

論文の内容の要旨

ダイナミックな身体運動における筋腱複合体の役割

－肘屈曲における負荷重量と予備緊張の影響－

氏名 若山章信

緒言

ヒトの身体運動、特に瞬発的な運動では、筋は一般的に最大下での予備緊張状態から筋収縮を開始する。なぜなら、多くの筋は完全にリラックスした状態ではなく、重力の影響下で身体の姿勢保持や道具の保持のために予め活動(予備緊張)しているからである。例えば、スクワットジャンプの静止姿勢での膝や股関節の伸展筋群、あるいは、砲丸投げの準備動作での砲丸を保持する肩関節伸展筋群などである。

筋腱複合体のパフォーマンスに対する予備緊張の影響として、正の効果である中枢神経系からの刺激および活動水準の高揚、そして直列弾性要素の貢献、負の効果である筋長の短縮に由来する筋出力の低下等が予想される。しかし、筋の特性研究の中で、予備緊張という概念は定性的には用いられても、その効果を定量した研究は少ない。また、筋腱複合体のパフォーマンスは伸張・短縮といった筋自体の収縮条件からは深く研究されているが、負荷重量の違いが筋腱複合体の特に直列弾性要素の挙動に及ぼす影響も同様に明らかにされているわけではない。

本研究の目的は、負荷重量および予備緊張が短縮性肘屈曲運動における仕事とパ

ワーに及ぼす影響を、筋腱複合体 (MTC) を収縮要素 (CC) と直列弾性要素 (SEC) に分けたモデルから検討することである。なお、被験者は、健康な体育系女子大学生 10 名であった。

1) 筋腱複合体の逆ダイナミクスモデル

本研究では、逆ダイナミクスによる MTC, CC および SEC の諸変量計算モデルを作成した。なお、主要な肘屈曲筋である上腕二頭筋、上腕筋および腕橈骨筋の 3 筋の解剖学的データより、1 本の MTC モデルを構築した (図 1: 被験者平均)。

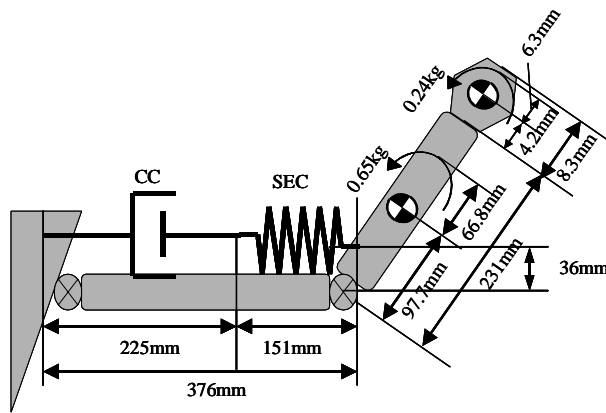


Fig 1. Model of MTC and rotating part of the arm.

2) 筋腱複合体に及ぼす負荷重量の影響

1kgw から 5kgw までの重量負荷について、PT0% MVC (: 随意最大張力 (MVC) に対する予備緊張割合

(PT%), この場合 CC 不活動状態) から急激な短縮性肘屈曲を行わせ、負荷重量の違いが MTC, CC および SEC のパワーおよび仕事量に及ぼす影響を検討した。その結果 (図 2), 肘関節 60 度から 90 度 (CC 長変化量平均 21.2mm) の間では、重量負荷に関わらず CC パワーおよび SEC パワーの絶対値に差はなく、負荷重量との相関関係も認められなかった。また、それぞれの MTC パワーに対する貢献率は、CC: 93% および SEC: 7%, MTC の仕事量に対する貢献率は CC: 110% と SEC: -10% で、やはり負荷重量の違いによる差はなかった。しかし、MTC, CC と SEC のそれぞれの仕事量の絶対値には重量負荷による差が認められ、また、負荷重量の増加に対し MTC, CC および再利用された SEC 仕事は有意な正の相関関係を、貯蔵された SEC の仕事は有意な負の相関関係を示した。ただし、再利用される仕事と比べ貯蔵される SEC 仕事の割合が多くなり、今回の動作区間においては CC の仕事が MTC の仕事に反映されない内的仕事 (SEC を伸張させる仕事) に消失されていったといえる。ただし、なお、肘屈曲中に SEC に蓄えられた弾性エネルギーは約 50% が再利用された。

