

筋厚と形態計測値の組み合わせによる筋形状指標の有効性

Validity of muscle architectural index by combination of muscle thickness and morphometric values

赤木 亮太*, 東 香寿美**, 太田 めぐみ*, 高田 佑輔*, 川上 泰雄**, 福永 哲夫**

Ryota Akagi*, Kazumi Azuma**, Megumi Ohta*, Yusuke Takata*,

Yasuo Kawakami**, Tetsuo Fukunaga**

*早稲田大学大学院 人間科学研究科

*Graduate School of Human Sciences, Waseda University

**早稲田大学 スポーツ科学部

**School of Sport Sciences, Waseda University

キーワード: 超音波法, 筋厚, 肘関節屈曲トルク

Key words: ultrasonography, muscle thickness, elbow flexion torque

抄 録

本研究では、肘関節屈曲トルクに影響する筋の形態的要因を考えるにあたり、肘関節屈曲トルク発揮時の筋厚に注目し、上腕長、上腕周径囲と組み合わせることで肘関節屈曲トルクとの関係について検討することを目的とした。被検者は健常な成人男性 12 名と女性 4 名の計 16 名であった。肘関節専用トルクメータを用い、肘関節角度 90 度で等尺性随意最大筋力 (MVC) を発揮させ、肘関節屈曲トルクを測定した。肘関節屈筋群の超音波横断面像を取得し、安静時及び MVC 発揮時の筋厚 (それぞれ MTrest 及び MTmvc) を測定した。また、メジャーを用いて安静時及び MVC 発揮時の上腕周径囲 (それぞれ Crest 及び Cmvc) も計測した。筋厚及び周径囲いずれも上腕長 (L) の近位 60% の位置とした。安静時、MVC 発揮時双方の MT、MT×L、MT×C、MT×L×C、 $\pi \times (MT/2)^2$ 、 $\pi \times (MT/2)^2 \times L$ を算出し、それら各指標と肘関節屈曲トルクとの相関関係についてそれぞれ検討した結果、肘関節屈曲トルクは各指標との間に有意な高い相関関係 ($r=0.788$ 以上、 $p<0.001$) を示した。特に、MVC 発揮時の各指標は安静時のそれよりも高い相関関係を示す傾向が見られた。MVC と最も高い相関関係を示したのは $MTmvc \times L \times Cmvc$ であった ($r=0.901$ 、 $p<0.001$)。これらの結果より、MVC 発揮時の肘関節屈曲トルクは安静時よりも MVC 発揮時の筋形状指標がより影響している可能性が示唆された。

1. 緒言

人体における骨格筋の発揮張力は関節トルクを生み、複数の関節トルクの総合されたものとして身体運動が成り立つ。つまり、身体運動の出来ばえは筋の力発揮特性により強く影響される。さらに、筋線維の発揮張力が関節トルクを生み出すまでの過程は筋線維、腱や関節の構造などの解剖学的条件により著しく影響されることを考慮しなければならないと福永 (2002) は述べている。それ故に、筋断面積や筋体積、筋線維長、羽状角、モーメントアームといった人間の筋形状を決定している変数を測定することは、人間の身体運動を知る上で重要であることが報告されている (Fukunaga et al. (2001))。

筋形状を測定するにあたり、これまでは安静時の値を測定することから、関節トルクとの関係を検討するような手法がとられていた。例えば、Fukunaga et al. (2001) は超音波法を用いて安静時の肘関節伸展・屈曲筋群の筋厚を測定し、身長、体重、上腕周径囲の計測値と筋厚から推定した各々の筋体積と関節トルクに有意な相関があると報告している。また、Miyatani et al. (2001) はインピーダンス法を用いて安静時の肘関節伸展・屈曲と膝関節屈曲・伸展筋群の筋体積をそれぞれ推定し、各々の関節トルクと有意な相関があると述べている。しかし、筋を収縮させることで形状が変わることは明らかであるにもかかわらず、収縮させた状態での変数を測定して関節トルクとの関係を検討する研究はこれまで行われていない。

