

応用生理学的なフィードバック制御による 運動療法の妥当性について

藤 原 孝 之
信州大学医学部環境生理学教室
(主任: 上田 五雨教授)

Physiological Studies of Therapeutic Exercise Controlled by Feedback System

Takayuki FUJIWARA

*Department of Environmental Physiology, Shinshu University School of Medicine
(Director: Prof. Gou UEDA)*

The purpose of this study was to develop a comprehensive system for a safe and stable exercise load for certain clinical cases and health promoting programs for the aged, and to carry out both adequate risk management and active therapeutic exercise. The treadmill exercise test was given to a total of 70 subjects (20 normal volunteers and 50 patients with either cardio-pulmonary diseases or metabolic diseases such as diabetes melitus and obesity). Energy consumption per unit time was measured by oxygen uptake and/or METS value. The target value of exercise intensity for each subject was determined on the basis of ventilatory anaerobic threshold (VAT). Then, 20 normal volunteers and 26 patients were able to performed the bio-informing mechanical feedback exercise (BIMF ver. 1.1) for average period of 13.5 minutes according to the target value. This system was composed of an expiratory gas analyzer, a computerized metabolic control unit, a heart monitor and a treadmill.

Results were as follows:

1. VAT was detected in 18 out of 20 normal subjects (90%) and in 41 out of 50 patients (82%).
2. Variations of METS value were controlled within $\pm 10\%$ when this BIMF system has been applied to 20 normal subjects.
3. General conditioning exercises by use of BIMF system were successfully completed by a total of 225 out of 248 among 50 subjects (91%).

From these results, it is suggested that the BIMF system provides a safer and more stable exercise condition than the popular heart rate control method. *Shinshu Med., J.*, 37: 311-320, 1989

(Received for publication March 3, 1989)

Key words: exercise test, therapeutic exercise, expiratory gas analysis, feedback control, optimum exercise load

運動負荷試験, 運動療法, 呼気ガス分析, フィードバック制御, 至適運動負荷量

はじめに

近年、心疾患をはじめ、肺機能低下、糖尿病や肥満などの代謝疾患に対する運動療法の重要性が注目されている。また、中・高年者の健康管理と運動処方に関しては、厳格な安全対策や至適負荷量の基準化が配慮されない経験的な運動負荷は、致命的なリスクをとともなうことが予測される。運動負荷のリスクに関する研究としては、1918年に Blousfield¹⁾ が冠不全の症例に運動負荷を行い、心電図上で S-T 部分の下降を記録して以来、同様の指摘が数多く報告されている²⁾⁻⁶⁾。Riseman⁷⁾ は運動負荷中に出現する低酸素血症に対して、予防的な酸素吸入を行うことによって、健康人では S-T 部分が 1.0mm 以下、心疾患患者においては 2.0~7.0mm 下降することを報告している。また、Johnson⁸⁾ は Master と Jaffe⁹⁾ によって開発されたステップテストの負荷強度などを改良して、ハーバード・ステップテストとして発表した。このハーバード・ステップテストは各種の運動クラブでの会員やさらに軍人の体力測定に应用されてきている。その後、Yu と Soffer¹⁰⁾ によってその運動負荷試験の臨床応用と判定基準が報告された。また、Bruce¹¹⁾ によって、1956年にニューヨーク心不全分類 I-IV が示され、運動負荷試験のプロトコルとその結果の解析の指針が発表された。1950年代後半から1960年代にかけては、Balke と Ware¹²⁾、Blackburn¹³⁾、Robb と Marks¹⁴⁾ らによって、心疾患に対する運動負荷試験の方法論と結果の信頼性についての報告が相次いで発表され、さらに、1970年代の後半からは、Diamond¹⁵⁾ をはじめ、多くの運動生理や心臓疾患を対象とする研究者によって臨床で広く利用される運動負荷試験法が確立し現在に至っている。しかし、現在までの報告は、心疾患に対する心電図学的な変化を中心に行われており、被験者から得られる生化学的、呼吸・エネルギー代謝学的な指標に対して検討された報告は少ない。また、呼吸器疾患に対する運動負荷試験については、1982年に「呼吸困難患者に対する運動負荷試験」のワークショップが米国で開催された。このワークショップの内容は Wasserman¹⁶⁾ により報告されている。上述のワークショップでは呼吸器疾患に対する運動負荷試験の臨床応用への可能性と基礎的な知見が示された。

