マラソンレースが身体に及ぼす影響

高山 史徳^{1,2}, 鍋倉 賢治¹

Effects of marathon races on physical condition

Fuminori Takayama^{1,2} and Yoshiharu Nabekura¹

¹筑波大学体育系, 〒305-8574 茨城県つくば市天王台1-1-1 (*Faculty of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan*)

²日本学術振興会, 〒102-8472 東京都千代田区麹町5-3-1 (*Japan Society for the Promotion of Science, 5-3-1 Kouzimachi, Chiyoda-ku, Tokyo 102-8472, Japan*)

Received: April 12, 2018 / Accepted: May 31, 2018

Abstract Marathon running performance closely related to the several physiological and performance variables such as maximal oxygen uptake, running economy, and peak velocity. It is well known that muscle damage has a negative impact on the physiological and performance variables. Thus, restarting training or participating in the race in a state where recovery is inadequate may cause injury and loss of race performance. The aims of this review article are to (1) summarize the previous studies that investigated effects of a marathon race on muscle damage and physiological and performance variables, (2) discuss the middle and long term effects of marathon races on physical condition, (3) suggest the practical strategy for some runners that participate in consecutive races within a short period.

Jpn J Phys Fitness Sports Med, 67(4): 269-279 (2018)

Keywords : running economy, maximal oxygen uptake, anaerobic threshold

はじめに

フルマラソン (以後, マラソン) レースの完走時間はエリートランナーでも2時間を超え, また5時間以上を要するレクリエーションランナーもいる. マラソンレース中の心拍数 (Heart rate: HR) は最高心拍数 (Maximal HR: HRmax) の80-90%にも達することから^{1,2)}, 心臓血管系に対する負荷は非常に高いと言える. また, マラソンレースでは, 伸張-短縮サイクルの連続によって筋損傷が起こる³⁾. これらの知見は, マラソンレースが過酷なスポーツであることを示している.

我が国における近年の市民ランニングの現場では, 開催される大会数が増加し, マラソンレースは市民ランナーにとってより身近な存在になっている. 特にマラソンシーズンと言われる10月から4月にかけては, 非常に多くの大会が開催されており, 高頻度でマラソンレースに出場するランナーも存在する⁴⁾.

筋損傷は, マラソンの記録と密接な関係がある走の経済性 (Running economy: RE)⁵⁾や最高走速度 (Maximal velocity: Vmax)^{6,7)}を低下させると報告されている. また, 身体状態の回復が不十分な状態でのトレーニングの再開やレースへの出場は, スポーツ傷害やレースパフォーマンスの低下を惹起する可能性がある. したがっ

て, マラソンレース後における身体状態の回復過程を明らかにする研究は, ランナーやそのコーチがレース後の休養期間やレースの出場頻度を決める際, 貴重な情報となる.

そこで本総説では, 身体状態の中でも筋損傷と生理学的指標およびパフォーマンス指標に焦点を当て, マラソンレース後のそれらの変化を検討した先行研究を概説する. また, 繰り返しマラソンレースに出場したランナーを対象とした先行研究をもとに, マラソンレースが身体状態に与える中・長期的影響についても考察する. 最後に, 短い間隔で繰り返しマラソンレースに出場するランナーに対して, これまでに報告されている研究をもとに示唆を述べる.

用語の定義と扱い

回復 Bishop et al.⁸⁾はトレーニング後の回復に関する総説において, 回復を「ある特定の活動において事前のパフォーマンスを達成もしくは上回ることでできる能力」と定義している. マラソンレース後の回復を検討した先行研究においても, レース前後の各指標を統計学的手法によって比較することで評価している⁹⁻¹⁹⁾. そこで本総説では, 回復を「ある特定の指標がマラソンレース前と比較して有意差がない状態になること」と定義する.

レクリエーショナルランナーとエリートランナー 先行研究では、マラソンレースの完走時間が3時間未満のランナーを「elite runner」¹⁵⁾もしくは「experienced runner」^{14,20)}と表記している。これに対し、3時間以上のランナーを対象とした報告では「recreational runner」^{10-12,16,18)}、「amateur runner」²¹⁾もしくは「non-elite runner」²²⁾と表記している。それらに基づき、本研究では、対象とした先行研究の完走時間の平均値が3時間未満の場合はエリートランナー、3時間以上の場合はレクリエーショナルランナーと記述し表現を統一した。

筋損傷 本研究では、筋損傷を「筋線維および結合組織の形態学的変化および炎症反応」と定義する²³⁾。バイオプシー法を用いた組織科学的分析は、筋の形態学的変化を直接定量できる反面、侵襲性が高い。そのためマラソンレースを対象としたほとんどの先行研究では、最大随意収縮 (Maximal voluntary contraction: MVC) のトルク、血中のクレアチンキナーゼ活性値 (Creatine kinase: CK) および筋痛といった指標によって筋損傷が評価されている。本研究においても、MVCトルク、CKおよび筋痛の3つの指標を筋損傷の評価指標とする。

生理学的指標とパフォーマンス指標 本研究では、マラソンの記録に影響するとされる指標を生理学的指標とパフォーマンス指標の2つに大別し表記する。最大酸素摂取量 (Maximal oxygen uptake: $\dot{V}O_{2max}$) とREの両指標は、マラソンのレースパフォーマンスと密接な関係を有する生理学的指標として扱う。このうち $\dot{V}O_{2max}$ は有酸素性エネルギー出力の大きさを表す指標であり、単位時間に取り込まれ、使われる酸素の最大値と定義され²⁴⁾、レースパフォーマンスと密接な関係があることが数多くの先行研究によって報告されている²⁵⁻²⁹⁾。例えば、Foster²⁶⁾ は25名のマラソンランナーを対象として、 $\dot{V}O_{2max}$ とマラソンの記録との間に強い相関関係 ($r = -0.96$) を認めている。REは最大下強度における酸素摂取量 (Oxygen uptake: $\dot{V}O_2$) あるいは酸素コスト (Oxygen cost: O_2 cost) によって評価される指標であり、数値が低い程REに優れると評価される³⁰⁾。REとマラソンの記録との相関関係を検討した先行研究の見解は一致しておらず、有意な相関関係を認めた報告^{25,28,29)}と認めない報告^{27,31)}がそれぞれ存在する。しかし、 $\dot{V}O_{2max}$ が等質なエリートランナーを対象とした場合においては、REはレースパフォーマンスを決定する要因になりやすいと考えられており³²⁾、実際、世界一流ランナーのREは非常に優れている³³⁾。

持久性パフォーマンスに関する総説において、Bassett and Howley³⁴⁾ は、乳酸性閾値 (Lactate threshold: LT) の走速度 (velocity at LT: vLT) が、生理学的指標を反

