

研究ノート

亜最大走運動疲労困憊後の血中乳酸除去からみた クーリングダウン走の影響 —大学陸上競技長距離選手について—

山本 薫・赤井 麗佳

The Effect of Cooling Down on Blood Lactate Removal
in Submaximal Exhaustive Treadmill Running:
A Case Study of Long-Distance Runners

YAMAMOTO Kaoru, AKAI Reika

要 旨

大学陸上長距離選手(ET群)を対象に、トレッドミルで疲労困憊まで走運動した後、最大酸素摂取量の40%(40% $\dot{V}O_{2max}$)速度でクーリングダウン(C-down)走をした際の血中乳酸濃度(LA)の変化について検討した。疲労困憊時のLAを100%とした値(%LApeak)はすべての測定点でET群が対照群より有意に低値を示した。ET群は、40% $\dot{V}O_{2max}$ 速度のC-down走後(15分後)には100%LApeakが40%まで、30~35分後に25%まで低下した。その低下速度は先行研究(70% $\dot{V}O_{2max}$)と同程度で、その身体特性からET群におけるC-down走の効果は40~70% $\dot{V}O_{2max}$ と強度の幅があることが示唆された。

キーワード

血中乳酸濃度 亜最大走運動 疲労困憊 クーリングダウン 陸上長距離選手

目 次

- I. 背景
- II. 方法
- III. 結果
- IV. 考察
- V. まとめ
- VI. 謝辞
- VII. 参考文献

I. 背景

一般市民から競技スポーツ実施者まで多くの人々に行なわれる運動終了後のクーリングダウンは運動による疲労の回復を早めるとされ、その生理学的意義は、(1)乳酸の除去の亢進(2)血圧低下の予防(3)過換気の抑制と述べられている¹⁾。しかし、その根拠は議論をされ尽くされておらず、最も報告の多い乳酸の除去の亢進については被験者の違い、用いる機器の違い、運動強度の違いなどから、回復期にどのようなクーリングダウン運動を行なうことがパフォーマンス回復への有効な手段となり得るのか、そもそも乳酸除去の亢進によって疲労回復がもたらされたものなのかという議論も含め、依然、一致した見解が得られていない。回復運動としてのクーリングダウンにおける適切な条件を検討する上では、求めるパフォーマンス発揮に即した運動の様式、運動強度、運動時間、運動頻度、そして対象者の身体特性などを明確に示す必要があると考えられ、本来、その組み合わせの状況に応じて適切なクーリングダウン運動の方法が行なわれることが望ましい。

多くの競技スポーツの中でも陸上競技長距離選手は中程度以上の運動強度で長時間・長距離、毎日のようにトレーニングを積み、試合でも全力を出し切った後、速やかに次の練習や試合(5000mを想定、U20の日本記録：男子13分25秒、女子15分5秒)に臨めるために筋の疲労回復に繋がる適切なクーリングダウン運動が求められる。ここで取り上げる筋疲労の原因については、活動筋における運動誘発性の酸塩基平衡不均衡発症が考えられ²⁾、さらにその不均衡を引き起こす原因の一つとされている血中乳酸濃度消長の観点から検討するため、基礎データの収集をすることが必要と考えた。

血中乳酸は本来、細胞内で酸化されエネルギーとして代謝されることから、近年は運動の阻害要因としてではなく重要なエネルギー基質と考えられている。一方、従来からの考え方として血中乳酸は行う運動の強度によってその産生量が変わってくるが、比較的高い強度の運動を行うと、活動筋では筋収縮を起こすエネルギーを産生するため、解糖系が活発に働きグリコーゲンが分解されて多量のピルビン酸が発生する。このピルビン酸の生成速度がミトコンドリアによるピルビン酸の酸化速度を上回った場合

にピルビン酸は乳酸に変換される。従って乳酸が生成されるかどうかは、ピルビン酸が生成される速度、つまり運動強度によって決まるが、高強度運動時にはこの乳酸が多量に産生されると共に、過換気による二酸化炭素の増加、ATP分解亢進といった主に三つの要因が重なって、 H^+ が多量に発生することが運動誘発性アシドーシスを引き起こし、筋肉内および血液までが酸性に傾くことで結果的に疲労の発生につながると考えられている²⁻⁸⁾。一つ目の理由である乳酸の発生は、安静時でも糖(グリコーゲンやグルコース)より常に産生され約 $1.0\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ で安定し、血液pHを低下させることはないが、高強度運動によって多量に産生された乳酸が処理(重炭酸塩等による緩衝)できなくなると乳酸により生成された H^+ が乳酸性アシドーシスを起こし、筋内や血液のpHを低下(酸性へ)させてしまう。二つ目の CO_2 の増加は、高強度運動直後に体内の代謝により誘発され、 CO_2 の分解により多くの H^+ が発生することで筋内や血液のpHを酸性へ傾けてしまう。三つ目のATP分解亢進は、筋収縮のエネルギー源確保のために誘発され、その際に H^+ が発生することで筋内のpHを酸性化してしまうものである。従って、疲労困憊に至るような高強度運動実施後の運動誘発性アシドーシスからの早期回復には、唯一無二となる決定的な解決策はないが、血中乳酸を除去すること、言い換えると乳酸を速やかに代謝(酸化)させることは高強度運動後の筋収縮阻害要因と考えられていることの一つを取り除くことに繋げることに貢献できるものと思われる。こうした乳酸の速やかな代謝促進は、陸上長距離選手においてはさらに有利となる。乳酸の代謝(酸化)は主として骨格筋で行われ、骨格筋には乳酸の酸化反応を起こす乳酸脱水素酵素(LDH)が多く、更に長距離選手の骨格筋中で多くを占めるとされる遅筋線維は、ミトコンドリア内に乳酸を取り込む乳酸輸送担体MCT1 (Monocarboxylate Transporter 1)が多いことから乳酸を取り込む能力と酸化の能力の両方に長けている。したがって乳酸の代謝(酸化)を速やかに促すことがエネルギー源であるATPの早期産生につながると考えられる。

このような活動筋のpH低下抑制と乳酸酸化促進の両面から効率のよいクーリングダウンの様式と強度、実施時間について検討を加えることは意義ある

表1 被験者の身体的特徴

	身長 (cm)	体重 (kg)	体脂肪率 (%)	除脂肪量 (kg)	BMI (kg·m ⁻²)	最大酸素摂取量 (l·min ⁻¹)	体重あたりの 最大酸素摂取量 (ml·kg ⁻¹ ·min ⁻¹)
ET群 (n=6)	161.2±8.5	54.3±8.2	18.0±8.6	44.3±6.8	20.9±2.9	3.29±0.57	61.1±8.8*
CON群 (n=5)	164.8±11.0	57.9±8.1	20.8±7.4	46.1±8.9	21.4±2.5	3.02±0.49	51.3±1.9

