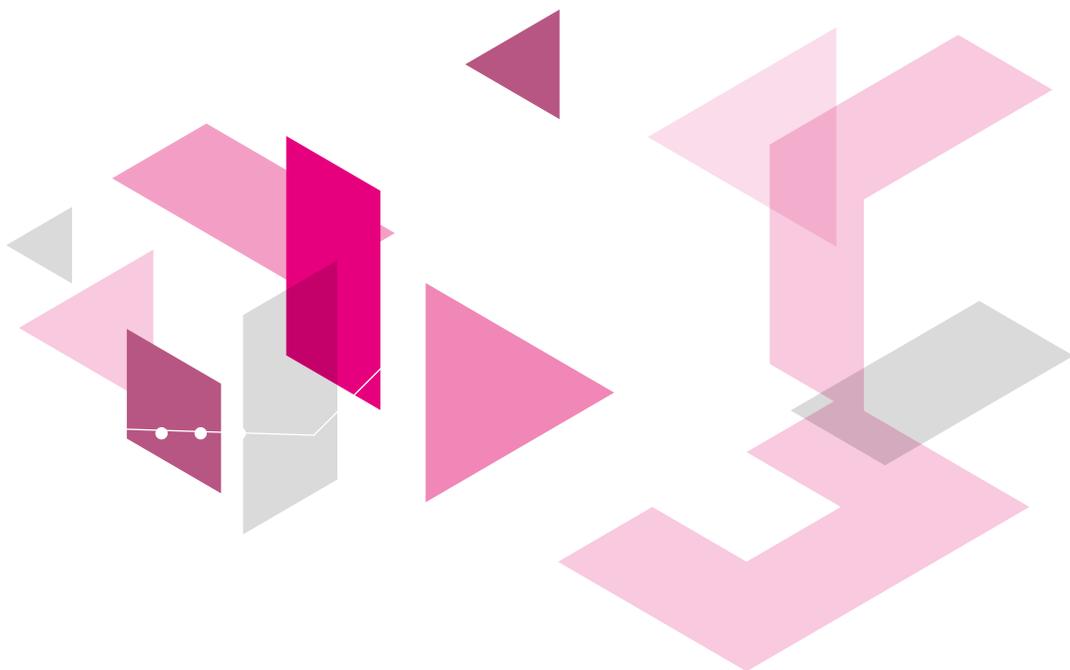


# 運動負荷心エコーの ための運動生理学

負荷心エコーとCPXのコラボによる診断・治療戦略

編著 安達 仁

群馬県立心臓血管センター心臓リハビリテーション部顧問  
東京医科大学循環器内科客員教授



# 第 1 章

## 運動と心臓・心疾患

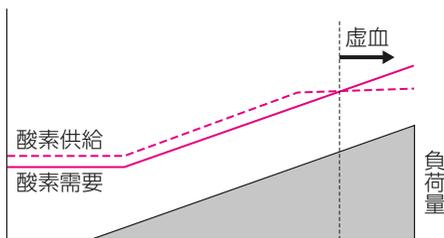
### 1 心疾患の症状と運動

#### (1) 労作時の胸痛

多くの心疾患の主訴は「労作時……」というものである。胸痛、動悸、易疲労感、息切れ感などを訴える。胸痛は心筋の酸素需要に供給が追いつかなくなった場合に感じる **図1** もので、労作性の場合には冠動脈硬化による内腔狭窄が原因となることが多い。運動誘発性の冠血管攣縮もあり、これには微小循環障害も含まれる。

心筋酸素需要は、心拍数 (HR) と血圧が上昇すると増加する。供給が需要を下回るのは、活動強度が上がった場合か、狭窄が進行した場合である。CCS 分類<sup>1)</sup> **表1** III 以上、あるいは Duke Treadmill Score<sup>2)</sup> で severe (-11 点以下) **図2** は酸素摂取量に置き換えるとおよそ 4 メッツである。狭心症症状や所見がこれ以下で出現する場合は予定外の PCI (経皮的冠動脈インターベンション) 実施割合が多いことが報告されている **図3**<sup>3)</sup> ので注意深く治療する必要がある。

