

水泳中の無酸素性エネルギー供給動態

萩田 太 (Futoshi Ogita) 鹿屋体育大学

【要旨】

200m以下の種目がほぼ8割を占める競泳競技において、無酸素性エネルギー供給能力は競技成績を左右する重要な体力要因である。近年、無酸素性エネルギー供給量は酸素借によって測定されるようになった。最大無酸素性エネルギー供給量を示す最大酸素借は、ウインゲートテストで測定された最大無酸素性パワーや短・中距離走の成績とも高い相関を示し、ハイパワー、ミドルパワーを反映した運動成績を評価する指標として、非常に優れていることが示唆されている。酸素借の測定により水泳運動中の無酸素性エネルギー供給量を評価したところ、2-3分の運動で最高値を示し、それ以降は低下することが明らかとなった。このことは、200m全力泳の時、乳酸産生は最大となることを示唆するものである。また最近では、無酸素性作業能力の評価や、トレーニング強度の決定のために、血中乳酸濃度の測定が頻繁に行われている。これは、最大血中乳酸濃度や4 mmol・l⁻¹に相当する泳速が、競泳成績と密接な関係にあるからであり、そのために多くのテスト法も開発された。しかしながら、血中乳酸濃度で評価する場合は、必ずしも筋での乳酸産生と血中乳酸濃度が比例関係を示すわけではないことにも留意する必要がある。

◆キーワード：水泳運動、酸素負債、酸素借、血中乳酸濃度

はじめに

身体運動は、筋内で産生された化学エネルギーを力学エネルギーに変換することによって遂行される。この化学エネルギーとはアデノシン三リン酸(ATP)であり、極わずかな量が筋内に貯蔵されている。しかしながら、貯蔵されているATPはスプリント泳などでは数秒で枯渇してしまう¹⁾ため、それ以上運動を持続する場合にはATPを再合成する必要がある。この再合成には、酸素を使う機構と、酸素を使わない機構の2つがある。一般に、前者は運動時間が長くなるほど重要な役割を果たし、後者は短時間の高強度運動中に重要な役割を果たしている。本稿では、無酸素性エネルギー供給に焦点を当て、その定量法、水泳運動中のエネルギー動態と無酸素性エネルギー供給能力の重要性を概説すると同時に、無酸素性エネルギー供給量や筋疲労の指標としてしばしばトレーニングに用いられている血中乳酸濃度と水泳運動との関連について記すことにする。

1. 無酸素性エネルギー供給量の定量法

・酸素負債と酸素借

a. 酸素負債

古くより、無酸素性エネルギー量の定量には、酸素負債が測定されてきた。運動中の酸素の借り(酸素借)を運動後の過剰酸素摂取量として返済する(酸素負債)というこの概念は1920年代にHill et al.¹³⁻¹⁴⁾によって提唱されたものであり、当時酸素借＝酸素負債と考えられていた(図1)。さらに、1930年代に入りクレアチンリン酸が発見されると、Margaria et al.²⁵⁾は新たな仮説を唱え、酸素負債の概念を急速に回復する局面の非乳酸性酸素負債と、時間をかけて緩やかに回復する局面の乳酸性酸素負債の2つに分類した。運動中の借金を運動後に等価分返済するというアイデアは非常に受け入れやすく、かつ運動後の酸素摂取量の定量が比較的簡便であったこともあり、多くの研究者がこの方法を用いてきた。

水泳運動においても、運動中のエネルギー需要量を求めるために、古くは酸素負債の測定が用いられてきた。すなわち、比較的短い距離を無呼吸で泳ぎ、泳ぎ終わった後酸素負債を計ることによって、エネルギー需要量を推定したのである^{1,2,17-20,23)}。

しかしながら、後年の研究の結果、運動後の過剰

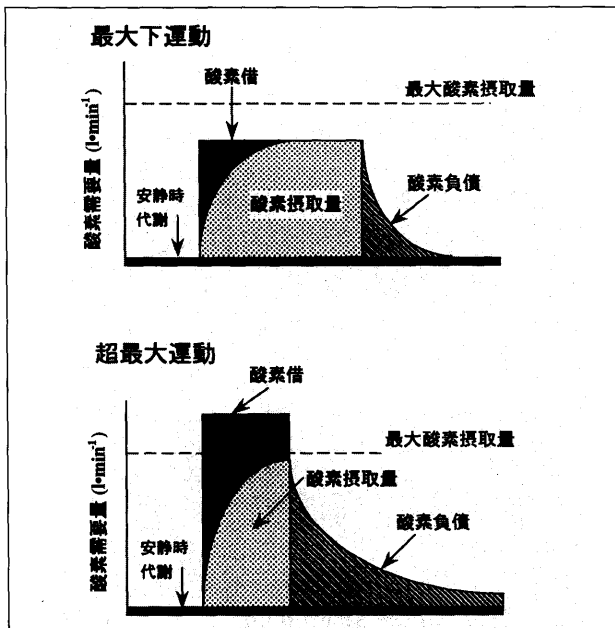


図1 最大下強度と超最大強度における酸素摂取量、酸素借、酸素負債
a : 最大下運動、 b : 超最大運動

酸素摂取量は、クレアチン磷酸の再補填、乳酸からグリコーゲンへの再合成という酸素負債の概念に関する因子の他、カテコールアミンの上昇、甲状腺ホルモンおよび糖質コルチコイド、体温の上昇、基質サイクルなどのような酸素負債とは関係のない因子にも影響されることが明らかとなってきた¹¹⁾。したがって、酸素負債の値は、実際に運動中に供給された無酸素性エネルギー供給量より高くなることが証明されている。借金の返済には利子がつきものである。

b. 酸素借

酸素負債に変わり、近年無酸素性エネルギー量として測定されるようになったのが酸素借である。この酸素借の概念は、1920年にはすでに Krogh and Lindhard²⁰⁾によって紹介されており、1980年代中頃、Hermansen et al.¹²⁾がこれを超最大運動に応用した(図1-b)。超最大運動における酸素需要量(エネルギー消費率)は、最大下の運動強度と酸素摂取量の関係より外挿法によって推定するのであるが、この方法の問題点は、最大下強度における効率が超最大強度でも変わらないという仮説を前提にしている点である。確かに批判意見も多いが、呼気ガスから求められた酸素借は、実際の活動筋内のATP、CPの

