

低酸素トレーニングによる緩衝能の改善が 高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響

国立スポーツ科学センター 伊藤 穰
(共同研究者) 筑波大学 鈴木 康弘
株式会社デサント 山崎 一彦
筑波大学 高松 薫

The Influence of Improved Muscle Buffer Capacity due to Hypoxic Training on High Intensity Exercise Performance

by

Osamu Ito

Japan Institute of Sports Sciences (JISS)

Yasuhiro Suzuki

Doctoral Program in Health and Sport Sciences,

University of Tsukuba

Kazuhiko Yamazaki

DESCENTE

Kaoru Takamatsu

Institute of Health and Sport Sciences,

University of Tsukuba

ABSTRACT

The purpose of the present study was to examine the effects of high intensity training in hypoxic condition on buffer capacity of human skeletal muscle and high intensity exercise performance. Twelve active university students participated in this study. They performed 8-weeks of twice a week high intensity training using 30-s maximal pedaling

exercise in hypoxic condition (Hypo: n=6) or normoxic condition (Norm: n=6). Peak power and mean power during pedaling exercise were measured throughout training. Carnosin concentration was determined from a biopsy sample and thigh muscle cross-sectional area was measured by Magnetic resonance imaging before and after training. Maximal oxygen consumption and non-metabolic CO₂ were also measured during incremental pedaling exercise tests performed before and after training. Peak power gradually increased only in Hypo. Mean power gradually increased in both groups but the increase rate of Hypo was greater than that of Norm, although it was not significant. Carnosin concentration increased in both groups (p<0.05) but the increase was slightly greater in Hypo. These results suggest that high-intensity training in hypoxic condition may have improved muscle buffer capacity, power and endurance capacity of power.

要 旨

本研究の目的は、低酸素環境下における短時間高強度運動トレーニングが、ヒト骨格筋の水素イオン (H⁺) 緩衝能力および高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討することであった。

活動的な男子大学生12人の被検者を6人ずつ常酸素群と低酸素群とに分け、それぞれに30秒間全力ペダリング運動を用いた週2回8週間の高強度トレーニングを行わせた。トレーニングの前後に、最大酸素摂取量、非代謝性CO₂排出量、大腿の筋横断面積、筋線維組成および筋カルノシン濃度を測定した。

8週間のトレーニング中、30秒間全力ペダリング時の最高パワーは、低酸素群においてのみ徐々に増加した。平均パワーは、両群ともに徐々に増加したが、その増加率は、低酸素群が常酸素群に比べて大きい傾向にあった。また、筋カルノシン濃度は、両群ともに有意に増加した。これらの結果は、低酸素環境下における高強度トレーニングが、筋緩衝能力を改善し、筋パワーおよび筋パワーの持続能力を向上させる可能性を示している。

緒 言

近年、様々な競技スポーツにおいて、高地における低圧あるいは低酸素に対する身体の適応反応を利用してパフォーマンスを向上させることをねらいとした、いわゆる「高地（高所）トレーニング」が取り入れられてきている。一般に、高地トレーニングは筋酸素利用能力の改善を目的とするため、現在のところ、この高地トレーニングは、長距離走や水泳競技、クロスカントリースキーなど、主に持久性スポーツの選手において多く用いられている。先行研究においても、高地トレーニングが血中ヘモグロビンおよび筋毛細血管密度を増加させ、持久性能力の向上をもたらすことが報告されている^{2), 15)}。最近では、高地に居住してトレーニング自体は平地の常酸素環境で行う、いわゆる“Living high-Training low”が有酸素性持久力の改善に有効であることもまた示されてきている^{4)・6)}。一方、Mizunoら⁹⁾は、海拔2100m地点に滞在し、海拔2700mの高地で平地と同様のトレーニングを2週間行った結果、骨格筋の水素イオン (H⁺) 緩衝能力が有意に向上したことを報告した。このことは、比較的短時間で高強度の運動形態を有する競技種目に対しても、高地ト

レーニングが有効である可能性を示している。しかし、そのような高強度運動パフォーマンスの改善を目的として高地トレーニングを行った研究は少なく、 H^+ 緩衝能力に着目した研究も Mizuno ら⁹⁾以降ほとんど行われていない。

したがって、本研究の目的は、高地をシミュレートした低酸素環境下における短時間高強度運動トレーニングが、ヒト骨格筋の緩衝能力を改善するかどうかを検討すること、およびその改善が高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討することである。

