

ケニア人長距離選手の生理学的・バイオメカニクスの特徴の究明  
～日本人長距離選手の強化方策を探る～

榎本靖士

目 次

要約・・・・・・・・・・1

緒言・・・・・・・・・・2

方法・・・・・・・・・・3

結果・・・・・・・・・・6

考察・・・・・・・・・・17

摘要・・・・・・・・・・21

ケニア人長距離選手の生理学的・バイオメカニクスの特徴の究明  
～日本人長距離選手の強化方策を探る～

榎本靖士(京都教育大学)  
岡崎和伸(大阪市立大学)  
岡田英孝(電気通信大学)  
渋谷俊浩(びわこ成蹊スポーツ大学)  
杉田正明(三重大学)  
高橋英幸(国立スポーツ科学センター)  
高松潤二(国立スポーツ科学センター)  
前川剛輝(国立スポーツ科学センター)  
森丘保典(日本体育協会スポーツ科学研究室)  
横澤俊治(国立スポーツ科学センター)

要約

本研究の目的は、ケニア人長距離選手の生理学的およびバイオメカニクスの特徴を日本人選手と比較して明らかにし、日本人選手に適した持久力および走動作の改善点および改善法を検討し、日本人長距離選手の強化に役立つ示唆を得ようとするものである。

ケニア人および日本人一流選手を被験者とし、血液、体格、筋横断面積、トレッドミルテストにおける生理学的変量、走動作のバイオメカニクスの変量を計測した。血液では、全血液量を推定し、体格では三次元人体形状計測装置を用いて人体の体積を計測し、その後 CAD ソフトを用いて質量、質量中心位置、慣性モーメントを算出した。MRI は下腿、大腿、体幹における横断画像を撮影し、断面積を算出した。トレッドミルテストは、320m/min から 20m/min ごとに増大させ、1 セット 4 分間走を 1 分間の休息と血中乳酸濃度の測定を 4 セットくり返した。走動作は直線走路においてモーションキャプチャと地面反力計を用いて計測した。

その結果、ケニア人選手の血液は、赤血球が小さく、ヘモグロビン量がやや多く、粘性は小さい傾向にあった。全血液量はケニア人選手と日本人選手に関係なく、酸素摂取能力と強い関係がみられた。ケニア人選手は、日本人選手との間に LT において差は見られず、ランニングエコノミーが高いことがわかった。筋の横断面積は、ケニア人選手は大腰筋が大きく、日本人選手は内転筋が大きかった。そのほか、ケニア人選手は下腿が細長く、アキレス腱が長いことが明らかとなった。走動作は、キック脚のスウィングは、下腿がすばやく、かつ大きく前傾し、支持期を通して大腿のスウィングスピードが大きい。そして、離地後、いったん後方へ送らせて、股関節屈曲トルクがタイミングよく、大きく発揮されることで効果的に大腿の前方スウィング動作を行なえると考えられた。

ケニア人選手は、大腿の大きく、かつ速いスウィング動作により大腰筋に代表される股関節屈曲筋群が発達しており、これは生まれつきというよりはむしろ走速度の高い、かつ起伏の激しいところを走っていることで他の生理学的特徴とともに発達し、トレーニングの効果として表れているものと考えられる。下腿が長いことは、単純に日本人選手に期待することは難しいが、これらの下腿とランニングエコノミーとの関係にあるメカニズムを究明することで、日本人選手にも適したトレーニング課題と方法を見出し、トレーニング効果を高めることにつながると考えられる。現時点では、脚のスウィング動作を大きくし、できるだけ速い走速度で走るトレーニング強度を高める工夫をすることがケニア人選手との差を生んでいると考えられる。

## I. 緒言

近年、日本人男子長距離選手の国際大会での不振が続いている。特にトラック種目(5000m, 10000m)ではここ10年間で世界記録は著しく向上しているのに対し、日本記録はほとんど向上しておらず、差が広がる一方である(図1)。また、オリンピックや世界選手権での長距離レースでは、前半から外国人選手についていけないことが多く、日本人長距離選手のスピード不足が指摘されている(榎本, 2006)。さらに、長距離走のスピード化はマラソンにまで進んできており、近いうちにマラソンでもスピード化の問題に直面することになる。

ケニア人選手は優れた持久力ばかりでなく、無駄なく効率的に高いスピードを獲得できる走動作を身につけていると考えられる。Saltinら(1995)は、ケニア人選手が遺伝的および環境的要因により優れた持久力が養われていること、そして体型的な特徴から特有の走動作を身につけ、それが長距離走に適していることなどを示唆している。これらのケニア人選手の特徴をそのまま日本人選手に当てはめ、トレーニング課題を検討することは日本人選手の特徴を無視したもので無理があると考えられるが、ケニア人選手の特徴を日本人選手と比較して明らかにし、それらのメカニズムを検討することで日本人選手に適した持久力および走動作の改善点および改善法に関する示唆を得ることができ、日本人選手の強化方策に役立つ情報を提供することができるであろう。

Enomotoら(2005)は、ケニア人長距離選手のレース中の走動作を日本人選手と比較し、離地後下肢が後方へスウィングされるときに大きく股関節屈筋群が働き、下肢が大きく引き上げられつつ前方へすばやく引き出されていることなどを明らかにした。しかし、下肢の形態的な特徴は考慮されておらず、筋の機能的特徴なども含めてケニア人選手の走動作のバイオメカニクスの特徴を検討する必要がある。また、生理学的特徴についてもケニア人の最大酸素摂取量についていくつか報告があるものの、乳酸性作業閾値、代謝特性、末梢循環、さらには血液の特性など総合的に評価したものはないようである。

本研究は、ケニア人長距離選手の生理学的およびバイオメカニクスの特徴を日本人選手と比較して明らかにし、日本人選手に適した持久力および走動作の改善点および改善法を検討し、日本人長距離選手の強化に役立つ示唆を得ようとするものである。

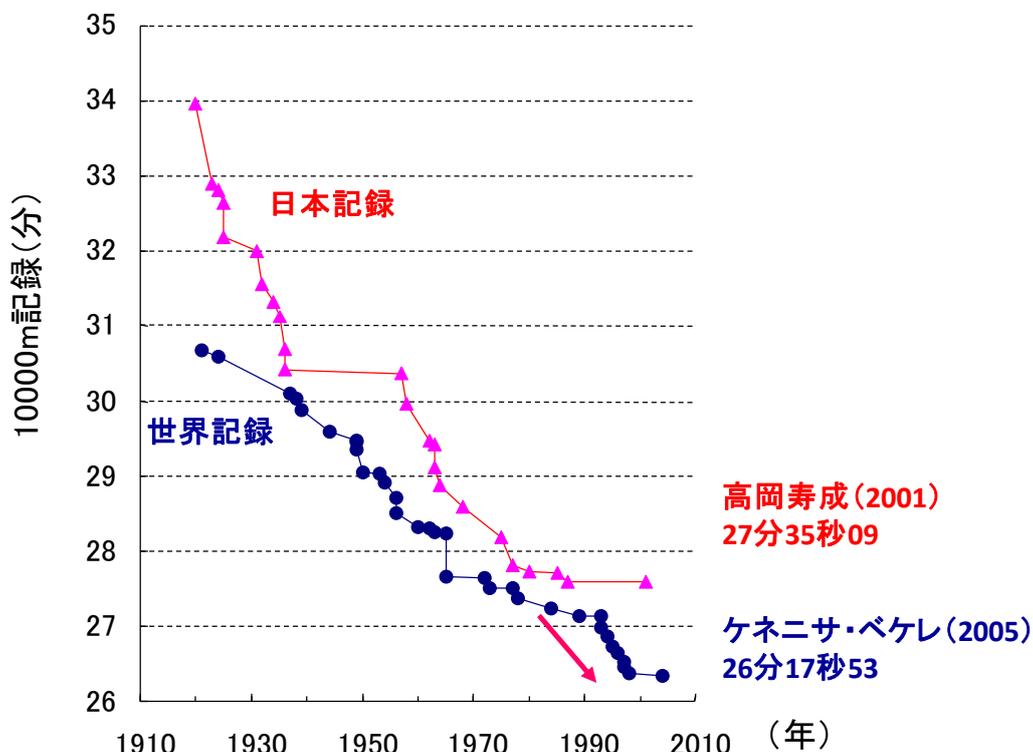


図1 男子10000m世界および日本記録の変遷(1920年~2005年)

## II. 方法

### 1. 被験者

表 1 は、被験者の特性を示したものである。測定項目によっては、選手のコンディションなどにより測定できなかったものもあった。

表1 被験者の特性

|                 |      | 年齢 [yr]   | 身長 [cm]     | 体重 [kg]   |
|-----------------|------|-----------|-------------|-----------|
| 日本人選手<br>(n=14) | 平均   | 22.1      | 170.3       | 55.8      |
|                 | 標準偏差 | 0.9       | 5.6         | 4.2       |
|                 | 範囲   | 20.6~23.5 | 161.7~180.2 | 45.5~61.8 |
| ケニア人選手<br>(n=6) | 平均   | 20.3      | 171.5       | 56.9      |
|                 | 標準偏差 | 2.8       | 3.6         | 5.1       |
|                 | 範囲   | 17.5~24.3 | 165.1~175.8 | 52.2~66.3 |

### 2. 測定項目および方法

#### 1) 血液性状および血液量

上腕部の採血より以下の測定項目を分析した。赤血球数:1マイクロリットルの血液に含まれる赤血球の個数。ヘマトクリット:血液全体に占める赤血球の容量の割合。ヘモグロビン濃度:100 ミリリットルの血液に含まれるヘモグロビン(血色素)の量。平均赤血球容積:赤血球1個の平均的な大きさ。平均赤血球ヘモグロビン量:赤血球1個に含まれる平均的なヘモグロビンの量。平均赤血球ヘモグロビン濃度:赤血球1個に含まれる平均的なヘモグロビンの濃度。血液粘性(低ずり速度時):血液のサラサラ度の指標。数値が高いほど血液が流れにくい。血液粘性(高ずり速度時):赤血球の変形能の指標。数値が高いほど赤血球が変形しにくい。

血液量は、被験者に一酸化炭素を吸引させ、指先より血液を採取し、ヘモグロビンの一酸化炭素の吸着率を測定することにより、全身のヘモグロビン量を、そしてヘモグロビン量とヘモグロビン濃度から全身の血液量を推定した。

#### 2) 体格

光学式三次元人体形状計測装置(3D スポーツ人体計測装置 C8300, 浜松ホトニクス社製)を用いて、高さ2.5 mm 間隔で立位姿勢における身体表面上の点群の三次元位置座標を取得した。計測した点群データを三次元 CAD ソフト(SolidWorks 2008, ソリッドワークス社製)に読み込み、点群により構成される身体形状をソリッド化して、人体モデルを作成した。

これらのデータに屍体標本から得られた身体部分の密度を乗じて質量, 質量中心位置, 3つの慣性主軸 (x 軸:左右軸, y 軸:前後軸, z 軸:上下軸)まわりの主慣性モーメントを算出した. さらに, 質量比(身体部



分質量の身体質量に対する比), 質量中心比(上端点から質量中心位置までの距離の部分長に対する比), 回転半径比(慣性モーメントを部分質量で除して 1/2 乗した値(回転半径)の部分長に対する比)を算出した.

