

常圧低酸素環境での滞在およびトレーニングが高地滞在中の生理的応答に及ぼす影響
～競泳日本代表選手を対象とした実践的検討～

研究代表者:鈴木康弘

目次

I. 緒言	2
II. 方法	3
1. 低酸素プール施設の概要	3
2. 被験者	3
3. 実験デザイン	4
(1) 事前合宿	4
(2) 高地トレーニング	5
(3) 測定項目	6
III. 結果	7
1. 睡眠中の動脈血酸素飽和度および脈拍数	7
2. 血液検査	8
3. 自転車テスト	9
4. スイムテスト	10
IV. 考察	12
V. 総括	14
VI. 参考文献	15

常圧低酸素環境での滞在およびトレーニングが高地滞在中の生理的応答に及ぼす影響
～競泳日本代表選手を対象とした実践的検討～

鈴木康弘

要 約

【目的】本研究では、競泳日本代表選手を対象として、世界に例のない低酸素プール施設を用いた短期間の競泳トレーニングが血液性状および生理的応答に及ぼす影響について検討すること、さらにその直後に行われる高地トレーニングでの高地順化に及ぼす影響について検討することを目的とした。

【方法】2007 年度競泳日本代表選手 3 名を対象として、中国昆明において 3 週間の高地トレーニングを3回実施し、それぞれの高地トレーニングに先立って 3 条件 (Live-Low Train-Low: LL、Live-High Train-High: HH、Live-High Train-Low: HL) の事前合宿を行った。事前合宿前後および高地トレーニング後に血液検査、自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストおよびスイムテストを実施し、すべての事前合宿および高地トレーニング期間中において、携帯型酸素飽和度モニターを用いた睡眠中の動脈血酸素飽和度を測定した。

【結果】短期間の事前合宿前後を比較すると、HHとHLの両方で赤血球およびヘモグロビン濃度が増加する傾向にあったが、乳酸カーブテストでは HH においてのみ同一強度での血中乳酸濃度が低下する傾向にあり、スイムテストでは HL で泳速が速くなる傾向が認められた。一方、高地順化の指標として用いた高地トレーニング開始1週間までにおける動脈血酸素飽和度は、HHがHLおよびLLと比較して高値を示した。

【結論】短期間の低酸素プール施設でのトレーニングと低酸素宿泊とを組み合わせることにより、その後に行われる高地トレーニングでの高地順化を早めることが示唆され、これには酸素運搬能力および筋の酸化能力の改善が関与している可能性が示唆された。

勤務先

国立スポーツ科学センター スポーツ科学研究部
〒115-0056 東京都北区西が丘 3-15-1
TEL: 03-5963-0231 FAX: 03-5963-0232

I. 緒言

近年、高地トレーニングが様々な競技において実施されるようになってきており、日本の陸上競技長距離種目や水泳競技競泳種目においては、トレーニングの“ツール”として必要不可欠なものになっている。しかしながら、高地トレーニングの実施により必ずパフォーマンスが向上する訳ではなく、多くの競技者が高地トレーニングでの失敗を経験している。高地トレーニングが成功するのか、失敗するのかを左右する要因は様々であるが、「トレーニング期間中における良好なコンディションの維持」が高地トレーニングの成否を左右する最も重要な要因であろう。言い換えれば、低圧低酸素環境への慢性暴露に対していかに早く順応できるかが重要であると言える。一般に、高地滞在直後は、平地と比較して安静時における換気量および心拍数の上昇、動脈血酸素飽和度の低下が急激に起こり、3日から1週間ほどかけて徐々に回復していく(高地順化)。この高地順化には大きな個人差があるが、もし高地滞在直後から激しいトレーニングを行えば、高地順化をすることなく急性高山病のような症状に見舞われ、体調を崩しやすいことが良く知られている。その一方で、低酸素環境において事前順化を行うことにより効果的な高地トレーニングが実施できることが示唆されている(Beidleman et al. 1997, Benoit et al. 1992, Geiser et al. 2001, Richalet et al. 1992, Savourey et al. 1994, 1998)。基本的に事前順化は、低圧チャンバーや低酸素ガス吸入装置を用いて個別に行われることが多く、先行研究によると、低酸素宿泊(5日間, 8時間/日, 4,500〜8,500 m)(Savourey et al. 1998)や、中強度の自転車運動(3週間, 6日/週, 2時間/日)(Benoit et al. 1992)または高強度の自転車運動(6週間, 5日/週, 30分/日)(Geiser et al. 2001)が行われている。そしてこれらの研究では、被験者は事前順化プログラム後の高地滞在ではより早く適応し、より効果的にトレーニングを行うことができたことが示されている。

国立スポーツ科学センター(Japan Institute of Sports Sciences: JISS)は、低酸素宿泊室、低酸素トレーニング室および低圧環境実験室を有しており、これらを利用して低酸素または低圧環境でのトレーニングをどのように適用するのが競技者の身体能力向上に有用であるのかを検証し、あわせて高地環境での滞在およびトレーニングで得られる効果とも比較しながら、低酸素環境での滞在およびトレーニングに対する指針を各競技団体の競技者および指導者へ提供することを目的として研究をすすめている。これまで、JISSにおける低酸素環境でのトレーニングは、運動様式がトレッドミルや自転車エルゴメーター等の陸上運動に限られており、水泳選手が低酸素トレーニングを行う場合でも自転車エルゴメーターを用いてトレーニングを行っていた。しかし、トレーニングの専門性の原則からすると、水泳選手は水泳運動で低酸素トレーニングを行うことが望ましいと考えられる。JISSでは2004年度に低酸素プール施設を開発し、実際の競泳トレーニングの利用に問題がないことを確認しているが、競泳選手が高地トレーニングを実施する際の事前順化にこの施設が有効であるのか否かについては検討していない。

そこで本研究では、競泳日本代表選手を対象とした実践的な研究として、低酸素プール施設を用いた短期間の競泳トレーニングがその後に行われる高地トレーニングでの高地順化および各種生理的応答に及ぼす影響について検討することを目的とした。

Ⅱ. 方法

1. 低酸素プール施設の概要

低酸素プール施設は、国立スポーツ科学センター地下 1 階にある競泳プール(50m×8 レーン)に備え付けられている。この施設は鉄製のパイプを天井から吊り、ビニール製の透明膜材を装着する方式であり、普段は膜材を取り外し、パイプは天井レールに沿ってプール両脇の壁際に収納できるようになっている(写真)。

外形寸法は、長さ 50m、高さ 1.5m、幅 3.5m であり、1 レーンのみを低酸素環境にすることができる仕様である。低酸素発生には膜分離方式を採用している。これは酸素が通りにくい特殊な膜(酸素分離膜)に加圧された空気を流すことによって、酸素濃度が大气よりも低い低酸素空気を作る方式である(図 1)。この低酸素空気と大気を混合して 17.4～13.6%(標高 1500～3500m 相当)の範囲内の低酸素空気を作り出すことができる。

