

主論文の要旨

Effect of Expiratory Muscle Fatigue on the Respiratory Response during Exercise

〔 呼気筋疲労が運動中の呼吸応答に及ぼす影響 〕

名古屋大学大学院医学系研究科 健康社会医学専攻
健康増進医学講座 健康スポーツ医学分野

(指導：押田 芳治 教授)

杉浦 弘通

【緒言】

呼吸運動は呼吸筋の働きによって行われ、安静時では主に吸気筋が働き、運動を行うと、吸気筋と共に呼気筋が活発に働く。運動中の換気増大には呼気筋の働きが必要不可欠である。呼吸筋が疲労すると呼吸困難を引き起こし、運動を制限させる原因となる。呼吸筋と運動パフォーマンスの関連性について数多く報告されているが、呼気筋についての報告は少なく、呼気筋疲労が運動に及ぼす影響についてはあまり知られていない。呼気筋は吸気筋よりも疲労しやすく、運動負荷が高くなると筋活動もより高まることから、呼気筋疲労は特に高強度運動時の呼吸応答に影響することが考えられる。本研究では呼気筋疲労が運動中の呼吸応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

【方法】

被検者は健常な成人男性 9 名(平均年齢 20.9 ± 0.3 歳、平均身長 170.9 ± 2.8 cm、平均体重 64.5 ± 5.7 kg)とした。同一被検者に対して、運動前に呼気筋を疲労させる条件(EMF)と運動のみを行う対照条件(CON)の 2 条件を設定した。肺機能はスパイロメータを用いて、努力性肺活量(FVC)、1 秒量(FEV₁)、1 秒率(FEV_{1.0%})を測定した。呼吸筋力は口腔内圧計を用いて、最大呼気口腔内圧(PE_{max})、最大吸気口腔内圧(PI_{max})を測定した。運動中の呼吸応答は、呼気ガス分析装置を用いて、分時換気量(V_E)、呼吸数(f)、1 回換気量(V_T)、酸素摂取量(VO₂)、二酸化炭素産出量(VCO₂)を測定した。呼吸困難感は、自覚的運動強度ボルグ・スケールを用いて、1 から 10 までの 10 段階で評価した。循環応答は、心電計による心電図の RR 間隔から心拍数(HR)を算出した。EMF に対する呼気筋疲労方法では、吸息は鼻から行い、呼息は口腔内圧計に接続したマウスピースを用いて口腔内圧に負荷を加えて行った。呼息にかける負荷量は最大呼気口腔内圧の 50%を 1 分間に 12 回の頻度で 20 分間行った。その後、PE_{max} が 20%以上低下していることを確認した。運動方法は、自転車エルゴメータを用いて、ランプ負荷運動を 30W から開始し 1 分ごとに 20W ずつ増加させ、ペダルの回転速度を 55rpm に設定した。運動終了は設定された回転速度を超えなくなる時点とした。実験手順は、EMF と CON の施行順序を無作為に行い、EMF では呼気筋疲労させる前後に、CON では運動前に肺機能、呼吸筋力を測定し、ランプ負荷運動を行った。運動終了後には、再度、肺機能と呼吸筋力を終了直後、15 分後、30 分後に測定した。分析方法は、EMF と CON の運動終了時間が揃った時の最大負荷を高強度運動(W_{100%})、その半分を中強度運動(W_{50%})として設定し、運動中の呼吸応答を中強度、高強度運動に分けて分析した。比較項目は、各条件の運動前後の肺機能、最大口腔内圧、EMF と CON の条件間の運動終了時間、各強度の呼吸応答 (V_E、f、V_T、VO₂、VCO₂)、1 分間ごとのボルグ・スケールとした。

