

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 9 月 11 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K01554

研究課題名(和文) 長距離ランニング中のエネルギー供給系とスキル系の連関モデルの検討

研究課題名(英文) Investigation in linkage model between energy supply system and motor skill during long distance running

研究代表者

山崎 健 (YAMAZAKI, Ken)

新潟大学・人文社会・教育科学系・フェロー

研究者番号：50092739

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,600,000円

研究成果の概要(和文)：長距離ランニング中にランニングスキルは変容する。これは疲労の進行だけではなくエネルギー供給系の減少に対応した適応制御と考えることができる。本研究では、10回反復される1000mペースランニングをモデルに、この問題を検討した。

1000m走の反復に伴い、動作解析では、疾走速度とピッチとの相関が高まる傾向がみられた。しかし、この傾向は反復に伴い単純に増加するのではなく、セット毎に変動しており、被検者個人間でも個人内でも同様であった。

心拍数は、セットの進行に伴って継続的に増加したが、血中乳酸値は全体として上昇してゆくが、セット間で低下する例も見られた。

研究成果の概要(英文)：During long-distance running running skills change. This can be thought of not only to progress of fatigue but also as adaptive control to decrease of energy supply system. In this study, we investigated this problem using a 1000 m pace running which is repeated 10 times. With the repeats of 1000 m run, tended to increase correlation between running speed and pitch as a result of motion analysis. However, this tendency does not simply increase with repetition, but fluctuates from set to set, and it is the same for individual subjects as well as for individuals. Heart rate increased continuously as the set progressed, but blood lactate levels as a whole increased, but there were cases where the heart rate decreased between sets.

研究分野：運動生理学

キーワード：ランニングスキルの変容 適応制御 3×3システム

1. 研究当初の背景

猪飼 (1975) は、パフォーマンスのモデルとして $P=C \cdot E(M)$ を示し、サイバネティックスとしての制御系と意欲を含むエネルギー供給系との関係性を指摘した。

継続して反復される運動実施に伴い外的パフォーマンスが低下することは「疲労の発現」と解釈される。しかし、長距離走などの持続的運動の実施では、急速にパフォーマンスが低下することではなく、ある程度まで同一の疾走速度を維持している。

この際にレースの進捗に伴い疾走動作が変容することはよく知られている。山崎 (2011a、2011b、2015a、2015b) は、これらは「疲労の進行」と解釈すべきではなく、「エネルギー供給系の変容に応じた動作の適応制御」ではないかとの仮説から検討を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究は、この長距離ランニング中の疾走動作の変容が、実際のレース中及び実験条件下でどのように発現しているのか、またそのような動作変容をもたらす要因は何なのか、について適応制御という視点から検討しようとするものである。

ハルトマンら (2009) は「コーディネーション」にかかわる7つの概念を示したが、スポーツパフォーマンス全体にかかわるレベルでのエネルギー供給系の重要性は指摘されているものの動作系との直接的関連には言及していない。

ベルンシュタイン (2003) は、「彼は巧みに 10000 メートルを走り抜きました！」などという文中での巧みさや巧みという単語は誤用されている」と指摘しているが果たしてそうであろうか。例えばどのような単純な運動であれ、その発現にはスキルと戦略が関与しており、その運動経過を支えるエネルギー供給系が存在しているのではないか。

3. 研究の方法

本研究では、この仮説を検討するために、長距離ランニング中の疾走動作の解析を行い、疾走速度とストライド、疾走速度とピッチ、疾走速度と膝関節伸展速度等の継時的変容を検討した。また、長距離レースのシミュレーションモデルとして、反復される 1000 m ペース走を対象として、動作解析とともに、各セット終了直後の心拍数及び血中乳酸濃度の変化を検討し、ランニングスキル変容のトリガとなる運動生理学的指標を検討した。

4. 研究成果

山崎はこの間の研究で、長距離ランニング中の疾走動作の変容が、単なるエネルギー供給系の変動(減少)の結果として生じたものではなく、エネルギー供給系のモードに応じて最も効率的なランニングスキルに適応制御しているのではないかとの仮説から検討を加えてきた。実際、10000m レース中では、前半 2000m と後半 4800m 及び後半 8800m で、疾走スピードとストライド、疾走スピードとピッチとの相関係数をそれぞれで変化させ、8800m 地点では短距離スプリントと同様に膝関節伸展速度を減少(疾走速度との負相関)させ関節の固定傾向を強める(バネ係数を高める)例も見られた。

