

生命予後を改善する事実は、循環器疾患治療の1つの選択肢として心臓リハビリテーション・運動療法を無視してはならないことを物語っている。

 **御法度!!**

- ❖ 血行再建が成功すれば虚血性心疾患の治療が終わったと思うな。動脈硬化の原因に介入する内科治療、心リハを行うべきである。
- ❖ 運動処方なしに運動療法を行うな。できる限り運動負荷試験で安全で効果的な運動強度を定めよ。

文献

- 1) O'Connor GT, et al. *Circulation* 1989; **80**: 234-244.
- 2) ExTraMATCH Collaborative. Exercise training meta-analysis of trials in patients with chronic heart failure (ExTraMATCH). *BMJ* 2004; **328**: 189-191
- 3) Witt BJ, et al. *J Am Coll Cardiol* 2004; **44**: 988-996
- 4) Ades PA, et al. *Am Heart J* 1992; **123**: 916-921
- 5) 野原隆司, ほか. 循環器病の診断と治療に関するガイドライン(2006年度合同研究班報告). 心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン(2007年改訂版): 251-258.

神原記念病院 伊東春樹, 神原記念クリニック検査課 前田知子

心肺運動負荷試験 (CPX)

CPX から何がわかるか

● Point

- ▶ CPX は、運動負荷試験に連続呼気ガス分析を併用したもの。
- ▶ CPX は、運動にかかわる臓器（肺、心臓、骨格筋、血管）の相互作用を反映し、血行動態ばかりでなく代謝動態も評価できる。
- ▶ CPX で得られた分時換気量 (\dot{V}_E)、酸素摂取量 (\dot{V}_{O_2})、二酸化炭素排出量 (\dot{V}_{CO_2}) をもとに、各種指標が求められる。
- ▶ 運動処方での運動強度は、嫌気性代謝閾値 (AT) を指標とする。

運動負荷試験の目的

運動負荷試験は、①虚血性心疾患や不整脈、さらに運動誘発性喘息など、呼吸器系も含めた疾病の診断および重症度判定、②治療効果判定、③病態生理の評価、④運動処方の決定、⑤運動療法の評価、⑥予後の推定、などの目的で臨床の場で活用されている。

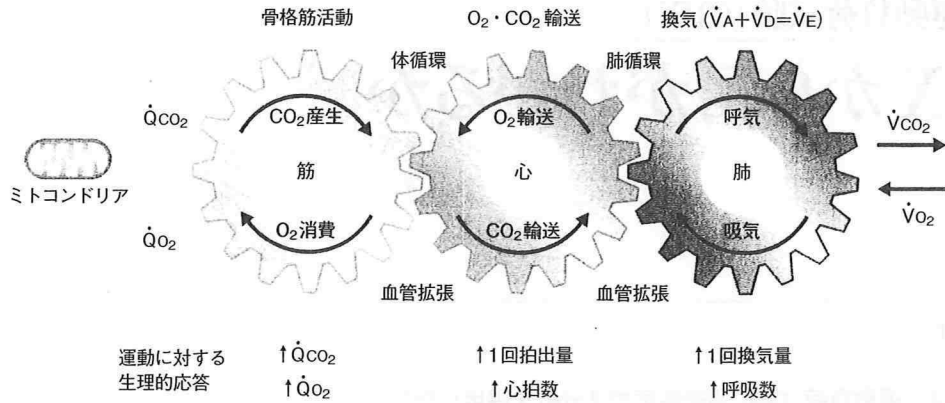
なかでも心肺運動負荷試験 (cardiopulmonary exercise test : CPX) は、連続呼気ガス分析を併用することにより、呼吸動態や循環動態という、いわゆる心肺動態ばかりでなく、代謝動態も評価できるので、運動耐容能や運動能力などを客観的に評価することが可能である。

肺循環と体循環の生理学的関係 ①

CPX を理解するには、運動にかかわる臓器の機能的な相互作用を理解する必要がある。

大気中の酸素は肺→心臓を介して、最終的にミトコンドリアでエネルギー代謝に利用される。その結果として産生された二酸化炭素は、逆の経路により大気中に排出される。

筋における酸素消費量の増大は、筋を灌流している血液から取り込んだ酸素量の増加、末梢血管床の拡張、心拍出量 (1回拍出量×心拍数) の増加、肺血管の拡張による肺血流の増加、および換気量の増加などによる。

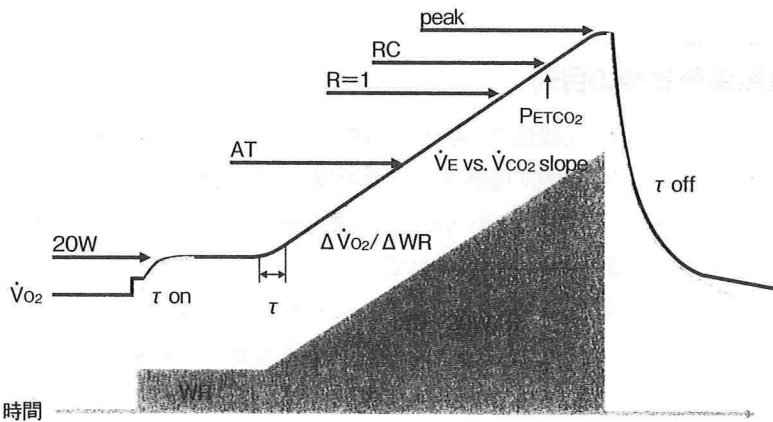


① 細胞呼吸 (内呼吸) と肺呼吸 (外呼吸) の連関に対するガス輸送機構

運動時の骨格筋細胞における酸素消費と二酸化炭素排出は内呼吸 (代謝) と呼ばれ、大気との間のガス交換を示す外呼吸と区別される。

\dot{Q}_{CO_2} : 二酸化炭素産生量, \dot{Q}_{O_2} : 酸素消費量, \dot{V}_{O_2} : 酸素摂取量, \dot{V}_{CO_2} : 二酸化炭素排出量, \dot{V}_E : 分時換気量, \dot{V}_A : 肺泡換気量, \dot{V}_D : 死腔換気量。

(Wasserman K, et al. Principles of Exercise Testing and Interpretation. 2005¹⁾ より改変)



② ランプ負荷試験から得られる指標

心肺運動負荷試験から得られる情報

この一連の生理学的な関係を推測することが、CPX 施行の目的である。CPX では、運動負荷による血圧、心電図、心拍数、負荷量に加え、呼気ガス分析により呼気と吸気の酸素と二酸化炭素濃度、換気量が測定される。

これらの測定値から算出される主な項目を以下に解説する (②)。

\dot{V}_{O_2} (酸素摂取量), \dot{V}_{CO_2} (二酸化炭素排出量)

呼気中の酸素濃度、二酸化炭素濃度および1回換気量から算出される。

Key word

Fickの原理

「組織の酸素消費量は、毛細管床を通過する際に血液から摂取される酸素容量に相関する」というFickが提唱した原理である。この原理より「動脈血と混合静脈血との酸素濃度の差は、肺胞から取り込まれた酸素量を表す」とされている。ここからFickの式 [$\dot{V}O_2 = \text{動静脈酸素含有量較差} \times \text{心拍出量}$] が導かれる。

Key word

MET: metabolic equivalent

運動強度の目安として使用される。酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) を基にしたエネルギー消費量の指標。健康な体重70kgの40歳白人男性の安静時の $\dot{V}O_2$ が1 MET (3.5mL/分/kg) と定義されている。日常活動において、ある労作が、安静時1 METの何倍の酸素摂取量を要する強度かを理解するのに利用されている。ただし、人種や体重、年齢が異なればこの値は違ってくるので、その点を考慮して指導する。

Key word

ランプ (ramp) 負荷

負荷プロトコルの一つ。直線的漸増運動負荷。運動を開始してから運動強度を直線的に漸増していく。

Fickの式より、 $\dot{V}O_2$ は動静脈酸素含有量較差が一定であれば心拍出量と比例するので、心ポンプ機能の指標となりうる。

$\dot{V}O_2$ はエネルギー代謝量、運動強度の指標にもなり、活動レベルはMETで表される。

peak $\dot{V}O_2$ (最高酸素摂取量), $\dot{V}O_2 \text{ max}$ (最大酸素摂取量)

個体の最大運動能力を示す指標として重要である。

直線的漸増負荷 (ランプ負荷) 試験では $\dot{V}O_2$ は運動強度の増加により直線的に増加するが、 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ は、負荷量を増加しても $\dot{V}O_2$ がそれ以上増加をしなくなった頭打ち状態の時点の $\dot{V}O_2$ と定義される。しかし臨床的に $\dot{V}O_2$ の頭打ち状態までの負荷を行うことは難しく、運動負荷試験中に記録された最高の酸素摂取量 (peak $\dot{V}O_2$) を $\dot{V}O_2 \text{ max}$ の代用として使用する。

