©NSCA JAPAN
Volume 26, Number 8, pages 2-11

特集 feature

マラソン競技の科学の発展と実践への応用・展望

山地 啓司, Ph.D.
富山大学名誉教授, 元 拓殖大学駅伝部監督

1. マラソン研究の萌芽と発展

1) マラソン研究の萌芽期

スポーツ科学は、テクノロジーの開発やスポーツの記録・勝敗・成績と密接な関係を保ちながら発展してきた。例えば、マラソンを科学するためには、運動のエネルギー測定のための運動機器や酸素(O_2)と二酸化炭素(CO_2)の分析機器が先に開発されていなければならない。前者の機器は、①踏み台、②自転車エルゴメーター、③トレッドミルなどで一定のテンポ、仕事、スピードが定量化できる物である。代謝量を測定するためには呼気ガス量測定器と、その中に含まれる相対的なO_2やCO_2濃度を定量化するガス分析器が必要である。それらの運動や測定の機器が開発されたのは20世紀に入ってからである。

世界で最初にスポーツ科学の扉を開いたのはイギリスのAV.Hillである。Hillは、スポーツ科学の基礎的原理・原則を構築し、未来の研究を視座した。例えば、自転車エルゴメーター駆動中の代謝量を測定し、運動に使われた全酸素量を酸素需要量(oxygen requirement)と名づけ、それは運動中に取り入れられる酸素摂取量(oxygen intake：$\dot{V}O_2$)と運動後に支払われる酸素負債量(oxygen debt：O_2 debt)によって構成されるとした。さらに、数分間しか続かないような激しい運動を最大作業と、また、その運動の$\dot{V}O_2$の最大値を最大酸素摂取量($\dot{V}O_2$max)と呼んだ(16)。その後、Robinsonら(34)は当時2マイルと5,000 mの世界記録保持者であったLashの$\dot{V}O_2$maxを測定し、5.35 ℓ /min(81.4 ml/kg/min)であることを報告し、現代の選手と比較する上で貴重な資料を提供した。

マラソンの距離が正式に42.195 kmと決まったのは1924年のパリ五輪からである。当時の長距離・マラソンはフィンランドの全盛時代で、著名な選手に5,000 mや10,000 mのPaavo Nurmi選手やVille Ritola選手、マラソンのHannes Kolehmaainen選手などがいた。彼らが用いていたトレーニングはファルトレク走と呼ばれ、平原や丘陵地帯を自由奔放にスピードに強弱をつけながら長時間走るものであった。第2次世界大戦後に開催されたヘルシンキ五輪では、当時人間機関車と呼ばれていたEmil Zatopek選手が五輪史上初めて5,000 m、10,000 m、マラソンの長距離3冠王に輝いた。彼が用いたトレーニングは、ファルトレク走をさらにスピードアップする、主にトラックを用いた短い距離(約400 ～ 600 m)をハイスピードとジョギングで10 ～ 30回繰り返して走るインターバル走であった。このトレーニング法は瞬く間に世界に広がり、インターバル走の全盛時代を築くこととなった。

インターバルトレーニングはその後マラソン科学の発展に大きく寄与した。その原因のひとつは、インターバルトレーニングの効果を理論的に解明しようと若いスポーツ研究者が多く誕生したこと、もうひとつは、スポーツ科学から生まれた理論から新トレーニング法を生むのではなく、選手の誰かが優れた記録を作るたびに“why”や“how”を追究する、いわゆる『記録や実践』が先行し、『研究』がその後を追

いかけて理論的に解明する後追いの構図を作り上げたことである。この構図は21世紀に入った今日も継続しているといえる。

2) マラソン研究の発展期

(1) マラソンを走るためのエネルギー発生過程

当時のインターバルトレーニングに関する科学的研究は、スウェーデンのÅstrand夫妻を中心としたスウェーデン体育大学の研究グループが先行していた。Noakes(31)は、Åstrandら(3)の研究データをわかりやすく図化**(図1a)**して説明している。この研究は、インターバル走の速く走る運動期とジョギングの休息期の比を1：2とし、運動期を10秒、30秒、60秒の3つの異なった時間行なった際の血中乳酸濃度(La)の違いを比較し、10秒と30秒のランニングでは回数が増えてもLaは上昇しないが、60秒の運動期では徐々に上昇する。すなわち、インターバルの運動期と休息期の時間が異なると体内で使われるエネルギー発生過程に違いが生じること、つまり10秒の運動期はATP-CP系のエネルギー発生過程が主であるのに対して、30～60秒は乳酸性エネルギー発生過程が主であることを明らかにした。この事実は**図1b**のグリコーゲンの低下からも推測される。したがって、30～60秒のインターバル走は筋の緩衝能を高め、低いpHでの運動を繰り返すことで解糖や酸化過程の能力を高める。さらに運動期を60秒より長くすると長距離・マラソントレーニングに効果的であることを示唆した**(図2)**。

エネルギー発生過程には、アネロビック(ATP-CP系と乳酸系)とエアロビック(酸化系)がある**(図3)**。アネロビックのATP-CP系は全力走では約8秒しか続かない。これを補うのが乳酸系である。エネルギー源のグリコーゲンが分解して焦性ブドウ酸になり、助酵素($NADH_2$)の働きによってエネルギーと乳酸が生成される。このとき発生したエネルギーはATPの再合成に使われるが、酸素が不足すると焦性ブドウ酸の再合成に寄与しない乳酸は筋や血液中に残される。乳酸の貯蓄量が限界になるとランニングスピードを落とさないとペースの維持が困難になる。したがって理論的には、乳酸が発現しないランニングスピード(乳酸性閾値(LT)以下のスピード：<vLT)が維持されなければならない。しかし、実際にはマラソンレース終盤にはvLTは低下(約5～10%)する。よって、マラソンを物理的イーブンペースで走り続けるためにはvLTに余裕をもったペースで走り始めなければならない。

