

令和元年6月19日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K01551

研究課題名(和文) ランニングエコノミーを用いた中・長距離走における評価・診断法の開発

研究課題名(英文) Development of diagnostic assessment system in terms of running economy for middle and long distance runners

研究代表者

榎本 靖士 (Enomoto, Yasushi)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：90379058

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高強度ランニングにおけるランニングエコノミーを、酸素摂取量、呼吸交換比、運動後の血中乳酸値を用いてエネルギーコストを算出して評価できることを確認した。1つの慣性センサーをランナーの腰部に装着し、身体重心の動きを評価できることを確認し、さらに身体重心の動きとランニングエコノミーとの関係から身体重心の上下動がエコノミーに大きく影響することを明らかにした。またそれには支持期における下肢の膝関節伸展動作および伸展筋群の働きが関係していることが明らかになった。とくに膝関節最大屈曲時の姿勢とタイミングが重要であることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際的にランニングエコノミーに関する研究は急激に増大していた。一方、国内では研究はわずかであり、とくにバイオメカニクス研究はほとんどない。小型慣性センサーはここ数年で急激に普及しており、これを用いたランニング動作の評価は今後さらに発展することが期待される。一方、ランナーや指導者においてランニングエコノミーや動作に関する興味はあるものの正しい知識は乏しい。今回の研究は応用可能な成果を提供しており、科学的知識のみならず、応用した実践が普及することも期待できる。

研究成果の概要(英文)：It is clarified that energy cost calculated by oxygen consumption, respiratory ratio, and blood lactate is useful to evaluate running economy in high intensity running for distance runners. It might be enough to measure the movement of center of mass by an inertia sensor on the sacrum for a runner, and there is a significant relationship between vertical movement of center of mass and energy cost. It is also suggested that energy cost is related to knee extension movement and muscle activity of knee extensors in support phase. It might be implied that timing and angle of maximum knee flexion would be significant point to improve running economy.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：ランニングエコノミー エネルギーコスト 慣性センサー バイオメカニクス 上下動 身体重心 ランニング動作

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年の日本中長距離走ではトラック競技ばかりでなくマラソンにおいても国際レベルのスピード化に対応できず、良い成績を残せないばかりか、日本記録をも更新できない状況が続いている。長距離走のパフォーマンスは、これまでの研究から最大酸素摂取量 (VO<sub>2</sub>max)、乳酸性閾値 (LT)、およびランニングエコノミー (RE) によって大部分を説明できることが示されている (Joyner, 1991)。近年の研究では、エリート選手は VO<sub>2</sub>max が大きく向上しなくても大きく記録を伸ばしていることから RE の重要性を指摘するものが増えてきている (McCann and Higginson, 2008)。国内のジュニア長距離選手は VO<sub>2</sub>max が高く RE が低い特徴があることがわかっており (杉田ら, 2013)、彼らがさらにパフォーマンスを高めるためには RE の向上が不可欠であると考えられる。国際的には RE に関する研究は数多く行われている。RE に影響を及ぼすバイオメカニクスの要因は、古くは Williams ら (1997) が多くのバイオメカニクスの変量と RE の関係を重回帰分析し、RE のばらつきの大部分をバイオメカニクスの変量によって説明できると述べている。近年では、Kram らが実験的に RE に影響を及ぼすバイオメカニクスの要因を検証している。彼らは、高圧ラバーで腰を上方へ持ち上げる装置で体重の (Grabowski and Kram, 2008)、腰を左右からばねで支えることで身体の左右方向のバランスの (Arellano and Kram, 2011)、足を前方に引き出すバネをつけて脚のスウィングの (Modica and Kram, 2005) RE への影響を見積もっている。しかしながら、彼らの研究ではランニングスピードが遅く、被験者の競技レベルも高くない。そして、あくまでも実験的にバイオメカニクスの要因と RE との関係を検討しており、トレーニングによる RE の向上を検討しているわけではない。研究代表者は、これまで長距離走のバイオメカニクスの研究を行っており、日本陸上競技連盟のプロジェクト「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」をリーダーとして 10 名の研究チームで学際的に実施した。その結果、日本人選手と比較したケニア人選手の特徴として、下腿が細く、かつ長いこと、ランニングエコノミーが高いことなどを確認したが、Saltin (2009) が報告しているように、下腿が細長いことそのものは脚のスウィングに有利に働かないことをスウィング中の慣性モーメントの変化を算出して明らかにした (横澤ら, 2008)。さらに大学において選手のコーチングも担当し、VO<sub>2</sub>max も含めて総合的に選手の評価・診断が行なえる状況にある。

