

日本トップ競歩選手のサロマ湖 100-kmレース前・後にみられる生理的応答

山地啓司¹⁾、井口文雄²⁾、橋爪和夫³⁾

¹⁾ 立正大学法制研究所

²⁾ 富山県西部スポーツセンター

³⁾ 富山大学人間発達科学部

キーワード: 一流競歩選手、100-kmレース、肺換気量、酸素摂取量

【抄録】

日本を代表する競歩選手のサロマ湖 100-kmレース前・後の生理的応答に関する比較を行った。レースは2006年6月に開催され、多数のランナーに交じって100-kmをウォーキング(競歩)で完歩した。そのタイムは9時間09分であった。体重の低下はわずか0.1kg、最大作業時の肺換気量(\dot{V}_E)と最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)はそれぞれ $54.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (34.0%)と $0.481 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (11.4%)低下した。 \dot{V}_E の低下は呼吸数(f)の $7 \text{ breaths}\cdot\text{min}^{-1}$ (9.2%)、1回換気量(V_T)の $0.57 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ (26.9%)の大幅な低下に原因した。さらに、換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)は24.9%低下した。最大下作業時のウォーキングスピードが $120\sim 240 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ の範囲では、レース後の \dot{V}_E は19.4~29.5%低下し、その低下が f の12.0~35.4%と V_T の-10.1~8.8%の低下に負うことが明らかになった。しかし、最大・最大下のウォーキング中に心拍数(HRmax)、血中乳酸濃度(LT)、主観的運動強度(RPE)にはほとんど差がみられなかった。100-kmレース(競歩)の3日後に低換気症候群(hypoventilation syndrome)が認められた。従って、本被験者や競技力の高い競歩選手がさらなるパフォーマンス向上をねらう場合、呼吸筋の疲労度の軽減や速やかな回復を図るために呼吸筋のトレーニングを行うことも、一考に値すると考える。

スポーツパフォーマンス研究, 7, 370-380, 2015年, 受付日: 2015年10月13日, 受理日: 2015年12月24日

責任著者: 山地啓司 〒360-0194 埼玉県熊谷市万吉1700 立正大学法学部 yamaji.kk@nifty.com

* * * * *

Physiological responses of Japan's top race walker before and after 100 km race walk around Saroma Lake

Keiji Yamaji¹⁾, Fumio Iguchi²⁾, Kazuo Hashizume³⁾

¹⁾ Rissho University

²⁾ Toyama West Sports Center

³⁾ Faculty of Human Development, University of Toyama

Key words: super walker, 100-km race walk, pulmonary ventilation, oxygen intake

[Abstract]

The present study evaluated the physiological responses of Japan's top race walker before and after a 100-km race walk around Saroma Lake. The race was conducted in June, 2006. He completed the 100-km walk mingled among many other participants. His time was 9 hours 9 minutes. His weight loss was only 0.1 kg, and his maximal pulmonary ventilation (\dot{V}_E) and maximal oxygen intake ($\dot{V}O_{2max}$) were reduced by 54.0 L per min^{-1} (34%) and 0.481 L per min^{-1} (11.4%) respectively. The reduction of \dot{V}_E was caused by his large reduction in breathing rate (f) of 7 breaths per min^{-1} (9.2%) and one-time ventilation rate (\dot{V}_T) of 0.57 L per min^{-1} (26.9%). His ventilator equivalent ($\dot{V}_S/\dot{V}O_2$) dropped by 24.9%. At the time when his walking speed was submaximal, in the range of 120~240 m per min^{-1} , his \dot{V}_E after the race dropped by 19.4~29.5%. That decrease was due to the drop of 12.0~35.4% in f and in \dot{V}_T of -10.1~8.8%. His maximal heart rate (HRmax), blood lactate (LT), and rating of perceived exertion (RPE) did not change significantly. A hypoventilation syndrome was observed 3 days after the race. These results suggest that for improvement of race walking performance, training of the respiratory muscles may be effective for lessening and recovering from fatigue of the respiratory muscles.