vLTが低下する要因には、①レース終盤にみられる$\dot{V}O_2max$や%$\dot{V}O_2max$の低下、②熱放散や呼吸筋の活動水準

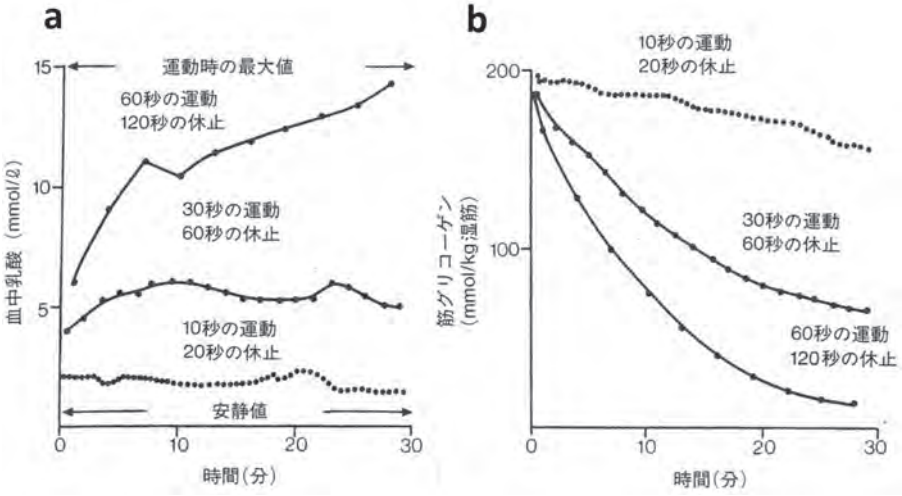

図1　インターバルトレーニング中の血中乳酸(a)と筋グリコーゲン(b)の濃度の経時的変動(31)

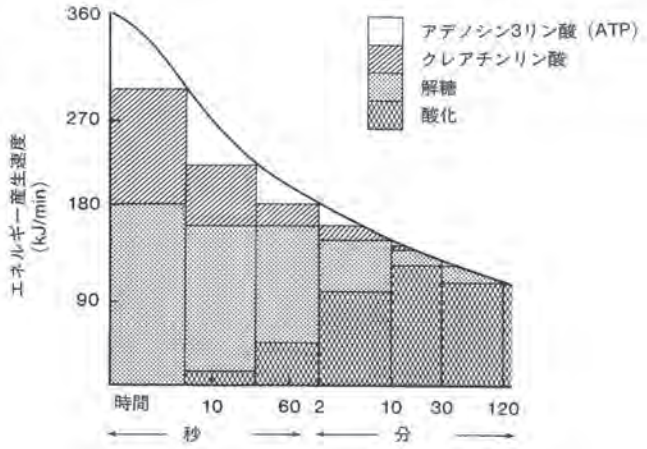

図2　持続時間が長くなるにつれて最大作業時のエネルギー代謝過程がアネロビック過程(ATP-CP系や解糖系)からエアロビック過程(酸化系)へ移行する。ただし、この図は単一の運動であるが、インターバルを繰り返すことでこの傾向はますます高まる(31)

の高まりによるランニングの経済性の低下(酸素消費量の増加)、③グリコーゲン貯蓄量の減少による脂肪代謝量の増加、④脚筋力の低下によるランニングの経済性の低下などが考えられる。トレーニングによってこれらの原因の改善を図らなければならないが、そのひとつの有力なトレーニング法がインターバルトレーニングである。

(2) マラソンレースのペースを決める乳酸性閾値(LT)

マラソンを走る際の持続可能なペース(ランニングスピード)はエアロビックのエネルギーを100%利用して走ることである。例えば、遅いスピードから走り始め徐々にスピードを高めていくと、エアロビック的エネルギー発生だけではスピードの維持ができなくなりアネロビック的エネルギーの発生が起こる。そのシンギュラポイント(変異点)をアネロビック閾値(anaerobic threshold：AT)と呼ぶ(43)。この測定方法には、換気量が急激に増加を始めるシンギュラポイントから求める換気性閾値(VT)と、乳酸が急激に出始めるシンギュラポイントから求める乳酸性閾値(LT)がある(18)。一般にLTを求める方法には作図法とコンピューター法があるが、いずれも再現性に問題があるため、乳酸が4 mmol/mlに達した点(onset of blood lactate accumulation：OBLA)を乳酸性閾値として代用することがある(22,51)。測定されたLTとVTのランニングスピードをvLTとvVTとして用いるが、両者の間にvLT≦vVTの傾向がある。マラソントレーニングやレースでは主にvLTがペースの指標として用いられる。

3) 日本のマラソンの科学の夜明け

我が国のスポーツ科学は1964年の東京五輪に備えて各スポーツ種目に科学委員会が設置され、指導者と協議しながら競技力向上に向けて種々の対策が講じられたことから始まった。加えて1968年のメキシコシティ五輪の高所での大会に備えて、引き続いて積極的に高所トレーニングに関する研究が行なわれた。当時の日本のスポーツ科学は五輪に勝つための競技力向上に焦点が絞られ、科学的研究と実践現場が同じ大きな目標に向かって歯車がかみ合った時代であった。その歯車が狂い始めたのは1970年以降である。それから半世紀を経た現在のマラソントレーニングは研究と実践(現場)との間に溝が開きつつある。

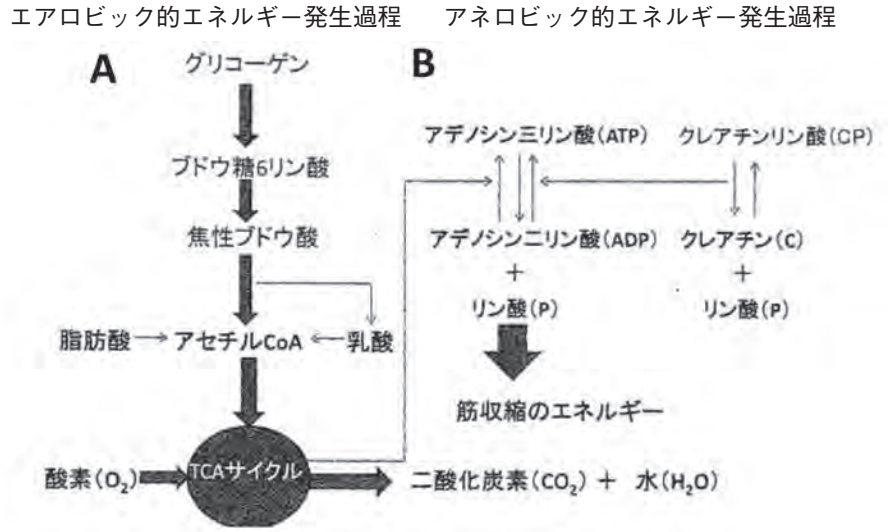

図3　エアロビック(A)とアネロビック(B)のエネルギー発生過程

2. マラソン科学の多様化

1960年のローマ五輪は長距離・マラソン界に2つの話題を投げかけた。1つは、ニュージーランドチームの快進撃である。ニュージランド・オークランドのArthur Lydiardコーチが主宰する小さなスポーツクラブに所属するPeter Snell選手が800 mと1,500 mで、またMurray Halberg選手が5,000 mでそれぞれ金メダルを、さらに最終日のマラソンでBarry Magee選手が銅メダルを獲得した。もう1つは、マラソンで全く無名であったエチオピアのAbebe Bikila選手が底知れない力を発揮して優勝し、そのレース後のインタビューで「エチオピアには私のような選手が大勢いる」と語ったことから、高所民族の中にはとんでもないスピードとスタミナを有する選手がいるという未知の国への期待をもたせたことである。この2つの出来事が将来のマラソン界を大きく変えることを、つまり前者はマラソンの大衆化の発展、後者は高所民族の大躍進を当時誰が予想したであろうか。

