

——最大酸素摂取量と無酸素性作業閾値——

- 5 -

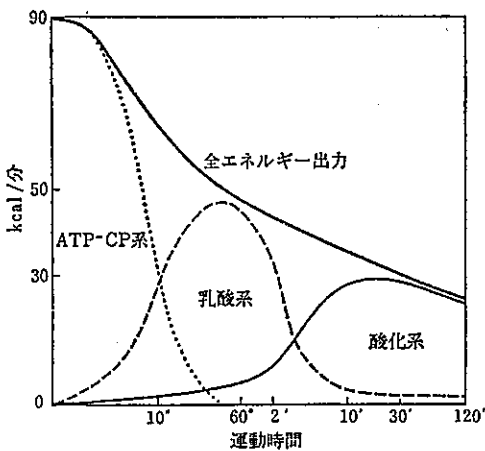


図 2 最大運動時のエネルギー産生。最大運動時間が長くなると当然時間単位当りのエネルギー出力は低下する。運動時間が短い場合は図 1 で示した無酸素性エネルギー産生が主役となるが、最大強度の運動が数分以上になると有酸素性エネルギー産生に頼る。

動体力と表現する。

スポーツの世界で体力と言った場合には行動体力とくに運動能力 (motor fitness) を意味し、それには筋力・スピード・持久性・柔軟性などがある。図 1, 2 に示すようにスポーツは身体からエネルギーを出す機序によって、有酸素性 (aerobic) エネルギー産生と無酸素性 (anaerobic) エネルギー産生に大別できる<sup>2)</sup>。このうち有酸素性作業能力 (aerobic work capacity) を重視して、これを体力という言葉と同義語に扱うことが多い<sup>3,4)</sup>。今日、この有酸素性作業能力のもっとも信頼できる指標が最大酸素摂取量である。

### 3. 最大酸素摂取量 (maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$ )

人間は全く動かない状態でも酸素の摂取は

当然行っており、生命を維持するための最少必要限のエネルギーを産生している。これを基礎代謝量 (basal metabolic rate) という。運動をすると、その強度が増すにつれて酸素の需要は増加する。というよりも運動の強度の指標が酸素摂取量 ( $\dot{V}O_2$ ) そのものともいえる。強度の低い運動では酸素の需要量と供給量が運動中はほぼ一致し、定常状態 (steady state) と呼ぶ。しかし強度が高くなると需要に供給が追いつかなくなり酸素不足が生じ、その不足分は運動終了後の回復期に償却することになる。運動中に不足した酸素分を酸素不足 ( $O_2$  deficit), 運動後に返却した酸素分を酸素負債 ( $O_2$  debt) と呼んでいる。(図 3)。前者と後者の値は厳密に言えば等しくないが、ほぼ同じと考えて支障はない。ガス交換指標からは後者を測定することになる。また厳密に言う強度の高い運動でも運動の開始後 2—3 分間は多少の酸素不足を生ずる (図 3)。この“づれ”は、運動を開始してもすぐには換気量、心拍出量など呼吸循環機能が運動に相応して増えないために起る。さらに運動の強度を増していくと酸素の摂取量が増えなくなってしまう (プラトー) 時点がくる。これを levelling off といい、この値が  $\dot{V}O_{2max}$  である (図 4)。すなわち、運動中に身体に摂取される酸素の単位時間当たり (1 分間) の最大値を  $\dot{V}O_{2max}$  という。この  $\dot{V}O_{2max}$  はいろいろな因子によって規定される。呼吸機能での換気量、酸素運搬能力という面での心拍出量や血液中のヘモグロビン量、末梢 (骨格筋) における酸素摂取能力などがその因子となる。 $\dot{V}O_2$  は身体が取り込んだ酸素の量であるから

