Japan Society of Exercise and Sports Physiology

日本運動生理学雑誌
第5巻第1号 89～99, 1998

最高有酸素的ランニング速度（v$\dot{V}O_2$max）の意義と評価

山地啓司

Significance and Assessment of the Velocity at $\dot{V}O_2$max (v$\dot{V}O_2$max)

Keiji YAMAJI

Abstract

The concept of a maximal aerobic running velocity (running velocity associated with $\dot{V}O_2$max; v$\dot{V}O_2$max or velocity in an incremental test at which $\dot{V}O_2$ max was elicited) was first introduced in 1984 by Daniels et al and formulated in 1986 by di Prampero. Since that, it was become clear by many researchers that good estimations of over 1500m to marathon running performance among elite and subelite runners could be derived from v$\dot{V}O_2$max and time to exhaustion during exercise at the velocity associated with $\dot{V}O_2$max. A summary of findings from datas which have been reported indicated that the mean running time to exhaustion at v$\dot{V}O_2$max was about 5 to 8 minute, the reproducibility was a high significant correlation, and the mean coefficient correlation, and the mean coefficient of variation (CV) ranged from 16 to 25 in well-traind runners. However, the conceivable reasons of this wide variation have not been revealed.

Considering to take advantage of v$\dot{V}O_2$max as being the index for workload of endurance training, an experimental method and protocol as following is recommended for determination of v$\dot{V}O_2$max; (1) the initial speed was set at a running velocity (0% slope) corresponding to 110 to 130 beats·min^{-1} heart rate (HR) and was increased 10 m·min^{-1} every one minute up to exhaustion. (2) in the last 30 sec of each stage, $\dot{V}O_2$ and HR were obtained and calculated for one minute values. (3) v$\dot{V}O_2$max was the last running velocity that reached to examination. v$\dot{V}O_2$max which was obtained such as this method was not always corresponded to running velocity which $\dot{V}O_2$max was elicited. Therefore, we can identify it as "a pseudo-v$\dot{V}O_2$max".

Key words: Maximal aerobic running velocity, $\dot{V}O_2$max
Running time to exhaustion at v$\dot{V}O_2$max

I．はじめに

全身持久性の作業成績は有酸素的エネルギー発生と無酸素的エネルギー発生の大きさ，すなわち，どれだけ大きな運動のエネルギーを単位時間に発生し，持続するかに負う。たとえば，陸上競技の競技種目で考えるならば，有酸素的エネルギー発生は約3～10分間の競技時間である1500m，3000m，3000m障害では，最大酸素摂取量（$\dot{V}O_2$max）の大きさ，それ以上の時間や距離（5000m以上）の競技では，さらに，酸素摂取水準（%$\dot{V}O_2$max）あるい

富山大学教育学部
Faculty of Education, Toyama University

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

はその決定に深く関与する無酸素的作業閾値（AT）等が指標となる。

これらの有酸素的エネルギー発生と無酸素的エネルギー発生の総和は，個人がいかに大きなエネルギーをある限られた時間や距離の中で発揮できるかの能力を示す。そのエネルギー発生の大きさや持続性は発生したエネルギーをいかに有効にランニングの推進力を高めるために使うか，すなわち，ランニングの効率（efficiency）や経済性（economy）の優劣とは本質的に別の問題である。仮に，無酸素的エネルギー発生を無視して有酸素的エネルギー発生からランニングの競技記録あるいは競技中の平均ランニング速度（$\bar{v}$; m/sec^{-1}）をみると次の式が成り立つ。

3分＜ET＜10分　$\bar{v}=a\times\dot{V}o_2max\times RE$ …… (1)

10分≦ET　$\bar{v}=a\times\dot{V}o_2max\times\%\dot{V}o_2max\times RE$ …… (2)

ただし，

ET(min)＝競技時間

$\dot{V}o_2max$(ml・kg^{-1}・min^{-1})＝最大酸素摂取量

$\%\dot{V}o_2max$＝酸素摂取水準

RE(ml・kg^{-1}・min^{-1}/RS)＝ランニングの経済性

RS(m・min^{-1})＝ランニング速度

このように，競技中の平均ランニング速度（$\bar{v}$）は数多くの因子によって左右されることになる。これらの因子を総合的に示し，しかもトレーニングの場で有効に利用できる新たな指標が広く求められてきた。その一つの考え方が，1985年Daniels[18]によって提唱された$\dot{V}o_2max$に相当するランニング・スピード（running velocity associated with $\dot{V}o_2max$; $v\dot{V}o_2max$）である。そして翌年di Plampero[20]は，$v\dot{V}o_2max$の意義と有効性を理論的に証明した。その後，アメリカ[15,25,26,36,37]やフランス[2,6,31,39]の研究者によって，$v\dot{V}o_2max$あるいは$v\dot{V}o_2max$でのランニング持続時間と全身持久性の体力やperformanceとの関連性が明らかにされてきた。

そこで，本総説は運動様式をランニングに限定して$v\dot{V}o_2max$の意義や評価，さらには測定方法の問題点について論議しつつ，ランニングの指導やトレーニングにいかに応用できるかを探ることを目的とした。

Ⅱ．$\dot{V}o_2max$に相当するランニング速度（$v\dot{V}o_2max$）が意味するもの

A．$v\dot{V}o_2max$の研究のはじまり

1937年，Robinson et al[42]は一流競技者と一般人の$\dot{V}o_2max$を測定することによって，全身持久性の体力を競うランナーの$\dot{V}o_2max$が一般人に比べて約2倍近く大きいことを認めた。それ以来，$\dot{V}o_2max$が全身持久性の有力な指標として広く用いられてきた[11,43,49]。しかし，その一方で$\dot{V}o_2max$と競技記録やレースの平均ランニング速度との間に密接な関係が認められないという報告も少なくない[12,20,29,36,40,44]。これらの報告の特徴は被験者の競技記録や$\dot{V}o_2max$の上，下限が小さい場合（homogenous）に両者に有意な関係が認められなくなることである。たとえば，Sjödin and Svedenhag[44]はマラソンの競技記録が2時間10分から4時間以内のランナー75人の$\dot{V}o_2max$とマラソン・レースの平均ランニング速度との間にr＝0.78（p＜0.001）の関係が認められるものの，2時間30分以内のランナーに限定するとr＝0.01（p＞0.1）で有意な関係が認められない。