1) 大衆マラソンの発展

五輪後世界の指導者や選手たちはこぞってニュージーランドへ出向き、Lydiardコーチに教えを請うた。その中に米国のオレゴン大学コーチのBill Bowermanがいた。彼は早朝に競技者でもないジョガーやランナーが走っていることを知り、帰国すると早速YMCA(キリスト教青年会)を通じて全米に紹介・普及に尽力した。第2次世界大戦における戦勝国の米国は未曽

有の好景気に沸いていたときでもあり、過食と運動不足による高血圧や心臓病などの生活習慣病が国家的重要課題となっていた。J. F. Kennedy大統領が小冊子『The Soft American』(ひ弱なアメリカ人)を書き、同じ年に、Kraus&Raab(23) が『Hypokinetic Disease』(運動不足症)を出版したときでもあったから、“いつでも、どこでも、誰でも”できるジョギングやランニングは瞬く間に全米に広がった。それを後押ししたのが、Cooperの『Aerobics』(エアロビックス)(7)である。この本は世界50ヵ国以上で翻訳され世界的大ベストセラーとなり、ランニングブームの起爆剤となった。

1970年代に入ると、マラソンを走ってみたいというランナーの欲望を満たす受け皿として、ニューヨークシティ(1970)、シカゴ(1973)、ホノルル(1973)、パリ(1977)、ロンドン(1981)、ロッテルダム(1981)等々の、これまでのエリートマラソン大会と異なる大衆マラソン大会が世界中に誕生した。我が国では、村おこしや町おこしの一環として各地でマラソン大会が開催され、それに刺激されてエリートのマラソン大会として古くから開催されていた福岡、大阪、名古屋、東京などの大会も重い腰を上げて大衆マラソン大会へと変革した。

一般ランナーが増えることによって、ランナーのマラソンの目標も多様化し、例えば、①競技マラソン、②健康マラソン、③楽しみのマラソンに分かれ、さらに、走り始めて2～3年もすると目標が1つに限らず複合化した。また、マラソンに飽き足らないランナーは各種のウルトラマラソンやトレイルマラソン、あるいは、トライアスロンなどに挑戦するようになった。その結果、マラソン科学もそれぞれの目標に呼応する内容へと多様化せざるをえなくなった。

自動車のF1レースではいかに安全で、速く、効率的で快適に走るかの車の性能が競われる。そのために高額な開発費を投入して車の開発・改善に取り組んでいる。その過程で修得した知的財産や製造・整備に関連する技術は大衆車の開発にも役立っている。それと同じように、マラソンをより速く、より安全で、より経済的に走るための科学的追究は一流の選手だけでなく、一般ランナーのトレーニング方法や関連する機械・機器やグッズ、例えばシューズやウェア、モニタリング用のGPS(全地球測位システム)付きの心拍計など、またケガの予防やリハビリ用の医薬品などのハードおよびソフト両面の改革・開発に大きく貢献した。このことはまたマラソン科学の目標でもある、いかに安全で速くしかも経済的に走るか、の追究に貢献することになった。

2)高所民族の台頭

大衆マラソンは新たに4つの変革をもたらした。すなわち、①第4回ロンドン五輪(1908)で制定された「アマチュア規定」が1974年に五輪憲章から削除された。その主な要因はマラソン大会への選手招聘や謝金などに伴う金銭の授受がすでに既成の事実として慣習化されている実態にあった。さらに、1984年のロサンゼルス五輪以降の大都市の国際的マラソン大会では大々的に“賞金レース”と明記する大会まで現れ始めた。②国際陸連(IAAF)は、ランナーの無用な牽制をなくし安定したハイペースで走るためとして、2001年にはペースメーカーの規定を明文化して導入に踏み切った。③稼げるスポーツになったマラソンは高所民族の台頭を促す結果となった。特にケニアはマラソン選手育成に力を入れ、その効果が1994年ころから現れ始め、10年後にはエチオピアを凌ぐマラソン大国へと急成長した。また、④賞金レースの導入は一部のマラソンランナーをドーピングへと追いやった。マラソンランナーが使用する薬は造血作用を促進し持久性能力を高めるエリスロポエチン(EPO)関連の薬品である。ドーピングは“負の遺産”である。現在もなお多くの選手が摘発されているが、それは氷山の一角かもしれない。

3. マラソンの記録を決定する因子

1)マラソンのエネルギー出力の大きさ

$\dot{V}O_2max$は酸素運搬系である肺換気量、心拍出量、心臓の大きさや心拍数、肺拡散能や組織拡散能など、赤血球数やヘモグロビン・ミオグロビン量などと酸素消費系のミトコンドリアの容量と機能、酸化酵素、単位面積当たりの毛細血管の密度、活動筋の筋線維の種類とその分布の割合等々の中で最も機能的に低い器官によって決まる(46)。これらの酸素運搬系や消費系の容量や機能は7～10年以上にわたる厳しいトレーニングによって20～30%向上する。

個人の$\dot{V}O_2max$(ℓ/min)の絶対値は体重に比例することから、一般には体重1kg当たりの$\dot{V}O_2max$(ml/kg/min)の相対値が用いられる。国際的にみるとマラソンのトップランナーの$\dot{V}O_2max$は男子が75～85ml/kg/min、女子が65～75ml/kg/minである(ちなみに、日本人の$\dot{V}O_2max$の一般成人男子の平均値は40～45ml/kg/min、女子は35～40ml/kg/minである)。$\dot{V}O_2max$(ml/kg/min)の特性は、①トレーニングの内容や体調により5～8%変動する(20)、②専門的にト