上述のような歴史的背景に鑑み、運動療法を行う際には、運動耐容能力を指標にすることによって、個々

の症例に応じた評価法と、それに基づいた至適運動負荷量を決定することが大切なことであるといえる。従来、この種の運動負荷量の決定に際しては、負荷量を概算的に定めたトレッドミルや自転車型エルゴメータが用いられてきている。この運動負荷時の負荷量の決定には、心電図、酸素摂取量、二酸化炭素排出量などを測定し、この測定データに基づいて、経験的かつ帰納的な方法で至適運動負荷量が決定されている。しかし、このような経験的な方法では、個々の患者の全身状態および心肺機能に適切に対応することが困難であり、同一患者においても全身状態の時間的な変化に厳密に対応することはできない。さらに、日時を変えて行う各回の運動療法ごとに至適負荷量の過不足を来すという問題が発生する。最近、田中ら¹⁷⁾ は心拍変動フィードバック管理負荷制御方式を使用して自転車エルゴメータのトルク負荷を自動調節する方法を試みている。しかし、彼らが検討した心拍・心電図モニターによって負荷量を制御する方式では、安静時においても自律神経系に影響を与える可能性のある薬物や心理的要因が制御系の外乱として混入する可能性があり、正確な制御が不可能になる。したがって、複雑な生理学的制御機序が介在し得る指標を利用して、運動負荷時の至適運動量を制御する方式は、積極的運動療法やリスク管理の何れに対しても、いまなお満足する成績が得られないのが現状である。

本研究では、運動時のエネルギー消費を酸素摂取量または METS 値（健康人における安静時の酸素摂取量で、1分間に体重 1kg 当たり 3.5ml の酸素摂取を基準にして 1MET と定めた¹⁸⁾）で求めた負荷の指標値をあらかじめ設定し、設定された指標値、すなわち METS 値を一定に維持しながら、その指標値を中心に減衰振動し、同時に厳密なリスクの管理を行うことが可能な、呼吸ガス指標フィードバック制御型至適運動負荷装置の開発を行うとともに、その臨床生理学的な応用について検討することを目的とした。

I 方法

A 装置の概要

本研究に使用された装置は、図 1 に示すように、呼吸ガス分析装置（日本電気三栄社製、エアロピクスプロセッサ 391 改良型）とテレメーター心電計（日本電気三栄社製、2E41A）から、酸素摂取量（ $\dot{V}O_2$ ）および METS 値の 1 秒トレンドと心電図の R 波のアナログ出力を、A/D コンバータを介してメタボリッ

フィードバック制御による運動療法

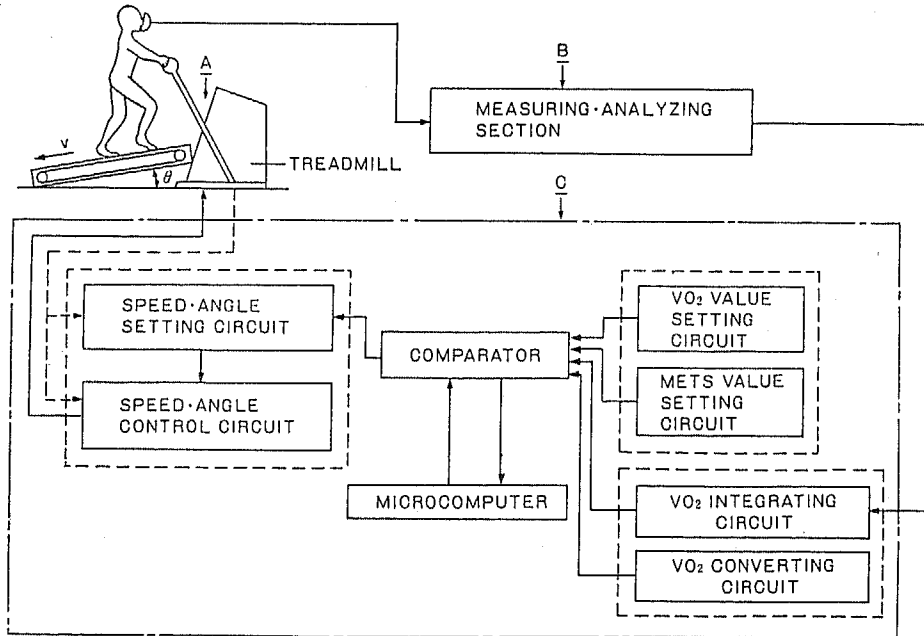


図1 呼吸ガス指標フィードバック制御型至適運動負荷装置の概要。A：速度（0～11.3 Km/h）・角度（0～25%）の可変できる電動型トレッドミル。B：心電図モニター付呼吸ガス分析装置と解析・制御用出力部分。C：呼吸ガス分析装置からの出力を受けて、酸素消費量が METS 値で設定した目標値との差を演算しトレッドミルの速度と角度を調節する制御部分。

ク・コントローラー（建部青州堂社製，MPC-750）または汎用パソコン（NEC 社製 PC-9801VX）に取り込み、目標値として設定した $\dot{V}O_2$ 値、METS 値との差を判別しながら運動負荷装置であるトレッドミル（酒井医療社製，SPR-702）の速度および角度を制御させ、減衰振動させながらその差を是正するように設計したものである。制御用のソフトウェアとしては、新たに開発した BIMF SYSTEM (bio-informing mechanical feedback system) ver. 1.1 を用いた。

B 健康人を対象とした検討

試作したフィードバック型至適運動負荷装置の制御出力の精度を検定する目的で、心肺疾患や歩行障害の既往をもたない健康人20名（男女各10名、平均年齢21.5歳、19～24歳）を対象として以下の実験を行った。

