

高所での活動能力の低下を防止するための 事前順化トレーニングに関する文献

奥島 大¹⁾, 山本 正嘉²⁾

¹⁾ 鹿屋体育大学大学院,

²⁾ 鹿屋体育大学スポーツ生命科学系

1. はじめに

高所では、酸素分圧の低下による影響を受けて、運動能力が低下する。また急性高山病や、それが発展して重症の高山病（肺水腫や脳浮腫など）が引き起こされることも知られている。このような問題に対処するために、高所へ赴く前にあらかじめ、自然の高所あるいは低酸素室を利用して、酸素分圧の低い環境に曝露し、ある程度の高所順化を獲得しようとする試みが古くから行われてきた（以下、事前順化トレーニング）。

かつての事前順化トレーニングは、長期間、長時間、あるいは高強度の運動を用いて行われることが多かった。しかし近年では、より短い期間や時間、あるいは低強度の運動による事前順化トレーニングによって、高所への順化を獲得しようとする試みが

行われている。期間、時間の短縮あるいは強度の低減は、高所で登山やスポーツ活動を行う人にとって、日常生活や通学環境でのトレーニングを大きく制限されることなく行える点で有用である。

本稿は、事前順化トレーニングに関する先行研究について、1) 高所に出かける登山者を対象としたものと、2) 高所で競技やトレーニングを行う競技者を対象としたものに分類して一覧表を作成し、資料として提供しようとするものである。なお、先行研究を収集するにあたって、トレーニング期間は3週間以内で行われているものを収集した。

2. 高所に出かける登山者を対象とした研究

表1は、登山者を対象として行われた事前順化トレーニングに関する先行研究を一覧表にしたもので

表1. 高所に出かける登山者を対象とした研究の一覧

著者	発表年	対象者 (うち対照群)	n	利用環境	トレーニング			前後測定		結果	
					酸素濃度 ^a	高度 ^b	期間	トレーニング内容	酸素濃度 ^a		高度 ^b
Benoit et al. ⁶⁾	1992	健康者	18(9)	常圧低酸素吸入	12.2~10.0%	4500~5700m	3週間	自転車運動2時間	10.4%	5400m	HVR↑
Richalet et al. ¹⁶⁾	1992	エリート登山家	5	自然高所 低圧低酸素室	12.1~11.4% 11.1~6.8%	4350~4807m 5000~8500m	1週間 4日間	居住	11.5%	4700m	Hb↑ SaO ₂ ↑(最大下運動時)
Rodriguez et al. ¹⁷⁾	1999	登山家	17	低圧低酸素室	12.7~10.4%	4000~5500m	9日間	安静3~5時間(+自転車運動)	20.9%	0m	運動持続時間↑, VEmax↑, BLA↓ RBC↑, Hb↑, Ht↑
Katayama et al. ¹⁴⁾	2001	健康者	6	低圧低酸素室	11.9%	4500m	7日間	安静1時間	11.9%	4500m	HVR↑ VE/V _O 2↑, SaO ₂ ↑(最大下運動時)
前川ら ¹⁵⁾	2001	大学生	7	常圧低酸素室	16.7%	2000m	4日間	睡眠7時間	12.7%	4000m	VO ₂ max↑, Lmax↑ VE↑, VT↑(VO ₂ max出現時) SpO ₂ ↑(最大下運動時)
鳥賀陽ら ²⁰⁾	2002	成人男性	6	常圧低酸素室	12.7%	4000m	1週間	安静30分+自転車運動30分	12.7%	4000m	HR↓, SpO ₂ ↑, RPE↓
鳥賀陽ら ²¹⁾	2003	登山家	17(8)	常圧低酸素室	12.7%	4000m	1週間	安静30分+自転車運動30分	12.7%	4000m	SpO ₂ ↑, RPE↓(トレーニング期間中) SpO ₂ ↑, RPE↓
鳥賀陽ら ²²⁾	2004	登山家	5	常圧低酸素室	12.7~9.8% 14.5~12.7%	4000~6000m 3000~4000m	1週間	運動および安静計4~8時間 睡眠7~10時間	12.7%	4000m	Hb↑, MCH↑, MCHC↑ SpO ₂ ↑ SpO ₂ CV↑(トレーニング期間中)
Beidleman et al. ³⁾	2004	低地居住者	6	自然高所	12.3%	4300m	3週間	4時間安静 (+ランダムで自転車運動45~60分)	12.3%	4300m	AMSスコア↓ PetCO ₂ ↓
柴田ら ¹⁹⁾	2006	健康者	7	低酸素吸入装置	10.0%	5600m	2週間	間欠的低酸素吸入1.5~2時間	12.7%	4000m	SpO ₂ ↑, RPE↓
Jones et al. ¹²⁾	2008	低地居住者	16(6)	常圧低酸素室	11.8% 14.4%	4400m 3100m	7日間	安静2時間 自転車運動1時間	12.3%	4300m	SaO ₂ ↑(安静時) HR↓, SaO ₂ ↑(睡眠時)
山本ら ²⁴⁾	2008	一般成人	8	自然高所 (富士山)	15.8~13.1%	2300~3776m	3日間	歩行運動計12時間+安静, 睡眠 (実登山)	20.9% 12.7%	0m 4000m	HVR↑ BLA↓, RPE↓(高度0m) HR↓, BLA↓, SpO ₂ ↑, RPE↓(高度4000m)
Beidleman et al. ⁵⁾	2009	低地居住者	11	自然高所	16.2%	2200m	6日間	居住	12.3%	4300m	AMSスコア↓ PetCO ₂ ↓, SaO ₂ ↑(安静時)
Fulco et al. ¹⁰⁾	2011	低地居住者	23(9)	常圧低酸素室	16.2~14.4%	2200~3100m	7日間	睡眠7.5時間	12.6%	4300m	PetCO ₂ ↓(安静時) SaO ₂ ↑(睡眠時) AMSスコア↑(起床時)