レーニングを始めて7～10年でその伸びは定常状態に達し、35歳以降はトレーニングを継続して実施していても低下する(46)、③世界のトップ選手に限定すると$\dot{V}O_2$maxとマラソンの記録との間に有意な比例関係がみられない(39)、④マラソンレース後の$\dot{V}O_2$maxはレース前の値よりも低下している(11)。マラソン走行中の%$\dot{V}O_2$max(ml/kg/min)は、①高所民族のケニア人のトップランナーは最高80～90%であるが、それに比べると低所民族は75～85%と約5%低い。②これらの割合はvLTに近似することから、高所民族のランナーはハイペースのランニングが可能である。なぜなら彼らは、普段から低所民族に比べ約5%少ない酸素を呼吸しながら生活しトレーニングをしているので、低所でのレースでは普段より酸素濃度が約5%高い空気を呼吸して走っている。③マラソン走行中の%$\dot{V}O_2$maxは継続的にトレーニングを行なうことによって少しずつ改善し続けるが、35歳を過ぎると$\dot{V}O_2$maxの低下に伴ってその増加傾向はより高まる。いずれにしろ高所民族は高い%$\dot{V}O_2$max(ml/kg/min)を長く持続できる特性を有する。

2)ランニング(マラソン)の経済性

(1)ランニングの経済性とは

ランニングの経済性は、空気中の酸素を体内に取り込みミトコンドリア内に運ばれた酸素がグリコーゲンや脂肪を分解し、化学的エネルギーを発生させるまでの内因性と、ランニングの推進力を高める物理的エネルギーである外因性のエネルギーとの和と実際の仕事に要した全エネルギー量に対する割合によって決まる。一般に一定スピードにおけるエネルギー消費量($\dot{V}O_2$)が大きいと経済性が低く、小さいと経済性が高いと評価する。評価はマラソンの走行スピードに相当するLT点のランニングスピード(vLT)での$\dot{V}O_2$、あるいは、再現性の高い4mmol/ml(vOBLA)での$\dot{V}O_2$を測定するが、vLTとマラソンの記録の間に密接な関係があることから、vLTが一般に用いられる(41)。

(2)ランニングの経済性を左右する因子

$\dot{V}O_2$maxはトレーニングによって比較的短い期間で個人の限界に達するが、ランニングの経済性は長期間トレーニングを継続することによって改善する。経済性に関与する主な項目は次の点である。

①解剖的要因:年齢、性、身長や体重、脚の長さや太さ、体型と体組成、筋線維の特性

②生理学的要因:$\dot{V}O_2$maxや%$\dot{V}O_2$max、トレーニング、エネルギー源、体内の酸素運搬能力、w-upや当日の身体などのコンディション、サーカディアンリズム

③バイオメカニクス的要因:重心の上下動、ストライド長と頻度、地面反力(着地の際の緩衝能や反発力)、テーパリング、活動筋の疲労

④生化学的要因:赤血球やヘモグロビン・ミオグロビン、ミトコンドリアや酸化酵素、血中乳酸濃度

⑤環境的要因:気温、空気抵抗(風向・風力)、コース特性や走路の状態(雨天など)

⑥心理的要因:やる気や集中力、ペース調整への感性、単純な同じ動作の繰り返しに対する耐性、ライバルやペースメーカーの存在、応援効果

⑦その他:シューズ特性、衣類の体温の放熱性や保温性

このような多くの複合的な要因が身体的好・不調を決め、記録を変動させる。

4. マラソンレースにおける維持可能なペースから記録を推定する

Sjödin＆Svedenhag(39)は世界のエリートランナーに限定すると$\dot{V}O_2$maxとマラソンの記録の間に有意な関係が認められないと報告している。さらに、Daniels(9)やCostill＆Winrow(8)はほぼ同じ$\dot{V}O_2$maxを有するランナーのマラソンの記録の約10%の差がランニングの経済性の相違によるとみなしている。したがって、エリートランナーに限定するとマラソンの勝敗はランニングの経済性の影響を強く受けることになる。

これまで多くの研究者は、マラソンの記録がどこまで短縮できるかを予測している。その手法の多くは過去の記録の伸び率を直線的(44)や指数関数的(27)と考え統計的に推定したものである。唯一Joyner(21)は生理学的データを基に下記の推定式を考案した。

マラソンの平均スピード(Y:km/h)
＝$\dot{V}O_2$max(ml/kg/min)×%$\dot{V}O_2$max at LT×RE(km/h/$\dot{V}O_2$[ml/kg/min])

LT:乳酸性閾値、RE:ランニングの経済性、$\dot{V}O_2$:酸素摂取量である。

ただし、ランニングの経済性についてはConley＆Krahenbuhl(6)が算出した優・良・可の3つの直線式から求めた値を採用して、マラソンの記録を推定した(21)**(表)**。さらに、このデータがトレッドミル走で得られたものであることから、空気抵抗や疲労に伴うペースの低下などを考慮してペースが約10%低下すると仮定して算出している。

5. マラソンのトレーニング

生理学的にみると、マラソンのトレーニングは呼吸循環系トレーニング

と筋力系トレーニングに大別される。ここでは誌面の都合で前者の呼吸循環系の中の呼吸筋トレーニングと高所トレーニングについて述べる。

1)呼吸筋トレーニング

全身持久性の制限因子が古くから検討されてきた。例えばHill(16)は、運動強度を漸増的に高めていくと$\dot{V}O_2$や心拍出量($\dot{Q}$)に定常状態が現れてついには増加しなくなることから、酸素運搬系に制限因子があるとみなした。同じ酸素運搬系の中でも肺換気量($\dot{V}_E$)は$\dot{V}O_2$や$\dot{Q}$に定常状態が現れるころから逆に指数関数的に上昇することから、$\dot{V}_E$は制限因子ではないとみなした。その後約70年間にマラソンレース後呼吸機能が低下するなど多くの報告があったが、Hill(16)の見解を覆すまでには至らなかった。

1990年代に入るとAaronら(2)やJohnsonら(19)は、ランニングスピードを漸増的に高めていくとVTが現れるが、このときに呼吸筋で使われるエネルギー消費量は全エネルギーの約4%に過ぎないことを明らかにした。その後、$\dot{V}_E$は指数関数的に上昇し、$\dot{V}O_2$maxが出現するころには全エネルギー量の14～16%にも達する**(図4)**。さらに、$\dot{V}O_2$や$\dot{Q}$に定常状態が現れた以降に呼吸筋で使われる$\dot{V}O_2$や$\dot{Q}$がどこからくるのかを追究した結果、本来活動筋にいく血液やO_2は呼吸筋で先に使われ(盗血作用)、活動筋で使われる相対的な$\dot{V}O_2$が減少することを明らかにした。

(1)マラソンレースによる呼吸筋の疲労

マラソンレース後、努力性肺活量(FVC)はレース前に比べ約17%低下し(13)、1秒量(FEV_1)や2秒量(FEV_2)もそれぞれ26.7%と23.3%低下する(28)。これらは呼気筋が疲労していることを示し、残気量(RV)が増加する。この原因は、肺の気管支周辺の浮腫や末梢の細い気道の直径の縮小とみなされている。また、マラソンレース後に肺拡散能の低下も認められている(30)。これらの呼吸筋疲労はウルトラマラソンなどではより顕著になる(45,48)。これらの機能低下はマラソンレース時の呼吸効率($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)を低下させるために、呼吸筋で用いられるエネルギー量が多くなることが推測される。

