

マラソン記録を読む ～高齢者マラソンの生理学的意義～

齊藤 満*¹⁾

本研究は高齢者の最大酸素摂取量の加齢にともなう低下を抑制する制限因子の新しい考え方について、マラソンの加齢変化から検討した。マラソン記録は20歳から90歳までの世界記録(W-G)、日本ランキング1位(J-G)の合計141名を対象とした。最大酸素摂取量はこれまでに報告されているマラソンタイムに及ぼす様々の生理学的数値を取り入れ、マラソン記録から推定した。まず、エリート持久ランナーの走速度-酸素摂取量関係式を用いて走行時の酸素摂取量を推定し、続いて、最大酸素摂取量に対する比率で表される乳酸性閾値を用い最大酸素摂取量を算出した。推定最大酸素摂取量の最大値はW-Gが30歳の80 ml/kg/分、J-Gが30歳の78 ml/kg/分であった。その後、最大酸素摂取量は年齢とともに90歳まで曲線的に低下した。80歳代ランナーの最大酸素摂取量は26～40 ml/kg/分であり、これまでに報告されている35～42 ml/kg/分にほぼ匹敵する値であった。20歳～50歳までの最大酸素摂取量の低下率は緩やかであるが、その後は曲線的に減少した。しかしながら、中年期から高年期の最大酸素摂取量低下速度はこれまでに報告されている一般人の低下速度に比べて低値を示した。本解析結果から、仮に50歳頃からいつ始めたとしても、一生涯マラソンを続けることで、その後の最大酸素摂取量の低下速度を不活動な人に比べて抑えることが可能である。

キーワード：最大酸素摂取量、マラソン、心肺体力、加齢

1 はじめに

最大酸素摂取量は体力の生理学的な指標として用いられる³⁾³⁵⁾が、最近の研究から肥満、2型糖尿病などの生活習慣病、心血管系疾患、ガンなどの死亡率と密接に関係することが明らかにされ⁶⁾²⁷⁾、健康評価の定量的指標の一つとなりつつある¹³⁾。最大酸素摂取量は20歳代をピークとして加齢とともに低下する³⁾が、その低下をできるだけ少なくすることは健康の維持および健康寿命延伸にとって不可欠である。Myersたち²⁷⁾は自立活動ができなくなるレベルは最大酸素摂取量でみると17 ml/kg/minが定量的な閾値になると提起している。このように加齢とともに低下する最大酸素摂取量をどのように維持するかは体力だけでなく健康そのものの維持にとって重要な目標となる。

加齢にともなう最大酸素摂取量の低下を抑えるにはより高い有酸素運動の実施が効果的である。しかし、一般の人にこれを取り入れることは容易ではない。このブレイクスルーの一つとして考えられることは適切なスポーツ活動の導入である。近年のマラソンプームの広がりから毎年数十万人の人がマラソンに挑戦³²⁾し、さらに増加し続けている。しかも若者より中高年者の増加が大きい、さらに障害者、一部の疾病を抱えている人たちも含まれ、その多くは「完走」や「記録」を目標に挑戦し続ける例が少なくない。この背景にはこれまでの「健康」という定性的な目標から「競技性」、「タイムや距離」といった具体的な目標が設定でき、それに向かって挑戦できる格好のスポーツとして存在するからであろう。

本研究ではマラソンが健康の定量的な指標となる最大酸素摂取量の維持とその経年的な低下速度の抑制を

*1) 愛知学院大学心身科学部健康科学科

(連絡先) 齊藤 満 愛知学院大学心身科学部健康科学科 電話 0561-73-1111 内線3434 メールアドレス saitman@dpc.agu.ac.jp

目指すスポーツとして用いるための基礎的な情報を得ることを目的とし、マラソン記録の加齢変化を生理学的面からその特性を検討する。

II 方法

1. マラソン記録

マラソン記録を分析するための資料として、1) マラソン記録が一定の基準を満して得られた信頼される結果であること、2) 集団の代表となりうるデータであることを、前提として次の二つを選んだ。一つは Association of Road Racing Statisticians (ARRS) が報告している男子年齢別マラソン最高記録 (W 群) [2015.10.17現在の記録]²⁾、もう一つはランナーズ編集部が報告している第10回全日本マラソンランキング (J 群) の男子年齢別記録 (2014年4月～2015年3月単年度記録)³²⁾ を用いた。解析対象とした年齢は W 群が20歳から90歳まで、J 群は20歳から89歳まで88歳の1名を欠く、合計141名である。

2. マラソン記録からの最大酸素摂取量推定

マラソン記録からの最大酸素摂取量の推定はマラソンレースに必要な酸素摂取量、走行時の有酸素エネルギー供給特性、エネルギー消費に及ぼす走運動効率を検討し、以下の手順で進め、推定した。

1) マラソン記録と酸素摂取量、最大酸素摂取量

(1) レース時の酸素摂取量

マラソン記録は、空気抵抗、環境温、走路条件さらに技術 (走効率)^{7) 26) 31)} に影響されるが、全体としてマラソンレースの平均走速度で表され、この時の酸素

