

## 7 低酸素施設の利用

### 7-(1) 低酸素施設での生活

村岡 功

#### 1. はじめに

#### (1) 高地トレーニングのメリットとデメリット

高地トレーニングは、低圧・低酸素環境下に一定期間居住することによる受動的効果（高地馴化）と、トレーニングによる効果（積極的効果）との合成効果によって、平地でのトレーニング以上に競技力を向上させるものとして期待されています。その生理・生化学的効果としては、酸素不足によってもたらされるエリスロポエチン（EPO）の上昇とそれに伴う赤血球数やヘモグロビン濃度の上昇、赤血球内2,3-DPGの上昇とそれに伴う酸素解離曲線の右傾化、毛細血管網の発達、ミトコンドリアの増加および酸化系酵素活性の上昇などが挙げられ、その結果、酸素摂取能力が向上すると考えられています（図1）。

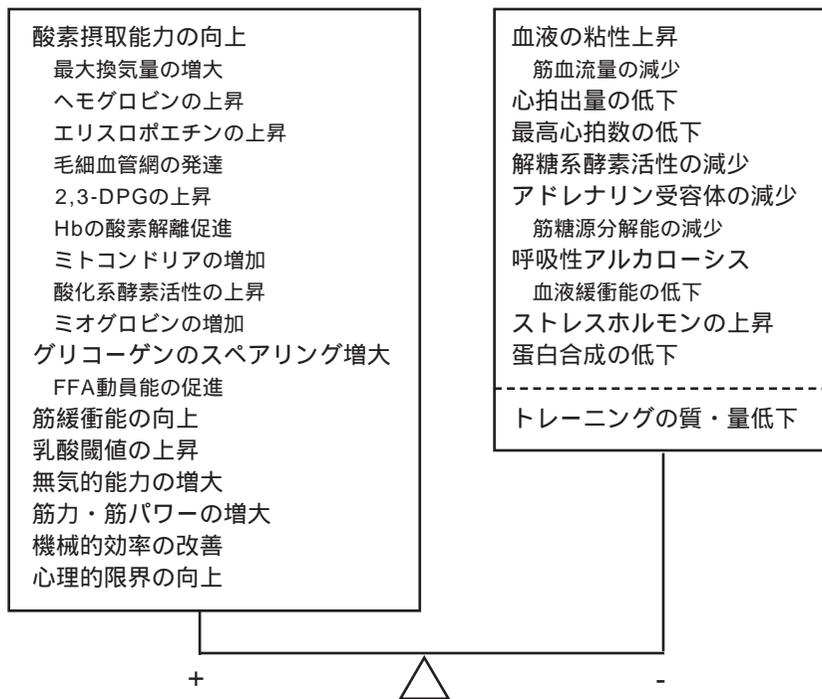


図1 高地トレーニングによる平地でのパフォーマンス向上に対する個人差を説明する図  
パフォーマンスの向上は期待される効果と予想される悪影響との差によって決まり、そして、それは様々な要因によって影響される。

しかし、高地トレーニングによって望ましい効果ばかりが得られるわけではなく（図1）、また、従来の高地に滞在して高地でトレーニングする方法（LH・TH; Living High, Training High法）における最大の問題点として、「トレーニングの質的・量的低下」が挙げられています。さらに、高地では体調管理も難しく、コンディションを維持することが困難となる場合も多くみられます。その結果、脱トレーニングと同様の状況を引き起こして、平地でのパフォーマンスを低下させる可能性もあるといわれています。それゆえ、高地トレーニングの競技力向上への影響については、その効果と悪影響のバランスによって決定されるとも考えられ、このことから、悪影響を極力減らし、効果を大きくするような取り組みが必要となると考えられます。

## （2）Living High, Training Low

近年、この問題を解決する方法として、Levineらは、高地に滞在してトレーニングをより高度の低いところで行う方法（LH・TL; Living High, Training Low法）を提唱しました。そして、高度2,500mに滞在しながら、トレーニングを1,300m前後の高度で行わせたところ、最大酸素摂取量が約5%増加し、5,000m走タイムにも向上がみられたことを報告しています。このことから、彼らは、低地でトレーニングを行うことによって運動強度の質的低下を抑制することができ、加えて高地馴化によって、平地でのパフォーマンス向上が期待できると結論しました。



### (3) 低酸素施設の開発

また、高地トレーニングの効果は、主に低酸素が主要な刺激となって起こると考えられることから、Ruskoらは、大気中の窒素を分離して適度に空気に混合し、常圧下で低酸素環境を作る“altitude house”、すなわち低酸素室を開発しました。そして、競技者を対象として、酸素濃度を15.3%（高度2,500m相当）に設定した低酸素室に、1日14～18時間滞在させて、トレーニングを平地で行かせた結果、血清EPO濃度や網状赤血球数が増加したことから、赤血球新生の亢進を示唆しています。

ところで、低酸素室を利用することによって、「高地がなくても低酸素環境を経験できる、相当高度（酸素濃度）を自在に設定できる、トレーニングや体調の管理が比較的容易である、体調不良者にもすぐに対応できる、高地へ移動するのに要する時間や費用が節約できる、時差やカルチャー・ショックの影響がない」といったメリットを挙げることができます。山岳地帯でのトレーニング施設が少ないわが国では、高地トレーニングに適した場所を確保することも難しく、日常のトレーニングにこれを簡便に取り入れるのは困難な状況にありました。しかし、低酸素室を利用することによって、LH・TL法の適用が可能になってきたといえるでしょう。

そこで、ここでは低酸素室居住を用いた研究結果をもとに、その生理・生化学的效果を整理するとともに、問題点についても考えることとします。

## 2. 低酸素室居住における生理・生化学的效果

低酸素室居住に関する研究結果を表1にまとめました。従来の高地トレーニングで報告されている生理・生化学的效果のうち、低酸素室研究においても効果が認められている項目については、滞在前からの増加率を示しています。また、それらの項目について、効果が認められた研究での、低酸素室における滞在条件（「相当高度（酸素濃度）」、「滞在期間」、「1日の滞在時間」）を表2に整理しました。

### (1) 赤血球新生の亢進

平地での酸素摂取能力を改善する重要な適応現象として、赤血球数やヘモグロビン濃度の増加が挙げられ、この赤血球新生の亢進には、EPO分泌の上昇が関わっています。そして、これまで低酸素環境に暴露した際のEPOの応答は、直後に上昇を始め、2～3日後にピークを迎えるとされています。

