

論文審査結果の要旨

論文提出者： 黒川 貞生

本論文 “Functional significance of muscle-tendon complex during human jumping” (和訳：「ヒトの跳躍運動における筋・腱複合体の機能的意義」) は、超音波 B モード断層法を用いて、ヒトの跳躍運動中の筋・腱複合体 (MTC) の動態を計測する事から、身体運動における筋束 (筋線維) と腱組織の機能的役割を明らかにした研究であり、身体運動の分野における多くの新しい知見をもたらした。

本論文は以下のようにまとめられる。

(1) 「スクワットジャンプ中の筋束および腱組織の動態と機能」を明らかにするために、健康な成人男性 8 名を被験者とし、スクワット姿勢からの最大努力の垂直跳び (SQJ) を行わせ、腓腹筋内側頭における筋形状 (筋束長および羽状角) を超音波 B モード測定装置により測定した。Grieve ら (1978) の方法により MTC およびモーメントアームの長さ変化を算出した。これらのパラメータを用いて、MTC、筋束および腱組織の機械的パワーと仕事量を算出した。その結果、Phase-I (-350~-100ms: 0ms=toe-off) では MTC 長は一定であったが、筋束長は 26% 短縮し、これにより腱組織は 6% 伸張した (直立時の各パラメータに対する変化量の相対値)。一方、phase-II (-100~0ms) では、MTC 長は 5.3% 短縮したが、筋束の長さ変化は僅かであった。つまり、phase-II における MTC 長の短縮は主に腱組織の短縮によって生じていた。また、腱組織は急激に短縮し、その最大短縮速度は筋束のその 2.6 倍であった。ジャンプ運動中の筋束長から推定したサルコメア長は、プラト一部から上行脚の上部にわたっており、力発揮に有利な条件で機能していることが示唆された。Phase-II で身体重心をさらに加速するためには足関節の高い角速度と大きな関節トルクが要求される (Bobbert et al., 1986)。筋の力-速度特性からするとこの 2 つの要求は相反するが、筋束が至適長付近で、かつ等尺性収縮により張力を発揮することにより、また引き伸ばされた腱組織が急激に短縮することにより MTC はこの要求をみたす事が出来ることが明らかとなった。Phase-I ではゆっくりと筋束が収縮し、これにより腱組織が伸張され弾性エネルギーを蓄積し、phase-II では腱組織が急激に短縮し予め蓄積された弾性エネルギーを短時間でリリースし、腱組織はエネルギーの re-distributor であると共に power amplifier として機能していると考えられた。

(2) 「反動を用いたジャンプ中の筋束および腱組織の動態と機能」を明らかにするために、実験 1 と同様の方法を用いて、反動を用いた垂直跳び (CMJ) を最大努力で行わせ、MG の筋束長および羽状角を実測し、腱組織の長さ変化を推定した。その結果、身体重心の下降相 (-800~-250msec) で MTC は伸張されず、1.6% の短縮が認められた。また、筋束の伸張は全く認められず、逆に 23% 短縮し、これにより腱組織は 2.2% 伸張された。身体重心の上昇相は MTC の長さ変化に基づいて up phase-I (-250~-100msec) と up phase-II (-100~0msec) の 2 相に分けることができた。up phase-I では MTC 長は一定であったが、筋束長は更に 20% 短縮し、これにより腱組織はさらに 4.4% 伸張された。up phase-II では MTC 長は 5.3% 急激に短縮した。しかし筋束長の変化はわずかで準等尺性収縮により張力を発揮していた。MTC の急激な短縮は主に腱組織の短縮により生じていた。反動動作に相当

する下降相において MTC の伸張は認められず、腱組織に蓄積された弾性エネルギーは僅か 1J であった。これまでの研究により、反動動作を用いることによって跳躍高が増加することが報告されている (Komi & Bosco, 1978)。しかし反動動作によって蓄積された弾性エネルギーは、少なくとも MG では、僅かであった。反動動作による跳躍高増加に対して、contractile machinery の potentiation と伸張反射の貢献が指摘されている (Ettema et al., 1990)。しかし、本研究の結果において、筋束の伸張が全く認められなかったことから、この両者の貢献は MG では殆ど無いと考えられた。up phase-I と up phase-II の筋束および腱組織の動態は反動を用いない SQJ の phase-I と phase-II のそれらの動態と類似しており、ヒトの MG では、ジャンプ運動中、筋束は power generator として機能し、腱組織は redistributer および power amplifier として機能することにより、より高く跳ぶために要求される MTC の高い機械的パワーが発揮できたと結論を下した。跳躍高の増加には他の筋が貢献していることが示唆された。

(3) 「ドロップジャンプ中の筋束および腱組織の動態と機能」を明らかにし、Stretch-Shortening Cycle (SSC) を伴う身体運動における機械的パワーおよび機械的効率向上のメカニズムについて検討するために、健康な成人男性 8 名を被験者とし、実験 1 および 2 と同様の方法を用いて、台高 20cm からのドロップジャンプ (DJ) 中の筋束および腱組織の動態を捉えた。その結果、DJ 中、touchdown に続く背屈相 (-200~100msec) で MTC は 4.0%伸張された。しかるに、筋束は 10.6%短縮し、腱組織は 6.8%伸張された。背屈相で、筋束が外力に屈せず僅かに短縮できたことにより、身体が有する力学的エネルギーが効率よく腱組織に蓄積(7.6J)された。この弾性エネルギーの 76%は続く底屈相(-100~0msec)において短時間でリリースされ、これは MTC の正仕事量の 76%であった。また、屈曲相では筋束の伸張は認められなかったため、筋紡錘の伸張に由来する伸張反射および contractile machinery の potentiation による力の増強の可能性は低いと考えられる。SSC 運動で機械的パワーあるいは仕事量が増強するメカニズムとして、腱組織の Stretch-Shortening が生じ、これに起因する弾性エネルギーの蓄積および再利用が主に貢献していることが明らかとなった。SSC 運動で効率が向上するメカニズムは、MTC が伸張されつつ腱組織がより stiff な状態で筋線維が力発揮を行うため、その短縮速度がより低く抑えられるためであろうと考えられた。DJ 中に得られた腱組織の弾性特性は SQJ 中に得られたそれよりも stiff であった。この原因として、DJ における腱組織の伸張速度がより高いことにより、粘性の影響がより強く現れたためと考えられた。

以上のように、黒川 貞生君の論文は、ヒトの跳躍動作における筋・腱複合体の動態を捕らえ、筋線維および腱組織の長さ変化、機械的パワーおよび仕事を定量し、身体運動発現のメカニズムを明らかにしたものであり、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、黒川 貞生君により提出された本論文は、博士(学術)の学位授与に相応しい内容と判断した。