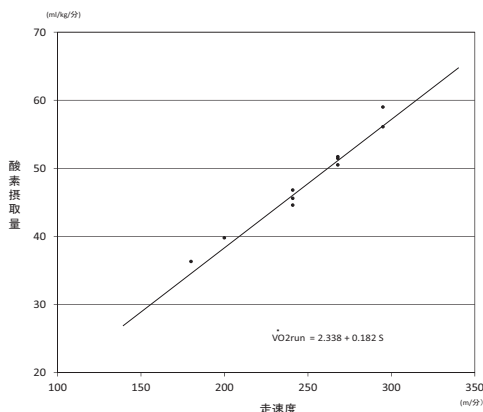


図1 走速度-酸素摂取量関係
速度-酸素摂取量回帰式は: $Y=2.338+0.182X$
($R^2=0.964, p<0.0001$)

摂取量で推定することができる (1式)。

マラソン記録

$$\begin{aligned} &= \text{マラソンレース平均走速度} \\ &= \text{酸素摂取量} \quad (1 \text{式}) \end{aligned}$$

走効率はレースの酸素摂取量をきめる大きな要因となり、持久ランナーが非競技者より高いことが明らかにされており^{7) 20) 29)}、しかも優れたマラソンランナー間でも数パーセントの差が報告されている²⁹⁾。本研究では、これまでに報告されている優秀なマラソンランナーおよび長距離ランナーの報告データ^{8) 9) 10) 26)}をもとに速度-酸素摂取量関係の回帰直線を推定 (図1、2式) し、マラソンレース平均速度から走行時の酸素摂取量を算定した。

$$\text{走行時酸素摂取量} = 2.338 + 0.182 S \quad (2 \text{式})$$

但し、Sは走行速度 (m/分) を示す。

(2) レース時酸素摂取量と最大酸素摂取量の関係

レース時の酸素摂取量は速度に比例して高まるが、酸素摂取量には上限 (最大酸素摂取量) があるためマラソン記録はこれで規定される^{19) 35)}。しかも長時間のマラソンレースでは有酸素エネルギーが主体となるため筋ミトコンドリアの酸化代謝能が記録をきめる重要な制限因子となり¹⁷⁾、乳酸性閾値 (LT) がその有酸素代謝能を示す指標となる^{4) 5) 14) 36)}。したがって、マラソン記録とその限界因子である最大酸素摂取量の関係は次式で示される。

マラソン記録=レース平均走速度

$$\begin{aligned} &= \text{走行時酸素摂取量} \\ &= \text{最大酸素摂取量} \times \text{無酸素性閾値} \quad (3 \text{式}) \end{aligned}$$

但し、LTは血中乳酸濃度が4 mmol/Lを超える運動強度^{19) 36)}を指し、最大酸素摂取量に対する比率 (%VO₂max) で表す。以上の仮定から、マラソン記録に影響するさまざまな外的条件を除き、生理的なエネルギー供給系面に限定すれば3式により最大酸素摂取量の推定が可能である。

(3) 乳酸性閾値の推定と最大酸素摂取量

最大酸素摂取量に対する有酸素エネルギー供給能を示す乳酸性閾値はトレーニングレベルで大きな差があり¹⁹⁾、一般人では最大酸素摂取量の50~60%、優れ

たマラソンランナーでは70～85%である。本研究ではこれまでに報告されている優秀な持久性ランナーの報告値²⁰⁾をもとに、75, 80, 85%VO₂maxの三つの乳酸酸性閾値を用いて最大酸素摂取量を推定した。

以上の手順によりこれまでに公表されている2時間2～10分台の記録を持つマラソンランナーおよび現在活躍している世界的なランナーの推定最大酸素摂取量を表1に示す。この結果から、これまでのエリートランナーで報告されている71～84 ml/kg/分^{19) 23) 24) 29)}に相当する値に最も適合するLT80%VO₂maxを用いた。ランナーのLTレベルは加齢とともに低下する⁴⁾、高まる²⁵⁾、変わらない⁵⁾報告があり一定しないが、高齢ランナーはトレーニングを長期間継続していると考えられるので若年、中年年齢群と大差はないと判定し、LT80%VO₂maxを用いて推定した。

表1 一流マラソン選手の記録から推定した最大酸素摂取量比較

	記録 (時:分:秒)	年齢 (歳)	最大酸素摂取量 (ml/kg/分)			
			LT75%	LT80%	LT85%	実測値
Kimetto K. ²⁾	2:02:57	30	86.4	81.0	76.2	-
Makau P. ²⁾	2:03:38	26	85.9	80.6	75.8	-
Shoter F. ²⁹⁾	2:10:30	26	81.6	76.5	72.0	71.3
宇佐美彰朗 ²⁴⁾	2:10:37	24	81.5	76.4	71.9	83
君原 健二 ²³⁾	2:13:25	28	80.0	74.9	70.5	84