これまでの低酸素室居住に関する研究においても、低酸素室滞在15日目に測定を行ったLaitinenらの報告を除くと、滞在開始から5日以内に測定を行っており、その結果、滞在前と比較して有意な上昇が認められています。したがって、低酸素室居住によっても、EPO応答に関しては、従来の高地トレーニングと同様の効果が期待できるといえるでしょう。

その際、酸素濃度としては、2,000～3,000mの高度に相当する約16.4～14.5%が用いられています。一方、Hinojosaら（2000）は、異なる酸素濃度下での血清EPO濃度の変化を検討し、7,000フィート（高度約2,100m）以下の酸素濃度下では、腎臓での低酸素化は持続せず、EPO分泌の亢進も制限されると推察しています。したがって、赤血球新生を亢進するためには、少なくともこれと同等か、そ

表1 低酸素室居住に関する研究結果

研究者および滞在条件	被験者	EPO	網状赤血球数	Hb	赤血球量	2,3-DPG	パフォーマンス	その他
Laitinenら(1995) 2,500m 1日16~18時間 20~28日間	鍛錬者	84.4%	-	-	7.3%	14.9%	-	-
Ruskoら(1995) 2,500m 1日14時間 11日間	クロスカントリースキー選手	46.9%	66.7%	-	-	23.9%	-	-
Mattilaら(1996) 3,000m 1日18時間 11日間	自転車競技者	47.0%	97.8%	-	-	-	ペダリング速度の増加	-
Ruranenら(1996) 2,500m 1日の滞在時間不明 5日間	持久力競技者	57.0%	39.1%	-	-	17.6%	-	3日目まで血漿量減少
Piehl Aulinら(1998) 2,000mおよび2,700m 1日12時間 10日間	持久力競技者	増加 (2,000m) 85.0% (2,700m)	60.0% (2,000m) 38.0% (2,700m)	NS	-	-	VO2max変化なし	-
Ashendenら(1999) 2,650m 1日8~10時間 12日間	女性自転車競技者	-	NS	NS	-	-	-	-
Ashendenら(1999) 3,000m 1日8~10時間 23日間	男性持久的競技者	-	NS	NS	-	-	-	-
Ruskoら(1999) 2,500m 1日12~16時間 25日間	クロスカントリースキー選手	60.0%	-	-	5.0%	-	VO2max向上(3%)	-
Ashendenら(2000) 2,650m 1日8~11時間 5日間×3回	男性中距離走者	57% 反復では 差なし	NS	NS (増加)	-	-	-	-
Hillerら(2000) 2,100m 1日12.5時間 30日間	トライアスロン競技者	-	63.3%	5.5%	3週目に ピーク値	-	VO2max向上(7.9%) ペダリング仕事率向上 (21.2%)	除脂肪体重減少 (4週目には元に戻る)
Nummelaら(2000) 2,200m 1日16.5時間 10日間	400m走者	-	-	-	-	-	400m走タイム向上 乳酸値5および7mM での走速度向上	-
Robertsら(2000) 2,650~3,000m 1日8~10時間 12日間	トライアスロン競技者 および自転車競技者	-	-	-	-	-	VO2maxに変化はないが 酸素借増大(17.2%)	-
Strav-Gundersenら(2000) 2,440m 1日8時間 3日間	一般被験者	増加	-	-	-	-	-	-
Koistinenら(2000) 2,500m 1日12時間 7日間	一般被験者	70.7%	増加	NS	-	17.3%	-	-
村岡ら(2000) 2,500m 1日16および15時間 2日間	一般被験者	94.6% (10時間) 72.7% (15時間)	NS (10時間) 37.9% (15時間)	NS	NS	-	-	-
村岡ら(2001) 2,500m 1日10時間 6日間および3日間×2回	一般被験者	63.1% (6日間) 54.2% (3日×2)	33.9% (6日間) NS (3日×2)	NS	NS	-	-	-

・各項目において有意な変化が認められたものについては、滞在前からの変化率(%)を示した。  
 ・NS:測定を行ったが、有意な変化が認められなかった項目。

表2 低酸素室滞在で予想される生理・生化学的効果と滞在条件

生理・生化学的効果	滞在条件		
	相当高度	1日の滞在時間	滞在期間
EPOの上昇	2,000～3,000m	8～18時間	2日～30日間
網状赤血球の上昇	2,000～3,000m	10～18時間	2日～30日間
Hb濃度、赤血球量の上昇	2,100～2,500m	12.5～18時間	20日～30日間
2,3-DPGの上昇	2,500m	12～18時間	7日～28日間
VO <sub>2</sub> maxの向上	2,100～2,500m	12～16時間	25日～30日間
無気的能力の向上	2,100～3,000m	8～18時間	10日～30日間

れ以上の高度設定が必要であるといえるでしょう。

EPOの分泌上昇によって骨髄での赤血球新生が亢進した場合に、その指標として網状赤血球数が用いられますが、これはEPOの上昇を受けて2～3日遅れて増加すると報告されています。低酸素室居住において網状赤血球数の変化を検討した研究では、その測定を滞在7日以内に行っており、相当高度2,000m以上では、1日の滞在時間が12時間以上の条件で、滞在前と比較して有意な増加が観察されています。

一方、相当高度2,650～3,000mに1日8～11時間にわたって滞在させた研究では、否定的な結果を報告しているものもあります。しかしながら、われわれは相当高度2,500mに1日10時間滞在させた場合に、滞在6日目に網状赤血球数（赤血球数に対する割合）の有意な増加を認めています。それゆえ、低酸素刺激に対する馴化応答（受動的効果）を得るには、1日の中である程度長い時間（12～15時間程度）滞ることが望ましいと思われませんが、日本人では1日10時間でも、その可能性は高いと考えることもできます。

一方で、EPO濃度や網状赤血球数が上昇しているにもかかわらず、短期間滞在中ではHb濃度や赤血球数に変化は認められず、有意な上昇が認められているのは、滞在期間が20日間以上の場合です。骨髄での赤血球新生が開始され、それが血中に放出されるまでには7日間程度を要すると報告されていることから、短期間の滞在研究ではそれほどの変化は認められず、滞在期間として、より長期間の設定が必要であると推察されます。