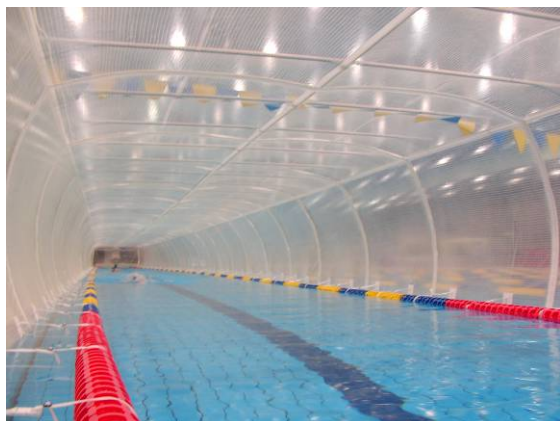
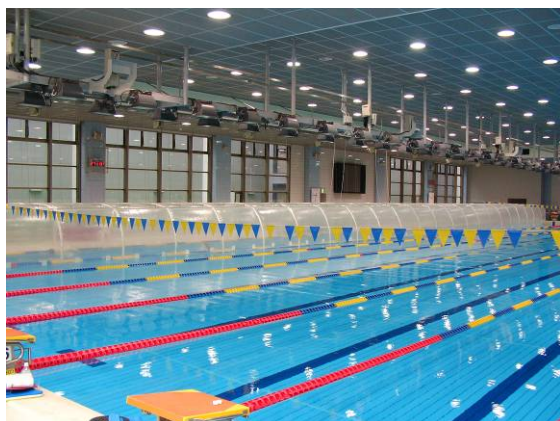


写真 低酸素プール施設の外観(上)
および内部(下)

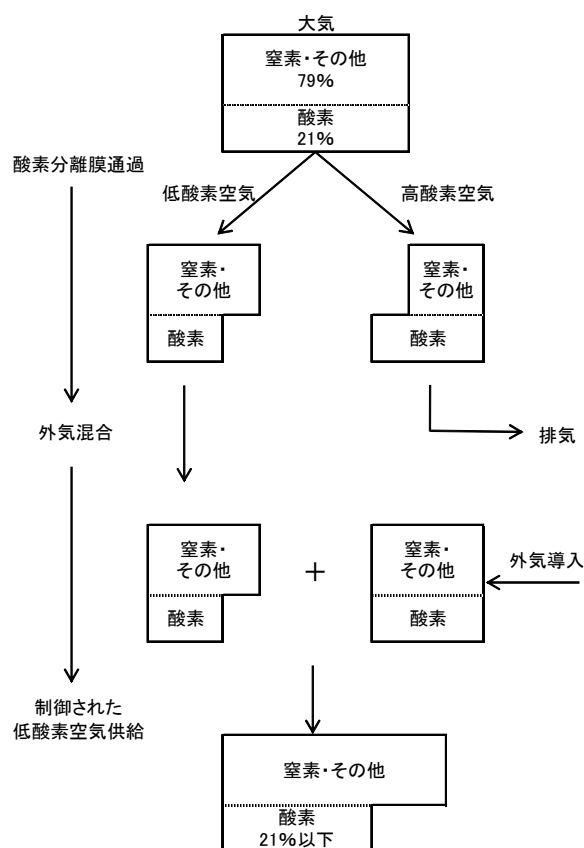


図 1 低酸素発生原理

2. 被験者

被験者には 2007 年度競泳日本代表選手 3 名を用いた。すべての被験者に実験の主旨、内容および危険性について説明をし、参加の同意を得た。また、いずれの被験者も過去に 2～4 週間の高地トレーニングを 5 回以上経験していた。被験者の身体的特性を表 1 に示した。

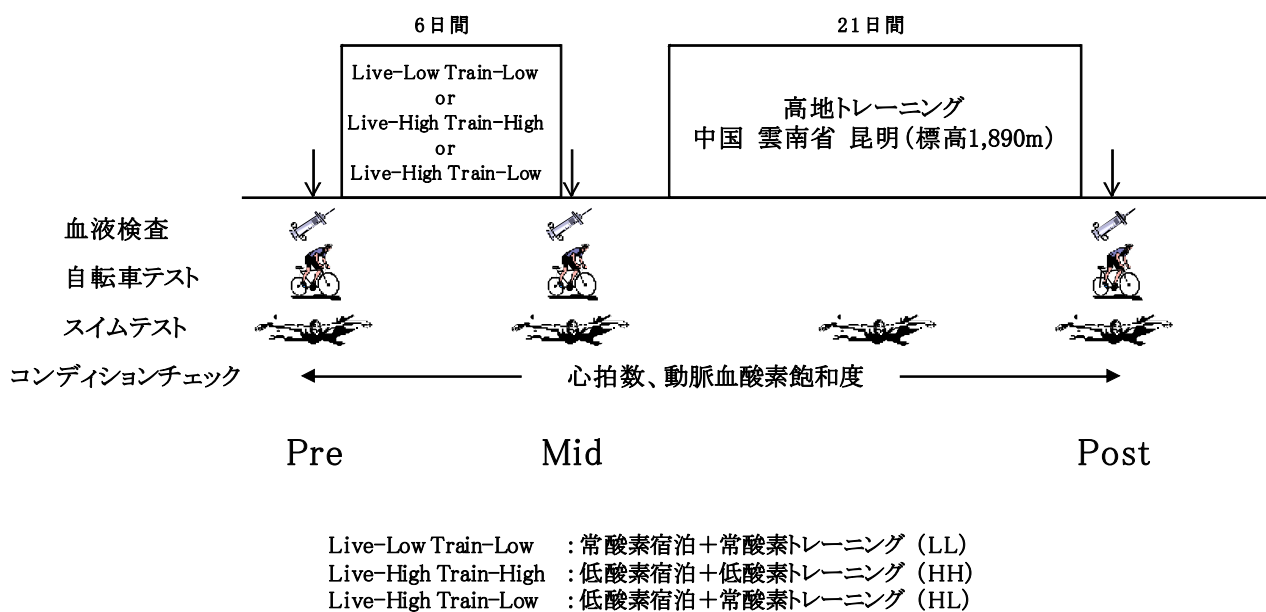
表 1 被験者の身体的特徴

被験者	性別	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)	専門種目
A	男	27	181.6	79.9	11.7	自由形
B	男	27	177.3	70.7	10.8	バタフライ
C	女	28	163.3	57.1	17.3	バタフライ