1. 緒論

マラソンのレース後呼吸筋が疲労するという報告が1924年初めてGordon et al(1924)のボストンマラソン(研究当時は40.3 kmであった)を完走した20名について行われている。その報告によると、レース後の努力性肺活量(FVC)がレース前に比べ0.8L(約17%)低下している。続いて、Hug(1928;1929)はスイスマラソンレース前・後のFVCを調べた結果、1927年のレースでは0.7L(約16%)、1928年のレースでは0.9L(約18%)の低下をそれぞれ認め、Gordon et al(1924)の報告を追認した。しかし、その後約四半世紀の間、長距離レースと呼吸あるいは呼吸筋に関する報告は認められない。1950年後半から再び長距離レースと呼吸に関する報告がなされたが、それらはいずれも長距離レースでは肺臓の活動水準からみて呼吸には十分余裕があるとみなし、呼吸は最大酸素摂取量の制限因子にはならないとした(Asmussen and Nielsen,1958; Fox and Costill,1972; Shephard,1967)。例えば、Fox and Costill(1972)は、9名のマラソンランナーが各選手のマラソンベスト記録の平均スピードで走っている際の心拍出量(\dot{Q})や酸素摂取量($\dot{V}O_2$)の活動水準が最大値の80~95%に達しているのにもかかわらず、肺換気量(\dot{V}_E)は最大値の約70%の水準にあることから肺機能にはまだ余裕があるとみなした。

しかし、1980年ごろになるとその考えに異議を唱える報告が出始めた(Mahler and Loke,1981A; Mahler and Loke,1981B; Maron et al,1979)。例えば、Maron et al(1979)は1977年に行われたウイシコンシンMayfair マラソンの完走者13名の努力性肺活量(FVC)が0.48L(8.6%)低下し、それは残気量の増加分に匹敵するものであった。さらに、Ridgefield マラソンとJohn W.English マラソンを完走した46名と41名のランナーを対象にした報告でも、FVCが3.9%と5.9%それぞれ低下したことを報告した(Mahler and Loke,1981A)。さらに、マラソンよりも距離の長いウルトラマラソン(80.6 km及び100 km)でもFVCが12.4%、1秒率(FEV_1)が9.5%、それぞれ有意に低下することを突き止めた(Mahler and Loke,1981B)。しかし、これらの報告は、運動直後あるいは数日後の安静時に測定されたものである。レース3日後に運動を負荷した時の生理的応答に関する比較はわずか高山ほか(2015)の報告があるのみである。この報告は本研究と同じ100-kmレースではあるが、運動様式としてランニングを用いたものであるため、直接比較が困難である。

さらに、本研究の被験者は日本を代表する競歩選手であること、また、ランナーに混じって100-kmウルトラマラソンレースに挑戦したことから、自分の能力の極限まで発揮した(追い込んだ)ものと考えられる。そこで本研究では、日本を代表する競歩選手が極限まで追い込んだレース3日前とレース3日後の呼吸・循環機能の生理的変化を明らかにすることによって、被験者ならびに競技力の高い競歩選手の今後のトレーニングの方向性を見極める一資料を得ることを目的とした。

II. 研究方法

1. 被験者

被験者は競歩(20km および50km)のトレーニングにすでに8年間取り組んできた日本を代表する競歩競技者男子1名(23歳)である。(なお被験者の当時のベスト記録は、20kmが1時間20分38秒、50kmが3時間43分38秒である)。レース前の被験者の身長は178.1cm、体重は64.5kg、皮脂厚で測定された体脂肪量は体重の14.4%であった。

2. 測定方法

2006年に開催されたサロマ湖100-kmレースに出場する3日前とレース終了3日後の同一曜日および時間帯にトレッドミル(傾斜角度は0%)を用いて、競歩の断続的漸増負荷法で最大・最大下作業(all-outテスト)を行った。トレッドミルの角度をフラットに保ち、初速を $120\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ から3分間行い、1分間の休息の後、スピードを $30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ 高めて($150\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)3分間ウォーキングを行う、すなわち、3分間ウォーキングを1分間の休息をはさみながら $30\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ ずつ速度を高める、速度の漸増負荷法でall-outに達するまで実施した(図1)。なお、all-outは被験者が主体的に判断した。

