

発育過程における筋力増加に関する研究

東京慈恵会医科大学 馬 詰 良 樹
(共同研究者) 同 小野寺 昇
愛知教育大学 春日 規 克

A Study on Muscular Force During Growth

by

Yoshiki Umazume, Shō Onodera
The Jikei University School of Medicine
Department of Physiology
Norikatsu Kasuga
Aichi University of Education

ABSTRACT

Variation of the length of skeletal muscle fibers and sarcomere lengths were investigated in extensor digitorum longus (EDL) and soleus (SOL) muscles in mice (ICR) during postnatal growth in the range from 2 to 12 weeks after the birth. Lengths of fiber were measured under the dissecting microscope. For measuring sarcomere lengths, laser diffraction technique was used. For measuring lattice spacing, X-ray diffraction technique was used. Following results were obtained;

- (1) Muscle fiber length increased rapidly up to 8 and 5 weeks in EDL and SOL, respectively.
- (2) Relative fiber lengths at 12 weeks against 2 weeks were 1.30 in EDL, and 1.32 in SOL.
- (3) Sarcomere lengths at both ends of the fiber showed no significant change during growth.
- (4) On the other hand, sarcomere lengths at mid point showed maximum values at 8 and 5 weeks in EDL and SOL respectively. These observations suggest that the sarcomere are stretched especially at mid point when lengths of muscle fibers increase rapidly. It would be possible to

consider that this change of the sarcomere length during postnatal growth affect the contractile properties of muscles.

1. 緒 言

筋収縮の基本過程は、筋線維内のミオシンフィラメントとアクチンフィラメントがカルシウムイオン (Ca^{2+}) 存在下に ATP 分解を伴った滑りの力を発生することである。この機構は、ミオシンフィラメントとアクチンフィラメントの間にクロスブリッジと呼ばれるミオシン分子の一部が形成され、これが力学的変化をすることによって考えられている。2つのフィラメントの重なり合いの量やフィラメント間の距離は、クロスブリッジの発生力を決定する因子になる。

生後発育に伴い筋力は増大する。この筋力の決定因子としては、運動神経線維の放電パターンなどの神経由来のもの¹⁾と、骨格筋自体の形態などに由来するものに大別できる。この筋由来の因子としては、筋節長などの長軸方向の形態や、筋断面積などの幅方向のそれが考えられる。また、筋組成による収縮時間、張力などの機能的因子も重要であろう。本報告では、筋力の決定因子のうち、長軸方向のものとして筋節長を、また、幅方向のそれとしてフィラメント間距離に着目し、これらが発育期における筋力増加の因子になりうるかどうかを検討した。

2. 方 法

1) 筋節長の測定

実験材料には ICR 系の雄マウスを用いた。生後2週齢から12週齢まで一週齢ごとに各5匹を実験に用いた。被験筋には、速筋の代表として長趾伸筋 (EDL) を、遅筋の代表としてヒラメ筋 (SOL) を選んだ。固型飼料は CA-1 (日本クレア) を用い、水とともに自由摂取の状態で飼育し

た。

体重の測定後屠殺、大腿骨上部からの両脚を切断し、ただちにロック液中で、EDL と SOL を傷つけぬよう残し、他の筋をすべて除去した。その後、膝および足関節角度を90度になるよう固定し、2.5%グルタルアルデヒドを含むロック液中に2時間浸漬し、室温 (19~20°C) で固定した。次に単一筋線維を分離した。また、SOL では筋中央部の EDL では第3足指に終止する筋線維を選んだ。この筋線維長を実体顕微鏡下で測定した後、筋線維の中樞側端と末梢側端および筋線維の四等分点の計5点において筋節長の測定を行った。筋節長の測定は He-Ne レーザによる光回折法によった²⁾。

2) X線回折法

骨格筋の横断面は図1のように、ミオシンとアクチンフィラメントが正方六方格子を形成している³⁾。骨格筋に X-線を入射させると、この格子構造に由来して赤道方向に回折像が観察される^{4,5)} (図2)。

