講演

理学療法と運動生理 (その2)

— 運動負荷試験 —

黒川 幸雄¹⁾

LECTURE: Exercise Physiology and Physical Therapy (Part 2) Exercise Test.

Yukio KUROKAWA, RPT, MA¹⁾.

1) School of Rehabilitation, Tokyo National Chest Hospital: 1-2-7 Umezono Kiyose city
Tokyo (204) Japan. TEL 0424-91-1311.

J. Exerc. Physiol. 3(2):109-117, 1988. ISSN 0912-7100. Spoke May 31, 1987.

ABSTRACT

In the field of the exercise physiology, an elementary knowledge for physical therapy, exercise test was selected as the subject of this occasion. This paper describes history, kind, purpose, contraindication, protocol, and interruption point of exercise test, and comparison between several exercise tests. Taking above into account, respiration condition and energy cost while performing exercise test were also discussed.

Key Words; exercise test, protocol, energy cost

要旨

理学療法の基礎知識である運動生理として、今回は運動負荷試験について述べた。運動負荷試験の歴史、種類とその比較、目的、禁忌、プロトコール、中止基準や、運動負荷時の呼吸応答およびエネルギー代謝について解説した。

キーワード: 運動負荷試験 プロトコール エネルギー代謝

1) 国立療養所東京病院附属リハビリテーション学院 理学療法学科.

東京都清瀬市梅園1-2-7 (〒204) TEL 0424-91-1311.

運動生理 3(2):109-117, 1988. 1987年5月31日 (第3回運動生理研究会学術集会)

運動負荷試験

表1は循環器負荷試験の流れを春見¹⁾のに追加して表としてまとめた。ここで注目されるのは、1891年Riva-Rocciの血圧計と1903年のEinthovenの心電計である。今日の診断技術は飛躍的進歩を遂げ、体表面電位図法、心エコー図法、R I 検査、C T、M R I、各種心臓カテーテル法、24時間(48時間)心電図法等々高度化が進んでいる。しかし、心電図法は、心臓の本来の生理学的機能を実徴的に捉えている点で優れている。

Masterの2段階試験は、各種の批判もあるが、臨床の場合では容易さもあり広く利用されている。1942年Masterは、S T低下0.5 mm以上および第Ⅲ誘導を除く他の誘導におけるT波平低化または逆転を病的とした。この基準を設定してから1961年にDouble Two Step Testの陽性判定基準をS T低下2 mm以上、Q X /

Q T $\geq 50\%$ またはQ T 比 ≥ 1.08 、虚血型S T低下(全く水平か、sagging)を陽性とし、更に1968年に一定の変更を行うまで、たびたび変えてきた。それは年代を追ってこの分野での研究の進展でDataの変化が影響したためである。

Master以外にもたくさんの負荷試験がある。循環器負荷試験は、大きく分けると次のようである。

- 1) 運動負荷試験
- 2) 薬物負荷試験
- 3) 精神的負荷試験
- 4) その他

さらに特殊なものを挙げると次のようである。

- Isoproterenol負荷試験(薬物)
- 低酸素負荷試験
- 心房ペースティング試験(外科手術の効果)
- 負荷心エコー図法
- 負荷心筋シンチグラフィー

表1 運動負荷試験の歴史(春見¹⁾より作成)