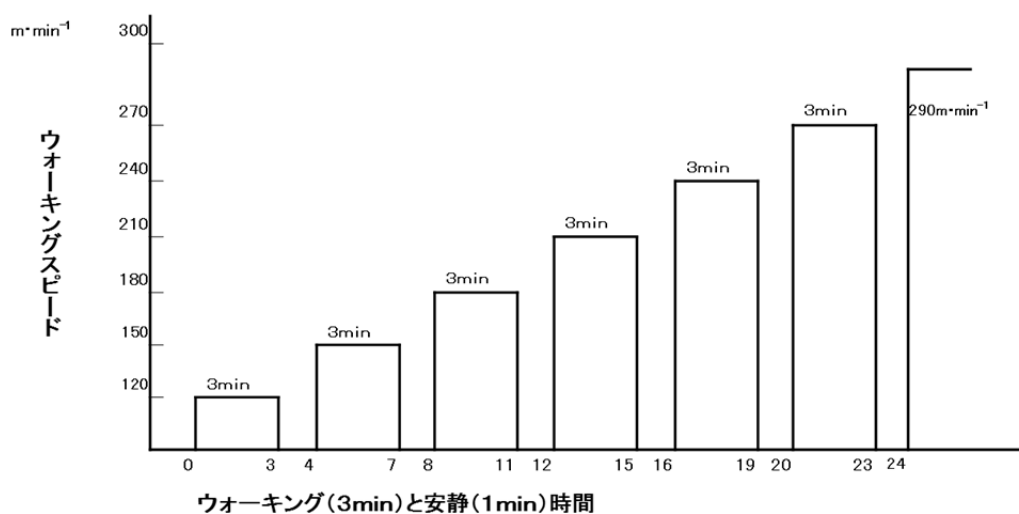


図1 速度の漸増負荷法によるプロトコール

ウォーキング中の酸素摂取量($\dot{V}O_2$)、肺換気量(\dot{V}_E)、1回換気量(V_T)の測定はデンマークのInovision社製のASCM1000を用いて吸気量を、また、呼気ガスの酸素濃度(F_{IO_2})はミキシングチェンバー法で測定し、3分間の運動中の最後の2分目から3分目までの1分間の値をそのスピードでの値とした。さらに、それに同期した2分目から3分目までの1分間の呼吸数($\text{breaths}\cdot\text{min}^{-1}$)とNECメディカルシステムズHR500を用いて心拍数(HR)とを測定した。さらに、1分間の休息中に指尖より採血を行い、Arkray社のラクテート・プロを用いて血中乳酸濃度を測定した。なお、all-out後の採血は運動終了後約1分目と3分目の2回行い、大きい値を運動後のピーク乳酸値とした。RPEは休息時とall-out直後に口頭で聞き取りを行った。

III. 結果

被験者はサロマ湖100-kmを競歩で止まることなく歩き続け9時間09分39秒で完歩した。この被験者のレース3日前とレース3日後の身長は178.1cmと変わらず、体重は64.5kgと64.4kg、皮脂厚から推定された体脂肪率は14.4%と14.6%とほぼ同じであった。

レース3日後のトレッドミルでのスピードの漸増負荷テストでは、ウォーキングに対する $\dot{V}O_2$ ($\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)は直線的に高まったが、そのレベリングオフはレース前の $240\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ に比べ早い段階の約 $210\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ で出現した。最大値($\dot{V}O_{2\text{max}}:\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)は両者とも $270\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ で現れ、レース前の

65.5ml \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ に対してレース後では 58.1 ml \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ と 7.4 ml \cdot kg $^{-1}\cdot$ min $^{-1}$ (11.3%)低下した(図2). レース前の \dot{V}_E は all-out までほぼ直線的に高まるのに対して、レース後の \dot{V}_E は 210m \cdot min $^{-1}$ のスピードを超えるとレベリングオフが現れ、定常状態に近づいていた(図3). $\dot{V}O_{2max}$ が出現した時の \dot{V}_E はレース前が 160.9L \cdot min $^{-1}$ に対して、レース後は 106.9 L \cdot min $^{-1}$ と 54.0 L \cdot min $^{-1}$ (33.6%)の大幅な低下を示した(表1). ウォーキングスピードに対する f はレース後にはレース前よりも 5~23 breaths \cdot min $^{-1}$ 少なく、それに対して V_T は 210 m \cdot min $^{-1}$ まではレース前・後に大きな差が認められないが、レース後の 240 m \cdot min $^{-1}$ では 0.18L(8.8%)の低下が、さらに $\dot{V}O_{2max}$ が出現した 270m \cdot min $^{-1}$ では 0.57L(26.9%)と著しく低下した. すなわち、レース後 210 m \cdot min $^{-1}$ 以降の \dot{V}_E の増加率の低下は f と V_T の顕著な低下によることが明らかになった. さらに、レース後の換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)はレース前に比べ 13.7~25.2%低下した(表2). ウォーキングスピードに対する HR はトレーニング前・後にほぼ同様な直線を描き、HRmax も 190 beats \cdot min $^{-1}$ と同じ値であった. さらに、ウォーキングスピードに対する血中乳酸濃度の上昇率は 240m \cdot min $^{-1}$ まではほぼ等しかったが、270m \cdot min $^{-1}$ ではレース前 9.8 mmol \cdot L $^{-1}$ に比べレース後(11.1 mmol \cdot L $^{-1}$)若干高くなったが、レース前の all-out 直後のピーク乳酸濃度の 12.6(mmol \cdot L $^{-1}$)に比べると低くなった.

