

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

Development of the method for estimating muscle-length change by means of bio-electrical impedance method

太田 めぐみ (Megumi Ohta) 指導：福永 哲夫

【緒言】

身体運動のメカニズムを理解するためには、ヒト生体内における筋腱複合体の動態に着目する必要がある。超音波診断装置はリアルタイムで組織を画像化できることから、筋腱複合体の長さ変化の定量が可能となった。この超音波診断装置を用いた方法（超音波法）で、関節角度すなわち筋腱複合体長が一定である等尺性収縮においては、筋長の短縮量は腱長の伸長量に等しいことが明らかになった (Ito et al. 1998)。さらに、腱伸長量を測定することにより、ヒト生体内における腱組織の粘弾性が定量可能になり (Ito et al. 1998, Kubo et al. 1999, 2001, 太田ら 2004)、腱組織の粘弾性がスポーツパフォーマンスと関与することも報告されている (Kubo et al. 1999, 2001)。

本研究においては、筋長（腱長）変化を測定するための新たなアプローチとして生体電気インピーダンス (bio-electrical impedance: BI) 法に着目した。BI 法は計測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。このとき、インピーダンス（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ことから、インピーダンスの測定によって筋長変化を推定可能であろうと考えられる。これまでにインピーダンス変化と関節角度や発揮筋力と変化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、筋長変化がインピーダンスを変化させていることを表していると考えられる。

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、筋腱複合体を計測区間とした時、測定されるインピーダンスは体積抵抗率が低い組織である筋の情報を反映することになる。さらに筋線維の走行方向に対して 90deg の方向に通電した場合の体積抵抗率は、0deg の方向に通電した場合のおよそ 10 倍である (Gielen

& Boon 1981) ことから、羽状角の大きさによって筋間の体積抵抗率は異なると考えられる。

本研究では、肘関節屈曲筋群を対象に BI 法による筋長（腱長）変化測定の可能性を明らかにするため、肘関節屈曲筋群と伸展筋をそれぞれ円柱とみなし、両筋群を並列に配したモデルを使用し、以下の仮説を立てた。

- ・ 肘関節伸展筋は屈曲筋群に比べ羽状角が大きいため、感度（インピーダンスへの貢献）が低い。
- ・ 受動的に肘関節角度を屈曲させることによって、筋長を短縮させた時、上腕部のインピーダンスは低下する。
- ・ 等尺性肘関節屈曲筋力発揮に伴って筋長が短縮した時、上腕部のインピーダンスは低下する。

モデルおよび仮説に基づくと、関節角度変化時および筋力発揮時のいずれにおいても、筋長変化とインピーダンスの 1/2 乗が関与すると予想される。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ため、同一円周上に複数の計測区間がある場合、インピーダンスは計測区間によって異なることが予想される。したがって、対象とする筋の情報を感度よく捉えるための計測区間が存在すると考えられる。

そこで、肘関節屈曲筋群の筋長変化を BI 法で測定可能かどうかを明らかにするという本研究の目的を達成するために以下の 3 つの実験を行った。

- 実験 1：上腕部のインピーダンス分布を明らかにし、筋長変化の測定に適した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。

【方法】

インピーダンスの測定には生体電気インピーダンス方式筋量測定装置 (MUSCLE α 、(株)アートヘブンナイン、500 μ A、50kHz) を使用した。

測定部位は右上腕とした。被検者の姿勢は非伝導体の材質でできた測定台上での仰臥位であり、右肩関節を 90deg 外転、前腕を回外した状態でトルク測定装置 (肘屈伸トルクメータ、(株)ヴァイン) に固定した。

【結果と考察】

実験1: 上腕部のインピーダンスの分布と計測区間の選定

上腕におけるインピーダンス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インピーダンス(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測定に最適な計測区間があることを示唆するものであった。さらに、肘関節を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の変化率は計測区間によって異なり、肩峰~70%上腕長・上腕二頭筋上の計測区間で9.2±1.1%と最も大きかった。さらに、この区間の $\Delta Z^{1/2}$ と超音波診断装置を用いて測定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($R^2 = 0.883, p < 0.001$)。

Zが電極を貼付した部位の直下の組織の情報を反映することを考慮すると、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示された。そこで、肩峰~70%上腕長・上腕二頭筋上をインピーダンス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インピーダンス変化(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を測定した。

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(% ΔZ)を求めたところ、100degでは18.0±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)と同様であり、肘関節伸展筋のZへの貢献が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(Amis et al. 1979)を用いて、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。被検者は男性14名(23.1±1.9才, 172.2±6.6cm, 67.8±7.7kg)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_{us} , Zともに非線形に変化することが示された。80% MVCにおけるトルク、 ΔL_{us} および ΔZ 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、腱組織の粘弾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($\Delta L_{BI}(f) = 4.441 \times \Delta Z^{1/2}(f) - 4.802$)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} の間には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)変化が推定可能であることが示された。

【結論】

本研究の結果、肘関節屈曲筋群の筋長変化はインピーダンス計測区間を肩峰~70%上腕長・上腕二頭筋上とすることで、感度良く測定可能であることが示された。また、こ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。特に、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法が腱の粘弾性の簡便な推定法となり得ること示唆するものであった。