写真1 3D スポーツ人体計測装置による計測の様子

### 3)筋の形態

大腿部, 下腿部, 体幹部の MRI 画像を撮影し, 得られた画像から, 各部位を構成する, 筋, 骨, 皮下脂肪等の横断面積を測定した. さらに, 下腿部の画像からヒラメ筋腱(アキレス腱)および腓腹筋腱を同定し, それらの長さを測定した.

### 4)トレッドミルテスト

ケニア人選手と日本人選手の酸素摂取および血中乳酸値の特性を比較するため 300m/min(日本人選手)または 320m/min(ケニア人選手)を初速度とし, 20m/min ずつ漸増負荷する 4 分間×4~5 セットの間欠的走行テストを行なった. 図 2 は, トレッドミルテストのプロトコールを示したものである.

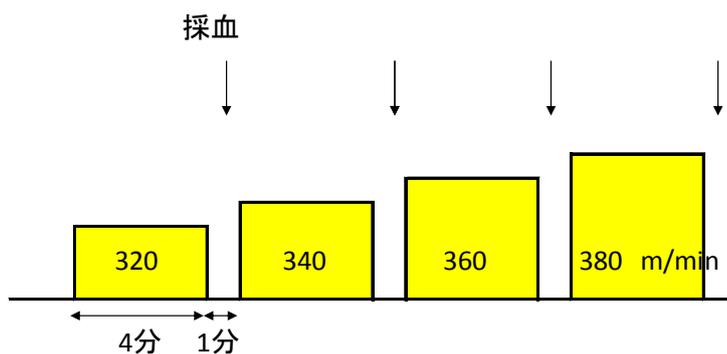


図2 トレッドミルテストのプロトコール

## 5) 走動作

モーションキャプチャ(VICON)を用いてレーススピード(6.2m/s)での走動作を計測した。6.0m/s前後の走速度(10000m レースペース)で実験的に走らせ、三次元動作解析システム(VICON612; Oxford Metrics 社製)により250Hzで撮影し、身体分析点の三次元座標を得、走路に埋設した6台のフォースプラットフォーム(9287A; Kistler 社製)により地面反力を計測した(写真2)。反射マーカ位置をもとに構築した身体の三次元座標および地面反力データから、下肢のキネマティクスおよび下肢関節トルク、パワーなどを算出した。



写真2 走動作の計測の様子

### Ⅲ. 結果

#### 1. 血液成分および血液量

図3は、ケニア人選手と日本人選手の血液成分および血液粘性を比較したものである。酸素を肺から筋肉に運ぶ働きを担っている赤血球とヘモグロビンの濃度には、群間で差はみられなかった(①~③)。また、これらの値は全ての選手で基準値の範囲内で、血液が薄すぎる「貧血」や、逆に濃すぎる「多血」の選手は一人もいなかった。つまり、血液の濃さは、日本人選手とケニア人選手で差はなかった。

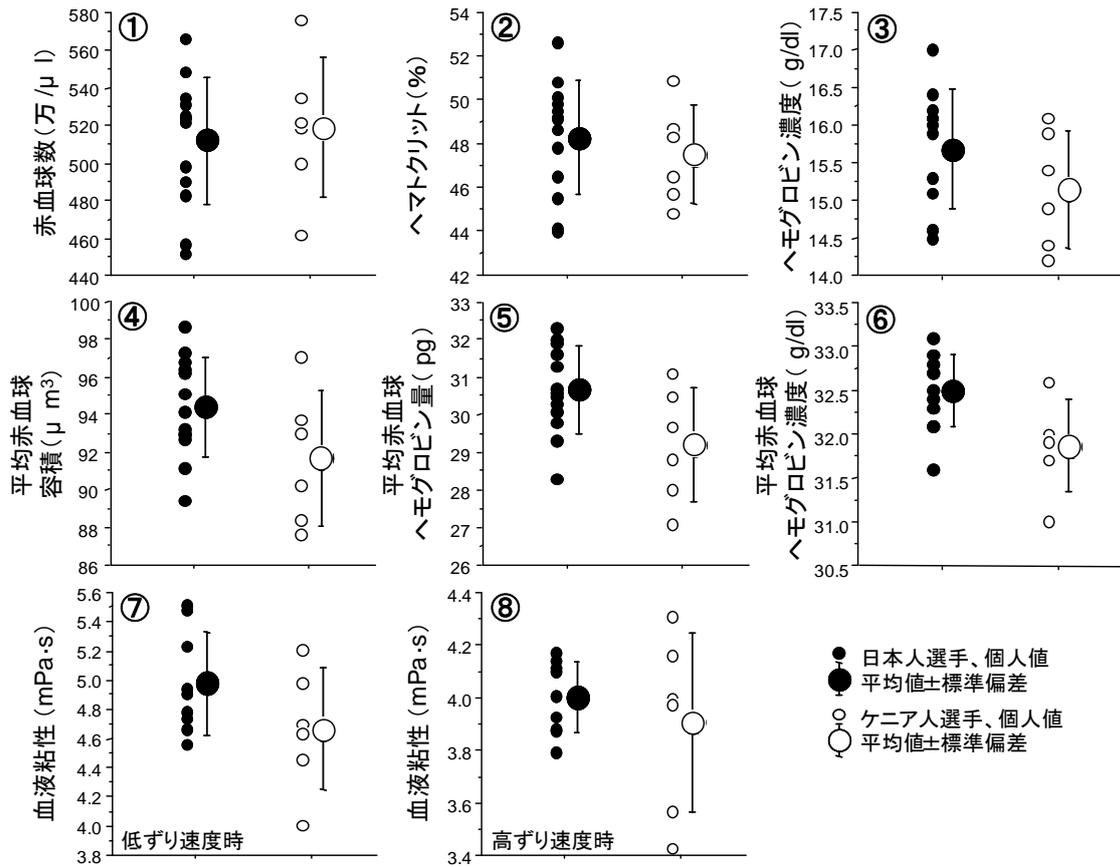


図3 日本人選手(13人)とケニア人選手(6人)の血液成分値(①~⑥)および血液粘性(⑦~⑧)の比較

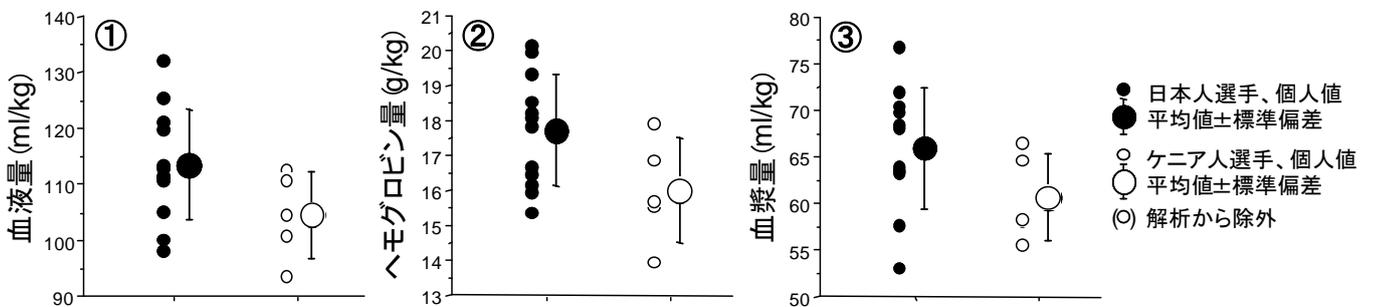


図4 日本人選手(12人)とケニア人選手(5人)の血液量(①)、ヘモグロビン量(②)、および血漿量(③)の比較

一方、④～⑥に示すように、赤血球1個の大きさや中に含まれるヘモグロビンの量は、日本人選手に比べてケニア人選手が低い傾向にあった。また、⑦～⑧に示すように、血液粘性は日本人選手に比べてケニア人選手が低い傾向にあった。つまり、日本人選手に比べてケニア人選手の血液は、赤血球が小さく、粘性が低いことを示していると考えられる。ケニア人選手の赤血球が小さいのは、遺伝的特徴と考えられるが、ケニア人選手の血液粘性は一般人平均的値の範囲内であるので、高いパフォーマンスを説明する要因ではないと考えられる。一方、数名の日本人選手の血液粘性は一般人よりやや高い傾向にあった。

図4は、血液量、ヘモグロビン量、および血漿量を示したものである。血液量、ヘモグロビン量、および血漿量には、ケニア人選手と日本人選手の間に差はみられなかった。

図5は、血液量と最大酸素摂取量との関係を示したものである。血液量と最大酸素摂取量は有意な正の相関関係がみられた。この関係は日本人選手とケニア人選手別でも同様の傾向であった。つまり、血液の酸素運搬能力と酸素利用能力には、日本人選手とケニア人選手で差がないことを示していると考えられる。

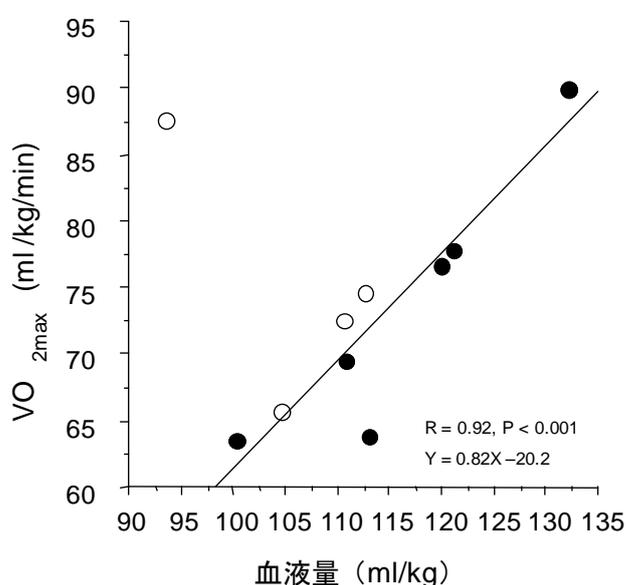


図5 日本人選手(6人)とケニア人選手(4人)の最大酸素摂取量( $VO_{2max}$ )と血液量の関係

## 2. 体格

表2は、日本人選手とケニア人選手の身体部分慣性係数を絶対値で示したものであり、表3は相対値で示したものである。図6は、日本人選手を基準にしたケニア人選手の割合を示したものである。