これらの反射のうち、1, 0 反射は図1の1, 0 面に対応し、この回折角より1, 0 格子面間隔を決定することができる。また、子午線上には、ミオシンフィラメントのクロスブリッジに由来する子午反射と呼ばれるものと、クロスブリッジがミオシンフィラメントの長軸上にラセン配列をしていることに由来する層線と呼ばれるものが観察される⁵⁾ (図3)。

本報告では、マウスの長趾伸筋を対象として1, 0 面間隔を求めた。

X線源には回転対陰極型発生装置 (RU-200, 定格焦点面積 $0.1 \times 1\text{mm}^2$, 理学電気) を用いた。チューブ電流は 30mA, 電圧 40kV であった。

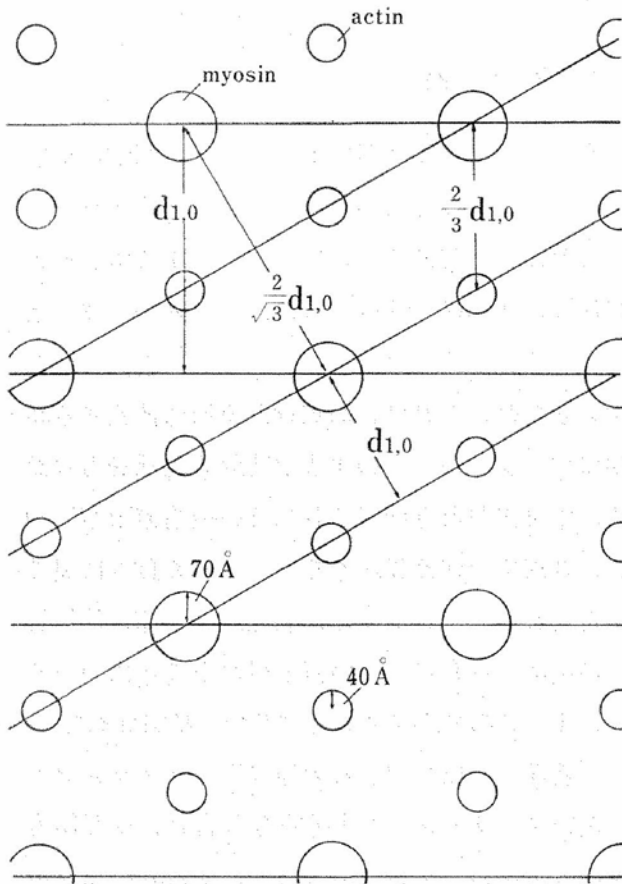


図1 骨格筋フィラメントが形成する
正方六角格子の模式図

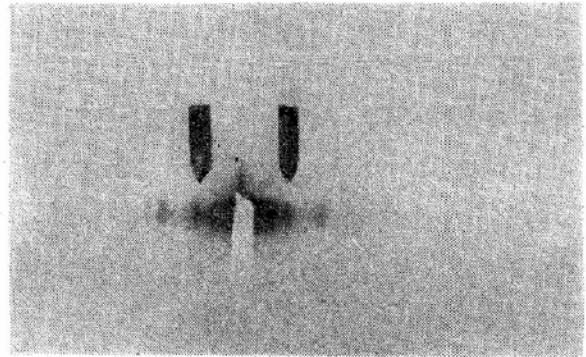
筋肉は垂直にスリットの直後に置き、標本とフィルムの距離は 300mm とした。フィルムにはコダック X 線フィルム DEF-5 を用い、露出時間は約 20 分とした。