*p<0.05

BMI : Body mass index

ことと考えられる。加えて競技を実施する選手の視点で考えると、クーリングダウン運動に、試合終了直後に素早く簡易に短時間で実施できることが望まれる。そのため、陸上競技選手であれば短時間のジョギングで最低限の強度さえ押さえることができれば好ましい。

陸上長距離選手などは、実際のレース終盤には全力疾走に近い速度で疲労困憊まで走り切り、レース後、速やかにこの疲労を回復させるためのクーリングダウンを行っている。この回復過程において、日々のトレーニングを積んだ持久性鍛錬者には効率よく疲労を回復する特性があることも考えられている。この特性を十分引き出すためにはどのような内容のクーリングダウン運動を実施すべきかについても十分な検討は成されておらず不明な点が多い。これらの課題解決に繋がる乳酸代謝についての報告には、健常成人を対象に行なった高強度運動実施後、中程度の運動を行うことが速やかな代謝につながる事が報告されている^{9,10}。その他にトレッドミルを用いた走運動の場合60% $\dot{V}O_2\max$ 強度の走運動¹¹、自転車エルゴメーターによる運動では40~70% $\dot{V}O_2\max$ 強度の運動¹²⁻¹⁴で乳酸の消失や除去率にもたらす効果が大きいと報告されている。しかし、これらの報告は日々トレーニングを積んだ陸上長距離選手を対象にしておらず、クーリングダウン運動についても走運動の効果を報告した研究はあまり見当たらない。実際、様々な強度のクールダウン走が実施されることも踏まえ、本研究は大学陸上競技部に所属する長距離選手を対象に、5000mの全力疾走程度に相当する強度(最大酸素摂取量の95%に相当する強度(95% $\dot{V}O_2\max$))で疲労困憊に至るまで運動を実施した後に、走運動では報告の見当たらない

40% $\dot{V}O_2\max$ の強度でクーリングダウンを実施した際の血中乳酸動態について明らかにすることにより、今後、血中乳酸濃度を測定せずとも適切なクーリングダウンの運動強度範囲が明らかになることでアスリートのみならず一般健常人に役立てることができるとすれば意義あることと考える。そこで40% $\dot{V}O_2\max$ 強度でのクーリングダウンの効果を調べ、今後、強度の異なるクーリングダウンの効果と比較する基礎データの収集を行うことを目的とし本研究を行った。

II. 方法

A. 被験者

被験者は、年齢 21 ± 2 歳(18~22歳)の健常な男女大学生11名で、その内、持久性鍛錬者群として松本大学生陸上部に所属する長距離選手6名(男子4名・女子2名、年齢 21 ± 1 歳:ET群)、コントロール群として運動習慣のない一般健常大学生男女5名(男子4名・女子1名、年齢 21 ± 2 歳:CON群)の2群とした。ET群およびCON群の身体的特徴は表1に示した。体重当たりの最大酸素摂取量を除いて身長、体重、BMI、体脂肪率、除脂肪体重、最大酸素摂取量(絶対値)について両群間に統計的有意差は認められなかった。各被験者には本実験の主旨と測定に伴う苦痛や危険性について書面と口頭で十分に説明を行い、書面にて参加の同意を得た。なお、本研究は、松本大学研究倫理委員会の承認を受けて実施した(承認番号第113号)。

B. 測定項目

最大酸素摂取量決定のための漸増負荷テストの測

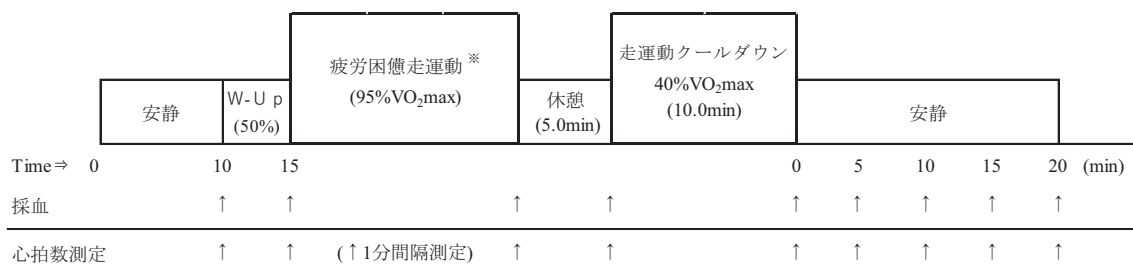
定項目は、酸素摂取量、心拍数(HR)、主観的運動強度(RPE)であった。酸素摂取量の測定は自動呼吸ガス代謝モニターシステム(AE300Sミナト医学科社製・日本)を用いてブレスバイブレス法にて30秒毎に平均の酸素摂取量の測定を行った。校正は、標準混合ガス(O₂:15.17%、CO₂:5.034%、N₂:バランス)によって測定の前後に行った。また、クーリングダウン運動テストの測定項目は、血中乳酸濃度、心拍数およびRPEであった。血中乳酸濃度の測定は、簡易乳酸測定器ラクテート・プロ2(アークレイ社製、日本)を用いて採血を行った。採血は、直前に43~45度程度の温水に5分間以上前腕を浸して温め、上腕の静脈血を動脈化したのち、指先を消毒用アルコールにて十分消毒して乾燥させ、指尖より採血用穿刺器具(ランセット)を用いて穿孔し、0.3μLの血液を採取した。出てきた血液の最初の一滴はふき取り、2滴目を測定した。

心拍数の測定は心拍計(FT-2 POLAR社製、フィンランド)を使用し、運動中の値をモニターして得られた心拍数の最高値を最高心拍数とした。RPEはBongのスケールから小野寺と宮下が作成した日本語版¹⁵⁾を用いた。

C. 実験手順

実験は全て松本大学環境制御室内にて実施した。室内は気温22.0℃、湿度40%でコントロールし、十分な換気を行った。被験者は測定日前日の激しい運動を避け、十分な睡眠をとり実験に参加した。

本実験は最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の測定(実験1)、乳酸蓄積のための疲労困憊運動および休息後のクーリングダウン運動と安静保持(実験2)(図1)にて構成した。



※疲労困憊走運動時間ET群: 13.3±4.7min CON 群: 11.6±2.6min

図1. 本研究の血中乳酸消長測定にかかる実験プロトコール

1. 最大酸素摂取量($\dot{V}O_{2max}$)の測定 (実験1)

$\dot{V}O_{2max}$ の測定は、被験者ができるだけ普段の運動に近い形で測定するため、トレッドミル オートランナー (AR-200ミナト医科学株式会社、日本)を用いて測定した。その後、疲労困憊運動とクーリングダウン運動の負荷強度(95% $\dot{V}O_{2max}$ 強度と40% $\dot{V}O_{2max}$ 強度)を決定した。

