

運動負荷漸増に伴う酸素摂取量と心拍数の関係 —AT（無酸素性作業閾値）との関連から—

塩野谷 明*・橋本 哲雄*

THE RELATIONSHIPS BETWEEN $\dot{V}O_2$ AND HR WITH EXERCISE. —From points of AT (Anaerobic Threshold) —

Akira SHIONOYA and Tetuo HASIMOTO

It is well-known that the relationship between oxygen-uptake ($\dot{V}O_2$) and heart rate (HR) is correlative (positive) in the middle level of exercise load. But it is not understood how is the middle level of exercise load for the relationship between $\dot{V}O_2$ and HR being in order. In this paper we reported the relationship between $\dot{V}O_2$ and HR with an exercise from points of AT (Anaerobic threshold).

To find out the AT of each subjects, $\dot{V}O_2$, $\dot{V}E$ (Ventilation expier), $\dot{V}CO_2$ (Ventilation CO_2), O_2 rate ($\dot{V}O_2/\dot{V}E$), FEO_2 , $FECO_2$ and HR were measured during an exhaust test using an exercise load system AY 500-T. AT was determined at the point when there was a rapid increase in $\dot{V}E$ and when $FECO_2$ started to decrease.

The results of the experiment led us to decide:

- 1) The middle level of exercise load is equal to the level to AnT (Anaerobic threshold)
- 2) The threshold being equal to AnT is point of transition from aerobic metabolism to anaerobic metabolism.

Key Words: Oxygen uptake/Heart rate/AT (Anaerobic threshold)

1. 緒 言

酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) および最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) は、有酸素性機構による運動能力の指標として競技選手のトレーニングや一般人の体力トレーニング等に広く利用されている。この酸素摂取量は中程度の強度の運動では、心拍数との間に直線関係のあること¹⁾は周知の事実で、この関係を利用して心拍数から酸素摂取量や最大酸素摂取量を推定する方法が開発、製品化²⁾されている。特に最大酸素摂取量の運動負荷テストによる測定の場合、運動強度が被験者の生理的なほぼ限界にまで達することから、安全確保の面が非常に問題となるが、この心拍数からの推定方法では運動強度が中程度で行われるため、安全面および一般の体力トレーニングのための測定には非常に有効な手段となる。

しかし運動強度が漸増され、代謝活動の高進した筋

による O_2 需要に対するミトコンドリアへの O_2 供給の不足、さらに O_2 需要—供給の不均衡に伴う、ピルビン酸の乳酸への移行をともなった細胞内での無酸素性解糖の増大、その結果として乳酸の蓄積と、乳酸から遊離した H^+ の、 HCO_3^- による細胞内での緩衝、重炭素系による緩衝作用による発生する CO_2 に起因する $\dot{V}CO_2$ の増加、このような酸塩基平衡の変動がもたらす、ガス交換の変化等といった生体に見られる変化が起こる³⁾と、酸素摂取量と心拍数の直線関係は崩れていくことが考えられる。こういった生体内の変化は一般に AT (Anaerobic threshold: 無酸素性作業閾値)、VT (Ventilation threshold: 換気性閾値)、LT (Lactate threshold)、OBLA (On set of blood lactate) 等として知られるが、本稿からの一連の研究ではこの AT と関連させ、そこから考えられる生体内の変化が、酸素摂取量と心拍数の相関関係(係数)の負荷漸増運動に伴う時系列上での変化とどういった関係があるのかについて検討していく。本第一報では、Wasserman⁴⁾⁵⁾⁶⁾ および Skinner, McLellan⁷⁾ さらに根

原稿受付 平成2年5月31日

*長岡技術科学大学 体育・保健センター

本、宮下⁹⁾ら AT の考え方・提唱に基づいた方向からの、上記関係および酸素摂取量と心拍数の2因子の相関関係が成り立つ中程度の運動強度の具体的な強度などについて報告する。

2. 方 法

実験は長岡技術科学大学・体育保険センター運動機能実験室において、一定気温(摂氏25度)および湿度(50%)の環境下において実施した。

被験者は、16歳から19歳までの健康で日常何等かの運動を習慣としている(主として競技者)男子10名であった。尚被験者の形態等は表1を参照する。

方法はモナーク社製自転車エルゴメーター7kp型を用いた自転車駆動運動によって行った。運動強度は、0kpを3分間駆動させたのた、毎分0.25kp毎のステップ式負荷漸増報で被験者が疲労困憊(all out)に至るまで行った。運転速度は、メトロノームに合わせて1分間に50回転(50rpm, 50revolution per minute)のペダリング頻度で行った。

測定はチェスト社製運動負荷システムAY500-Tを用い、被験者が疲労困憊に至るまでの換気量($\dot{V}E$)、酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、酸素消費濃度(FEO_2)、二酸化炭素排出濃度($FE\text{CO}_2$)、呼吸商(R)、心拍数(HR)を記録、コンピューターによる電算処理を行った。また心拍数については日本光電社製マルチテレメータシステムを用い、R-R間隔より数値の校正を行った。また今回用いた運動負荷システムのプログラムは、15秒毎の呼吸応答を積算するため、各測定項目の最大値の決定は前後4区間の平均値(但し4点移動平均法)を持って決定した¹⁰⁾。