理論的に関節トルクは筋体積によって決定されることが報告されている (福永 (2002))。Fukunaga et al. (1992) によれば、筋体積は、MRI 法を用いて直接組織を映像化することで推量できるが、装置が大掛かりで、多くの一般人を対象に測定することは不可能に近い。そこで、比較的簡単に筋体積を測定するために超音波法の利用が検討されてきた。福永ら (1989) によれば、超音波法を用いた筋厚の測定精

度とその再現性は非常に高い。測定した筋厚と筋断面積との間に高い相関関係が見られることが報告されている (福永ら (1991))。そして、この相関関係は筋体積の評価として筋厚の測定を利用できる可能性を示唆し、Miyatani et al. (2000) によって筋厚と体肢長から筋体積を精度よく推定できることが証明された。Miyatani et al. (2000) は筋厚を直径とする筋断面を想定して、 $\pi \times (\text{筋厚}/2)^2 \times \text{体肢長}$ で筋体積を算出した。

しかし福永ら (1991) は、皮下脂肪厚から皮下脂肪断面積を推定する場合に、周径囲による補正が必要であると述べている。これは、筋厚から筋断面積・筋体積を推定する場合にも同様に周径囲による補正が有効である可能性を示唆している。事実、超音波法を用いて筋厚を測定し、体重、身長、周径囲を組み合わせることで筋体積を推定する式が Fukunaga et al. (2001) によって導出された。

そこで本研究では、肘関節屈曲動作を対象として、安静時及び等尺性収縮時の肘関節屈筋群の筋厚と上腕周径囲、上腕長を組み合わせた筋形状指標を求めた。そして、各指標と肘関節屈曲トルクとの関係について検討することを目的とした。

2. 方法

2.1 被検者

被検者は健常な成人男性 12 名と女性 4 名の計 16 名で、被検者の身体特性を Table 1 に示す。

Table 1 被検者の身体特性

	人数 (人)	年齢 (歳)	身長 (cm)	体重 (kg)
男性	12	23.2±2.3	172.1±5.9	68.3±8.0
女性	4	23.0±4.0	158.0±4.0	50.3±3.2
合計	16	23.2±2.7	168.6±8.3	63.8±10.7

被検者全体の年齢は 23.2±2.7 歳、身長は 168.6±

8.3 cm、体重は 63.8 ± 10.7 kg であった。実験は被検者の利き腕に関係なく、全て右腕で行った。各被検者には事前に実験課題に関する説明を十分に行い実験参加の同意を得た。

2.2 実験方法

被検者は直立した状態で右腕を下垂し、力が入っていないことを確認してからスチール製のメジャーを用いて上腕長 (L) を計測した。次に、右腕を肘関節

専用トルクメータ (VTE-002R、㈱VINE) に固定し、

肘関節角度 90 度で力を発揮していない状態 (安静状態) の肘関節屈筋群の横断画像を超音波診断装置 (SSD-900、ALOKA ㈱) で撮像して、その横断画像から筋厚 (MTrest) の測定を Fig.1 のように行った。そして、撮像した後に安静時の上腕周径 (Crest) を布製のメジャーで計測した。筋厚の測定及び上腕周径の計測は川上 (2000) に従い、いずれも上腕長 (L) の近位 60% の位置で行った。

