

一般中年男性の低圧シミュレーターによる高所トレーニングの 有氣的作業能に及ぼす影響

浅野 勝己・水野 康・競 達也*

Effect of Training at Simulated Altitude on Aerobic Work Capacity in Middle-aged Sedentary Men

ASANO Katsumi, MIZUNO Koh and KISOU Tatsuya

The purpose of this study was to elucidate the effect of training at 2,000 m simulated altitude on aerobic work capacity in middle-aged sedentary men. Subjects were sedentary healthy clerks in University. Five men aged 37-58 (46.2 ± 8.9) years old comprised for altitude training group, whereas five men aged 37-62 (54.4 ± 10.0) years old comprised for sea level training group. Submaximal pedalling for 15 min on Monark ergometer at the load of 50-60% HR reserve was performed 2-3 times per week for 4 weeks at 2,000 m (596 mmHg) in a hypobaric simulator and at sea level. Before and after training sessions, aerobic work capacity was tested at sea level. This test consisted of two submaximal pedalling (50rpm) for detecting VT level and PWC170.

1) VT-work load and PWC170 increased significantly by 18.2% and 18.4%, respectively in altitude training group after training.

2) Diastolic blood pressure during submaximal 12 min pedalling in altitude training group showed a significant decrease after training.

3) An enhancement of efficiency for myocardial O₂ delivery during submaximal pedalling was suggested from a tendency of decrease in PRP (double product) after altitude training.

In conclusion, it might be considered that training at 2,000 m simulated altitude could bring about a significant improvement in submaximal aerobic work capacity and a beneficial effect for cardiovascular function during submaximal work at sea level even in middle-aged sedentary men.

Key words: Simulated high altitude training, Middle-aged sedentary men, Aerobic work capacity

1. 緒言

高所トレーニングは低圧低酸素環境下における滞在暴露による安静時のとくに呼吸循環系などの亢進(受動的効果)の上にトレーニングによる刺激効果(積極的効果)の相乗効果を得ようとするものである。この効果により平地および高所における

競技能力および作業能力の向上に貢献することが期待される。したがって、競技選手および高峰登山者にとって高所トレーニングは重要な意義を有し、これに関する研究は数多く報告されてきている^{1-3,7-9)}。一方、定期的な運動を行っていない一般人についての研究は少なく、とくに中高年者を

* 石狩市立花川南中学校 Ishikari Municipal Hanakawa Minami Junior High School

者を対象とする高所トレーニング研究は未だ報告されていない。従来、標高1,000~3,000m程度の高地住民に長寿者が多く、また冠心疾患や高血圧の発症率の低いことが報じられている^{6,10)}。その要因として1)高所での運動時の生理的負担度が平地よりも比較的大きく、呼吸循環系への刺激の大きいこと¹²⁾、2)高所における甲状腺刺激ホルモン(TSH)の分泌亢進により基礎代謝が平地より高いこと¹⁵⁾、3)骨髄細胞への低酸素刺激により血球新生が活発化すること^{5,6)}、4)遊離脂肪酸の動員と利用が亢進すること^{16,17)}、などが指摘され、これらの総合的効果が高地民族の成人病の発症を抑制しているものと考えられる^{5,6,19)}。したがって、とくに定期的な運動を行っていない中高年者が高地民族の生活条件に近い低酸素環境下で高所トレーニングを行うことは、有気的作業能の向上および成人病予防に貢献する可能性がある。そこで一般中年男性を被検者として2,000m相当高度下で高所トレーニングを負荷し、有気的作業能に及ぼす影響について常圧下トレーニングを負荷した対照群と比較検討した。

2. 方法

1. 被検者

日常的に運動を実施していない健常な一般中年男性5人(年齢:46.2±8.9歳)を高所トレーニング群とし、他の5人(年齢, 54.4±10.0歳)を常圧下トレーニング群とした。被検者の身体的特性を表1に示した。

2. トレーニング前後の測定

トレーニング前後に以下の項目について午後5~6時に測定した。

(1) 換気性作業閾値(VT)