ところで、Hb濃度や赤血球数は、トレーニングそれ自体によって増加する可能性もあります。しかし、LaitinenらやRuskoらの研究では、コントロール群（低地でトレーニングのみを行う群）では赤血球数の増加は認められておらず、それゆえ、これらの研究で観察された赤血球数の有意な増加は、低酸素室居住によるものであるといえるでしょう。

## (2) 2,3-DPG濃度の上昇

2,3-DPGはヘモグロビンと酸素の親和力を調節する物質であり、この上昇に伴いヘモグロビンからの酸素解離は促進され、組織への酸素供給が増大すると考えられています。これまでの研究において、低酸素環境では滞在初期（2～3日）に2,3-DPGが増加することが観察されています。また、低酸素室を利用した研究でも、滞在15日目に測定を行ったLaitinenらの報告を除いて、滞在3～4日目で2,3-DPGの有意な増加を認めています。なお、これらの研究では、相当高度としては2,500m、1日の滞在時間としては12時間以上が用いられています。

## (3) VO<sub>2</sub>maxの増大

低酸素室を利用したLH・TL研究において、VO<sub>2</sub>maxの向上を認めている研究は2編です。そのうちRuskoらの研究では、コントロール群として用いた平地滞在・平地トレーニング群では有意な変化が認められなかったことから、VO<sub>2</sub>maxの向上は低酸素室滞在に起因するものであると考えられます。また、注目すべき点は、この研究における滞在期間が、Hb濃度や赤血球数の上昇を認めたそれとほぼ同様であることです。それゆえ、平地でのパフォーマンス、特に持久的種目に対する効果が、主に赤血球新生に伴う酸素摂取能力の向上にあるとすれば、このことが期待される3～4週間の低酸素室への滞在が必要であると考えられます。

## (4) 無気的能力の向上

近年まで、高地トレーニングと同様に低酸素室の利用においても、主に持久的種目でのパフォーマンス向上に期待が寄せられてきました。しかし、高地滞在や低酸素室居住の初期段階においては、有気代謝機能が抑制され、それを補うために無気代謝機能が亢進すると考えることもできます。低酸素室を利用したこれまでの研究でも、10日間程度の滞在によって、400m走タイムや自転車ペダリング速度の改善、あるいは酸素借の増大が報告されており、無気のパワーを改善すると結論するものもあります。

## 3. 低酸素室居住における問題点

高地トレーニングの開始初期段階では、血漿量の減少とそれに相当するヘマトクリット値の上昇が報告されています。低酸素室を利用した研究でも、相当高度2,500mの条件において、滞在3日目で血漿量の減少を報告した研究もみられます。血漿量の減少による血液の粘性上昇は、筋血流量を減少させること等により、平地でのパフォーマンスに不利益に働く可能性もあります。また、Hillerらは、相当高度2,100mの低酸素室に1日に12.5時間、計30日間にわたって滞在させる研究を行ったところ、2週間目まで除脂肪体重が減少すること、そして、その後4週間目までにほぼ滞在前の値へ回復したことを報告しています。このことは、低酸素室に居住することによって、一時的に筋力が低下する可能性を示唆するも

のです。

さらに、われわれは2001年度の研究において、競技者を対象として、相当高度2,000～2,500mの低酸素室に1日10時間、計6日間にわたって滞在させたところ、相当高度2,000mにおいても、軽度ではあるものの、倦怠感・脱力感や睡眠障害などの体調不良を訴える者が少数現れました。このことは、低酸素室居住においても適応に対する個人差が存在していることを示唆するものでしょう。

#### 4. おわりに

低酸素室に一定期間居住することによって、赤血球新生の亢進や2,3-DPGの増大を通じて酸素摂取能力が高まることや、一方で、無気的能力が向上するとの報告もなされており、これらのことにより、平地でのパフォーマンス向上に効果的に作用する可能性が考えられます。その際に考慮しなければならないのは、酸素濃度（相当高度）、1日の滞在時間および滞在期間です。これまでの研究から、相当高度としては2,000～2,500m程度、1日の滞在時間としては少なくとも10時間以上、出来れば12～15時間程度、滞在期間としては、スプリント系種目では1週間～10日間程度、持久的種目では2～4週間程度が望ましいと思われる。

しかし、われわれの2001年度の研究結果からも、激しいトレーニングを行う競技者の中には、従来の高地トレーニングと同様に、体調不良を訴える者も出てくる可能性もあります。したがって、このような競技者を対象とする場合には、最初は低めの相当高度（2,000m程度）に居住し、徐々に相当高度を高くする（2,500m程度）ことも必要でしょう。

さらに、考慮しなければならない点は、低酸素室居住においても、そこに上手く適応できる者とそうでない者がいるということです。これまで、低酸素室を用いた実験研究において、必ずしも見解が一致しない原因として、この個人差が大きく影響している可能性も高いと思われます。個人差を生じさせるものとして、様々な要因が挙げられますが、とりわけ、低酸素に対する耐性は、低酸素室滞在時における体調を左右し、どれだけトレーニングをこなせるかどうかという本質的な問題と関わっているように思われます。この点について、Chapmanら（1998）は、4週間のLH・TL法によって、パフォーマンスに有意な改善が認められた群（responder）は、そうでない群（non-responder）と比較して、EPO濃度に有意な上昇がみられた事を報告しています。また、われわれは、低酸素刺激に対する換気応答（HVR）の高い人、あるいは、低酸素室滞中に伴う交感神経系活動の変化の大きい人ほど、EPO濃度の増加が大きいという結果を得ており（図2）、低酸素刺激に対する効果の個人差を検討する上で、HVRおよび交感神経系の応答の違いが有用な指標になるとも推察されます。