※記号の説明

Lmax: 最大作業強度

VO₂max: 最大酸素摂取量, VEmax: 最大換気量, VE: 換気量, VE/V_O2: 酸素換気当量, VT: 1回換気量, PetCO₂: 呼吸終末気体分圧, HVR: 低酸素換気応答

BLA: 血中乳酸濃度, HR: 心拍数, SaO₂: 動脈血酸素飽和度(経血的), SpO₂: 動脈血酸素飽和度(非経血的), SpO₂CV: 動脈血酸素飽和度変動係数, AMSスコア: 急性高山病スコア, RPE: 主観的運動強度

RBC: 赤血球数, Ht: ヘマトクリット, Hb: ヘモグロビン濃度, MCH: 平均赤血球ヘモグロビン量, MCHC: 平均赤血球ヘモグロビン濃度

(注)表中のa, bについて論文内に記載があるものに関しては各論文の記載に従った。また記載の無いものに関しては以下の方法で記載を行った

a 常圧低酸素室, 常圧低酸素吸入および低酸素吸入装置に関しては1気圧の酸素濃度を, 低圧低酸素室および自然高所に限っては, 当該高度における酸素分圧を1気圧の酸素濃度に換算した値を記載した

b 常圧低酸素室, 常圧低酸素吸入および低酸素吸入装置に関しては酸素濃度から換算した気圧に相当する高度を, 低圧低酸素室に関しては設定された気圧に相当する高度を, 自然高所に関しては標高を記載した

ある。トレーニングに採用された高度は、2000～8500mと非常に広範囲であった。低酸素曝露時の様態としては、安静、睡眠、運動や居住と様々な方法が採用されており、1回のトレーニングにおける曝露時間は、短いものでも1時間以上に設定されていた。トレーニング効果の測定時に採用された高度に関しては、高高所 (high altitude)¹⁾とも呼ばれる4000m以上が多くの研究で採用されていた。

これらのトレーニングによって得られる効果としては、安静時および最大下運動時の心拍数 (HR)、血中乳酸濃度 (BLa)、主観的運動強度 (RPE) の低下や、動脈血酸素飽和度 (SaO₂, SpO₂) の上昇といった、軽運動時における身体の負担度の低減に影響する項目があげられる。また換気量 (VE)、1回換気量 (VT) の増加や低酸素換気応答 (HVR) の上昇といった、高所における換気能の亢進が得られたものや、高高所では特に注意が必要とされる急性高山病スコア (AMSスコア) の低下が得られた研究も見られた。