食事摂取後2時間以上経過した状態で、仰臥位安静をとらせた後、図2に示すように、トレッドミル上で坐位安静、そして起立したのち角度0度状態で速度を1.0mph、2.0mph、2.5mph、3.0mphと2分ごとに段階的に増加させた。次に、速度を3.0mphに固定した状態で角度を初期値から5%、10%、15%と増加させ、合計7段階の漸増段階負荷法による運動負荷試

験を行った。

健康人における通常の日常動作域として目標作業強度を4METSに設定し、2分間の坐位安静ののち、METSコントロール・プログラムを用いて10分間のフィードバック制御によって運動負荷を行った。回復時の経過を観察するために、クーリング・ダウンは行

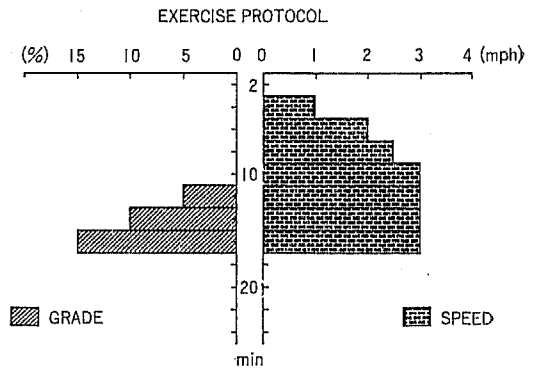


図2 本研究に使用された運動負荷試験のプロトコルを図示している。臨床例で応用する際のクーリング・ダウンは、実行した負荷強度の中から適宜2段階を選択して行った。

わず負荷終了後直ちに被験者に坐位をとらせ5分間の坐位安静時の状態を記録観察した。

被験者の生理学的データとして、酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), 3.5ml/kg·min の $\dot{V}O_2$ を 1MET として換算した METS 値, 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$), 呼吸商 (RQ), 換気量 ($\dot{V}E$), 呼吸回数 (RR), 心拍数 (HR) を記録するとともに, トレッドミルの速度および角度も同時に記録した。CM₅ 導出による心電図上で S-T 部分を30秒ごとに計測し, 負荷開始時に比較して2mm 以上の下降が観測された症例では直ちに全ての検査を中止した。30分以上の経過観察によってなんらの自覚, 他覚的異常の持続がないことを確認したのち実験を終了した。

C 臨床応用

1 1985年9月から1988年11月までの間に某病院内科に入院または外来受診し, 虚血性心疾患と診断された患者29例(男17名, 女12名), 糖尿病・代謝疾患と診断された17例(男11名, 女6名)および肺炎, 慢性気管支炎などの肺疾患と診断された患者4例(男3名, 女1名)の合計50名(男31名, 女19名)に対して, 至適運動負荷測定試験として前述した漸増段階負荷試験を行った。本運動療法による健康者を対照に検討した前述の成績からの安全性と妥当性について被験者に説明し協力を依頼するとともに, 主治医の口頭または書面によって本研究への協力に対する承諾を得た。しかし, 被験者50名のうち50%の症例においては, 足の運びが追従できず, 結果の判読に必要な最低4段階以上の負荷に耐えられないことが予測されたので, 換気性無酸素閾値 (ventilatory anaerobic threshold, VAT) の観測が可能な範囲で, 適宜, 負荷のプロトコルを変更した。運動負荷試験の実施にあたっては, トレッドミル歩行と採気用マスク装着による違和感に順応させる目的で, 最低1回以上の練習を施行した。また, その練習中の歩行の状態を観察し, 安定した歩容で連続的に歩行できる最高速度と角度を確認することによって, プロトコル変更の必要性の有無を決定した。

2 運動負荷試験により VAT が判定できた症例に対しては, VAT に対応する $\dot{V}O_2$ または METS 値を測定し, その METS 値を VAT 値とした。この VAT 値を基準として, 心疾患の症例ではリスクを考慮して基準 VAT 値の70~80%, その他の疾患においては80~90%の比率で $\dot{V}O_2$ または METS 値を算出し, 初回の運動負荷成績の評価に対する暫定的な至適運動負荷量 (optimum exercise load, OEL) と

した。そして, この OEL を目標値として, 月曜日から土曜日までの週6回のフィードバック制御による METS コントロール・プログラムを施行した。その後, 1ないし2週間ごとにこの方法による運動負荷試験を繰り返し, 随時新たな OEL 値を再設定し, 運動負荷によるリスクの軽減と負荷量の過不足の調節をかけた。

II 結果

A 健康人を対象とした検討

健康人20例に対する運動負荷試験の結果は, 最終ステージの負荷まで可能だったもの16例, 7段階中6段階まで可能だったもの4例であった。また, 図3に示すように20例中18例で VAT の判定が可能であった。図4では, METS コントロール・プログラムにより, 目標値である4 METS を30秒値に換算し, その1/2に相当する2 METS/30sec を維持するよう10分間の運動負荷を行った結果を示している。負荷開始後2分以内に至適運動負荷量の目標値に到達し, その後, 比較的小さい振動を繰り返しながら平均10%の分散で被験者の運動時の代謝量が制御されていることが認められる。図5は制御運動負荷中の実際の記録である。この記録では目標値の2 METS/30sec を一定に維持するようトレッドミルの速度と角度がフィードバック制御され, 経時的かつ自動的に変化していることを示している。