### 2. 研究の目的

#### RE の評価方法の検討

トレッドミルにおいて多段階のセット走を行なわせ、そのときの酸素摂取量を測定し、走速度に対する酸素摂取量の関係を求める。これまでの RE の評価は、最大下のある走速度における酸素摂取量で評価されており、この方法では同一の走速度でなければ評価できなかった。そこで、VCO<sub>2</sub> も考慮してエネルギーコストに換算して評価する方法を検討した (Tanji et al., 2014)。

#### RE に影響を及ぼすバイオメカニクスの要因の検討

身体重心の動き、とくに体重支持が大きな影響を与えるであろうことは Kram らの一連の研究によって示唆されている。これらは、身体重心に関しては加速度計を腰に貼付することで、体重支持に関してはランニングの条件を変えて支持脚の筋群の筋活動を計測することで検討した。

### 3. 研究の方法

#### (1) 慣性センサーを用いた身体重心の動きの評価

13 名の学生長距離ランナーを被験者に、実験走路において 5 つの異なる走速度 (400m タイムが 76, 72, 68, 64, 60 秒に相当) で走らせ、3 次元動作キャプチャおよび地面反力計を用いて 1 サイクルのランニング動作の 3 次元のキネマティクスおよびキネティクスを算出するとともに、腰部に装着した慣性センサーを用いて身体の動きを計測した。

#### (2) 慣性センサーを用いた身体重心の評価とランニングエコノミーの関係

8 名の学生長距離ランナーを被験者にトレッドミルにおいて多段階のステージ走を行わせ、酸素摂取量の測定と同時に身体重心の動きを慣性センサーを用いて計測した。

#### (3) ランニングエコノミーの評価方法の検討

学生長距離ランナー 31 名を対象にトレッドミルにおける多段階での 3 分間ステージ走を行わせ、酸素摂取量および各ステージ走行終了後の血中乳酸濃度 (La) を測定した。乳酸性作業閾値 (LT) を超える強度におけるランニングエコノミー (RE) を評価するため走スピードの VO<sub>2</sub>、RER および La によって、以下の式を用いて 1 km 走行当たりのコスト (kcal/kg/km) として算出した (Tanji et al., 2017)。

RE [kcal/kg/km]

$$= (20202 \text{ J/O}_2\text{L} - (0.82 - \text{RER}) \times 100 \times 50 \text{ J/O}_2\text{L}) \times \text{VO}_2[\text{mL/kg/min}]/1000 \times \text{speed}[\text{km/h}] \times 60/1000 \times (1/4.182) + \text{La}[\text{mmol/L}] \times 3.0[\text{mL O}_2/\text{kg/mM}] \times (20202 \text{ J/O}_2\text{L} - (0.82 - \text{RER}) \times 100 \times 50 \text{ J/O}_2\text{L})/1000/3 \text{ min} \times \text{speed}[\text{km/h}] \times 60/1000 \times (1/4.182)$$

つまり、RER が 0.82 時のエネルギー等価量を 20202 J/O<sub>2</sub>L とし、RER が ±0.01 変化した時エネルギー等価量も ±50 J/O<sub>2</sub>L 変化させ、RER が 1.00 を超えた時のエネルギー等価量は 21102 J/O<sub>2</sub>L とした。エネルギー等価量に VO<sub>2</sub> を乗ずることによって、有酸素性エネルギー代謝を算出した。さらに La が 2.0 mmol/L を超えた時、安静時の La との差によって DLa を算出し、係