Monark社製自転車エルゴメーターを用い、50rpmで25Wから毎分12.5Wの負荷漸増法により運動を負荷し、心拍数予備(HR reserve)の80%を超えた時点で運動を終了させた。なお80%HR reserveを年齢から推定した最高心拍数(220-年齢)と安静時心拍数との差に0.8を乗じ、それに安静時心拍数を加算して求めた。運動中の心拍数を胸部双極誘導により測定し、ミナト社製レスピロモニターRM-300により呼気ガス交換諸量を連続測定してVT時の心拍数(VT-HR)および仕事量(VT-WL)を求めた。VTの決定は、 $\dot{V}E$ 、 $\dot{V}CO_2$ の非直線的増加、 $F_{E}O_2$ の上昇、 $F_{E}O_2$ の低下、およ

びRの上昇の各一致点をもって行った。

(2) PWC170

Monark社製自転車エルゴメーターを用い、50rpmで各段階4分の3段階、計12分間の負荷漸増運動を負荷した。各段階の負荷は被検者毎に決定し、VT時の心拍数(VT-HR)と負荷の関係から第1段階が50%HR reserve、第2段階が60%HR reserve、第3段階が70%HR reserveになるように設定した。各段階の最後の1分間に主観的運動強度(RPE)を聴取し、さらにコーリン社製血圧計(STBP-780)により心拍数と血圧を測定し、心拍数と収縮期血圧を乗じてダブルプロダクト(PRP)を算出した。心拍数と負荷強度の関係から回帰式を求め、心拍数が170拍/分における仕事量(PWC170)を算出した。

3. トレーニング処方

高所トレーニングを筑波大学体育科学系環境制御装置(室内容積60m³)を用い、2,000m相当高度(596mmHg)、室温20℃、相対湿度60%の環境下で1回15分、週2~3回、4週間にわたり実施した。各被検者のトレーニング回数合計は10~15回であった。なおトレーニングを午後6時前後に行った。運動はMonark社製自転車エルゴメーターによるペダリング運動とし、その強度を50~60%HR reserveとした。減圧および復圧速度は毎分20mmHgとした。一方、常圧下トレーニングを環境制御室内で高所トレーニング群と同一の運動強度で同様に負荷した。

4. 統計処理

各測定結果についてpaired t-testを行い、危険率5%未満をもって有意水準とした。

3. 結果

1. トレーニングのVT-WLとPWC170および運動時RPE、循環応答への影響

図1にトレーニング前後におけるVT-WLとPWC170の変化を示した。すなわちVT-WLは、高所トレーニング群では平均110.0±5.6Wから平均130.0±14.3Wへ平均18.2%の有意な増大($p < 0.05$)を示したが、常圧下トレーニング群では平均77.5±5.6Wから平均85.0±5.6Wへ平均9.7%の増大傾向を示すにとどまった。

つぎにPWC170は高所トレーニング群では平均168.4±43.4Wから平均199.4±58.4Wへと平均18.4%の有意な増大($p < 0.05$)を示したが、常圧

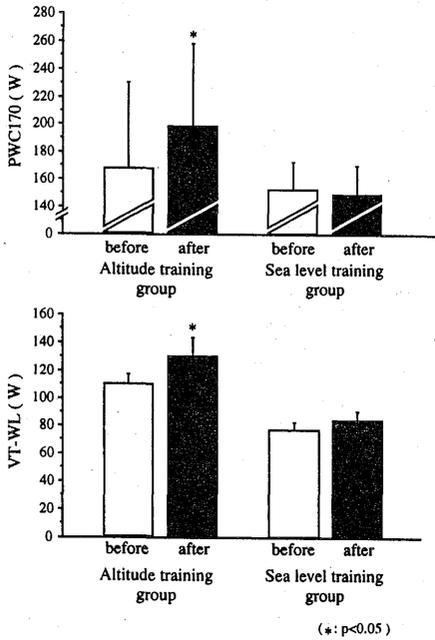


Fig. 1 Comparison of PWC170 and VT-WL between altitude training group and sea level training group of before and after training.
* shows significant difference.

