

氏か育ちか：東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか

佐川 和則

Nature versus nurture : Why are East African long-distance runners fast?

Kazunori Sagawa

Abstract

Over the last few decades, East African runners have dominated international long-distance running. Although mtDNA and Y chromosome haplogroups may play a role in determining East African running success, no evidence has yet been presented.

Also investigations on ACE and ACTN3 genotype does not support the role of ACE and ACTN3 polymorphism in explaining the East African distance running phenomenon. It seems that $\dot{V}O_2\text{max}$ of black and white distance runners are no difference, and the black runners can maintain a high % $\dot{V}O_2\text{max}$ during the race and have higher running economy. These may have been associated with long legs, slender body and lactate kinetics characterized by black runners. A higher proportion of Kenyan and Ethiopian elite runners ran to school each day and covered greater distance. A considerable proportion of Kenyan elite athletes were motivated to run for economical reasons. In addition these runners have been shown to have a distinctive pattern on nutrients and fluid intake in training and competition periods. The disproportionate success of East African population is not only genetic factors, social and cultural factors also contribute.

Key words : East African runners, genotype, physiological phenotype, biochemical phenotype, environment

I. はじめに

2011年8月27日から9月4日までの期間に開催された国際陸上競技連盟（IAAF）主催世界陸上テグ大会の長距離種目（5000m, 10000m, 3000mSC およびマラソン）において、東アフリカ出身の男子選手は全12個のメダルのうち実に11個を獲得し（Fig.1）、同様に女子選手においても10個のメダルを手にした。またIAAFのデータベース（<http://www.iaaf.org>）によれば2011

年の男子マラソン30傑のうち、東アフリカの選手は28名を数える（このうち22名はケニア選手, 2011年9月23日現在）。クロスカンントリー競技を含めたこれらの競技種目における東アフリカ出身選手の成功は最近40年間において特に顕著である。

これらの国の出身者で世界的に注目された最初の人物は、1960年のオリンピックローマ大会の男子マラソンで優勝したAbebe Bikila（エチオピア）であろう。Haile Selassie I世の親衛隊員で

あった Abebe は部隊の訓練のために取り入れられた長距離走のトレーニングでその力が認められ、ローマオリンピックの強化選手となる。無名のまま出場したマラソン競技では、裸足で走っての勝利が全世界にインパクトを与えた。Abebe は4年後の東京大会でもマラソン競技で優勝しオリンピック2連覇を成し遂げる。その後、メキシコ大会のマラソンで3個目の金メダルに挑んだが、膝の故障のため途中棄権に終わっている。しかし同じメキシコ大会の男子マラソンに優勝した Mamo Wolde (エチオピア) をはじめ、東アフリカ諸国の選手は中長距離種目で実に9個のメダルを獲得し、メキシコシティという高地での開催ということも手伝って高地民族の長距離競技への適性があらためて注目されることとなった。しかしこの時点では東アフリカ諸国の選手の強さは高地民族がもつ低酸素環境への適応がその理由と考えられており、平地に住む民族も高所でのトレーニングを積むことにより、高地民族と同等の成績が修められるだろうとの観測があったようだ。少なくともその後の数十年の間、東アフリカ諸国のランナーがこの分野に君臨することになると予測した者はそれほど多くなかったものと思われる。

東アフリカ諸国のランナーがなぜ陸上長距離種目でこのような成功を修めているのかについて、これまで多くの研究者がその理由を解明しようとしてきた。本稿はこれまでの研究を概観し、遺伝的要因、生理的・生化学的要因および社会的文化的要因について述べる。

II. 遺伝子多型

東アフリカ諸国の中で特に陸上長距離種目に成功を修めてきた国は、ケニアとエチオピアである。ケニアにおいてこれらの種目に一流選手を輩出してきたのは、リフトバレー州の Kalenjin 族が突出して多く、そのなかでも Nandi 亜族の割合が高い (Onywera et al., 2006)。エチオピアにおいても同様に、エチオピアの国際レベルのランナーの多くは Arsi 地方と Shewa 地方の出身である (Scott et al., 2003)。特定の地域の特定の民族

が突出した成功を修めている事実は、その背景に遺伝的素因の可能性を匂わせる。

ミトコンドリアは酸化的リン酸化系により有酸素的にアデノシン三リン酸 (ATP) を産生する細胞内小器官である。ミトコンドリアは核 DNA とは別に独自に DNA (ミトコンドリア DNA ; mtDNA) を有している。この約 16,000 塩基対からなる mtDNA には一定期間ごとに生じる突然変異によって変異が累積している。また mtDNA は母系遺伝であり、母方の祖先の mtDNA 変異のセットはそのまま子孫へと受け継がれる。したがって、この突然変異の痕跡を遡っていけば、最終的に一人の女性に行きつくことになる。最近のミトコンドリアゲノムの全塩基配列の解析によれば、現在の人類の共通の祖先は 19 万 2400 年前のアフリカに生きていた女性にたどりつくという (田中, 2011)。ある集団に共通に検出される mtDNA 変異のセットはミトコンドリアハプロタイプと呼ばれ、類似したハプロタイプをグループ化したものをハプログループという。アフリカに生きていた現生人類の祖先は、約 7 万年前にアフリカ大陸を出てインド亜大陸に進出した。また別の集団は 4 万 5 千年前にヨーロッパへも移動したとされる。現代に生きる世界各地域の人類のハプログループを調べると、アフリカから世界中に拡散していった現生人類の系統樹を描くことができる。アフリカではハプログループ L0 から L7 が認められるが、このうちハプログループ L3 がアフリカ大陸を出た集団であり、その後これはハプログループ N および M に分岐する。ハプログループ N はヨーロッパとアジアに分布を広げたのに対し、ハプログループ M はアジアのみに分布を広げていったとされている。ちなみに日本人に多いハプログループは M から分岐した D4 である。

