



長距離選手に対する調整期の低圧低酸素環境下におけるランニングが運動終了後の自律神経系に及ぼす影響

両角 速 (体育学部競技スポーツ学科) 西出仁明 (体育学部競技スポーツ学科)

山下泰裕 (体育学部武道学科) 内田晴久 (教養学部人間環境学科)

寺尾 保 (スポーツ医科学研究所)

The Effects of Running in Hypobaric Hypoxic Environments on the Autonomic Nervous System Post-exercise during a Conditioning Period in Long-distance Runners

Hayashi MOROZUMI, Noriaki NISHIDE, Yasuhiro YAMASHITA, Haruhisa UCHIDA and Tamotsu TERAO



Abstract

The purpose of this study is to elucidate the effects of high-speed running in a hypobaric hypoxic environment on the autonomic nervous system during a conditioning period in long-distance runners. Four male adults (20.5 ± 0.6 years) volunteered for this study. The subjects exercised for 32-60 minutes on a treadmill in hypobaric hypoxic environment at 3000m simulated altitude (30HE). The following parameters were measured during exercise and at rising for 5 days post exercise; RPE, arterial oxygen saturation (SpO_2), the autonomic nervous system (Coefficient of Variation of R-R intervals; CVRR, HF normalized unit; HFnu). Our results showed (1); the SpO_2 during exercise in 30HE showed 68-72 %. (2) the HR during exercise in 30HE showed 178-194 b/min. (3) the RPE during exercise in 30HE showed 16-18. (4) the CVRR at rising for 5 days showed a tendency to high volumes. (5) the HFnu at rising for 5 days in four subjects showed above 50%. These results suggest that high-speed running in a hypobaric hypoxic environment at 3000 m simulated altitude may be a useful method for stimulating the activity of the autonomic nervous system during a conditioning period in long-distance runners.

(Tokai J. Sports Med. Sci. No. 28, 59-66, 2016)

I. 緒言

近年、自律神経活動の間接的な評価としては、心拍変動解析が利用されている。自律神経系は、交感神経系と副交感神経系とからなり、多くの臓

器では、両者の拮抗作用により機能が調節されている。また、両者の活動レベルが、体力や疲労感などの体調の変化、あるいは、睡眠状況等の生体リズムなどに関連して変化することも知られている。スポーツ競技におけるコンディションを評価する方法は多様にあるが、特に、起床時における

表1 被験者の身体的特徴
Table 1 Physical characteristics of the subjects

被験者	年齢(歳)	身長(cm)	体重(kg)	体脂肪率(%)
A	20	175.5	53.9	8.0
B	20	172.5	53.5	9.5
C	21	168.2	49.0	10.0
D	21	178.3	56.5	9.3

自律神経活動の指標も重要な役割をもつと考えられる。心拍変動は、非侵襲的苦痛を与えずに評価が可能であり、アスリートのコンディション評価に適した指標であると考えられる¹⁾。

私たちの先行研究²⁾では、箱根駅伝選手に対する調整期のコンディショニングという観点から起床時の自律神経活動のバランスと競技パフォーマンスとを関連させて検討することは有用であると報告している。さらに、前報^{3,4)}では、長距離選手に対する標高1500mに相当する低圧低酸素環境下におけるスローランニングは、運動終了後の翌朝において、副交感神経活動が優位な状態がみられ、自律神経活動のバランスおよび反応力を一時的に好ましい方向に変えることができると示唆された。また、高地トレーニングで鍛錬されている長距離選手は、標高3000mに相当の常圧低酸素環境下での睡眠は、起床時、副交感神経活動の優位な状態を維持し、睡眠状況、食事、疲労感、体調の評価からも良好なコンディションを維持できることも報告している。

本研究では、これまでの成績（長距離選手に対する標高1500m、3000mにおける運動および睡眠の有用性）を踏まえ、長距離選手を対象に、競技大会前の調整期におけるコンディションづくりの基礎資料および高地トレーニングで得られた効果を競技大会で発揮させる一つの方策等を得る目的で、競技大会前の調整期に低圧低酸素環境下（標高3000m）における高強度の運動による低圧低酸素負荷（低酸素刺激）を与えることが運動終了後