1887年	Ludwig, Waller; 毛細検電器による胸壁からの心臓起電力の記録に成功
1891年	Riva-Rocci; 血圧計
1903年	Einthoven; 心電計
1918年	Arrilaga; 狭心症発作、一過性脚ブロック、T波逆転
1921年	Green, Gilbert; 反復呼吸負荷試験
1928年	Gallavardium, Rougier; Ischemic-ST↓
1929年	Master; 運動負荷試験の標準化—年齢別、性別、体重別
1925年	Cornell大学にて階段(9インチ)昇降による脈拍、血圧の変化
1931年	White, P.D.; "Heart Disease" 著作
"	Woodら; 狭心症に対して運動負荷試験心電図導入
1932年	Goldhammer & Scherf; 適度の運動→潜在性冠不全
"	胸部誘導の概念発表 12誘導心電図の一般化
1942年	Levy Patterson; 低酸素負荷試験
1959年	Balke; 多段階treadmill負荷試験
1961年	Double 2 step test判定基準
1963年	Bruce; 多段階treadmill運動負荷試験
"	Humphreys & Lind; 等尺性負荷の循環動態、心機能
1967年	Sowton; 心房ペースティング試験
1970年	Augmented Master's 2 step test
1973年	Functional Aerobic Impairment (FAI) 概念の導入

負荷 R I アンジオグラフィー

負荷試験については、静的dataの意味が動適dataの意味との相違により、今後さらに応用範囲を広げて行くのもと思われる。

運動負荷試験の目的

循環器系医学、体力、スポーツ医学などの分野でこの試験は、冠疾患の予防、早期診断、心機能評価、治療効果の判定、予後の推定、運動処方、健康、体力維持増進などを目的として実施され、対象は年齢、性別、各種疾患、各種運動種目にとらわれずに広く応用されている（表2）。

アメリカ・スポーツ医学協会は、この分野において大変先駆適役割を果たしている。その運動処方の指針によると、テスト対象者を9グループに分類した（表3）。日本における健康増進、予防医学、治療医学の面からみると、一歩進んだ危険管理及び運動処方の考慮を行っている。

運動負荷試験の禁忌

運動を行う前に、自分の体調を気にすることは、誰もが自然に行っていることであるが、運動事故発症症例を見ると、必ず何らかの無理、配慮の欠如が伺われる。

子供のスポーツ・クラブなどに見られる過度に競争心を煽ることも決して小児・思春期の子供に対する科学的トレーニングとは思えない。適切な助言が必要であるし、それを受け入れる意志のない指導者は、子供に危険を課すことに注意を払うべきである。学童の場合の突然死例の報告では、剖検の77%が心疾患に関係ありとされ、心筋炎、心筋症、心機能不全の診断のつくものが多いという。そして運動に関連した死亡の多いことを認めてい

表2 運動負荷試験の目的³⁾

1. 胸痛の診断
2. 冠状動脈疾患の予後評価
3. 冠状動脈疾患の治療効果の評価
4. 心筋梗塞後のリハビリテーションにおける運動処方
5. 外科的処置の有効性の評価
6. 体力作りのプログラムに参加する前の検査
7. 危険因子の多い人の検査

表3 Classification by age and health status of participants for exercise testing⁴⁾

Category	
A	Asymptomatic, physically active persons of any age without CHD risk factors or disease.
B	Asymptomatic, physically inactive persons less than 35 years of age without CHD risk factors or disease.
C	Asymptomatic physically inactive persons 35 years and older without CHD risk factors or disease.
D	Asymptomatic physically active or inactive persons of any age with CHD risk factors but no known disease.
E	Asymptomatic persons of any age with known disease.
F	Symptomatic, physically active persons clinically stable for 6 months or longer.
G	Symptomatic, physically inactive persons clinically stable for 6 months or longer.
H	Symptomatic persons with recent onset of CHD or a change in disease status (Example: Recent myocardial infarction, unstable angina, coronary artery bypass surgery).
I	Persons for whom exercise is contraindicated (See Table 3, Contraindications for Exercise and Exercise Testing).

