

## 運動が作業筋皮膚表面乳酸濃度に及ぼす影響

名古屋工業大学大学院	大 桑 哲 男
(共同研究者) 同	伊 藤 宏
同	山 崎 良比古
同	蘇 恩 和
ピコデバイス	津 田 孝 雄

### **Influence of Exercise on Lactate Concentration on Skin Surface of Working Muscle**

by

Tetsuo Ohkuwa, Hiroshi Itoh, Enhe So

*Department of Material Science and Engineering,  
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology*

Yoshihiko Yamazaki

*Department of Computer Science and Engineering,  
Graduate School of Engineering, Nagoya Institute of Technology*

Takao Tsuda

*Pico-Device Co., Ltd., Offices, Incubation Center*

### **ABSTRACT**

We examined the influence of exercise on lactate concentration on the skin surface of working muscle. A plastic container with 100  $\mu$ l 1% ethanol was put on the skin surface of the belly of rectus femoris muscle. The workloads were 360, 720, 900 and 990 (or 1080) kpm/min and each stage was 5 min in duration. Sample collections were performed at rest, during exercise, and recovery.

The skin surface lactate concentration during exercise significantly increased compared

to the basal level ( $p < 0.05$  or  $p < 0.001$ ). The skin lactate concentration at five minutes after exercise was significantly high compared with the basal level ( $p < 0.01$ ). Skin surface lactate concentration was found to correlate significantly with heart rate at the exercise intensity of 360 kpm/min ( $r = -0.64$ ,  $p < 0.05$ ), 720 kpm/min ( $r = -0.73$ ,  $p < 0.01$ ) and 900 kpm ( $r = -0.61$ ,  $p < 0.05$ ). This study confirmed that 1) the increase in lactate concentration on the skin surface of working muscle is associated with increase in exercise intensity, and 2) lactate concentration on the skin surface correlated with heart rate at each exercise intensity. From these results it was suggested that skin is useful for the uptake of lactate produced in working muscle.

## 緒言

これまでに血中乳酸濃度は解糖のみならず<sup>15)</sup>, 無酸素的作業能力を示す指標であることが報告されている<sup>10)</sup>. 我々は非鍛錬者と長距離選手において, 血中乳酸濃度の最高値は400m全力疾走でのランニングスピードと有意な相関関係が認められること, および短距離選手において, 無酸素的運動後の血中乳酸濃度の最高値は非鍛錬者と長距離選手の値に比べ有意に高いことを報告してきた<sup>16)</sup>. 乳酸測定のために血液を採取することは血液の量的損失, 精神的なストレス, 苦痛, 感染症などの危険性を伴うなどの問題が生じる可能性がある. 皮膚表面乳酸濃度の測定は血中乳酸や他の非侵襲的サンプリング方法に比べ多くの利点がある. 唾液や汗の採取は非侵襲的であるが, 皮膚表面乳酸の採取は唾液や汗採取に比較し容易である. さらに負荷漸増法での運動中の汗中乳酸濃度は血中乳酸濃度と相関関係は認められないと報告されている<sup>1, 11)</sup>.

乳酸はタイプII線維によって生成され<sup>17, 18)</sup>, タイプI筋線維で酸化・消去される<sup>17, 18)</sup>. あるいは肝臓においてはグルコースに合成され<sup>14)</sup>, また骨格筋において, 乳酸からグリコーゲンが生成される<sup>3, 4)</sup>. 乳酸の取り込みと排出はモノカルボン酸トランスポーターが重要な役割を担っている.

モノカルボン酸トランスポーター-1 (MCT-1) は赤筋線維において乳酸の取り込み量と高い相関関係を持ち<sup>12, 13, 20)</sup>, 一方モノカルボン酸トランスポーター-4 (MCT-4) は乳酸排出に関係している<sup>7, 20)</sup>. ヒフク筋白筋部位である速筋線維ではMCT-4は多いがMCT-1は少ない<sup>7, 12)</sup>. ヒラメ筋のような遅筋線維はMCT-1が多く, MCT-4が少ない<sup>7, 12)</sup>. MCT-1は血液中から乳酸の取り込みに重要な役割を果たしている<sup>6, 7)</sup>. さらにBonenら<sup>8)</sup>はラットの皮膚にMCT-1, -2, -4, -7が存在することを認めている. Bonenら<sup>8)</sup>のこの結果は皮膚においても乳酸の取り込みと排出がトランスポーターを介して行われていることが推察される. しかし, 運動が皮膚表面乳酸濃度に及ぼす影響は報告されていない. 本研究は漸増負荷運動が作業筋皮膚表面乳酸濃度に及ぼす影響を明らかにすることである.