(2)呼吸筋疲労や呼吸抵抗の増減がパフォーマンスに与える影響

運動前に呼吸筋を疲労させると、その後の持久性運動のパフォーマンスが低下する。例えば、Martinら(29)の実験では最大自発的換気量(MVV_{12})の2/3の強度で、休息(4分)を挟みながら断続的に15分間の呼吸を計150分間行なった後、自転車駆動の漸増的オールアウト運動を行なうと、駆動持続時間が7分34±24秒から6分31±25秒に低下した。この場合も呼吸効率の低下が推測される。

空気中の窒素ガス(N_2)とヘリウムガス(He)を入れ替えると呼吸抵抗が軽減する。21% O_2+79% Heの混合ガ

表　乳酸性閾値(LT)における$\dot{V}O_2$(ml/kg/min)と3つのランニングの経済性から推定したマラソンの記録(時間：分：秒)(21)

$\dot{V}O_2$ at LT, ml/kg/min	ランニングスピード(km/h)		
	低いRE	平均的RE	高いRE
52.5	14.40 (2：55：49)	15.18 (2：46：47)	16.42 (2：34：11)
56.0	15.28 (2：45：41)	16.10 (2：37：15)	17.35 (2：25：55)
57.8	15.74 (2：40：51)	16.56 (2：32：53)	17.84 (2：21：55)
59.5	16.16 (2：36：40)	17.00 (2：28：55)	18.29 (2：18：25)
61.6	16.70 (2：31：36)	17.56 (2：24：10)	18.85 (2：14：18)
63.0	17.05 (2：28：29)	17.93 (2：21：12)	19.23 (2：11：39)
65.5	17.68 (2：23：12)	18.58 (2：16：16)	19.89 (2：07：17)
67.2	18.11 (2：19：48)	19.03 (2：13：02)	20.35 (2：04：24)
71.4	19.17 (2：12：45)	20.13 (2：05：46)	21.46 (1：57：48)

Ⓒ National Strength and Conditioning Association Japan

スを呼吸しながら90～95％ $\dot{V}O_2max$ の強度で自転車駆動を行なうと、ノーマルの空気を呼吸する際と比較して持続時間が約40％延長する(1)。Harmsら(14)は、比例補助換気法(PAV)を用いて①呼吸抵抗を増やす場合、②呼吸抵抗を減らす場合、③コントロールの3つの異なった条件で漸増的自転車駆動を行なった際の、呼吸の仕事の増加に対する脚への血流量($\dot{Q}$)や$\dot{V}O_2$の応答を調べた。その結果、呼吸の仕事が高まるにつれ脚への$\dot{Q}$と$\dot{V}O_2$が減少することを明らかにした**(図5)**。

これらの一連の報告は呼吸効率を高めることが脚の$\dot{Q}$と$\dot{V}O_2$の低下を防ぐことを実証した。

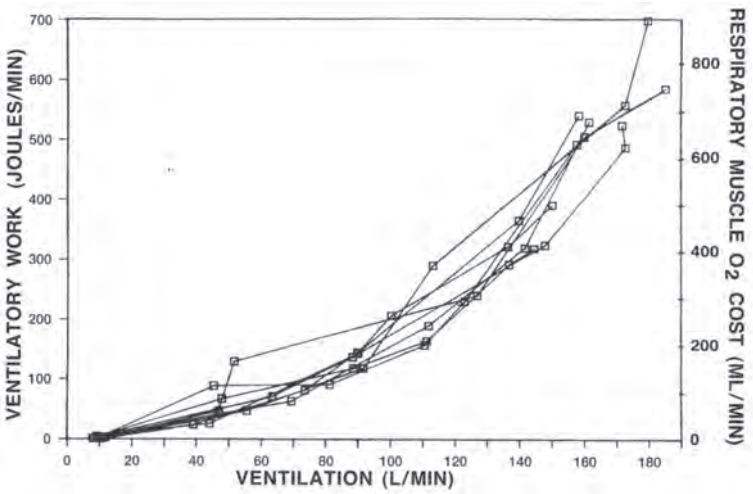

図4　肺換気量(L/min)と呼吸の仕事(joules/min)との関係。ただし、呼吸筋で消費した酸素摂取量(ML/MIN)はAaronら(2)の式(呼吸筋で使われる$\dot{V}O_2$[L/min]＝0.081＋0.001[運動中と安静時の呼吸の仕事との差])から求めた(19)。

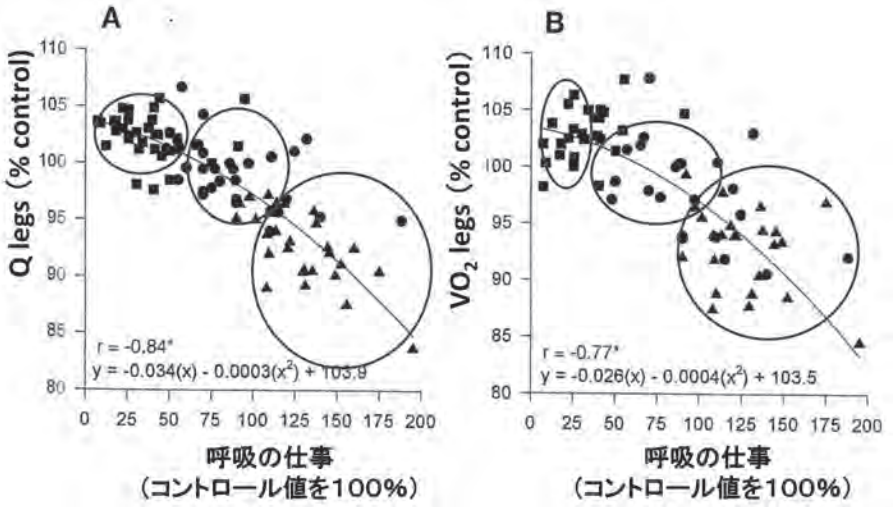

図5　比例補助換気法(PAV)を用いて呼吸抵抗を増加した場合(▲)、軽減した場合(■)、およびコントロール(●)にみられる脚筋への血流量($\dot{Q}$)(Aの図)と酸素摂取量($\dot{V}O_2$)(Bの図)の変動を、呼吸の仕事をコントロール値に対する割合で示したもの(14)。

