and Japanese population among each age group.

L_{shank}: Shank length, CSA_{AT}: Achilles tendon cross-sectional area, L_{AT-GAS}: Gastrocnemius-Achilles tendon length, L_{AT-SOL}: Soleus-Achilles tendon length, Relative L_{AT-GAS}: Gastrocnemius-Achilles tendon length relative to shank length, Relative L_{AT-SOL}: Soleus-Achilles tendon length relative to shank length.

a, b and c show significant differences among each age group at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

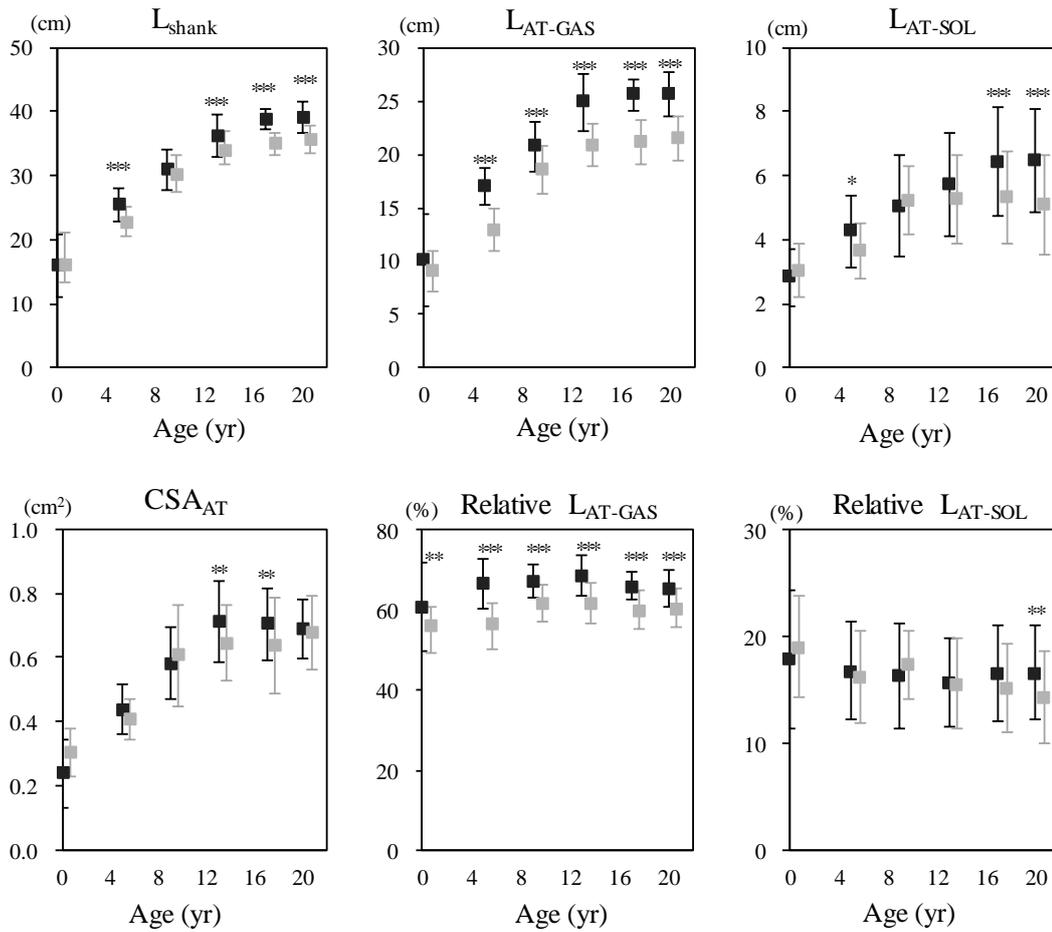


Figure 11. Comparisons of shank length and Achilles tendon parameters between Kenyan (■) and Japanese (■) population at different age groups.

L_{shank}: Sahnk length, CSA_{AT}: Achilles tendon cross-sectional area, L_{AT-GAS}: Gastrocnemius-Achilles tendon length, L_{AT-SOL}: Soleus-Achilles tendon length, Relative L_{AT-GAS}: Gastrocnemius-Achilles tendon length relative to shank length, Relative L_{AT-SOL}: Soleus-Achilles tendon length relative to shank length.

***, ** and * show significant differences between Kenyans and Japanese at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

Figure 12 は内側腓腹筋筋形態を年齢群別・人種別に示したものである。筋束長 ($F(5,643) = 7.13, p < 0.001, \eta^2 = 0.05$) , 羽状角 ($F(5,643) = 3.35, p < 0.01, \eta^2 = 0.02$) , 筋厚 ($F(5,643) = 9.70, p < 0.001, \eta^2 = 0.07$) において人種×年齢群の2要因に交互作用が認められた。下腿長に対する筋束長においては、人種×年齢群の2要因に交互作用は認められなかった ($F(5,643) = 2.21, p = 0.05, \eta^2 = 0.01$) 。

Table 6 に内側腓腹筋筋形態の人種別、各年齢群間の平均値の比較結果を示す。筋束長はケニア人で0-4歳群から17-19歳群にかけて、日本人では0-4歳群から13-16歳群、17-19歳群から20歳群にかけて、大きい年齢群ほど有意に長い値を示した。下腿長に対する筋束長の割合では、ケニア人は0-4歳群より5-8歳群が有意に小さい値を示し、日本人は0-4歳群から13-16歳群にかけて、大きい年齢群ほど有意に小さい値を示した。羽状角においては、ケニア人と日本人ともに各年齢群間で有意な違いは認められなかった。筋厚では、ケニア人で0-4歳群と5-8歳群、13-16歳群と17-19歳群で大きい年齢群が有意に大きい値を示し、日本人では0-4歳群から17-19歳群にかけて大きい年齢群ほど有意に大きい値を示した。

筋束長、下腿長に対する筋束長の割合について、各年齢群でのケニア人と日本人の比較では、ケニア人が日本人と比較して全ての年齢群で有意に短い値を示した (Figure 12) 。筋厚は、9-12歳群、13-16歳群、17-19歳群、20歳群でケニア人が日本人と比較して有意に小さい値を示した (Figure 12) 。羽状角は5-8歳群、9-12歳群、13-16歳群、17-19歳群、20歳群でケニア人が日本人と比較して有意に大きい値を示した (Figure 12) 。