実際の競技場面では、その時点での適切なランニングスキルの発現とそれを支えるエネルギー供給系との「連関(Linkage)」が実現されない限り高水準のパフォーマンスを発揮し維持することはできない。

様々なレース状況に対応したランニングスキルは、エネルギー供給系が運動の継続的实施によって変動(減少)することから、全く同一の運動スキルに依存しては、最適なパフォーマンス発揮は実現できない。

山崎は、旧東欧圏のスポーツ科学の概念である「ダイナミックステレオタイプ：力動的常同性」について、外的内的条件変動に依りて無意識的に動作系を選択して適切に対応する運動習熟のモデルを示した（1986）。その後（2004）伊藤（1992）の「動作の熟練は、制御対象の動特性Gに対し小脳が 1/G の逆動特性補正（学習）を行うことによって実現される」との理論から図1のように修正した。

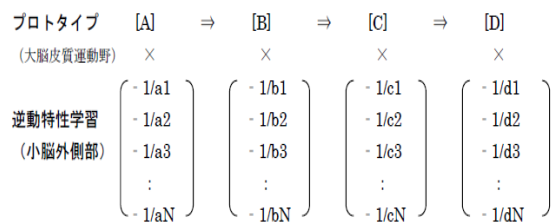


図1 ダイナミックステレオタイプのモデル：運動野でのプロトタイプを小脳が補正する、1~Nは補正制御対幅（運動学習により向上）

しかし、このモデルはあくまでも動作の習熟にかかわるものであってエネルギー供給系との関係は依然明確とはならないことから、1986年に示したスキル系（S）とエネルギー系の重回帰式モデル（ $P=S1 \times PCr + S2 \times Gly + S3 \times Mtc + b$ ）との関連から新たなマトリクスモデルを示した（図2：2011）。

$$Y = \begin{bmatrix} PCr0 \\ PCr1 \\ PCr2 \\ \vdots \\ PCrN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Gly0 \\ Gly1 \\ Gly2 \\ \vdots \\ GlyN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Mtc0 \\ Mtc1 \\ Mtc2 \\ \vdots \\ MtcN \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sm \alpha \\ Sm \beta \\ Sm \gamma \\ \vdots \\ Sm \omega \end{bmatrix}$$

図2 パフォーマンスのマトリクスモデル：PCrはクレアチンリン酸系、Glyは解糖系、Mtcは有酸素系のエネルギー生産系、Smはスキルモードでエネルギー供給系（例えばある時点ではPCr3+Gly2+Mtc1の供給モード）に応じてランニングスキルがダイナミックステレオタイプを介して変容する

八田（2009）は、速筋系線維で生成した乳酸が遅筋系線維でエネルギーとして再利用される「乳酸シャトル」の概念を示した。山崎（2015）は、この概念から3種類の筋線維と3種類のエネルギー供給系から構成される筋の「3×3システム」について、解剖学的な起始と停止は同一であることから、ある時点でのエネルギー供給系のモードに応じて運動のテンポや強度を変容させて適応制御しており、複雑な身体運動システムのモデルとして拮抗筋でのマルチレイアシステムの可能性を示した（図3）。

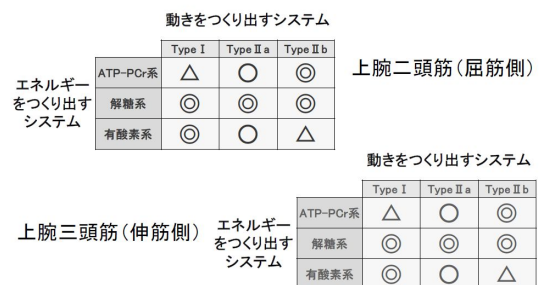


図3 3×3システムのマルチレイアモデル：肘関節の運動では拮抗筋が運動し、相対的に遅筋線維の多い上腕二頭筋と速筋線維の多い上腕三頭筋がエネルギー供給系のモードに応じてダイナミックステレオタイプを介して収縮様式を変容させ適応制御する