カッコつき数値は文献番号を示す、LT、乳酸酸性閾値

3. マラソン記録の加齢変化解析

マラソン記録から推定した最大酸素摂取量は、年齢を従属変数、最大酸素摂取量を主変数として二次回帰曲線に当てはめ、平滑化ののち、加齢と最大酸素摂取量の関係について解析した。データ解析にはSPSS統計ソフトウェアを用いた。

III 結果と考察

1. 年齢別マラソン記録

年齢別マラソン記録と平均速度を、それぞれ図2、3に示す。記録は変動を示しながら全体として加齢とともに低下する。記録をタイム表示にとすると70歳頃から急激に時間が延長する様子が観察できる。これに対し速度で表示すると滑らかな低下曲線を描き低下

する。

W群の世界最高記録は30歳の2時間02分54秒、平均速度は343 m/分、最高齢は93歳の6時間35分47秒、平均速度は106 m/分である。J群は30歳の2時間07分38秒、平均速度は338 m/分、最高齢は89歳の5時間24分23秒、平均速度は130 m/分である。

2. 加齢と最大酸素摂取量

1) 加齢変化

図4にマラソンタイムから推定した最大酸素摂取量の個人記録および回帰曲線から再計算した年齢ごとの記録を重ねて示す。

個々のマラソン記録はばらつくが、加齢ともなう変化はW群、J群ともに類似の傾向である。回帰曲線から推定したマラソン記録はW群では24歳(80.2 ml/kg/分)でピークを示し、その後加齢とともに記

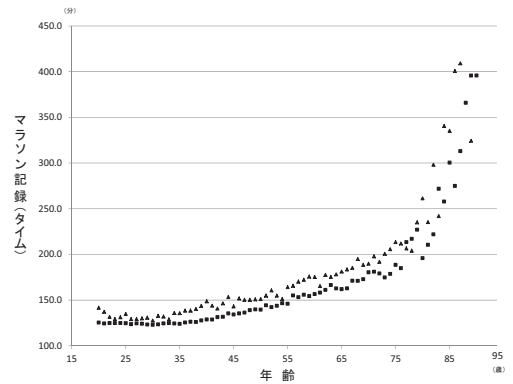


図2 マラソンタイムの年齢別記録
■、▲はそれぞれ世界記録、日本ランキングを示す。

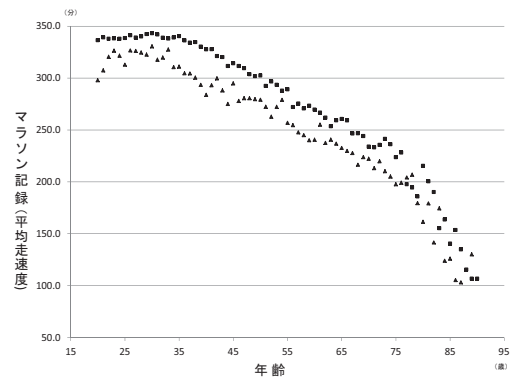


図3 マラソン平均走速度の年齢別記録
■、▲はそれぞれ世界記録、日本ランキングを示す。

録が曲線的に低下する。J群は20歳(75.7 ml/kg/分)が最高となり以後加齢とともに記録は曲線的に低下する。回帰曲線から推定した20から90歳までの最大酸素摂取量の年間低下量を表2示す。W群、J群ともに20から40歳までの低下は緩やかに(77~80 ml/kg/分)推移するが、その後の低下は次第に大きくなり60歳を超えると加速的に低下する。70、80、90歳の最大酸素摂取量はそれぞれ56、44、31 ml/kg/分である。80~90歳の最大酸素摂取量はTrappeたち⁴³⁾が報告した高齢持久競技者の最大酸素摂取量、38~48 ml/kg/分より4~7ml/kg/分低い値を示した。この差は最大酸素摂取量の決定法の違いによると考えられる。彼らは自転車エルゴメータを用いた直接法で測定しており、本研究ではマラソン記録から間接的に推定した。マラソンは長時間運動のため呼吸循環系以外に脚筋の疲労が進み、速度が低下するため、推定値は直接法より低くなる可能性が高い。

以上の点を考慮し、先行研究の結果を踏まえると、マラソン記録から推定した最大酸素摂取量は高齢マラソンランナーの値を十分に反映すると考えられる。

2) W群とJ群の比較

最大酸素摂取量をW群とJ群で比較すると20~60歳までは、W群がJ群より高くその差は約5.5 ml/kg/分で、両者はほぼ平行して推移した。この差はデータ特性の違いによると考える。W群のデータはこれまでに蓄積された全世界のデータベースをもとにしており、J群の記録は日本で行われたレースでしかも単年