ある特定の地域の特定の民族が突出して高い身体能力を持ち、それが遺伝的要因によるのであれば、かれらのハプログループはいずれかのハプログループに偏っているはずだという仮説が成り立つ。エチオピアの国際レベル長距離選手 76 名と一般のエチオピア人 108 名のミトコンドリア

東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか



Fig.1 IAAF 世界陸上テグ大会男子長距離種目（5000m, 10000m, マラソンおよび3000m 障害）でメダルを獲得した東アフリカ諸国選手の出身国とメダル数。ソマリアの2つのメダルは英国代表として出場した Mohamed Farah によるもの。またケニアの銀メダル1個は米国代表として出場した Bernard Lagat (Nandi 亜族出身) によるものである。

★：金メダル，●：銀メダル，▲：銅メダル

ハプログループの分布を調べた研究 (Scott et al., 2005a) によれば、長距離選手のハプログループは特定のグループに偏ってはならず、エチオピアに住む一般の人々の分布と変わらなかった。しかし同じ研究者のグループが4年後に報告したケニア人ランナーと一般ケニア人のミトコンドリアハプログループの頻度比較を行った研究 (Scott et al., 2009) は、国際レベルのケニア人長距離選手は一般のケニア人と比較し、ハプログループ L0 の頻度が有意に高く、逆にハプログループ L3 の頻度が有意に低いことを見出した。mtDNA は酸

化的リン酸化系に働くいくつかの重要なたんぱく質をコードしており、mtDNA 多型が ATP 産生能力に変化をもたらし、有酸素的持久能力に影響をおよぼす可能性が考えられる。現在のところ、ミトコンドリアハプログループ L0 あるいは L3 に検出される mtDNA 多型と運動能力の関連性は不明であるが、今後それらのメカニズムの解明が進むと予想される。

Y 染色体に存在する DNA は核 DNA であるが、父系遺伝の性質を持つことから、mtDNA 同様ハプログループを決定し系統樹が作成されてい

る。前述の mtDNA ハプログループを調べた研究者グループは、エチオピア人一流選手 62 名、一般的エチオピア人のコントロール群 95 名および Arsi 地域出身のコントロール群 85 名の Y 染色体ハプログループの分布を報告した (Moran et al., 2004)。それによれば、エチオピア人一流走者の Y 染色体ハプログループは、2 つのコントロールグループのものと同様な分布であったが、4 つのハプログループの頻度に統計的に有意な差が認められた。この結果は、Y 染色体ハプログループがエチオピア人の長距離種目での成功に重要な役割を果たしている可能性を示すものである。しかしながら、Y 染色体に存在する遺伝子は 70 個あまりであり、しかもエネルギー産生に関わる mtDNA 多型とは異なり、それらは重要な働きをする遺伝子とは考えられていない (篠田, 2007)。現在のところ、Y 染色体ハプログループと表現型としての特定の運動能力との関連についての研究は非常に少なく、今後の知見の蓄積が期待される。

mtDNA とは異なり、約 3 万もの遺伝子をもつ核 DNA は膨大な遺伝情報を有している。これまで体力に影響を及ぼす可能性のある遺伝子の候補は 100 以上見つかっている (Rankinen et al., 2006)。このうち運動能力およびトレーニング効果と関連して最も多く研究されてきた遺伝子多型はアンジオテンシン I 変換酵素 (Angiotensin I converting enzyme : ACE) であろう。ACE 遺伝子は 17 番染色体長腕 (17 q 23) に位置し、26 のエクソンと 25 のイントロンを含む。このイントロン 16 には 287 塩基対が存在している場合 (I アレル) と欠損している場合 (D アレル) があり、2 対の対立遺伝子の組み合わせによって II 型、ID 型および DD 型のいずれかに分けられる。ACE はレニン-アンジオテンシン系に働き、アンジオテンシン I をアンジオテンシン II に変換する。アンジオテンシン II は血管を収縮させ血液の循環を制限し血圧を上げる作用を持つ。また ACE はカリクレイン-キニン系にも働き、血管拡張物質を阻害することで血圧の増加因子として働く。余分な塩基配列が挿入された II 型と ID

型では DD 型に比べ ACE の作用が弱められると考えられている。ACE の血管収縮作用が低下した状態であれば、運動中の筋への酸素供給も維持されやすく、II 型、ID 型は DD 型に対して持久的運動により適性が高いと考えられる。ACE と運動能力について最初に報告したのは、無酸素で 7,000m 以上の山に登頂した経験のある英国人男性登山家 25 名と英国人一般男性 1,906 名の ACE 多型の頻度を比較したものである (Montgomery et al., 1998)。登山家の ACE 遺伝子多型は対照群に比較し、II 型が多く DD 型が少ないこと、また酸素の供給なしに 8,000m 以上の高所に登山した 15 名の中には DD 型は含まれていなかったことが明らかになったことで、ACE 遺伝子多型と特に持久能力との関係に注目が集まった。同じ研究グループはこの翌年に、91 名の英国人一流陸上競技選手の ACE 遺伝子多型を調べ、I 対立遺伝子は競技の距離が長くなるに従い増加すること、また 200m 以下の短距離選手では対照群に比べ I 対立遺伝子の頻度が低かったことを示した (Myerson et al., 1999)。