臨床では、運動耐容能の最もよい指標であり、同一運動様式での測定では再現性も良好であることから、重症度分類の客観的評価に用いられると同時に心不全患者の生命予後指標として、また治療や運動療法の効果判定に有用である。

AT (㉓)

ランプ負荷において、負荷が増強するに従って運動筋への酸素供給に限界が生じる。解糖系でのエネルギー代謝亢進により、ピルビン酸産生がそれに続く有機的代謝系であるTCA回路以降の代謝率を上回る。その結果、ピルビン酸が乳酸になり、乳酸が重炭酸イオンで緩衝されて二酸化炭素を生じる。この無機的な代謝が加わる直前の $\dot{V}O_2$ がAT (anaerobic threshold; 嫌気性代謝閾値) と定義された。

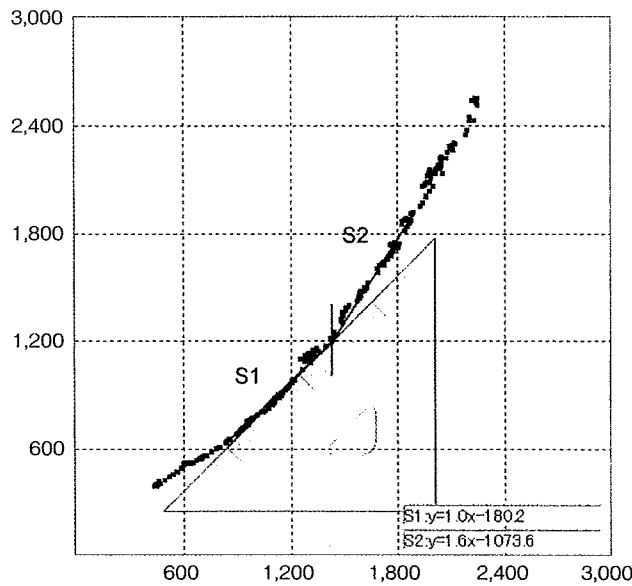
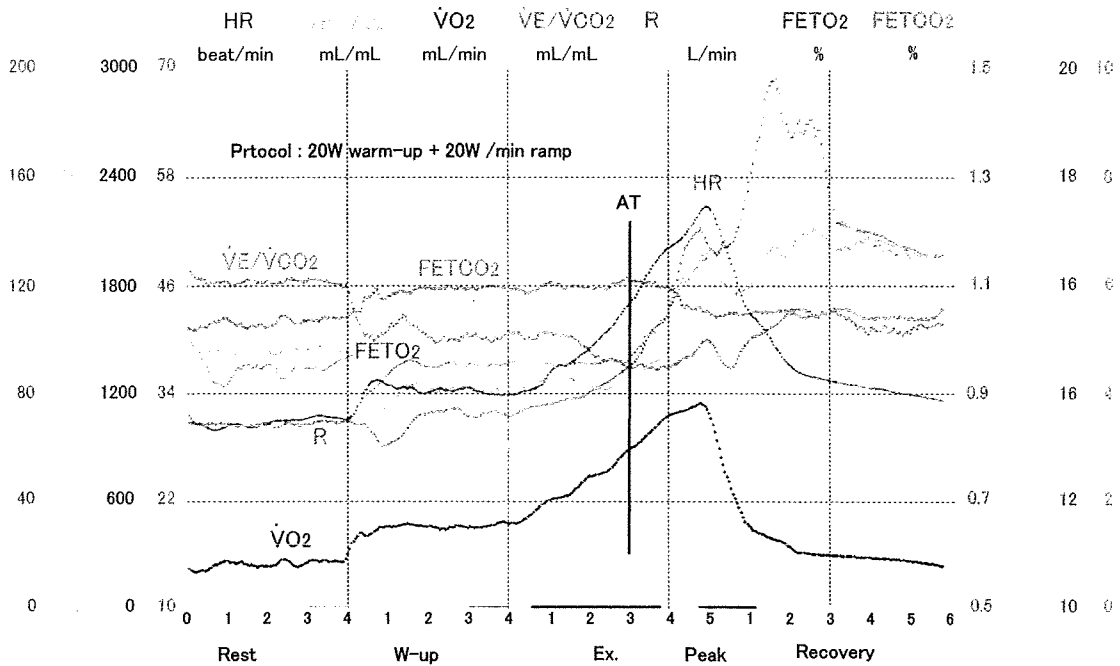
ATを決定するためにいくつかの基準が提唱されている。それらのうち、比較的よく用いられているものを㉔に示す。

peak $\dot{V}O_2$ と同様、ATは健常者、心疾患例いずれにおいても身体活動能力の指標として、また生命予後の指標として重要である。

RCポイント

運動強度がATを超えてさらに強くなると乳酸産生が進み徐々にアシドーシスになり始める。この乳酸に対して腎臓で産生される HCO_3^- (重炭酸塩) による緩衝が不十分となり、呼吸性代償 (過換気) が始まる。これがRCポイント (respiratory compensation point; 呼吸性代償開始点) である。

RCポイント以降は代償性換気のため、動脈血二酸化炭素分圧 (PaCO_2) の低下を反映して終末呼気二酸化炭素分圧 (PETCO_2) は下降する。つ



③ ATの決定法

上：ランブ負荷試験における各指標の変化とAT
 PET_{O_2} (FET_{O_2} : 呼気終末酸素分画) が増加する点、 \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} が上昇せずに \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} が増加する点、ガス交換比 (R) がより急峻に上昇する点、としてATが決定できる。

下：V-slope法によるAT決定法

x軸に \dot{V}_{O_2} , y軸に \dot{V}_{CO_2} をとり、ランブ負荷中の変化をプロットしたグラフ。45度の三角定規を当て、傾きが急峻となっていく点をATとする。通常、AT以下 (S1) の傾きは1.0となり、AT以上 (S2) の傾きは運動耐容能が低いほど急峻となる。

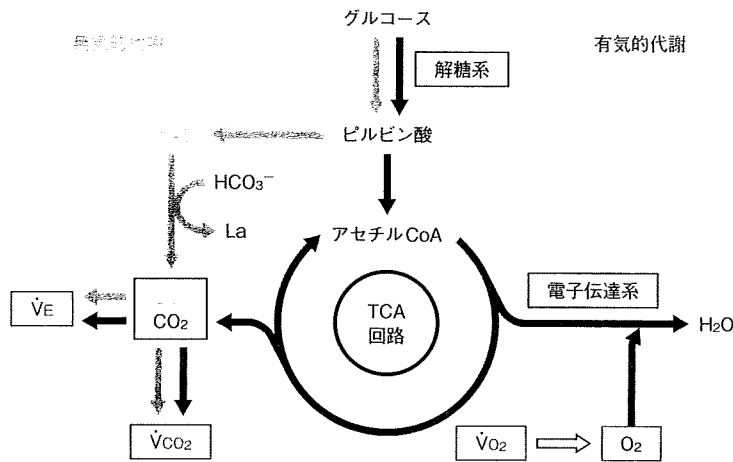
④ ガス分析法によるAT決定のための基準

1. ガス交換比 (R) の運動強度 (\dot{V}_{O_2}) に対する上昇点
2. \dot{V}_{CO_2} の \dot{V}_{O_2} に対する上昇点 (V-slope法)
3. \dot{V}_E/\dot{V}_{CO_2} が増加せずに \dot{V}_E/\dot{V}_{O_2} が増加する点
4. 終末呼気二酸化炭素分圧 (PET_{CO_2}) が変化せずに終末呼気酸素分圧 (PET_{O_2}) が増加する点
5. \dot{V}_E の \dot{V}_{O_2} に対する上昇点

COLUMN エネルギー代謝とガス交換

無氣的代謝で産生されたピルビン酸は、TCA回路に続く電子伝達系に必要な酸素が供給されないとTCA回路に入れず、乳酸となる。これは重炭酸イオン (HCO_3^-) で緩衝され、その結果二酸化炭素が産生される。動脈血の PCO_2 の増加を防ぐため

に換気の亢進が起こって、 \dot{V}_E が増加する。さらに二酸化炭素が増えると動脈血 HCO_3^- が減少し、 H^+ イオンが増加。これが主に頸動脈小体を刺激してさらに換気を増加させる。



■ 無氣的代謝と有氣的代謝

まり、RCポイントで PETCO_2 値は最高をとる。 PETCO_2 は、運動中の換気血流不均等が肺血流（心拍出量）に大きく依存するため、運動中の心ポンプ機能を推測できると考えられる。

