

II. 文献研究

1. 筋一腱複合体の動態に関する研究

ヒトのlocomotionは、複数の関節の働きによって動きを成している。骨に付着している骨格筋によって発揮された張力が、腱や韌帯を介して外部に伝達され、関節トルクを生みだす (Roy and Edgerton, 1992)。したがって、関節トルクは、筋および腱の解剖学的な構造に影響されると考えられる。

Hill (1938) の古典的な筋モデルによれば、筋一腱複合体 (Muscle-Tendon Complex) は、収縮要素 (Contractile Element; CE) である筋線維と直列弾性要素 (Series Elastic Element; SEC) である腱組織が直列に付着している。

従来、筋一腱複合体の構造に関しては、ヒトの生体内での筋線維や腱の動態を直接測定することが不可能であったことから、屍体を解剖することによって研究が行われてきた (Friedrich and Brand, 1990; Cutts, 1988; Wickiewicz et al., 1983)。また、実際のlocomotion中の筋一腱複合体の動態と力、速度およびパワーなどの機能的な要素との関係については、直接的なデータを得ることはできず、バイオメカニクス的な手法を用いて間接的に推定するしかなかった。

しかし、近年、超音波断層法 (Ultrasonography)、コンピューター連動断層撮影法 (Computed Tomography; CT)、核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging; MRI)などを用いて、生体内における筋一腱複合体の構造に関する研究が多く行われるようになってきた。

Griffiths (1991) は、超音波断層法を用いて、ネコの腓腹筋内側頭の等尺性

収縮における筋線維の発揮張力と筋線維長との関係について検討した。その結果、張力の増大とともに筋線維は最大で28%まで短縮すると報告した。このことは、筋線維が張力を発揮した時、その張力によって筋に直列に付着している腱が引き伸ばされていることを示唆するものであると考えられる。

また、Ito et al. (1998) は、超音波断層法を用いて、ヒトの生体内の前脛骨筋の筋束長、羽状角および腱の伸張について検討した。その結果、ヒトの筋の等尺性収縮において、筋線維によって発揮された張力が腱に吸収され、腱が伸張すると報告した。

これらの研究結果は、等尺性収縮中の筋一腱複合体全長の長さが一定であっても筋線維は短縮し、腱は伸張していることを示唆するものであると考えられる。

さらに、関節角度変化と筋一腱複合体の動態との関係、そして筋力発揮時の羽状角の変化などを明らかにした研究がある。

Fukunaga et al. (1996) は、超音波断層法を用いて、ヒトの下腿中央部の前脛骨筋の深部腱盤 (aponeurosis)、筋束、筋膜などを映像化し、関節角度変化と筋一腱複合体の長さ変化との関係について検討した。その結果、ゆっくりした動作速度で足関節の屈伸を繰り返すだけでは腱の伸張は起こらないことから、腱の移動と関節角度変化はほとんど同期化していると報告した。

Fukunaga et al. (1997) は、ヒトの外側広筋の超音波断層像について膝関節角度を一定にした状態 (50° 屈曲位、完全伸展を 0° とする) で、安静時と10%最大随意収縮 (Maximum Voluntary Contraction; MVC) 時の筋束長を比較した。その結果、筋束長は安静時に比較して収縮時には短縮され、その短縮量は膝関節が伸展位 (40° 以内) において、顕著である傾向を示したと報告した。ま

た、膝関節角度の変化にともなう羽状角 (Pennation angle) の変化も検討した。その結果、羽状角は膝伸展にともない増加する傾向を示したと報告した。これらのこととは、等尺性収縮時の筋線維長の短縮と羽状角の増加は、伸展位においてより強くなることを示唆するものであると報告した。

Kawakami et al. (1993) は、羽状角と筋の生理学的断面積との関係を明らかにするために、超音波断層法を用いて、ヒトの生体内における羽状角を測定した。その結果、筋が肥大するにつれて羽状角は大きくなると報告した。

