

スポーツ選手と Anaerobic Threshold (AT)

—運動処方としての AT—

脇元 幸一 伊東 春樹

はじめに

スポーツ外傷・障害の臨床に携わる理学療法士の役割は、ADL レベルの回復はもとより、早期競技復帰を企図した理学療法プログラムの作成とその実施、遂行にあることは周知の通りである。当然ながら、個々のプログラミングは競技の特殊性を考慮し、そのゴールの設定においては選手の望むパフォーマンスレベルに十分応えうるよう工夫することが必要である。そのためには、形態、筋力、関節可動域(ROM, range of motion)、協調性 (coordination) などの評価ばかりでなく、心機能、呼吸機能など生理的機能まで含めた総合的な評価が必要とされる。

そこで筆者らは、何らかの疾患に罹患したスポーツ選手の運動耐容能を定量的に評価する方法として、呼吸換気指標より求めた AT をとり入れ、それに基づく運動療法の処方と実施を行っている。AT がトレーニング効果とも密接な関係があることは知られてきており、運動療法の効果判定に、客観的かつ定量的な評価を可能にするものとして有用な指標と考えられる。

本稿においては、運動療法前評価としての運動負荷試験の方法、AT の決定法と、「持久性」を競技特性とした選手の運動療法に AT を利用した場合の実際の処方および方法を、筆者らの成績を

含めて概説する。

I. AT の定義と概念

運動時、骨格筋における酸素の需要は大きく、通常の歩行で安静の 20 倍、ジョギング中には 40 倍に達するといわれる。この酸素需要の増加に対し、生体は心拍出量ならびに骨格筋血流の増加と酸素摂取率の増加によって対応する。しかし、運動強度を増し有気的代謝によるエネルギー産生が不十分な場合には、無気的代謝によるエネルギー産生が進行する。その結果、無気的代謝により乳酸産生が増加すると、重炭酸系の緩衝作用により血液の酸-塩基平衡を一定に保持する機構が働き、 CO_2 と H^+ の増加を招来する。血中 CO_2 の増加は呼吸中枢の興奮をきたし分時換気量 (\dot{V}_E) が増加し、炭酸ガス排出量 (\dot{V}_{CO_2}) は酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}) の増加によりさらに急に増加する (図 1)。Wasserman はこのような一連の変化に注目し、「運動強度を漸増する負荷の実施中に、動脈血乳酸濃度の上昇による代謝性アシドーシス、またはそれに伴うガス交換変化が起こる直前の \dot{V}_{O_2} で表わした運動強度」を AT と定義した¹⁻⁴⁾。

II. スポーツ選手と AT

百メートル走など激しい運動で酸素の供給が間に合わない場合、そのエネルギー源は ATP-CP 系の化学反応とグルコースの無気的代謝により供給される。このように酸素を用いないで発生するエネルギーに依存する運動は“anaerobic exercise” (無気的運動) と呼ばれ、筋中または血中の乳酸濃度に応じて持続時間が短縮される。

一方、長距離走、エアロビクスなどのように長

Anaerobic Threshold as an Index for Physical Therapy Program.

脇元幸一：船橋整形外科スポーツ外来
WAKIMOTO, Koichi, RPT: Funabashi Orthopaedics Sports Section.

伊東春樹：千葉社会保険病院内科
Itoh, Haruki, MD: Chiba Shakai Hoken Hospital, Internal Medicine.

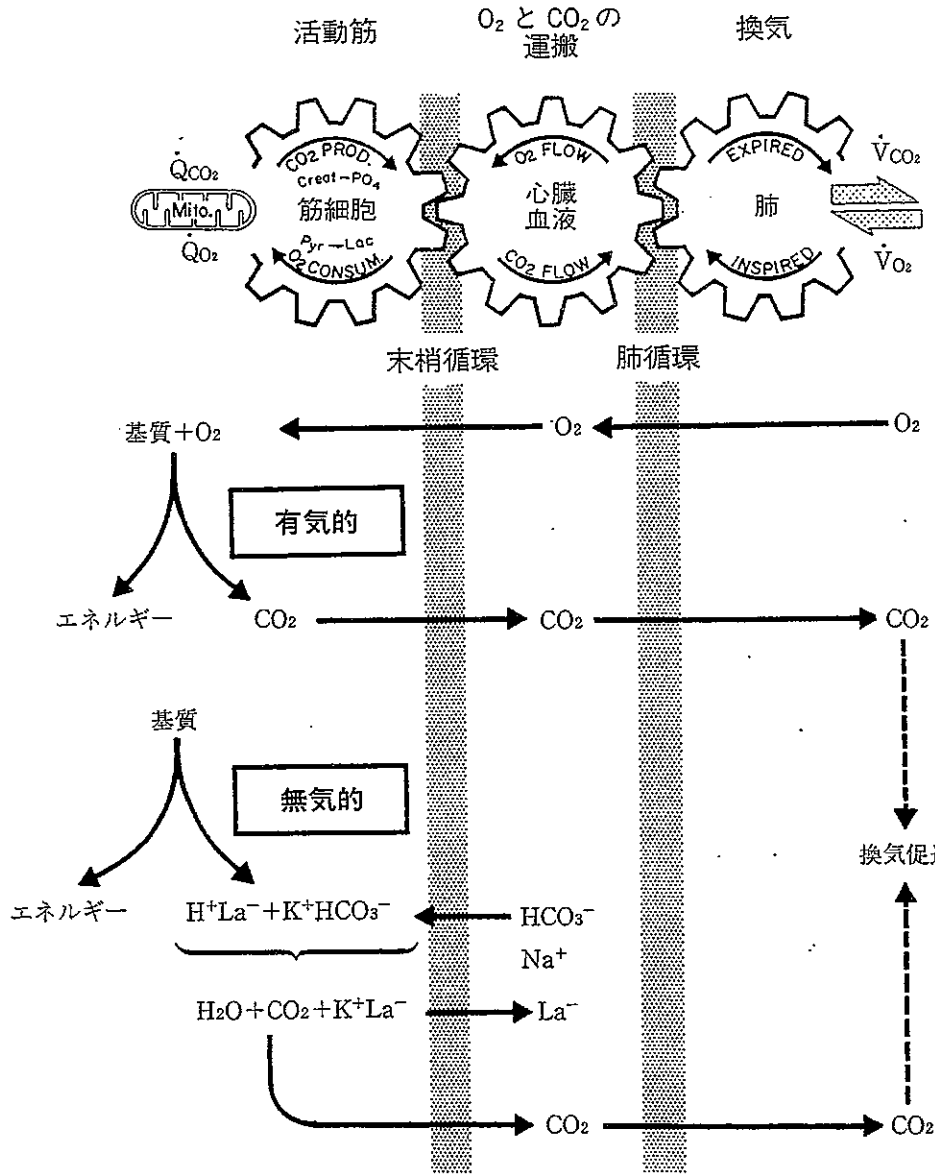


図1 運動中の呼吸循環生理 (文献27より引用)

時間持続する運動は、そのエネルギーが主として酸素の供給下に発生するものに依存するので“aerobic exercise” (有氣的運動) と呼ばれる^{1,5)}。aerobic exercise では、筋のグリコーゲンの枯渇や血糖の低下の場合を除き、エネルギーの発生速度は体内への酸素の取り込みの速度、すなわち酸素摂取量 \dot{V}_{O_2} に比例する。酸素摂取量には限度があり、その上限は最大酸素摂取量 (maximal \dot{V}_{O_2}) と呼ばれ、maximal \dot{V}_{O_2} が大きいほどエネルギー発生速度が大きく、それだけ激しい運動の持続が可能となる。今まで、長時間の運動でそのスピードを決定するものは主として maximal \dot{V}_{O_2} だと考えられ、運動生理学の立場から maximal \dot{V}_{O_2} が持久性の指標としてしばしば測定されてい

た。しかし、仮に同種目の長距離選手で年齢、性別、身長、体重、体脂肪量、そして maximal \dot{V}_{O_2} までも互いに等しいAとBを想定した時、その70%に相当する運動強度をもって運動させると、Aの血液中の乳酸は次第に増加して運動継続が不可能となるが、Bの乳酸は増加せずエネルギー源が枯渇するまで長時間にわたって運動が可能であるということが起こりうる。これは、持久性の指標として maximal \dot{V}_{O_2} のみならず、血液中の乳酸が増加し始める時点、すなわち無氣的代謝の始まる時点 (AT) を知ることの重要性を示唆している。以後、maximal \dot{V}_{O_2} は個体の最大の運動能力を表す指標として、AT は持久性の指標として様々な分野で利用されている。