$\Delta \dot{V}_{\text{O}_2} / \Delta \text{WR}$

仕事率 (WR) 増加に対する \dot{V}_{O_2} 増加の程度である。

$\Delta \dot{V}_{\text{O}_2} / \Delta \text{WR}$ が低値であれば、活動筋での酸素消費量の増加に見合うだけ \dot{V}_{O_2} が増加しないことを意味し、その結果酸素不足が増大して運動耐容時間は短くなる。

$\Delta \dot{V}_{\text{O}_2} / \Delta \text{WR}$ の正常値は 10 ~ 20 W/分のランブ負荷試験では 10 ~ 11 mL/分/W で、心機能障害が進行すると低値となり、年齢や性別による差はほとんどない。

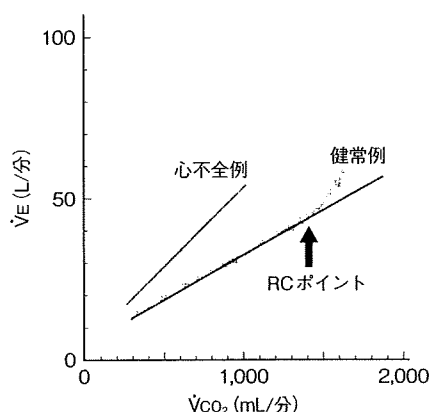
\dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} (分時換気量 vs. 二酸化炭素排出量) slope (⑤)

一定の二酸化炭素排出に要する換気量を示すので、換気効率とも呼ばれ、心不全時の労作時呼吸困難感（重症度）に関係する指標と考えられている。

健常者の \dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slope は 24 ~ 34 の範囲にある。加齢とともに上

Key word

仕事率 (work rate : WR)
単位時間内に行う仕事を仕事率 (work rate : WR) という。1秒間に 1J (ジュール) の仕事をする場合、1W (ワット : J/秒) という単位が用いられる。



⑤ \dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slopeの求め方

運動中の \dot{V}_{CO_2} を横軸に、 \dot{V}_E を縦軸にとり両者の関係を見ると、RCポイントまでは、きわめて良好な相関がみられる。これは換気がほとんど PCO_2 によりコントロールされているためである。RCポイント以上では \dot{V}_E は \dot{V}_{CO_2} に対して急峻になる。 \dot{V}_E 増加開始点からRCポイントまでを一回帰してその傾きを求める。

昇し、男性より女性で若干高値を示す。

\dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slopeの急峻化は、心不全に伴う肺の死腔換気率(生理学的死腔量/1回換気量)の上昇、化学受容体感受性亢進、あるいは慢性閉塞性肺疾患などの器質的肺疾患の合併などにより生じる。

τ (時定数) : τ on, τ off

τ onは、運動開始時、第Ⅱ相の \dot{V}_{O_2} 増加の程度の時定数。運動開始時にどのくらい速やかに心拍出量が増加するかを評価している。健常例の場合、20W開始で約20～40秒である。

τ offは、運動終了時の \dot{V}_{O_2} の減衰曲線の時定数。最大負荷試験の場合に、正常例では負荷終了後2分間前後、心不全では重症度に応じて延長するが、急峻な指数関数的減少と、それに続く比較的緩やかな減少がみられる。この早期の部分を経験回帰してその時定数を計算する。運動中の酸素不足を反映する。健常例は自覚的負荷後で50～80秒である。

各指標をどのように判断するか

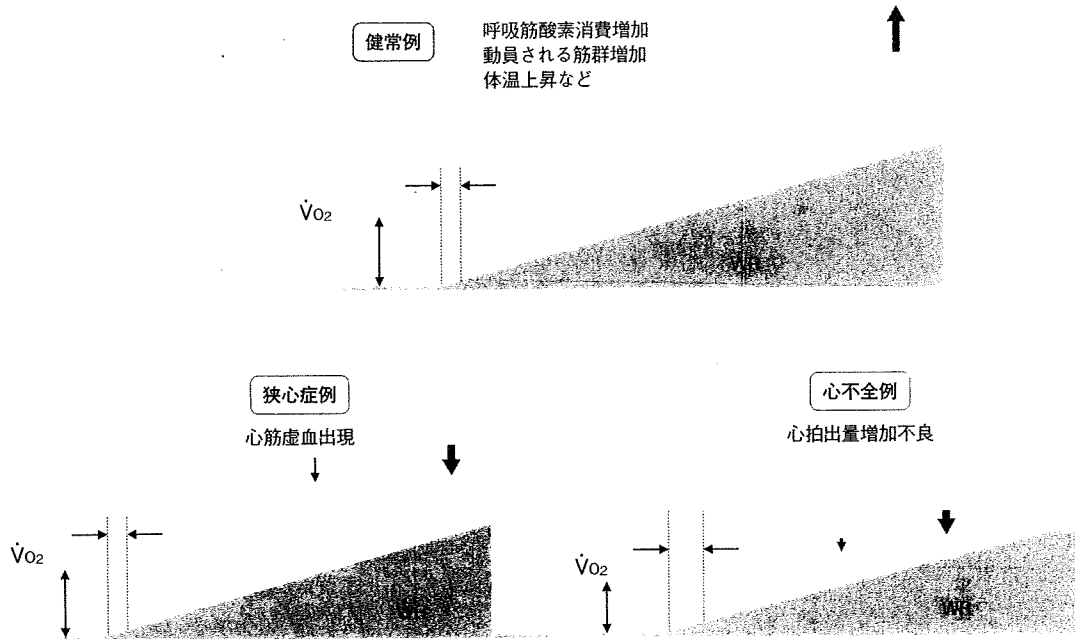
心不全の重症度評価⁴⁾

peak \dot{V}_{O_2} , AT, $\Delta \dot{V}_{O_2} / \Delta WR$ は重症度が高いほど低値を示す。

健常例では、運動強度がある程度強くなると体温上昇や呼吸筋の酸素消費増大などにより \dot{V}_{O_2} の増加の程度が増し、 $\Delta \dot{V}_{O_2} / \Delta WR$ は増加する。心不全例では運動開始時から \dot{V}_{O_2} 増加の傾きは小さく $\Delta \dot{V}_{O_2} / \Delta WR$ は低値をとる(⑥)。特にpeak \dot{V}_{O_2} は生命予後指標として重要であり、アメリカの心移植の対象については、peak \dot{V}_{O_2} が10mL/分/kg以下が絶対適応、14mL/分/kg以下が相対適応とされている。

τ on, τ offは、重症度が高いほど延長する。

\dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slopeは重症度が高いほど高値を示し、高値なほど生命予後



⑥ ランプ負荷に対する $\dot{V}O_2$ の応答と各指標の位置づけ

健常例では運動強度が高くなると、換気の亢進、動員される筋肉群の増加などでWR増加に対する $\dot{V}O_2$ の増加($\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$)が増える。心不全例では中等度以下の運動強度でも、不十分な心拍出量増加によって $\dot{V}O_2$ の増加は少なく $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は低値になる。また虚血が出現すると、左室壁運動低下、1回拍出量減少を反映し、 $\dot{V}O_2$ の上昇が緩慢となって $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は減少する。

不良。心不全でみられる代償的な過換気と関係した指標である。

虚血の評価

虚血性心疾患患者では、運動時間短縮によりpeak $\dot{V}O_2$ が低下する。

虚血性心疾患患者は、漸増運動負荷中に心筋虚血が出現する時点から心ポンプ機能の相対的低下が起り、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ は低下する(⑥)。

したがって、心ポンプ機能を反映する $\dot{V}O_2$ 動態を解析することにより心筋虚血の検出や重症度を推測することが可能である。

運動処方(⑦)

運動療法は心血管リハビリテーションの中心的役割を担っており、さまざまな身体効果が証明されている^{*1}。

運動療法を適切に行うために、運動処方が作成される。これには、運動強度、持続時間、負荷頻度、種類、期間などが考慮される。

運動強度を決定する際、ATを指標とすることが一般的になっている。運動処方を負荷量で設定する場合、負荷に応答する時間を考慮しATレベルの1分前の負荷量を処方する。心拍数で処方する場合には、AT

*1 「心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン(2007年改訂版)」(JCS 2007)。

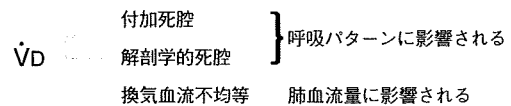
COLUMN 心不全時の換気と血流

\dot{V}_E (分時換気量) は \dot{V}_A (肺胞換気量) と \dot{V}_D (死腔換気量) の和であり、 \dot{V}_D は呼吸パターンに影響される解剖学的死腔 (ガス交換に関与しない鼻腔, 気管, 気管支などの容量) および付加死腔 (検査時のマスクなど) と, 換気血流不均等 (\dot{V}/\dot{Q} mismatch) に起因する生理学的死腔により決定される (2)。