質量は、頭部では日本人選手の方が有意に大きく、上肢の身体部分ではケニア人選手の方が有意に大きかった。一方、下肢の身体部分には有意な差がみられなかった。相対差をみると、日本人選手に比べてケニア人選手の頭部は8%ほど小さく、上肢の身体部分では15~30%ほど大きかった。質量比は、上肢の身体部分に加えて大腿および足もケニア人選手の方が有意に大きい結果となった。しかし、下腿には有意な差はみられなかった。相対差をみても、質量と同様の傾向がみられた。

左右軸および前後軸まわりの慣性モーメントは、頭部のみ日本人選手のほうが有意に大きく、四肢の身

体部分のほぼ全ての部分で、ケニア人選手の方が有意に大きかった。上下軸まわりの慣性モーメントは、左右の前腕、手および足でケニア人選手の方が有意に大きかった。相対差をみてみると、左右軸および前後軸まわりの慣性モーメントは上肢の身体部分で 40～60 %ほどケニア人選手の方が大きかった。同様に下肢の身体部分でも、10～30 %ほどケニア人選手の方が大きかった。しかし、回転半径比(質量と部分長を考慮した場合の慣性モーメントの相対値と考えられる)をみると、左右軸および前後軸まわりで有意差がみられるのは下腿と足のみで、慣性モーメントでは有意差のみられた上肢については、回転半径比では有意な差はみられなかった。相対差をみても、左右軸および前後軸まわりの回転半径比では、ほとんどの部分で 2 %未満であったため、大きな差はみられなかったといえるであろう。

表2 日本人選手とケニア人選手の身体部分慣性係数の比較(絶対値)

| 部分  | 日本人選手 (n=14)           |                      |                               |                      |                      | ケニア人選手 (n=6)       |                  |                               |                  |                  |
|-----|------------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|------------------|-------------------------------|------------------|------------------|
|     | 質量 [kg]                | 部分長 [cm]             | 慣性モーメント [kg・cm <sup>2</sup> ] |                      |                      | 質量 [kg]            | 部分長 [cm]         | 慣性モーメント [kg・cm <sup>2</sup> ] |                  |                  |
|     |                        |                      | Ix                            | Iy                   | Iz                   |                    |                  | Ix                            | Iy               | Iz               |
| 頭   | * 5.28 +<br>( 0.33 )   | * 14.9 +<br>( 0.7 )  | * 331 +<br>( 43 )             | † 298 +<br>( 38 )    | 180<br>( 16 )        | 4.88<br>( 0.26 )   | 14.0<br>( 0.7 )  | 279<br>( 26 )                 | 240<br>( 21 )    | 164<br>( 16 )    |
| 胴体  | 24.3<br>( 1.8 )        | * 49.5 +<br>( 1.7 )  | 8080<br>( 990 )               | 8820<br>( 1060 )     | 2120<br>( 270 )      | 23.3<br>( 2.2 )    | 47.2<br>( 1.4 )  | 7260<br>( 1370 )              | 7920<br>( 1550 ) | 2130<br>( 410 )  |
| 右上腕 | * 1.33 -<br>( 0.15 )   | † 25.3 -<br>( 1.1 )  | † 90.0 -<br>( 15.1 )          | † 87.8 -<br>( 14.7 ) | 11.4<br>( 2.3 )      | 1.52<br>( 0.22 )   | 28.1<br>( 1.0 )  | 125<br>( 19 )                 | 122<br>( 18 )    | 13.3<br>( 3.9 )  |
| 右前腕 | † 0.767 -<br>( 0.079 ) | † 23.8 -<br>( 0.8 )  | * 34.5 -<br>( 4.3 )           | * 35.0 -<br>( 4.4 )  | † 4.09 -<br>( 0.65 ) | 0.926<br>( 0.127 ) | 26.2<br>( 1.4 )  | 51.1<br>( 10.5 )              | 51.5<br>( 10.7 ) | 5.34<br>( 1.22 ) |
| 右手  | † 0.377 -<br>( 0.063 ) | † 8.48 -<br>( 0.59 ) | † 8.23 -<br>( 1.92 )          | † 7.08 -<br>( 1.6 )  | † 2.00 -<br>( 0.44 ) | 0.488<br>( 0.064 ) | 9.47<br>( 0.50 ) | 12.7<br>( 2.5 )               | 11.1<br>( 2.3 )  | 2.77<br>( 0.52 ) |
| 右大腿 | 7.21<br>( 0.64 )       | * 40.0 -<br>( 2.0 )  | * 1090 -<br>( 180 )           | * 1050 -<br>( 180 )  | 219<br>( 29 )        | 7.81<br>( 0.92 )   | 42.5<br>( 2.2 )  | 1310<br>( 220 )               | 1270<br>( 210 )  | 236<br>( 57 )    |
| 右下腿 | 2.69<br>( 0.33 )       | † 38.2 -<br>( 1.8 )  | † 296 -<br>( 55 )             | † 292 -<br>( 54 )    | 34.0<br>( 7.4 )      | 2.70<br>( 0.22 )   | 42.5<br>( 0.91 ) | 381<br>( 36 )                 | 377<br>( 35 )    | 30.0<br>( 4.8 )  |
| 右足  | 0.842<br>( 0.098 )     | † 24.4 -<br>( 0.8 )  | † 30.0 -<br>( 5.0 )           | 6.29<br>( 1.22 )     | † 31.8 -<br>( 5.3 )  | 0.933<br>( 0.081 ) | 25.6<br>( 0.88 ) | 37.7<br>( 4.8 )               | 6.78<br>( 1.04 ) | 39.7<br>( 5.2 )  |
| 上腕  | 15.1<br>( 1.6 )        | 31.1<br>( 1.6 )      | 1860<br>( 290 )               | 2520<br>( 370 )      | 1370<br>( 210 )      | 14.4<br>( 1.5 )    | 30.2<br>( 0.9 )  | 1710<br>( 270 )               | 2310<br>( 380 )  | 1330<br>( 240 )  |
| 下腕  | 9.19<br>( 0.97 )       | 19.1<br>( 1.3 )      | 707<br>( 134 )                | 817<br>( 130 )       | 606<br>( 83 )        | 8.86<br>( 1.10 )   | 18.0<br>( 1.4 )  | 676<br>( 128 )                | 728<br>( 188 )   | 575<br>( 121 )   |
| 左上腕 | * 1.25 -<br>( 0.15 )   | † 25.2 -<br>( 1.7 )  | † 82.5 -<br>( 19.0 )          | † 81.0 -<br>( 18.9 ) | 10.1<br>( 1.8 )      | 1.46<br>( 0.23 )   | 27.8<br>( 1.3 )  | 114<br>( 22 )                 | 112<br>( 22 )    | 12.4<br>( 3.8 )  |
| 左前腕 | † 0.777 -<br>( 0.087 ) | † 23.5 -<br>( 0.7 )  | † 35.1 -<br>( 4.8 )           | † 35.5 -<br>( 4.9 )  | † 4.22 -<br>( 0.75 ) | 0.969<br>( 0.126 ) | 26.8<br>( 1.1 )  | 56.5<br>( 9.9 )               | 56.7<br>( 10.1 ) | 5.68<br>( 1.30 ) |
| 左手  | † 0.397 -<br>( 0.068 ) | 8.68<br>( 0.73 )     | † 8.93 -<br>( 2.09 )          | † 7.64 -<br>( 1.81 ) | † 2.19 -<br>( 0.50 ) | 0.512<br>( 0.085 ) | 9.20<br>( 0.60 ) | 13.2<br>( 3.3 )               | 11.4<br>( 3.0 )  | 3.11<br>( 0.68 ) |
| 左大腿 | 7.07<br>( 0.63 )       | † 39.8 -<br>( 1.8 )  | * 1050 -<br>( 160 )           | † 1020 -<br>( 160 )  | 213<br>( 28 )        | 7.74<br>( 0.82 )   | 42.4<br>( 1.8 )  | 1300<br>( 190 )               | 1250<br>( 190 )  | 233<br>( 48 )    |
| 左下腿 | 2.72<br>( 0.33 )       | † 38.6 -<br>( 2.0 )  | * 312 -<br>( 58 )             | * 308 -<br>( 57 )    | 34.6<br>( 7.0 )      | 2.74<br>( 0.22 )   | 42.1<br>( 1.3 )  | 386<br>( 45 )                 | 381<br>( 45 )    | 31.4<br>( 4.7 )  |
| 左足  | * 0.798 -<br>( 0.096 ) | † 24.3 -<br>( 0.8 )  | † 27.7 -<br>( 4.8 )           | 5.71<br>( 1.19 )     | † 29.7 -<br>( 5.0 )  | 0.921<br>( 0.063 ) | 25.8<br>( 0.8 )  | 36.4<br>( 3.9 )               | 6.70<br>( 0.76 ) | 38.5<br>( 4.4 )  |

1) \*, †印は群間の有意差を示す(\* p<0.05, † p<0.01, + 日本人>ケニア人, - 日本人<ケニア人).  
2) カッコ内の数値は標準偏差を示す.