1. 方法

1.1 被検者

被検者には、活動的な男子大学生12名（年齢 21.1 ± 1.6 歳，身長 172.9 ± 4.8 cm，体重 64.3 ± 7.8 kg）を用いた。被検者には、実験開始前に、運動テストおよびトレーニングで疲労困憊まで追い込むことの苦痛および筋バイオプシーに伴う苦痛と危険性を詳細に説明し、いかなる時でも実験への参加を取りやめることができるという条件の下で参加の同意を得た。

1.2 スプリントトレーニング

低酸素環境下における高強度運動が、無酸素性作業能力の発達および筋パラメータに及ぼす影響を検討するために、被検者を6名ずつに分け、常酸素環境下（常酸素トレーニング群：Norm）または低酸素環境下（低酸素トレーニング群：Hypo）においてそれぞれ8週間のスプリントトレーニングを行わせた（図1）。Hypoにおけるトレーニングは、筑波大学低酸素実験室において行った。トレーニングには、電磁ブレーキ式の自転車エルゴメータ（ハイパワーエルゴメータ，竹井機器社製）による30秒間の全力ペダリング運動を用いた。セット数は、両群ともに最初の2週間を1セットとし、以後6週間を2セットとした。トレーニン

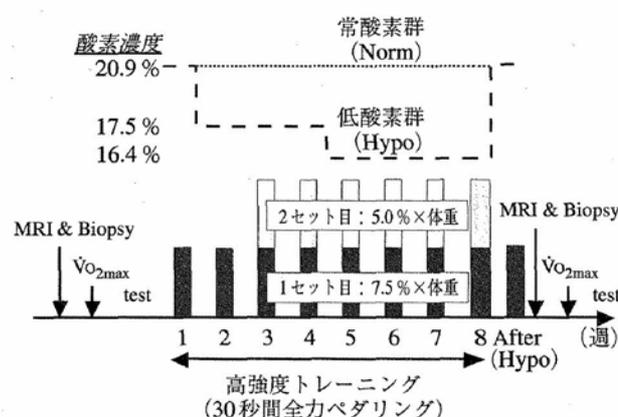


図1 実験のプロトコル。トレーニングには30秒間の全力ペダリング運動を用いた。低酸素群（Hypo）における2～8週目のトレーニングは、低酸素環境下で行った。また、Hypoのみ、8週目のトレーニングの後に、常酸素環境下での30秒間全力ペダリングテストを行った（After）。

グ負荷は、トレーニング当日における体重を基準として、1セット目を体重の7.5% × kp，3週目から始まる2セット目を体重の5.0% × kpとした。また、トレーニングの頻度は、1週間に2回（計16回）とした。Hypoにおける酸素濃度は、トレーニング第1週を20.9%（常酸素），第2週～第4週を17.4%（高度1500m相当）とし、第5週以降を16.4%（高度2000m相当）とした。

1.3 測定項目および測定方法

30秒間全力ペダリング中の最大パワーおよび30秒間の平均パワーを、トレーニング期間の8週間にわたって継続的に記録した。また、Hypoにおいてのみ、トレーニング後1週間以内に、常酸素環境下における30秒間全力ペダリングテストを行い、同様に最大パワーおよび平均パワーを算出した。

スプリントトレーニングの前後に、最大漸増負荷ペダリング運動テスト、磁気共鳴映像法（MRI）を用いた筋横断面積測定、および筋バイオプシーを行った。最大漸増負荷ペダリング運動テストでは、自動呼気ガス分析器（OXYCON-GAMMA，MIJNHARDT社製）を用いて、運動テスト中の呼気ガス分析を行った。被検者は、フェイスマスクに取り付けられたタービン式のボリュームトラ

ンスデューサを通して呼吸し、その際の呼気ガスの一部をサンプリングチューブを介して連続的に採取した。データ解析用のコンピュータ (Prolinea 4/25s, Compaq 社製) を用いて、二酸化炭素排出量 ($\dot{V}CO_2$) および酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$) をオンラインで一呼吸毎に算出し、運動中の最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) を決定した。また、漸増負荷運動中における非代謝性 CO_2 排出量の指標として、NM- CO_2 を伊藤ら³⁾と同様の方法を用いて算出した。