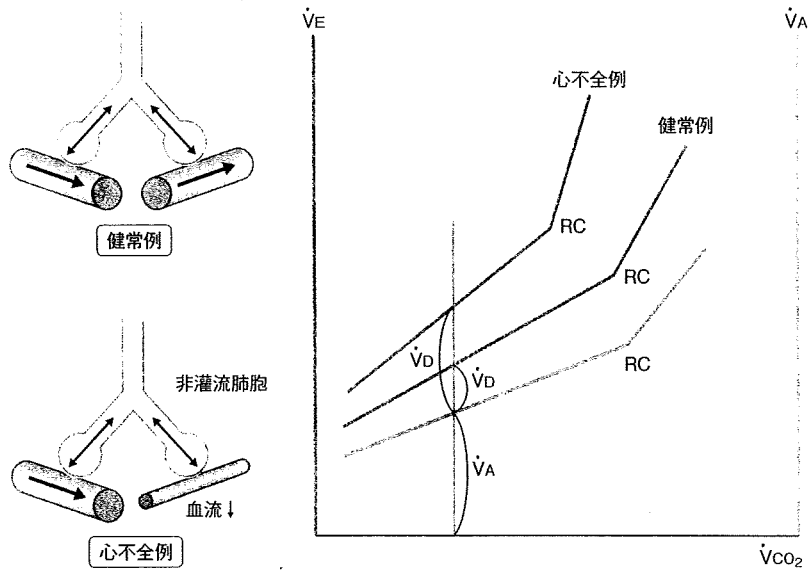
\dot{V}_E は, RC ポイント以下では基本的に PaCO_2 により調節されている。運動中の PaCO_2 は肺疾患を伴わなければ, 一定の二酸化炭素を排出するために必要な有効 \dot{V}_A は心不全例も健常例も差がない。したがって \dot{V}_E を増加させている要素は死腔換気量 (\dot{V}_D) であり ($\dot{V}_E = \dot{V}_A + \dot{V}_D$)、心不全での呼吸パターンの変化と換気血流不均等が \dot{V}_D 増加の主たる原因である。つまり心不全例で, 肺胞壁・間質の浮腫や運動中の肺毛細管圧の上昇などはコンプライアンスの低下を招き, 1 回換気量増加を妨げる。そこで \dot{V}_E を増加させるためには呼吸数を増加させ, いわゆる浅く速い呼吸となって, 解剖学的死腔に起

因する \dot{V}_D が増加する。さらに, 運動中の心拍出量の増加が少ないことは, 非灌流肺胞が残り \dot{V}_D を増加させ, 併せて心不全での運動中の \dot{V}_D を増すこととなり, その結果 \dot{V}_{CO_2} に対する \dot{V}_E が増加し \dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slope は急峻となる (3)。 \dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slope は慢性心不全での化学受容体感受性の亢進による換気亢進とも関係し, 慢性心不全での代償性過換気や労作時呼吸困難感の指標としてよく用いられている。

$$\dot{V}_E = \dot{V}_A + \dot{V}_D$$



2 \dot{V}_E (分時換気量), \dot{V}_A (肺胞換気量), \dot{V}_D (死腔換気量) の関係



3 心不全時の換気と血流

肺疾患を伴わなければ, 一定の二酸化炭素を排出するために必要な有効 \dot{V}_A は心不全例も正常例も変わらない。しかし, 心不全例では死腔換気が多いため, 同じ \dot{V}_{CO_2} に要する換気量は増加しており, そのため \dot{V}_E vs. \dot{V}_{CO_2} slope は急峻となる。

心肺運動負荷試験 (CPX)

CPXの結果から作成する運動処方

Point

- ▼ 心肺運動負荷試験 (CPX) を行い, AT を決定する.
- ▼ 運動処方箋には, 運動の種類, 強度, 時間, 頻度のほかに, 心拍数, 血圧の上限などを明記.
- ▼ AT は運動強度の上限とし, AT レベルで虚血や危険な不整脈, 血圧の異常などがあった場合には, それら異常反応が起こる手前まで運動強度を下げてもつ処方する.

AT を基準とする妥当性

心臓リハビリテーションを行うにあたり, 運動強度の設定は重要である. 運動強度の設定を誤り, 強い強度で心臓に負担をかけすぎると, 重症例や低体力者の場合, 症状を悪化させる可能性がある.

運動強度の設定法にはさまざまな方法があるが, 最も安全な方法は心肺運動負荷試験 (CPX) を行って AT (anaerobic threshold: 嫌気性代謝閾値) を決定し, それに基づき心拍数・血圧・運動強度を設定する方法である.

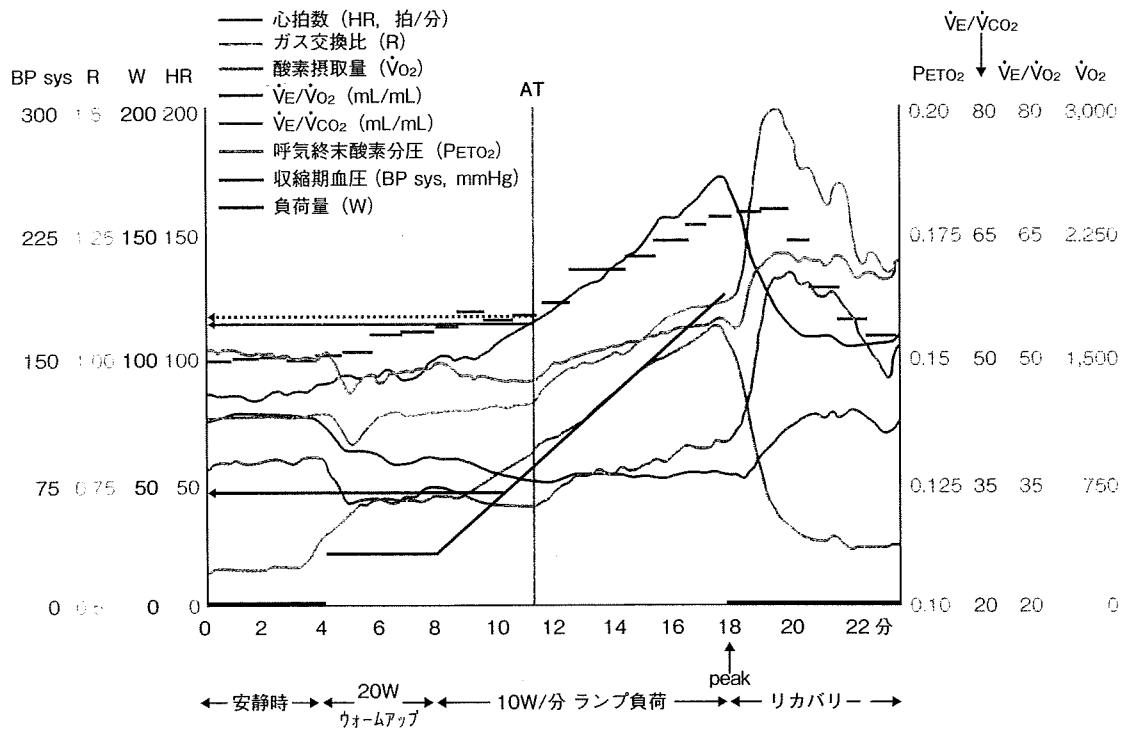
AT は運動生理学的には有酸素運動の上限であり, AT 以上の運動強度ではカテコラミン増加による後負荷の上昇や血液粘度増加, 血中乳酸濃度上昇, 心筋酸素消費量の増加などに拍車がかかり, 心疾患患者においては左室駆出率低下, 不整脈の発現などが起こりやすくなる. そのため, AT レベル以下を運動療法の基準とすることが多い.

AT から運動処方へ

❶ は CPX の結果の一例である. AT の生理学的特徴 (AT 決定クライテリア) をもとに AT を決定する. 次に AT 時心拍数をグラフのスケール (縦軸) から読み取る (❶). 負荷中の AT 時の運動強度は 57W であるが, 運動処方での運動強度は生体の反応遅れ時間を考慮し, AT の 1 分前の 47W となるので, 45 (~50) W を処方する. そのときの心拍数 110/分, 収縮期血圧が 175mmHg で, これらが運動中の上限値となる (❷). 正確に処方したい場合は 45W での一段階負荷試験を行って確認する.