表 3 日本人選手とケニア人選手の身体部分慣性係数の比較(相対値)

| 部分  | 日本人選手 (n=14)           |                     |                     |                     |                      | ケニア人選手 (n=6)       |                 |                 |                 |                  |
|-----|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
|     | 質量比 [%]                | 質量<br>中心比 [%]       | 回転半径比 [%]           |                     |                      | 質量比 [%]            | 質量<br>中心比 [%]   | 回転半径比 [%]       |                 |                  |
|     |                        |                     | %kx                 | %ky                 | %kz                  |                    |                 | %kx             | %ky             | %kz              |
| 頭   | † 9.50 +<br>( 0.49 )   | 85.3<br>( 3.6 )     | 53.0<br>( 2.3 )     | 50.3<br>( 2.2 )     | * 39.2 -<br>( 1.6 )  | 8.62<br>( 0.68 )   | 86.2<br>( 4.5 ) | 54.1<br>( 2.4 ) | 50.2<br>( 2.4 ) | 41.5<br>( 1.9 )  |
| 胴体  | † 43.5 +<br>( 1.5 )    | 47.1<br>( 1.5 )     | 36.8<br>( 1.2 )     | 38.5<br>( 1.3 )     | * 18.8 -<br>( 0.8 )  | 40.9<br>( 1.5 )    | 47.1<br>( 1.3 ) | 37.2<br>( 1.2 ) | 38.9<br>( 1.3 ) | 20.2<br>( 1.3 )  |
| 右上腕 | † 2.38 -<br>( 0.19 )   | † 40.7 -<br>( 1.3 ) | 32.5<br>( 0.4 )     | 32.1<br>( 0.5 )     | † 11.5 +<br>( 0.5 )  | 2.66<br>( 0.17 )   | 42.7<br>( 1.0 ) | 32.3<br>( 0.6 ) | 32.0<br>( 0.5 ) | 10.5<br>( 0.8 )  |
| 右前腕 | † 1.38 -<br>( 0.10 )   | † 41.6 +<br>( 0.5 ) | 28.1<br>( 0.3 )     | 28.3<br>( 0.3 )     | * 9.67 +<br>( 0.40 ) | 1.63<br>( 0.15 )   | 40.5<br>( 0.7 ) | 28.2<br>( 0.3 ) | 28.3<br>( 0.3 ) | 9.12<br>( 0.70 ) |
| 右手  | † 0.674 -<br>( 0.091 ) | 81.5<br>( 3.4 )     | 55.0<br>( 2.4 )     | 51.0<br>( 2.2 )     | 27.1<br>( 1.9 )      | 0.859<br>( 0.087 ) | 82.1<br>( 2.5 ) | 53.7<br>( 2.8 ) | 50.2<br>( 2.4 ) | 25.2<br>( 1.9 )  |
| 右大腿 | † 12.9 -<br>( 0.3 )    | 38.5<br>( 0.5 )     | 30.6<br>( 0.5 )     | 30.1<br>( 0.5 )     | * 13.8 +<br>( 0.6 )  | 13.7<br>( 0.5 )    | 38.6<br>( 0.4 ) | 30.4<br>( 0.4 ) | 29.9<br>( 0.2 ) | 12.9<br>( 1.1 )  |
| 右下腿 | 4.81<br>( 0.34 )       | 41.1<br>( 0.7 )     | † 27.3 -<br>( 0.3 ) | † 27.1 -<br>( 0.3 ) | † 9.26 +<br>( 0.50 ) | 4.74<br>( 0.16 )   | 40.5<br>( 0.5 ) | 28.0<br>( 0.5 ) | 27.8<br>( 0.5 ) | 7.83<br>( 0.41 ) |
| 右足  | † 1.51 -<br>( 0.11 )   | † 57.0 -<br>( 0.6 ) | 24.4<br>( 0.3 )     | † 11.2 +<br>( 0.4 ) | 25.1<br>( 0.3 )      | 1.64<br>( 0.06 )   | 56.0<br>( 0.8 ) | 24.8<br>( 0.4 ) | 10.5<br>( 0.3 ) | 25.4<br>( 0.3 )  |
| 上胴  | 27.0<br>( 2.1 )        | 39.9<br>( 1.2 )     | 35.7<br>( 0.9 )     | 41.6<br>( 1.4 )     | 30.6<br>( 1.7 )      | 25.4<br>( 1.9 )    | 41.3<br>( 1.8 ) | 36.0<br>( 1.0 ) | 41.9<br>( 1.3 ) | 31.7<br>( 1.5 )  |
| 下胴  | 16.5<br>( 1.5 )        | 64.3<br>( 3.9 )     | 45.9<br>( 2.9 )     | 49.5<br>( 2.9 )     | 42.7<br>( 3.1 )      | 15.6<br>( 1.0 )    | 64.2<br>( 1.2 ) | 48.5<br>( 3.2 ) | 49.9<br>( 1.9 ) | 44.9<br>( 6.1 )  |
| 左上腕 | † 2.24 -<br>( 0.14 )   | * 43.4 -<br>( 1.3 ) | 32.1<br>( 0.4 )     | 31.8<br>( 0.4 )     | * 11.3 +<br>( 0.6 )  | 2.56<br>( 0.20 )   | 44.8<br>( 1.3 ) | 31.8<br>( 0.6 ) | 31.5<br>( 0.5 ) | 10.4<br>( 1.0 )  |
| 左前腕 | † 1.39 -<br>( 0.12 )   | † 41.9 +<br>( 0.5 ) | 28.5<br>( 0.3 )     | 28.7<br>( 0.3 )     | † 9.86 +<br>( 0.41 ) | 1.70<br>( 0.14 )   | 41.0<br>( 0.9 ) | 28.4<br>( 0.2 ) | 28.5<br>( 0.3 ) | 9.00<br>( 0.64 ) |
| 左手  | † 0.709 -<br>( 0.096 ) | 79.3<br>( 5.3 )     | 54.6<br>( 3.8 )     | 50.5<br>( 3.6 )     | 27.1<br>( 2.4 )      | 0.900<br>( 0.124 ) | 82.1<br>( 3.8 ) | 54.8<br>( 3.2 ) | 50.9<br>( 2.8 ) | 26.8<br>( 2.3 )  |
| 左大腿 | † 12.7 -<br>( 0.4 )    | 38.6<br>( 0.5 )     | 30.6<br>( 0.4 )     | 30.1<br>( 0.4 )     | * 13.8 +<br>( 0.6 )  | 13.6<br>( 0.4 )    | 38.8<br>( 0.5 ) | 30.4<br>( 0.2 ) | 30.0<br>( 0.1 ) | 12.9<br>( 0.9 )  |
| 左下腿 | 4.87<br>( 0.36 )       | 41.1<br>( 0.7 )     | * 27.6 -<br>( 0.3 ) | * 27.4 -<br>( 0.3 ) | † 9.20 +<br>( 0.49 ) | 4.83<br>( 0.22 )   | 40.5<br>( 0.5 ) | 28.1<br>( 0.6 ) | 27.9<br>( 0.6 ) | 8.02<br>( 0.44 ) |
| 左足  | † 1.43 -<br>( 0.10 )   | 57.0<br>( 0.8 )     | 24.1<br>( 0.5 )     | * 10.9 +<br>( 0.4 ) | 25.0<br>( 0.4 )      | 1.62<br>( 0.03 )   | 56.9<br>( 0.8 ) | 24.3<br>( 0.3 ) | 10.4<br>( 0.3 ) | 25.0<br>( 0.2 )  |

- 1) \*, †印は群間の有意差を示す(\* p<0.05, † p<0.01, + 日本人>ケニア人, - 日本人<ケニア人)。
- 2) カッコ内の数値は標準偏差を示す。
- 3) 質量比は身体質量に対する比, 質量中心比は部分長に対する中枢端からの距離の比である。
- 4) 足, 上胴, 下胴の質量中心比は, それぞれ足先, 胸骨上縁面中心, 最下肋骨下縁間の midpoint からの距離の比である。
- 5) 回転半径比は回転半径の部分長に対する比であり, 部分質量, 部分長を考慮した場合の慣性モーメントの相対値に相当する。

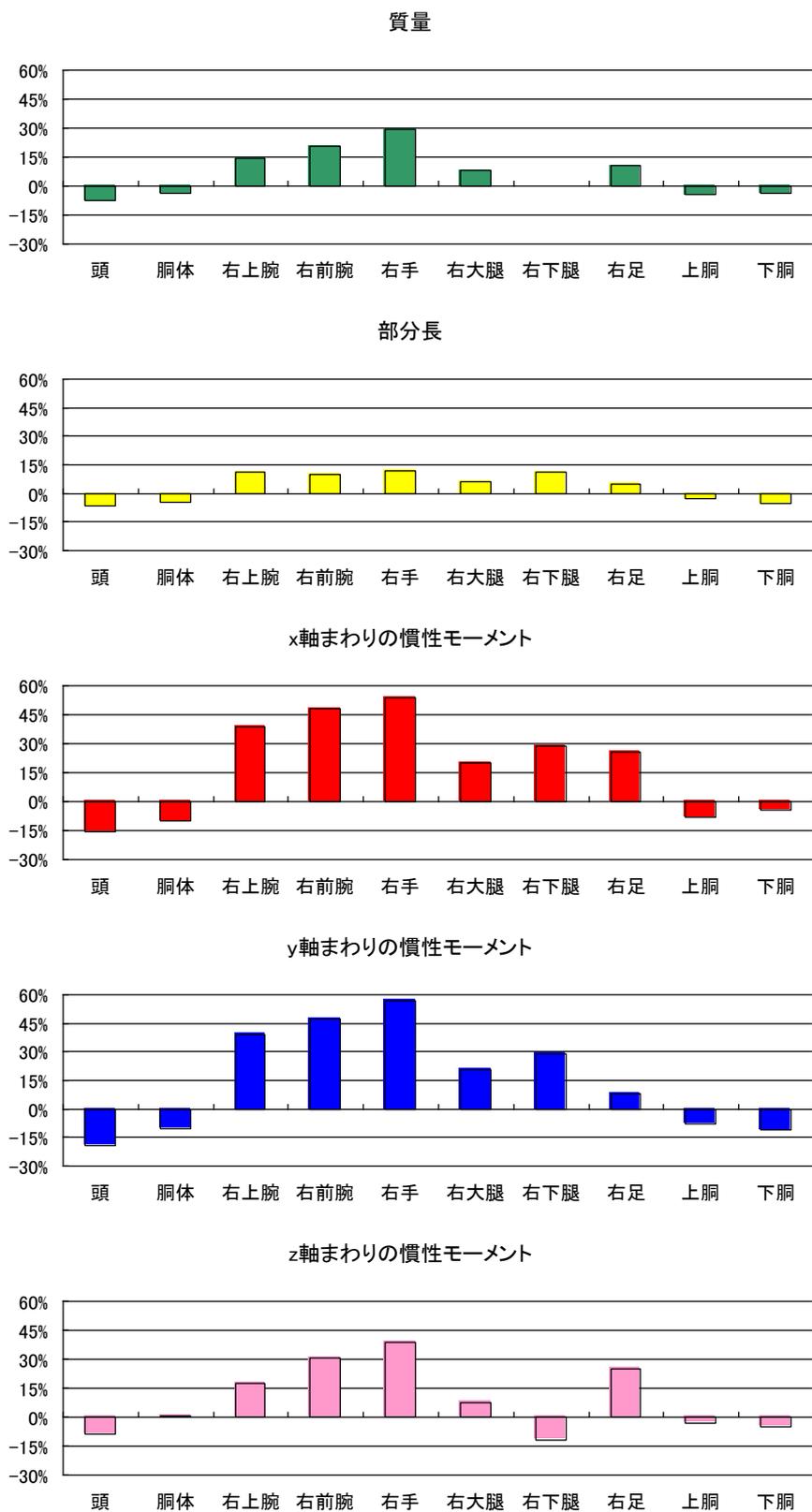


図6 日本人選手を基準にしたときのケニア人選手の割合(絶対値)

