

心疾患患者に対する心肺運動負荷試験の現状と 課題に関する文献的研究

福祉社会デザイン研究科ヒューマンデザイン専攻博士後期課程2年
太附 広明

キーワード

心肺運動負荷試験・最大歩行速度・心臓リハビリテーション

要 旨

心肺運動負荷試験（Cardiopulmonary Exercise Testing：CPX）はトレッドミルや自転車エルゴメーターに呼気ガス分析を併用した運動負荷試験である。運動中のエネルギー代謝を非侵襲的に推定でき、対象者の呼吸機能や無酸素性代謝閾値（Anaerobic Threshold：AT）ならびに酸素摂取量などの運動耐容能を評価して運動処方に活用することが可能である。CPXから得られた指標は心不全患者において重症度判定にも利用され、生命予後に関して多くの研究結果が報告されている。このようにCPXから得られる情報は有用性の高い評価指標であり、心疾患患者に対する運動処方はCPXの結果に基づいて行うことが「心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」によって示されている。

しかし、欧米に比べると本邦の心大血管リハビリテーション（心リハ）実施施設数は少なく、CPX実施施設は限られている。さらに回復期や維持期心リハは急性期に比べて体制が不十分である。今後は回復期病院や診療所等での心リハ運営ならびにCPX実施が望まれるが課題が多いのが実情である。CPXを実施せずに運動処方を行う場合には心拍処方や自覚的運動強度を用いる方法がある。しかし心拍処方は不整脈や心拍数を制御する薬剤によって誤差が生じる点や自覚的運動強度は客観性に劣る可能性がある。したがってこれらの方法に加えて安定した評価指標が望まれる。

一方、最大歩行速度（Maximum Walking Speed：MWS）は高齢者の運動機能を簡便に評価でき、CPXの運動処方強度を推定する一要素となる可能性がある。さらにCPX実施に先立って運動負荷強度を予測しておくことはCPXを効率的かつ有効に実施するために重要である。即ち、MWSによってATや運動負荷強度を予測することが可能であれば意義深い

ことである。

そこで、本研究ではCPXとMWSに関する先行研究をまとめるとともにCPXの現状と課題、さらにMWSのスクリーング評価利用の可能性について述べる。

目 次

I 緒言

II CPXについて

III CPXに関する先行研究

1. CPX指標間の関係と再現性について
2. CPX指標の標準値、平均値について
3. CPXの安全性に関する研究
4. CPXから得られた心疾患患者の運動耐容能に関する研究
5. CPX指標と運動機能との関連性の研究
6. CPX指標と生命予後に関する研究

IV CPXの課題と問題点

V MWSに関する先行研究

1. MWSの再現性と妥当性に関する研究
2. MWSと運動機能、日常生活自立度、生命予後との関連性

VI 今後の課題

VII まとめ

謝辞

参考文献

I, 諸 言

心肺運動負荷試験 (Cardiopulmonary Exercise Testing : 以下、CPX) はトレッドミルや自転車エルゴメーターに呼気ガス分析を併用して行う運動負荷試験である。呼気ガス分析によって連続して採血を行わないと知り得なかった運動中のエネルギー代謝を非侵襲的に推定できるようになった。骨格筋での代謝が間接的に推定可能となり、スポーツ選手や呼吸循環器疾患の心肺機能や運動耐容能評価に利用されている。CPX指標は客観性や再現性に優れた有用な心肺機能指標と報告されている^{26) 76)}。小池³⁵⁾はCPXの有用性について、「心不全患者の重症度評価はニューヨーク心臓病協会 (New York Heart Association : 以下、NYHA) 心機能分類が広く用いられているが自覚症状に基づく評価のため客観性・定量性に乏しいこと、心臓超音波や心臓カテーテル検査は安静時の心機能評価であり運動時の自覚症状や活動制限に反映しない場合がありCPXの評価が重要である」と述べている。しかも心疾患患者の運動負荷に対する応答反応は様々で、健常人よりも異常反応が出現する危険性が高い。このため心疾患患者に対する運動処方CPXの結果に基づいて行うことが「心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」⁵⁰⁾で推奨されている。そしてCPXに関しては心不全の心移植判定基準^{22) 39)}や重症度判定⁷⁷⁾、健常人の生命予後との関連性⁴⁸⁾、心疾患患者の生命予後との関連性^{5) 14) 15) 16) 34) 37) 54) 69)}、高齢者の運動機能テストとの関連性^{9) 36)}など多くの研究がなされている。ところがCPXの実施には高額な機器や医師の監視、加えて解析には専門的知識を必要とするため容易ではない。心大血管リハビリテーション (以下、心リハ) 基準認定施設の多くはCPXを行っているものの認定施設数が少ない。CPXを実施せずに運動処方を行う場合には一般的に心拍処方や自覚的運動強度 (Rating of Perceived Exertion : 以下、RPE) を用いることが多い。しかし心拍処方は心拍数を制御する薬剤や不整脈の影響によって誤差を生じる可能性があり、RPEは客観性に劣る面もある。即ち、これらの方法に加えて安定した評価指標が望まれる。

そこでCPXによる運動処方強度を推定する一指標として最大歩行速度 (Maximum Walking Speed : 以下、MWS) の利用が考えられる。MWSは簡便に実施でき⁶³⁾、高齢者の運動機能の有用な指標¹⁰⁾とされている。本稿では第一に心疾患患者に対するCPXの現状と先行研究をまとめ、次にCPXの課題、最後にMWSの先行研究ならびにCPX指標との関連の可能性について述べる。

II. CPXについて

運動負荷試験は静的 (等尺性) 負荷と動的 (等張性) 負荷試験に大別される。動的負荷試験を実施する場合、自転車エルゴメーターやトレッドミルを用いることが多い。これによって血圧、心拍数、心電図、運動負荷量が測定でき、不整脈や心筋虚血評価が可能である。CPXではこれらの評価に加え、呼気ガス分析による酸素摂取量、二酸化炭素排出量、換気

量等が測定できる。運動負荷試験の目的は虚血性心疾患の診断や重症度判定、心疾患患者の運動耐容能評価、不整脈の検出、薬剤投与後の治療判定、運動処方作成など³⁸⁾ 列挙されるが、CPXに特徴的なものが運動処方の決定である。CPXの適応は米国胸部疾患学会・胸部内科学会⁷⁾ によって示され、小林³¹⁾ が翻訳している。

CPXは欧米の運動生理学分野で発展してきた。英国の医師・生理学者J. S. Holdaneは呼吸中の二酸化炭素の役割を解明し、自らの名を冠した呼気ガス分析装置を開発した。その後、C. G. Douglas はJ. S. Holdaneとともに運動中の呼吸制御における酸素と乳酸の役割を研究している。運動生理学の研究では長年、ガス収集袋が使用されており、ノルウェーのP. F. Schlanderはガス分析装置の較正方法を開発した。米国においてはハーバード大学のDavid Bruce Dillのもと、運動生理学研究がすすめられ、有名なHoldaneの呼気ガス分析装置やVan Slykeの血液ガス分析装置が多くの研究で使用されてきた。1980年代に入るとコンピューター制御機器が開発され分析に利用されたが当時は精度に少し問題があったようである⁶¹⁾。CPX指標のうち、無酸素性代謝閾値（Anaerobic Threshold：以下、AT）の概念に関して、谷口⁷¹⁾ によると、「1954年にNaimark, Aらが連続的な呼気終末二酸化炭素濃度や窒素濃度の変化からガス交換比（R）を追究し、運動中にRが突然上昇を示す点があり、血中乳酸が上昇して重炭酸イオンが減少するこのRの変化で運動耐容能が推察可能とした。1964年にはWasserman, Kらが運動中の乳酸の増加に一致して呼吸商や重炭酸の変化点が運動筋における無酸素性代謝の開始点と考え、これがATという言葉の始まりである」としている。そして「1973年にBeaver W. Lらがコンピューターを利用してbreath-by-breathに運動中の換気量や酸素摂取量、炭酸ガス排出量を求める方法を開発した」と報告している。

CPXの連続的ガス測定法にはmixing-chamber法とbreath-by-breath法がある。mixing-chamber法は一定量集めた呼気ガスサンプルを測定部に導いて酸素摂取量を測定する方法である。一方、breath-by-breath法はマウスピースやマスク内の呼吸量とガス濃度を一呼吸ごとに測定し時間の遅れをコンピューターで補正する方法である。両者にはそれぞれ一長一短あるがmixing-chamber法は長時間の連続測定には不適で、吸入ガス濃度が変化する場合は測定不可能である。逆にbreath-by-breath法は呼吸ガスの連続測定が可能である⁷²⁾。

CPXの運動負荷様式は一定負荷とランプ負荷法（連続的多段階負荷法）があるが、本稿では運動強度を決定する目的で行われるランプ負荷試験について述べる。ランプ負荷によるCPXは心電図、血圧、心拍数、呼気ガス分析装置による呼吸指標をモニタリングしながら酸素・二酸化炭素濃度を測定し、換気能力や持久力、最大運動能力などを判定できる。CPXで使用する運動負荷装置にはトレッドミルと自転車エルゴメーターがあり、それぞれ利点・欠点、特徴がある。一般的にトレッドミルの方が運動筋の動員が多く負荷量が大きくなる。

ところで、CPXからは複数の指標が得られるが、これらCPX指標を要約して示す。まず、最高酸素摂取量（以下、peak $\dot{V}O_2$ ）は最大心拍出量を反映し、酸素輸送能の最も良好な指標

で、全身の運動耐容能（全身持久力）を表している。心不全患者の予後予測や治療および運動療法の効果判定としても重要な指標である。一方、最大酸素摂取量（以下、 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ ）は生体固有の最大酸素摂取能力で、 $\text{peak}\dot{V}O_2$ とは異なる。 $\text{peak}\dot{V}O_2$ は1回の運動負荷試験から得られた酸素摂取量の最高値であり、 $\dot{V}O_2 \text{ max}$ は対象者の持つ酸素摂取能力の最大値である³⁵⁾。次に、ATは増加する運動強度において有気的エネルギー代謝（有酸素運動）から無気的エネルギー代謝（無酸素運動）に切り替わる直前の運動強度である。運動処方強度はAT値から求められ、心拍数で運動処方を行う場合にはAT時の心拍数を運動強度とする。しかし仕事量による負荷設定には便宜上ATより1分前の運動強度を処方する^{3) 22)}。これは負荷量増加に対する酸素摂取量が一定の遅れをとって増加するためである。ATによる運動処方の利点は複数あり、①乳酸の持続的上昇が無く長時間の運動が可能であること、②代謝性アシドーシスが起りにくく換気亢進や息切れが生じにくいこと、③血中カテコラミンの上昇が少なく心臓への過負荷や不整脈を生じにくいこと、④交感神経活性が少なく凝固作用が亢進しないことなどが挙げられる。続いて、分時換気量－二酸化炭素排泄量勾配（以下、 $\dot{V}E-\dot{V}CO_2 \text{ slope}$ ）は一定の二酸化炭素排出量（以下、 $\dot{V}CO_2$ ）に対する分時換気量（以下、 $\dot{V}E$ ）の比である。これは換気効率や運動時の心拍出量増加を示し、息切れ症状を反映して、心不全症状が重度なほど増加する。また最大負荷を必要とせず再現性も良好であるが、呼吸性代償開始点（Respiratory Compensation Point：RCP）以上では $\dot{V}E$ の増加量が大きくなり、 $\dot{V}E$ と $\dot{V}CO_2$ の比率勾配が急峻となる（数値が大きくなる）。このため解析範囲に注意が必要である。さらに換気血流比不均等分布が大きい場合も換気効率が低くなる。これは一定量の $\dot{V}CO_2$ を達成するために必要な $\dot{V}E$ が大きくなるためである。 $\dot{V}E-\dot{V}CO_2 \text{ slope}$ の正常値は35.0未満で、一般的に年齢が上がると上昇し、男性に比べ女性の方が高く、心不全が重症なほど高値である²²⁾。麻野井⁶⁾は、慢性心不全患者は $\dot{V}E$ が大きく、浅く速い換気様式と低心拍出量によって換気血流不均等分布が大きくなるため生理的死腔を生じると述べている。そのほか心疾患患者の $\dot{V}E-\dot{V}CO_2 \text{ slope}$ は交感神経と関連すると報告されている²⁷⁾。最後に仕事量増加に対する酸素摂取量増加（以下、 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ ）である。この指標は自転車エルゴメーターによるランプ負荷テストで測定できるもので末梢活動筋への酸素輸送増加の程度を表す。加えて心拍出量の増加率も反映し、血流分布、動静脈酸素較差、骨格筋での酸素利用能が影響する。10～20ワットランプ負荷時では性別に関わらず、約10ml/min/Wが正常値である。しかしランプ負荷量が大きくなるほど数値が低下するので異なったプロトコル間の比較には注意を要する。そして年齢や性別による影響は少ないものの心疾患患者は健常者に比べて値が低く、心不全が重症なほど低値である²²⁾。