心筋虚血が出現すると、まず、心筋細胞の拡張機能と収縮機能が低下し、その後、心電図上 ST が低下し、胸痛が出現する **図4**<sup>4)</sup>。したがって、胸痛と心電図変化が狭心症出現の大



**図1** ランプ負荷中の心筋酸素需要と供給の関係

健常人では酸素供給は酸素需要を満たしているが、冠動脈狭窄病変があると、ある負荷量以上では、酸素供給に限界が生じ、増加する酸素需要を満たせなくなる。需要が供給を上回ると心筋は虚血に陥る。

運動時間 (分) - 5 × 最大 ST 下降 (mm) - 4 × 胸痛指標

胸痛指標: 胸痛(-) → 0 点  
胸痛(+) → 1 点  
胸痛による運動中止 → 2 点

判定: 高リスク: -11 以下  
低リスク: +5 以上

**図2** Duke Treadmill Score

## 第4章

# 運動負荷様式と血行動態応答の違い

### 1 運動負荷時の循環応答

運動時の循環応答は、骨格筋の酸素需要に応じた血液を供給することである。最大運動時には心拍出量（CO）が約5倍に増加する<sup>1)</sup>。さらに、この増えた血液は各臓器に均等に分配されず、運動中の骨格筋に大部分が配分され、同様に心臓への血流つまり冠血流量も増加する。一方、運動中に酸素をそれほど必要としない内臓臓器への血液量は減少し、血流の再配分が生じる。運動中には交感神経活動の亢進によって、身体の各器官の細動脈の血管が収縮し、血流が減少する。酸素摂取量は、主に心血管系による供給能と骨格筋における酸素利用能とによって決定される。最大運動時の各臓器の血液量の変化を示した図1。この循環応答は、運動時の運動筋への血流供給調節のほか体温調節にも関与する。最大運動時には骨格筋の血流量がCO全体の約20～25% → 80～85%に到達するが、逆に内臓臓器の血流

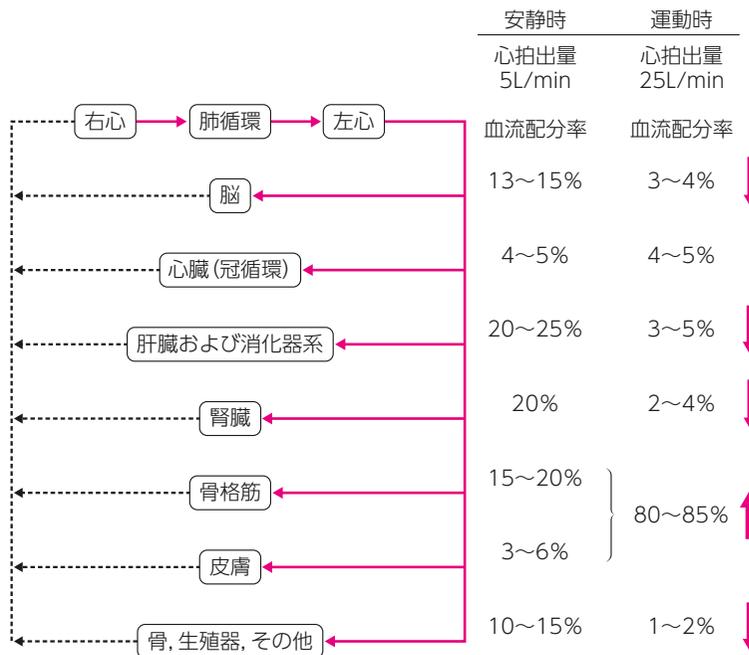


図1 安静時と運動時の各臓器の血液量の変化

右端の矢印は、安静時から運動時の血流配分率の変化を示す。

(堀 清記. TEXT 生理学 3版. 南山堂; 1999. p.74<sup>2)</sup> および本郷利恵, 他. 標準生理学 5版. 医学書院; 1999. p.565<sup>3)</sup> より改変)

