

主論文の要旨

## Hypoxia Augments Oscillatory Blood Flow in Brachial Artery during Leg Cycling

〔 低酸素環境は下肢自転車運動中の上腕動脈における  
順行性血流量と逆流性血流量を増加させる 〕

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)

岩本 えりか

## 【緒言】

有酸素性の運動トレーニングは、血管の柔軟性や機能を向上させることが知られている。興味深いことに、運動による血管への好影響は、運動を行っている運動肢のみならず、非運動肢の血管にも認められる。運動による血管機能改善のメカニズムは完全には明らかにされていないが、運動時の血流量上昇に伴う血管内皮細胞へのずり応力（シヤーストレス）増大による、血管拡張物質（一酸化窒素：NO）の産生増加の関与が推測されている。超音波診断装置を用いて、運動時に非運動肢の動脈の血流動態を観察すると、中枢から末梢へ向かうプラス方向の血流速度（順行性血流）だけでなく、末梢から逆流するマイナス方向の血流速度（逆流性血流）も認められる。この順行性と逆流性の血流の組み合わせのことを“血流パターン”といい、血流パターンの変化も血管機能の改善に関係する可能性が示唆されている。

近年、低酸素環境において有酸素性の運動トレーニングを行った結果、通常酸素環境でトレーニングを行うよりも、運動肢の血管の柔軟性や機能がより改善することが報告された。一方、低酸素環境における有酸素性運動が、非運動肢の血流動態および血管機能へ与える影響は不明である。低酸素環境では、常酸素環境と比較して灌流圧および末梢血管抵抗が高くなることから、非運動肢の血流パターンも変化すると考えられる。また、この低酸素環境における血流パターンの変化は、非運動肢の血管機能に影響を与える可能性がある。

本研究では、低酸素環境での下肢を用いた有酸素性運動時における非運動肢（上腕動脈）の血流パターンを明らかにすることを目的とした。我々は、低酸素環境での運動では、非運動肢における順行性および逆流性血流量が増大すると仮説を立てた。

## 【対象および方法】

8人の健康成人男性が本研究に参加した（年齢、 $21.3 \pm 0.5$  歳；身長、 $173.8 \pm 1.6$  cm；体重、 $70.7 \pm 2.2$  kg）。まず、被験者に常酸素ガス（酸素濃度 21%）を吸入させ 5 分間の安静をとらせた（Rest 1）。その後、安静状態のまま吸入ガスを常酸素もしくは低酸素（酸素濃度 12%）に切り替えた（10 分間、Rest 2）。安静後、常酸素もしくは低酸素ガスを吸入しながら最大運動テストを実施した。運動テストにはリカンベント式の自転車エルゴメータを用い、初期負荷 30W より疲労困憊（Exhaustion）にいたるまで 2 分ごとに 30W ずつ増加させる連続的多段階漸増負荷法を用いた。運動テスト中の酸素摂取量、心拍数（HR）、血圧を記録した。超音波診断装置を用いて各ステージの最後の 1 分間の上腕動脈の血流速度と血管径を測定し、後半 30 秒間の平均、順行性、逆流性の血流量およびシヤアートを以下の式より算出した [血流量 ( $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ ) = 血管断面積 ( $\text{cm}^2$ ) × 血流速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) × 60]、[シヤアート ( $\text{s}^{-1}$ ) =  $4 \times$  血流速度 ( $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ) / 血管径 (cm)]。

各変数の結果は、平均値 ± 標準誤差で示した。運動による影響（群内要因：強度）、常酸素および低酸素による影響（群間要因：試行）の交互作用の検定には、二元配置反復測定分散分析を用いた。それぞれの試行の安静時（Rest 1）に対する各変数の検

定には、Dunnett テストを用いた。常酸素試行と低酸素試行の差の検定（群間要因：試行）には、Bonferroni テストを使用した。危険率 5%未満を有意水準とした。

### 【結果】

最高酸素摂取量は、低酸素試行において常酸素試行より有意に低い値を示した（常酸素試行;  $40.5 \pm 1.5 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、低酸素試行;  $28.7 \pm 1.2 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ）。HR および収縮期血圧（SBP）は、運動により両試行において有意に増加したが、拡張期血圧（DBP）は変化が見られなかった。運動の全負荷での HR および 90、120、150W における SBP は、常酸素試行と比較して低酸素試行において有意に高い値を示した（表 1）。

平均の血流量およびシェアレートは、運動開始により両試行とも安静値より低下し、その低下には試行間に有意な差を認めなかった。その後、常酸素試行では 150W 以降で安静値に戻ったが、低酸素試行では疲労困憊まで安静値と比較して低値を示した。順行性および逆流性の血流量およびシェアレートは、両環境ともに運動強度の増加に伴い増加を示した（図 1、2）。低酸素試行における 30、60、120W での順行性血流量および全負荷の逆流性血流量は、常酸素試行より有意な高値が認められた（図 1）。

### 【考察】

低酸素環境は、漸増負荷運動中の非運動肢における順行性および逆流性の血流量を増加させた。血流パターンが常酸素試行と低酸素試行において異なった原因として、全身の灌流圧（upstream pressure）と末梢の臨界閉鎖圧（downstream pressure）の圧勾配の違いが考えられる。低酸素環境における運動時には、HR および SBP の増加により、心臓の収縮期における灌流圧が常酸素環境よりも増加していたと推測され、これにより順行性血流量が増加したと考えられる。これに対して、DBP は試行間で有意な差を認めず、心臓の拡張期における中枢側の圧は、試行間で有意差がなかったと推測される。低酸素環境における運動は、筋交感神経活動レベルを常酸素環境と比較して上昇させることが報告されている。筋交感神経活動レベルの上昇は、非運動肢の末梢血管抵抗を増加させるため、逆流性血流量が増加したと考えられる。

運動トレーニングによる血管の柔軟性および機能の向上には、血流パターンの変化が関係していることが推測されている。また、順行性と逆流性の両者の血流量増加は、合計のシェアレートを増加させ、非運動肢の血管機能をより改善させる可能性があるとの報告もある。これらの先行研究を考慮すると、本研究の低酸素環境にて観察された、順行性および逆流性の血流量増加は、非運動肢の血管機能改善に有効である可能性が示唆される。この点を明らかにするためには、低酸素環境下での急性の運動やトレーニング前後における非運動肢の血管機能の検討など、さらなる研究が必要である。

### 【結論】

低酸素環境は、動的下肢運動時の非運動肢（上肢）の動脈における順行性および逆流性血流量を増大させることが明らかとなった。