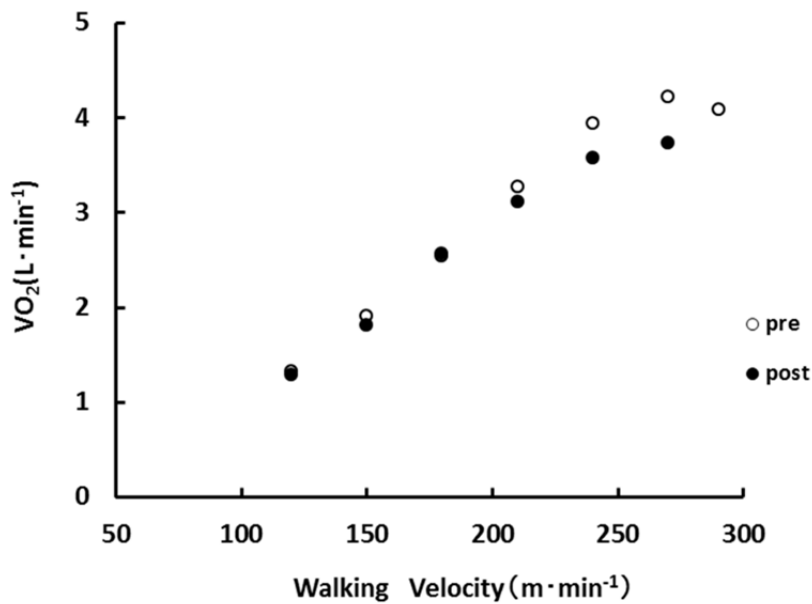


図2. All-out テストにおける酸素摂取量の変動

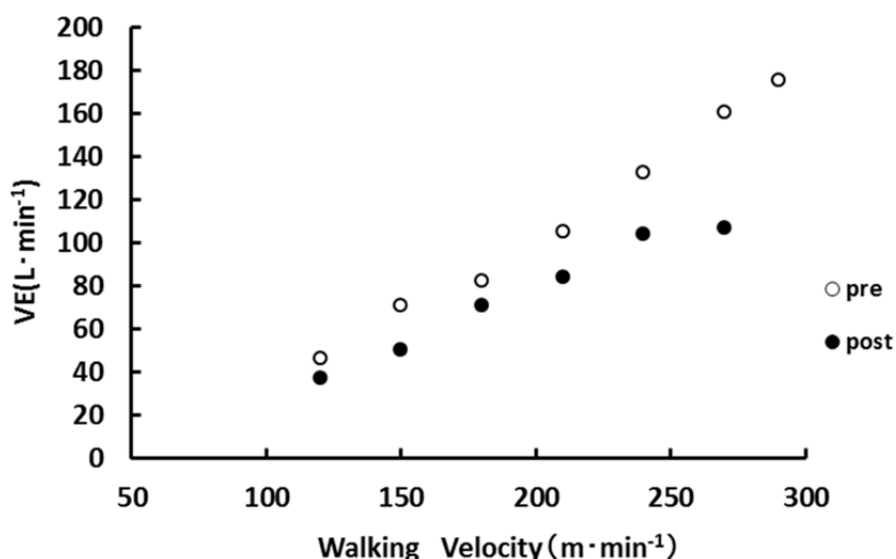


図3. All-out テストにおける肺換気量の変動

表1. レース前・後にみられる $\dot{V}O_{2max}$ が出現した時の呼吸・循環機能の比較

	レース前	レース後	%
最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$;L·min ⁻¹)	4.22	3.74	11.4
($\dot{V}O_{2max}$;ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)	65.5	58.1	11.3
肺換気量(\dot{V}_E ;L·min ⁻¹)	160.9	106.9	33.6
呼吸数(f;breaths·min ⁻¹)	76	69	9.2
一回換気量(\dot{V}_T ;L·breath ⁻¹)	2.12	1.55	26.9
最高心拍数(HRmax;beats·min ⁻¹)	190	190	0
血中乳酸濃度(LT;mmol)	9.8	11.1	-13.8
呼吸交換率(R)	1.2	1.09	0.09
換気当量($\dot{V}_E / \dot{V}O_2$)	38.1	28.6	24.9