## 第5章

# CPX 実施法とパラメータの意味

### 1 CPX とは

CPX は呼気ガス分析を併用する運動負荷試験である。分析するガスは、通常、酸素と二酸化炭素で、RR（呼吸数）とTV（一回換気量）も測定する。臨床に用いられる呼気ガス分析装置の多くは各呼吸ごとに計算する。吸気のガスは大気中のガスで、呼気のガスは生体から吐き出されるガスである。吸気中と呼気中のガス分圧の差を計算して $\dot{V}O_2$ （酸素摂取量）と $\dot{V}CO_2$ （二酸化炭素排出量）を計算する。また、RR とTV の積から $\dot{V}E$ （分時換気量）を計算する。さらに、これらの指標から換気血流不均衡分布の指標である $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E/\dot{V}CO_2$  やSV（一回心拍出量）の指標である $\dot{V}O_2/HR$ （酸素脈）などを計算する。

生体が酸素を消費する理由はATPを産生するためで、 $\dot{V}O_2$ を測定することによってATPをどの程度必要としているのかを知ることができる。逆に運動レベルから予測される酸素需要よりも $\dot{V}O_2$ が低い場合には、生体に何らかの異常があることが推察される。CPXは呼気ガス分析を通して病態を推測できる検査である。

### 2 プロトコール

ここでは、一般的なup-right cycle-ergometerを用いたCPXについて述べる。

負荷方法にはランプ（漸増）負荷を用いる（図1A）。連続的に負荷量が増加してゆく負荷のことで、数分ごとに一定量ずつ増加する負荷方法をステップ負荷（図1B）という。

ランプ負荷試験は10分程度でピークに達するのがよいため、それに合うようにランプ強度を決定する。そのためには最大仕事率（peak work rate: peak WR）を推定して10で除すればよい。peak WRは年齢、体重、性別によっておよそ計算できる（表1）。すなわち、60歳、体重65kgの男であれば予測peak WRが123ワットであるため12.3ワット/minにする。ちなみに（表1）において、骨格筋量と体脂肪のバランスはすべての年齢と体重でほぼ一定であると仮定されている。すなわち、体重が120kgであった場合、いわゆる肥満の人でも、超一流運動選手のように筋肉のがっしりした人でもなく、普通に元気に動き回っている体格のいい人の標準値と考えてほしい。ほとんど体を動かさずにただ太っただけの120kgの30歳男性は326ワットまで自転車は漕げない。このような問題点と、個人ごとに設定を変更した場合のミスリスクも考え、実際には、当院では、心疾患患者には年齢、性別、体重を問

## 第6章

# 運動生理学的観点から考える 運動負荷心エコー実施法

### 1 負荷強度を設定する意義

運動負荷心エコーを行う場合、どの程度の負荷強度をかけるかは、検査の目的により異なる。運動によって心室壁運動や逆流の程度が変化するの否かのみをみるだけならば、20ワットや50ワットなどで被検者が実施可能な負荷量設定で実施するので構わない。この場合はCPXのデータと対比する必要はないため呼気ガス分析は不要である。

一方、患者の症状が、「動き始め」や「2階まで昇る途中」、「走った時」など、どの程度で症状を感じるのかが具体的で、その状況で心臓に何が生じているのかを検索する場合には、負荷心エコーに用いる負荷強度の設定が重要になってくる。

動き始めに症状を感じる場合には、体を動かすという応答が症状の原因になっていることが考えられるため、0ワット負荷であっても異常所見が出現するはずである。負荷強度を強くすると症状が強くなるとは限らないため、20ワットを追加して得られる情報は少ないが、一般的には安静時、0ワット、20ワットの負荷を3～5分間ずつ実施して心エコーを行う。