以上のことから、日本人選手とケニア人選手の慣性モーメントの相違は、身体部分の質量と部分長の相違が大きく影響していると考えられる。すなわち、ケニア人選手では上肢の身体部分において、質量と部分長のいずれもが日本人選手より大きいことが、これらの部分の慣性モーメントが大きいことが原因であると考えられる。同様に下肢の身体部分で、ケニア人選手の方が日本人選手よりも左右軸および前後軸の慣性モーメントが大きかったのは、質量には大きな差がみられなかったが、部分長が大きいためであるといえる。下腿では、日本人選手は部分長、左右軸(x 軸)および前後軸(y 軸)まわりの慣性モーメントと回転半径比がケニア人選手より有意に小さかった。予想に反して、左右軸まわり(下腿の引きつけ動作、振り出し動作、振り戻し動作など、ランニングにおいては最も慣性の影響が大きいと考えられる軸まわり)の下腿の慣性モーメントは日本人選手よりもケニア人選手で約 25%程度大きかった。これは部分長の影響が大きいと考えられるが、質量と長さを考慮した相対値である回転半径比でも x および y 軸まわりではケニア人選手の方が大きかった。一方、質量中心比と上下軸(z 軸)まわりの回転半径比は日本人選手の方が有意に大きかった。下腿の質量中心比が大きいことは相対的に質量中心位置がより下方に位置していることを意味している。これは日本人とケニア人の下腿三頭筋の形状の違いが反映されたものであると考えられる。すなわち、日本人選手は筋腹(筋のふくらみ)がより下方から始まっており、ケニア人選手は腱が長く、筋腹がより上方から始まっていることに起因していると考えられる。また、日本人選手の上下軸まわりの回転半径比が大きいことは下腿が長さに対して太いことを意味している。このことは、日本人選手では下腿長がケニア人よりも約 10%短いにもかかわらず、下腿の質量はわずかながらケニア人よりも大きいことからいえる。

### 3. 筋の形態

表 4 は、日本人選手とケニア人選手の大腿部の横断面積を示したものである。ケニア人選手は、日本人選手よりも縫工筋や薄筋が大きかった。また、内転筋がケニア人選手の方が低値を示しており、これが主要因となって筋面積の前後比がケニア人選手の方が大きくなっていた。

表 5 は、日本人選手とケニア人選手の下腿部の横断面積を示したものである。ケニア人選手は、日本人選手よりも底屈筋群が小さかった。このため、全筋横断面積や全横断面積も、ケニア人選手の方がより低値を示した。

表 6 は、日本人選手とケニア人選手のヒラメ筋腱および腓腹筋の長さを示したものである。ケニア人選手は、日本人選手よりもヒラメ筋腱(アキレス腱)や腓腹筋腱が長かった。これは、下肢長に対する割合でも同じ結果であり、ケニア人選手は下腿が長く、さらに下腿における筋が小さく、アキレス腱が長いことがわかった。

表 7 は、日本人選手とケニア人選手の体幹部(ヤコビーライン)の横断面積を示したものである。ケニア人選手は、日本人選手よりも大腰筋が大きかった。

表4 日本人選手とケニア人選手の大腿部横断面積の比較

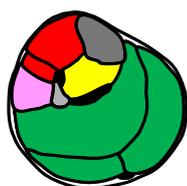


- 大腿四頭筋
- 縫工筋
- 外側ハムストリング
- 内側ハムストリング
- 内転筋
- 薄筋
- その他(血管・神経等)
- 骨
- 皮下脂肪

| 部位名         | 横断面積・絶対値 (cm <sup>2</sup> ) |               | 横断面積・相対値 (%) |               |
|-------------|-----------------------------|---------------|--------------|---------------|
|             | 日本人選手                       | ケニア人選手        | 日本人選手        | ケニア人選手        |
| 大腿四頭筋       | 68.5 ± 7.3                  | 70.9 ± 8.0    | 42.6 ± 2.7   | 45.0 ± 2.3    |
| 縫工筋         | 3.9 ± 0.9                   | 5.7 ± 1.7 **  | 2.4 ± 0.5    | 3.6 ± 0.7 **  |
| 外側ハムストリング   | 13.6 ± 1.5                  | 13.9 ± 1.8    | 8.4 ± 0.7    | 8.8 ± 0.6     |
| 内側ハムストリング   | 18.5 ± 2.4                  | 17.5 ± 2.3    | 11.5 ± 1.3   | 11.1 ± 0.8    |
| 内転筋群        | 27.0 ± 3.1                  | 22.2 ± 4.0 *  | 16.9 ± 1.8   | 13.9 ± 1.2 ** |
| 薄筋          | 4.3 ± 0.8                   | 5.2 ± 1.3     | 2.7 ± 0.4    | 3.3 ± 0.4 *   |
| 全筋横断面積      | 135.7 ± 10.9                | 135.5 ± 17.6  | 84.5 ± 2.4   | 85.6 ± 2.0    |
| 皮下脂肪        | 16.2 ± 4.2                  | 14.6 ± 6.0    | 10.1 ± 2.4   | 9.0 ± 2.5     |
| 骨           | 6.1 ± 0.4                   | 5.9 ± 0.6     | 3.8 ± 0.3    | 3.8 ± 0.7     |
| その他(血管、神経他) | 2.5 ± 0.4                   | 2.5 ± 0.7     | 1.6 ± 0.3    | 1.6 ± 0.5     |
| 全横断面積       | 160.6 ± 12.2                | 158.4 ± 22.4  |              |               |
| 周囲径(cm)     | 40.5 ± 1.5                  | 40.2 ± 3.0    |              |               |
| 前面の筋/後面の筋比  | 1.08 ± 0.11                 | 1.21 ± 0.07 * |              |               |

平均値±標準偏差、\*P<0.05、\*\*P<0.01、前面の筋:大腿四頭筋、後面の筋:ハムストリング+内転筋+薄筋  
相対地は、全横断面積に対する割合)

表5 日本人選手とケニア人選手の下腿部横断面積の比較



- 背屈筋群  
(前脛骨筋、長指伸筋、長母指伸筋)
- 腓骨筋
- 深部底屈筋群  
(後脛骨筋、長指屈筋、長母指屈筋)
- 下腿三頭筋  
(ヒラメ筋、腓腹筋外・内側頭)
- 脛骨
- 腓骨
- その他(血管・神経等)
- 皮下脂肪

| 部位名         | 横断面積・絶対値 (cm <sup>2</sup> ) |              | 横断面積・相対値 (%) |               |
|-------------|-----------------------------|--------------|--------------|---------------|
|             | 日本人選手                       | ケニア人選手       | 日本人選手        | ケニア人選手        |
| 背屈筋群        | 10.7 ± 2.0                  | 10.2 ± 1.2   | 11.6 ± 1.8   | 12.5 ± 0.9    |
| 腓骨筋         | 4.6 ± 1.0                   | 4.1 ± 1.1    | 5.0 ± 1.2    | 5.0 ± 1.2     |
| 深部底屈筋群      | 7.1 ± 0.9                   | 5.5 ± 1.2 ** | 7.7 ± 1.0    | 6.8 ± 1.5     |
| 下腿三頭筋       | 52.7 ± 8.2                  | 44.5 ± 4.4 * | 57.0 ± 2.7   | 54.7 ± 2.8    |
| 全筋横断面積      | 75.1 ± 9.7                  | 64.3 ± 5.8 * | 81.3 ± 1.6   | 78.9 ± 3.3 *  |
| 皮下脂肪        | 7.7 ± 1.5                   | 7.3 ± 2.0    | 8.4 ± 1.4    | 9.0 ± 2.3     |
|             | 8.3 ± 1.2                   | 8.8 ± 0.8    | 9.0 ± 1.1    | 10.9 ± 1.3 ** |
| その他(血管、神経他) | 1.2 ± 0.3                   | 0.9 ± 0.3    | 1.4 ± 0.4    | 1.2 ± 0.4     |
| 全横断面積       | 92.3 ± 11.3                 | 81.4 ± 5.8 * |              |               |
| 周囲径(cm)     | 31.0 ± 1.9                  | 29.2 ± 1.2 * |              |               |
| 前面の筋/後面の筋比  | 0.17 ± 0.03                 | 0.19 ± 0.01  |              |               |

平均値±標準偏差、\*P<0.05、\*\*P<0.01、背屈筋群:前脛骨筋+長指伸筋+長母指伸筋、  
深部底屈筋群:後脛骨筋+長指屈筋+長母指屈筋、下腿三頭筋:ヒラメ筋+腓腹筋外側頭・内側頭、  
前面の筋:背屈筋群、後面の筋:腓骨筋+深部底屈筋群+下腿三頭筋

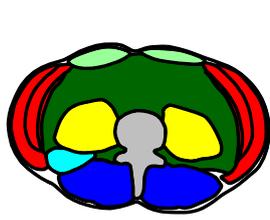
表6 日本人選手とケニア人選手のヒラメ筋腱および腓腹筋の長さの比較



| 部位名        | 測定値           |                  |
|------------|---------------|------------------|
|            | 日本人選手         | ケニア人選手           |
| ヒラメ筋腱長(cm) | 7.0 ± 1.5     | 9.5 ± 1.8 **     |
| ヒラメ筋腱長/身長  | 0.041 ± 0.009 | 0.055 ± 0.011 ** |
| ヒラメ筋腱長/下肢長 | 0.081 ± 0.018 | 0.102 ± 0.022 *  |
| 腓腹筋腱長(cm)  | 20.1 ± 2.2    | 25.1 ± 1.3 **    |
| 腓腹筋腱長/身長   | 0.118 ± 0.013 | 0.146 ± 0.007 ** |
| 腓腹筋腱長/下肢長  | 0.234 ± 0.024 | 0.269 ± 0.013 ** |

平均値±標準偏差、\*P<0.05、\*\*P<0.01

表7 日本人選手とケニア人選手の体幹部横断面積の比較



- 腹直筋
- 外側腹筋群
- 大腰筋
- 腰方形筋
- 脊柱起立筋
- その他(内臓等)
- 骨
- 皮下脂肪

| 部位名         | 横断面積・絶対値(cm <sup>2</sup> ) |               | 横断面積・相対値(%) |            |
|-------------|----------------------------|---------------|-------------|------------|
|             | 日本人選手                      | ケニア人選手        | 日本人選手       | ケニア人選手     |
| 腹直筋         | 13.6 ± 2.8                 | 13.9 ± 3.2    | 3.9 ± 0.7   | 3.9 ± 0.8  |
| 外側腹筋群       | 48.4 ± 5.3                 | 51.5 ± 8.2    | 13.8 ± 1.5  | 14.3 ± 2.1 |
| 大腰筋         | 35.1 ± 3.7                 | 38.5 ± 1.7 *  | 9.9 ± 0.7   | 10.8 ± 1.3 |
| 腰方形筋        | 13.2 ± 2.6                 | 15.4 ± 2.0    | 3.7 ± 0.6   | 4.3 ± 0.5  |
| 脊柱起立筋       | 46.8 ± 5.4                 | 44.6 ± 3.1    | 13.3 ± 1.4  | 12.4 ± 1.1 |
| 全筋横断面積      | 157.1 ± 13.8               | 163.8 ± 11.9  | 44.6 ± 2.9  | 45.6 ± 3.9 |
| 皮下脂肪        | 34.4 ± 8.7                 | 33.1 ± 6.0    | 9.7 ± 1.9   | 9.2 ± 1.2  |
| 骨           | 25.8 ± 2.6                 | 26.2 ± 2.9    | 7.4 ± 1.0   | 7.3 ± 0.6  |
| その他(血管、神経他) | 135.0 ± 15.9               | 137.7 ± 23.3  | 38.3 ± 3.1  | 38.0 ± 4.4 |
| 全横断面積       | 352.3 ± 27.4               | 360.8 ± 29.8  |             |            |
| 周囲径(cm)     | 62.5 ± 2.2                 | 63.0 ± 3.4    |             |            |
| 腹側筋群/背側筋群比  | 2.38 ± 0.25                | 2.69 ± 0.34 * |             |            |