下トレーニング群では平均153.0±20.1Wから平均149.5±21.0Wとほぼ変わらなかった(図1)。PWC170測定のための最大下の12分間ペダリング中の心拍数、収縮期および拡張期血圧、ダブルプロダクト(心拍数と収縮期血圧の積:PRP)、および主観的運動強度(RPE)に対するトレーニングの影響について図2に示した。すなわち心拍数は高所トレーニング群では運動4分および8分でトレーニング効果を認めなかったが、運動12分目においてトレーニング後に約10拍/分の有意(p<0.05)な低下を示した。血圧は収縮期、拡張期ともトレーニングにより低下する傾向を示し、また拡張期血圧は安静時、運動4分、および12分目にトレーニングによる7~18%の有意な低下(p<0.05)を示した。またPRPは運動8分および12分目にトレーニングによる10~17%の低減傾向を示した。RPEは、トレーニング前には8分および12分でそれぞれ平均13(ややきつい)および15(きつい)であったが、トレーニング後にはそれぞれ平均12および13へ有意(p<0.05)に低減した。一方、常圧下トレーニング群では、心拍数が運動12分目にトレーニングによる有意な低下を示した

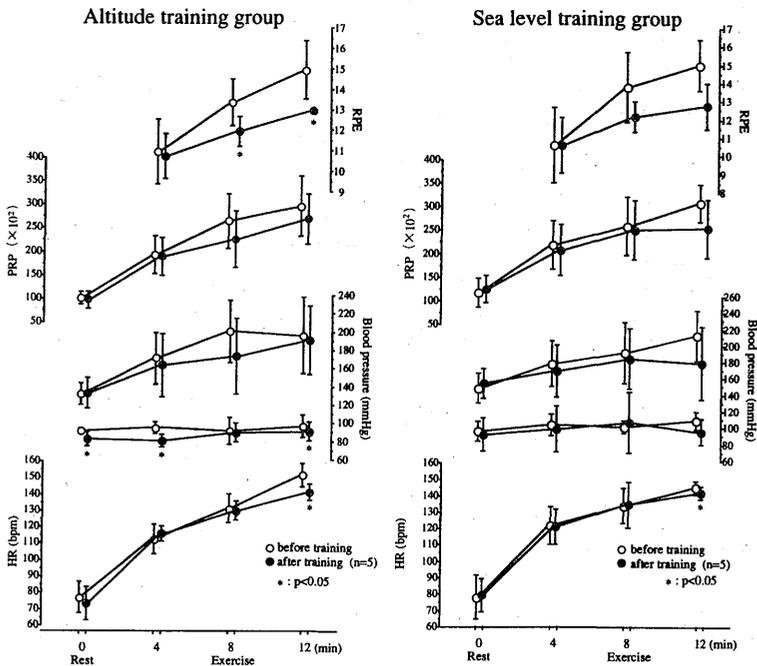


Fig. 2 Comparison of heart rate, blood pressure, PRP, and RPE during submaximal pedalling for 12 min between altitude training group and sea level training group of before and after training.
* shows significant difference.

が, それ以外の測定項目はトレーニング後に有意な変動を示さなかった。

2. 形態的变化

腹部周囲長, 腹部皮脂肪厚, および体脂肪率に対する高所トレーニング群および常圧下トレーニング群のトレーニングの影響を表1に示した。各5人の被検者とも腹部周囲長, 腹部皮脂肪厚および体脂肪率にトレーニングによる有意な変動を示さなかった。

3. K.K.氏(58歳)の高所トレーニングによる

・心血管系応答の変化

比較的血圧の高値傾向にあったK.K.氏(58歳)

について安静時および12分間最大下ペダリング時の心拍数, 血圧, およびPRPを表2に示した。心拍数はトレーニング後に安静および運動時とも減少傾向を示し, 収縮期および拡張期血圧も安静および運動時に明らかな減少を示した。さらにPRPは, トレーニング後に安静時で24%, 運動時に9~13%減少した。