映し、長距離走の記録を精密に推定できる指標だと述べている。実際、vLT^{25,28)} あるいは換気性閾値 (Ventilatory threshold: VT) の走速度 (velocity at VT: vVT)^{16,35)} とマラソンレースの記録との関係を検討した多くの先行研究が両者の間に強い相関関係を認めている。また、Vmaxも生理学的指標を反映した指標であり³⁶⁾、マラソンレースの記録との間に強い相関関係が報告されている²⁸⁾。以上の先行研究を踏まえ、本研究では、生理学的指標を反映したパフォーマンス指標として無酸素性閾値 (Anaerobic threshold: AT) の走速度 (velocity at AT: vAT) とVmaxを扱う。なお、LTとVTとの間に密接な関係があるという先行研究³⁷⁾をもとに、両指標ともATの指標として扱った。

マラソンレース後の筋損傷

Table 1はマラソンレース後におけるMVCトルクを報告した先行研究をまとめたものである。Warren et al.³⁸⁾ は、筋損傷の評価指標に関する総説において、正確性や信頼性の観点からMVCトルクが最も優れた指標の一つであると述べている。マラソンレース後におけるMVCトルクの回復に関しては、筋収縮の種類としては等尺性収縮、測定部位としては膝関節伸筋群や足関節底屈筋群を対象とした研究が多い^{9-11,15,17,18)}。Petersen et al.¹⁵⁾ は、エリートランナーを対象として膝関節伸展の等尺性MVCトルクをマラソンレースの前、直後、2日後および5日後に測定している。その結果、レース直後には22.6%の低下を認めたが、2日後と5日後ではレース前との間に有意差を認めなかった。これに対し、Takayama et al.¹⁸⁾ は、レクリエーショナルランナーを対象としてマラソンレースの前と1日後、2日後および3日後に膝関節伸展の等尺性MVCトルクを測定した結果、レース前に比べて2日後まで有意な低下を認めたと報告している。ただし、レース3日後の測定値は回復していた。また、レクリエーショナルランナーを対象とした他の報告においても、膝関節伸展の等尺性MVCトルクはレース2日後まで有意な低下を認めたものが多い^{10,11,17)}。

足関節底屈筋群を対象とした場合、エリートランナーにおいてマラソンレース後の著しい低下が認められている¹⁵⁾。すなわち、Petersen et al.¹⁵⁾ の報告において、対象となったエリートランナーのレース2日後の足関節底屈の等尺性MVCトルクは25.4%の有意な低下を示した。ただし、5日後の測定値は回復していた。一方、レクリエーショナルランナーを対象とした報告では、足関節底屈の等尺性MVCトルクは、レースの前および1-3日後との間で時間による有意な主効果がなかった¹⁸⁾。また、レクリエーショナルランナーを対象とした別の報告によると、レース2日後の足関節底屈の等尺性MVCトルクは、レース前に比べると4.7%の有意な低下であったが、

エリートランナーを対象とした研究に比べると低下率は軽微であった¹⁷⁾。

エリートランナーにおける足関節底屈の等尺性MVCトルクの低下が著しい原因としては、マラソンレース中の絶対強度（走速度）の違いによって足関節底屈筋群への負荷が異なることが関係している可能性がある。走速度とステップ長との間には直線的な関係があり、走速度が高くなるほどステップ長は増大するため³⁹⁾、マラソンレース中のステップ長はエリートランナーで大きくなる。また接地に関しては、レクリエーションランナーと比べてエリートランナーでは、踵着地で走るランナーの割合が低下する⁴⁰⁾。実際、エリートランナーにおけるマラソンレース2日後の足関節底屈の等尺性MVCトルクの著しい低下についてPetersen et al.¹⁵⁾は、大きなステップ長を伴う長時間高強度運動が立脚期後半の足関節底屈筋群の歪みに寄与し、そのことが筋に著しい損傷を与えたと推察している。しかし、著者らの知る限り、マラソンレース中の走速度と足関節底屈の等尺性MVCトルクの低下率との関係を直接比較した研究はないため、この点については推測の域を脱しない。

これまでに報告された先行研究の結果をまとめると、等尺性MVCトルクは、ランナーの特性に関わらずマラソンレース後1週間以内に回復するようである。一方、Sherman et al.⁴¹⁾は、エリートランナーを対象とした場合、膝関節伸展の短縮性MVCトルクはマラソンレース7日後でもレース前と比べて有意に低く、1週間では回復しないことを報告している。長時間ランニング後における筋力低下の程度は、筋収縮の種類により異なるという報告⁴²⁾を踏まえると、マラソンレース後における筋力の回復も筋収縮の種類の影響を受ける可能性が考えられる。レクリエーションランナーを対象として、マラソンレースの前と18時間後に膝関節屈曲の短縮性MVCトルクと伸張性MVCトルクを測定した報告では、伸張性MVCトルクのみには有意な低下を認めている⁴³⁾。しかし、この報告ではその後の回復過程は不明である。著者らの知る限り、マラソンレース後におけるMVCトルクの回復過程を筋収縮の種類の観点から検討した研究はない。今後の研究では、マラソンレース後における筋力の回復過程に関して、筋収縮の種類の観点を踏まえて詳細に検討していく必要がある。

CKは、筋損傷の程度を反映する指標としての限界が指摘されているものの、筋損傷の有無を判断する指標として多くの研究で用いられている⁸⁾。著者らの知る限り、マラソンレース後におけるCKの回復過程を検討した研究は、いずれも2日後までの有意な増加を認めている一方で^{10-13,17,18,44-49)}、1週間以内には回復することを報告している^{10,12,13,18,44-46,49)}(Table 2)。また、筋痛に関しても、多くの先行研究がマラソンレースから1週間以内にレー

ス前と同等レベルになることを認めている^{13,16,18,41,46,49)}(Table 3)。したがって、CKおよび筋痛はランナーのレベルに関わらず、マラソンレース後1週間以内に回復すると考えられる。

これまでに挙げた知見を踏まえると、マラソンレース2日後までは、確実に筋損傷が生じていると考えられる。しかし、マラソンレース1週間後には膝関節伸展の短縮性を除いたMVCトルク、CKおよび筋痛は回復していることから、筋損傷はおおむね回復していると考えられる。また、このことは、次に述べるマラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復に影響を与えていると考えられる。

マラソンレース後の生理学的指標および パフォーマンス指標

前述したとおり、マラソンレースの記録は生理学的指標($\dot{V}O_2\max$ とRE)と密接な関係を持ち、パフォーマンス指標(vAT と $Vmax$)によって大部分が推定できる。したがって、マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標の回復過程を知ることは、ランナーがマラソンレースに出場後、どれぐらいの期間で通常のトレーニングを再開したり、レースに出場することができののかを検討する上で貴重な判断材料となる。

Table 4-5はマラソンレース後における生理学的指標およびパフォーマンス指標の変化を報告した先行研究をまとめたものである。著者らの知る限り、 $\dot{V}O_2\max$ や $\dot{V}O_2peak$ に関してレース直後あるいは1日後に測定した研究はみあたらず、マラソンレース後に関しては、最も近いもので2日後の測定となる。それらの先行研究をみると、低下を認めた報告^{17,21)}とレース前後での有意な変化を認めない報告がある^{14,16,18,50)}。ただし、高山ら¹⁷⁾の研究では、絶対値で表された $\dot{V}O_2\max$ (L/min)には有意差がなかったことから、レース2日後の体重1kg当たりの $\dot{V}O_2\max$ の低下は体重増加によるものである。したがって、マラソンレース後の有酸素性エネルギー出力に顕著な低下が認められたのは、3-4日後に $\dot{V}O_2peak$ が8.7%低下したSierra et al.²¹⁾の報告に限られる。