ウォーミングアップは自転車エルゴメーター(828Eモナーク社製、スウェーデン)を用いて1kp、回転数70rpmの自転車こぎ運動を10分間行った。5分間の休憩後、安全ベルトと呼吸ガスマスクを装着し、座位にて安静時の測定を行った。運動プロトコールは6分まで2分毎に時速1.2kmずつ、6分以降は時速0.6kmずつ速度を漸増する多段階漸増負荷法を用いた。運動中は呼吸を連続して摂取し、30秒毎に酸素摂取量、換気量、心拍数、RPE、呼吸交換比(R)を測定した。測定運動時の運動強度と酸素摂取量との関係を一回帰直線に表し、運動強度が増加しても酸素摂取量が増加しないレベリングオフが確認できることとRが1.10以上であること、心拍数が予測最大心拍数の90%以上に達していること、RPEが19以上これらの中から3つ以上の条件に満たしている場合を最大酸素摂取量とした。最大酸素摂取量の測定終了後、95% $\dot{V}O_{2max}$ 、40% $\dot{V}O_{2max}$ に相当する運動強度を内挿法にて算出した。

2. クーリングダウン運動(実験2)

実験2のプロトコールを図1に示した。被験者は実験1後、激しい運動を避けて1週間以上の間隔を空けて測定を行なった。測定の前日には睡眠を十分とる

ように指示した。被検者は座位で10分間の安静後、その後トレッドミルにて傾斜5%、50% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度で5分間のウォーミングアップ(W-Up)を行い、連続して傾斜3%、95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度での運動を疲労困憊(オールアウト: All-Out)に至るまで行った。オールアウト直後、5分間の休息を挟んだのちにクーリングダウン運動(C-Down)として40% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度で10分間のトレッドミル走を行い、その後20分間の座位安静を保った。

血中乳酸濃度の測定は、運動前安静時、ウォーミングアップ運動終了後、95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 疲労困憊運動終了時、5分間の休息後、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度クーリングダウン終了直後、クーリングダウン終了後5分、10分、15分、20分に測定した。

3. 統計処理

数値はすべて平均値±標準偏差(SD)で示した。ET群とCON群における平均値の差の検定は対応のないt-検定を用いた。

運動開始前から終了までの各変数の経時的変化について2群間の差を検討するために繰り返しのある二元配置分散分析(repeated measure two-factor ANOVA)を用いた。この分析で群×時間の交互作用に有意差が認められた場合は、Tukey-Kramer法により単純主効果の多重比較検定を行った。

すべての統計処理における有意水準は5%未満とした。統計処理は統計解析ソフトStatcel 4を使用した。

Ⅲ. 結果

A. 最大酸素摂取量の測定

絶対値および体重当たりの最大酸素摂取量は表1および表2に示した。絶対値では群間に差は認められなかった。体重当たりの最大酸素摂取量はET群が有意に高い値を示した。

B. ET群とCON群の最大酸素摂取量、最大酸素摂取量の95%と40%、およびそれぞれの強度に相当するトレッドミル走行速度

$\dot{V}O_2\text{max}$ 、95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ および95% $\dot{V}O_2\text{max}$ と40% $\dot{V}O_2\text{max}$ の強度に相当する走速度を表2に示した。すべての項目において、ET群がCON群に比較して有意に高値を示した。

C. 回復運動時の血中乳酸動態

本研究におけるET群とCON群の95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度での疲労困憊運動、および40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度でのクーリングダウン運動とその後の安静座位中の血中乳酸濃度を表3と図2に示した。両群間に有意な差は認められなかった。

表2 最大酸素摂取量($\dot{V}O_2\text{max}$)、95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ および95%と40% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する走速度

群	100% $\dot{V}O_2\text{max}$	95% $\dot{V}O_2\text{max}$	40% $\dot{V}O_2\text{max}$	走速度 @95% $\dot{V}O_2\text{max}$	走速度 @40% $\dot{V}O_2\text{max}$
	($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{ml} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
ET	61.1±8.8 ※	58.0±8.4 ※	24.5±3.5 ※	13.4±1.9	4.9±1.7 ※
CON	51.3±2.2	48.7±2.1	20.5±0.9	11.6±1.8	2.5±1.2

※p<0.05 vs CON.

表3 鍛錬者(ET)群と非鍛錬者(CON)群の血中乳酸濃度

	安静 (mmol·l ⁻¹)	W-up 後 (mmol·l ⁻¹)	All-Out 走 直後 (mmol·l ⁻¹)	5分間 休憩後 (mmol·l ⁻¹)	C-down 後 (mmol·l ⁻¹)	回復 5分後 (mmol·l ⁻¹)	回復 10分後 (mmol·l ⁻¹)	回復 15分後 (mmol·l ⁻¹)	回復 20分後 (mmol·l ⁻¹)
ET	1.0±0.1	2.6±2.9	12.1±2.7	9.2±2.8	5.0±3.0	4.0±2.6	3.3±2.1	2.9±1.6	2.8±1.8
CON	1.1±0	1.7±1.2	12.2±4.5	11.4±2.8	6.9±2.1	5.7±1.9	4.8±1.5	4.4±1.6	3.6±1.1

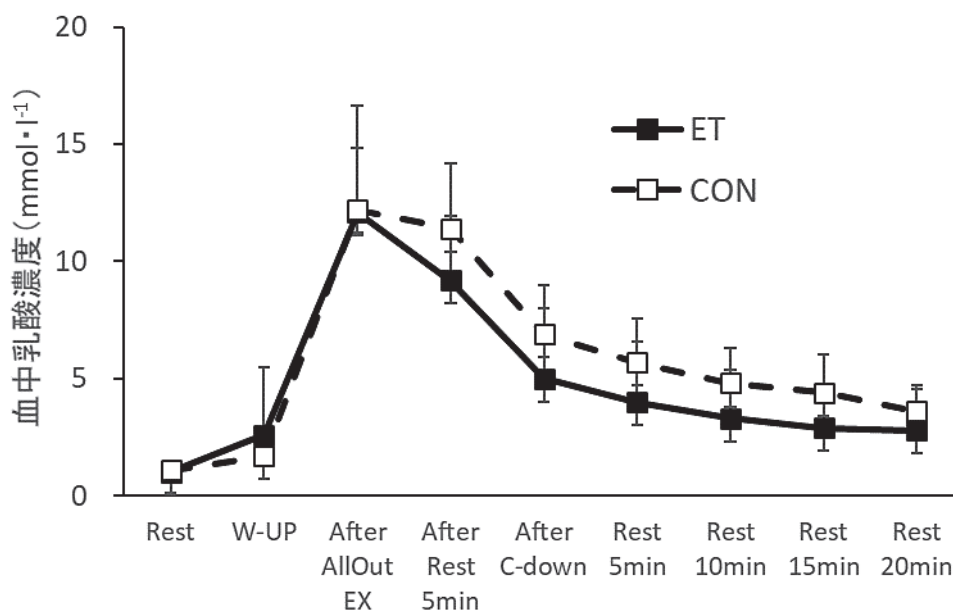


図2. 95% $\dot{V}O_2$ max強度の疲労困憊運動後のクーリングダウン走(40% $\dot{V}O_2$ max強度)及び安静20分における血中乳酸濃度