尚被験者の疲労困憊の時点は被験者の判断に併せて、酸素摂取量のレベルオフ、心拍数、呼吸商等の数値をもって決定した。

ATの決定は、Skinner and McLellan¹¹⁾の理論および萌芽期における根本、宮下の提言に基づいて、急上昇する $\dot{V}E$ および $FE\text{CO}_2$ (または $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$)のピークからAnTが発現する作業負荷値、さらに $\dot{V}E$ と $\dot{V}CO_2$ の非直線的上昇点と $\dot{V}O_2/\dot{V}E$ のピークによりAerTが発現する作業負荷値の2つから決定した(図1参照)。以上についての詳細は、結果・考察の中において行う。

尚自転車駆動を0.25kp/minの負荷漸増とした点では、Wassermann¹³⁾らが4分間毎に15wattずつ漸増する負荷試験と、1分間15wattずつ増加する負荷試験の比較から、負荷の上昇に対するLA(乳酸値)ある

いは肺換気動態の変動には多少の差異が見られるが、ATの測定値自体には差がなかったことを報告している初期の論文に基づいている。またこれに対して、1分間の漸増では生体が定常状態にならない危険性もあるため、負荷漸増強度を0.25kp/minと小さくした。

このような条件で求めたAT(AerTおよびAerT)を境界として得られる3領域で、換気動態の変化特に

Table 1 Characteristics of each subjects

Sub	Height	Weight	Sex	%Fat	LBM	Athlete or not
A	168.0	68.0	M	11.0	60.5	Athlete
B	168.0	65.0	M	13.3	56.2	Athlete
C	171.0	56.0	M	14.3	48.0	Athlete
D	170.0	68.0	M	15.8	57.3	Athlete
E	170.6	63.5	M	15.8	52.5	Athlete
F	162.0	53.0	M	14.4	45.4	Athlete
G	165.0	59.0	M	20.6	46.8	Athlete
H	165.0	61.0	M	13.7	52.6	Non-Athlete
I	173.8	65.7	M	9.5	59.5	Athlete
J	155.5	49.2	M	10.6	43.9	Athlete

酸素摂取量と心拍数の相関関係から多方向に渡って検討を加えた。

3. 結 果

表2は、今回の測定における各被験者の酸素摂取量(以下 $\dot{V}O_2$)、換気量(以下 $\dot{V}E$)、心拍数(以下HR)の最大値(以下max)を示している。 $\dot{V}O_2\text{max}$ は被験者Aの74.28ml/kg*minを最高に、平均58.27ml/kg*min(SD=9.68)であった。 $\dot{V}E\text{max}$ は被験者Iの127.77l/minが最高で、平均106.39l/min(SD=15.39)であった。またHRmaxは、平均189.0beats/min(SD=6.48)であった。

表3は、各被験者のAerTの発現時における $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、HRを示している。AerT- $\dot{V}O_2$ は平均36.83ml/kg*min(SD=5.97)で、63.52%(SD=6.79) $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する。AerT- $\dot{V}E$ は平均48.67l/min(SD=8.46)で、46.00%(SD=6.09) $\dot{V}E\text{max}$ に相当する。またAerT-HRは平均145.00beats/min(SD=8.50)で、これは78.16%(SD=3.71)HRmaxに相当する。

第4は、各被験者のAnTの発現時における $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、HRを示している。AnT- $\dot{V}O_2$ は平均47.61ml/kg*min(SD=8.74)で、これは81.60%(SD=5.32) $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する。AnT- $\dot{V}E$ は平均72.91l/min(SD=15.91)で、これは68.29%(SD=7.87) $\dot{V}E\text{max}$ に相当する。AnT-HRは169.60beats/min(SD=8.

