

プロトコールの違いが中距離ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響
～エリート中距離ランナーの超最大運動における生理学的適応能力～

大庭 恵一

目 次

I. 要約	1
II. 緒言	2
III. 研究課題 1: プロトコールの違いが長距離(5000m)ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響	
1. 研究目的	3
2. 研究方法	3
3. 結果	7
4. 考察	8
IV. 研究課題 2: プロトコールの違いがエリート 800m ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響	
1. 研究目的	10
2. 研究方法	10
3. 結果	11
4. 考察	12
V. 研究課題 3: プロトコールの違いが 1500m ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響	
1. 研究目的	14
2. 研究方法	14
3. 結果	15
4. 考察	16
VI. 総括	17
VII. 謝辞	18
VIII. 参考文献	19

プロトコルの違いが中距離ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響
～エリート中距離ランナーの超最大運動における生理学的適応能力～

大庭 恵一 中村 和照

I. 要約

本研究では、中距離ランナーにおいて、測定プロトコルの違いが $\dot{V}O_{2max}$ に及ぼす影響を明らかにするために、間欠的(Taylor)および連続的漸増負荷テスト(GXT)、中距離走レースの強度に近い $v\dot{V}O_{2max}$ 前後の強度での定常負荷走行テストを行わせ、それらの $\dot{V}O_{2peak}$ の違いを明らかにし、エリート中距離ランナーにおける有効な $\dot{V}O_{2max}$ を測定するプロトコルについて検証することを目的とし、研究課題1～3を行った。

研究課題1:プロトコルの違いが長距離(5000m)ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

研究課題1では、5000m以上を専門種目とする長距離ランナー5名を対象に、Taylor、GXTおよび95%、100%、105% $v\dot{V}O_{2max}$ における定常負荷テストを行わせた。その結果、TaylorとGXTとの間に有意な差は認められなかったものの、95% $v\dot{V}O_{2max}$ において最も高い $\dot{V}O_{2peak}$ を示し、5000mのパフォーマンスが最も高い被験者はそのテストでの $\dot{V}O_{2peak}$ において最も高い値を示した。

研究課題2:プロトコルの違いがエリート800mランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

研究課題2では、日本ランキング上位の800mランナー4名を対象に、GXTおよび105% $v\dot{V}O_{2max}$ を行わせ、エリート中距離ランナーの超最大運動に対する生理学的適応能力についての検討を行った。

1'48'54の最も良い記録を有する被験者が105% $v\dot{V}O_{2max}$ テストの $\dot{V}O_{2peak}$ において、他の被験者に比べ最も高い値を示した。

研究課題3:プロトコルの違いが1500mランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

研究課題3では、1500mレースに向けてトレーニングを行っている大学中長距離ランナー3名を対象に、GXTおよび95%、100%、105% $v\dot{V}O_{2max}$ における定常負荷テストを行わせ、各テストの $\dot{V}O_{2peak}$ と1500mのパフォーマンスとの関連について検証した。その結果、100% $v\dot{V}O_{2max}$ において最も高い $\dot{V}O_{2peak}$ を示した。また、1500mに最も高いパフォーマンスを有するランナーは、95%、100%、105% $v\dot{V}O_{2max}$ の3つのすべてのテストにおいて最も高い $\dot{V}O_{2peak}$ を示した。

以上の結果から、専門とする種目に近い強度での定常負荷テストにおいて、最も高い $\dot{V}O_{2peak}$ がみられ、その強度に有酸素エネルギー供給機構を適応させているものと考えられる。また、105% $v\dot{V}O_{2max}$ テストにおける $\dot{V}O_{2peak}$ が、エリート800mランナー間の比較において、パフォーマンスに影響を及ぼす有効な指標となる可能性が示唆された。

代表者所属:大分工業高等専門学校
共同研究者所属:茨城キリスト教大学

I. 緒言

陸上競技の中長距離走は、これまで有酸素性機構からのエネルギー供給を示す指標とパフォーマンスとの関連が高いことが報告されている。その指標を測定するテストとして、有酸素性エネルギー供給量の最大値を示す最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)をはじめ、換気量($\dot{V}E$)、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)および呼吸交換比(RER)などの呼気ガスデータを算出するテストが行われている。一流の中距離ランナーの $\dot{V}O_{2max}$ もトレッドミル走中の呼気ガスから得られたデータをもとに算出されている。 $\dot{V}O_{2max}$ の測定方法について、長距離走は $\dot{V}O_{2max}$ 、乳酸性閾値(LT)、走の経済性(RE)でパフォーマンスの大部分を説明できると報告されていることから(Midgley 2007)、これらが同時に測定できる3~4分間の間欠的漸増負荷テスト(Taylor 1955)を用いて行われることが多い。このテストの総運動時間は、休息は挟むものの、60分近くにもおよび、 $\dot{V}O_{2max}$ の出現をねらって行われる最終セットの漸増負荷走行において、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)が上昇しないランナーも存在する。特に、中距離ランナーにおいて、このような現象が起きてしまうことが多い。

中距離走は、 $\dot{V}O_{2max}$ を超える運動強度で行われる超最大運動(Supra Maximal Exercise)であるため、その高い運動強度に対して適応する能力が必要になってくると考えられる。運動開始時における生理学的適応能力に関して、Duffieldら(2008)らは、超最大運動における酸素摂取動態について、中距離ランナーにおける100%v $\dot{V}O_{2max}$ と110%v $\dot{V}O_{2max}$ 強度での運動開始時における酸素摂取動態を比較し、110%v $\dot{V}O_{2max}$ 強度がより速い酸素摂取動態を示す($\dot{V}O_2$ が速く立ち上がる)ことを報告している。Thomasら(2005)は、800mレースにおいて、スタートから300m前後で $\dot{V}O_{2max}$ レベルに達し、そのレベルを200m前後維持し、それ以降酸素摂取応答が減少したと報告している。さらに、その減少はレース後半の走速度の減少と有意な正の相関関係があると報告している。これらの報告は、中距離走において、運動開始時から後半にかけての酸素取り込み能力の重要性を示唆していると考えられる。

Sousaら(2011)は、陸上競技の800m走と近い運動時間で行われる水泳の200mクロールにおいて、そのパフォーマンスは酸素摂取の立ち上がり(時定数: τ)などの酸素摂取動態の指標と関連がみられなかったものの、 $\dot{V}O_{2peak}$ との間に有意な正の相関関係が認められたことを報告しており、水泳競技の中距離レースにおける有酸素性エネルギー供給の貢献度がこれまでの研究で報告されている割合よりも高いことを報告している。200mクロールと同様、2分前後の全力運動で行われる800m走においても、レース中の $\dot{V}O_{2peak}$ がパフォーマンスに影響を及ぼしている可能性があると考えられる。