また，Conley and Krahenbuhl[10]，Costill and Winrow[13]，Daniels[17]，Noakes[38]，山地[50]は同じ$\dot{V}o_2max$でありながら競技記録に差があったり，競技記録が同じであっても$\dot{V}o_2max$に差がある原因がランニングの経済性（running economy）にあることを確認した。たとえば1985年にDaniels[18]は二人の女子ランナーの$\dot{V}o_2max$が73.3ml・kg^{-1}・min^{-1}と60.4ml・kg^{-1}・min^{-1}となりその差が12.9ml・kg^{-1}・min^{-1}と大きな違いにもかかわらず，3000m走のベスト記録が9分06秒と9分07秒とほぼ等しくなるのは両者のランニングの経済性の相違に負う。すなわち，$\dot{V}o_2max$とランニングの経済性の二つの要素が加味された要因が二人の$\dot{V}o_2max$に相当するランニング速度によって表出されることを明らかにした（図1）。この考えは，Daniels et al[19]が1984年に開催されたオリンピック科学会議で発表した，30名の女子ランナーを対象にしたトレッドミルのランニング速度と$\dot{V}o_2$直線から$\dot{V}o_2max$に相当するランニング速度を$v\dot{V}o_2max$と名付け，performanceと密接な関係があることを明らかにしたことに基づくものである。

翌年di Prampero et al[20]は，ランニングの競技成績を決める因子が$\dot{V}o_2max$，$\%\dot{V}o_2max$とランニングの経済性に負うとし，それらの三因子を総合的に判断する指標を理論的に明らかにした。それは，ラ

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

ンニング中に発揮される代謝量の大きさ（E; ml・kg^{-1}・min^{-1}）はランニング走行時のエネルギー出力（C; ml・kg^{-1}・ml^{-1}）と速度（v; m・min^{-1}）によることから，

$E=C\cdot v$ …… (3)

の式が成り立つ。さらに，Eの最大値で示すと

$Emax=C\cdot vmax$ …… (4)

となる。(4)式からvmaxは

$vmax=Emax/C$ …… (5)

に置き換えられる。長距離走のEmaxは酸素負債量を無視すると，Emaxが$\dot{V}o_2max$に近似することから，

$Emax\fallingdotseq F\cdot \dot{V}o_2max$ …… (6)

となる。すなわち，ランニングレース中に維持される理論値の最高の平均速度（vmax）は

$vmax=F\cdot \dot{V}o_2max/C$ …… (7)

によって求められるとした（ただし，Fは$\%\dot{V}o_2max$）。

そして，実際に36人（17～52歳）のフル・マラソンやハーフ・マラソンレースにおける平均ランニング速度（$\bar{v}$）との間に

$\bar{v}=1.12+0.64vmax$ ($r^2=0.72$) …… (8)

の関係式を導き出した。そして，$\bar{v}$と$\dot{V}o_2max$，F・$\dot{V}o_2max$，$\dot{V}o_2max\cdot C^{-1}$との間にそれぞれ$r^2=0.51$，$r^2=0.58$，$r^2=0.63$の有意な関係を認め，式(8)によって，実際のランニング・レースにおける平均ランニング速度が予測できるとした。

$v\dot{V}o_2max$が全身持久性の有力な指標となることを不動なものにしたのがMorgan et al[36,37]である。Morgan et al[36,37]はDaniels[18]と同様，$\dot{V}o_2max$だけではレース中のランニング・スピードを決めることが困難であり，これにランニングの経済性を加味した指標である$v\dot{V}o_2max$によって10kmレースにおける平均ランニング・スピードを決定することが可能であるとした。さらに，十分トレーニングされた男子ランナーの比較的$\dot{V}o_2max$の上，下限が大きなグループ（heterogenous group）とその中から3名を除いた$\dot{V}o_2max$の上，下限が小さなグループ（homogenous group）と比較すると表1が得られた。すなわち，heterogenous groupでは10kmレースの記録と$\dot{V}o_2max$との間に有意な関係（$p<0.05$）が認められたがhomogenous groupになると両者に有意な関係（$p>0.05$）が認められなくなった。しかし，10kmレースの記録と$v\dot{V}o_2max$や血中乳酸が4mmolを越える地点のランニング速度（vLT）との間には有意な関係（$p<0.01$）が認められた。その結果，$\dot{V}o_2max$はランニング・レースにおいて優れた競技成績をあげる重要な因子である。その上に，$\dot{V}o_2max$に大きな差のないhomogenousなグループ間ではランニングの経済性が競技成績を決めると結論した。

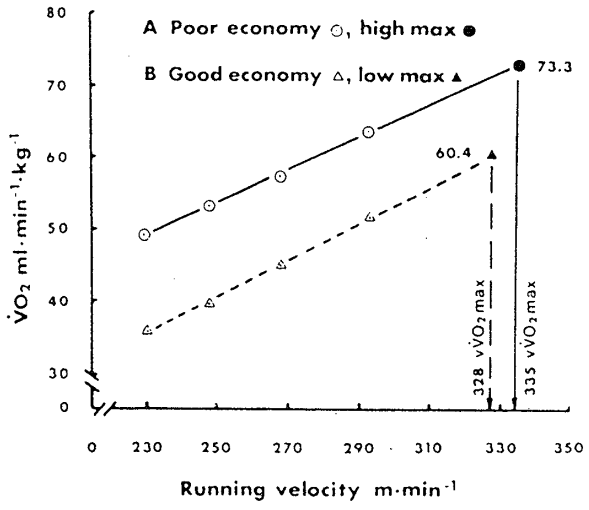

Fig. 1. $\dot{V}o_2$ at four velocities and $\dot{V}o_2max$ for two elite female distance runners. Best 3000-m time were 9:06 for A and 9:07 for B, which are closely refrected by their $v\dot{V}o_2max$ data (Daniels, 1985).