IV. 考察

日本を代表する競歩選手を対象に、ウォーキング(競歩)で 100-kmレースを完歩した時の呼吸循環系疲労についてレース 3 日後に最大・最大下テスト(all-out テスト)を行うことによって確かめた。レース 3 日後に all-out テストを実施したのは、レースが北海道で行われ、all-out テストを富山市で測定したこと、また、レースに最大・最大下テストを行うため、脚疲労がテスト結果に大きく反映しないことを考慮したためである。被験者はレース後 2 日間に早朝の 30~60 分の軽い競歩を行い疲労回復に努めた。

All-out に達するまでの持続時間は断続的運動強度であるため比較が困難であるが、トレーニング前は 290m のスピードで 1 分 02 秒に対して、レース後には 270m のスピードでようやく 3 分間を歩き続けることができる状態であった。従って、レース 3 日後のパフォーマンスは低下したと言える。この結果は高山ほか(2015)の 100-kmウルトラマラソンと同様の結果を示した。高山ほか(2015)は、パフォーマンスの低下(6.3%)の原因として $\dot{V}O_{2max}$ の低下(3.8%)や筋損傷に伴う脚筋力の低下、あるいは all-out 時

の肺換気量の顕著な増加(11.2%)に伴う活動筋への血液配分量の減少を挙げている。本研究では $\dot{V}O_2\max$ がレース3日前とレース3日後のいずれにおいても270mのスピードで発現し、レース3日後ではレース3日前に比べ11.4%の低下が生じた。その時の \dot{V}_E にはレース前に比べ33.6%の顕著な低下が認められた。この \dot{V}_E の大幅な低下は、呼吸数の9.2%の低下と V_T の26.9%の低下によるものであった。テスト前・後の換気量の測定器の検定では異常が認められなかった。さらに考えられるマスクからの呼吸ガスの漏れでも検者側のチェックでは異常が認められず、被験者への内省では「漏れたようには思わない。ただ、いつものように呼吸がうまくできず、苦しかった」と言う返事であった。

そこで、「呼吸がうまくできなかった」と言う主観的見解を、最大下のスピード(120~210m \cdot min $^{-1}$)における $\dot{V}O_2$ 、 \dot{V}_E 、呼吸数の関係から調べてみた。レース後の $\dot{V}O_2$ はレース前に比較して2.9~5.1%と若干低下傾向がみられるが、 \dot{V}_E は19.0~29.0%の大きな低下を示した(表2参照)。この時の呼吸数は12.0~35.4%と顕著な低下を示したのに、 V_T は-10.1~8.2%とそれほど大きな低下ではなかった。すなわち、最大下のウォーキングスピードの段階ですでに呼吸に異常が認められ、特に呼吸数の低下が顕著に現れていた。

表2. レース前・後の最大・最大下作業における酸素摂取量と呼吸機能との比較

		120	150	210	240	270	290
		(m/min $^{-1}$)	(m/min $^{-1}$)	(m/min $^{-1}$)	(m/min $^{-1}$)	(m/min $^{-1}$)	(m/min $^{-1}$)
酸素摂取量 ($\dot{V}O_2$;ml \cdot l $^{-1}$ \cdot kg $^{-1}$ \cdot min $^{-1}$)	レース前	20.6	29.8	50.8	61.1	65.6	63.3
	レース後	20.0	28.1	48.3	55.6	58.1	
	Δ %	2.9	5.1	4.9	9	11.3	
肺換気量 (\dot{V}_E ;L \cdot min $^{-1}$)	レース前	46.4	71.0	105.0	132.5	160.9	175.4
	レース後	37.4	50.4	84.1	103.9	106.9	
	Δ %	19.4	29.5	19.8	21.6	33.6	
呼吸数 (f;breaths \cdot min $^{-1}$)	レース前	42	65	59	65	76	91
	レース後	37	42	49	56	69	
	Δ %	12.0	35.4	16.9	13.8	9.2	
一回換気量 (V_T ;L \cdot breath $^{-1}$)	レース前	1.1	1.09	1.78	2.04	2.12	1.93
	レース後	1.01	1.20	1.72	1.86	1.55	
	Δ %	8.2	-10.0	3.4	8.8	26.9	
換気当量 ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)	レース前	34.9	37.3	32.1	33.6	38.1	42.9
	レース後	29.1	27.9	27.1	29	28.6	
	Δ %	16.7	25.2	15.6	13.7	24.9	