本研究では、エリート中距離ランナーにおいて、 $\dot{V}O_{2max}$ を測定するための有効なプロトコールについて検証するために、現在日本トップの中長距離ランナーの $\dot{V}O_{2max}$ を測定するプロトコールとしても採用されている間欠的漸増負荷テスト(Taylor Test)と、10分前後でexhaustionに至る連続的漸増負荷テスト(GXT)、および中距離走レースの強度に近いv $\dot{V}O_{2max}$ 前後の強度での定常負荷走行テストを、様々な専門種目の中長距離ランナーに行わせ、専門種目や競技レベルによる $\dot{V}O_{2peak}$ の違いを明らかにすることを目的とした。その目的を達成するために、以下の3つの研究課題を設定した。

研究課題 1:プロトコールの違いが長距離(5000m)ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

研究課題 2:プロトコールの違いがエリート800mランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

研究課題 3:プロトコールの違いが1500mランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

Ⅲ. 研究課題 1: プロトコールの違いが長距離(5000m)ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

1. 研究目的

研究課題 1 は、長距離走を専門とする大学男子長距離ランナーを対象に、間欠的漸増負荷テスト (Taylor Test), GXT, および $v\dot{V}O_2\text{max}$ 前後の強度での定常負荷走行テストを行わせ、プロトコールの違いが最大酸素摂取量にどのような影響を及ぼすのかを明らかにすることを目的として行われた。

2. 研究方法

(1) 被験者

表 1 に、研究課題1で用いた被験者の身体的特性および 5000mのパフォーマンスを示した。この 5 名の被験者は、持久性トレーニングを週 5 日以上行っており、5000m 以上の距離を専門にトレーニングを行っている。

表 1. 被験者の身体的特性および 5000mのパフォーマンス

	age	height	weight	5000m
	(yrs)	(cm)	(kg)	(' ")
A	21	162	52.2	15'14"
B	20	166	57.8	15'53"
C	19	164	51.1	16'09"
D	19	170	53.9	14'57"
E	20	160	49.3	15'10"
mean	19.8	164.4	52.9	
SD	0.8	3.8	3.2	

(2) 測定方法

【漸増負荷テスト】

①間欠的漸増負荷テスト(Taylor test) (図 1)

4 分間の間欠的漸増負荷テストを 2 分間の休息を挟んで 5~6 セット行わせる。20m/min ずつ速度を漸増させ、5~6 セットで exhaustion に至るように 1 セット目の走速度を設定する。

②連続的漸増負荷テスト(GXT) (図 2)

$\dot{V}O_2\text{max}$ および $v\dot{V}O_2\text{max}$ を測定するために、傾斜1%のトレッドミルで漸増負荷テストを行わせる。被験者のレベルに合わせて初期速度をせってし、1 分ごとに 10m/min ずつ漸増させ、10 分前後で exhaustion に至るプロトコールで行わせる。exhaustion に達した時の $\dot{V}O_2$ を $\dot{V}O_2\text{max}$ 、その時のランニング速度を $v\dot{V}O_2\text{max}$ とした。(Billat 1994, 山地 1998)

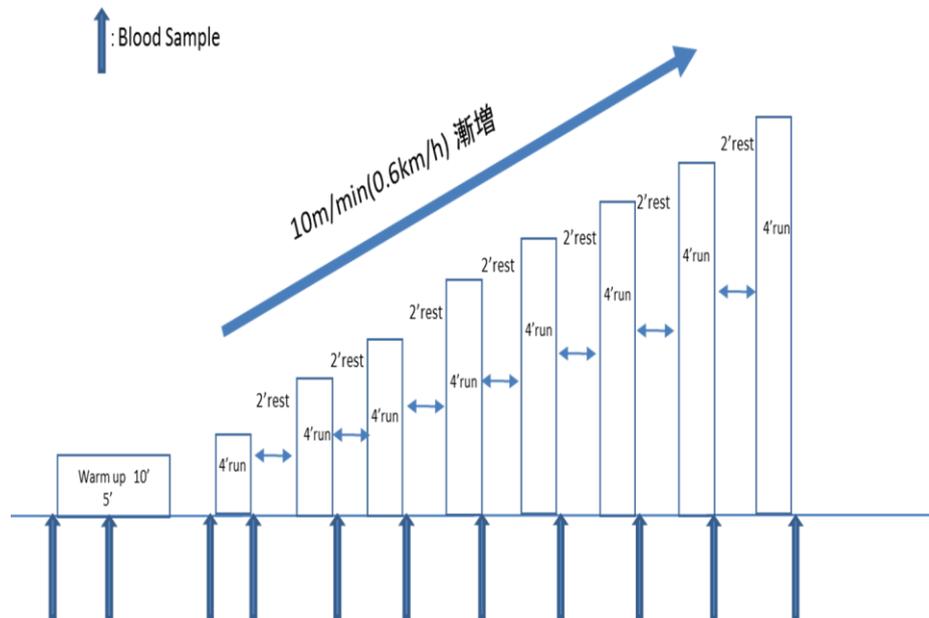


図 1. 間欠的漸増負荷テスト(Taylor Test)

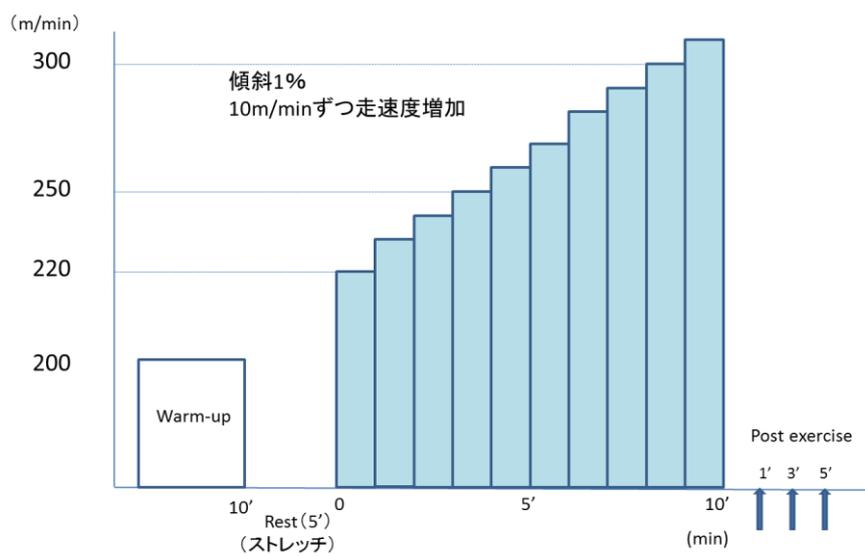


図 2. 漸増負荷テスト(GXT)