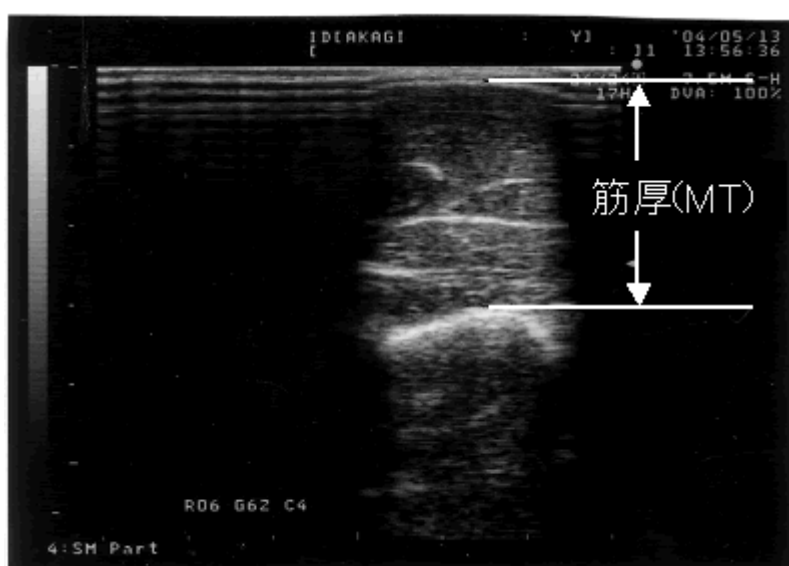


Fig. 1 超音波画像を利用した筋厚の測定方法

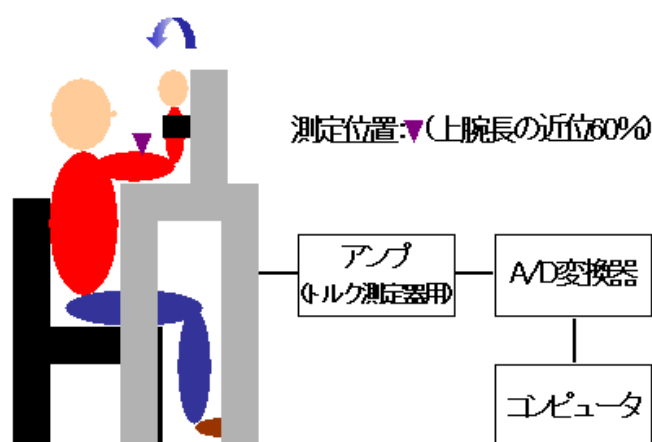


Fig. 2 実験装置の概略図

肘関節屈曲トルクは、上記のトルクメータを用い、肘関節角度 90 度で 3 秒間の等尺性随意最大筋力 (MVC) を発揮させ、これを 2 回測定した。1 回目に筋厚 (MTmvc) の測定、2 回目に上腕周径囲 (Cmvc) の計測を行い、肘関節屈曲トルクは、2 回の測定で高い値を示した方を採用し、この 2 回の値に有意差がないことを確認した。以上の実験の概略図を Fig. 2 に示す。

2.3 統計処理

本研究では、超音波法により測定した筋厚 (MTrest, MTmvc) を上腕周径囲 (Crest, Cmvc)、上腕長 (L) と組み合わせることで、Table 2 のような計 12 個の指標を考えた。そして、各指標と肘関節屈曲トルクの関係の検討にはピアソンの積率相関係数を算出し、有意水準を 1% とした。

Table.2 安静時, MVC 発揮時の各指標

	指標	説明
安静時	MTrest	安静時の筋厚
	MTrest x L	安静時の筋厚 x 上腕長
	MTrest x Crest	安静時の筋厚 x 上腕周径囲
	MTrest x L x Crest	安静時の筋厚 x 上腕長 x 上腕周径囲
	$\pi \times (MTrest / 2)^2$	安静時の筋厚を直径とした筋断面積
	$\pi \times (MTrest / 2)^2 \times L$	上記断面を底面とした筋体積 (円柱と仮定)
MVC 発揮時	MTmvc	MVC 発揮時の筋厚
	MTmvc x L	MVC 発揮時の筋厚 x 上腕長
	MTmvc x Cmvc	MVC 発揮時の筋厚 x 上腕周径囲
	MTmvc x L x Cmvc	MVC 発揮時の筋厚 x 上腕長 x 上腕周径囲
	$\pi \times (MTmvc / 2)^2$	MVC 発揮時の筋厚を直径とした筋断面積
	$\pi \times (MTmvc / 2)^2 \times L$	上記断面を底面とした筋体積 (円柱と仮定)

3. 結果

3.1 筋厚・上腕長・上腕周径囲の実測値

安静時と MVC 発揮時双方の筋厚と上腕周径囲、そして上腕長の実測値を Table 3 に示す。筋厚の安静時 (MTmvc) の平均は 30.8 ± 6.7 mm、MVC 発揮時 (MTmvc) の平均は 37.1 ± 5.0 mm となり、両者の間に統計的に有意な差が見られた ($p < 0.001$)。同様に、上腕周径囲についても安静時 (Cmvc) と MVC 発揮時 (Cmvc) の間に統計的に有意な差が見られ ($p < 0.001$)、Cmvc の平均は 27.5 ± 2.6 cm、Cmvc の平均は 28.5 ± 2.8 cm であった。