	L_{Fas}							MG thickness					
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr		0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		a	a	a	a	a	0-4yr	b	a	a	a	a	
5-8yr	a		n.s.	b	a	a	5-8yr	a		n.s.	a	a	a
9-12yr	a	a		n.s.	a	a	9-12yr	a	a		a	a	a
13-16yr	a	a	a		b	b	13-16yr	a	a	a		a	a
17-19yr	a	a	a	n.s.		n.s.	17-19yr	a	a	a	a		n.s.
20yr	a	a	a	a	b		20yr	a	a	a	a	n.s.	
	Relative L_{Fas}							MG pennation angle					
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr		0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		a	a	a	a	a	0-4yr		c	b	a	a	a
5-8yr	a		b	a	a	a	5-8yr	n.s.		n.s.	a	a	a
9-12yr	a	b		n.s.	n.s.	n.s.	9-12yr	n.s.	n.s.		b	a	b
13-16yr	a	a	n.s.		n.s.	n.s.	13-16yr	b	a	n.s.		n.s.	n.s.
17-19yr	a	a	n.s.	n.s.		n.s.	17-19yr	a	a	a	b		n.s.
20yr	a	b	n.s.	n.s.	n.s.		20yr	a	a	a	c	n.s.	

Table 6. Significance level of differences in mean values of medial gastrocnemius muscle architecture in Kenyan (bold) and Japanese population among each age group.

MG: medial gastrocnemius muscle, L_{Fas}: MG fascicle length, Relative L_{Fas}: MG fascicle length relative to shank length
a, b and c show significant differences among each age group at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

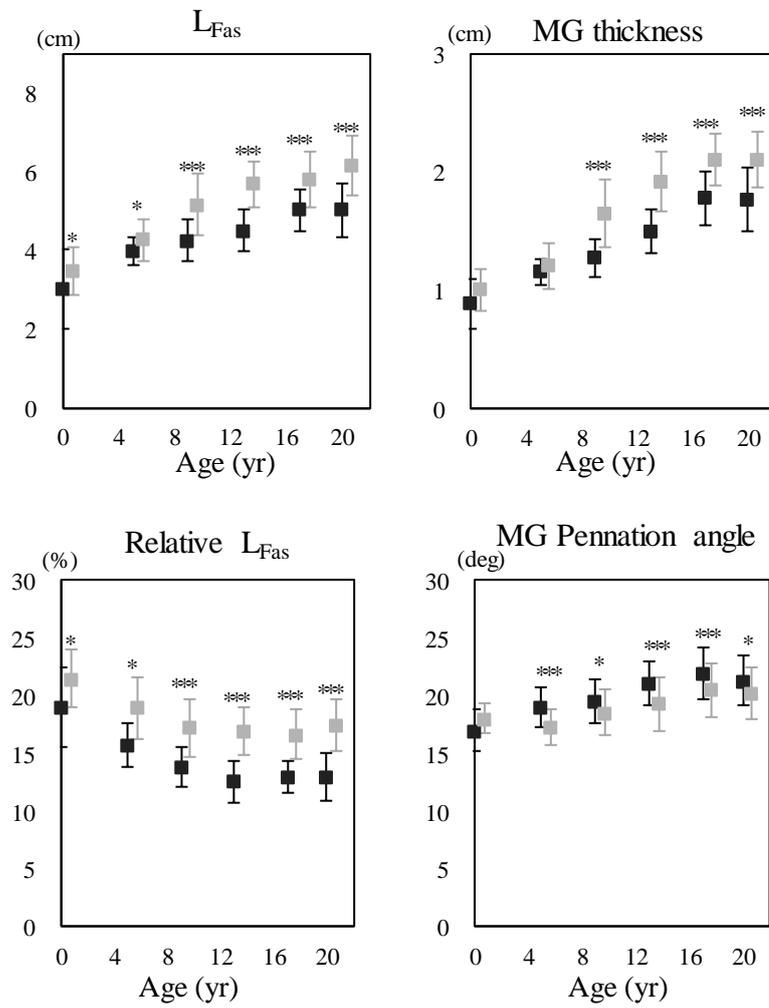


Figure 12. Comparisons of medial gastrocnemius muscle architecture between Kenyan (■) and Japanese (▒) population at different age groups.

MG: medial gastrocnemius muscle, L_{Fas} : MG fascicle length, Relative L_{Fas} : MG fascicle length relative to shank length

*** and * show significant differences between Kenyans and Japanese at $p < 0.001$ and $p < 0.05$, respectively.

Figure 13 は足部骨格形態を年齢群別・人種別に示したものである。MA_{AT} ($F(5,643) = 6.30, p < 0.001, \eta^2 = 0.05$) , 足長 ($F(5,643) = 5.79, p < 0.001, \eta^2 = 0.04$) , 前足長 ($F(5,643) = 2.27, p < 0.05, \eta^2 = 0.01$) と筋束長-MA_{AT}比 ($F(5,643) = 2.89, p < 0.05, \eta^2 = 0.02$) において人種×年齢群の2要因に交互作用が認められた。足関節でこ比においては人種×年齢群の2要因に交互作用は認められなかった ($F(5,643) = 1.95, p = 0.08, \eta^2 = 0.01$) 。

Table 7 に足部骨格形態の人種別, 各年齢群間の平均値の比較結果を示す。MA_{AT}は, ケニア人で0-4歳群から17-19歳群にかけて, 日本人では0-4歳群から13-16歳群にかけて, 大きい年齢群ほど有意に長い値を示した。足関節のこ比は日本人のみ13-16歳群が9-12歳群と比較し有意に小さい値を示した。前足長は, ケニア人で0-4歳群から13-16歳群にかけて, 日本人で0-4歳群から17-19歳群にかけて大きい年齢群ほど有意に長い値を示した。足長はケニア人で0-4歳群から17-19歳群にかけて, 日本人で0-4歳群から13-16歳群にかけて, 大きい年齢群ほど有意に長い値を示した。筋束長-MA_{AT}比は, ケニア人で5-8歳群から13-16歳群にかけて有意に小さい値を示した。

MA_{AT}について, 各年齢群におけるケニア人と日本人の比較では, ケニア人は17-19歳群, 20歳群で有意に長かった。足関節のこ比では, 5-8歳群, 9-12歳群, 17-19歳群, 20歳群でケニア人が有意に小さい値を示した。足長は, 5-8歳群, 17-19歳群, 20歳群でケニア人が, 前足長は9-12歳群で日本人が有意に長かった。筋束長-MA_{AT}比は, 5-8歳群, 9-12歳群, 13-16歳群, 17-19歳群, 20歳群でケニア人が有意に小さい値を示した (Figure 13) 。