トレーニング前後における大腿部の筋横断面積を算出するために、1.5 T の超伝導 MR 装置 (Gyrosan ACS-NT, Philips 社製) を用いて右脚の横断像を撮影した。撮影の際には、膝関節を完全に伸展させ、大腿部がベットに触れないように注意した。分析には、脛骨頭の外側顆間結節と大転子最上端部との中間 (50%) 部位を用いた。得られた筋横断像をトレースし、スキャナー (GT-9000, EPSON 社製) を用いてコンピュータ (Macintosh G3, Apple 社製) にそのトレース画像を取り込んだ後、画像解析用ソフトウェア (NIH image, NIH 社製) により横断面積を算出した。

組織化学的分析用にマウントされた筋バイオプシーサンプルから、チャンバー内を-23℃にセットしたクリオスタット (OT-FAS 型, ブライト社製) を用いて厚さ 10 μ m の連続横断切片を作り、myosin ATPase 染色 (preincubation pH10.3, および 4.3)¹⁾を行った。得られた標本の顕微鏡写真から、筋線維を Type I, TypeIIa および TypeIIx の3種類に分類した。また、生化学分析用に十分な量が採取できた12人中10人の筋サンプルを用いて、筋中のカルノシン濃度を測定した。分析は、ホモジネートした筋サンプルをエーテル抽出後、アミノ酸分析器 (JLC-300, 日本電子社製) を用いて行った。

1. 4 統計処理

本研究のデータは、すべて平均値 (標準偏差) で示した。トレーニング前後における測定データの有意差検定には Student's t-test を用い、相関係数の算出には Pearson の積率相関分析を用いた。いずれの場合も有意性の判定には、危険率 5% を採用した。

2. 結果

8週間にわたる30秒間全力ペダリング運動を用いた高強度トレーニングの結果、常酸素群 (Norm), 低酸素群 (Hypo) とともに被検者の体重 (Norm: 61.9 \pm 4.8 kg (トレーニング前), 62.0 \pm 4.7 kg (トレーニング後), Hypo: 66.7kg \pm 9.8 kg (トレーニング前), 67.0 \pm 11.0 kg (トレーニング後)) および $\dot{V}O_{2max}$ (表1) には有意な変化は認められなかった。また、漸増負荷運動中における血液中の重炭酸緩衝作用の指標として算出した NM- CO_2 は、常酸素群、低酸素群ともに増加する傾向にあったが、有意な変化ではなかった (表1)。

表1 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニング前後における最大酸素摂取量 ($\dot{V}O_{2max}$) および非代謝性 CO_2 排出量 (NM- CO_2)

	Norm (n=6)		Hypo (n=6)	
	Before	After	Before	After
$\dot{V}O_{2max}$ (ml/min/kg)	50.7 (4.5)	50.2 (4.3)	49.7 (4.8)	51.0 (5.1)
NM- CO_2 (ml/kg)	59.6 (12.3)	63.7 (15.4)	58.1 (10.9)	63.3 (11.8)

() は標準偏差

表2に、トレーニング1週目 (Week 1) と8週目 (Week 8) における1セット目 (体重の7.5%の負荷) の30秒間全力ペダリング運動時の最高パワーおよび平均パワーを示した。また、Hypo における Week 8 は低酸素環境下における試技であるため、トレーニング終了後に常酸素環境下で行ったテスト (After) の結果も合わせて示した。Norm においては、最高パワーは Week 1 と Week

表2 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニング1週目 (Week 1) と8週目 (Week 8) における30秒全力ペダリング運動時 (1セット目) の最高パワーおよび平均パワー. Hypoにはトレーニング後に常酸素環境下で行ったテスト (After) の結果も合わせて示した.

	Norm (n=6)		Hypo (n=6)		
	Week 1	Week 8	Week 1	Week 8	After
Peak power (W/kg)	12.4 (1.0)	12.8 (0.7)	11.4 (0.5)	12.2 ** (0.2)	12.1 ** (0.5)
Mean power (W/kg)	8.8 (0.4)	9.3 * (0.5)	8.1 (0.3)	8.8 *** (0.3)	9.0 ** (0.3)

* ; p<0.05, ** ; p<0.01, *** ; p<0.001 vs Week 1 () は標準偏差.

8との間に有意差が認められなかったが, 平均パワーはWeek 8がWeek 1に比べて有意に高値を示した. 一方, Hypoにおいては, 最高パワーおよび平均パワーともに, Week 8およびAfterがWeek 1に比べてそれぞれ有意に高値を示した.