これまで多くの研究者によってマラソンやウルトラマラソン直後の努力性肺活量(FVC)の低下やそれに伴う残気量(RV)の増加が報告されている(Mahler and Loke 1981A;1981B;Maron et al,1979;Romer and Polkey, 2008)。その低下はマラソンよりウルトラマラソンに(Mahler and Loke 1981A;1981B)、またウルトラマラソンでも距離が長く起伏の多いレース(Wüthrich et al, 2014)に顕著に現れている。マラソンなどのレース後にみられる呼吸筋の機能低下が、Maron et al(1979)は気管支周辺の浮腫あるいは

末梢の気道の直径の縮小(閉塞)にあると、また、Romer and Polkey (2008)は①肺のコンプライアンスの低下、②横隔膜の伸縮力の減退、③呼吸筋の弾性エネルギーの低下、等に原因するとみなした。さらに、Miles et al (1983)は、マラソンのレース後気道障害は認められないが、肺拡散能や肺胞膜拡散能の低下が肺胞毛細血管の膜抵抗の増加を引き起こし、それが弾性反動(elastic recoil)の減衰と閉鎖性容積(closing volume)の増加を引き起こしているものとみなしている。これらの報告はいずれも呼吸の深さの問題、いわゆる、 V_T の低下の原因を指摘するもので、呼吸数の低下を説明するものではない。これらの報告はレース直後の安静時における肺機能検査によるもので、マラソンレース直後の肺機能の低下が呼吸抵抗の増加と肺容量の減退等によるものであることを証明したものである。

高山ほか(2015)が行った100-kmウルトラマラソンレース3日後の最大下テスト($280\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)時の \dot{V}_E は27.6%増加している。さらに、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ が出現した時はレース前に比べ \dot{V}_E が11.2%増加している。この研究では f や V_T が明らかでないので、 \dot{V}_E の増加にどちらの影響が大きいのかは明らかではない。また、 \dot{V}_E が増加しそれに対して $\dot{V}O_{2\text{max}}$ に3.8%の低下が認められるため、換気当量($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$)は9.0%増加($35.6\rightarrow 40.6$)している。本研究ではこの報告とは逆にレース後の換気当量は大きく低下($13.7\sim 25.2\%$)した。この両者の研究結果の相違の原因については明らかではないが、推測するに、高山ほか(2015)の被験者は呼吸循環機能よりも脚の疲労が先行したため、呼吸循環機能にまだ余裕が残っていた。それに対して、本研究の被験者が日本を代表する競歩選手であることや、走る際には体重の2倍以上の負担が脚に係るのに対して、歩く場合には両足が地についていることも条件の1つであることから走るほどの負担が脚にかからないなどの運動様式の違いにより、本研究においては脚の疲労と呼吸循環器系の疲労が拮抗していたと推測できる。このことから、本被験者は呼吸筋の疲労を最高度に追い込んでいたことが考えられる。しかし、これは想像の域を超えない。

呼吸筋をあらかじめ疲労させた後に運動テストによって生理的反応が報告されている。Mador and Acevedo (1991)は、健康な男女10名を対象に最大口腔内圧が生じる吸気作業閾値の80%でもうこれ以上呼吸がつづけられなくなるまで呼吸を行った後、90% $\dot{V}O_{2\text{max}}$ の強度で自転車駆動を疲労困憊まで行った。その結果、持続時間がコントロール値に比べ23.8%、 $\dot{V}O_{2\text{max}}$ が11.8%低下し、 \dot{V}_E に有意な差はないが5.1%低下したと報告している。また、Martin et al (1982)は、最大自発的換気量(MVV)の67%の過呼吸を15分間ごとに4分の休息をはさみながら断続的に計150分を行った後、自転車駆動の持続時間が13.9%、peak $\dot{V}O_2$ が5.2%、 \dot{V}_E が5.9%それぞれ低下したことを報告した。これらの報告は呼吸筋の疲労が脚の疲労を早め、運動を制限することを明らかにするものであった。この報告は本研究の結果にほぼ一致するものであった。すなわち、本研究では100-kmレース3日後にも被験者の呼吸筋の疲労が回復していなかったことが、持続時間や $\dot{V}O_{2\text{max}}$ を低下させる主な原因であったと考えられる。しかし、Mador and Acevedo (1993)の報告でも明らかのように最大下のいずれの強度でも \dot{V}_E は増加し、その増加は f の増加(V_T には有意な低下が認められていない)によっている。Hotta et al (2006;2007)は伸張性運動やダイナミックな運動によってあらかじめ脚筋を疲れさせる(筋の炎症や水腫の発生)と、一定の運動強度の作業時に肺の活動水準が高まり \dot{V}_E を高めることを明らかにした。すなわち、最大下の作業では活動筋の疲労が \dot{V}_E を高めることを指摘している。しかし、これらの報告は本研究の被験者の f がなぜ少なくなったのかについて明らかにするものではない。もし、Hotta et al (2006;2007)が指摘するように呼吸筋や活動筋(脚筋)に炎症や水腫が起きたり、Maron et al (1979)やRomer and Polkey (2008)