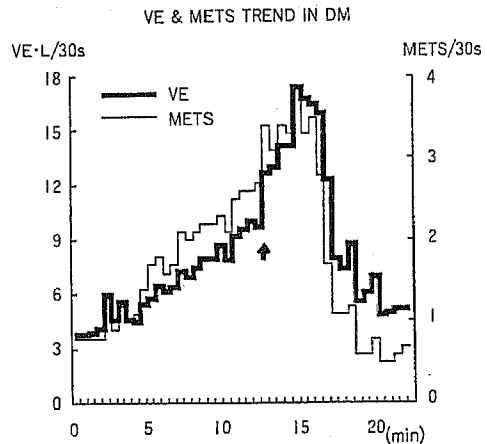


図3 運動負荷試験における30秒当たりの換気量 (VE) と METS 値の変動例。換気性無酸素閾値を矢印で示してある。DM: diabetes mellitus, 糖尿病。

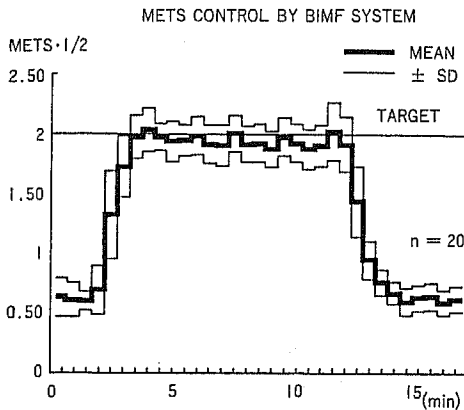


図4 健常人20例の METS コントロール・プログラムの結果。目標値は 4 METS (2 METS/30 sec) に設定している。
BIMF: bio-informing mechanical feedback, 生体情報フィードバックシステム。

B 臨床応用

虚血性心疾患, 糖尿病・代謝疾患および肺気腫, 慢性気管支炎などの肺疾患の50症例に対して行った運動負荷試験の結果は, VAT が判定可能だった症例は41例 (82%), 4段階以上の負荷が可能であったが VAT が判別できなかった症例は 4例 (8%), 3段階以下の負荷で他覚的または自覚的の発現によって負荷の中止を余儀なくされた症例は5例 (10%) であった。また, 50例中24例については, 13例が VAT の判定が可能であったが, 家庭・職場復帰を直前にひかえて, 1~2回の負荷試験により運動耐容能力を評価することと, 負荷を体験させることにより日常生活における活動能力に自信をもたせることを目的とした症例であった。したがって, 評価後の運動療法は行っていない。残りの26例は, 全例が VAT の判定可能な群に属し, 3~8回の負荷試験と5~49回の METS コントロール・

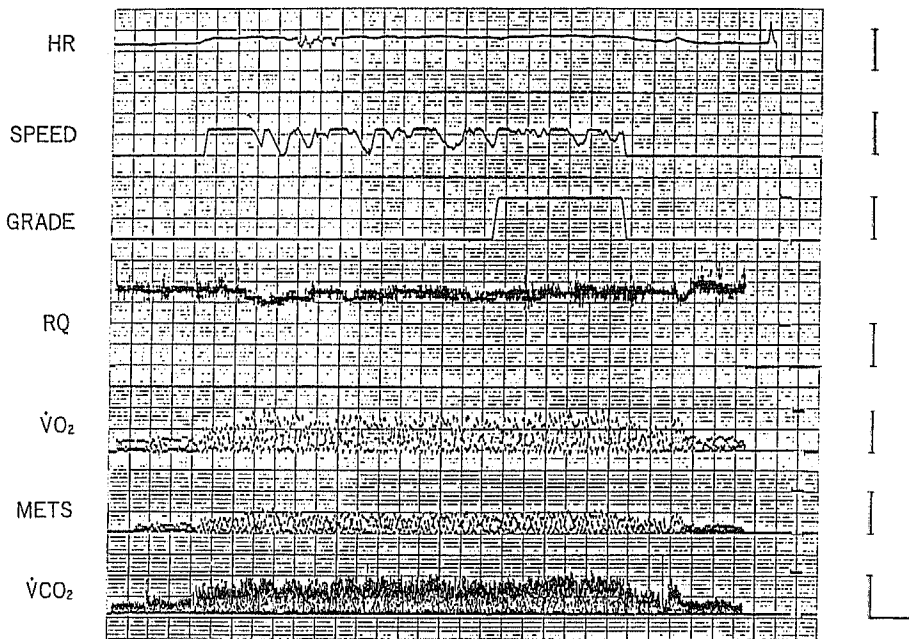


図5 METS コントロール運動負荷中の呼気ガス分析の結果。上段より心拍数 (HR), 速度 (SPEED), 角度 (GRADE), 呼吸商 (RQ), 酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$), METS 換算値 (METS), 二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) を示している。METS 値を可及的一定に維持するよう, トレッドミルの速度・角度は自動的に変化している。なお, 呼気ガスデータはサンプリング時間 50 msec, 1秒ごとの積分値で出力し, 速度と角度は移動10点平均処理したものである。図中のスケールは上段より 150 beats/min, 5.0 mile/hr, 5%, 50, 1.5 L/min, 4 METS および 1.5 L/min で, 時間は 1 min を示している。