4. 考察

2,000m相当高度(596mmHg)では, 約16%の低濃度酸素を吸入している状態に相当している。すなわちPaO₂およびSaO₂は安静時ではそれぞれ

Table 1 Physical characteristics of the subjects

Altitude training group										
Subj. (male)	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)	Abdominal girth (cm)		Subcute fat abdomen (mm)		%Fat		
				before	after	before	after	before	after	
K.K.	58	163.4	62.5	83.4	81.7	25.5	25.0	17.2	16.9	
S.K.	53	168.4	74.9	93.0	90.7	23.0	22.0	21.0	21.7	
H.F.	42	166.6	67.6	80.0	80.3	20.0	18.0	14.1	13.2	
Y.Y.	41	164.5	60.6	82.9	82.4	17.5	16.5	14.4	13.4	
H.O.	37	180.4	97.2	100.4	100.9	38.0	39.5	26.1	26.3	
Mean	46.2	168.7	72.6	87.9	87.2	24.8	24.2	21.7	21.6	
S.D.	8.9	6.8	14.8	8.5	8.7	8.0	9.2	6.3	6.6	

Sea level training group										
Subj. (male)	Age (yrs)	Height (cm)	Weight (kg)		Abdominal girth (cm)		Subcute fat abdomen (mm)		%Fat	
			before	after	before	after	before	after	before	after
K.Y.	62	158.2	66.9	67.5	92.7	92.0	24.0	22.0	20.0	20.5
S.K.	59	169.5	77.4	77.1	95.1	94.8	36.0	36.0	22.4	22.2
H.Y.	58	164.0	63.2	63.7	88.0	87.9	26.0	27.0	18.6	18.1
Y.T.	56	159.0	58.6	58.4	81.6	80.6	17.0	13.0	13.0	12.7
T.O.	37	173.1	86.6	87.2	95.5	98.5	31.0	26.0	22.9	23.2
Mean	54.4	168.7	70.5	70.8	90.6	90.8	26.8	24.8	19.4	19.3
S.D.	10.0	6.8	11.3	11.4	5.8	6.9	7.2	8.3	4.0	4.2

Table 2 Comparison of blood pressure, heart rate, and PRP during submaximal pedalling for 12 min between before and after altitude training in the subject K.K. aged 58 years.

Hemodynamic function	Rest	Intensity			
		87.5W	100W	112.5W	
Systolic / Diastolic (mmHg)	Before training	143/90	204/101	223/94	226/105
	After training	81	121	140	159
Heart rate (bpm)		115.8	246.8	312.2	359.3
PRP (×10 ²)	Before training	120/72	187/86	206/91	217/95
	After training	78	121	134	144
		93.6	226.3	276.0	312.5

70mmHg および95%であり、最大運動時にはそれぞれ68mmHg および88%に減少し、最大酸素摂取量は約9%の減少を示すとされている⁴⁾。本実験はこのような低圧低酸素環境下において、1回15分のペダリング(運動時最高心拍数130~150拍/分)を週2~3回、約4週間にわたり間欠的に高所トレーニングを計10~15回負荷したことになる。その結果、VT-WLとPWC170のいずれにも約18%の増大が認められた。このような換気性作業閾値や最大下作業時の有気的作業能の改善の機序は、主に心血行動態の向上¹¹⁾や筋内解糖系代謝の抑制などによるとされる。たとえば、Terradosら¹⁶⁾は一流サイクリストについて2,300m相当高度において1回60~90分のペダリングを週3回で4週間負荷して、筋内ホスホフラクトキナーゼ(PFK)および乳酸脱水素酵素(LDH)などの解糖系律速酵素がそれぞれ18%および25%低下したが、cytrate synthaseなどの酸化系律速酵素には明らかな変化の認められなかったことを報告している。本研究でVT-WLおよびPWC170がトレーニング後に増大したことは、主に筋組織内の解糖系代謝の抑制に起因するものと考えられる。一方、常圧下トレーニング群ではVT-WLは、高所トレーニング群の18%の増大に対し9.7%の増大傾向にとどまり、PWC170には明らかな変化は認められなかった。一般中年男性として高所トレーニング群と同等の運動強度で同様のトレーニングを負荷したにも拘わらず、常圧下では低酸素刺激によりもたらされるような解糖系代謝の抑制が十分に獲得できなかったことを示唆している。