度の最高記録に限られている。しかし、年齢が高くなり60歳を超えると両群間の差は次第に縮小し、80歳ではその差は2.5 ml/kg/分となり、90歳ではほぼ等しくなる(図4)。この結果は高齢になるに従いからだの機能は生命の限界に近づき、母集団の違いを超えた一定の値に収斂する可能性を示す。

3. マラソン記録(走速度)と最大酸素摂取量

1) 加齢による変化量と変化率

マラソン記録の回帰曲線から推定した20歳以降10歳ごとの平均走速度と酸素摂取量の年間変化量と低下率を表2、3に示す。20から40歳までの平均走速度の年間低下率はW群、J群の走速度がそれぞれ+0.1~-0.5%、-0.0~-0.6%であり、60歳ではともに-1.3%である。高齢期に入り、70歳ではW群、J群ともに-1.9%、80歳ではそれぞれ-2.9%、-2.8%であり、両群の低下率はほぼ同じである。

20歳から40歳までの最大酸素摂取量の年間低下率はW群、J群それぞれ+0.1~-0.4%、0.0~-0.6%である。60歳ではW群、J群それぞれ-1.2%、-1.3%であり両群の年間低下率は同程度である。高齢期に入り、70歳ではW群、J群ともに-1.8%、80歳ではそれぞれ-2.7%、-2.6%であり、W群、J群ともに低下率はほぼ同じである。

加齢にともなう両群の走速度、最大酸素摂取量の変化率にはほとんど差が認められなかった。このことは被験者がそれぞれ大きな母集団の最高値(代表値)のため違いがでなかったと考えられる。

走速度と最大酸素摂取量の年間低下率は60歳頃まではほぼ同じであるが、70歳を超えると走速度の低下

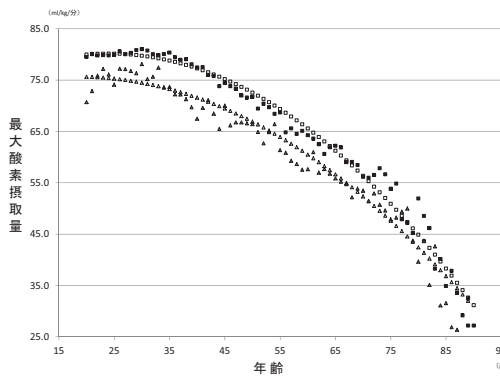


図4 個人記録および回帰曲線から推定した年齢別最大酸素摂取量 □、△はそれぞれ世界記録、日本ランキング。■、▲はそれぞれ回帰曲線から推定した世界記録、日本ランキングを示す。

世界記録回帰式(■): $Y=73.736+0.537X-0.011X^2, R^2=0.979, p<0.0001$
 日本ランキング回帰式(▲): $Y=72.690+0.323X-0.009X^2, R^2=0.961, p<0.0001$

表2 回帰曲線から推定した平均走速度とその低下速度および年間低下率

年齢(歳)	W群		J群	
	平均速度	年間変化量 (%)	平均速度	年間変化量 (%)
	m/分	m/分 (%)	m/分	m/分 (%)
20	339	+0.4(+0.1)	320	-0.1(-0.0)
30	338	-0.6(-0.2)	314	-0.9(-0.3)
40	327	-1.6(-0.5)	301	-1.7(-0.6)
50	307	-2.5(-0.8)	280	-2.5(-0.9)
60	277	-3.5(-1.3)	251	-3.3(-1.3)
70	237	-4.5(-1.9)	215	-4.0(-1.9)
80	187	-5.5(-2.9)	170	-4.8(-2.8)
90	127	-6.5(-5.1)	124*	-5.5(-4.5)

*は89歳の結果
 年間低下量は回帰曲線の傾斜より推定。年間変化量、変化率の+は上昇、-は低下を示す。

率が大きくなる傾向を示す。これは、心肺機能と走行時に働く下肢筋の機能低下速度との間に乖離が生じた可能性が考えられる^{11) 16) 34)}。

2) 中高年期以降の最大酸素摂取量低下

40歳までのマラソン記録および最大酸素摂取量の年間低下率はほぼ0.5%以内であるが(表3)、その後は加齢にともない加速度的に増大する。これまで報告されている水泳、短中距離走記録および最大酸素摂取量の縦断的研究では中高年齢以降の低下が大きくなることが報告されている^{12) 21) 43)}。今回の結果は横断的なデータであるが先行研究と同様の結果が得られた。しかし、70歳を超える高高齢期に入ると低下量、低下率ともに先行研究^{34) 37) 38)}を上回り、しかも経年的にその差が拡大した。本結果はマラソン記録から最大酸素摂取量を推定したが、長時間の運動では有酸素エネルギー供給系だけでなく筋持久力、骨格機能さらには精神的な適応など多数の因子^{20) 22) 30) 40)}が複合的に作用するため、マラソン記録の低下を心肺機能だけで説明することはできない。一方で加齢に伴う活動性の低下(frail)^{11) 34)}はトレーニング量の減少につながり呼吸循環機能(心肺体力)の低下を促進させた可能性も考えなければならない。