これに対して、2階まで昇る途中や、走った時などの症状を感じる場合には、それぞれの活動レベルに合わせた負荷が必要である。安静時、症状が出現するレベル以下の負荷量、それ以上の負荷量で心エコーを実施し、所見の変化を評価して、症状出現時に何が起きているのかを考えるべきである。

### 2 日常活動の運動レベルと酸素摂取量の対比

第1章の表3に日常活動に必要な酸素摂取量( $\dot{V}O_2$ )を示した。1メッツとは安静時に必要な酸素摂取量で3.5mL/min/kgである。もともとは体重70kgの白人男性のデータである<sup>1)</sup>が、当院でも自験例データをみたところ、体重30～145kg(平均61.6kg)、およそ20～80歳のデータベースで計算しても安静時の $\dot{V}O_2$ は3.58mL/min/kgであり、国際的な3.5という数値を使用することに問題はないと思われた。

表1に、負荷心エコーでよく用いられる25ワット、50ワット、75ワット、100ワットの負荷レベルが日常生活のどの程度の活動量に合致するかを示す。

日本人の自転車エルゴメータでのAT(嫌気性代謝閾値)標準値は、 $Y = -0.100X + 21.44$  (男)、 $Y = -0.069X + 19.35$  (女)であらわされる<sup>2)</sup>ため、男性の場合、50歳なら4.7メッツ、60歳なら4.4メッツ、70歳なら4.1メッツである。このことから、男性で表1

表1 自転車エルゴメータの負荷量（仕事率）と酸素摂取量・日常活動

負荷量 (ワット)	$\dot{V}O_2$ (mL/min)		$\dot{V}O_2$ (mL/min/kg)	メッツ	代表的な日常活動
25	650	A	8.1	2.3	植物への水やり ゆっくりした平地歩行（時速 3.2km） 2 階まで昇る
		B	10.8	3.1	時速 4.0km の歩行
		C	13.0	3.7	軽い筋トレ
50	900	A	11.3	3.2	掃除機かけ
		B	15.0	4.3	時速 6.0km の歩行
		C	18.0	5.1	走り出す直前の速さ（時速 6.5km）で歩く
75	1150	A	14.4	4.1	
		B	19.2	5.5	
		C	23.0	6.6	ジョギング（時速 8.0km）
100	1400	A	17.5	5.0	
		B	23.3	6.7	
		C	28.0	8.0	サイクリング（時速 8.3km）

A: 50 歳・体重 80kg, B: 60 歳・体重 60kg, C: 70 歳・体重 50kg の場合  
0 ワット時の  $\dot{V}O_2$  が 400mL/min の場合

の A の条件の場合なら 100 ワット, B なら 75 ワット, C なら 50 ワットでは AT 以上の負荷量となっていることがわかる。

もしも、患者の息切れが、階段を 3 階まで昇った時に出現するのであれば 4 メッツ程度の労作で症状が出現するということなので、A の条件の被検者なら 75 ワット、やせぎみの高齢者である C であれば 50 ワット負荷時に出現する異常がその息切れの原因と説明できる。動き始めに息切れを感じる被検者が、負荷心エコーの 50 ワットで異常が出現するのであれば、そこで生じた異常は息切れの原因とはいえず、ほかの原因を探さなければいけない。