る。従って科学的トレーニングという概念の中にメディカル・チェックの位置を明確に唱う必要がある。

運動負荷試験は、そのメディカル・チェックの重要な一部であり、かつメディカル・チェックによってそれ自体の適否を確かめる必要性を有している（表4）。医学的リハビリテーションの対象となっている内部障害を除く神経筋疾患、筋・骨・関節疾患などは嚴重に注意を要するカテゴリーに入ってくる。

表5はMichigan Heart Associationが示し

表 5 Cardiac risk index²⁾

1 Age	10 to 20	21 to 30	31 to 40	41 to 50	51 to 60	61 to 70
	1	2	3	4	6	8
2 Heredity	No known history of	1 relative over 60 with cardiovascular disease	2 relatives over 60 with cardiovascular disease	1 relative under 60 with cardiovascular disease	2 relatives under 60 with cardiovascular disease	3 relatives under 60 with cardiovascular disease
	1	2	3	4	6	8
3 Weight	More than 5 lbs below standard weight	-5 to +5 lbs standard weight	6-20 lbs overweight	21-35 lbs overweight	36-50 lbs overweight	51-65 lbs overweight
	0	1	2	3	5	7
4 Tobacco smoking	Nonuser	Cigar and/or pipe	10 cigarettes or less a day	20 cigarettes a day	30 cigarettes a day	40 cigarettes or more a day
	0	1	2	4	6	10
5 Exercise	Intensive occupational and recreational exertion	Moderate occupational and recreational exertion	Sedentary work and intense recreational exertion	Sedentary work and moderate recreational exertion	Sedentary work and light recreational exertion	Complete lack of all exercise
	1	2	3	5	6	8
6 Cholesterol or % fat in diet	Cholesterol below 180 mg%	Cholesterol 181-205 mg%	Cholesterol 206-230 mg%	Cholesterol 231-255 mg%	Cholesterol 256-280 mg%	Cholesterol 281-330 mg%
	No animal or solid fats in diet	10% animal or solid fat in diet	20% animal or solid fat in diet	30% animal or solid fat in diet	40% animal or solid fat in diet	50% animal or solid fat in diet
	1	2	3	4	5	7
7 Blood pressure	100 upper reading	120 upper reading	140 upper reading	160 upper reading	180 upper reading	200 or over upper reading
	1	2	3	4	6	8
8 Sex	Female under 40	Female 40-50	Female over 50	Male	Stocky male	Bald stocky male
	1	2	3	5	6	7

Total score.....

RISKO is reprinted courtesy of Michigan Heart Association. © Michigan Heart Association.

表 4 運動負荷試験の禁忌¹⁾

(A) 絶対的禁忌	(B) 相対的禁忌	(C) 厳重に注意を要する疾患
1 浮腫、腹水、呼吸困難などうっ血性心不全	1 頻脈性の上室性不整脈	1 刺激伝導異常
2 新鮮心筋梗塞（発症後3ヵ月以内）	2 頻発する心室期外収縮	(a) 完全房室ブロック
3 脳出血や脳血栓など新しい脳血管障害	3 重症高血圧症(250/120以上、網膜症III以上)	(b) 完全左脚ブロック
4 急性あるいは活動性のある心筋炎	4 重症肺高血圧症	(c) 両脚ブロック
5 不安定な狭心症	5 心室瘤	(d) WPW症候群
6 肺梗塞	6 中等度大動脈狭窄・縮窄	2 高度の徐脈(Sick Sinus Syndromeなど)
7 肺炎腫、慢性気管支炎肺性心	7 重症心筋疾患	3 その他重要な不整脈
8 重症肺機能不全（肺結核、サルコイドーシス、肋膜炎、肺手術後）	8 高度の心臓拡大	4 電解質異常（とくに低カリウム血症）
9 解離性大動脈瘤	9 妊娠中毒症	5 心臓薬使用（ジギタリス、β遮断薬など）
10 急性、熱性、感染疾患	10 流・早産のおそれのある妊娠後期	6 僧帽弁狭窄
11 血栓性静脈炎	11 重症甲状腺機能亢進症	7 IHSS（心筋疾患）
12 心室頻拍や危険性のある不整脈	12 重症甲状腺機能低下症	8 中等度以上高血圧（拡張期110以上）
13 多源性および連発性、R on T型心室期外収縮	13 重症糖尿病	9 狭心症、冠不全
14 重症大動脈狭窄・縮窄	14 重症貧血	10 高度の肥満
15 ジギタリス中毒	15 チアノーゼを有する疾患	11 肝障害
16 腎不全		12 腎障害
		13 精神・神経疾患
		14 神経・筋肉疾患
		15 筋肉・骨・関節疾患