変化、および乳酸産生より推定された筋の酸素借と等しいことが報告されており^{4, 26)}、信頼性の高い測定法であると思われる。

・最大酸素借(アネロビックキャパシティー)の測定法

超最大強度における酸素需要量を推定するためには、運動強度と酸素需要量の関係を知る必要がある(図2-a)。そこで、6分から10分間の最大下一定強度泳中の定常状態時の酸素摂取量を、少なくとも8回以上強度を変えて(最大酸素摂取量の40%-90%程度の間)測定する(注:この直線関係は個人毎に求めなければならない。r=0.99以上)。水泳運動の場合、運動強度には泳速の3乗(抵抗にうち勝つためのパワーが、速度の3乗にほぼ比例するため⁵³⁻⁵⁴⁾)を用いる。

最大酸素借は、2-3分(最大でも4分以内)で疲労困憊に達する運動中に測定する。これは、通常大筋群の運動における酸素借が、2-3分で最大に達するからである^{28-29, 33-35, 37)}。疲労困憊の指標は、泳速を維持できなくなった場合(流水プールの場合、泳ぎ始めた位置よりも1m下がった場合)とする。運動強度の目安としては、最大酸素摂取量の110-120%^{28, 33, 35)}程度とし、これに該当する酸素需要量を予め求めておいた運動強度-酸素需要量関係から外挿法によって求める(図2-a, b)。超最大運動中の酸素借は、図2-bに示すように、その運動強度の酸素需要量(総エネルギー供給率)と実際の運動時間の積より求めた総酸素需要量から運動中連続して測定された

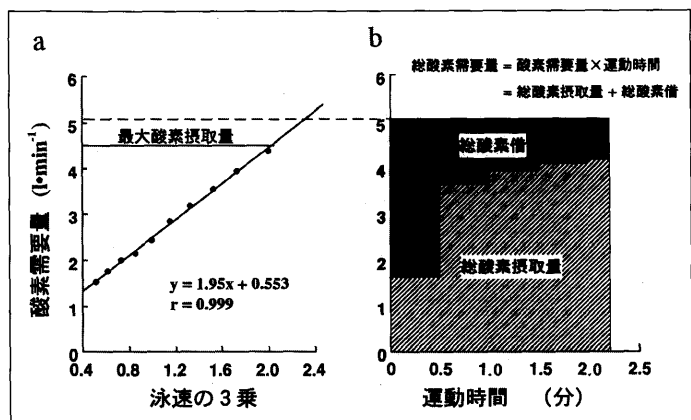


図2 最大酸素借の求め方

a : 定常状態の酸素摂取量(酸素需要量)と運動強度(速度の3乗)の関係

b : 総酸素借の求め方 総酸素需要量-総酸素摂取量=総酸素借
超最大強度の酸素需要量は、a 図の回帰直線より外挿する。

総酸素摂取量を引いて求める。このようにして得られた最大酸素借をHermansenはアネロビックキャパシティーと命名した。この最大酸素借は、吸気中の酸素濃度（分圧）が異なっても^{7, 29)}、一定強度運動でも可変強度運動でも変わらない¹⁰⁾ことから、かなり妥当性の高い測定項目と考えられる。

・最大酸素借とパフォーマンスとの関連

最大酸素借の大きさは、活動筋量^{35, 44, 60)}とその筋群の乳酸緩衝能力^{30, 43, 47-48)}に大きく依存する。したがって、筋の容量と機能を正直に反映する指標といえよう。また、ウインゲートテストで測定された最大無酸素性パワー⁴⁷⁾や短・中距離走の成績⁵⁹⁾とも高い相関を示すことが報告されており、ハイパワー、ミドルパワーを反映した運動成績を評価する指標として、非常に優れていることが示唆されている。実際、競泳競技においても、100mや200m競技では、これまで体力の絶対的指標として数多く用いられてきた最大酸素摂取量よりも、むしろ最大酸素借の方が関係が深いことが明らかにされている⁵⁵⁾。これまで水泳運動中に測定された最大酸素借の値をいくつか表

1にまとめてみた^{7, 15, 21, 32, 34-36)}。

2. 水泳運動中の無酸素性エネルギー動態

・運動持続時間と有酸素性及び無酸素性エネルギー供給量の関係

図3は、15秒から10分程度で疲労困憊に達する水泳（全身泳）中の総酸素摂取量(a)、および総酸素借(b)を示したものである。一見してわかるように、有酸素性エネルギー供給量は、運動時間が長くなるにつれて直線的に増加する。これは泳距離が長くなるほどより多くのエネルギーが必要であることを意味しており、高い有酸素性エネルギー供給能力を有する長距離選手ほど有利となることを示している。

一方、無酸素性エネルギー供給量としての酸素借は、運動開始1分後までは急激に増加する。この運動開始後1分の間に、それぞれの選手の持つ最大酸素借の80-95%程が供給される。さらに、酸素借は2-3分の運動までわずかな増加を続け、最大値に達する。したがって、競泳の場合、200m種目において無酸素性エネルギーが最大限に動員されることになる。

表1. 水泳運動中に測定された最大酸素借

著者	文献番号	被検者	最大酸素借	
			l	ml·kg ⁻¹
D'Acquisto et al.	7	鍛錬された水泳選手	4.15±0.58 (平地)	
			4.32±0.33 (高地)	
平井ら	15	男子大学競泳選手	3.70±0.49	53.6
Kavouras and Troup	21	オリンピック選手	6.5±0.5	
Ogita and Tabata	32	男子大学競泳選手	4.43±1.01 (トレーニング前)	
			4.83±0.95 (トレーニング後)	
Ogita et al.	34	男子大学競泳選手	2.40±0.48 (ブル)	
			2.23±0.22 (バドルブル)	
Ogita et al.	35	大学競泳選手 (男2、女4)	2.15±0.31 (ブル)	53.3-60.6 (男) 42.7-53.3 (女)
			2.52±1.08 (キック)	
			2.99±0.52 (スイム)	
荻田ら	36	男子大学競泳選手	1.95±0.46 (ブル)	