【超最大運動強度における定常負荷テスト】

傾斜1%のトレッドミルを用いて、95%、100%および105% $\dot{V}O_2\max$ の走速度における3種類の定常負荷テスト(図3~5)を行わせた。被験者は、各走速度に達したトレッドミルに跳び乗り、exhaustionに至るまで走行させる。

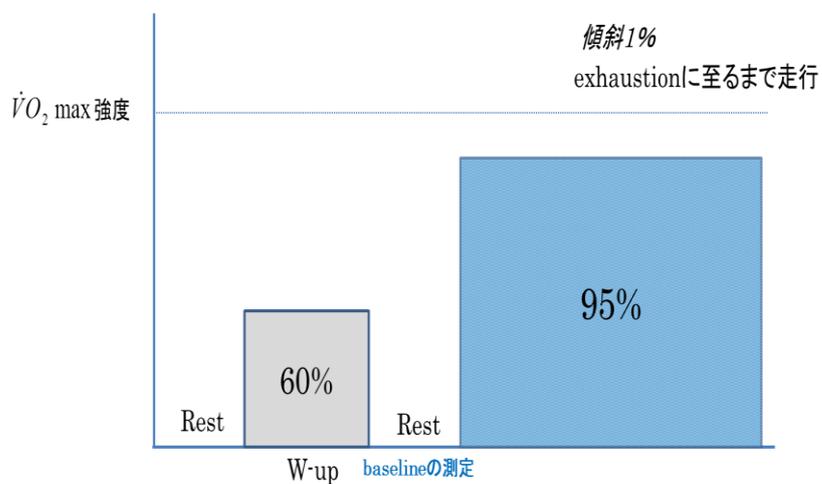


図3. 95% $\dot{V}O_2\max$ テスト

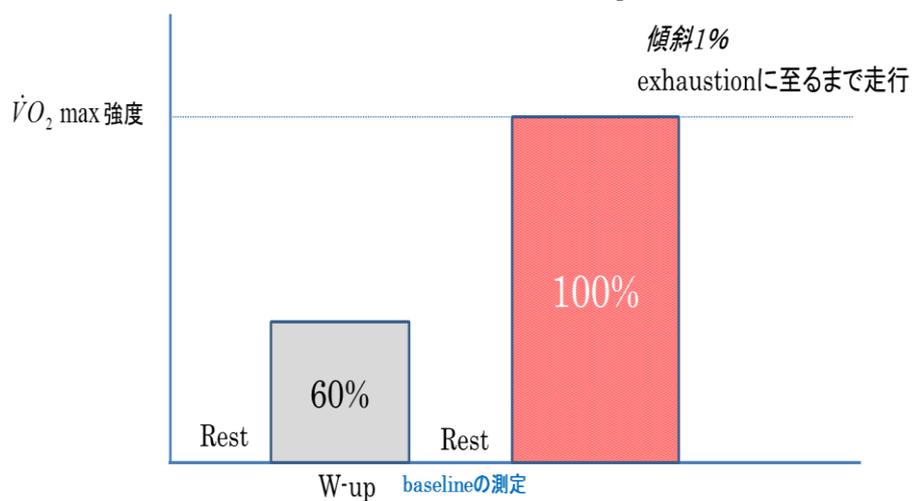


図4. 100% $\dot{V}O_2\max$ テスト

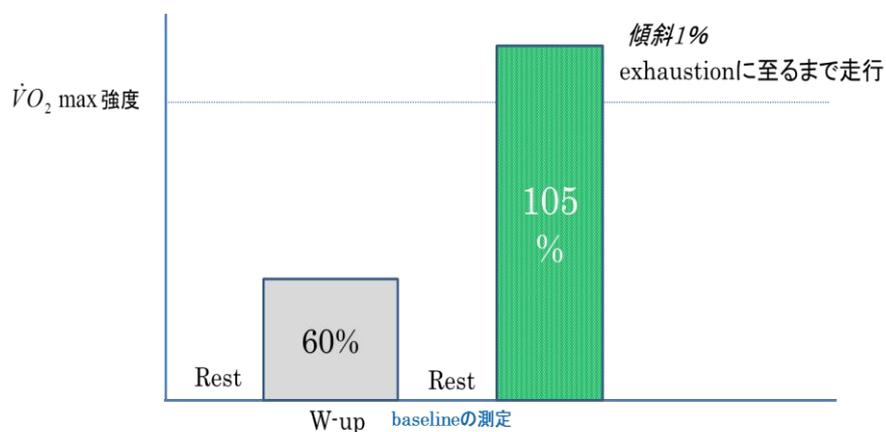


図5. 105% $\dot{V}O_2\max$ テスト

(3) 測定項目

①呼気ガスパラメータ:

呼気ガス分析器(エアロモニターAE310; ミナト医科学)により、換気量($\dot{V}E$)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)および呼吸交換比(RER)を呼気ガス採取法により、15秒平均で算出した。

30秒平均で得られた $\dot{V}O_2$ の最大値を $\dot{V}O_{2max}$ とした。 $\dot{V}O_{2max}$ の判定基準は、(1) $\dot{V}O_2$ のプラトーが出現すること、(2)RERが1.10以上であること、(3)運動後の血中乳酸濃度(Bla)が10mmol以上であること、(4)RPEが19または20であることおよび(5)運動時の心拍数(HR)の最大値が予測HR(220-暦年齢)に達していることの5項目中2項目当てはまることを条件とした。(山地 2001)

②心拍数(HR):HRモニター(Polar RS800)を用いて、HRを5秒間隔で測定した。

③血中乳酸濃度(Bla):上記の5つのテストにおける安静時、および運動後1', 3', 5', 7'に指先より採血を行い、YSI 1500Sportを用いてBlaを測定した。その中で最も高い値を用いた。