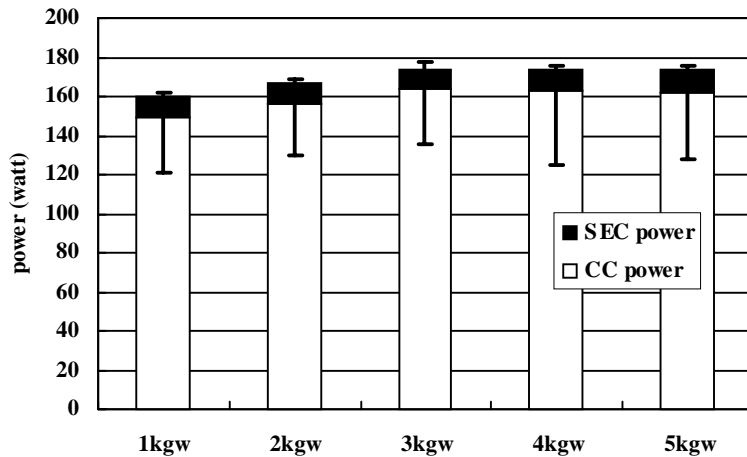


Fig 2. CC and SEC power contributions for MTC power at the elbow angle of 85 deg.

関節角度が規定された場合、MTC 長の変化量には重量負荷による影響はない。そして、SEC の伸張・短縮量すなわち弾性エネルギーの貯蔵・放出（再利用）量を決定するのはCCの発揮張力である。したがって、重

量負荷が軽ければCCの短縮速度は高まるものの、力-速度関係からCC発揮張力は高まらず、結果としてSECの伸張量（弾性エネルギーの貯蔵量）は少なく、SECの貢献は小さい。一方、負荷重量が重ければ、CCの発揮張力は高まり、SECの伸張量（弾性エネルギーの貯蔵量）は大きい、CC短縮速度が高まらず（CC発揮張力が下がらず）、結果としてSEC短縮量（弾性エネルギーの放出）は少なく、やはりSECの貢献が小さくなる。このことから、CCの発揮パワーが最大速度（負荷ゼロ）と最大張力（速度ゼロ）発現時を下限に、上に凸の2次曲線を描くと同様に、SECの発揮パワーも2次曲線を描き、負荷重量による差が生じると予想した。しかし、SECパワーだけでなくCCパワーにおいても、2次回帰での有意な相関関係はみられなかった。この理由として、負荷重量の幅（1kgwから5kgw）が狭かったことが考えられた。幅広く負荷重量を設定できなかった理由は、6kgw以上の負荷重量では挙上できない被験者が複数いたためである。各被験者の最大パワー発揮の至適負荷重量（平均3kgw程度）を保持するトルクは40%MVC程度であり、6kgwの負荷重量は平均80%MVC程度であるが、被験者によっては6kgwが100%MVC近くなり、肘60度屈曲位では関節角度の正弦に比例するモーメントアームが小さくなるため、実際には挙上不能となった。また、前腕部の重量や慣性を考えれば、負荷重量0kgwにあっても発揮張力は0Nにはならず、MTCパワーやSECパワーも0wattとならないことがあげられる。

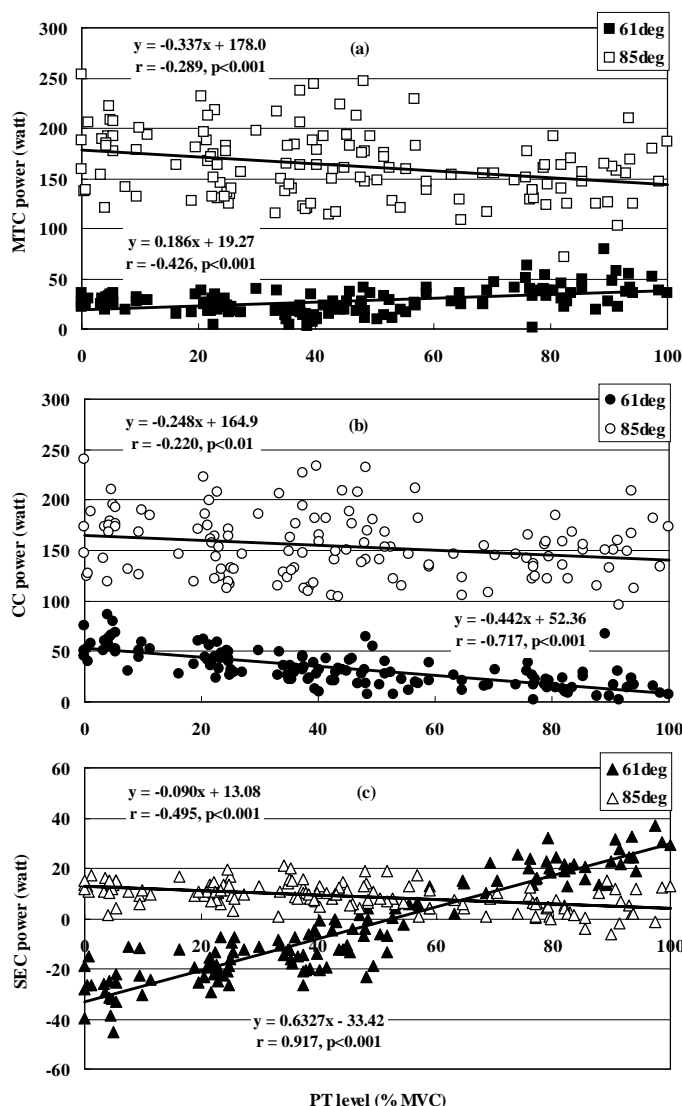


Fig 3. The relationship between PT level and MTC, CC and SEC power.