3. 実験デザイン

すべての被験者は事前合宿を行った後、中国昆明において 3 週間の高地トレーニングを行う日程の合宿を3回実施した(第1回:2007 年 5 月 31 日～2007 年 6 月 21 日、第2回:2007 年 10 月 9 日～2007 年 11 月 7 日、第3回:2007 年 10 月 20 日～2008 年 1 月 18 日)。

事前合宿は、宿泊およびトレーニング中における酸素濃度の条件を変えて実施した。事前合宿前後および高地トレーニング後に血液検査、自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストおよびスイムテストを実施した。なお、高地トレーニングの 14 日目にもスイムテストを実施した。またすべての事前合宿および高地トレーニング期間中において、携帯型酸素飽和度モニターを用いた睡眠中の動脈血酸素飽和度を測定した。



(1) 事前合宿

事前合宿は、高地トレーニングに先立って国立スポーツ科学センター (Japan Institute of Sports Sciences: JISS) において宿泊およびスイムトレーニングを行った。

事前合宿の第1回目は常酸素宿泊と常酸素トレーニング(Live-Low Train-Low:LL)、第2回目は低酸素宿泊と低酸素トレーニング(Live-High Train-High: HH)、第3回目は低酸素宿泊と常酸素トレーニング(Live-High Train-Low:HL)を行った。なお、低酸素宿泊時の酸素濃度は16.4%(標高2000m相当)とし、トレーニング、食事、風呂等を除いた時間はできる限り低酸素宿泊室に滞在するように指示した。

競泳プールでのスイムトレーニングは、主に有酸素性能力の向上を目的とした約5000～7000mの内容であった。低酸素プールでのトレーニングにおける酸素濃度は16.4%(標高2,000m相当)とし、水温は27度、室温27度、湿度90%の条件であった。

表2に事前合宿時のスケジュールを示した。事前合宿は7泊8日のスケジュールであり、被験者は測定の前日にチェックインし、その日はどの条件においても常酸素宿泊とした(Day 1)。2日目の朝食前に血液検査のための採血を実施し、その日の午前中は自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストを行い、午後はスイムテストを行った(Day 2: Pre)。3日目から6日目まで合計5回のスイムトレーニングを行い、7日目に2日目と全く同じ内容のテストを行った(Day 7: Mid)。なお、第1回目の事前合宿は、Day 7から行い、3日目に高地トレーニングへ出発するスケジュールであった。

表2 事前合宿時のスケジュール

	AM	PM
Day 1	-	チェックイン
Day 2	血液検査、自転車テスト	スイムテスト
Day 3	○	OFF
Day 4	○	○
Day 5	○	OFF
Day 6	OFF	○
Day 7	血液検査、自転車テスト	スイムテスト
Day 8	高地トレーニングへ出発	

○:スイムトレーニング

(2) 高地トレーニング

高地トレーニングの合宿地は、中国雲南省の省都である昆明(標高1,886m)とした。昆明は中国の南方に位置し、1年中比較的温暖な気候である。また、日本から5時間程度で移動することができ、時差が1時間であるため、時差調整を行う必要がなくトレーニングできることが最大の魅力である。さらに2008年夏期オリンピックの開催地が中国北京であったことから、高地トレーニングを通じて中国文化に触れる機会を作れることも昆明を選んだ理由であった。

高地滞在中のトレーニングはいずれの合宿においても、基本的には午前・午後合わせて5回練習して1回オフ、5回練習して2回オフを繰り返すスケジュールであった。また、5回練習のうち最初の4回は水中でのトレーニングが中心であり、5回目はウエイトトレーニングを中心とした内容であった。それぞれの高地トレーニングにおけるトレーニングスケジュールおよびトレーニング強度の割合を表3に示した。

表 3 高地トレーニングにおけるトレーニング内容

	第 1 回 5/31～6/21	第 2 回 10/16～11/6	第 3 回 12/27～1/17
期間 (日)	22	22	22
合計トレーニング回数 (回)	25	27	27
1 日の平均泳距離 (m)	9,679	8,656	6,872
トータル泳距離 (m)	164,550	155,800	123,700
トレーニング強度 [A1, A2] の割合 (%)	46.3	56.6	63.2
トレーニング強度 [EN1, EN2, EN3] の割合 (%)	46.0	41.4	25.7
トレーニング強度 [AN1, AN2, AN3] の割合 (%)	7.8	2.0	11.1

これらの高地トレーニングは、2008 年 4 月に開催される日本選手権兼北京オリンピック代表選考会に向けての強化合宿として位置づけられており、高地において基礎的持久力およびスピード持久力の向上を目的として実施した。

高地トレーニングのすべての日程終了後はそのまま JISS に宿泊し、次の日は血液検査、自転車テスト、スイムテストを Pre および Mid と同じスケジュールで行った(Post)。

(3)測定項目

1)睡眠中の動脈血酸素飽和度および脈拍数

事前合宿および高地トレーニング中のすべての夜間睡眠中における動脈血酸素飽和度(SpO₂)および脈拍数(HR)をパルスオキシメーター(Pulsox ME300:コニカミノルタ社製)を用いて測定した。

被験者はディスポーザブルタイプのプローブ付きパルスオキシメーターを人差し指に装着し、就寝時から起床時までの HR および SpO₂を 1 秒ごとに記録した。得られたデータから睡眠時間の平均値を算出し、それぞれ睡眠中の HR および SpO₂とした。

2)血液検査

事前合宿の前後において朝食前に肘静脈から採血を行い、赤血球、ヘモグロビン、ヘマトクリット、網状赤血球、エリスロポエチン、フェリチンを測定した。

3)自転車テスト

事前合宿の前後および高地トレーニング直後に、自転車エルゴメーター(Power MaxVII:COMBI 社製)を用いて乳酸カーブテストを実施した。任意のウォーミングアップ後、回転数 60rpmで男性は 120W、女性は 60W から 3 分ごとに 30W ずつ負荷を漸増し、疲労困憊まで行わせた。各ステージ終了 30 秒前に指先から採血し、簡易血中乳酸測定器(Lactate Pro:アークレイ社製)を用いて各ステージの血中乳酸濃度を測定した。また運動中の心拍数をハートレートモニター(Polar 810i:Polar 社製)を用いて測定

した。

4) スイムテスト

事前合宿の前後および高地トレーニング直後に、50m プールにおいてスイムテストを行い、タイム、血中乳酸濃度を測定した。いずれのテストの際も、同じ内容のメニューでウォーミングアップを行った後にスイムテストを開始した。

スイムテストの内容は4×50m を1セットとしたインターバル泳を異なる泳速度とサイクルタイムで5セット行う漸増負荷泳とした。各セットの泳速度は最大努力の80、85、90、95、100%とし、それぞれのセットは一定のタイムで泳ぐように指示した。なお5セット目については1本目から最大努力で泳ぐように指示した。各セットのサイクルタイムはそれぞれ、50、60、70、80、90秒とし、セット間の休息時間は、それぞれ4分40秒、5分30秒、6分20秒、7分10秒とした。各セット終了直後に指先から採血し、簡易血中乳酸測定器(Lactate Pro:アークレイ社製)を用いて血中乳酸濃度を測定した。