## 1. 方法

本研究に被験者として13人が参加した. 実験1に参加した1名は55歳で日常運動を行っている鍛錬者であった. 実験2に参加した被験者は水泳部とワンダーフォーゲル部に所属する男子大学生であった. 年齢, 身長, 体重, およびBMI (Body Mass Index) の平均値±標準偏差はそれぞれ  $20.4 \pm 1.3$  才,  $169.0 \pm 5.4$ cm,  $58.06 \pm 6.1$ kg,

20.2 ± 1.7kg/m<sup>2</sup>であった。全ての被験者は良好な健康状態であり、薬剤投与はなく、非喫煙者であった。本研究の目的と実験手順の説明を受け、納得した後、承諾書にサインし実験に参加した。本研究は名古屋工業大学の生命倫理審査委員会にて承諾を得た後に行われた。

被験者は少なくとも2時間前に食事をとり、実験室に来室し、20分間の安静後に実験を開始した。運動はモナーク社製の自転車エルゴメーターを使用し負荷漸増法にて実施された。運動強度は360kpm/min, 720kpm/min, 900kpm/min, 990kpm/minあるいは1080kpm/minであった。運動時間は各負荷5分間、合計20分間とした。実験室温度は26 ± 1℃であった。実験1では1人の被験者が前述した運動を10回行い、大腿直筋皮膚表面の乳酸濃度の測定を行った。実験2は12人の被験者が各負荷5分間、合計20分間の運動を行い大腿直筋皮膚表面の乳酸濃度を測定した。

皮膚表面乳酸濃度測定のためのサンプル採取は大腿直筋の筋腹部位を1%エタノールで数回洗浄しキムワイプできれいに拭き取った後、100 μlの1%エタノール入りのプラスチック容器（直径7.2mm, 高さ6.6mm）を逆さにして皮膚表面に添付し、皮膚と1%エタノールを1分間接触させた。正確に4分経過した後に2回目の安静時の採取を行った。安静時の採取において最初の乳酸値は高い値を示し、2回目以降は安定した値が得られた。安静時は2回測定し2回目の値を安静時の値とした。また採取から採取まで時間は一定間隔（4分間隔）で行った。運動中のサンプルは4-5, 9-10, 14-15, 19-20分、回復期のサンプルは運動後4-5, 9-10, 14-15分（実験1では採取しなかった）に採取された。なおサンプル採取のために運動を6秒間中断した。サンプルは実験中同じ場所から採取した。

乳酸濃度の測定はUV検出器（SPD-20A, Shimadzu, Kyoto, Japan）を使用して高速液体ク

ロマトグラフィーを用いて行った。ポンプはLC-20AD（Shimadzu,）, 記録器はChromatocorder 21（SIC, Tokyo, Japan）, カラムはCAPCELL PAK C18 UG 1205-S（4.6mm × 150mm: Shiseido, Kyoto, Japan）を使用して分析した。移動相は7.3mM リン酸と88mM リン酸二水素ナトリウム混合溶液、測定波長は210nm, 注入量は20 μl, ポンプの送液量は0.5ml/minにて行った。乳酸濃度の定量は検量線を作成しピーク面積から行った。乳酸成分は標準サンプルの吸収スペクトルと保持時間から同定した。

測定結果は平均値と標準誤差で示し、反復測定-分散分析後、Fisher's PLSD法を用いてpost hoc 検定を実施した。有意水準はp<0.05とした。

## 2. 結果

図1は1名の被験者が10回運動を行った際の大腿直筋皮膚表面乳酸濃度の変化を示したものである。720, 900, 1080kpm/minの運動強度および運

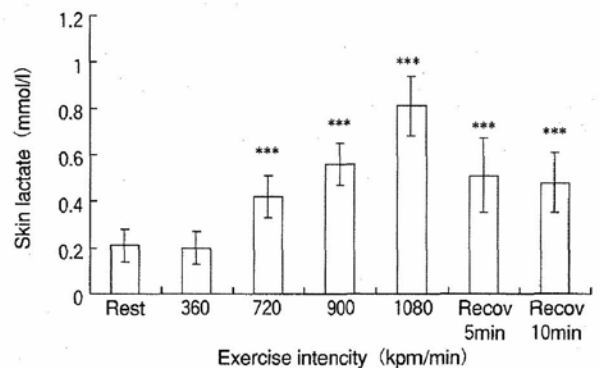


図1 運動に伴う作業筋皮膚表面乳酸濃度の変化（実験1）1名の被験者が10回運動した際の平均値±標準誤差を示した。  
\*\*\* p<0.001 運動前との比較