の自律神経系の応答にどのような影響を及ぼすかを検討した。

II. 実験方法

本研究は、すべての検査項目が簡便で、被験者の生体に負担の少ない非侵襲的な検査であった。

1. 対象者

実験対象は、東海大学陸上競技部中・長距離選手4名（年齢； 20.5 ± 0.6 歳、身長； 173.6 ± 4.3 cm、体重； 53.2 ± 3.1 kg、体脂肪率； 9.2 ± 0.9 %）とした（表-1）。

本研究は、東海大学「人を対象とする研究」に関する倫理委員会の承認を得て実施した。なお、被験者には、予め実験の概要を十分に説明し、文書にて実験参加の同意を得た。

2. 環境条件

低圧低酸素環境下の実験は、東海大学スポーツ医科学研究所に設置されている低圧（高地トレーニング）室を使用した。

本研究では、標高3000mに相当する気圧（ 526mmHg ； 30HE ）に調整して行った（室温を 22°C 、相対湿度を 50% ）。

3. 低圧低酸素環境下の高強度ランニングおよび運動強度の判定

本研究では、競技大会（全日本大学駅伝、箱根駅伝）前の調整期に、トレッドミルを用い、ビルドアップ走、または二段階走（一定のペース後、速度を上昇）により、生体負担度の指標である動脈血酸素飽和度を70%前後になるようランニング速度を上昇した。なお、ランニング時間に関しては、各選手の自主的な判断に委ねた（32～60分程度）。但し、被験者Cは、運動による低酸素刺激を2日間、連続で行った。被験者Dについては、調整期に標高3000m相当の常圧低酸素環境下で睡眠を継続しながら、箱根駅伝（復路）出場の4日前に運動による低酸素刺激を行った。

本研究では、ランニング中の動脈血酸素飽和度および心拍数をパルスオキシメーター（Pulsox-300i、コニカミノルタ）、ハートレートモニターRS800CXN（Polar社）を用いて測定するとともに、運動中の自覚的運動強度（RPE）を測定するため、Borgのスケールを用い、運動終了直後に、被験者に対して口答で求めた。

4. 自律神経機能の測定方法

運動終了後の翌朝（AM5:00）から5日間に亘り、起床時の自律神経活動（自律神経活動量、交感神経と副交感神経のバランスなど）の動態について評価した。自律神経活動の測定は、調整期の起床直後、座位にて安静5分間とした。なお、最初と最後の1分間ずつを削除した計3分間を解析した。

自律神経活動の評価は、心拍変動（R-R間隔）データを解析した。時間領域解析（CVRR=R-R間隔の標準偏差/R-R間隔の平均値）により、脈拍間隔のばらつきを算出し、自律神経活動量（自律神経の大きさ）の指標とした。周波数解析によって求められる心拍変動の低周波帯域（LF：0.04～0.15Hz）は、交感神経活動と副交感神経活動の双方を反映し、高周波帯域（HF：0.15～0.40Hz）については、副交感神経活動を反映すること^{5,6)}が定義されている。そこで、HF normalized unit

（以下、HFnu、 $HFnu = HF / (LF + HF) \times 100$ ）は、LFに対するHFの大きさを計算することで自律神経活動における副交感神経活動の指標とした⁷⁾。この指標から自律神経活動のバランスを推定した。

心拍変動の解析は、ハートレートモニターRS800CXN（Polar社）を用いて心拍R-R間隔を記録し、データをPolar ProTrainer 5.3を用いて高速フーリエ解析を行った。

III. 実験結果

1. 低圧低酸素環境下のランニング中におけるSpO₂、HRおよびRPEの変化

図1、2および3にランニング中におけるSpO₂、HRおよびRPEの変化を示した。SpO₂（最低値）は、被験者AおよびBが72%、被験者Cが68%、被験者Dが71%であった。HR（最高値）は、被験者Aが180拍/分、被験者Bが178拍/分、被験者Cが186拍/分、被験者Dが194拍/分であった。RPEは、被験者Aが17、被験者Bが16、被験者Cが18、被験者Dが17であった。

2. 低圧低酸素環境下のランニング終了後における起床時のCVRRおよびHFnuの変化

ランニング終了後における起床時のCVRRおよびHFnuの変化を個人ごとに図4、5、6、7に示した。被験者Aは、低酸素負荷後5日間、CVRRが12.20～15.80%（平均；14.81%）およびHFnuが64.00～69.91%（平均；65.85%）の両方で高い値を維持していた。被験者Bも被験者Aと同様にCVRRが12.56～14.95%（平均；13.79%）およびHFnuが48.32～74.48%（平均；63.64%）で高い値を維持していた。被験者Cは、CVRRが3.90～7.76%（平均；5.82%）、HFnuが38.10～77.31%（平均；59.37%）をそれぞれに示した。被験者Dは、CVRRが10.28～13.01%（平均；11.74%）、HFnuが45.15～56.52%（平均；51.29%）であった。