Ⅲ. CPXに関する先行研究

1. CPX指標間の関係と再現性について

CPX指標間の関係は慢性心不全患者を対象に $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope間に負の相関が報告されている^{11) 22) 27)}。しかし、その他のCPX指標間の関係は文献検索上見当たらない。

CPX指標の再現性に関して $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ は被験者の意欲に左右されるため完全な客観的指標になりにくい点が指摘されている³⁾。一方、小池ら³²⁾はATの妥当性、そしてATと $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ の再現性について良好な結果を報告している。これによると心疾患患者15名を対象とした自転車エルゴメーターによるCPXで呼気ガスによるAT (13.3 ± 2.8) と採血での乳酸値増加地点の酸素摂取量 ($13.4 \pm 2.7 \text{ ml/kg/min}$) にて高い相関 ($r=0.93$) を認めた。そして1週間間隔でCPXを2回行い、1回目と2回目の相関係数はATが $r=0.97$ 、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ は $r=0.92$ 、最大負荷は $r=0.91$ と高い再現性を示している。また、AT決定法におけるタイムトレンド法は $\dot{V}\text{O}_2$ と $\dot{V}\text{CO}_2$ のグラフを視覚的に求めるため検者間での誤差を指摘している³⁵⁾。他方、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeと $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$ は呼気ガス指標の経時的変化を直線回帰して算出するため客観的かつ再現性良好と述べている³⁵⁾。CPX指標の経時的変化についてはATや $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ などの運動耐容能は経過とともに増加し⁸⁰⁾、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeも経過とともに改善することが示されている^{1) 24) 60)}。しかし、 $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$ については運動療法により改善した後に低下することも報告されている³⁰⁾。

2. CPX指標の標準値、平均値について

健常者を対象としたCPX指標の平均値に関しては大宮⁵²⁾が自転車エルゴメーターおよびトレッドミルで測定したATと $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ のデータを「日本循環器学会・運動に関する診療報酬委員会（村山正博委員長）1990年度報告：日本人の運動時呼吸循環指標の標準値」から引用し報告している。これは多施設における310名（男性179名、女性131名）を対象とし、年代別（20代～60代）に標準値をまとめたものである。さらに鈴木ら⁶⁷⁾は健常者548名（男性240名、女性308名、8歳から82歳）にトレッドミルを用いたCPXによって $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ を測定し、反復切断法（臨床検査領域の基準域設定法の一つ）を用いて性、年齢に応じた臨界値を示している。Sunら⁶⁵⁾は17歳から78歳までの健常男女474名を対象に自転車エルゴメーターまたはトレッドミルによるCPXを実施し、換気状態（ $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope、AT時の $\dot{V}\text{E}/\text{CO}_2$ 、 $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2$ 最低値）ならびにATを報告している。その結果、 $\dot{V}\text{E}/\dot{V}\text{CO}_2$ 最低値は換気効率を推定する非侵襲的で有効な方法と結論づけている。このようにCPXの平均値をまとめた報告は健常者を対象としては換気指標と運動耐容能についてわずかである。しかも自転車エルゴメーターとトレッドミルによる測定が混在しており測定値に差を生じている可能性もある。一方、心疾患患者を対象としては運動耐容能（AT、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ ）や $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeの報告は多い。この内容はCPX指標と運動機能ならびに生命予後との関連性として後述する。しか

し、運動耐容能に他のCPX指標を加えた平均値の報告は自験例⁷³⁾を含めてわずかである。このため心疾患患者におけるCPX指標を参考値として多くまとめるべきと考える。

3. CPXの安全性に関する研究

虚血性心疾患における再灌流療法後の早期運動負荷試験もしくは運動療法は心破裂、再狭窄、左室リモデリング、亜急性血栓性閉塞（Subacute Thrombosis：以下、SAT）などを惹起・悪化させる可能性があるため注意が必要である¹⁸⁾。心破裂は急性心筋梗塞（Acute Myocardial Infarction：以下、AMI）発症後2週間以内に発生することが多いが、合併症のないAMIでは亜最大運動負荷を発症後4～6日から開始できる。しかし高血圧は心破裂の危険因子の一つであるため過度の血圧上昇は避けることが推奨されている¹⁸⁾。また再狭窄は運動による生理活性物質の産生によって発生する可能性が考えられたが、現在では再狭窄を増加させることなく安全に心リハビリが実施されている。左室リモデリングは広範囲心筋梗塞の場合、運動によって促進される可能性が1980年代に指摘された。現在ではその原因にならないものの広範囲前壁梗塞で左室駆出率（Left Ventricular Ejection Fraction：以下、LVEF）が40%未満の症例は運動強度を弱めに設定する方が安全とされている¹⁸⁾。さらにSATに関しては、1995年にSamuelsら⁵⁸⁾が冠動脈形成術（Percutaneous Coronary Intervention：以下、PCI）後の早期CPX施行によるステント内血栓症発症を報告して以来、PCI後早期のCPXは避けられる傾向にあった。だが、2003年にRoffiら⁵⁷⁾がBare Metal Stent（BMS）留置後翌日のトレッドミルによるランダム化比較大規模試験を施行し、十分な抗血小板療法下でのATレベルの運動は安全であることを示した。これ以降、PCI後早期CPXの安全性を確認する追試報告が数多くなされ、現在ではPCI後の早期CPXの安全性は広く知られることとなった⁴⁵⁾。本邦でもPCI後早期CPXの安全性に関して諸家が報告している。Gotoら¹⁷⁾の多施設調査（47施設、13685名）によれば4360名にステント留置が行われ、1ヶ月以内のSAT発生は132名であった。このうち運動療法中または終了後24時間以内のSAT発症はなく、1名にSATが発生したが、この症例は抗血栓療法未実施であった。そして7施設で14日以内に最大運動負荷試験を、6施設で7日以内に亜最大運動負荷試験を有害事象なく実施していた。また、曾我ら⁶⁸⁾は待機的PCI症例（無作為に抽出した84例：男性67例、女性17例、 67.3 ± 9.3 歳）に対してPCI翌日のCPX結果（自転車エルゴメーターによるATレベルまでの10ワットラング負荷）を報告している。これによると軽微な合併症（倦怠感、ふらつき、腰痛、心室期外収縮、血圧上昇）が数名にみられたが、重大な合併症（胸痛、意識消失、血圧低下、重篤な不整脈など）は認めなかった。さらに勝木ら²⁵⁾も待機的PCI（8名）翌日にCPX（自転車エルゴメーターによる10ワットラング負荷）にて運動療法の妨げになる事象はなかったという。山下ら⁸²⁾は薬剤溶出性ステント（Drug Eluting Stent：以下、DES）によるPCI後のCPXの安全性を報告している。DES留置後の43名に対して自転車エルゴメーターまたはトレッドミルに

よるCPXを退院前、心リハ開始3ヶ月、6ヶ月時に実施した。その結果、不整脈（期外収縮）2名、ST低下7名（1名に胸部不快感）を認めたが、有害事象はなく、SATはその後の運動療法でも生じなかった。続いて諸富ら⁴⁵⁾もDESによる待機的PCI後のCPX（自転車エルゴメーター）結果を報告している。狭心症患者80名を早期CPX群（PCI後14日以内：50名）と対照群（15日以降：30名）に分類し検討した結果、AT、peak $\dot{V}O_2$ 、中止理由、心血管事故の有無は2群間で差を認めず、全例に運動処方を行っている。このようにSATと急性期の運動負荷は多くの議論が重ねられてきたが、現在では抗凝固療法下の早期亜最大運動負荷（ATレベル）は問題ないという状況である。

4. CPXから得られた心疾患患者の運動耐容能に関する研究

CPXにおける運動耐容能（AT・peak $\dot{V}O_2$ ）の研究成果は諸家が報告しており、心不全患者を対象とした場合、これらはNYHA心機能分類と関連している。Matsumuraら⁴⁰⁾は健常者34名（19～59歳；平均38歳）と心不全患者47名（23～66歳；平均42歳）にトレッドミルによるCPXを実施している。ATは健常者 32.95 ± 6.17 、心不全患者 17.22 ± 4.86 ml/kg/minと心不全患者の方が低く、NYHA心機能分類が重度なほど低かった（I； 22.78 ± 3.74 ，II； 16.99 ± 3.66 ，III； 12.97 ± 2.76 ）。そして両群ともにATは $\dot{V}O_{2max}$ の70%であり、加齢により減少していた。さらにKoikeら³³⁾も健常者42名（ 40.0 ± 16.6 歳）と心不全患者106名の計148名（男性91名、女性57名）に対するCPX結果（自転車エルゴメーター）を検討している。この研究でもpeak $\dot{V}O_2$ は健常者 32.4 ± 7.1 ml/kg/minに対し心不全患者はNYHA I； 25.1 ± 4.8 ，II； 21.1 ± 4.7 ，III； 16.9 ± 2.7 と心不全患者の方が低く、心不全が重度なほど低かった。ATも同様の結果で、健常者 20.0 ± 4.6 、心不全患者NYHA I； 16.0 ± 2.4 ，II； 14.1 ± 2.5 ，III； 11.3 ± 1.5 であった。 $\Delta\dot{V}O_2/\Delta WR$ も健常者 10.95 ± 3.15 ml/min/Wに対し心不全患者はNYHA I； 9.67 ± 2.88 ，II； 8.82 ± 2.92 ，III； 8.08 ± 1.91 と低値であった。

