

運動時の筋エネルギー代謝における性差

稲木 光晴・高橋 英幸*・久野 譜也**・勝田 茂

Sex difference of muscle energy metabolism during exercise

INAKI Mitsuharu, TAKAHASHI Hideyuki*,
KUNO Shin-ya**, KATSUTA Shigeru

The purpose of this study was to investigate sex difference of muscle energy metabolism during exercise. Five males and five females, who didn't perform any type of physical training, were took part in this study. They performed leg-elevating exercise with increment of elevating-frequency in supine position. We measured muscle energy metabolism during exercise by ^{31}P MRS. The Pi/PCr at the same relative exercise intensity was lower in female than in male. Whereas increase of intramuscular H^+ concentration during exercise was higher in female than in male. As a consequence, slope of increase in intracellular H^+ with Pi/PCr was higher in female than in male. These results suggest that sex difference is recognized in the rate of H^+ accumulation related to Pi/PCr in muscle during leg-elevating exercise.

Key words : sex difference, muscle energy metabolism, ^{31}P MRS

緒言

これまで、骨格筋特性における性差については数多くの報告がなされてきた^{1,7,10}。Greenら⁷は、男性は解糖系の酵素活性と糖原分解に関与する酵素の活性値が女性よりも高いことを認め、男性はグリコーゲンの無氣的分解と解糖能力に優れることを報告している。

乳酸蓄積を伴う高強度の無酸素運動のパフォーマンスは、筋の解糖能力だけでなく緩衝能力（乳酸蓄積に伴う細胞内 pH の低下を抑制する能力）にも大きく依存する¹³。生体に存在する緩衝系には、大きく分けて重炭酸系と非重炭酸系とがあるが、女性は非重炭酸系の重要な緩衝物質であるカルノシン濃度が男性より有意に低いことが報告されてきている¹²。このことは、女性において無酸素性パフォーマンスが低いことの一要因となっていると考えられる。

また最近、Glenmarkら⁶は、加齢によって男性では速筋線維の割合が、女性では遅筋線維の割合が増加する傾向にあることを報告している。速筋線維の割合とカルノシン濃度との間に正の相関関係がある¹³ことから、このような女性における加齢に伴う遅筋化は、筋の非重炭酸系の緩衝能力の低下をもたらす可能性があると考えられる。以上のことから、女性は男性に比べて、筋肉中の水素イオン (H^+) の蓄積速度が大きいと推察される。しかしながら、このことについては明らかにされていない。

そこで本研究においては、運動にともなう筋肉中のリン化合物および pH の変化を非侵襲的に、しかも連続して観察することのできるリンの磁気共鳴分光法 (^{31}P MRS) を用いて、運動時の高エネルギーリン酸と H^+ 濃度の変化に性差が認められるか否かについて検討した。

* 筑波大学医学研究科

Doctoral Program in Medical Science, University of Tsukuba

** 東京大学教養学部・体育科

Department of Sports Sciences, College of Arts and Sciences, University of Tokyo

方法

a 被検者

被検者は健康な一般成人男性5名と女性5名であり、定期的なトレーニングは全く行っていなかった。表1には被検者の身体特性を示した。

b 運動プロトコル

被検者は、筑波大学附属病院に設置されている超電導MR装置 (Signa, GE社製1.5T) 内において、頻度漸増法による右脚の膝伸展挙上運動を行った (図1)。頻度は最初35回/分から開始し、その後疲労困憊に至るまで毎分5回ずつ漸増した。なおその際に、男性には1kg, 女性には0.5kgの重りを右足首に固定した。

male: 1.0 kg weight
female: 0.5 kg weight

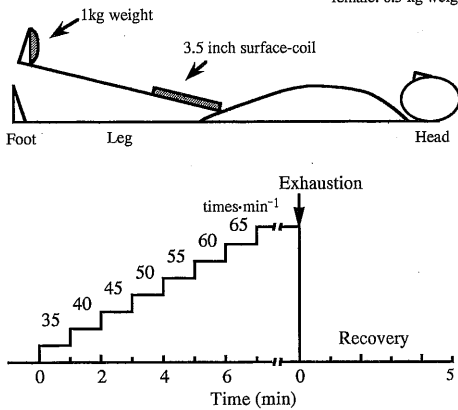


Fig. 1 Exercise protocol in this study.