動後5, 10分後の乳酸濃度は安静時の値に比べ有意に増大した。360kpm/minの運動強度では安静時に比べ有意な増加は認められなかった。図2は12名の被験者における運動前、運動中および運動後の皮膚表面の平均乳酸濃度の結果を示した。乳酸濃度は低・中強度（360と720kpm/min）にお

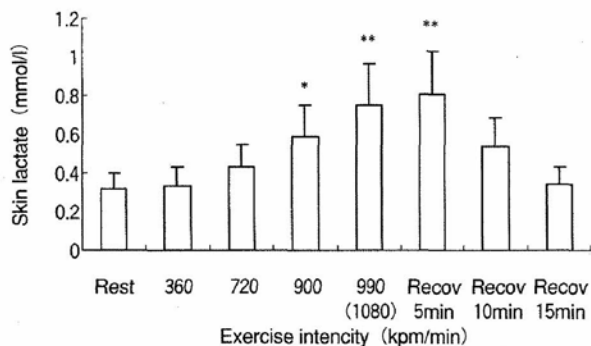


図2 運動に伴う作業筋皮膚表面乳酸濃度の変化(実験2)  
\* p<0.05 運動前との比較, \*\* p<0.01 運動前との比較

いては運動前と有意な変化は認められなかったが、高い運動強度(900, 990あるいは1080kpm/min), および運動後5分では運動前に比べ有意に高い値が認められた。負荷強度の増大に伴い著しく増大する被験者と増加が少ない被験者が認められた。図3は各運動強度における心拍数と皮膚表面乳酸濃度の関係を見たものである。360kpm/min (A),

720kpm/min (B), 900kpm/min (C) および990 (1080) kpm/min (D) の運動負荷での両測定項目間の相関係数はそれぞれ  $r=-0.64$  ( $p<0.05$ ),  $r=-0.73$  ( $p<0.05$ ),  $r=-0.61$  ( $p<0.05$ ),  $r=-0.29$  (n.s.) であり, 360, 720, 900kpm/minの運動負荷強度で有意な負の相関関係が認められた。

### 3. 考察

1名の被験者において自転車作業を10回行った際の大腿直筋皮膚表面の乳酸濃度は作業負荷強度に伴い増大した(図1)。

実験2において, 12名の被験者における大腿直筋皮膚表面の平均乳酸濃度は運動強度に伴い有意に増大した。この結果は実験1と同じ結果であった(図2)。McCullaghら<sup>13)</sup>は長期間にわたる筋収縮は赤筋と白筋線維においてMCT-1が増大することを報告している。そしてMCT-1と乳酸取り込みは強い正の相関関係が見られると報告して