(4) 統計処理

各測定値は、すべて平均値±標準偏差で示した。平均値間の有意差の比較には対応のないt検定を実施した。統計的有意性は、危険率5%未満で有意差ありと判定した。

3. 結果

表 2. Taylor, GXT, 95%, 100%, 105% $\dot{V}O_2$ max テストにおける $\dot{V}O_2$ peak

subject	Taylor (ml/kg/min)	GXT (ml/kg/min)	95% (ml/kg/min)	100% (ml/kg/min)	105% (ml/kg/min)
A	73.3	69.2	78.6	71.8	74.0
B	65.7	66.7	71.1	65.8	61.2
C	77.5	73.6	76.6	71.7	72.6
D	77.7	75.9	86.6	72.2	68.6
E	74.2	78.0	72.4	63.2	63.9
mean	73.6	72.7	77.0	68.9	68.1
SD	4.9	4.7	6.2	4.2	5.5

表 2 に、各プロトコールの $\dot{V}O_2$ peak を示した。95%において、5000mのパフォーマンスの最も高い被験者 B の $\dot{V}O_2$ peak が他のプロトコールに比べ、顕著に高い値を示した。

表 3. Taylor, GXT, 95%, 100%, 105% $\dot{V}O_2$ max テストにおける呼気ガスパラメータ

	Taylor	GXT	95%	100%	105%
運動時間 (sec)			356.6 ± 47.7	202.6 ± 18.6	131.0 ± 40.8
baseline (ml/kg/min)			7.0 ± 0.9	6.7 ± 0.9	6.9 ± 0.7
$\dot{V}O_2$ peak (ml/kg/min)	73.6±4.9	72.9 ± 4.5	77.0 ± 6.2*	68.9 ± 4.2*	68.1 ± 5.5*
$\dot{V}CO_2$ peak (l/min)	3.86±1.56*	4.19 ± 2.07*	4.17 ± 3.58	4.31 ± 21.1*	4.27 ± 5.0
$\dot{V}E$ (l/min)	156.7±16.0	156.6 ± 16.8	153.4 ± 14.2	151.7 ± 10.1	146.6 ± 16.4
RER	1.01±0.02*	1.10 ± 0.06*	1.10 ± 0.04*	1.21 ± 0.04*	1.21 ± 0.08*
HR (bpm)	194.4±5.8*	192.2 ± 3.4*	185.6 ± 6.3*	181.0 ± 5.9*	178.0 ± 6.8*
Bla (mmol/l)	6.79±1.52	6.24 ± 1.20*	8.21 ± 2.17	8.53 ± 1.41*	8.73 ± 3.20

N=5, * ; p<0.05

表 3 に、各プロトコールの呼気ガスデータおよび心拍数、血中乳酸濃度を平均値±標準偏差で示した。 $\dot{V}O_2$ peak において、95%の $\dot{V}O_2$ peak が最も高い値であったが、Taylor およびGXTとの間には有意な差は認められなかった。 $\dot{V}CO_2$ peak, RER においては、Taylor が最も低い値を示した。HR においては、Taylor が最も高い値を示した。

4. 考察

研究課題 1 は、大学長距離ランナーを対象に、間欠的漸増負荷テスト(Taylor)、連続的漸増負荷テスト(GXT)および 95%, 100%, 105% $\dot{V}O_{2max}$ (95%, 100%, 105%) の高強度定常負荷テストにおける最高酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$ peak) を比較することを目的として行われた。その結果、95%において、最も高い $\dot{V}O_2$ peak ($77.0 \pm 6.2 \text{ ml/kg/min}$) を示し、5000mのパフォーマンスの最も高いランナー(5000m:14'57")は他の被験者に比べ顕著に高い値(86.6ml/kg/min)を示した。

$\dot{V}O_2$ peak が高いことは、有酸素性エネルギー供給の最大値が高まっていることを示し、中長距離走のパフォーマンスの向上につながると考えられる。しかし、 $\dot{V}O_{2max}$ テストが有酸素性エネルギー供給を最大限高めるプロトコールになっていなければ、中長距離ランナーの有酸素性エネルギー供給能力を過小評価してしまう可能性があると考えられる。近年では、これまでの漸増負荷テストが $\dot{V}O_{2max}$ のプロトコールとして適切であるか検証する研究も行われてきている(Mauger 2012)。本研究課題では、95%の $\dot{V}O_2$ peak が、これまで $\dot{V}O_{2max}$ テストのプロトコールとして多く採用されている二つの漸増負荷テストの $\dot{V}O_2$ peak を上回る値を示した。したがって、本研究課題の被験者において、95% $\dot{V}O_{2max}$ における定常負荷テストが他のプロトコールに比べ、有酸素性エネルギー供給を大きく引き上げるプロトコールになっていたと考えられる。