AT 決定のクライテリア

- ① ガス交換比 (R) の運動強度に対する上昇点
- ② $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が増加せずに $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が増加する点
- ③ $PETCO_2$ (呼気終末二酸化炭素分圧) が変化せずに $PETO_2$ (呼気終末酸素分圧) が増加する点
- ④ $\dot{V}E$ の $\dot{V}O_2$ に対する上昇点
- ⑤ $\dot{V}CO_2$ の $\dot{V}O_2$ に対する上昇点 (V-slope 法)



① CPXの結果の一例

AT pointはAT決定のクライテリアに基づき、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$ が増加せずに $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が増加する点、ガス交換比(R)の運動強度に対する上昇点、 PET_{O_2} (呼気終末酸素分圧)が増加する点などを参考に決定する。この図のATはランプ負荷開始後3分42秒で、心拍数111/分、収縮期血圧174mmHg、運動強度57Wである。AT以降は血圧上昇が強くなっているのがわかる。

CPXをエルゴメータで実施して、ウォーキングでの心拍数を処方する際には、心拍数を5～10程度高く設定してもかまわない。これは、エルゴメータ運動では、歩行時に比し若干心拍数応答が抑制されるからである。

ATはあくまで運動強度の上限とし、ATレベルで虚血や危険な不整脈、血圧の異常(高血圧例の場合には180mmHgを目安とする)などがあつた場合には、それら異常反応が起こる手前まで運動強度を下げて処方する。ATレベルで血圧が180～190mmHgを超えている場合は、降圧治療を行ってから、再度CPXを行って処方を作成する。

高血圧や脂質代謝改善、持久力向上のためには、1回の運動はATレベルで30分から60分以上行うことがよいとされている。

(前田知子, 伊東春樹)

ID No. : 氏名 : 年齢 : 才 性別 :

主治医 :

病名 : HT, 境界型DM

負荷試験結果

検査日 : 年 月 日

負荷装置 : エルゴメータ 負荷法 : 20watts Warm up 4分+10watts Ramp

	安静時	AT 1分前	AT	PEAK
負荷量 (watts)		47	57	120
$\dot{V}O_2$ (ml/min/kg)	3.4	11.92	13.2	21.3
METs	1	3.4	3.8	6.1
血圧 (mmHg)	79	105	111	163
心拍数 (bpm)	118	170	174	230

ATレベルで 血圧異常(-) 心拍数異常(-) ST異常(-) 調律異常(-)

運動処方

- 1) エルゴメータで45(～50) watts, 心拍数110 bpm, 収縮期血圧175 mmHgを目安に
1回30分, 1日1回
- 2) トレッドミルで時速__km, __%, 心拍数__bpm
収縮期血圧__mmHgを目安に1回__分, 1日__回
- 3) ウォーキングエクササイズで時速3～4 km, 心拍数110～120 bpmを目安に
1回30～60分, 1日1回, 週3～5回

留意事項

- 1) 正確な較正を行っていないエルゴメータでは仕事率 (watt) を目標にすることは避けて下さい。
- 2) 以下の場合には実施しないで下さい。
 - a) 満腹時, 著しい空腹時
 - b) 定められた服薬をしなかったとき
 - c) 睡眠不足など, 体調が悪いとき
- 3) 運動の前後にストレッチを中心とした適当な体操を行って下さい。
- 4) その他

発行日 : 年 月 日
 医師 (サイン) :
 施設名 :

② 運動処方箋の一例

運動処方を作成するとき, 心拍数, 血圧はランプ負荷中のAT時のデータを使用し, 運動強度は生体の反応遅れ時間を加味し, ATの1分前のデータを使用する。ATレベルで血圧, 心拍数(不整脈出現), STなどに異常が認められた場合は, 治療後再検を行うか, 異常が認められないレベルまで運動強度を下げて処方する。

● 参考文献

- 1) 谷口興一, 伊東春樹(編). 心肺運動負荷テストと運動療法. 東京: 南江堂; 2004.
- 2) 伊東春樹(監). 心臓リハビリテーション—現場で役立つ Tips. 東京: 中山書店; 2008.
- 3) 伊東春樹(監). 心臓リハビリテーション—知っておくべき Tips. 東京: 中山書店; 2008.

VI 心臓リハビリテーション

1 心臓リハビリテーションの定義

心臓リハビリテーションは「医学的な評価，運動処方，冠危険因子の是正，教育およびカウンセリングからなる長期的で包括的なプログラムである。このプログラムは，個々の患者の心疾患に基づく身体的・精神的影響をできるだけ軽減し，突然死や再梗塞のリスクを是正し，症状を調整し，動脈硬化の過程を抑制あるいは逆転させ，心理社会的ならびに職業的な状況を改善することを目的とする」と定義されている¹⁾。

心臓リハビリテーションは，心筋梗塞や心不全を発症して入院してから自宅へ退院するまでのPhase I（急性期），社会復帰を目標としたPhase II（回復期），社会復帰以後生涯を通じて行われるPhase III（維持期）に分けられる。

2 包括的リハビリテーションの重要性

運動療法は心臓リハビリテーションの中心的な役割を担っており，表4-25に示すようなさまざまな身体効果が証明されている²⁾。しかし，平

表4-25 心臓リハビリテーション運動療法の身体効果

項目	内容	ランク
運動耐容能	最高酸素摂取量増加 嫌気性代謝閾値増加	A A
症状	心筋虚血閾値の上昇による狭心症発作の軽減 同一労作時の心不全症状の軽減	A A
呼吸	最大下同一負荷強度での換気量減少	A
心臓	最大下同一負荷強度での心拍数減少 最大下同一負荷強度での心仕事：量（二重積）減少	A A
冠動脈	冠狭窄病変の進展抑制，軽度の退縮 心筋灌流の改善	B B
中心循環	冠動脈血管内皮機能の改善	B
末梢循環	最大動静脈酸素較差の増大 安静時，運動時の総末梢血管抵抗減少 末梢動脈血管内皮機能の改善	B B B
骨格筋	ミトコンドリアの増加 骨格筋酸化酵素活性の増大 骨格筋毛細管密度の増加	A A A
冠危険因子	II型からI型への筋線維型の変換	A
自律神経	高血圧，脂質代謝，糖代謝の改善 交感神経緊張の低下 圧受容体反射感受性の改善	B A B
血液	血小板凝集能低下 血液凝固能低下	B B
予後	冠動脈性事故発生率の減少 心不全増悪による入院の減少 生命予後の改善	A B (CAD) B (CAD)

A：証拠が十分であるもの，B：論文の質は高いが論文数が十分でないもの，CAD：冠動脈疾患。（心血管疾患におけるリハビリテーションに関するガイドライン（2007年改訂版）²⁾，p. 9から抜粋）

成8年10月AHCPR (Agency for Health Care Policy and Reserch: 米国医療政策研究局) から発表された心臓リハビリテーションガイドライン¹⁾でも明らかなように、心臓リハビリテーションにおいては運動療法だけでは再発予防のための危険因子の軽減が十分ではない。すなわち、禁煙効果はほとんどなく、また、脂質、肥満、血圧には効果が一定していない。このため、最近のPhase IIでは、医学的な評価や適切な運動処方と運動療法、薬物療法、食事療法、患者教育、カウンセリングなどをセットにした包括的なプログラムに基づいて行われており、包括的であることで、生活習慣の変容を達することができて、心臓リハビリテーションの威力が倍増する。このような取り組みは「包括的心臓リハビリテーション」と呼ばれる。冠動脈再灌流療法の進歩や急性冠症候群の管理の進歩により、Phase Iの入院期間が短縮し、包括的ケアを行うPhase IIの必要性がますます高まっている。

3 心臓リハビリテーションと安全性

心不全患者でも日常運動量が少ないと生命予後の短縮につながることは明白である³⁾。すなわち、循環障害者は安全な範囲内で運動療法を行わなければならない。低酸素血症や心拍数異常の検出には、経皮的酸素飽和度測定計、心拍モニター、ホルター心電計など非侵襲的かつ携帯型のものが開発されており、安全に運動療法が行えるようになった。また、再還流療法や薬物治療などの進歩により、心臓リハビリテーションは以前よりも安全に行われるようになった。心筋梗塞後のリハビリテーションの安全性に関する全国調査により、心停止や入院など重篤なケースはほとんどなく、適切な運動処方に基づく運動療法はきわめて安全であることが報告されている⁴⁾。