【結果】

FVC、FEV₁、FEV_{1.0%}の変化では、EMF、CON共に運動前後に有意差を認めなか

った(Table.1)。最大口腔内圧の変化では、EMFのPE_{max}は呼気筋疲労前と比較して、呼気筋疲労後、運動直後に低下を認め、PI_{max}は呼気筋疲労前と比較して、呼気筋疲労後、運動後に有意差を認めなかった。また、CONのPE_{max}、PI_{max}は運動前後に有意差を認めなかった(Table.2)。両条件の運動終了時間の比較では、EMF(573.7±51.9秒)とCON(545.1±105.0秒)に有意差を認めなかった。運動中の呼吸応答について、EMFはCONと比較して、V_Eでは安静時、W_{50%}に有意差を認めず、W_{100%}に低下を認めた。fでは安静時に有意差を認めず、W_{50%}に増加、W_{100%}に低下を認めた。V_Tでは安静時、W_{100%}に有意差を認めず、W_{50%}に低下を認めた。VO₂、VCO₂では、安静時、W_{50%}、W_{100%}に有意差を認めなかった。心拍数の比較においても、安静時、W_{50%}、W_{100%}に有意差を認めなかった(Table.3)。ボルグ・スケールの比較では、EMFはCONと比較して、運動開始1分後、2分後に増加を認め、その後は有意差を認めなかった(Table.4)。

【考察】

呼気筋疲労による運動中の呼吸応答は、中強度運動では1回換気量の低下と呼吸数の増加によって、分時換気量を増加させた。しかし、高強度負荷になると呼吸数の低下により、運動負荷に見合う換気量まで増加させることができなかった。

運動中の呼吸応答について、一般的には換気量を増大させる際、中強度までは1回換気量と呼吸数はほぼ同時に増加し、運動強度が高くなり分時換気量がさらに増加すると1回換気量の増加は上限となり、呼吸数の増加は急峻となる。運動中の呼気筋の働きは呼吸数を増加させるだけでなく、肺の残気量を減少させ、横隔膜をさらに拡張させることで吸気量を増加させる。よって、呼気筋の疲労は運動中の換気の増加量を低下させることが考えられる。しかし、本研究では、EMFの中強度運動において呼吸数の増加と1回換気量の低下が認められ、運動中の呼吸は浅く速い呼吸パターンに変更され、分時換気量は低下しなかった。先行研究では運動中の呼吸調節について、Dempseyらは呼吸運動には仕事効率が至適な状態になるように調節機構が働いていることを報告している。また、呼吸パターンの調節について、Poonらは1回換気量と呼吸数は呼吸の仕事量と補助呼吸筋などの仕事量が最小限となるように選択されると報告している。このことから、呼気筋疲労時においても、呼気筋の負担を呼吸パターンによって代償し、分時換気量を低下させないように呼吸調節機構が働いていることが考えられる。中強度運動でみられた1回換気量が低下する原因については、呼吸筋疲労の他に、PaCO₂の増加や、息苦しさ感などが挙げられる。しかし、本研究の中強度運動時のEMFはCONと比べ、VCO₂、ボルグ・スケールに有意差を認めないことから、PaCO₂の増加や息苦しさ感が影響している可能性は低いと考えられる。運動中のV_Eにおいて、中強度の時点では、EMFは換気量を増加させることができるが、高強度になるとCONと同等の換気量まで増加させることができなかった。よって、呼気筋疲労は、特に高強度運動のような多くの換気量を必要とされる場合に影響することが考えられる。

呼気筋の疲労や筋力低下は、運動中の呼吸応答に悪影響を及ぼし、慢性呼吸器疾患患者の運動中の息切れや過呼吸の原因となることが考えられる。このように、呼気筋疲労が運動中の呼吸応答に影響することから、呼気筋の強化によっても運動中の呼吸応答を改善させ、また負担を軽減させることが推察される。呼吸筋力が低下している場合、呼吸筋力トレーニングを併用して運動を行うことが安全な運動とパフォーマンスの向上に寄与することが考えられる。

【結論】

呼気筋疲労は運動中の呼吸応答に対して、中強度運動では浅く速い呼吸パターンに変更させ、換気量を増加させることができる。しかし、高強度運動になると呼吸数を増加させることができず、必要な換気量まで増加させることができない。このことから、呼気筋疲労は運動中の呼吸応答に影響することが示唆された。