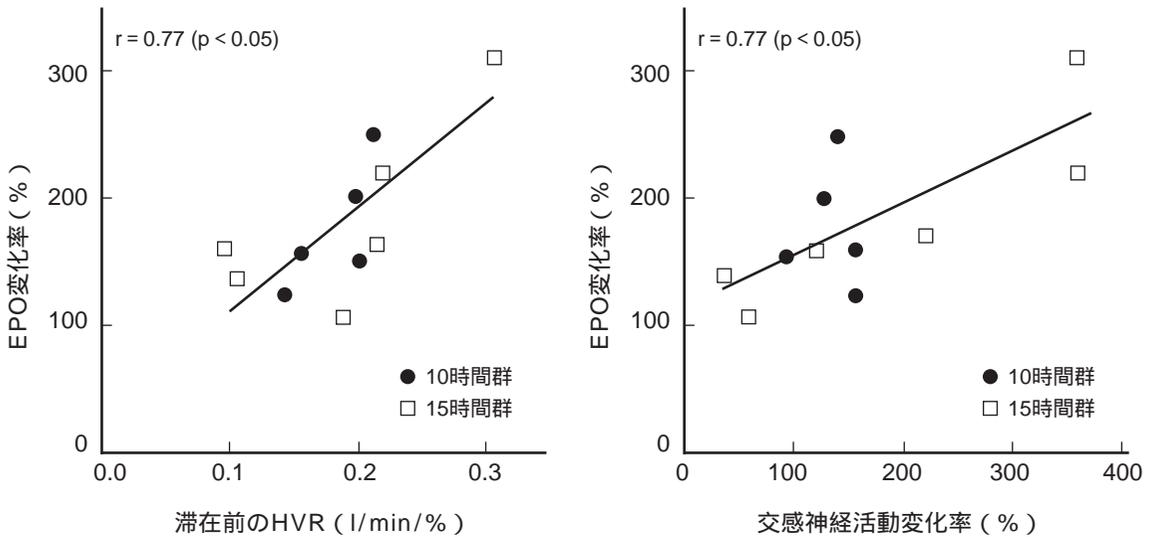


図2 低酸素室滞在前のHVR (左)および滞在による交感神経活動の変化 (右)とEPOの変化

いずれにしても、この問題は低酸素室居住における“成功”と結びつくことから、早急に解決すべき事柄でしょう。低酸素室利用のメリットが、居住環境（酸素濃度や滞在時間など）を自在に設定でき、体調管理が容易に行える事にある以上、個人の応答の違いによって、酸素濃度や滞在時間・期間の調整、ひいては低酸素室滞在の可否などを判断することが求められているといえます。



## 7 - (2) 低酸素施設でのトレーニング

小林 寛道

### 1. 低酸素環境での最大運動

低酸素環境を利用してトレーニングを行おうとする場合には、低酸素環境での運動が身体に対してどのような影響をもたらすかを生理学的にとらえておく必要があります。

健康な男子7名を対象として、常圧常酸素環境（酸素濃度20.9% $O_2$ ）と常圧低酸素環境（酸素濃度15.0% $O_2$ ）の2つの条件で、自転車エルゴメーターを用い、漸増負荷方法によって、疲労困憊に至るまでペダリングを行いました。負荷は1分毎に0.25kpずつ増加させて、ペダルの回転数は60回転/分としました。

その結果、疲労困憊に至る時間は、常酸素環境では18.3分、低酸素環境では10.6分と約9分の短縮がみられました。

最高心拍数は、常酸素環境178拍/分、低酸素環境179拍/分と差はみられませんでした。最大酸素摂取量は、常酸素環境3.0l/分、低酸素環境2.6l/分と、低酸素環境では、12.5%の減少がありました。

血中乳酸濃度は、最大運動直後で、常酸素環境9.4mM、低酸素環境8.6mMとあまり差がありませんでしたが、途中経過をみると、低酸素環境で乳酸濃度カーブの立ちあがり期が早期に生じてきます。このことは、低酸素環境では、乳酸が早い時期から蓄積されはじめることを意味しています。

近赤外分光測定装置（OM-200、島津製作所）を用いて、組織中のヘモグロビンの酸素化状態をモニターしてみると、常酸素環境の場合と比較して、低酸素環境での運動では、明らかに30% $VO_2max$ 強度以上の負荷でヘモグロビンの酸素化の割合が低下する様子がみられました。安静時の局所骨格筋の総ヘモグロビン値や酸素化ヘモグロビン値は、低酸素環境に入ると上昇します。これは低酸素環境によって組織への酸素供給が低下するため、血管を拡張させてこれを補償していると考えられます。

運動を開始すると、開始直後に局所骨格筋の酸素ヘモグロビンは一時的に増加しますが、その後、運動強度の増加にともなって、局所骨格筋の酸素化ヘモグロビンは低下していきます。

比較的低強度の運動時には、低酸素環境における局所骨格筋の酸素化ヘモグロビンは、常酸素環境とかわりありませんが、運動強度の増加にともなって、低酸素環境では、常酸素環境よりも酸化ヘモグロビンの減少が著しくなります。

すなわち、低酸素環境では、局所骨格筋への酸素供給が低下して、常酸素環境よりも早期に解糖系への依存率が大きくなると考えられます。

### 2. 低酸素環境での間欠的運動について

1回限りの単発的な短時間の高強度の運動は、運動のエネルギー発揮に酸素を必要としない無酸素代謝によるところから、低酸素環境であっても、運動に対する影響はほとんどないと考えられています。しか

し、短時間の高強度の運動をくり返す間欠的運動では、有酸素代謝のかかりもでてくることから低酸素環境の影響を検討しておく必要があります。

健康な男子8名を対象として、常酸素環境（20.9%O<sub>2</sub>）および低酸素環境（15.0%O<sub>2</sub>）で自転車エルゴメーター（パワーマックス - 、コンピ製）を用いて10秒間の全力ペダリングを170秒間の休息をはさんで8セット行った時の、心拍数、運動パフォーマンス、血中乳酸濃度、血中アンモニア濃度、局所骨格筋の酸素動態について調べてみました。自転車エルゴメーターの負荷は、各対象者の体重の5.0%となるようにしました。

その結果、心拍数はいずれの環境においても8セット目に最高値となり、常酸素環境154拍/分、低酸素環境155拍/分となり、両者に差がみられませんでした。発揮パワーについては、8セットとも常酸素環境と低酸素環境で差がなく、平均518～540Wという値でした。血中乳酸濃度や血中アンモニア濃度には、両環境で差がありませんでしたが、局所骨格筋の酸素化ヘモグロビンの回復時間は、明らかに低酸素環境で長いという結果が得られました。

これらの結果をみると、低酸素環境での全力ペダリングという間欠的な運動において、仕事量（発揮パワー）は常酸素環境とかわらなく実行することができますが、回復期にヘモグロビンが酸素を取り込んで回復する速さは低酸素環境では遅くなるということがわかりました。

### 3. 低酸素環境を利用した持続的トレーニングについて

普段は通常的环境（常圧常酸素）で生活し、トレーニングを行う時だけ低酸素環境を利用した場合にはどのような結果が生じるでしょうか。

健康な男子14名を対象として、常圧常酸素環境（20.9%O<sub>2</sub>）または常圧低酸素環境（15.0%O<sub>2</sub>）で5日間65%VO<sub>2</sub>maxの負荷で45分間の持続的自転車ペダリング運動を実施した時の生理的变化をとらえてみました。