近年、運動生理学の分野ではトレーニング効果のATに与える影響が検討され、特にATは持久能力と密接に関連し、長距離選手の記録とATとの間にはかなり高い相関があるといわれている⁶⁾。筆者らは男子長距離選手16名に心肺運動負荷試験を実施し、呼気ガス分析により決定したAT・peak $\dot{V}O_2$ を各個人の持つ1万メートルのベストタイムと比較した。その結果、個々のベストタイムとATの相関($r=0.85$)はpeak $\dot{V}O_2$ との相関($r=0.55$)よりもはるかに高いことを認めた。このことは、持久力を必要とする競技では体重1kg当りの $\dot{V}O_2$ で表したATが高い選手ほど有利であることを示唆している。スポーツ選手のpeak $\dot{V}O_2$ に対するATの割合は非トレーニング者に比べて相対的に高く、60~80%で生じる。

III. 運動処方とAT

1. 疾病に罹患したスポーツ選手の理学療法

長期安静臥床による影響としては、循環器系の機能をはじめとし、代謝・内分泌系の異常などがある(表1)。したがって、退院時の日常生活範囲や運動レベルの指導はきわめて重要であるが、高水準の体力を要求されるスポーツ選手にはより合理的な効率の良い運動処方が望まれる。また、いわゆるスポーツマン心臓は心筋の肥大を特徴とし、安静時の徐脈や期外収縮などを高頻度に認める症候群であり、加齢とともに、若年ではみられなかった心室コンプライアンスの低下(拡張障害)が現れることがある。30歳以上のスポーツ選手や、過去に激しいスポーツ歴のある例の運動療法プログラム作成にあたっては、循環器系の異常に十分注意する必要がある。

2. スポーツ選手におけるATを指標としたトレーニングプログラム

近年、スポーツ選手におけるATを指標としたトレーニング効果に関する報告が散見される⁷⁾。筆者らも男性の中・長距離選手(トレーニングを週5日以上行い、peak $\dot{V}O_2$ が $50 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 以上の者)を対象にトレーニング強度をAT指標として決定し、その効果を検討している。運動負荷装置としては、定量的に運動強度を設定でき早

表1 長期安静臥床の人体に及ぼす影響
(文献28より引用)

1. 循環器系
(1) 安静時および運動時の心拍数の増大
(2) 心容量の減少
(3) 1回拍出量の減少
(4) 起立耐性の低下
(5) 最大酸素摂取量の減少
(6) 加速度耐性の低下
(7) 血漿量、全血量の減少
(8) 造血機能の低下と赤血球の減少
2. 骨代謝
(1) 尿中Ca排泄の増大
(2) 骨の脱灰(N, P, Caが1か月につき0.5%の率で減少)
(3) 骨軟化→骨折の可能性の増大
3. 筋系
(1) 萎縮
(2) 筋の脂肪による置換
4. 内分泌系
(1) ACTHの増加
(2) 副腎皮質ホルモンの減少
(3) 血漿インスリン濃度の上昇(活性度低下)
(4) 成長ホルモンの増大
(5) ノルエピネフリンの減少(エピネフリンは不変)

期運動療法が可能となる cycle ergometer を採用した。最初に ramp 負荷を用いた心肺運動負荷試験を実施し、呼気ガス分析によりATを決定した。次いでATの120%に相当する運動強度で、1日1回30分間を週5日、9週間にわたりトレーニングを行った。図2にその実例を示す。16名を、I群:相対的にpeak $\dot{V}O_2$, ATとも低値のもの、II群:peak $\dot{V}O_2$, ATとも高値のもの、III群:peak $\dot{V}O_2$ が高くATが低いもの、IV群:peak $\dot{V}O_2$ が低くATが高いものの4群に分け一群を4名とした。また、現在トレーニングを行っていないスポーツ選手10名を対照群とした。実施期間中、トレーニング効果によるATの変化に対応するため、途中2回、心肺運動負荷試験を実施しATを測定、運動強度の変更を行った。

その結果、トレーニング群は4群とも非トレーニング群に比しpeak $\dot{V}O_2$ とATが有意に増加した(図3)。また、トレーニング群におけるATの増加率(3~68%)はpeak $\dot{V}O_2$ の増加率(4~8%)よりもかなり高値を示した。

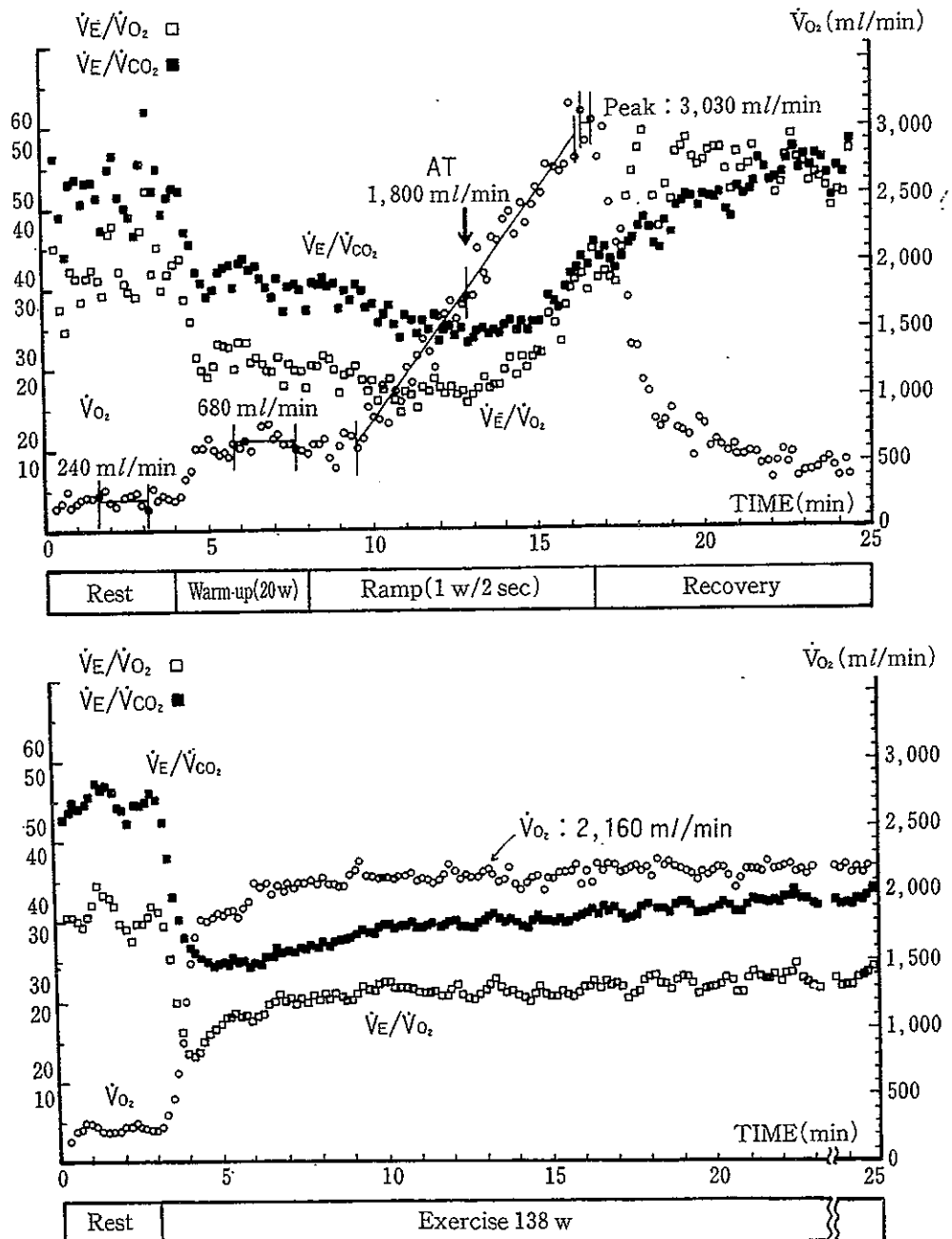


図2 心肺運動負荷試験の例

本例は22歳(170 cm, 56 kg)の長距離選手である。上段にはAT決定のための心肺運動負荷試験を示す。ATは165 w時、約1,800 ml/minを示し、peak $\dot{V}O_2$ は3,030 ml/minであった。下段は $\dot{V}O_2$ がATの120%に相当する2,160 ml/minとなるような段階負荷を示し、これに必要な運動強度は138 wであった。またATの140%以上の運動強度では30分間のトレーニング持続は不可能であった。