Sierra et al.²¹⁾の研究で $\dot{V}O_2peak$ の低下が認められた原因としては、他の研究と比べて対象者の年齢が高いことが影響している可能性がある。すなわち、彼ら²¹⁾の研究で対象としたランナーは中年ランナー(43歳, 中央値)であり、その他の研究に比べて年齢が高い。Martin et al.⁴⁷⁾は、若年ランナー(25-39歳)とマスターランナー(55歳以上)を対象として、マラソンレース後に心筋マーカーとしてCK-MB(Creatine kinase-myocardial band)を測定した結果、マスターランナーの増加が著しかったことを報告した。彼ら⁴⁷⁾は、この結果に基づき、マラソンレースにおける心臓への負荷はマスターランナーで顕著であ

Table 1. Recovery time course for maximal voluntary contraction after marathon running

Study	Subjects	Marker (%/sec)	Time (days after competition)						
			1	2	3	5	6	7	10
Clifford et al. ⁹⁾	17 (7 F and 10 M) recreational runners ^{*1}	KE ISO (0)	↓	NS					
	17 (6 F and 11 M) recreational runners ^{*2}	KE ISO (0)	↓	NS					
Hill et al. ¹⁰⁾	12 (4 F and 8 M) recreational runners ^{*3}	KE ISO (0)	↓	↓	NS				
	12 (3 F and 9 M) recreational runners ^{*4}	KE ISO (0)	↓	↓	NS				
Howatson et al. ¹¹⁾	10 (3 F and 7 M) recreational runners ^{*5}	KE ISO (0)	↓	NS					
	10 (4 F and 6 M) recreational runners ^{*6}	KE ISO (0)	↓	↓					
Petersen et al. ¹⁵⁾	8 M elite runners	KE ISO (0)		NS		NS			
		PF ISO (0)		↓		NS			
Sherman et al. ⁴⁰⁾	10 M elite runners	KE CON (63)	↓		↓	↓		↓	
		KE CON (183)	↓		↓	↓		↓	
		KE CON (304)	↓		↓	↓		↓	
Takayama et al. ¹⁷⁾	7 (2 F and 5 M) recreational runners	KE ISO (0)		↓					NS
		KF ISO (0)		↓					NS
Takayama et al. ¹⁸⁾	7 M recreational runners	KE ISO (0)	↓	↓	NS				
		KF ISO (0)	↓	NS	NS				
		PF ISO (0)	NS	NS	NS				

Blanks indicate no data reported.

Abbreviations: F = female; M = male; KE = knee extension; PF = plantar flexion; KF = knee flexion; ISO = isometric; CON = concentric; NS = not significant; ↓ = significant decrease.

^{*1} These runners consumed beetroot juice for 3 days following marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 3 days following marathon running.

^{*3} These runners wore lower limb compression tights for 72 hours after marathon running.

^{*4} These runners received a single treatment of 15 minutes of sham ultrasound after marathon running.

^{*5} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

^{*6} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

ると述べている。実際、Sierra et al.²¹⁾は、対象者のレース直後の心筋収縮力（心エコー検査によって定量）が低下していたことを踏まえ、心筋疲労によって有酸素性エネルギー供給能力が低下したと考察している。以上を踏まえると、先行研究間における結果の差異は、年齢によるマラソンレース中の心臓への負荷の違いによって説明できる可能性がある。ただし、彼ら²¹⁾の報告では、レース3-4日後に心機能の測定を行っていないため、トレッドミルテスト実施時の心筋疲労の有無は不明である。

REに関してマラソンレース直後に測定を行った研究はいくつか存在するが、低下を認めた報告¹³⁾と変化を認めない報告⁵¹⁾があり、結果は一致していない。また、マラソンレース2-3日後にREを評価した先行研究をみても、変化を認めない報告¹⁴⁾、低下した報告¹⁷⁾、向上した報告¹⁵⁾がある。ただし、エリートランナーを対象としたPetersen et al.¹⁵⁾の報告では、半分のランナーが著しい疲労感によってレース後のトレッドミルテストを実施していないため、対象者数が少ない (n=4)。

多くの先行研究が下り坂走や筋力トレーニングによって引き起こされた筋損傷によってREが低下することを明らかにしている^{5,52-60)}。この原因としては、筋線維の発揮張力の低下を補うためにtype II線維の動員が増加すること、伸張-短縮サイクルの遂行能力低下、痛みによりランニングフォームが変化することなどが指摘されている^{5,58)}。実際、高山ら¹⁷⁾は、マラソンレース2日後

において、筋損傷とRE低下の両現象を認めている。REは、生理学的因子、バイオメカニクスの因子、形態的因子、神経筋因子、心理学的因子など様々な影響を受けるため⁶¹⁾、マラソンレース後のREの変化もこれらの因子の変化の影響を受けると予測される。したがって、今後の研究では、マラソンレース後のREの変化について、REに影響を及ぼす因子と同時に評価することで包括的に明らかにする必要がある。

Takayama et al.¹⁶⁾は、レクリエショナルランナーを対象として、マラソンレースの前と7日後にトレッドミルテストの測定を行った。その結果、レース前後の $\dot{V}O_2\max$ 、RE、vATおよびVmaxは有意差がなく、さらに変化の程度を表す効果量も些細なものであった。このような結果に基づき彼ら¹⁶⁾は、レースパフォーマンスと密接な関係を持つ生理学的能力はレース後1週間以内に回復すると結論づけた。また、Maron and Horvath²⁰⁾は、マラソンを2時間36分から2時間44分で完走したエリートランナー4名を対象として、レースの前（27日前から2日前）からレース後（5日後から17日後）にかけて1人あたり6回から12回の $\dot{V}O_2\max$ を測定している（レース後の測定は各ランナーの筋痛が消失してから実施）。その結果、レース前後における4名の $\dot{V}O_2\max$ には有意差がなかったことを報告している。さらに、レースの前後でそれぞれ6回の測定を行った1名のランナーでは、レース後の $\dot{V}O_2\max$ は有意に増加していた（レー

Table 2. Recovery time course for creatine kinase after marathon running

Study	Subjects	Time (days after competition)							
		1	2	3	4	5	6	7	10
Asp et al. ⁴⁰	6 M recreational runners	↑	↑					NS	
Asp et al. ⁴⁵	7 M recreational runners	↑	↑					NS	
Clifford et al. ³⁹	17 (7 F and 10 M) recreational runners ^{*1}	↑	↑						
	17 (6 F and 11 M) recreational runners ^{*2}	↑	↑						
Hill et al. ¹⁰	12 (4 F and 8 M) recreational runners ^{*3}	↑	↑	NS					
	12 (3 F and 9 M) recreational runners ^{*4}	↑	↑	NS					
Howatson et al. ¹¹	10 (3 F and 7 M) recreational runners ^{*5}	↑	↑						
	10 (4 F and 6 M) recreational runners ^{*6}	↑	↑						
Kobayashi et al. ¹²	15 M recreational runners	↑	↑	↑				NS	
Kyröläinen et al. ¹³	7 (1 F and 6 M) trained triathletes		↑		↑		NS		
Liang et al. ⁴⁶	15 recreational runners	↑	↑		NS				
Martin et al. ⁴⁷	17 M recreational runners	↑	↑						
Soeder et al. ⁴⁸	11 M runners	↑		↑					
Takayama et al. ¹⁷	7 (2 F and 5 M) recreational runners		↑						NS
Takayama et al. ¹⁸	7 M recreational runners	↑	↑	NS					
Tojima et al. ⁴⁹	11 M recreational runners	↑	↑			NS			

Blanks indicate no data reported.