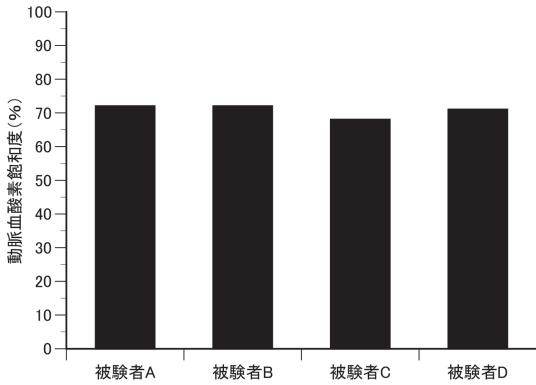


図1 ランニング中における動脈血酸素飽和度の変化 (標高3000m)
 Fig. 1 Changes in arterial oxygen saturation (SpO₂) during running in hypobaric hypoxic environment at 3000m simulated altitude.

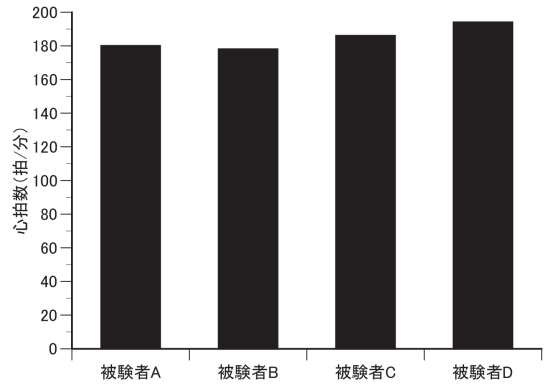


図2 ランニング中における心拍数 (HR) の変化 (標高3000m)
 Fig. 2 Changes in HR during running in hypobaric hypoxic environment at 3000m simulated altitude.

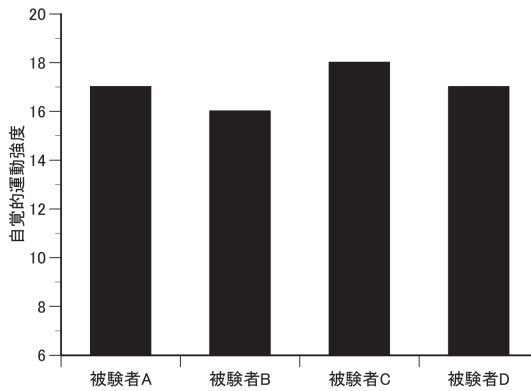


図3 ランニング中における自覚的運動強度 (RPE) の変化 (標高3000m)
 Fig. 3 Changes in RPE during running in hypobaric hypoxic environment at 3000m simulated altitude.

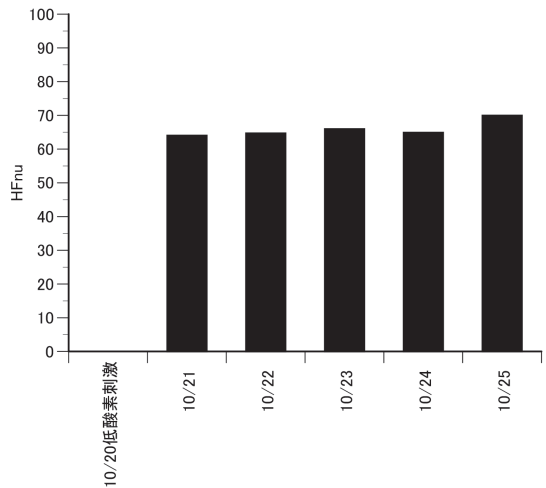
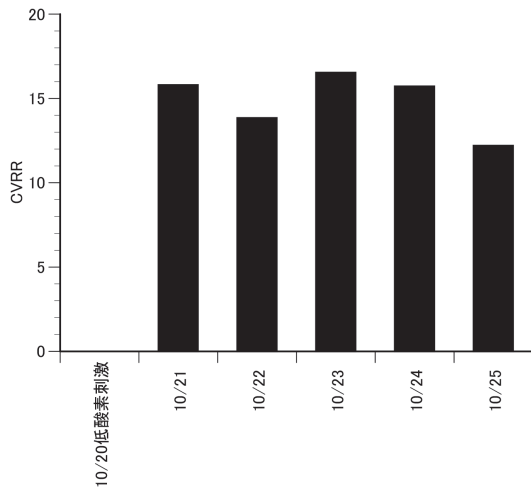


図4 ランニング後におけるCVRRおよびHFnuの変化 (被験者A)
 Fig. 4 Changes in CVRR and HFnu at rising for 5 days after running (Subject A).