Ⅲ. 結果

1. 睡眠中の動脈血酸素飽和度および脈拍数

図3に、事前合宿における睡眠中の SpO_2 の変化を示した。いずれの選手も常酸素宿泊である1日目から、低酸素宿泊である2日目にかけて大きく低下し、そこから徐々に増加する傾向にあり、HHがHLと比較して高い傾向にあった。一方、就寝時におけるHRは、常酸素宿泊から低酸素宿泊に変わっても大きな変化はみられず、HHとHLの条件間に差はみられなかった。なお、HLの3日目は低酸素発生装置の異常があり、就寝時に低酸素状態にならないというトラブルが発生したため、データから削除した。

表4に、高地トレーニング滞在1日目、滞在3日間平均および滞在7日間平均の SpO_2 を事前合宿の条件ごとに示した。滞在1日目、すなわち昆明に到着した日の睡眠時における SpO_2 は3名の被験者全員でHHにおいて高く、LLにおいて低いことが認められた。また、滞在3日間平均および7日間平均も同様の傾向であった。

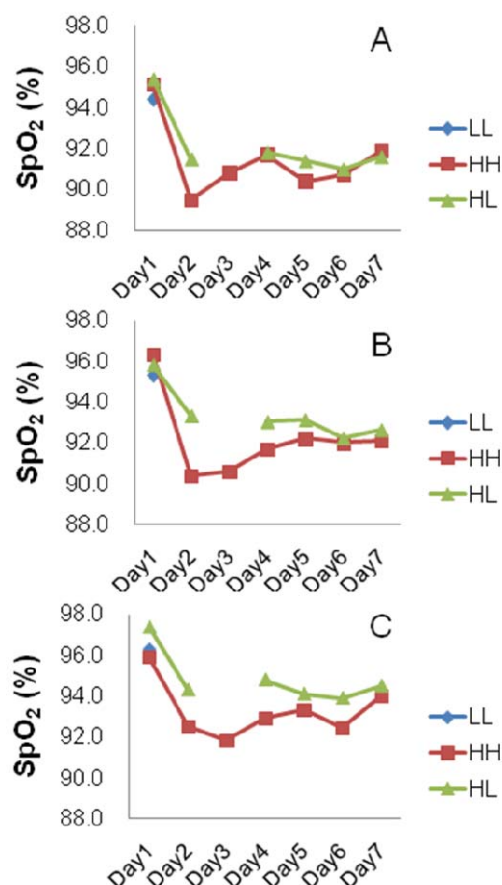


図3 事前合宿における睡眠中の SpO_2 の変化

表 4 高地滞在初期における SpO₂

	A			B			C		
	LL	HH	HL	LL	HH	HL	LL	HH	HL
滞在1日目	89.0	92.1	91.3	90.5	93.8	91.2	93.2	94.4	93.5
SpO ₂ (%) 滞在3日間平均	90.2	91.4	91.4	90.8	93.1	91.4	93.3	94.1	93.7
滞在7日間平均	90.5	91.5	91.3	91.4	92.7	92.0	93.5	94.0	94.2

2. 血液検査

表 5 に、事前合宿前後および高地トレーニング後における血液検査の結果を示した。HH では Pre と比較して Mid で赤血球およびヘモグロビン濃度が増加する傾向にあったが、HL では被験者 C では増加していたが、被験者 A、B ではそのような傾向は認められなかった。また、エリスロポエチンは HH では Pre と比較して Mid において全員が増加していたが、HL では被験者 B は増加していたが、被験者 A は低下しており、一様の傾向は認められなかった。

表 5 事前合宿前後および高地トレーニング後における血液検査の結果

A	LL			HH			HL		
	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
赤血球 (×10 ⁴ /μL)	–	575	567	575	575	591	580	581	604
ヘモグロビン (g/dL)	–	16.2	16.2	15.9	16.1	16.6	16.6	16.4	17.5
ヘマトクリット(%)	–	50.3	49.2	50.7	49.8	51.3	51.2	50.6	51.8
網状赤血球 (‰)	–	12	10	11	12	11	11	8	8
エリスロポエチン(mIU/mL)	–	16.1	18.4	18.2	22.9	17.3	19.1	16.9	13.9
フェリチン (ng/mL)	–	69.8	84.2	79.7	82.7	51.9	42.4	41.3	45.1

B	LL			HH			HL		
	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
赤血球 (×10 ⁴ /μL)	–	461	489	495	513	507	522	482	535
ヘモグロビン (g/dL)	–	14.1	15.3	15.0	15.9	15.5	16.0	15.0	16.4
ヘマトクリット(%)	–	45.3	47.9	48.6	49.8	48.6	51.2	46.4	51.5
網状赤血球 (‰)	–	15	7	11	10	7	11	10	8
エリスロポエチン(mIU/mL)	–	22.4	12.4	15.3	18.1	13.2	17.9	21.7	13.7
フェリチン (ng/mL)	–	132.0	203.0	177.0	168.0	178.0	175.0	233.0	192.0

C	LL			HH			HL		
	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
赤血球 (×10 ⁴ /μL)	–	436	438	436	446	485	459	484	479
ヘモグロビン (g/dL)	–	13.6	13.7	13.3	14.0	15.1	14.5	14.9	15.0
ヘマトクリット(%)	–	42.0	42.4	42.2	42.2	45.0	43.6	45.7	45.0
網状赤血球 (‰)	–	13	11	13	16	14	18	13	12
エリスロポエチン(mIU/mL)	–	20.0	19.8	16.5	21.6	15.9	15.3	15.5	15.3
フェリチン (ng/mL)	–	65.4	59.2	95.9	115	80.7	82.7	82.4	67.3

3. 自転車テスト

図 4 に、事前合宿前後および高地トレーニング後の自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストにおける血中乳酸濃度の変化を示した。

LL では、被験者 A および B は Mid と比較して Post で同一強度における血中乳酸濃度が高くなる傾向がみられたが、被験者 C は同一強度における血中乳酸濃度に大きな変化はみられなかった。一方、HH では 3 名の被験者全員の乳酸カーブが右側にシフトする傾向がみられた。すなわち、Pre と比較して Mid および Post において同一強度における血中乳酸濃度が低くなる傾向がみられ、特に 4mmol/l を超える高強度においてその差が顕著であった。また、Post では 3 名とも運動持続時間が長くなった。さらに、被験者 A、B の乳酸カーブは Mid と Post で大きな変化はみられなかったが、被験者 C の乳酸カーブは Mid と比較してさらに右側にシフトする傾向がみられた。一方、HL では、Pre、Mid、Post のいずれのテストにおいても乳酸カーブの大きな変化はみられなかった。