東アフリカの一流ランナーと ACE 遺伝子変異の関連を評価した研究は、ケニア人選手とエチオピア人選手についてのものがある。前者は 221 名のケニア国内級選手、70 名の国際級選手と 85 名の一般人について、ACE 遺伝子 I/D 多型と ACE A22982G の遺伝子型を調べた (Scott et al., 2005b)。A22982G の遺伝子型は I/D 多型に比べより強く ACE 活性と関係することが分かっている (Zhu et al., 2000)。しかしながら結果は、ACE 遺伝子 I/D 多型の出現頻度は 3 群とも統計的有意差は認められず、A22982G の遺伝子型の出現頻度も同様であった。後者の研究は、前述のようにエチオピアの一流長距離選手が Arsi や Shewa など特定の地域から数多く輩出されることから、一般のエチオピア人の対照群 (317 名) に加え生誕地を考慮した対照群 (410 名) を設定し、ACE 遺伝子 I/D 多型および ACE A22982G の遺伝子型の出現頻度を一流選手 (76 名) と比較したものである (Ash et al., 2011)。結果はケニアでの成果と同様に ACE 遺伝子多型と一流長

東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか

距離選手としての活躍状況とは関連性が認められなかった。ACE 遺伝子 I/D 多型と ACE 活性との関係について、黒人の子どもは白人の子どもに対して関連が弱いことがわかっており (Bloem et al., 1996), このことがケニアとエチオピアでの研究結果に影響を及ぼしているのかもしれない。

スポーツパフォーマンスに関連する遺伝子の候補として最も注目されているもう一つは、ACTN3 である。この遺伝子によってコード化される α -アクチニン 3 は、サルコメアを区切っている Z 膜中に発現し、収縮タンパク同士を結合させる役割を持つことから、筋収縮の強さを規定する重要なタンパクであると考えられている。ACTN3 タンパクは 11 番染色体上に位置し、901 個のアミノ酸から構成される (Beggs et al., 1992)。このアミノ酸配列の 577 番目は通常アルギニン (R) であるが、これがストップコドン (X) に変異していると正常な ACTN3 タンパクをつくれなくなる。したがって、ACTN3 の多型は、R および X アレルの組み合わせから、RR 型、RX 型および XX 型の 3 種類が存在するが、XX 型は Type II 線維内に α -アクチニン 3 を発現できない (この場合 α -アクチニン 2 がその働きを代償する)。ACTN3 多型と運動能力の関係を調べた初期の報告は、スプリント/パワー系の白人オリンピック選手 (32 名) に XX 型は 1 人もおらず対照群 (白人 436 名) の多型の出現頻度とも異なっていたのに対し、持久系のオリンピック選手の多型の出現頻度は対照群と差がなかったことを明らかにした (Yang et al., 2003)。この研究を端緒に、現在まで ACTN3 多型と運動能力の関連性に関する数多くの研究がなされてきている。それらの成果をまとめると、スプリント/パワー系の一流選手には XX 型が極めて少なく、持久系の選手には 3 つの遺伝子型が一様に分布するか XX 型の頻度がわずかに多いといえるだろう。スプリント/パワー系競技で成功するには R アレルを持っていることが重要であるが、持久系競技ではその成功に遺伝子型は関与しないと取れる結果である。これに対し、 α -アクチニン 3 の

欠損をモデル化したノックアウトマウスを用いた研究では、これらのマウスの速筋線維の直径が減少し筋力も弱くなった反面、解糖系に関わる 2 つの酵素の活性が 26% と 62% 増大し、TCA 回路と電子伝達系に働く 3 つの酸化酵素活性が 25 - 39%、また脂肪酸酸化に関わる 2 つの酵素の活性も 30 - 42% それぞれ高くなった (MacArthur et al., 2008)。この結果は、XX 型の筋は強く速く収縮することはできないが、エネルギー産生効率は高い可能性を示すものとして注目される。

エチオピアとケニアの一流長距離ランナーの ACTN3 多型の出現頻度を調べた研究は、XX 型の頻度はエチオピアとケニアの一流長距離ランナーで、それぞれ 8% と 1% であり、おのおの対照群のそれはそれぞれ 11% と 1% だったことを報告した (Yang et al., 2007)。以上の結果から、この論文は、 α -アクチニン 3 の欠損はアフリカのアスリートのパフォーマンスに大きな影響は与えないと結論付けた。

最近では単一の遺伝子多型だけでは運動能力の違いをうまく説明できないと考え、ACE と ACTN3 の 2 つの“パフォーマンス遺伝子”を同時に検査し、それらの運動能力への“相乗効果”を調べた研究 (Gómez-Gallego et al., 2009 ; Scott et al., 2010) もなされつつあるが、東アフリカ諸国のランナーに関するものはまだ報告されていない。

