

## 肘関節屈曲筋群および伸展筋群の直列サルコメア数の推定

Estimation of serial sarcomere numbers for elbow flexor and extensor muscles

赤木 亮太 (日本学術振興会特別研究員 PD, 早稲田大学スポーツ科学学術院)

杉崎 範英 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

福永 哲夫 (鹿屋体育大学)

矢内 利政 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

川上 泰雄 (早稲田大学スポーツ科学学術院)

### 1. 緒言

骨格筋を構成する筋線維の最小機能単位であるサルコメアは、その長さによって発揮される力が異なり、これをサルコメアの力-長さ関係と呼ぶ(Gordon et al., 1966; Walker and Schrodt, 1974; Nigg and Herzog, 1994)。筋線維は、いくつものサルコメアが直列に連なることで構成されており、その長さは直列するサルコメアの数に依存する。それ故、筋の発揮張力を決定する一つの要因である骨格筋の力-長さ関係は、サルコメアの力-長さ関係および直列サルコメア数の両者の影響を受ける。以上のことから、ヒト生体において、筋線維内に含まれる直列サルコメア数を明らかにすることは、筋力発揮のメカニズムを知る上で非常に重要であることが示唆される。しかしながら、これまで、ヒトの下肢の直列サルコメア数に関してはいくつか報告がある(Wickiewicz et al., 1983; Huijing, 1985; Woittiez et al., 1985)ものの、上肢においては不明である。関節は複数の骨格筋がまたいでいることが多く、関節運動はこれらの筋群の収縮によって発現する。例えば、肘関節屈曲は上腕二頭筋長頭および短頭、上腕筋および腕橈骨筋が協働筋となって行われる。このことは、肘関節屈曲筋力は上腕二頭筋長頭および短頭、上腕筋および腕橈骨筋の各々の筋の力-長さ関係の影響を受けて発揮されることを意味する。

同様に、肘関節伸展は上腕三頭筋長頭、内側頭および外側頭が協働筋となって行われ、各々の筋の力-長さ関係が、発揮される肘関節伸展筋力に影響を及ぼす。それ故、上述の各筋の直列サルコメア数を推定し、力-長さ関係を検討することは、肘関節屈曲および伸展筋力の発揮メカニズムを明らかにするために不可欠である。

本研究では、肘関節屈曲筋群および伸展筋群の直列サルコメア数を推定することを目的とした。また、推定した直列サルコメア数をもとに、各筋線維の力-長さ関係を検討した。

### 2. 方法

#### 2.1 被検者および被検筋

被検者はヒト男性屍体 1 体 (63 yrs, 175.3 cm, 70.0 kg) であった。上腕二頭筋長頭(BB(L))および短頭(BB(S))、上腕筋(BRA)、腕橈骨筋(BRD)を肘関節屈曲筋群、上腕三頭筋長頭(TB(long))、内側頭(TB(med))および外側頭(TB(late))を肘関節伸展筋群とし、これらの筋を被検筋とした。本実験は、早稲田大学スポーツ科学学術院研究倫理委員会の承認を得た上で行われた。

