

陸上競技の走種目における指導過程に関する研究

— 運動時のエネルギー代謝に着目して —

北岡 祐

1. はじめに

超高齢化社会を迎えるにあたり、健康寿命を伸ばすことへの関心が高まってきている。運動が私たちの健康を維持・増進する上で非常に重要なことは多くの疫学研究から明らかであり^[1,2]、保健体育の学習指導要領においても、生涯にわたって運動を継続することの重要性が強調されている^[3]。陸上競技の大きな特徴として、競争の楽しさだけでなく、記録という目に見える形で自身の成長を実感することができることが挙げられる。実際に、東京マラソン2018では参加資格を得るための抽選倍率が10倍を超えるなど、マラソンブームが社会的な現象となっている。一方で、特に長距離走は、競技の単調さやきつさといった要素によって体育の授業の中で生徒に好まれない種目となっていることも報告されている^[4]。本研究では、身体的な苦痛を最小限に抑えながら自己記録を向上させることの喜びや達成感を得るために、競技中のエネルギー代謝を中心とした科学的な背景を理解することを目的とした。走ることの意義や身体への効果を十分に理解することで、特に長距離走への苦手意識を改善することを目指したいと考えている。

2. 陸上競技とエネルギー供給系の概要

リレー競走と障害物競走を除くトラック競技には100mから10000mまで様々な距離の種目

が存在する。その中で、100m, 200m, 400mの短距離種目はスターティングブロックを使ったクラウチングスタートで行われ、800m以上の中長種目ではスタンディングスタートで競技が行われる^[5]。一般的に800mと1500mは中距離種目とされ、トラック種目全体で短・中・長距離の3つに分類されることが多い。図1は、現時点（2017年9月）の男子の世界記録における各競技中の平均速度をプロットしたものである。競技中の平均速度は3つのコンポーネントに分かれることがわかるが、なぜだろうか。私たちは、アデノシン三リン酸（ATP）をアデノシン二リン酸（ADP）とリン酸（P）に分解する際に発生するエネルギーを用いて運動を行っている。ただし、ATP自体は体内にごく少量しか貯蔵されていないため、運動を行うためにはすぐにATPを再合成する必要がある。そのATP再合成のシステムが3つ存在することから、図1では3つのコンポーネントが現れていると考えることができる。3つのシステム

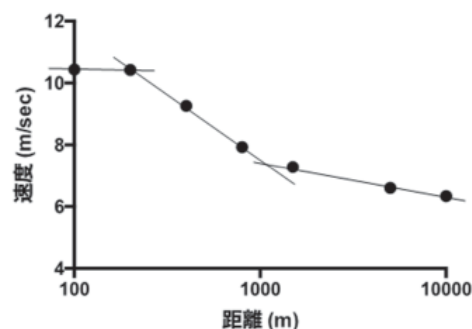


図 1

は、ATP-PCr系、解糖系、酸化系と呼ばれ、それぞれ異なる特徴を持っている。ATP-PCr系と解糖系は酸素を必要としない (anaerobic) プロセスであり、細胞質に存在する。一方で酸化系は酸素を必要とする (aerobic) プロセスであり、体内の発電所と呼ばれるミトコンドリアという細胞内小器官に存在することが知られている。

3. 短距離走と無酸素運動

ATP-PCr系は3つのシステムの中で、最もエネルギーの供給スピードが速いことが特徴である。体内に貯蔵されたATPを分解してエネルギーを得ること (ATP → ADP + P) に加えて、クレアチンリン酸 (PCr) を分解することによってATPを素早く再合成する (PCr + ADP → Cr + ATP)。しかしながら、ATPと同様にPCrの貯蔵量も、全て使い果たしたとしても数秒間の運動しか継続できないほど非常に限られている。したがって、いかに優れたアスリートであっても、最も距離の短い100m走においても後半には必ず失速する。「頑張る」ことによって解決されることのない、科学的な背景を理解させることで、無駄のない効率の良いスタート動作を身につけること、そして学習指導要領に書かれた「滑らかな動き」の重要性の説明に説得力を持たせることができると考えられる。前述の3つのエネルギー供給系のうち、短距離種目では酸素を利用しないプロセスがメインとして働くことから、これまで無酸素運動という言葉が用いられてきた。しかし、体内が無酸素状態になる、あるいは短距離種目は息を止めて走る、というような誤解を生んできた^[6]。酸素を利用しないプロセスが進むのはエネルギーの供給スピードが速いという利点のためであり、体内の酸素状態とは関係ない。実際に、十分に酸素が存在する状況であっても、解糖系が亢進することが実験的にも示されている^[7]。また、100m走においても少なく見積もっても10%以