	L_{foot}						L_{forefoot}						
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr		20yr	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		a	a	a	a	a	0-4yr		a	a	a	a	a
5-8yr	a		a	a	a	a	5-8yr	a		a	a	a	a
9-12yr	a	a		a	a	a	9-12yr	a	a		a	a	a
13-16yr	a	a	a		b	a	13-16yr	a	a	a		n.s.	n.s.
17-19yr	a	a	a	n.s.		n.s.	17-19yr	a	a	a	c		n.s.
20yr	a	a	a	n.s.	n.s.		20yr	a	a	a	a	n.s.	
	MA_{AT}						Foot lever ratio						
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr		20yr	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr	20yr
0-4yr		b	a	a	a	a	0-4yr		n.s.	n.s.	n.s.	b	n.s.
5-8yr	n.s.		a	a	a	a	5-8yr	n.s.		n.s.	a	a	a
9-12yr	a	a		a	a	a	9-12yr	n.s.	n.s.		n.s.	a	c
13-16yr	a	a	a		a	b	13-16yr	a	a	b		n.s.	n.s.
17-19yr	a	a	a	n.s.		n.s.	17-19yr	n.s.	a	n.s.	n.s.		n.s.
20yr	a	a	a	n.s.	n.s.		20yr	n.s.	a	n.s.	n.s.	n.s.	
	L_{Fas}-MA_{AT} ratio												
	0-4yr	5-8yr	9-12yr	13-16yr	17-19yr		20yr						
0-4yr		n.s.	b	a	a	a							
5-8yr	n.s.		b	a	a	a							
9-12yr	n.s.	n.s.		c	n.s.	n.s.							
13-16yr	a	a	n.s.		n.s.	n.s.							
17-19yr	n.s.	a	n.s.	n.s.		n.s.							
20yr	n.s.	c	n.s.	c	n.s.								

Table 7. Significance level of differences in mean values of foot architecture in Kenyan (bold) and Japanese population among each age group.

L_{foot}: foot length, L_{forefoot}: forefoot length, MA_{AT}: Achilles tendon moment arm, L_{Fas}-MA_{AT} ratio: Medial gastrocnemius muscle fascicle length-MA_{AT} ratio.

a, b and c show significant differences among each age group at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

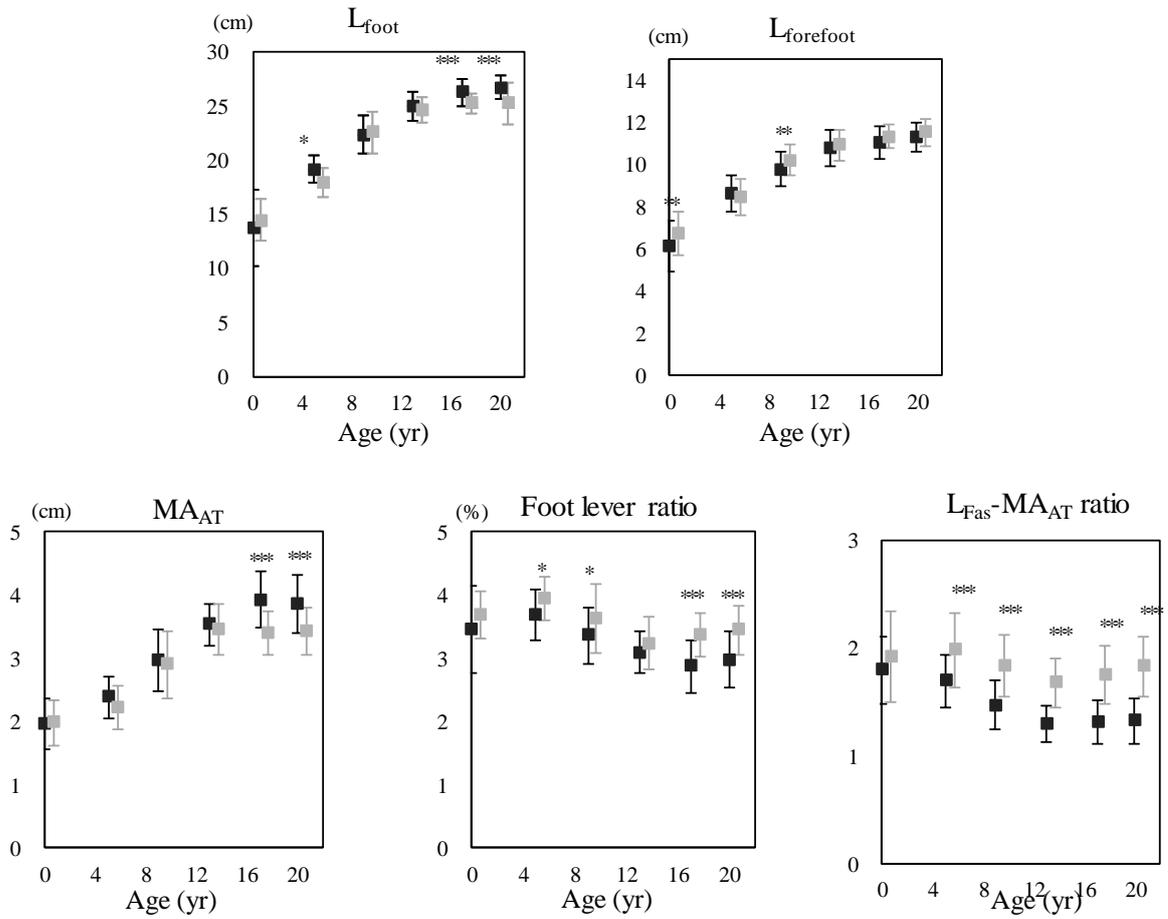


Figure 13. Comparisons of foot architecture between Kenyan (■) and Japanese (■) population at different age groups.

L_{foot} : foot length, L_{forefoot} : forefoot length, MA_{AT} : Achilles tendon moment arm, $L_{Fas}-MA_{AT}$ ratio: Medial gastrocnemius muscle fascicle length- MA_{AT} ratio.

***, ** and * show significant differences between Kenyans and Japanese at $p < 0.001$, $p < 0.01$ and $p < 0.05$, respectively.