#### 2.2 手順

ヒト屍体を解剖して被検筋を摘出し、被検筋から筋束を切り出した(図1)。切り出した筋束を30%硝酸水に30

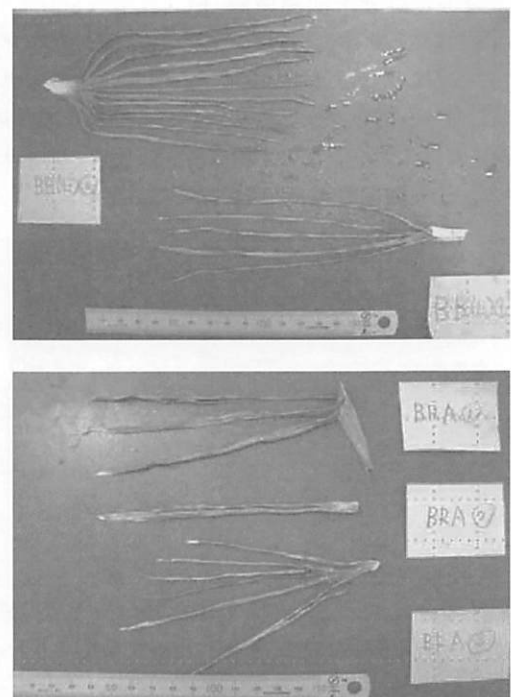


図1 上腕二頭筋長頭(上)および上腕筋(下)の筋束

Ryota AKAGI (Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science; Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

Norihide SUGISAKI (Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

Tetsuo FUKUNAGA (National Institute of Fitness and Sports in Kanoya)

Toshimasa YANAI (Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

Yasuo KAWAKAMI (Faculty of Sport Sciences, Waseda University)

分から3時間漬けた後、水で硝酸水を軽く洗い流し、50～100%グリセリンに浸潤した。適当な時間を置いた後、顕微鏡で確認しながら、筋線維1本あるいは数本の束(以下、筋線維)を取り出した。

筋線維をスライドガラス上に載せ、カバーガラスをかぶせたものを測定用プレパラートとした。スキャナを用いて測定用プレパラートをパーソナルコンピュータに取り込み、画像解析ソフト(ImageJ, National Institute of Health, USA)により筋線維長を計測した(図2)。

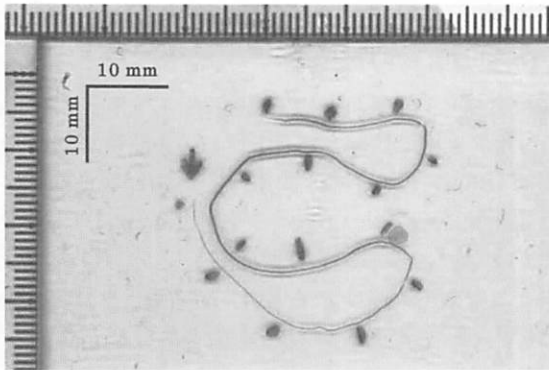


図2 上腕二頭筋短頭の筋線維

サルコメア配列を観察するために、筋線維の端から約1cm間隔毎に微分干渉顕微鏡(ECLIPSE E800, Nikon, Japan)を用いて200倍(接眼レンズ:10×, 対物レンズ:20×)に拡大し、カメラで撮影した(図3)。スキャナを用いて撮影フィルムをパーソナルコンピュータに取り込み、画像内におけるサルコメア1個あたりの長さ(サルコメア長)を、前述の画像解析ソフトを用いて計測した。

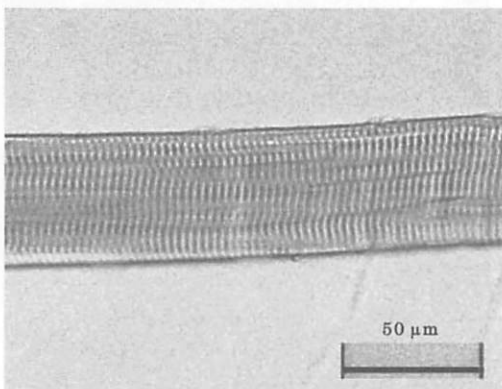


図3 上腕三頭筋内側頭のサルコメア配列

被検筋に含まれる直列サルコメア数を以下の方法で推定した。被検筋から取り出せた筋線維が1本の場合には、筋線維長を筋線維内のサルコメア長の平均で除したものを直列サルコメア数とした。被検筋から複数本の筋線維を取り出せた場合には、各筋線維の直列サルコメア数の