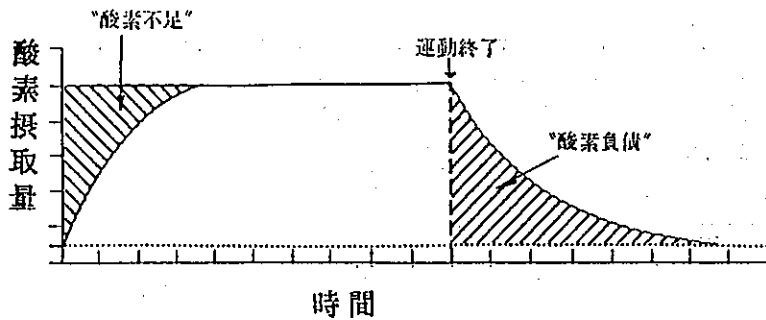


図3 運動強度と酸素摂取量。本文参照。

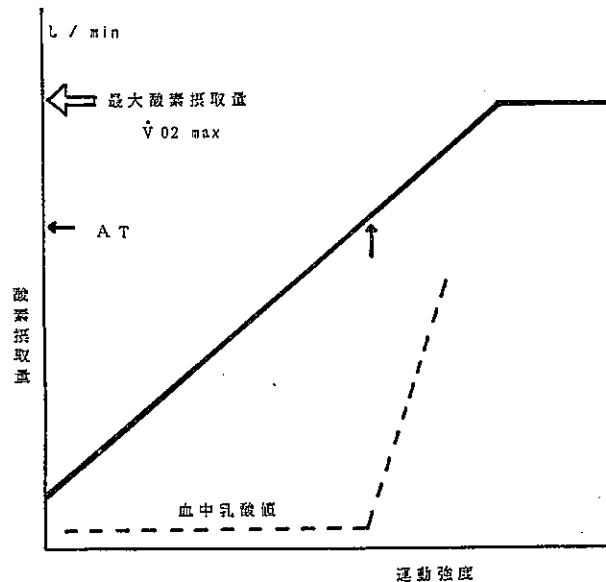


図4  $\dot{V}O_{2\max}$  と AT の関係を示した。酸素摂取量は運動強度が増すにしたがって並行的に増加する。ある強度になるとそれ以上酸素摂取量は増えなくなり、プラトーになる。この値が  $\dot{V}O_{2\max}$  である。また血液中の乳酸濃度は運動強度と並行するのではなくある強度になると増加する。このレベルに相当する運動強度を  $\dot{V}O_{2\max}$  の強度の対する比率 (%) で表したものが AT である。

心拍出量 (= 1 回拍出量 × 心拍数)

× 動静脈酸素較差,

または

酸素濃度差 (吸気 - 呼気) × 換気量

によって求めることが出来る。

上の式からもわかるように容積が大きい心臓では心拍出量を増やすのに有利でありよって  $\dot{V}O_{2\max}$  も大きくしやすい。また貧血が

あると単位当りの動脈血に含まれる酸素の量が少なく動静脈酸素較差が小さくなり  $\dot{V}O_{2\max}$  も小さくなる。動静脈酸素較差は筋肉が動脈血からどれくらい酸素を取り込むことができるかにより決まり、筋肉の量と質が規定因子になる。上記の式の前者の方法は、 $\dot{V}O_2$ を知るために心拍出量の測定や混合静脈血(肺動脈血)の採血が必要であるから普通は

体力の指標

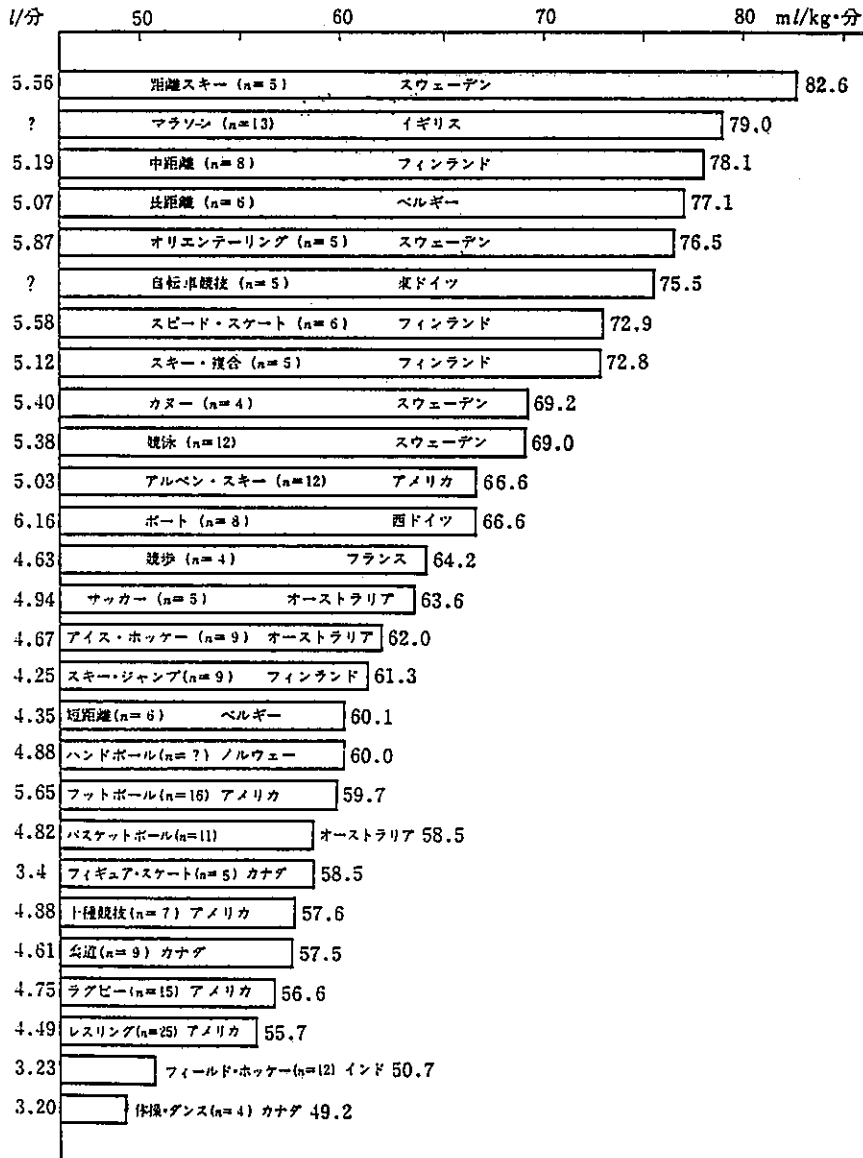


図5 男子におけるスポーツ種目別の  $\dot{V}O_{2max}$ 。体重で補正した値 (ml/min/kg) で比較した。左の数字は体重で補正しない絶対値 (L/min)。山地らのまとめた成績。