図 5 に、事前合宿および高地トレーニング後における自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテスト中の HR の変化を示した。HR は運動強度の増加にともなって直線的に増加したが、いずれの条件においても Pre、Mid、Post で大きな変化は認められなかった。

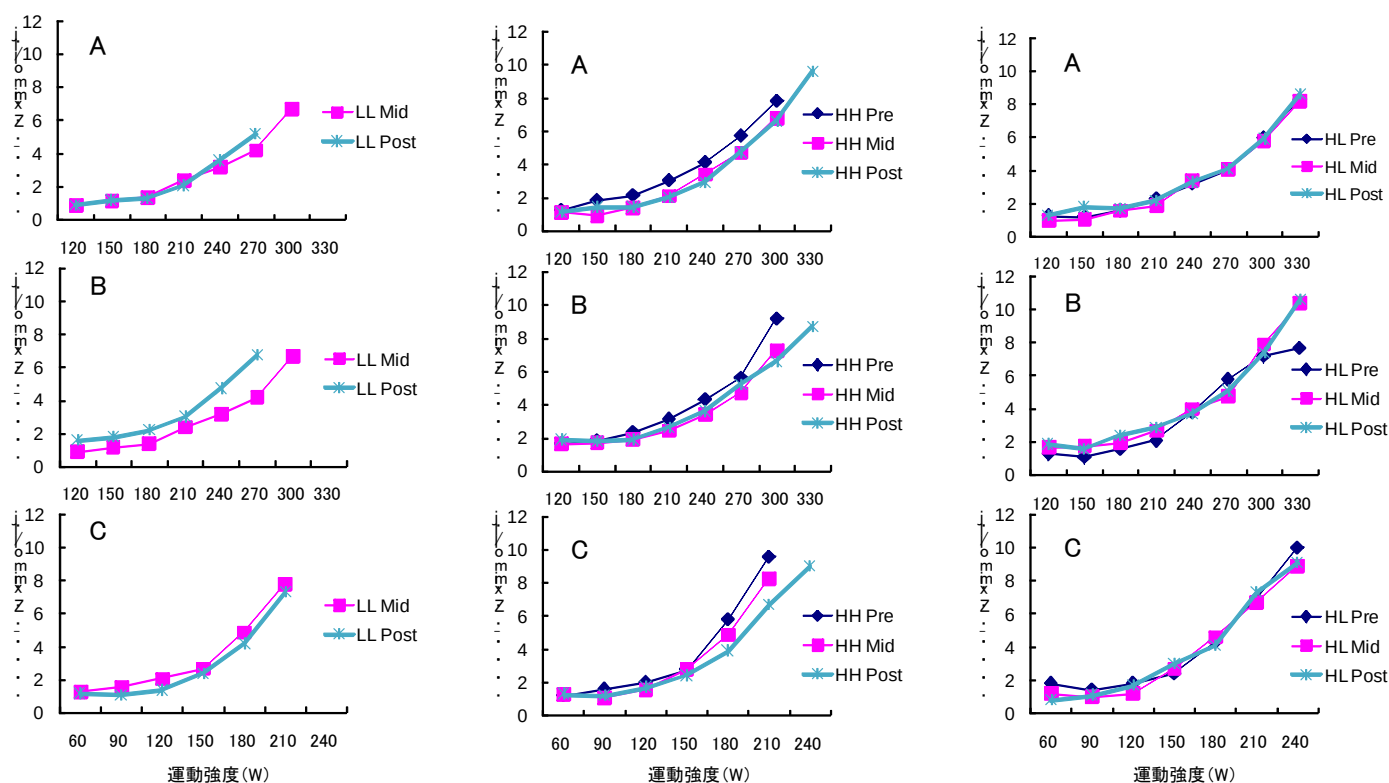


図 4 事前合宿前後および高地トレーニング後における自転車テスト中の血中乳酸濃度の変化

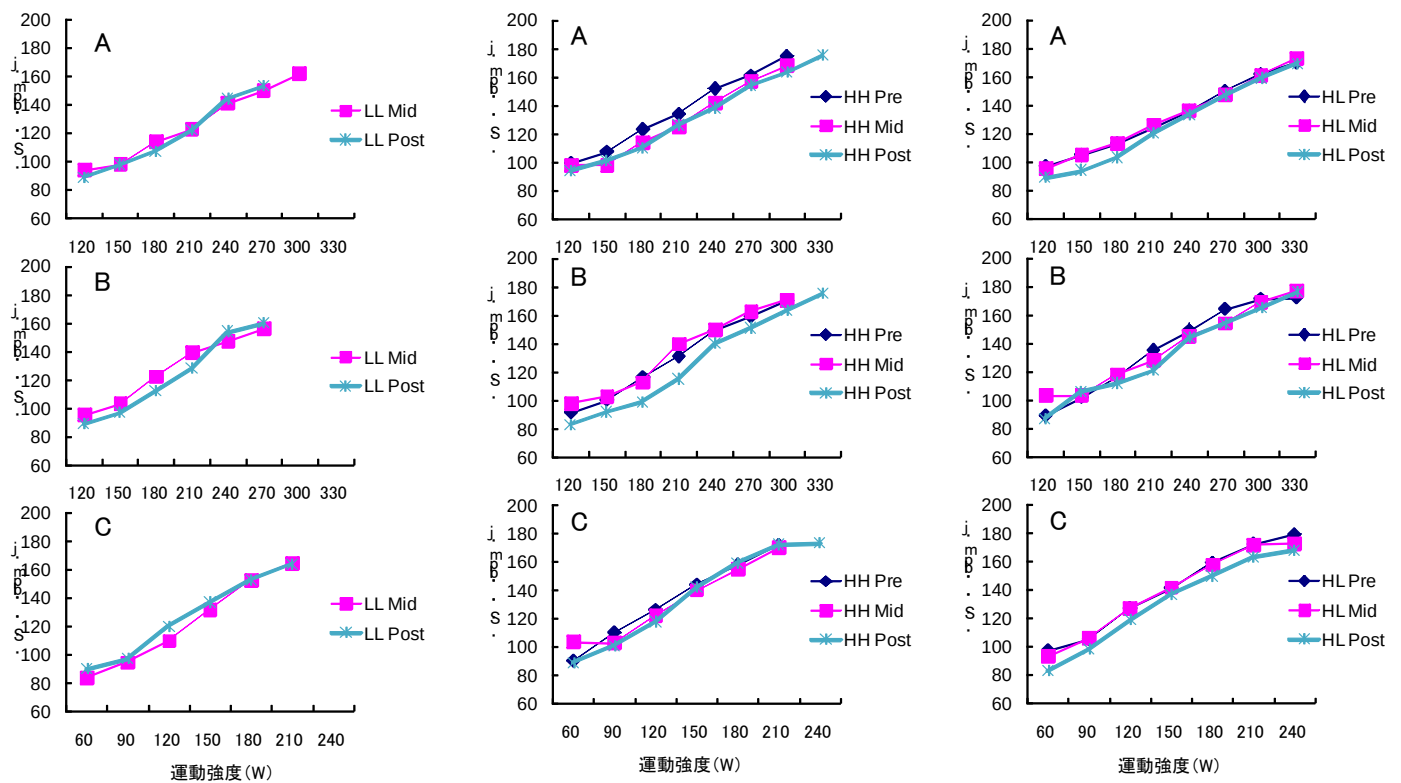


図 5 事前合宿前後および高地トレーニング後における自転車テスト中の心拍数の変化

4. スイムテスト

表 5 に、事前合宿前後および高地トレーニング後におけるスイムテストの 4 セット目の平均タイムと血中乳酸濃度、5 セット目の 1 本目のタイムと血中乳酸濃度を示した。スイムテストの 4 セット目の平均タイムは、いずれの条件においても Pre と比較して Mid で記録が良い傾向にあり、Mid と比較して Post で記録が良い傾向が認められた。なお、テスト全体での最高タイムは全員が HL で記録した。全力で泳ぐように指示した 5 セット目の 1 本目のタイムは、一様な傾向は認められなかった。

表 6 に、高地トレーニング開始 14 日目において実施したスイムテストにおける 4 セット目の平均タイムと血中乳酸濃度、5 セット目の 1 本目のタイムと血中乳酸濃度を示した。高地トレーニング中のスイムテストにおける 4 セット目の平均タイムおよび 5 セット目の 1 本目のタイムは HL が一番速く、血中乳酸濃度も高い傾向にあった。

表 5 事前合宿前後および高地トレーニング後におけるスイムテストのタイムおよび血中乳酸濃度

A		LL			HH			HL		
		Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
4セット目	平均タイム (秒)	–	26.8	26.1	26.6	26.5	26.0	26.5	25.9	25.8
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	6.9	11.3	10.8	9.2	12.1	11.8	11.0	11.9
5セット目	1本目タイム (秒)	–	25.4	25.0	25.1	24.6	25.6	26.9	25.3	25.2
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	12.0	16.2	15.1	13.6	14.6	13.4	13.9	14.8

B		LL			HH			HL		
		Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
4セット目	平均タイム (秒)	–	29.2	28.2	29.2	28.6	28.2	29.9	27.9	27.7
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	9.3	11.7	11.1	9.4	10.9	10.9	12.3	12.7
5セット目	1本目タイム (秒)	–	28.5	26.2	27.1	26.1	27.2	28.1	26.8	26.8
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	10.7	14.6	12.4	14.0	11.9	11.2	15.4	14.4

C		LL			HH			HL		
		Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post	Pre	Mid	Post
4セット目	平均タイム (秒)	–	31.2	30.4	31.2	31.5	30.5	30.8	30.3	30.7
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	5.0	7.4	6.3	5.3	7.1	7.8	10.4	8.3
5セット目	1本目タイム (秒)	–	29.7	28.7	28.8	29.3	29.2	29.2	29.8	29.6