心臓リハビリテーションのエビデンス

心臓リハビリテーションに関しては多くのエビデンスが得られている。多要素プログラムを擁す

表4-26 包括的心臓リハビリテーションの効果

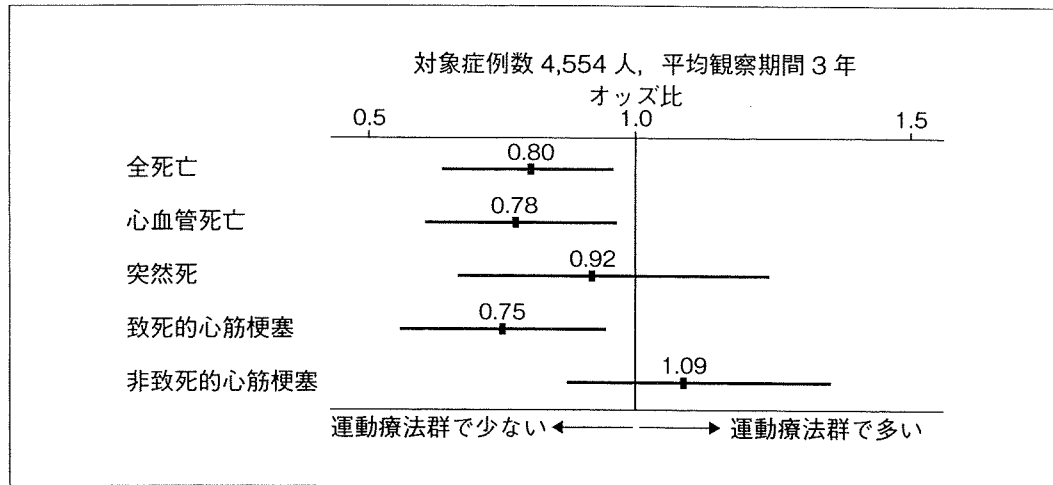
1. 運動耐容能を増加させる
 - ・最高酸素摂取量を増加させる
 - ・最大下同一負荷量における乳酸濃度を減少させる
 - ・嫌気性代謝閾値を上昇させる
2. 心室リモデリングに影響しない
3. 骨格筋機能障害を改善させる
 - ・骨格筋毛細血管密度を増加させる
 - ・II型からI型筋線維への再変換を促す
 - ・ミトコンドリアおよびその酸化酵素活性を増加させる
4. 冠危険因子を是正させる
 - ・喫煙率を低下させる
 - ・HDLコレステロールを増加させる
 - ・総コレステロールHDLコレステロール比を増加させる
 - ・血圧・血糖コントロールを改善させる
 - ・体重を減少させる
5. 冠動脈への直接作用(中枢作用)を有する
 - ・冠動脈硬化を改善させる
 - ・側副血行路の形成を促進させる
 - ・動脈の内皮機能障害を改善させる
 - ・微小循環を改善させる
 - ・血小板機能の充進状態を改善し血栓形成リスクを減少させる
6. 自律神経機能を改善させる
 - ・運動後の心拍数の回復を促進させる
7. 換気機能を改善させる
 - ・呼吸困難感を軽減させる
8. 生命予後を改善させる
 - ・全死亡率と心血管死亡率を減少させる
9. 不安, ストレス, 自信の欠如, うつ, 社会的孤立, QOLを改善させる

(上月正博, 2007⁵⁾)

る包括的Phase II心臓リハビリテーションにより、運動耐容能の増加、冠動脈硬化・冠循環の改善、冠危険因子の是正、生命予後の改善、QOLの改善などめざましい効果が示されている^{2, 5)}(表4-25, 表4-26)。とくに際立つのは、死亡率の改善である(図4-33)²⁾。

再灌流療法、ACE治療薬、高脂血症治療薬投与を行っている患者でも、Phase II心臓リハビリテーションにより全死亡率と心血管死亡率はさらに明らかに減少したと報告されている⁶⁾。また、急性心筋梗塞(AMI)以外の冠動脈疾患患者の二次予防に関しての63の無作為試験のメタアナリシス⁷⁾でも、全死亡率を15%減少させた。とくに12カ月では3%程度(心筋梗塞の再発は17%

図4-33 心臓リハビリテーションによる生存率の改善



(O'Connor GT, et al., 1989) (心疾患における運動療法に関するガイドライン, 2002²⁰⁾, p. 1198)

減少) なのに対し, 24 カ月では 47% も減少させたことが指摘されている⁷⁾. また, 除細動器植え込み患者においても外来通院型心臓リハビリテーションを受けた人のほうで運動耐容能が高く, また作動回数が少ないことが指摘されている⁸⁾.

心臓リハビリテーションの有効性が認められている循環器疾患には, 心筋梗塞の他にも, 狭心症, 冠動脈バイパス術後, 心臓弁膜症術後, 大動脈瘤手術後などがある. また, かつて心臓リハビリテーションの対象外とされてきた高齢者, 心不全, 心臓移植後などに対しても, 心臓リハビリテーションも適応が拡大され, その有効性が明らかになっている.

このように循環障害患者に対してリハビリテーションを行わないことは, 有効な「治療」を行わないことに等しいわけである. 心臓リハビリテーションにより, 筋肉機能・量が増えることで, 心機能は改善せずとも運動機能が改善する. また, 心臓リハビリテーションでは心臓機能自体が改善する可能性も明らかになってきている⁵⁾(表4-26). また, Hambrecht ら⁹⁾ が, 左冠動脈前下行枝の 75% 以上の狭窄を有する安定狭心症患者に狭窄部へステントを挿入した群に比較して, ステントを入れずに運動療法を主体とした心臓リハビリテーションを 1 年間続けた群で明らかに event free survival が良好であったという無作為対照試験の結果を報告したことは驚きであり, 心

臓リハビリテーションの有効性を大きく印象づけるものであったことは記憶に新しい. 従来のリハビリテーションといえば「疾病罹患後の廃用症候群の回復」というイメージが強かったが, 包括的リハビリテーションに取り組むことで, 日常生活動作の自立と社会復帰, 要介護の軽減のみならず, 冠動脈硬化・冠循環の改善, 冠危険因子の是正, 生命予後の改善, 機能予後の改善, QOL や不安・うつ改善などの目覚ましい成果をもたらされるのである. すなわち, リハビリテーションの概念に「危険因子の軽減による攻めの医療」という概念が加わったのである¹⁰⁾.

低いリハビリテーションへの参加率

心臓リハビリテーションは心臓疾患における標準的な治療法の 1 つであるといえるが, 呼吸リハビリテーション同様, 普及率は低値に留まっている. 厚生労働省循環器病研究委託費「わが国における心疾患リハビリテーションの実態調査と普及促進に関する研究」班の調査では, 循環器専門医研修施設ではほとんどの施設 (97%) が急性心筋梗塞患者の入院を受け入れ, 90% 以上の施設が冠動脈造影, PCI (percutaneous coronary intervention: 経皮的冠動脈形成術), 緊急 PCI を実施していた¹¹⁾. しかし, 心臓リハビリテーション実施状況を見ると, 「急性心筋梗塞患者に

何らかのリハビリテーションを実施している」「心筋梗塞患者の急性期心臓リハビリテーションを実施している」施設は研修施設で約半数、関連施設では約3割にすぎなかった。「心筋梗塞患者の回復期心臓リハビリテーションを実施している」施設は研修施設で2割強、関連施設で1割強、抽出施設で1.5%にすぎなかった。また、心臓リハビリテーションを実施していないと回答した循環器専門医研修施設245施設と研修関連施設106施設における心臓リハビリテーションを実施しない理由を調査したところ、「スタッフ不足」「設備がない」「施設基準を取得していない」であった。すなわち、わが国では、AMIに対する急性期冠動脈インターベンションが高度に普及しているのに比べ、心臓リハビリテーションの普及が不釣り合いに遅れていることが明らかになった¹¹⁾。

Phase II心臓リハビリテーションプログラムへの参加率の低さは海外でも同様で、米国では8.7～50%¹²⁾、英国では14～23%¹³⁾である。参加率が低い理由は、循環器内科医が患者に対して心臓リハビリテーションを積極的に紹介しないこと、心臓リハビリテーション施設への距離が遠いこと、患者のモチベーションが欠如していることなどがある。参加率が高い人の特徴は、年齢が若く、男性で、収入が多く、疾病の重篤度を理解していることである。

心臓リハビリテーションの普及には、患者自身あるいは患者と家族が自立・継続してリハビリテーションを行えるようにする工夫が必要である^{14), 15)}。すなわち、無理のないメニューにすること、最低限何が必要かを的確に患者や家族に伝えること、患者があきらめない内容にすることが必要であろう。

また、リハビリテーションの効果を維持するためには継続が必要不可欠であり、フォローアップのシステムをつくり継続させるような方策をとることが望ましい。リハビリテーションの効果の継続には、スタッフや家族による継続したサポートが重要であり¹⁶⁾、それらが得られない場合は、リハビリテーションの効果は訓練終了後低下すること¹⁷⁾、リハビリテーションは継続が困難であ