長距離選手に対する調整期の低圧低酸素環境下におけるランニングが運動終了後の自律神経系に及ぼす影響

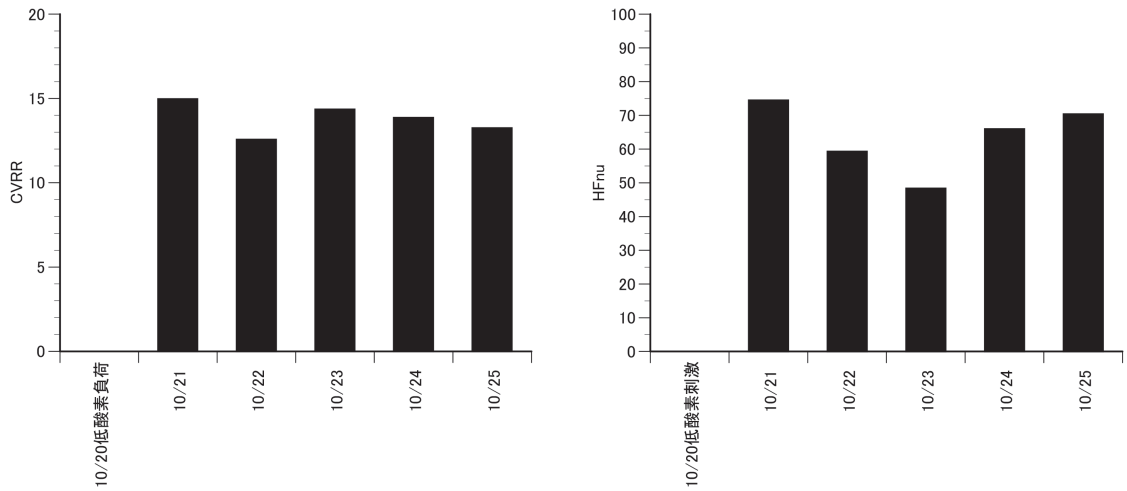


図5 ランニング後におけるCVRRおよびHFnuの変化(被験者B)
Fig. 5 Changes in CVRR and HFnu at rising for 5 days after running (Subject B).

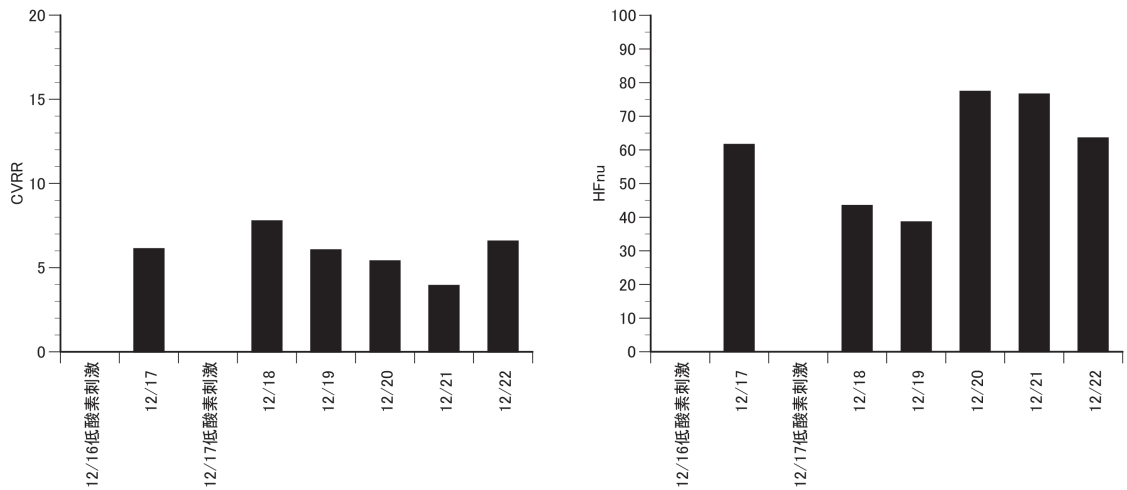


図6 ランニング後におけるCVRRおよびHFnuの変化(被験者C)
Fig. 6 Changes in CVRR and HFnu at rising for 5 days after running (Subject C).