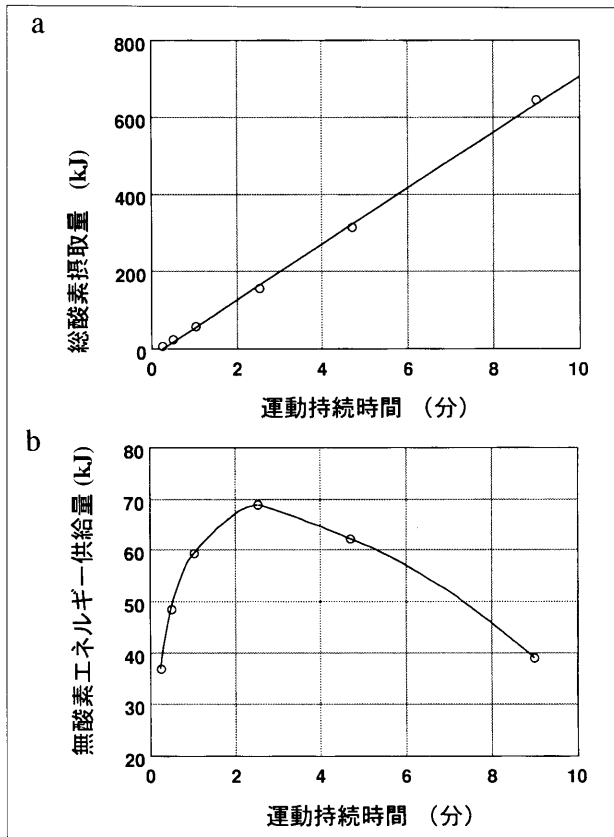


図3 運動持続時間と総酸素摂取量(a)、および総酸素借(b)の関係

競泳競技では男女合わせて26の個人種目があるが、200m以下の種目が20にもなることから、大部分の種目において無酸素性エネルギー供給系のトレーニングは重要な課題といえよう。また、4分以上になると無酸素性エネルギー供給量は運動時間の経過とともに徐々に低下する。

・運動持続時間ともなう有酸素性および無酸素性エネルギー供給量の割合の変化

図4は、上に示した総酸素摂取量と総酸素借の割合と運動持続時間との関係を表したものである。また時間軸上には、自由形の各距離種目でおおむね相当するタイムも合わせて示した。その結果、30秒の運動（50m泳にほぼ相当）では70%が無酸素性に供給されているが、1分の運動（100mに相当）ではそれが50%となり、さらに酸素借が最大となる2-3分の運動ではその割合は約30-35%となり、4分以上を要する運動では20%以下となる。また、ここに示された割合は、よく本などに引用されているHolmér¹⁶⁾のデータより有酸素性エネルギー供給機構の割合が

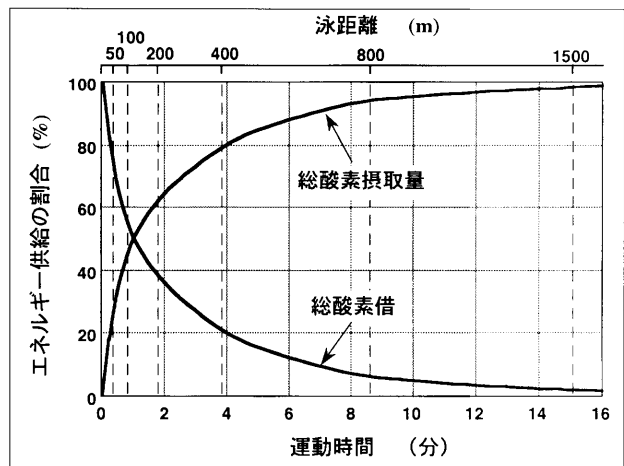


図4 総酸素需要量（総エネルギー消費量）に対する総酸素摂取量（有酸素性エネルギー供給量）と総酸素借（無酸素性エネルギー供給量）の割合の経時的変化

高い。これは、Holmérの示した割合が酸素摂取量と酸素負債を使って算出したものであるため、無酸素性エネルギー量が過大見積もりされたことに起因している。実際には、比較的短い運動でも有酸素性エネルギーの占める割合は、一般に思われているよりも高い割合となるのである。

3. 無酸素性エネルギー供給量の指標としての血中乳酸濃度、およびそのトレーニングへの応用

最近では、血中乳酸濃度分析器の小型化、簡便化が進み、しばしば現場でも血中乳酸濃度の測定が行われるようになった。これにより、筋疲労を招来しない運動強度の閾値を求め、トレーニング強度（カテゴリー）を設定したり³¹⁾、各泳者の有酸素性作業能力⁵⁶⁻⁵⁷⁾、トレーニング効果などを評価する例も少なくない⁵⁸⁾。そこで、血中乳酸濃度と無酸素性エネルギー量、または疲労閾値との関係について検討されたいくつかの先行研究例をまとめたので、以下に紹介する。

・レース後に観察される最高血中乳酸濃度

レース後の血中乳酸濃度を測定することで、レース中の無酸素性エネルギー供給量および生体へのストレスが評価されてきた。距離種目で比較すると、100m-400m種目が最も高く⁵⁻⁶⁾、12-16 mmol・l⁻¹程度（20 mmol・l⁻¹を越す値も見受けられる⁴⁰⁾）の値が観察されている。筋で産生された乳酸が血中に出てくる

までには時間的にずれが生じるため、運動時間が異なる種目間での値を単純に筋の乳酸産生量として比較することはできないが、前述した酸素借の結果から考慮しても、200m前後で最大となることは間違いないであろう。一方、長距離種目になると5-10 mmol·l⁻¹程度とやや値が低くなる^{5,6)}。ただし、これらの値もOBLA等の値より高いことから、レース終盤のラストスパートなどではかなり乳酸を産生して泳いでいることが推察される。