Table 1. Correlations among 10 km run time (RT) and $\dot{V}o_2max$, running economy (RE), predicted velocity at $\dot{V}o_2max$ ($v\dot{V}o_2max$), and treadmill velocity at a 4 m*M* blood lactate concentration (v at 4 m*M* BL) in well-trained male runners heterogeneous (study 1) and homogeneous (study 2) in $\dot{V}o_2max$ (Margan et al, 1989).

Comparison	Study 1 (*N*=13)	Study 2 (*N*=10)
10km RT vs $\dot{V}o_2max$	r=-0.55*	r=-0.45
10km RT vs RE	r= 0.30	r= 0.64*
10km RT vs $v\dot{V}o_2max$	r=-0.78†	r=-0.87†
10km RT vs V at 4m*M* BL	r=-0.85†	r=-0.82†

* $P\leq 0.05$.

† $P\leq 0.01$.

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

B．v$\dot{V}O_2$maxの求め方

1．$\dot{V}O_2$−RS直線から求める方法

Morgan et al[37]は230，248，268，293m・min^{-1}の各速度で6分間ずつ，計24分間トレッドミル走を行い，その時の$\dot{V}O_2$とランニング・スピード（RS）との直線から，別に測定した$\dot{V}O_2$maxに相当するランニング速度（predicted velocity at $\dot{V}O_2$max）を求めた（図2）。Cunningham[15]は24名の女子ランナー（15.9±1.0歳）を対象にしたため，Morgan et al[37]よりも遅い160，188，215および241m・min^{-1}のランニング速度で，各速度4分間，計16分間のトレッドミル走を行い，その後241m・min^{-1}の速度を固定し，一分ごとに2.5％ずつ傾斜角度を漸増する方法で$\dot{V}O_2$maxを求め，Morgan et al[37]と同様，作図法でv$\dot{V}O_2$maxを求めた。

2．推定式による方法

Lacour et alの研究グループ[31,39]は，中距離ランナーを対象に$\dot{V}O_2$maxに相当するランニングスピード（running velocity corresponding to $\dot{V}O_2$max; Vamax）を

$$Vamax=(\dot{V}O_2max-0.083)\cdot C_R^{-1} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (9)$$

式から求めた。ただし，$\dot{V}O_2$max(ml・kg^{-1}・S^{-1})，Vamax(m・S^{-1})，C_R=energy cost of running(ml・kg^{-1}・m^{-1})，すなわち，$C_R=(\dot{V}O_2-0.083)\cdot v^{-1}$となる。なお，最大下のランニング速度として5.42m・S^{-1}(325.2m・min^{-1})を採用した。また，0.083ml・kg^{-1}・S^{-1}はMedbø et al[34]より導かれた$\dot{V}O_2$/vの関係式のY軸との交点に相当する$\dot{V}O_2$の値である。

トレッドミルの最初のランニング速度を10.3km・h^{-1}とし，その速度で4分間走って1分間休息をはさみ，その後は4分ごとに1.54km・h^{-1}漸増しながら，しかもランニング速度が変わる際に1分間の休息をとりながら（intermittent exercise），被験者がexhaustionを訴えるまでランニングを行った。そして，exhaustionに達した時の$\dot{V}O_2$を$\dot{V}O_2$maxとした。

3．ランニング速度の漸増法による方法

Billat et al[6]は$\dot{V}O_2$maxが導き出す最低速度（minimum speed that elicits $\dot{V}O_2$max）を最高有酸素的ランニング速度（maximal aerobic speed）とし，男性の長距離ランナー（29±3歳）を対象にv$\dot{V}O_2$maxを測定した。その時用いた方法は，最初のトレッドミル速度を12km・h^{-1}（0％傾斜）で開始し，3分ごとに2km・h^{-1}を高める漸増法で被験者の3kmレースの平均ランニング速度の80％まで高め，その後1分ごとに1km・h^{-1}ずつ高めた。各ランニング速度の後半の30秒間の$\dot{V}O_2$の2倍を各速度における1分間の$\dot{V}O_2$とし，exhaustionに達した時の$\dot{V}O_2$を$\dot{V}O_2$max，その時のランニング速度をv$\dot{V}O_2$maxとした。

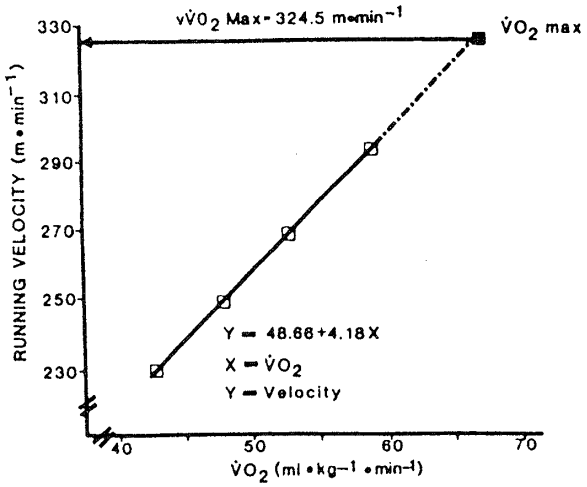

Fig. 2. How to estimate a velocity at $\dot{V}O_2$ max from a relationship between running velocity and $\dot{V}O_2$ at four running velocities (230, 248, 268, 293 m•min^{-1}) (Morgan et al, 1989).

また，Hill and Rowell[25,26]は13人の大学女子トラック種目の競技選手のv$\dot{V}O_2$max（velocity associated with $\dot{V}O_2$max）を求めた。まず，3回の5分間走を間に5分間の休息をはさみながら行い，その後2分ごとに13m・min^{-1}高める漸増法でexhaustionに達するまで走り続けた。後はBillart et al[6]と同様の手法によりv$\dot{V}O_2$maxを求めた。

Berthon et al[2]はトレッドミルの傾斜角度を1％と固定し，5～6回の漸増でexhaustionに達するように最初のランニング速度を設定した。さらに，3分ごとに1.5km・h^{-1}ずつ高めるランニング速度の漸増法を採用し，その後はBillart et al[6]と同様の手法を用いてv$\dot{V}O_2$maxを求めた。