心臓カテーテル検査時に用いる。よって運動負荷時には後者の方法で  $\dot{V}O_2$  を測定する。この  $\dot{V}O_2$  は L/min, あるいは ml/min/kg で表し,  $\dot{V}O_{2max}$  は一般男子は約 3 L/min (50ml/min/kg), スポーツ選手では 4 L/min 以上である。供給することの出来る酸素の量

が多ければ多いほど運動持続能力はあり, スポーツ選手でも持久力を要する種目の選手は高いことが知られている<sup>5)</sup>。逆に高くないければ持久競技の優秀な選手にはなれないことを意味している。図5には運動種目別男子の  $\dot{V}O_{2max}$  を比較して示した。長距離走のよ

うに自分の体重のみを運ぶ競技では  $\text{ml/min/kg}$  で表した  $\dot{V}O_{2\max}$  が競技成績とよく相関することが知られている。一方、ボートのように自分の体重ばかりではなく艇やコックスも運ぶ競技では  $\text{ml/min/kg}$  が同じ値なら体重で補正しない絶対量 ( $\text{L/min}$ ) が大きい、すなわち体重が重い方が有利といえる。また一般的に体重が軽いものの方が  $\text{ml/min/kg}$  で表した  $\dot{V}O_{2\max}$  は高い傾向にある。この  $\dot{V}O_{2\max}$  の増加は、発育が止まった後ではトレーニングをしてもせいぜい15—20%しか増加しない。運動を行った際のエネルギー供給を酸素だけに頼った場合には、 $\dot{V}O_{2\max}$  を上回る酸素を必要とする運動は出来ないことになるが、前述のように身体には酸素が不足した状態でエネルギーを合成して運動を行う能力が備わっている。これを無酸素的作業能力 (anaerobic work capacity) と呼ぶ。短距離走のように短時間に高いエネルギー産生を要求される運動では、無酸素的作業能力が競技力の重要な規定因子となる。

#### 4. 無酸素性作業閾値 (AT: anaerobic threshold) の意義

運動の強度を増していくと有酸素性エネルギー産生だけでは不十分で無酸素性エネルギー産生が行われる。その際、無酸素性エネルギー産生は有酸素性エネルギー産生の上限、すなわち  $\dot{V}O_{2\max}$  に達してから起こるのではなく、 $\dot{V}O_{2\max}$  のレベル以下で起こる。この時点をATと呼ぶ。ATは嫌気性代謝が起こる時点であり、解糖によって乳酸が増加する時点と言うことが出来る (図1, 4)。こ

のATは、ガス交換指標からは代謝性アシドーシスが起きていることにより、また血液では乳酸が増してくることにより知ることが出来る。ATは普通  $\dot{V}O_{2\max}$  の何% ( $\% \dot{V}O_{2\max}$ ) として表現する。普通の人のATは40—50%  $\dot{V}O_{2\max}$  である。

ガス交換からATを求めるには、運動の負荷量を増していく際に

(1) 換気量と炭酸ガス排泄量の比 ( $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ ) に変化なくして、換気量と酸素摂取の比 ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ) が増加し始める点

(2) 終末炭酸ガス分圧に変化なくして、終末酸素分圧が増加し始める点  
などを根拠としている (図6)<sup>9,10)</sup>。

一方、血液 (静脈血) からは、最大水準の定常状態を持続できる乳酸濃度が上述の定義からATということが出来る。その値については、過去十数年間数多くの研究がなされてきたが、一応静脈血中の乳酸が2.0mMol/L付近の濃度になった時点をATとする考えが一般的である。一部には血液中の乳酸が増えだした時点ではなく、むしろ乳酸蓄積が急激に始まる時点をATとする考えをもとに、その値が4 mMol/L であるとして OBLA (onset of lactate accumulation: 血中乳酸蓄積開始時点) と呼ぶ者もいる。また血液中の乳酸が2 mMol/L になった時点を aerobic threshold, 4 mMol/L を aerobic-anaerobic threshold, その中間にある範囲 (2-4 mMol/L) を aerobic-anaerobic transition と呼ぶ者もいる。