上は酸素を必要とする酸化系のプロセスによってエネルギーが供給されるし、体内に貯蔵されたATPやPCrのほとんどは酸化系によって合成されたものである。したがって、陸上競技の指導において無酸素運動という言葉は使用しない方が望ましい、と現在では考えられている。

4. 中距離走と乳酸

アメリカやヨーロッパにおいて中距離走のレース観戦は非常に人気が高いが、日本では疲労物質である乳酸が溜まる、陸上競技の中でも特にきつい種目というややネガティブなイメージが存在する。乳酸は、体内に貯蔵されたエネルギー源であるグリコーゲンが解糖系のプロセスによって分解された際に産生される物質であり、酸化系のプロセスの基質にもなる物質である。意外に思われるかもしれないが、乳酸は生物にとってエネルギー源であると言える。ただし、解糖系の方が酸化系と比較してエネルギーの供給スピードが速いことから、強度の高い運動時には乳酸が体内で蓄積する。長い間、乳酸は疲労物質だと考えられてきたが、実際には、火事現場における消防車のような役割に近い。きつい運動時に乳酸が蓄積することは、乳酸がきつさの原因であることを意味するわけではない。実は乳酸は疲労を防ぐ役割を持つことが自然科学におけるトップジャーナルとして知られるサイエンス誌においても報告されており^[8]、相関関係は因果関係を説明しないことの一つの実例となっている。興味深いことに、マッカードル病という遺伝性筋疾患の患者は運動をするとすぐに疲労感や筋痛を感じるが、乳酸はまったく蓄積しない^[9]。また、ヒトの800m走を想定してサラブレッドを実験動物として用いて行った2分間の全力運動に関する研究においては、乳酸の蓄積のほとんどが運動開始から最初の1分間で起こることを報告している^[10]。これらの結果も、疲労と乳酸との関係を否定するものである。このような科学的知見の積み重ね

によって「乳酸は疲労物質である」という文章が、最新の保健体育の教科書からはようやく削除されているが、一般的には残念ながらまだまだ誤解されているのが現状である。陸上競技の授業後に実施するアンケートにおいても「乳酸が溜まって疲れた」というようなコメントが学生から寄せられることが多く、乳酸代謝の科学的な背景を説明すると大変に驚かれるのを毎年繰り返している。

5. 長距離走におけるペース設定

学習指導要領において、長距離走では、自己に適したペースを守り、一定の距離を走り通すことが重要であるとされている。なぜペースを守ることが重要なのだろうか。長距離種目においてはそのエネルギー供給のほとんどを酸化系に依存しているが、酸化系のシステムは急に供給量を変化させることができないため、走行中に速度を変化させる際には、解糖系が亢進する。つまり、ペースを上げ下げすることは余分に貴重なグリコーゲンを分解してしまうことにつながるため、より良いタイムで一定の距離を走るためにはできるだけ一定のペースで走行することが望ましい。長距離走の授業における苦しさやきつきの少なくとも一部は、オーバーペースあるいはペースの不安定さが原因である。実際に、長距離走の授業における適切なペースを維持する学習の効果が報告されている^[11]。ペースの設定方法としては、心拍数の測定を行うことによって自身にとって最適なペースを学ばせることが非常に重要であると考えられる。また、試合の数日前から糖質を多く摂取するグリコーゲンローディングという手法が様々なスポーツの現場で用いられていることからわかるように、体内のグリコーゲン量は日々の食事内容によって大きく変動することが知られている^[12]。特に長距離走の授業においては、スポーツ栄養学的な知識も身につけさせることが必要であると思われる。神奈川大学人間科学部では、必修

の「健康科学とスポーツ」の授業において、走行速度と心拍数の変化に関する実習や、健康度測定として普段の食生活に関する栄養アンケートなどを実施している。

6. 長距離走におけるインターバルトレーニング

長距離走において、より良い記録を目指す上での適切なペースを維持する技能の重要性から、授業内容はこのようなペースコントロールに関する学習が中心となる場合が多い。しかしながら、長距離走当日において記録を求めると、記録向上を目指す練習法とが混同されないよう注意が必要である。近年の研究によって、一定ペースで長時間行うトレーニングよりも、短時間で行う高強度間欠の運動の方が効率的に運動パフォーマンス向上をもたらすことが明らかとなってきている^[13]。1952年のヘルシンキオリンピックで長距離三冠に輝いたザトベック選手が取り組んだことで有名な、インターバルトレーニングの科学的な背景が解き明かされつつあるのである。つまり、身体の適応をもたらすトレーニング効果を得るためには、ペースを急激に変化させることが刺激となる一方で、長距離走当日に良い記録を出すためにはなるべく一定のペースを維持することが重要となる、という2つの異なる視点を持つことが重要である。スポーツ科学の発展により効率的に記録を向上させるための方法が次々と考案されている中で^[14]、イーブンペースのみの学習では不十分だと考えられる。また、一定ペースでの長距離走では、長距離走の苦手な学習者はどうしてもより長時間にわたって走ることになり、身体的な苦痛だけでなく精神的な苦痛を受ける可能性がこれまで指摘されてきていることから^[4, 15]、他の練習法も授業の中で体験することが大切であると考えられる。短時間で高強度の練習を好むか、長時間で低強度の練習を好むかは個人差があり、運動を継続するために