c ³¹P MRS の測定

最適なリンのスペクトルを得るためのシミング調整をするために、被検者は仰臥位でプロトン (¹H) 用サーフェイスクoilを右大腿直筋上に固定された。シミング完了後直ちにリン (³¹P) 用サーフェイスクoilを同じ位置に固定し、³¹P MRSの測定を行った。用いられた繰り返し時間は3秒であり、一つのスペクトルを得るために4回の積算を行った。なお、データ採取には約40秒を要した。

得られたスペクトルより、クレアチンリン酸 (PCr) と無機リン酸 (Pi) のピークを同定し、PCr に対する Pi のケミカルシフト値 (σ) から以下の式に従い細胞内 pH を算出し、水素イオン (H⁺) 濃度に換算した。

$$pH = 6.75 + \log [(\sigma - 3.27) / (5.69 - \sigma)]$$

また、PCr と Pi について、パーソナルコンピュータ (シャープ社製, MZ-80B) に接続したデジタルイザ (グラフテック社製, MITABLET-II) を用いてそれぞれの面積を測定し、Pi / PCr を算出した。

d 統計処理

数値を平均±標準偏差で示し、男女間の平均値の有意差検定には、unpaired t-test を用いた。なお、有意水準は P < 0.05 とした。

結果

図2は、運動強度の増加に伴う Pi / PCr の変化を示している。男女において運動時間が異なっていたので (男性 ; 8.5 ± 2.6分, 女性 ; 4.0 ± 0.7分, P < 0.01), 横軸は運動終了時の挙上頻度を100%とした相対値で表している。男女のいずれにおいても、運動強度の増加に伴って、Pi / PCr は増加したが、同一の相対強度において女性では男性より低い Pi / PCr を示す傾向にあった。運動終了時の Pi / PCr は、男性 (0.46 ± 0.19) より女性 (0.32 ± 0.10) において低値を示す傾向にあったが、統計的に有意ではなかった (図3)。

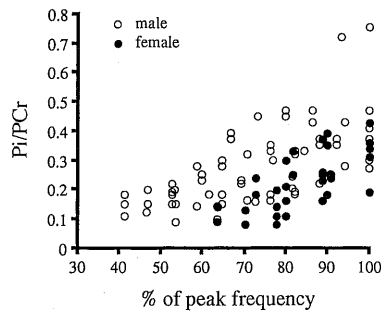


Fig. 2 Change of Pi/PCr during exercise. x-axis is relative exercise intensity, which expressed as percentage of peak frequency.

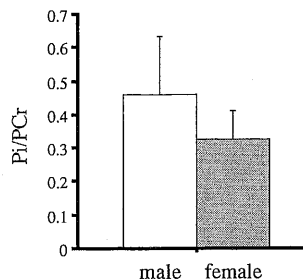


Fig. 3 Comparison of Pi/PCr at exhaustion between male and female.

図4は、運動強度の増加に伴う筋肉中のH⁺濃度の変化を示している。男女のいずれにおいても、運動強度の増加に伴って筋肉中のH⁺濃度は増加したが、その増加の程度は男性より女性において大きい傾向にあった。運動終了時の筋肉中のH⁺濃度は男性において122.0±3.5 nmol、女性において151.0±22.1 nmolであり、女性では男性より有意に高値であった(図5)。

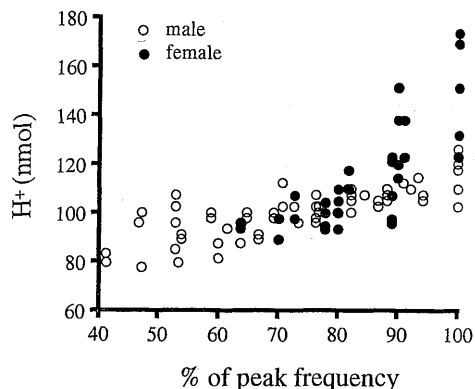


Fig. 4 Change of H⁺ concentration during exercise. x-axis is relative exercise intensity, which expressed as percentage of peak frequency.