3) 持久スポーツ競技成績との比較

加齢にともない持久競技スポーツ記録が低下し、低下率が漸増する傾向は、マスターズアスリートの10km競技記録、1500m競泳および彼らの最大酸素摂取量測定値から報告されている^{38) 39)}。これらの競技では競技記録に寄与する無酸素エネルギー量はマラソン競

技に比べて格段に大きいことから、今回の推定最大酸素摂取量と記録の関係を比較することはできない。しかし、最大酸素摂取量自体の比較は可能である。今回の解析結果では、50歳から70歳までの最大酸素摂取量の年間低下量は、0.6~1.0 ml/kg/分の範囲にあり、これまでに報告されている中年から高年齢および高年齢から高年齢の最大酸素摂取量の年間低下率の横断的結果0.20~0.57 ml/kg/年^{15) 37)}および縦断的結果0.48~0.84 ml/kg/分/年^{12) 37)}より高い傾向にあった。さらに、80歳以降になると、年間1.1~1.4 ml/kg/分の低下が推定された。80歳を超える年齢での最大酸素摂取量の年間低下率については報告されていないが、今回のように大きな母集団の頂点に立つデータから解析した結果であることを考慮すると、妥当な数値といえよう。この点については今後の研究に待ちたい。

4. 健常者の最大酸素摂取量標準値との対比

アメリカスポーツ医学会(ACSM)¹⁾が報告している20歳から70歳までの健常者の最大酸素摂取量基準値の上位90および50パーセントイルと今回の最大酸素摂取量推定値を対比して図5に示す。この結果、マラソン記録から推定した最大酸素摂取量は健常者標準値の90パーセントイルを大きく超え、65歳で5ml/kg/分高い値を示した。その後はさらに低下し76歳を過ぎるとACSMの90パーセントイルの外挿ラインを下回る。現時点で70歳を超える健常高齢者の基準値は報告されていないため対比して議論することはできないが、健常者の50パーセントイルより高いことは疑いないであろう。したがって、マラソン記録からの推定最大酸素摂取量はヒトの最大酸素摂取量の上限

表3 回帰曲線から推定した最大酸素摂取量とその変化量および変化率

年齢 (歳)	W群		J群	
	最大酸素摂取量 ml/kg/分	年間変化量 (%) ml/kg/分(%)	最大酸素摂取量 ml/kg/分	年間変化量 (%) ml/kg/分(%)
20	80.0	+0.1(+0.1)	75.7	0.0(0.0)
30	79.7	-0.1(-0.2)	74.5	-0.2(-0.3)
40	77.3	-0.3(-0.4)	71.6	-0.4(-0.6)
50	72.5	-0.6(-0.8)	66.9	-0.6(-0.9)
60	65.6	-0.8(-1.2)	60.5	-0.8(-1.3)
70	56.3	-1.0(-1.8)	52.3	-0.9(-1.8)
80	44.9	-1.2(-2.7)	42.4	-1.1(-2.6)
90	31.1	-1.4(-4.6)	32.0*	-1.3(-4.0)

*は89歳の結果
年間低下量は回帰曲線の傾斜より推定。年間変化量、変化率の+は上昇、-は低下を示す。

能に近く、これが高高齢まで維持できる可能性を示す重要な指標となろう。

5. 中高年者スポーツとしてのマラソン

からだの備える心肺体力の範囲でからだの全ての機能が最大限に発揮された結果としてマラソン記録は生まれる。本研究ではマラソンパフォーマンスをきめる最も重要な有酸素エネルギー供給能を支える最大酸素摂取量の面から加齢の影響について検討した。マラソンをはじめると短期的には心肺体力は高まる^{5) 22)}が長期的には低下を食い止めることはできない^{33) 38) 41)}ことは明らかである。このことは、何歳からマラソンを始めたとしても開始した時点での心肺体力をベースにして有酸素エネルギー供給能 (LT) の改善²⁵⁾、ランニング技術 (走行効率) の向上¹⁸⁾、精神的持続力²⁰⁾などを高めることで記録の向上あるいは維持に繋ぐことができることを示す。このことから、仮に最大酸素摂取量からみた心肺体力が経年的に低下したとしても継続的なマラソン参加により記録を高める、あるいは維持が可能になる。同時に、最大酸素摂取量の低下速度を抑制する効果を生み、これが振り返り記録の維持、そして健康、体力の指標となる最大酸素摂取量の維持に繋がることになろう。

7. 本研究の限界と意義

マラソン競技の生理的特性を踏まえ公表されている横断的データから最大酸素摂取量の推定を試みた。したがって、推定の前提となる生理的な数値が妥当であるかどうか重要である。マラソンに関する運動生理学的研究は豊富にあり、さまざまなスポーツ競技に比