運動耐容能からみた慢性心不全患者の重症度分類にWeberとJanickiの分類⁷⁷⁾がある。これは自転車エルゴメーターを用いたCPXによって得られたATと $\dot{V}O_{2max}$ をクラス分類したものである。この研究ではATによってクラスA（無症状～軽症）； >14 、クラスB（軽症～中等症）； $11 \sim 14$ 、クラスC（中等症～重症）； $8 \sim 11$ 、クラスD（重症）； $5 \sim 8$ 、クラスE（非常に重症）； <4 ml/kg/minに分類している。同様に $\dot{V}O_{2max}$ はクラスA； >20 、クラスB； $16 \sim 20$ 、クラスC； $10 \sim 16$ 、クラスD； $6 \sim 10$ 、クラスE； <6 ml/kg/minに分類している。しかしこの分類結果は欧米人を対象としており、日本人の運動耐容能は欧米人よりも低いいため本邦での利用は適切でない⁴⁾という意見もある。このため現状では参考に留め、日本人データとの比較等検討を進めることが今後の課題である。そしてManchiら³⁹⁾は心不全患者におけるpeak $\dot{V}O_2$ を用いた心移植の判断基準を報告している。この研究は心不全患者122名（男性103名、女性19名、22～69歳）にトレッドミルによるCPXを実施し対象者をpeak $\dot{V}O_2 \leq 14$

ml/kg/min (グループ1)、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 > 14$ ml/kg/min (グループ2)、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が低く心移植から除外された群 (グループ3) の3群に分類し比較検討したものである。3群間にてNYHA心機能分類、LVEF、心係数には差がなく、肺動脈楔入圧はグループ2で有意に低かった。生存率はグループ3 (1年後47%、2年後32%) とグループ1 (1年後70%) がグループ2 (1年後94%、2年後84%) に比べて有意に低かったという。このことから $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が14 ml/kg/min以下は生命予後が不良であり、米国ではこれが心移植の基準に用いられている²²⁾。

5. CPX指標と運動機能との関連性の研究

CPX指標と運動機能の関連性はCPX指標のうち運動耐容能 (AT、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$) と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeを用いた研究が多く報告されている。同時に運動機能指標としては下肢筋力、各種歩行テスト、バランス機能、運動機能テストが用いられている。対して、CPX指標のうち $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$ や運動処方強度については運動機能との関連を検討した報告は文献検索上ない。

山崎ら⁸¹⁾ は回復期心筋梗塞患者67例 (男性47例、女性20例、平均63歳) を対象に運動耐容能と下肢筋力の関係を報告している。この研究は歩行能力、CPX指標 (トレッドミルによる $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、AT、最高ガス交換比、予測最大心拍数/最高心拍数割合)、下肢筋力の関連を検討したものである。下肢筋力は等速性筋力測定器60deg/secの膝伸展ピークトルク値を用いている。その結果、下肢筋力は歩行障害例 (杖または歩行器歩行) で低く、年齢と負の相関 (男性 -0.675 、女性 -0.476)、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、ATとは正相関 ($r=0.735$, $r=0.533$) を認めていた。即ち、心筋梗塞患者の歩行能力や運動耐容能には下肢筋力が密接に関係するとしている。また海鋒ら²³⁾ はAMI患者の退院時運動耐容能の関連要因を探る目的で、運動耐容能 (トレッドミルによる $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$)、心機能、骨格筋機能の関連性を検討している。対象は発症後1ヶ月の男性AMI患者213名 (59.2 ± 10.8 歳) である。 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ (26.7 ± 4.9 ml/kg/min) は年齢 ($r=0.48$)、LVEF ($r=0.24$)、握力 ($r=0.28$)、膝伸展筋力 ($r=0.44$) と有意な相関を示し、重回帰分析から $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ の関連因子として年齢、LVEF、膝伸展筋力が抽出された。即ち、低心機能で下肢筋力が低下した高齢者は運動耐容能が低いことを提示している。これらの研究結果からAMI患者の運動耐容能には年齢や下肢筋力が関与していることが理解できる。

CPX指標に対して6分間歩行テスト (以下、6MWT)、シャトルウォーキングテスト、高速歩行テストとの関係も報告されている。Formanら¹³⁾ は外来心不全患者2054名 (年齢中央値59歳、男性71%、NYHA II; 64%、III; 36%、EF $\leq 35\%$) を対象にCPX指標 (自転車エルゴメーターによる $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope) と6分間歩行距離を測定し、再入院率と生命予後を2.5年間追跡調査している。その結果、CPX指標 (median $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$; 14.6ml/kg/min, median $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope; 32.4) と6MWT (median 372m) は再入院、死亡率の予測因子として同様の有益性があると報告している。さらにT-Luporiniら⁷⁴⁾ はトレッドミルを使用して

CPXと6MWTを測定し、20歳～45歳の女性における肥満群（BMI \geq 30、14名）と栄養良好群（18.5 \leq BMI \leq 24.9、15名）の2群で身体組成、心肺機能を比較している。その結果、CPXと6MWTにおけるpeak $\dot{V}O_2$ は有意な相関を認めた（ $r=0.53$ ）。また肥満群は栄養良好群に比べるとpeak $\dot{V}O_2$ 、 $\dot{V}E$ 、血圧が高く、両試験におけるピーク時心拍数の相関が高かった（ $r=0.77$ ）としている。Mikawaら⁴¹⁾は有酸素フィットネスを評価する目的で15mインクリメンタルシャトルウォーキングテスト（15-m ISWRT）、 $\dot{V}O_2$ max（自転車エルゴメーター15Wランプ）、1500m高速歩行の関連性を検討している。対象は中年男性68名（40～59歳）で、平均値は15-m ISWRT 1086.8 \pm 107.1m、 $\dot{V}O_2$ max 34.2 \pm 6.3ml/kg/min、1500m高速歩行812 \pm 64.2秒であった。そして $\dot{V}O_2$ maxと15-m ISWRTは高い相関（ $r=0.86$ ）、 $\dot{V}O_2$ maxと1500m高速歩行とは中等度の相関（ $r=-0.51$ ）を示した。以上、これら3つの研究結果からCPX指標（ $\dot{V}O_2$ max）と6MWT、歩行テストとの関連性が示された。しかし6MWTは運動強度がATを超えている可能性があり、急性期心疾患患者を対象とした場合は対象者のリスク管理と適応判断が重要と考える。さらに6MWTよりも運動負荷の高い15-m ISWRTや1500m高速歩行はなおさらのことである。

CPX指標と運動機能テストとの関連性も多数検討されている。熊丸ら³⁶⁾らは心疾患患者に対する高齢者体力評価（Fullerton Functional Fitness Test：FFFT）の妥当性を評価する目的で、CPX指標（AT、peak $\dot{V}O_2$ ）とFFFTとの関連性を検討している。対象は外来心リハ患者116名（男性82例、女性34例、心臓外科手術後44名、PCI後72名、平均64.5歳；35～77歳）である。その結果、CPX指標（AT、peak $\dot{V}O_2$ ）とFFFTのうち30-second chair test, 8-foot up-and-go test, 2-minute step testで軽度～中等度の相関を認めた。FFFTは欧米人対象であり、標準値を日本人向けに修正し、CPX非導入施設で代用できる可能性を述べている。この研究は男女を一緒に検討しており、測定値が示されていない。下肢筋力や持久力には性差があるうえ疾患群でも差が生じる可能性があり、これらの検討が必要と考える。次にBinderら⁹⁾はトレッドミルによるPeak $\dot{V}O_2$ とModified Physical Performance Test（M-PPT）の関連性を検討する目的で高齢女性（75歳以上）101名を対象に研究している。これによるとpeak $\dot{V}O_2$ （15.0 \pm 3.3ml/kg/min）はM-PPTトータルスコア（27.8 \pm 4.9）と有意な相関（ $r=0.53$ ）を示し、M-PPTのうち歩行速度（ $r=0.44$ ）、5回椅子立ち上がり時間（ $r=-0.43$ ）、階段昇り時間（ $r=-0.36$ ）と有意な関連を示している。上記2つの研究結果を受けて、運動耐容能評価をCPXに代わりFFFTやM-PPTで代用できる可能性が期待できる。しかし両者は簡便性に欠けるため、このうちの有効なテスト項目を選択するのが良いと考える。続いて森尾ら⁴³⁾は高齢者の運動耐容能を向上させる因子を明らかにする目的で運動耐容能（トレッドミルによるpeak $\dot{V}O_2$ 、AT）と筋力（握力、Hand Held Dynamometerによる下肢筋力）、バランス能力（片脚立位時間、Modified Functional Reach Test：M-FRT）、歩行能力（10mのMWS、歩幅）の関連性を検討している。対象は発症または手術後1ヶ月の

心疾患患者（108名）で、高齢群（57名）と壮年群（51名）に分類して、運動耐容能に対する共分散構造分析を行っている。 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ は高齢群 20.9 ± 4.8 、壮年群 25.4 ± 5.6 、同様の順にAT; 16.9 ± 3.6 , $18.6 \pm 4.5\text{ml/kg/min}$ 、MWS; 1.9 ± 0.4 , $2.1 \pm 0.4\text{m/s}$ 、歩幅; 77.7 ± 10.6 , $84.8 \pm 9.2\text{cm}$ と高齢群で不良であった。そして運動耐容能に関わる因果モデルは壮年群と高齢群では異なり、壮年群は筋力の増減要因が運動耐容能に直接関わるのに対し、高齢群ではバランス能力と筋力が歩行能力を介して運動耐容能へ間接的に影響すると述べている。

このようにCPX指標と運動機能の関係については運動耐容能と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeを用いた研究が多く、 $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$ や運動処方強度についての報告はない。また、対象は回復期以降の心疾患患者が多く、急性期患者を対象としたものはない。急性期病院で心リハを終了後、継続して回復期病院や診療所等で実施していくことを想定すると退院前の状態、即ち急性期心疾患患者を対象とした研究報告が望まれる。

6. CPX指標と生命予後に関する研究

CPX指標と生命予後のコホート研究は健常者に加え、慢性心不全患者を対象に諸家が報告している。即ち、CPX指標の $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ や $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeをカットオフ値として予後を検討したものである。Myersら⁴⁸⁾は健常男性2534名（ 55 ± 12 歳）と心疾患3679名（ 61 ± 10 歳）に対しトレッドミルによるCPXを実施し6.2±3.7年追跡調査している。そして $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が5Mets以下の群は8Mets以上の群に比べると健常者と心疾患患者ともに生命予後が不良で、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が低いことは生命予後の強力な危険因子であると結論づけている。つまり、心疾患患者に限らず健常者でも $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が低いと生命予後が不良であることが示された。他方、慢性心不全患者を対象とした研究は、以下のように多数報告されている。Sziachcicら⁶⁹⁾は男性慢性心不全患者27名（平均56歳；48～72歳）にCPX（自転車エルゴメーターによる）を実施し、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ が低いグループⅠ（ $\leq 10\text{ml/kg/min}$ 、13名）と $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ の高いグループⅡ（ $10 \sim 18\text{ml/kg/min}$ 、14名）の2群で2年間の生存率を比較している。グループⅠでは最初の1年で10名が死亡し、生存者は3名であった。グループⅡは1名追跡不能、最初の1年で1名死亡、その後1名が死亡し、最終的に生存者は11名であった。つまり $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ が高い群は低い群に比べて有意に生存率が高かった。次にLikoffら³¹⁾は特発性拡張型心筋症と虚血性心筋症による慢性心不全患者201名（ 62 ± 10 歳）を対象に28ヶ月間追跡調査している。その結果、調査中85名が死亡（心臓突然死26名、心不全合併症57名、交通事故2名）した。死亡率に差を認めた項目は虚血性心筋症であること、LVEF、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ （トレッドミルによるCPX）であった。これらから虚血性心筋症の群、LVEFが低い群（20%以下）、 $\dot{V}\text{O}_{2\text{max}}$ が低い群（ 13ml/kg/min 以下）は有意に生存率が低かったと報告している。続いてOpasichら⁵⁴⁾は男性心不全患者（548名）を対象にCPX（トレッドミル）を実施し、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ によって分類した3群間にて生存率をNYHA心機能分類別に比較している。分類基準は $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 10$ 、 $10 \sim$

