運動負荷試験の方法と臨床生理学的意義*

紅 露 恒 男**

(東京大学第四内科)

はじめに

心疾患のリハビリテーション(以下「リハ」)に運動負荷法が必要欠くべからざる手段であることは、広く理解されてきている。元来、循環系に対する運動負荷法の目的は、負荷を通じ、循環系機能亢進状態を惹起せしめ、被験者の循環系機能がどのレベルまで生理学的にみた正常範囲内の反応で追従適応し得るかを検討するところにある。

この循環系運動負荷法の臨床的用途は、①心疾患の有無に関する診断、②すでに診断のついた心疾患患者の重症度または機能容量の検討、③心ないし循環機能の改善を目的とする訓練への応用、に大別される。「リハ」における場合は主として②と③である。以下、特に「リハ」に関係した運動負荷試験法の方法と、その臨床生理学的意義につき述べる。

負荷法の種類——用具による別——

負荷法はまず用いる器具により step 法, tread mill 法(TM), bicycle ergometer 法(BE), isometric hand grip 法(IHG)などに分類される。

step 法¹⁾は安価、簡便であり、Master 表による万国共通の負荷量による多くの data の集積がある。近年、負荷の不確実性についての批判があり、TM, BE などに変わる施設も出てきているようであるが、負荷法を広く普及させる意味でも、未だに捨て難い方法である。負荷の強さは毎分当りの step 数で規定するが、疾患患者を対象とする機能容量判定の目的では、Master 表規定の 75%, 50%, 25% など軽い負荷量での試験も臨床的意義

がある。負荷持続時間についても分割法が工夫されている。step 中の血圧測定も血圧計および聴診器のチューブを約 1.5m に延長すると可能である。また、Master 台を使わずに台の高さを変える法や、1 ステップのものなどもある。

TM 法は、近年、米国を中心に急速な普及をみてきた。特に普通の 100 volt 電源を使え、使用後は折たたみ格納できる小型軽便な臨床用装置の開発が普及に大きな役割を果たしている。負荷の強さはベルト速度と台の傾斜によるが、Bruce²⁾をはじめ諸家の protocol がある。歩行という最も基本的な動作を用いるところに、日常生活との対比の意味からも、日常臨床的な観点から大きな優位性がある。従来の protocol は、診断的用途のためか、負荷量がやや大なる傾向がある。疾患患者の機能容量判定用には、軽負荷領域の重症度分類の可能な protocol の作成が望まれる。

BE 法は、欧州、特に北欧で古くから負荷の中心的役割を果たしてきた³⁾。一般にはやや不馴れた運動で、局所筋群の疲労のため、大きな酸素摂取 $\dot{V}O_2$ を得るのに不利といわれるが、臨床的には十分な心脈管系の反応レベルが得られ、大きなスペースを必要とせず、比較的安価な点など捨て難い長所を有する。上半身の動揺が少なく、血圧、耳朶からの脈波などの測定にも向く⁴⁾。特に臥位での BE 法は、心臓カテーテルなど、多少の危険を伴うもの、微妙な計測を要する検査時などには不可欠である。心エコー図法で左心室径の動態を連続測定することも可能となる⁵⁾。一般に BE 法は、使用筋群と Watt 数、または KPM (キロ・ポンド・メータ) 表示による外的仕事量の関係が直接的で、負荷時動態の数量的検討は正確にできる。

IHG 法は、上述の dynamic exercise と異なり、血圧すなわち左心室の後負荷 afterload を撰択的に増加せしめるが、 $\dot{V}O_2$ は安静時に比べほとんど増加しない点で異質な static な負荷法といわれる。

* The Methods of Exercise Testings and Their Clinico-physiological Meanings.