多くの医科学者がこのATについて研究している理由の一つには、例えば長距離走で維持できる最高のスピードは体内に乳酸が蓄積しないATレベルの強度であることが挙げら

体力の指標

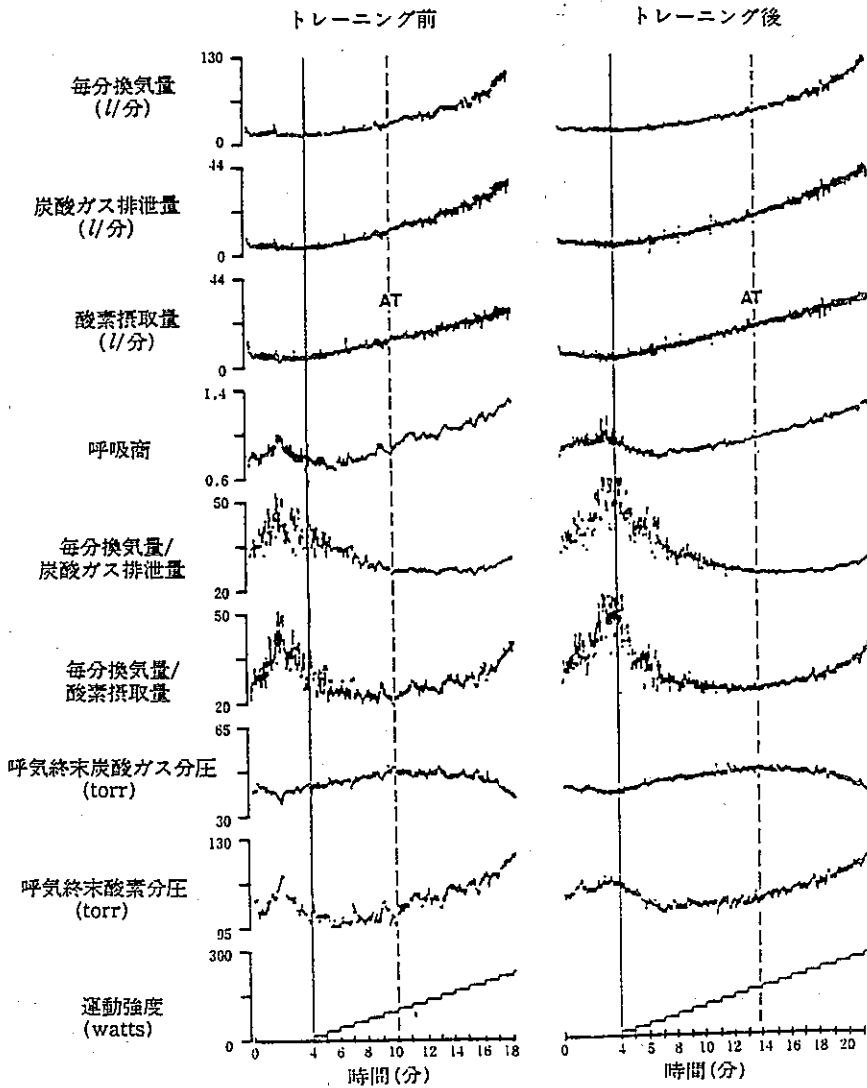


図 6 ガス交換指標による AT を求める方法。本文参照。この図は同一人を対象としてトレーニングの前後で各指標を比較している。AT レベルの上昇が明らかである。

れる。図 7 には短距離、中距離、長距離走の際の酸素摂取量と需要量の関係をしめた。実際、個人個人の長距離走の成績と AT ( $\% \dot{V}O_{2max}$ ) との間には極めてよい相関関係がみられる。前述したように  $\dot{V}O_{2max}$  はトレーニングによっても多くの増加は期待できないが、この AT は 30—40% 増すことが知られて

いる (図 6)。よって AT は  $\dot{V}O_{2max}$  と同様に有酸素的作業能力 (aerobic work capacity) の重要な指標となる。たとえば、 $\dot{V}O_{2max}$  が 5 L/min という優れた体力の持ち主がいたとする。しかしトレーニングせずに AT が  $\dot{V}O_{2max}$  の 50% であった場合、その人は 2.5 L/min のレベルの運動しか続けることはで

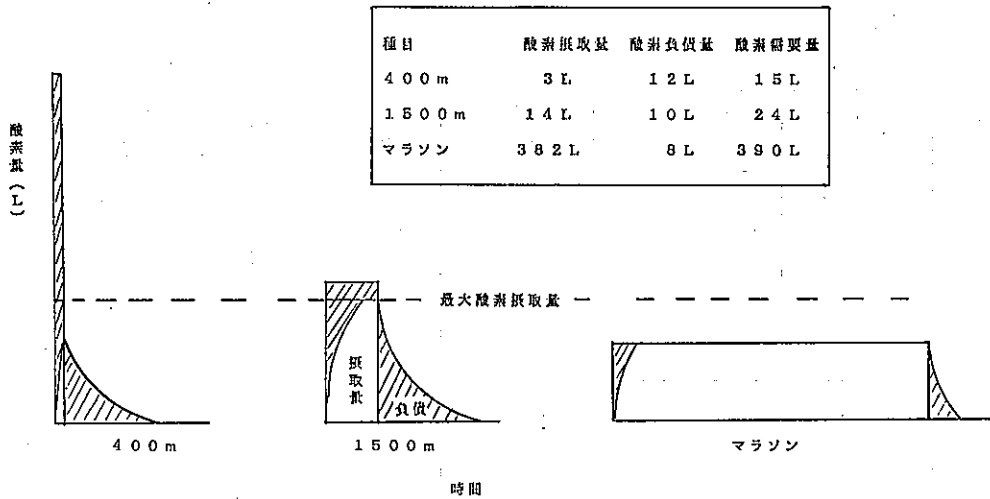


図7 短距離, 中距離, 長距離走における酸素の需要と供給(加賀谷)。マラソンの酸素摂取量がATレベルである。

きない。一方, 4 L/min の  $\dot{V}O_{2max}$  の人でもトレーニングによりATを75%に維持していれば3.0Lの強度の運動維持能力があり, 前者より優れた結果をだすことが期待できることになる。