また、泳法別に比較した場合、個人メドレーが最も高い値を示すようである⁶⁾。これは、個人メドレーが他の泳法と比較して多くの筋群を動員していることに起因すると思われる。その他の泳法間での比較では大きな差がないか、もしくは平泳ぎが他の泳法よりもやや高いというような結果である。

また、男女差を見てみると、ある程度レベルが高い選手の間ではレース後の血中乳酸濃度に差は認められない。しかしながら、年齢は最高血中乳酸濃度に影響する要因である。Albonitou³⁾は、14-15歳の群、16-17歳の群、18歳以上(平均19.3歳)の群間でレース後の血中乳酸濃度を比較しており、年齢が高い群ほど血中乳酸濃度が高かったことを報告している。泳記録も年齢の高い群の方が良かったため、より高い運動強度で行えたことが大きな原因であろうが、その他にも年齢が低い群ほど筋量が小さいことや、大人よりも子供の方が解糖系の鍵酵素であるフォスホフルクトキナーゼの活性値が低いこと⁹⁾なども、理由としては考えられる。また、この結果は、成長著しいジュニア期の選手を指導する場合、よく目にする一流成人選手の値をそのまま子供達の指標として当てはめられないことを示唆している。

また、予選レース後の血中乳酸濃度と決勝レース後の血中乳酸濃度を比較した場合、決勝レースの後の方が有意に高い値が観察されている⁵⁾。これは、決勝に進むような速い選手の場合、予選を流していることも考えられるが、原則的に高い泳速で泳げる選手はより高い乳酸産生能力を保持していると同時に、乳酸を緩衝する能力を持っているということが言えるかもしれない。

・血中乳酸濃度とパフォーマンスの関係

Torma and Székely⁵²⁾によると、25m、50m、75m、100m、150m、および200mを、それぞれの最高速度

に対する70%、80%、90%、および100%の速度で泳いだ場合、血中乳酸濃度は25mを除き、原則として速度が高くなるにつれてほぼ直線的に高かったことを報告している。このことは、50m～200mまでの距離種目であるならば、各人の血中乳酸濃度はパフォーマンスレベルの指標となり得ることを示している。いいかえれば、いかに多くの乳酸を産生できるかが上限の速度を決定しているといえよう。ただし、25mの場合だけは例外で、70%から100%の速度に至るまで血中乳酸濃度に差はなかった。おそらく、運動時間が短すぎるため、乳酸産生量に差がでないのだろう。実際、15秒と30秒の全力運動では、運動強度が違うにも関わらず活動筋における乳酸産生速度はどちらの運動も同じであることが報告されている。すなわち、より高い運動強度で15秒運動が行えるのは、クレアチン燐酸の分解によるより速いATP再合成に主として起因しているわけである⁵⁰⁾。

一方、長距離種目に関しては、血中乳酸濃度が4 mmol·l⁻¹の時の泳速と、400m以上の距離種目との成績との間に高い相関が示されている^{5, 42, 57-58)}。また、血中乳酸濃度が4mmol·l⁻¹の時の泳速と近似した強度である85% $\dot{V}O_{2max}$ の速度と400m種目の泳成績との相関も報告されている⁴²⁾。したがって、長距離選手の競技成績は、いかに乳酸をためずにより高い速度で泳げるかが重要な要因といえよう。

・血中乳酸濃度を用いた測定法

上記したように、血中乳酸濃度が蓄積し始める閾値強度と、長距離種目のパフォーマンスと相関が認められることなどから、血中乳酸が4mmol·l⁻¹となる速度、または最大乳酸定常の速度の測定法や、血中乳酸濃度から最大速度を推定する方法など、様々な研究が行われてきた。ここでは、そのいくつかの例を紹介する。

一般にラクテートカーブテストとは、200mまたは400mにおいて異なる泳速で(最大下から最大速度まで)4-5回泳いだときの血中乳酸濃度の変化を調べるテストを指す²²⁾。速度は、ベスト記録、またはその時点で出せることが予測される最も良いタイムから換算された泳速を100%としたとき、およそ80%、85%、90%、95%、及び100%の泳速で泳げば、低い血中乳酸濃度から最大血中乳酸濃度までの泳速と血中乳酸濃度の関係がわかるであろう。以前は、

乳酸が筋から血液中に出てくるまでに時間がかかることから400mがよく使われていたが、筋で乳酸が最大限に作られるのが2-3分の運動であることや、選手の精神的な苦痛を緩和するという意味で、近年では200mを繰り返すやり方も多い。また、このテストは、トレーニング強度を決定するために用いるだけでなく、トレーニング後の泳速-血中乳酸濃度関係を評価するという意味でも重要である。その一例を図5に示す(未発表データ 田中、私信)。

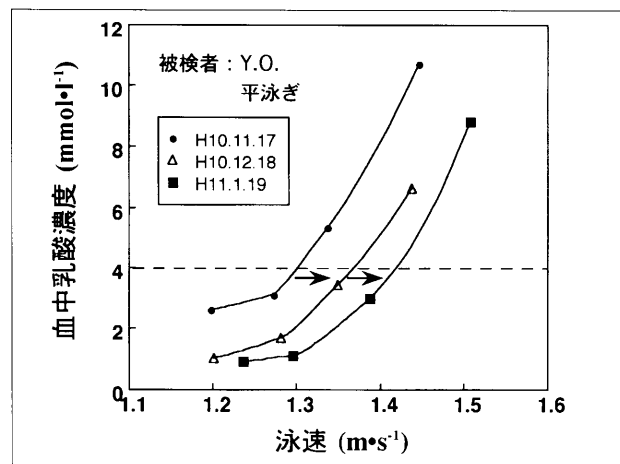


図5 トレーニングによるラクテートカーブの変化(田中 未発表データ)
データは平成10年11月から平成11年1月までのもの。トレーニングが進むに連れて、カーブが右側へシフトしているのに注目。