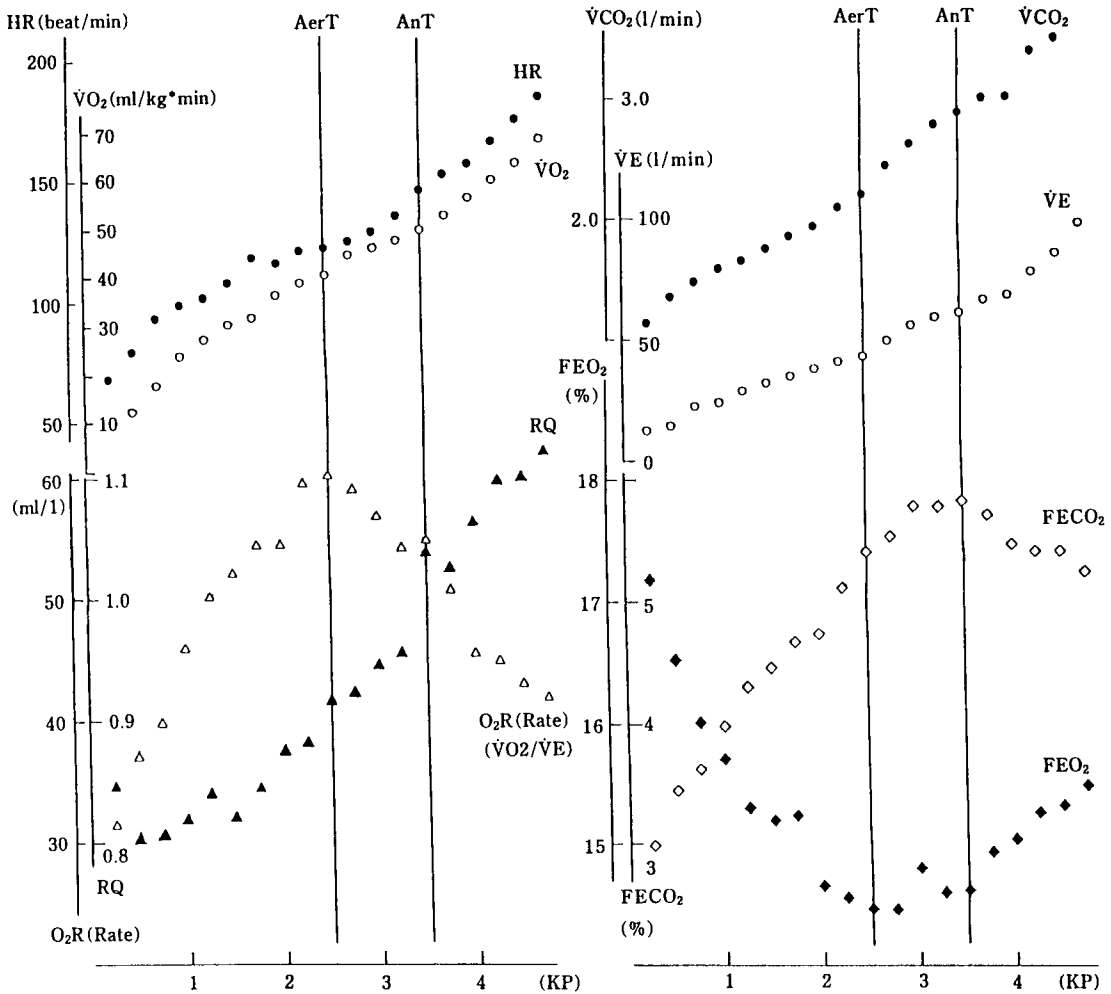


Fig. 1 Example of aerobic threshold (AerT) and anaerobic threshold (AnT) determination. AerT was determined by nonlinear increase in $\dot{V}E$ and $\dot{V}CO_2$, and peak ($\dot{V}O_2/\dot{V}E$) while AnT was estimated from break-away $\dot{V}E$ and the onset of decrease in $FECO_2$.

Table 2 $\dot{V}O_{2max}$, $\dot{V}E_{max}$, HR_{max} of each subjects

Sub	$\dot{V}O_{2max}$ (ml/kg*min)	$\dot{V}E_{max}$ (l/min)	HR_{max} (beats/min)
A	74.28	125.59	190
B	64.7	97.17	191
C	58.08	121.66	178
D	55.51	115.92	180
E	54.15	110.22	176
F	48.48	98.19	196
G	50.90	106.62	187
H	43.50	84.88	180
I	74.25	127.77	189
J	59.38	80.93	189
AVE	58.27	106.39	189.0
S.D	9.68	15.39	6.48

71) で、91.43% (SD=8.71) で91.43% (SD=3.56) HR_{max} に相当した。

表5は、このAerTおよびAnTを決定したことによって大別される負荷漸増運動の3つのPhaseに関連して、運動開始からAerTまで、AerTからAnTまで、AnTから運動終了まで、そして、運動開始からAnTまでの $\dot{V}O_2$ とのHRの相関関係について示している。

運動開始からAerT発現時 (From start to AerT) における両者の相関は平成0.97701 (SD=0.012893) と非常に高く、すべての被験者において99%水準で有意な相関が得られた。

AerT発現時からAnT発現時 (From AerT to

Table 3 AerT of each subject

Sub	AerT- $\dot{V}O_2$ (ml/kg*min)	% $\dot{V}O_2$ (%)	AerT- $\dot{V}E$ (l/min)	% $\dot{V}E$ (%)	AerT-HR (beats/min)	%HR (%)
A	42.99	57.88	56.82	45.24	149	78.42
B	41.03	63.93	49.42	53.62	146	76.43
C	35.83	61.69	53.85	44.26	146	82.02
D	43.63	78.59	65.50	56.59	150	83.33
E	29.60	54.66	40.75	36.97	130	74.29
F	29.10	60.00	40.06	40.74	149	76.02
G	34.65	68.07	52.78	49.50	152	81.28
H	27.60	63.40	37.96	44.72	127	70.55
I	42.23	56.88	49.00	38.35	149	78.84
J	41.65	70.14	40.50	50.40	152	80.42
AVE	36.83	63.52	48.67	46.00	145.0	78.16
S.D	5.97	6.79	8.46	6.09	8.50	3.71