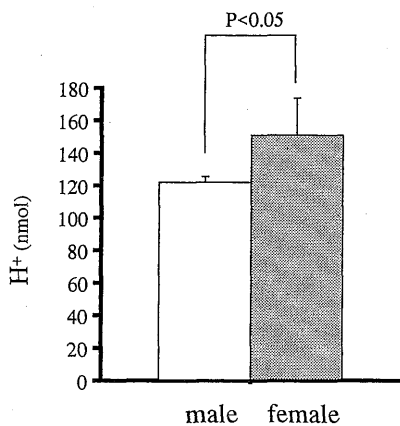


Fig. 5 Comparison of H⁺ concentration at exhaustion between male and female.

図6は筋肉中のPi/PCrとH⁺濃度との関係を被検者別に示している。すべての被検者において、Pi/PCrとH⁺濃度は有意な直線関係にあり、その傾きには大きな個人差が認められた。この傾き

を男女それぞれで平均すると、男性では101.0±31.7、女性では235.8±72.0となり、女性では男性より有意に高値を示した(図7)。

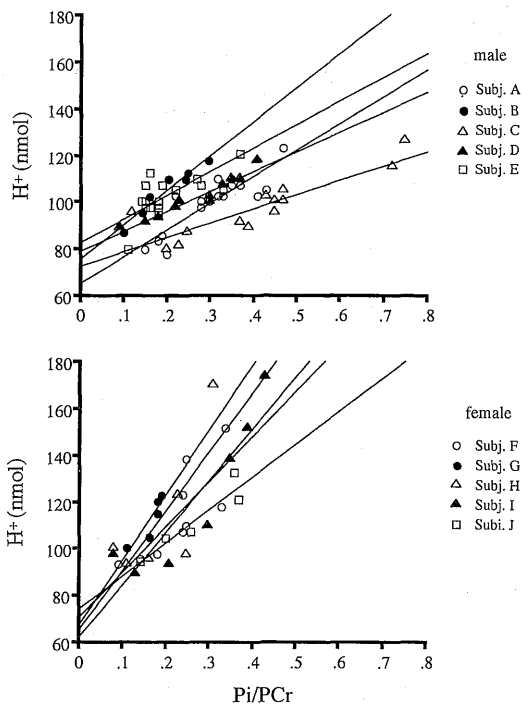


Fig. 6 Relationship between Pi/PCr and H⁺ in male and female.

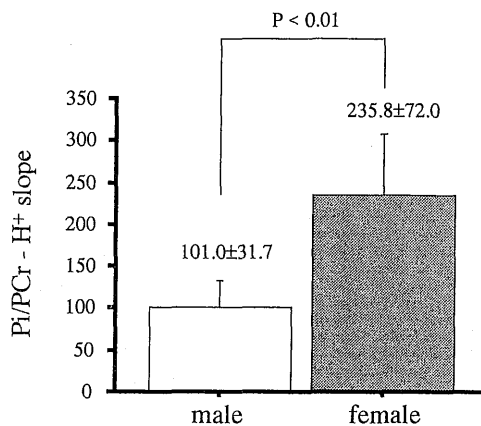


Fig. 7 Comparison of Pi/PCr-H⁺ slope between male and female.

考 察

本研究において、同一の相対強度における筋肉中の Pi/PCr は男性より女性において低値を示す傾向にあった。運動強度の増加に伴う Pi/PCr の増加がアデノシン二リン酸 (ADP) あるいは無機リン酸 (Pi) の増加を反映している²⁾と考えられるので、この結果は、同一の相対運動強度での筋における ADP あるいは Pi の蓄積が女性より男性において大きい可能性のあることを示唆している。この原因については明らかではないが、ひとつの可能性として、アデノシン三リン酸 (ATP) の分解酵素である ATPase 活性が男女で異なっていることが考えられる。事実、Komi と Karlsson¹⁰⁾ は Ca²⁺ 依存性の ATPase 活性が女性より男性において高いことを報告している。