るとの報告もある¹⁸⁾。患者のリハビリテーションへの意欲を維持するためにどうしても外来リハビリテーションが必要である患者には、最近日本で作られたNPO法人のPhase III心臓リハビリテーション組織であるメディックスクラブのような組織¹⁹⁾などが選択肢にあげられるかもしれない。

(上月正博)

6 患者教育

心臓リハビリテーションにおいて患者教育は重要な位置を占める。虚血性心疾患は、その多くが生活習慣に起因しており、食事療法、運動療法など生活習慣の改善が治療の基本となる。心不全管理においても、予防期からの継続した自己管理や日々の身体変化や身体的・精神的症状のセルフモニタリングが重要となる¹⁾。運動療法、患者教育、カウンセリングを含む包括的な心臓リハビリテーションの実施により、冠血管イベントの低下、生命予後の改善などの二次予防効果が得られており、医師、看護師、理学療法士、管理栄養士、健康運動指導士、臨床心理士などの多職種による積極的な患者教育への介入が求められる。

在院日数が短縮する中、十分な教育機会が得られない状況があり、心臓リハビリテーション各期で必要な教育内容をおさえて継続した教育機会を確保していくことが重要である。急性期では緊急対処方法と二次予防への動機付けが目標となる。急性期に教育すべき最小限の内容として、①胸痛が生じた際の対処方法と連絡先、②ニトログリセリン舌下錠またはスプレーの使用法、③家族を含む心肺蘇生法講習、④患者の有する冠危険因子についての説明、⑤二次予防のためのリハビリテーション参加と生活習慣改善への動機付け、⑥禁煙（とその継続）があげられる²⁾。回復期には、食事や薬物、カウンセリングなど退院後の生活への指導を行い、維持期では継続教育や強化を実施する。AHA/AACVPR (American Heart Association/American Association of Cardiovascular and Pulmonary Rehabilitation)

V 運動負荷試験とその注意点, ならびに運動処方

1 運動負荷試験

1) 目的

運動負荷試験は身体ストレスに対する生理的反応をみるものであり, その目的は診断と機能評価に大別される。リハビリテーションを行う際には, 併存症の有無について十分な検討を行う必要がある。患者は高齢であることが多く, 虚血性心疾患, 高血圧, 糖尿病, 腎疾患などの疾患を合併していることが多いため, あらかじめ運動負荷試験や血液生化学検査で, フィットネス向上のための運動の適否に関して慎重に検討し, 適切な運動許容範囲を決定する必要がある。従来, 臨床の場では運動時の心電図変化から虚血性心疾患の診断や治療効果を判定することを主要な目的としていたが, 最近では心肺運動負荷試験として連続的な呼気ガス分析を併用することにより, 運動耐容能を評価する目的でも広く行われている。すなわち, 単なる心疾患の診断にとどまらず前述の酸素輸送系の総合的な機能評価とその制限因子を把握し, 適切な運動許容量の指導や運動療法にあたっての運動処方を行うためには, 心肺運動負荷試験は不可欠なものとなっている。

2) 方法

個々の症例における運動耐容能の原因と程度を十分把握したうえで適切な運動許容範囲と運動療法の適応を決定することが重要である。

(1) リスク層別化の方法

運動により起こりうる疾患とそのリスク因子には表2-8に示すようなものがある。とくに高齢者は「潜在的な心不全患者」であるという考え方もあるので, 疾患のスクリーニングは注意深くなされるべきである。しかし, 全症例に対し可能な限りの検査を行うことは非現実的である。そこで, 米国スポーツ医学会 (ACSM) の答申¹⁾に従い, ①冠動脈危険因子によるリスクの層別化と, ②心血管系および呼吸器疾患を疑わせる主要兆候・症状の検出をもとに, リスクを層別化し, 運動参加に先立って医学的検査や運動負荷試験が必要か否かを検討する。具体的には表2-9で危険因子数を数える (陰性因子があれば危険因子はマイナス1として合計する)。次に, 表2-10で, 心血管系および呼吸器疾患を疑わせる主要兆候・症状の数を数える。表2-11を用いてリスク層別化を行う。そして, 表2-12で, 運動参加のレベル (中等度または高強度) からみて運動参加に先

表2-8 運動により起こりうる疾患とそのリスク因子

運動により起こりうる疾患	リスク因子
1. 突然死, 心不全, 心筋梗塞, 狭心症, 不整脈, 大動脈瘤破裂, 大動脈解離	虚血性心疾患, 心筋症, 不整脈, 伝導障害, 高血圧, 高脂血症, 動脈硬化
2. 呼吸不全	COPD, 塵肺, 間質性肺炎
3. 脳卒中	心房細動, 高血圧, 高脂血症, 動脈硬化
4. 間歇性跛行	末梢動脈疾患, 脊椎管狭窄
5. 骨折, 関節・筋・腱の損傷	変形性関節症, リウマチ, 痛風, 椎間板ヘルニア, 骨そしょう症, 骨軟化症
6. 肺梗塞	下肢静脈瘤, 肥満
7. 気管支喘息	運動誘発性喘息
8. 糖尿病性ケトアシドーシス	糖尿病

(上月正博, 2007¹⁹⁾)

表2-9 リスクの層別化に用いられる冠動脈危険因子基準

	危険因子	判定基準
陽性	家族歴 喫煙歴 高血圧	心筋梗塞, または, 冠動脈形成術, 突然死が55歳以下の父親・兄弟・息子・65歳以下の母親・姉妹・娘いずれにみられる 現在喫煙中, あるいは禁煙開始後6カ月以内 収縮期血圧 ≥ 140 mmHg または 拡張期血圧 ≥ 90 mmHg (日を変えて2回以上測定した値) または, 降圧薬服用中
	高コレステロール血症	血清総コレステロール > 200 mg/dl, あるいは HDL-コレステロール < 35 mg/dl, あるいは高脂血症治療薬服用中 (LDL-コレステロール > 130 mg/dl を測定している場合は総コレステロール > 200 mg/dl に優先する)
	空腹時血糖 肥満	空腹時血糖 ≥ 110 mg/dl (日を変えて2回以上測定した値) BMI ≥ 25 kg/m ² , または, へそ周囲径: 男性 ≥ 85 cm, 女性 ≥ 90 cm (内臓脂肪面積 男女とも 100 cm ² に相当)
	身体活動の少ない生活	規則的な運動をしていない人, あるいは中等度強度の身体活動を合計30分/日, ほとんど毎日実施する, に合致しない
	陰性	血清 HDL-コレステロール高値

陽性の危険因子の数を加算する. すなわち HDL-コレステロール高値は1つ減じる.
(ACSM, 2006¹⁾ を改変)

表2-10 心血管系および呼吸器疾患を疑わせる主要兆候・症状

- ・虚血が原因と思われる. 胸部, 頸部, 上肢, その他の部位の疼痛, 不快感 (または, その他の狭心症を思わせる症状)
- ・安静時または低強度労作時の息切れ
- ・めまいまたは失神
- ・起座呼吸または発作性夜間呼吸困難
- ・足の浮腫
- ・動悸または頻脈
- ・間欠性跛行
- ・既知の心雑音
- ・異常な疲労感または普通の身体活動時の疲労感・息切れ

これらの症状・徴候は心血管系・呼吸器疾患および代謝疾患に特異的ではないので, 臨床的背景を考慮して判断すべきである.
(ACSM, 2006¹⁾ を改変)

表2-11 リスクの層別化

低リスク	45歳未満の男性または55歳未満の女性で, 疾患の徴候・症状がなく冠危険因子 (表2-9) を0~1個有する
中等度リスク	45歳以上の男性または55歳以上の女性あるいは冠危険因子を2個以上有する
高リスク	心血管系および呼吸器疾患を疑わせる主要徴候・症状 (表2-10) を1個以上有する. または, 既知の心血管系疾患 (心・末梢血管または脳血管疾患), 呼吸器疾患 (慢性閉塞性疾患, 喘息, 間質性肺疾患, 嚢胞性線維症), 代謝性疾患 (1型・2型糖尿病, 甲状腺疾患, 腎または肝疾患) を有する

(ACSM, 2006¹⁾)

表2-12 運動参加に先立って行われる医学的検査と運動負荷試験の必要性に対する米国スポーツ医学会の勧告

	低リスク	中等度リスク	高リスク
中等度強度の運動	必須ではない	必須ではない	勧める
高強度の運動	必須ではない	勧める	勧める

中等度強度の運動: 健康成人に対しては, 3~6 METs の運動, もしくは 3~4 mph の速歩き, または最大酸素摂取量の 40~60% に相当する.