Abbreviations: M = male; F = female; NS = not significant; ↑ = significant increase.

^{*1} These runners consumed beetroot juice for 3 days following marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 3 days following marathon running.

^{*3} These runners wore lower limb compression tights for 72 hours after marathon running.

^{*4} These runners received a single treatment of 15 minutes of sham ultrasound after marathon running.

^{*5} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

^{*6} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

Table 3. Recovery time course for perceived muscle soreness after marathon running

Study	Subjects	Time (days after competition)							
		1	2	3	4	5	6	7	10
Howatson et al. ¹¹	10 (3 F and 7 M) recreational runners ^{*1}	↑	↑						
	10 (4 F and 6 M) recreational runners ^{*2}	↑	↑						
Kyröläinen et al. ¹³	7 (1 F and 6 M) trained triathletes	↑	↑	↑	↑	↑	NS		
Liang et al. ⁴⁶	15 recreational runners	↑	↑		NS				
Sherman et al. ⁴¹	10 M elite runners	↑		↑		NS		NS	
Takayama et al. ¹⁶	11 (3 F and 8 M) recreational runners	↑	↑	↑	NS	NS	NS	NS	
Takayama et al. ¹⁸	7 M recreational runners	↑	↑	NS					
Tojima et al. ⁴⁹	11 M recreational runners	↑	↑	NS	NS	NS			

Blanks indicate no data reported.

Abbreviations: F = female; M = male; NS = not significant; ↑ = significant increase.

^{*1} These runners consumed cherry juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

^{*2} These runners consumed placebo juice for 5 days before, the day of and 48 h following marathon running.

ス前：73.6±1.5 ml/kg/min, レース後：79.9±0.7 ml/kg/min, 平均値±標準誤差)。このような結果に基づき彼ら²⁰⁾は、筋痛から回復後の有酸素性エネルギー供給能力は、マラソンのレース前と比べて低下しないと及した。また、マラソンレースから2週間後には、レースパフォーマンスと強い相関関係を有するOBLA (Onset of blood lactate accumulation) の走速度がレース前と比べて有意に高まる超回復現象も報告されている⁶²⁾。さらに、マラソンのような長時間運動におけるパフォーマンスの制限因子と考えられる筋グリコーゲン量についても、マラソンレース1週間後には回復していることが報告されている^{44,45)}。以上の先行研究の結果を踏まえると、

マラソンレース後の生理学的指標およびパフォーマンス指標は1週間以内に回復すると考えられる。

マラソンレースが身体状態に及ぼす中・長期的影響

前章までに挙げた先行研究を総括すると、マラソンレース後には筋損傷が生じ、生理学的指標およびパフォーマンス指標は一時的に低下する場合があるものの、1週間以内には回復すると考えられる。一方、これまでに挙げた先行研究では、ある1回のマラソンレース後の変化を検討したのみであり、短期間に高頻度でレースに出場した場合(中期的影響)や何年間にもわたりレースに出場し続けた場合(長期的影響)の影響については

Table 4. Recovery time course for physiological characteristics after marathon running

Study	Subjects	Marker	Time (days after competition)											
			2	3	4	5	6	7	10	11	13	14	15	
Noble et al. ¹⁴	7 M elite runners	$\dot{V}O_2$	NS						NS			NS (13-15 d after)		
		$\dot{V}O_{2max}$										NS (13-15 d after)		
Kyröläinen et al. ¹³⁹	7 (1 F and 6 M) trained triathletes	$\dot{V}O_2$	NS		NS		NS							
Petersen et al. ¹⁵⁹	4 M elite runners	EE	↓				↓							
Sierra et al. ²¹	6 M recreational runners	$\dot{V}O_{2peak}$			↓									
Takayama et al. ¹⁶⁹	11 (3 F and 8M) recreational runners	$\dot{V}O_{2max}$								NS				
		O_2 cost								NS				
Takayama et al. ¹⁷	7 (2 F and 5 M) recreational runners	$\dot{V}O_{2max}$	↓								NS			
		$\dot{V}O_2$	↑								NS			
Takayama et al. ¹⁸	7 M recreational runners	$\dot{V}O_{2max}$		NS										
Zouhal et al. ⁵⁰	9 M elite runners	$\dot{V}O_{2max}$		NS							NS			

Blanks indicate no data reported.

Abbreviations: M = male; F = female; $\dot{V}O_2$ = oxygen uptake; $\dot{V}O_{2max}$ = maximal oxygen uptake; EE = energy expenditure; $\dot{V}O_{2peak}$ = peak oxygen consumption; O_2 cost = oxygen cost; NS = not significant; ↑ = significant increase; ↓ = significant decrease.

Table 5. Recovery time course for aerobic performance after marathon running

Study	Subjects	Marker	Time (days after competition)											
			2	3	4	5	6	7	10	11	13	14	15	
Hottenrott et al. ²²⁰	40 (19 F and 21 M) recreational runners	V _{IAS}			↑									
		V _{IANS}			NS									
		V _{max}			↓									
Jacobs et al. ⁶²⁰	7 M recreational runners	vOBLA											↑	
Noble et al. ¹⁴⁰	7 M elite runners	TTE									NS (13-15 d after)			
Sierra et al. ²¹¹	6 M recreational runners	V _{max}			NS									
Takayama et al. ¹⁶⁹	11 (3 F and 8M) recreational runners	vVT							NS					
		V _{max}							NS					
Takayama et al. ¹⁷¹	7 (2 F and 5 M) recreational runners	vLT	NS							NS				
		vOBLA	NS							NS				
		V _{max}	↓							NS				
Takayama et al. ¹⁸¹	7 M recreational runners	V _{max}		NS										
Zouhal et al. ⁵⁰⁹	9 M elite runners	V _{max}		NS										

Blanks indicate no data reported.

Abbreviations: F = female; M = male; V_{IAS} = velocity at individual aerobic threshold; V_{IANS} = velocity at individual anaerobic threshold; V_{max} = maximal velocity; $vOBLA$ = velocity at onset of blood lactate accumulation; TTE = time to exhaustion; vLT = velocity at lactate threshold; NS = not significant; ↑ = significant increase; ↓ = significant decrease.