たCardiac Risk Index で、①年齢、②習慣、③体重、④喫煙、⑤運動、⑥コレステロール、⑦血圧、⑧性、と8評価項目からなり、各々6段階にグレードされ、最終評価は、総評価点により次のように判定されている。

Grade I : 6~11点	基準以下でよい
Grade II : 12~17点	基準以下の状態
Grade III : 18~24点	基準からみて普通
Grade IV : 25~31点	いくらか危険
Grade V : 32~40点	危険なレベル
Grade VI : 41~62点	非常に危険

このようにいくつかの要素を組み合わせると合計点でみるにより、総合的判断を可能にするが、①喫煙、②高血圧、③高脂血症、④心電図異常（ST-T変化、不整脈など）を詳しく段階つけて評価するのもよい。①、②、③の三つが揃うと心臓発作の発症頻度は、5倍に高くなると言われている。

運動負荷試験実施にあたっての基準

- 1) 同意署名：リスクと効果の両面にわたり適切な説明及び質疑応答の後、承諾の署名
- 2) 緊急異常、危険発生時の処置
 - ①心肺蘇生術の訓練を終了している
 - ②高度な循環器専門医療機関での研修
 - ③緊急時の補助者
 - ④すべての必要な連絡体制
- 3) 緊急用備品と薬物

除細動器、挿管セット、酸素吸入装置、血管確保のための点滴セット、救急薬品
- 4) 負荷試験室の室温

18~25℃、湿度60%以下

運動負荷試験の種類とプロトコールの比較

安全で容易なものは step testであり、連続的で適用された運動の実施が容易である点

では自転車エルゴメータ、歩行という日常性でしたしみ易くVO₂max測定には向いているが、場所、経済コストでは問題があるトレッドミルなどがある。

米国においてはトレッドミルという伝統があるというが、モダリティーの利点・不利が個々の対象者との関係で、よりbetterなものを追求して行く中で、世界的にも統一がかなされて行くであろう。表6は、三つのモダリティーの比較を行ったものである。プロトコールの比較対象を行ったものが表7に示されているが、十分対応しているものが検討される余地もある。

運動負荷試験の中止基準

アメリカ・スポーツ医学協会の示す基準はまずVO₂maxの「真の最大容量」に到達した時点を限界として考える。また 症候性限界 (symptom limited) の観点からみると、

- ①めまい、失神に近い状態
- ②狭心症（心電図上の有無を問わない）

[註] + 4 - 狭心症：今までに経験した中で最も重篤な不快感と同じ位

+ 3 - 狭心症：中等度の不快

+ 2 - 狭心症：軽度の不快

+ 1 - 狭心症：明確でない不快
- ③悪心
- ④著しい呼吸困難
- ⑤異常なまたは強い疲労
- ⑥強度な破行、またはその他の痛み
- ⑦ふらつきまたは強度の不安感
- ⑧精神混乱
- ⑨強い苦痛を示す表情
- ⑩しっかりした脈拍を安定して触知できないとき
- ⑪チアノーゼまたは強度の顔面蒼白
- ⑫皮膚を短時間強く圧迫して白くなり、これが元の色に戻らないとき

次に心電図所見がある。

① ST-T の降下: 1.0 mm 以上 (2 mm の場合もある)

② 心室性不整脈: 心室性頻脈、二段脈、三段脈、頻繁な単元性または多源性異所性心室性期外収縮

③ 房室間または心室内伝導障害: Mobitz I 型 (Wenkebach)、Mobitz II、第3度房室ブロック、左脚ブロック

血圧反応としては、収縮期血圧が負荷強度増加にかかわらず上昇しない、または10mmHg以上下降、または250 mmHg以上上昇した時も中止である。拡張期血圧についてみると、20mmHg以上上昇、または110~120mmHg以上の場合である。