(3)呼吸筋トレーニングの効果

マラソンなどの長丁場のレースでは、呼吸筋は疲労しパフォーマンスを低下させる(26,35)。現在我が国で一般に用いられている呼吸筋トレーニング用のデバイスはスパイロタイガー、パワーブリーズ、ウルトラブレス、医療用マスクやノーズクリップなどである。至適なトレーニング強度はデバイスの種類や競技水準などによって異なるので一線を画することは難しいが、これまでのトレーニング実験では70～90％ $\dot{V}O_2max$が望ましい(48)。例えば、Rossら(36)はマラソンランナーを対象にした場合75％で30分、Boussanaら(4)はトライアスロン選手を対象にした場合75％以上が望ましいとしている。呼吸筋トレーニングによって最大呼気・吸気口腔内圧(PEmax・PImax)や12秒間の最大自発的換気量(MVV_{12})などに有意な改善が認められる。

山地ら(48)のジョガーを対象にしたノーズクリップを用いた4週間の呼吸筋トレーニングでは、オールアウトに達するまでの持続時間が4.8％、vLTが13m/min(7.6％)有意に改善した。また、筆者たちが2018年度に実施した、箱根駅伝出場を狙う大学チームのトップ選手を対象にパワーブリーズを用いた8週間のトレーニングでは、MVV_{12}、PEmax、PImaxが有意に改善し、$\dot{V}O_2max$が出現した際のランニングスピード(v$\dot{V}O_2max$)における持続時間が約56秒有意に延長した(未発表データ)。

これまでの呼吸筋トレーニングに関する一連の報告から、①呼吸筋の疲労が全身持久力の制限因子のひとつである、②呼吸筋トレーニングがMVV_{12}、PEmax、PImaxを改善し、長距離・マラソンのパフォーマンス向上に貢献すると推測される。

2)高所トレーニング

(1)メキシコシティ五輪に備えた高所トレーニング

高所トレーニングに関する科学的研究が始まったのは1963年に次期五輪が2,300mの高所であるメキシコシティで開催されることが決まってからである。高所での五輪開催が決まったのは1955年にパンアメリカン大会がメキシコシティで開催され、陸上競技では投てき、跳躍、短距離で好成績を上げ、長距離で競技成績が低下する番狂わせが続出したものの、重大事故もなく盛況のうちに終わった実績があったからである。しかし、長丁場のマラソンに関するデータは皆無であった。そこで世界のスポーツ科学者が連携して自国で行なった研究成果を持ち寄って毎年のように研究報告会を開き、次の意見の一致をみた。①高所でレースが開催される際は高所でトレーニングすることが望ましい。しかし、低所民族が低所でのレースのために高所でトレーニングすることは、高強度の運動量が減少するため必ずしも記録向上に結び付くとは限らない(12)。②低所に比べ中・長距離種目の記録が低下するのは1,500m≦である(33)。③$\dot{V}O_2max$に顕著な低下が現れ始める標高は1,500m≦である(5)。④高所で大会が開催される際はほぼ同じ標高で最低2～3週間トレーニングしなければならない(10)。⑤$\dot{V}O_2max$の伸びは高所トレーニングによって約5週間までは定常状態であることから、5週間≦の滞在が望ましい(38)。⑥高所トレーニングの効果は下山後なくなるようにみえるが、その効果の一部が体内に何らかの変化を起こしている。そのため、次回の高所トレーニングの際に順化がスムーズになる。当時のソビエト連邦代表のZimkin博士はこれを“身体は高所を記憶する”と述べた(17)。

これらの情報を基に日本陸上競技連盟の強化選手は乗鞍、富士山、立山、霧ケ峰などの高所でトレーニングを行なった結果、メキシコシティ五輪では長距離・マラソンの種目で高所民族が活躍する中、日本の君原健二選手が銀メダルを獲得する偉業を成し遂げた。

(2)メキシコシティ五輪後の高所トレーニング

五輪後の世界のマラソントレーニングは、引き続き高所トレーニングを継続した国や選手と、中断した国に分かれた。日本のマラソン陣(寺沢徹選手や重松森雄選手など)は高所トレーニングを中断したものの、引き続いて世界のマラソンを牽引して世界記録を更新した。当時低所民族が高所トレーニングを敬遠した理由は、長距離種目では高所で高速のトレーニングを行なった際や長期滞在すると疲労の回復が遅れ、レースに求められるスピードのトレーニング量が不足して、低所に下山した直後に良い実績が残せないと判断したからである。そして、徐々に世界のマラソン界から日本選手が取り残されるようになった。

筆者がカナダに滞在しているとき(1987)、陸連の松井秀治科学委員長から「コロラド州のボルダーが高所トレーニングの基地として最適であるという話がある。帰国の途中ボルダーに寄ってその事実を確かめてほしい」という指示を受けた。当時コロラド大学で短距離と跳躍のコーチをしていた岡本英司氏の協力を得てコロラド大学を訪れた際、長距離種目のコーチは私に「ボルダー(標高約1,500m)は低所民族が低所と同じ感覚でハイペースのトレーニングができ、しかも高所トレーニングの効果も期待できる。もし、より高所でのトレーニングを希望するならば30分で標高約3,000mまで行くことも可能である」と、ボルダーが高所トレーニングの最適地であると熱ぽっく語った。帰国後、報告書を科学委員長に提出した。その数年後に小出義雄監督率いるマラソンチーム(有森裕子選手や高橋尚子選手など)がボルダーへ出かけるようになった。

低所民族が高所でインターバルのような高速のトレーニングをすると疲労の回復に遅滞が現れ、結果的に高強度のトレーニング不足を招く弱点があった。1991年、Levineら(24)はこの弱点を解決するために、高所(2,500m)に滞在して高速のトレーニングを1,250mの中高所まで下山して行なうLiving High-Training Low(LH-TL)式高所トレーニング法を提唱し、翌年にはLH-TL式高所トレーニングが5,000mの記録を約5%向上することを実証した(25)。

低所で行なわれる高所トレーニングの実験やトレーニングには減圧室が用いられていた。減圧室は、外圧に耐えうる強固な壁で囲まれていなければならないことから建築費が高く、しかも室内の空気を抜くのに30～60分の時間を要するなどの弱点があった。Rusko(37)はこの弱点を解消する常圧低酸素室を開発した。この開発によって、都会で居住しながら種々のタイプの高所トレーニング、すなわち、①LH-TL式、②Living Low-Training High(LL-TH)式、③Living High-Training High(LH-TH)式を可能にした。この低酸素室は常圧のためにビニールハウスのような簡易な構造でもよく、ランニングコストも安価であることなどから瞬く間に世界に広まった。