Ⅲ. 生理学的表現型および生化学的表現型

これまで、東アフリカの一流長距離選手と東アフリカ以外の一流選手の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2\max$) を比較した研究は少ない。Saltin et al. (1995a) は 6 名ずつの一流ケニア人ランナーと白人ランナーの $\dot{V}O_2\max$ を測定し、その平均値はそれぞれ $79.9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ と $79.2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、両群間に統計的に有意な差はなかったと報告した。またエリトリアとスペインの一流ランナーの $\dot{V}O_2\max$ を比較した研究でも両者に有意な差はなく、それぞれの値は $73.8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ と $77.8 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ で

あったという (Lucia et al., 2006). ドイツ人選手群とケニアの一流選手群を比較した最近の研究 (Prommer et al., 2010) においても, 両群の $\dot{V}O_2\max$ はそれぞれ $70.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$, $71.5 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ と 10km のベストタイムはケニア選手群が良かったにもかかわらず差は認められなかった. 東アフリカの一流ランナー (特にケニアとエチオピア) はおおよそ 2000m 以上の高所で生活しトレーニングも同じ場所で行っているが (Oniwera et al., 2006; Scott et al., 2003), これらの $\dot{V}O_2\max$ の測定はすべて低地で測定されたものであるので, $\dot{V}O_2\max$ を過剰評価することはない. しかしながら前出の Saltin et al. を除いて, 報告された $\dot{V}O_2\max$ は日本人大学生ランナーの値 ($72.2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$; 熊本と佐川, 2006) と比較しても差はなく驚くほど一般的な値である. さらに最近, $\dot{V}O_2\max$ の決定要因の一つと考えられている血液量とヘモグロビン量は, 一流ケニア人ランナーとドイツ人ランナーで差がなかったことも明らかにされた (Prommer et al., 2010). $\dot{V}O_2\max$ はランニング成績の比較的広い範囲を対象としたときに, パフォーマンスとの間に関連が認められる (Cotill et al., 1973; Söjdin and Svedenhag, 1985) が, 均質な集団ではその関係が薄れるか消失する (Conley and Krahenbuhl, 1980; Söjdin and Svedenhag, 1985). 東アフリカの一流ランナーの $\dot{V}O_2\max$ は, 他の諸国の一流ランナーのものと差はなく, この一般的理解を逸脱しないと考えられる.

東アフリカ人ランナーの優れた長距離走パフォーマンスを $\dot{V}O_2\max$ の高さから説明できないのであれば, その違いはレース中の $\% \dot{V}O_2\max$ が高いか, ランニングエコノミー (RE) が高いか, あるいはその両方による. レース中にその個人の持つ $\dot{V}O_2\max$ に対してどの程度の $\% \dot{V}O_2\max$ を維持できるかは, 長距離走のパフォーマンスを予測する上で重要な因子である (Davies and Thompson, 1979). 実際のレース中の $\% \dot{V}O_2\max$ を測るのは困難であり, 東アフリカの一流選手を被検者としてそれを測定した報告も見当たらない. トレッドミル上をレースペース

で走り, 黒人と白人ランナーの $\% \dot{V}O_2\max$ を調べたものには, Bosch et al. (1990) と Weston et al. (2000) の報告がある. 前者はマラソンの, 後者は 10km のレースペースでの $\% \dot{V}O_2\max$ を調べたものであるが, 黒人ランナーは白人ランナーに対して有意に高い値で走ることができたという. また黒人ランナーと白人ランナーの疲労耐性を比較した研究 (Weston et al., 1999) によれば, 最大心拍数の 97.4%–99.2% の高強度のランニングにおいて, 黒人ランナーは白人ランナーに対して疲労困憊にいたる時間が約 2 倍大きかった. しかしながら, これらの研究は南アフリカ共和国の黒人ランナーを対象としており, これらの結果が東アフリカ諸国のランナーの特徴を反映するかどうかは明らかではない. さらに上述の 3 つの研究が対象とした被検者は競技レベルの低い選手であることにも注意が必要である.

同じ東アフリカ諸国の中で最近長距離競技に好成績を修めている国の一つはエリトリアである. エリトリアの国際級選手 7 名とスペインの国際級選手 9 名の RE を比較した研究によれば, 17, 19 および $21 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ の走速度での酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$; $\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) は, いずれもエリトリアのランナーが約 12% 低かった (Lucia et al., 2006). これらのエリトリアの一流ランナーの値は, ケニアの一流選手 (Saltin et al., 1995) あるいは米国の名選手 Frank Shorter (Pollock, 1977) に匹敵し, これまで報告された RE の中でも最も高い水準にある. Weston et al. (2000) は, 南アフリカの黒人ランナーと白人ランナーにおける $16 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ の走速度での $\dot{V}O_2$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) を測定し, その値はそれぞれ 47.4 と $49.9 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ であったことを報告している. この黒人ランナーの RE 値は, 先に報告された白人ランナーの値 ($50.3\text{--}51.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) と比較しても高い経済性を示す (Costill et al., 1973; Daniels et al., 1977; Conley and Krahenbuhl 1980). これら黒人ランナーと白人ランナーの RE は, 体型を考慮し一定走速度での $\dot{V}O_2$ を体重の 0.66 あるいは 0.75 乗で除した場合, その差が拡大する (Saltin et al., 1995a; Weston et al., 2000). RE に関する研究は, $\dot{V}O_2$