は自分に合った練習方法を知ることも重要である。

7. 長距離走における競争

ここまで、記録の向上が楽しさや喜びをもたらすという観点から、そのための科学的な背景について議論を進めてきた。しかしながら、自分に適したペースの設定と維持を学ぶ長距離走の授業においては、個人で取り組む時間がどうしても長くなってしまいう傾向がある。一方で、学習指導要領では、記録の向上だけではなく、「競争」の楽しさや喜びを味わうことが目的として挙げられている。勝負にこだわるオリンピックにおける中長距離種目の優勝タイムが世界記録と比べてずいぶん遅い記録であることは珍しくなく、競技中の駆け引きは陸上競技の大きな魅力の1つであると言える（セパレートレーンを走行する短距離種目では駆け引きの要素は小さい）。実際に、高等学校学習指導要領においては「ペースの変化に対応するなどして走ることもねらいとして挙げられている^[16]。そこで、長距離走において追い越しを制限する「制限区間」を設定することで競技中の駆け引きを強調する指導過程が考案されている^[17]。このような手法を用いることで、単調さという長距離走のネガティブなイメージを覆すこともできる。さらに、前述のインターバルトレーニングに近い形でペース変化に対応するための優れた練習法にもなり、結果として運動中に起こる過剰なグリコーゲン分解を抑制する身体の適応を引き起こすことができる。つまり、長距離走における競争相手との駆け引きを主題化した学習指導過程は、結果として自身の記録向上にもつながるものであると言える。

【参考文献】

1. Chakravarty EF, Hubert HB, Lingala VB, Fries JF. Reduced disability and mortality among aging runners: a 21-year longitudinal study. *Arch Intern Med.* 168, 1638–1164, 2008.
2. Woodcock J, Franco OH, Orsini N, Roberts I. Non-vigorous physical activity and all-cause mortality: systematic review and meta-analysis of cohort studies. *Int J Epidemiol.* 40:121-138, 2011
3. 文部科学省, 中学校学習指導要領解説 保健体育編, 2008.
4. 中村 昌平. 長距離走の嫌いな生徒の意識と実践. *体育の科学.* 33, 207-211, 1983.
5. International Association of Athletics Federations, IAAF Competition Rules, 2016-2017.
6. 八田 秀雄 . 乳酸サイエンス —エネルギー代謝と運動生理学—. 市村出版, 2017.
7. Richardson RS, Noyszewski EA, Leigh JS, Wagner PD. Lactate efflux from exercising human skeletal muscle: role of intracellular PO₂. *J Appl Physiol.* 85:627-634, 1998.
8. Allen D, Westerblad H. Lactic acid--the latest performance-enhancing drug. *Science.* 305:1112-1113, 2004.
9. Kitaoka Y, Ogborn DI, Mocellin NJ, Schlattner U, Tarnopolsky MA. Monocarboxylate transporters and mitochondrial creatine kinase protein content in McArdle disease. *Mol Genet Metab.* 108:259-262, 2013.
10. Kitaoka Y, Endo Y, Mukai K, Aida H, Hiraga A, Hatta H. Muscle glycogen breakdown and lactate metabolism during intensive exercise in Thoroughbred horses.

- J Phys Fitness Sports Med. 3: 451-456, 2014.
11. 小磯 透, 小山 浩. 中学校長距離走授業におけるイーブンペース走学習の成果. 発育発達研究. 55, 11-22, 2012
 12. 寺田 新, 稲井 真. 運動後の栄養補給法に関する最近の知見. 臨床スポーツ医学. 33, 1144-1149, 2016.
 13. Gibala MJ, Little JP, van Essen M, Wilkin GP, Burgomaster KA, Safdar A, Raha S, Tarnopolsky MA. Short-term sprint interval versus traditional endurance training: similar initial adaptations in human skeletal muscle and exercise performance. J Physiol. 575:901-911, 2006.
 14. 北岡 祐. 持久的トレーニングの科学. 体育の科学. 64, 721-726, 2014.
 15. 岩田 靖. 体育の教材を創る: 運動の面白さに誘い込む授業づくりを求めて. 大修館書店, 2012
 16. 文部科学省, 高等学校学習指導要領解説 保健体育編・体育編, 2009.
 17. 高嶋 香苗, 渡辺 輝也, 周東 和好. 競走相手との駆け引きを学ぶ長距離走の新しい学習指導過程の提案. 体育学研究. 62, 49-70, 2017.