図2に, 体重の7.5%の負荷を用いた30秒間全力ペダリング運動時の体重あたりの最高パワーの推移を, Week 1の値を100とした相対値で示した. Normにおいては, トレーニング期間中を通して最高パワーの有意な増加は認められなかったが, Hypoにおいては, Week 2で一旦減少したのち徐々に増加し, Week 5以降の値はWeek 1に比べて有意に高値を示した. また, 最高パワーの増加率は, Week 6でのみHypoがNormに比べて有

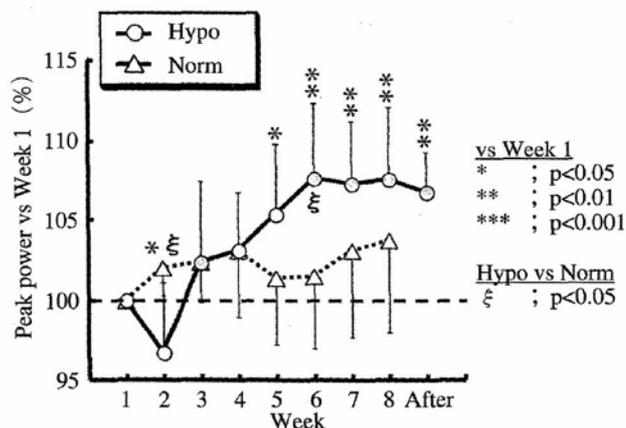


図2 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニングによる30秒全力ペダリング運動時 (1セット目) の最高パワーの変化. HypoのWeek 2からWeek 8は低酸素環境下での試技. データはすべてWeek 1の値を100とした割合で示した.

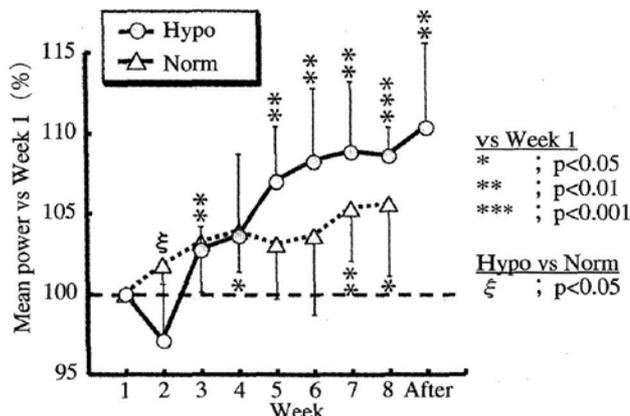


図3 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニングによる30秒全力ペダリング運動時 (1セット目) の平均パワーの変化. HypoのWeek 2からWeek 8は低酸素環境下での試技. データはすべてWeek 1の値を100とした割合で示した.

意に高値を示した.

図3に, 体重の7.5%の負荷を用いた30秒間全力ペダリング運動時の体重あたりの平均パワーの推移を, Week 1の値を100とした相対値で示した. Normにおいては, 平均パワーはトレーニング期間中に徐々に増加し, Week 4, Week 7およびWeek 8の値はWeek 1に比べて有意に高値を示した. また, Hypoにおいては, 最高パワーと同様にWeek 2で一旦減少したのち徐々に増加し, Week 5以降の値はWeek 1に比べて有意に高値を示した. なお, 平均パワーの増加率は, HypoがNormに比べて大きな傾向にあったが, トレーニング期間中を通して両者に有意な差は認められなかった.

表3に, 高強度トレーニング前後における被検者の筋線維組成を示した. NormおよびHypoともに, 高強度トレーニングにともなう筋線維組成

表3 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニング前後における筋線維組成.

	Norm (n=6)		Hypo (n=6)	
	Before	After	Before	After
% Type I	51.0 (14.8)	48.2 (8.9)	53.1 (9.5)	50.7 (7.5)
% Type IIa	29.0 (7.3)	38.2 (8.5)	30.1 (10.4)	33.2 (8.0)
% Type IIx	20.0 (10.3)	13.7 (4.6)	16.8 (4.3)	16.1 (2.4)

() は標準偏差.