Rutherford and Jones (1992) は、超音波断層法を用いて、ヒトの生体内における外側広筋および中間広筋の羽状角を測定した。その結果、超音波断層法は、羽状角を測定するのに用いることはできるが、羽状角と力の発揮能力との関係を説明することはできないと報告した。

市之瀬ら (1997) は、ヒトの生体における膝関節伸展筋 (外側広筋) について静的筋活動時の筋束長および羽状角の変化を、超音波断層法を用いて検討した。その結果、膝関節角度を100° (屈曲位) から10° (伸展位) まで、15° ずつ変化させ、各関節角度ごとに安静時からMVCまで力発揮レベルを変化させた際の筋束長は力発揮レベルが増加すると短縮し、羽状角は力発揮レベルが増加するにつれて大きくなる傾向を示したと報告した。

また、跳躍運動中の筋-腱複合体の動態を明らかにした研究もみられる。

Kurokawa et al. (1997) は、超音波断層法を用いて、垂直跳中の腓腹筋の筋線維長の測定を行った。その結果、垂直跳の動作開始の前半局面では、筋は短縮性収縮を行い、この時の張力によってアキレス腱が引き伸ばされ、その後に筋線維が等尺性の収縮を行うことによって伸張されたアキレス腱が短縮して垂直跳が行われると報告した。

これらの研究は、ヒトの骨格筋における構造的要素と機能的要素の相互関係を明らかにするのに役立つものであるが、実際の動きと関連づけて筋-腱複合体の動態を推定するには注意が必要であることを示唆するものと考えられる。

2. アキレス腱の発揮張力に関する研究

ヒトのアキレス腱は、下肢の機能的な側面において重要な1部分を占めている。アキレス腱は、下腿三頭筋における腱としての働きをし、弾性的特性を有している (Alexander and Bennet-Clarke, 1977)。腱の弾性的特性は、さまざまな身体運動中の力発揮に対する効率に影響を与える。また、解剖学的な位置関係を考慮するとアキレス腱を含んだ下腿三頭筋は、さまざまな locomotionにおいて衝撃負荷を受ける最初の部位である。したがって、動きのパフォーマンスおよび障害のメカニズムを明らかにするためには、アキレス腱張力に関する情報は重要である。

(1) アキレス腱張力の測定方法

アキレス腱張力の推定方法には、大きく間接法と直接法が用いられている (Komi et al., 1992a)。

間接法は、筋力および腱張力に関する情報を、筋骨格モデルを用いて計算する方法として定義することができる。直接法は、外科的な手法を用いて、ヒト (Fukashiro et al., 1995; Komi, 1990; Komi et al., 1987; Komi et al., 1984a) または動物 (Roberts et al., 1997; Gregor et al., 1988; Whiting et al., 1984; Peres et al., 1983;

Walmsley et al., 1978) の腱にトランスデューサーを移植し、発揮張力を直接測定する方法として定義することができる。最近では、optic fibre を用いることによって、簡易的にアキレス腱の発揮張力を測定しようとする試みがなされている (Nicol et al., 1995)。以下にKomi et al. (1990) によって行われた実験方法について説明する。

実験前に、対象となる被験者の足のX線撮影を行い、最も最適なトランスデューサーを選択した。そして、被験者はうつ伏せの状態になり、局所麻酔下で移植を行った。移植は、腱の側面に対して行われた。ストレンゲージからのワイヤーを含んだケーブルは、皮膚の下を通して、トランスデューサーの約10cm上の外側に出した。そして、ケーブルをアンプと接続することによって手術は終了した。手術終了後、約3時間の間に、歩行、ランニング、ジャンプ、自転車運動を行わせ、アキレス腱の発揮張力と同時に、地面反力、EMGを記録した。

(2) 各種locomotionにおけるアキレス腱の発揮張力

Burdett (1982) は、ランニング中の足関節のバイオメカニクス的なモデルを考案し、足関節の力発揮を推定した。その結果、ピークの関節合力は、体重の約9.0から13.3倍の範囲内であり、ピークのアキレス腱の発揮張力は、体重の5.3から10.0倍の範囲内であったと報告した。