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	–	9.4	11.4	9.2	7.9	10.7	10.4	12.6	10.6

表 6 高地トレーニング中におけるスイムテストのタイムおよび血中乳酸濃度

		A			B			C		
		LL	HH	HL	LL	HH	HL	LL	HH	HL
4セット目	平均タイム (秒)	26.6	26.7	26.1	30.2	29.8	28.5	31.1	31.8	31.0
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	11.2	11.6	11.0	9.8	11.3	12.6	6.6	7.7	8.6
5セット目	1本目タイム (秒)	25.2	25.1	24.9	28.6	28.3	26.4	29.6	29.4	28.7
	血中乳酸濃度 (mmol/l)	13.9	11.8	14.6	10.3	11.7	15.8	10.3	9.8	11.4

IV. 考察

本研究では、高地トレーニング前に短期間の常圧低酸素環境での宿泊とトレーニングを実施することにより、常圧低酸素環境での宿泊のみの場合や低酸素環境を利用しない場合と比較して、高地滞在初期における SpO_2 の低下を小さくすることができる可能性が示唆された。

低酸素暴露により吸気酸素分圧 (PI_{O_2}) が低下し、この PI_{O_2} の低下は肺泡気レベルの酸素分圧 (PA_{O_2}) の低下を引き起こす。さらに PA_{O_2} の低下は最終的に動脈血酸素分圧 (Pa_{O_2}) の低下を引き起こすことにより、動脈血酸素飽和度 (Sa_{O_2} または Sp_{O_2}) が低下する。この Sp_{O_2} の低下は二次的に最大酸素摂取量の低下を引き起こすことはよく知られている。また高地滞在中における睡眠障害などが起こる際には Sp_{O_2} の低下が生じており、 Sp_{O_2} の低下が著しい選手はトレーニング伴ってコンディションを崩す傾向があることが示唆されている。本研究では、事前合宿における低酸素宿泊初日 (Day 2) の睡眠中 Sp_{O_2} は、低酸素宿泊 + 低酸素プール施設でのトレーニング (HH) が低酸素宿泊 + 常酸素トレーニング (HL) と比較して低い傾向にあったが、徐々にその差は縮まり、Day 7 では HH と HL の差はほとんどなかった。これは、HH が HL より先に実施されたことから、HL では HH と比較して急性の低酸素暴露に対して適応していた可能性が考えられる。その一方で、高地滞在 1 日目における Sp_{O_2} は HH が HL より高い傾向を示し、この傾向は高地滞在 7 日目まで続いた。これは HH では事前合宿において宿泊だけではなく、トレーニングの環境も低酸素であり、低酸素暴露時間が長かったことが大きな原因であると考えられる。事前合宿における競泳トレーニングは、HH および HL ともに有酸素性能力の向上を目的とした約 2 時間のメニューであった。事前合宿における競泳トレーニングは、HH および HL ともに 5 回行っていることから、HH では HL と比較して 10 時間ほど長く低酸素に暴露されていた。この 10 時間の低酸素暴露時間の差が高地滞在初期の Sp_{O_2} に影響を及ぼしたものと考えられる。さらに、低酸素環境での Sp_{O_2} の低下は、非鍛錬者よりも鍛錬者で顕著であることが示唆されている。Lawler et al. (1988) は、非鍛錬者と鍛錬者の男性を対象にして平地と標高 3,000 m 相当の低圧室で自転車エルゴメーターを用いた漸増負荷運動を行わせており、鍛錬者グループは平地および低圧環境の両方において非鍛錬者と比較して Sp_{O_2} が有意に低下したことを報告している。本研究ではトレーニング中の Sp_{O_2} は測定していないが、本研究の被験者は高度にトレーニングされたエリート選手であり、低酸素プール施設を用いたトレーニングは彼らのトレーニング中の Sp_{O_2} を大きく低下させたと考えられる。このことも高地滞在初期における睡眠中の Sp_{O_2} の低下を抑制した理由の一つかもしれない。