べてもその精度は高い。今回の解析に当たりこれらの研究を十分に検討し、条件を厳密に設定したうえで解析したことから、信頼に耐え得る結果と考える。

本研究で解析の対象とした被験者数はわずか141名であるが、その母集団となる人数は数十万以上であり、その中から選ばれた頂点に立つデータである。したがって、データとしての信頼性は十分に高いといえる。この意味で本解析結果は広く一般健常人に適用できると考える。

IV まとめと結論

マラソンの運動生理学的研究成果をベースにしてマラソン記録の加齢変化から、健康維持運動として、マラソンを一般の人に勧めるための基礎となる生理学的背景について検討した。その結果、ランニング技術、エネルギー代謝効率さらに有酸素代謝機能の改善により、中高年になってもマラソン記録を高めることが可能であり、高高齢まで十分にマラソンを続けられる可能性が示された。また、マラソン参加を通して中年から高高齢期にかけての最大酸素摂取量の経年的な低下速度を抑えられることが、一般健常人のデータと比較することで確かめられた。

本研究から、年齢にかかわらず生活の中にマラソンを取り入れると、その時点から呼吸循環系機能が改善され、健康の定量的指標となる最大酸素摂取量の経年低下速度を抑制することが可能といえる。

V 補遺

1. 健康運動としてのマラソン運動

多数の市民ランナーが完走する5時間30分 (平均速度130 m/分) の酸素摂取量は26 ml/kg/分である。このタイムをクリアするにはこれより高い最大酸素摂取量を備えることが条件となる。しかし要求される最大酸素摂取量はLT (有酸素代謝能) で大きく変わる。LTが最大酸素摂取量の65%であれば最大酸素摂取量は40 ml/kg/分となり、LTが75%VO₂maxに高まると5 ml/kg/分低い35 ml/kg/分となる。LT65%VO₂maxで推定される最大酸素摂取量は男子50歳の50~99パーセンタイル (37~49 ml/kg/分) に該当し、LT75%VO₂maxの最大酸素摂取量は34 ml/kg/分となり、70歳男子の50~99パーセンタイルに該当する (32.1~49.3 ml/kg/分) (ACSM)¹⁾。これらの結果から健康な70歳代の半数はフルマラソン

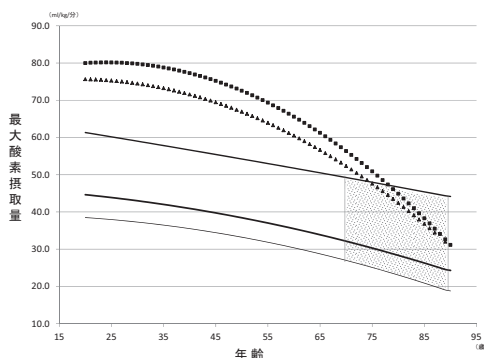


図5 マラソン記録から推定した最大酸素摂取量および健常人標準値
■、▲はそれぞれ回帰曲線から推定した各年齢の世界記録、日本ランニングの最大酸素摂取量を示す。実線はACSMが提示している健常人の最大酸素摂取量標準値を、上から90、50、20パーセンタイルで示す。70歳超の影部分およびラインはACSM報告値の外挿値として示す。

を5時間半で完走することが可能である。

以上の考察から、高齢から高高齢者まで、スポーツとしてマラソンを楽しむ能力（心肺体力）を多くの人が備えており、活動的な生活でその能力を開発しフルマラソンを楽しむことは十分可能である。我々の祖先が数百万年前には一日3～4時間の活発な移動を繰り返しながら狩猟採取生活²⁸⁾をしていたことを考えれば、健康な高齢者がフルマラソンを楽しむことはあながち特別とは言えない。