Kamen (1985) は、11名の被験者を用いて、アキレス腱反射に対する等尺性および等張性運動の影響を検討した。試技条件は、それぞれ、中強度 (50% MVC) および低強度 (25% MVC) の等尺性および等張性運動であった。その結果、低強度の等尺性運動において、ピーク力の到達時間および反射張力 (ト

ルク) の低下が観察され、中強度の等尺性運動においては、反射張力の改善がみられたことから、アキレス腱の反射は、運動のタイプおよび強度によって、向上または低下すると報告した。

Gregor et al. (1987) は、1名の男子を用いて、サイクリング中のアキレス腱を含んだ下腿三頭筋の張力および筋長の変化を測定した。アキレス腱に移植したトランスデューサーを用いて、発揮張力を直接測定し、3つの異なった負荷でのサイクリング運動中における、ヒラメ筋と腓腹筋の筋長の変化およびEMGを検討した。その結果、ピークのアキレス腱の発揮張力は、1kpから3kpの負荷の範囲で、それぞれ489Nから661Nまで増加すると報告した。

Gollhofer et al. (1992) は、各種の垂直跳を用いて、下腿三頭筋の筋一腱複合体の機械的な負荷および各筋の神経支配特性を明らかにし、足関節における運動量および対応するモーメントアームから、アキレス腱の発揮張力を推定した。その結果、アキレス腱の発揮張力および下腿三頭筋の長さ変化は、伸張負荷に対して高い感受性をもっていると報告した。

Fukashiro et al. (1995) は、最大努力でのスクワットジャンプ (Squat Jump; SJ)、垂直跳 (Counter Movement Jump; CMJ) およびホッピング運動中の筋・腱システムの弾性的な働きを、生体内におけるアキレス腱の発揮張力を測定することによって明らかにした。その結果、ピークのアキレス腱張力および下腿三頭筋による機械的な仕事は、それぞれ、SJでは2233N および34J、CMJでは1895N および27J、ホッピング運動中には3786N および51J であると報告した。さらに、アキレス腱において貯蔵される弾性エネルギーの量は、SJ、CMJ およびホッピング運動における下腿三頭筋の仕事の、それぞれ23%，17% および34% であると報告した。

一方、弾性エネルギーの貯蔵と腱の張力との関係を比較検討した研究もある。

Bobbert et al. (1986a) は、ジャンプ中のヒトの下腿三頭筋の筋-腱複合体の働きに関する情報を、簡単なモデルを用いて明らかにすることを試みた。その結果、垂直跳における下腿三頭筋の働きについて、伸張局面の最後では、大きな角速度とトルクが必要であることから、筋よりも腱の収縮速度の方が速く、また、弾力性のある腱がなくてはこの条件を満たすことができないと報告した。

さらに、Bobbert et al. (1986b) は、ジャンプパフォーマンスに対する足関節伸展パワーを3つに分け、筋線維による出力が30%，腱状構造の弾性エネルギーによるものが45%，上位の関節が発揮したパワーの伝達によるものが25%であり、ジャンプパフォーマンスにとって弾性による反動とパワーの伝達が重要であると報告した。

ヒトを対象にしてアキレス腱の発揮張力を、生体内において正確に測定することは、方法論的な問題があるために、これまでそれほど多くの研究は行われていなかった。しかし、アキレス腱を含んだ生体内における力の測定は、骨格筋のメカニズムおよび運動制御の理解に重要であることを考慮しなければならないと考えられる。

3. 各種 locomotion における腓腹筋の機能に関する研究

ヒトの locomotion は、多数の関節が複合的に働くことによってその動きを成

している。関節によって発揮されたトルクは、関節にまたがっている主働筋および拮抗筋によって発揮された力によって決定される。1つの筋は、またがっている関節の数によって、単関節筋と2関節筋に分類される。それぞれの機能については、主に、単関節筋は主運動局面における仕事の產生に関与し、2関節筋は近位から遠位の関節にパワーを伝達することによって、連続的な身体セグメントの回転運動を効率よく重心運動に転換するのに重要な役割を果たしているといわれている (Jacobs et al., 1996; van Ingen Schenau et al., 1992; Jacobs and van Ingen Schenau, 1992; Gielen et al., 1990; Bobbert and van Ingen Shenau, 1988)。