さらに簡便的な方法がOlbecht et al.³⁸⁻⁴⁰⁾や、Ribeiro et al.⁴²⁾によって報告されている。それは、異なる速度で200m×2本、または400m×2本泳いだときの泳速と血中乳酸濃度の回帰関係を求め、その直線式を外挿して血中乳酸濃度が4mmol·l⁻¹に相当する泳速を求めする方法である(図6)。この方法で得られた4mmol·l⁻¹に相当する泳速は、ほぼ最大乳酸定常状態に等しいと推測できる30分間最大努力泳の平均泳速と差がないことも示されている。

最大乳酸定常の求め方は、もう少し複雑である。これを求めるには、400m×4本で構成された1600m泳を異なる泳速で数回行う⁵⁷⁾。この1600m泳中、400m毎に泳ぎを中断し、1セット中計4回の血中乳酸濃度を測定する。それぞれのセット中の値の変動から乳酸が増加し続けられない最大の速度を探し、最大乳酸定常を求める。

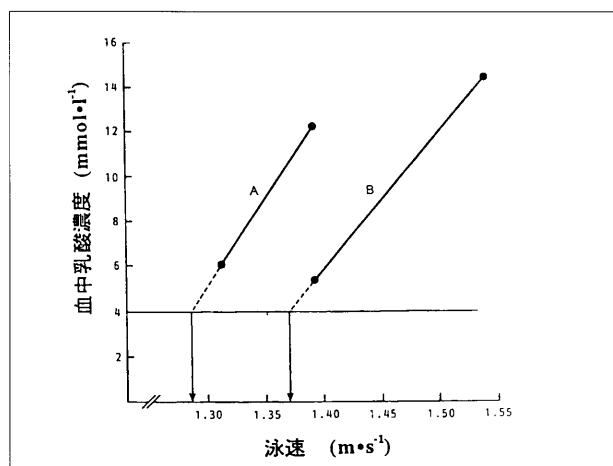


図6 血中乳酸濃度が4 mmol·l⁻¹に相当する泳速の簡易的求め方⁴²⁾
異なる速度(この場合は400mの最大速度の90%と100%)で400mを2本泳いだときの泳速と血中乳酸濃度の回帰直線から、血中乳酸濃度が4 mmol·l⁻¹に相当する泳速を求める。

また、このように血中乳酸濃度によって設定されたトレーニング強度は、心拍数を指標として設定されたときよりも、日差変動が小さく、より安定した指標であることも示されている⁴¹⁾。

ここでは、血中乳酸濃度が測れることを前提に測定法を紹介しているが、血中乳酸濃度が測定できなくとも、それに相当するような強度を求めることは可能である。Wakayoshi et al.⁵⁷⁾は、200mと400mの全力泳の記録と距離の関係の回帰直線の傾きからクリティカルベロシティを決定し、それとOBLAの速度や400m全力泳の平均速度と有意な相関があることを報告している。また、20分間持続でき得る最大平均速度は、最大乳酸定常の速度とほぼ一致する(未発表データ 若吉、私信)。これらのことは、血中乳酸濃度を測定しなくとも、ストップウォッチ1個あれば、疲労閾値に関連したトレーニング強度を推測できることを示唆しており、非常に現場的であると思われる。

また、最大下の速度と血中乳酸濃度の関係を用い、最高血中乳酸濃度から最高速度を推定する手法もいくつか報告されている。一般に、血中乳酸濃度は乳酸閾値を越えると二乗曲線状に増加する。Elliott and Haber⁵⁸⁾はこの特性を利用し、乳酸閾値以上の泳速と対数処理した血中乳酸濃度が直線関係になることから、最大血中乳酸濃度に相当する泳速を導き出

し、実際のレースの泳速とほぼ一致することを確認している。また、Bonifazi et al.⁵⁾は、血中乳酸濃度が速度の3乗に比例して増加する特性を利用し、この回帰直線に最大血中乳酸濃度を代入して、最大泳速を推定している。この方法で得られた推定値も実際の泳速とほぼ一致していた。いずれにしても、トレーニングにおいて最大下の泳速と血中乳酸濃度の関係が予めわかれば、最大血中乳酸濃度が得られたときに最大泳速を推測できるわけである。仮に推定された値がこれまでの最高記録よりも速かった場合、ある程度の科学的根拠を示しながら選手に自信を付けるための手段として用いることができるであろうし、選手自身もそれを示されれば次のレースに対して大きな動機づけになるであろう。

・血中乳酸濃度の妥当性 (注意点)

これまで、血中乳酸濃度を用いた測定法、その妥当性、及びその使い方などについて説明してきた。しかしながら、血中乳酸濃度は、筋での乳酸産生量、産生された乳酸の筋から血液への拡散、筋内での乳酸の再分解、筋内に蓄積されたままの乳酸など様々な要因が複雑に影響し合っていて決まるわけである。したがって、測定された血中乳酸濃度がすべて単純に比較できるかというところではない。

図7は、15秒、30秒、1分、2-3分、4-5分、8-10分で疲労困憊に達する全力泳中の酸素借と運動後の最高血中乳酸濃度を示したものである。上図の例は酸素借と血中乳酸濃度が高い相関関係を示したものであるが、下図のように酸素借と血中乳酸濃度が全く関係を示さないこともある。むしろ、このように異なる運動時間で疲労困憊に達する場合、下図のようなケースが多い。なぜならば、先述したように血中乳酸濃度は乳酸産生量のみならず、多くの他の要因によって大きく影響されるからである。したがって、特に最大血中乳酸濃度を評価する場合には、特定の距離種目において比較することを薦める。また、最大下強度と血中乳酸濃度の関係を求める場合は、乳酸が筋へ出てくるまでの時間を考慮して、200mから400mまでの距離で行う方がいいであろう。また、インターバル後の血中乳酸を比較する場合も、大きく距離や時間が違う場合の比較はさほど参考にならないかもしれないことをつけ加えておく。