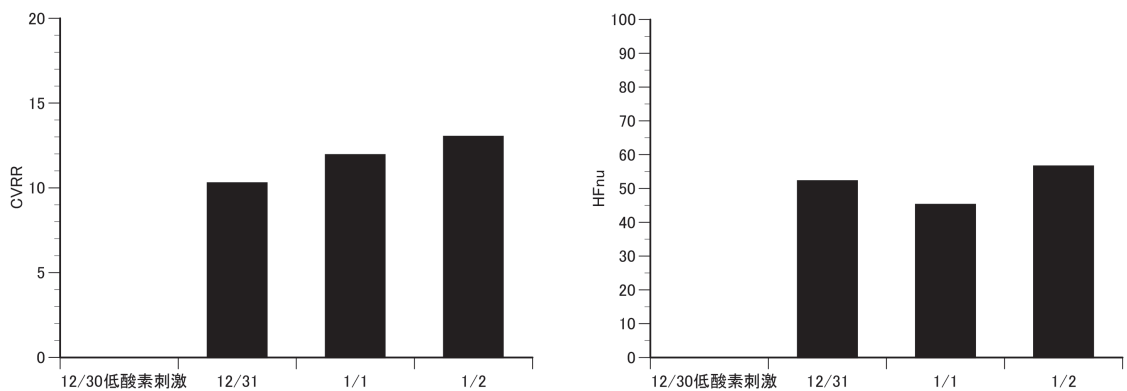


図7 ランニング後におけるCVRRおよびHFnuの変化(被験者D)
Fig. 7 Changes in CVRR and HFnu at rising for 3 days after running (Subject D).

IV. 考察

本研究では、長距離選手を対象に、競技大会前の調整期に低圧低酸素環境下（標高3000m）における高強度のランニングによる低圧低酸素負荷（低酸素刺激）が運動終了後の自律神経系の応答にどのような影響を及ぼすかを検討した。

高地トレーニングに関しては、1990年代以後、種々の概念の1つに“高地トレーニング刺激は、体内に記憶され、繰り返し実施することにより、適応能力が高まる”ことが報告されている⁸⁾。したがって、本研究の被験者は、夏期高地合宿（白樺湖、女神湖、車山高原、霧が峰高原、菅平）や、日常、低圧室を利用した標高3000mでのトレーニングおよび低酸素テントを利用した標高3000mでの睡眠等で高地における適応能力が高まっていることが示唆される。そこで、これまで培われた高地トレーニングの効果を競技大会に活かそうとする場合、調整期においても生体に運動による低酸素刺激を与えることの良否を追究した。

その結果、高強度のランニング中の SpO_2 （最低値）は、被験者 A および B が72%、被験者 C が68%、被験者 D が71%と大幅に低下した。HR（最高値）は、被験者 A が180拍/分、被験者 B が178拍/分、被験者 C が186拍/分、被験者 D が194拍/分であった。RPE は、被験者 A が17、被験者 B が16、被験者 C が18、被験者 D が17であった。先行研究^{3,9,10)}では、環境（標高）の違いに関して、軽運動中の SpO_2 が標高に応じて平地、標高1500m、標高2000m、標高3000mの順で低値を示し、逆に、HR や RPE は、標高に応じて平地、標高1500m、標高2000m、標高3000mの順で高値を示したことを報告している。

そこで、高地で生じる種々の生理学的変化の中で、最も重要な変化の一つに挙げられるのが SpO_2 である。平地および高地における運動による SpO_2 の低下は、鍛錬者の方が非鍛錬者よりも顕著に低いことや、とくに、トレーニングされた持久系選手において著明に低下することが報告さ

れている¹¹⁾。この持久系選手の標高3000m相当の擬似高地で自転車エルゴメーターを用いた最大酸素摂取量（漸増負荷運動）測定時の SpO_2 は77.3%であった。この値と比較しても本研究の SpO_2 は、明らかに低い値であった。本研究の被験者は、 SpO_2 を低下させる能力が優れているものと示唆される。高地における運動の生理的応答は、標高、運動強度および被験者の特性（年齢、鍛錬度、高地経験度等）によって異なる。標高が高くなれば、過度の低圧低酸素負荷がかかり、生体負担度が大きくなるであろう。本研究では、標高3000m相当におけるランニングの最高速度は、時速20km前後であった。したがって、本研究における SpO_2 応答の変化から推察すると、標高3000mにおけるランニング時には、生体にかなりの低圧低酸素負荷がかかっていたと考えられる。