Bobbert et al. (1986b) は、CMJ中の膝関節から足関節への腓腹筋によるパワーの伝達を検討した。この研究では、Hillの筋モデルにKinematicsデータだけを入力し、CMJ中の足底屈筋のシミュレーション実験を行うことによって、腓腹筋のパワー伝達による足関節まわりの仕事の貢献度を推定した。その結果、足関節まわりの仕事の25%が、腓腹筋による膝関節から足関節へのパワー伝達によるものであると報告した。

Jacobs et al. (1993) は、ランニングにおける単関節筋であるヒラメ筋と2関節筋である腓腹筋の機能について比較検討した。その結果、ヒラメ筋は、大きな伸張が生じる局面ではあまり活動をしなかったが、伸張局面の後半で最大の等尺性張力の値に近似した大きな張力を発揮したことから、エネルギーの蓄積において重要な役割を果たしていると報告した。一方、腓腹筋は、外力ベクトルの調節および弾性エネルギーの利用において重要な役割を果たしていると報告した。

Jacobs et al. (1996) は、ジャンプおよびスプリントにおいて、2関節筋によるパワーの伝達が関節まわりの仕事に対してどの程度の貢献をするのか検討し

た。その結果、腓腹筋によるパワーの伝達は、足底屈筋における総仕事に対して、ジャンプでは25%，スプリントでは28%の貢献であったと報告した。これらの結果から、2関節筋の活動は、爆発的な脚伸展中における近位から遠位へのパワー伝達に貢献すると報告した。

上述の研究から、2関節筋は、近位から遠位の関節へのパワー伝達において重要な役割を果たしているという仮説が得られた。しかし、2関節筋がある課題に対するパフォーマンスを向上させるか否かが問題になる。

Pandy and Zajac (1991) は、2関節筋である腓腹筋を単関節筋であると仮定した。このモデルを最適化した結果、パフォーマンスには大きな影響を与えないことから、腓腹筋の活動は単関節筋であるヒラメ筋の活動と大きな差がないと結論づけた。

以上の研究結果から、膝関節から足関節へのパワー伝達において重要な役割を果たしている腓腹筋の活動レベルまたは収縮動態を検討することは、ある課題に対する神経筋活動を評価するうえで重要な手がかりが得られるものと考えられる。

4. 伸張－短縮サイクル運動に関する研究

(1) 伸張－短縮サイクル運動

筋が短縮する前に伸張する複合的な筋の収縮運動を、伸張－短縮サイクル (Stretch - Shortening Cycle; SSC) 運動と呼んでいる (Komi and Buskirk, 1972)。伸張と短縮を複合した時の筋活動は、短縮性だけの筋活動と比較して、短縮局

面において大きな力およびパワー発揮が可能になる。SSC運動によって爆発的なパワー発揮ができる理由として、予備緊張によって筋を活性化させ、短縮局面の開始時点における力の立ち上がりを速くできること (Bobbert et al., 1996; Svantesson et al., 1994; 高松ら, 1991; Chapman and Sanderson, 1990; Mungiole and Winters, 1990; Jaric et al., 1985; van Ingen Schenau, 1984; 金原ら, 1964a, 1964b)。直列弾性要素に貯蔵した弾性エネルギーを短縮局面において効果的に再利用できること (Svantesson et al., 1991; Hull and Hawkins, 1990; Komi and Bosco 1978; Asmussen and Bonde-Petersen, 1974)、活動筋を伸張させることによって伸張反射を誘発し、筋stiffnessを高められること (Dietz et al., 1978b; Melvill Jones and Watt, 1971a; 1971b) などがあげられる。これらは、いずれも、伸張局面前の活動筋のタイミングよい活性化と伸張局面から短縮局面への素早い移行 (Bosco and Komi, 1979b)、および活動筋の伸張速度および筋長の変化に大きく依存しているとみられている (Aura and Komi, 1986; Cavagna et al., 1968)。