東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか

max に対してどの程度の割合でレースを走れるかという能力の研究と同様に、ケニアおよびエチオピアの国際レベルの選手を被検者としているものは限定的である。しかしこれらの指標に関する南アフリカの黒人ランナーの特徴は、東アフリカのランナーのそれを理解する上で有益な情報を与えるだろう。東アフリカおよび南アフリカのランナーに見られる高い RE は、おもに低い BMI と長く細い脚に代表される形態学的特徴がその要因と考えられているが (Larsen, 2003 ; Lucia et al., 2006), ランニング中のエネルギー消費に影響を与えるとされる種々のバイオメカニク的要因 (Anderson, 1996) についての知見は、東アフリカのランナーに関するものはほとんどなく、今後の研究の進展が期待される。

以上のように、東アフリカ諸国の一流長距離ランナーにみられる生理学的表現型の特徴は、 $\dot{V}O_2\max$ は白人一流ランナーと差がないが、RE が高く、高い $\% \dot{V}O_2\max$ でレースを走れるとまとめることができる。Fig.2 は、これらの事象を直感的に理解する助けとなる。 $\dot{V}O_2\max$ に差がなくとも (①), ある一定の速度での $\dot{V}O_2$ が低く (RE が高く ; ③), レース中に $\dot{V}O_2\max$ に対して高いレベルの $\dot{V}O_2$ を維持できれば (②), 結果的に速く走れることがわかる。

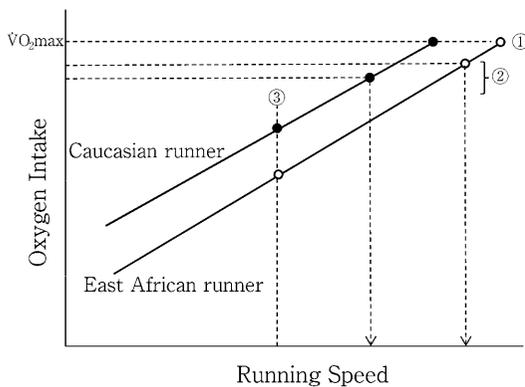


Fig.2 走速度-酸素摂取量関係からみた東アフリカ出身ランナーと白人ランナーの特徴を理解するためのモデル。①最大酸素摂取量は同等。②レース中の $\% \dot{V}O_2\max$ は東アフリカランナーが高い。③ランニングエコノミーは東アフリカランナーが優れている。

○：東アフリカ出身ランナー、●：白人ランナー

東アフリカと南アフリカの黒人ランナーの生化学的特徴を調べた研究は、これらのランナーの最大下強度でのランニング中の血中乳酸値が、白人ランナーと比較し低いことを明らかにした (Bosch et al., 1990 ; Coetzer et al., 1993 ; Saltin et al., 1995 ; Weston et al., 1999). これに関してエリトリアの一流ランナーでは逆の結果が示されたが (Lucia et al., 2006), 同等の 10 km 競技成績とトレーニング量を持った 2 群を対象とし、黒人ランナーの生理学的生化学的特徴を厳密な実験条件で明らかにしようとした最近の研究において、黒人ランナーの最大下スピードでの血中乳酸値の低いことが再度確認された (Kohn et al., 2007). 黒人ランナーにおいて最大下スピードでのランニング中の血中乳酸値が低くなるのは、白人ランナーと比較して筋中のクエン酸合成酵素 (citrate synthase : CS) が高い (Weston et al., 1999), あるいは 3-ヒドロキシアシル CoA 脱水素酵素 (3-hydroxyacyl-CoA dehydrogenase : 3-HAD) が高い (Saltin et al., 1995b) ためだとする報告がある。しかしながら南アフリカの黒人ランナーと白人ランナーを調べた研究は (Kohn et al., 2007), これらのエネルギー基質の酸化に関わる酵素の活性に両群で差があるという結果を否定した。乳酸脱水素酵素 (lactate dehydrogenase : LDH) を黒人ランナーの低い血中乳酸値と関連付けようとする研究もあるが、乳酸をピルビン酸へ変換することを好む LDH-M アイソザイムが黒人ランナーに高いとするもの (Kohn et al., 2007) と、逆にピルビン酸を乳酸に変換するのに向く LDH-H アイソザイムが高いとする報告 (Saltin et al., 1995) がありその解釈を困難にしている。さらに乳酸の細胞膜通過に関与するモノカルボン酸輸送担体 1 および 4 (monocarboxylate transporter1 and 4) の筋中の量にも黒人と白人ランナーで差はなく (Harley et al., 2009), 現在のところ、生化学的表現型と東アフリカの長距離ランナーの優位性について、その関連性を明確に説明することはできない。