3. 高所で競技やトレーニングを行う競技者を対象とした研究

表2は、高所で競技やトレーニングを行う競技者を対象とした事前順化トレーニングに関する先行研究を一覧表にしたものである。トレーニングに採用された高度は2200～5600mであった。低酸素曝露時の様態としては、安静あるいは運動が多くを占めており、1回のトレーニングにおける曝露時間は1

時間以上に設定されていた。トレーニング効果の測定時に採用された高度は、2000m前後の高度 (1550～2500m) と4000m程度の高度 (4000～4300m) に分かれていた。2000m前後の高度は、ソルトレークシティオリンピック (2002, ソルトレークシティ, 標高1250～2003m), FIFAワールドカップ2010 (2010, 南アフリカ, 標高0～1753m) といった国際レベルの競技会における競技会場の高度に相当する。

トレーニングによって得られる効果としては、タイムトライアル記録の改善や、その際の発揮パワーの上昇、酸素摂取量の増加といった、最大努力作業時における能力の改善があげられる。また最大下運動時の心拍数 (HR)、血中乳酸濃度 (BLa)、主観的運動強度 (RPE) の低下、動脈血酸素飽和度 (SaO₂) の上昇を報告したのものもある。しかし、前後で効果が得られなかった研究も見られた。

4. おわりに

事前順化トレーニングの主な効果としては、安静時や最大下運動時に身体にかかる負担の軽減や、高所における運動パフォーマンス低下の抑制があげられる。1回のトレーニングにおける曝露時間は、高所に出かける登山者を対象とする場合には、最短の場合1時間でも効果が得られるといえる。一方、高所で競技やトレーニングを行う競技者を対象とする場合には、研究間の結果が異なり不明な点も多いため、今後さらに検討が必要である。

表2. 高所で競技やトレーニングを行う競技者を対象とした研究の一覧

著者	発表年	対象者	n (うち対照群)	トレーニング				前後測定		結果	
				利用環境	酸素濃度 ^a	高度 ^a	期間	トレーニング内容	酸素濃度 ^a		高度 ^a
Vallier et al. ²³⁾	1996	エリートトライアスロン選手	5	低圧低酸素室	12.7%	4000m	3週間	自転車運動1時間	20.9% 16.4% 12.7%	0m 2000m 4000m	
Katayama et al. ¹³⁾	2007	陸上競技長距離選手	18(6)	常圧低酸素テント	15.5% 12.3%	2500m 4300m	1週間	安静1時間	15.5%	2500m	12.3%群: HVR _T (安静時)
Beidleman et al. ⁴⁾	2008	低地居住者	10	低圧低酸素室	12.3%	4300m	1週間	安静4時間 安静4時間+うち自転車運動45分	12.3%	4300m	TTime _↓ HR _↓ , SaO _{2↑} , RPE _↓ (最大下運動時)
Hamlin et al. ¹¹⁾	2008	ラグビー選手	22(13)	低酸素吸入装置	13.0～10.0%	3750～5600m	9-13日間	間欠的低酸素吸入1時間	17.3%	1550m	
Beidleman et al. ²⁾	2009	低地居住者	17(6)	常圧低酸素室	11.8% 14.4%	4500m 3000m	1週間	安静1時間35分 自転車運動25分	12.3%	4300m	
Fulco et al. ⁸⁾	2009	現役軍人	10	自然高所	16.5%	2200m	6日間	居住+うち自転車運動計50分	12.6%	4300m	TTime _↓ , MeanPower _↑ , VO _{2↑} (TT時) HR _↓ , PetCO _{2↓} , SaO _{2↑} (安静時) SaO _{2↑} (低強度運動時) HR _↓ , RPE _↓ (高強度運動時)
Faulhaber et al. ⁹⁾	2010	自転車選手	11(5)	常圧低酸素室	12.5%	4500m	7日間	安静1時間	16.4%	1970m	