Table 4 AnT of each subjects

Sub	AerT- $\dot{V}O_2$ (ml/kg*min)	% $\dot{V}O_2$ (%)	AerT- $\dot{V}E$ (l/min)	% $\dot{V}E$ (%)	AerT-HR (beats/min)	%HR (%)
A	64.12	86.32	100.26	79.83	180	94.73
B	49.48	77.11	58.73	63.72	170	89.01
C	52.06	89.63	92.32	75.88	172	96.62
D	49.67	89.48	89.94	77.59	169	93.89
E	39.99	73.85	64.30	58.33	154	88.00
F	37.48	77.31	56.03	57.07	175	89.28
G	41.41	81.36	70.34	65.97	161	86.09
H	34.59	79.51	57.07	67.24	158	87.87
I	57.05	76.84	79.14	61.94	180	95.24
J	50.23	84.59	60.93	75.29	177	93.65
AVE	47.61	81.60	72.91	68.29	169.6	91.43
S.D	8.74	5.32	15.91	7.87	8.71	3.56

AnT)における相関は平均0.906989 (SD=0.074142)とこれも非常に高い相関が得られ、やはりすべての被験者において99%水準で有意な相関が得られた。

AnT 発現時から運動終了時 (From AnT to end) における相関は、平均0.350994 (SD=0.507277)とこのPhaseにおいて極端な低下が見られ、有意な相関が得られた被験者はB, E, Gの3名に留まった。また被験者Iにおいては相関係数-0.624946で、95%水準で有意な負の相関が得られた。

運動開始からAnT 発現時 (From start to AnT) における相関は、平均0.988793でのこのPhaseにおいても高い相関が得られ、すべての被験者において99%水準で有意な相関が得られた。

尚各被験者の相関関係および回帰式は表5を参照するものとする。

以上の結果が、今回の測定によって得られた。

4. 考 察

1) $\dot{V}O_2$ とHRの関係から

前述のように中程度の強度の運動においては、 $\dot{V}O_2$ とHRの間に直接関係のあること¹⁴⁾はよく知られている。

例えば山地¹⁵⁾は年齢別にみた場合のHR-% $\dot{V}O_2$ 、Astrand¹⁶⁾らは性差からみた場合 Grover¹⁷⁾、Stenberg¹⁸⁾、Sargeant¹⁹⁾らは低酸素や高酸素濃度下における場合等を報告しているが、両者間に直接関係を報告している。

また運動の様式の違い、各種スポーツ中におけるHR-% $\dot{V}O_2$ 直線の報告²⁰⁾²¹⁾も数多くなされている。

一方Sargent²²⁾や小笠原²³⁾らは、走速度と酸素需要量との関係が曲線で表せられることを報告している。つまり走速度が大きくなると、酸素需要量が急激に増加していくことが指摘された。しかしMedbo²⁴⁾は、こ

Table 5 Regression coefficient between $\dot{V}O_2$ and HR in each phase (** < 0.01, * < 0.05)

Sub	From start to AerT	From AerT to AnT	From AnT to end	From start to AnT
A	0.990677 ** Y=0.4477 X-25.78	0.954849 ** Y=0.5839 X-43.88	-0.316654 Y=-0.268 X-117.45	0.995194 ** Y=0.500 X-30.62
B	0.992213 ** Y=0.5301 X-34.81	0.779362 ** Y=0.4141 X-15.93	0.853037 ** Y=0.4695 X-28.78	0.993722 ** Y=0.5317 X-34.92
C	0.991654 ** Y=0.3694 X-20.13	0.94294 ** Y=0.6787 X-62.84	-0.213321 Y=-0.223 X+90.58	0.986086 ** Y=0.4557 X-28.46
D	0.974129 ** Y=0.7845 X-76.28	0.942494 ** Y=0.4371 X-24.00	0.475419 Y=0.5443 X-43.20	0.896086 ** Y=0.7190 X-68.35
E	0.954561 ** Y=0.5025 X-45.29	0.936765 ** Y=0.3538 X-24.16	0.850990 ** Y=0.3964 X-31.49	0.984029 ** Y=0.4475 X-39.17
F	0.978181 ** Y=0.4163 X-24.80	0.760127 ** Y=0.0662 X+29.36	0.519487 Y=0.3520 X-10.70	0.990877 ** Y=0.4647 X-28.99
G	0.974129 ** Y=0.5130 X-43.43	0.864328 ** Y=0.3383 X-12.93	0.783780 ** Y=0.5251 X-43.58	0.990016 ** Y=0.5421 X-46.61
H	0.959956 ** Y=0.4160 X-26.41	0.959269 ** Y=0.3241 X-15.37	0.527276 Y=0.3400 X-20.07	0.985693 ** Y=0.3734 X-22.29
I	0.967194 ** Y=0.4725 X-33.91	0.957755 ** Y=0.5162 X-36.51	-0.624946 * Y=-0.300 X+119.1	0.982685 ** Y=0.5276 X-39.93
J	0.988012 ** Y=0.5085 X-36.59	0.972447 ** Y=0.5199 X-40.14	0.654876 Y=0.4085 X-19.61	0.993538 ** Y=0.4896 X-34.63
AVE	0.977071	0.906989	0.350994	0.988793
S.D	0.012893	0.074142	0.507277	0.01091