4．v$\dot{V}O_2$maxの測定上の問題点

a. 水平走行か傾斜走行か

表2に示されているように，これまでのv$\dot{V}O_2$maxの測定はトレッドミルを水平に固定したランニングで行うことが多い。一般に長距離ランナーの$\dot{V}O_2$maxは傾斜走行の時に比べて水平走行の方が同じかあるいは若干高い[49]。したがって，v$\dot{V}O_2$maxのトレーニング等への汎用性を考えると水平走行が望ましい。しかし，水平走行ではトレッドミルの速度が

NII-Electronic Library Service

Table 2. Protocols and methods of determining $\dot{V}O_2max$

	Morgan et al (1989)[36]	Cunningham (1990)[15]	Lacour et al (1990)[31] & Padillar et al (1992)[39]	Billat et al (1994)[6]	Hill & Rowell (1996[25]; 1997[26])
Subjects Sex	M	F	M+F	M	F
Age (yrs)	27.3±3.6	15.7	23.7±3.5	29±3	university students
Holizontal or uphill	holizontal	holizontal +uphill	holizontal	holizontal	holizontal
Continuous or discontinuous	continuous	continuous	disconti. (1 min rest)	continuous	disconti. (5 min rest)
$\dot{V}O_2$-RS line or curved line	line	line	curved line	curved line	curved line
Initial velocity ($m \cdot min^{-1}$)	230	160	172	200	241
Running time for one stage (min)	6	4	4	3	2
Running velocity between each stage ($m \cdot min^{-1}$)	18～25	26.7	26.7	33	13

300m・min^{-1}を越えることが多いので，トレッドミルに安全装置が施されていること，しかも被験者がトレッドミル走に熟達した若いランナーであることが条件となる。

b. 連続か不連続か

トレッドミル走を一時中断して休息をとるプロトコールは休息中に血中乳酸の測定の採血が行われる場合がある[25,26,31,39]。たとえば，Lacour et al[31]やPadillar et al[39]は1分間の，また，Hill and Rowell[25,26]は5分間の休息期に採血を行っている。一方，Morgan et al[36]やCunningham[15]は1段階のランニング時間を4～6分と長くとり，運動中に採血を実施している。採血を休息期に行うことは，正確にしかも安全に測定するという意味では有利ではあるが，ランニングを中断することによってリズムをこわす不利もある。特に，$\dot{V}O_2$－RS直線を求める際の簡便さを追及する意味では，ランニングが連続的にexhaustionまで行われることが理想である。

c. $\dot{V}O_2$－RS関係は直線か曲線か

Morgan et al[36]やCunningham[15]は最大下のランニング中に得られたランニング速度と$\dot{V}O_2$との関係から$\dot{V}O_2$－RS直線を求め，その直線の延長上に$\dot{V}O_2max$が存在すると仮定した。すなわち，この考え方は$\dot{V}O_2$とRSとがどこまでも直線的な関係を保つとしたものである。これに対して，Lacour et al[31]，Billat et al[6]，Hill and Rowell[25,26]はランニング速度の高まりとともに$\dot{V}O_2$が増加するものの，exhaustion近くなると$\dot{V}O_2$の増加率が徐々に低下し，$\dot{V}O_2$に定常状態が現れる，すなわち，$\dot{V}O_2$－RSは曲線と考えた。

Taylor et al[46]は$\dot{V}O_2max$発現の評価基準として作業負荷を高めても$\dot{V}O_2$に2.0ml・kg^{-1}・min^{-1}以上の増加が認められないこと，を挙げている。しかし，$\dot{V}O_2max$の測定の際exhaustion近くなって現れるプラトー現象はかならずしも全被験者に出現するとは限らない。たとえば，Cumming and Friesen[14]やCunningham et al[15]は少年では50％以下しか，また，老人では約75％しかプラトー現象が認められないとしている。一般成人を対象にしたトレッドミル走では，Pollock et al[41]が約80％，Faulkner et al[22]が92％，Katch et al[28]は61％にプラトー現象を認めている。一般に，十分トレーニングされた選手ではプラトー現象の発現率は高い[45]。これらの報告を考慮するとたとえ一般人とはいえ，$\dot{V}O_2$－RSを単純に直線と考えるよりはむしろ曲線と考え，ランニング速度の漸増法で$\dot{V}O_2$とRSとの関係を被験者ごとに明らかにすることが必要である。

d. 第一段階のランニング速度

歩行に近いランニング速度からexhaustionまでのランニング速度の間の$\dot{V}O_2$－RS曲線は厳密にはS字カーブを描く。たとえば，Brooke and Hamley[7]は軽度の作業から中等度の作業にかけて描かれる低増加率の曲線をanticipatory phase，中等度の作業から重度の作業に至る直線をlinear phase，そして重度からexhaustionに至る徐々に増加率が低下する曲線をexhaustion phaseとそれぞれ区分した。歩行に近いランニング速度でみられるanticipatory phaseを排除するためには，第一段階のランニング

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

速度が被験者の年齢や性，体力やトレッドミルにおけるランニング技術からみて至適でなければならない。これまで報告されている $v\dot{V}o_2max$ 測定の際の作業最初（第一段階）のランニング速度は男子では約200～241m・min^{-1}，女子では約160～170m・min^{-1}となる（表2参照）。筆者らの研究[50]では，若いランナーであれば男子150～230m・min^{-1}，女子120～200m・min^{-1}の範囲であれば心拍数は100～120拍／分となり，HR－RSが直線となることを確認している。この心拍数の範囲はWahlund[48]の PWC_{170} の測定の際の第一段階の負荷作業である1分間の心拍数115～130拍／分に近似するものであった。ただ，$\dot{V}o_2$－RSの関係を作図法で求める時はanticipatory phaseを除去して作図することができるので，第一段階のランニング速度の選択は強すぎないことだけを考慮すれば良いので容易となる。