SSC運動における筋-腱複合体の神経系の制御機構を明らかにすることは、ヒトの基本的な locomotion における動きの制御、機械的な出力および効率を理解するのに役立つものであると考えられる。

(2) 伸張-短縮サイクル運動における力発揮

SSC運動の有効性の1つとして、伸張性収縮を行うことによって筋の活動水準を高め、短縮局面における力の立ち上がりを速くし、仕事量の増大をもたらすことがあげられる。最大随意筋収縮 (Maximal Voluntary Contraction; MVC)において筋力が最大値に達するまでには、ある程度の時間を要する。例えば、脚の伸展において最大力の90%に達するまでには300から500msの時間がかかる (

Bobbert and van Ingen Schenau, 1990a; Thomas et al., 1988; Jaric et al., 1985; Komi, 1979)。つまり、可能な限り速く動作するように指示を与えたとしても、筋力が最大に達するまでには時間を要することになる。もし、短縮性収縮が、力が立ち上がってすぐに開始された場合、筋-腱複合体の短縮距離の一部は最大下の力で移動したことになり、発揮された力は最大下であると考えられる。このような現象は、短縮性収縮の開始前に等尺性 (Bobbert and Harlaar, 1993; Bobbert and van Ingen Schenau, 1990a)、または伸張性の筋収縮を行うことによって避けることができる。

Cavagna et al. (1965) は、カエルの摘出筋を用いた実験を行った。筋に電気的な刺激を加え、十分に興奮させた状態で、一定の速さで筋を引き伸ばし、その後に一定の速度で短縮させた。その結果、すでに引き伸ばされている筋を同じ速度で短縮させるよりも仕事量が大きいと報告した。

Chapman and Caldwell (1985) は、短縮性運動中の機械的出力が、反動動作の有無にどのように影響されているかを比較検討した。この研究では、前腕の回外運動が用いられた。その結果、反動動作を伴った場合がそうでない場合よりも大きな速度を得ることができ、それは運動の初期段階において顕著であることを報告した。

Bobbert et al. (1996) は、CMJおよびSJにおける異なる筋の活動レベルが関節モーメントおよび関節まわりの仕事に及ぼす影響について検討した。この目的を達成するために、CMJおよびSJ中のKinematics, Kinetics およびEMGを記録し、それを筋骨格モデルに入力した。シミュレーション実験の結果、SJと比較してCMJにおいて高い跳躍高が得られた理由として、伸張性収縮が短縮局面の開始前に筋の活動レベルおよび力発揮を高いレベルにまで高めることが可能で

あつたことに起因するものであると報告した。

van Ingen Schenau (1984) は、SSC運動における短縮性の力の発揮および正の仕事の増大に対するメカニズムとして、筋の弾力性および収縮要素における力の増強 (potentiation) をあげ、爆発的な動きにおける反動動作の重要性を主張した。

Jaric et al. (1985) は、9名の体育専攻学生を用いて、最大努力の膝伸展運動を、膝屈曲の反動動作を伴う場合と伴わない場合で行わせた。両運動はさまざまな負荷条件下で行われ、その際の膝伸展筋の力-速度曲線を求めた。その結果、膝屈曲の反動動作を伴う膝伸展運動時の角速度は、反動動作を伴わない場合よりも大きいと報告した。

Svantesson et al. (1994) は、22名の健康な女性を用いて、足関節の底屈力に対する伸張性および等尺性の筋活動の効果を検討した。その結果、主動作に先立った筋活動は、より大きな短縮性のトルク発揮を可能になると報告した。しかし、短縮性の力の増強は、等尺性よりも伸張性の筋活動において有意に大きい値であった。このように大きな短縮性のトルク発揮を可能にする理由として、筋の予備活動、特に伸張性収縮を行うことによる筋の活動レベルの向上をあげた。

