

1. はじめに

骨格筋は収縮することによって力を発生し、外部に仕事をを行う。この時、代謝によってエネルギー物質である ATP (アデノシン三リン酸) 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線維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、筋線維の違いによる筋収縮速度、ATP 消費速度、筋負荷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¹⁾。代謝過程における反応スキームを図 1 に示す。この反応スキームは ATP が線維性のタンパク質である A・M (アクチン) に結合し、ADP (アデノシン二リン酸) と Pi (リン酸) に分解されるまでの 6 つの反応過程を考慮している。この反応スキーム内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、化学種濃度の時間変化を求める。遅筋線維における各化学過程の反応速度定数を表 1 に示す。

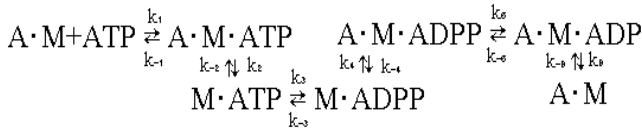


図 1 代謝反応スキーム

表.1 遅筋線維の反応速度定数

k_1	$10^6 M^{-1} s^{-1}$	k_{-1}	$10 s^{-1}$
k_2	$10^5 M^{-1} s^{-1}$	k_{-2}	$10^{-2} s^{-1}$
k_3	$3 s^{-1}$	k_{-3}	$2.5 s^{-1}$
k_4	$10^5 M^{-1} s^{-1}$	k_{-4}	$4.7 \times 10^5 s^{-1}$
k_5	$10^2 s^{-1}$	k_{-5}	$10^3 M^{-1} s^{-1}$
k_6	$4 s^{-1}$	k_{-6}	$10^3 M^{-1} s^{-1}$

速筋線維では、表 1 の k_3 , k_{-3} の値をそれぞれ $k_3=10s^{-1}$, $k_{-3}=8.3s^{-1}$ に変更して解析を行った。

スキーム 1 を解くことによって得られた各物質の濃度を用いて、骨格筋の負荷 $F[kN/m^2]$ を式(1)で求める。

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

ここで c は比例定数を表す。

収縮速度 $V[m/s]$ は式(2)の Hill の方程式で求める。

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

ここで F_0 は最大収縮力 $[kN/m^2]$, V は収縮速度 $[m/s]$, V_{max} は最大収縮速度 $[m/s]$, a は熱定数、 b はエネルギー遊離速度定数 $[m/s]$ を表す。

仕事率 $P[W]$ は式(3)を解くことによって得られる。

$$P = F \times V \quad (3)$$

解析条件として、人間の骨格筋 1kg あたりに含まれる ATP 初期濃度を 6mM とした。また筋負荷を変えるために $A \cdot M$ を 0.1 から 0.83mM まで変化させた²⁾。

3. 解析結果および考察

図 2 に筋収縮速度と ATP 消費速度の関係を示す。遅筋線維、速筋線維ともに筋収縮速度に比例して ATP 消費速度は増加する。また、速筋線維の方が ATP 消費速度の値が大きい結果となった。

図 3 は筋収縮速度と仕事率の関係を示す。図 2 と同様、遅筋線維と速筋線維の筋線維種類の違いで大きく異なる結果が得られた。遅筋、速筋線維ともに約 1/2 倍の筋収縮速度にて仕事率は最大値を示している。これは既往の実験結果³⁾と一致している。

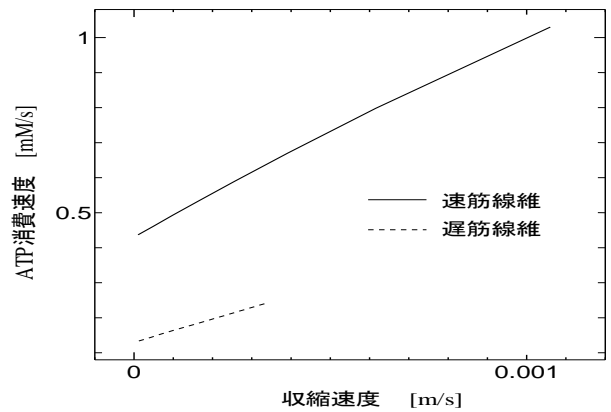


図 2 筋収縮速度と ATP 消費速度の関係

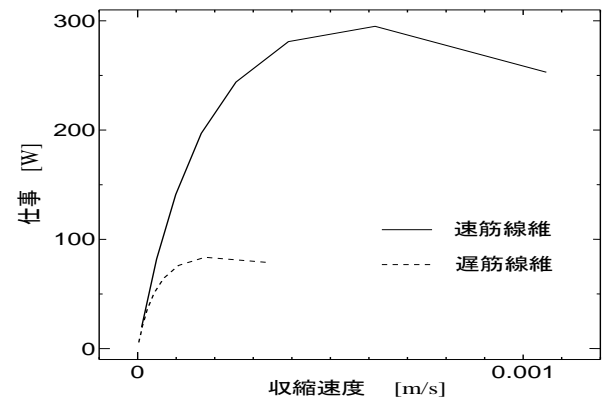


図 3 筋収縮速度と仕事率の関係

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)
- 2) 香川靖雄, エネルギーの生産と運動、分子生物化学 7、1990
- 3) 金子公有, パワーアップの科学, 1988