4.5 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い（研究課題 3, 骨格の大きさを考慮した各下腿骨格・筋腱形態の人種間（ケニア人と日本人）の比較）

Figure 14 に、ケニア人と日本人の骨格の大きさ（身長，下腿長，足長）と各下腿骨格・筋腱形態の関係を示す。全ての相関関係において、回帰係数が有意であることが示された。そこで、骨格の大きさと各下腿骨格・筋腱形態との間で平行性の検定を行なった結果、ケニア人と日本人の下腿長と腓腹筋アキレス腱長との間でのみ、交互作用がみられず ($F = 0.849, p = 0.357$)，平行性の仮定が保証された。そこで、共分散分析によって、ケニア人と日本人の腓腹筋アキレス腱長の平均値の差を検討した結果、ケニア人は日本人より有意に大きい値を示した ($F = 228.633, p < 0.001$)。

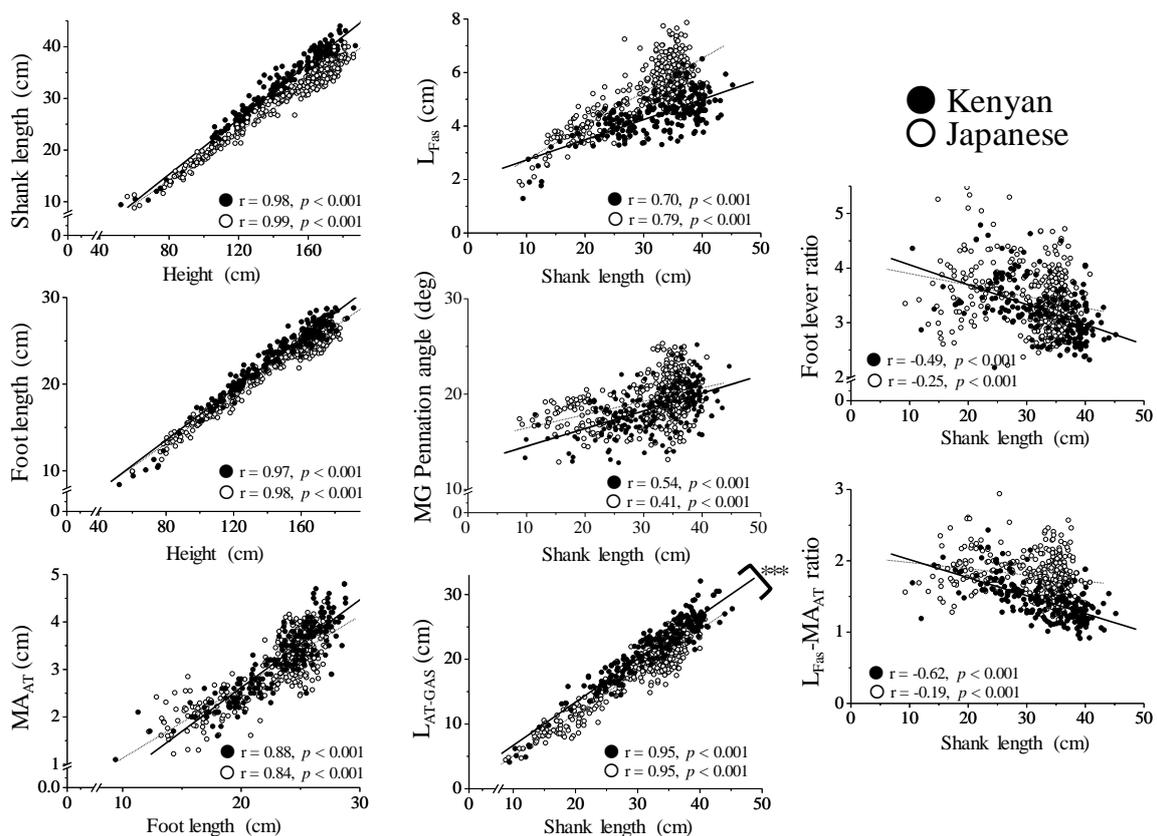


Figure 14. Relationships between segment length and musculoskeletal parameter in Kenyan (●) and Japanese (○) population.

MA_{AT}: Achilles tendon moment arm, MG: medial gastrocnemius muscle, L_{FAS}: MG fascicle length, L_{AT-GAS}: Gastrocnemius-Achilles tendon length.

***shows significant difference between Kenyans and Japanese at $p < 0.001$ (by ANCOVA).

5. 考察

本研究では、エリートケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴を明らかにし、走能力に関係する項目を抽出した。さらに、ケニア人の下腿骨格・筋腱形態について地域間の違いがあるのか検討し、ケニア人エリート選手の走能力に関係する形態的特徴は、エリート選手のみに認められる特有の特徴か、またはケニアの地域性に起因するものか明らかにした。

5.1 エリートケニア人陸上中長距離選手を含むケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱形態の特徴と競技力との関係

これまでの一般ランナーを対象とした研究では、短い MA_{AT} を有するランナーほどランニングエコノミーが高いと報告されてきた。短い MA_{AT} によって、走運動中のアキレス腱張力が増加し、腱の弾性利用効率が高まることから、高いランニングエコノミーを可能にするメカニクスと主張されている (Scholz et al., 2008; Raichlen et al., 2011; Barnes et al., 2014; Mooses et al., 2015)。一方で、本研究の結果から、エリートケニア人選手の特徴として長い MA_{AT} が確認され、競技力の高い選手ほど MA_{AT} は長かった。つまり、エリートケニア人選手は、従来の一般ランナーとは異なるメカニクスで高いランニングエコノミーでの走行を可能にしていると考えられる。 MA_{AT} が長い場合、短い場合と比較して、同程度の足関節底屈トルクを発揮した際の下腿三頭筋発揮張力は小さくなる。したがって、エリートケニア人選手においては、長い MA_{AT} を活かして下腿三頭筋にかかる負荷を減らしている可能性がある。Sano et al (2015) は、東アフリカのエリート選手の走運動接地中の下腿三頭筋の筋活動量と腓腹筋筋束短縮量は日本人選手と比べて少ないことを報告している。東アフリカのエリート選手の走運動中の下腿三頭筋筋動態の特徴は、エリートケニア人選手の長い MA_{AT} が筋の仕事量を

抑える可能性を支持するものである。さらに、エリートケニア人選手の特徴として、長い MA_{AT} に加え、小さいてこ比（前足長 / MA_{AT} ）も確認され、競技力とてこ比の間には負の相関関係が認められた。安静時の足関節のてこ比は、走運動中のギア比（垂直方向の床反力のモーメントアーム / MA_{AT} ）に対応する骨格指標であり、運動中のエネルギー消費や力発揮効率に影響する（Carrier et al., 1994, 1998; Biewener et al., 2004; Karamanidis & Arampatzis, 2007）。長い MA_{AT} に加えて、小さい足関節のてこ比を示したエリートケニア人選手の足部骨格形態は、下腿三頭筋の発揮張力を効果的に足関節底屈トルクへ変換できる特徴であり、エリートケニア人選手は力発揮効率の高い骨格構造を有しているといえる。これらの点から、一般の陸上中長距離選手とエリートケニア人選手においては、 MA_{AT} の長・短がランニングエコノミーや競技力に及ぼす影響が異なることが考えられ、今後はそのメカニクスの詳細を検討していくことが必要である。