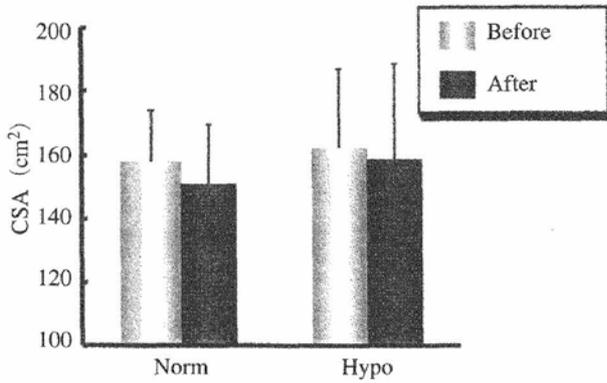


図4 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニング前後における右足大腿50%部位の筋横断面積 (CSA)

の有意な変化は認められなかった。

図4に、高強度トレーニング前後における右足大腿50%部位の筋横断面積 (CSA) を示した。Norm および Hypo ともに、高強度トレーニングにともなう CSA の有意な変化は認められなかった。

図5に、高強度トレーニング前後における筋カルノシン濃度の変化を示した。Norm および Hypo ともに、筋カルノシン濃度は高強度トレーニングにより有意に増加した。また、その増加率は、Hypo が Norm に比べて大きな傾向を示したが、有意な差は認められなかった。

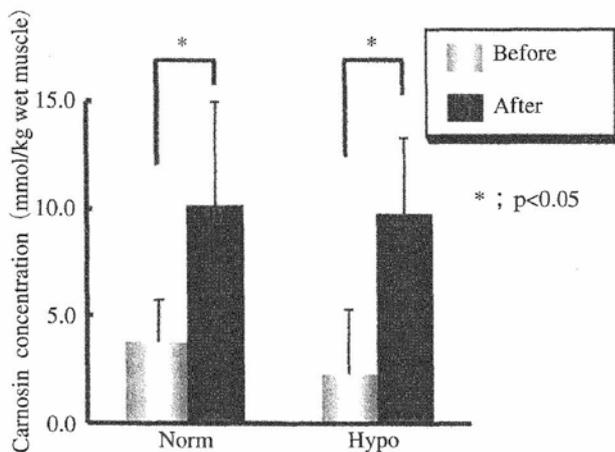


図5 常酸素群 (Norm) および低酸素群 (Hypo) の高強度トレーニング前後における筋カルノシン濃度。

図6に、高強度トレーニング後の筋カルノシン濃度とトレーニング期間中における30秒間全力ペダリング運動時の最高パワーおよび平均パワー

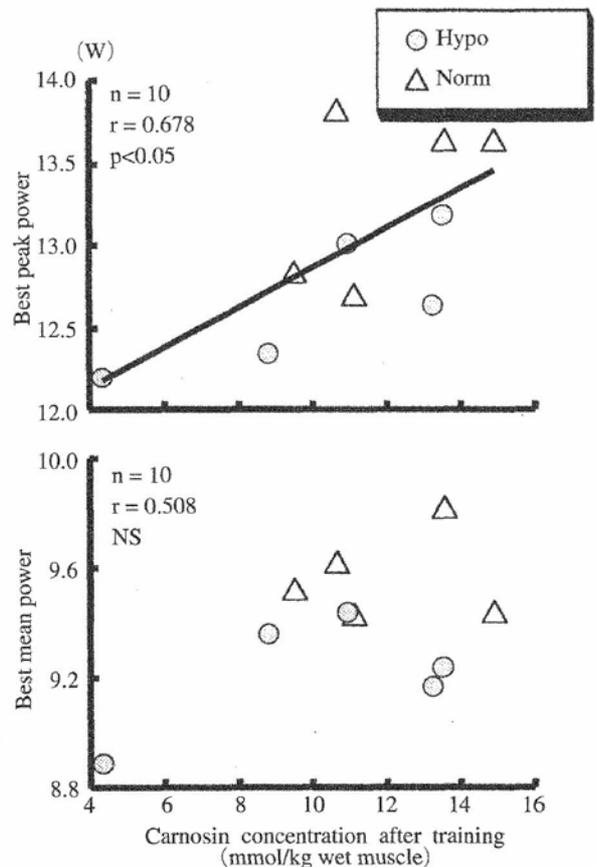


図6 高強度トレーニング後における筋中カルノシン濃度とトレーニング中の30秒間全力ペダリング運動時における最高パワーおよび平均パワーのベスト記録との関係。

のベスト記録との関係を示した。筋カルノシン濃度と最高パワーのベスト記録の間には、有意な正の相関関係が認められた。また、筋カルノシン濃度と平均パワーのベスト記録の間には、正の相関傾向 ($r=0.508$, $p=0.138$) が認められたが、有意な関係ではなかった。

