

# スポーツ参加に向けた心肺運動負荷試験の活用

足利光平\*

## ●心肺運動負荷試験 (Cardiopulmonary Exercise Test : CPX) とは

CPX は心肺機能に基づいた運動耐容能の評価に用いられる検査である。運動中に身体へ取り込む酸素摂取量を評価し、検査における最高値である最高酸素摂取量 (peak  $\text{VO}_2$ ) や ATP 産生における無機的な代謝が始まる時点での酸素摂取量である嫌気性代謝閾値 (Anaerobic Threshold : AT) を求める (図 1)。酸素摂取量は Fick の式 (酸素摂取量 = 心拍出量  $\times$  動静脈酸素含有量較差) で表されるように、間接的な心拍出量の評価に有効である。これは、動静脈酸素含有量較差は運動強度の増加に比例して直線的に増加することから<sup>1,2)</sup>、運動強度の増加による酸素摂取量の変化は心拍出量の変化と相関する関係となるためである。

## ●心疾患患者への運動処方

心疾患患者に対する運動の実施は明確な予後改善効果が示されていることから、積極的な実施が推奨されている。運動を実施する際、医学的な評価に基づいた運動指導を行う事を、「運動処方」という。運動処方では運動強度の設定が重要であり、原則として AT レベルでの運動の指導が推奨されている<sup>3)</sup>。これは、AT を超える強度で運動を行うと、心拍数や血圧の変動が大きくなり<sup>4)</sup>、心筋酸素需要量が増加し、さらに心不全患者では一回心拍出量が低下する等、心負荷の増大が示されているためである。これらの事から、心疾患患者に運

動処方を行う際には、CPX を実施して AT の評価を行う。また、peak  $\text{VO}_2$  の評価は予後予測に有効であるため、合わせて日常診療に用いられている。

## ●アスリートの評価に用いる心肺運動負荷試験について

アスリートの心肺機能に基づいたパフォーマンスの評価にも、peak  $\text{VO}_2$  や AT が用いられる。peak  $\text{VO}_2$  を規定する主な因子は、肺拡散能、心拍出量、酸素輸送能、骨格筋量である<sup>5)</sup>。これらの因子のうち、心拍出量や肺拡散能は疾病による変動を除けば短期的に変化することはなく、骨格筋量はトレーニング状況に依存する。そのため、アスリートの運動耐容能に対して短期的に影響する因子としては酸素輸送能が挙げられる。酸素は赤血球内のヘモグロビン (Hb) と結合して運搬されるため、酸素輸送能は赤血球動態と関連する。

## ●赤血球動態と運動耐容能の関連

運動耐容能の評価として用いる赤血球の評価項目としては、Hb の濃度よりも Hb 総質量 (Hb 濃度  $\times$  血液量) が有用であることが知られている<sup>6)</sup>。これは、持久系の競技に従事するアスリートはトレーニングの時期によって循環血液量が変化しやすい事が関連している。

一方、持久的な運動に従事するアスリートの赤血球動態を評価するうえで、同じ動作を繰り返す運動特性から、溶血を来しやすいことが分かっている。血管内溶血は、主にランニングや競歩などの衝撃の大きいスポーツで、足の着地に対する反応として発生することが知られている。しかし、水泳などの衝撃を伴わないスポーツでも、同じ動作を繰り返し行う事によって筋肉の収縮によって溶血が誘発され、さらには小血管で赤血球が圧迫

\* 聖マリアンナ医科大学スポーツ医学

Corresponding author : 足利光平 (k2ashikaga@marianna-u.ac.jp)