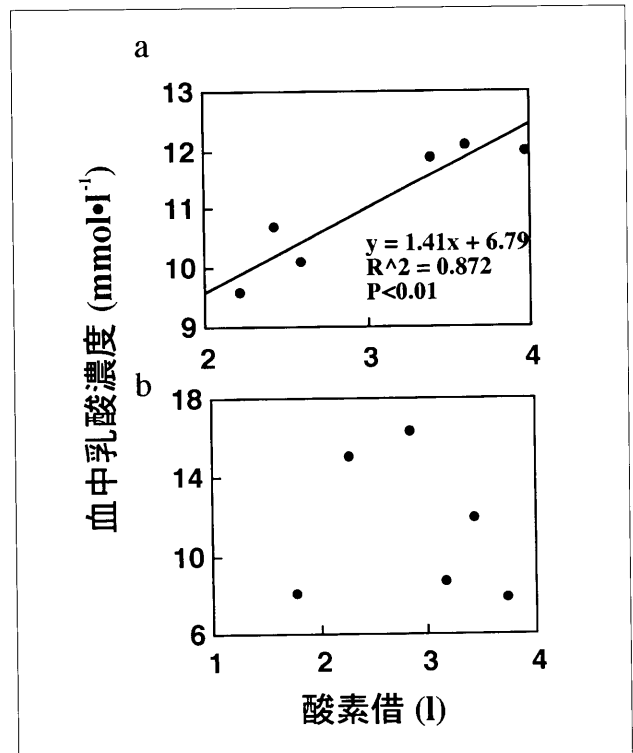


図7 異なる運動時間で疲労困憊に達する運動中の酸素借とその運動後の最高血中乳酸濃度の関係 (荻田 未発表データ)

- a. 酸素借と血中乳酸濃度の間に高い相関が認められる例
- b. 酸素借と血中乳酸濃度の間に何ら関係の認められない例

おわりに

無酸素性エネルギー供給機構は、ほとんどの競泳競技種目の成績に対し、重要な要因の1つである。しかしながら、これまでエネルギー供給系に対するトレーニング効果は、ほとんどが最大酸素摂取量、またはラクトートカーブの推移によって評価されてきており、無酸素性エネルギー供給能力の観点から評価した例は少ない^{27, 32, 49)}。いくつかの研究をまとめると、最大酸素借は、OBLA程度に相当する70% $\dot{V}O_{2max}$ 強度で1時間の運動を週5日、6週間以上行ったとしても増加しない(最大酸素摂取量は有意に増加)が、短時間の超最大運動を短時間の休息運動をはさみ疲労困憊まで繰り返す間欠的運動では、有意に増加する⁴⁹⁾。すなわち、無酸素性エネルギー供給機構に大きな刺激が与えられる高い強度の運動でなくては、無酸素性エネルギー供給能力は増大し

ないようである。したがって、そのトレーニングセッションでいかに多くの無酸素性エネルギーを動員できるかがトレーニング効果の重要な鍵と思われる。現在報告されている中で最も効果の高い間欠運動の組み合わせとしては、170% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で20秒間の運動を10秒の休息を挟みながら疲労困憊まで8セット以上行うトレーニングである。ただし、この組み合わせでは水泳トレーニングに応用しづらいため（25mでは短すぎ50mでは長すぎるため）、まだまだ検討すべき課題である。

また、1990年代に入り、高地トレーニング後、筋の緩衝能力が改善され、酸素借が増大したことが報告された³⁰⁾。この通常概念とは全く逆の発想を検証するために、我々も高地をシミュレートした低圧チャンバー内で高強度トレーニングを行った。その結果、最大酸素摂取量の改善に対しては個人差が大きく、むしろ低下する選手も少なくなかったが（このような結果は先行研究でも多く報告されている）、最大酸素借はより高い確率で改善させることができた³²⁾。これらのことは、高地トレーニングが、無酸素性エネルギー供給能力の改善、短距離種目へのパフォーマンス改善にも効果的であることを示唆するものである。無酸素性エネルギー能力の改善に対する高地トレーニングプログラムの開発に関しては、先に示したインターバルトレーニングの組み合わせと同様、残された大きな研究課題である。