次に、ランニング終了後における起床時の CVRR および HFnu の変化は、被験者 A が低酸素負荷後5日間、CVRR：12.20～15.80%（平均：14.81%）および HFnu：64.00～69.91%（平均：65.85%）の両方で高い値を維持していた。被験者 B も被験者 A と同様に CVRR：12.56～14.95%（平均：13.79%）および HFnu：48.32～74.48%（平均：63.64%）で高い値を維持していた。被験者 C は、CVRR：3.90～7.76%（平均：5.82%）、HFnu：38.10～77.31%（平均：59.37%）をそれぞれに示した。被験者 D は、CVRR が10.28～13.01%（平均：11.74%）、HFnu が45.15～56.52%（平均：51.29%）であった。一般的に安静時の CVRR の変化は、年齢と逆相関を示すことが報告されている。この指標の年齢ごとの基準値を設定すると、一般人における20歳前後では、約5.5%（下限：約3%前後）前後の値である（クロスウエル社の心拍変動解析）。本研究では、各被験者で多少の変動があるものの、いずれも起床時 CVRR の数値が高く、基準値より極端に低い値を示した選手はみられなかった。これまでに長距離選手を対象にして、定期的に起床時の自律神経活動の測定を行ってきている。その結果、CVRR の値は、元来、高い値の選手や基準値の選

手、千差万別であった。本研究の被験者も CVRR は、上記の標高3000mに相当の環境下でのトレーニングや睡眠を経験する前の値が4～5%であった。この値と比較して、今回の方が明らかに高い値を示していた。本研究の結果から、CVRRの値は、運動終了後の翌朝から数値が極端に低い選手はみられず、高い値を維持していたことが示唆された。今後、CVRRの変動については、高地トレーニングと競技パフォーマンスの関連性から詳細に検討する必要があると考えられる。

起床時の自律神経の活動水準は、低酸素環境への適応に加え、前日までのトレーニングや疲労の状態、コンディションの状況などをある程度反映しているものと考えられる。とくに、HFnuに関して、私たちの先行研究²⁾では、箱根駅伝前の調整期の起床時、個人差はあるがHFnuの数値が高い選手、すなわち、副交感神経活動優位の状態を維持できた選手は競技成績が良く、逆に、HFnuの数値が極端に低い選手、すなわち、交感神経優位の状態が続いた選手は競技成績が悪くなる傾向を示したことを報告している。したがって、HFnuの数値を高くして、副交感神経活動を優位の状態に維持することが競技パフォーマンスの向上にも繋がると示唆した。本研究の結果、標高3000mに相当する低圧低酸素環境下での高強度の運動は、いずれの選手も起床時HFnuの数値が高く、極端に低い値を示した選手はみられなかった。仮に、この値が大きく変化して、低い値を維持するようであれば、自律神経のバランスとして、交感神経活動優位の状態を意味することになる。これは、過剰な低酸素負荷によって生体にかかる負担度が大きく、睡眠の質や疲労の回復力が下がり、コンディションにも悪影響を及ぼすことが考えられる。本研究では、運動終了後の5日間において、各被験者で良好なコンディションを維持することができたと示唆される。現在では、各選手の自主性に任せ、調整期のコンディショニングの一方策としても標高3000mに相当する低圧低酸素環境下での高強度のランニングを取り入れている。

以上、本研究の成績から、長距離選手に対する調整期における標高3000mに相当する低圧低酸素環境下における高強度のランニングは、SpO₂の応答の変化から推察すると、生体にかんりの低圧低酸素負荷がかかっていたにもかかわらず、運動終了後の5日間において、自律神経活動量が大きく、副交感神経活動が優位な状態が多くみられ、良好なコンディションを維持することができたと示唆される。高地トレーニングで鍛錬された長距離選手は、これまでの高地トレーニングで得られた効果を競技大会に活かそうとする場合、調整期においても生体にかんりの低酸素刺激を与えることの可能性があると考えられた。