検討していない。そこで本章では、マラソンレースが及ぼす中・長期的影響について先行研究をもとに考察する。

高山ら⁴⁾は、8週間で4回のマラソンレースに出場したエリートランナーを対象として、その期間を含む16週間における生理学的指標およびパフォーマンス指標の変化を検討している。その結果、このランナーの生理学的指標およびパフォーマンス指標は実験期間中一定であり、全てのマラソンレースを完走し、うち2回は自己記録を更新していたことを報告している。また、Takayama et al.⁶³⁾は、過去3年間で70回以上のレース出場経験があるエリートランナーを対象として、マラソンレースの1週間前と1週間後にトレッドミルテストをした結果、レース前後の生理学的指標およびパフォーマンス指標はほぼ同等であったことを報告した。これらの先行研究は、短期間に高頻度でレースに出場した場合でも、生理学的指標およびパフォーマンス指標は回復する

ことを示唆している。

トレーニングやレースの経験が豊富なランナーでは、マラソンレース後の筋損傷が軽微であることも報告されている^{19,64)}。レース経験が豊富なランナー8名（マラソンレースの平均完走回数：108回）が1週間にわたりマラソンレースに毎日出場（42.195 km×7日）した前後に血液検査を実施した報告によると、最後のレースから20-24時間後のCKの変化は1回のマラソンレースを対象とした報告に比べると些細なものであったとされている⁶⁴⁾。筋損傷には繰り返しの効果と呼ばれる筋損傷抑制効果があり、事前に同じような運動を行った対象者では筋損傷は軽減されることが知られている⁶⁵⁾。したがって、短期間に高頻度でマラソンレースに出場するランナーは、マラソンレースによる負荷によって、より強固な筋損傷抑制効果を獲得していると考えられる。

近年、Pressler et al.⁶⁶⁾は、繰り返しのマラソンレース

出場が心血管系に悪影響を及ぼすのかを明らかにするために、幅広いレース出場経験（マラソンレースの出場回数：1-500回）を有する男性ランナー 97名を対象として、対象者の特徴と心血管系指標（Intima media thickness, Ankle brachial index, pulse wave velocity など）との関係を検討した。その結果、レースの出場回数や年間・年間のトレーニング量と心血管系指標との間には有意な相関関係は認められなかった。彼らはこのような結果に基づき、健康的な男性ランナーを対象とした場合、繰り返しのマラソンレース出場は、無症候性の血管損傷の追加的な危険因子にはならないと結論づけた。

事例研究ではあるものの、長期間にわたりマラソンレースに出場し続けたランナーを対象として、 $\dot{V}O_2\text{max}$ などを測定した研究はいくつか存在する⁶⁷⁻⁶⁹⁾。50年間にわたりトレーニングを継続している男性元オリンピックマラソンランナーを対象としたMaud et al.⁶⁹⁾の報告によると、70歳のときに測定された $\dot{V}O_2\text{max}$ は56.8 ml/kg/minであり、同年代の一般的な数値に比べると非常に高く、その他の血液指標などの結果も良好であった。また、このランナーは、測定の数ヶ月前に当時の年代別マラソン世界記録を更新していた（3時間06分24秒）。その他の報告としては、48歳のときに最初のマラソンレースを完走し、その後91歳までに627回のマラソンレースと117回のウルトラマラソンレースを完走した男性ランナーを対象とした研究が挙げられる^{67,68)}。この研究では、対象者の $\dot{V}O_2\text{max}$ とマラソンレースの記録は72歳以降曲線的に低下するものの、80歳代後半まで常に多くのレースに出場していたことを報告している。これらの事例研究はいずれも長期間にわたりマラソンレースに出場し続けても、身体諸機能に著しい悪影響がなかったことを示していると考えられる。

一方、数多くのマラソンレースに出場した場合では、加齢によるパフォーマンスの低下を加速させる可能性も示唆されている。男性ランナー（マラソンレース未満の距離のレース出場回数：258回、マラソンレースの出場回数：122回、マラソンレースを超える距離のレースの出場回数：90回）を対象として、27歳から64歳までのトレーニング・レース状況を詳細に分析した報告では、対象者のマラソンレースの記録の低下率が予想される低下率（アメリカ人を対象として各年齢の最高記録をもとに算出した低下率）に比べて高かった結果に基づき、膨大な量のトレーニングやレースの出場は、加齢によるパフォーマンスの低下を加速させるかもしれないと考察している⁷⁰⁾。また、前述した91歳の男性ランナーを対象とした報告においても、1年間当たりの出場レースを抑えた場合、より優れた記録を残せた可能性があったと述べられている^{67,68)}。ただし、このランナーは、レースで優れた記録を残すことよりも、多くのレースに出場するこ

とを目的としていた。

以上のことから、マラソンレースが身体状態に及ぼす中・長期的影響を詳細に明らかにするためには、複数のランナーを対象として、トレーニング・レース状況や生理学的指標およびパフォーマンス指標を縦断的に測定する必要がある、現時点では十分な検討をするのが難しい。したがって、この点については今後の研究が必要である。

現場への示唆

市民ランナーの中には、短い間隔で繰り返しマラソンレースに出場するランナーがいる。その中には、世界選手権日本代表に3度選ばれた川内優輝選手のようなエリートランナーもいる。一方、高頻度でのレース出場は不十分な回復を招きオーバーリーチングを誘発する可能性がある。オーバーリーチングとは、トレーニングまたはトレーニング以外のストレスの蓄積によって短期的にパフォーマンスが低下した状態のことをさす⁷¹⁾。Aubry et al.⁷²⁾は、23名の男性トライアスロン選手を対象として、3週間の過負荷トレーニング期と4週間のテーパリング期の後にそれぞれパフォーマンスを評価している。その結果、過負荷トレーニング後にオーバーリーチングになった対象者は、ならなかった対象者と比べてテーパリング期におけるパフォーマンスの改善度が低かった。この知見は、オーバーリーチングになることがトレーニングによる適応を妨げる可能性があることを示している。そこで本章では、先行研究をもとに短期間で繰り返しマラソンレースに出場するランナーを対象として、レース後の至適な過ごし方やオーバーリーチングを避けるためのトレーニング戦略を述べる。

筋損傷の代表的な症状である最大筋力の低下は、ランニング障害の原因となる可能性が指摘されている⁷³⁾。加えて、筋損傷によってランニングフォームが変容することも報告されている⁵⁸⁾。先行研究によると、10日間の脱トレーニングでは $\dot{V}O_2\text{max}$ は低下しないこと⁷⁴⁾や、生理学的指標の低下は脱トレーニング開始から2週間以降で顕著となることが報告されている⁷⁵⁾。また、マラソンレース後、筋損傷が顕著なときにレースペースで30分間のランニングを実施すると、CKが著しく増加することも報告されていることから⁷⁶⁾、レース直後における過剰なトレーニングは回復を遅延させたり、オーバーリーチングの誘発に繋がりがかねない。したがって、マラソンレース後、筋損傷が顕著とされる2日間は消極的休息とし、その後は着地衝撃を伴わない自転車運動などのクロストレーニングを行った後、最初のレースから1週間以降は、通常のレース前と同様に、トレーニング量を抑えたテーパリングを実施するのが望ましい。実際、このようなアプローチは2週間の間隔で開催されるアイアンマントライアスロンレースとオフロードトライアスロンの