平均値±標準偏差、\*P<0.05、外側腹筋群:外・内腹斜筋+腹横筋、  
腹側筋群:腹直筋+外側腹筋群+大腰筋+腰方形筋、背側筋群:脊柱起立筋

#### 4. トレッドミルテストの結果

表 8 は、ケニア人選手と日本人選手のトレッドミルテストの結果を示したものである。

最終走行速度(Peak speed)については、日本人選手のうち 2 名が 380 m/min(1000m を 2 分 37 秒ペース) , 4 名が 360 m/min(1000m を 2 分 46 秒ペース)であったのに対して、ケニア人選手は 5 名全てが 380 m/min であった。全員が完走した 360 m/min 走行後の主観的運動強度(RPE)については、日本人選手平均が 18.3(17 が「かなりきつい, Very hard」)に対して、ケニア人選手平均は 11.4(11 は「楽である, Fairly light」)と有意に低かった。この RPE の差については、初速度設定や総セット数が異なることや、日本語と英語の差異および表現に関する前提条件(「きつい」「Hard」などの意味解釈の相違)などを考慮する必要がある。しかしながら、検者らが測定状況を観察した限りにおいても、ケニア人選手のほうが明らかに「楽に」走っていたという印象であったことから、トレッドミル走におけるパフォーマンスに関しては、両者の間に差がみられたといえるだろう。

最高心拍数(Peak HR)は、日本人選手平均が 188.5bpm(185~198)、ケニア人選手平均が 186.8bpm(180~196)と両者の間に明確な差はみられなかった。体重あたりの最高酸素摂取量(Peak VO<sub>2</sub>)は、日本人選手平均が 73.5ml/kg/min(63.4~89.9)、ケニア人選手平均が 74.1ml/kg/min(65.7~87.5)であり、両者の間に明確な差は認められなかった(日本人選手とケニア人選手ともに個人差は大きい)。最高血中乳酸濃度(Peak lactate)は、日本人選手平均が 8.6mmol/l(6.9~11.5)、ケニア人選手平均は 9.3mmol/l(7.0~11.7)と、両者の間に明確な差は認められなかった。日本人選手で Peak lactate が 10mmol/l を超えたのは渡辺選手のみであったが、ケニア人選手では 2 名が超えていた。すでに述べたように、ケニア人選手は第 4 セット終了時の RPE が低く、見た目にも疲労困憊まで追い込んでいようには見えなかったが、事前に「最低 4 セットは走って欲しい」とリクエストしていたため、結果的に全ての選手が

第4セット(380 m/min)で測定を終えている。仮に、全ての選手が第5セット(400m/min)を行った場合、ケニア人選手の Peak lactate はさらに高まることが予想され、このことは、ケニア人選手が、日本人選手に比べてより中距離選手に近い生理学的特性を有する可能性を示唆するものであるといえる。

340 m/min 走行時の酸素摂取量(340 VO2)は、日本人選手平均が 65.6ml/kg/min (60.0~70.5)であったのに対して、ケニア人選手平均は 58.1ml/kg/min (52.7~62.8)と有意に低かった。一般的に、同速度走行中の酸素摂取量は「ランニングエコミー(走の経済性:RE)」の指標として用いられている。この RE は、同じ仕事を少ない酸素によって賄えている、すなわち同速度走行中の酸素摂取量が低いほど効率がよいとする考え方がベースになっており、VO2max よりも長距離走パフォーマンスへの影響が大きいことが指摘されている。したがって、340 VO2 にみられた日本人選手とケニア人選手との差は、両者の RE に差がみられることを示していると考えられる。

表 8 ケニア人選手と日本人選手のトレッドミルテスト結果

|                | Peak speed   | Peak RPE    | 360 RPE     | Peak HR      | Peak VO2    | 340 VO2     | Peak lactate |
|----------------|--------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
|                | (m/min)      | (6~20)      | (6~20)      | (bpm)        | (ml/kg/mim) | (ml/kg/mim) | (mmol/l)     |
| K1             | 380          | 11          | 10          | 184          | 70.2        | 60.6        | 11.4         |
| K2             | 380          | 17          | 13          | 185          | 87.5        | 58.0        | 9.4          |
| K3             | 380          | 11          | 9           | 189          | 65.7        | 56.5        | 7.0          |
| K4             | 380          | 11          | 12          | 180          | 72.5        | 52.7        | 7.1          |
| K5             | 380          | 15          | 13          | 196          | 74.4        | 62.8        | 11.7         |
| <b>Average</b> | <b>380.0</b> | <b>13.0</b> | <b>11.4</b> | <b>186.8</b> | <b>74.1</b> | <b>58.1</b> | <b>9.3</b>   |
| J1             | 380          | -           | 14          | 185          | 69.5        | 63.6        | 8.1          |
| J2             | 380          | -           | 17          | 189          | 89.9        | 69.5        | 8.8          |
| J3             | 360          | 20          | 20          | 178          | 63.9        | 60.0        | 6.9          |
| J4             | 360          | 19          | 19          | 198          | 77.9        | 70.5        | 9.3          |
| J5             | 360          | 20          | 20          | 191          | 76.6        | 66.5        | 6.9          |
| <b>Average</b> | <b>368.0</b> | <b>19.7</b> | <b>18.0</b> | <b>188.2</b> | <b>75.5</b> | <b>66.0</b> | <b>8.0</b>   |

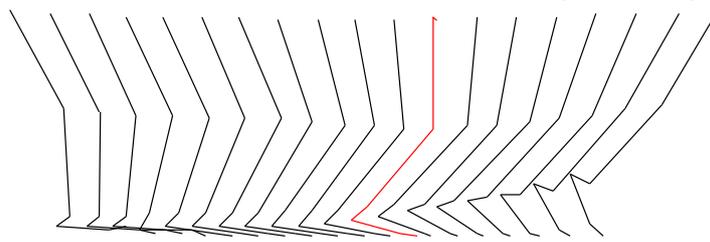
## 5. 走動作

表 9 は、走動作計測における走速度、ステップ長(ストライド)、ステップ頻度(ピッチ)とその内訳を示したものである。ケニア人選手と日本人選手の間には走速度に有意差はなかったが、ケニア人選手は、ステップ長が大きく、ステップ頻度が小さかった。さらに、接地時間が長く、支持期距離(支持期の重心移動距離)が長かった。

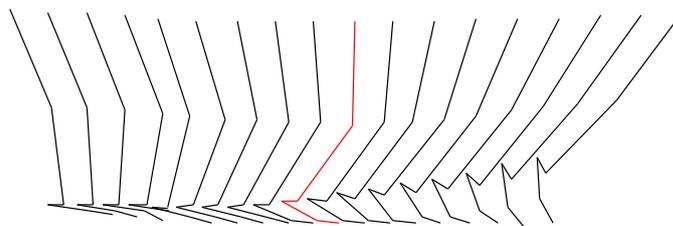
表9 走速度, ステップ長, ステップ頻度, およびその内訳

|                 | 日本選手       | ケニア選手         |
|-----------------|------------|---------------|
| 走速度(m/s)        | 6.10 ±0.16 | 6.14 ±0.07    |
| ステップ長(m)        | 1.79 ±0.07 | 1.91 ±0.11 *  |
| 支持期距離(m)        | 0.88 ±0.03 | 0.95 ±0.05 ** |
| 非支持期距離(m)       | 0.91 ±0.08 | 0.96 ±0.09    |
| ステップ頻度(steps/s) | 3.41 ±0.17 | 3.23 ±0.17 *  |
| 接地時間(ms)        | 145 ±6     | 156 ±9 **     |
| 滞空時間(ms)        | 149 ±15    | 155 ±14       |

\*: p<0.05, \*\*: p<0.01



ケニア人選手



日本人選手

図7 ケニア人選手と日本人選手の支持脚の比較

図7は、ケニア人選手と日本人選手の支持脚のキック動作をスティックピクチャで比較したものである。ケニア人選手では、接地から離地まで大腿の動作範囲が大きく、とくに支持期前半に下腿が大きく前傾し、その後大腿が大きくスウィングしている様子がわかる。とくに大腿が垂直になる姿勢では、その違いが顕著である。

図8は、1サイクルにおけるケニア人選手と日本人選手の平均の下肢関節トルク(関節を屈曲および伸展する力)を示したものである。0~25%あたり支持期、その後回復期になっている。日本人選手は支持期中盤の股関節伸展トルクが小さく、離地後なだらかに屈曲トルクが上昇していたのに対し、ケニア人選手は支持期中盤に股関節伸展トルクが大きく、離地後日本選手よりも遅いタイミングで急激に大きな股関節屈曲トルクを発揮していた。ケニア人選手は、脚を一度後方へ送った後で強く股関節屈曲トルクを発揮し、鞭を振るようにキックした脚をリカバリーしていたと考えられる。

図9は、ケニア人選手と日本人選手の下肢関節の1サイクルの平均パワーを示したものである。股関節の平均パワーはケニア人選手の方が有意に大きく(p<0.05)、股関節による出力を強調した走動作になっ