れが中程度強度の運動では $\dot{V}O_2$ と走速度の間に直接関係があることを報告している。

宮下²⁹⁾はこの点に注目し、中程度のスピード（強度）の走運動と走行中の定常心拍数との間に直接関係のあることを予想し、見つけ出された両者の回帰式から75%HRmaxの心拍数にあたる走速度を算出して、実際の走競技の成績と相対的に同一のHRでの走速度を比較している。この際75%HRmaxを選択した理由は、その値が無酸素性作業閾値すなわちATに近いやや少ないHRに相当するとの根本²⁹⁾らの報告に基づいている。

このように考えるなら $\dot{V}O_2$ とHRとの間に直線関係の存在する中程度の強度の運動とは、ATすなわち無酸素性作業閾値を境界としていることが考えられる。

ATは前述のように無酸素性作業閾値と邦訳され、一般にはこれを境に運動中無酸素の代謝が始まる強度とされている。Wasserman²⁷⁾は当初AT出現のメカニズムを、無酸素状態(A: Anaerobic)―乳酸産生(L: Lactate)―肺換気動態の変化(V: Ventilation)といった一連の図式で捉えている。

本研究では前述のようにこのATをSkinner, McLellan²⁸⁾の仮設モデルおよび根本、宮下²⁹⁾の提唱し

たモデルに基づいてATを導きだしているが、先に述べたとおりAerT (Aerobic threshold: 有酸素性作業閾値)とAnT (Anaerobic threshold: 無酸素性作業閾値)のふたつに分けてATを捉えている。後述するが、近年の多くの研究ではVTやLTとの関係等からAerTを唯一の閾値=ATとしてみているものが多いが、AnTを唯一の閾値=ATとするもの³⁰⁾や本稿のようにAerTとAnTに分けて捉えているものもみられる。

本研究の実験設定で得られたATすなわちAerT, AnTによって区分された各Phaseをみていくと、運動開始からAerT発現点までの $\dot{V}O_2$ とHRの相関は0.977071平均と非常に高く、しかも99%水準で有意な相関関係であることから、ここでのPhaseは有酸素性の代謝によってATPが獲得されていることが両者の関係からも示唆される。

次にAerTからAnTにかけてのPhaseでは、両者の相関関係は0.906989で先のPhaseと比較して若干数値は低いものの、やはり99%水準で有意な相関が得られている。すなわちこの時点(AerTを越えてAnTに至るまで)でも依然として呼吸性補償の代謝であり、これまで言われてきた中程度の運動強度内にあることが示唆される。

次に AnT を越えて運動終了時すなわち被験者の all out 時までの両者の相関は平均 0.350994 と極端に低下がみられ、有意な相関がみられたものは被験者 B, E, G の 3 名のみであった。これはこの AnT を境界として運動のエネルギー供給機構が有酸素性から無酸素性に移行したことによる肺換気動態の変化によるものと考えられる。

またこのことからこれまで言われてきた中程度の運動強度というものは AnT に至るまでの強度の運動と考えられる。しかし宮下らが考えた 75% 水準の心拍数、すなわち AT の近似値における心拍数は AnT ではなく AerT の相当する心拍数であることが伺える結果であった(表 3)。これらについては、次の項で AT と関連させて詳細を述べていく。

2) $\dot{V}O_2$ と HR の相関関係の崩れ—AT の関連から人間が運動を行う場合のエネルギー (ATP) は、運動の時間や強度等によって獲得機構が変わってくる。今回のような負荷漸増運動 (0.25 kp/min) を行った場合のモデルを考えると、運動開始から AerT の発現時までは $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$ (二酸化炭素排出量), $\dot{V}E$, HR 等は直線的に増加している³¹⁾。これは今回得られた $\dot{V}O_2$ -HR の相関関係から明らかであると考えられる。Gollnick³²⁾らは、ここでの Phase におけるエネルギー源は呼吸商 (R) が 0.7—0.8 の範囲であることから遊離脂肪酸 (FFA) が主体であり、有酸素性代謝によって ATP が獲得されているとしている。この Phase でのエネルギー獲得機構が有酸素性であることは、今回の実験から得られたデータ及び先に述べた $\dot{V}O_2$ -HR の高い相関関係からも明らかと考えられる。またここで動員される筋線維は酸化を主たるエネルギー獲得機構とする Type I(SO) 線維であることが考えられ、また FFA 代謝による解糖 (Glycolysis) の抑制³³⁾と Type I 線維の H-LDH isozyme によって血中乳酸濃度は低レベルに保たれていることが報告³⁴⁾される。