3) 筋腱複合体に及ぼす予備緊張の影響

予備緊張の影響について PT 0% MVC から PT 100% MVC まで、最大パワー発揮の至適負荷において検討した。その結果、これまでに指摘されてきた SEC の役割 (弾性エネルギーの放出) は MTC パワーに対し短縮開始後のごく初期にのみ正の効果を示し、CC に対して予備緊張は負の効果を示した (図 3 黒マーク, CC パワーは負相関にあるも SEC・MTC パワーは正相関)。そして、PT レベルに由来する CC パワーの低下は、張力減衰に起因していた (図 4)。このように、負の効果が見られる原因として考えられる① CC の CC 長・CC 短縮速度一力関係、②運動単位の動員

数および動員される運動単位の種類、③神経系の抑制、のいずれも等尺性・短縮性の両条件下で否定された。残された要因として、CC の短縮履歴による張力の減衰が考えられた。なお、短縮履歴による張力減衰についてのメカニズムは、現在のところ十分に明らかにされていないが、最近の報告では主に 2 つの説が有力である。一方の説は、ミオシン・アクチンオーバーラップゾーンの歪み等によるサルコメア長変化など、筋の幾何学的変化 (geometry changes) である。他方は、 Ca^{++} の感受性の低下によるクロスブリッジの連結の乖離等、細胞内の化学的転換 (intracellular chemical shifts) である。

予備緊張の影響が MTC のパフォーマンスに対し正の効果のみとした先行研究に対

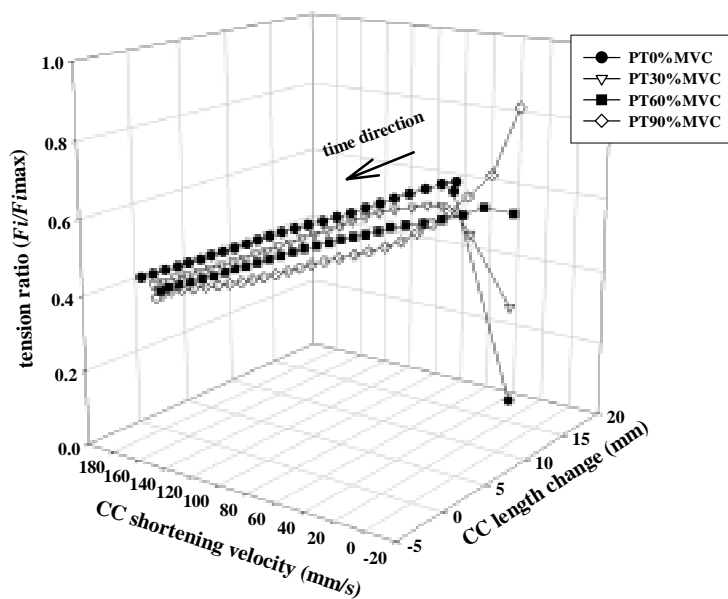


Fig 4. CC length and shortening velocity - tension ratio relationships for several PT levels.

し、本研究では負の効果を示した。この理由として、労作計の違いが考えられた。すなわち、先行研究では等速性筋力測定器が用いられたが、この種の測定器では回転部分の重量と慣性モーメントは非常に小さく、また負荷がかかるまでの「あそび」もあるため、張力発揮に対し即座に角度変化が起こる。このため、測定速度が高い程、筋の活動水準あるいは張力レベルは高いレベルに達せず、この部分で貯蔵された弾性エネルギーの大部分が放出されてしまう。それに対し、本研究のように重量負荷を用いた短縮性収縮では、負荷となる部分の重量と慣性を加速させるために張力は高いレベルに達する。すなわち、等速性測定器と比べ屈曲開始時の CC 短縮速度は遅く、張力は高いため、弾性エネルギー放出のタイミングが等速性筋力測定器よりも遅延したといえる。

生体筋の自然な(等張性の)特性については、CC 長(または筋長)とその短縮速度を統一した実験を行うことは極めて困難である。しかし、多くの日常活動やスポーツ活動においては、負荷重量(体重や道具)はあらかじめ決められている。また、姿勢についてもある程度決められた形がある。それゆえ、本研究の結果は予備緊張の発生する自然な条件での筋腱複合体の現象として、張力やパワー、仕事量の減衰が起こることを示唆しているといえる。