【参考文献】

1. Adrian, M.J., M. Singh, and P.V. Karpovich (1966) Energy cost of leg kick, arm stroke, and whole crawl stroke. *J. Appl. Physiol.* 21 : 1763-1766
2. 阿久津邦男 (1964) 水泳のエネルギー代謝に関する研究 (その I). 水泳のスピードと酸素需要量. *体力科学* 13 : 173-179
3. Avlonitou, E. (1996) Maximal lactate values following competitive performance varying according to age, sex and swimming style. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 36:24-30.
4. Bangsbo, J., P.D. Gollnick, T.E. Graham, C. Juel, B. Kiens, M. Mizuno and B. Saltin (1990) Anaerobic energy production and O₂ deficit-debt relationship during exhaustive exercise in humans. *J. Physiol. (Lond.)* 422 : 539-559
5. Bonifazi, M., G. Martelli, K. Marugo, F. Sardella, and G. Carli (1993) Blood lactate accumulation in top level swimmers following competition. *J. Sports Med. Phys. Fitness* 33:13-18
6. Chatard, J.-C., M. Paulin, and J.-R. Lacour (1988) Postcompetition blood lactate measurements and swimming performance: Illustrated by data from a 400-m olympic record holder. In: B.E. Ungerechts, K. Wilke, K. Reischle (eds.), *Swimming Science V, Human Kinetics : Champaign, Illinois*, 311-316.
7. D'Acquisto, L.J., Z.V. Tran, C.G.R. Jackson, and J.P. Troup (1996) Exergy release during altitude and acute simulated sea level exposure in altitude acclimatized/trained swimmers. In: J.P. Troup, A.P. Hollander, D. Strasse, S.W. Trappe, J.M. Cappaert, T.A. Trappe (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VII. E&FN SPON : London*, 140-145
8. Elliott, M., and P. Haber (1983) Estimation on the peak performance in the 100-meter breast stroke on the basis of serum lactate measurement during two submaximal test heats at different velocities. In: A.P. Hollander, P.A. Huijting, G. De Groot (Eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming, Human Kinetics : Champaign, Illinois*, 335-338.
9. Eriksson, B.O., and B. Saltin. (1974) Muscle metabolism during exercise in boys aged 11 to 16 years compared to adults. *Acta Paediatr. Belg.* 28 : 257-265.
10. Gastin, P.B., D.L. Costill, D.L. Lawson, K. Krzeminski, G.K. McConell (1995) Accumulated oxygen deficit during supramaximal all-out and constant intensity exercise. *Med. Sci. Sports Exerc.* 27:255-263
11. Gaesser, G. and G.A. Brooks (1984) Metabolic bases of excess post-exercise oxygen consumption: a review. *Med. Sci. Sports Exerc.* 16 : 29-43
12. Hermansen, L., J.I. Medbø, A.-C. Mohn, I. Tabata, and R. Bahr (1984) Oxygen deficit during maximal exercise of short duration (Abstract). *Acta Physiol. Scand.* 121, 39A
13. Hill, A.V., C.N.H. Long, and H. Lupton. (1924) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. Pt. IV-VI, VII-VIII. *Muscular exercise and oxygen uptake. Proc. Roy. Soc. London Ser. B.* 97 : 84-138, 155-176
14. Hill, A.V. and H. Lupton (1923) Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilization of oxygen. *Quart. J. Med.* 16 : 135-171
15. 平井雄介, 小笠原悦子, 田畑泉 (1993) 超最大強度の水泳運動における無酸素性及び有酸素性エネルギー供給機構の貢献度. *Jap. J. Sports Sci.* 12 : 124-129
16. Holmér, I. (1979) Physiology of swimming man. In: R.S. Hutton, D.I. Miller (eds.) *Exercise and Sports Science Reviews. Franklin Institute : Philadelphia*, 87-123
17. Houston, M.E. (1978) Metabolic response to exercise, with special reference to training and competition in swimming. In: B. Eriksson, B. Furberg (eds.) *Swimming Medicine IV. University Park Press : Baltimore*, 207-232
18. Karpovich, P.V. and N. Millman (1944) Energy expenditure in swimming. *Am. J. Physiol.* 142 : 140-144
19. Karpovich, P.V. and H. LeMaistre (1940) Prediction of time in swimming the breast stroke based on oxygen consumption. *Res. Q.* 11:40
20. Karpovich, P.V. and K. Pestrecov (1938/39) Mechanical

- work and efficiency in swimming crawl and back strokes. *Arbeitsphysiologie* 10 : 504-514
21. Kavouras,S.A., and J.P.Troup (1995) The profile of the olympic swimmer. XI Fina World Sports Medicine Congress Program and Abstracts : 30
 22. Kelly,M., G.Gibney, J.Mullins, T.Ward, B.Donne, and M.O'Brien.(1992) A study of blood lactate profiles across different swim strokes. In: D.MacLaren, T.Reilly, A.Lees (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming, Swimming Science VI*, E&FN SPON : London, 227-234.
 23. Klissouras,V., and W.S.Sinning (1978) Metabolic prediction of swimming performance. In: B.Eriksson, B.Furberg (eds.) *Swimming Medicine IV*. University Park Press : Baltimore, 262-273
 24. Krogh,A. and J.Lindhard (1920) The changes in respiration at the transition from work to rest. *J.Physiol. (Lond.)* 53, 431-437
 25. Margaria,R., H.T.Edwards, and D.B.Dill (1933) The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and role of the lactic acid in muscular contraction. *Am.J.Physiol.* 106 : 689-715.
 26. Medbø, J.I., and I.Tabata (1993) Anaerobic energy release in working muscle during 30 s to 3 min of exhaustive bicycling. *J.Appl.Physiol.*75 : 1654-1660
 27. Medbø, J.I., and S.Bergers (1990) Effect of training on the anaerobic capacity. *Med.Sci. Sports Exerc.*22 : 501-507
 28. Medbø, J.I., and I.Tabata (1989) Relative importance of aerobic and anaerobic energy release during short-lasting exhausting bicycle exercise. *J.Appl.Physiol.* 67 : 1881-1886
 29. Medbø, J.I., A.C.Mohn, I.Tabata, R.Bahr, O.Vaage, and O.M. Sejersted (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O₂ deficit. *J.Appl.Physiol.* 64 : 50-60
 30. Mizuno,M., C.Juel, T.Bro-Rasmussen, E.Mygind, B.Scjibye, B.Rasmussen, and B.Saltin (1990) Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude. *J Appl Physiol.* 68 : 496-502
 31. Mujika, I., T.Busso, A.Geyssant, J.C.Chatard, F.Barale, and L.Lacoste (1996) Training content and its effects on performance in 100 and 200 m swimmers. In: J.P.Troup, A.P.Hollander, D.Strasse, S.W.Trappe, J.M.Cappaert, T.A.Trappe (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming VII*. E&FN SPON : London, 201-207
 32. Ogita,F., and I.Tabata (1998) The effect of high intensity intermittent training under a hypobaric hypoxic condition on anaerobic capacity and maximal oxygen uptake. VIII International Symposium Biomechanics and Medicine in Swimming, Programme and Abstracts : 103
 33. 荻田太, 小野寺丈晴, 若古浩二 (1998) 超最大強度におけるプル、キック、スイム中の代謝特性. *水泳水中運動科学* 1 : 13-18
 34. Ogita,F., T.Onodera, I.Tabata, T.Tanaka, and N.Taguchi (1997) Effects of hand paddles on peak oxygen deficit and peak oxygen uptake during arm stroke swimming. In : B.O.Eriksson, L.Gullstrand (Eds) *Proceedings XII FINA World Congress on Sports Medicine : Göteborg, Sweden*, 397-409
 35. Ogita,F., M.Hara, and I.Tabata (1996) Anaerobic capacity and maximal oxygen uptake during arm stroke, leg kicking and whole body swimming. *Acta Physiol.Scand.* 157 : 435-441
 36. 荻田太, 田畑泉, 平井雄介, 山奥慎一, 田川信彦 (1993) スイムベンチ運動およびアームストロークにおける酸素借の最大値. *日本体育学会第44回大会号* : 354
 37. Ogita, F., T.Onodera, and I.Tabata (1999) Effect of hand paddles on anaerobic energy release during supramaximal swimming. *Med.Sci.Sports Exerc.* 31 : 729-735.
 38. Olbrecht,J., A.Mader, O.Madsen, H.Liesen, W.Hollmann (1988) The relationship of lactic acid to long-distance swimming and the 2 × 400-m "2-speed test" and the implications for adjusting intensities. In: B.E.Ungerechts, K.Wilke, K.Reischle (eds.), *Swimming Science V, Human Kinetics : Champaign, Illinois*, 261-267
 39. Olbrecht,J., A.Mader, H.Heck, and W.Hollman (1992) The importance of a calculation scheme to support the interpretation of lactate tests. In: D.MacLaren, T.Reilly, A.Lees (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming, Swimming Science VI*, E&FN SPON : London, 243-249
 40. Olbrecht,J., O.Madsen, A.Mader, H.Liesen, and V.Hollmann. (1985) Relationship between swimming velocity and lactic concentration during continuous and intermittent training exercise. *Int.J.Sports Med.*6:74-77
 41. Peyrebrune,M.C., and C.A.Hardy (1992) Heart rate and lactate responses to swimming. In: D.MacLaren, T.Reilly, A.Lees (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming, Swimming Science VI*, E&FN SPON : London, 235-241
 42. Ribeiro,J.P., E.Cadavid, J.Baena, E.Monsalvete, and E.H. De Rose. (1990) Metabolic predictors of middle-distance swimming performance. *Br.J.Sports Med.* 24:196-200.
 43. Saltin,B (1990) Anaerobic capacity. Past, present, prospective. In: *Biochemistry of Exercise VII*, A.W.Taylor, P.D.Gollnick, H.J.Green, C.D.Ianuzzo, E.G.Noble, G.Metivier, J.R.Sutton. (Eds.), *Human Kinetics : Champaign, Illinois*, 387-412
 44. Saltin,B (1973) Metabolic fundamentals in exercise. *Med.Sci Sports* 5: 137-146
 45. Sawka,M.N., R.G.Knowlton, D.S.Miles, and J.B.Critz (1979) Post competition blood lactate concentrations in collegiate swimmers. *Eur.J.Appl.Physiol.*41:93-99.
 46. Scott,C.B., F.B.Roby, T.G.Lohman, and C.Bunt (1991) The maximal accumulated deficit as an indicator of anaerobic capacity. *Med.Sci.Sports Exerc.* 23 : 618-624, 1991.
 47. Tabata,I., K.Nisimura, M.Kouzaki, Y.Hirai, F.Ogita, M.Miyachi, K.Yamamoto. Effects of moderate-endurance and high intensity-intermittent training on aerobic capacity and $\dot{V}O_{2max}$. *Med.Sci.Sports Exerc.* 28:1327-1330, 1996.
 48. 田畑泉, 山本正嘉 (1989) 身体運動のエナジェティクス. 高文堂出版社 : 東京