すなわち、こういった生体内特に肺換気動態が $\dot{V}O_2$ と HR の間に高い相関関係をもたらしていると考えられる。

次に AerT から AnT にいたるまでの Phase であるが、まず先にも述べたように AerT に該当する閾値を Anaerobic threshold すなわち AT としている報告は多い。これは AT がいわゆる有酸素性の機構から無酸素性への機構の移行点であると定義付け最初に行ってしまったこと(前述の Wasserman の図式)、また血中乳酸の解釈の違いが大きな原因と考えられている。

しかし根本³⁵⁾らはこれに対して有酸素性作業閾値と

いう言葉を当て、この AerT から AnT までの Phase を有酸素性代謝から無酸素性代謝の移行相としている。

ここでは ATP 分解の速度の増大が、FFA 代謝による Phosphofrutokinase (PFK) 活性に対する抑制を軽減し、解糖を促進し、その結果焦性ブドウ糖 (Pyruvate) が生成される³⁶⁾。運動強度の増加につれ増加した Pyruvate は、ここで動員される Type II 線維の M-LDH isozyme によって乳酸へ代謝³⁷⁾され、この乳酸の増加によってもたらされた代謝性アシドーシス (metabolic acidosis) を補償するために換気動態の変化が³⁸⁾起こる。代謝性アシドーシスは脂肪分解 (lipolysis) を抑制するために脂肪利用を減少させ、かわりに糖質代謝を高める。しかしこの Phase での代謝性アシドーシスは呼吸性代謝能力の範囲内であると報告³⁹⁾される。

これらの報告の中で、特に代謝性アシドーシスは呼吸性代謝能力の範囲内にあるとの報告を裏付けるものとして、今回得られた結果でこの Phase における $\dot{V}O_2$ と HR の相関関係が、有酸素性から無酸素性への移行相といわれるにも関わらず、0.906989 と非常に高い相関であったことが考えられる。

さらに AnT から運動終了に至る Phase では、運動強度の増加とともに乳酸の増加は脂肪分解を抑制し、解糖を促進する⁴⁰⁾。ここでの乳酸 (血中) の増加は、Type II b 線維の動員に伴う M-LDH isozyme⁴¹⁾および無酸素性代謝によるものと考えられ、呼吸代謝能力の限界が AnT にみられることが報告⁴²⁾される。

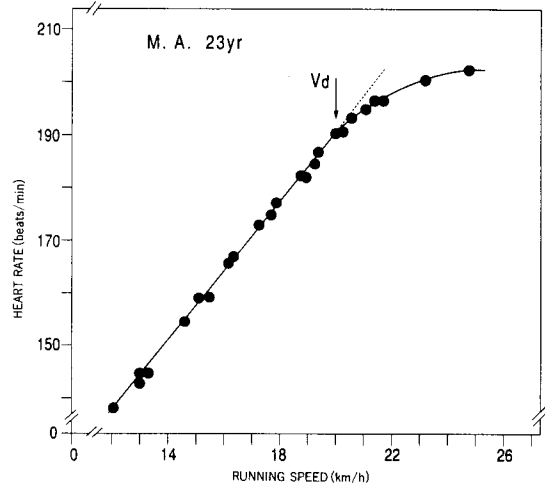


Fig. 2 Seeking for at bo conconi method. Vd equal to AT. (from stomy of "AT" by Yoshiharu Yamamoto and Yoshio Nakamura)

この呼吸性代謝の限界が、この Phase での $\dot{V}O_2$ -HR の相関が 0.350994 と極端に低下することによっても示唆されることが考えられる。

例えば Conconi が提唱した心拍数から AT の測定法（コンコーニ法：図 2）といった簡易法が知られるが、この方法によればランニングスピードと心拍数の直線関係が崩れるポイントが AT に相当するということである、これは前述の宮下らの研究と同じ視点に立ったものと考えられるが、このコンコーニ法による AT は今回の結果からは、AnT に相当する値を示すものと考えられる。

また Riberiro⁴⁴⁾も、この方法に基づいた AT は LT（乳酸性閾値）とは一致しないこと、そしてこの AT に相当するスピードでは被験者は 1 分しか運動が継続しなかった例を上げ、この方法に対する問題点を示している。

すなわちこのように考えてきた場合、AT の定義をより明確にする必要性が生じてくる。近年 Wasserman⁴⁵⁾は AT について“血中乳酸濃度(La)が継続的に上昇することなく行いうる最高の強度”と定義付けをした。山本⁴⁶⁾らはこれを最大乳酸定常 (Maxmal Lactate Stesdy State) と仮称している。また Wasserman らは当初より AerT に相当する点を AT としているが、これは LT と一致はしないがほぼ近似値となっている (AerT に相当する点では血中乳酸濃度は 2 mMOL, これに対し AnT ではおよそ 4 mMOL とされる) ことがその重要な視点となってくる。