e. 各段階のランニング時間と段階間のランニング速度の差

これまでの研究[2, 6, 26, 36]の多くが血中乳酸の測定と並行しながらランニング速度と $\dot{V}o_2$ との関係を求めているため，各段階のランニング時間には2～6分の幅がある。各ランニング速度での血中乳酸の測定を正確に行うためには，定常状態が発現する3～6分の時間が各段階で必要である。しかし，ランニング速度の漸増幅が小さい場合には定常状態の発現はより短時間で出現する。特に，血中乳酸を測定しない場合には，ランニングの漸増は短時間に繰り返される。たとえば，1分ごとに10m・min^{-1}ずつ高めることも可能である。Conconiテストの提唱者Conconi et al[9]は，ランニング速度とHRの正確な関係をみるためには16～24回の段階で，各段階間の心拍数は8beats・min^{-1}以下が望ましいとしている。筆者などの研究[50]では，この条件を満たすためには，1分ごとに10m・min^{-1}ずつ高めるランニング速度の漸増が望ましいことを確認している。北村など[30]は漸増負荷法で自転車駆動を行う際180kpm・min^{-1}を4分ごと，1分ごと，15秒ごとの異なった三つの漸増法で行った時に得られるHR－$\dot{V}o_2$直線が著しく近似することから，定常状態と非定常状態の運動で得られたHR－$\dot{V}o_2$直線に差がないと結論した。さらに，筆者など[50]は，全自動の代謝測定機器で1分ごとに10m・min^{-1}ずつ高めるランニング速度の漸増中，各段階の30秒間の前後のランニング速度と $\dot{V}o_2$ との関係式から，同一速度での両者の $\dot{V}o_2$ の相違がわずか3～4 ml・kg^{-1}・min^{-1}以下であることを確認している。

これらのことを考えると，16～24個の $\dot{V}o_2$ とランニング速度の関係のプロットを得るためには，各段階の漸増は1分ごとに10m・min^{-1}あるいは1mile・min^{-1}がトレッドミルを運転する側からみても理想である。さらに，各ランニング速度の $\dot{V}o_2$ は後半の30秒間の値を2倍したものを採用することが望ましい。

f. 考えられる至適な $v\dot{V}o_2max$ の測定法

a～e項から考えられる至適な $v\dot{V}o_2max$ の測定方法はトレッドミルの傾斜角度を零とし，1分ごとに10m・min^{-1}ずつ高める速度の漸増法で行う。被験者の体力に合わせて心拍数が100～120beats・min^{-1}の範囲のランニング速度とし，約16～24段階の漸増が可能なような第一段階のランニング速度を選ぶ。w－upの際にランニング速度と心拍数との関係から，第一段階のランニング速度を決定することが可能である。$\dot{V}o_2$ は30秒ごとに測定し，各ランニング速度の31～60秒間の $\dot{V}o_2$ の2倍をそのランニング速度の $\dot{V}o_2$ とする。そして，exhaustionに達した時点の速度をもって $v\dot{V}o_2max$ とする。たとえば，ランニング速度を漸増中に被験者が検者にexhaustionを訴えた場合には漸増しようとしたランニング速度を $v\dot{V}o_2max$ とする。これはマスクやマウスピースを装着した場合よりも取り除いた方がexhaustion timeが延びるからである。$\dot{V}o_2max$ は各ランニング速度の後半の30秒間の最も大きな値とする。したがって，このようにして求められた $v\dot{V}o_2max$ はかならずしも $\dot{V}o_2max$ が発現した時の最高ランニング速度というわけではないので，“みなし $v\dot{V}o_2max$”ともいえる。しかし，上記のようにして求められた $v\dot{V}o_2max$ をもって“$v\dot{V}o_2max$ とする”ことを論文作成の際には明記することによって混乱を未然に防ぐことができる。

しかし，$v\dot{V}o_2max$ の至適な測定方法については種々の条件を設定して，繰り返しテストを行いながら検討してゆくことが必要であろう。

Ⅲ．$v\dot{V}o_2max$ と生理学的要素や競技記録との関係

A．$v\dot{V}o_2max$ と生理学的要素との関係

$v\dot{V}o_2max$ が全身持久性のperformanceを左右する $\dot{V}o_2max$，$\%\dot{V}o_2max$，running economyの三つの要

NII-Electronic Library Service

素を加味した要素であることから $v\dot{V}o_2max$ は $\dot{V}o_2max$[20]，$\%\dot{V}o_2max$（VT あるいは LT）[21,44] あるいはランニングの経済性[20] と密接な関係を有する。たとえば，Lacour et al[31] は LT（4mmol）$=0.86v\dot{V}o_2max+0.04$（$r=0.92$; $p<0.001$）の関係式を，また，vVT と $v\dot{V}o_2max$ との間に $r=0.72$（$p<0.001$）[15] などの関係を報告している。

B．$v\dot{V}o_2max$ と競技記録との関係

di Prampero et al[20] が17～52歳のアマチュアランナーのフル・マラソン・レース中の平均速度と $v\dot{V}o_2max$ との間に有意な関係（$p<0.001$）を報告して以来，多くの研究者[2,15,20,31,36,39] によって1500m からフル・マラソン・レースの平均速度（$\bar{v}$）と $v\dot{V}o_2max$ との間に密接な関係が報告されている（表3）。中でも，$v\dot{V}o_2max$ は1000m の平均速度[35] や1500～3000m の平均速度[31] とより密接な関係があり，一方，800m の平均速度（$m\cdot S^{-1}$）と $v\dot{V}o_2max$ との間には有意な関係（$p>0.1$）が認められていない[2,31,39]。これらのことは，後で述べる $v\dot{V}o_2max$ の持続時間が約5～8分であることと無関係ではあるまい。

Ⅳ．$v\dot{V}o_2max$ の持続時間（t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$）

最近，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間が aerobic と anaerobic の両方の要素を加味した体力の評価基準として重要視されてきた[6,25]。また，LaVoie and Mercer[33] は自転車駆動における $\dot{V}o_2max$ の発現に相当する負荷での持続時間が生理学的な体力やコンディションだけでなく，心理状態（意欲等）をも把握する有力な指標となっていることを指摘した。その後フランスからの報告[6,31,39] やアメリカからの報告[25,26] によって，$\dot{V}o_2max$ が発現した時のランニング速度における持続時間（time to exhaustion at $\dot{V}o_2max$）が種々の視点から研究されている。

A．$v\dot{V}o_2max$ の持続時間と生理学的要素との関係

Lacour et al[32] は $v\dot{V}o_2max$ の持続時間（秒）と $\dot{V}o_2max$（$ml\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$）および乳酸性作業閾値

Table 3. The coefficient of correlation between selected phygiologic variables and running time to exhaustion at $v\dot{V}o_2max$ or an average velocity at various distance races.