その結果、5日間のトレーニング後では、運動中の乳酸濃度が低下し、心拍数は、第1日目は常酸素環境での運動に対して低酸素環境で約10拍/分高い水準であったものが、5日目には常酸素環境と同水準の心拍水準（150拍/分）で運動を遂行できるようになりました。VO<sub>2</sub>maxは、5日間のトレーニングで常圧常酸素環境グループが11.8%増加したのに対し、常圧低酸素グループでは、14.7%とより大きな増加がみられました。テストに用いた運動時間も1分程度延長しました。

このことから、5日間という短期間のトレーニングにおいても低酸素環境を用いることは、持続的な運動能力を向上させることに有効であるということが出来ます。

低酸素トレーニングにともなう推移をさらに20名の大学選手についてとらえてみると、トレーニングの進行にともなって低酸素環境では、当初みられた動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）の低下状態が徐々に改善されてくることが明らかとなりました。また、運動中心拍数、血中乳酸濃度の水準も低くなりました。す

なわち、常圧常酸素環境（20.9%O<sub>2</sub>）と常圧低酸素環境（14.5%O<sub>2</sub>：標高3000m相当の酸素濃度）において、90分間の安静状態を保ったのち、漸増負荷法により12～14分間の亜最大レベルの自転車運動を実施し、心拍数、動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）、血中乳酸濃度の推移を調べました。その結果、低酸素環境（14.5%O<sub>2</sub>）では心拍数が10～20拍/分高くなり、動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）は運動後半では85～83%に低下し、血中乳酸濃度の上昇は常酸素の場合より急激であることを示しました。常酸素環境では激運動の場合でも動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）が著しく低下するといった状況は生じにくいのですが、低酸素環境では、安静レベルですでに動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）の低下がみられ、運動によって動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）の低下が著しくなることが特徴的です。このことは、運動にともなって組織への酸素供給不足が進行することを示しており、動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）が低下した状態で運動を持続することによって組織内での低酸素環境に対する適応が生じると考えられます。

このことを利用すれば、必ずしも低酸素環境に滞在せず、トレーニングの時だけ低酸素環境を用いることによって、体内組織での酸素取り込み能力を高めることができるのではないかと予想されます。

成人男子18人を対象に、14.5%O<sub>2</sub>の低酸素室に毎日2時間滞在し、65%VO<sub>2</sub>maxの負荷で45分間の自転車運動を9日間連続して実施しました。コントロール群は、運動を行わずに同条件の低酸素環境に2時間滞在することを9日間実施しました。その結果、血液性状（ヘモグロビン、ヘマトクリット、網状赤血球、総タンパクなど）には、トレーニング前後で有意な差は認められず、造血の可能性もみられませんでした。しかし、トレーニング群では最大酸素摂取量と乳酸閾値に有意な向上がみられました。また、運動中の動脈血酸素飽和度（SpO<sub>2</sub>）は、トレーニングの進行に伴い、低下の割合が少なくなり、心拍数の水準も下がり、血中乳酸濃度も低い水準で運動が遂行されるようになりました。注目すべきこととして、血糖値の利用が少なくなり、代わりに血中アミノ酸の濃度が高まることによって、代謝系に変化が生じたことが示されました（図1～6参照）。

一般に、低酸素環境では、筋の緩衝能の増加がはかられ、細胞の無気的エネルギー生成の改善が生じます。低酸素環境で生じるアンモニア濃度の上昇は、こうした無気的エネルギー代謝の亢進がはかられることを示すものといえます。また、低酸素環境では、血管の内皮細胞から一酸化窒素が生じ、血管の弛緩に働くと考えられています。また、低酸素ストレスに対する自律神経の反応も、トレーニングが進行するにしたがって、少なくなることが報告されています。

#### 4. まとめ

低酸素環境を利用したトレーニングでは、有酸素的能力を改善するとともに、無気的エネルギーを産生する機序に刺激を与え、無気的作業能力を改善することに有効であると考えられます。

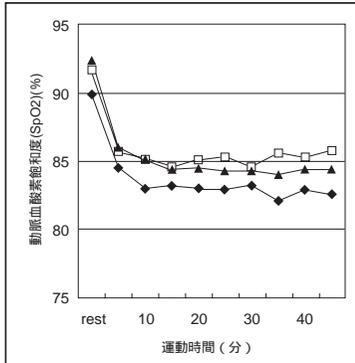


図1 トレーニングによる動脈酸素飽和度の変化

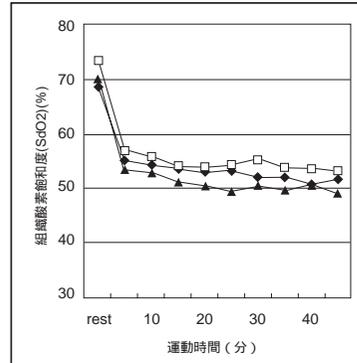


図2 トレーニングによる組織酸素飽和度の変化

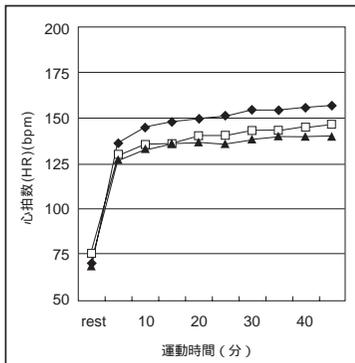


図3 トレーニングによる心拍数の変化

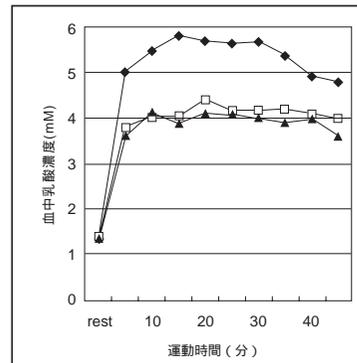


図4 トレーニングによる血中乳酸濃度の変化

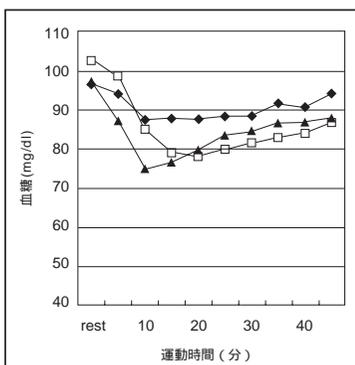


図5 トレーニングによる血糖の変化

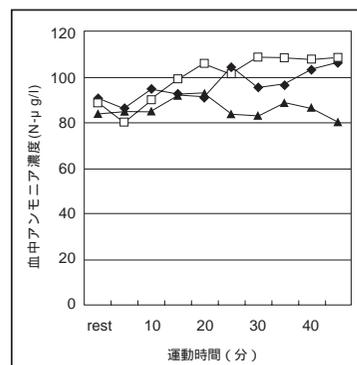


図6 トレーニングによる血中アンモニア濃度の変化

常圧低酸素（14.5%O<sub>2</sub>）に1日2時間滞在し、65% VO<sub>2</sub>max の自転車運動を45分間行うトレーニングを9日間継続した場合の運動中生理指標の変化