さらに興味深いことは、各グループのトレーニングによるATの増加率がⅢ群>Ⅰ群>Ⅱ群・Ⅳ群となることである。これは、相対的にpeak $\dot{V}O_2$ が高く、かつpeak $\dot{V}O_2$ に対するATの割合が低いものほどトレーニング効果が大きいことを意味している。現在までの結果から、ATレベルにおける $\dot{V}O_2$ を100%として、その120%に相

当する $\dot{V}O_2$ を約30分間維持できるような運動強度のトレーニングが適当ではないかと考えている。

3. 運動習慣のない健常人とAT

運動習慣のない健常人は、肉体活動の盛んな人に比べてATは低値をとり^{2,3)}、peak $\dot{V}O_2$ に対するATの割合は50~60%に相当する。AT測定

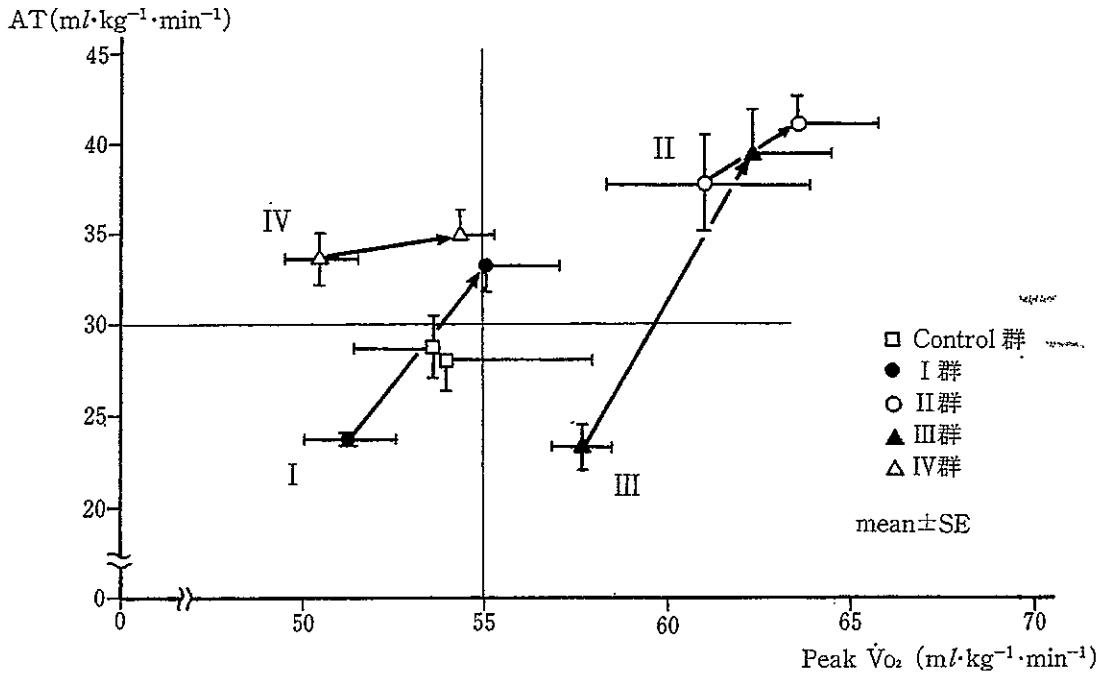


図3 9週間のトレーニング前後のATとpeak $\dot{V}O_2$ の変化(本文参照)

は peak $\dot{V}O_2$ に比して努力依存性が少ないので、AT からその人の運動能を推定することができる。本邦におけるATの正常値は運動様式によっても異なるが年齢が高くなると低下し、女性は男性より低い。図4に、cycle ergometer におけるATの正常値を示す。またATは健常人において運動耐容能の指標であるとともに運動効果閾

値の指標でもあると考えられている。Katch⁸⁾らは、運動療法による健常人の運動耐容能の改善にはトレーニングの運動強度をAT以上とする必要があると報告している。

4. 中高年者および心疾患患者とAT

加齢とともに運動耐容能は低下し、特に酸素輸送能の低下を惹起する各種疾患においては、酸素

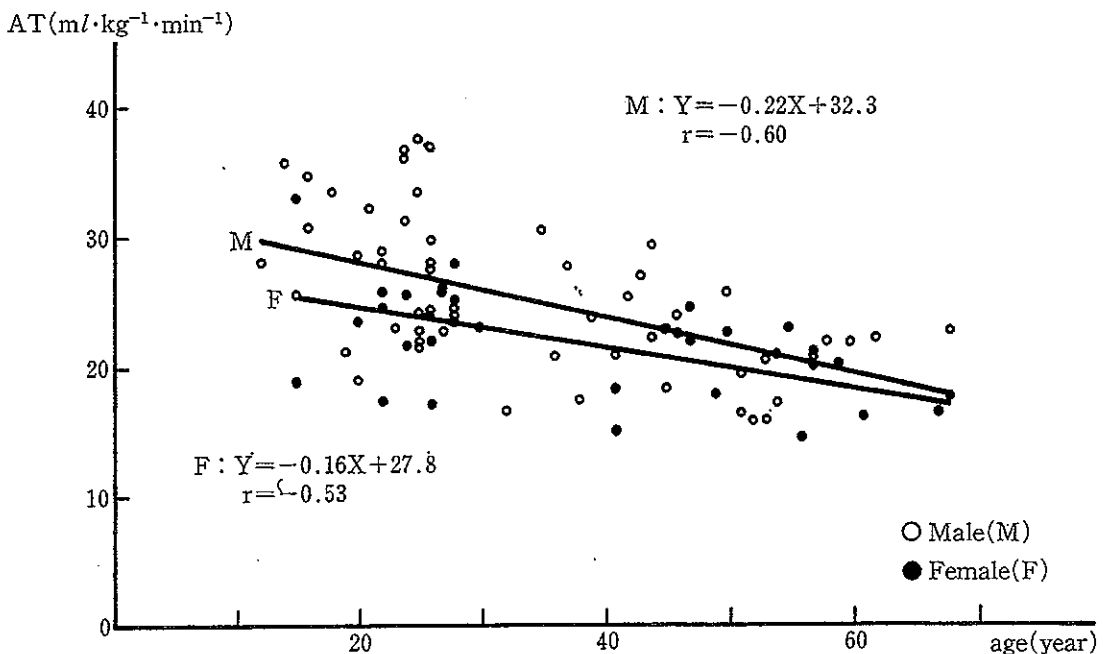


図4 cycle ergometer による心肺運動負荷試験(文献10より引用)

運動習慣のない健常例95例を対象に実施し、ATを測定した。ATは女性より男性が高値を示し、同時に高齢者ほど低値をとった。

動態の異常は臨床的には運動制限となって現れる。貧血、呼吸器疾患、循環器疾患などでは、その運動制限の大部分は酸素動態の異常に密接に関係している。例えば、心疾患患者において運動という生理的な負荷によって引き起こされる最も多い訴えは労作時息切れと疲労による運動制限であり、これは患者の日常生活および運動能力を規定する重要な因子である。しかし、安静時の心拍出量や駆出率などの心機能指標は自覚症状や運動制限の程度と相関していない⁹⁾。したがって、心疾患患者の重症度を運動耐容能で評価することは重要であり、ATにより重症度を適切に評価できる(図5)¹⁰⁾。

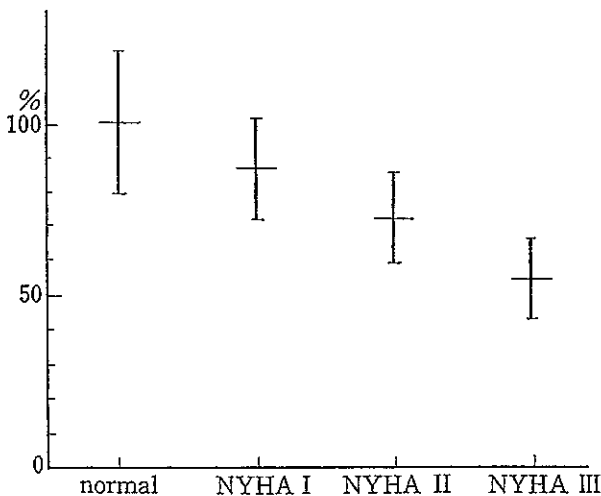


図5 予測AT値の割合(文献10より引用)