3.2 安静時・MVC 発揮時の各指標について

安静時の各指標と肘関節屈曲トルクの関係を図 3 に、MVC 発揮時の各指標と肘関節屈曲トルクの関係を図 4 にそれぞれ示す。肘関節屈曲トルクは各指標との間に、いずれも統計的に有意な高い相関係数 ($r = 0.788$ 以上) を示した ($p < 0.001$, Table 4)。最も相関係数が高かった指標は、安静時 ($r = 0.860$)、MVC 発揮時 ($r = 0.901$) とともに $MT \times L \times C$ であった。安静時の指標で最も肘関節屈曲トルクと高い相関関係を示した $MTmvc \times L \times Cmvc$ ($r = 0.860$) は、MVC 発揮時のいずれの指標よりも低い値を示した。

Table 3

筋厚・上腕長・上腕周径圏の実測値 (n=16)

項目	平均±標準偏差 $m \times 10^{-2}$
MTrest	3.08 ± 0.67
MTmvc	3.71 ± 0.50
Crest	27.5 ± 2.6
Cmvc	28.5 ± 2.8
L	31.4 ± 1.7

※筋厚、上腕周径圏ともに MVC 発揮時と Rest 時に有意差あり ($p < 0.001$)

Table 4

各指標と肘関節屈曲トルクとの相関関係 (n=16)

	安静時	MVC 発揮時
MT	0.788	0.872
MT x L	0.818	0.882
MT x C	0.849	0.894
MT x C x C	0.860	0.901
$\pi \times (MT / 2)^2$	0.801	0.866
$\pi \times (MT / 2)^2 \times L$	0.815	0.875

※いずれも $p < 0.001$

4. 考察

安静時と MVC 発揮時の各指標に注目すると、安静時の指標で最も肘関節屈曲トルクと高い相関関係を示した MTmvc $\times L \times C$ ($r=0.860$) は、MVC 発揮時のいずれの指標よりも低くなっていた。よって、MVC 発揮時の肘関節屈曲トルクには MVC 発揮時の指標がより影響している可能性が示された。

Humphreys and Lind (1963) は、筋が強い収縮をした時 (30~40% MVC 以上)、血流量は筋の張力により血管が圧迫され閉塞するため減少すると述べている。一方で Bonde-Petersen et al. (1975) は、血流が停止される負荷強度は灌流圧と筋内圧との兼ね合いで決まるが、筋線維と血管の位置関係とも関係があるため、筋によって相違があると報告している。加賀谷 (2002) によれば、一般的には 10% MVC 以下であれば血管閉塞は起こらず、15% MVC を超えると徐々に血流制限が始まり、70% MVC 以上では停止すると考えられる。また、筋内圧と血流量との関係を調べた Nielson and Ingvar (1967) は、筋内圧が最低血圧に近い 80 mmHg 以上になると血流が阻止されると報告している。以上のことから、MVC 発揮時における血流は停止していると考えられる。筋厚から筋体積を推定できることを考慮すると、血流の停止、血管径の縮小が MVC 発揮時の筋厚に影響を与え、関節トルクを決定する筋体積をより正確に推定できることが

示唆される。MVC 発揮時は安静時に比べて筋腹が膨れ上がり筋厚が厚くなるが、このことも同様に筋体積のより正確な推定を可能にしているのだろう。

また、どちらも筋体積を反映している指標だと考えられる $\pi \times (MT/2)^2 \times L$ と $MT \times L \times C$ を比較すると、安静時、MVC 発揮時ともに $MT \times L \times C$ の相関係数の方が高かった。このことは、実際の筋は円柱ではなく、周径圏を筋形状指標に組み込んで補正することで、筋の体積をより適切に評価できる実際に近い筋形状を考えられることを意味する。筋断面積に注目して、上記の式から上腕長を除いた $\pi \times (MT/2)^2 \times$ と $MT \times C$ の相関係数を比較しても同様のことが示唆される。