D. 95% $\dot{V}O_2$ max強度の疲労困憊運動終了時点での血中乳酸濃度を100%としたときの、各測定時点における相対値

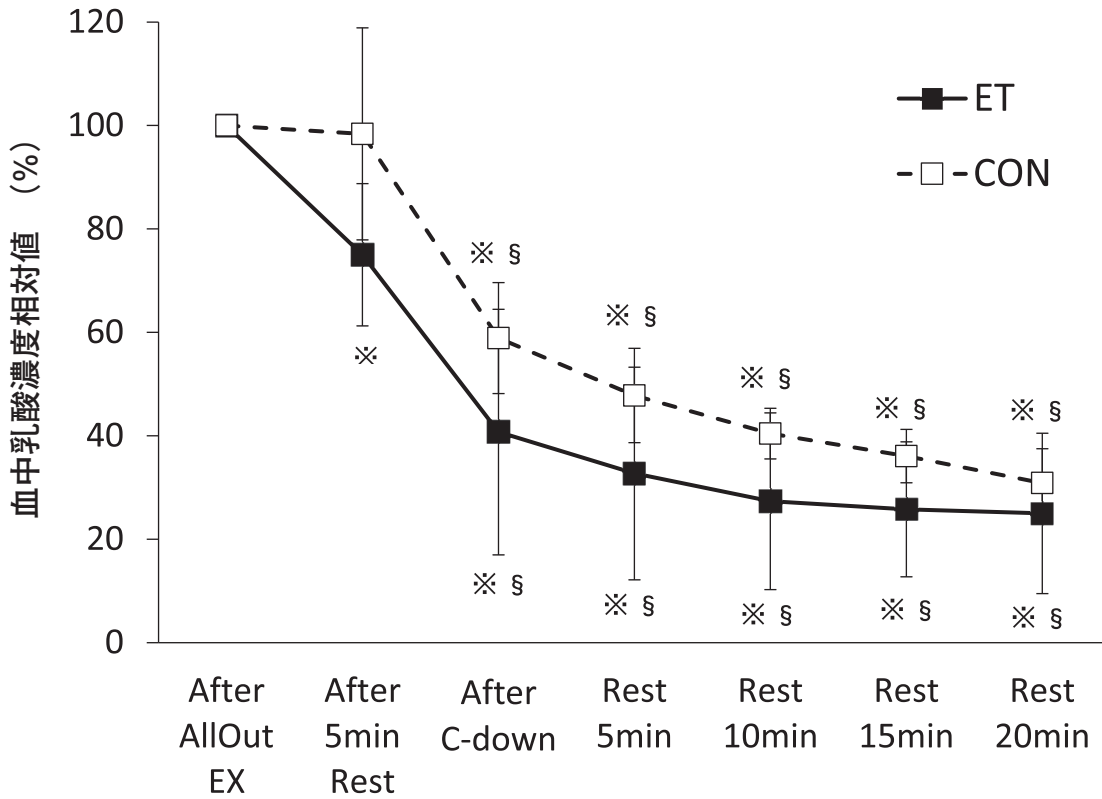
本研究におけるET群とCON群の95% $\dot{V}O_2$ max強

度での疲労困憊運動、および40% $\dot{V}O_2$ max強度でのクーリングダウン運動とその後の安静座位中の血中乳酸濃度を表4と図3に示した。疲労困憊直後を除いて、すべての測定時でET群がCON群に比較して有意に高値を示した。

表4 95% $\dot{V}O_2$ max強度での疲労運動終了直後の最高血中乳酸濃度を100%とした時の血中乳酸濃度の相対値

群	All-Out 走 直後 (%)	5分間 休憩後 (%)	C-down 後 (%)	回復 5分後 (%)	回復 10分後 (%)	回復 15分後 (%)	回復 20分後 (%)
ET	100±0	75.0±13.8 ^b	40.7±23.7 ^b	32.7±20.6 ^b	27.4±17.1 ^b	25.8±13.0 ^b	25.0±15.5 ^b
CON	100±0	98.4±20.5	58.9±10.7	47.8±9.1	40.4±4.9	36.1±5.2	30.9±6.7

^b: p<0.05 vs CON.



※: p<0.05 vs After All-Out EX §: p<0.05 vs After 5min Rest

図3. 95% $\dot{V}O_2$ max強度での疲労運動終了直後の最高血中乳酸濃度を100%とした時の血中乳酸濃度の相対値

E. 回復運動時の心拍数

本研究におけるET群とCON群の95% $\dot{V}O_2$ max強度での疲労困憊運動および40% $\dot{V}O_2$ max強度での

クーリングダウン運動とその後の安静座位中の心拍数を表5と図4に示した。両群間に有意な差は認められなかった。

表5 運動中から運動終了時20分までの心拍数

	安静 (beat·min ⁻¹)	W-up 後 (beat·min ⁻¹)	All-Out 走直後 (beat·min ⁻¹)	5分間休憩後 (beat·min ⁻¹)	C-down 後 (beat·min ⁻¹)	回復5分後 (beat·min ⁻¹)	回復10分後 (beat·min ⁻¹)	回復15分後 (beat·min ⁻¹)	回復20分後 (beat·min ⁻¹)
ET	65±9.0	134±11.5	194±11.7	112±14.8	113±12.9	101±11.4	91±13.2	91±13.3	91±16.4
CON	69±12.3	111±20.6	198±6.9	120±14.7	118±17.6	107±14.6	97±15.3	97±14.1	94±13.2