3. 考察

本研究の目的は、低酸素環境下における短時間高強度運動トレーニングが、ヒト骨格筋の緩衝能力を改善するかどうかを検討すること、およびその改善が高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響について検討することであった。

Living high-Training low理論の発達により、有酸素性能力の向上には高地に滞在すること自体が重要であるという見解が大勢となりつつある⁴⁾⁻⁶⁾。

このことは、高地における低圧-低酸素環境では、平地に比べてトレーニングの相対的な強度が上がり、必然的に平地と同じトレーニングの強度および量を維持できなくなるという理由に基づいている¹³⁾。一方、高強度運動能力の向上に対して、高地トレーニングの適用を試みている研究は少ない。Nummela and Rusko¹⁰⁾は、Living high-Training lowを400m走競技者に適用した結果、400mのタイムが向上したことを報告し、その理由として呼吸性アルカローシスにともなう酸-塩基平衡の変化および乳酸代謝の変化が影響していた可能性をあげている。一方、Mizunoら⁹⁾は、海拔2100m地点に滞在し、海拔2700mの高地で平地と同様のトレーニングを行った結果、わずか2週間で骨格筋の水素イオン(H⁺)緩衝能力が有意に向上したことを報告した。Saltinら¹⁴⁾もまた、2000m高度における2週間のトレーニングによって、筋緩衝能力が有意に増加したことを報告している。これらの報告は、高地トレーニングが、酸素の利用能力の改善のみならず、乳酸から解離した水素イオンの緩衝能力の改善にともなう解糖系からのエネルギー供給量の増大に貢献しうる可能性を示しているものと考えられる。

そこで、本研究では、活動的な男子大学生を対象として、常酸素環境(Norm)あるいは低酸素環境(Hypo)のそれぞれにおいて、30秒間の全力ペダリング運動を用いた8週間の高強度トレーニングを行わせ、パワーおよび筋緩衝能力に及ぼす影響について検討した。また、本研究では、低酸素環境は、各トレーニング試技30秒間の特に後半部分により強く影響すると考え、低酸素トレーニングの効果は30秒間の最高パワーよりも平均パワーにおいて顕著に現れるという仮説をたてた。しかし、本研究の結果、ペダリング中の最高パワーが、Normにおいてはほとんど増加しなかったのに対して、HypoにおいてはWeek 3以降徐々に増加し、Week 5以降はWeek 1に比べて有

意に高値を示した。低酸素環境が、ペダリング開始5秒程度で認められる最高パワーに及ぼす影響の解釈は難しい。しかし、本研究においては、Hypoのトレーニング終了後30分間は低酸素室内に留まるように指示したため、この回復期における低酸素暴露が筋中クレアチンリン酸(PCr)の回復や酸-塩基平衡になんらかの影響を及ぼし、無酸素性(ATP-PCr系および解糖系)のエネルギー供給速度を増加させた可能性も考えられる。一方、単なる初期値の違いによる影響であった可能性も考えられる。残念なことに、本研究で用いた被検者のWeek 1における最高パワーの大きさは、体重あたりの相対値ではHypoがNormに比べて低値を示す傾向にあった(表2)。したがって、このことが、その後の改善率の違いに影響した可能性も否定できない。ただし、最高パワーの絶対値でみた場合には、Week 1では両群間にほとんど差が認められなかったが(Norm: 772 ± 114 watt, Hypo: 763 ± 111 watt)、HypoのWeek 8(813 ± 121 watt)およびAfter(812 ± 143 watt)の値は、NormのWeek 8(791 ± 83 watt)に比べてやや高値を示した。すべての被検者が、本研究で用いたようなトレーニングを日常的に行っておらず、両群における筋線維組成(表3)および大腿の筋横断面積(図4)に大差が認められなかったことを考慮すると、Hypoにおける最高パワーの絶対値の増加は特筆に値するかもしれない。しかし、筋量は同じであっても体重が大きい方がパワーの発揮に対して有利になることも考えられる。したがって、この点については、体重あたりの最高パワーが初めから高い被検者をHypoに追加するなどして、今後、さらに検討する必要があるものと考えられる。

一方、30秒間の平均パワーは、Norm, Hypoの両群ともに有意に増加した(図3)。また、有意差は認められなかったものの、その改善率はHypoがNormに比べて高値を示す傾向にあった。