Items / References	Subjects	n	Sex	Distance races	Correlation for selected physiological and performance variables				Correlation (r) between performance and $v\dot{V}o_2max$
					$\dot{V}o_2max$ ($ml\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1}$)	$v\dot{V}o_2max$	$\dot{V}o_2$ at AT	vVT	
di Prampero et al (1986)[20]	amateur runners	36	M	full-marathon		0.849			$Vamax=1.56Vmarathon-1.74$ ($m\cdot sec^{-1}$)
Morgan et al (1989)[36]	well-trained runners		M	10km run time					
	heterogenous in $\dot{V}o_2max$	13			-0.55	-0.78		-0.85	
	homogenous in $\dot{V}o_2max$	10			-0.45	-0.87		-0.82	
Cunningham (1990)[15]	runners	24	F	5-km cross-country race	-0.69	0.77	-0.66	0.78	
Lacour et al (1990)[31]	athletes		M	800m		NS			
		24	M	1500m		0.62			$Vamax=0.90\bar{V}_{1500m}+0.10$
			M	3000m		0.64			
		13	M	5000m		0.86			$Vamax=1.3\bar{V}_{5000m}-1.6$
Lacour et al (1991)[32]	athletes	24	M+F	1500m (v:$m\cdot sec^{-1}$)		0.90			$Vamax=0.89\bar{V}_{1500m}+0.42$ ($m\cdot sec^{-1}$)
Padilla et al (1992)[39]	middle-distance runners			800m (v:$m\cdot sec^{-1}$)		NS			
		14	F	1500m (〃)		0.72			
		10	F	3000m (〃)		0.66			
		24	M	1500m (〃)		0.62			
		18	M	3000m (〃)		0.64			
Berthon et al (1997)[2]	volunteers			800m ($m\cdot sec^{-1}$)		NS			
		12		1500m (〃)		0.97			$Vamax(5)=0.79\bar{V}_{1500m}+0.73$
		9		3000m (〃)		0.97			$=1.03\bar{V}_{3000m}-0.22$
		9		5000m (〃)		0.95			$=1.04\bar{V}_{5000m}-0.10$
		12		10000m (〃)		0.95			$=0.93\bar{V}_{10000m}+0.69$
		13		half-marathon		0.96			$=0.83\bar{V}_{HM}+1.44$

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

(LTの%$\dot{V}o_2max$) との間に,

$v\dot{V}o_2max$ の持続時間(秒)

$=850.0-6.80\times\dot{V}o_2max(ml\cdot kg^{-1}\cdot min^{-1})$

$r=-0.349(p<0.05)$

$v\dot{V}o_2max$ の持続時間(秒)

$=-100.43+5.96\times LT(\%\dot{V}o_2max)$

$r=0.378(p<0.05)$

が成り立つことを，また，Billat et al[6]は $v\dot{V}o_2max$ の持続時間 (t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$) と $v\dot{V}o_2max$ との間に,

t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$(秒)

$=1088.7-335\times v\dot{V}o_2max(km\cdot h^{-1})$

$r=-0.362(p<0.05)$

が成り立つことを認めた。また，$\dot{V}o_2max$ や16kmにおけるランニングの経済性との間に有意な関係 ($p>0.1$) が認められなかったものの，3000mレースの記録，LT (%$\dot{V}o_2max$)，ハーフ・マラソン・レースの平均速度との間に密接な関係を認めた[6]。

したがって，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間が$\dot{V}o_2max$ やランニングの経済性よりもむしろ，競技記録やレース中の平均速度と密接な関係があることから，全身持久性のperformanceの指標としてより至適であるとみなした。

B．再現性と変動係数 (CV)

Billat et al[5]は8名の準エリートランナーの $v\dot{V}o_2max$ における持続時間 (t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$) の第一回目のテストが404±101秒，一週間後の第二回目のテストが402±113秒となり，両テストの間に $r=0.864$ の有意 ($p<0.001$) な関係を認めた。しかし，変動係数 (CV) は25%となり，個人の持続時間に大きな変動が生じることが明らかとなった。同年Hill and Rowell[25]は13人の女子トラック選手を対象にした $v\dot{V}o_2max$ の持続時間の変動係数 (CV) が21%であったと報告した。また，Hill et al[27]は6人の元大学トラックチーム選手を対象にした研究で変動係数が16%であったことを報告している。この個人内変動の要因を追及するためには $v\dot{V}o_2max$ の持続時間に関与する因子の分析が必要となる。Billat et al[6]はHill[24]が導き出した式から，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間 (t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$) が

t_{LIM} at $\dot{V}o_2max$

$=$anaerobic capacity$/(v\dot{V}o_2max-$vAT)

の式によって導き出されるとした。そこでHill and Rowell[25]は，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間がanaerobic capacity，vAT，$v\dot{V}o_2max$ によって左右されることから，個人内変動がこれらの因子によってどれだけ説明されるかを求めた。その結果，anaerobic capacity 26%，vAT 44%，$v\dot{V}o_2max$ 12%，そしてこの三つの要素を合わせたanaerobic$/(v\dot{V}o_2max-$vAT) によって36%が説明されるとした。このことから，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間にみられる大きな個人の変動係数 (21%) は，anaerobic capacity，vAT，$v\dot{V}o_2max$ あるいはこれらの生理学的因子を合わせたものよりも他の要因に負うところが大きいことが明らかである。この他の要因として心理学的要因や環境条件の要因等が考えられるが，具体的にはこれから解決してゆかなければならない問題である。