山崎は、これまでの先行研究において、実際の10000mレース中の動作解析と10回繰り返される1000mのインターバル走時の動作解析と心拍数、血中乳酸を検討し、いずれも後半に疾走スピードとピッチの相関が高くなる知見が得られているが、運動生理学的指標との明確な対応関係は得られていない。

柿田と八田（2015）は、自転車ロードレース中におけるペダリングケイデンスは乳酸性作業閾値（4ミリモル）に収斂する可能性を示唆したが、本研究でのインターバル走では、いずれも血中乳酸濃度が当初から8から16ミリモルと高く、また心拍数は漸増してゆ

くことから、乳酸性作業閾値をランニングスキル変容の指標とする仮説は検証できなかった。

現在、ランニング中の疾走動作の変容が「中枢性抑制の脱抑制現象」である可能性も検討している。図4は、猪飼と矢部（1971）の著名な筋活動の脱抑制現象（×は掛け声効果）を示しており、山崎らは筋電図の周波数解析において、張力低下時の高周波成分の減少と再発現（張力も回復）に脱抑制現象と見做せる知見（未発表）を得ている。

長距離選手は、レース中にその集団が同一の疾走リズムで推移した場合、突然のペースアップに対応できない例が多く見られる。これは、図3での3×3システムで、特定の筋線維群とエネルギー供給系のマトリクスに一定時間依存して動作を遂行していった場合、そこに「中枢性抑制」が生ずる可能性も考えられ、それを脱抑制するために疾走動作を変容させるとの仮説も検討している。

森谷（1995）は、自転車ペダリング運動時のデータから、最大酸素摂取量の70%の同一の運動でも、ペダルの回転数を1分80回にすると最大筋力の11%出力ですむのに対し、1分40回では17%に達し、回転数の多い方が相対的に動員される筋群が交代できる可能性があることを指摘した。このことは、1分80回転のペダリングはトルクが小さいため発揮張力のやや低い筋線維群も動員されるのに対し、40回転では特定の速筋線維群に限定されている可能性を指摘した。

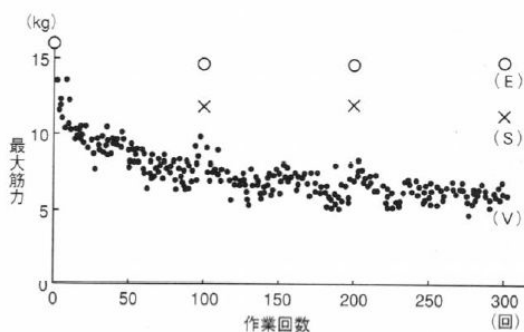


図4 筋活動の心理的境界と生理的境界

「運動習熟とエネルギー供給系」は、それぞれが個別に変容するのではなく、何らかの状況がその連関を「生起させる」ものと考えられる。本研究は、実際の長距離ランニング中のランニングスキル変容とそれに関連すると考えられる運動生理学的指標の関連について検討しようとする点で大きな独自性を持っている。

山崎は、長距離ランニング中のエネルギー供給系は継時的に変容（減少）すると考えられるが、レース中の疾走速度は維持されていることとの関連から、図2のパフォーマンスのマトリクスモデルを示し、疾走動作の変容が持つ適応制御としての意味を検討（2015a、2015b、2015c、2017）してきた。

山崎は、図2のパフォーマンスや図3の筋の3×3システムが、「動きを作り出すシステム」と「エネルギーを作り出すシステム」と連関して変容することについて長距離ランニングをモデルとして検討してきたが、これは伊藤（1992）も指摘する短距離スプリントを含む様々な距離でのランニングパフォーマンスにも関わるものと思われる。

本研究ではこれまで、長距離ランニング中の疾走動作の変容について適応制御の視点から検討を加えてきた。しかし、そのスキルモードの変容が「何を」トリガとして発現するのかは未だに明らかになっていない。その点で、心拍数や血中乳酸値、想定した速度との誤差情報のフィードバックや主観的運動強度（その疾走速度での継続の可否判断）などいくつかの運動生理学的指標との関連を検討することは「運動習熟とエネルギー供給系の連関モデル」解明の糸口となる事が今後期待される。