本研究の結果から、エリートケニア人選手の下腿筋形態の特徴として、短い内側腓腹筋筋束、大きい羽状角、小さい筋厚が確認された。これらの特徴は、少ない筋量にも関わらず、生理学的横断面積を効率よく稼ぐことができる点から、筋のエネルギー消費量を抑えたエリートケニア人選手の走行の可能性（Sano et al., 2015）を支持するものである。筋形態と競技力との関係においては、競技力の高い選手ほど短い筋束を示した（ $r = -0.34$, $p < 0.05$ ）。一般の陸上中長距離選手においても、一般成人と比較して腓腹筋筋束が短いことが知られている（Karamanidis & Arampatzis, 2006）。筋束の長さは筋の短縮量を決定する構造的因子である。短い筋束の場合、単位筋束あたりのサルコメア数が少なくなり、筋の収縮量が少なくなることから、張力を発揮する際のエネルギー消費量も小さくなる（Lieber & Fridén, 2000; Blazevich., 2006）。日本人選手と比較して短い筋束を有するエリートケニア人選手においては、筋張力発揮時のエネルギー消費量も少ない可能性があり、短い筋束の特徴が効率的な走行に有利に働いていると考えられる。また、長い MA_{AT} と短い筋束を有するエリートケニア

人選手の筋束長- MA_{AT} 比は日本人選手と比較して有意に小さく、競技力とも負の相関関係が認められた ($r = -0.56, p < 0.001$, Figure 7) . 筋束長- MA_{AT} 比が小さい場合、大きい場合と比較して、足関節の背屈方向への関節可動域が小さくなる (Lieber & Fridén, 2000) . 東アフリカのエリート選手は、走運動接地中の足関節角度変化量が小さいことから (Sano et al., 2015) , これらに小さい筋束長- MA_{AT} 比が影響している可能性が高い. また、東アフリカのエリート選手の走運動接地中の足関節角度変化量が小さいことは (Sano et al., 2015) , エリートケニア人選手は短い MA_{AT} で足関節を回転しやすくしているのではなく、長い MA_{AT} を活かして、小さい足関節可動範囲でも効率良く足関節底屈トルクを発揮していると考えられる. そして、エリートケニア人選手の効率的な力発揮を可能とする特徴的な下腿の筋腱の振る舞い (Sano et al., 2013, 2015) は、上記のような下腿骨格・筋腱形態と走動作の特徴によるものと考えられる.

アキレス腱形態については、腓腹筋アキレス腱長のみ競技力と有意な弱い正の相関関係が認められた ($r = 0.38, p < 0.05$) . 先行研究では、腓腹筋アキレス腱が長い人ほどランニングエコノミーが高いと報告されており (Hunter et al., 2011, 2015) , 本研究の結果とも一致している. 先行研究では、長いアキレス腱によって腱の伸張量が増加し、弾性エネルギーがより貯蔵されることで効率的な走りが可能になると考察されている (Hunter et al., 2011, 2015) . しかしながら、東アフリカのエリート選手は走運動 (Sano et al., 2015) やホッピング運動 (Sano et al., 2013) の接地中、アキレス腱の伸張・短縮量は日本人選手と比較して少ない. そのため、長い MA_{AT} と小さい MA_{AT} との比によって、アキレス腱への張力が軽減されている可能性を踏まえると、エリートケニア人選手の長いアキレス腱は、走運動中、腱を沢山伸び縮みさせ、弾性エネルギーの貯蔵量を増加させるよりも、運動中の腱の伸張率をより抑え、アキレス腱の疲労低下 (スティフネスの低下) を軽減させることに貢献している可能性がある (Wren et al., 2003; Peltonen et al., 2010) .

5.2 エリートケニア人陸上中長距離選手とケニアの一般陸上中長距離選手，一般成人の下腿骨格・筋腱形態の違い

エリートケニア人陸上中長距離選手の特徴であった長い腓腹筋・ヒラメ筋アキレス腱長，短い内側腓腹筋筋束長，長い MA_{AT} と小さい足関節のてこ比は，ケニア出身の一般男子陸上中長距離選手と特別な運動を行っていない一般成人男性においても同様に確認された。つまり，ケニア出身のエリート男子陸上中長距離選手の特徴的な長いアキレス腱， MA_{AT} と短い筋束は，ケニア人男性に共通した特徴である可能性が高い。

腓腹筋アキレス腱長やアキレス腱モーメントアーム長の可塑性については，発育に伴ってそれぞれの長さが増加すること (Waugh et al., 2011) や骨格 (脛骨長や足長) サイズの影響を受けること (Waugh et al., 2011; Sheehan, 2012; Rosso et al., 2012) が報告されている。しかし，トレーニングや特殊な環境による適応についての報告は見当たらないことから，エリートケニア人選手の長い腓腹筋アキレス腱と MA_{AT} はケニア人の遺伝やケニア地域の環境による影響が強いかもれない。

一方で，筋束長についてはトレーニングや環境による適応の可能性が示唆されている。12ヶ月間のマラソントレーニングによって筋束は短くなる (Murach et al., 2015)。また，狩猟採集民で木に登る習慣のある部族と農耕民の部族の生活環境の違いが筋束長に影響を及ぼすこと (Venkataraman et al., 2013) が報告されている。本研究においては，ELITE (5.17 ± 0.43 cm)，RUNNERS (5.19 ± 0.58 cm) と CTRL (5.05 ± 0.69 cm) の腓腹筋の筋束長は，先行研究の日本人ランナー (5.36 ± 0.72 cm; Abe et al., 2000, 5.7 ± 0.9 cm; Sano et al., 2015) や日本人一般成人 (5.69 ± 0.75 cm; Abe et al., 2000)，ヨーロッパの一般成人 (5.68 ± 0.94 cm; Sano et al., 2013) と比較して短かった。つまり，エリートケニア人選手の短い筋束についても，ケ

