

1. 緒言

骨格筋は、収縮することによって力を発生し、外部に仕事を行う。この時、代謝によってエネルギー物質である ATP が消費される。しかしながら、ATP の持つ化学エネルギーが骨格筋の発生する力学的エネルギーへの変換効率に対する筋収縮速度や筋負荷の違いは十分に理解されていない。そこで本研究では、骨格筋の代謝・収縮の数値シミュレーションを行い、筋負荷の違いによる筋収縮速度、ATP 消費速度および仕事率の変化を検討した。

2. 解析方法

本解析では、骨格筋の単収縮時における代謝、力の発生および筋収縮速度を推算する解析モデルを用いた<sup>1)</sup>。代謝過程における反応スキームを図1に示し、この反応スキームは、ATP が線維性タンパク質である A・M(アクトミオシン)に結合し、ADP(アデノシン二リン酸)と Pi に分解されるまでの過程を考慮している。この反応スキーム中の各化学種の濃度変化に対する連立常微分方程式を解くことにより、各化学種濃度の時間変化を求める。得られた濃度より骨格筋の筋負荷  $F[\text{kN/m}^2]$  を式(1)より求める。

$$F = c([A \cdot M \cdot ADPP] + [A \cdot M \cdot ADP] + 0.1[A \cdot M]) \quad (1)$$

ここで、 $c$  は比例定数を表す。筋収縮速度  $V[\text{m/s}]$  は、式(2)の Hill の方程式より算出する。

$$F/F_0 = a(V_{max} - V)/(V + b) \quad (2)$$

ここで、 $F_0$  は最大筋収縮力  $[\text{kN/m}^2]$ 、 $V_{max}$  は最大筋収縮速度  $[\text{m/s}]$ 、 $a$  は熱定数、 $b$  はエネルギー遊離速度定数  $[\text{m/s}]$  を表す。仕事率  $P[\text{W}]$  は、式(3)より算出する。

$$P = FV \quad (3)$$

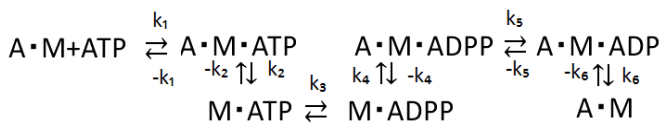


図1 代謝反応スキーム

表1 反応速度定数

$k_1$	$10^6 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	$k_1$	$10 \text{s}^{-1}$
$k_2$	$10^5 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	$k_2$	$10^{-2} \text{s}^{-1}$
$k_3$	$10 \text{s}^{-1}$	$k_3$	$8.3 \text{s}^{-1}$
$k_4$	$10^5 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	$k_4$	$4.7 \times 10^5 \text{s}^{-1}$
$k_5$	$10^2 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$	$k_5$	$10^3 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$
$k_6$	$4 \text{s}^{-1}$	$k_6$	$10^3 \text{M}^{-1} \text{s}^{-1}$

解析条件として、人間の骨格筋 1kg あたりに含まれている ATP 濃度を初期濃度 6mM とした。また、筋負荷を変えるため A・M の初期濃度を 0.1mM から 0.8mM まで 0.1mM ごとに変化させた。

3. 解析結果および考察

筋負荷と筋収縮速度に対する A・M 濃度の影響を図2に示す。A・M 濃度が高くなるにつれ筋負荷が増加し、速度が低下する。

ATP 消費速度に対する A・M 濃度の影響を図3に示す。A・M が高くなるにつれ ATP 消費速度の値が増加する。

仕事率に対する筋負荷の影響を図4に示す。仕事率は、最大筋収縮力の約 1/3 の筋負荷で最大値となった。これは、参考文献の値と同じ結果となった。

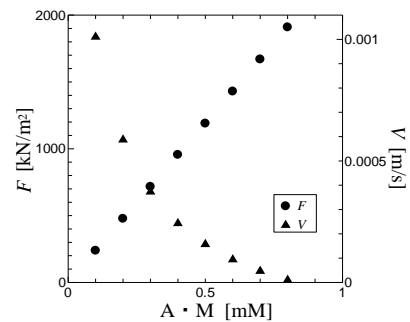


図2 筋収縮力および収縮速度に対する A・M 濃度の影響

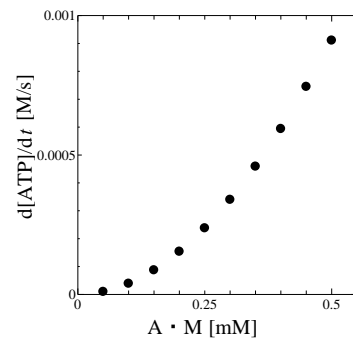


図3 ATP 消費速度と A・M 濃度の関係

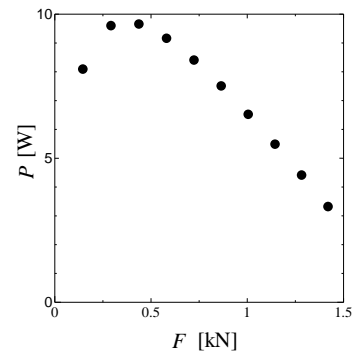


図4 仕事率および変換効率に対する筋負荷の影響

文献

(1) Zhen-He He et al., "ATP Consumption and Efficiency of Human Single Muscle Fiber with Different Myosin Isoform Composition" Biophysical Journal Volume 79, pp.945-961(2000)