実際にATを測定するには, ガス交換指標から行う際には明確な時点を決定することが必ずしも容易ではないこと, また血中乳酸値から決める際には頻回に採血する煩雑さを伴うことになる。

## 5. 運動負荷の方法

### A. 装置

自転車エルゴメーターは機械的もしくは電気的なブレーキによる負荷に対して仕事を行う装置である。頻用されているモナーク社の自転車エルゴメーターは1回転すると6m進むようになっており, 1kgの抵抗をつけて毎分50回転で走らせれば, 仕事は300kpm/

minとなる。kpmはキロ・ポンド・メートルの略であり, 1kpmとは正常重力に抗して1kg重量の物を1m持ち上げるのに必要なエネルギーを意味する。ポンドを重量の単位であるパウンド (pound: 453.6g) と誤解している人があるが, 1ポンドとはエルゴメーターで1kgの重さをつけてこぐことを意味する単位である。またこの型のエルゴメーターを用いた時の負荷量はwattで表すのが普通である。1wattは6kpm/minに相当する

表1 運動負荷にトレッドミルと自転車エルゴメーターを使用した際の利点と欠点。左記の項目で優れている方を○印で示した。

|                       | トレッドミル | 自転車エルゴメーター |
|-----------------------|--------|------------|
| 運動の自然性                | ○      |            |
| 心電図・血圧測定              |        | ○          |
| 血液サンプル                |        | ○          |
| $\dot{V}O_{2max}$ の測定 | ○      |            |
| 設備の価格                 |        | ○          |
| 雑音の混入                 |        | ○          |
| 運搬の容易さ                |        | ○          |

体力の指標

表 2 主に虚血性心疾患の診断あるいはスクリーニングに用いられるトレッドミル施行の各種プロトコール。本文参照。

| Bruce |             |           |            | McHenry |             |           |            | Naughton |             |           |            |
|-------|-------------|-----------|------------|---------|-------------|-----------|------------|----------|-------------|-----------|------------|
| Stage | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) | Stage   | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) | Stage    | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) |
| 1     | 1.7         | 10        | 3-4        | 1       | 2.0         | 3         | 3          | 1        | 2           | 0         | 3          |
| 2     | 2.5         | 12        | 3-4        | 2       | 3.3         | 6         | 3          | 2        | 2           | 3.5       | 3          |
| 3     | 3.4         | 14        | 3-4        | 3       | 3.3         | 9         | 3          | 3        | 2           | 7.0       | 3          |
| 4     | 4.2         | 16        | 3-4        | 4       | 3.3         | 12        | 3          | 4        | 2           | 10.5      | 3          |
| 5     | 5.0         | 18        | 3-4        | 5       | 3.3         | 15        | 3          | 5        | 2           | 14.0      | 3          |
| 6     | 5.5         | 20        | 3-4        | 6       | 3.3         | 18        | 3          | 6        | 2           | 17.5      | 3          |
| 7     | 6.0         | 22        | 3-4        | 7       | 3.3         | 21        | 3          |          |             |           |            |

| Balke (standard test) |             |           |            | Kattus |             |           |            | Ellestad |             |           |            |
|-----------------------|-------------|-----------|------------|--------|-------------|-----------|------------|----------|-------------|-----------|------------|
| Stage                 | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) | Stage  | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) | Stage    | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) |
| 1                     | 3           | 2.5       | 2          | 1      | 2           | 10        | 3          | 1        | 1.7         | 10        |            |
| 2                     | 3           | 5.0       | 2          | 2      | 3           | 10        | 3          | 2        | 3.0         | 10        |            |
| 3                     | 3           | 7.5       | 2          | 3      | 4           | 10        | 3          | 3        | 4.0         | 10        |            |
| 4                     | 3           | 10.0      | 2          | 4      | 4           | 14        | 3          | 4        | 5.0         | 10        |            |
| 5                     | 3           | 12.5      | 2          | 5      | 4           | 18        | 3          |          |             |           |            |
| 6                     | 3           | 15.0      | 2          | 6      | 4           | 22        | 3          |          |             |           |            |
| 7                     | 3           | 17.5      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |
| 8                     | 3           | 20.0      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |
| 9                     | 3           | 22.5      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |
| 10                    | 3           | 25.0      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |
| 11                    | 3           | 27.5      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |
| 12                    | 3           | 30.0      | 2          |        |             |           |            |          |             |           |            |

| Taylor |             |           |            | 岡本ら   |             |           |            |
|--------|-------------|-----------|------------|-------|-------------|-----------|------------|
| Stage  | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) | Stage | Speed (mph) | Grade (%) | Time (min) |
| 1      | 7           | 0         | 3          | 1     | 2           | 0         | 3          |
| 2      | 7           | 2.5       | 3          | 2     | 2           | 5         | 3          |
| 3      | 7           | 5.0       | 3          | 3     | 3           | 5         | 3          |
| 4      | 7           | 7.5       | 3          | 4     | 4           | 5         | 3          |
| 5      | 7           | 10.0      | 3          | 5     | 4           | 10        | 3          |
| 6      | 7           |           |            | 6     | 4           | 15        | 3          |
|        |             |           |            | 7     | 4           | 20        | 3          |
|        |             |           |            | 8     | 5           | 20        | 3          |