が指摘するように気管支周辺の浮腫や気道障害が同時に現れた場合には、本研究結果のように f や V_T が同時に低下し、 \dot{V}_E を低下させるのかもしれない。この点についてはさらに検証する必要がある。

レースにみられる呼吸機能の変化(反応)には個人差が大きい。例えば、Hanson et al (1982) は 70~75% $\dot{V}O_{2max}$ の強度で 60~80 分のトレッドミル走の終了近くでは、 \dot{V}_E が 9~32% 高まり、4 名の被験者の中 1 名は f が 92 breaths \cdot min $^{-1}$ に達し頻呼吸性過呼吸 (tachypneic hyperventilation) 現象が現れた、と報告している。この過呼吸現象は呼吸筋の流動抵抗が増え横隔膜の呼吸疲労を促進させたことによるものとみなしている。本研究の被験者でもレース 3 日前の all-out 直前の f が 92 breaths \cdot min $^{-1}$ に達し、レース 3 日後には最大下の低いスピード (120m \cdot min $^{-1}$) からすでに低換気 (hypoventilation) 現象が認められた。測定後の被験者の内省の“呼吸がうまくできなかった”という主観的な感想が何を意味しているのか、また、指導者の感想の、「本被験者は呼吸でリズムを取っている選手であるため、呼吸筋への疲労が大きいのではないか」、との関連性については今後明らかにしていかなければならない。いずれにしろ、低換気現象が現れたことは、呼吸筋に問題が生じたと考えられることから、呼吸筋トレーニングを積極的に行っていくことが、被験者ならびに競歩選手のパフォーマンス向上に繋がる可能性があるかと推察できる。

V. 現場への示唆

これまで報告されている呼吸筋トレーニングは、実験室で自転車エルゴメーターの駆動中に行われたものである (Holm et al, 2004; Romer et al, 2002)。これまでの研究結果では、呼吸筋機能の改善のために最も効果的な運動強度は 75~85% $\dot{V}O_{2max}$ 、運動の長さは 30 分以上続けられることが望ましいとされている (Holm et al, 2004; Ross et al, 2008)。しかし、実際に屋外でのランニング、競歩、サイクリング中に呼吸筋トレーニングが行われた報告は見当たらない。室内の実験で使われる呼吸筋のトレーニング機器は高価で、しかも持ち運びが困難である。ポータブルな簡易の呼吸筋トレーニング機器で、現在日本で市販されているものには、①パワーブリーズ、②スパイロタイガーの 2 種類がある。これらの呼吸筋トレーニングは専門とする主運動のトレーニング中に用いるものではなく、それ以外の時間に安静の状態 (立位あるいは椅座位) で、一定のリズムで深い呼吸を 20~30 分間繰り返えし行うものである。専門の運動のトレーニング中に行う呼吸筋トレーニングには、医療用のマスクで口と鼻に呼吸抵抗を増す方法がある。

競歩はランニングに比べ着地の際の衝撃が小さいだけ脚疲労よりも呼吸循環系の疲労が先行することが予想されることから、呼吸筋のトレーニングはパフォーマンス改善に有効と考えられる。

VI. まとめ

日本を代表する競歩選手がサロマ湖 100-km に出場し、9 時間 09 分で完歩した。レース 3 日前・後の最大・最大下ウォーキングテストでの生理応答に次のような相違が認められた。

最大作業時の $\dot{V}O_2$ と \dot{V}_E はそれぞれ 11.3% と 33.6% 低下した。 \dot{V}_E の顕著な低下は f の 9.2% と V_T の 26.9% の低下に原因した。さらに、換気当量 ($\dot{V}_E/\dot{V}O_2$) は 24.9% 低下した。しかし、その他 HR、LT、RPE にはほとんど差が認められなかった。最大下作業時のウォーキングスピードが 120~210m \cdot min $^{-1}$ の範囲ではレース前・後の $\dot{V}O_2$ に差が認められないが、240 m \cdot min $^{-1}$ を超えるとレース後に急激なレベリングオ

フが現れた。一方、レース後の \dot{V}_E はレース前に比べ120 ~240 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ の範囲で19.4~29.5%低下し、その低下は f の12.0~35.4%の顕著な低下と V_T の-10.1~8.8%の低下に負うことが明らかになった。