プログラムによる運動療法を施行することができた。

OEL を目標値とした METS コントロール・プログラムによる運動療法は、26例で延べ248回（1人当たり約10回）、1回当たり平均13.5分（8～30分）施行した。この248回中11回は、運動開始前に一過性に体調の不調を訴えて、運動療法を行わず検討から除外した。また、疲労感を訴えて負荷の中止を希望した13回、VAT値の心拍数が120%以上に上昇し目標時間を達成することができずに中止した7回、1分当たりの期外収縮発生数が10回以上または1回以上のショートランが検出された3回についても検討から除外された。すなわち、248回の運動負荷療法のうち、225回（全施行中91%）で予定したプログラムを終了することができた。この225回の運動負荷療法中、至適運動負荷測定、運動療法施行中および終了後1時間以内に、自覚的および他覚的に異常を訴えて特別な処置を必要とすることはなかった。

以上の臨床症例のなかから、入院、外来を通じて12カ月以上の経過観察が可能だった糖尿病・肥満の1例と、比較的短期間の運動療法プログラムで顕著な全身調整能と日常生活能の改善が認められた心疾患の1症例を示す。

症例-1：労作時胸痛の主訴で入院し、狭心症と診断された43歳女性である。負荷心電図検査（ダブル・マスター法）で陽性所見を示した。診断確定後、カルシウム拮抗剤（Adalat®）等を投与することによって自覚症状は直ちに改善したので、運動耐容能力の評価と日常生活能の改善を図る目的で至適運動負荷量測定試験を開始した。1週ごとに評価を行い、初回評価で目標値4.9METS、2週目5.9METS、3週目7.5METSとなった。入院から4週を経過し、急な階段の昇りを除けば、ほとんどの日常生活に支障がなくなったので退院した。

症例-2：糖尿病のコントロールが困難であった45歳男性の例である。過去3年にわたり外来にて経口血糖降下剤（Euglucon®）の投与で経過観察されていたが、外来でのコントロールが困難であると判断されて入院した。入院時、身長162cm、体重96kg（+72%）と肥満で、空腹時血糖229mg/dl、中性脂肪224mg/dl、GOT47（カルメン unit）、GPT62（カルメン unit）であり、腹部超音波断層によって脂肪肝と診断された。入院後、食事療法として1,600Cal/日、経口血糖降下剤が投与されたが入院4週後においても改善は認められなかった。積極的運動療法が必要であると判断され

たので、運動負荷量測定と、呼気ガス指標によるフィードバック制御型運動負荷の運動療法を開始した。開始当初のVAT時のMETS値（METS_{VAT}）は7.7METSであり、トレッドミルによる運動負荷に慣れるまでの1週間は、OELをMETS_{VAT}の70%の強度である5.4METS、12分間と暫定的な至適運動負荷量を設定し負荷を連日行った。図6は入院期間中の目標値、空腹時血糖値と体重の推移を示している。目標運動負荷量の増加にともない空腹時血糖と体重が時間経過とともに下降している。約3カ月の時点での体重は77.5kg（+39%）まで減少し、空腹時血糖値も81mg/dlまで下降した。最終的な運動負荷量は11.2METS、20分であった。図7では、GOTとGPTおよび中性脂肪と動脈硬化指数（AI=[LDL+VLDL]/HDL）の推移を示している。それぞれの生化学的指標は下降を示した。血糖値が改善したので、運動負荷開始後2週間で経口血糖降下剤の投与を中止した。退院後2年間にわたり外来にて経過を観察しているが、その間体重が80kg前後で推移しており、血清・生化学的に特に問題となる所見は現在のところ出現していない。

III 考 察

心疾患の機能的評価として開発された運動負荷試験法は、AstrandとRodahl¹⁹、Ellestad²⁰、Wilsonら²¹、Froelicher²²、Fox²³、Noble²⁴、Brannonら²⁵によって成書としてまとめられている。この運動負荷試験法は体力医学的研究への応用も確立し、方法論的にはほぼ完成されたものといえる。しかしながら、運動負荷試験によって得られた成績を臨床での治療面にフィードバックさせるということに関しては、従来から最大酸素摂取量の50～60%または換気性無酸素閾値を指標にして、負荷の量を固定させるという経験的で帰納的な運動処方なされているのが現状といえる。また、簡易運動負荷試験として行われてきている単位時間当たりの歩行距離の測定、階段昇降負荷テストや自転車エルゴメータによる負荷試験²⁶など、日常生活動作と対比させてその成績を臨床治療面に活用しようとする試みにおいては、負荷試験を実施している個々の施設ごとに独自のものが作成されており、いまだ一定の基準・方法がない現状である。