運動中、活動筋で生じた ADP と Pi は、グリコーゲンの分解酵素であるホスホリラーゼや解糖系の律速酵素であるホスホフルクトキナーゼを活性化させることによって、無酸素的代謝を亢進させることが知られている⁴⁾。したがって、運動による筋肉中の ADP あるいは Pi の増加が大きくなればなるほど、活動筋中の無酸素的代謝の亢進は大きく、結果として生成される乳酸 (すなわち H⁺) は多くなると考えられる。しかしながら、本研究においては、運動による筋肉中の Pi/PCr の増大は男性より女性において小さい傾向にあったにもかかわらず、筋肉中の H⁺ 濃度の増加は女性で大きい傾向にあり、運動終了時の筋肉中の H⁺ 濃度は男性より有意に高値であった。この原因については、本研究で明らかにすることはできないが、ふたつの可能性が考えられる。ひとつは活動筋における乳酸の蓄積量が男女で異なる可能性、もうひとつは筋の緩衝能力が男女で異なる可能性である。

運動による筋肉中の乳酸の蓄積量は、乳酸の生成速度と筋肉からの乳酸の除去速度によって決定され、前者が後者を上回ると筋肉中に乳酸が蓄積する。本研究において女性は男性より運動による筋肉中の Pi/PCr の増加が小さい傾向にあったこと、また先行研究において女性では男性より筋肉中の解糖系酵素活性が低いと報告されている⁷⁾ ことから、女性では男性より運動中の筋肉による乳酸生成速度は遅いと考えられる。一方、筋肉からの乳酸の除去速度は、毛細血管密度が高いほど速いことが報告されている¹⁴⁾ が、本研究において筋肉の毛細血管密度が男性と女性で異なるか否か

については明らかではない。しかしながら、先行研究において、定期的な持久性トレーニングを行っていない男性と女性において、筋肉の毛細血管密度は同等であることが報告されていることから^{8,15)}、本研究において毛細血管密度に有意な性差があるとは考えにくい。したがって、運動中の筋肉における乳酸の蓄積量は男性より女性において少なかった可能性が高いと考えられる。これらのことから、女性において認められたより大きな H⁺ の増加は、乳酸蓄積量の違いによって説明することができないと思われる。

筋肉の緩衝系は HCO₃⁻系と非 HCO₃⁻系とに大別できる。HCO₃⁻緩衝作用は H⁺ + HCO₃⁻ ⇌ H₂O + CO₂ の反応によって CO₂ を生成するため、もし CO₂ が効率良く筋肉から排出されなければ、この系の緩衝効率は低下する。実際、動的運動に比べて血流の途絶が生じやすい等尺性運動においては、一定の乳酸蓄積に対する筋肉中の pH の低下が大きいとされている⁹⁾。このことから、毛細血管の発達の違いは筋肉からの CO₂ 排出に影響を及ぼし、結果として HCO₃⁻系の緩衝効率を左右すると考えられる。しかしながら、本研究では筋肉の毛細血管密度に性差はないと考えられるので、HCO₃⁻系の緩衝効率は男女で同等であると推察される。

非 HCO₃⁻系の緩衝作用は緩衝物質 (A⁻) と H⁺ との化学反応 (A⁻ + H⁺ → AH) であるため、筋肉中の緩衝物質濃度が非常に重要となってくる。最近、筋肉の緩衝物質のひとつであるジペプチドカルノシンの濃度が、男性より女性において低いことが報告されてきている¹²⁾。このことは、女性が男性より非 HCO₃⁻系の緩衝能力で劣っている可能性を示している。これらのことから考えると、本研究において、運動による筋肉中の Pi/PCr の増加が男性より女性で小さい傾向にあったにもかかわらず、筋肉の H⁺ 濃度の上昇が有意に大きかった原因としては、筋の緩衝能力が男性より女性で小さかった可能性が考えられる。

本研究においては、女性の測定について性周期を考慮していなかったため、女性のデータに対して性周期の影響がどの程度あったかについては明らかではない。しかしながら、月経周期は活動筋における無酸素性代謝を反映する血中乳酸濃度に有意な影響を及ぼさないとする報告が多いことから^{2,5,11)}、本研究の測定項目に対する月経周期の