本研究では、100-kmレース3日後に低換気症候群(hypoventilation syndrome)が現れた。その予防や回復を促進するために、積極的な呼吸筋トレーニングが必要であろう。

VII. 文献

- Asmussen, E. and Nielsen, M. (1958) Pulmonary ventilation and effect of oxygen breathing in heavy exercise. *Acta Physiol Scand.*, 43:365-378.
- Fox, EL. and Costill, D.L. (1972) Estimated cardiorespiratory responses during marathon running. *Arch Environ Health.* 24:316-324.
- Gordon, B., Levine, S.A. and Wilmaers, A. (1924) Observations on a group of marathon runners with special reference to the circulation. *Arch Intern Med.* 33:425-434.
- Hanson, P., Claremont, A., Dempsey, J. et al. (1982) Determinants and consequences of ventilatory responses to competitive endurance running. *J Appl Physiol. : REEP.* 52:615-623.
- Holm, P., Sattler, A. and Fregosi, R.F. (2004) Endurance training of respiratory muscles improves cycling performance in fit young cyclists. *BMC Physiol.* 4:9.
(<http://www.biomedcentral.com/1472-6793/4/9>)
- Hotta, N., Sato, K., Sun, Z. et al. (2006) Ventilatory and circulatory responses at the onset of exercise after eccentric exercise. *Eur J Appl Physiol.*97:598-606.
- Hotta, N., Yamamoto, K., Katayama, K. et al. (2007) The effect of the amount of eccentric exercise on ventilator response at the onset of exercise. *J Physiol Sci.* 57:193-197.
- Hug, O. (1928) Sportärztliche Beobachtungen vom I. Schweizerrischen Marathonlauf 1927, unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltens der Kreilauforgane und der Atmung. *Schweiz Med Wochenschr.* 58:453-561. Cited by Maron, et al (1979)
- Hug, O. (1929) Die sportärztliche Erfahrungen vom II. Schweizerrischen Marathonlauf 1928. *Schweiz Med Wochenschr.* 59:522-525. Cited by Maron, et al (1979)
- Mador, M.J. and Acevedo, F.A. (1991) Effect of respiratory muscle fatigue on subsequent exercise performance. *J Appl Physiol.* 70:2059-2065.
- Mahler, D.A. and Loke, J. (1981A) Lung function after marathon running at warm and cold ambient temperatures. *Am Rev Respir Dis.* 124:154-157.
- Mahler, D.A. and Loke, J. (1981B) Pulmonary dysfunction in ultramarathon runners. *Yale J Biol Med.* 54:243-248.
- Maron, M.B., Hamilton, L. and Maksud, M.G. (1979) Alterations in pulmonary function consequent to competitive marathon running. *Med Sci Sports.* 11:244-249.
- Martin, B.J. and Chen, H.I. (1982) Ventilatory endurance in athletes: a family study. *Int J Sports Med,* 3:100-104.
- Martin, B., Heintzelman, M. and Chen, H.I. (1982) Exercise performance after ventilator work. *J*

- Appl Physiol.:Respirat Environ Exercise Physio. 52:1581-1585.
- Miles, D.S., Doerr, C.E., Schonfeld, S.A. et al. (1983) Changes in pulmonary diffusing capacity and closing volume after running a marathon. Res Physiol. 52:349-359.
 - Romer, L.M., McConnell, A.K. and Jones, D.A. (2002) Inspiratory muscle fatigue in trained cyclists effects of inspiratory muscle training. Med Sci Sports Exerc 34:785-792.
 - Romer, L.M. and Polkey, M.I. (2008) Highlighted Topic. Fatigue mechanisms determining exercise performance exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. J Appl Physiol. 104:879-888.
 - Ross, E., Middleton, N., Shave, R., et al. (2008) Changes in respiratory muscle and lung function following marathon running in man. J Sports Sci 26:1295-1301.
 - Shephard, R. (1967) The maximum sustained voluntary ventilation in exercise. Clin Sci. 32:167-176.
 - 高山史徳、森寿仁、冢吉彩香、ほか(2015)100 kmウルトラマラソンレースが 有酸素性作業能や脚筋力へ与える運動生理学的影響—市民ランナーによる事例研究—. ランニング学研究. 27:21-30.
 - Wüthrich, T.U., Marty, J., Kerherve, H. et al. (2014) Aspects of respiratory muscle fatigue in a mountain Ultramarathon race. Med Sci Sports Exerc. 47:519-527.