18、 $18\text{ml/kg/min} < \text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ で、生存率評価を6ヶ月後、1年後、2年後に実施している。3群間において年齢には差はなかった。そして $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ による生存率はNYHA心機能分類Ⅲ・Ⅳでは差がなかったが、NYHA心機能分類Ⅰ・Ⅱでは $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ の低い群が高い群に比べて有意に低かったと報告している。即ち、心機能が重症例では $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ による予後判定は困難であるが、中軽症例では $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ によって判断可能といえる。さらにFrancisら¹⁴⁾は心不全患者（男性267名、女性26名、 59 ± 11 歳）にCPX（トレッドミル）を実施し、対象者を $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ ならびに $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeによって分類し、平均47ヶ月間追跡調査している。分類基準は $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ による4区分（Ⅰ； <13 、Ⅱ； $13 \sim 16.5$ 、Ⅲ； $16.6 \sim 21.6$ 、Ⅳ； $21.6 \text{ ml/kg/min} <$ ）、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeによる4区分（Ⅰ； <27.7 、Ⅱ； $27.7 \sim 34.5$ 、Ⅲ； $34.6 \sim 42.1$ 、Ⅳ； $42.1 <$ ）である。死亡率は $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ Ⅰ；48%、Ⅱ；32%、Ⅲ；12%、Ⅳ；4%、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeⅠ；3%、Ⅱ；17%、Ⅲ；26%、Ⅳ；49%と $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ が低い群と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeが高い群はともに死亡率が高い結果であった。即ち、心不全患者の $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeは生命予後の強力な予測指標であると結論づけている。Chuaら¹¹⁾は慢性心不全患者173名（男性155名、女性18名、 59.3 ± 11.5 歳）と健常対照群68名（男性56名、女性12名、 56.4 ± 9.5 歳）を対象にした報告をしている。この研究ではCPX（トレッドミル）にて $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeを測定し、18ヶ月間追跡調査している。そして心不全患者については $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeの低い群（34未満）と高い群（34以上）にて生存率を比較している。結果として、心不全患者にて $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope間に負の相関（ $r = -0.53$ ）を認めた。また心不全群の $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ は 18.5 ± 7.3 と対照群 $32.5 \pm 8.3\text{ml/kg/min}$ に比べ有意に低かった。さらに $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeは心不全群 34.8 ± 10.6 、対照群 26.3 ± 4.1 と心不全群の換気効率は不良であった。そして心不全患者における $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeによる生存率は $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope が低い群が95%、高い群は65%で $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeが高いと生存率が低く、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeは慢性心不全患者の独立した予後指標であると述べている。またKoikeら³⁴⁾は慢性心不全患者385名（男性275名、女性110名、 58.3 ± 10.1 歳）を対象に自転車エルゴメーターによるCPXを実施している。この研究では生存率を2500日間調査し、この期間に33名が心血管疾患で死亡していた。CPX指標を検討した結果、生存率は $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR} < 7\text{ml/min/W}$ の群は84.2%、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope ≥ 40 の群は75.7%と不良であった。このことからこれらの条件は独立した生命予後予測指標であるとしている。しかもこれらにLVEF $< 50\%$ の条件を加えると生存率はさらに不良となっていた。即ち、 $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR} < 7\text{ml/min/W}$ とLVEF $< 50\%$ の群は62.5%、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope ≥ 40 とLVEF $< 50\%$ の群は56.0%であった。一方、以前から生命予後不良と示されていた $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 < 14\text{ml/kg/min}$ は生存率が低いものの独立した予後予測因子ではなかったと報告している。Gittら¹⁶⁾は慢性心不全患者223名（男性192名、女性31名、 58.3 ± 10.1 歳）にCPX（自転車エルゴメーター）を実施し $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、AT、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slopeのそれぞれにカットオフ値を設けて平均644日間追跡調査している。カットオフ値は $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 14\text{ml/kg/min}$ 、AT $< 11\text{ml/kg/min}$ 、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope > 34 である。その

結果、6カ月後の死亡リスクは $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 14\text{ml/kg/min}$ が3.4倍、 $\text{AT} < 11\text{ml/kg/min}$ は5.3倍、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope} > 34$ は4.8倍であった。さらには $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 14\text{ml/kg/min}$ かつ $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope} > 34$ の場合の死亡リスクは6.1倍、 $\text{AT} < 11\text{ml/kg/min}$ かつ $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope} > 34$ の死亡リスクは9.6倍であった。このことから慢性心不全患者の予測死亡リスクは $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope} > 34$ と $\text{AT} < 11\text{ml/kg/min}$ の方が従来の $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 14\text{ml/kg/min}$ よりも優れていた。即ち、上記2つの研究結果はManchiら³⁹⁾が示した慢性心不全患者の予後指標である $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2 \leq 14\text{ml/kg/min}$ よりも高い予後予測指標を示した訳である。藤原ら¹⁵⁾は慢性心不全患者104名（男性76名、女性28名、平均 58 ± 13 歳）を対象にトレッドミルによるCPXを実施し、90日から3409日の生存率を追跡調査している。この間の生存例は77名、死亡例は27名であり、生存例と死亡例を比較すると $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ (20.7 ± 7.5 vs 17.1 ± 5.9)、 AT (15.4 ± 4.9 vs $13.2 \pm 4.3\text{ml/kg/min}$)、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ (peak時; 33.8 ± 6.9 vs 40.8 ± 11.9 , AT時; 32.8 ± 6.5 vs 38.7 ± 10.0)で有意差を認めていた。即ち、 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 、 AT 、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ は慢性心不全患者における生命予後の独立した予測因子であった。さらにこれらに加えてLVEFも生命予後の独立した予測因子であったという。そして死亡例27例を1年以内（8例）、1年～3年（8例）、3年以上（11例）の3群に分類した場合、1年以内死亡例は $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 13.6 ± 3.0 、 AT $10.5 \pm 2.2\text{ml/kg/min}$ で、3年以上の群よりも有意に低かった（3年以上; $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 21.1 ± 4.3 、 AT 16.4 ± 2.8 、1年～3年; $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ 15.1 ± 6.9 、 AT 11.5 ± 5.0)。このことから $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ と AT は特に1年以内の短期予後を考慮する上で有用であるとしている。Arenaら⁵⁾は心不全患者448名（男性77.8%、女性21.2%、 56.9 ± 13.0 歳）を対象としてCPX（トレッドミルとエルゴメーター）による $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ を指標とした多施設研究を報告している。2年間の追跡調査にて81名に心血管イベントが発生していた（死亡64名、心移植10名、左室デバイス7名）。そして $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ のROC分析から対象者を4群に分類した。分類カテゴリーはVC I ($\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope} \leq 29.0$; 144名)、VC II ($\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ 30～35.9; 149名)、VC III (36.0～44.9; 112名)、VC IV (≥ 45.0 ; 43名)である。その結果、生存率はVC I; 97.2%、VC II; 85.2%、VC III; 72.3%、VC IV; 44.2%と $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ が高いほど死亡率が高いと報告している。以上より慢性心不全患者において運動耐容能（ AT や $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ ）が低いこと、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ が高く換気効率が不良なこと、LVEFが低く低心機能であることは生命予後指標となることが示された。しかし、これらの研究のうち男女を一緒に検討しているものが見受けられる。 $\text{peak}\dot{V}\text{O}_2$ や $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2 \text{ slope}$ には性差があるため男女別に検討した場合には異なった結果となる可能性も推察される。

IV. CPXの課題と問題点

CPXは心疾患患者の心肺機能、運動機能を非侵襲的に評価でき、個々に見合った運動処方が可能な優れた運動負荷試験といえる。しかし緒言で述べたようにCPXを実施している

施設は少ない。後藤ら¹⁹⁾は2006年に本邦におけるCPX実施状況を調査している。その報告によるとCPX実施数は循環器専門医研修施設526施設中、72施設（13.7%）、研修関連施設194施設では5施設（2.6%）、合計720施設中わずか77施設（10.7%）である。そのうえ本邦の心リハ運営は急性期の在院日数が短縮されて入院期間中に回復期心リハが困難で、なおかつ外来での実施体制が不十分である。このため回復期以降の心リハ実施施設数が圧倒的に少ないのが実情である^{18) 19)}。したがって回復期以降の心リハを充実させるには急性期病院での外来実施率を向上させるか、地域連携を生かして回復期病院や診療所、在宅などでの実施数を向上させることが期待されている^{44) 49)}。先にも述べたように心疾患患者の運動処方CPXの結果に基づいて実施されることが推奨されている。ところが回復期病院や診療所でCPXを実施するには人員配置や設備面から多くの課題を要する。なぜならCPXには運動負荷装置、呼気ガス分析装置、心電計や自動血圧計といった高額な医療機器類が必要なこと、安全性確保のために救命器具の配備や医師の参加も必要なためである。なおかつ検査手順や結果の解析には専門的知識を要するため実施は容易ではない。

CPXを実施せずに運動処方を行う場合、心拍処方やRPE、二重積を用いる方法が挙げられ²⁰⁾、臨床的には簡便性から心拍処方やRPEを用いることが多い。心拍処方には目標至適心拍数やKarvonen法がある。目標至適心拍数については $\dot{V}O_2\max$ の55~70%にHRmaxの70~85%が該当するとされており、回復期心筋梗塞の運動強度は年齢別予測最大心拍数（220-年齢）の60~70%に設定する²⁰⁾。またKarvonen法は目標心拍数を「（予測最大心拍数-安静時心拍数）×K+安静時心拍数」で計算する。K値は定数で0.4~0.6とすることが多い²⁰⁾が、急性期心疾患の場合は0.2とすることもある²⁾。RPEは運動負荷強度をボルグスケールで聴取し、胸部および下肢疲労感が11（楽である）~13（ややきつい）の範囲で決定する^{2) 20)}。その他、トークテストにて息切れの出現しない運動強度で実施することも可能である^{55) 56)}。畦地ら⁸⁾はトークテストについて心疾患患者10名（AMI 3名、陈旧性心筋梗塞1名、冠動脈バイパス術後3名、大動脈弁置換術後3名、男性7名、女性3名、平均65歳：47歳~82歳）を対象に検討している。方法はCPXから得られた運動処方強度の-30%（70%AT）と+30%（130%AT）で自転車エルゴメーターによる3分間定常負荷運動を実施し、運動開始1分後に約350文字の文章を患者に音読させる。そして運動終了時にボルグスケールとトークテストスケールを評価したものである。その結果、70%AT負荷時のボルグスケールとトークテストスケールは $r=0.748$ 、130%AT負荷時の場合は $r=0.879$ と良好な相関を示した。また患者に息切れ感が出現したボルグスケールは70%ATでは 11.8 ± 0.6 、130%ATでは 13.1 ± 0.9 であった。一方、トークテストスケールは70%ATで 11.6 ± 0.5 、130%ATでは 12.3 ± 0.8 であった。このことからトークテストスケールによる安全な運動強度は12以下であるとしている。本研究は興味深い結果であるが、対象者が少ないため今後、症例数を増やして検討すべきである。ところでこれらの方法はいくつか問題点がある。それはKarvonen法を含む心拍処方は、心房