<引用文献>

1. N.A.ベルンシュタイン：工藤俊和訳、ディクステリリティ～巧みさの発達～、金子書房、2003年、pp.3-23

2. C.ハルトマン：ライブチヒスポーツ科学
交流協会誌、コーディネーション理論、
コーチングクリニック 23 巻4 号、2009
年、pp.48-52
3. 八田秀雄、乳酸と運動生理・生化学、市
村出版、2009 年、pp.60-77
4. 猪飼道夫、身体運動の生理学、杏林書院、
1975 年、pp.375
5. 伊藤章、陸上競技・短距離、体育の科学 第
55 巻第12 号、杏林書院、2005 年、
pp.947-952
6. 伊藤正男、熟練の脳内メカニズム、体力
科学、Vol.41(1)、1992 年、pp.1-7
7. 柿木克之・八田秀雄、自転車競技の現場
における技術としての選手強化支援手法
開発の試み、日本運動生理学会抄録集、
2015 年、pp.48
8. 定本朋子・宮下充正、骨格筋線維にみ
られる運動の効果、臨床成人病 17 巻5
号、1987 年、pp.811-817
9. 森谷敏夫、筋線維の動員特性と動作のテ
ンポ、体育の科学 第45 巻1 号、1995 年、
pp.18-24
10. 矢部京之助、人体筋出力の生理的限界と
心理的限界、杏林書院、1977 年、
pp.150-168
11. 山崎 健、スポーツの認識と習熟 (In 伊
藤・出原・上野編「スポーツの自由と現
代」)、青木書店、1986 年、pp.299-311
12. 山崎 健、エネルギー供給系と運動習熟の
連関、現代スポーツ研究 第12 号、2011
年、pp.54-60
13. 山崎 健、ランニングパフォーマンスを決
定するマトリクスモデルの検討、ランニ
ング学研究 第23巻1 号、2011 年、
pp.55-56
14. 山崎 健、運動処方とトレーニング(In 山
地・大築・田中編「スポーツ・運動生理
学概説」)、明和出版、2011 年、pp.180-181
15. 山崎 健、10000mレース中のランニング

動作変容に関するモデルの検討、ランニ
ング学研究 第26巻1 号、2015 年、
pp.78-79

16. 山崎 健、運動生理学の研究から見えてく
る身体運動システムの複雑さ、スポーツ
社会学研究 第23巻1 号、2015 年、
pp.35-46
17. 山崎 健、運動習熟とダイナミックステレ
オタイプの再考、陸上競技研究103 号、
2015 年、pp.2-11
18. 山崎 健、長距離ランニング中の疾走動作
の変容は何を意味するのか、ランニング
学研究 第28 巻1号、pp.77-79

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

山崎 健、長距離ランニング中の疾走動
作の変容は何を意味するのか、ランニ
ング学研究 第 29 巻 1 号、査読無、2015
年、pp.77-79

山崎 健、スポーツ科学研究の「これま
で」とこれから」、新潟体育学研究第 34
巻、査読無、2016 年、pp.115-117

山崎 健、運動習熟とダイナミックステ
レオタイプの再考、陸上競技研究 第 103
号、査読有、2015 年、pp.2-11

〔学会発表〕(計3件)

山崎 健、長距離ランニング中の疾走動
作の変容は「適応制御」なのか、ランニ
ング学会第 30 回大会、2018 年 3 月 31 日
(筑波大学)

山崎 健、長距離ランニング中の疾走動
作の変容は何を意味するのか、ランニ
ング学会第 29 回大会、2017 年 3 月 20 日(九
州共立大学)

山崎 健、運動習熟とダイナミックステ
レオタイプの再考、新日本スポーツ連盟
附属スポーツ科学研究所第 3 回研究集会、
2016 年 3 月 23 日(武蔵野美術大学新宿
サテライト)

〔その他〕

ホームページ

<http://aka.gmob.jp/yamakensensei/papers/>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

山崎 健 (YAMAZAKI , Ken)

新潟大学・人文社会・教育科学系・フェロ

—

研究者番号：50092739