** T. Koro (The 4th Department of Internal Medicine, Faculty of Medicine, University of Tokyo)

図 1

図 2 Examination about O₂-Deficit vs Debt

図 3 Dd, Ds vs HR

負荷スケジュールによる分類

負荷法は、負荷実施のスケジュールによっても分類される⁶⁾。図1左上は single level load, 単一水準負荷法で、一定の強さの負荷を一定の時間、1 回だけかける方法で、あらゆる負荷法の基本的要素を含んでいる。他の三法は、ある目的とする異常所見が現れるまで、負荷の強度を次第に増していく段階的負荷漸増法である。右上は一段階を比較的短時間とし、ほぼ連続的に負荷強度を上げる法で、回復期に関する配慮がない。短時間内に maximal level まで到達することを主目的とする。左下は負荷強度を上げる間に短時間の休息をとる方法で、前回負荷の影響を少しく消去でき、回復期の検討も多少できるなど、疾患者のテストに適する。右下は一段階が比較的長く、一応定常状態 steady state (以下 SS) での検討を目指したものであるが、total の時間が長くなる欠点がある。

負荷試験における各相と steady state

これら諸パターン of 負荷検討の基礎は、single level load の中にみられる。負荷時反応パラメータは、多かれ少なかれ図2の如き動きをみせる。すなわち、図の B₁ に示す運動開始早期の新しい代謝レベルへの適応期、平衡状態に達した定常状態期としての B₂、運動終了後の回復期 C である。SS をのぞく前後の部分は energy の出入バランスがとれておらず不安定で、計測値の評価が困難になるため、負荷試験ではなるべく SS での機能検定

が望まれる。ところで、SS が得られない労作の体酸素摂取率 $\dot{V}O_2$ は、運動初期の酸素欠損 O₂-deficit と負荷後の酸素負債 O₂-debt を等価とみなし、算出するが、両者は必ずしも等しくはない。図の下部に算出したものは BE で 50~75 Watt × 6 分の負荷時の値であるが、Debt は Deficit の約 2 倍となる。したがって〔運動中 $\dot{V}O_2 + O_2$ -Debt〕なる計測値は、SS での計測より大なる値が得られることになる。ちなみに、Master 台による step 法でのエネルギー消費を算出、比較すると、〔運動中 $\dot{V}O_2 + O_2$ -Debt〕は 8.6 Cal/min、SS では 7.6 Cal となり 1 Cal の差が出る。 $\dot{V}O_2$ 値にふれる時には採気条件、算出法を明記すべきである。

また、一般に SS の認定は心拍数 (HR) が一定になることで行うが、近年普及してきた超音波心臓図 (UCG) により左室内径の動態を検討すると、HR が SS に入った後も、1 回拍出量 (SV) ($Dd^3 - Ds^3$ として算出) が増し続け non-steady である相の存在がみられる (図3)。厳密な意味での SS の認定は、臨床的には困難なことを認識すべきである。

負荷試験時の計測項目

循環系の負荷試験では一般に HR、血圧 (BP)、 $\dot{V}O_2$ 、ECG 波型、その他目的に応じ心臓カテーテル、UCG、頸動脈波などを用いて SV、分時心送血量 (CO)、心室収縮時相 (STI) などの検討が行われる。検討の基本は、負荷の強さと反応の大きさの相互関係から被験者循環系の反応特性をみるところにある。

運動負荷時循環系反応の基本

負荷法の相違により、同一個体に関しても $\dot{V}O_2$, HR, BP などの反応様式が多少異なる。この問題を解明する共通の原理について検討する必要がある。この基本は、労作の強度 work intensity に求められる。すなわち、ある共通の運動系、筋肉群を用いる労作の強度は、その系を用いてなされ得る最大運動量を $\dot{V}O_{2max}$ で表せば、これに対する労作時実測 $\dot{V}O_2$ 値の比で表され、relative work load とも呼ばれる。 $\dot{V}O_2/\dot{V}O_{2max} \times 100$ 。