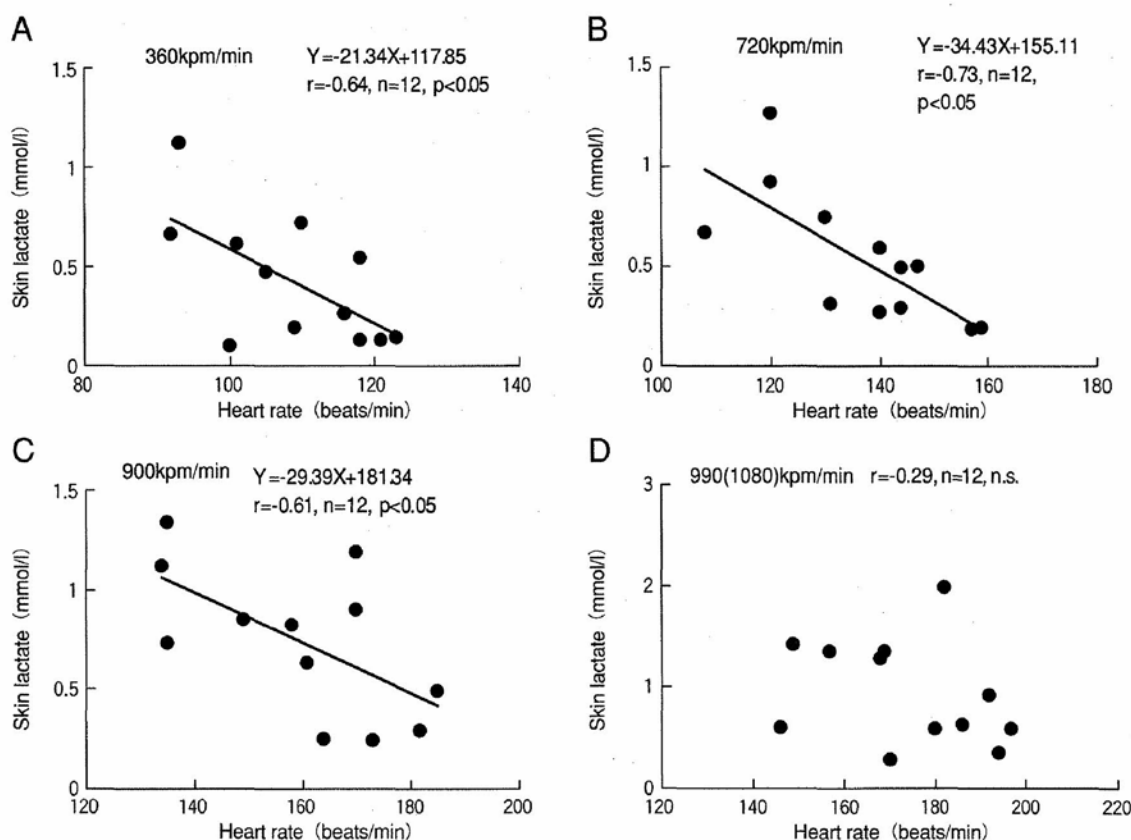


図3 各運動負荷での心拍数と作業筋皮膚表面乳酸濃度の関係(実験2)

いる<sup>12, 13)</sup>。MCT-1は主に筋肉への乳酸の取り込みに関係し、MCT-4は乳酸の筋肉からの排出に関係していると考えられている<sup>6, 7)</sup>。Bonenら<sup>8)</sup>はラットの皮膚にはMCT-1, -2, -4, -7が存在していることを報告している。これらのトランスポーターの存在はラットでの観察であるが、ヒトの皮膚にも存在していることが考えられる。本研究において、自転車作業中の作業筋皮膚表面の乳酸濃度の変化は骨格筋からの乳酸の排出と、皮膚における乳酸の取り込みと関係していることが考えられる。

本研究において、大腿直筋皮膚表面の乳酸濃度は360, 720, 900kpm/minの負荷強度で心拍数と有意な負の相関関係が認められた(図3)。このことから、同一作業強度での作業中において、心拍数が低い被験者は作業筋皮膚表面乳酸濃度は高く、心拍数が高い被験者の乳酸濃度は低いことが明らかになった。

Pilegaardら<sup>19)</sup>は膝伸展運動トレーニングにより大腿直筋のMCT-1とMCT-4は増大したと報告している。さらにヒトを対象に自転車エルゴメーターでの有酸素的トレーニング後、大腿直筋のMCT-1とMCT-4が増大したと報告されている<sup>5, 9)</sup>。動物実験においてもトレッドミルでのランニングトレーニングと長期間の電気刺激によりMCT-1が増大したことが報告されている<sup>2, 13)</sup>。本研究において、一定負荷強度での作業筋皮膚表面乳酸濃度は心拍数と密接に関係していることが明らかとなった(図3)。

#### 4. まとめ

作業筋皮膚表面乳酸濃度は1) 運動強度の増大に伴い有意に増大すること、2) 各運動強度での心拍数と有意な負の相関関係が認められた。これらの結果は皮膚は作業筋で生成された乳酸の取り込みに役立っているものと推察される。

#### 謝 辞

研究助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心から感謝いたします。また本研究実施にあたり多大なご協力を頂きました名古屋工業大学学生諸氏に厚くお礼申し上げます。