※記号の説明
 TTime: タイムトライアル記録, MeanPower: 平均発揮パワー
 VO₂: 酸素摂取量, PetCO₂: 呼気終末炭酸ガス分圧, HVR: 低酸素換気応答
 HR: 心拍数, SaO₂: 動脈血酸素飽和度 (観血的), RPE: 主観的運動強度

(注) 表中のa, b)について論文内に記載があるものに関しては各論文の記載に従った。また記載のないものに関しては以下の方法で記載を行った。
 a 常圧低酸素室, 常圧低酸素テントおよび低酸素吸入装置に関しては1気圧の酸素濃度を、低圧低酸素室および自然高所に関しては、当該高度における酸素分圧を1気圧の酸素濃度に換算した値を記載した。
 b 常圧低酸素室, 常圧低酸素テントおよび低酸素吸入装置に関しては酸素濃度から換算した気圧に相当する高度を、低圧低酸素室に関しては設定された気圧に相当する高度を、自然高所に関しては標高を記載した。

低酸素曝露に対する生理的応答や順化の速度には、個人差が見られることが報告されている⁷⁾。今後、事前順化トレーニングにおいても、低酸素曝露に対する個人間の違いに着目した研究を行うことが必要である。また、これまでは高所におけるパフォーマンス低下の防止に主眼が置かれていたが、今後は、FIFAワールドカップ2010の前に日本代表選手団が取り組んだような、競技会直前の体調管理を主目的とした事前順化トレーニング¹⁸⁾のように、体調の管理という視点からの研究も重要な研究課題となるであろう。

参考文献

- 1) Bärtsch P., B. Saltin: General introduction to altitude adaptation and mountain sickness. *Scand. J. Med. Sci. Sports.* 18 (Suppl. 1): 1-10, 2008.
- 2) Beidleman B. A., C. S. Fulco, S. R. Muza, P. B. Rock, J. E. Staab, V. A. Forte, M. D. Brothers, A. Cymerman: Effect of six days of staging on physiologic adjustments and acute mountain sickness during ascent to 4300 meters. *High Alt. Med. Biol.*, 10: 253-60, 2009.
- 3) Beidleman B. A., S. R. Muza, C. S. Fulco, A. Cymerman, D. Ditzler, D. Stulz, J. E. Staab, G. S. Skrinar, S. F. Lewis, M. N. Sawka: Intermittent altitude exposures reduce acute mountain sickness at 4300 m. *Clin. Sci. (Lond)*, 106: 321-8, 2004.
- 4) Beidleman B. A., S. R. Muza, C. S. Fulco, A. Cymerman, M. N. Sawka, S. F. Lewis, G. S. Skrinar: Seven intermittent exposures to altitude improves exercise performance at 4300 m. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 40: 141-8, 2008.
- 5) Beidleman B. A., S. R. Muza, C. S. Fulco, J. E. Jones, E. Lammi, J. E. Staab, A. Cymerman: Intermittent hypoxic exposure does not improve endurance performance at altitude. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 41: 1317-25, 2009.
- 6) Benoit H., M. Germain, J. C. Barthélémy, C. Denis, J. Castells, D. Dormois, J. R. Lacour, A. Geysant: Pre-acclimatization to high altitude using exercise with normobaric hypoxic gas mixtures. *Int. J. Sports Med.*, 13:S213-6, 1992.
- 7) Chapman R. F., J. Stray-Gundersen, B. D. Levine: Individual variation in response to altitude training. *J. Appl. Physiol.* 85: 1448-56, 1998.
- 8) Faulhaber M., H. Gatterer, T. Haider, C. Patterson, M. Burtscher: Intermittent hypoxia does not affect endurance performance at moderate altitude in well-trained athletes. *J. Sports Sci.*, 28: 513-9, 2010.
- 9) Fulco C. S., S. R. Muza, B. Beidleman, J. Jones, J. Staab, P. B. Rock, A. Cymerman: Exercise performance of sea-level residents at 4300 m after 6 days at 2200 m. *Aviat. Space Environ. Med.*, 80: 955-61, 2009.
- 10) Fulco C. S., S. R. Muza, B. A. Beidleman, R. Demes, J. E. Staab, J. E., Jones, A. Cymerman: Effect of repeated normobaric hypoxia exposures during sleep on acute mountain sickness, exercise performance, and sleep during exposure to terrestrial altitude. *Am. J. Physiol. Regul. Integr. Comp. Physiol.*, 300: R428-36, 2011.
- 11) Hamlin M. J., E. A. Hinckson, M. R. Wood, W. G. Hopkins: Simulated rugby performance at 1550-m altitude following adaptation to intermittent normobaric hypoxia. *J. Sci. Med. Sport.* 11: 593-9, 2008.
- 12) Jones J.E., S. R. Muza, C. S. Fulco, B. A. Beidleman, M. L. Tapia, A. Cymerman: Intermittent hypoxic exposure does not improve sleep at 4300 m. *High Alt. Med. Biol.* 9: 281-7, 2008.
- 13) Katayama K., K. Sato, N. Hotta, K. Ishida, K. Iwasaki, M. Miyamura: Intermittent hypoxia does not increase exercise ventilation at simulated moderate altitude. *Int. J. Sports Med.* 28: 480-7, 2007.