$\dot{V}O_2$ は使用する筋肉量にも比例するから、 $\dot{V}O_2$ の絶対値では真の運動強度の指標となし得ない。これを大筋群使用例としての脚運動と、小筋群使用例としての腕運動時の循環諸変量反応を work intensity を基盤として考えてみる。図 4⁷⁾にみる如く、腕運動では毎分約 2l の $\dot{V}O_2$ で work intensity は 100% に達し、これは交感神経の最大緊張に通じて HR, BP など交感神経緊張度依存性の指標は最大反応を示す。同じレベルの心拍数の反応—毎分約 200—は、脚運動ではより大きな $\dot{V}O_2$, 毎分約 3l に対応していることがわかる。一方、 $\dot{V}O_2$ の安静状態からの増加分 $\Delta\dot{V}O_2$ は、使用筋群の血流量の増加分、結局、分時心拍出量 $\dot{Q}$ の増加分 $\Delta\dot{Q}$ に比例する。 $\dot{Q}$ は SV と HR の積であるから、 $\dot{V}O_2 = \dot{Q} \times A-VDO_2 = SV \times HR \times A-VDO_2$ なる式から SV の値を考えると、同一強度の労作では、HR が同一とみなされるから、それに対する $\dot{V}O_2$ が大なる脚運動では大、腕運動では小となる。この原理が TM, BE など負荷法による反応性の相違として表れてくると理解できる。

心筋酸素消費量関連指数

同一の身体運動量に対する循環系反応、すなわち増大した体酸素需要量にこたえるべく活動する心脈管系の仕事量としての心筋酸素消費量 ($M\dot{V}O_2$) は各個体により差がある。したがって、冠不全病態の重症度を表す指標の一つとしての ST 偏位量は、身体運動量との対比でなく、 $M\dot{V}O_2$ との対比で行われるべきものである。

この $M\dot{V}O_2$ を臨床的に推測するのに、表 1 に示す如き種々の指数が提唱されている。 $M\dot{V}O_2$ 実測値との相関をみると、double product すなわち HR と収縮期血圧の積が最も良い相関を示し、HR がこれに次いでいる⁸⁾。心室の収縮時間を加味した複雑な指数よりも HR が良い相関を示すことは、運動負荷時の反応として興味のあるところである。まして、「リハ」では日常生活を含めた患者への全体的な配慮が必要であるから、日常活動中にも比較的簡単に検出検討可能な、単純ではあるが根元的な指数である HR の活用をすすめるべきで

図 4

表 1

	r
Tension Time Index	0.65
Triple Product	0.68
Double Product	0.86
HR	0.82

ある。

年齢別最大心拍数

上述の如く、運動の強さと HR が直線的な比例関係を持つことは、古くから知られており、スポーツ医学でも運動強度を HR で計ることが行われてきた。そして、HR の反応には生理学的に達し得る限界値があり、最大心拍数 maximal HR (HR_{max}) と呼ばれるが、この値は加齢と共に減少する。多くの研究者によるデータがあり^{9,10)}、各々相違もあり、個体間のバラツキも大きい、平均的にみるとはば「220—年齢」となる。

図 5 CO vs HR, PRP, KATZ'S Index

$\dot{V}O_2$ と HR は高い相関を持つところから、前述の relative work load の $\dot{V}O_2$ を HR に置換した式 $HR/HR_{max} \times 100$ にて、ある負荷試験時に到達した HR が、年齢別最大 HR の何 % であるかをみれば、被験者年齢相当の運動強度を知ることができる。各年齢層の被験者にとって同等の強さの負荷をかける時のよい指標となる可能性がある。また、心疾患患者の心機能の評価に利用する時は、症状によって制約される最大運動能力を HR で表し、上記の式に当てはめれば、その年齢相応の健常者に比べ何 % の機能容量を持つかの評価が可能となる。