高強度の運動: ~65歳 6.0 METs (65~79歳 4.8 METs, 80歳~3.0 METs) 以上の運動であり, 最大酸素摂取量の 60% 以上に相当する.

(ACSM, 2006¹⁾)

表2-13 運動療法の適応と禁忌

	日本循環器学会	ACSM (American College of Sports Medicine)
適応	<ol style="list-style-type: none"> 1. 心筋梗塞後の患者 2. ACバイパス術や経皮経管冠動脈形成後の狭心症患者 3. 弁膜症をはじめとする心臓血管病手術後の患者 4. 高脂血症, 高血圧症, 糖尿病, 肥満など冠危険因子を有する患者 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 医学的に安定した心筋梗塞後 2. 安定狭心症 3. 冠動脈バイパス術 (CABG) 4. 経皮的冠動脈形成術 (PTCA) 5. 代償性うっ血性心不全 (CHF) 6. 心筋症 7. 心臓ないし多臓器移植 8. 弁置換およびペースメーカ植込みなどの心臓手術 [植込み型自動除細動器 (AICD) を含む] 9. 末梢血管疾患 10. 外科的適応のないハイリスク心血管疾患 11. 心臓突然死症候群 12. 末期腎疾患 13. 糖尿病, 高脂血症, 高血圧症などの冠危険因子保有者 14. 系統だった運動や患者教育が有益とされる患者
禁忌	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不安定狭心症, 心筋梗塞発症直後 2. コントロール不良の高血圧症 (収縮期圧 220 mmHg 以上, あるいは拡張圧 120 mmHg 以上) 3. 中等度以上の大動脈弁狭窄症 4. うっ血性心不全 5. 重症不整脈 (コントロールされていない期外収縮, 心室頻拍, III度房室ブロックなど) 6. 頻脈 (100 bpm 以上) 7. 活動性の心筋炎, 心内膜炎, 心膜炎 8. 新しい梗塞症, 血栓性静脈炎 9. コントロールされていない糖尿病 10. 急性全身性疾患, 発熱 11. 解離性大動脈瘤 12. 運動禁止が必要な整形外科疾患 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不安定狭心症 2. 安静収縮期圧 > 200 mmHg ないし拡張期圧 > 110 mmHg は個別に評価 3. 症状を伴う 20 mmHg を超える起立性血圧低下 4. 重篤な大動脈弁狭窄症 (一般成人で大動脈弁口面積 < 0.75 cm² のピーク収縮期圧較差 > 50 mmHg) 5. 急性全身性疾患ないし発熱 6. コントロールされていない心房性ないし心室性不整脈 7. コントロールされていない洞頻脈 (> 120 bpm) 8. 非代償性心不全 9. III度房室ブロック (ペースメーカ植込みなし) 10. 活動性の心膜炎, 心筋炎 11. 新しい塞栓症 12. 血栓性静脈炎 13. 安静時 ST 変化 (> 2 mm) 14. コントロールされていない糖尿病 (随時血糖分 > 400 mg/dl) 15. 運動禁止が必要な重症の整形外科的問題 16. 急性甲状腺炎, 低 K 血症, 血液量減少などの代謝的問題

(ACSM, 2006¹⁾, 日本循環器学会, 1991²⁾)

立って医学的検査や運動負荷試験が必要か否かを検討する。

(2) 運動療法の適応と禁忌

運動療法の有効性はその危険性をはるかに上回って初めて認められるべきものであり、薬物治療により十分疾患がコントロールされていなければ勧められるものではない。運動療法の適応と禁忌 (表2-13)^{1, 2)}について十分検討することが必要である。

(3) 運動負荷試験の行い方と中止基準・陽性基準

虚血性心疾患の診断のみを目的とする場合には

マスター2階段試験を行うことが多い。これは規格の決まった2階段を年齢、性別、体重によって定まった速度にて昇降し、前後の心電図変化を検討するものである。特別な設備を要さず安価で簡便な検査方法ではあるが、単一強度の負荷であり、運動耐容能の評価には不適である。

これに対しトレッドミル (treadmill) や自転車エルゴメーター (bicycle ergometer) は負荷強度の自由な設定が可能であり、負荷中に多くの生理的指標が測定できるため、詳細な心機能や運動耐容能を検討するためには必須である。トレッドミルは速度と傾斜により負荷量を設定し、自

表2-14 日常よく用いられる運動負荷試験

(1) マスター2 階段試験

規格の決まった2 階段を年齢, 性別, 体重によって定まった速度にて昇降し, 前後の心電図変化を検討するものである。シングル (1 分 30 秒) とダブル (3 分) がある。特別な設備を要さず安価で簡便な検査方法ではあるが, 単一強度の負荷であり運動耐容能の評価には不適である。また負荷中の心電図がわからず, 欧米ではもはやあまり用いられていない。

(2) エルゴメーター

抵抗の加えられる自転車で, 負荷量は通常 watt の単位で表される。自転車にかかる抵抗とスピードの積である。1 kp の抵抗で 1 回転 6 m 進み, 1 分間に 50 回転させると 300 kpm (kgm) / 分であり, これは約 50 watt に相当する。我々の施設では通常 0 watt から開始し, 1 分ごとに 10 watt ずつ漸増する方法をとっている。仕事量を正確に示せる。採血などの処置が容易である。緊急時にも対応しやすい。しかし, ベダリングに不慣れな人もいる。主として大腿四頭筋を中心とした下肢の運動であり, 全身運動でないという欠点がある。下肢の筋肉を多く使うので, 筋力が弱いと心臓に十分に負荷がかかる前に, 下肢の疲労のために運動負荷を中止せざるをえないこともある。

(3) トレッドミル

速度と傾斜により負荷量を設定し自転車エルゴメーターは車輪に対する摩擦荷重で強度を設定する。歩行速度と傾斜の設定により運動負荷量を MET や Cal / 分で表すことができ, 漸増することも簡単である。MET は metabolic equivalent の略で, 運動時の酸素消費量が安静時の何倍であることを示しており, 1 MET は安静時の酸素消費であり, 5 METs は安静時の 5 倍の酸素を消費する運動の強さを示している。また心電図や血圧のモニターもやりやすい。トレッドミル試験では各施設で独自のプロトコルが考案されているが, 負荷量の増加が直線的な ramp 負荷は安全性に優れ, 呼気ガス分析を併用することで運動耐容能の客観的な指標である嫌気性代謝閾値 (AT: anaerobic threshold) が測定できることなどから, 近年好んで用いられている。しかし, 装置が大きく, 高価であるという欠点がある。下肢機能の障害者や高齢者では転倒などの危険があり, 注意が必要である。

(上月正博, 2006⁷⁾ を改変)

表2-15 脳血管疾患患者で可能な運動負荷法

1. 臥位下肢自転車エルゴメーター	両脚使用, 健側脚使用
2. 座位下肢自転車エルゴメーター	両脚使用, 健側脚使用
3. 臥位上肢自転車エルゴメーター	両腕使用, 健側腕使用
4. 座位上肢自転車エルゴメーター	両腕使用, 健側腕使用
5. 車椅子エルゴメーター	ホルター心電図使用
6. トレッドミル	運動障害が軽度な場合
7. 日常生活でのホルター心電図	すべての患者に適応あり

(上月正博, 佐藤徳太郎, 1999⁴⁾ を改変)

自転車エルゴメーターは車輪に対する摩擦荷重で強度を設定する。それぞれに長所, 短所を有するため, 検査の目的や被検者の状態に応じて選ぶ必要がある (表2-14, 表2-15)。

神経疾患や整形外科的疾患のために下肢による運動が困難な者に対しては, 腕クランク法 (arm cranking) などの上肢による負荷が行われる。

運動負荷のかけ方には, 一定の負荷量を持続的にかける方法と, 数分ごとに徐々に負荷量を増加させ運動強度を増やしていく方法 (多段階漸増負荷法) がある。通常, 多段階漸増負荷法が行われることが多く, 虚血性心疾患の診断を目的とす

る場合にはわが国ではブルース (Bruce) のプロトコルを用いることが多い³⁾。運動能力のゴールドスタンダードは最大酸素摂取量 (VO_{2max}) とされている。すなわち, VO_{2max} は単位時間内に好氣的過程で産生しうる最大のエネルギー量を意味する。VO_{2max} や後述する嫌気性代謝閾値を測定し運動耐容能を評価するためには, 連続的に負荷量を漸増し換気応答や心拍数が直線的に変化するランプ (ramp) 負荷法が必要である。VO_{2max} を測定するためには, 症候限界性の負荷を行う必要があるが, 障害者や高齢者に症候限界性の負荷をかけることは危険であり, むしろあら