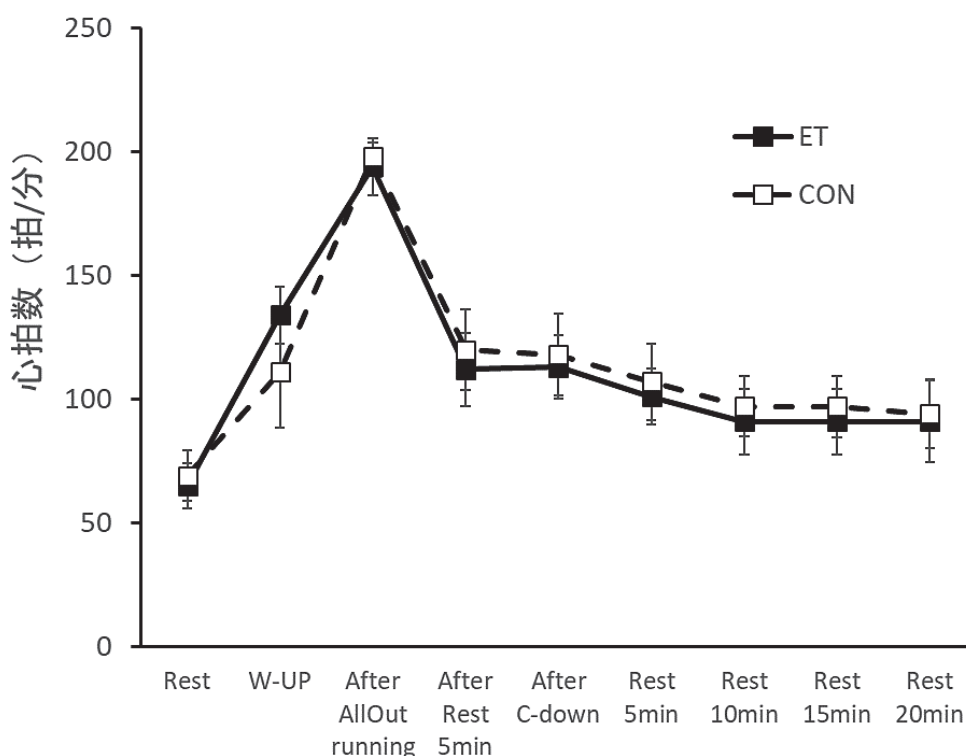


図4. 95% $\dot{V}O_2$ max強度の疲労困憊運動とその後のクーリングダウン(40% $\dot{V}O_2$ max強度)及び安静20分時までの心拍数

F. 95% $\dot{V}O_2$ max強度の疲労困憊運動終了時点での心拍数を100%としたときの、各測定時点における相対値

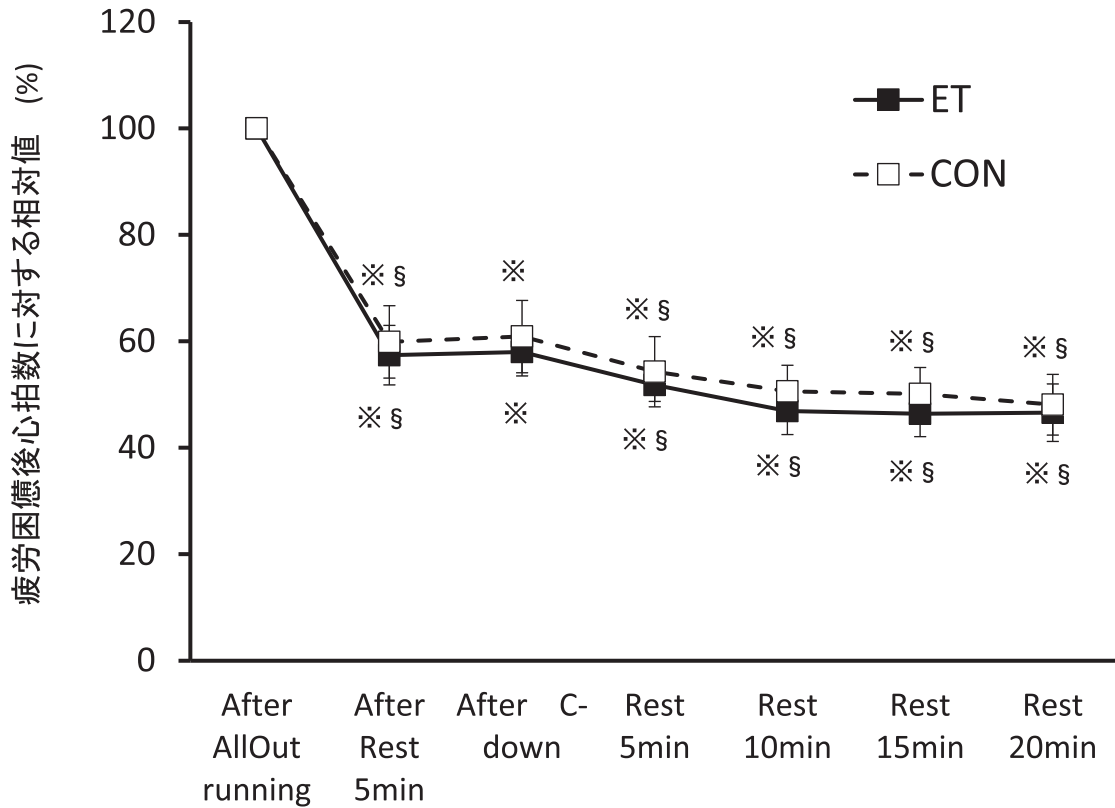
本研究におけるET群とCON群の95% $\dot{V}O_2$ max強

度での疲労困憊運動および40% $\dot{V}O_2$ max強度でのクーリングダウン運動とその後の安静座位中の心拍数を表6と図5に示した。疲労困憊直後を除いて、すべての測定時でET群がCON群に比較して有意に高値を示した。

表6 疲労困憊運動(95% $\dot{V}O_2$ max強度)終了直後の最高心拍数を100%とした時の各測定時の心拍数の相対値

群	All-Out 走直後 (%)	5分間休憩後 (%)	C-down 後 (%)	回復5分後 (%)	回復10分後 (%)	回復15分後 (%)	回復20分後 (%)
ET	100±0	57.4±5.6 ^b	58.0±4.5 ^b	51.8±3.1	46.9±4.4 ^b	46.4±4.3 ^b	46.6±5.4 ^b
CON	100±0	59.9±6.8	60.9±6.8	54.3±6.6	50.6±4.9	50.1±5.0	48.1±5.7

^b : p<0.05 vs CON



※: $p < 0.05$ vs After All-Out EX §: $p < 0.05$ vs After 5min Rest

図5. 95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度運動終了時の心拍数を100%としたときの各測定時点での心拍数の相対値

IV. 考察

本研究は、高い乳酸除去能力を有していると考えられる大学陸上競技部に所属する持久性鍛錬者の40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度に相当する走行でのクーリングダウン運動が血中乳酸動態に及ぼす影響について検討した。本研究の実験には被験者の通常の運動形式に近いトレッドミル走を用いた。これは、普段のトレーニングが下肢に体重負荷がかかった状況で行なわれることと、トレーニングされている下肢筋群を通常に近い形で使用することにより、被験者のトレーニング特性を反映させることが出来ると考えたためである。各被験者を5000m走の全力疾走を模した運動強度(95% $\dot{V}O_2\text{max}$)で疲労困憊まで追い込んだ状態後、休憩を挟んで40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度のクーリングダウン走運動を実施した。本研究の持久性鍛錬者における最大酸素摂取量は $61.1\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ で、先行研究と比較しても比較的高く(Belcastro:男子体育学専攻大学生 $\dot{V}O_2\text{max}$ $46.7\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、Davies: 健康男性 $\dot{V}O_2\text{max}$ $53.5\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、