から上述の例では50 watt の負荷量と換算する。一方、トレッドミルによる外的仕事は、手すりに手をかけなければベルトの速さ・傾斜そして体重により決まる。しかしこの外的仕事を測定することは容易ではない。このため椅子に座って安静にしている時のエネルギー代謝率を1単位 (1 MET: metabolic equivalent) として各負荷時のエネルギー代謝率を

表す方法がとられている。1 MET を酸素摂取率に換算すると約3.5ml/kg/min になり、5 METS ならばその5倍の代謝を行った運動になる。

トレッドミルと自転車エルゴメーターの利点と欠点の比較を表1に示した。トレッドミルは大きいこと、上体の動きがあることなどが欠点になるが、歩く、走るといった運動が

表 3 主に運動選手の体力測定に用いられるトレッドミル施行のプロトコール。

| 体協スポ研プロトコール I |           |                 |             | 体協スポ研プロトコール II |           |                 |             | 慈大臨床検査医学教室 運動選手用運動負荷プロトコール |                |           |
|---------------|-----------|-----------------|-------------|----------------|-----------|-----------------|-------------|----------------------------|----------------|-----------|
| アドレス          | 時間<br>(分) | スピード<br>(m/min) | 角度<br>(deg) | アドレス           | 時間<br>(分) | スピード<br>(m/min) | 角度<br>(deg) | 時間(分)                      | スピード<br>(km/時) | 角度<br>(度) |
| 1             | 1'00"     | 120             | 0.0         | 1              | 1'00"     | 120             | 0.0         | 1                          | 8              | 0         |
| 2             | 1'00"     | 120             | 3.0         | 2              | 1'00"     | 120             | 3.0         | 2                          | 8              | 0         |
| 3             | 1'00"     | 130             | 3.0         | 3              | 1'00"     | 120             | 5.0         | 3                          | 8              | 0         |
| 4             | 1'00"     | 140             | 3.0         | 4              | 1'00"     | 130             | 5.0         | 4                          | 8              | 0         |
| 5             | 1'00"     | 150             | 3.0         | 5              | 1'00"     | 140             | 5.0         | 5                          | 8              | 0         |
| 6             | 1'00"     | 160             | 3.0         | 6              | 1'00"     | 150             | 5.0         | 6                          | 10             | 0         |
| 7             | 1'00"     | 170             | 3.0         | 7              | 1'00"     | 160             | 5.0         | 7                          | 10             | 0         |
| 8             | 1'00"     | 180             | 3.0         | 8              | 1'00"     | 170             | 5.0         | 8                          | 12             | 0         |
| 9             | 1'00"     | 190             | 3.0         | 9              | 1'00"     | 180             | 5.0         | 9                          | 12             | 1         |
| 10            | 1'00"     | 200             | 3.0         | 10             | 1'00"     | 190             | 5.0         | 10                         | 12             | 2         |
| 11            | 1'00"     | 210             | 3.0         | 11             | 1'00"     | 200             | 5.0         | 11                         | 12             | 3         |
| 12            | 1'00"     | 220             | 3.0         | 12             | 1'00"     | 210             | 5.0         | 12                         | 12             | 4         |
| 13            | 1'00"     | 230             | 3.0         | 13             | 1'00"     | 220             | 5.0         | 13                         | 12             | 5         |
| 14            | 1'00"     | 240             | 3.0         | 14             | 1'00"     | 230             | 5.0         | 14                         | 12             | 6         |
| 15            | 1'00"     | 250             | 3.0         | 15             | 1'00"     | 240             | 5.0         | ：                          | ：              | ：         |
| 16            | 1'00"     | 260             | 3.0         | 16             | 1'00"     | 250             | 5.0         |                            |                |           |
| 17            | 1'00"     | 270             | 3.0         | 17             | 1'00"     | 260             | 5.0         |                            |                |           |
| 18            | 1'00"     | 280             | 3.0         | 18             | 1'00"     | 270             | 5.0         |                            |                |           |
| 19            | 1'00"     | 290             | 3.0         | 19             | 1'00"     | 280             | 5.0         |                            |                |           |
|               |           |                 |             | 20             | 1'00"     | 290             | 5.0         |                            |                |           |
|               |           |                 |             | 21             | 1'00"     | 300             | 5.0         |                            |                |           |
|               |           |                 |             | 22             | 1'00"     | 310             | 5.0         |                            |                |           |
|               |           |                 |             | 23             | 1'00"     | 320             | 5.0         |                            |                |           |
|               |           |                 |             | 24             | 1'00"     | 330             | 5.0         |                            |                |           |