49. Telford,R.D., A.G.Hahn, E.A.Catchpole, A.R.Parker, W.F.Sweetenham (1988) Post competition blood lactate concentration in highly ranked Australian swimmers. In: B.E.Ungerechts, K.Wilke, K.Reischle (eds.), *Swimming Science V, Human Kinetics : Champaign, Illinois, 277-283.*
50. Torma.Z.D., and G.Székely (1978) Parateters of acid-base equilibrium at various swimming intensties and distances. In: B.Eriksson, B.Furberg (eds.) *Swimming Medicine IV. University Park Press : Baltimore, 274-281.*
51. Toussaint,H.M., A.Beelen, A.Rodenburg, A.J.Sargeant, G.De Groot, A.P.Hollander, and G.J.Van IngenSchenau (1988) Propelling efficiency of front-crawl swimming. *J.Appl.Physiol. 65 : 2506-2512*
52. Toussaint,H.M., G.De Groot, H.H.C.M.Savelberg, K.Vervoorn, A.P.Hollander, and G.J.Van IngenSchenau (1988) Active drag related to velocity in male and female swimmers. *J.Biomech. 21 : 435-438*
53. Troup,J.P., A.P.Hollander, M.Bone, S.Trappe, and A.P.Barzdukas(1992) Performance related differences in the anaerobic contribution of competitive freestyle swimmers. In: D.MacLaren, T.Reilly, A.Lees (eds.) *Biomechanics and Medicine in Swimming, Swimming Science VI, E&FN SPON : London, 271-277*
54. Wakayoshi,K., K.Ikuta, T.Yoshida, M.Udo, T.Moritani, Y.Mutoh, and M.Miyashita. Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *Eur.J.Appl.Physiol. 64 : 153-157, 1992.*
55. Wakayoshi,K.,T.Yoshida, M.Udo, T.Harada, T.Moritani, Y.Mutoh, and M.Miyashita. (1993) Does critical swimming velocity represent exercise intensity at maximal lactate steady state? *Eur.J.Appl.Physiol. 66:90-95.*
56. Wakayoshi,K., T.Yoshida, K.Ikuta, Y.Mutoh, and M.Miyashita (1993) Adaptation to six months of aerobic swim training.Changes in velocity, stroke rate, stroke length, and blood lactate. *Int.J.Sports Med. 14 : 368-372*
57. Weyand,P.G., K.J.Cureton, D.S.Conley, M.A.Sloniger, Y.L.Liu (1994) Peak oxygen deficit predicts sprint and middle-distance track performance.*Med.Sci.Sports Exerc. 26 : 1174-1180*
58. Weyand,P.G., K.J.Cureton, D.S.Conley, and E.J.Higbie(1993) Peak oxygen deficit during one- and two-legged cycling in men and women. *Med.Sci.Sports Exerc. 25 : 584-591*