

論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名：伊藤雅充

本論文“Changes in architecture of a muscle-tendon unit during muscle actions”（和訳：「筋活動中の筋腱複合体の形状変化」）では、超音波断層法を用いてヒト生体に於ける筋収縮中の筋腱複合体（MTC）の動態を測定することにより、関節を固定した状態での筋活動（静的筋活動）中に腱組織が伸長し、筋線維が短縮する事が明らかになった。更に、筋線維と腱組織との接合部位の移動する距離を定量する事により足関節のモーメントアーム長を測定する事が可能になった。また、関節角度を変化させることにより筋線維の発揮張力と筋線維長との関係を明らかにする事から筋の最大発揮張力が推定され、筋活動中の各種パラメータを用いてヒト生体での固有筋力を算出する事ができた。これらの研究から得られた知見は、身体運動科学における研究の新しい方向を示すものとして注目される。本論文は以下のようにまとめられる。

(1) 「ヒト骨格筋等尺性収縮中の筋束の非等尺性動態」を明らかにする為に、健康成人6名を被験者とし、足関節を固定した足背屈筋力発揮時（いわゆる‘等尺性’収縮）の前脛骨筋の筋形状（筋束長・羽状角）を超音波法を用いて測定した。その結果、随意最大筋力(MVC)発揮により、筋束は $90 \pm 7 \text{mm}$ (mean \pm SEM) から $76 \pm 7 \text{mm}$ まで 16%短縮し、羽状角は $10 \pm 1^\circ$ から $12 \pm 1^\circ$ まで 20%増加した。以上のように、筋-腱複合体の長さ是一定であるにも関わらず、筋線維張力により腱が伸張され、その結果、筋線維は短縮することが確認された。そのとき、筋線維の短縮による機械的仕事は $3.4 \pm 0.4 \text{J}$ と算出された。また、健康成人9名を被験者とし、‘等尺性’収縮中の前脛骨筋内に観察される腱組織の伸張量 (Dx) を超音波法を用いて定量することにより腱のスティッフネス及びヤング率を求めた。MVC発揮により、前脛骨筋の遠位腱は $15 \pm 2 \text{mm}$ 伸張した。測定された関節トルクとモーメントアーム (Ruggら, 1990) とから腱張力 (F^l) を算出し、 Dx - F^l 関係より腱のスティッフネスを算出した。また、腱の断面積 (CSA^l) を超音波法を用いて測定し、腱の初期長 (L^{ini}) を第1中足骨から超音波計測点までとして測定することにより、ストレス (F^l/CSA^l) - ストレイン (Dx/L^{ini}) 関係を求めヤング率を算出した。スティッフネスは 10N/mm ($F^l=10\text{N}$) から 32N/mm ($F^l=250\text{N}$) に、ヤング率は 157MPa から 530MPa に増加した。これらの値は先行研究の範囲内 (スティッフネス: $10.5 \sim 261.2 \text{ N/mm}$ 、ヤング率: $188 \sim 1650 \text{ MPa}$) にあった。腱の長さ-力関係は曲線部分 (toe region) とそれに続く直線部分から成るが、得られたスティッフネス (もしくはヤング率) - F^l 関係から、ヒト生体内では toe region が主に用いられていると考えられた。

(2) 「Bモード超音波法を用いたヒト生体でのモーメントアーム」を算出する方法の開発する為に、健康成人7名を被験者とし、MVCの0、30、60%のトルク発揮中に関節角度を変化させ、そのときの腱の移動距離を超音波法を用いて計測し、腱の移動距離を関節角度変化で除することによりモーメントアーム (m) を算出した (Anら, 1983)。得られたモーメントアーム-関節角度 (a) 関係を $m=R\sin(a+D)$ を用いて最小二乗法で回

帰した (Miller と Dennis, 1996)。R は最大のモーメントアーム値、D は R が出現するときの関節角度を 90° からのオフセットとして求めたものである。その結果、R には 30% と 60% 条件間には有意差は認められなかったが、能動的 2 条件と受動的 (0%) 条件間には有意差 ($p < 0.01$) が認められた。従って、両能動的条件から求められたモーメントアーム値 (30% : 49mm、60% : 50mm) は妥当であると考えられた。

(3) 「ヒト前脛骨筋の長さ-力関係を明らかにし、固有筋力を算出する」ために、健康成人 6 名を被験者とし、静的足背屈随意最大トルク (MVC) - 足関節角度関係を求めた。MVC 発揮中に超音波法を用いて前脛骨筋の縦断画像を撮像し、その画像から筋束長と羽状角を求めた。第 3 章で用いた方法でモーメントアームを求め、トルクを腱張力に換算した。このとき、先行研究 (Yamaguchi ら, 1990) で報告されている生理学的断面積比から足背屈トルクの 49.8% を前脛骨筋が発揮したものと仮定した。次に、腱張力から羽状角の値を用いて筋力 (筋束方向の力) を求めた。筋体積を核磁気共鳴画像法を用いて求め、腱張力が最大となったときの筋束長と羽状角の値を用いて生理学的断面積を算出し、更に腱張力を生理学的断面積で除することにより固有筋力を求めた。その結果、足背屈トルクは関節角度 100 度で最大であったが、筋線維の発揮張力は 120 度で最大となった。すなわち、最大の足背屈トルクは筋の長さ-力関係の上向脚でを用いて発揮されていることが明らかになった。また、筋線維の長さ-力関係から至適長での最大張力が推定され、更に、筋収縮時のモーメントアーム、羽状角の測定から、固有筋力の値は $32.0 \pm 5.3 \text{ N/cm}^2$ と算出された。この値は、従来推定でしか明らかにされていなかった値をヒト生体で直接測定したものである。

以上のように、伊藤雅充君の論文は、ヒト生体における筋活動中の筋-腱複合体の振る舞いを定量し、随意努力下での張力発揮時の筋線維の長さ変化やモーメントアーム長変化を明らかにしたもので、身体運動科学の分野における意義は非常に大きいものがある。従って、伊藤雅充君により提出された本論文は、東京大学大学院課程による学位 (学術) の授与に相応しいと内容と判定した。