- 14) Katayama K, Y. Sato, Y. Morotome, N. Shima, K. Ishida, S. Mori, M. Miyamura: Intermittent hypoxia increases ventilation and SaO₂ during hypoxic exercise and hypoxic chemosensitivity. *J. Appl. Physiol.*, 90:1431-40, 2001.
- 15) 前川剛輝, 山本正嘉: 高度2,000mでの4日間の睡眠時低酸素暴露により4,000mでの最大有酸素性作業能力は改善する. *登山医学*, 21: 25-32, 2001.
- 16) Richalet J. P., J. Bittel, J. P. Herry, G. Savourey, J. L. Le Trong, J. F. Auvert, C. Janin: Use of a hypobaric chamber for pre-acclimatization before climbing Mount Everest. *Int. J. Sports Med.*, 13:S216-20, 1992.
- 17) Rodríguez F. A., H. Casas, M. Casas, T. Pagés, R. Rama, A. Ricart, J. L. Ventura, J. Ibáñez, G. Viscor: Intermittent hypobaric hypoxia stimulates erythropoiesis and improves aerobic capacity. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 31:264-8, 1999.
- 18) 杉田正明, 早川直樹: FIFAワールドカップ2010における日本代表チームの高地対策について. 第14回高所トレーニング国際シンポジウム2010 東京 プログラム, pp12-13, 2010.
- 19) 柴田幸一, 大澤拓也, 山本正嘉: 携帯型の低酸素トレーニング機器を用いたIntermittent Hypoxic Trainingの効果: 登山者向けの高所順化を目的として. *登山医学*, 26: 123-130, 2006.
- 20) 烏賀陽信央, 山本正嘉: 常圧低酸素室を用いた短期間かつ短時間での高所順化トレーニング法の開発. *登山医学*, 22: 83-90, 2002.
- 21) 烏賀陽信央, 山本正嘉: 常圧低酸素室を用いた短時間かつ短期間での高所順化トレーニング法の開発 (第2報). *登山医学*, 23: 63-70, 2003.
- 22) 烏賀陽信央, 山本正嘉: 常圧低酸素室を用いた短期合宿形式 (1週間) の高所順化トレーニングの効果: 血液性状および運動時, 安静時, 睡眠時生理応答の変化. *登山医学*, 24: 41-49, 2004.
- 23) Vallier J. M., P. Chateau, C. Y. Guezennec: Effects of physical training in a hypobaric chamber on the physical performance of competitive triathletes. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 73: 471-8, 1996.
- 24) 山本正嘉, 岸本麻美, 烏賀陽信央, 鮮干攝, 浅野勝己, 前川剛輝, 平野裕一: 富士山を利用した短期間の高所トレーニングに関する研究: 登山中の生理応答と登山後における身体能力の変化. *登山医学*, 28: 145-152, 2008.