特に、HypoのAfterにおける平均パワーは、Week 1に比べて10.3%高値を示し、これは最高パワーの改善率(6.7%)よりも大きな値であった。このことは、本研究で用いたトレーニングによって、ペダリング中の特に後半部分のパワーに大きな改善が認められたことを示唆している。この傾向は、2.8%の最高パワーの改善に対して5.6%の平均パワーの改善が認められたNormにおいても同様であった。両群の改善率の差については、上述した最高パワーの場合と同様の問題も考えられるために、今後、慎重に議論していく必要があるものと考えられる。なお、Hypoにおいて、Week 2の最高パワー(図2)および平均パワー(図3)がWeek 1に比べて低値を示したことは、Week 2で初めて低酸素環境に暴露されたことによる心理的な影響が大きかったものと考えられる。

8週間の高強度トレーニングの結果、被検者の筋線維組成および大腿50%部位における筋横断面積に有意な変化は認められなかった(表3, 図4)が、筋緩衝能力の指標として用いた筋中のカルノシン濃度は両群ともに有意に増加した(図5)。トレーニングにともなう筋カルノシン濃度の変化量と、筋の物理化学的緩衝能力(β)の変化量との間には、有意な正の相関関係があることが縦断的研究によって示されているので⁷⁾、本研究においても、Norm, Hypo両群の筋緩衝能力は増加していたものと考えられる。しかし、筋緩衝能力の改善が、直接、高強度運動パフォーマンスの改善に結びつくかどうかということに関しては、先行研究では一致した見解が得られていない。高い緩衝能力を有することが、pHが低下するまでに解糖系から多くのエネルギーを獲得することに貢献し、高強度運動の持続時間を延長するという報告^{11), 12)}もあれば、そのような関係は認められなかったとする報告⁸⁾もある。本研究の結果、トレーニング前の筋カルノシン濃度と30秒間全力ペ

ダリングの1回目の試技における最高パワー($r=0.478$, NS)および平均パワー($r=0.085$, NS)、あるいは、トレーニング後の筋カルノシン濃度と30秒間全力ペダリングの最後の試技における最高パワー($r=0.346$, NS)および平均パワー($r=0.211$, NS)との間には、いずれも有意な相関関係は認められなかった。しかし、トレーニング後の筋カルノシン濃度と最高パワーおよび平均パワーのトレーニング中のベスト記録(ほとんどの被検者が6週目以降に記録した)との間には、中程度の正の相関関係が認められた。特に、最高パワーのベスト記録との関係は有意であった(図6)。本研究で用いた30秒間全力ペダリングのような高強度運動のパフォーマンスには、生理学的な条件の他に、体調や精神的なモチベーションなど様々な要因が影響を及ぼすと考えられる。したがって、筋緩衝能力が高強度運動パフォーマンスに及ぼす影響は、1度の測定で顕著に現れるほど大きなものではないかもしれない。しかし、逆に言うと、高強度運動のベストパフォーマンスと筋カルノシン濃度との間に正の相関関係が認められたことは、例えば、エリート競技者がコンディションを整えて試合に望むときのように、個人の有する最大能力を発揮しようとする場合には、筋緩衝能力がパフォーマンスを作用する一要因となりうることを示唆しているものと考えられる。

本研究における筋カルノシン濃度の増加率は、HypoがNormに比較してやや高い傾向にあった(Hypo: 3.8倍, Norm: 3.0倍)。さらに、最大酸素摂取量および血中重炭酸緩衝作用の大きさの指標として用いた非代謝性CO₂もまた、有意ではないがHypoがNormに比べてやや大きく改善する傾向にあった(表1)。したがって、Hypoにおける最高パワーおよび平均パワーの高い改善率には、これらのいくつかの要因が関わっているかもしれない。しかし、本研究では、トレーナビリティの高い一般健常者を対象としたために、低酸

素環境自体が及ぼす影響については明確に結論づけるには至らなかった。今後は、様々な被検者を対象として、いくつかの酸素濃度の異なる環境におけるトレーニングを試みるとともに、低酸素刺激が、筋緩衝能力のみならず筋毛細血管の発達や乳酸/H⁺トランスポーターの増加に関わる筋細胞外への乳酸/H⁺排出に及ぼす影響まで視野に入れて、さらに詳しく検討していく必要があるものと考えられる。