以上のこととは、SSC運動の遂行能力を高めるためには、短縮局面の開始前に、筋の活動レベルおよび力発揮を高いレベルまで高め、力の立ち上がりを速くすることが重要であることを示唆するものである。

(3) 伸張-短縮サイクル運動における弾性エネルギーの貯蔵および再利用の役割

SSC運動における仕事の増大をもたらす要因の1つとして、収縮要素に直列に付着した弾性要素の役割があげられる。これは、伸張局面中、活動筋が伸張されることによって生じた機械的エネルギーの一部分が、直列弾性要素に貯蔵され、短縮局面において再利用されるという理論である。このメカニズムは、弾性強化 (elastic potentiation) とも呼ばれている (Komi, 1992b)。多くの研究者は、この弾性強化が、短縮局面に產生される仕事の増大をもたらすと主張している。

弾性強化に関する古典的な研究として、Cavagna et al. (1968) は、カエルの摘出筋 (Cavagna et al., 1965) と同様に、ヒトの肘屈曲運動についても伸張効果を調べ、伸張効果による仕事量は、動作速度の増加に伴って大きくなることを示した。このように仕事量が大きくなる理由として、筋の収縮機構の活性化および筋の伸張時に貯蔵された弾性エネルギーの解放の2つの要因をあげた。

筋の弾性強化の特徴を明らかにしようとする試みは、Cavagna et al. (1968) による摘出筋などを用いた基礎研究から、走および跳動作を用いた全身運動へと発展していった。

Asmussen and Bonde-Petersen (1974) は、19名の被験者を用いて、SJ、CMJおよび0.233, 0.404および0.690mの台高からのドロップジャンプ (Drop jump; DJ) の3種の跳躍運動を行わせた。そして、跳躍運動中のヒトの骨格筋における弾性エネルギーの貯蔵および再利用に関して検討した。その結果、CMJはSJよりも高い跳躍高が得られ、その原因の1つとして弾性エネルギーの利用をあげている。しかし、DJでは、ある高さの台高まで跳躍高が増すことから、最も高い跳躍高を得るために適切な伸張負荷の強度が存在すると報告した。

このことは、弾性エネルギーの貯蔵および再利用が効率よく機能するために

は、伸展筋に対する適度な伸張速度および伸張量が重要であることを示唆するものと考えられる。

Thys et al. (1975) は、2名の被験者を用いて、膝をまっすぐ伸ばした状態で足首だけの最大下の連続跳躍を行わせた。その結果、負の仕事の60%が弾性エネルギーとして貯蔵されると報告した。

Bosco et al. (1982c) は、機械的効率に対する連続跳躍の膝曲げ動作の大きさの影響を、5名の被験者を用いて検討した。1分間の運動中、伸展筋群からのEMGを記録すると同時に、エネルギー消費の指標として呼気が採集された。その結果、跳躍運動における膝曲げ動作が小さい場合には正の仕事の50%，膝曲げ動作が大きい場合には正の仕事の30%が、それぞれ負の仕事において貯蔵された弾性エネルギーの再利用によって行われていると報告した。また、伸張中の筋の長さ変化およびstiffnessと関係している弾性エネルギーの解放は、仕事の機械的効率を調節するにあたって重要な役割を果たしていると報告した。

伊藤ら (1987) は、成人男子3名を用いて、瞬発的な足底屈による3種類の連続跳躍を行わせ、下腿三頭筋における機械的仕事と筋放電量の定量的測定を通してエネルギー授受の面から反動効果を検討した。その結果、筋放電量がエネルギー消費に比例し、無反動跳躍の機械的効率を25%と仮定して反動跳躍における弾性エネルギーの利用量を計算した場合、反動跳躍における正の仕事の約80% (全力) ~70% (軽い反動) が、弾性エネルギーの利用によるものと報告した。また、つま先だけの連続跳躍において、反動効果は、神経入力の増加よりむしろ、筋および腱における弾性エネルギーの利用によるものであると報告した。