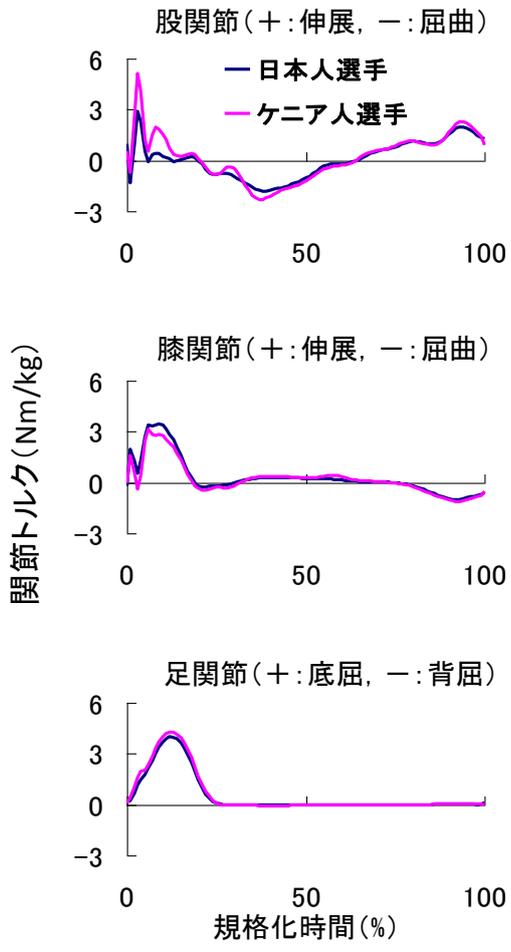


図8 ケニア人選手と日本人選手の下肢関節トルクの比較

ていた。長距離走のレースにおいて走速度が高い選手ほど股関節の出力が大きいと報告されており、本研究の結果は長距離走において股関節の出力を高めることの重要性をさらに強調するものであろう。これは接地期の股関節伸展トルクの大きさと離地後の股関節屈曲トルクパターンが影響していると考えられる。

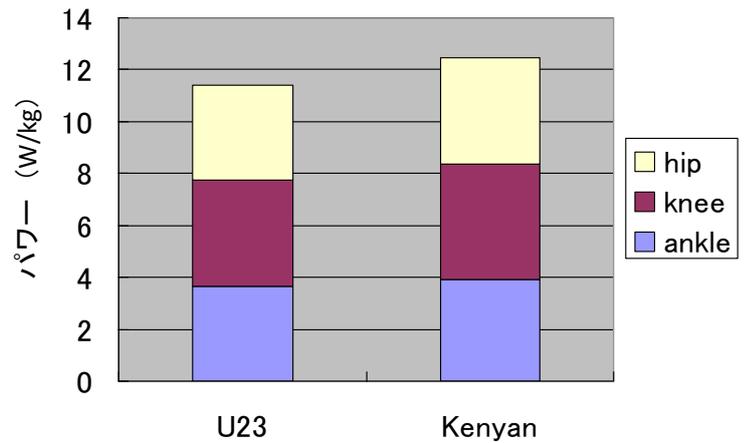


図9 1サイクルにおける下肢関節平均パワー

#### IV. 考察

国際的な研究チームは、ケニア人長距離選手を対象にさまざまな研究を行ない、ケニア人選手がかならずしも持久的な能力に優れているわけではないこと、それが遺伝的に影響しているわけではないことを報告している(Saltin, 2003). しかし、Saltin(2003)や Lucia ら(2006)は、ケニア人選手、あるいはエリトリア人選手のランニングエコミーが高いことが長距離走における高いパフォーマンスの決定因子であることを報告するとともに、彼らの高いランニングエコミーは下腿の周囲が小さいこと、軽いことが影響している関係づけている。しかし、下腿の軽さ、あるいは小さい慣性モーメントが関係しているのであれば、それは走動作に影響してランニングエコミーと関係しているはずであるが、走動作については言及していない。

そこで、われわれは国際的な研究と同様に生理学的なデータを確認しつつ、体格や筋の形態と走動作の関係をとくに詳細に検討した。

まず、生理学的な観点からケニア人選手と日本人選手の間に大きな違いはみられなかった。血液成分については、ややケニア人選手のほうが赤血球が小さく、ヘモグロビン量が多い、血漿量が多いことで、血液の粘性が低いことがみられたが、個人差も大きく、トレーニングの影響を受けていることを加味すると、パフォーマンスに直接影響しているとは考えにくいものであった。

本研究では、血液量を評価した。これは、これまで長距離走ではヘモグロビン濃度に代表される血液成分の濃度が高いことが酸素運搬能力と関係し、長距離走パフォーマンスやトレーニング評価において重視されていた。しかし、近年の研究から持久的なトレーニングによって血液量が増えることが報告されており、本研究においても被験者数が少ないものの高いレベルの長距離選手間においても血液量と酸素摂取量との間に相関関係がみられた。これは、血液量が多ければ、心臓に帰ってくる血液の量が増えるため、より多くの血液が心臓から筋に流れ、より多くの酸素が筋に行き渡るためであると考えられる。よく知られているように、ヘモグロビン量は高地や低酸素環境(低酸素室や低圧室など)に滞在すると増加し、血漿量は高強度のトレーニングや暑熱環境下でのトレーニングで増加します。これらのトレーニングを織り交ぜて血液量を増加できれば、それに伴って最大酸素摂取量、そして長距離走パフォーマンスがさらに向上すると考えられよう。

本研究においてもケニア人選手のランニングエコミーが高いことが確認された。図 10 は、走速度と酸素摂取量との関係を示したもので、エリトリア人選手とスペイン人選手のデータは Lucia ら(2006)から引用したものである。走速度の増大にともない酸素摂取量が大きくなっており、同速度であれば、酸素摂取量が低いほどエコミーが高いと考えられる。ケニア人選手は他国の選手より同じ速度あたりでは低く、より高い速度では大きく増大しており、ランニングエコミーが高いばかりではなく、最大酸素摂取量も高いことが窺われる。トレッドミルテストにおける最大乳酸値からもわかるように、ケニア人選手は乳酸値がかならずしも低いわけではないことがわかる。近年、長距離走では乳酸域値(LT)がパフォーマンスと関係が強いことが示され(大後ら, ), LT を高めるためのトレーニングが主流となっているようである。しかし、ケニア人選手は最大下速度において乳酸値の高い選手はテストでの最大乳酸値も高く、最大下において乳酸が低ければ最大値も低い関係がみられた。すなわち、これらの結果は、ケニア人選手には長距離タイプと中距離タイプの両方がいることを示していると考えられるが、どちらのタイプであってもランニングエコミーが高いことが明

らかとなった。

ケニア人選手の走動作では、キック脚における下腿と大腿のスウィング動作は日本人選手とは大きく異なり、さらに離地後に一度大きく後方へ送られる特徴のあることが報告されている(Enomoto ら, 2005)。さらに、ケニア人選手は後方へ送った大腿を前方へスウィングするために後方スウィングから前方スウィングに切り返すところで大きな股関節屈曲トルクを発揮することも指摘している。本研究においても短い走路における実験走ではあるものの同様の動作の特徴と股関節屈曲トルクの発揮がみられた。

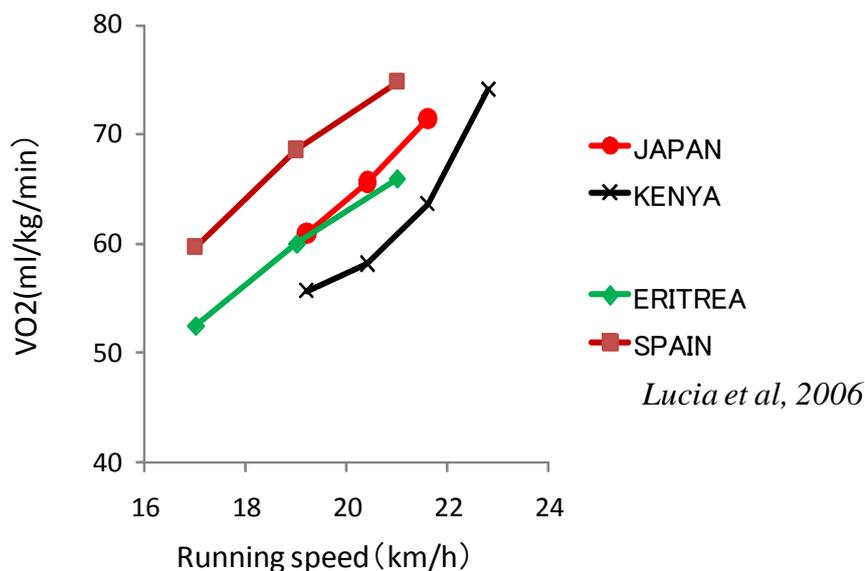


図10 日本人選手とケニア人選手のランニングエコノミーの比較

MRI においてケニア人選手の大腰筋の横断面積が日本人選手より大きいことがわかった。大腰筋は、股関節の屈曲に大きく関与する筋であり、表 7 において示した図からもわかるように、股関節屈曲筋群(腹筋群)の中でも大きい筋であることがわかる。一方、内転筋は日本人選手のほうが大きかった。大腿直筋やハムストリングなどの他の股関節屈曲および伸展に関与する筋では差はみられなかった。すなわち、内転筋は股関節の屈曲と伸展に作用する筋であり、日本人選手の股関節屈曲動作にはより内転筋が貢献しており、ケニア人選手では大腰筋が貢献している可能性を示唆していると考えられる。

図 11 は、1 サイクルの下肢関節パワーの平均値をケニア人選手と日本人選手の平均値で示したもので、右が推定した身体部分慣性係数(BSP)を、左が本研究で実測した体格値から算出した選手の個々のBSPを用いて関節トルクパワーを算出したものである。ケニア人選手は股関節のパワーが大きい特徴が明らかになっているが、そのような特徴はどちらのBSPを用いても変わらなかった。すなわち、身体慣性特性の影響は小さいことがわかる。また、Saltin(2003)は、ケニア人選手の下腿の軽さがランニングエコノミーに影響していると述べているが、本研究ではケニア人選手の下腿は細いが、長いために重さには日本人選手と差はなく、慣性モーメントではむしろ大きくなっていった。すなわち、ケニア人選手の下腿そのものはスウィングしやすいわけではないことを示唆するものであろう。以上のことは、Enomoto ら(2005)がすでにケニア人選手の技術として示唆しているように、彼らはキックしたのち後方へスウィングした脚が股関節まわりに大きな慣性モーメントとなっているときに大きな股関節屈曲トルクを発揮し、前方へのスウィングが始まる