ニア人の遺伝的または環境による特徴である可能性が高いと考えられる。筋束長に影響を及ぼす遺伝または環境的要因については今後検討していく必要がある。

Magnusson & Kjaer (2003) は、アキレス腱近位部ではレクリエーションレベルのランナーと非ランナーにおいて、アキレス腱横断面積に違いが認められないことを報告している。しかしながら、本研究では、ELITE と RUNNERS のアキレス腱横断面積は CTRL と比較して有意に小さかった (Figure 8c) 。 Sheehan (2012) は、体質量はアキレス腱横断面積と正の相関関係にあると報告しており、本研究でも、体質量あたりのアキレス腱横断面積においては3群間で有意な違いが認められなかった。これらの点から、ELITE に認められる細いアキレス腱は、ランニングトレーニングによる特異的な適応ではなく、陸上中長距離選手の小さい体質量が影響したためと考えられる。

5.3 発育段階におけるケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態の違い

本研究の発育段階の一般ケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態は、欧米人や日本人を対象とした先行研究 (Morse et al., 2008; Waugh et al., 2011; Waugh et al., 2012; 坂口と図子 2013) と同様に、乳児期から成人期までのケニア人の腓腹筋アキレス腱長、内側腓腹筋筋束長、羽状角、筋厚、 MA_{AT} は大きい年齢群ほど大きい値を示した。

発育段階のケニア人と日本人の下腿骨格・筋腱形態を比較した結果、ケニア人の子ども達は日本人と比べて5~8歳頃から長い腓腹筋アキレス腱を示し、0~4歳頃から短い筋束を示した。これらの結果から、エリートケニア人選手の高い競技力に関係する、長い腓腹筋アキレス腱や短い筋束の特徴はケニアの地域性に起因している可能性が高い。腓腹筋アキレス腱長については、下腿長と高い正の相関関係にあることが報告されているため (Rosso et al., 2012) , ケニア人で確認された長い下腿が長い腓腹筋アキレス腱に影響している可能性があ

る。しかしながら、全ての発育段階で、ケニア人の下腿長に対する腓腹筋アキレス腱長の割合は日本人と比較して有意に大きかった。さらに、ケニア人の筋束長の絶対値と下腿長に対する筋束の割合は日本人と比較して有意に短かったことから、ケニア人は腓腹筋筋腱複合体における腱の占める割合が日本人と比べて大きいことが考えられる。また、本研究のケニア人の子ども達の腓腹筋アキレス腱長と筋束長を先行研究の同年代の欧米 (Morse et al., 2008; Waugh et al., 2012) や日本 (坂口と凶子, 2014) の子ども達の値と比較したところ、ケニア人の子ども達の腓腹筋アキレス腱は長く、筋束長は短かった。すなわち、エリートケニア人選手の長い腓腹筋アキレス腱や短い筋束は、遺伝または環境の影響を受けた、ケニア人に共通して認められる幼少期からの特徴であると考えられる。一方で、ケニア人と日本人の下腿長と筋束長の関係において、ケニア人と日本人の回帰直線に平行性は認められなかったことから、発育段階の筋束長の増加の程度が日本人とケニア人で異なる可能性がある。

足部骨格構造について、 MA_{AT} は青年期以降でケニア人は日本人と比較して有意に長く、一方で、前足長については、ケニア人が短い傾向を示した。その結果、青年期以降でケニア人の足関節の MA_{AT} は日本人と比較して有意に小さい値を示した。つまり、エリートケニア人選手の高い競技力に関係する長い MA_{AT} や小さい足関節の MA_{AT} は、発育段階で特徴として確認できるケニア人に共通した形態である可能性が高い。 MA_{AT} は踵骨長と高い正の相関関係にあることから (Raichlen et al., 2011) , ケニア人は発育段階における踵骨の成長が日本人よりも大きい可能性がある。乳幼児期から成人期までの MA_{AT} については、欧米などの他人種では調査されていないため、ケニア人特有の踵骨の成長の可能性については今後さらなる検討が必要である。

5.4 本研究の方法論上の限界点

本研究の限界点として、以下の点が挙げられる。研究課題 1・2 の陸上中長距離選手の競技力の評価は、全ての被験者において、同じ大会の記録を使用するのが好ましいができなかった。また、本来は酸素消費量を直接測定しランニングエコノミーを評価すべきであった。しかしながら、ケニア人選手と日本人選手は標高の異なる場所で中・長距離走トレーニングを行っており、異なった測定場所では正確に酸素消費量を評価することは難しい。そのため、今回は IAAF スコアリングテーブルシステムを用いて長距離走能力の評価を行った。

研究課題 3 では、発育過程における下腿骨格・筋腱形態の検討を試みた。発育の影響を検討する場合、同一被験者を追跡して調査・測定すべきであるが、研究期間やコストの問題から、本研究では横断的研究手法によって調査・測定を行なった。そのため、各年齢群での被験者は異なり、年齢群によってはサンプル数が相対的に小さくなっている。今後は、縦断的調査による検討が課題である。

また、本研究での超音波装置による MA_{AT} の算出は、Scholz et al. (2008) が用いた矢状面の写真撮影から求めた値よりも小さい傾向にあった。しかしながら、超音波画像から算出された MA_{AT} 値は、矢状面の写真撮影から求めた MA_{AT} 値よりも、3次元 Magnetic resonance imaging 法でより正確に算出された MA_{AT} 値 (Hashizume et al., 2012) と近いことを同一被験者で確認しており、本研究の被験者間の違いは評価には影響していないと考えられる。

6. 結論

- 1) エリートケニア人陸上中長距離選手の下腿骨格・筋腱の形態的特徴として、長い腓腹筋アキレス腱と MA_{AT} 、短い内側腓腹筋筋束、大きい羽状角と小さい筋厚に加えて、小さい足関節にてこ比、筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比が確認された。特に、 MA_{AT} 、足関節にてこ比、筋束長-アキレス腱モーメントアーム長比が走能力と関係している。
- 2) エリートケニア人選手の特徴的な下腿骨格・筋腱の形態は、先天的要因やトレーニングによって獲得されたエリート選手のみに認められる特徴ではなく、ケニア人一般成人男性にも共通して認められる特徴である。
- 3) ケニア人の長い腓腹筋アキレス腱以外の下腿骨格・筋腱形態の特徴は、発育段階で認められるケニア人に共通した形態的特徴である可能性が高い。

引用文献

Anderson T. (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med.* 2: 76–89.

Abe T, Kumagai K, Brechue WF. (2000) Fascicle length of leg muscles is greater in sprinters than distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 32: 1125–1129.

Barnes KR, McGuigan MR, Kilding AE. (2014) Lower-body determinants of running economy in male and female distance runners. *J Strength Cond Res.* 28: 1289–1297.