心拍反応からみた場合

① 220-年齢 (15歳以上の健康人)

② 210-年齢/2

※患者の場合最大心拍数が少ないと言うことを肝に銘じておくべきである

呼吸反応からみた場合

① 著しい呼吸困難

② チアノーゼ

以上基準的中止基準であり、個々の患者についての特徴をつかみ、機敏な対応が必要で、それが患者を常に安全な状態におくことになる。

運動負荷と呼吸応答

呼吸はエネルギー代謝に必要な O_2 と CO_2 のガス交換を行う。それは肺胞および細胞間レベルで行われるが、肺胞で交換された O_2 は血流に乗って各器官へ送られる。図1はそれらを三つの歯車に例えて表現したものである。

図1 運動時呼吸応答における生理学機序を示す模式図¹⁾

図2 一定運動負荷時の換気応答曲線¹⁾

c:安静時、x:運動時、r:回復時、

1:運動開始ないしは停止直後の反応

2:緩徐な反応を示す相、3:恒常状態

呼吸調整は、体液性因子と神経性因子からなっており、前者は動脈血 P_{O_2} 、 P_{CO_2} 、 pH の変化を頸動脈体や大動脈体などの末梢化学受容器が舌咽神経、迷走神経あるいは延髄内神経伝達路を介して橋・延髄内の呼吸調節ニューロン群に達し、その出力が横隔膜神経、肋間神経などの遠心路を介して呼吸筋に達し、換気量、呼吸数、リズム等が周期的かつ協調性をもって調整されている。後者は、受容体が皮膚や関節、骨格筋の筋紡錘やゴルジ体があり、そこからの求心路が中枢に達し、出力として前者と同様に横隔膜神経や肋間神経を介して調整を行うようになっている。

運動負荷をしたとき、開始直後から急激に換気量が増加する。これを第1相、次の徐々に増加する時期を第2相、定常状態を第3相という(図2)。

正常人や循環器疾患患者においては、運動能力が心循環器系の出力により規定されるのに対し、慢性閉塞性肺疾患患者では気道抵抗の上昇があり、肺の機械的特性により運動時

換気能力が制限される。

多段階運動負荷による最大換気能力 ($\dot{V}E_{max}$) は一秒量と相関し、閉塞性障害が強い程 $\dot{V}E_{max}$ は低下する。閉塞性障害が強い症例では呼吸困難を訴え代謝性アシドーシスの前に運動を中止してしまう。呼吸困難の発現機序を説明する仮説に Campbell & Howell の length-tension 不均衡説がある。length には呼吸筋の長さ、tension には呼吸筋の張力が相当する。例えば運動の増加にともない換気量を増加させようと中枢からの神経興奮が増し、呼吸筋の緊張 (tension) の亢進にもかかわらず、気道抵抗の増大のため換気 (length) がそれに追いつかず不均衡が生じ呼吸困難として感ずる。

COLD 患者に対して理学療法として実施される。①運動トレーニング、②換気トレーニング、③腹式呼吸、④口すばめ呼吸法、⑤呼吸抵抗負荷法などにより、筋細胞のミトコンドリアや酵素の量が増加して好気性代謝効率が良くなったり、呼吸困難に対する感受性の低下、運動意欲の増強、呼吸筋力の増強など全体として運動能が増すものと考えられる。

気管支喘息に対する運動負荷が発作を誘発することが良くあるが、過換気による気道の冷却化が有力視されている。気管支喘息患者でも運動負荷に対する呼吸抵抗が①抵抗変化なし、②運動後抵抗上昇、③運動中より抵抗上昇の三つのパターンに分かれる。