IV. 社会的・文化的要因

東アフリカ諸国の長距離選手における成功の秘密を遺伝的要因ではなく社会的・文化的要因から説明しようとした研究も存在する。エチオピアの陸上ナショナルチームに所属する男女選手と一般エチオピア人に対するアンケート調査結果が示すところによれば、マラソンを専門とする選手（34名）の73%は子供時代の毎日の通学距離が5-20kmで、そのうち68%は走っての通学だったという（Scott et al., 2003）。ケニアの国際レベル、国内レベルの長距離選手と一般ケニア人を対象とした同様の研究では、毎日の通学距離が5km以上だったと答えた割合は、国際レベル選手、国内レベル選手および一般人で、それぞれ51%、42%、25%であり、それぞれの群には統計的に有意な差があった（Onywera et al., 2006）。そしてこの研究においてもケニアの国際レベルのランナーの81%は走っての通学だったという。これらの国以外にも、子どもの多くが長距離を走って通学する習慣を持つ国や地域が存在する可能性を否定できないが、少なくとも先進諸国の市街地では限定的であろう。ケニア国内の少年（16歳）を被検者とした研究では、都会と田舎に育つ少年の $\dot{V}O_2\max$ は、それぞれ50.2と55.1 ml \cdot kg $^{-1}$ \cdot min $^{-1}$ であり、田舎の少年の $\dot{V}O_2\max$ が約10%高い理由は毎日の高い身体活動量のためだとされた（Larsen et al., 2004）。2011年のユース男子3000m世界10傑のうち9名が東アフリカ諸国の選手である（<http://www.iaaf.org>）ことから、これらの国のランナーは若年期から高いパフォーマンスを有していることは明らかである。幼少期からの高い身体活動量に特徴づけられる生活習慣が、東アフリカのランナーの成功の一因であることは否定できないだろう。

前出の研究（Onywera et al., 2006）は、ケニア選手の競技者になった理由についても調べている。その理由としてもっとも多かったのは、国際レベル、国内レベルの選手とも同様に“経済的理由”であった（それぞれ33%、38%）。ケニア国民の40%は定職がなく、少なくとも50%は貧困

の状態にあるという。家族や同胞を支えるために走るという強いモチベーションがケニア人ランナーの成功に貢献しているという主張には、そのモチベーションを持つ選手の割合以上に説得力が感じられる。

東アフリカの長距離選手の栄養素摂取に関する研究もなされている。ケニアとエチオピアのランナーは1日に2,937-3,194 kcal 摂取しているが、摂取栄養素の内訳はいずれの研究でも高炭水化物（64.3-76.5%）・低脂肪（13.4-23.3%）であった（Christensen et al., 2002 ; Onywera et al., 2004 ; Fudge et al., 2006 ; Beis et al., 2011）。これらの摂取量と摂取割合はいずれも国際的あるいは米国の公的機関が持久競技者に推奨する基準に合致しているが、ケニアの一流ランナーは、トレーニング期と試合期に短期間ながら負のエネルギーバランスの状態を作り出すことで、体重を減少させランニングのエネルギーコストを改善している可能性が指摘された（Onywera et al., 2004 ; Fudge et al., 2006）。またケニアとエチオピアの一流ランナーはトレーニングの前後でほとんど水分を摂取せず、一日の水分摂取量は1.75-2.3Lと少ないことも明らかとなった（Onywera et al., 2004 ; Fudge et al., 2006 ; Beis et al., 2011）。とはいえ一日の水分摂取量は不足してはならず、不足分は野菜を主体とした食物から補われているという。これらの研究は東アフリカのランナーの食物と水分の摂取様式の特徴を明らかにするものであるが、これら以外の諸国の一流ランナーとの比較はなされておらず、ケニヤとエチオピアのランナーの強さとの関連は不明である。

V. まとめ

最近40年間、東アフリカ諸国出身のランナーは、世界の陸上長距離界を席卷している。これまでこれらの成功の理由を解明しようとする研究が数多くなされてきた。mtDNAとY染色体のハプログループを調べた研究のいくつかは、東アフリカの一流選手の出現頻度が一般集団と異なることを見出しているが、ある特定の祖先を持つ集団が

東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか

持久能力に優れるという証拠は不足している。また東アフリカの一流選手の ACE と ACTN3 の出現頻度も調べられたが、これらの遺伝子多型と持久能力との関連性は認められていない。黒人と白人の長距離ランナーの $\dot{V}O_2\max$ には差はないが、黒人ランナーはレース中に高い $\% \dot{V}O_2\max$ を維持でき、RE も高いようだ。これらには黒人ランナーの乳酸動態と比較的小さく細く長い脚に特徴づけられる体型が関係しているかもしれない。ケニアとエチオピアの一流ランナーは、子供時代に長距離を走って通学していたものが多く、ケニアの選手では約 1/3 が経済的理由で走っているという。さらにトレーニング期と試合期には、これらのランナーには特徴的な栄養素と水分摂取様式があることが示されている。東アフリカ諸国の陸上長距離における成功は、単一の要因によるのではなく、遺伝的、社会・文化的要因の複合された結果と考えられる。