（ トレーニング1日目、 トレーニング5日目、 トレーニング9日目）

（小林ら、2001）

## 7 - (3) 常圧低酸素環境の利用

前嶋 孝

### 1. はじめに

スピードスケートは、その運動特性から、たとえ長距離種目であっても、脚筋に酸素不足状態を生じ、競技直後の血中乳酸濃度が15～20mmol/lに達します。このような特性をもった競技に対するトレーニング内容は、当然、乳酸に対する耐性を高める、あるいは、筋の緩衝能力を高めるために、強度の高い運動形態が必要となります。したがって、高地において、運動強度を抑えた、しかも、ランニングなど運動様式の違ったもっぱら有酸素的運動だけでは、たとえ酸素運搬能力が高まったとしてもスケート選手としての体力的特性を高めることにはなりません。また、特にスケートリンクと高地との地理的条件を満たす場所はほとんどありません。

そこで、人工的高地環境（常圧低酸素環境：以下低酸素環境とする）を試作（前嶋,1995）し、平地あるいは準高地にいながら一日の一定時間、低酸素環境を利用するいくつかのトレーニング法を試みました。その結果、以下のようなトレーニング法において、performanceの向上が示唆され、血液量、エリスロポエチン、ヘモグロビンあるいはヘマトクリットの増加といった、従来の高地馴化としての指標とperformanceとの関係のみではなく、むしろ、低酸素環境において比較的高強度の運動を負荷することによる新たな生理学的効果を生み出していることが推察されました。

### 2. 低酸素トレーニングによる生理学的効果

1995年9月に低酸素室試作第1号による実験が行われました。この低酸素室は、高さ1.9m、幅2mおよび奥行き1.9mの気密性の高い塩化ビニール製のテントでした。テント内の酸素濃度は16.4%（標高2,000mを想定）に設定し、1日に低酸素室で過ごす時間は原則として夜9時から朝7時までの10時間としました。また、低酸素室滞在期間中は毎日1時間の低酸素を吸入しながらの30分から40分の自転車エルゴメータによる中等度（後述）の運動を加えるというトレーニングを1週間から10日間行いました。そして、トレーニング期間については効果のあがる最低限の日数を目指そうとしました。

以上のような低酸素トレーニング実験を数十回実施した結果から、以下のような生理的主観的データが得られています。

低酸素室に入室することによって安静時における動脈血酸素飽和度は減少し、心拍数は増加する。

低酸素運動中の動脈血酸素飽和度は運動負荷の増加に伴って低下する。

低酸素トレーニングの経過に伴い、同一負荷運動中の心拍数は減少し、SpO<sub>2</sub>は増加する（図1）。

1週間から10日の低酸素トレーニングによって自転車エルゴメータによる同一運動負荷中の血中乳酸濃度は低下する傾向を示し（図2）、仕事量が増加する（図3）。

主観的には、運動中の呼吸が楽になり、最大努力の測定において、苦しくなってきたのがんばりがきくようになる。

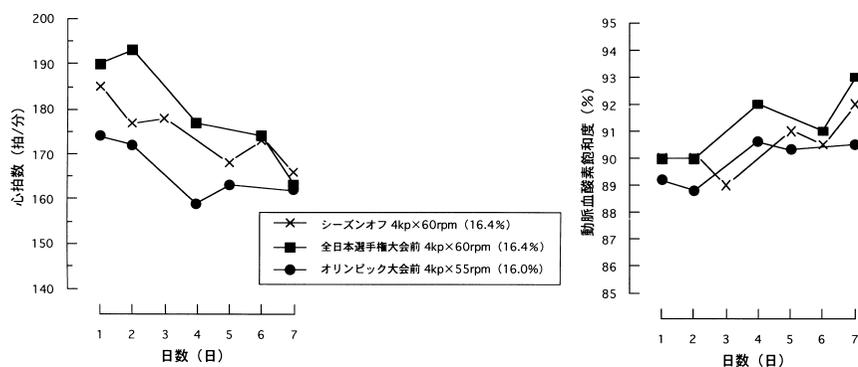


図1 低酸素トレーニングに伴う心拍数および動脈血酸素飽和度の変化

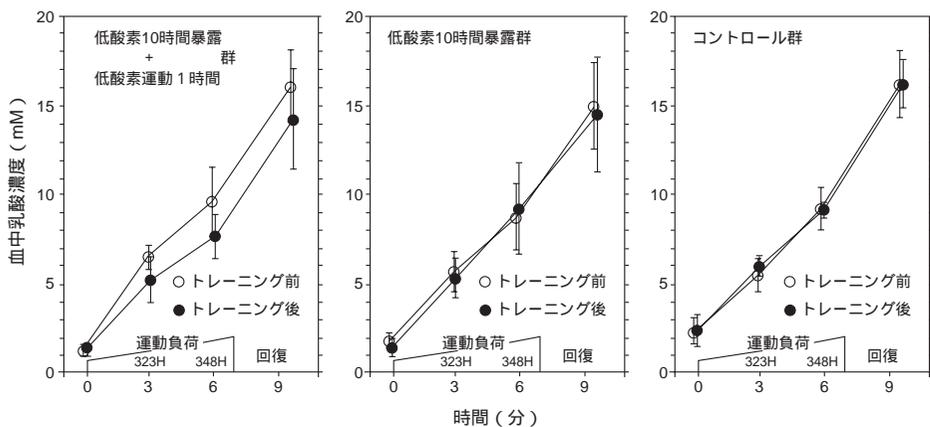


図2 低酸素トレーニングによる血中乳酸濃度の変化

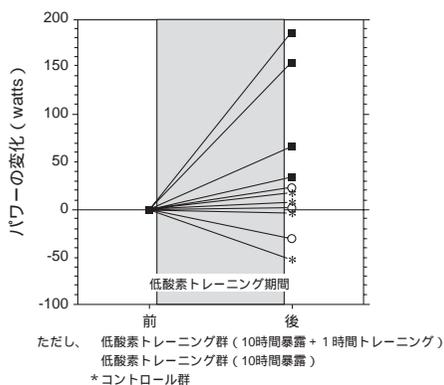


図3 低酸素トレーニングによるパワーの変化

以上の結果は、人工的低酸素環境の利用でも高地と同じ生体反応が得られることが確認されたとともに、主観的にも持久力の増大を感じており、低酸素トレーニングの有効性が示唆されました。