本研究では、運動負荷装置として、個人のエネルギー代謝を経時的に計測し、その成績から算出された目標値としての負荷強度を負荷機械の側で制御する方法、すなわち、生体情報を制御出力に変換したマン・マシン

フィードバック制御による運動療法

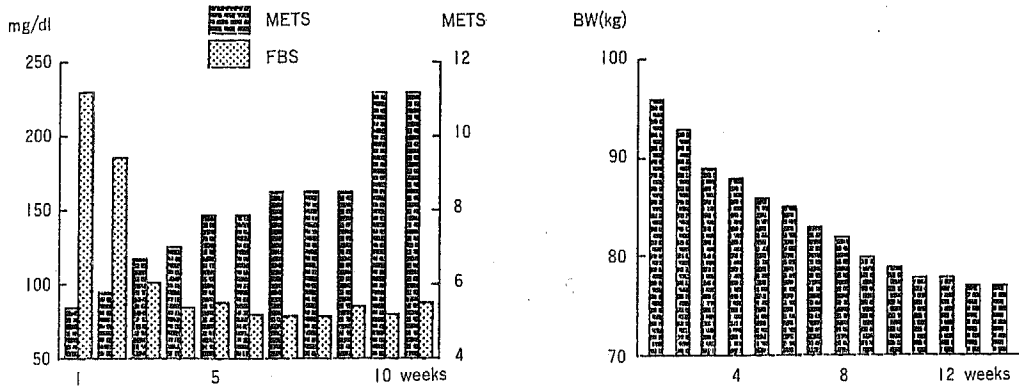


図6 運動負荷装置により3カ月間の運動療法（1日1回，延べ49回）を施行した糖尿病・肥満の症例の至適運動負荷量の目標値（METs）と空腹時血糖値（FBS）および体重（BW）の経時的な推移を週（weeks）の単位で示した。

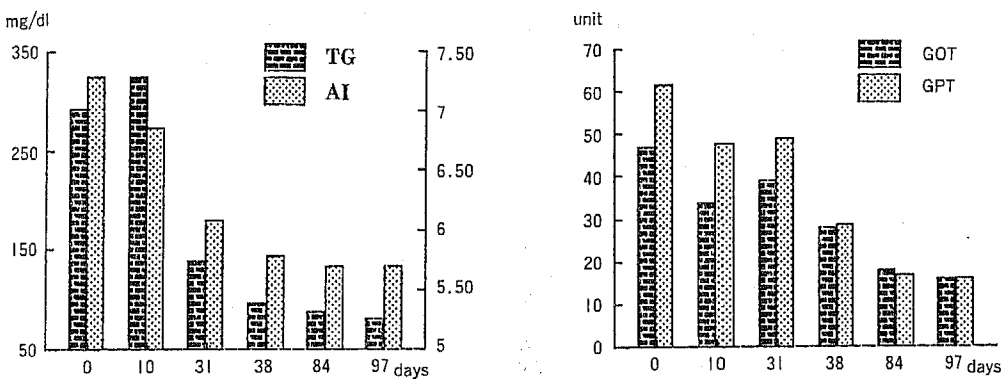


図7 症例-2の中性脂肪（TG），動脈硬化指数（AI），GOT値およびGPT値の推移。

ン系の閉回路を構築したもの（bio-informing mechanical feedback control system）を使用した。本制御システムに基づいて試作した運動負荷装置を用いて，健常人で行った漸増段階負荷法による運動負荷試験の結果は，20名中18名においてVATの判定が可能であった。この成績から，本負荷装置とその制御方式がVATを指標とした運動負荷試験に適していたものと考えることができる。Wasserman²⁷⁾の呼気ガス分析法でのVAT判定基準によれば，経時的にプロットした $\dot{V}E$ ， $\dot{V}CO_2$ が非直線的変化を示した時点，または， $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ が急激に増加しはじめる時点をVATとした。このVAT値は，運動中の血中乳酸濃度の

増加と高い正の相関を示すことを彼は報告している。本研究においても，この判定基準に準じて上記の項目（ $\dot{V}E$ ， $\dot{V}CO_2$ または $\dot{V}E/\dot{V}O_2$ ）のうち2項目以上が満たされた場合にVATとした。運動に必要なエネルギーを好氣的代謝のみでは供給することができなくなり，嫌氣的代謝過程を動員するような状況が出現すると血中の乳酸濃度が増加しはじめることはよく知られている²⁰⁾²³⁾²⁷⁾。動脈血中の酸塩基平衡を維持するために，運動負荷中には $\dot{V}E$ や $\dot{V}CO_2$ が急激に増加する点もよく知られた生理学的知見である²⁰⁾²¹⁾²⁷⁾。健康人はもちろんのこと，心疾患や呼吸器疾患さらに代謝異常をともなう患者に対する運動耐容能の個人差を考