C．$v\dot{V}o_2max$ の持続時間

表4に示されているように，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間は，男子が約400～480秒，女子がそれよりも約60～110秒短い290～420秒である。男女合わせると約5～8分である。この値はBillat et al[6]が $v\dot{V}o_2max$ の持続時間は5～8分間と結論づけたものと一致するものであった。また，100mからフル・マラソンまでのランニング速度と対数目盛の記録（時間）の関係からみて，有酸素的エネルギー発生と無酸素的エネルギー発生が50%ずつとなると考えられる点の4.97分[8]やMontmayeur and Villaret[35]の $v\dot{V}o_2max$ の持続時間の推定値4.95分に近似するものであった。さらに，最も新しいBerthon et al[2]の報告でも $v\dot{V}o_2max$ の持続時間を測定するフィールドテストの最も適切な時間が5分であるとしている。この考えは，5分間走で得られた平均ランニング速度 ($17.1km\cdot h^{-1}$) が，トレッドミル走によって得られた $v\dot{V}o_2max$ ($16.9km\cdot h^{-1}$) より速く，トラック・フィールドで自転車の速度の漸増に合わせて疾走することによって得られた $v\dot{V}o_2max$ ($18.2km\cdot h^{-1}$) より遅いという結果から結論づけられたものである。

一方ではKatch et al[28]のように実験室で測定される $\dot{V}o_2max$ と競技記録との関係を調べる際，一定速度のランニング時間として5分以上走る必要がないとした意見もある。いずれにしろ，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間の約5～8分というのは1500～3000mの競技時間に相当すること，Lacour et al[31]の，$v\dot{V}o_2max$ が3000mレースの平均速度 ($\bar{v}$) にほぼ等しいという報告からみても妥当な値である。

NII-Electronic Library Service

Table 4. Running time to exhaustion (t_{LIM} at $v\dot{V}o_2max$) at the velocity associated with $\dot{V}o_2max$ ($v\dot{V}o_2max$)

Items / References	Subjects	n	Sex	Age (yrs)	$\dot{V}o_2max$ ($ml \cdot kg^{-1} \cdot min^{-1}$)	$v\dot{V}o_2max$ ($m \cdot min^{-1}$)	t_{LIM} at $v\dot{V}o_2max$ (sec)
Higgs (1973)[23]	active college women	20	F		41.3		278
Volkov et al (1975)[47]	recreational women	4	F		60.8±3.2		308±15
Lacour et al (1990)[31]	middle-distance runners	27	M	23.7±3.4	71.3±4.5	364.8±18.0	480±42 $v\dot{V}o_2max$=V at 3000m
Padilla et al (1992)[39]	middle-distance runners	14	F	24.1±4.2	65.3±5.0	325.2±19.2	420±132
		24	M	23.7±3.5	71.9±4.2	357.0±15.0	504±126
Billat et al (1994)[6]	subelite runners	8	M	29.0±3.0	69.5±4.2	354.2±18.3	first time=404±101 second time=402±113 r=0.864
Hill & Rowell (1996)[25] Hill & Rowell (1997)[26]	university track team (400m～5000m)	13	F	19.0±1.0	52.1±5.1	271.0±18.0	290±61
Hill et al (1997)[27]	former members of a university track team	6	M	24.0±4.0	61.6±9.1	271.0±18.0	330±85

Hill and Rowell[26]は Anderson[1]や Billat[4]の考えを基にして，トレーニングの目的が $v\dot{V}o_2max$ の持続速度を延ばすことであれば，$v\dot{V}o_2max$ は最も至適なトレーニング強度である。特に，$v\dot{V}o_2max$ のトレーニングは呼吸・循環機能（central）の改善よりもむしろ末消組織（peripheral）の改善に役立つ。逆に $v\dot{V}o_2max$ の持続時間を基礎として $v\dot{V}o_2max$ の改善を目的としたインターバル・トレーニングを行う際には，$v\dot{V}o_2max$ の持続時間の60％が至適な速度かもしれない，とみなしている。しかし，これらの考えは推測の域を脱していない。$v\dot{V}o_2max$ や $v\dot{V}o_2max$ の持続時間をいかにトレーニングやレースの場で生かしていくかはこれからの問題である。

引用文献

1) Anderson O (1994) To optimize your performance, train "A la Veronique" Running Res Nov-Dec, 1-4. Cited by Hill and Rowell (1997)
2) Berthon P, Eellmann N, Bedu M, Beaune B, Dabonneville M, Coudert J and Chamoux A (1997) A 5-min running field test as a measurement of maximal aerobic velocity. Eur J Appl Physiol 75, 233-238.
3) Berthoin S, Gerbeaux M, Turpin E, Guerrin F, Lensel-Carbeil G and Vandendorpe F (1994) Comparison of two field tests to estimate maximum aerobic speed. J Sports Sci 12, 355-362.
4) Billat V (1991) Course de Fond et Performance. Paris: Editions Chiron, pp 103-242. Cited by Hill and Rowell (1997)
5) Billat L V and Koralsztein J P (1996) Significance of the velocity at $\dot{V}o_2max$ and time to exhaustion at this velocity. Sports Med 22, 90-108.
6) Billat V, Renoux J C, Pinoteau J, Petit B and Koralstein J P (1994) Reproducibility of running time to exhaustion at $\dot{V}o_2max$ in subelite runners. Med Sci Sports Exerc 26, 254-257.
7) Brooke J D and Hamley E J (1972) The heart-rate-physical work curve analysis for the prediction of exhausting work ability. Med Sci Sports 4, 23-26.
8) Chamoux A, Berthon P and Laubignat J F (1996) Determination of maximum aerobic velocity by a 5-minute test with reference to world running records. A theoretical approach. Arch Int Physiol Biochem 104, 207-211.
9) Conconi F, Grazzi G, Casoni I, Guglielmini C, Borretto C, Ballarin E, Mazzoni G, Patracchini M and Manfredini F (1996) The conconi test: Methodology after 12 years of application. Int J Sports Med 17, 509-519.
10) Conley D L and Krahenbuhl G (1980) Running economy and distance running performance of high-