### 3. 低酸素環境における適正な酸素濃度、トレーニング強度および期間

平地でのトレーニングを通常どおりに行いながら酸素濃度16.4%（標高2,000m相当）の低酸素環境を利用すると多くの選手が低酸素トレーニング開始4～5日目から身体のだるさや疲労感を訴えます。これは低酸素環境利用による身体的回復の遅れが考えられます。いずれにしても、疲労状態のままトレーニングを継続することのないように配慮しなければなりませんので、低酸素トレーニングの期間は1週間程度ではないかと思われます。そして、低酸素トレーニング後、この身体のだるさを解消させるために1週間程度の日数が必要でした。また、低酸素トレーニングは低酸素室に滞在するのみでなく、同じ低酸素を吸入しながらの運動を負荷しますが、この場合、現在のところSpO<sub>2</sub>が80%以下にならない程度の負荷を設定しています。ただし、この設定については今後さらに検討する必要があります。

また、酸素濃度を15.4%（標高2,500mを相当）の低酸素室内に一日10時間滞在することに加えて酸素濃度15.4%で運動負荷を行うと、低酸素運動中、「あくびがでた」、「頭痛がする」、「頭がボーとする」などの自覚症状があり、低酸素トレーニングの後半は多くの選手が強い身体のだるさを訴えました。

このように、低酸素室の酸素濃度を低くすると低酸素トレーニング中、生理的にも主観的にも疲労の傾向を示し、途中でトレーニングを中止せざるを得ない選手もいました。低すぎる低酸素環境に滞在するために平地におけるトレーニングの強度をあまりにも軽減しなければならないようであれば、競技力向上への効果は薄れることが考えられます。

したがって、低酸素室の利用は酸素濃度を16.4%で1週間程度とし、何週間かのインターバルを置いてこれを繰り返す方法が良いと思われます。

### 4. 低酸素環境におけるその他の利用法

さらに、低酸素環境の利用法について著者が試みたいいくつかの結果を以下に示します。ただし、以下のいずれのトレーニング方法においても共通していることは、15.4%～16.4%の低酸素気を吸入しながらの運動負荷が課せられていることです。その理由は、これまでの著者の低酸素環境利用実験において、低酸素室滞在のみにおけるperformanceへの効果は見出されていないからです。

#### (1) インターバル低酸素トレーニング

高地への馴化は一般に、標高2,000mで2～3週間とされています。したがって、低酸素環境を利用したトレーニングにおいてもある程度のトレーニング期間が必要であろうと考えます。しかし、前述のように、低酸素トレーニング開始4～5日目で体のだるさを訴えることから、16.4%の低酸素環境を利用するトレーニング期間を3日間とし、4日間のインターバル（平地）を置いて3回繰り返すことを試みました（図4）。

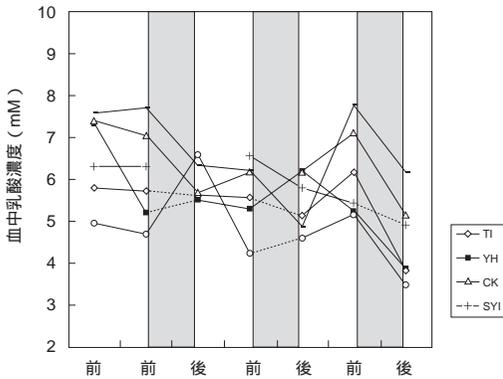


図4 インターバルトレーニングに伴う血中乳酸濃度の変化

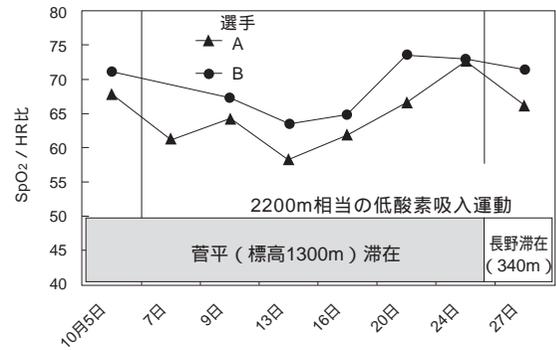


図5 準高地滞在 - (平地+低酸素) トレーニングにおける SpO<sub>2</sub> / HRの変化

その結果、上述のトレーニングを3回繰り返すと、一週間連続して低酸素トレーニングを行った場合と同様に、自転車エルゴメータによる同一負荷運動中の血中乳酸濃度が顕著に減少し、漸増負荷法(2.5kpで4分間以後4分毎に0.5kpずつ漸増)による運動持続時間も増加しました。低酸素環境の利用は3日間程度でもそれを繰り返すことによって、一定の効果のあることが示唆されました。

## (2) 準高地滞在 - (平地+低酸素) トレーニング

オリンピックが長野で開催されることを機会に、標高1,300m(菅平)に滞在しながら、標高340m(長野スケートリンク)の平地と低酸素環境(2,200m相当)の両方を利用するという方法を2週間実施しました。その結果、菅平に滞在しながら2,200m相当の低酸素運動を2~3日のインターバルで5~6回実施した選手の同一運動負荷中のSpO<sub>2</sub> / HRはトレーニングに伴って徐々に高い値を示しました(図5)。また、このトレーニング期間中に体のだるさを訴える者はいませんでした。このように、滞在場所を準高地にして、氷上トレーニングは平地で行う場合、常圧低酸素を使ったトレーニングは、やや低い低酸素濃度(15.4%)での運動負荷も可能ということになります。