世界選手権レースに出場するエリートトライアスロン選手が取り入れている⁷⁷⁾。また、マラソンレース後の筋損傷は、レース前後の栄養戦略¹¹⁾、レース後における Unstable rocker shoes⁷⁸⁾ やコンプレッションタイツ¹⁰⁾ の着用によって軽減できることが報告されている。例えば、Howatson et al.¹¹⁾ の研究では、マラソンレースの5日前から48時間後にかけて抗酸化物質などを含むタルトチェリージュースを摂取したランナーはプラセボ飲料を摂取したランナーに比べると膝関節伸展のMVCトルクの回復が早かった。したがって、これらの各種方策の実施もマラソンレース後の回復を促進するために有効なアプローチだと考えられる。

ま と め

エリートランナーおよびレクリエーショナルランナーがマラソンレースを走ると、筋損傷が生じ、生理学的指標およびパフォーマンス指標が一時的に低下する場合がある。その一方でこれらの指標は比較的早期に回復し、これまでに報告された先行研究をみる限り、1週間後にはレース前と同等レベルにまで戻る。また、いくつかの先行研究によって、中・長期的に数多くのマラソンレースに出場したとしても、身体状態に悪影響を及ぼさないことが示されている。このことから、マラソンレースに出場し続けるためには、マラソンレース直後の身体状態の低下に注意を払うことが重要だと考えられる。

今後の検討課題としては、マラソンレースが筋損傷、生理学的指標およびパフォーマンス指標に与える影響の個人差の解明やマラソンレースが身体状態に与える中長期的影響を詳細に明らかにすることが挙げられる。

利益相反自己申告：申告すべきものはなし

謝 辞

本総説は日本学術振興会特別研究員奨励費（17J01363）の助成の一部を受けて実施した。

文 献

- 1) Billat VL, Mille-Hamard L, Meyer Y, Wesfreid E. Detection of changes in the fractal scaling of heart rate and speed in a marathon race. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 388: 3798–3808, 2009. doi: 10.1016/j.physa.2009.05.029.
- 2) Billat VL, Petot H, Landrain M, Meilland R, Koralsztein JP, Mille-Hamard L. Cardiac output and performance during a marathon race in middle-aged recreational runners. *ScientificWorldJournal* 2012: 810859, 2012. doi: 10.1100/2012/810859.
- 3) Sanchez LD, Corwell B, Berkoff D. Medical problems of marathon runners. *Am J Emerg Med* 24: 608–615, 2006. doi: 10.1016/j.ajem.2006.01.023.
- 4) 高山史徳, 嶋津 航, 青柳 篤, 鍋倉賢治：市民ランナーにおけるマラソンシーズンの生理学的指標、パフォーマンスの回復ならびにトレーニング負荷と主観的体調との関係：事例研究, *体育学研究*, 17047, 2018. doi: 10.5432/jpehss.17047.
- 5) Braun WA, Dutto DJ. The effects of a single bout of downhill running and ensuing delayed onset of muscle soreness on running economy performed 48 h later. *Eur J Appl Physiol* 90: 29–34, 2003. doi: 10.1007/s00421-003-0857-8.
- 6) Christmas BC, Taylor L, Siegler JC, Midgley AW. A reduction in maximal incremental exercise test duration 48 h post downhill run is associated with muscle damage derived exercise induced pain. *Front Physiol* 8: 135, 2017. doi: 10.3389/fphys.2017.00135.
- 7) Rose Christmas BC, Taylor L, Siegler JC, Midgley AW. Muscle-damaging exercise 48 h prior to a maximal incremental exercise treadmill test reduces time to exhaustion: is it time to reconsider our pretest procedures? *Res Sports Med* 25: 11–25, 2017. doi: 10.1080/15438627.2016.1258641.
- 8) Bishop PA, Jones E, Woods AK. Recovery from training: a brief review: brief review. *J Strength Cond Res* 22: 1015–1024, 2008. doi: 10.1519/JSC.0b013e31816eb518.
- 9) Clifford T, Allerton DM, Brown MA, Harper L, Horsburgh S, Keane KM, Stevenson EJ, Howatson G. Minimal muscle damage after a marathon and no influence of beetroot juice on inflammation and recovery. *Appl Physiol Nutr Metab* 42: 263–270, 2017. doi: 10.1139/apnm-2016-0525.
- 10) Hill JA, Howatson G, van Someren KA, Walshe I, Pedlar CR. Influence of compression garments on recovery after marathon running. *J Strength Cond Res* 28: 2228–2235, 2014. doi: 10.1519/JSC.0000000000000469.
- 11) Howatson G, McHugh MP, Hill JA, Brouner J, Jewell AP, van Someren KA, Shave RE, Howatson SA. Influence of tart cherry juice on indices of recovery following marathon running. *Scand J Med Sci Sports* 20: 843–852, 2010. doi: 10.1111/j.1600-0838.2009.01005.x.
- 12) Kobayashi Y, Takeuchi T, Hosoi T, Yoshizaki H, Loepky JA. Effect of a marathon run on serum lipoproteins, creatine kinase, and lactate dehydrogenase in recreational runners. *Res Q Exerc Sport* 76: 450–455, 2005. doi: 10.1080/02701367.2005.10599318.
- 13) Kyröläinen H, Pullinen T, Candau R, Avela J, Huttunen P, Komi PV. Effects of marathon running on running economy and kinematics. *Eur J Appl Physiol* 82: 297–304, 2000. doi: 10.1007/s004210000219.
- 14) Noble BJ, Maresh CM, Allison TG, Drash A. Cardio-respiratory and perceptual recovery from a marathon run. *Med Sci Sports* 11: 239–243, 1979.
- 15) Petersen K, Hansen CB, Aagaard P, Madsen K. Muscle mechanical characteristics in fatigue and recovery from a marathon race in highly trained runners. *Eur J Appl Physiol* 101: 385–396, 2007. doi: 10.1007/s00421-007-0504-x.