Stamford:健康男性 $\dot{V}O_2\text{max}$ $47.7\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、これらは自転車エルゴメーターを使用。Hermansen:鍛錬者7名(男3、女4) $\dot{V}O_2\text{max}$ $58.8\text{ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 、これらはトレッドミルを使用)、CON群と比較して有意に高値であった。自転車エルゴメーターを用いた測定様式は運動中の体勢が安定し様々な測定を行ない易く、リスクも少ない反面、体重が免荷される分、酸素摂取量や活動筋量も陸上運動に比べ筋への刺激が異なると考えられる。一方でトレッドミルを用いた測定様式は下肢筋には体重による荷重刺激が加わり、自転車こぎ運動のような局所筋活動ではない全身運動で、被験者が陸上で走る状況を再現できるものと考えられる。しかし、トレッドミルを使用した報告¹¹⁾は多くなく、日常的にランニングトレーニングを継続している陸上競技長距離選手を用いてクーリングダウン後の血中乳酸消長の特性を観察した報告も見あたらない。そこで、下肢活動筋群において筋・血中乳酸の酸化(除去能)に特徴があると考えられている²⁷⁾陸上競技長距離選手を対象に、体重負荷が掛かるランニングで強度設定をして検討する

ことで異なる結果が得られるかもしれないと考えた。

1. 血中乳酸濃度の消長とクーリングダウン走運動の強度

本研究にて、血中乳酸濃度は、疲労困憊前の安静時から回復20分後までの間で、疲労困憊後の最高値を100%とする相対値にて検討したところ、減少速度においてはET群がCON群よりも有意に高値を示した。本研究のようなクーリングダウンに関する研究は、最大酸素摂取量を基準とした運動強度を設定し、回復期に行われる運動後の血中乳酸濃度消長の観点から評価した報告が多いが^{11-13, 16, 17}、Daviesら¹⁰は自転車エルゴメーターを用いて40% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する強度の運動を行った場合に、Hermansen & Stensvold¹¹は鍛練者を対象にトレッドミルを用いた走運動において60~70% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する運動で最も乳酸の除去率が高かったと報告した(最も乳酸除去率が高かった運動強度が63% $\dot{V}O_2\text{max}$)。本研究のトレッドミルを用いて行なった疲労困憊運動直後の血中乳酸濃度は、ET群で $12.1 \pm 2.7 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ 、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度クーリングダウン走運動後 $5.0 \pm 3.0 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ 、20分安静後 $2.8 \pm 1.8 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ となった。同様にCON群で疲労困憊運動後 $12.2 \pm 4.5 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ 、クーリングダウン走運動後 $6.9 \pm 2.1 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ 、20分安静後 $3.6 \pm 1.1 \text{mmol} \cdot \text{m}^{-1}$ であった。疲労困憊直後の血中乳酸濃度は自転車エルゴメーターを用いて実施した先行研究^{12, 14, 19}と比較して運動様式や負荷強度は異なっても同程度であったことから同程度の疲労困憊と考えられる。そこで、先行研究の結果とも比較し易いように疲労困憊直後の値から相対値で表し検討を行った。

図3に95% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の疲労困憊運動直後の血中乳酸濃度の値を100%とした相対値を示した。ET群で疲労困憊後の休息5分後 $75.0 \pm 13.8\%$ 、クーリングダウン走運動後 $40.7 \pm 23.7\%$ 、20分安静後 $25.0 \pm 15.5\%$ となった。同様にCON群では疲労困憊運動後の休息5分後 $98.4 \pm 20.5\%$ 、クーリングダウン走運動後 $58.9 \pm 10.7\%$ 、20分安静後 $30.9 \pm 6.7\%$ と、いずれのタイミングでもET群がCON群と比較して有意に低値を示した。これらの結果は、40% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度に相当するクーリングダウン走運動10分間におい

て、被鍛練者と比較して持久的鍛練者は、疲労困憊直後に測定した血中乳酸濃度の最高値から低下する速度が速いことを示している。持久的鍛練者に対してこの40% $\dot{V}O_2\text{max}$ という低強度で10分間のクーリングダウン走運動は血中乳酸濃度の処理速度に影響を及ぼすことを示唆している。本研究と同様にトレッドミルを用いてクールダウン走運動を行ったHermansen and Stensvold¹¹の報告は、30分間の持続運動のため、クールダウン走運動の時間が10分間のみの本研究と異なり、厳密には比較できないが、本研究の相対値は、彼らが最も乳酸除去率が高かったと述べている60~70% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する強度のクールダウン走運動で得られた血中乳酸濃度の低下速度と同程度の除去速度か、それ以上と思われる。通常、運動強度が高いと血流再配分により活動筋に血流が集中してしまい、乳酸の酸化が可能なその他の非活動筋や内臓への血流量が減少してしまう。これではトータルでの酸化量が頭打ちとなり兼ねないが、そのバランスが取れる上限に相当する運動強度が60~70% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する強度であろうと考えられる。逆に運動強度が軽度であると、高い強度の運動時と比較して、血中乳酸産生量は減少しているが、筋中や全身の血流量自体が低下することで血中乳酸の除去量も低下してしまうことが考えられる。走運動でのクールダウンの場合、本研究にて用いた40% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する低強度の運動は、血流量という要因が関係する中で60~70% $\dot{V}O_2\text{max}$ 強度の運動と同程度の血中乳酸濃度を代謝可能な運動強度の下限と考えられる。

更に本研究での40% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する低強度の運動が60~70% $\dot{V}O_2\text{max}$ に相当する中強度の運動と同程度の除去が可能と思われる理由として、本研究が対象とした陸上長距離選手は骨格筋の筋線維組成において血中乳酸の処理能力が高まっていることが考えられる。

持久的鍛練者で血中乳酸濃度の除去能が高いと考えられる要因の1つに骨格筋と筋血流量の影響が強いことが挙げられている²⁷⁻³¹。骨格筋は乳酸代謝の主要な部位である²⁰⁻²³が、高強度運動後に多量に産生される乳酸は活動筋において酸化される。持久的トレーニングを積んだ持久的鍛練者は遅筋線維の占める割合が高く、乳酸を利用するミトコンドリアが増え、さらに心臓と併せて毛細血管が発達すること