平均値を代表値とした。

本研究では、Walker and Schrodt (1974) および Nigg and Herzog (1994) の報告に従って、図4のようなサルコメアの力-長さ関係を前提とした。ここで示されたサルコメアの長さに本研究で推定された直列サルコメア数を乗じることで、各被検筋の筋線維の力-長さ関係を作図した。測定および推定された値を、すべて平均値±標準偏差で表した。筋線維長およびサルコメア長に関しては、併せて範囲を示した。

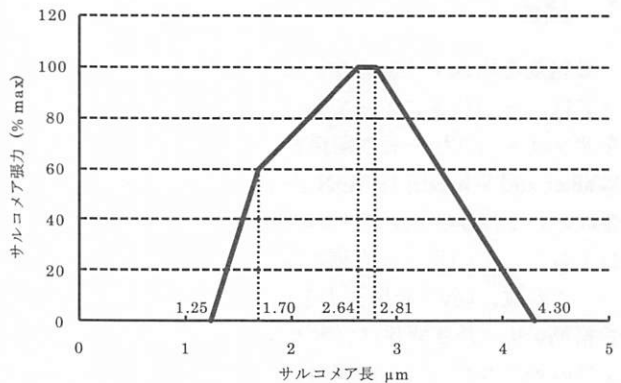


図4 サルコメアの力-長さ関係(Walker and Schrodt (1974) および Nigg and Herzog (1994) を改変)

### 3. 結果

表1に取り出せた筋線維数、筋線維長およびサルコメア長を示す。また、筋線維長をサルコメア長で除すことで推定した直列サルコメア数を図5に示す。肘関節屈曲筋群において、BRAの直列サルコメア数(27110個)はBB(L), BB(S)およびBRDのそれ(40278-43181個)と比較して非常に低い値であった。一方、肘関節伸張筋群の各筋の直列サルコメア数は、15740-20934個と比較的狭い範囲に収まっていた。本研究で推定された直列サルコメア数から、肘関節屈曲筋群および伸張筋群の各筋線維の力-長さ関係を作図したものが(図6)である。

表1 肘関節屈曲筋群および伸張筋群における各筋の筋線維数、筋線維長およびサルコメア

	筋線維数 本	筋線維長 mm	サルコメア長 μm
肘関節屈曲筋群			
BB(L)	1	125.2	3.11 ± 0.11 (2.77-3.25)
BB(S)	3	124.0 ± 5.9 (120.5-130.8)	2.91 ± 0.32 (2.30-3.89)
BRA	3	80.2 ± 28.5 (53.2-110.0)	2.97 ± 0.23 (2.67-3.67)
BRD	1	125.5	2.91 ± 0.14 (2.58-3.16)
肘関節伸張筋群			
TB(long)	12	53.4 ± 9.4 (29.2-62.2)	2.57 ± 0.28 (2.13-3.74)
TB(med)	4	40.3 ± 8.3 (27.8-45.1)	2.56 ± 0.22 (2.12-3.14)
TB(late)	7	52.9 ± 6.3 (45.6-63.4)	2.78 ± 0.34 (2.22-3.84)

平均値 ± 標準偏差。BB(L): 上腕二頭筋長頭, BB(S): 上腕二頭筋短頭, BRA: 上腕筋, BRD: 腕橈骨筋, TB(long): 上腕三頭筋長頭, TB(med): 上腕三頭筋内側頭, TB(late): 上腕三頭筋外側頭。

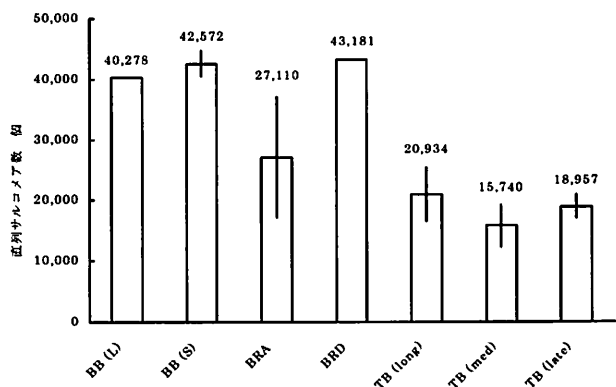


図5 各筋線維の直列サルコメア数 BB(L)：上腕二頭筋長頭，BB(S)：上腕二頭筋短頭，BRA：上腕筋，BRD：腕橈骨筋，TB(long)：上腕三頭筋長頭，TB(med)：上腕三頭筋内側頭，TB(late)：上腕三頭筋外側頭。