## (3) 平地滞在 - 低酸素トレーニング

低酸素環境は、テントや民家の部屋など何処でも比較的容易に設置することができます。しかし、滞在する人数が多ければ多いほど装置も大きくなり、移動や設置が容易ではありません。そこで、マスクを介して低酸素気を吸入しながら運動ができる1人用の小型の低酸素発生装置(YKS社製)を用いることを試みました。すなわち、低酸素環境には滞在せず、低酸素気を吸入しながら運動することだけに利用するのです。自転車エルゴメータにおける運動負荷を週4回6週間実施し、その中に図6に示すような酸素濃度16.4%および17.9%の低酸素を吸入しながらのトレーニングを組み入れました。

その結果、低酸素(16.4%)吸入による同一負荷(5kp:60rpm)運動中のSpO<sub>2</sub>は約10%増加し、心

拍数は約15拍/分減少、血中乳酸濃度は約4 mmol/l減少しました。さらに、常酸素（20.93%）での同じ運動負荷中のSpO<sub>2</sub>には変化が認められませんが、心拍数および血中乳酸濃度の減少が認められました。

現場においては、スピードスケート選手を対象に全日本選手権大会2週間前から大会5日前まで、通常の氷上練習に加えて、標高2,000m相当の低酸素気を吸入しながら中等度の運動を1日30分間実施し、このトレーニングを行った選手のうち2名が、全日本選手権大会において5,000mおよび10,000mの両種目に1位および2位となり、スピードスケート2001年世界選手権大会日本代表選手となりました。また、低酸素環境に滞在せず、標高2,000m相当の低酸素室で運動強度80～90%HRmaxの強度で1回あたり30分間、週3回の頻度で5週間継続した結果、OBLA強度付近での血中乳酸濃度が大幅に低下し、このトレーニング直後に行われた自転車競技会において各選手とも自己新記録を大幅に更新したという研究報告もあります。

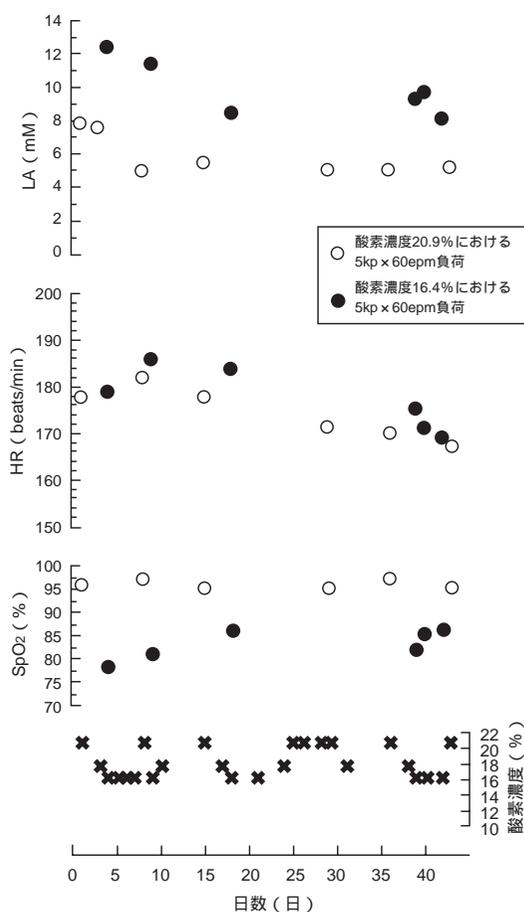


図6 平地滞在 - 低酸素トレーニングに伴う同一運動負荷中SpO<sub>2</sub>、心拍数および血中乳酸濃度の変化

### 5. 低酸素環境における適応能力の個人差への対応

上述のような、低酸素環境を利用したいいくつかのトレーニング方法を実施している中で、低酸素に対する適応能力に大きな個人差があることが分かりました。その差をSpO<sub>2</sub>でみると、標高2,000m相当の低酸素環境において、安静状態で94～97%の範囲の個人差があり、同じ環境で運動すると、負荷の増加に伴って、その差はさらに大きくなりました。もちろん、酸素濃度が低くなれば、その差はさらに大きくなります。たとえば、標高2,200m相当の低酸素環境で心拍数160拍/分程度の運動を行った場合、SpO<sub>2</sub>が高い被験者では93%程度までの低下ですが、低い被験者では86%まで低下しました(図7)。そして、低酸素環境下におけるSpO<sub>2</sub>の低下が大きい被験者は、低酸素トレーニングに伴って疲労感を訴え、体調を崩しやすい傾向にありました。このような傾向は、上述した短期間の低酸素トレーニングを繰り返すことによって大幅に解消されますが、また、このような選手が低酸素トレーニングを何回繰り返しても低酸素環境でのSpO<sub>2</sub>の値が高い選手と同じになるという傾向は見られていません。したがって、日頃のSpO<sub>2</sub>の変化を指標に、個人ごとに酸素濃度、トレーニング強度あるいは低酸素環境の利用頻度をコントロールする必要があります。

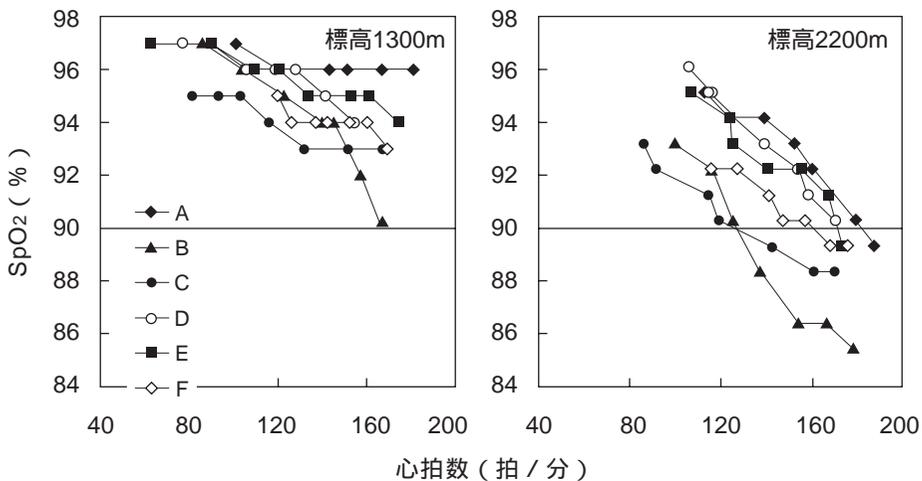


図7 低酸素環境における運動中SpO<sub>2</sub>の個人差