図4に示した男女別回帰直線を用いれば各症例の予測AT値が計算できる。この予測値に対する実測値の割合をpercent of predicted ATとして心疾患例のNYHA機能分類との関係を示す。重症度が高くなるにつれてATは低値を示した($n=388$, $p<0.001$, 分散分析)。

また、心疾患患者に安全な運動療法を行う目的でATを指標としたリハビリテーションプログラムが採用されつつある。最近、ATレベルを基準として、それ以上と以下では心機能の運動強度増加に対する追従能に差があることがわかってきている。健常例では左室駆出率は運動強度の増加とともに上昇するが、ATのレベルからはその程度は少なくなり、減少する例もある。同時に心拍出量の増加する割合はATを境にして鈍化し始める。これらの事実がATを指標とする一つの

根拠となっていると考えられる¹¹⁾。中高年者においても心肺機能をはじめとする身体諸機能が低下していると考えられるため、その運動療法には慎重な安全対策が要求される。

これまで、運動耐容能の低い中高年者および心疾患患者を対象とした多くの運動療法プログラムでは運動習慣のない健常者と同様の運動強度が処方されている^{12,13)}。しかし、最大心拍数の40~60%の心拍数が得られる運動強度(ほぼATレベルと考えられる)による運動療法でも十分運動耐容能の改善が得られるとの報告¹⁴⁾や、最近ではAT以下の運動強度でも効果があるとする意見もあり¹⁵⁾、今後さらに運動療法におけるATの意義、有用性を明らかにしていく必要がある。

IV. AT測定上の問題点

現状ではAT測定にはいろいろな判定基準が提唱されており、未だ統一されたものとして標準化されていないため混乱した状態にあり、個々のデータを比較する場合には注意を要する。

ATを測定する上で重要なことは、運動の方法およびプロトコルの選択、ATを求めるための指標測定法およびATの決定法である。ATの測定には、動脈血中乳酸濃度より求める方法と呼気ガスより求める方法^{16,17)}があり、一般には両者の間に高い相関があると言われている¹⁶⁾。しかし、データを解釈するにあたっては、どのような方法でATが決定されたのか注意する必要がある。

1. 動脈血乳酸濃度によるAT

血中の乳酸濃度は通常、上腕動脈にエラストマーを留置し漸増負荷中に30~60秒毎に採血して、乳酸値(動脈血乳酸濃度)の経時的推移を観測し、乳酸の急増し始める点をATとして求める。この方法で血中乳酸の動きをもって筋肉内乳酸の動きが直接反映されていると考えるのは多少の問題があるが、ATを測定する上では比較的直接的な方法であると言える。本測定法のもう1つの問題点は、運動中の乳酸の上昇が明瞭な屈折点を示さず徐々に上昇していく場合もあり、AT決定が困難な例もあることである。図6にはこれまで報告

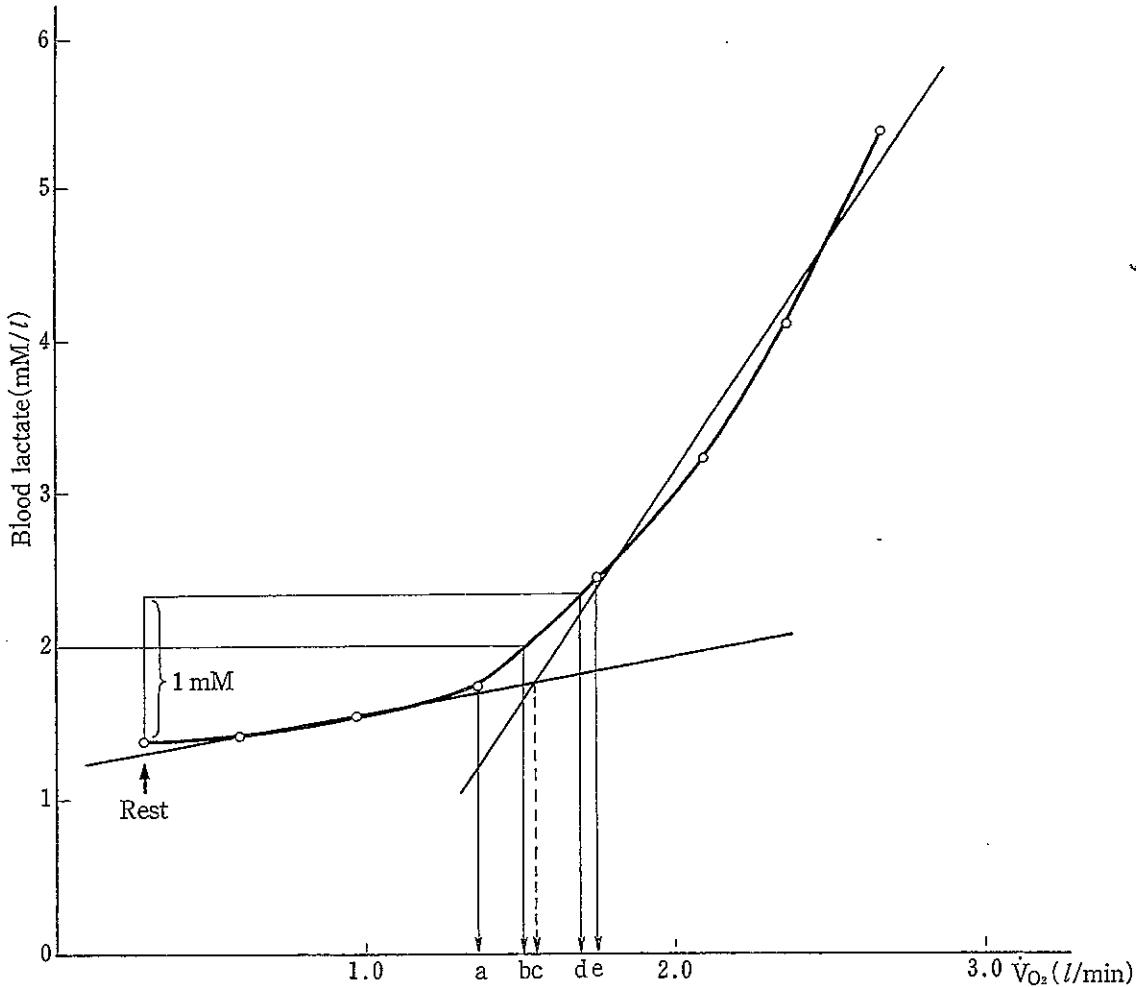


図6 血中乳酸の動きと AT の決定法 (文献 18 より引用)

aは乳酸が急に上昇を始める直前のポイント, bは絶対値が2.0 mM/l を越す点, cは2本の回帰直線の交点, dは安静時の乳酸値プラス1.0 mM/l を越す点, eは急に上昇をはじめた最初の点. 採血の間隔をかなり短くしないと, aではATを過小評価し, eでは過大評価することになる. cは理論的には最も客観的と言える.

されている AT 決定法のいくつかを示した. また最近, ピルビン酸との関係で AT を決定しようとする試みも行われている.

2. 呼気ガス分析による AT 値測定

最近呼気ガス分析器の発達に伴い, 非観血的にかなり正確に AT が決定できるようになり本法が主流を占めつつある.

1) AT 決定法

呼気ガスパラメータから求める AT の決定法は各種の方法が試みられている (図7). すなわち, ① \dot{V}_{CO_2} に対する換気当量 (\dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2}) が不変で \dot{V}_{O_2} に対する換気当量 (\dot{V}_E/\dot{V}_{O_2}) が急上昇する変移点^{16,21}, ②呼気終末二酸化炭素分圧 (PETCO₂:end-tidal Pco₂) が不変で呼気終末酸素分圧 (PETO₂)

が上昇し始める点¹⁶, ③分時換気量 (\dot{V}_E) が非直線的に増加し始める変移点^{3,20}, ④ \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} が最小となる点¹⁷, ⑤ RER ($\dot{V}_{CO_2}/\dot{V}_{O_2}$) が急激に上昇する変移点²⁰, ⑥ V-slope 法²²: \dot{V}_{CO_2} を y 軸, \dot{V}_{O_2} を x 軸にとり, \dot{V}_{O_2} に対し \dot{V}_{CO_2} が非直線的に上昇を開始する点 (図8), ⑦ y 軸に \dot{V}_E , x 軸に \dot{V}_{O_2} をとった $\dot{V}_E-\dot{V}_{O_2}$ 曲線の変移点²¹, などが試みられている.