今後呼吸器疾患、低肺機能患者に対する運動負荷試験の臨床応用も、理学療法分野において増加することが予想され、個々の患者の特性を十分配慮して行うことが望まれる。

運動負荷とエネルギー代謝

運動負荷に対してエネルギー代謝の応答様式に三つのタイプがある。嫌気性のものとして 1) ATP-PC system 2) lactic acid system、

図3 The various energy systems and their involvement

好気性のものとして 3) oxygen system 反応時間からみると、1)はimmediate型 2)はintermediate型、3)はlong term型として分けられる。ATPの産生は、1), 2)は限定されており、すでに貯えられていたものを放出する形態であるが、3)は O_2 の供給に基づき制限されないものである(図3)。そして運動種目もそれらに対応する。一般に運動負荷後数分(4, 5分)にて定常状態となる。この状態は酸素の受容と供給が平衡となり、エネルギー供給も連続している状態である。各動作のエネルギー消費量(O_2 消費量)はこの定常状態のものを使っている。図4, 5は脂肪、炭水化物、蛋白質が、エネルギー代謝系にどの様に取り込まれエネルギーとなるかを示したもので、Krebs cycle, beta oxidation systemなど、エネルギー代謝系の基礎回路が示されている。呼気ガスを分析することで、エネルギー代謝に関しての各値を算出することができる。

1) エネルギー代謝率

(Relative Metabolic Rate: RMR)

$RMR = (\text{運動時間の全酸素消費量} - \text{運動時間内の安静時酸素消費量}) / \text{運動時間の基礎代謝量}$

2) Metabolic Equivalent (METs)

図4 The metabolic mill: interconversions between carbohydrates, fats, and proteins⁵⁾

METs=運動時酸素消費量

安静時酸素消費量

※ 1 MET=3.5ml/min/kg

3) Physical Fitness Index (PFI)

$$PFI = \left(\frac{\text{運動中平均呼吸効率} \times 10}{\text{運動中止後 3分間心拍数合計}} \right) \times \left(\frac{\text{運動時間 (分)}}{5 (分)} \right) \times 100$$

平均呼吸効率 = 吸気酸素濃度 - 呼気酸素濃度

4) 酸素消費量 ($V O_2$ ml/m²/min)

$V O_2$ (ml/m²/min) = 平均呼吸効率 $\times$ 換気量

5) 酸素負債 (O_2 -debt%)

酸素負債 = 運動中止後回復期 5分間の全過剰酸素消費量 / (運動中に要した全過剰酸素消費量 + 運動中止後回復期 5分間の全過剰酸素消費量) $\times 100$

一般に酸素負債は血中乳酸と正の相関を示すといわれ、重症例ほど運動負荷により血中乳酸は増加する。つまり酸素負債も心機能を示す一つの指標となりうる。

Source	Pathway	ATP Yield per molecule neutral fat
1 Molecule glycerol	Glycolysis + Krebs cycle	22
3 Molecules of 18-carbon fatty acid	Beta oxidation + Krebs cycle	441
		TOTAL 463

図5 General scheme for the degradation of the glycerol and fatty acid fragments of neural fat⁵⁾

6) 酸素脈 (O_2 -pulse)

O_2 -pulse = $V O_2$ ml/m²/min / 心拍数 (分)

METsの計算法については文献4)の中で、詳しく解説しているので参照されたい。

引用文献

- 1) 水野康・他：循環器負荷試験法—理論と実際—。診断と治療社 1981.
- 2) Fox, E.L. et al: The Physiological Basis of Physical Education and Athletics, 3rd Ed. Saunders College 1981.
- 3) 木全心一：狭心症・心筋梗塞のリハビリテーション。南江堂 東京.
- 4) American College of Sports Medicine: Guideline for Graded Exercise Testing Prescription. 2nd Ed. Lea & Febiger, 1980.
- 5) McArdle, W.D. et al: Exercise Physiology Lea & Febiger 1981.