VI. 文献

- Anderson T. (1996) Biomechanics and running economy. *Sports Med.*, 22 (2): 76-89.
- Ash G.I., Scott R.A., Deason M., Dawson T.A., Wolde B., Bekele Z., Teka S., and Pitsiladis Y.P. (2011) No association between ACE gene variation and endurance athlete status in Ethiopians. *Med Sci Sports Exerc.*, 43 (4): 590-7.
- Beggs A.H., Byers T.J., Knoll J.H., Boyce F.M., Bruns G.A., and Kunkel L.M. (1992) Cloning and characterization of two human skeletal muscle alpha-actinin genes located on chromosomes 1 and 11. *J.Biol.Chem.*, 267 (13): 9281-9288.
- Beis L.Y., Willkomm L., Ross R., Bekele Z., Wolde B., Fudge B., and Pitsiladis Y.P. (2011) Food and macronutrient intake of elite Ethiopian distance runners. *J.Int Soc.Sports Nutr.*, 8:7.
- Bloem L.J., Manatunga A.K., and Pratt J.H. (1996) Racial difference in the relationship of an angiotensin I-converting enzyme gene polymorphism to serum angiotensin I-converting enzyme activity. *Hypertension*, 27 (1): 62-66.
- Bosch A.N., Goslin B.R., Noakes T.D., and Dennis S.C. (1990) Physiological differences between black and white runners during a treadmill marathon. *Eur.J.Appl.Physiol.Occup. Physiol.*, 61 (1-2): 68-72.
- Christensen D.L., Van Hall G., and Hambraeus L. (2002) Food and macronutrient intake of male adolescent Kalenjin runners in Kenya. *Br.J.Nutr.*, 88 (6): 711-717.
- Coetzer P., Noakes T.D., Sanders B., Lambert M.L., Bosch A.N., Wiggins T., and Dennis S.C. (1993) Superior fatigue resistance of elite black South African distance runners. *J Appl Physiol.*, 75 (4): 1822-1827.
- Conley D.L. and Krahenbuhl G.S. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med.Sci.Sports Exerc.* 12 (5): 357-360.
- Costill D.L., Thomason H., and Roberts E. (1973) Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 5 (4), 248-252.
- Daniels J., Krahenbuhl G., Foster C., Gilbert J., and Daniels S. (1977) Aerobic responses of female distance runners to submaximal and maximal exercise. *Ann.N.Y.Acad.Sci.*, 301: 726-33.
- Davies C.T.M. and Thompson M.W. (1979) Aerobic performance of female marathon and male ultramarathon athletes. *Eur.J.Appl. Physiol.Occup.Physiol.*, 41 (4): 233-245.
- Fudge B.W., Westerterp K.R., Kiplamai F.K., Onywera V.O., Boit M.K., Kayser B., and Pitsiladis Y.P. (2006) Evidence of negative energy balance using doubly labelled water in elite Kenyan endurance runners prior to competition. *Br.J.Nutr.*, 95 (1): 59-66.

- Fudge B.W., Easton C., Kingsmore D., Kiplamai F.K., Onywera V.O., Westerterp K.R., Kayser B., Noakes T.D., and Pitsiladis Y.P. (2008) Elite Kenyan endurance runners are hydrated day-to-day with ad libitum fluid intake. *Med. Sci.Sports Exerc.*, 40 (6): 1171-1179.
- Gómez-Gallego F., Santiago C., Gonzalez-Freire M., Muniesa C.A., Fernandez Del Valle M., Pérez M., Foster C., and Lucia A. (2009) Endurance performance : genes or gene combinations? *Int.J.Sports Med.*30 (1): 66-72.
- Harley Y.X., Kohn T.A., St Clair Gibson A., Noakes T.D., and Collins M. (2009) Skeletal muscle monocarboxylate transporter content is not different between black and white runners. *Eur.J.Appl.Physiol.*, 105 (4): 623-632.
- Iaaf.org . Home of World Athletics. Top list in 2011 marathon men updated as at : 23/09/2011., <http://www.iaaf.org>
- Kohn T.A., Essén-Gustavsson B., and Myburgh K.H. (2007) Do skeletal muscle phenotypic characteristics of Xhosa and Caucasian endurance runners differ when matched for training and racing distances? *J.Appl.Physiol.*, 103 (3): 932-940.
- 熊本和正, 佐川和則 (2006) エリートランナーの全身持久能力を測定するためのトレッドミルを用いた ramp 負荷プロトコル. 近畿大学健康スポーツ教育センター研究紀要, 5 (1): 67-75.
- Larsen H.B. (2003) Kenyan dominance in distance running. *Comp Biochem Physiol.A.Mol Integr.Physiol.*, 136 (1): 161-170.
- Larsen H.B., Christensen D.L., Nolan T., and Søndergaard H. (2004) Body dimensions, exercise capacity and physical activity level of adolescent Nandi boys in western Kenya. *Ann. Hum.Biol.*, 31 (2): 159-173.
- Lucia A., Esteve-Lanao J., Oliván J., Gómez-Gallego F., San Juan A.F., Santiago C., Pérez M., Chamorro-Viña C., and Foster C. (2006) Physiological characteristics of the best Eritrean runners-exceptional running economy. *Appl.Physiol. Nutr.Metab.*, 31 (5): 530-540.
- Prommer N., Thoma S., Quecke L., Gutekunst T., Völzke C., Wachsmuth N., Niess A.M., and Schmidt W. (2010) Total hemoglobin mass and blood volume of elite Kenyan runners. *Med.Sci. Sports Exerc.*, 42 (4): 791-7.
- MacArthur D.G., Seto J.T., Chan S., Quinlan K.G., Raftery J.M., Turner N., Nicholson M.D., Kee A.J., Hardeman E.C., Gunning P.W., Cooney G.J., Head S.I., Yang N., and North K.N. (2008) An Actn3 knockout mouse provides mechanistic insights into the association between alpha-actinin-3 deficiency and human athletic performance. *Hum.Mol.Genet.*, 17 (8): 1076-1086.
- Montgomery H.E., Marshall R., Hemingway H., Myerson S., Clarkson P., Dollery C., Hayward M., Holliman D.E., Jubbs M., World M., Thomas E.L., Brynes A.E., Saeed N., Barnard M., Bell J.D., Prasad K., Rayson M., Talmud P.J., and Humphries S.E. (1998) Human gene for physical performance. *Nature.*, 393 (6682): 221-222.
- Moran C.N., Scott R.A., Adams S.M., Warrington S.J., Jobling M.A., Wilson R.H., Goodwin W.H., Georgiades E., Wolde B., and Pitsiladis Y.P. (2004) Y chromosome haplogroups of elite Ethiopian endurance runners. *Hum. Genet.*, 115 (6): 492-497.
- Myerson S., Hemingway H., Budget R., Martin J., Humphries S., and Montgomery H. (1999) Human angiotensin I-converting enzyme gene and endurance performance. *J.Appl.Physiol.*, 1313-1316.
- Onywera V.O., Kiplamai F.K., Boit M.K., and Pitsiladis Y.P. (2004) Food and macronutrient intake of elite kenyan distance runners. *Int. J.Sport Nutr.Exerc.Metab.*, 14 (6): 709-719.
- Onywera V.O., Scott R.A., Boit M.K., and Pitsiladis Y.P. (2006) Demographic