から筋血流量が増加する。筋血流量の増加はクーリングダウン運動の際に乳酸を全身へ運び、筋中の乳酸輸送担体MCT 1の働きと相まって非活動筋や心臓での乳酸酸化に貢献すると考えられる。これら活動筋および非活動筋における乳酸産生と乳酸吸収についてヒトを対象に、放射性同位元素 ^{14}C で標識された ^{14}C -乳酸を投与して、その後の ^{14}C の行方を追うことで乳酸の代謝を検討する実験を行ったStanley et al.の報告^{21,23)}がある。Stanley et al.は、自転車エルゴメーターを使用して4種類の強度の運動を実施し、それぞれの強度において、活動筋である脚と非活動筋である腕から産生された血中乳酸濃度、標識した ^{14}C -乳酸の濃度を測定した。その結果、活動筋である脚が乳酸を放出(産生)する一方で産生に相当する量の乳酸を摂取し、その摂取量は他の部位と比較してかなり多くの量であったことから、活動筋が血中の乳酸を代謝する主要な部位であることを示した。また、脚よりは少ないが、非活動筋である腕でも乳酸産生と吸収との間に相関関係を見いだした。これらは運動強度が低い場合に正の相関があったことも併せて報告されている。

本研究のような持久的鍛錬者については、先行研究で示された60~70% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ 強度だけでなく、40% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ の低強度であっても、遅筋線維の占める割合並びに血中乳酸を摂取する能力が高かったと推定されるが、本研究では、60% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ 強度以上のクーリングダウン走運動との直接的な比較を行っていないため、今後、トレーニングの内容と有無、対象者の数などを揃えて強度の異なるクーリングダウンの効果と比較する基礎データの収集を行い、個人差も含めて更に効果の望めるクーリングダウン走運動強度について確かめる必要があると思われる。

2. 血中乳酸濃度の消長速度と血中乳酸濃度

血中乳酸濃度の半減期の観点から比較検討すると、ET群は疲労困憊後、5分間の休憩後が98%と、CON群と比較してピーク値の75%へ有意に低下した。さらに10分間のクーリングダウン走運動後ではET群がピーク値の40%であったのに対してCON群は60%であった。従って、ET群はクーリングダウン走開始前が75%であったことから、10分間で35%

低下したこととなる。クーリングダウン走運動中に1分間当たりの速度を算出すると3.5%の低下となり、約50%まで半減するにはクーリングダウン走運動を開始してから7分後(疲労困憊後12分後)になると考えられる。一方、CON群はクーリングダウン走開始前が98.4%であったことから、10分間で39.5%低下したこととなる。その後5分間の安静座位で11.1%低下しピーク値の47.8%を示した。このことより、安静座位最初の5分間は1分間当たりの速度を算出すると2.22%ずつの低下となり、約50%まで半減するにはクーリングダウン走運動を開始してから12.8分後(疲労困憊後17.8分後)になると考えられる。さらにその半分の25%程度に低下するまでにET群はクーリングダウン走運動を開始してから30分後(疲労困憊後35.0分後)で、CON群はクーリングダウン走運動を開始してから30分(疲労困憊後35.0分)経過しても到達せず、ET群と比較して有意に高値を示した。

これらの結果から、本研究における持久的鍛錬者を対象とした血中乳酸濃度除去速度の特徴として三つのフェイズが考えられる。一つは、疲労困憊に至った直後の安静座位5分間で、CON群と比較して有意に血中乳酸濃度除去速度が速いET群に特有のものと考えられる。二つめは、40% $\dot{V}\text{O}_2\text{max}$ 強度に相当するクーリングダウン走運動10分間で、両群において除去速度に差が認められない。三つめは、クーリングダウン走運動後の安静座位20分間である。この20分間は除去速度の違いからさらに前半の10分間と後半の10分間に分けることができる。クーリングダウン走運動を終え、血中乳酸濃度の割合がピーク値の40%程度に低下以降の10分間はET群で1分間当たり1.33%、CON群で1.85%を示し、両群ともクーリングダウン走運動中の約半分の速度であった。クーリングダウン走運動終了後10分から20分までの最後の10分間ではさらに低下してET群で1分間当たり0.24%、CON群で0.95%を示した。これらの結果より、ET群は、血流量が比較的多いと推定される疲労困憊直後からクーリングダウン走運動中までは血中乳酸の除去速度が維持され、血流量維持に伴う活動筋の代謝能力の貢献が考えられた。一方で血流量が維持できなくなると推定されるクーリングダウン走運動後では血中乳酸の除去速度はCON群よりも低下することが示唆された。

高強度運動後、水素イオン(H^+)が多量に生成され筋中および血中でpHが低下し、アシドーシスが引き起こされることが考えられている。その要因として活動筋内での運動誘発性過換気による二酸化炭素の産生、血中乳酸産生、ATP分解の亢進などの関与が挙げられており、クーリングダウン走運動による血中乳酸濃度の低下のみで疲労回復について議論することは無意味とも言える。ただ、疲労困憊後は座位安静よりも軽運動を実施することは循環代謝の点でメリットが多い。血中乳酸に関しては、軽運動の強度によっては全身の血流量が増加して体中に運搬され、活動筋中の遅筋線維を中心に非活動筋の遅筋線維や心臓で乳酸輸送担体MCT1によってミトコンドリア内へ入り酸化される。これが再び活動筋のエネルギーとなることからエネルギー回復に役立つと考えられる。また、血中乳酸の酸化が進むことにより血中グルコースの節約にもつながっているとの報告もある²³⁾。以上の点については、持久的トレーニングを積んだ鍛錬者において、二酸化炭素を排出する換気能力、血中乳酸の酸化能力、血流量の調整等に特性があることが考えられ、異なる競技レベルや一般健常人との違いについて検討することはトレーニング効果を確かめる意味で、今後、重要と思われる。このような観点から血中乳酸の早期除去だけでなく対象者に適したクーリングダウン走運動の強度を明らかにすることは大切である。

V. まとめ

本研究は高い乳酸除去能を獲得していると思われる大学陸上長距離選手を対象に、トレッドミルを用いて、95% $\dot{V}O_2max$ に相当する速度で疲労困憊に至るまで運動を実施した直後に40% $\dot{V}O_2max$ に相当する速度でクーリングダウン走を実施した際の血中乳酸濃度の動態について検討を加えることを目的とした。その結果、持久性鍛錬者群は血中乳酸濃度のピーク値からの低下率において40% $\dot{V}O_2max$ に相当する速度でのクーリングダウン走運動により、非鍛錬者に比べて有意に低値を示した。また、持久性鍛錬者は、ピーク値に占める血中乳酸濃度の割合が1分で半減し、30分でさらに半減した。また、その低下の速度は60~70% $\dot{V}O_2max$ 相当の中強度でクーリングダウン走運動を実施した先行研究⁵⁾と同程度で