3. 結 果

1) 筋 長

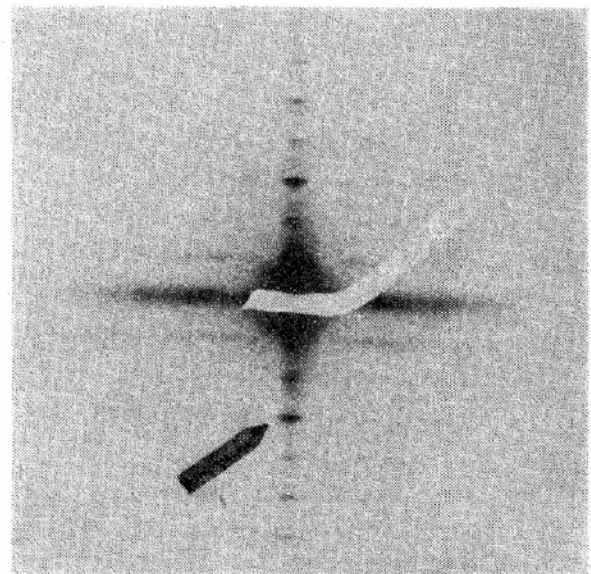
図 4 に、生後発育時の EDL および SOL の筋線維長を示した。

EDL の筋長と筋線維長は 8 週齢付近まで高い増加率を示し、その後若干の変動はみられたが、大きな増加はみられなかった。2 週齢時の値に対する 12 週齢時の増加率は、筋線維長では約 130 % であった。SOL の筋線維長の急速な増加が停止する時期は EDL より早く、5 週齢付近であり、12 週齢までの増加率では、筋線維長では約 132 %



矢印は 1,0 面からの反射

図2 骨格筋の赤道反射



矢印は、クロスブリッジ由来と考えられる
143\text{ \AA} の反射

子午線の両側にみえる細長い反射は層線反射

図3 骨格筋の子午線反射

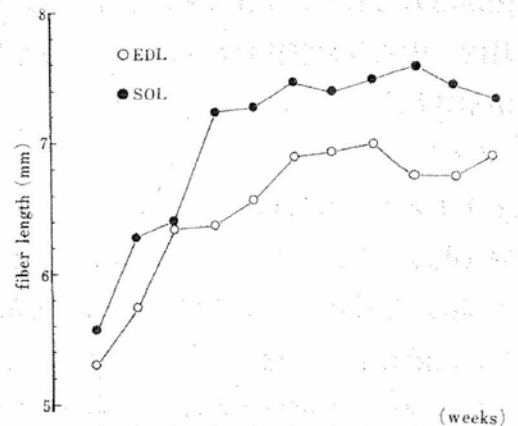


図4 生後発育と筋線維長の関係

であった。

2) 筋 節 長

EDL および SOL の筋節長の変化は、筋端部より中央部の方が大きかった。統計的処理を行うと、EDL では8週齢付近で、SOL では5週齢付近で、中央部の筋節長が両端に比して長いことが観察された。そこで、両筋の両側端の平均筋節長に対する中間部の筋節長の比を求めた (図5)。

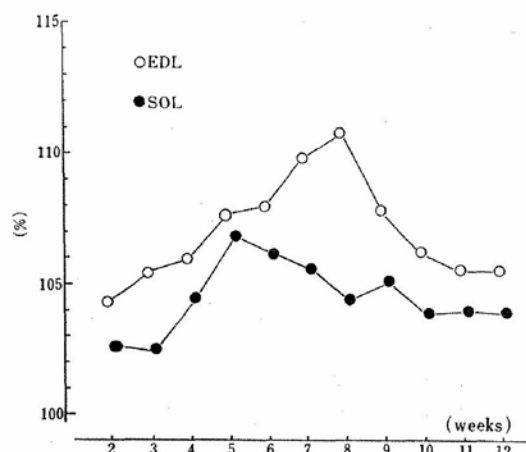


図5 生後発育における筋節長の変化
両端の筋節長に対する中央部の
筋節長の割合 (%)