いずれの決定法にも一長一短があるものの, 健常例やスポーツ選手を対象とした場合には V-slope 法がすぐれている. また, これらの呼吸循環指標の関係を用いた AT 決定法には, 測定者が視覚的に推量・決定するため主観的要素が入る恐れがあるが, 測定者間変動の少ない有力な指標

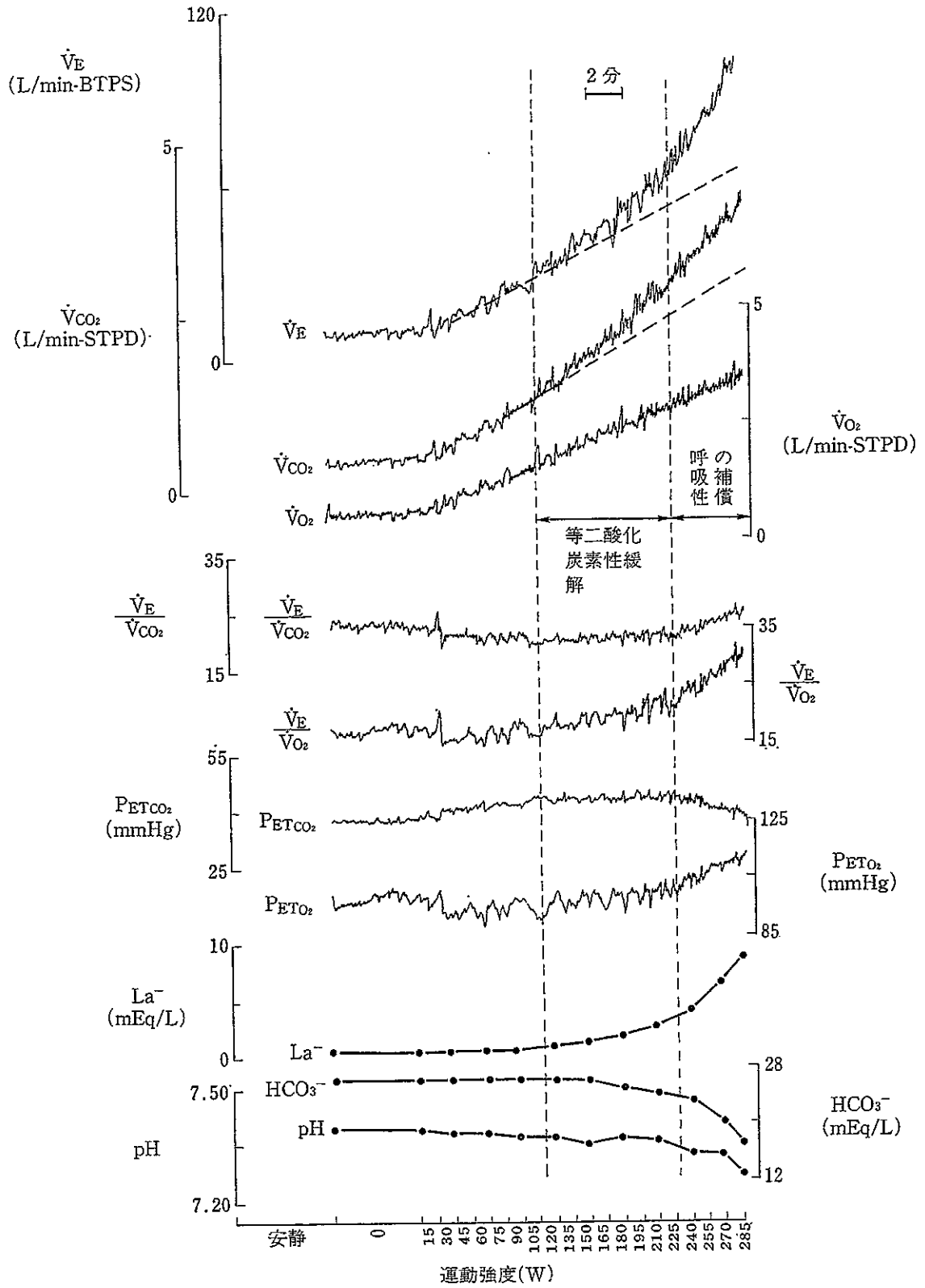


図7 AT 測定の種類の方法 (文献27より引用)

自転車エルゴメータ運動による1分毎の漸増負荷運動テスト中に breath-by-breath で測定した肺換気量 (\dot{V}_E), 二酸化炭素排泄量 (\dot{V}_{CO_2}), 酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2}), \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} , \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} , P_{ETCO_2} , P_{ETO_2} の変化と動脈血乳酸濃度, 重炭酸イオン濃度および pH の変化。

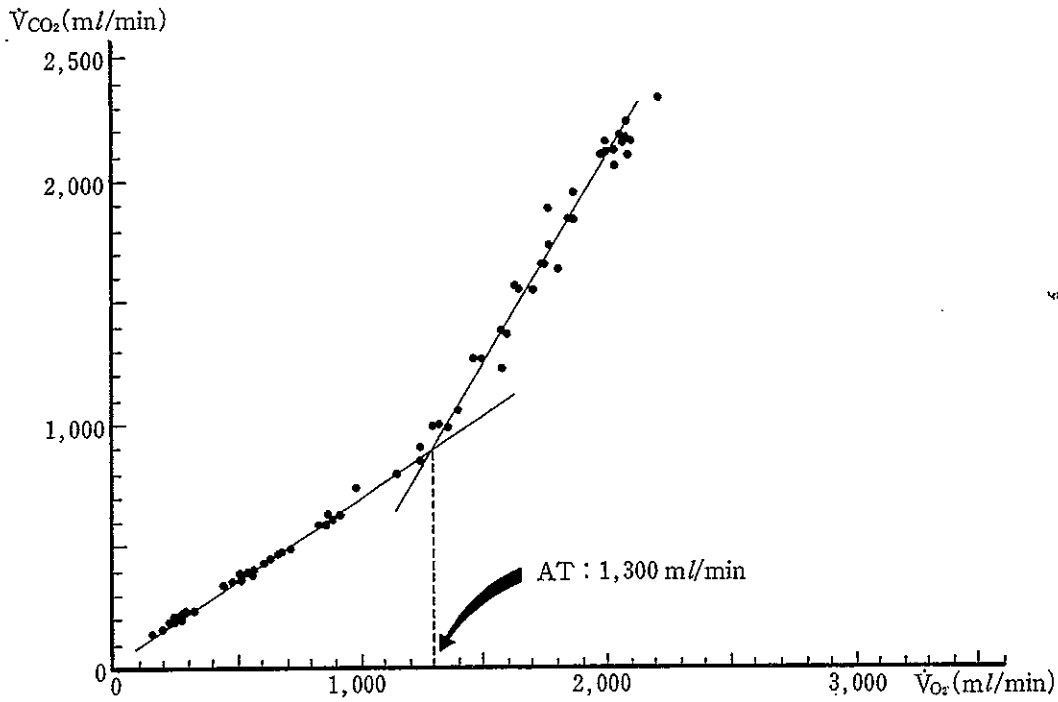


図 8 V-slope 法 (文献 30 より引用)

として AT を採用できるとした報告もある¹⁹⁾。いずれの決定法を用いるにしても、後述の如く各対象例の運動耐容能に見合った漸増負荷量の設定が必要である。

2) 心肺運動負荷試験の方法

漸増負荷が可能な装置としては cycle ergometer と treadmill があり、いずれも等張性で活動筋の動員が多いものほど負荷に有利である。peak

$\dot{V}O_2$ 、AT については、前者を用いた方が後者を用いるよりも低い $\dot{V}O_2$ と低い心拍数で出現すると言われている²³⁾。treadmill は歩く、走るという生理的な運動様式である点で有利であるが、定量的に運動強度を設定でき、整形外科疾患において免荷時期より比較的早期に運動療法プログラムに利用できる点では cycle ergometer の方が優れている。両者の比較を表 2 に示す。

表 2 運動負荷試験における treadmill と cycle ergometer の比較 (文献 27 より引用)