しかし、周径圏が含んでいる情報を丁寧に検討する必要があるだろう。周径圏は肘屈筋群に関する筋形状を反映している一方で、皮下脂肪厚、上腕三頭筋のような拮抗筋の筋厚についても反映していると考えられる。特に、上腕部の皮下脂肪厚については、女性が男性の 1.5~2 倍に及ぶと安部と福永 (1995) は報告している。本研究では、女性被検者の数が少なかったため、男女を含めた全データについて処理を行ったが、 $MT \times L \times C$ を用いて筋のモデルを考えていく際には男女を分けて検討する必要があるかもしれない。

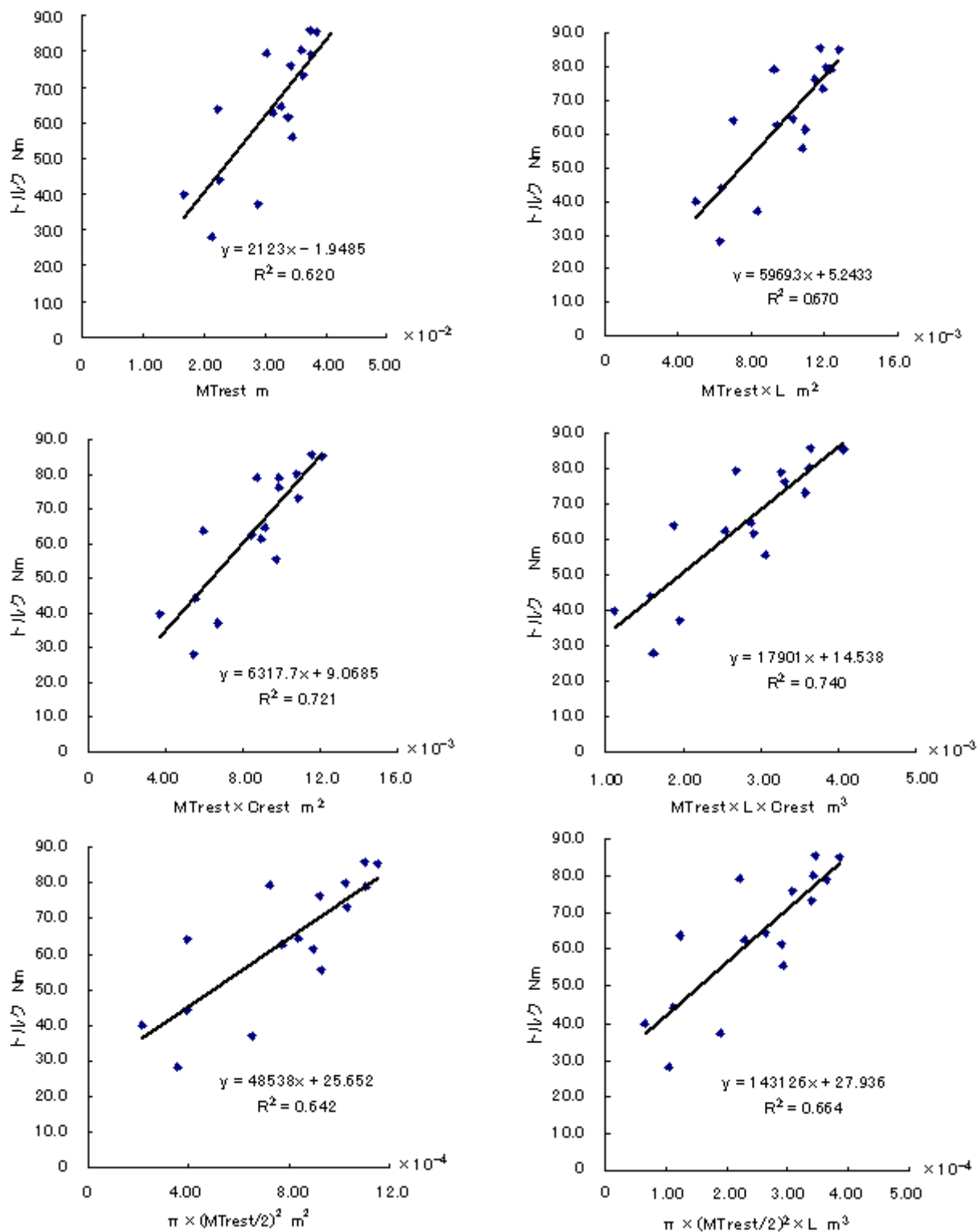


Fig. 3 安静時の各指標と肘関節屈曲トルクとの関係 (n=16)