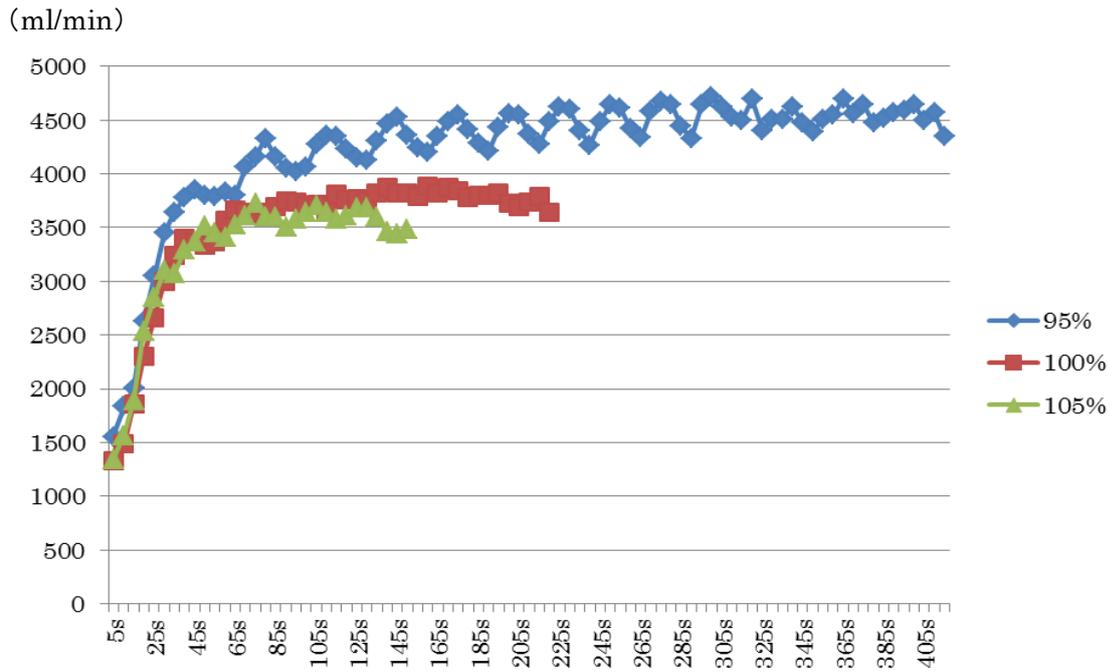


図 6. 被験者Dにおける 95%, 100%, 105%v $\dot{V}O_2$ max テスト中の $\dot{V}O_2$ の推移

5000mのパフォーマンスの最も高い(14'57")被験者Dの酸素摂取動態($\dot{V}O_2$ kinetics)を図6に示した。被験者Dの95%における $\dot{V}O_2$ kineticsは他のプロトコールに比べ、高い値で推移していた。一方、100%および105%においては95%よりも運動強度が高いにもかかわらず、運動開始から $\dot{V}O_2$ は低い値で推移し、 $\dot{V}O_2$ peakも95%の値を下回っていた。したがって、95%テストが5000mランナーの有酸素性エネルギー供給能力を測定するテストとして、漸増負荷テストよりも有効であると考えられる。しかし、100%や105%などv $\dot{V}O_2$ maxを超える超最大運動において、本研究で対象とした長距離ランナーの有酸素性エネルギー供給を最大限に高めることはできなかったものと考えられる。この原因として、有酸素性エネルギー供給機構が最大限に高まる前にexhaustionに達していたと考えられる(Hill 2002)。乳酸性閾値(LT)を上回る強度における定常負荷運動では、酸素摂取($\dot{V}O_2$)は定常状態に達することなく、運動の継続とともに緩やかに増加し、この増加した要素は緩成分(slow component)と呼ばれている(Jones et al. 2011)。95%は運動時間が6分前後と長く、運動の後半では、緩成分によって $\dot{V}O_2$ が上昇したのと考えられる。Slonigerら(1996)は、持久性ランナーにおけるslow component現象によって最大酸素摂取量($\dot{V}O_2$ max)を上回ることがないことを報告している。本研究においても同様に、95%の $\dot{V}O_2$ peak(77.0±6.2ml/kg/min)とTaylorやGXTで得られた $\dot{V}O_2$ max(73.6±4.9, 72.9±4.5ml/kg/min)との間に有意な差は認めるまでには至らなかった。ただ、図6に示した被験者Bのように、高強度定常負荷テストにおいて、TaylorやGXTなどの漸増負荷テストで測定された $\dot{V}O_2$ max(77.7ml/kg/min)を大きく上回る $\dot{V}O_2$ peak(86.6ml/kg/min)を示すランナーが存在することが確認された。

IV. 研究課題 2: プロトコールの違いがエリート 800m ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

1. 研究目的

研究課題 2 では、エリート男子中距離ランナーを対象に、中距離レースの走速度に近い超最大運動強度による定常負荷テスト行わせ、800mのパフォーマンスと酸素摂取量との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 被験者

表 4 に、研究課題2で対象にした大学男子中距離ランナー4名の身体的特性および2011年度における800mのパフォーマンスを示した。被験者には2011年男子800m日本ランキング上位者を含んでいる。

表 4. 被験者の身体的特性および800mのパフォーマンス

	身長 (cm)	体重 (kg)	800m best (' ")
A	182.0	68.0	1'51"45 (2011年度日本ランキング 38位)
B	172.7	60.2	1'48"54 (2011年度日本ランキング 6位)
C	179.5	69.4	1'51"50 (2011年度日本ランキング 40位)
D	175.0	58.0	1'52"44*
mean	177.3	63.9	

*被験者Dは、2011年度800mのレースに出場していないため、2010年度の記録

(2) 測定方法

研究課題1と同様の方法でGXT(図2)を行わせ、 $\dot{V}O_{2max}$ および $v\dot{V}O_{2max}$ を算出した。さらに、本研究課題2では105% $v\dot{V}O_{2max}$ テスト(図5)のみを行わせた。

(3) 測定項目

研究課題1と同様の方法で、呼気ガスパラメータ($\dot{V}E$ 、 $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}CO_2$ およびRER)、 Bla 、HRを測定した。

3. 結果

表 5. GXTにおける生理的パラメータ

	$\dot{v}VO_{2max}$ (km/h)	運動時間 (' ")	\dot{VO}_{2max} (ml/kg/min)	\dot{VO}_{2max} (l/min)	\dot{VCO}_2 (ml/min)	Bla (mmol)	HR peak (bpm)
A	20.4	11:30	69.6	4732.5	5122.5	8.51	194
B	19.8	11:00	67.4	4058.0	4532.5	7.73	201
C	19.8	11:20	67.8	4703.5	4900.5	9.67	195
D	21.0	13:00	72.9	4228.0	4634.0	7.75	188
mean	20.3	11:43	69.4	4430.5	4797.4	8.4	194.5

表 6. 105% $\dot{v}VO_{2max}$ の生理的パラメータ

	走速度 (km/h)	運動時間 (")	\dot{VO}_2 peak (ml/kg/min)	\dot{VO}_2 peak (l/min)	\dot{VCO}_2 (ml/min)	Bla (mmol)	HR peak (bpm)
A	21.4	210	69.3	4714.0	5650.0	13.17	190
B	20.8	241	74.4	4439.3	4978.5	11.08	193
C	20.8	222	61.0	4235.0	5089.7	9.91	190
D	22.1	184	72.8	4223.8	5030.2	10.78	186
mean	21.3	214.3	69.4	4403.0	5187.1	11.2	189.8

表 5 に、GXTで測定された $\dot{v}VO_{2max}$, \dot{VO}_{2max} , \dot{VCO}_2 , 血中乳酸濃度(Bla), 最高心拍数(HR peak)を示した。

表 6 に、105%で測定された運動時間、 \dot{VO}_2 peak, \dot{VCO}_2 , Bla, HR peak を示した。

800mのパフォーマンスの最も高い被験者Bは、2011 年日本学生陸上競技対校選手権大会男子 800mの優勝者であり、2011 年度男子 800mのランキング 6 位のランナーであるが、105%における \dot{VO}_2 peak が他の被験者に比べ最も高い値であった。

\dot{VCO}_2 peak およびBla においては、全ての被験者がGXTに比べ 105%において高い値を示した。HR peak においては、全ての被験者が 105%に比べGXTにおいて高い値を示した。