引用文献

- 1) American College of Sports Medicine. (2010) ACSM's Guidelines for Exercise Testing and Prescription. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, p. 84–89
- 2) Association of Road Racing Statisticians. (2015) World Single Age Record–Marathon. http://www.arrs/SA_Mara.htm
- 3) Astrand, I. (1960) Aerobic work capacity in men and women with special reference to age. *Acta Physiol Scand*, 49, 1–92.
- 4) Benelli, P., Ditoilo, M., Forte, R., De Vito, G., & Stocchi, V. (2007) Assessment of post–competition peak blood lactate in male and female swimmers aged 40–79 years and its relationship with swimming performance. *Eur J Appl Physiol* DOI 10.1007/s00421–006–03342.
- 5) Billat, V., Sirvent, P., Lepretre, P–M., & Koralsztein, J.P. (2004) Training effect of performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance–runners. *Pflugers Arch Eur J Physiol*, 447, 875–883.
- 6) Blair, S.N., Kohl, III H.W., Paffenbarger, R.S. Jr., Clark, D.G., Cooper, K.H. & Gibbons, L.W. (1989) Physical fitness and all–cause mortality. A prospective study of healthy men and women. *JAMA*, 262, 2395–2401.
- 7) Bransford, D.R. & Howley, E.T. (1977) Oxygen cost of running in trained and untrained men and women. *Med Sci Sports*, 9, 41–44.
- 8) Conley, D.L. & Krahenbuhl, G.S. (1980) Running economy and distance running performance of highly trained athletes. *Med Sci Sports*, 12, 357–360.
- 9) Costill, D.L. (1970) Metabolic responses during distance running. *J Appl Physiol*, 28, 251–255.
- 10) Daniels, J.T. (1985) A physiological's view of running economy. *Med Sci Sports*, 17, 332–338.
- 11) Ehsani, A.A., Spina, R.J., Peterson, L.R., Rinder, M.R., Glover, K.L., Villareal, D.B., Binder, E.F., & Holloszy, J.O. (2003) Attenuation of cardiovascular adaptations to exercise in frail octogenarians. *J Appl Physiol*, 95, 1781–1788.
- 12) Eskurza, I., Donato, A.J., Moreau, K.L., Seals, D.R., & Tanaka, H. (2002) Changes in maximal aerobic capacity with age in endurance–trained women: 7–yr follow–up. *J Appl Physiol*, 92, 2303–2308.
- 13) Farrell, S.W., Kampert, J.B., Kohl, H.W., Barlow, C.E., Macera, C.A., Paffenbarger, R.S. Jr, Gibbons, L.W., & Blair, S.N. (1998) Influence of cardiorespiratory fitness levels and other predictors on cardiovascular disease mortality in men. *Med Sci Sports*, 30, 899–905.
- 14) Farrell, P.A., Wilmore, J.H., Coyle, J.H., Billing, J.H., & Costill, D.L. (1979) Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports*, 11, 338–344,
- 15) Fitzgerald, M.D., Tanaka, H., Tran, Z.V., & Seals, D.R. (1997) Age–related declines in maximal aerobic capacity in regularly exercising vs sedentary women: a meta–analysis. *J Appl Physiol*, 83, 160–165.
- 16) Heath, G.W., Hagberg, J.M., Ehsani, A.A., & Holloszy, J.O. (1981) A physiological comparison of young and older endurance athletes. *J Appl Physiol*, 51, 634–640.
- 17) Holloszy, J.O., Rennie, M.J., Hickson, R.C., Conlee, R.K., & Hagberg, J.M. (1977) Physiological consequences of the biochemical adaptations to endurance exercise. *Ann NY Acad Sci*, 301, 441–450.
- 18) Jones, A.M. (1998) A five year physiological case study of an Olympic runner. *Br J Sports Med*, 32:39–43.
- 19) Joyner, M.J. (1991) Modeling: optimal marathon performance on the basis of physiological factors. *J Appl Physiol*, 70, 683–687.
- 20) Joyner, M.J. & Coyle, E.F. (2008) Endurance exercise performance: the physiology of champions. *J Physiol*, 586, 35–44.
- 21) Katzell, L.I., Sorkin, J.D., & Fleg, J.L. (2001) A comparison of longitudinal changes in aerobic fitness in older endurance athletes and sedentary men. *J Am Geriatr Soc*, 49, 1657–1664.
- 22) Kohrt, W.M., Malley, M.T., Coggan, R., Spina, R.J., Ogawa, T., Ehsani, A.A., Bourey, R.E., Martin, III W.H., & Holloszy, J.O. (1991) Effects of gender, age, and fitness level on response of $\dot{V}O_2\max$ to training in 60–71 yr olds. *J Appl Physiol*, 71, 2004–2011.