特 徴	トレッドミル	自転車エルゴメータ
より高い peak $\dot{V}O_2$ および最高酸素脈	+	
最高心拍数および最高換気量の再現性	+	+
負荷の慣れ	++	+
負荷の定量化	--	++
心電図、呼吸ガスや血圧測定のアーチファクト	--	++
動脈血サンプルの容易さ	--	++
安全性(骨格筋障害に対し)		+
仰臥位での使用		+
検査室のスペース		+
騒音		+
価格		+
運搬の可能性	-	+
アメリカでの経験	+	
ヨーロッパでの経験		+

有利(++), やや有利(+), やや不利(-), 不利(--)

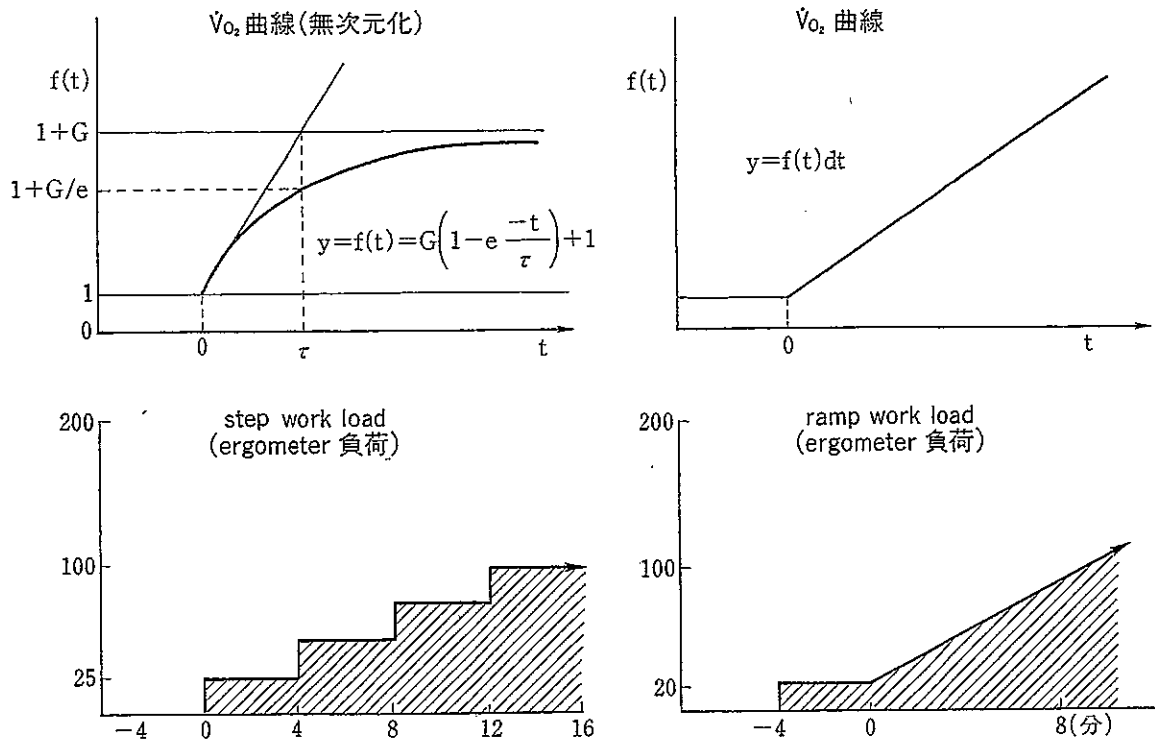


図9 step work load と ramp work load の \dot{V}_{O_2} パターン (τ : 時定数)
(文献 26 より引用)

3) 運動強度と負荷の与え方

連続的な漸増負荷運動法には段階的の定常漸増負荷法と直線的漸増負荷法の2種類がある。前者は各段階毎に定常状態を作りながら運動負荷を漸増する方法である。その測定では、 \dot{V}_{O_2} 、心拍数(HR)、血圧などの指標は、ある最高値へ収斂する指数関数のパターンを示し(図9)、有氣的代謝に無氣的代謝の加わる点を容易に観察することが難しい。これに対して後者の直線的漸増負荷法(ramp 負荷法)は Whipp ら^{24,25)}により提唱された方法で、 \dot{V}_{O_2} は運動強度の漸増に伴い直線的に増大し(図2)、代謝のパターンの変化を比較的容易に観測できる。treadmill, cycle ergometer いずれにおいても種々のプロトコルが考案されているが、AT 測定には Sheffield 法, Bruce 法, Ellestad 法などのように3分毎の段階的負荷増大を行う方法よりも、直線的漸増負荷法がより適していると考えられる(図10)。筆者らは cycle ergometer 負荷を用い、毎分60回転で20 w 4分間の warming up に続き ramp 負荷(20 w/分)に移行する方法を行っている¹⁰⁾。また、treadmill を用いる場合には \dot{V}_{O_2} の直線的上昇が

得られるプロトコルを採用している(表3)。

筆者らは、スポーツ選手 ($\text{peak } \dot{V}_{O_2} \geq 50 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)、運動習慣のない健常人と心疾患例(NYHA 機能分類 class II)を対象とし、20 w 4分間の warming up の後、心疾患例に対しては6秒に1 w (すなわち毎分10 w)、および3秒に1 w (毎分20 w)の割合で負荷量を増加させる2つのプロトコルを、またスポーツ選手、運動習慣のない健常人に対しては、さらに2秒に1 w (毎分30 w) および3秒に2 w (毎分40 w)の2つのプロトコルを加え、試行順序を無作為化して心肺運動負荷試験を実施した。負荷試験方法は電磁制動型坐位で cycle ergometer を用い、呼吸

図10 上段: 同一症例における Bruce のプロトコルと、筆者らの採用している treadmill を用いた ramp 負荷による \dot{V}_{O_2} 、ガス交換比(RER)、 \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} の変化。これらの指標は AT を決定するために重要なものであるが、Bruce のプロトコルでは stage が進むたびに大きく変化する。

下段: 同一症例における Bruce のプロトコルと、treadmill ramp 負荷における心拍数(HR)、血圧(BP)、ramp 負荷の方が明らかに各指標の変化がスムーズである。