4. 考察

研究課題2は、日本のエリート800mランナーを含む大学男子中距離ランナー4名を対象に行われた。被験者の競技レベルは日本ランキング6位の被験者をはじめ、日本ランキング40位以内に位置していた。被験者Dは2011年度において、800m走のレースに出場していないが、1500m走において日本ランキング52位の3'50"44の記録を有していた。これらの一流中距離ランナーを対象に、GXTおよび105% $\dot{V}O_2\text{max}$ テストを行わせ、プロトコールによる $\dot{V}O_2\text{peak}$ の違いを明らかにすることを目的として、研究課題2は行われた。その結果、800mのパフォーマンスの最も高いランナー(1'48"54)が105%においてGXTよりも顕著に高い $\dot{V}O_2\text{peak}$ を示した。一方で、GXTで得られた $\dot{V}O_2\text{max}$ においては、被験者間で大きな差は認められず、800mのパフォーマンスが最も高い被験者Bは最も低い $\dot{V}O_2\text{max}$ (67.4ml/kg/min)を示した。以上のことは、GXTにおける $\dot{V}O_2\text{max}$ よりもむしろ、105%の $\dot{V}O_2\text{peak}$ が、研究課題2の被験者の中で800mのパフォーマンスが顕著に高いランナーを特徴づける指標として有効であることを示唆している。Sousaら(2011)は、800m走と同等の運動時間で行われる水泳の200mクロールにおける $\dot{V}O_2\text{peak}$ とパフォーマンスとの間に有意な正の相関関係が認められたと報告している。本研究における超最大運動は、800m走をシミュレートしたプロトコールではないが、105% $\dot{V}O_2\text{max}$ において $\dot{V}O_2\text{peak}$ の高いランナーは800m走のレース中においても高いレベルで酸素を取り込むことができ、レースのパフォーマンスを引き上げている可能性があると考えられる。

一方、GXTの $\dot{V}O_2\text{max}$ (67.8ml/kg/min)に比べ、105%の $\dot{V}O_2\text{peak}$ において低い値(61.0ml/kg/min)を示した被験者Cの800mのパフォーマンスは1'51"50であり、2011年度日本ランキング40位のランナーである。しかし、被験者Cの800mのベスト記録は1'50"23であり、2010年度にマークしている(日本ランキング14位)。2011年度において、被験者Cは中距離ランナーとしてベストなコンディションではなかったと考えられることから、105% $\dot{V}O_2\text{max}$ テストにおける $\dot{V}O_2\text{peak}$ は、中距離ランナーとしてベストなコンディションにあるかを推定する指標になる可能性があると考えられる。

800m走中のエネルギー代謝については、これまで有酸素性エネルギー供給と無酸素性エネルギー供給に分けて、その供給比について論じられているものが多い(Spencer and Gastin 2001)。それらの報告によると、800m走において、有酸素エネルギー機構からより多くのエネルギーが供給されるものの、無酸素性エネルギー供給能力もパフォーマンスに影響を及ぼすとしたものが多い。本研究においては最大酸素借(MAOD)(Medbø et al. 1988)など、無酸素性エネルギー供給量を定量化した指標は算出していないが、無酸素性代謝で産生される乳酸(Bla)や、その乳酸の緩衝作用と関連のある二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$) (前村ら 2005)が、GXTに比べ105%では、4名すべての被験者において高い値を示していた。平木場ら

(1990)は、過剰二酸化炭素排出量と有酸素性エネルギー供給能力との関連を示唆する報告を行っている。本研究の結果も、有酸素性エネルギー供給を最大限引き出すためには無酸素性エネルギー代謝の関与が必要であることを示しているのかもしれない。

V. 研究課題 3: プロトコールの違いが 1500m ランナーの最大酸素摂取量に及ぼす影響

1. 研究目的

本研究課題では、大学男子持久性ランナーを対象に、GXTおよび 95%、100%、105% $\dot{V}O_{2max}$ テストを行わせ、1500mのパフォーマンスと各テストプロトコールの最高酸素摂取量($\dot{V}O_2$ peak)との関係を明らかにすることを目的とした。

2. 研究方法

(1) 被験者

表 7 に、研究課題 3 で用いた大学中長距離ランナー 3 名の身体的特性および 1500mのパフォーマンスを示した。このパフォーマンスは、3 名とも測定日の直後のもの(2 週間以内)であった。

表 7. 被験者の身体的特性および 1500mのパフォーマンス

	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)	1500m (' ")
A	171	57.0	12.0	4'13"84
B	173	61.4	8.8	4'12"17
C	177	60.3	3.9	3'59"98
mean	173.7	59.6	8.2	

(2) 測定方法

傾斜 0%のトレッドミルを用い、速度の漸増については、研究課題 1、2 と同様の方法で GXT(図 2)を行わせ、 $\dot{V}O_{2max}$ および $\dot{V}O_{2max}$ を算出した。本研究課題の高強度定常負荷テストは 95%(図 3)、100%(図 4)、105% $\dot{V}O_{2max}$ テスト(図 5)を行わせた。

(3) 測定項目

① 呼吸ガスパラメータ:

換気量($\dot{V}E$)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、二酸化炭素排出量($\dot{V}CO_2$)および呼吸交換比(RER)を全自動呼吸ガス分析器(Vmax2000; Sensor Medics 社)を用いて、breath by breath 法により分析した。

30 秒平均で得られた $\dot{V}O_2$ の最大値を $\dot{V}O_{2max}$ とした。 $\dot{V}O_{2max}$ の判定基準は、(1) $\dot{V}O_2$ のプラトーが出現すること、(2) RER が 1.10 以上であること、(3) 運動後の血中乳酸濃度(Bla)が 10mmol 以上であること、(4) RPE が 19 または 20 であることおよび(5) 運動時の心拍数(HR)の最大値が予測HR(220-暦年齢)に達していることの 5 項目中 2 項目当てはまることを条件とした。(山地 2001)

② 心拍数(HR): HRモニター(Polar RS800)を用いて、HRを 5 秒間隔で測定した。

③ 血中乳酸濃度(Bla): 上記のテストにおける安静時、および運動後 1', 3', 5', 7' に指先より採血を行い、Lactate Pro(Arkray 社)を用いて Blaを測定した。その中で最も高い値を用いた。

3. 結果

表 8. GXT, 95%, 100%および 105% $\dot{V}O_{2max}$ テストにおける $\dot{V}O_{2peak}$

	GXT (ml/kg/min)	95% (ml/kg/min)	100% (ml/kg/min)	105% (ml/kg/min)
A	70.6	70.1	73.5	67.8
B	64.3	70.6		64.1
C	64.1	71.7	74.7	72.8