マラソンのような超長距離のトレー

ニングを行なうためには、自然の中で自由奔放な走りができることが身体的・精神的に望ましい。また、日本の長い夏の暑さの中では涼しい高所でのトレーニングは欠かせない。今日世界のマラソントップ選手の80～90%が高所トレーニングを経験している。特に現在、世界の男･女のマラソンをリードしているのは高所民族であることから、マラソンランナーにとって高所トレーニング抜きのトレーニングは考えられない時代になっている。

6. マラソン科学の近未来的展望

マラソン科学の目的は「いかに速く安全に、しかも経済的に走るか」である。しかし、安全性、すなわち、ケガをいかに防ぐかが軽視されがちである。

マラソンランナーがもつ潜在能力を100%開花させるためには、「個人が耐えうる最高の強度と距離を走ること」である。そのためにもケガは禁物である。ケガを完全になくすことはできないが最少にしなければならない。そのためにはランナーの体力や技術の発達に見合ったトレーニングの質・量でなければならない。近年の子どもは野山を駆け巡るほど環境や仲間に恵まれていない。遊びも室内遊びが多い。そのためケガをしやすい身体になっている。その一方で専門的トレーニング開始年齢が徐々に低年齢化している。基礎体力や基本的動きの技術が十分身に付いていないとケガをしやすい。症状がすぐに出なくても中・高校でケガの芽を育て、完成期を迎えた20歳以降に現れることがある。それを防ぐためには専門的トレーニングを始める前に筋力トレーニング(32)、コアトレーニング(49)、プライオメトリックトレーニング(SSC)(40)などで筋肉を正しい動きの中で強化しなければならない。特に筋力の弱い女子ランナーはコアトレーニングを十分すぎるほど行なう必要がある。

ケガの予防や早期発見のためには、毎日のトレーニング内容や記録をより客観的に(例えば、GPS付き心拍計などを用いて)記録し、さらに定期的(1回／2～4週)に心身の疲労度テスト、血液・尿検査などを行なう。また、1年に2回生理学的体力や動作分析の測定を行ない、これらの結果を総合的に評価・反省し、その結果を次期シーズンの記録やトレーニング目標・内容等に生かさなければならない。この一連の測定やテストをモニタリングトレーニングと呼び、世界のスポーツ界ではすでに10年ほど前から専門トレーナーが選手の安全と健康に細心の注意を払っている(42)。モニタリングトレーニングは選手を守り、生かし育てるために不可欠な時代になっている。なぜなら、優れた人材には限りがあるからである。

7. まとめにかえて

1991年カナダの医師Guyattは度重なる医療ミスや医療過誤を憂い、これからは“科学的根拠に基づく医療(Evidence Based Medicine: EBM)”を目指さなければならないと説いた。それを契機に世界の医療制度や医療の手法は科学的成果を積極的に応用する方向に転じた。この考えは今日の裁判やスポーツの在り方を変えた。

世界のスポーツ界は、スポーツ科学が進歩するにつれこれまでのような経験や勘だけでなく、可能な限り科学的根拠に基づいたトレーニング(Evidence Based Application: EVA)を追求している。現時点で、我が国で科学的根拠に基づいたマラソンのトレーニングが可能か否かを考えると、“No”と言わざるをえない。なぜなら、スポーツ科学は客観化(数量化)すること、さらに統計的処理が求められるからである。その結果、個人の特性は平均値の中に埋没する。トレーニングは個人の体力・技術に応じて行なうべきであることを考慮すると、マラソンの科学分野でも個人特性を重要視した事例研究が医学論文並みに重要視されなければならない。もうひとつは、個々人のモニタリングトレーニングを日常化し、集積・分類したデータをメタ解析・評価し、その結果がトレーニングの中で生かされなければならない。研究者は実験で得られた新しい知見をわかりやすく提供する義務がある。もちろん、不十分な部分は指導者の経験と感性に依存しなければならない。

これまでのマラソンの研究は主に“なぜ：Why”を追究してきたが、これからは“どのように：How”へ研究の重点を移行しながらその成果を実践の場へフィードバックしなければならない。◆

参考文献

1. Aaron, E. A., K. G. Henke, D. F. Pegelow, and J. A. Dempsey. Effects of mechanical unloading of the respiratory system on exercise and respiratory muscle endurance. *Med Sci Sports Exerc*. (Abstract) 17:290. 1985.
2. Aaron, E. A., K. C. Seow, B. D. Johnson., D. F. Pegelow, and J. A. Dempsey. The oxygen cost of exercise hyperpnea: implications for performance. *J Appl Physiol* 72:1818-1825.1992.
3. Åstrand, I., P-O. Åstrand, E. H. Christensen, and R. Hedman. Intermittent muscular work. *Acta Physiol Scand*. 48:448-453. 1960.
4. Boussana, A., O. Hue., S. Matecki, O. Galy, M. Bamonatxo, A. Varray, and D. L. Gallais. The effect of cycling followed by running on respiratory muscle performance in elite and competition triathletes. *Eur J Appl Physiol*. 87:441-447. 2002.
5. Buskirk, E., J. Kollias, E. Picon-Reátegui, et al. Physiology and performance of track athletes at various altitudes in the United States and Peru.