小島 (1983) は、反動動作を伴った下肢の屈伸運動のエネルギー消費量と下

肢の屈曲運動のみのエネルギー消費量を測定し、正の仕事のエネルギー消費量を運動全体のエネルギー消費量と負の仕事のエネルギー消費量の差として求めることにより、反動動作を伴った下肢屈伸運動における弾性エネルギーの役割について検討した。その結果、反動動作を伴う運動の正の仕事における弾性エネルギーの利用率は、60~70%であったと報告した。

Huxley and Simmons (1971) は、直列弾性要素が、腱だけではなく、ミオシンフィラメントからアクチンフィラメントに向かって出ているクロスブリッジ内に存在する可能性を提示した。

この仮説から、Bosco et al. (1981a) は、伸張効果のメカニズムを簡単なモデルを用いて説明している。すなわち、筋が短く非常に素早く伸張された場合には、弾性エネルギーは、腱だけではなくクロスブリッジにも貯蔵され、引き続く短縮に利用することができるが、筋が長い距離をゆっくり伸張された場合には、クロスブリッジの分離が生じ、弾性エネルギーの利用ができなくなると報告した。つまり、クロスブリッジに弾性エネルギーを貯蔵し、再利用するためには、速い伸張速度、大きい伸張性の力および短いカップリングタイムが、重要な要因になると考察している。

Bosco and Komi (1979a) は、各種跳躍運動における負荷および動作様式を変化させ、反動効果を比較検討した。跳躍運動としてSJ、CMJおよび膝曲げ角度の浅いDJと深いDJを行わせ、その際の力-速度関係を求めた。その結果、膝曲げ角度の浅いDJにおいて、最も有効に弾性エネルギーが利用されていると報告した。

しかし、近年、van Ingen Schenau et al. (1997) は、SSC運動における弾性エネルギーの役割に関して違った見解を示している。彼らは、短縮局面の仕事量

が、直列弾性要素に貯蔵された弾性エネルギーではなく、短縮局面の開始時点（踏切中点）の力によって影響されることを強調している。これは、Bobbert et al. (1996) によるシミュレーション実験の結果から裏付けられる。彼らは、股関節伸展筋だけによって股関節トルクが発揮される単純化されたモデルを用いた。そして、短縮局面前の筋への刺激レベルを2倍にし、踏切中点における力と弾性エネルギーの量に関して検討した。その結果、貯蔵された弾性エネルギーの差が大きくなっているにもかかわらず、產生された仕事量にはほとんど差がないと報告した。このことは、短縮局面における仕事量を決定するのは、筋の活動レベルの差であり、弾性エネルギーの貯蔵および再利用ではないことを示唆するものであると考察した。このような弾性エネルギーの再利用に関する知見は、Chapman and Sanderson (1990) およびAnderson and Pandy (1993) の研究結果と一致している。

Chapman and Sanderson (1990) は、反動動作による仕事の増大が弾性エネルギーに依存しないことを、直列弾性要素をもっていないと仮定した筋モデルを用いることによってさらに説得力のある主張をしている。

また、Anderson and Pandy (1993) は、弾性組織の筋活動に対する役割を明らかにすることを目的に、CMJおよびSJの最大跳躍高に対する適切な制御機構を解明するためのモデルを用いた。そして、以下のような課題について分析した。

- ①弾性組織は、CMJおよびSJ中、骨格筋に伝達された総エネルギーに対してどれぐらいの貢献をしているのか。
- ②伸展筋は、CMJ中に伸張性収縮が行われた場合、SJよりも大きな力を発揮し、多くの弾性エネルギーを貯蔵するのか。