数 (3.0 mL O<sub>2</sub>/kg/mM) を乗じ、走行時間 (3 min) で除することによって無酸素性エネルギー代謝を算出した。そして、有酸素性エネルギー代謝と無酸素性エネルギー代謝を加算することによってそれぞれの走スピードにおける RE を算出した。

#### (4) ランニングエコノミーと身体重心に影響する要因の検討

12 名の中長距離ランナーを対象に、5 段階の傾斜で速度 13.5km/h でのトレッドミル走を行わせ、そのときの酸素摂取量、血中乳酸濃度、慣性センサーによる身体の動き、筋電図による下肢筋群の活動を計測した。筋電図はバイオメトリクス社製 (SX-230) を用いて、右脚の大腿直筋 (RF)、外側広筋 (VL)、大臀筋 (GM)、大腿二頭筋 (BF)、前脛骨筋 (TA)、腓腹筋 (GA)、ヒラメ筋 (SO) において計測した。RE は上述の方法によりエネルギーコストを算出した。

### 4. 研究成果

#### (1) 慣性センサーを用いた身体重心の動きの評価

身体重心の動きを、3 次元動作解析から算出した身体重心、慣性センサーに貼付したマーカー、慣性センサーデータから算出した動きを比較した結果、慣性センサーから算出した身体重心の動きは、上下動に関してはよく一致していたが、前後および左右方向に関しては相違がみられ、とくに左右方向は動作解析と慣性センサーでは相反した動きを示していた。しかし、前後方向および左右方向においても走スピードの増大につれて大きくなる傾向がみられ、今後の研究によって評価可能性が示された。

慣性センサーのジャイロスコプデータを用いて腰の回転との関係も検討した。回転の動きはよく一致しており、左右の脚のスウィングに関しても慣性センサーを用いて評価できる可能性が示唆された。

#### (2) 慣性センサーを用いた身体重心の評価とランニングエコノミーの関係

慣性センサーから算出された身体重心の上下動、左右動、前後動 (一定スピードで走っているとした時の前後への移動距離) と酸素摂取量 (ランニングエコノミー) との関係を検討した。その結果、上下動とランニングエコノミー (RE) との間には高い相関関係が認められたが、左右動と前後動の間には有意な関係はみられなかった。しかし、上下動は走スピードとの関係が強く、酸素摂取量も同様に関係が強いため、走スピードを媒介変数としている可能性が考えられるが、左右動や前後動は走スピードとの関係はむしろ負の関係を示していた。そこで、これらの 3 方向への動きを総力積 (TI) としてみると、RE との間に強い相関関係が認められた。すなわち、左右動および前後動にも走技術が反映されている可能性が示唆された。

#### (3) ランニングエコノミーの評価方法の検討

乳酸性閾値 (LT) 以上の走スピードにおけるランニングエコノミー (RE) を評価するため、エネルギー量に換算して RE を評価した。その結果、5000m よりも 1500m 記録において RE との関係が強くなる傾向が認められた。さらに、LT 以下における RE ではみられなかったランニングにおける接地時間との間に、LT 以上の走スピードにおいて RE との相関関係がみられた。以上の結果は、高強度における走スピードにおいてエネルギー量に換算した RE を用いた評価が役立つことを示していると考えられる。

#### (4) ランニングエコノミーと身体重心に影響する要因の検討

傾斜を変えたトレッドミルランニングにおいて RE と下肢筋群の働きを検討した。その結果、上りのランニングにおいて下肢筋群の活動が大きくなることが確認されたが、酸素摂取の増大に伴っては、足関節伸展筋群 (腓腹筋、ヒラメ筋) および膝関節伸展筋群 (大腿直筋、外側広筋) が関係しており、支持期における膝関節の動作範囲および足関節の伸展角速度においてその動作の特徴がみられた。すなわち、膝関節と足関節の屈曲および伸展のタイミングや身体重心が最も低くなる姿勢においてランニングエコノミーの良し悪しが現われる可能性が示唆された。