心拍出量の反応

心血管系の機能の第一義は全身各臓器への送血である。この心臓のポンプ機能の評価は、心電図のみでは不可能で心拍出量 $\dot{Q}$ を計測する必要がある。この $\dot{Q}$ が、運動時にどのように反応するかを知ることは重大な問題である。運動時の体酸素摂取率の増加分 $\Delta \dot{V}O_2$ と心拍出量の増加分 $\Delta \dot{Q}$ の間には、健常者ではほぼ一定の比例関係があり、男女、老若を問わず $\Delta \dot{V}O_2$ 1 l に対して $\Delta \dot{Q}$ 6 l すなわち 1:6 である¹¹⁾。Ferrer, Braunwald らは cardiac performance の検討に、この関係をみ、 $\dot{V}O_2$ 100 ml の増加に対し、500 以上 700 ml に達する $\dot{Q}$ の増加が得られる心臓は良い performance を有するとした¹²⁾。この比を Exercise Factor (EF) と呼ぶ。EF = $\Delta \dot{Q} / \Delta \dot{V}O_2$ 。

木村(登)一門は、つとに虚血心につき運動時の STT 反応と EF の関係を検討し、虚血性病態の心筋細胞膜電位と血行動態の相関についての業績をあげ、向後の研究の方向性に関する貴重な示唆を投じた¹³⁾。

近年、急速に発達普及してきた UCG の利用によって、このような血行動態に関する情報を左室内径の変化としてとらえ得るようになった。安静時に記録可能な例では、運動中にも計測可能な記録が得られる。

Pombo の式により、内径の 3 乗の差として SV を算出すれば、運動負荷中の心拍出情況が一拍毎に連続的に、しかも非観血的に計測可能となる。

図 5 は、HR, BP, SV の反応を臥位 BE 50 Watt 6

分の単一水準負荷法でみたものであるが、HR, BP の迅速な反応に比べ SV の立ち上がりがおくれ、あたかも O_2 -deficit の如き相をみせている。

UCG 法には虚血心などの場合、心室の収縮様式の変化を来たと M モードのスクリーンでは情報が不十分となるなど問題点をはらんではいないが、いずれ何らかの方法にて、血行動態の反応が正確に手安く観察可能とすることは今後の大きなテーマである。

T.K. 54 6 Two Step Test

* During Attack C₅-C_{6R} by ECG Memo

図 6

目標心拍数による速度自動制御型 TM

運動負荷試験時の指標としての HR の有用性は以上述べた

通りであるが、具体的な応用の一例として目標心拍数によるベルト速度自動制御型 TM と、その臨床応用が考えられる¹⁴⁾。すなわち、冠疾患の診断的目的ならば、年齢別 HR_{max} の 85~90%，診断のついた冠疾患患者の冠予備力検定ならば 100, 110, 120, 130 と段階的に目標 HR を設定する。TM 本体に連結された制御器内部で、瞬時 HR は設定されている目標 HR と比較器で比較され、低ければベルト速度を加速、高ければ減速せしめる。ベルト速度と HR が併行して連続記録されるため、歩行速度と HR による SS の認定が容易となり負荷試験の質の向上に資する。

β-受容体遮断薬 (β-blocker)

生体の運動時の合目的的適応に交感神経系の活動があり、運動の強度は交感神経緊張の強度と並行しており、HR の適応レベルもその一つの現れと理解できる。臨床で冠不全病態の control に近年繁用される β-blocker は、運動時の交感神経心臓枝の活動効果を抑制する。すなわち、HR を押え、心筋収縮性を低め、血圧を下げ、心拍出量を減らす。この効果は、限られた冠循環機能容量を持つ冠不全患者の活動時心筋酸素消費量を押え、心筋の酸素需給関係を subclinical なレベルに押え、狭心症状の発来を押える。しかし、元来身体活動時に合目的的に活動する交感神経の緊張を押えれば、どこかにひずみが来てはいないか問題になる。