あり、クーリングダウン走運動の効果は40% $\dot{V}O_2max$ 相当の低強度から幅があることが示唆された。

VI. 謝辞

本研究を行なうにあたり、快く実験に協力頂いた松本大学陸上部長距離部員並びにスポーツ健康学科学生の皆さんに深謝致します。

参考文献

1. 健康・体力づくり事業財団, 「ウォームアップとクールダウン」『健康運動指導士養成講習会テキスト(下)』南江堂, pp. 441-447(2019).
2. Powers S K, Howley E T.(内藤久士, 柳谷登志雄, 小林裕幸, 高澤祐治監修「第11章運動時の酸塩基平衡」『パワーズ運動生理学』メディカル・サイエンス・インターナショナル, pp.265-277(2020).
3. Böning, D., Maassen, N. Point: Counterpoint:Lactic acid is/is not the only physicochemical contributor to the acidosis of exercise. *J. Appl. Physiol.* 105, 358-361 (2008).
4. Jones, N. L. Hydrogen ion balance during exercise. *Clin. Sci.* 59, 85-9 (1980).
5. Karlsson, J. Localized_muscular_fatigue_role_of_muscle role of muscle metabolism and substrate depletion. 7, 1-42 (1979).
6. Nattie, E. E. The alaphstat hypothesis in respiratory control and acid-base balance. *J. Appl. Physiol.* 69, 1201-1207 (1990).
7. Spriet, L. L. Phosphofructokinase activity and acidosis during short-term tetanic contractions. *Can. J. Physiol. Pharmacol.* 69, 298-304 (1991).
8. Vøllestad, N. K. & Sejersted, O. M. Biochemical correlates of fatigue - A brief review. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 57, 336-347 (1988).
9. E. V. Newman, D. B. Dill, H. T. Edwards, and F. A. W. The rate of lactic acid removal in exercise. *Am. J. Physiol.* 118, 457-462 (1937).
10. Iwahara, F., Ito, M. & Asami, T. Effect of cooling down on blood lactate removal and anaerobic workout in exhaustive cycle ergometer exercise. *Japanese J. Phys. Fit. Sport. Med.* 52, 499-511 (2003).
11. Hermansen, L. & Stensvold, I. Production and Removal of Lactate during Exercise in Man. *Acta Physiol Scand.* 86, 191-201 (1972).
12. Belcastro, A. N. & Bonen, A. Lactic acid removal rates during controlled and uncontrolled recovery exercise. *J. Appl. Physiol.* 39, 932-936 (1975).
13. Davies, C. T. M., Knibbs, A. V. & Musgrove, J. The rate of lactic acid removal in relation to different baselines of recovery exercise. *Int. Zeitschrift für Angew. Physiol. Einschließlich Arbeitsphysiologie* 28, 155-161 (1970).
14. Maruyama, A., Hirakoba, K. & Misaka, K. Characteristics of blood lactate disappearance due to relative recovery exercise in endurance-trained Men. *Japanese J. Phys. Fit. Sport. Med.* 40, 156-163 (1991).
15. 小野寺孝一, 宮下充正. 「全身持久性運における主観的強度と客観的強度の対応性」*Japan Soc. Phys. Educ.* 21, 191-203 (1976).
16. 池上晴夫, 稲沢見矢子, 近藤徳彦. 「乳酸消失からみたクーリング・ダウンに関する研究—特に漸減強度の回復期運動の効果について—」, 17.151-158(1986).
17. Stamford, B. A., Weltman, A., Moffatt, R. & Sady, S. Exercise recovery above and below anaerobic threshold following maximal work. *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.* 51, 840-844 (1981).
18. 稲沢見矢子, 西保岳, 近藤徳彦, 勝田茂, 池上晴夫. 「乳酸消失からみたクーリングダウンの効果に関する研究—間欠的回復運動の場合—」*Jap. J. Phys. Educ. 体育学研究*33, 145-153 (1988).
19. Hultman, E. & Sahlin, K. ACID_BASE_BALANCE_DURING_EXERCISE.5. in *Exercise and Sport Sciences Reviews* 41-128 (the Frandlin Institute Press, 1980).
20. Poortmans, R., Physiologique, C. & Clinique, D. B. Lactate up take by inactive forearm uring progressive leg exercise. *J. Appl. Physiol. Respir. Environ. Exerc. Physiol.* 45, 835-839 (1978).
21. Stanley, W. C. et al. Lactate extraction during net lactate release in legs of humans during exercise. *J. Appl. Physiol.* 60, 1116-1120 (1986).
22. Wahren, J., Felig, P., Hendler, R. & Ahlborg, G. Glucose and amino acid metabolism during recovery after exercise. *J. Appl. Physiol.* 34, 838-845 (1973).
23. Stanley, W. C., Wisneski, J. A., Gertz, E. W., Neese, R. A. & Brooks, G. A. Glucose and lactate interrelations during moderate-intensity exercise in humans. *Metabolism* 37, 850-858 (1988).
24. McDermott, J.C. & Bonen A.:Lactate transport in rat sarcolemmal vesicles and intact skeletal muscle, and after muscle contraction. *Acta Physiol Scand.* 151, 17-28 (1994).
25. Costill DL, F. W., Pollock ML, ML', S. articles by 'Pollock & ML, P. Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. 96-100 (1976).
26. Farrel, P. A., Wilmor, J. H., Coyl, E. F., Billin, J. E. & Costil, D. L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med. Sci. Sports Exerc.* 25, 1091-1097 (1993).
27. Foster, C., Costill, D. L., Daniels, J. T. & Fink, W. J. Skeletal muscle enzyme activity, fiber composition and $\dot{V}O_2$ max in relation to distance running performance. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 39, 73-80 (1978).
28. Bonen, A., Campbell, C. J, Kirby, R.L. and Belcastro, A. N. "Relationship between slow-twitch muscle fibers and lactic acid removal. *Can. J. Appl. Sport Sci.*, 3; 160-162 (1978).
29. 八田秀雄, 「持久的トレーニングや発育加齢に

よるエネルギー代謝の変化』『乳酸と運動生・
生化学—エネルギー代謝の仕組み—』市村出
版, p.122-123(2009).

30. Hatta, H., Soma, R. Atomi, Y. Effect of endurance training on oxidation of lactate in mice after supramaximal exercise. *Comp. Biochem. Physiol. – Part A Physiol.* 107, 27-30 (1994).
31. Hatta, H., Atomi, Y., Yamamoto, Y., Shinohara, S. Yamada, S. Oxidation of lactate in rats after short-term strenuous exercise. *Int. J. Sports Med.* 9, 429-432 (1988).