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

ly trained athletes. Med Sci Sports Exerc 12, 357-360.
11) Costill D L, Coté R and Fink W (1976) Muscle water and electrolytes following varied levels of dehydration in man. J Appl Physiol 40, 6-11.
12) Costill D L, Fink W J and Pollock M L (1976) Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. Med Sci Sports 8, 96-100.
13) Costill D L and Winrow E (1970) A comparison of two middle aged ultramarathon runners. Res Q Exerc Sport 41, 135-139.
14) Cumming G R and Friesen W (1967) Bicycle ergometer measurement of maximal oxygen uptake in children. Can J Physiol Pharmacol 45, 937-946.
15) Cunningham L N (1990) Relationship of running economy, ventilatory threshold, and maximal oxygen consumption to running performance in high school females. Res Q Exerc Sport 61, 369-374.
16) Cunningham D A, Goode P B and Critz J B (1975) Cardiorespiratory response to exercise on a rowing and bicycle ergometer. Med Sci Sports 7, 37-43.
17) Daniels J (1974) Physiological characteristics of champion male athletes. Res Q Exerc Sport 45, 342-348.
18) Daniels J T (1985) A physiologist's view of running economy. Med Sci Sports Exerc 17, 332-338.
19) Daniels J, Scardina N, Hayes J and Foley P (1984) Elite and subelite female middle-and long-distance runners. In: Sport and Elite Performances, Landers D M (Ed). Champaign, IL: Human Kinetics, 1984 pp 57-72.
20) di Prampero, Atchou G, Brückner J C and Moia C (1986) The energetics of endurance running. Eur J Appl Physiol 55, 259-266.
21) Farrell P A, Wilmore J H, Coyle E F, Billing J E and Costill D L (1979) Plasma lactate accumulation and distance running performance. Med Sci Sports 11, 338-344.
22) Faulkner J A, Kollias C B, Favour C B, Buskirk E R and Balke B (1968) Maximum aerobic capacity and running performance at altitude. J Appl Physiol 24, 685-691.
23) Higgs S L (1973) Maximal oxygen intake and maximal work performance of active college women. Res Q 44, 125-131.
24) Hill D W (1993) The critical power concept. Sports Med 16, 237-254.
25) Hill D W and Rowell A L (1996) Significance of time to exhaustion during exercise at the velocity associated with $\dot{V}o_2max$. Eur J Appl Physiol 72, 383-386.
26) Hill D W and Rowell A L (1997) Responses to exercise at the velocity associated with $\dot{V}o_2max$. Med Sci Sports Exerc 29, 113-116.
27) Hill D W, Williams C S and Burt S E (1997) Responses to exercise at 92% and 100% of the velocity associated with $\dot{V}o_2max$. Int J Sports Med 18, 325-329.
28) Katch V L, Sady S S and Freedson P (1982) Biological variability in maximum aerobic power. Med Sci Sports Exerc 14, 21-25.
29) Kenney W L and Hodgson J L (1985) Variables predictive of performance in elite middle-distance runners. Brit J Sports Med 19, 207-209.
30) 北村潔和，鳥海清司，布村忠弘，堀田朋基 (1991) 定常状態と非定常状態の運動で得られた HR-$\dot{V}o_2$関係．体力科学 4，372-373.
31) Lacour J R, Padilla-Magunacelaya S, Barthélémy J C and Dormois O (1990) The energetics of middle-distance running. Eur J Appl Physiol 60, 38-43.
32) Lacour J R, Padilla-Mayunacelaya S, Chatard J C and Barthélémy C (1991) Assessment of running velocity at maximal oxygen uptake. Eur J Appl Physiol 62, 77-82.
33) LaVoie N F and Mercer T H (1987) Incremental and constant-load determinations of $\dot{V}o_2max$ and maximal constant-load performance time. Can J Spt Sci 12, 229-232.
34) Medbø J R, Mohn A C, Tabata I, Bahr R, Vaage O and Sejersted O M (1988) Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O_2 deficit. J Appl Physiol 64, 50-60.
35) Montmayeur A and Villaret M (1997) Etude de la vitesse maximale aérobic der rière cycliste. Sci Montricité 10, 27-31.
36) Morgan D W, Baldini F D, Martin P E and Kohrt W M (1989) Ten kilometer performance and predicted velocity at $\dot{V}o_2max$ among well-trained male runners. Med Sci Sports Exerc 21, 78-83.
37) Morgan D W, Martin P E and Kohrt W M (1986) Relationship between distance-running performance and velocity at $\dot{V}o_2max$ in well-trained runners. Med Sci Sports Exerc 18 (Suppl), S37.
38) Noakes T D (1988) Implications of exercise testing for prediction of athletic performance: a con-

NII-Electronic Library Service

Japan Society of Exercise and Sports Physiology

temporary perspective. Med Sci Sports Exerc 20, 319-330.
39) Padilla S, Bourdin M, Barthélémy J C and Lacour J R (1992) Physiological correlates of middle-distance running performance. A comparative study between men and women. Eur J Appl Physiol 65, 561-566.
40) Pollock M L (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part 1: Cardiorespiratory aspects. Ann N Y Acad Sci 301, 310-321.
41) Pollock M L, Bohannon R L, Cooper K H, Ayres J J, Ward A, White S R and Linnerud A C (1976) A comparative analysis of four protocols for maximal treadmill stress testing. Am Heart J 92, 39-46.
42) Robison S (1938) Experimental studies of physical fitness in relation to age. Arbeitphysiol 10, 251-323.
43) Saltin B and Åstrand P-O (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. J Appl Physiol 23, 353-358.
44) Sjödin B and Svedenhag J (1985) Applied physiology of marathon running. Sports Med 2, 83-99.
45) Stamford B A (1976) Step increment versus constant load tests for determination of maximal oxygen consumption. Eur J Appl Physiol 35, 89-93.
46) Taylor H L, Buskirk E and Henschel A (1955) Maximal oxygen intake as an objective measure of cardio-respiratoy performance. J Appl Physiol 8, 73-80.
47) Volkov N I, Shirkovets E A and Borilkevich V E (1975) Assessment of aerobic and anaerobic capacity of athletes in treadmill running tests. Eur J Appl Physiol 34, 121-130.
48) Wahlund H (1948) Determination of the physical working capacity. A physiological and clinical study with special reference to standardisation of cardiopulmonary functional test. Acta Med Scand Suppl 215, 1-78.
49) 山地啓司 最大酸素摂取量の科学. 杏林書院 1992 pp22-23.
50) 山地啓司 田中佐和子 北川鉄人 (1997) Conconi テストにおける心拍作業閾値(HRT), Deflection Velocity, HRmax とランニング持続時間の意義. Jpn J Biomech Sports Exerc 1, 228-236.

(平成9年11月26日受理)

NII-Electronic Library Service