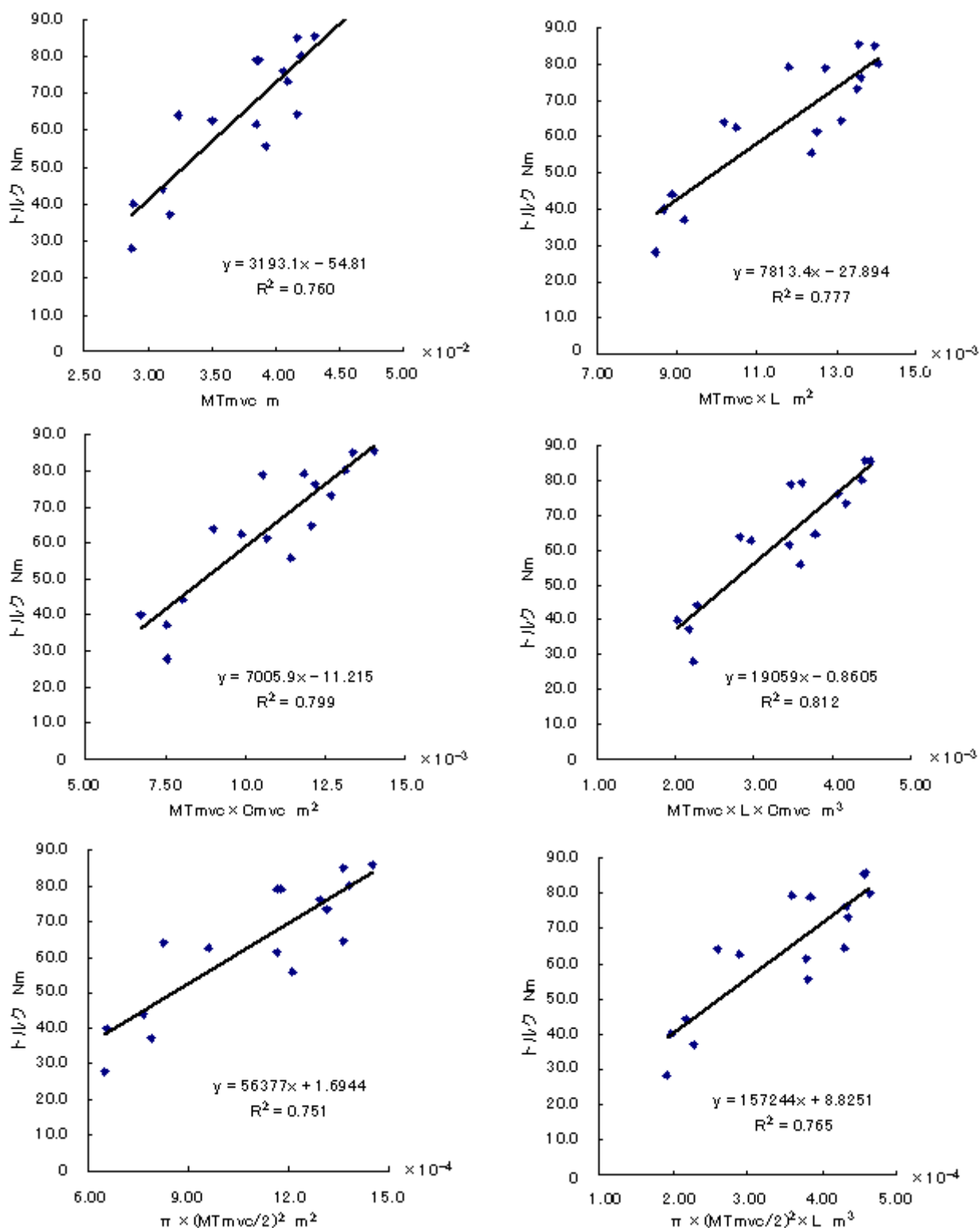


Fig. 4 MVC 発揮時の各指標と肘関節屈曲トルクとの関係 (n=16)