Symposium Proceedings Effects of Altitude on Physical Performance. Cicago, Athletic Institute. 1966.
6. Conley, D. L., and G. S. Krahenbuhl. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 12:357-360. 1980.
7. Cooper, K. H. *Aerobics*. New York. Bantam Books. 1968.
8. Costill, D. L., and E. Winrow. Maximal oxygen intake among marathon runners. *Arch Phys Med Rehab*. 51:317-320. 1970.
9. Daniels, J. T. A physiologist's view of running economy. *Med Sci Sports Exerc*. 17:332-338. 1985.
10. Dill, D.B. Physiological adjustments to altitude changes. *JAMA*. 205:747-753. 1968.
11. Dressendorfer, R. H. Acute reduction maximal oxygen uptake after long-distance running. *Int J Sports Med*. 12:30-33.1991.
12. Faulkner, J. A., J. Kollians, C. B. Favour, E. R. Buskirk, and B. Balke. Maximum aerobic capacity and running performance at altitude. *J Appl Physiol* 24:685-691. 1968.
13. Gordon, B., S. A. Levine, and A. Wilmaers. Observations on a group of marathon runners with special reference to the circulation. *Arch Intern Med*. 33:425-434. 1924.
14. Harms, C. A., M. A. Babcock, S. R. McClaran, D. F. Pegelow, G. A. Nickele, W. B. Nelson, and J. A. Dempsey. Respiratory muscle work compromises leg blood flow during maximal exercise. *J Appl Physiol*. 82:1573-1583. 1997.
15. Hill, A. V., C. N. H. Long, and H. Lupton. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen: parts Ⅰ-Ⅲ. Proc. Royal. Soc. Bri. 97:438-475. 1924. Cited by Noakes,T. *Scand J Med Sci Sports*. 10:123-145. 2000)
16. Hill, A. V., and H. Lupton. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. *Quart J Med*. 16:135-171. 1923.
17. 猪飼道夫. 高所トレーニング五話. *体育科教育*. 4:54-57.1966.
18. Ivy, J. L., R. T. Withers, P. J. Van Handel, D. H. Elger, and D. L. Costill. Muscle respiratory capacity and fiber type as determinants of the lactate threshold. *J Appl Physiol*. 48:523-527.1980.
19. Johnson, B. D., K. W. Saupe. and J. A. Dempsey. Mechanical constraints on exercise hyperpnea in endurance athletes. *J Appl Physiol*. 73:874-886. 1992.
20. Jones, A. M., The physiology of the world record holder for the women's Marathon. *Int J Sports Sci Coa*. 1:101-116. 2006.
21. Joyner, M. J. Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol*. 70:683-687.1991.
22. Kindermann, W., G. Simon, and J. Keul. The significance of the aerobic-anaerobic transition for the determination of work load intensities during endurance training. *Eur J Appl Physiol*. 42:25-34.1979.
23. Kraus.H., and W. Raab. *Hypokinetic Disease*. Springfield. Charles C. Thomas. 1961.
24. Levine, B. D., J. Stray-Gundersen, G. Duhaime, P. G. Snell, and D. B. Friedman. Living high-training low: the effect of altitude acclimatization/normoxic training in trained runners. *Med Sci Sports Exerc*. 23(Suppl):S25. 1991.
25. Levine, B. D., and J. Stray-Gundersen. A practical approach to altitude training: Where to live and train for optimal performance enhancement. *Int J Sports Med*. 13: S209-S212. 1992.
26. Loke, J., D. A. Mahler, and J. A. Virgulto. Respiratory muscle fatigue after marathon running. *J Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol*. 52: 8221-824. 1982.
27. 野口純正. 2020年の100mとマラソンの世界記録. *陸上の友*. No.597:25-35. 2014.
28. Maron, M. B., L. H. Hamilton. and M. G. Maksud. Alterations in pulmonary function consequent to competitive marathon running. *Med Sci Sports*. 11:244-249. 1979.
29. Martin, B., M. Heintzelman, and H. I. Chen. Exercise performance after ventilatory work. *J Appl Physiol: Respirat Environ Exercise Physiol*. 52: 1581-1585. 1982.
30. Miles, D. S., C. E. Doerr, S. A. Schonfeld, D. E. Sinks, and R. W. Gostshall. Changes in pulmonary diffusing capacity and closing volume after running a marathon. *Res Physiol* 52:349-359. 1983.
31. Noakes, T., *Lore of Running*. 1991. Oxford University Press. Southern Africa.
32. Paavolainen, L., K. Häkkinen I. Hämäläinen, A. Nummela, and H. Rusko. Explosive-strength training improves 5-km running time by improving running economy and muscle power. *J Appl Physiol*. 86:1527-1533. 1999.
33. Pugh, L. G. C. E. Altitude and athletic performance. *Nature*. 207:1397-1398. 1965
34. Robinson, S., H. T. Edwards, and D. B. Dill. New records in human power. *Sci*. 85:409-410.1937.
35. Romer, L. M., A. K. McConnell. and D. A. Jones. Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists: effects of inspiratory muscle training. *Med Sci Sports Exerc*. 34:785-792. 2002.
36. Ross, E., N. Middleton, R. Shave, K. George and A. Mcconnell. Changes in respiratory muscle and lung function following marathon running in man. *J Sports Sci*. 26:1295-1301. 2008.
37. Rusko, H. K., A. Leppävuori, P. Mäkelä, and J. Leppäluoto. Living high, training low: A new approach to altitude training at sea level in athletes. *Med Sci Sports Exerc*. 27:S6.1995.
38. Saltin, B., Aerobic and anaerobic work capacity at an altitude of 2250 meters. Pp.97-102 in the international symposium on the effects of altitude on physical performance, Albuquerque, New Mexico March 3-6. 1966.
39. Sjödin, B. and J. Svedenhag. Applied physiology of marathon running. *Sports Med*. 2:83-99. 1985.
40. Spurrs, R. W., A. J. Murphy, and M. L. Watsford. The effect of plyometric training on distance running performance. *Eur J Appl. Physiol*. 89:1-7. 2003.
41. Tanaka. K., and Y, Matuura. Marathon performance, anaerobic threshold, and onset lactate accumulation. *J Appl Physiol*. 57:640-643.1984.
42. Taylor. K., Fatigue monitoring in high performance sport: a survey of current treads. *J Aust Strength Cond*. 20:12-23. 2012.
43. Wasserman, K., A. L. Van Kessel, and G. G. Burton. Interaction of physiological mechanisms during exercise. *J Appl Physiol*. 22:71-85. 1967.
44. Whipp, B. J and S. A. Ward. Will women soon outrun men. *Nature*. 355.2: 25. 1992.
45. Wüthrich, T. U., J. Marty, H. Kerherve, G. Y Millet, S. Verges and C. M. Spengler. Aspects of respiratory muscle fatigue in a mountain Ultramarathon race. *Med Sci Sports Exerc*. 47:519-527. 2015.
46. 山地啓司. *最大酸素摂取量の科学*. 2001. 杏林書院.
47. 山地啓司. 呼吸筋の疲労とトレーニングが生理的機能と持久性運動のパフォーマンスへ与える影響. *日本運動生理学雑誌*. 22:25-40. 2015
48. 山地啓司, 井口文雄, 橋爪和夫. 日本トップ競歩選手のサロマ湖100㎞レース前・後にみられる生理的応答. *スポーツパフォーマンス研究*. 7:370-380, 2015.
49. 山地啓司, 橋爪和夫. 持久性競技者におけるコアトレーニングの必要性と有効性. *ランニング学研究*. 30:1-17. 2019.
50. 山地啓司, 高山史徳, 鍋倉賢治. ノーズクリップを用いた呼吸筋トレーニングが有酸素性の生理的応答やパフォーマンスに与える影響. *スポーツパフォーマンス研究*. 8:375-387. 2016.
51. Yoshida,T., M.Chida, M. Ichioka, and Y. Suda. Blood lactate parameters related to aerobic capacity and endurance performance. *Eur J Appl Physiol*. 56:7-11. 1987.

著者紹介

山地 啓司：
教育博士、富山大学名誉教授、箱根駅伝・国体各３回出場、元拓殖大学駅伝部監督。