細動などの不整脈や血圧・心拍数を制御する薬剤によって誤差を生ずる可能性があること、RPEなどの自覚症状は個人差があり客観性に劣る点である。健康な女子大学生を対象とした研究であるが、内田ら⁷⁵⁾は運動習慣の違いがRPEに及ぼす影響について検討している。運動習慣のない9名と運動習慣のある9名に自転車エルゴメーターによるランプ負荷を行いボルグスケール13ならびに15の時点までの運動時間、心拍数を比較している。その結果、運動習慣のない者は運動習慣のある者に比べてボルグスケール13と15までの運動時間が有意に短く、ボルグスケール13と15時点での心拍数が有意に低かった。即ち、運動習慣がない者は、すぐに疲労感を感じ、目標心拍数に達しない可能性を示唆している。さらに高橋ら⁷⁰⁾は心疾患患者104名（男性73名、女性31名）を対象に自転車エルゴメーターによるCPXを実施し、ボルグスケールによる運動処方と心拍処方の妥当性について検討している。この研究においてAT時にボルグスケール11～13を示した割合は男性75.3%、女性64.5%と女性の割合が低かった。つまり男性の約25%、女性の約35%はATと誤差を生じていた訳である。一方、ボルグスケール7～10（極めて楽である～かなり楽である）を示した割合は男性9.6%、女性3.2%と男性の割合が高かった。即ち、ボルグスケールでは男性心疾患患者の約1割は過負荷になる可能性を示している。逆にボルグスケール14～17（極めてきつい～かなりきつい）を示した割合は男性15.1%、女性32.3%と女性の割合が高かった。即ち、ボルグスケールによる判定ではこれらの確率で運動強度がATに至らない可能性を示唆しており、その確率は女性で顕著であった。次いで心拍処方の妥当性に関してはKarvonenの式でK値を0.2としてもAT時心拍数を超えた割合が27%あり、Karvonen法だけでは安全な運動処方とはいえないと述べている。本研究は心疾患患者におけるATレベルの運動強度に対してRPEと心拍処方の誤差を明確に示した貴重な論文といえる。しかしAT時のRPEや心拍処方の妥当性を性差のみで検討しており、対象者の年齢や心疾患名の詳細が不明である。このためこれらの影響も考慮すべきと考える。

以上のことから、心拍処方やRPEだけでは運動処方に誤差を生じるためこれらに加えて簡便で安定した評価指標が望まれる。さらに心拍処方やRPEは運動しながら負荷強度を調整するものであり、あらかじめ運動処方強度を予測するものではない。安達⁴⁾はCPXの運動時間は8分から12分で終了するのが望ましいと述べている。運動耐容能に対してランプ負荷プロトコルが低いと運動時間が長くなり非効率である。逆に患者の運動耐容能が低くランプ負荷プロトコルが高い場合はウォーミングアップでATに達してしまい正確な測定が困難となる。現状ではCPXのランプ負荷プロトコル設定は被検者の年齢や活動状況を考慮し検者の主観で決定されている場合が多く的確に判断されている訳ではない。即ち、CPXの実施前にATや運動処方強度をある程度予測しておくことは有用と考える。

V. MWSに関する先行研究

さて、CPXによる運動強度を推定する安定した評価指標としてMWSの利用の可能性が考えられる。MWSは5m^{29) 47) 62) 64)}、6m^{10) 12)}あるいは10m^{21) 28) 42) 43) 53) 66) 78) 79)}の測定距離が用いられている。測定方法は測定区間前後に3mずつの予備路を設けて、遊脚相の足部が測定起点を超えてはじめて接地した地点から測定終点を超えてはじめて足部が接地するまでの時間をストップウォッチにて測定する。その際、被験者に対して「走らないようにできるだけ速く歩いて下さい」と指示して複数回測定し、速い値を代表値とするのが一般的である^{21) 42) 64) 78)}。

1. MWSの再現性と妥当性に関する研究

衣笠ら²⁸⁾は18歳から83歳までの健常男性95名を対象に10mのMWSを2回測定し、MWSと歩行因子（歩幅、歩行率、歩行比）の再現性を検討している。その結果、MWSの1回目と2回目の相関は $r=0.88$ で、その他、歩行因子の相関も歩幅 $r=0.89$ 、歩行率 $r=0.75$ 、歩行比 $r=0.97$ と再現性良好であった。また、村田ら⁴⁶⁾は健常者42名（男性18名、女性24名、 22.1 ± 2.5 歳）を対象にマット型歩行解析装置を用いて最適歩行時と最速歩行時の歩幅、歩隔、足角、ステップ時間、歩行速度、歩行率を測定している。さらに得られた測定値（歩幅、歩隔、足角、ステップ時間）を利き足、非利き足に分けて再現性を分析している。最速歩行における歩幅、ステップ時間、歩行速度、歩行率の再現性は級内相関係数（Intraclass Correlation Coefficient：以下、ICC）0.9以上の高い相関を示した。また利き足、非利き足に分けた最速歩行時のICCは利き足、非利き足の順に、歩幅; 0.97, 0.97、歩隔; 0.75, 0.64、足角; 0.72, 0.59であった。これらの研究からMWSの再現性は良好としている。さらに大熊ら⁵¹⁾はシート式足圧接地足跡計測装置を使用して最適歩行と最速歩行における歩行速度、歩行率、重複歩距離、歩幅、総軌跡長の再現性を検討している。対象は要介護高齢者33名（男性10名： 70.4 ± 7.0 歳、女性23名： 82.5 ± 9.5 歳）である。これに加え、妥当性評価として上記歩行因子とFRT、10秒椅子立ち上がりテストとの関連性を検討している。まず再現性について、最速歩行速度のICCは0.968と高い再現性を示した。他の歩行因子におけるICCは歩隔が0.709と低かったが、それ以外は0.80以上の高い値であった（歩行率 $r=0.891$ 、重複歩距離 $r=0.883$ 、総軌跡長 $r=0.944$ ）。次に妥当性について、最速歩行時歩行因子とFRTの関係は歩行速度 $r=0.475$ 、重複歩距離 $r=0.472$ と2項目で有意な関連性を示したが他の歩行因子は関連していなかった。また、最速歩行時の歩行因子と10秒椅子立ち上がりテストは全て有意な関連性を認めていた（歩行速度 $r=0.590$ 、歩行率 $r=0.518$ 、重複歩距離 $r=0.502$ 、歩幅 $r=-0.489$ 、総軌跡長 $r=-0.476$ ）。以上の研究から健常者や虚弱高齢者におけるMWSは再現性良好で妥当性も認められた。しかし、心疾患患者のMWS測定については再現性と妥当性評価は行われておらず、先行研究同様に再現性良好で妥当性があるか安全性も含めて検証する必要がある。

2. MWSと運動機能、日常生活自立度、生命予後との関連性

健常者を対象としたMWSの影響因子について、斉藤ら⁵⁹⁾がMWS (10m) と敏捷性の関係を報告している。健常女性22名 (20.7±2.0歳) のMWS (平均4.0±0.4m/s) に対して座位上肢最大タッピング (128.5±15.2ms) ならびに立位下肢最大ステップング (118.4±18.4ms)、握力 (33.0±4.5kg)、等尺性膝伸展筋力 (10.2±1.9kg) との関係を検討した。その結果、MWSとは最大ステップング、膝伸展筋力で有意な相関を認めた ($r=-0.53$, $r=-0.50$)。他方、最大ステップングと膝伸展筋力間にも有意な相関を認めていた ($r=-0.53$)。MWSを従属変数とした重回帰分析では最大ステップングが抽出され、最大ステップングによってMWSが予測できると述べている。また、伊東ら²¹⁾は健常老年男性15名 (64歳～84歳) を対象にMWS (10m) を規定する要因について検討している。測定結果はMWS 2.33 ± 0.34 m/s、歩幅 0.892 ± 0.084 m/step、歩行率 2.63 ± 0.36 step/s、重心動揺距離 304 ± 114 mm/20sである。重心動揺距離は年齢と正相関 ($r=0.493$)、MWS、歩行率と負の相関を認めた ($r=-0.528$, $r=-0.715$)。一方、MWSは歩行率と正相関 ($r=0.771$) を示したものの、歩幅とは関連しなかった。即ち、加齢につれて立位バランス能力が低下し、これが歩行率の減少、MWSの低下をもたらしたと結論づけている。さらに宮原ら⁴²⁾は地域住民687名 (男性197名、女性490名、17歳～92歳) を対象に運動能力 (握力、長座体前屈、閉眼片足立ち、10mのMWS) を測定し、若年群、中年群、高齢群の年代別の特徴を検討している。その結果、運動能力は加齢により低下し、このうちバランス能力が最も低下していた。測定項目間ではMWSと握力間に有意な関連を認めた (男性女性の順に若年群 $r=0.48$, $r=0.39$, 中年群 $r=0.40$, $r=0.33$, 高齢群 $r=0.20$, $r=0.29$)。また、運動能力の個人差は高齢なほどMWSと握力で大きかったとしている。続いて、村田ら⁴⁷⁾は病院通院または通所リハを行っている虚弱高齢者134例 (男性60例、女性74例、平均78.4歳、要支援: 68例、要介護1: 55例、要介護2: 11例) を対象に検討している。測定項目はMWS (5m)、Time Up and Go Test (以下、TUG)、下肢筋力、下肢荷重力、10秒間椅子立ち上がりテスト (FralCS-10) で、これらの関連性を男女別に求めている。MWSは男性 0.9 ± 0.5 、女性 0.8 ± 0.3 m/s、TUGは男性 14.7 ± 9.0 、女性 14.6 ± 7.3 秒で、男女ともにMWSとTUGは有意な相関を認めた (男性 $r=-0.83$ 、女性 $r=-0.85$)。また両テストは他の下肢機能検査とも有意な相関を認めていた (男性女性の順にMWSに対し下肢筋力 $r=0.46$, 0.41 、下肢荷重力 $r=0.69$, 0.50 、FralCS-10 $r=0.78$, 0.58 。TUG対し下肢筋力 $r=-0.39$, -0.30 、下肢荷重力 $r=-0.50$, -0.48 、FralCS-10 $r=-0.65$, -0.51)。そしてTUGに比べMWSの方が下肢機能検査との関連性が強く、虚弱高齢者の下肢機能を反映していた。

心疾患患者を対象としたMWSの研究は山本ら⁷⁸⁾が実施している。入院期心疾患患者34例を壮年群 (65歳未満18例) と高齢群 (65歳以上16例) に分類し臨床的背景因子、MWS (10m)、下肢筋力、静的バランス能力、動的バランス能力 (FRT、姿勢安定度評価指標: IPS) を比較した。尚、運動機能は300m歩行開始時と退院時の2時点で評価している。その