さらに、本研究では肘関節屈筋群として上腕二頭筋と上腕筋を考え、その2つの筋の境を無視して肘関節屈筋の筋厚として合わせて測定した。つ

まり、上腕二頭筋の筋厚と上腕筋の筋厚を個別に測定せず、肘関節屈筋群の筋厚を指標として肘関節屈曲トルクとの関係に注目した。しかし、

Kawakami et al. (1994) は、肘関節屈曲トルクに対する貢献度は上腕二頭筋 47%、上腕筋 34%、腕橈骨筋 19%と報告している。

今後は上腕二頭筋と上腕筋各々の筋厚の測定を行い、各筋の貢献度をそれぞれの被検者について求めることで、より肘関節屈曲トルクとの相関の高い指標が得られるのではないかと考えられる。

本研究の結果、今回求めた筋形状指標はいずれも肘関節屈曲トルクと高い相関関係があり、特に MVC 発揮時の指標が MVC 発揮時の肘関節屈曲トルクにより影響している可能性があることが明らかとなった。そして、筋の力発揮能力を筋厚から評価する場合、周径囲を筋形状指標に組み込むことが有効であることが示された。

5. 参考文献

- 安部孝, 福永哲夫 (1995) 日本人の体脂肪と筋肉分布, 杏林書院, 東京, pp.147-148.
- Bonde-Petersen, F., Mork, AL. and Nielsen, E.(1975) Local muscle blood flow and sustained contractions of human arm and back muscles. *Eur J Appl Physiol.* **34**,43-50.
- 福永哲夫(2002) 筋の科学事典—構造・機能・運動—, 福永哲夫編, 朝倉書店, 東京, pp.78, 94-95.
- Fukunaga, T., Miyatani, M., Tachi, M., Kouzaki, M., Kawakami, Y. and Kanehisa, H. (2001) Muscle volume is a major determinant of joint torque in humans.*Acta Physiol Scand* **172**, 249-255.
- Fukunaga, T., Roy, R.R., Shellock, F.G., Hodgson, J.A., Day, M.K., Lee, P.L., Kwong-Fu, H. and Edgerton, V.R. (1992) Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging.*J Orthop Res.* **10**, 928-934.
- 福永哲夫, 安部孝, 池川繁樹, 小沢治夫, 合田浩二, 石田良恵, 浅見俊雄 (1991) 超音波断層法による筋厚・皮下脂肪厚と組織断面積との関係. *体育科学* **19**, 1-6.
- 福永哲夫, 松尾彰文, 石田良恵, 角田直也, 内野滋雄, 大久保真人 (1989) 超音波 B モード法による皮下脂肪厚および筋厚の測定法の検討. *超音波医学* **16**, 170-177.
- Humphreys and Lind (1963) The blood flow through active and inactive muscles of the forearm during sustained hand-grip contractions.*J Physiol.* **166**, 120-135.
- 加賀谷淳子 (2002) 筋の科学事典—構造・機能・運動—, 福永哲夫編, 朝倉書店, 東京, pp.136-137.
- 川上泰雄 (2000) 教養としてのスポーツ・身体運動, 東京大学身体運動科学研究室編, 東京大学出版会, 東京, pp.180.
- Kawakami, Y., Nakazawa, K., Fujimoto, T., Nozaki, D., Miyashita, M. and Fukunaga, T. (1994) Specific tension of elbow flexor and extensor muscles based on magnetic resonance imaging.*Eur J Appl Physiol.* **68**, 139-147.
- Miyatani, M., Kanehisa, H., Masuo, Y., Ito, M. and Fukunaga, T. (2001) Validity of estimating limb muscle volume by bioelectrical impedance.*J Appl Physiol.* **91**, 386-394.
- Miyatani, M., Kanehisa, H. and Fukunaga, T. (2000) Validity of bioelectrical impedance and ultrasonographic methods for estimating the muscle volume of the upper arm.*Eur J Appl Physiol.* **82**, 391-396.
- Nielson, B. and Ingvar, D. (1967) Intramuscular pressure and contractile strength related to muscle blood flow in man.*Scand J Clin Lab Invest Suppl.* **99**, 31-38.