つまり AT はすでに Anaerobic すなわち無酸素といった意味合いを持たないことになってしまう。今回の結果からも示唆されるように、AerT から AnT にかけて Phase では呼吸性代謝によって補償されていることがわかる (但し $\dot{V}O_2$ と HR の相関が呼吸性代謝を補償しているという条件のもとで)。すなわち Wasserman⁴⁷⁾らが AerT に相当する閾値を AT としたような場合では、それは代謝性の変化を示すものでなく、乳酸濃度が問題となってくることになる。本来の無酸素性作業閾値といった意味を含むのであれば、AnT に相当する閾値が AT に含められて然かるものであると考えられる。

これらに関連して実際 AT は活動筋の無酸素状態とは関係がないとされる報告⁴⁸⁾⁴⁹⁾⁵⁰⁾が現在主になってきていることすなわち有酸素性の代謝から無酸素性の代謝への移行といった性格のものではないという点からも、呼吸性補償が成立している Phase での運動強度 (スピード) の上限 (AnT, 血中乳酸濃度 = 4 mMOL)

では運動継続が困難であるのか、困難であるとするればそれは最大乳酸定常 (AerT, 血中乳酸濃度 = 2 mMOL) が運動継続の限界となる閾値を示唆するのかといった点が、AT の臨床応用も含めて今後の大きな課題のひとつと考えられる。

5. 結 語

本研究は以下のように要約される。

1) これまでいわれる $\dot{V}O_2$ と HR が直線関係を示す中でどの強度の運動とは、AnT に相当する閾値に至るまでの強度と考えられる。

2) $\dot{V}O_2$ と HR が直線関係にあるということが呼吸性代謝を補償するという条件で、AnT に相当する閾値が有酸素性の代謝から無酸素性の代謝への大きな変化点といえる。

3) その意味からも AT が呼吸性補償を示唆するものなのか、最大乳酸定常を示唆するものなのかを明確にする必要がある。

以上である。

参考文献

- 1) Astrand, P. O. et al.: Textbook of Wotk Physiology (3rd Ed.) McGrow Hill Company. 1986.
- 2) 竹井機器工業：PWC-MAX 測定器仕様書 p. 9 1978.
- 3) 田中喜代次：持久性競技者の競技成績と AT 体育の科学 Vol. 39 (5) pp. 382-390 1990.
- 4) Wasserman, K., and M. B. McLlroy : Detecting the threshold of anaerobic metsbolisum in cardiac patients during exercise. Am. J. Cardiol. 14. pp. 844-852. 1964
- 5) Wasserman, K., A., L. von Kessel, and G. G. Burton : Interaction of physiological mechanisms during exercise. J. Appl. Physiol. 22. pp. 71-84 1967.
- 6) Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal, and W. L. Beaver : Anaerobic threshold and respiratory gas exchage during exercise. J.Appl. Physiol. 35 pp. 236-243. 1973.
- 7) Skinner. J. S., and T. H. McLellan : The transition from aerobic to anaerobic metabolism. Research Quarterly for Exercise and Sport. 51. pp. 234-248 1980.
- 8) 根本 勇, 宮下充正 : Aerobic threshold と Anaerobic thre-shiol. 体育の科学 pp. 834-840. 1980.
- 9) 根本 勇, 宮下充正 : 日本人成人男子の有酸素性作業閾値及び無酸素性作業閾値 東邦大学教養紀要 Vol. 15 pp. 99-115 1983.
- 10) 塩野谷明 : Jr. アルペンスキー選手の有酸素性能力及び AT 新潟体育学研究 Vol. 9 印刷中
- 11) Skinner, J. S., and T. H. McLellan : The transition from aerobic to anaerobic metabolism. 前掲書
- 12) 根本 勇, 宮下充正 : Aerobic threshold と Anaerobic thre-shiol. 前掲書