結果、臨床的背景因子は年齢以外に2群間で差を認めなかった。退院時比較においてMWSは壮年群 116.0 ± 25.0 、高齢群 95.3 ± 17.5 (m/min) と高齢群が有意に遅かった。また、高齢群は壮年群に比べて動的バランス能力が有意に低かった (高齢群; FRT 30.7 ± 7.8 , IPS 1.0 ± 0.4 , 壮年群; FRT 37.0 ± 6.2 cm, IPS 1.5 ± 0.3)。MWSの回復については壮年群のMWSは入院中に改善したが高齢群は変化がなく回復が遅延していた。そして退院時MWSの関連項目は、壮年群は下肢筋力 ($r=0.557$) のみで、高齢群では下肢筋力 ($r=0.553$) と動的バランス能力 (FRT : $r=0.553$, IPS : $r=0.724$)、在院日数 ($r=0.499$, 高齢群 27.6 ± 12.6 , 壮年群 22.4 ± 8.0 日) であった。つまり入院期高齢心疾患患者のMWSは壮年者に比べて改善が遅延し、その原因として下肢筋力と動的バランス能力低下が関与していたと述べている。本研究では退院時の状況が論点であるが、300m歩行開始時のデータが不明であり、両群の300m歩行開始時までの期間差の影響も重要と考える。また、男女差を認めていないが男女を一緒に検討している。MWSは性差があり、この影響はなかったか検討の余地があると考ええる。健常者と心疾患の比較もYamamotoら⁷⁹⁾が報告している。これはAMI患者 (壮年者210名; 男性178名、女性32名、高齢者188名; 男性134名、女性54名) と健常者 (壮年者87名; 男性49名、女性38名、高齢者111名; 男性82名、女性29名) におけるMWS (10m) を男女別年代別に比較したものである。さらにAMI患者のMWSと臨床的背景、運動機能との関連性も検討している。その結果、AMI患者のMWSは男女ともに同年代の健常者に比べて有意に遅く、その比率は中年AMIでは男性患者77.9%、女性患者75.7%、高齢者AMIでは男性患者78.7%、女性患者74.2%であった。重回帰分析にてMWSとの関連項目は中年AMIでは下肢筋力のみで、高齢AMIは下肢筋力と立位バランスであったとしている。

次に高齢者のMWSと日常生活自立度、介護度との関連性についてまとめた。鈴木ら⁶⁶⁾は65歳以上の一般高齢者71名 (男性40名、女性31名) を対象にMWS (10m) と日常生活活動 (Barthel Index、老研式活動能力指標)、運動機能 (下肢筋力、立位バランス) との関連を検討している。これによるとMWSは男性 (113.2 ± 21.9 m/min) に比べて女性 (104.4 ± 26.1) の方が遅く、加齢により減少するという結果であった。そして重回帰分析による高齢者MWSの決定要因は年齢、体重、膝関節筋力、前後方向への姿勢制御であった。MWSは老研式活動能力指標と関連し、活動能力全項目可能な群はMWSが 110 m/min以上であることを示している。また、新開ら⁶²⁾は地域高齢者736名 (65~89歳) を対象に体力測定 (握力、指タッピング、開眼片足立ち時間、5m歩行速度; 通常・最大) を実施し、6年後の日常生活動作 (Activity of Daily Living : 以下、ADL) 障害を調査している。するとADL障害発生率は高齢なほど高く、その発生率は男性前期高齢者25.2%、後期高齢者60.5%、女性前期高齢者27.2%、後期高齢者49.6%であった。そしてCox比例ハザードモデルを用いた各体力テストにおける25%タイルでADL障害発生を調べた結果、ハザード比に差を認めたのは前期高齢者ではMWSであり、後期高齢者では通常歩行速度であった。即ち、5m歩行速度は高齢者

のADL障害発生を予測する有用な検査であるとしている。さらに衣笠ら²⁹⁾は70歳以上の地域高齢者466名を対象に体力測定（膝伸展筋力、握力、FRT、5m歩行速度：通常・最大）を実施し、老研式活動能力指標の満点群と未満点群で比較検討している。さらには未満点者を運動介入群（15例）と非介入群（15例）に分類して比較している。この結果、老研式活動能力指標の未満点者は満点者と比べると握力を除く全ての体力テストで劣っており、日常生活機能低下は体力低下と関連することを示した。また未満点者における運動介入群と非介入群の比較では運動介入後3カ月に差はなく、6カ月後に介入群で400m歩行速度が改善したため介入効果には3ヶ月以上の運動療法が必要と述べている。

MWSと生命予後との関係も多数報告されている。杉浦ら⁶⁴⁾は高齢者（65歳～86）に運動能力検査と歩行能力テスト（5m歩行速度：通常・最大）を実施し4年後に再調査できた510名（男性192、女性318名）を対象にIADL（Instrumental ADL; 手段的ADL）と介護度を検討している。これによると初年度のMWSが25%タイル以下では死亡率が増加し、50%タイル以下でIADLが低下していたという。そのうえMWSが1m/s遅くなるとIADLの低下リスクが4.44倍、死亡リスクが9.09倍になると報告している。次に岡田ら⁵³⁾は65歳以上の在宅自立高齢者630名（男性234名：平均73.9歳、女性396名：平均75.0歳）を対象にMWS（10m）のカットオフ値による5年後の要介護化、介護重症化、死亡について調査している。この結果、要介護、死亡に関するMWSのカットオフ値は、男性では要介護1.63、介護重症化1.55、死亡1.63m/sであり、女性では要介護1.13、介護重症化1.13、死亡1.12m/sであることを示した。また、Studenskiら⁶³⁾はMWSと生存率の関連性を検討する目的で9つのコホート研究を分析（1986～2000年）している。これはMWSによって65歳以上の地域高齢者34485名（73.5±5.9歳、女性59.6%、白人79.8%）を6～21年間追跡し、生存率を分析したものである。この期間中に17528名が死亡し、5年生存率は84.8%、10年生存率は59.7%であった。またMWSの平均は0.92±0.27m/sで、全ての研究でMWSは生存率に関連していた。そして歩行速度が0.1 m/s速くなると生存率が有意に増加し、75歳で予測される10年生存率（確率幅）は男性19～87%、女性35～91%であったという。さらに一般高齢者3047名（平均74.2歳、女性51.5%）を対象にMWS（6m）を測定し、4.9年間追跡調査した結果をCesariら¹⁰⁾が報告している。まず、対象者を無作為にA群（2031名）とB群（1016名）に分類して、それぞれMWSが1m/s以上とそれ未満の2群に分類している。そしてA群では下肢イベント発生率を、B群では生命予後を検討した。その結果、MWSが1m/s未満の者は1m/s以上の者に比べ、下肢障害発生リスクが2.20倍、著しい下肢障害発生リスクが2.29倍、死亡リスクは1.64倍、入院リスクは1.48倍であった。このことからMWSは高齢者の予後の有用な評価項目であるとしている。最後にDumurgierら¹²⁾は地域高齢者3208名（男性1138名、女性2070名、73.2±6.6歳）を対象に、MWS（6m）を測定し、男女別に低速群、中速群、高速群の3群に分類して予後との関係を報告している。分類基準は男性では低速群 ≤1.5m/s、中速群1.51～1.84、高速群1.85≤、

女性では低速群 $\leq 1.35\text{m/s}$ 、中速群 $1.36\sim 1.50$ 、高速群 $1.51\leq$ である。そして生存率と死因を1.8年後、3.6年後、5.1年後に調査している。調査期間中209名が死亡し、その内訳は癌99名、心血管59名、その他51名であった。そして男女ともに歩行速度が遅い人は速い人に比べて死亡リスクが高く（ハザード比1.44, 95%信頼区間1.03-1.99）、20～30ヶ月以降に増加していた。このうち癌の死亡率とは関連していなかったが（ハザード比1.03）、心血管死亡リスクは2.92倍（95%信頼区間1.46-5.84）であった。結論として高齢者の歩行速度低下は心血管死亡率と関連すると述べている。

以上より、MWSは年齢を反映し加齢変化を追跡でき、男性に比べて女性の方が遅いことが示されていた。また、心疾患患者のMWSは健常者に比べて遅いという結果を得た。MWSとの関連因子としては下肢筋力やステッピング、歩行効率が影響し、高齢者ではこれらにバランス能力も関与していた。さらには高齢者のMWSは立ち上がりテストやTUGなどの運動機能テストとも関連していた。そのうえ高齢者のMWSはADLや介護度、心疾患死亡率や生命予後の予測因子と成りうることが示されており、今後は急性期の心疾患患者についても有用な指標になることが期待される。

VI. 今後の課題

CPX指標とMWSとの関連性は回復期の心疾患患者を対象としATや $\dot{V}\text{O}_2$ との関連性が報告されているが、 $\dot{V}\text{E}-\dot{V}\text{CO}_2$ slope、 $\Delta\dot{V}\text{O}_2/\Delta\text{WR}$ 、運動処方強度との関連性は明確でない。加えて急性期心疾患患者は検討されていない。したがって今後は急性期心疾患患者に対してこれらを検討すべきと考える。心疾患患者のCPXによる運動処方強度とMWSに関連性が認められればMWSから得られた運動強度予測値を心拍処方やRPEに組み合わせて、より精度の高い運動処方が可能となる。また、CPX実施に先立ちATや運動処方強度を予測することはランブ負荷強度の決定に役立つため意義深い情報源に値するといえる。今後、MWSを急性期心疾患患者に利用するにあたり、測定の実行性や再現性について検討すべきである。

VII. まとめ

心疾患患者のCPX指標は対象者の心肺機能を評価できる有用な指標であり、運動機能や生命予後との関連等、数多くの研究がなされている。しかしCPXが実施可能な施設は限られている。CPXを実施できない場合に運動処方を行う方法には心拍処方やRPEが挙げられるが、これらには短所もあり、さらに安定した評価指標が望まれる。そこでCPXによる運動処方強度を推定する指標としてMWSの利用が考えられる。MWSは簡便に測定でき、高齢者の運動機能や日常生活活動、生命予後との関連性について数多くの研究がなされ、心疾患患者については運動耐容能との関係が報告されている。MWSの利用によって運動処方強度の予測が可能であればCPXが実施できない施設にとっては心拍処方やRPEと組み合わせる

ことによって、より精度の高い運動負荷設定が可能となる。また、MWSによる運動負荷強度予測は効率のよいCPXプロトコル設定にも利用できる可能性があり、今後の研究報告が期待される。