Biewener AA, Roberts TJ. (2000) Muscle and tendon contributions to force, work, and elastic energy savings: a comparative perspective. *Exerc Sport Sci Rev.* 28: 99–107.

Biewener AA, Farley CT, Roberts TJ, Termaner M. (2004) Muscle mechanical advantage of human walking and running: implications for energy cost. *J Appl Physiol.* 297: 2266–2274.

Blazevich AJ. (2006) Effects of physical training and detraining, immobilisation, growth and aging on human fascicle geometry. *Sports Med.* 36: 1003–1017.

Carrier DR, Heglund NC, Earls KD. (1994) Variable gearing during locomotion in the human musculoskeletal system. *Science.* 265: 651–653.

Carrier DR, Gregersen CS, Silverton NA. (1998) Dynamic gearing in running dogs. *J Exp Biol.* 201: 3185–3195.

Costill DL, Thomason H, Roberts E. (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports.* 5: 248–252.

Dowson TJ, Taylor CR. (1973) Energetic cost of locomotion in Kangaroos. *Nature.* 246: 313–314.

榎本靖士, 岡崎和伸, 岡田英孝, 渋谷俊浩, 杉田正明, 高橋英幸, 高松潤二, 前川剛輝, 森丘保典, 横澤俊治. (2009) ケニア人長距離選手の生理学的・バイオメカニクス的特徴の究明～日本人長距離選手の強化方策を探る～. 上月財団スポーツ研究助成事業報告書.

Fletcher JR, Groves EM, Pfister TR, Macintosh BR (2013) Can muscle shortening alone, explain the energy cost of muscle contraction in vivo? *Eur J Appl Physiol.* 113: 2313–2322.

Hashizume S, Iwanuma S, Akagi R, Kanehisa H, Kawakami Y, Yanai T. (2012) In vivo determination of the Achilles tendon moment arm in three-dimensions. *J Biomech.* 45: 409–413.

Hunter GR, Katsoulis K, McCarthy JP, Ogard WK, Bamman MM, Wood DS, Den Hollander JA, Blauadeu TE, Newcomer BR (2011) Tendon length and joint flexibility are related to running economy. *Med Sci Sports Exerc.* 43: 1492–1499.

Hunter GR, McCarthy JP, Carter SJ, Bamman MM, Gaddy ES, Fisher G, Katsoulis K, Plaisance EP, Newcomer BR. (2015) Muscle fiber type, Achilles tendon length, potentiation, and running economy. *J Strength Cond Res.* 29: 1302–1309.

Joyner MJ. (1991) Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol.* 70: 683–637.

Joyner MJ, Coyle EF. (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol.* 586: 35–44.

Karamanidis K, Arampatzis A. (2006) Mechanical and morphological properties of human quadriceps femoris and triceps surae muscle-tendon unit in relation to aging and running. *J Biomech.* 39: 406–417.

Larsen, HB. (2003) Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.*, 136: 161–170.

Larsen HB, Christensen DL, Nolan T, Søndergaard H. (2004) Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Ann Hum Biol.* 31: 159–173.

Larsen HB, Sheel AW. (2015) The Kenyan runners. *Scand J Med Sci Sports.* 4: 110–118.

Lieber RL, Fridén J. (2000) Functional and clinical significance of skeletal muscle architecture. *Muscle Nerve.* 23: 1647–1666.

Lieberman DE, Castillo ER, Otarola-Castillo E, Sang MK, Sigei TK, Ojiambo R, Okutoyi P, Pitsiladis Y. (2015) Variation in Foot Strike Patterns among Habitually Barefoot and Shod Runners in Kenya. *PLoS One.* 10: e0131354. doi: 10.1371/journal.pone.0131354.

Lucia A, Esteve-Lanao J, Oliván J, Gomez-Gallego F, San Juan AF, Santiago C, Perez M, Chamorro-Vina C, Foster C. (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl Ohysiol Nutr Metab.* 31: 530–540.

Lundberg A, Svensson OK, Németh G, Selvik G. (1989) The axis of rotation of the ankle joint. *J Bone Joint Surg Br.* 71: 94–99.

Magnusson P, Kjaer M. (2003) Region-specific differences in Achilles tendon cross-sectional area in runners and non-runners. *Eur J Appl Physiol.* 90: 549–553.

Mooses M, Mooses K, Haile DW, Durussel J, Kaasik P, Pitsiladis YP (2015) Dissociation between running economy and running performance in elite Kenyan distance runners. *J Sports Sci.* 33: 136–144.

- Moses M, Hackney AC. (2016) Anthropometrics and Body Composition in East African Runners: Potential Impact on Performance. *Int J Sports Physiol Perform.* 15: 1–27.
- Morse CI, Tolfrey K, Thom JM, Vassilopoulos V, Maganaris CN, Narici MV. (2008) Gastrocnemius muscle specific force in boys and men. *J Appl Physiol.* 104: 469–474.
- Murach K, Greever C, Luden ND. (2015) Skeletal muscle architectural adaptations to marathon run training. *Appl Physiol Nutr Metab.* 40: 99–102.
- Onywera VO, Kiplamai FK, Biot MK, Pitsiladis YP (2004) Food and macronutrient intake of elite Kenyan distance runners. *Int J Sport Nutr Exerc Metab.* 14: 709–719.
- Onywera VO, Scott RA, Boit MK, Pitsiladis YP. (2006) Demographic characteristics of elite Kenyan endurance runners. *J Sports Sci.* 24: 415–422.
- Peltonen J, Cronin NJ, Avela J, Finni T. (2010) In vivo mechanical response of human Achilles tendon to a single bout of hopping exercise. *J Exp Biol.* 213: 1259–1265.
- Pitsiladis Y, Wang G, Wolfarth B, Scott R, Fuku N, Mikami E, He Z, Fiuza-Luces C, Eynon N, Lucia A. (2013) Genomics of elite sporting performance: what little we know and necessary advances. *Br J Sports Med.* 47: 550–555.
- Prommer N, Thoma S, Quecke L, Gutekunst T, Völzke C, Wachsmuth N, Niess AM, Schmidt W. (2010) Total hemoglobin mass and blood volume of elite Kenyan runners. *Med Sci Sports Exerc.* 42: 791–797.
- Raichlen DA, Armstrong H, Lieberman DE. (2011) Calcaneus length determines running economy: Implications for endurance running performance in modern humans and Neanderthals. *J Hum Evol.* 60: 299–308.

Rosso C, Schuetz P, Polzer C, Weisskopf L, Studler U, Valderrabano V. (2012) Physiological Achilles tendon length and its relation to tibia length. *Clin J Sport Med.* 22: 483–487.

