

論文審査の結果の要旨

論文提出者 氏名 山内 潤一郎

ヒトの身体運動は、原動機としての骨格筋の動的特性と、筋活動を調節する神経系の機能に強く支配される。エンジンやモータなどの人工的な原動機の動的特性は一般に、負荷として作用する力と、原動機の発生する速度の関係で表されることから、筋についても同様の関係が古くから調べられてきた。特に、A.V.Hill (1938) は、動物から摘出した骨格筋を用い、等張力性条件のもとで筋が発生する力と短縮速度の間関係を調べ、この関係が直角双曲線で近似されることを示した(力—速度関係)。この双曲線で近似される力—速度関係は、ミオシン分子とアクチンフィラメントの相互作用のレベルで決定されることから (Ishii et al., 1997)、基本的にすべての筋で成り立つものと考えられている。また、ヒト生体内の筋運動においても、例えば肘屈曲運動などのように単純な運動(単関節動作)では、力—速度関係は、筋単体の場合と同様の直角双曲線で近似されることが示されている。一方、実際の身体動作の多くはこのような単純な動作ではなく、複数の関節と筋が同時にかかわる複合関節動作である。このような複合関節動作の動的特性は、おそらく関連する個々の筋の特性の単純和として表せるものではなく、個々の筋の解剖学的位置や、個々の筋の活動を調節する神経系の機能が関与することで、筋単体がもつ特性とは大きく異なったものとなる可能性がある。しかし、主に技術的な問題から、複合関節動作の動的特性を厳密な力学的条件下で調べた研究はきわめて少ないのが現状である。本研究は、新たに開発した「サーボ制御式膝・股関節伸展ダイナモメータ」を用い、ヒト生体内での複合関節動作の動的特性とそのメカニズムを調べ、さらにこの装置によって得られるデータをどのように一般的な筋機能の測定やエクササイズプログラムの作成に応用できるかを示したものである。

本研究で使用したダイナモメータは、従来単一筋線維を対象として行われてきた“force clamp”法の原理をヒト生体内での測定に応用したものであり、フィードバック機構により膝・股関節伸展筋力を任意の関数に固定するように動作速度を調節するものである。まずこの装置を用いて力—速度関係を調べるため、等尺性条件下での長さ—張力関係(脚長と踏力の関係)に基づいて、フィードバック制御のための力制御関数を決定した。この操作により、最大筋力に対する相対的筋力を、脚長によらず常に一定に保つように制御することが可能となった。このように厳密な条件下(等張力性条件)で複合関節動作の動的特性を調べた研究は本研究が初めてである。得られた力—速度関係は、直線できわめてよく近似され、骨格筋単体や単関節動作で見られ双曲線型の力—速度関係とは大きく異なる様相を呈した。また、同様の直線的な力—速度関係は、膝・

股関節伸展動作のみならず、別途開発した「リカレント型サイクルエルゴメータ」を用いたペダリング動作の解析によっても得られた。

そこで、力—速度関係がこのように直線状になるメカニズムについて、筋の電気的活動の測定、筋の電気刺激の両面から調べた。膝・股関節伸展動作に関わる7つの主動筋から表面筋電図を導出し、その時間当たり積分値から筋活動量を推定したところ、力発揮の大きな領域では膝伸筋の活動が抑制され、逆に力が小さく速度が高い領域では股関節伸筋の活動が抑制されることがわかった。これらの結果から、個々の筋の力—速度関係の単純和は双曲線になるものの、力の大きな領域と力の小さな領域の双方で、筋活動の抑制により速度が低減する結果、直線に近い力—速度関係となることが示唆された。次に、この可能性を検証するために、股関節伸筋である半腱様筋の活動を電気刺激により増強した場合の効果調べた。その結果、電気刺激の効果は被検者に依存し、低負荷での速度が上昇する場合と、逆に低下する場合に分かれた。また本来半腱様筋の活動レベルが高い場合には電気刺激により速度が低下し、逆の場合には速度が上昇する傾向が見られた。半腱様筋は、股関節伸展と膝関節屈曲の作用を併せ持つ二関節筋であることから、その過度の活動は膝伸展に対する内的負荷となってしまうものと考えられた。以上の結果から、膝・股関節伸展動作が直線状の力—速度関係を呈するメカニズムに、複数の主動筋の活動調節機構が関わっていることが判明した。特に、二関節筋である半腱様筋については、その活動が高すぎても低すぎても速度の低減が起こることから、低負荷領域での速度発揮には高度の巧緻性が要求されることが示唆された。

このように力—速度関係が直線で近似されれば、低負荷での複数の測定から、最大筋力 (F_{max})、無負荷最大速度 (V_{max})、最大パワー (P_{max})などを外挿により推定することが可能である。そこで本研究では、このような利点を高齢者の筋機能評価やトレーニング効果の判定などに応用するための多様な基礎的測定を行った。まず、等張力性条件下での膝・股関節伸展筋力発揮時には、従来から一般的に行われている等尺性最大筋力測定の場合に比べ、動作中の血圧上昇が少ないことを実証した。その上で、横断的測定により、 F_{max} 、 V_{max} 、 P_{max} などの加齢変化を調べ、 F_{max} が加齢に伴い著しく低下するのに対し、 V_{max} は加齢の影響をほとんど受けないことなどを示した。また、高齢者を対象とした2年間の長期筋力トレーニングの結果、初期の1年間で主に F_{max} が増加し、2年目に V_{max} が増加することを示した。これらの成果はいずれも、新しい測定方法によって得られた新規の知見とみなすことができる。

以上のように本研究は、厳密な力学的条件下でのヒト複合関節動作の動的特性を明らかにし、またその測定・評価法を、高齢者の筋機能測定など多方面に応用できる可能性を示した点で高く評価される。したがって、本審査会は博士(学術)の学位を授与するにふさわしいものと認定する。