EDL は8週齢を、SOL は5週齢をピークに、その前後において順次増加、減少がみられた。また、EDL では2週齢と5, 6, 7, 8, 9週齢間に、12週齢と5, 6, 7, 8, 9週齢間に、SOL では2週齢と5, 6, 7週齢間、12週齢と5, 6週齢間に有意差が認められた。すなわち、発育過程において一時的に中央部の筋節長が両端に比し長くなることが示された。

3) フィラメント間距離

フィラメント間距離の代表として、1, 0面格子間隔 ($d_{1,0}$) を測定した。2, 5, 8, 12週齢について $d_{1,0}$ を求めたが、これらは、 $352 \pm 5.5 \text{ \AA}$ であり、週齢による有意の差はみられなかった。本年度は本測定法の確定に重点がおかれた (方法参照)。まだ各週齢における多くのデータが集積されていないので、詳細は今後の発展を待た

い。

4. 考 察

今回の結果で特に興味深いことは、測定部位別に筋節長を比較した場合に、発育に伴う変化が認められたことである。特に筋端に対する中間部の筋節長の比率に、筋線維長の急速な増加に伴い増大がみられ、筋線維長が一定になった後、低下が認められた。これは、筋線維が急速に伸長する時期には、新しい筋節の生成が時間的遅延をもつため、中央部が引き伸ばされ、その後筋節数が増加し、各部位の筋節長がある程度一定の長さに戻ると考えれば理解しやすい。筋線維中央部の筋節長が筋端部より有意に短い値を得たことについては、多くの報告があるように⁶⁻⁸⁾、筋線維端で新しい筋節が生成され、この際に細いフィラメントと太いフィラメントが十分重なり合い、相互作用を保った状態が必要であること、機械的に筋を引き伸ばした場合には、筋端の筋節長の変化が中央部より少ない⁹⁾ こと、などの知見と矛盾しない結果である。

以上のように、骨格筋の縦方向の構造は、発育期に均一な状態を保ち全体が伸長するのではないと考えられる。発育期において中央部筋節長が増す時期には、発揮張力に大きな影響を与えるのみならず、この筋節長の不均一による各筋節の発揮張力の差異は筋に不可逆的崩壊を生じさせる可能性も考えられる。

稿を終るにあたり、本研究に御援助いただきましたデサントスポーツ科学振興財団に深謝いたします。

文 献

- 1) 矢部京之助；人体筋出力の生理的限界と心理的限界，5章 筋出力の神経支配と疲労についての検討，杏林書院，pp. 114—189 (1977)
- 2) Umazume, Y. and S. Fujime; Electro-optical property of extremely stretched skinned muscle

- fibres, *Biophys. J.*, **15** : 163—180 (1975)
- 3) Huxley, H.E. and W. Brown: The low-angle X-ray diagram of vertebrate striated muscle and its behaviour during contraction and rigor, *J. Mol. Biol.*, **30** : 383—434 (1967)
- 4) Elliott G.F., J. Lowy and B.M. Millman; X-ray diffraction from living striated muscle during contraction. *Nature.*, **206** : 1357—1358 (1965)
- 5) Huxley. H.E, W. Brown and K.C. Holmes; Constancy of axial spacings in frog sartorius muscle during contraction. *Nature.*, **206** : 1358 (1965)
- 6) Kitiyakara, A. and D.M. Angevine; A study of the pattern of postembryonic growth of M. Gracilis in mice. *Develop. Biol.*, **8** : 322—340 (1963)
- 7) Mackay, B. and T.J. Harrop; An experimental study of the longitudinal growth of skeletal muscle in the rat. *Acta. Anat.*, **72** : 38—49 (1969)
- 8) Mackay, B., J.J. Harrop and A.R. Muir; The fine structure of the muscle tendon junction in the rat. *Acta. Anat.*, **73** : 588—604 (1969)
- 9) Goldspink, G.; Sarcomere length during post-natal growth of mammalian muscle fibres. *J. Cell. Sci.*, **3** : 539—548 (1968)