- 16) Takayama F, Aoyagi A, Shimazu W, Nabekura Y. Effects of marathon running on aerobic fitness and performance in recreational runners one week after a race. *J Sports Med* 2017; 9402386, 2017. doi: 10.1155/2017/9402386.
- 17) 高山史徳, 平田浩祐, 森 寿仁, 鍋倉賢治, 宮本直和: 大学生市民ランナーのマラソンレースが筋損傷指標と有酸素性能力に与える影響, *ランニング学研究*, 27: 47-58, 2016.
- 18) Takayama F, Hirata K, Nabekura Y, Kanehisa H, Miyamoto N. Effects of marathon running on muscle damage in lower limb muscle groups and maximal aerobic capacity in novice recreational runners. *Gazz Med Ital* 176: 100-109, 2017. doi: 10.23736/S0393-3660.16.03332-5.
- 19) 高山史徳, 鍋倉賢治: 学生市民ランナーにおけるマラソンレース後の筋痛-トレーニング状況およびレースパフォーマンスとの関連性からの検討-, *ランニング学研究*, 29: 133-141, 2018.
- 20) Maron MB, Horvath SM. Maximal aerobic power after competitive marathon running. *Can J Sport Sci* 13: 50-55, 1988.
- 21) Sierra AP, da Silveira AD, Francisco RC, Barretto RB, Sierra CA, Meneghelo RS, Kiss MA, Ghorayeb N, Stein R. Reduction in post-marathon peak oxygen consumption: sign of cardiac fatigue in amateur runners? *Arq Bras Cardiol* 106: 92-96, 2016. doi: 10.5935/abc.20150148.
- 22) Hottenrott K, Ludyga S, Schulze S, Gronwald T, Jäger FS. Does a run/walk strategy decrease cardiac stress during a marathon in non-elite runners? *J Sci Med Sport* 19: 64-68, 2016. doi: 10.1016/j.jsams.2014.11.010.
- 23) Peake J, Nosaka K, Suzuki K. Characterization of inflammatory responses to eccentric exercise in humans. *Exerc Immunol Rev* 11: 64-85, 2005.
- 24) Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 32: 70-84, 2000.
- 25) Farrell PA, Wilmore JH, Coyle EF, Billing JE, Costill DL. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 11: 338-344, 1979.
- 26) Foster C. VO₂ max and training indices as determinants of competitive running performance. *J Sports Sci* 1: 13-22, 1983. doi: 10.1080/02640418308729657.
- 27) Foster C, Daniels JT, Yarbrough RA. Physiological and training correlates of marathon running performance. *Aust J Sports Medicine* 9: 58-61, 1977.
- 28) Noakes TD, Myburgh KH, Schall R. Peak treadmill running velocity during the VO₂max test predicts running performance. *J Sports Sci* 8: 35-45, 1990. doi: 10.1080/02640419008732129.
- 29) Sjödin B, Svedenhag J. Applied physiology of marathon running. *Sports Med* 2: 83-99, 1985.
- 30) Saunders PU, Pyne DB, Telford RD, Hawley JA. Factors affecting running economy in trained distance runners. *Sports Med* 34: 465-485, 2004.
- 31) Loftin M, Sothorn M, Tuuri G, Tompkins C, Koss C, Bonis M. Gender comparison of physiologic and perceptual responses in recreational marathon runners. *Int J Sports Physiol Perform* 4: 307-319, 2009.
- 32) Lundby C, Robach P. Performance Enhancement: What are the physiological limits? *Physiology* 30: 282-292, 2015. doi: 10.1152/physiol.00052.2014.
- 33) Jones AM. The physiology of world record holder for the women's marathon. *Int J Sports Sci Coach* 1: 101-116, 2006. doi: 10.1260/174795406777641258.
- 34) Bassett DR Jr, Howley ET. Maximal oxygen uptake: "classical" versus "contemporary" viewpoints. *Med Sci Sports Exerc* 29: 591-603, 1997.
- 35) Takayama F, Aoyagi A, Nabekura Y. Relationship between classic physiological variables and running performance in recreational runners. *Int J Sport and Health Sci* 201720, 2018. doi: 10.5432/ijshs.201720.
- 36) Saunders PU, Cox AJ, Hopkins WG, Pyne DB. Physiological measures tracking seasonal changes in peak running speed. *Int J Sports Physiol Perform* 5: 230-238, 2010.
- 37) Gaskill SE, Ruby BC, Walker AJ, Sanchez OA, Serfass RC, Leon AS. Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc* 33: 1841-1848, 2001.
- 38) Warren GL, Lowe DA, Armstrong RB. Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med* 27: 43-59, 1999.
- 39) Mercer JA, Vance J, Hreljac A, Hamill J. Relationship between shock attenuation and stride length during running at different velocities. *Eur J Appl Physiol* 87: 403-408, 2002. doi: 10.1007/s00421-002-0646-9.
- 40) Kasmer ME, Liu XC, Roberts KG, Valadao JM. Foot-strike pattern and performance in a marathon. *Int J Sports Physiol Perform* 8: 286-292, 2013.
- 41) Sherman WM, Armstrong LE, Murray TM, Hagerman FC, Costill DL, Staron RC, Ivy JL. Effect of a 42.2-km footrace and subsequent rest or exercise on muscular strength and work capacity. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol* 57: 1668-1673, 1984.
- 42) Lepers R, Pousson ML, Maffiuletti NA, Martin A, Van Hoecke J. The effects of a prolonged running exercise on strength characteristics. *Int J Sports Med* 21: 275-280, 2000. doi: 10.1055/s-2000-308.
- 43) Koller A, Sumann G, Schobersberger W, Hoertnagl H, Haid C. Decrease in eccentric hamstring strength in runners in the Tirol Speed Marathon. *Br J Sports Med* 40: 850-852, 2006. doi: 10.1136/bjsm.2006.028175.
- 44) Asp S, Daugaard JR, Rohde T, Adamo K, Graham T. Muscle glycogen accumulation after a marathon: roles of fiber type and pro- and macroglycogen. *J Appl Physiol* 86: 474-478, 1999. doi: 10.1152/jap-1999.86.2.474.
- 45) Asp S, Rohde T, Richter EA. Impaired muscle glycogen resynthesis after a marathon is not caused by decreased muscle GLUT-4 content. *J Appl Physiol* 83: 1482-1485, 1997. doi: 10.1152/jappl.1997.83.5.1482.
- 46) Liang MT, Allen TW, McKeigue ME, Kotis A, Gierke