Rugg SG, Gregor RJ, Mandelbaum BR, Chiu L. (1990) In vivo moment arm calculations at the ankle using magnetic resonance imaging (MRI). *J Biomech.* 23: 495–501.

坂口将太, 関子浩二. (2013) 2歳から6歳までの幼児におけるリバウンドジャンプ遂行能力の発達過程, *体育学研究*, 58: 599–615.

Saltin B, Astrand PO. (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol.* 23: 353–358.

Saltin B, Larsen H, Terrados N, Bangsbo J, Bak T, Kim CK, Svedenhag J, Rolf CJ. (1995a) Aerobic exercise capacity at sea level and at altitude in Kenyan boys, junior and senior runners compared with Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports.* 5: 209–221.

Saltin B, Kim CK, Terrados N, Larsen H, Svedenhag J, Rolf CJ. (1995b) Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand J Med Sci Sports.* 5: 222–230.

Saltin B. (2003) The Kenya project - Final report. *New studies in athletics.* 18: 15–24.

Sano K, Ishikawa M, Nobue A, Danno Y, Akiyama M, Oda T, Ito A, Hoffrén M, Nicol C, Locatelli E, Komi PV. (2013) Muscle-tendon interaction and EMG profiles of world class endurance runners during hopping. *Eur J Appl Physiol.* 113: 1395–1403.

Sano K, Nicol C, Akiyama M, Kunimasa Y, Oda T, Ito A, Locatelli E, Komi PV, Ishikawa M. (2015) Can measures of muscle-tendon interaction improve our understanding of the superiority of Kenyan endurance runners? *Eur J Appl Physiol.* 115: 849–859.

Santos-Concejero J, Tam N, Coetzee DR, Oliván J, Noakes TD, Tucker R. (2016) Are gait characteristics and ground reaction forces related to energy cost of running in elite Kenyan runners? *J Sports Sci.* 7: 1–8.

Scholz MN, Bobbert MF, van Soest AV, Clark JR, van Heerden, J. (2008) Running biomechanics: shorter heels, better economy. *J Exp Biol.* 211: 3266–3271.

Scott RA, Georgiades E, Wilson RH, Goodwin WH, Wolde B, Pitsiladis YP (2003) Demographic characteristics of elite Ethiopian endurance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 35: 1727–1732.

Scott RA, Moran C, Wilson RH, Onywera V, Boit MK, Goodwin WH, Gohlke P, Payne J, Montgomery H, Pitsiladis YP. (2005) No association between Angiotensin Converting Enzyme (ACE) gene variation and endurance athlete status in Kenyans. *Comp Biochem Physiol A Mol Integr Physiol.* 141: 169–175.

Scott RA, Fuku N, Onywera VO, Boit M, Wilson RH, Tanaka M, H Goodwin W, Pitsiladis YP. (2009) Mitochondrial haplogroups associated with elite Kenyan athlete status. *Med Sci Sports Exerc.* 41: 123–128.

Sheehan FT. (2012) The 3D in vivo Achilles' tendon moment arm, quantified during active muscle control and compared across sexes. *J Biomech.* 45: 225–230.

Spiriev B. (2011) IAAF scoring tables. Monaco: Multiprint.

Tam E, Rossi H, Moia C, Berardelli C, Rosa G, Capelli C, Ferretti G. (2012) Energetics of running in top-level marathon runners from Kenya. *Eur J Appl Physiol.* 112: 3797–3806.

Venkataraman VV, Kraft TS, Dominy NJ. (2013) Tree climbing and human evolution. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 110: 1237–1242.

Waugh CM, Blazeovich AJ, Fath F, Korff T. (2011) Can Achilles tendon moment arm be predicted from anthropometric measures in pre-pubescent children? *J Biomech.* 44: 1839–1844.

Waugh CM, Blazeovich AJ, Fath F, Korff T. (2012) Age-related changes in mechanical properties of the Achilles tendon. *J Anat.* 220: 144–155.

Weston AR, Mbambo Z, Myburgh KH. (2000) Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med Sci Sports Exerc.* 32: 1130–1134.

Wren TAL, Lindsey DP, Beaupré GS, Carter DR. (2003) Effects of creep and cyclic loading on the mechanical properties and failure of human Achilles tendons. *Ann Biomed Eng.* 31: 710–717.

Yang N, MacArthur DG, Wolde B, Onywera VO, Boit MK, Lau SY, Wilson RH, Scott RA, Pitsiladis YP, North K. (2007) The ACTN3 R577X polymorphism in East and West African athletes. *Med Sci Sports Exerc.* 39: 1985–1988.

吉岡利貢, 中垣浩平, 中村和照, 向井直樹, 鎌倉賢治. (2012) 世界トップレベルで活躍するケニア人長距離ランナーの体力・形態特性. *体育学研究*, 57: 237–248.

謝辞

本論文の執筆にあたりご協力頂いた方々へ心よりお礼申し上げます。

指導教員である石川昌紀先生には、大学院博士前期課程から後期課程にわたり、論文の執筆、実験方法から研究への取り組み方まで、根気よく熱心にご指導頂きました。これまで先生の多大な労力によって、ここまでご指導頂いたこと、ここに深く感謝申し上げます。

伊藤章先生（大阪体育大学名誉教授）、金子公有先生（大阪体育大学名誉教授）、Paavo V Komi 先生（University of Jyväskylä）、Caroline Nicol 先生（Aix-Marseille Université）、小田俊明先生（兵庫教育大学）には論文の執筆や研究活動において、多くの貴重なご意見・ご指導を頂きました。Julian Wayne 先生（大阪体育大学）には、欧文での論文執筆において、大変丁寧にご指導頂きました。また、石川研究室の助手の佐野先生をはじめ、大学院生、学部生の皆さまには、測定の協力、博士論文の執筆にあたりご協力頂きました。ここに深く感謝申し上げます。

また、本研究プロジェクトでは、多くのケニアと日本の陸上関係者の皆様、特に、測定においては、Keino K 博士（the IAAF High Performance Training Centre, Kenya）をはじめ、ケニアと日本の陸上中長距離選手、コーチ、監督の皆さまにご協力頂きました。子ども達の測定においては、子ども達のご両親、ケニアと日本の保育園、幼稚園、小・中・高校関係者の皆様に快くご協力頂きました。心より感謝致します。

本研究は、JSPS 科研費 20800061, 23500729, 23700756, 15KK0261, JSPS 二国間交流事業共同研究の助成と世界陸上連盟の協力によって行われました。ここに記して感謝の意を表します。

2017年2月 国正陽子