まとめとして、常酸素環境下あるいは低酸素環境下において、週2回8週間の高強度トレーニングを行わせた結果、30秒間全力ペダリング中の最高パワーは、低酸素群においてのみ徐々に増加した。平均パワーは、両群ともに徐々に増加したが、その増加率は、常酸素群に比べて低酸素群で大きい傾向にあった。また、筋カルノシン濃度は、両群ともに有意に増加した。これらの結果は、低酸素環境下における高強度トレーニングが、筋緩衝能力を改善し、筋パワーおよび筋パワーの持続能力を向上させる可能性を示している。しかし、低酸素刺激そのものが及ぼす影響については必ずしも明確な結果が得られなかったため、この点について今後さらに検討する必要があるものと考えられる。

謝 辞

本研究に対して研究助成を賜りました財団法人デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。本研究の実施に際して、筑波大学体育科学系棟に低酸素実験室を新設いたしました。竹中工務店の木村興造氏を初め、設置のためにご尽力頂いた多くの関係者の方々に深く感謝いたします。本研究にあたり、筋バイオプシーを担当して頂いた筑波大学の向井直樹講師、ならびにMRI撮影を担当して頂いた国立スポーツ科学センターの高橋英幸主任研究員に心から深謝いたします。また、本研究における筋カルノシン濃度の分析にご協力

頂いた筑波大学分析センターに深く感謝いたします。最後に、本研究の実施にあたり、多大なご協力を頂いた筑波大学の前村公彦氏、後藤一茂氏、ならびに快く被検者を引き受けてくださった関係諸氏に心から感謝の意を表します。

文 献

- 1) Brooke M. H., Kaiser K. K.; Three "myosin adenosine triphosphatase" systems: the nature of their pH lability and sulfhydryl dependence, *J. Histochem. Cytochem.*, 18, 670-2 (1970)
- 2) Ingjer F., Myhre K.; Physiological effects of altitude training on elite male cross-country skiers, *J. Sports Sci.*, 10, 37-47 (1992)
- 3) 伊藤 稜, 鈴木康弘, 蒲原一之, 高松 薫; 漸増負荷運動中における非代謝性CO₂排出量の評価の信頼性, *体力科学*, 50, 129-138 (2001)
- 4) Levine B. D., Stray-Gundersen J.; "Living high-training low": effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance, *J. Appl. Physiol.*, 83, 102-12 (1997)
- 5) Levine B. D., Stray-Gundersen J.; A practical approach to altitude training: where to live and train for optimal performance enhancement, *Int. J. Sports Med.*, 13, S209-12 (1992)
- 6) Levine B. D., Stray-Gundersen J., Duhaime G., Snell P. G., Friedman D. B.; Living high-Training low: The effect of altitude acclimatization / normoxic training in trained runners, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 23, S25 (1991)
- 7) Mannion A. F., Jakeman P. M., Willan P. L.; Effects of isokinetic training of the knee extensors on high-intensity exercise performance and skeletal muscle buffering, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 68, 356-61 (1994)
- 8) Mannion A. F., Jakeman P. M., Willan P. L.; Skeletal muscle buffer value, fibre type

- distribution and high intensity exercise performance in man, *Exp. Physiol.*, 80, 89-101 (1995)
- 9) Mizuno M., Juel C., Bro-Rasmussen T., Mygind E., Schibye B., Rasmussen B., Saltin B.; Limb skeletal muscle adaptation in athletes after training at altitude, *J. Appl. Physiol.*, 68, 496-502 (1990)
 - 10) Nummela A., Rusko H.; Acclimatization to altitude and normoxic training improve 400-m running performance at sea level, *J. Sports Sci.*, 18, 411-9 (2000)
 - 11) Parkhouse W. S., McKenzie D. C.; Possible contribution of skeletal muscle buffers to enhanced anaerobic performance: a brief review, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 16, 328-38 (1984)
 - 12) Parkhouse W. S., McKenzie D. C., Hochachka P. W., Ovalle W. K.; Buffering capacity of deproteinized human vastus lateralis muscle, *J. Appl. Physiol.*, 58, 14-7 (1985)
 - 13) Rusko H. R.; New aspects of altitude training, *Am. J. Sports Med.*, 24, S48-52 (1996)
 - 14) Saltin B., Kim C. K., Terrados N., Larsen H., Svedenhag J., Rolf C. J.; Morphology, enzyme activities and buffer capacity in leg muscles of Kenyan and Scandinavian runners, *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 5, 222-30 (1995)
 - 15) Terrados N., Melichna J., Sylven C., Jansson E., Kaijser L.; Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists, *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 57, 203-9 (1988)