謝辞

稿を終えるにあたり、ご指導頂きました東洋大学教授神野宏司先生、多くの文献を調達頂いた相模原協同病院図書室秘書池嶋千夏氏、貴重な資料をご提供頂いた東京工科大学医療保健学部教授高橋哲也先生、北里大学医療衛生学部講師木村雅彦先生に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 安達 仁・櫻井繁樹・外山卓二・星崎 洋・大島 茂・谷口興一 (2002)「心疾患患者の呼気中一酸化窒素濃度および換気血流不均等分布は2週間の運動療法にて改善する」『ICUとCCU』, 26 (2), p113-118.
- 2) 安達 仁 (2004)「運動処方の基本」, 谷口興一・伊東春樹『心肺運動負荷テストと運動療法』, 南江堂, p254-261.
- 3) 安達 仁 (2005)「心肺運動負荷試験－方法と解釈」, 山田純生『循環器疾患のリハビリテーション』, 三輪書店, p206-218.
- 4) 安達 仁 (2009)「心肺運動負荷試験C パラメータの統合的解釈法」, 安達 仁『CPX・運動療法ハンドブック』, 中外医学社, p79-89.
- 5) Arena R, Myers J, Abella J, Peberdy M.A, Bensimhon D, Chase P, Guazzi M. (2007), Development of a ventilatory classification system in patients with heart failure, 『Circulation』, 115, p2410-2417.
- 6) 麻野井英次 (2005)「心不全1) 慢性心不全の病態生理」, 山田純生『循環器疾患のリハビリテーション』, 三輪書店, p142-151.
- 7) American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. (2003), ATS/ACCP Statement on Cardiopulmonary Exercise Testing, 『Am J. Respir. Crit. Care Med』, 167 (2), p211-277.
- 8) 畦地 萌・安達 仁・高橋哲也・熊丸めぐみ・山田宏美・横澤尊代・廣瀬真純・河野裕治・櫻井繁樹・大島 茂・谷口興一 (2005)「心疾患患者のATを基準にした運動強度とTalk Testにおける息切れ感および自覚症状との関連性について」『心臓リハビリテーション』, 10 (2), p240-242.
- 9) Binder E.F, Birge S.I, Spina B.R, Ehashi A.A, Brown M, Sinacore D.R, Kohrt W.M. (1999), Peak aerobic power is an important component of physical performance in older women, 『J. Gerontol』, 54 (7), pM353-356.
- 10) Cesari M, Kritchevsky S.B, Penninx B.W.H.J, Nicklas B.J, Simonsck E.M, Newman A.B,

- Tylavsky F.A, Brach J.S, Satterfield S, Harris T.B, Pahor M. (2005), Prognostic value of usual gait speed in well-functioning older people –Result from the health, aging and body composition study, 『American Geriatrics Society』, 53, p1675–1680.
- 11) Chua T.P, Ponikowski P, Harrington D, Anker S.D, Webb-Peploe K, Clark A.L, Poole-Wilson P.A, Coats A.J.S. (1997), Clinical Correlation and Prognostic significance of the ventilatory response exercise in chronic heart failure, 『JACC』, 29 (7), p1585–1590.
 - 12) Dumurgier J, Elbaz A, Ducimetiere P, Tavernier B, Alperovich A, Tzourio C. (2009), Slow walking speed and cardiovascular death in well functioning older adults prospective cohort study, 『BMJ』, 339, b4460, p1-7.
 - 13) Forman D.E, Fleg J.L, Kizman D.W, Brawner C.A, Swank A.M, Mckelvie R.S, Clare R.M, Ellis S.J, Dunlap M.E, Bittner V. (2012), 6-Min walk test provides utility comparable to cardiopulmonary exercise testing in ambulatory outpatients with systolic heart failure, 『JACC』, 60 (25), p2653–2661.
 - 14) Francis D.P, Shamin W, Davies L.C, Piepoll M.F, Ponikowski P, Anker S.D, Coats A. (2000), Cardiopulmonary exercise testing for prognosis in chronic heart failure: continuous and independent prognostic value from VE/VCO₂ slope and peak VO₂, 『J. Eur Heart J』, 21 (2), p154–161.
 - 15) 藤原正義・志水栄伸・中 聡夫・榊谷充男・大柳光正・岩崎忠昭 (2002), 「慢性心不全患者の予後推定における心肺運動負荷試験の有用性について」『兵庫医科大学会誌』, 27 (2), p133–141.
 - 16) Gitt. A.K, Wasserman K, Kilkowski C, Kleemann T, Kilkowski A, Bangert M, Schneider S, Schwarz A, Senges J. (2002), Exercise anaerobic threshold and ventilatory efficiency identify heart failure patients for high risk of early death, 『Circulation』, 106, p3076–3084.
 - 17) Goto Y, Sumida H, Ueshima K, Adachi H, Nohara R, Itoh H. (2002), Safety and implementation of exercise testing and training after coronary stenting in patients with acute myocardial infarction, 『Circulation J』, 66, p930–936.
 - 18) 後藤葉一 (2005) 「急性期再灌流療法と運動療法」, 山田純生 『循環器疾患のリハビリテーション』, 三輪書店, p30–33.
 - 19) 後藤葉一・齋藤宗靖・岩坂壽二・代田浩之・上月正博・上嶋健治・牧田 茂・安達 仁・横井宏佳・大宮一人・三河内弘・田邊 潤・横山広行 (2006) 「我が国における急性心筋梗塞症回復期心臓リハビリテーションの全国調査」『心臓リハビリテーション』, 11 (1), p36–40.
 - 20) 今井 優・上嶋健治 (2010) 「CPXを用いない運動処方」, 長山雅俊 『心臓リハビリテーション実践マニュアル』, 中山書店, p166–174.
 - 21) 伊東 元・長崎 浩・丸山仁司・橋詰 謙・中村隆一 (1990) 「健常老年者における最大歩行

- 速度の決定因－重心動揺と歩行率の関連－」『理学療法学』, 17 (2), p123-125.
- 22) 伊東春樹 (2004)「各種呼気ガス分析指標」, 谷口興一・伊東春樹『心肺運動負荷テストと運動療法』, 南江堂, p103-117.
- 23) 海鋒有希子・笠原西介・井澤和大・渡辺 敏・平木幸治・森尾裕志・長田尚彦・大宮一人・三宅良彦 (2010)「急性心筋梗塞患者における退院時運動耐容能の関連要因に関する検討」『心臓リハビリテーション』, 15 (1), p115-119.
- 24) 加藤 理・伊東春樹・田嶋明彦・前田知子・西谷香織・玉腰久美子・大原礼子・山口よしの・大沼ヨシ子・長田尚彦・小池 朗・青木啓一・傳 隆泰・渡辺 熙・加藤和三 (2001)「弁膜症手術後急性期運動療法の効果」『心臓リハビリテーション』, 6 (1), p133-139.
- 25) 勝木達夫・酒井有紀・坂下真紀子・田中里美・河南昌美・新木さおり・高橋和代・花井正美・山口宏美 (2006)「経皮的冠動脈直後からの心臓リハビリテーション導入」『心臓リハビリテーション』, 11 (1), p90-93.
- 26) keteyian S.J, Brawner C.A, Ehrnan J.K, Ivanhoe R, Boehmer J.P, Abraham WT. (2010), Reproducibility of peak oxygen uptake and other cardiopulmonary exercise parameters, 『CHEST』, 138 (4), p950-955.
- 27) 木村祐子・福間長知・及川恵子・美浦和代・馬渕浩輔・草間芳樹・宗像一雄・高野照夫 (2001)「予後不良の指標である最大酸素摂取量低下と換気応答亢進が表す病態の差異」『心臓リハビリテーション』, 6 (1), p98-101.
- 28) 衣笠 隆・長崎 浩・伊東 元・橋詰 謙・古名丈人・丸山仁司 (1994)「男性 (18～83歳)を対象にした運動能力の加齢変化の研究」『体力科学』, 43, p343-353.
- 29) 衣笠 隆・芳賀脩光・江崎和希・古名丈人・杉浦美穂・勝村俊仁・大野秀樹 (2005)「低体力高齢者の体力、生活機能、健康度に及ぼす運動介入の影響 (無作為化比較試験による場合)」『日本運動生理学雑誌』, 12 (2), p63-73.
- 30) 小林康之・安達 仁・櫻井繁樹・種畑昌明・磯部直樹・外山卓二・内藤滋人・星崎 洋・大島 茂・谷口興一・伊東春樹 (1999)「慢性心不全の酸素摂取量に及ぼす運動療法の影響」『J Cardiol』, 34 (5), p267-272.
- 31) 小林康之 (2009)「心肺運動負荷試験A 準備」, 安達 仁『CPX・運動療法ハンドブック』, 中外医学社, p1-27.
- 32) 小池 朗・伊東春樹・千田 守・谷口興一 (1989)「心疾患患者における Anaerobic Threshold (AT)」『日本臨床生理学会誌』, 19 (3), p169-174.
- 33) Koike A, Hiroe M, Adachi H, Yajima T, Nogami A, Itoh H, Takamoto K, Taniguchi k, Marumo F. (1992), Anaerobic metabolism as an indicator of aerobic function during exercise in cardiac patients, 『J am coll Cardiol』, 20, p120-126.
- 34) Koike A, Itoh H, Kato M, Sawada H, Aizawa T, Fu L.T, Watanabe H. (2002), Prognostic

Power of Ventilatory Responses During Submaximal Exercise in Patients with Chronic Heat Disease, 『CHEST』, 121, p1581-1558.

- 35) 小池 朗 (2004) 「各種疾患と心肺運動負荷テスト 心疾患」, 谷口興一・伊東春樹 『心肺運動負荷テストと運動療法』, 南江堂, p193-215.
- 36) 熊丸めぐみ・高橋哲也・立石真純・河野祐治・田屋雅信・宮澤寛子・畦地 萌・横澤尊代・櫻井繁樹・安達 仁・金子達夫・大島 茂・谷口興一 (2006) 「高齢者体力評価 (Fullerton Functional Fitness Test : FFFT) の心疾患患者への導入」 『心臓リハビリテーション』, 11 (1), p55-58.
- 37) Likoff M.J, Chandler S.L, Kay H.R. (1987), Clinical determinants of mortality in chronic congestive heart failure secondary to idiopathic dilated or ischemic cardiomyopathy, 『Am J Cardiol』, 59 (69), p634-638.
- 38) 牧田 茂 (2010) 「運動負荷試験の使い分け」, 長山雅俊 『心臓リハビリテーション実践マニュアル』, 中山書店, p129-142.
- 39) Manchi D.M, Eisen H, Kussmaul W, Mull R, Edmunds Jr L.H, Wilson J.R. (1991), Value of peak exercise oxygen consumption for optimal timing of cardiac transplantation in ambulatory patients with heart failure, 『Circulation』, 83 (3), p778-786.
- 40) Matsumura N, Nishijima H, Kojima S, Hashimoto F, Minani M, Yasuda H. (1983), Determination of anaerobic threshold for assessment of functional state in patients with chronic heart failure, 『Circulation』, 68, p360-367.
- 41) Mikawa K, Senjyu H. (2011), Development of a field test for evaluating aerobic fitness in middle-aged adult: Validity of a 15-m incremental shuttle walk and run test, 『Journal of Sports and Medicine』, 10, p712-717.
- 42) 宮原洋八・竹下寿郎・西美津代 (2004) 「地域住民 (17~92歳) を対象とした運動能力」 『理学療法科学』, 19 (4), p285-290.
- 43) 森尾裕志・井澤和大・渡辺 敏・平木幸治・田中綾乃・笠原西介・武市尚也・長田尚彦・大宮一人・三宅良彦・川間健之介 (2008) 「心疾患患者における運動耐容能に関わる運動機能指標の相互関係について - 高齢群および壮年群での検討 -」 『心臓リハビリテーション』, 13 (2), p299-303.
- 44) 諸富伸夫・伊東春樹 (2012) 「現状と展望 (特集: 心大血管のリハビリテーション)」 『総合リハビリテーション』, 40 (11), p1385-1389.
- 45) 諸富伸夫・斉藤正和・白石奈々・長山雅俊・伊東春樹・川手信行・水間正澄 (2012) 「薬剤溶出性ステント留置後の早期心肺運動負荷試験の検討」 『心臓』, 44 (6), p436-441.
- 46) 村田 伸・忽那龍雄・北山智香子 (2004) 「最適歩行の相違 - GAIT Riteによる解析 -」 『理学療法科学』, 19 (3), p217-222.