#### 文 献

- 1) Ament, W., Huizenga, J.R., Mook, G.A., Gips, C.H., Verkerke, G.F.: Lactate and ammonia concentration in blood and sweat during incremental cycle ergometer exercise, *Int. J. Sports Med.*, 18, 35-39 (1997)
- 2) Baker, S.K., McCullagh, K.J.A., Bonen, A.: Training intensity-dependent and tissue-specific increases in lactate uptake and MCT-1 in heart and muscle, *J. Appl. Physiol.*, 84, 987-994 (1998)
- 3) Bonen, A., McDermott, J.C., Tan, M.H.: Glycogenesis and glyconeogenesis in skeletal muscle: effects of pH and hormones. *Am. J. Physiol.*, 258, E693-E700 (1990)
- 4) Bonen, A., Homonko, D.A.: Effects of exercise and glycogen depletion on glyconeogenesis in muscle. *J. Appl. Physiol.*, 76, 1753-1758 (1994)
- 5) Bonen, A., McCullagh, K.J.A., Putman, C.T., Hultman, E., Jones, N.L.: Heigenhauser, G.J.F.: Short-term training increases human muscle MCT1 and femoral venous lactate in relation to muscle lactate. *Am. J. Physiol.*, 274, E102-E107 (1998)
- 6) Bonen, A., Tonouchi, M., Miskovic, D., Heddle, C., Heikkila, J.J., Halestrap, A.P.: Isoform-specific regulation of the lactate transporters MCT1 and MCT4 by contractile activity. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 279, E1131-E1138 (2000a)
- 7) Bonen, A., Miskovic, D., Tonouchi, M., Lemieux, K., Wilson, M.C., Marette, A., Halestrap, A.P.: Abundance and subcellular distribution of MCT1 and MCT4 in heart and fast-twitch skeletal muscles. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 278, E1067-E1077 (2000b)
- 8) Bonen, A., Heynen, M., Hatta, H.: Distribution of monocarboxylate transporters MCT1-MCT8 in rat

- tissues and human skeletal muscle. *Appl. Physiol. Nutr. Metab.*, 31, 31-39 (2006)
- 9) Dubouchaud, H., Butterfield, G.E., Wolfel, E.E., Bergman, B.C., Brooks, G.A.: Endurance training, expression, and physiology of LDH, MCT1, and MCT4 in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol. Endocrinol. Metab.*, 278, E571-E579 (2000)
  - 10) Fujitsuka, N., Yamamoto, T., Ohkuwa, T., Saito, M., Miyamura, M.: Peak blood lactate after short periods of maximal treadmill running. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 48, 289-296 (1982)
  - 11) Green, J.M., Bishop, P.A., Muir, I.H., Mclester, J.R. Jr., Heath, H.E.: Effects of high and low blood lactate concentrations on sweat lactate response. *Int. J. Sports Med.*, 21, 556-560 (2000)
  - 12) McCullagh, K.J.A., Poole, R.C., Halestrap, A.P., O'Brien, M., Bonen, A.: Role of the lactate transporter (MCT1) in skeletal muscles. *Am. J. Physiol.*, 271, E143-E150 (1996)
  - 13) McCullagh, K.J.A., Poole, R.C., Halestrap, A.P., Tipton, K.F., O'Brien, M., Bonen, A.: Chronic electrical stimulation increases MCT1 and lactate uptake in red and white skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 273, E239-E246 (1997)
  - 14) McDermott, J.C., Bonen, A.: Glyconeogenic and oxidative lactate utilization in skeletal muscle. *Can. J. Physiol. Pharmacol.*, 70, 142-149 (1992)
  - 15) Medbø, J.I.: Glycogen breakdown and lactate accumulation during high-intensity cycling. *Acta Physiol. Scand.*, 149, 85-89 (1993)
  - 16) Ohkuwa, T., Kato, Y., Katsumata, K., Nakao, T., Miyamura, M.: Blood lactate and glycerol after 400-m and 3,000-m runs in sprint and long distance runners. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 53, 213-218 (1984)
  - 17) Pagliassotti, M.J., Donovan, C.M.: Influence of cell heterogeneity on skeletal muscle lactate kinetics. *Am. J. Physiol.*, 258, E625-E634 (1990a)
  - 18) Pagliassotti, M.J., Donovan, C.M.: Role of cell type in net lactate removal by skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 258, E635-E642 (1990b)
  - 19) Pilegaard, H., Domino, K., Noland, T., Juel, C., Hellsten, Y., Halestra, A.P., Bangsbo, J.: Effect of high-intensity exercise training on lactate/H<sup>+</sup> transport capacity in human skeletal muscle. *Am. J. Physiol.*, 276, E255-E261 (1999)
  - 20) Wilson, M.C., Jackson, V.N., Heddle, C., Price, N.T., Pilegaard, H., Juel, C., Bonen, A., Montgomery, I., Hutter, O.F., Halestrap, A.P.: Lactic acid efflux from white skeletal muscle is catalyzed by the monocarboxylate transporter isoform MCT3. *J. Biol. Chem.*, 273, 15920-15926 (1998)