V. まとめ

本研究では、長距離選手を対象に、競技大会前の調整期に低圧低酸素環境下(標高3000m)における高強度の運動による低酸素刺激が運動終了後の自律神経系の応答にどのような影響を及ぼすかを検討した。

その成績を示すと次のごとくである。

1) ランニング中におけるSpO₂(最低値)は、被験者AおよびBが72%、被験者Cが68%、被験者Dが71%であった。HR(最高値)は、被験者Aが180拍/分、被験者Bが178拍/分、被験者Cが186拍/分、被験者Dが194拍/分であった。RPEは、被験者Aが17、被験者Bが16、被験者Cが18、被験者Dが17であった。

2) ランニング終了後における起床時のCVRRおよびHFnuの変化は、被験者Aが低酸素負荷後5日間、CVRR:12.20～15.80%(平均;14.81%)およびHFnu:64.00～69.91%(平均;65.85%)の両方で高い値を維持していた。被験者Bも被験者Aと同様にCVRR:12.56～14.95%(平均;13.79%)およびHFnu:48.32～74.48%(平均;63.64%)で高い値を維持していた。被験者Cは、CVRR:3.90～7.76(平均;5.82)、HFnu:38.10～77.31%(平均;59.37%)をそれ

ぞれに示した。被験者 D は、CVRR が 10.28～13.01 % (平均; 11.74 %)、HFnu が 45.15～56.52% (平均; 51.29%) であった。

以上、本研究の成績から、長距離選手に対する調整期における標高3000mに相当する低圧低酸素環境下における高強度のランニングは、SpO₂の応答、HR および RPE の変化から推察すると、生体にかかなりの低圧低酸素負荷がかかっていたにもかかわらず、運動終了後の5日間において、自律神経活動量が大きく、副交感神経活動が優位な状態が多くみられ、良好なコンディションを維持することができたと示唆される。高地トレーニングで鍛錬された長距離選手は、これまでの高地トレーニングで得られた効果を競技大会に活かそうとする場合、調整期においても生体にかかなりの低酸素刺激を与えることの可能性があると考えられた。

参考文献

- 1) 清水和弘：免疫系指標と自律神経系指標によるコンディション評価, 臨床スポーツ医学, 28(8): 855-859, 2011.
- 2) 両角速, 山下泰裕, 寺尾保：箱根駅伝選手における自律神経活動と競技成績に関する実践的研究, 東海大学スポーツ医科学雑誌, 26: 53-58, 2014.
- 3) 寺尾保, 両角速, 西出仁明, 山下泰裕, 栗田太作, 小澤秀樹, 内田晴久, 内田裕久：長距離選手に対する低圧低酸素環境下におけるスローランニングが運動終了後の自律神経系に及ぼす影響, 東海大学スポーツ医科学雑誌, 27: 63-69, 2015.
- 4) 両角速, 西出仁明, 山下泰裕, 寺尾保：箱根駅伝選手に対する常圧低酸素環境下の睡眠が自律神経活動およびコンディションに及ぼす影響, 東海大学スポーツ医科学雑誌, 27: 43-49, 2015.
- 5) 早野順一郎：臨床医のための循環器自律神経機能検査法, 51-61, メディカルレビュー社, 1997.
- 6) 日本自律神経学会：自律神経機能検査, 第4版, 文光堂, 2007.
- 7) 飯塚太郎：心拍数・心拍変動, II. コンディションの評価とその活用—具体的な評価手法とその応用—, 臨床スポーツ医学, 28: 166-171, 2011.
- 8) 小林寛道：高地トレーニングと低酸素トレーニングの発展, 体育の科学, 51(4), 260-265, 2001.
- 9) 寺尾保, 小澤秀樹, 三田信孝, 桑平一郎, 内田裕久：中高年者に対する低圧低酸素環境下における歩行運動が運動終了後の自律神経系および動脈機能に及ぼす影響, 東海大学スポーツ医科学雑誌, 21: 43-50, 2009.
- 10) 寺尾保, 栗田太作, 小澤秀樹, 瀧澤俊也, 灰田宗孝, 内田晴久, 内田裕久：中高年者に対する低圧低酸素環境下における歩行運動が自律神経系, 末梢血液循環および動脈機能に及ぼす影響, 東海大学スポーツ医科学雑誌, 24: 57-64, 2012.
- 11) Randall L. Wilber：高地トレーニングと競技パフォーマンス, 川原貴, 鈴木康弘監訳, 講談社サイエンティフィク, 2008.