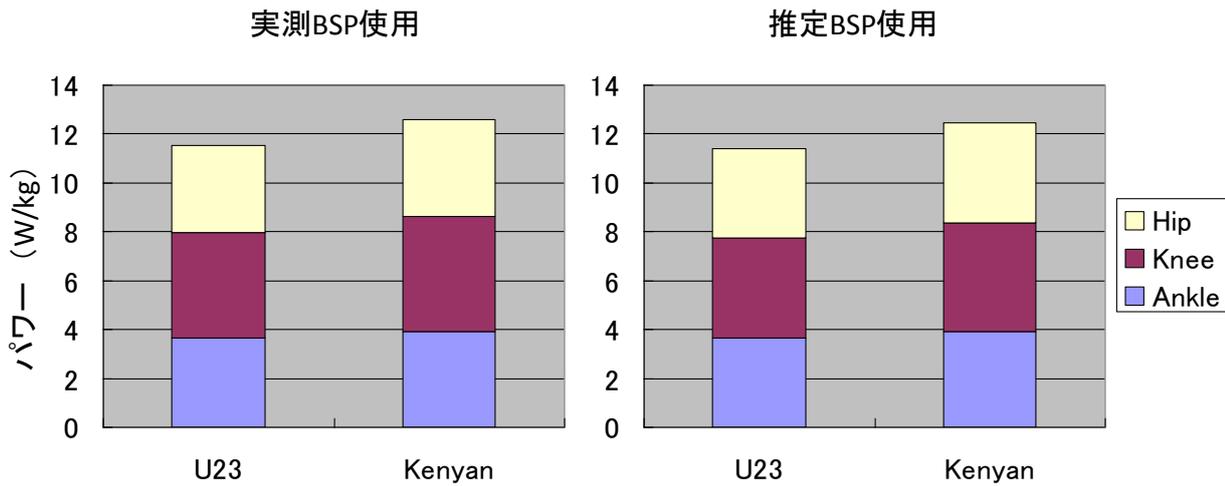


図11 下肢関節パワー(絶対値)のサイクル平均値

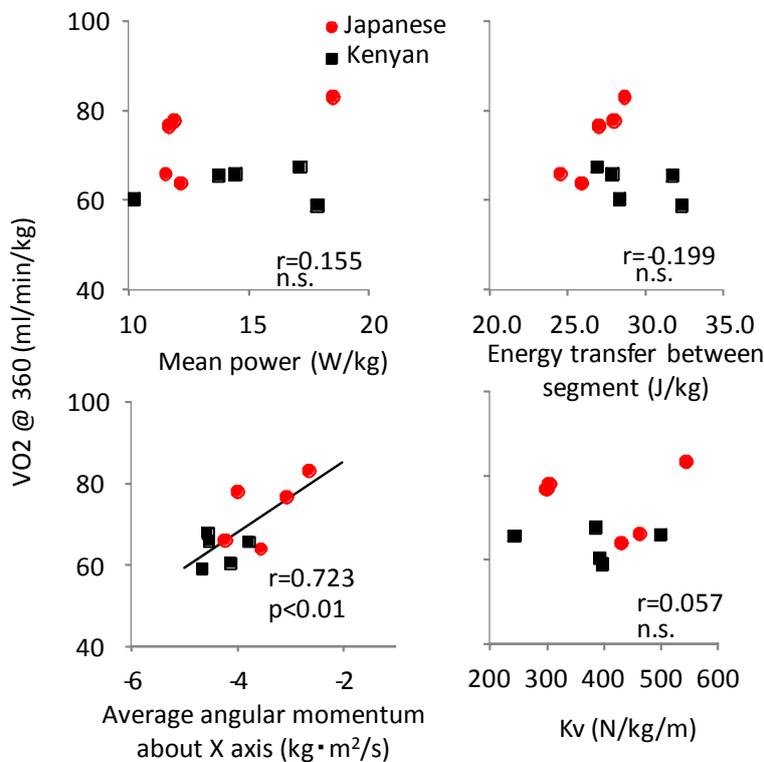


図12 ランニングエコミーとバイオメカニクス的変量との関係

と、下腿を大腿に引きつけ、慣性モーメントを小さくして、前方へのスウィングを効果的に高めているという仮説を支持するものであろう。

図 12 は、ランニングエコミーとバイオメカニクス的変量との関係を示したものである。これまで走動作の評価項目として提案されてきた平均パワー、力学的エネルギーの伝達量、有効鉛直スティフネスはランニングエコミーとの間に有意な相関はみられなかったが、左右軸まわりの角運動量とランニングエコミーとの間には有意な相関がみられた( $r=0.723$ ,  $p<0.01$ )。左右軸周りの角運動量は、走速度を増大すると負に大きくなることが報告されているが(Hinrichs, 1987)、ケニア人選手は同程度の走速度で走っていても

前方回転の角運動量大きいことを示していると考えられる。さらに、前方回転の角運動量は、脚の回転により大きくなるため、同じ走速度でもケニア人選手が大きく、かつ速く脚のスウィング動作を行なっていることを行なっており、その動作がランニングエコノミーと関係していることを示唆するものであろう。これらのメカニズムについては今回の研究では明らかにできなかったが、図 13 に示すように、新たな仮説構造を提案できるものであろう。すなわち、長い下腿は、支持脚のスウィング動作とともに回復脚のスウィング動作にも効果的に作用し、これらが角運動量として評価されている。そして、それらは、力学的エネルギーの伝達を効果的に行なっていることを示すと考えられ、これがランニングエコノミー、さらには長距離走パフォーマンスに影響を及ぼしていると考えられ、もう一方では、支持脚のキック動作を効率的なものにし、ランニングエコノミー、長距離走パフォーマンスへと関連している可能性も考えられよう。Kram (2000) は、支持脚のトルクの発揮がランニングエコノミーに影響していることを示唆している。これらは今回のバイオメカニクスの分析のみでは明らかにすることができず、さらなる実験による検証が必要であろう。

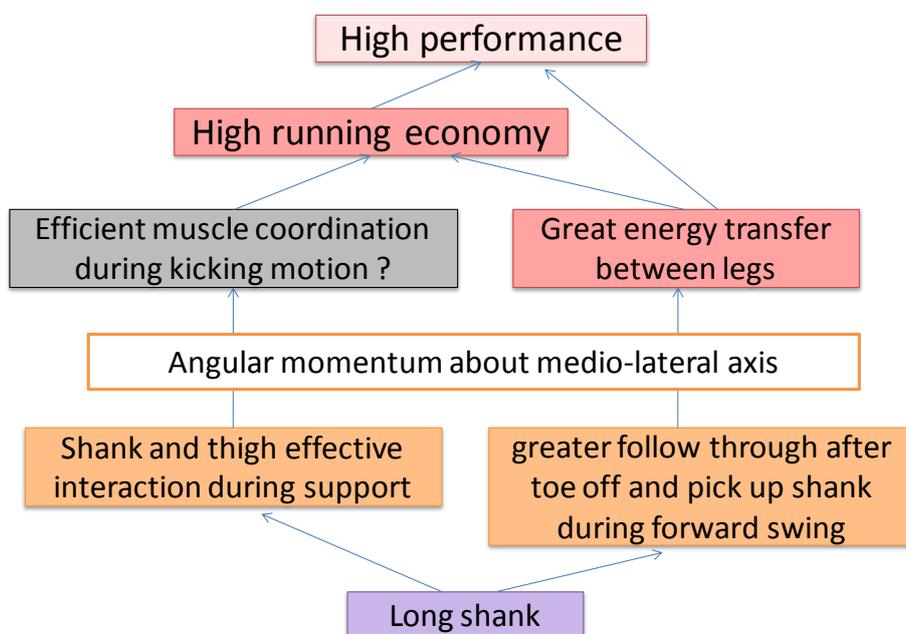


図13 ケニア人選手の下腿がパフォーマンスに影響を及ぼす仮説構造

## V. 摘要

本研究で得られた結果をまとめ、ケニア人選手の特徴を記述すると以下ようになる。

- ① 血液の濃度には大きな差はみられないが、赤血球が小さく、血漿量が多いことから血液がより流れやすくより酸素を運搬できる可能性がある。
- ② 血液量はとくに多いわけではないが、ケニア選手に関わらず酸素摂取量が多い選手は血液量が多い。
- ③ 体格的特徴は、下腿が細長く、下腿の筋も小さいが、脚を前後にスウィングすることへの影響は小さい（慣性モーメントは日本人選手と比較して小さくない）。
- ④ アキレス腱が長く、腹筋（大腰筋）が発達している。
- ⑤ 生理学的特徴は、乳酸域値や最大酸素摂取量には大きな差はないと考えられるが、ランニングエコノミーが高く、高い走速度でのトレッドミル走を比較的楽に走ることができる。
- ⑥ キックしたのちの脚の前方スウィング開始あたりで大きな屈曲トルクをタイミング良く発揮している。

以上の結果から、ケニア人選手の特徴はとくに走動作においてキックした脚が後方へ一度送られ、それを大腰筋が強く働いて前方へ勢いよく振り出していると考えられる。これがトレッドミル上で楽に走れることとも関係していると推測できる。そして、これは下腿の軽さの利点よりも技術的な要素が強く影響していると考えられる。ケニア人選手の高い長距離パフォーマンスは、これまで重視されてきた血液成分や LT ばかりでなく、ランニングエコノミーと強く関係しており、これは体格よりも走動作に影響されていると考えられ、日本人選手は走動作のトレーニングを行なうことでその差を埋められる可能性を示唆していると考えられる。何よりもケニア人選手の特徴は、遺伝的な体格や筋の特徴とトレーニングによる筋の発達、生理学的特徴が走動作を介してパフォーマンスとして効果的に発揮できていることにあると考えられる。日本人選手にとって長距離走パフォーマンスを高めるためのトレーニングモデルを提案し、個々の選手の課題をあげ、トレーニングを実行し、課題を克服していくことが必要であることを再確認するものであった。

### トレーニング現場への示唆

- 1) 高い走速度や大きな走動作で走る機会を増やし、股関節屈曲筋群の筋力トレーニング、脚の前後スウィング動作の技術的トレーニングを積極的に行なう。
- 2) 体力的には LT を高めるばかりではなく、様々な強度と量を組み合わせたトレーニングを行なうことが長距離走においても重要であり、そのときにランニングエコノミーを高める工夫を入れるべきである。

## 引用文献

Enomoto Y, Ae M (2005) A biomechanical comparison of Kenyan and Japanese elite long distance runner's techniques. Book of abstracts XXth Congress of the International Society of Biomechanics, No. 852.

Hinrichs R N (1987) Upper extremity function in running. II: Angular momentum considerations. Int. J. Sport Biomech. 3, 242-263.

Kram R (2000) Muscular force or work: what determines the metabolic energy cost of running? Exerc. Sport Sci. Rev. 28, 138-43.

Lucia A et. al (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners- exceptional running economy. Appl. Physiol. Nutr. Metabo. 31, 530-540.

Saltin B (2003) The Kenya project - Final report. New Studies in Athletics, 18: 15-24.

## 謝辞

本研究は、(財)日本陸上競技連盟および国立スポーツ科学センターの協力により行なわれました。また、実験においては大塚製薬陸上競技部河野監督、コニカミノルタ陸上競技部酒井監督をはじめ多くの関係者のご協力とご支援により実施することができました。ここに記して感謝の意を表します。