事前合宿前後に測定した血液性状について着目してみると、赤血球、ヘモグロビン濃度は HH では全員が増加していたが、HL では男性被験者 2 名では増加がみられなかった。これも Sp_{O_2} と同様に低酸素暴露時間の差によるものと考えられる。低酸素刺激による吸気酸素分圧 (PI_{O_2}) 低下の結果、動脈血酸素分圧 (Pa_{O_2}) も同時に低下し、その低下は腎臓の Pa_{O_2} 低下や腎臓組織における酸素化の低下を引き起こす (Ou et al. 1998, Richalet et al. 1994)。この腎臓組織における酸素化の低下は、赤血球やヘモグロビンの生成を調整する主要なホルモンであるエリスロポエチン (EPO) の合成や分泌を促す (Porter and Goldberg 1994, Richalet et al. 1994)。そして、血清 EPO 濃度の増加は、赤血球の前駆体、特に赤芽球コロニー形成単位の分裂頻度を促進することにより、赤血球の生成を促す。この赤血球の成熟過程には低酸素刺激による血清 EPO の増加からおよそ 5~7 日間かかること (Bell 1996, Flaharty et al. 1990) が示されているが、同時に低酸素刺激による赤血球生成の反応には大きな個人差が存在することも示されている (Chapman et al. 1998)。本研究における事前合宿は LL を除いて 7 泊 8 日の日程であったが、低酸素宿泊は 6 日間であり、赤血球およびヘモグロビン濃度を増加させることができる日程であったと考えられる。HH では低酸素宿泊

に加えて合計 10 時間の低酸素プール施設でのトレーニングを実施していたことにより、被験者全員が赤血球およびヘモグロビン濃度を増加させることができたと考えられる。これは HH ではエリスロポエチンが Pre と比較して Mid で全員が大きく増加していたのに対して、HL では 1 名を除いて増加がみられなかったことから説明できる。一方、高地トレーニング後(Post)における血液性状は、LL、HH、HL のいずれにおいても概ね良好な結果であった。すなわち、赤血球およびヘモグロビン濃度が増加する傾向にあった。エリスロポエチンは帰国してから常酸素環境において 1 泊して採血を実施したこともあり、Mid と比較して低値を示す傾向にあった。

本研究では、持久性能力を評価するために、事前合宿前後および高地トレーニング後に自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストを行った。その結果、HH では同一負荷強度での血中乳酸濃度が Pre と比較して Mid および Post で明らかに低下していたのに対して、HL では大きな変化はみられなかった。HH では特に 4mmol/l 以上の強度において Pre と比較して大きく低下している傾向にあった。同一強度における血中乳酸濃度が低下した理由として、赤血球およびヘモグロビン濃度の増加により活動筋への酸素運搬能力の向上したことや、ミトコンドリア量の増加による筋の酸化能力が向上したことが考えられる。HH における Mid および Post の血中乳酸濃度が Pre と比較して明らかに低下した被験者 C は、赤血球およびヘモグロビン濃度が顕著に増加していた。一方 HL では、赤血球およびヘモグロビン濃度の大きな変化がみられず、自転車テストの乳酸カーブにも変化がみられなかった。このことから、本研究における同一強度での血中乳酸濃度の低下には、酸素運搬能力の向上が関与していることが示唆された。

水泳のパフォーマンスを評価するために、本研究では 4×50m を 1 セットとしたインターバル泳を異なる泳速度とサイクルタイムで 5 セット行う漸増負荷泳を実施した。各セットの設定タイムは最大努力の 80、85、90、95、100%とし、それぞれのセットは一定のタイムで泳ぐように指示した。しかし、5 セット目の 1 本目は最大努力で泳ぐようにとも指示したことから、5 セット目の 2~4 本目のタイムは 4 セット目よりも遅くなったため、実質的に 4 セット目が一定のタイムで泳ぐことができる最大泳速度であった。そのため、本研究では 4 セット目の平均タイムと 4 セット目終了後の血中乳酸濃度、および 5 セット目の 1 本目のタイムと 5 セット目終了後の血中乳酸濃度を水泳パフォーマンスの指標とした。

血液検査および自転車テストとは対照的に、4 セット目の平均タイムは HL における Mid および Post で最も速いタイムを記録した。また、高地トレーニング 14 日目に実施したスイムテストにおいても HL で最も速いタイムを記録した。これは目標とする大会に最も近い時期であったことから、各被験者のトレーニング状態が良くなっていたことが原因の一つであると考えられるが、持久性のスイムパフォーマンスの向上には HH より HL の方が適していることを示唆するものかもしれない。しかし、本研究ではコントロール群を設定しておらず、被験者数も 3 名と少ないことから、これらの知見を一般化することはできない。

本研究の結果は、低酸素環境を用いた短期間の合宿を実施することにより生理学的指標(Spo₂、血液性状、血中乳酸濃度)を向上させるためには HL より HH の方が有利であるが、持久性のスイムパフォーマンスを向上させるためには HH より HL の方が有利である可能性を示唆するものである。HL 法は標高 2,000 ~ 2,700m で滞在と睡眠を行い、同時にトレーニングは低い標高(1,000m 以下)で行う方法である。この方法の有用性を示した最初の研究は Levine and Stray-Gundersen(1997)によって行われている。この研究では 13 名の男女大学生陸上選手を対象にして、平地において 4 週間の滞在后、標高 2,500m(ユタ州パークシティ)に滞在し、トレーニングは 1,250 m(ユタ州ソルトレイクシティ)で行うトレーニングプログラムを 28 日間行っている。HL 群ではトレーニング終了 3 日後に行ったテストにおいて、トレーニング前と比較して赤血球量(5%)、ヘモグロビン濃度(9%)、トレッドミルでの $\dot{V}O_{2max}$ (5%)が有意に増加していたが、コントロール