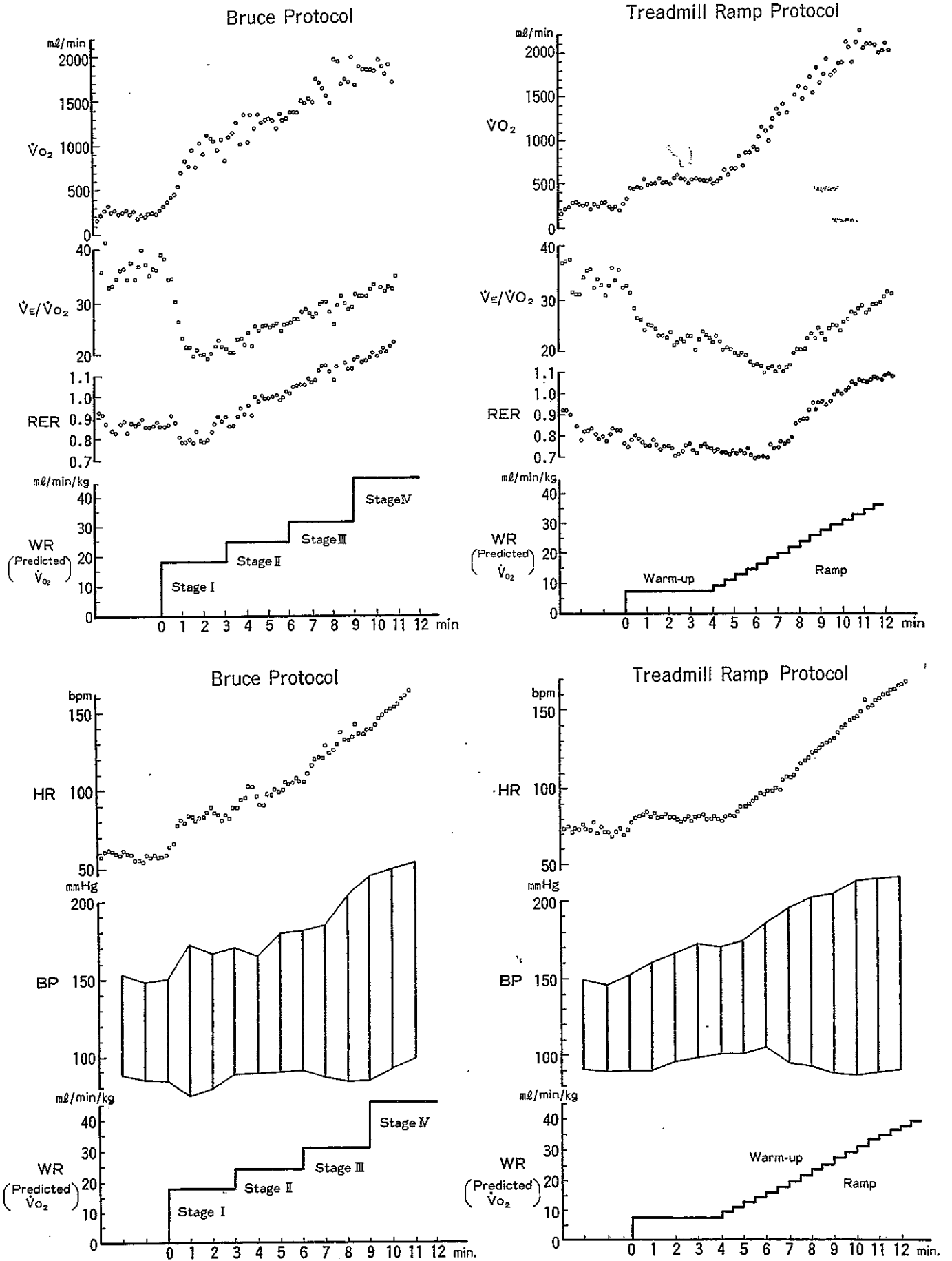


図 10 Bruce のプロトコールと ramp プロトコールの比較 (文献 30 より引用)

表3 treadmill を用い、 $\dot{V}O_2$ が直線的に増加する ramp 負荷プロトコルの例
志野ら²⁹⁾が求めた、多段階漸増負荷における $\dot{V}O_2$ 予測式の係数と定数を、健常男子(平均26.3歳, n=12)に ramp 負荷を行って決定し直し、1 stage は30秒として30 stage目まで $\dot{V}O_2$ が約60 ml \cdot kg⁻¹ \cdot min⁻¹ となるようなプロトコルを作成した。

Stage No.	Speed (km/h)	Grade (%)	Time (min)	予測値 $\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)	Stage No.	Speed (km/h)	Grade (%)	Time (min)	予測値 $\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)
1	1.0	0.0	4.0	7.4	16	5.5	15.7	0.5	34.4
2	1.3	4.6	0.5	9.2	17	5.8	15.8	0.5	36.2
3	1.6	7.5	0.5	11	18	6.1	15.9	0.5	38
4	1.9	9.4	0.5	12.8	19	6.4	16.0	0.5	39.8
5	2.2	10.9	0.5	14.6	20	6.7	16.1	0.5	41.6
6	2.5	11.9	0.5	16.4	21	7.0	16.2	0.5	43.4
7	2.8	12.7	0.5	18.2	22	7.3	16.2	0.5	45.2
8	3.1	13.4	0.5	20	23	7.6	16.3	0.5	47
9	3.4	13.9	0.5	21.8	24	7.9	16.3	0.5	48.8
10	3.7	14.3	0.5	23.6	25	8.2	16.3	0.5	50.6
11	4.0	14.7	0.5	25.4	26	8.5	16.3	0.5	52.4
12	4.3	14.9	0.5	27.2	27	8.8	16.4	0.5	54.2
13	4.6	15.2	0.5	29	28	9.1	16.4	0.5	56
14	4.9	15.4	0.5	30.8	29	9.4	16.4	0.5	57.8
15	5.2	15.6	0.5	32.6	30	9.5	16.4	0.5	59.6

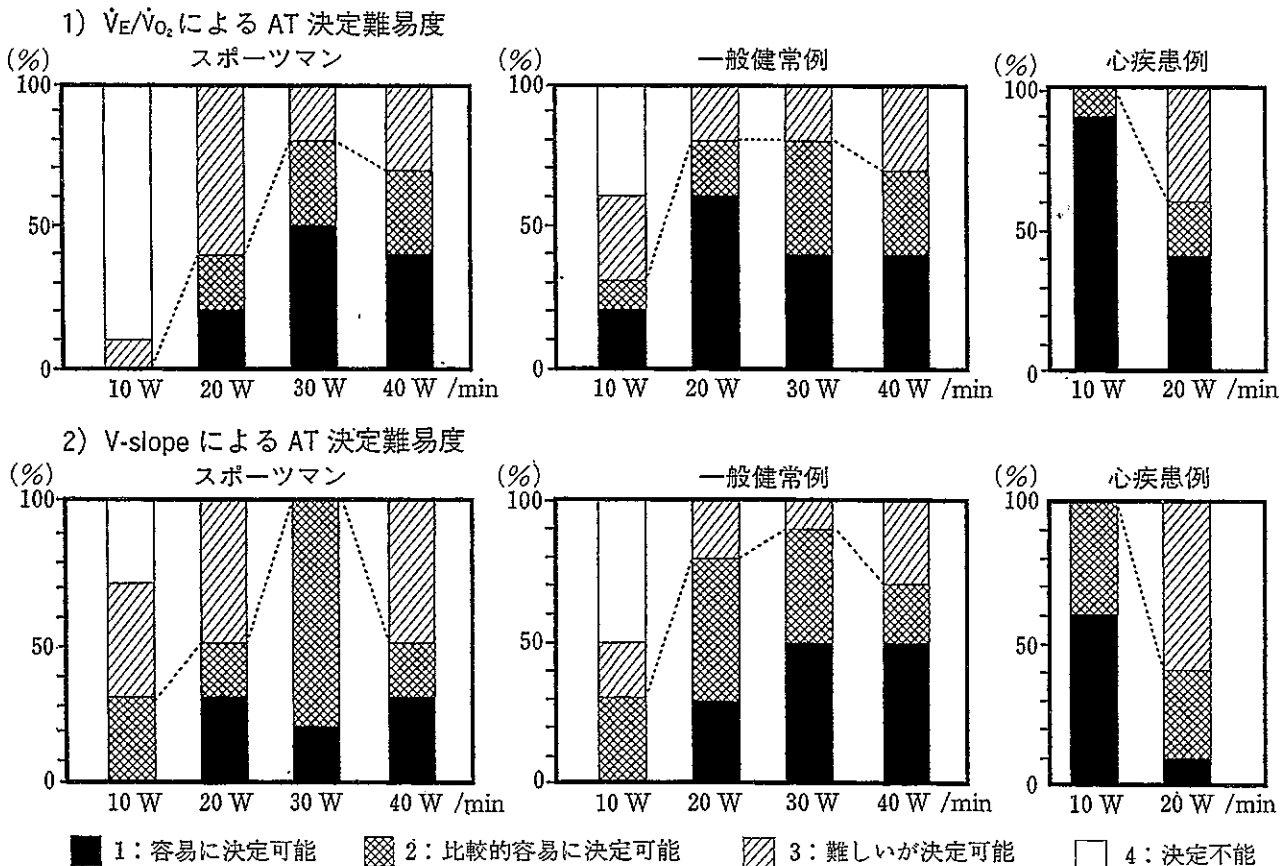


図11 $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ および V-slope による AT 決定難易度 (文献31より引用)

スポーツ選手には30 w/min, 運動習慣のない健常例には20 w/min, 心疾患患者には10 w/min の ramp slope が適当と考えられた。

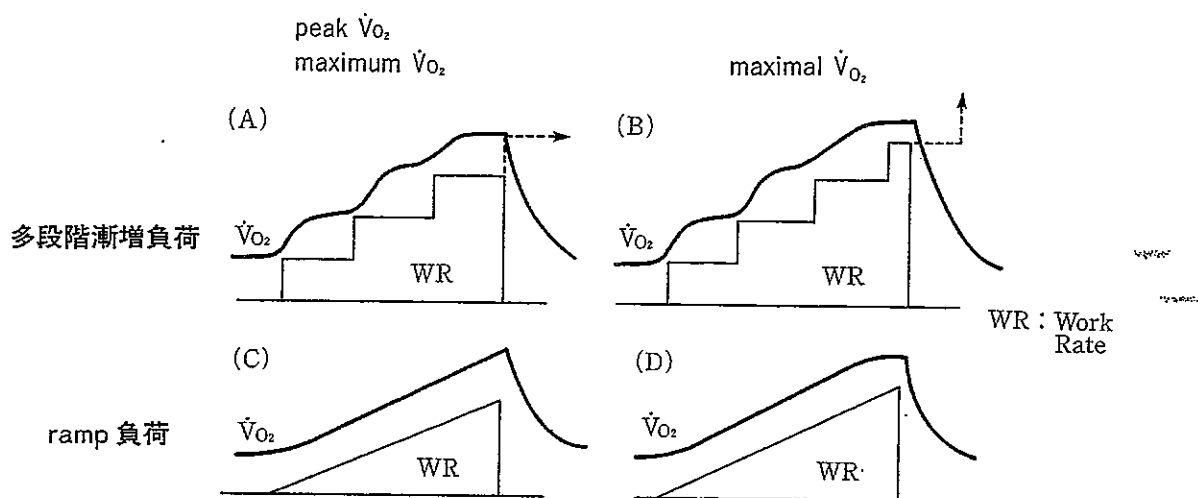


図 12 (文献 30 より引用)