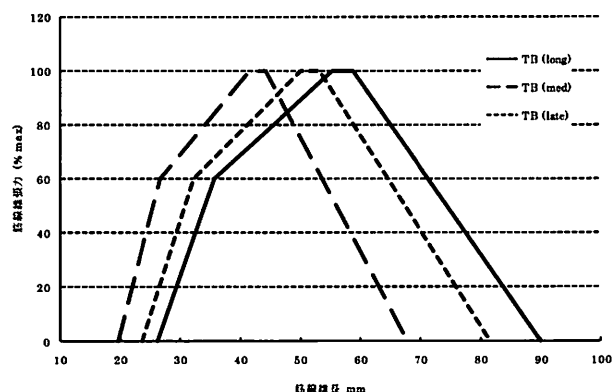
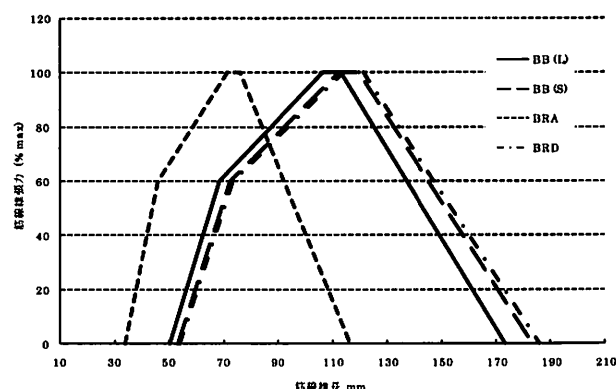


図6 肘関節屈曲筋群(上)および伸展筋群(下)の各筋線維の力-長さ関係 BB(L)：上腕二頭筋長頭，BB(S)：上腕二頭筋短頭，BRA：上腕筋，BRD：腕橈骨筋，TB(long)：上腕三頭筋長頭，TB(med)：上腕三頭筋内側頭，TB(late)：上腕三頭筋外側頭。

#### 4. 論議

肘関節屈曲筋群において、BRAの直列サルコメア数(27110個)は、BB(L), BB(S)およびBRDのそれ(40278-43181個)と比較して低い値であった(図5)。これは、BRAの筋線維長(80.2mm)が、BB(L), BB(S)およびBRDのそれ(124.0-125.5 mm)よりも短かった(表1)ことが要因であると推察される。一方、肘関節伸展筋群の直列サ

ルコメア数は、肘関節屈曲筋群と比較して筋間差が小さかった。本研究において、その理由を明らかにすることはできないが、本研究では上腕三頭筋の各筋を肘関節伸展筋群としたため、機能および形状の筋間差が、肘関節屈曲筋群のそれらよりも小さかったと推察される。

本研究で得られた肘関節屈曲筋群の各筋線維の力-長さ関係から各筋線維の至適長を算出し、先行研究において筋モデルを用いて推定された値(Chang et al., 1999; Garner and Pandey, 2003; Koo et al., 2002; Li et al., 2007)と比較したものを表2に示す。ただし、Chang et al.(1999)は、各筋線維ではなく各筋の至適長を推定したため、An et al.(1989)が報告している筋線維長-筋長比(BB(L), BB(S): 0.67, BRA: 0.95, BRD: 0.72)を用いて、筋の至適長を筋線維のそれに変換した。BB(L), BB(S), BRAおよびBRD、いずれの値も本研究で得られた筋線維の至適長に近い先行研究はみられなかった。また、用いられた筋モデルがそれぞれ異なるため、推定された筋線維の至適長も先行研究間で多岐に亘っていた。ヒト屍体を対象とした実測により得られた本研究の値は、筋モデルを用いて推定した値よりも正確であると考えられ、それ故、これまで考案されている筋モデルの改良の必要性が示唆される。より正確な筋モデルを構築する上で、本研究で得られた筋線維の至適長を既知の値として適用することは不可欠であろう。