本研究では、慣性センサーを用いてランニングエコノミーに影響するランニング動作を評価する方法を検討した。その結果、慣性センサーを用いることで、LT 以上における走スピードにおいて、さらに陸上競技トラックや道路におけるランニング動作も評価可能であることを示すことができた。ランニングエコノミーに影響する要因は個人差があるものの、さまざまな評価を繰り返すことで、個人のランニング動作の改善と RE の改善を評価することができると考えられ、実践的に役立つ知見を提供することができた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

Enomoto Y, Ali MJ, Aibara T, Nabekura Y: Changes in Running Speed and Step Variables Measured by Inertial Sensors during Marathon. Proceedings of 36th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, 36, 269-272, 2018-9. (査読有)

Enomoto Y, Aibara T, Sugimoto K, Seki K, Yokozawa T, Murata M: ESTIMATION OF THE CENTER OF MASS AND PELVIS MOVEMENT IN RUNNING USING AN INERTIA SENSOR MOUNTED ON SACRUM. 35th International Conference of Biomechanics in

Sports Proceedings 35-1, 500-503. 2017-6. (査読有)

Seki K, Sugimoto K, Kyrolainen H, Enomoto Y. Effect of biomechanical factors on energy cost during running at varying inclines. 35th International Conference of Biomechanics in Sports Proceedings 35-1, 1100-1103. 2017-6. (査読有)

丹治史弥、榎本靖士、鍋倉賢治：中長距離ランナーにおける高強度走行中のステップ変数と走の経済性. 体育学研究 62, 523-534. 2017. (査読有)

丹治史弥、関慶太郎、榎本靖士：高強度走行中のランニングフォームと経済性. ランニング学研究、27、21 - 35. 2016. (査読有)

〔学会発表〕(計 6件)

Enomoto Y, Ali MJ, Aibara T, Nabekura Y: Changes in Running Speed and Step Variables Measured by Inertial Sensors during Marathon. Proceedings of 36th Conference of the International Society of Biomechanics in Sports, Auckland, New Zealand, 2018-9-10 to 14.

榎本靖士、相原岳浩、Muhammad Jafar Ali：慣性センサーを用いたマラソンにおけるランニング動作の評価. 第25回日本バイオメカニクス学会，東京，2018年9月4-6日.

Enomoto Y, Aibara T, Sugimoto K, Seki K, Yokozawa T, Murata M : ESTIMATION OF THE CENTER OF MASS AND PELVIS MOVEMENT IN RUNNING USING AN INERTIA SENSOR MOUNTED ON SACRUM. 35th International Conference of Biomechanics in Sports, Cologne, 2017-6.

Seki K, Sugimoto K, Kyrolainen H, Enomoto Y. Effect of biomechanical factors on energy cost during running at varying inclines. 35th International Conference of Biomechanics in Sports, Cologne. 2017-6.

榎本靖士、関慶太郎、大森由香子、相原岳浩、大谷勇治：長距離選手のトレッドミルランニングにおける身体動揺と酸素摂取量との関係. 第24回日本バイオメカニクス学会大会. 立命館大学. 2016.

大森由香子、榎本靖士、関慶太郎：大学女子中長距離走者におけるピッチと上下動がランニングエコノミーに及ぼす影響. 第67回日本体育学会大会. 大阪体育大学. 2016.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 1件)

名称：運動支援装置及び運動支援方法、運動支援プログラム

発明者：カシオ計算機株式会社、筑波大学

権利者：

種類：

番号：特願 2016-140876

出願年：2016

国内外の別：国内

取得状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：鍋倉賢治

ローマ字氏名：Nabekura Yoshiharu

所属研究機関名：筑波大学

部局名：体育系

職名：教授

研究者番号（8桁）：60237584

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：丹治史弥

ローマ字氏名：Tanji Fumiya

研究協力者氏名：関慶太郎

ローマ字氏名： Seki Keitaro

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。