慮し非観血的に VAT を観察することは、身体性疲労を最少限度に抑え、さらに効率のよい運動をさせるための、いわゆる至適運動量決定に不可欠な条件であるといえる。

健常人を用いた METS コントロール・プログラムによる運動負荷の成績は、被験者20名のばらつきが目標値の±10%以内であり、目標値によく収束している。この成績は、本装置の利用が個体差を越えて定常運動負荷状態をつくりだし、その負荷状態を一定に維持させるための手段としての妥当性をもつものと考えられる。

臨床応用に際しては、患者に対する運動負荷の安全性を十分考慮したために VAT の判定率が82%となったが、リスクを完全には排除できないこの種の検査としては妥当な結果であったと考えられる。また、延べ248回の運動療法目的の負荷のうち、225回について目標の負荷量を終了できた(完遂率91%)。この成績は、装置の安全な運用の可能性を確認することができたものと考えられる。また、目標の負荷を終了できなかった23回については、さらにその成績を詳細に再分析して、運動負荷試験の再施行、運動負荷のプロトコルの変更および制御プログラムの再検討を含めて、さらに完遂率の向上をはかる必要性が残されているものと思われる。また、本装置の構造に関して今後検討すべき点としては、呼気ガス採取用マスクの装着による違和感を軽減することができるようにマスクの構造を改良することや、トレッドミルによる単調な運動に対して少しでも変化をもたせるため、負荷速度に対応して画面が展開するモニター装置の附設などが考えられる。

症例-1として示した狭心症の例では、入院中に、日常生活動作域である4~5METSをはるかに越える7.5METSの負荷強度が安全に体験できた点から、本症例では労作時胸痛の発生をおさえた運動量の指標を自覚、体験することによって、退院後の日常生活における自己の作業能力に自信をもつことができた。また、症例-2についても、VATにより基準化された負荷量が毎日の運動療法を続けることによって、日々の治療目標を明確に自覚できたために、退院後の運動療法が効率よく行われた。その結果、糖尿病の自己管理というきわめて困難な課題を克服することができ、減量の成果をもたらし、肥満による合併症の改善をはかることができたものと思われる。

本システムの主要な目標としては、自己の至適運動

負荷量を厳守しながら、安全でかつ効率のよい運動療法を体験させる点にある。心拍数による負荷量の指標は、その簡便さは長所である一方、心拍数は精神的要素や薬物および外乱の影響を受けやすいために、制御指標としては不安定な欠点をもっている。また、不整脈やペースメーカー埋め込み症例には対応できない欠点がある。そのような点から、運動療法を必要とする各種の疾患患者さらに長期臥床後や整形外科手術後の四肢・体幹の固定による廃用症候群などに対して、歩行を含めた基本的日常生活での活動範囲を拡大させ、生活の質的向上を計るためには、好氣的エネルギー代謝を基準とした運動量の測定と、それに基づいた運動処方ガイドライン作成が早急に必要とされる。本システムは、エネルギー代謝をフィードバック制御で調節し、常に一定の負荷量をかけることのできる装置である。本研究ではVATを基準にして目標値を算出し妥当な成績を得ることができたが、さらに生理学的知見の集積によって新たな指標を加味することで、個々の患者の病態に応じた、より有効な運動療法を開発することも、本研究で示した試作装置とその制御に対する概念を基礎にして可能なことであると考えられる。

IV ま と め

運動におけるエネルギー消費を酸素摂取量またはMETS値で評価し、運動負荷試験により個別の目標値を算出した。次いで、その目標値を一定に維持しながら減衰振動することにより、満足度の高いリスク管理を行いながら運動負荷が可能な装置の開発と、その臨床生理学的応用について検討し、以下の成績を得ることができた。

1 健常人20例に対して、漸増段階負荷法によるトレッドミル運動負荷試験を施行し、20例中18例(判定率90%)で換気性無酸素閾値を観察することができた。

2 同一の健常例に対して、目標値4METSで呼気ガス指標フィードバック制御型至適運動負荷を行い、負荷量の変動を±10%の範囲に収束させることができた。

3 虚血性心疾患または糖尿病・代謝疾患さらに呼吸器疾患の患者50例に対して、漸増段階負荷法によるトレッドミル運動負荷試験を施行し、換気性無酸素閾値を50例中41例(判定率82%)で観察することができた。

4 同一症例に対して、個々の患者の至適運動負荷量が呼気ガス指標フィードバック制御型至適運動負荷

を行い、延べ248回中225回(完遂率91%)で目標の運動負荷量を施行することが可能であった。

5 臨床応用例として、本装置の評価と運動療法を施行して好成績を示した代表的な狭心症と糖尿病患者の2症例を示した。

6 生体出力を制御出力に変換することによって、個体に応じた運動負荷を行うことが可能であることが判明するとともに、本制御装置が広範囲にわたる臨床例に応用可能であることが判明した。