これを運動時の HR, BP の反応を低める身体訓練効果 physical training effects と対比して考えると、β-blocker は全身の交感神経緊張のうち、心臓神経の反応を遮断するが、α-支配の末梢、内臓臓器の組織灌流量減少反応は抑制しない。一方、運動訓練効果の主体は迷走神経緊張増大 vagotonia であり、運動時の全身の交感神経緊張反応レベルを下げる。したがって、組織灌流の減少反応は少なく、生体活動にとりより合理的な適応といえる。

事実、BE 負荷を β-blocker 投与前後に行った際の耳朶採血による pH を Astrup 法で検討すると、β-blocker 使用時には運動後の pH の酸性側推移からの回復が大幅におくれ、組織灌液の不適合を露呈している。この事実は、治療や生活指導に当たって留意すべき点と考える。

広義の負荷法に関する問題点

これまで述べてきたところは、運動負荷、 $\dot{V}O_2$ 増大、循環系負荷増大、 $M\dot{V}O_2$ 増大、冠不全誘発なる一方向性の発症機構のみにふれたが、循環系の病態はそれほど単純なものではない。

症例 T.K. は、夜間排尿時のみに狭心症状を訴える

ものであるが、double Master test では有意な STT の変化がみられない。広義の負荷法としての携帯型心電計にて、この発作をとらえてみると、負荷試験時到達した HR よりも少ない HR で ST の有意の低下を来していることが判明した。このように冠不全病態発現の閾値は、おそらく自律神経、体液性の関与を受けて、同一症例においても 24 時間通して固定的でないことを推測させる事象は、間々経験するところである。したがって、心冠疾患患者の病態検討には、患者の日常生活内のあらゆる situation に起因する発症要因の検討が必要となる。特に「リハ」の分野においては然りである。この際、携帯型心電計は、有力な武器となろう。誘導が多くの場合一誘導であり、検討される虚血心筋部位が限られるなどの制約はあるが、睡眠中を含めた、vagotonic な機能的冠血流減少に起因する冠不全病態の検出には有効な手段であることに違いない。この方法は、負荷試験としては定量的でないが、少なくとも HR との対比において検討すれば意味づけは十分に可能となろう。

おわりに

運動負荷法は種類・方法を含め多岐にわたり、それぞれ利害得失がある。また、きわめて貴重な検査法である反面、時間と人手が要る。目的にそった無駄のない、必要かつ十分な条件をみたます検査の protocol の検討が望まれる。同時に、この面に対する paramedical の方々の理解がすすみ、多くの参加を得て、この有用な検査法の適応が増し、患者への寄与の面で大きな進歩となることを期待したい。

文 献

- 1) Master, A.M., Oppenheimer, E.T.: A simple exercise tolerance test for circulatory efficiency with standard tables for normal individuals. Am. J. Med. Sci., 170: 223, 1929.
- 2) Bruce, R.A.: Modern concepts of cardiovascular, 25: 321, 1956.
- 3) Åstrand, P.-O., Ryhming, S.: A nomogram for calculation of aerobic capacity (Physical Fitness) from pulse rate during submaximal work. J. Appl. Physiol., 7: 218, 1954.
- 4) Chirife, R., Foerster, J.M., Bing, O.H.L.: Left ventricular ejection time by densitometry in patients at rest and during exercise, atrial pacing and atrial fibrillation. Comparison with central aortic pressure measurements. Circulation, 50: 1200, 1974.
- 5) 野田汎史, 荻田啓子, 天野直美, 紅霧恒男, 伊藤良雄, 赤池 陽, 木暮 喬: 運動負荷心エコー

図一健常者の臥位 Ergometer 単一水準負荷法による左心機能評価への試み. J. of Cardiography in print.