- 23) 黒田善雄、加賀谷潤彦、塚越克己、雨宮輝也、太田裕造、酒井惇子 (1968) 日本人一流競技選手の最大酸素摂取量. 日本体育協会スポーツ科学研究報告
- 24) 黒田善雄、塚越克己、雨宮輝也、伊藤静雄、金子敬二、松井美智子 (1977) 日本人一流競技選手の最大酸素摂取量並びに最大酸素負荷量. ～第3報～. 日本体育協会スポーツ科学研究報告
- 25) Marcell, T.J., Hawkins, S.A., Tarpinning, K.M., Hyslop, D.M., & Wiswell, R.A. (2003) Longitudinal analysis of lactate threshold in male and female athletes. *Med Sci Sports*, 35, 810–817.
- 26) McMiken, D.F. & Daniels, J.T. (1976) Aerobic requirement and maximum aerobic power in treadmill and track running. *Med Sci Sports*, 8, 14–17.
- 27) Myers, J., Prakash, M., Froelicher, V., Do D., Partington, S., & Atwood, J.E. (2002) Exercise capacity and mortality among men referred for exercise testing. *N Engl J Med*, 346, 793–801.
- 28) O'keefe, J.H., Vogel, R., Lavie, C.J., & Cordain, L. (2010) Exercise like a hunter-gatherer in the 21st century: back to the future. *Am J Med*, 123, 1082–1086.
- 29) Pollock, M.L. (1977) Submaximal and maximal working capacity of elite distance runners. Part I: cardiorespiratory aspects. *Ann NY Acad Sci*, 301, 310–322.
- 30) Pollock, M.L., Mengelkoch, L.J., Graves, J.E., Lowenthal, D.T., Limacher, M.C., Foster, C., & Willmore, J.H. (1997) Twenty-year follow-up of aerobic power and body composition of older track athletes. *J Appl Physiol*, 82, 1508–1516.
- 31) Pugh, L.G.C.E. (1970) Oxygen intake in track and treadmill running with observation on the effect of air resistance. *J Physiol*, 207, 823–835.
- 32) ランナーズ (2015) 第10回全日本マラソンランキング、ランナーズ 40巻6号付録.
- 33) Rivera, A.M., Pels, III A.E., Sady, S.P., Sady, M.A., Cullinane, E.M., & Thompson, P.D. (1989) Physiological factors associated with the lower maximal oxygen consumption of master runners. *J Appl Physiol*, 66, 949–959.
- 34) Rogers, M.A., Hagberg, J.M., Martin, W.H.I., Ehsani, A.A., & Holloszy, J.O. (1991) Decline in $\dot{V}O_2\text{max}$ with aging in master athletes and sedentary men. *J Appl Physiol*, 68, 2195–2199.
- 35) Saltin, B. & Astrand, P.-O. (1967) Maximal oxygen uptake in athletes. *J Appl Physiol*, 23, 353–358.
- 36) Sjodin, B. & Jacobs, I. (1981) Onset of blood lactate accumulation and marathon running performance. *Int J Sports Med*, 2, 23–26.
- 37) Stathokostas, L., Jacob-Johnson, S., Petrella, R.J., & Paterson, D.H. (2004) Longitudinal changes in aerobic power in older men and women. *J Appl Physiol*, 97, 781–789.
- 38) Tanaka, H., DeSouza, C.A., Jones, P.P., Stevenson, E.T., Davy, K.P., & Seals, D.R. (1997) Greater rate of decline in maximal aerobic capacity with age in physically active vs. sedentary healthy women. *J Appl Physiol*, 83, 1947–1953.
- 39) Tanaka, H. & Seals, D.R. (2003) Dynamic exercise performance in Masters athletes: Insight into the effects of primary human aging on physiological functional capacity. *J Appl Physiol*, 95, 2152–2162.
- 40) Trappe, S.W., Costil, D.L., Fink, W.J., & Pearson, D.R. (1995) Skeletal muscle characteristics among runners: a 20-yr follow-up study. *J Appl Physiol*, 78, 823–829.
- 41) Trappe, S.W., Costil, D.L., Vukovich, M.D., Jones, J., & Melham, T. (1996) Aging among elite distance runners: a 22-yr longitudinal study. *J Appl Physiol*, 80, 285–290.
- 42) Trappe, S., Hayes, E., Galpin, A., Kaminsky, L., Jemiolo, B., Fink, W., Trappe, T., Jansson, A., Gustafsson, T., & Tesch, P. (2013) New records in aerobic power among octogenarian lifelong endurance athletes. *J Appl Physiol*, 114, 3–10.
- 43) Wilson, T.M. & Tanaka, H. (2000) Meta-analysis of the age associated decline in maximal aerobic capacity in men: relation to training status. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 278, H829–H834.

(平成28年1月6日 受理)

Learning from the marathon running records about changes related to age -Physiological significance of marathon running in aged citizens-

Mitsuru SAITO

Abstract

This study examined new concept concerning limiting factors in slowing maximal oxygen uptake ($\dot{V}O_2\text{max}$) decline in the aged by modeling of age related change in a marathon running time of World record (W-G) and Japan marathon ranking (J-G) for total of 141 men aged between 20 and 90 yrs. $\dot{V}O_2\text{max}$ was estimated by modeling marathon running times on the basis of various combinations of previously reported physiological values such as oxygen uptake ($\dot{V}O_2$) as a function of running speed, which was determined on elite endurance runners. After that $\dot{V}O_2\text{max}$ was determined from aerobic metabolisms while blood lactate threshold is related to the fraction of $\dot{V}O_2\text{max}$. The highest value of estimated $\dot{V}O_2\text{max}$ was 80 ml/kg/min on age 30 yr for W-G and 78 ml/kg/min on age 30 yr for J-G, after that those values decreased at a curve linearly as a function of age. Octogenarian runner's $\dot{V}O_2\text{max}$ were 26–40 ml/kg/min and is comparable with previously reported values of 35–42 ml/kg/min (Trappe et al., 2013) . The rate of decline of $\dot{V}O_2\text{max}$ on ages between 20 and 50 yrs was a very mild decrease and after that the decrease at a curve lineally until 90 yr. However, during middle age the decreasing speed was slower than that of previously reported in an untrained subject. These results from the analysis suggest that life-long marathon running, if it is started anytime at middle age prior to ~50 yr, declining speed of $\dot{V}O_2\text{max}$ could be slow compared to the sedentary people in their lives.

Keyword: Maximal oxygen uptake, marathon running, cardiorespiratory fitness, aging