表2 先行研究および本研究における肘関節屈曲筋群の各筋線維の至適長

	Chang et al. (1999)	Garner and Pandey (2003)	Koo et al. (2002)	Li et al. (2007)	本研究
BB(L)	94.1	142.2 †	113.0	216.0	106.3-113.2
BB(S)	94.1	142.2 †	145.0	216.0	112.4-119.6
BRA	62.0	102.8	101.0	104.0	71.6-76.2
BRD	124.1	270.3	238.0	142.0	114.0-121.3

単位：mm。BB(L)：上腕二頭筋長頭，BB(S)：上腕二頭筋短頭，BRA：上腕筋，BRD：腕橈骨筋。Chang et al. (1999)の研究では、筋線維ではなく筋の至適長が報告されている。そこで、An et al. (1989)が報告している筋線維長-筋長比(BB(L), BB(S): 0.67, BRA: 0.95, BRD: 0.72)を用いて、筋線維の至適長に変換した。†上腕二頭筋長頭および短頭を区別していない。

一方、肘関節伸展筋群に関しては、いくつかの先行研究(Blazevich and Giorgi, 2001; Kawakami et al., 1995; Kubo et al., 2003)において、ヒト生体で筋束長を推定する試みがなされてきた。これらはいずれも、上腕三頭筋の筋厚および羽状角を超音波法により測定し、筋厚を羽状角の正弦成分で除すことで筋束長とした。しかしながら、Blazevich and Giorgi(2001)はTB(late)の筋厚および羽状角を、Kawakami et al.(1995)は上腕三頭筋各筋を含んだ筋厚およびTB(long)の羽状角を、そしてKubo et al.(2003)はTB(long)の筋厚および羽状角を用いており、上腕三頭筋筋束長の推定方法がそれぞれ異なっていた。

それ故、報告された筋束長の平均値も、133-179 mm(Blazevich and Giorgi, 2001)、106-109 mm(Kawakami

et al., 1995) および 52–59 mm (Kubo et al., 2003) と先行研究間で大きな違いがみられ、上述の上腕三頭筋筋束長の推定方法の内、どの方法が適切なかは明らかにされていない。Murray et al. (2000) の報告によれば、TB(long) および TB(late) のサルコメア長の operating range は、それぞれ至適長の約 80–110% および約 80–120% の長さに相当する。図 4 に従って、サルコメアの至適長を 2.81 $\mu$ m とし、上記の operating range を本研究の TB(long) および TB(late) の筋線維長に適用すると、それぞれ 47–65 mm および 43–64 mm であった。筋束長と筋線維長が等しいと仮定すると、Blazevich and Giorgi (2001) および Kawakami et al. (1995) は、上腕三頭筋筋束長を過大評価している可能性が示唆される。言い換えれば、上腕三頭筋筋束長を推定する際には、Kubo et al. (2003) のように、TB(long) の筋厚および羽状角を用いる方法が適切であると推察される。

## 5. 結論

本研究により、肘関節屈曲筋群および伸展筋群の直列サルコメア数が推定された。そして、各々の筋の力–長さ関係を明らかにすることができた。これらの知見は、肘関節屈曲筋群を対象とした筋モデルの正確な構築に応用可能であり、また、いくつかの先行研究で報告されている肘関節伸展筋群の筋束長の推定方法に関して、その妥当性の有無について言及するものであった。より正確な直列サルコメア数を得るために、今後さらなる調査が必要であることが示唆された。