自然であり，また動員する筋肉量も多いことから  $\dot{V}O_{2max}$  を測定する点でも目的にかなっている。トレッドミルにより求めた  $\dot{V}O_{2max}$  は自転車エルゴメーターによる  $\dot{V}O_{2max}$  に比較して10—20%高いことが知られている。

B. プロトコール

体力測定や患者に対しての運動負荷には運動の負荷量を定量的に知ることの出来る作業計を用いることが必要であり，これをエルゴメーター (ergometer) と呼び，エルゴメーターを用いて測定することをエルゴメトリー (ergometry) という。エルゴメトリーには，被検者の行った仕事量そのものを測定することと生理的機能を測定することによって被検者の運動遂行の潜在性能力を求める場合があ

る。最大仕事量の測定や最大持久走時間の測定は前者であり，最大酸素摂取量の測定は後者に該当する。また虚血性心疾患患者の安全運動域を測定することは前者に該当する。しかし多くの場合は，物理的強度（前者）と生理的強度（後者）との関係を求めることになる。運動選手などではトレッドミルでは走スピード—酸素摂取量関係を，また自転車エルゴメーターでは負荷量—酸素摂取量関係を求め， $\dot{V}O_{2max}$  に対する任意の酸素摂取量(%  $\dot{V}O_{2max}$ ) に相当する負荷をスピードあるいは負荷強度で表すことになる。今日，持久的な競技ではATレベルぎりぎりの強度のトレーニングの有用性が強調されており，それを実行するためにはこの物理的強度と生理的強

体力の指標

表 4 米国心臓病学会によるトレッドミルのプロトコール。右欄には自転車エルゴメーターとも比較してある。

| O <sub>2</sub> requirements<br>mlO <sub>2</sub> /kg/min | Mets | treadmill tests |                 |                 |                         |                       |                     | bicycle<br>ergometer    |
|---------------------------------------------------------|------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------------|
|                                                         |      | Naughton        | Bruce           | Kattus          | Balke                   | Balke                 | Ellested            |                         |
|                                                         |      | 3-min<br>stages | 3-min<br>stages | 3-min<br>stages | % grade<br>at<br>3.4mph | % grade<br>at<br>3mph | 10%<br>grade<br>mph |                         |
| 56.0                                                    | 16   |                 |                 |                 | 26                      |                       | 5.0                 | for 70kg<br>body weight |
| 52.5                                                    | 15   |                 |                 | mph%gr          | 24                      |                       |                     | kgm/min                 |
| 49.0                                                    | 14   |                 | mph%gr          | 4 22            | 22                      |                       |                     | 1,500                   |
| 45.5                                                    | 13   |                 | 4.2 16          |                 | 20                      |                       |                     | 1,350                   |
| 42.0                                                    | 12   |                 |                 | 4 18            | 18                      | 22.5                  |                     | 1,200                   |
| 38.5                                                    | 11   |                 |                 |                 | 16                      | 20.0                  |                     | 1,050                   |
| 35.0                                                    | 10   |                 |                 | 4 14            | 14                      | 17.5                  | 4.0                 | 900                     |
| 31.5                                                    | 9    |                 | 3.4 14          |                 | 12                      | 15.0                  |                     | 750                     |
| 28.0                                                    | 8    | mph%gr          |                 | 4 10            | 10                      | 12.5                  |                     | 600                     |
| 24.5                                                    | 7    | 2 17.5          | 2.5 12          | 3 10            | 8                       | 10.0                  | 3.0                 | 450                     |
| 21.0                                                    | 6    | 2 14            |                 | 2 10            | 6                       | 7.5                   | 1.7                 | 300                     |
| 17.5                                                    | 5    | 2 10.5          | 1.7 10          |                 | 4                       | 5.0                   |                     | 150                     |
| 14.0                                                    | 4    | 2 7             |                 |                 | 2                       | 2.5                   |                     |                         |
| 10.5                                                    | 3    | 2 3.5           |                 |                 |                         | 0.0                   |                     |                         |
| 7.0                                                     | 2    | 2.0 0           |                 |                 |                         |                       |                     |                         |
| 5.6                                                     | 1.6  | 1.0 0           |                 |                 |                         |                       |                     |                         |

度の関係を明らかにすることが必須となる。運動負荷のプロトコールには、トレッドミルに用いるものだけでも数多くあり、しかも患者を対象としたプロトコール(表2)<sup>5)</sup>と運動選手を対象としたプロトコール(表3)は異なる。しかしプロトコール間の負荷量は安全性を考えての軽重であり、各プロトコール間で本質的な差があるわけではない。実際面では各プロトコールのお互いの負荷量の関係、つまり負荷がどのくらいのエネルギー代謝を必

要とするかについては知っておく必要がある。表4には体重70kgの人を例にとった米国心臓病学会によるトレッドミル各プロトコールの負荷量の関係を自転車エルゴメーターのものと併せて示した。表より明らかなようにNaughton法は他の方法より、最初から負荷量が小さく、運動耐容量が少ない患者に用いるプロトコールといえる。慶應義塾大学病院ではスクリーニングの目的ではBruce法を、疾患があり運動能が低いような例に安全限界