つぎに高所トレーニングによる12分間最大下ペダリング時の心拍数と収縮期および拡張期血圧の低下についてであるが、Maherら¹³⁾やYoungら¹⁸⁾が指摘するように、トレーニングによって心筋への β -交感神経系緊張が抑制されることに起因しているかもしれない。Nelsonら¹⁴⁾は心拍数と収縮期血圧の積であるダブルプロダクト(PR_P)については心筋酸素摂取量と高い相関関係のあることを指摘している。本研究において高所トレーニングにより運動時のPR_Pが10~17%減少する傾向を示したことは、最大下運動時の心筋の酸素摂取効率の上昇によるものかもしれない。このことは、とくに収縮期血圧の高値傾向にあったK.K.氏(58歳)の場合、運動時PR_Pの9~13%減少を示しており、高所トレーニングによって心筋酸素摂

取能が改善され、それが降圧をもたらした可能性を示すものと考えられる。

身体の形態では、両群において腹部周囲長、腹部皮脂肪厚、および体脂肪率のいずれもトレーニングの影響を示さなかった。Picon-Reatequi¹⁵⁾は、高地住民の体型が除脂肪のやせ型であるのは甲状腺機能の上昇に由来する基礎代謝の亢進によることを指摘している。またTerradosら¹⁶⁾は、高所滞在とトレーニングにより脂質酸化が亢進する可能性について、間欠の高所トレーニングにより3-hydroxyacyl-CoA-dehydrogenase (HAD)の増大する傾向にあることから示唆している。さらにYoungら¹⁷⁾も高所滞在とトレーニングにより遊離脂肪酸の動員と利用が亢進し、運動時に筋グリコーゲンの節約をもたらすことを指摘している。したがって、本研究の一般中年男性における2,000m相当高度での4週間の高所トレーニング条件では、脂質酸化の上昇をみるには至らなかった可能性がある。なお本研究において高所トレーニング群において12分間の最大下運動時のRPEが高負荷段階で10~13%有意に低減し、さらに収縮期および拡張期血圧の低下が比較的短期間に認められたことは、一部の成人病改善に高所トレーニングが有効である可能性を示すものとして注目したい。

5. 要約

日常的に運動を行っていない健康な一般中年男性5人(平均年齢46.2歳)を高所トレーニング群とし、一般中年男性5人(平均年齢54.4歳)を常圧下トレーニング群とした。高所トレーニング群については環境制御装置の低圧シミュレーターを用いて、2,000m相当高度(596mmHg)において、1回15分間(50~60%HR reserve強度)のペダリング運動を週2~3回で4週間にわたり負荷した。一方、常圧下トレーニングは環境制御装置内において高所トレーニング群と同一の運動強度で同様に負荷し、有気的作業能に及ぼす影響について両群で比較検討した。

1) VT-WLおよびPWC170は、高所トレーニング群ではトレーニング後にそれぞれ平均18.2%および18.4%の有意な増大を示したが、常圧下トレーニング群では有意な変化を示さなかった。

2) 最大下運動時の収縮期および拡張期血圧は、高所トレーニング群では低下し、心拍数の低下に

伴いダブルプロダクトが減少傾向を示したことから、心筋の酸素摂取効率の上昇が示唆された。一方、常圧下トレーニング群ではこのような変動は認められなかった。

これらの成果から、運動習慣のない一般中年男性における2,000m相当高度での高所トレーニングは、比較的短期間に心血管系および有気的作業能の改善をもたらすことが示唆された。