- 47) 村田 伸・大田尾 浩・村田 潤・堀江 淳・八木原幸子・甲斐健一郎・大塚 真 (2010) 「虚弱高齢者におけるTime Up and Go Test, 歩行速度, 下肢機能との関連」『理学療法科学』, 25 (4), p513-516.
- 48) Myers J, Prakash M, Froelicher V, Do D, Partington S, Atwood J.E. (2002), Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing, 『N Engl J Med』, 346 (11), p793-801.
- 49) 長山雅俊・伊東春樹 (2007) 「歴史的展開 (特集: 心疾患のリハビリテーション)」『総合リハビリテーション』, 35 (1), p15-22.
- 50) 野原隆司・他 (2012) 「心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」, http://square.umin.ac.jp/jacr/link/doc/JCS_2012_nohara_d.pdf. (2014年6月29日参照).
- 51) 大熊美穂・西 起成・村田 伸 (2012) 「要介護高齢者の歩行テストは最適歩行と最速歩行のどちらで評価すべきかー再現性と妥当性の検討ー」『Japanese Journal of Health Promotion and Physical Therapy』, 2 (1), p1-4.
- 52) 大宮一人 (2004) 「健常者およびスポーツ選手における呼気ガス分析指標」, 谷口興一・伊東春樹 『心肺運動負荷テストと運動療法』, 南江堂, p4178-183.
- 53) 岡田真平・朴 相俊・久堀周治郎 (2011) 「在宅高齢者の要介護、重度化、生命予後を予測する最大歩行速度の検討」『信州公衆衛生雑誌』, 6, p26-27.
- 54) Opasigh C, Pinna G.D, Bobbio M, Sisti M, Demchelis B, Febo O, Fomi G, Riccardi R, Riccardi P.G, Capomolla S, Cobell F, Tavazzi L. (1998), Peak exercise oxygen consumption in chronic heart failure: toward efficient use in the individual patients, 『Am J Cardiol』, 31 (4), p766-775.
- 55) Persinger R, Foster C, Gibson M, Fater Dennis C.W, Porcari J.P. (2004), Consistency of the talk test for exercise prescription, 『Clinical Journal of the American College of Sports Medicine』, 36 (9), p1632-1636.
- 56) Rodrigez-Marroyo J.A, Villa J.G, Garcia-Lopez J, Foster C. (2013), Relationship between the talk test and ventilatory thresholds in welltrained cyclists, 『J Strength Cond Res』, 27 (7), p1942-1949.
- 57) Roffi M, Wenaweser P, Windecker S, Mehta H, Eberli F.R, Seiler C, Fleisch M, Garachemani A. (2003), Early exercise after coronary stenting is safe, 『J Am Coll Cardiol』, 42, p1569-1573.
- 58) Samuels B, Schumann J, Kiat H, Friedman J, Berman D.S. (1995), Acute stent thrombosis associated with exercise testing after successful percutaneous transluminal coronary angioplasty, 『Am Heart J』, 130 (5), p1220-1122.
- 59) 齊藤琴子・丸山仁司 (2005) 「敏捷性と最大歩行速度の関係」『理学療法科学』, 20 (2), p159-

- 60) 佐藤 滋・鎌田潤也・上嶋健治・斎藤花織・斎藤雅彦・小林 昇・荒川直志・川副浩平・平盛勝彦 (1999)「冠動脈バイパス術前後の運動耐容能の変化に関する検討」『理学療法学』, 26 (6), p249-253.
- 61) Scott K.P, Edward T.H. (1996), Introduction to Exercise Physiology, 『Exercise Physiology』, McGraw-Hill Inc, US, p2-13.
- 62) 新開省二・渡辺修一郎・熊谷 修・吉田祐子・青柳幸利・鈴木隆雄・柴田 博 (2000)「高齢者の活動的余命の予測因子としての5m歩行速度」『Research in Exercise Epidemiology』, 2, p32-38.
- 63) Studenski S, Perera S, Patel K, Rosano C, Faulkner K, Inzitari M, Breach J, Chandler J, Cawthon P, Connor E.B, Nevitt M, Visser M, Kritchevsky S, Badinelli S, Harris T, Newman A.B, Cauley J, Ferrucci L, Curalnik J. (2011), Gait Speed and Survival in Older Adults, 『JAMA』, 305 (1), p50-58.
- 64) 杉浦美穂・長崎 浩・古名丈人・奥住秀之 (1998)「地域高齢者の歩行能力－4年間の縦断変化－」『体力科学』, 47, p443-452.
- 65) Sun X.C, Hansen J.E, Garatachea N, Storer T.W, Wassarman K. (2002), Ventilatory efficiency during exercise in healthy subjects, 『Am J Respir Crit Care Med』, 166 (11), p1443-1448.
- 66) 鈴木堅二・今田 元・竹内正人・黒後裕彦・大町おかり・関 和則・岩谷 力・中村隆一 (2000)「地域で自立生活している高齢者の歩行速度と生活関連活動との関連」『総合リハビリテーション』, 28 (10), p955-959.
- 67) 鈴木政登・石山育朗・塩田正俊・町田勝彦 (2003)「健常人の性・年齢別最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_2 \text{ max}$) 基準域および $\dot{V}O_2 \text{ max}$ 判定指標－反復切断法による $\dot{V}O_2 \text{ max}$ 基準域の設定－」『体力科学』, 52, p585-598.
- 68) 曾我芳光・平松伸一・小早川裕子・横井宏佳・中原智子・木村多寿子・神崎良子・山下奈津子 (2004)「待機的冠動脈ステント留置術直後における運動療法の安全性に関する検討 (第2報)」『心臓リハビリテーション』, 9 (1), p105-107.
- 69) Sziachcic J, Massis B.M, Kramer B.L, Topic N, Tubau J. (1985), Correlates and prognostic implication of exercise capacity in chronic congestive heart failure, 『Am J Cardiol』, 55 (8), p1037-1042.
- 70) 高橋和代・勝木達夫・坂下真紀子・山口宏美・大谷啓輔・高橋友哉 (2009)「運動処方における安静時心拍数からの簡易式の妥当性」『心臓リハビリテーション』, 14 (1), p94-97.
- 71) 谷口興一 (1983)「ATの意義・定義」, 谷口興一『心肺運動負荷テスト』, 南江堂, p143-149.
- 72) 谷口興一 (2004)「各種呼気ガス分析指標」, 谷口興一・伊東春樹『心肺運動負荷テストと運動

- 療法』, 南江堂, p68-102.
- 73) 太附広明 (2014) 「退院前における急性期心疾患患者の心肺運動負荷試験指標について－疾患群ならびに年代群別の比較検討－」『東洋大学大学院紀要第50集』, p297-320.
 - 74) Thommazo-Luporini L.D, Jurgenson S.P, Castello-Simes V, Catai A.M, Arena R, Borghi-Silva A. (2012), Metabolic and clinical comparative analysis of treadmill six-minute walking test and cardiopulmonary exercise testing in obese and eutrophic women, 『Rev Bras Fisioter』, 16 (6), p469-478.
 - 75) 内田英二・神林 勲・塚本未来・木本理可・武田秀勝 (2012) 「運動習慣の有無が運動時の生体応答および主観的強度に及ぼす影響」『大正大学研究紀要第97号』, p160-155.
 - 76) Weber K.T, Kinasewitz G.T, Jenicki J.S, Fishman A.P. (1982), Oxygen utilization and ventilation during exercise in patients with chronic cardiac failure, 『Circulation』, 65 (6), p1213-1223.
 - 77) Weber K.T, Jenicki J.S. (1995), Cardiopulmonary exercise testing for evaluation of chronic cardiac failure, 『Am J Cardiol』, 55, p22A-31A.
 - 78) 山本周平・松永篤彦・澤入豊和・石井 玲・松本卓也・佐藤友則・堀田一樹・神谷健太郎・並木優子・高橋由美・増田 卓・和泉 徹 (2008) 「入院期高齢心疾患患者の最大歩行速度に関する検討」『心臓リハビリテーション』, 13 (2), p304-308.
 - 79) Yamamoto S, Matsunaga A, Kamiya K, Miida K, Ebina Y, Hotta K, Shimizu R, Matsuzawa R, Abe Y, Kimura M, Shimizu S, Watanabe H, Noda C, Yamaoka-Tojo M, Masuda T. (2012), Walking speed in patients with first acute myocardial infarction who participated in supervised cardiac rehabilitation program after coronary intervention, 『Int Heart J』, 53, p347-345.
 - 80) 山崎裕司・山田純生・渡辺 敏・前田秀博・大森 豊・三好邦達・田辺一彦・岩崎達弥・榊原雅義 (1991) 「心筋梗塞患者におけるAnaerobic Thresholdの経時的推移」『理学療法学』, 18 (5), p467-472.
 - 81) 山崎裕司・山田純生・渡辺 敏・三好邦達・田辺一彦・長田尚彦・村山正博・前田秀博 (1994) 「心筋梗塞患者の下肢筋力－下肢筋力と歩行、運動耐容能の関連－」『総合リハビリテーション』, 22 (1), p44-44.
 - 82) 山下英治・安達 仁・入江忠信・高松寛人・吉村裕子・芝崎太郎・栗原 淳・村上 淳・鶴谷英樹・河口 廉・櫻井繁樹・外山卓二・星崎 洋・大島 茂・谷口興一 (2006) 「シロリムス溶出性ステント留置例における心肺運動負荷試験および心臓リハビリテーションの安全性の検討」『心臓リハビリテーション』, 11 (2), p295-297.

Literature Review: Current Situations and Problems of Cardiopulmonary Exercise Testing in Patients with Heart Disease

TATSUKI, Hiroaki

Abstract

Cardiopulmonary exercise testing (CPX) is an exercise tolerance test with respiratory gas analysis using cycle ergometer or treadmill. CPX can estimate non-invasively energy metabolism during exercise and be utilized for exercise prescription by evaluating the exercise tolerance, such as oxygen uptake and Anaerobic Threshold (AT). CPX indices are used to determine the severity of patients with heart failure. Many research studies in mortality using CPX indices have also been reported. Thus the CPX indices are highly beneficial. According to the Japanese guidelines in rehabilitation for patients with cardiovascular disease, exercise prescription based on the CPX indices is recommended for patients with heart disease.

There are fewer cardiac rehabilitation facilities in Japan than in Europe and the United States. Further more, its facilities in maintenance phase are insufficient. Thus, more a hospitals and clinics in recovery phase are needed to establish a system of cardiovascular rehabilitation. However, there are many problems when carrying out cardiovascular rehabilitation and CPX. Although exercise prescription is often based on heart rate prescription and Rating of Perceived Exertion (RPE), with the exception of the CPX method these methods may have poor objectivity in the case of the presence of arrhythmia and the heart rate controlled by medicine. Thus, additional objective indices are needed.

Maximum Walking Speed (MWS) can evaluate easily the motor function in particularly elderly people, and may be correlated with the strength of the exercise prescription estimated by CPX. To predict the strength of the exercise prescription is important, in order to carry out CPX with the appropriate load. In addition, predicting the AT and the strength of the exercise prescription by MWS would be meaningful.

This study summarized the previous studies on MWS and CPX, as well as on thired the current situation of CPX, including the possibility of screening evaluation by MWS.

Key words

Cardiopulmonary exercise testing, Maximum walking speed, Cardiac rehabilitation