maximal $\dot{V}O_2$ の定義からすると、A図は $\dot{V}O_2$ はプラトーとなっはいるが、その時点での運動強度の増加はないので maximal $\dot{V}O_2$ とはいえない。多段階漸増負荷法でも、B図のように運動強度の増加にかかわらず $\dot{V}O_2$ がプラトーとなれば maximal $\dot{V}O_2$ が得られる。一方、ramp 負荷では常に運動強度が漸増しているの、D図のように $\dot{V}O_2$ がプラトーとなればそれが maximal $\dot{V}O_2$ といえる。A図とC図の場合を peak $\dot{V}O_2$ と呼んでいる。

ガス分析は breath by breath で $\dot{V}_E, \dot{V}O_2, \dot{V}CO_2$ を測定した。10秒毎の平均値を personal computer に取り込みリアルタイムで表示させ、 $\dot{V}_E/\dot{V}CO_2$ の増加なしに $\dot{V}_E/\dot{V}O_2$ が増加する点、あるいは V-slope での変曲点を AT とした。その結果、スポーツ選手には 30 w/分、運動習慣のない健常例には 20 w/分、心疾患例には 10 w/分の漸増負荷量が AT 決定には最も適当と考えられた (図 11)。

おわりに

運動療法における運動強度は施行時点における対象例の運動能、特に循環機能に見合うものでなくてはならない。すなわち、循環機能に十分な刺激を与え、かつ過大な負担とならないような運動強度が必要である。これまでは患者やスポーツ選手の運動耐容能を定量的に評価し、運動療法にも応用しうる指標として maximal $\dot{V}O_2$ が用いられてきた。しかし、日常生活における行動の大部分はかなりの生理的予備力を残し、大部分は AT 以下の運動レベルで営まれており、最大努力時の値をもって運動能力のすべてを表わせるとは考えにくい。また、maximal $\dot{V}O_2$ は「運動強度の増大にもかかわらず $\dot{V}O_2$ の増加が得られない時点

の $\dot{V}O_2$ 、すなわち leveling off が見られた時の $\dot{V}O_2$ 」と定義されており、ramp 負荷を用いても得られないことがしばしばある (図 12)。また、測定上のリスクも大きいことから理学療法の中で繁用することは少ない。

近年、心疾患、肺疾患、糖尿病、肥満などの治療に運動療法が重要な役割を果たすことが認識されてきている。その評価に、安全度も高くかつ患者の運動耐容能や ADL レベルを定量的に示す指標として AT が導入され、AT を指標とした運動療法が検討されつつある。本稿においては、AT についてその意義、有用性を筆者らの経験を中心に述べた。将来、AT 測定とその応用による運動療法の処方および実施は、患者のみならず、健常人、スポーツ選手にも広く用いられると思われる。

文 献

- 1) Wasserman, K. : Dyspnea on exertion : Is it the heart or the lung? *JAMA*, 248 : 2039-2045, 1982.
- 2) Wasserman, K. et al. : Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol*, 35 : 236-243, 1973.
- 3) Wasserman, K. et al. : Exercise physiology

- in health and disease. *Am Rev respir Dis*, 112 : 219-249, 1975.
- 4) Wasserman, K. et al. : Detecting the threshold of anaerobic metabolism. *Am J Cardiol*, 14 : 844-852, 1964.
 - 5) Wasserman, K. : The anaerobic threshold measurement in exercise testing. *Clin Chest Med*, 5 : 77-88, 1984.
 - 6) Yoshida, T. et al. : Endurance training regimen based upon arterial blood lactate : Effects on anaerobic threshold. *Eur J Appl Physiol*, 49 : 223-230, 1982.
 - 7) Tanaka, K. et al. : Longitudinal associations between anaerobic threshold and distance running performance. *Eur J Appl Physiol*, 55 : 248-252, 1986.
 - 8) Katch, V. et al. : Validity of the relative percent concept for equating training intensity. *Eur J Appl Physiol*, 39 : 219-225, 1978.
 - 9) Weber, K.T. et al. : Oxygen utilization and ventilation during exercise in patients with chronic cardiac failure. *Circulation*, 65 : 1213-1223, 1982.
 - 10) Itoh, H. et al. : Severity and pathophysiology of heart failure on the basis of anaerobic threshold (AT) and related parameters. *Jpn circul J*, 53 : 146-154, 1989.
 - 11) 土肥まゆみ・他 : 心肺運動負荷試験における AT と EF の推移. 第36回日本心臓学会抄録集.
 - 12) Pollock, M.L. et al. : Exercise prescription for rehabilitation of the cardiac patients. *Heart Disease and Rehabilitation* (Pollock, M.L., Schmidt, D.H. eds) p. 413-421. Houghton Mifflin Professional Publishers, Boston, 1979.
 - 13) Leon, A.S. et al. : Exercise rehabilitation of the coronary heart disease patient. *Geriatrics*, 32 : 66-73, 1977.
 - 14) Mazzeo, R.S. et al. : 24-hour analysis of heart rate variability of cardiac patients participating in a rehabilitation program. *J Cardia Rehab*, 2 : 138-146, 1982.
 - 15) 張 光哲・他 : 冠状動脈疾患患者における嫌気性代謝閾値以下の運動強度を用いた運動療法の検討. 呼と循, 33 : 1347-1353, 1985.
 - 16) Davis, J.A. et al. : Anaerobic threshold and maximal power for three modes of exercise. *J Appl Physiol*, 41 : 544-550, 1976.
 - 17) Reinhard, U. et al. : Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. *Respiration*, 38 : 36-42, 1979.
 - 18) 栗原直嗣・他 : Anaerobic threshold の測定とその意義. 呼吸, 4 : 288-292, 1985.
 - 19) 伊東春樹・他 : 呼気ガス分析による AT 測定上の問題点. 心臓, 21 (Suppl 1) : 108-110, 1989.
 - 20) Davis, H.A. et al. : Anaerobic threshold and lactate turnpoint. *Eur J Appl Physiol*, 50 : 383-392, 1983.
 - 21) Caiozzo, V.J. et al. : A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold. *J Appl Physiol*, 53 : 1184-1189, 1982.
 - 22) Beaver, W.L. et al. : A new method for detecting anaerobic threshold by gas exchange. *J Appl Physiol*, 60 : 2020-2027, 1986.
 - 23) Kindermann, W. et al. : Aerobic performance diagnostics with different experimental settings. *Int J Sports Med*, 1 : 110-114, 1980.
 - 24) Whipp, B.J. et al. : A test to determine parameters of aerobic function during exercise. *J Appl Physiol*, 50 : 217-221, 1981.
 - 25) Davis, J.A. et al. : Effect of ramp slope on determination of aerobic parameters from the ramp exercise test. *Med Sci Sports exercise*, 14 : 339-343, 1982.
 - 26) 谷口興一 : Anaerobic threshold. 呼と循, 36 : 157-165, 1988.
 - 27) Wasserman, K. et al. : Principles of Exercise Testing and Interpretation. Lea & Febiger, Philadelphia, 1987. (谷口興一・他訳 : 運動負荷テストとその評価法. 南江堂, 1989)
 - 28) 池上晴夫 : 運動処方, p. 39. 朝倉書店, 1987.
 - 29) 志野友義・他 : 臨床上使用される treadmill 運動負荷試験における酸素摂取率の予測. 名医学, 105 : 69, 1983.
 - 30) 伊東春樹・他 : 心不全患者のための Ramp 負荷試験. *Coronary*, 6 : 41-49, 1989.
 - 31) 高橋 淳・他 : 漸増負荷量の違いによる呼吸循環応答の変化——対象別至適 ramp slope の決定. 第53回日本循環器学会抄録集.