本研究は平成7年度文部省一般研究(B)「高所トレーニングの呼吸循環内分泌応答に及ぼす影響」(課題番号06454625)により行われたものである。

引用文献

- 1) Asano K, Kumazaki Y, Suganuma I, Mizuno K, Masaoka T, Lee G C, Sunoo S, and Takeda M (1992): Effects of simulated altitude training and climbing on aerobic work capacity. (Ed.) G Ueda et al (In) High Altitude Medicine, Shinshu University Press, Matsumoto, pp.428-434.
- 2) Asano K, Masaoka T, Mizuno K, Lee G C, and Takeda M (1992): Effects of simulated altitude training on performance and aerobic work capacity in long distance runners. *Med Sci Sports Exerc* 24 : S101 (Suppl).
- 3) Asano K, Kuno S, Tanaka K, Mizuno K, Takeda M, Hayakawa Y, Inaki M, Takahashi H, and Kamata Y (1993): Effects of simulated cold plus altitude training on aerobic work capacity and muscle energetics by ^{31}P NMR in Japanese Olympic nordic combined skiers. *Med Sci Sports Exerc* 25 : S127 (Suppl).
- 4) 浅野勝己, 松坂 晃, 紅露恒男(1983): 低圧環境下における運動負荷時血行動態. *最新医学* 38 : 74-77.
- 5) 浅野勝己(1990): 高所(低酸素)環境と体力増進. *体力科学* 39 : 15-16.
- 6) 浅野勝己(1991): 高地と運動. *呼吸* 10 : 1609-1618.
- 7) 浅野勝己(1994): 高所トレーニングと持久力. (編) 石河, 竹宮「持久力の科学」, 杏林書院, 東京, pp.192-233.
- 8) 浅野勝己(1996): 高所順応トレーニングと安全登山. *臨床スポーツ医学* 13 : 655-663.
- 9) 浅野勝己(1996): 低圧シミュレーターによる高所トレーニングの意義と実際. *Jap J Sports Sci* 15 : 321-331.
- 10) Halhuber MJ, Humpeler E, Inama AK, and Junpmann H (1985): Dose altitude cause exhaustion of the heart and circulatory system? Indications and contraindications for cardiac patients in altitudes. In *High Altitude Deterioration* (Ed.) Rivolier RJ et al, Karger, Basel, pp.192-202.
- 11) Hartley LH, Alexander JK, Modelski M, and Grover RF (1967): Submaximal cardiac output at rest and during exercise in residents at 3,100 m altitude. *J Appl Physiol* 23 : 839-848.
- 12) Maher JT, Jones LG, and Hartley LH (1974): Effects of high altitude exposure on submaximal endurance capacity of man. *J Appl Physiol* 37 : 895-898.
- 13) Maher JT, Denniston JC, Wolfe DC, and Cymerman A (1978): Mechanism of the attenuated cardiac response to β -adrenergic stimulation in chronic hypoxia. *J Appl Physiol* 44 : 647-651.
- 14) Nelson RR, Gobel FL, Jorgensen CR, Wang K, Wang Y, and Taglor HL (1974): Hemodynamic predictors of myocardial oxygen consumption during static and dynamic exercise. *Circulation* 50 : 1179-1189.
- 15) Picon-Reatequi E (1961): Basal metabolic rate and body composition at high altitudes. *J Appl Physiol* 16 : 431-434.
- 16) Terrados N, Melichna J, Sylven C, Jansson E, and Kaijser L (1988): Effects of training at simulated altitude on performance and muscle metabolic capacity in competitive road cyclists. *Eur J Appl Physiol* 57 : 203-209.
- 17) Young AJ, Evans WJ, Cymerman A, Pandolf KB, Knapik JJ, and Maher JT (1982): Sparing effect of chronic high altitude exposure on muscle glycogen utilization. *J Appl Physiol* 52 : 857-862.
- 18) Young AJ, Young PM, McCullough RE, Moore LG, Cymerman A, and Reeves JT (1991): Effects of β -adrenergic blockade on plasma lactate concentration during exercise at high altitude. *Eur J Appl Physiol* 63 : 315-322.
- 19) 山本正嘉(1994): 登山による健康増進の可能性. *登山医学* 14 : 73-78.