

2006年7月7日

人間科学研究科長 殿

太田 めぐみ 氏 博士学位申請論文審査報告書

太田 めぐみ 氏の学位申請論文について、下記の審査委員会は、人間科学研究科の委嘱をうけ審査をしてきましたが、2006年6月26日に審査を終了しましたので、ここにその結果をご報告します。

記

1. 申請者氏名

太田 めぐみ

2. 論文題目

生体電気インピーダンス法を用いた筋長変化測定法の開発

3. 本文

(別紙)

4. 太田 めぐみ 氏 博士学位申請論文審査委員会

主任審査員：早稲田大学教授 教育学博士 (東京大学) 福永 哲夫

審査員：早稲田大学教授 工学博士、医学博士 (大阪大学) 彼末 一之

審査員：早稲田大学教授 博士 (教育学) (東京大学) 川上 泰雄

審査員：東京大学大学院助教授 教育学博士 (東京大学) 金久 博昭

以上

3.本文

【緒言】

これまで、ヒト生体内における筋腱複合体の長さ変化を定量する方法として超音波法が用いられている。関節を構成する筋腱複合体は筋と腱が直列で配列されているので、等尺性収縮中の筋長の短縮量は、腱の伸長量に等しいことになる(Ito et al. 1998)。そして、超音波法による腱伸張量の測定から、腱組織の粘弾性特性を定量することが可能になった。

本研究においては、筋長(腱長)を測定するための方法として生体電気インピーダンス(bio-electrical impedance:BI)法に着目した。つまり、インピーダンス(Z :高周波電流と電圧計測電極間に生じた電位差の比)は長さに比例し、断面積に反比例するので、 Z の計測から長さ変化を推定することが可能であろうと考えられる。これまでに Z 変化と関節角度や発揮筋力との間には相関があることが報告されている(岡部と藤田 1989, Nakamura et al.1992, Kim et al. 2003)が、このことは、筋長変化が Z を変化させることを表していると考えられる。

BI法は測定区間に存在する組織をそれぞれ円柱に見立て、各組織を電氣的に並列に配置したモデルで理論化されている。四肢を構成する組織の体積抵抗率は脂肪が最も高く、以下、骨 > 腱 > 筋であることが示されている(Baumgartner et al. 1990, Salinari et al. 2002)。測定対象とする部位が体積抵抗率の異なる組織で構成されている場合、体積抵抗率の高い組織には電流がほとんど通電しない。したがって、筋腱複合体を測定区間とした時、測定される Z は体積抵抗率の低い筋の情報を反映することになる。また、関節角度変化および筋収縮に伴う Z 変化は、筋長変化を反映するという仮説が導かれる。しかしながら、生体内においては組織が単純に配列されていないので、同一円周上に複数の測定区間がある場合、 Z はそれぞれ異なることが予想され、対象とする筋を感度よく捉えるための測定区間が存在すると考えられる。

そこで、本研究では肘関節屈曲筋群を対象とし、BI法による筋長(腱長)変化測定の可能性を明らかにすることを目的として、以下の3つの実験を行った。

実験 1:上腕部の Z 分布を明らかにし、計測区間を選定する

実験 2:受動的な筋長変化測定の可能性を検討する

実験 3: 等尺性筋力発揮中の筋長変化の測定の可能性を検討する

【研究内容(結果と考察)】

実験 1: 上腕部の Z 分布と計測区間の選定

上腕における Z の分布を明らかにし、肘関節角度変化に対して測定感度の高い計測区間を選定することを目的とした。被検者は 4 名であり、男女それぞれで鍛錬者・非鍛錬者 1 名ずつであった(23.8±2.2 才, 162.4±6.6cm, 62.2±5.1kg、平均値±標準偏差)。計測区間の選定を行うため、上腕部におよそ 40 の計測区間を設定した。電圧計測電極のうち一方を基準側として右肩峰に固定した。もう一方を探查側とし、上腕長の 60, 70, 80% 部位のそれぞれにおいて上腕の長軸に垂直な円周上に電極を貼付し Z を導出した。

その結果、計測区間が短くなると Z は減少した。また円周方向において Z は同一ではなく、電極の直下に体積抵抗率が低い組織(血管および筋)がある場合に低値を示した。これは、Z が電極貼付位置の直下に存在する組織の影響を受けることを示しており、対象とする筋により長さ変化の計測に最適な計測区間があることが示唆された。さらに、肘関節角度を 40deg から 120deg まで屈曲させることにより(完全伸展位 = 0deg)、Z は低下した。Z の変化率は肩峰～70% 上腕長・上腕二頭筋上の計測区間で $-9.2 \pm 1.1\%$ と最も大きかった。さらに、この部位の $\Delta Z^{1/2}$ と超音波診断装置を用いて計測した上腕二頭筋の遠位筋腱移行部の移動距離(mm)の間には 2 次の曲線関係が認められた ($R^2 = 0.883, p < 0.001$)。