- 13) Wasserman, K., A., L. von Kessel, and G. G. Burton : Interaction of physiological mechanisms during exercise. 前掲書
- 14) Astrand, P. O. et al. : Textbook of Wotk Physiology (3rd Ed.) McGrow Hill Company. 1986.
- 15) 山地啓司 : 心拍数の科学 p. 42-43 大修館書店 1981.
- 16) Astrand, P. O. and I. Rhyning : A nomogram for calculation of aerobic capacity from pulse rate during submaximal work. J. Appl. Physiol. Vol. 7 pp. 218-221. 1954.
- 17) Grover, R. F., J. T. Reeves, E. B. Grover and J. E. Leathers : Muscular exercise in young men native to 3100m altitude. J. Apple. Physiol. Vo 1. 22 pp 555-564 1967.
- 18) Stenberg, J., B. Ekblom, and R. Messin : Hemodynamic response work at stimulated altitude 4000 m J. Appl. Physiol Vo 1. 21 pp 1589-1954. 1966.
- 19) Davies. C. T. M and A. J. Sargeant: Physiological response to one-and two leg exercise breathing air and 45% oxygen. J. Appl. Physiol. Vol. 36 pp. 142-148. 1974.
- 20) Ekblom, B., A. N. Gokdbarg, A. Kilbom and P. O. Astrand : Effect of atorpine and propranolol on the oxygen transport system during exercise in man. Scand. J. Clin. Lab. Invest. Vol. 30 pp. 35-42 1972.
- 21) Yamaji, K., and M. Miyashita : Relationship between heart rate and relative oxygen uptake in male subjects aged 10 to 27 years. J. Human Ergol. Vol. 7 pp. 29-39. 1978.
- 22) Sargent, R. M : The relation between oxygen requirement and speed in running. Pric. Roy. Soc. London.
- 23) 小笠原道生 : 同速度の歩行と走行における酸素需要量について 体育研究 Vol. 2 pp. 16 1934.
- 24) Medbo, J. L. et al : Anaerobic capacity determined by maximal accumulated O2 deficit. J. Appl. Physiol. Vol. 64 pp. 50-60. 1988.
- 25) 宮下充正, 岡川 暁 : 最大心拍数と速度との関係 日本体育学会第 39 回大会号 p. 252 1988.
- 26) Nemoro, I, et al : Aerobic and anaerobic threshold of Japanese male adults. J. Human Ergol. Vol. 9 pp. 193-189 1980.
- 27) Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal, and W. L. Beaver : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. 前掲書
- 28) Skinner, J. S., and T. H. McLellan : The transition from aerobic to anaerobic metabolism. 前掲書
- 29) 根本 勇, 宮下充正 : Aerobic threshold と Anaerobic threshold. 前掲書
- 30) MacDougall. J. : The anaerobic threshold : Its significance for the endurance athlete. Can. J. Appl Sport. Sci. Vol. 2 pp. 137-140. 1978.
- 31) Wasserman, K. : Breathing during exercise. New Engl. J. Med. Vol. 298 pp. 780-785, 1978.
- 32) Gollnick, P. D : Free fatty acid turnoner and the availability of substrates as a limiting factor in prolonged exercise. Ann. N. Y. Acad. Sci. Vol. 301 pp. 64-71 1977.
- 33) Essen, B : Internationl substrate utilization during prolonged exercise. Ann. N. Y. Acad. Sci. Vol. 301 pp. 30-44 1977.
- 34) Sjodin, B : Lactate dehydrogenase in human skeletal muscle. Acta Physiol. Scand. : Suppl. Vol. 436 pp. 1-32. 1976.
- 35) 根本 勇, 宮下充正 : Aerobic threshold と anaerobic threshold. 前掲書.
- 36) Newsholme, E. A : The reguation of intracellular and extracellular fuel supply during sustained exercise. Ann. N. Y. Acad. Sci. Vol. 301 pp. 81-91. 1977
- 37) Tesch, P., B. Sjodin, and J. Karlsson : Relationship between lactate accumulation, LDH activity, LDH isozyme and fiber type distribution in human skelstal muscle. Acta Physiol. Scand Vol. 103 pp. 40-46. 1978.
- 38) Essen, B : Internationl substrate utilization during prolonged exercise. 前掲書.
- 39) Reinhard, U., P. H. Muller, and R. M. Schmulling : Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. Respiration Vol. 38 pp. 36-42, 1979.
- 40) Gollnick, P. D. : Free fatty acid turnover and the availability of subusrates as limiting factor in prolonged exercise. 前掲書.
- 41) Sjodin, B. : Lactate dehydrogenase in humanskeletal muscle. 前掲書.
- 42) Reinhard, U., P. H. Muller, and R. M. Schmulling : Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. 前掲書.
- 43) Concodeca, F., M. Farrai. P. G. Ziglo, P. Droghetti, and L. Codeca : Determination of the anaerobic threshold by a nonivasive field test in runners. J. Apple. Physiol. Rhysiol. : Respirat. Environ. Exercise Physiol Vol. 52 pp. 869-873, 1982.
- 44) Rebeior. J. P., R. A. Fielding, V. Hughes, A. Black, M. A. Bodhese, and H. G. Knuttgen : Heart rate break point may coincide with the anaerobic threshold and not the aerobic threshold. Int. J. Sports Med., Vol. 6 pp. 220-224, 1985.
- 45) Wasserman, K., J. E. Hansen, D. Y. Sue, and B. J. Whipp : Princiotes of exercis testing and interpretation. Lea & Febiger, Philadelphia, 1986.
- 46) 山本義春, 宮下充正 : これまでの AT とこれからの AT 体育の科学 Vol. 39(5) pp. 348-363, 1990.
- 47) Wasserman, K., B. J. Whipp, S. N. Koyal, and W. L. Beaver : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. 前掲書
- 48) Brooks, G. A. : Anaerobic threshold : review of the concot and direction for future reseach. Med. Sci. Sport Exerc. Vol. 1/17 pp. 22-31, 1985.
- 49) Brooks, G. A. : The lactate shuttle during exercise and recovery. Med. Sci. Sports Exerc. Vol. 18 pp. 360-368, 1986.
- 50) Connett, R. J., T. E. J. Gayeski, and C. R. Honig : Lactate accumulation in fully aerobic, working dog gracilis muscle. Am. J. Physiol. Vol. 246 pp. 120-128, 1984.