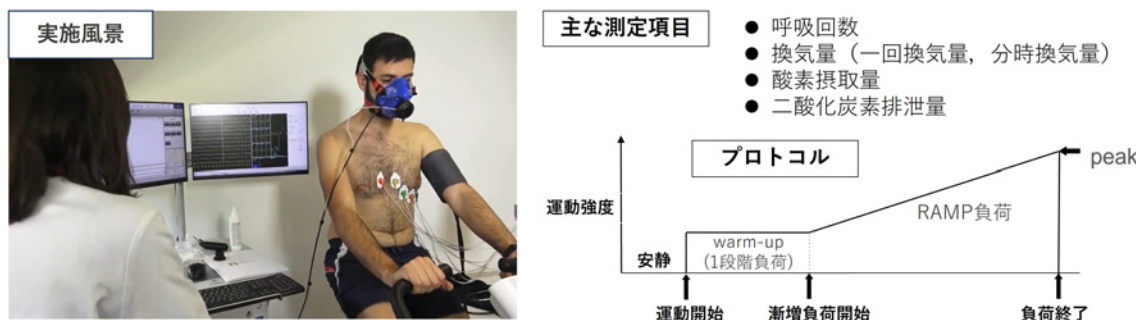


図1 心肺運動負荷試験の実施風景, 主な測定項目, プロトコル

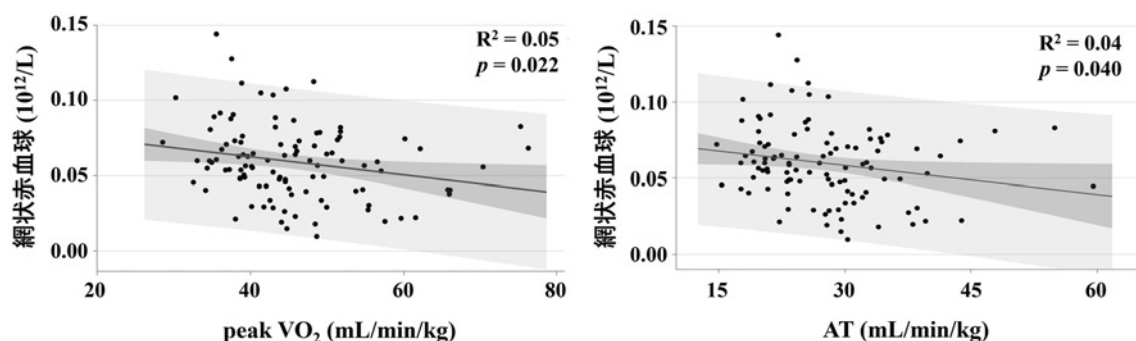


図2 網状赤血球数と peak  $VO_2$ , AT の関係

され、溶血を来すことが報告されている<sup>7)</sup>。運動誘発性の血管内溶血は赤血球機能を低下させ、酸素輸送を損なう可能性がある。また、運動前後の赤血球機能の変化に関する研究では、赤血球機能の要素である血液粘度や凝集能が自転車エルゴメータによる運動後に有意な増加を認めていた<sup>8)</sup>。血液粘度の増加や凝集能の上昇は一般的に酸素輸送には負に影響する。その他、運動に関連した赤血球変形能の評価を行った研究では、変形能は高強度の運動後に低下し、12~24時間は低下したままであることが報告されている<sup>9)</sup>。変形能の低下には酸化ストレスの影響で赤血球膜脂質と膜タンパク質が変化して変形能を低下させる可能性や、乳酸の増加と pH 低下が赤血球の収縮を引き起こし、変形能を低下させる可能性が寄与していると考えられている。そして、赤血球変形能の低下は酸素輸送能の低下を引き起こすことが報告されている。

このように、溶血が亢進するような持久系の運動はパフォーマンスに対して負に影響する可能性が報告されているが、別の側面も持ち合わせている。持久的な運動による溶血の亢進は赤血球寿命の短縮に繋がる。過去の報告によると、長距離陸上アスリートは非アスリートと比較して約 40%

赤血球寿命が短縮していた<sup>10)</sup>。赤血球寿命の短縮は赤血球ターンオーバーの亢進を意味し、これらは赤血球年齢の低下に繋がる。赤血球年齢が低下すると、赤血球で生産される酸素解離曲線移動の調節物質である 2,3DPG レベルが増加する。2,3 DPG が増加すると、酸素解離曲線は右方に移動するため、組織に酸素を与えやすい状態になる。つまり酸素運搬能力が向上する可能性がある。

以上より、持久系の運動は酸素輸送に対して正負それぞれの効果を与えていることが示唆される。そこで、持久的トレーニングが酸素輸送に与える影響を総合的かつ客観的に評価する項目として、幼弱赤血球である網状赤血球と運動耐容能の関係に着目した。すると、網状赤血球の値は peak  $VO_2$  や AT と負に相関していた (図 2)<sup>11)</sup>。この負の相関関係については、網状赤血球の寿命は約一日であることから、評価の前日に持久的なトレーニングを行うと、赤血球年齢の低下による酸素輸送能の上昇よりも、赤血球機能の低下による酸素輸送能の低下が強く影響し、運動耐容能が低下する可能性が考えられた。

## ●さいごに

CPX の実施は心疾患患者に対する運動指導に有用であり, またアスリートの心肺機能に基づいたパフォーマンスの評価を客観的に行うことができるため, 積極的な活用が推奨される。

### 文 献

- 1) Weber KT, Janicki JS. Cardiopulmonary exercise testing for evaluation of chronic cardiac failure. *Am J Cardiol.* 1985; 55: 22A-31A.
- 2) Stringer WW, Hansen JE, Wasserman K. Cardiac output estimated noninvasively from oxygen uptake during exercise. *J Appl Physiol.* 1997; 82: 908-912.
- 3) Makita S, Yasu T, Akashi YJ, et al. JCS/JACR 2021 Guideline on Rehabilitation in Patients With Cardiovascular Disease. *Circ J.* 2022; 87: 155-235.
- 4) Itoh H, Ajisaka R, Koike A, et al. Heart rate and blood pressure response to ramp exercise and exercise capacity in relation to age, gender, and mode of exercise in a healthy population. *J Cardiol.* 2013; 61: 71-78.
- 5) Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2000; 32: 70-84.
- 6) Martino M, Gledhill N, Jamnik V. High VO<sub>2</sub>max with no history of training is primarily due to high blood volume. *Med Sci Sports Exerc.* 2002; 34: 966-971.
- 7) Selby GB, Eichner ER. Endurance swimming, intravascular hemolysis, anemia, and iron depletion. New perspective on athlete's anemia. *Am J Med.* 1986; 81: 791-794.
- 8) Nader E, Guillot N, Lavorel L, et al. Eryptosis and hemorheological responses to maximal exercise in athletes: Comparison between running and cycling. *Scand J Med Sci Sports.* 2018; 28: 1532-1540.
- 9) Yalcin O, Erman A, Muratli S, et al. Time course of hemorheological alterations after heavy anaerobic exercise in untrained human subjects. *J Appl Physiol* (1985). 2003; 94: 997-1002.
- 10) Weight LM, Byrne MJ, Jacobs P. Haemolytic effects of exercise. *Clin Sci (Lond).* 1991; 81: 147-152.
- 11) Ashikaga K, Perrone MA, Gianfelici A, et al. Reticulocyte Count and Exercise Performance in Elite Athletes: A Retrospective Study. *Sports (Basel).* 2025; 13: 169.