表 9. 95% $\dot{V}O_{2max}$ テスト

	速度 (km/h)	運動時間 (")	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (l/min)	$\dot{V}O_2/w$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (l/min)	RER	Bla (mmol/l)
A	20.0	416	141.4	4.02	70.1	4.36	1.16	13.7
B	19.4	440	144.2	4.36	70.6	4.61	1.09	11.3
C	20.5	415	135.6	4.37	71.7	4.92	1.16	11.6

表 10. 100% $\dot{V}O_{2max}$ テスト

	速度 (km/h)	運動時間 (")	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (l/min)	$\dot{V}O_2/w$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (l/min)	RER	Bla (mmol/l)
A	21.0	288	148.6	4.26	73.5	4.75	1.27	14.9
B	20.4	304						12.3
C	21.6	282	138.1	4.51	74.7	5.14	1.15	12.9

注) 被験者Bの 100% $\dot{V}O_{2max}$ テストにおける呼気ガスデータは、マスクからガス漏れの可能性があったため、欠損値とした。

表 11. 105% $\dot{V}O_{2max}$ テスト

	速度 (km/h)	運動時間 (")	$\dot{V}E$ (l/min)	$\dot{V}O_2$ (l/min)	$\dot{V}O_2/w$ (ml/kg/min)	$\dot{V}CO_2$ (l/min)	RER	Bla (mmol/l)
A	22.1	201	141.7	3.92	67.8	4.48	1.24	15.3
B	21.4	211	132.0	3.93	64.1	4.49	1.19	14.3
C	22.7	211	138.1	4.39	72.8	5.11	1.19	13.8

表 8 に、4 つのテストにおける各被験者の $\dot{V}O_2 peak$ を示した。

被験者AおよびCは 100%において最も高い $\dot{V}O_2 peak$ を示した。

表 9～11 に、95%, 100%および 105% $\dot{V}O_{2max}$ テストにおける $\dot{V}E$, $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}CO_2$, 呼吸交換比 (RER), Bla を示した。1500mのパフォーマンスの最も高い被験者Cは、100%で最も高い $\dot{V}O_2 peak$ を示し、105%においても他の被験者に比べ顕著に高い値を示した。

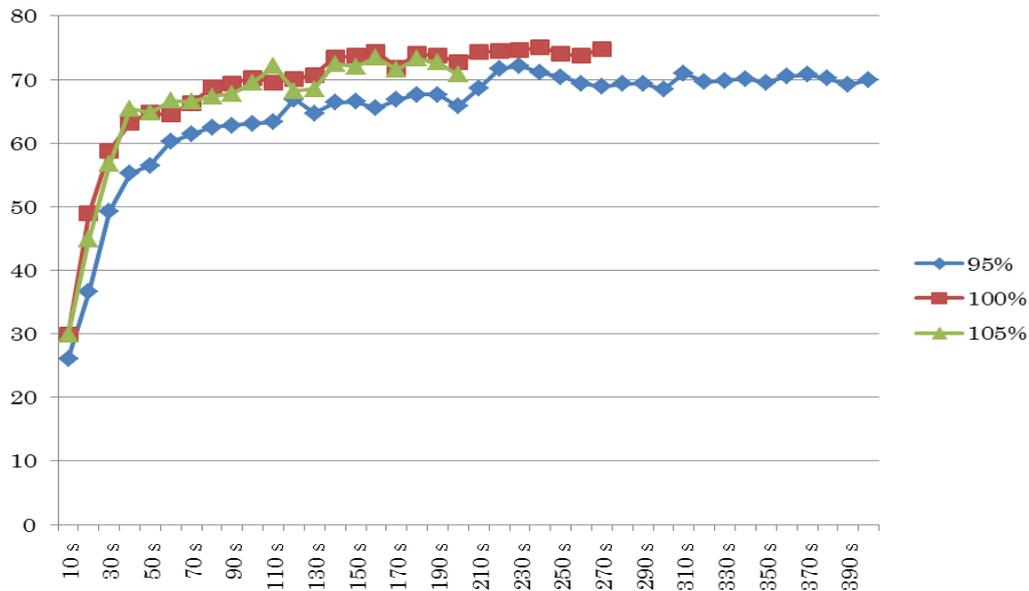


図 7. 被験者Cにおける 95%, 100%, 105%vVO₂max テスト中の VO₂ の推移

4. 考察

研究課題 3 は、大学男子中長距離ランナーを対象に、GXTおよび 95%、100%および 105% vVO₂max テストの4つのテストを行わせ、プロトコルの違いによる VO₂ peak の違いについて明らかにすることを目的として行われた。その結果、本研究課題の被験者は 100%において最も高い VO₂ peak を示した。また、1500mのパフォーマンスの最も高い被験者は、GXTにおける VO₂maxは他の被験者の VO₂ peak を下回っていたが、3つの定常負荷テスト全てにおいて、最も高い VO₂ peak を示した。以上のことから、研究課題 3 で用いたランナー間において、超最大運動による定常負荷テストにおける VO₂ peak が 1500mのパフォーマンスを決定づける要因であった可能性があると考えられる。一方、GXTにおける VO₂ peak では、研究課題 3 で対象とした最も 1500mのパフォーマンスの高い被験者Cの生理的特性を見出すことはできなかったと考えられる。

研究課題1では、95%で最も高い VO₂ peak を示した被験者が多くいたが、研究課題3においては 95%よりも 100%において高い VO₂ peak を示していた。105%において、1500mのパフォーマンスの最も高い被験者のみが他のプロトコールと同等の VO₂ peak を示した。さらに、図 7 に示されるように、被験者Cの 100%および 105%は 95%に比べ、運動開始から酸素摂取が高い値で推移していた。Murgatroyd ら(2011)は、高強度運動において酸素取り込みの応答速度が運動パフォーマンスを決定する重要な因子であることを報告している。したがって、1500m走のように運動開始から高い走速度で行われる運動において、その運動強度で必要とされるエネルギーをできるだけ有酸素性供給機構から賄うことができるかがパフォーマンスを向上させるうえで大きな鍵になると考えられる。

VI. 総括

これまで最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)を測定するテストとして漸増負荷テストが行われてきた。漸増負荷テストによって $\dot{V}O_{2max}$ 以外の有酸素性能力を示す指標である乳酸性閾値(LT)、ランニングエコノミー(RE)が測定されるようになり、有酸素性エネルギー供給に関しては最大値のみで評価するのではなく、無酸素性代謝にいかにか依存せずに運動が継続できるかといったことや、エネルギーをいかに節約できるかといったことも評価できるようになってきた。そのため、近年、エネルギーを最大限に発揮してパフォーマンスを向上させるといった視点で研究が行われることが少なくなっている。