を決定するためには Naughton 法を用いている。

一方、運動選手を対象とした場合には負荷量の少ないプロトコルを用いると測定に時間がかかりすぎることになる。負荷の初期はある程度 warming upが必要であるが、あまり軽い負荷から徐々に行くと運動時間が長すぎ  $\dot{V}O_{2max}$  が得られない。限られた時間内に最大作業が終了 (exhaustion) する負荷条件とする必要がある。トレッドミルを使う際には

- (1) 速度120—300m/min
- (2) 傾斜角度0—17%
- (3) exhaustion 時間4—9分

になるように速度、傾斜、時間を組めば、どの様に合わせても  $\dot{V}O_{2max}$  が得られる<sup>9)</sup>。負荷の時間が短すぎるとあるいは長すぎると、 $\dot{V}O_{2max}$  は得られず、また傾斜角度が大きすぎると下腿に局限した疲労がきてそのために運動を止めなくてはならない点に留意すべきである。 $\dot{V}O_{2max}$  の測定には全身の筋肉の動員に伴った呼吸循環系の all-out が必要であり、局限した筋肉疲労のために運動を止めた場合には  $\dot{V}O_{2max}$  は得られない。しかしマラソン選手のような時速 20Km (=333m/min) を  $\dot{V}O_{2max}$  より低いATレベルでコンスタントに走ることのできる持久力に優れた選手を短時間で exhaustion に追い込むためにはどうしても傾斜を大きくして負荷量を増さざるをえない。

実際測定時に  $\dot{V}O_{2max}$  が得られたとすると判定基準としては

- (1) ほぼ年齢相応の最高心拍数に達していること

- (2) 運動強度を増しても  $\dot{V}O_2$ が増加しない (<150ml/min) こと

- (3) 最大運動時の呼吸商 (RQ) が1.0 以上のことが挙げられる<sup>10)</sup>。

## 6. 運動負荷施行の実例

運動は安静にしているときに比較して危険が伴うことは当然である。よって不慮の事故に備えて、検査室には除細動器を含めた救急用の薬品を備える必要がある。また運動を中止する時点を適格に判断することも大切である。あまり早く止めれば検査の目的を達することが出来ず、また判断が遅れると危険が増

表 5 運動負荷を施行する検査室に必要な備品。

- a. 直流除細動器
- b. 酸素ボンベ、マスク、air way、挿管チューブ、喉頭鏡
- c. 静脈点滴用具一式
- d. 注射薬 (リドカイン、アトロピン、ジソピラミド、ノルエピネフリン、ジギタリス、プロカインアミド、イソプロテレノール、フェニトイン、フロセミド、ドパミンetc.)
- e. 経口薬 (ニトログリセリン、ISDN)

表 6 運動負荷試験の中止基準 (Sheffield LT による)。

1. 次第に増強する狭心痛
2. 0.4mV 以上の ST 下降
3. 上室性頻拍
4. 運動により誘発された、もしくは増加した心室性不整脈 (心拍数の25%を越える頻度のもの)
5. 心室性頻拍
6. 運動により誘発された伝導障害
7. 末梢循環障害の兆候の出現
8. 軽度もしくは中等度の運動 (Bruce Stage 3 以下) によりおきた血圧低下
9. 強度の疲労、息切れ
10. モニター器具の故障
11. 患者の希望

す。必要な備品と主に虚血性心疾患患者を対象とした end point 判定基準を表 5, 6 に示した。

## 7. おわりに

スポーツ選手の体力評価に必須となった運動負荷試験の実際を、虚血性心疾患患者に対する負荷試験と併せて概説した。慶應義塾においてもスポーツ医学研究センターが発足せんとしている時期に、医療に関与している者のみならずスポーツの現場に関係している人にとっても必要な知識を筆者なりにまとめた。

### 文 献

- 1) 猪飼道夫, 須藤春一: 教育生理学, 第一法規, 1968
- 2) Laundry F, Orban WAR: 3rd Interna-

tional Symposium on Biochemistry of Exercise. vol 3. Symposia Specialist, USA 1978

- 3) Anderson KL, Hermansen H: Aerobic work capacity in middle-aged Norwegian men. *Appl Physiol* 20: 432, 1965
- 4) Åstrand PO, Rodahl K: Textbook of work physiology. McGraw-Hill, Inc. 1970
- 5) Wasserman K. et al: Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 35: 236, 1973
- 6) 山崎元: 運動生理とその応用 慶應医学 62: 525, 1985
- 7) Davis JA et al: Anaerobic threshold alternations caused by endurance training in middle-aged men. *J Appl Physiol* 46: 1039-1046, 1979
- 8) 岡本登: 運動負荷試験の基礎, 循環器負荷試験法, 朝倉書店, 1978
- 9) 猪飼道夫: 全身持久性の研究(1), 体育科学 16: 669, 1966
- 10) 小林寛道: 日本人のエアロビックパワー 杏林書院 1982