なお、本論文の主旨は1985年9月、第40回日本体力

医学会(鳥取)、1986年9月、The XXIII FIMS World Congress of Sports Medicine (Brisbane) および1987年5月、Tenth International Congress of World Confederation for Physical Therapy (Sydney) において発表した。

稿を終えるにあたり、御指導、御校閲を賜りました信州大学医学部環境生理学教室の上田五雨教授に深謝いたします。

文 献

- 1) Blousfield, G. : Angina pectoris : Changes in electrocardiogram during paroxysm. *Lancet*, 2 : 457, 1918
- 2) Feil, H. and Siegel, M. : Electrocardiographic changes during attacks of angina pectoris. *Am J Med Sci*, 175 : 225, 1928
- 3) Master, A.M. and Oppenheimer, E. J. : A simple exercise tolerance test for circulatory efficiency with standard tables for normal individuals. *Am J Med Sci*, 177 : 223, 1929
- 4) Wood, F.C. and Wolferth, C.C. : Angina pectoris : The clinical and electrocardiographic phenomena of the attack and their comparison with the effects of experimental temporary coronary occlusion. *Arch Intern Med*, 47 : 339, 1931
- 5) Goldhammer, S. and Scherf, D. : Elektrokardiographische untersuchungen bei kranken mit angina pectoris. *Z Klin Med*, 122 : 134, 1932
- 6) Katz, L. and Landt, H. : Effect of standardized exercise on the four-lead electrocardiogram : Its value in the study of coronary disease. *Am J Med Sci*, 189 : 346, 1935
- 7) Riseman, J.E.F., Waller, J. and Brown, M. : The electrocardiogram during attacks of angina pectoris : Its characteristics and diagnostic significance. *Am Heart J*, 19 : 683, 1940
- 8) Johnson, R.E., Brouha, L. and Darling, R.C. : A practical test of physical fitness for strenuous exertion. *Rev Can Biol*, 1 : 491, 1942
- 9) Master, A.M. and Jaffe, H.L. : The electrocardiographic changes after exercise in angina pectoris. *J Mt Sinai Hosp*, 7 : 629, 1941
- 10) Yu, P.N.G. and Soffer, A. : Studies of electrocardiographic changes during exercise (modified double two-step test). *Circulation*, 6 : 183, 1952
- 11) Bruce, R.A. : Evaluation of functional capacity and exercise tolerance of cardiac patients. *Mod Concepts Cardiovasc Dis*, 25 : 321, 1956
- 12) Balke, B. and Ware, R.W. : An experimental study of physical fitness of airforce personner. *US Armed Forces Med J*, 10 : 6-75, 1959
- 13) Blackburn, H. : The electrocardiogram in cardiovascular epidemiology : Problems in standardized application. In Blackburn, H. (ed.), *Measurement in exercise electrocardiography*. Charles C Thomas, Springfield, Illinois, 1969
- 14) Robb, G.P. and Marks, H. : Post exercise electrocardiogram in arteriosclerotic heart disease. *JAMA*, 200 : 110, 1967
- 15) Diamond, G. A. : Bayes' theorem ; A practical aid to clinical judgement for diagnosis of coronary-artery disease. *Practical Cardiology*, 10 : 47-77, 1984
- 16) Wasserman, K. : Exercise testing in the dyspneic patient. *Am Rev Respir Dis*, 192 : S1-100, 1984
- 17) 田中喜代次, 信田宣司, 長谷川陽三 : 心拍変動フィードバック管理負荷制御方式による Aerobic Score 考

藤原孝之

らみた有酸素性能力の縦断的評価. 生理人類誌, 8:3-12, 1989

- 18) Weber, K.T. and Janicki, J.S. : Cardiopulmonary exercise testing. 1st ed., pp.152-157, W.B. Saunders Co., Philadelphia, 1986
- 19) Astrand, P-O. and Rodahl, K. : Textbook of work physiology. McGraw-Hill, New York, 1970
- 20) Ellestad, M.H. : Stress testing. 3rd ed., F.A. Davis, Philadelphia, 1975
- 21) Wilson, P.K., Fardy, P. S. and Froelicher, V. F. : Cardiac rehabilitation, adult fitness and exercise testing, Lea and Febiger, Philadelphia, 1981
- 22) Froelicher, V.F. : Exercise and the heart. 2nd ed., Year book medical publishers, Chicago, 1983
- 23) Fox, E.L. : Sports physiology. 2nd ed., Holt-Saunders, Tokyo, 1984
- 24) Noble, B. J. : Physiology of exercise and sport. Mosby, St. Louis, 1986
- 25) Brannon, F. J., Geyer, M. J. and Foley, M. W. : Cardiac rehabilitation. F. A. Davis, Philadelphia, 1988
- 26) Löllgen, H. and Mellerowicz, H. : Progress in ergometry : Quality control and test criteria, Springer-Verlag, Berlin, 1984
- 27) Wasserman, K. : Principles of exercise testing and interpretation. pp.33-37, Lea and Febiger, Philadelphia, 1987

(1. 3. 3 受稿)