本研究は、エリート中距離ランナーにおいて、最大限にエネルギーを産生する能力がパフォーマンスを向上させるという仮説をもとに行われた。中距離ランナーとして対象にしたのは4名とも日本の上位にランクする800mランナーであり、その中でも最も高いパフォーマンスを示したランナーは $105\%v\dot{V}O_{2max}$ テストにおける $\dot{V}O_2$ peak において最も高い値を示し、GXTで得られた $\dot{V}O_{2max}$ の値を大きく上回っていた。このランナーは、中距離ランナーとして必要な生理学的適応能力を有していると考えられる。また、中距離ランナーとしてのコンディショニングがうまくいっているか評価する指標として、レース強度に近い定常負荷テストの $\dot{V}O_2$ peak が利用できる可能性が示唆された。また、エリートではないが、長距離を専門とするランナーや1500mに向けたトレーニングを行っているランナーを対象に、超最大運動強度の定常負荷テストを行った結果、長距離ランナーでは95%、1500mランナーでは100%とそれぞれの専門種目の運動強度に近い走速度において最も高い $\dot{V}O_2$ peak を示していた。自らの専門種目に向けたトレーニングは、その専門種目の走速度(強度)で行われることが多く、その強度で生理学的に適応したコンディションになっていると考えられる。その結果、高いレベルの中長距離ランナーは、専門とする種目のレース中において、他の種目に比べ、高いレベルで酸素を取り込みながら走行しているものと考えられる。

本研究によって、超最大運動における定常負荷テストにおける $\dot{V}O_2$ peak が、エリート中距離ランナーの生理学的特性を特徴づける可能性が示唆された。運動中の酸素摂取量は、活動筋の酸素消費に大きく左右されることから、超最大運動中に、どの筋が活動するかといったことは $\dot{V}O_2$ peak に影響するものと考えられる。今後、走行中の表面筋電図(EMG)による筋電位をもとに、超最大運動における $\dot{V}O_2$ peak に影響を及ぼす下肢の筋活動の特徴を明らかにする研究が行われることで、中距離レース中にエネルギーを最大限に産生するという観点から、中距離ランナーにおける筋力トレーニングや技術トレーニングの有効性を提示することができるものと考えられる。

VII. 謝辞

本研究は、上月スポーツ教育財団の支援を受けて行ったものである。

本研究の実施にあたり、実験に協力していただいた筑波大学陸上競技部中長距離ブロックの選手ならびにコーチの榎本靖士氏、大分大学陸上競技部の選手ならびに監督の谷口勇一氏に深く感謝いたします。

なお、本研究の一部は、第 66 回日本体力医学会および第 62 回日本体育学会において発表した。

VII. 参考文献

Astorino TA, White AC.(2010) Assessment of anaerobic power to verify $\dot{V}O_2$ max attainment. Clin Physiol Funct Imaging. 30(4):294-300.

Billat V, Renoux JC, Pinoteau J, Petit B, Koralsztein JP.(1994) Reproducibility of running time to exhaustion at $\dot{V}O_2$ max in subelite runners. Med Sci Sports Exerc. 26(2):254-7.

Duffield R, Bishop D(2008), $\dot{V}O_2$ Responses to Running Speeds Above $\dot{V}O_2$ max. Int J Sports Med. 29:494-499

Hill DW, Poole DC, Smith JC. The relationship between power and the time to achieve $\dot{V}O_2$ (2max). Med Sci Sports Exerc. 2002 Apr;34(4):709-14.

平木場浩二, 丸山敦夫, 美坂光治(1990)運動時の乳酸生成による CO_2 過剰排出と持久性パフォーマンスとの関係. 体力科学, 39 : 69-77.

Jones AM, Grassi B, Christensen PM, Krusturup P, Bangsbo J, Poole DC. (2011) Slow component of $\dot{V}O_2$ kinetics: mechanistic bases and practical applications. Med Sci Sports Exerc.;43(11):2046-62.

Kirkeberg JM, Dalleck LC, Kamphoff CS, Pettitt RW.(2011) Validity of 3 protocols for verifying $\dot{V}O_2$ max. Int J Sports Med. 32(4):266-70.

前村公彦, 鈴木康弘, 高松 薫. 過剰 CO_2 排出量と短時間高強度運動パフォーマンスとの関係(2005)過剰 CO_2 排出量の測定方法の相違に着目して. 体育学研究 50(1)27-35.

Mauger AR, Sculthorpe N.(2012) A New $\dot{V}O_2$ max Protocol Allowing Self-Pacing in Maximal Incremental Exercise. Br J Sports Med. 46:59-63.

Medbø JI, Mohn AC, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit. J Appl Physiol. 1988 Jan;64(1):50-60.

Midgley AW, McNaughton LR, Jones AM. (2007) Training to enhance the physiological determinants of long-distance running performance: can valid recommendations be given to runners and coaches based on current scientific knowledge? *Sports Med.* 37(10):857-80.

Murgatroyd SR, Ferguson C, Ward SA, Whipp BJ, Rossiter HB. (2011) Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *J Appl Physiol.* 110(6):1598-606.

Sloniger MA, Cureton KJ, Carrasco DI, Prior BM, Rowe DA, Thompson RW.(1996) Effect of the slow-component rise in oxygen uptake on $\dot{V}O_{2max}$. *Med Sci Sports Exerc.* 28(1):72-8.

Sousa AC, Figueiredo P, Oliveira NL, Oliveira J, Silva AJ, Keskinen KL, Rodríguez FA, Machado LJ, Vilas-Boas JP, Fernandes RJ. (2011) $\dot{V}O_2$ kinetics in 200-m race-pace front crawl swimming. *Int J Sports Med.* 32(10):765-70.

Spencer and Gatin,(2001) Energy system contribution during 200- to 1500-m running in highly trained athletes. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 33 No.1 157-162

Taylor HL, Buskirk E, Henschel A. (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cardiorespiratory performance. *J Appl Physiol* ;8:73-80.

Thomas C, Hanon C, Perrey S, Le Chevalier JM, Couturier A, Vandewalle H.(2005) Oxygen uptake response to an 800-m running race.*Int J Sports Med.* 26(4):268-73.

山地啓司(1998), 最高有酸素的ランニング速度($\dot{v}VO_{2max}$)の意義と評価. 日本生理学雑誌第 5 巻第 1 号, 89-99.

山地啓司(2001) $\dot{V}O_{2max}$ の測定法-直接法-, 改訂第 2 版 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院:東京, pp.3-42.