- LW. Effect of cooling on muscular health prior to running a marathon. *J Am Osteopath Assoc* 101: 219–225, 2001.
- 47) Martin TG, Pata RW, D'Addario J, Yuknis L, Kingston R, Feinn R. Impact of age on haematological markers pre- and post-marathon running. *J Sports Sci* 33: 1988–1997, 2015. doi: 10.1080/02640414.2015.1024712.
 - 48) Soeder G, Golf SW, Graef V, Temme H, Brüstle A, Róka L, Bertschat F, Ibe K. Enzyme catalytic concentrations in human plasma after a marathon. *Clin Biochem* 22: 155–159, 1989.
 - 49) Tojima M, Noma K, Torii S. Changes in serum creatine kinase, leg muscle tightness, and delayed onset muscle soreness after a full marathon race. *J Sports Med Phys Fitness* 56: 782–788, 2016.
 - 50) Zouhal H, Jacob C, Groussard C, Moussa E, Delamarche P, Gratas-Delamarche A. Effect of marathon running on aerobic performances in highly trained athletes. *Sci Sports* 21: 303–305, 2006. (French with English abstract)
 - 51) 鍋倉賢治: 長時間運動による心機能の変化と疲労, バイオメカニズム学会誌, 21: 86–91, 1997.
 - 52) Baumann CW, Green MS, Doyle JA, Rupp JC, Ingalls CP, Corona BT. Muscle injury after low-intensity downhill running reduces running economy. *J Strength Cond Res* 28: 1212–1218, 2014. doi: 10.1519/JSC.0000000000000422.
 - 53) Burt D, Lamb K, Nicholas C, Twist C. Effects of muscle-damaging exercise on physiological, metabolic, and perceptual responses during two modes of endurance exercise. *J Exerc Sci Fit* 10: 70–77, 2012. doi: 10.1016/j.jesf.2012.10.003.
 - 54) Burt D, Lamb K, Nicholas C, Twist C. Effects of repeated bouts of squatting exercise on sub-maximal endurance running performance. *Eur J Appl Physiol* 113: 285–293, 2013. doi: 10.1007/s00421-012-2437-2.
 - 55) Burt DG, Lamb K, Nicholas C, Twist C. Effects of exercise-induced muscle damage on resting metabolic rate, sub-maximal running and post-exercise oxygen consumption. *Eur J Sports Sci* 14: 337–344, 2014. doi: 10.1080/17461391.2013.783628.
 - 56) Burt D, Lamb K, Nicholas C, Twist C. Lower-volume muscle-damaging exercise protects against high-volume muscle-damaging exercise and the detrimental effects on endurance performance. *Eur J Appl Physiol* 115: 1523–1532, 2015. doi: 10.1007/s00421-015-3131-y.
 - 57) Chen TC, Chen HL, Wu CJ, Lin MR, Chen CH, Wang LI, Wang SY, Tu JH. Changes in running economy following a repeated bout of downhill running. *J Exerc Sci Fit* 5: 109–117, 2007.
 - 58) Chen TC, Nosaka K, Tu JH. Changes in running economy following downhill running. *J Sports Sci* 25: 55–63, 2007. doi: 10.1080/02640410600718228.
 - 59) Chen TC, Nosaka K, Wu CC. Effects of a 30-min running performed daily after downhill running on recovery of muscle function and running economy. *J Sci Med Sport* 11: 271–279, 2008. doi: 10.1016/j.jsams.2007.02.015.
 - 60) Chen TC, Nosaka K, Lin MJ, Chen HL, Wu CJ. Changes in running economy at different intensities following downhill running. *J Sports Sci* 27: 1137–1144, 2009. doi: 10.1080/02640410903062027.
 - 61) Barnes KR, Kilding AE. Running economy: measurement, norms, and determining factors. *Sports Med Open* 1: 8, 2015. doi: 10.1186/s40798-015-0007-y.
 - 62) Jacobs I, Sjodin B, Kaiser P, Karlsson J. Onset of blood lactate accumulation after prolonged exercise. *Acta Physiol Scand* 112: 215–217, 1981. doi: 10.1111/j.1748-1716.1981.tb06807.x.
 - 63) Takayama F, Tsuji T, Aoyagi A, Nabekura Y. Recovery of physiological characteristics and muscle soreness after a marathon running in a well-trained runner: a case study. *Gazz Med Ital* 177: 46–50, 2018. doi: 10.23736/S0393-3660.17.03492-1.
 - 64) Karstoft K, Solomon TP, Laye MJ, Pedersen BK. Daily marathon running for a week—the biochemical and body compositional effects of participation. *J Strength Cond Res* 27: 2927–2933, 2013. doi: 10.1519/JSC.0b013e318289e39d.
 - 65) McHugh MP, Connolly DA, Eston RG, Gleim GW. Exercise-induced muscle damage and potential mechanisms for the repeated bout effect. *Sports Med* 27: 157–170, 1999.
 - 66) Pressler A, Suchey C, Friedrichs T, Dallinger S, Grabs V, Haller B, Halle M, Scherr J. Running multiple marathons is not a risk factor for premature subclinical vascular impairment. *Eur J Prev Cardiol* 24: 1328–1335, 2017. doi: 10.1177/2047487317713326.
 - 67) Addison O, Steinbrenner G, Goldberg AP, Katzel LI. Aging, fitness, and marathon times in a 91 year-old man who competed in 627 marathons. *Br J Med Med Res* 8: 1074–1079, 2015. doi: 10.9734/BJMMR/2015/17946.
 - 68) Brendle DC, Joseph LJ, Sorkin JD, McNelly D, Katzel LI. Aging and marathon times in an 81-year-old man who completed in 591 marathons. *Am J Cardiol* 91: 1154–1156, 2003.
 - 69) Maud PJ, Pollock ML, Foster C, Anholm JD, Guten G, Al-nouri M, Hellman C, Schmidt DH. Fifty years of training and competition in the marathon: Wally Hayward, age 70 – a physiological profile. *S Afr Med J* 59: 153–157, 1981.
 - 70) Lambert MI, Bryer L, Hampson DB, Nobbs L, Rapolthy AM, Taliep MS, Viljoen LW. Accelerated decline in running performance in a master runner with a history of a large volume of training and racing. *J Aging and Physical Act* 10: 314–321, 2002. doi: 10.1123/japa.10.3.314.
 - 71) Coutts AJ, Wallace LK, Slattery KM. Monitoring changes in performance, physiology, biochemistry, and psychology during overreaching and recovery in triathletes. *Int J Sports Med* 28: 125–134, 2007. doi: 10.1055/s-2006-924146.
 - 72) Aubry A, Hausswirth C, Louis J, Coutts AJ, Le Meur Y.

- Functional overreaching: the key to peak performance during the taper? *Med Sci Sports Exerc* 46: 1769-1777, 2014. doi: 10.1249/MSS.0000000000000301.
- 73) Niemuth PE, Johnson RJ, Myers MJ, Thieman TJ. Hip muscle weakness and overuse injuries in recreational runners. *Clin J Sport Med* 15: 14-21, 2005.
- 74) Cullinane EM, Sady SP, Vadeboncoeur L, Burke M, Thompson PD. Cardiac size and VO₂max do not decrease after short-term exercise cessation. *Med Sci Sports Exerc* 18: 420-424, 1986.
- 75) Mujika I, Padilla S. Physiological and Performance Consequences of Training Cessation in Athletes: De-training. In: *Rehabilitation of Sports Injuries* (Frontera W, eds.), Wiley-Blackwell, USA, 117-143, 2008. doi: 10.1002/9780470757178.ch6.
- 76) Maresh CM, Allison TG, Noble BJ, Drash A, Kraemer WJ. Substrate and hormone responses to exercise following a marathon run. *Int J Sports Med* 10: 101-106, 1989. doi: 10.1055/s-2007-1024883.
- 77) Mujika I. Recovery between Ironman and XTERRA triathlon world championships. In: *Recovery for performance in sport* (Hauswirth C, Mujika I, eds.), Human kinetics, Champaign, IL, USA, 81-82, 2013.
- 78) Nakagawa K, Inami T, Yonezu T, Kenmotsu Y, Narita T, Kawakami Y, Kanosue K. Unstable rocker shoes promote recovery from marathon-induced muscle damage in novice runners. *Scand J Med Sci Sports* 28: 621-629, 2018. doi: 10.1111/sms.12911.