- 6) WHO tech. rep. ser. No. 388 : Exercise test in relation to cardiovascular function. Geneva, 1968.
- 7) Clausen, J.P. : Circulatory adjustments to dynamic exercise and effect of physical training in normal subjects and in patients with coronary artery disease. Prog. Cardiovas. Dis., 58 : 459, 1976.
- 8) Nelson, R.R., Gobel, F.L., Jorgensen, C.R., Wang, K., Wang, Y., Taylor, H.L. : Hemodynamic predictors of myocardial oxygen consumption during static and dynamic exercise. Circulation, 50 : 1179, 1974.
- 9) Robinson, S. : Experimental studies of physical fitness in relation to age. Arbeitsphysiol., 10 : 251, 1938.
- 10) Lester, F.M., Sheffield, L.T., Reeves, T.J. : Electrocardiographic changes in clinically

normal older men following near maximal and maximal exercise. Circulation, 36 : 5, 1967.

- 11) Bevegard, B.S., Holmgren, A., Jonsson, B. : The effect of body position on the circulation at rest and during exercise, with special reference to the influence on the stroke volume. Acta Physiol. Scand., 49 : 279, 1960.
- 12) Harvey, R.M., Ferrer, M.I., Samet, P., Bader, R.A., Bader, M.E., Cournand, A., Richard, D.W. : Mechanical and myocardial factors in rheumatic heart disease with mitral stenosis. Circulation, 11 : 531, 1955.
- 13) Katayama, F. : Observations on electrocardiographi-chemodynamic correlation in ischemic and/or hypertensive heart disease. Jap. Circul. J., 35 : 57, 1971.
- 14) 紅露恒男, 野田汎史, 荻田啓子, 天野直美, 伊藤良雄, 福田政義 : 指定心拍数による速度自動制御型 Treadmill, 第17回 エム・イー学会大会論文集, P. 21.

〔後期 : 54. 1. 22~26〕

(P 205 より続く)

	午 前	午 後
1月 22日 (月)	靴型装具 (9:00~10:30) 川崎医科大学教授 明石 謙 プラスチック装具 (10:30~12:00) 鹿教湯病院鹿教湯リハビリテーション研究所所長 石神 重信	ミルウォーキー装具 (13:00~15:00) 順天堂大学医学部整形外科助教授 山内 裕雄 電動補装具 (工学面) (15:00~17:00) 早稲田大学理工学部教授 加藤 一郎
23日 (火)	義手 (9:00~12:00) 国立身体障害センター補装具研究所所長 飯田卯之吉	脊柱の生体力学と体幹装具 (13:00~15:00) 自治医科大学整形外科助教授 大井 淑雄 DMP と下肢装具 東京大学附属病院リハビリテーション部副部長 上田 敏
24日 (水)	車椅子 (9:00~10:30) 国立身体障害センター外来医長 木村 哲彦 下肢装具 (10:00~12:00) 横浜国立大学医学部リハビリテーション科科長 大川 嗣雄	肘関節の生体力学 (13:00~15:00) 熊本大学医学部整形外科助教授 渡辺 英夫 肩関節の生体力学 (15:00~17:00) 帝京大学医学部教授 岩倉 博光
25日 (木)	上肢装具 (9:00~10:30) わらび診療所所長 荻島 秀男 義肢・装具製作チームの一員として (OT) (10:30~12:00) 国立身体障害センター OT 主任 沢 治子	痙性麻痺と装具 (13:00~15:00) 七沢老人リハビリテーション病院副院長 福井 罔彦 電動補装具 (医学面) (15:00~17:00) 東京都立補装具研究所所長 加倉井周一
(金) 26日	適合判定実習 (9:00~12:00) 次の4か所に分かれて実施する 鉄道弘済会東京身体障害者福祉センター (指導責任者 稗田 正虎) 中央鉄道病院リハビリテーション部 (指導責任者 佐藤 和男) 東京都立補装具研究所 (指導責任者 加倉井周一) 国立身体障害センター補装具研究所 (指導責任者 飯田卯之吉)	テスト (13:30~14:30) 検討会 (14:30~15:30) 閉講式 (15:30~16:30)