東アフリカ人長距離ランナーはなぜ速いのか

- characteristics of elite Kenyan endurance runners. *J. Sports Sci.* 24 (4): 415-422.
- Pollock M.L. (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: Cardiorespiratory aspects. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 301 : 310-322.
- Rankinen T., Bray M.S., Hagberg J.M., Perusse L., Roth S.M., Wolfarth B., and Bouchard C. (2006) The human gene map for performance and health-related fitness phenotypes: the 2005 update. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 38 (11): 1863-1888.
- Saltin B., Larsen H., Terrados N., Bangsbo J., Bak T., Kim C.K., Svedenhag J., and Rolf C.J. (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 (4): 209-221.
- Saltin B., Kim C.K., Terrados N., Larsen H., Svedenhag J., and Rolf C.J. (1995b) Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners. *Scand.J.Med.Sci.Sports.* 5 (4): 222-30.
- Scott R.A., Georgiades E., Wilson R.H., Goodwin W.H., Wolde B., and Pitsiladis Y.P. (2003) Demographic characteristics of elite Ethiopian endurance runners. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 35 (10): 1727-1732.
- Scott R.A., Wilson R.H., Goodwin W.H., Moran C.N., Georgiades E., Wolde B., and Pitsiladis Y.P. (2005a) Mitochondrial DNA lineages of elite Ethiopian athletes. *Comp.Biochem.Physiol. B Biochem.Mol.Biol.*, 140 (3): 497-503.
- Scott R.A., Moran C., Wilson R.H., Onywera V., Boit M.K., Goodwin W.H., Gohlke P., Payne J., Montgomery H., and Pitsiladis Y.P. (2005b) No association between Angiotensin Converting Enzyme (ACE) gene variation and endurance athlete status in Kenyans. *Comp.Biochem.Physiol. A Mol.Integr.Physiol.* 141 (2): 169-75.
- Scott R.A., Fuku N., Onywera V.O., Boit M., Wilson R.H., Tanaka M., H Goodwin W., and Pitsiladis Y.P. (2009) Mitochondrial haplogroups associated with elite Kenyan athlete status. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 41 (1): 123-128.
- Scott R.A., Irving R., Irwin L., Morrison E., Charlton V., Austin K., Tladi D., Deason M., Headley S.A., Kolkhorst F.W., Yang N., North K., and Pitsiladis Y.P. (2010) ACTN3 and ACE genotypes in elite Jamaican and US sprinters. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 42 (1): 107-112.
- 篠田謙一 (2007) 日本人になった祖先たち DNA から解明するその多角的構造. NHK ブック [1078] : 東京, pp.187-201.
- Sójdin B., Svedenhag J. (1985) Applied physiology of marathon running. *Sports Med.*, 2 (2): 83-99.
- 田中雅嗣 (2011) 人類の遺伝的多様性と運動能力. *体育の科学*, 61 (5): 351-356.
- Weston A.R., Karamizrak O., Smith A., Noakes T.D., and Myburgh K.H. (1999) African runners exhibit greater fatigue resistance, lower lactate accumulation, and higher oxidative enzyme activity. *J.Appl.Physiol.*, 86 (3): 915-923.
- Weston A.R., Mbambo Z., and Myburgh K.H. (2000) Running economy of African and Caucasian distance runners. *Med.Sci.Sports Exerc.*, 32 (6): 1130-1134.
- Yang N., MacArthur D.G., Gulbin J.P., Hahn A.G., Beggs A.H., Easteal S., and North K. (2003) ACTN3 genotype is associated with human elite athletic performance. *Am.J.Hum.Genet.*, 73 (3): 627-631.
- Yang N., MacArthur D.G., Wolde B., Onywera V.O., Boit M.K., Lau S.Y., Wilson R.H., Scott R.A., Pitsiladis Y.P., and North K. (2007)

The ACTN3 R577X polymorphism in East and West African athletes. *Med.Sci.Sports Exerc.*,39 (11): 1985-1988.

Zhu X., McKenzie C.A., Forrester T., Nickerson D.A., Broeckel U., Schunkert H., Doering A., Jacob H.J., Cooper R.S., and Rieder M.J. (2000) Localization of a small genomic region associated with elevated ACE. *Am.J.Hum. Genet.*, 67 (5): 1144-1153.

平成 23 年 9 月 16 日受付

平成 23 年 12 月 21 日受理