群では有意な変化は認められなかったことを報告している。さらに HL 群において 5,000m 走のタイムが平均で 1%改善されたが、コントロール群では改善は認められなかったことを報告している。多くの研究者がこの研究を引用して、HL 法が HH 法と比較して有用なトレーニング法であると述べているが、Levine and Stray-Gundersen (1997) の方法は、トレーニングを実施している標高が比較的高い(1,250m)ため、「Live-High Train-High」というよりはむしろ「Live-High Train-Moderate High」であるといえ、本研究のように低酸素環境で宿泊して平地でトレーニングする方法(Live-High Train Low)とは、トレーニング後における身体の生理的応答が異なる可能性があるため注意が必要である。一方、HH 法の研究においては、ヘモグロビン濃度が高地トレーニング後に有意に改善することが示されている研究もあるが、そのほとんどは平地での $\dot{V}O_2\text{max}$ および持久性パフォーマンスは向上しなかったことが示唆されており、持久性パフォーマンスが低下したことを示している研究もいくつかある(Bailey et al. 1998; Buskirk et al. 1967; Chung et al. 1995; Fulkner et al. 1967)。本研究でも HH においても、赤血球およびヘモグロビン濃度は増加する傾向にあったが、スイムパフォーマンスの向上はみられなかった。これは酸素運搬能力の向上が直接パフォーマンスの向上につながらなかったことを示している。

V. 総括

本研究では、低酸素プール施設を用いた短期間の競泳トレーニングが生理的応答およびその後に行われる高地トレーニングでの高地順化に及ぼす影響について検討することを目的とした。

競泳日本代表選手 3 名を対象として、中国昆明において 3 週間の高地トレーニングを 3 回実施し、それぞれの高地トレーニングに先立って 3 条件(Live-Low Train-Low:LL、Live-High Train-High: HH、Live-High Train-Low:HL)の事前合宿を行った。事前合宿前後および高地トレーニング後に血液検査、自転車エルゴメーターを用いた乳酸カーブテストおよびスイムテストを実施し、すべての事前合宿および高地トレーニング期間中において、睡眠中の動脈血酸素飽和度を測定した。

その結果以下のことが認められた。

- 高地トレーニング開始 1 週間までにおける動脈血酸素飽和度は、HH が HL および LL と比較して高値を示した。
- 事前合宿前後において、HH と HL の両方で赤血球およびヘモグロビン濃度が増加する傾向にあった。
- 事前合宿前後において、HH で乳酸カーブテストにおける同一強度での血中乳酸濃度が低下する傾向にあった。
- 事前合宿前後および高地トレーニング後において、スイムテストでは HL で泳速が速くなる傾向が認められた。

以上のことから、短期間の低酸素プール施設でのトレーニングと低酸素宿泊とを組み合わせることにより、その後に行われる高地トレーニングでの高地順化を早めることが示唆され、これには酸素運搬能力および筋の酸化能力の改善が関与している可能性が示唆された。

VI. 参考文献

- Bailey, D.M., B. Davies, L. Romer, L. Castell, E. Newsholme, and G. Gandy. 1998. Implications of moderate altitude training for sea-level endurance in elite distance runners. *European Journal of Applied Physiology* 78 : 360—368.
- Beidleman, B.A., S.R. Muza, P.B. Rock, C.S. Fulco, T.P. Lyons, R.W. Hoyt, and A. Cymerman. 1997. Exercise responses after altitude acclimatization are retained during reintroduction to altitude. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 29 : 1588—1595.
- Bell, C. 1996. Morphology of the erythron. In *Hematology : clinical and laboratory practice I*, edited by R.L. Bick. St. Louis : Mosby.
- Benoit, H., M. Germain, J.C. Barthelemy, C. Denis, J. Castells, D. Dormois, J.R. Lacour, and A. Geyssant. 1992. Pre-acclimatization to high altitude using exercise with normobaric hypoxic gas mixtures. *International Journal of Sports Medicine* 13 (Suppl. 1) : S213—S216.
- Buskirk, E.R., J. Kollias, R.F. Akers, E.K. Prokop, and E.P. Reategui. 1967. Maximal performance at altitude and on return from altitude in conditioned runners. *Journal of Applied Physiology* 23 : 259—266.
- Chapman, R.F., J. Stray-Gundersen, and B.D. Levine. 1998. Individual variation in response to altitude training. *Journal of Applied Physiology* 85 : 1448—1456.
- Chung, D.-S., J.-G. Lee, E.-H. Kim, C.-H. Lee, and S.-K. Lee. 1995. The effects of altitude training on blood cells, maximal oxygen uptake and swimming performance. *Korean Journal of Science* 7 : 35—46.
- Flaharty, K.K., J. Caro, A. Erslev, J.J. Whalen, E.M. Morris, T.D. Bjornsson, and P.H. Vlasses. 1990. Pharmacokinetics and erythropoietic response to human recombinant erythropoietin in healthy men. *Clinical Pharmacology and Therapeutics* 47 : 557—564.
- Faulkner, J.A., J.T. Daniels, and B. Balke. 1967. Effects of training at moderate altitude on physical performance capacity. *Journal of Applied Physiology* 23 : 85—89.
- Geiser, J., M. Vogt, R. Billeter, C. Zuleger, F. Belforti, and H. Hoppeler. 2001. Training high—living low : Changes of aerobic performance and muscle structure with training at simulated altitude. *International Journal of Sports Medicine* 22 : 579—585.
- Levine, B.D., and J. Stray-Gundersen. 1997. “Living high—training low” : Effect of moderate-altitude acclimatization with low-altitude training on performance. *Journal of Applied Physiology* 83 : 102—112.

- Ou, L.C., S. Salceda, S.J. Schuster, L.M. Dunnack, T. Brink-Johnsen, J. Chen, and J.C. Leiter. 1998. Polycythemic responses to hypoxia : Molecular and genetic mechanisms of chronic mountain sickness. *Journal of Applied Physiology* 84 : 1242—1251.
- Porter, D.L., and M.A. Goldberg. 1994. Physiology of erythropoietin production. *Seminars in Hematology* 31 : 112—121.
- Richalet, J.P., J. Bittel, J.-P. Herry, G. Savourey, J.-L. LeTrong, J.-F. Auvert, and C. Janin. 1992. Use of a hypobaric chamber for pre-acclimatization before climbing Mount Everest. *International Journal of Sports Medicine* 13 (Suppl. 1) : S216—S220.
- Richalet, J.P., J.C. Souberbielle, A.M. Antezana, M. Dechaux, J.L. Le Trong, A. Bienvenu, F. Daniel, C. Blanchot, and J. Zittoun. 1994. Control of erythropoiesis in humans during prolonged exposure to the altitude of 6,542 m. *American Journal of Physiology* 266 : R756—R764.
- Savourey, G., N. Garcia, Y. Besnard, A.-M. Hanniquet, M.-O. Fine, and J. Bittel. 1994. Physiological changes induced by pre-adaptation to high altitude. *European Journal of Applied Physiology* 69 : 221—227.
- Savourey, G., N. Garcia, J.-P. Caravel, C. Gharib, N. Pouzeratte, S. Martin, and J. Bittell. 1998. Pre-adaptation, adaptation and de-adaptation to high altitude in humans : Hormonal and biochemical changes at sea level. *European Journal of Applied Physiology* 77 : 37—43.