影響はほとんどないと考えられる。

まとめ

本研究においては、運動時の筋肉中のリン化合物および H^+ 濃度の変化に性差が認められるか否かを明らかにするために、頻度漸増運動時の両者の変化を ^{31}P MRSを用いて観察した。

結果の要約は以下の通りである。

1) 同一の相対運動強度における Pi/PCr は、女性が男性より低値を示す傾向にありその増加量は女性において小さい傾向が認められた。

2) 運動強度の増加に伴う H^+ の増加は、男性より女性において大きい傾向にあった。

3) Pi/PCr と H^+ との間には、すべての被検者で有意な相関関係が認められたが、 Pi/PCr の増加に対する H^+ の増加の傾きは、男性より女性において有意に高値を示した。

これらの結果は、頻度漸増法による脚伸展挙上運動時における筋肉中のリン化合物の変化および H^+ 濃度の変化に性差があり、男性より女性で筋肉における H^+ の蓄積速度が大きい可能性のあることを示唆している。

参考文献

- 1) Bass A, Vondra K, Rath R, and Vitek V (1975) : M. quadriceps femoris of man, a muscle with an unusual enzyme activity pattern of energy supplying metabolism in mammals. *Pflügers Arch* 354 : 249-255.
- 2) Bonen A, Belcastro AN, Ling WY, and Simpson AA (1981) : Profiles of selected hormones during menstrual cycles of teenage athletes. *J Appl Physiol* 50 : 545-551.
- 3) Chance B, Leigh J, Clark BJ, Maris J, Kent J, Nioka S, and Smith D (1985) : Control of oxidative metabolism and oxygen delivery in human skeletal muscle : A steady-state analysis of the work/energy cost transfer function. *Proc Natl Acad Sci USA* 82 : 8381-8388.
- 4) Chasiotis D, Sahlin K, and Hultman E (1982) : Regulation of glycogenolysis in human skeletal muscle at rest and during exercise. *J Appl Physiol* 53 : 708-715.
- 5) Eston R, and Burke EJ (1984) : Effects of the menstrual cycle on selected responses to short constant-load exercise. *J Sports Sci* 2 : 145-153.
- 6) Glenmark B, Hedberg G, and Jansson E (1992) : Changes in muscle fibre type from adolescence to adulthood in women and men. *Acta Physiol Scand* 146 : 251-259.
- 7) Green HJ, Foster IG, and Ranny DA (1984) : Male and female difference in enzyme activities of energy metabolism in vastus lateralis muscle. *J Neurol Sci* 65 : 323-331.
- 8) Hoppeler H, Howald H, Conley K, Lindstedt SL, Claassen H, Vock P, and Weibel ER (1985) : Endurance training in humans : aerobic capacity and structure of skeletal muscle. *J Appl Physiol* 59 : 320-327.
- 9) Hultman E, and Sahlin K (1980) : Acid-base balance during exercise. In Hutton RS and Miller DI (eds) *Exercise and Sport Sciences Reviews* 8 : pp. 41-128.
- 10) Komi PV and Karlsson J (1978) : Skeletal muscle fiber types, enzyme activities and physical performance in young males and females. *Acta Physiol Scand* 103 : 210-218.
- 11) Lamont LS (1986) : Lack of influence of the menstrual cycle on blood lactate. *Physician and Sportsmedicine* 14 : 159-163.
- 12) Mannion AF, Jakeman PM, Dunnett M, Harris RC, and Willan PLT (1992) : Carnosine and anserine concentrations in the quadriceps femoris muscle of healthy humans. *Eur J Appl Physiol* 64 : 47-50.
- 13) Parkhouse WS, and McKenzie DC (1984) : Possible contribution of skeletal muscle buffers to enhanced anaerobic performance : a brief review. *Med Sci Sports Exerc* 16 : 328-338.
- 14) Tesch PA, and Wright JE (1983) : Recovery from short intensity exercise : its relation to capillary supply and blood lactate concentration. *Eur J Appl Physiol* 52 : 98-103.
- 15) Zumstein A, Mathieu O, Howald H, and Hoppeler H (1983) : Morphometric analysis of the capillary supply in skeletal muscles of trained and untrained subjects-Its limitations in muscle biopsies. *Pflügers Arch* 397 : 277-283.