以上のことから、肩峰～70% 上腕長・上腕二頭筋上を計測区間とすることにより、Z 変化から肘関節屈曲筋群の筋長変化を感度よく測定可能であることが明らかになった。したがって、本論文では、この区間を Z の計測区間に選定した。

実験 2: 受動的な筋長変化測定の可能性

肘関節を受動的に変化させたときの ΔZ と筋腱複合体長変化(ΔL_{MTC} : mm)との関係を検討した。被検者は男性 11 名(25.7±2.0 才, 171.8±5.8cm, 66.5±5.9kg)であった。肘関節を 0deg から 100deg 屈曲位まで 10deg 刻みで受動的に屈曲させた時の Z を計測した。

その結果、Z は肘関節の屈曲に伴って直線的に減少する($r = -0.996, p < 0.001$)ことが示された。0deg における Z を基準にその変化率($\% \Delta Z$)を求めたところ、100deg では $-18.0 \pm 2.9\%$ で

あった。肘関節の屈曲に伴って Z が直線的に減少することは、先行研究の報告 (Kim et al. 2003)と同様であった。また、肘関節伸展筋の Z への貢献が屈曲筋群に比べて低いことを示すものであった。これは肘関節伸展筋の羽状角が影響しているものと考えられた。さらに、肘関節角度変化から推定したモーメントアーム値を用いて (Amis et al. 1979)、肘関節屈曲筋群の ΔL_{MTC} を求め $\Delta Z^{1/2}$ との関係を検討したところ、いずれの筋においても 2 次の曲線関係が認められた。

以上のことから、肘関節角度変化に伴う Z 変化が筋腱複合体長変化を反映することが示された。

実験 3: 等尺性筋力発揮中の筋長変化測定の可能性

等尺性筋力発揮により筋長を変化させた時の ΔZ と超音波法により定量した上腕二頭筋の筋短縮量 (ΔL_{US} : mm) との関係を検討した。被験者は男性 14 名 (23.1 ± 1.9 才, 172.2 ± 6.6 cm, 67.8 ± 7.7 kg) であった。肘関節角度は 70deg とし、8 秒間で最大随意収縮 (MVC) の 80% に達するよう、筋力を発揮した。

発揮筋力の増加に伴って L, Z とともに非線形に減少することが示された。80% MVC におけるトルク、 ΔL_{US} および $\Delta \%Z$ は、それぞれ 47.9 ± 4.8 Nm, 9 ± 3 mm, -9.1 ± 1.7% であった。 $\Delta Z^{1/2}$ と ΔL の間には 2 次の曲線関係があることが認められた ($R^2 = 0.988$, $P < 0.001$)。筋長変化を腱長変化に置き換えて、粘弾性特性の推定に適用することを考慮し、50% MVC 以上における筋長変化について検討を加えた。被検者を validation 群と cross-validation 群に分け (それぞれ n = 7)、validation 群における $\Delta Z^{1/2} - \Delta L$ 関係に基づき L_{BI} の推定式 ($\Delta L_{BI}(f) = 4.441 \times \Delta \%Z(f) - 4.802$) を得た。validation 群の L_{US} は 9 ± 1 mm、 L_{BI} は 9 ± 1 mm (いずれも平均値 ± 標準誤差) であり、両群間に有意差は認められなかった。validation 群で筋長の推定が可能であったことから cross-validation 群に適用した結果、 L_{US} の 8 ± 1 mm に対し、 L_{BI} は 9 ± 0 mm であり、cross-validation 群においても L_{US} と L_{BI} の間に有意差は認められなかった ($p = 0.749$)。

これらの結果から、等尺性筋力発揮中の Z 変化は筋長変化を反映したものであり、BI 法を用いて筋長(腱長)変化を推定可能であることが示された。

【結論】

本研究の結果、BI 法を用いて、肩峰～70%上腕長・上腕二頭筋上の区間から導出された Z の変化は、関節角度変化および等尺性筋力発揮に伴う肘関節屈曲筋群の長さ変化を反映していることが示された。等尺性筋力発揮中の筋長変化を BI 法により推定可能であるという知見が得られたことは、BI 法が腱の粘弾性特性の簡便な推定法となり得ること示唆するものであった。

以上のように、太田めぐみ学位申請論文「生体電気インピーダンス法を用いた筋長変化測定法の開発」は非常に優れた独創性の高い論文であり、博士(人間科学)の学位に相合しいものと判断された。