## 6. 謝辞

本研究の一部は特別研究員奨励費(08J01634)の助成を受けたものである。本研究を遂行するにあたり、大阪大学大学院医学研究科遠山正彌先生、大阪大学大学教育実践センター小松敏彦先生および大阪大学医学部機能形態学講座のご協力を得た。

## 7. 文献

- An, K.N., Kaufman, K.R., and Chao, E.Y. (1989) Physiological considerations of muscle force through the elbow joint. *J. Biomech.*, 22: 1249-1256.
- Blazevich, A.J., and Giorgi, A. (2001) Effect of testosterone administration and weight training on muscle architecture. *Med. Sci. Sports. Exerc.*, 33: 1688-1693.
- Chang, Y.W., Su, F.C., Wu, H.W., and An, K.N. (1999) Optimum length of muscle 5 contraction. *Clin. Biomech.*, 14: 537-542.
- Garner, B.A., and Pandy, M.G. (2003) Estimation of musculotendon properties in the human upper limb. *Ann. Biomed. Eng.*, 31: 207-220.
- Gordon, A.M., Huxley, A.F., and Julian, F.J. (1966) The variation in isometric tension with sarcomere length in vertebrate muscle fibres. *J. Physiol.*, 184: 170-192.
- Herzog, W. (1994) Muscle. Physical property. In: Nigg B.M. and Herzog W. (Eds.) *Biomechanics of the Musculo-Skeletal System*. John Wiley and Sons: Chichester, pp. 168-180.
- Huijing, P.A. (1985) Architecture of the human gastrocnemius muscle and some functional consequences. *Acta. Anat. (Basel)*, 123: 101-107.
- Kawakami, Y., Abe, T., Kuno, S.Y., and Fukunaga, T. (1995) Training-induced changes in muscle architecture and specific tension. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 72: 37-43.
- Koo, T.K., Mak, A.F., and Hung, L.K. (2002) In vivo determination of subject-specific musculotendon parameters: applications to the prime elbow flexors in normal and hemiparetic subjects. *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, 17: 390-399.
- Kubo, K., Kanehisa, H., Azuma, K., Ishizu, M., Kuno, S.Y., Okada, M., and Fukunaga, T. (2003) Muscle architectural characteristics in young and elderly men and women. *Int. J. Sports. Med.*, 24: 125-130.
- Li, L., Tong, K., Song, R., and Koo, T.K. (2007) Is maximum isometric muscle stress the same among prime elbow flexors? *Clin. Biomech. (Bristol, Avon)*, 22: 874-883.
- Murray, W.M., Buchanan, T.S., and Delp, S.L. (2000) The isometric functional capacity of muscles that cross the elbow. *J. Biomech.*, 33: 943-952.
- Walker, S.M., and Schrodt, G.R. (1974) I segment lengths and thin filament periods in skeletal muscle fibers of the Rhesus monkey and the human. *Anat. Rec.*, 178: 63-81.
- Wickiewicz, T.L., Roy, R.R., Powell, P.L., and Edgerton, V.R. (1983) Muscle architecture 10 of the human lower limb. *Clin. Orthop. Relat. Res.*, 179: 275-283.
- Woittiez, R.D., Rozendal, R.H., Huijing, P.A. (1985) The functional significance of architecture of the human triceps surae muscle. In: Winter, D.A., Norman, R.W., Wells, R.P., and Hayes, K.C., Patla, A.E. (Eds) *Biomechanics IX-A. Human Kinetics: Champaign*, pp. 21-26.

---

### 連絡責任者

赤木 亮太

〒359-1192 埼玉県所沢市三ヶ島 2-579-15

早稲田大学スポーツ科学学術院 川上泰雄研究室

TEL: 04-2947-6932

Email: carp\_crespo\_0522@ruri.waseda.jp