### 3 負荷に対する時間的応答性

活動強度が増加するにつれて、それを遂行するために必要な ATP 量が増加するため、 $\dot{V}O_2$  や心拍数 (HR) は増加する。しかし、瞬時に変化するものではなく、その負荷強度に適合するまでの時間が必要である (図1)。この時間を立ち上がり時定数 ( $\tau$ ) と呼ぶ。この時間的遅れは運動耐容能が良好なほど短時間で済むが、それでも 0 ワットから 25 ワットに負荷量を増やす場合には 2 分程度要する<sup>3)</sup>。適合に要する時間は負荷強度が増すほど長くなる<sup>4)</sup>。被検者にとって「中等度」、すなわち AT レベル程度の運動においては 6 分弱要することもある。すなわち、一定量の負荷をかけて負荷心エコーを記録する場合、負荷強度を増加してから少なくとも 2～3 分経たないと、新しい負荷量に応じた心行動態を反映していないのである。負荷量を 1～2 分間隔でどんどん増加していった心エコーを記録しても、いつの負荷量に応じた心臓の動きを記録しているのかわからなくなってしまう。また、各ステップが短すぎると、徐々に  $\dot{V}O_2$  が実際よりも低い数値を示すようになってしまい (図2)、患者が漕いでいる負荷量よりも少ない負荷量に対する応答を評価していることになってしまう。

# 第 12 章

## 心筋虚血と心機能障害

### 1 労作性狭心症

労作性狭心症の重症度は第 1 章で述べた通り症状をもとにした CCS 分類<sup>1)</sup>で評価する。負荷試験の判定法としては Duke Treadmill Score (DTS)<sup>2)</sup> が推奨されている。もちろん、冠動脈狭窄の程度は FFR (血流予備量比) や CCTA (冠動脈 CT 血管造影法) で評価するが、これは狭心症の重症度と必ずしも一致しない。

狭心症の予後に関しては CCS 分類 3 以上では予定外の PCI (経皮的冠動脈インターベンション) が増加することや<sup>3)</sup>、DTS で severe の場合には予後が悪いことが知られており<sup>4)</sup>、この評価のために運動負荷試験が必要である。ただ、トレッドミル負荷試験では心電図変化が読めない症例や無症候性心筋虚血に対応できないため、運動負荷試験としては CPX のほうが優れていると思われる。

CPX では運動中の一回心拍出量増加不全を  $\dot{V}O_2/HR$  (図1) や  $\Delta HR/\Delta \dot{V}O_2$  (図2) という指標で評価できる<sup>5)</sup>。これらの指標と心電図変化、症状から虚血が出現する運動強度、すなわち虚血閾値を評価でき、狭心症の重症度を決定できるとともに運動処方を作成できる。

また、狭心症の 10 ~ 20% が心不全を発症するといわれているが、これは虚血の範囲が関

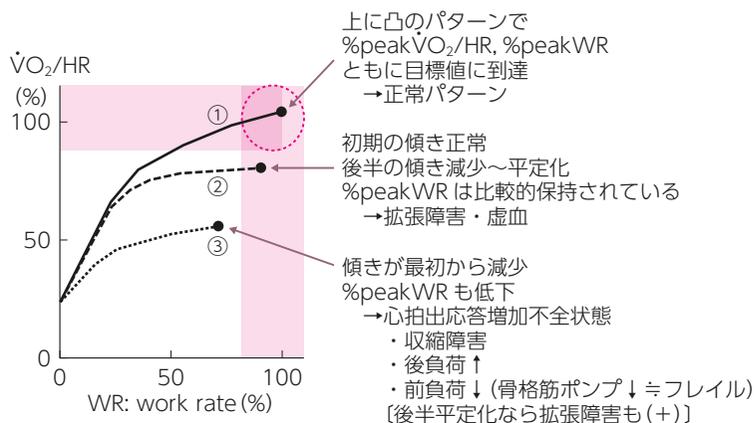


図1 心筋虚血に伴う  $\dot{V}O_2/HR$  の変化

健常人では  $\dot{V}O_2/HR$  はランブ負荷中、AT 付近まで急速に増加し、その後、やや傾きが浅くなるパターンを示す (①)。負荷開始後しばらくは正常で、AT 以下で  $\dot{V}O_2/HR$  が平定化した場合 (②)、心電図上 ST 低下を伴っていれば比較的広範囲の心筋虚血が生じたことを示唆する。広範囲心筋梗塞による HFrEF (左室駆出率が低下した心不全) では最初から傾きが浅い (③)。