③CMJとSJでは、弾性エネルギーの貯蔵および利用方法に違いがあるのか。

④貯蔵された弾性エネルギーは、跳躍高を向上させるのか。

彼らは、この課題を明らかにするために、それぞれのジャンプの主な特徴（筋活動パターン、各セグメントの動作、床反力、跳躍高、踏切時間）を模したモデルを確立した後、モデルの全ての作動器の力および収縮速度の時系列を用いて、直列弾性要素、並列弾性要素、収縮要素と同様に腱がなした仕事を計算した。その結果、CMJおよびSJでは、全ての弾性組織は、ほとんど同じ量のエネルギーを骨格に伝達すると報告した。その理由の1つとして、CMJではより多くの貯蔵されたエネルギーが熱として失われるためであると推察した。また、それぞれのジャンプにおけるエネルギーの貯蔵方法も異なり、CMJでは弾性組織に貯蔵されたエネルギーは、位置エネルギーに由来するのに対し、SJでは筋の収縮要素が腱や直列弾性要素を引き伸ばすことに起因していると報告した。また、モデルにおける腱の弾力性を大きくすると、貯蔵および利用される弾性エネルギーは大きくなるが、筋の収縮要素によって伝達されるエネルギーは減少することから、跳躍高はいずれのジャンプでも同じであったと報告した。このことは、貯蔵および利用される弾性エネルギーはジャンプパフォーマンスよりも、ジャンプの効率を高めることを示唆しているものと考察している。

このように弾性エネルギーの役割に関しては、今まで意見の一致がみられないのが現状である。しかし、弾性エネルギーは、SSC運動中の動きの制御、機械的な出力および効率を理解するうえでは重要な要因であると考えられる。

弾性エネルギーの貯蔵と筋stiffnessとの関係を比較検討した研究がみられる。

Cavagna (1970) は、弾性エネルギーと筋stiffnessとの関係を検討し、弾性エネルギーの貯蔵には筋stiffnessが重要であると報告した。

また、筋stiffnessは、筋力の増加にともなって高まるために、発揮された力のレベルを反映するものであると考えられてきた (van Ingen Schenau, 1984)。

以上のこととは、SSC運動を効率よく遂行するためには、弾性エネルギーが大きく貢献していることが考えられる。また、その弾性エネルギーの貯蔵に影響する要因として、伸張から短縮局面への素早い切り替えおよび筋stiffnessがあげられる。

(4) 伸張－短縮サイクル運動における伸張反射機構の役割

SSC運動における仕事の増大をもたらす要因の1つとして、活動筋に対する伸張負荷が長潜時反応 (Melvill-Jones and Watt, 1971a; 1971b) と同時に、脊髄反射を誘発し (Dietz and Noth, 1978a)，筋stiffnessを調節することによって短縮局面における筋刺激を最大限まで高められることがあげられる。

Melvill-Jones and Watt (1971a, 1971b) は、足首だけの連続ホッピング中の腓腹筋のEMGを比較検討した。その結果、伸張局面における腓腹筋の筋活動は、あらかじめプログラムされており、引き続く短縮局面のキック時には、伸張反射が効果的に働くと報告した。

また、山崎ら (1980) は、律動的なジャンプ動作中の下腿三頭筋の伸張反射活動の有無およびヒラメ筋と腓腹筋の筋活動の相違を比較検討した。被験者には健康な成人男子4名を用い、EMGはヒラメ筋、腓腹筋内側頭および前脛骨筋から導出した。その結果、ジャンプ動作の着地相でヒラメ筋に同期性の筋放電が観察されたが、腓腹筋ではそのような現象はみられなかつたと報告した。ま

た。台上でジャンプ動作を実施している際に、被験者に予告なく、台が取り除かれた場合、それまで出現していたヒラメ筋の同期性信号は認められなかつたと報告した。これらのこととは、ヒラメ筋の同期性の筋放電は前もってプログラムされた筋放電ではなく、伸張によって誘発されたことを示唆するものであると報告した。上述の結果は、律動的なジャンプ動作では、あらかじめプログラムされた筋放電および伸張反射活動が重要な役割を果たしていることを示唆しているものと考えられる。

Bosco and Komi (1979b) は、1名の男子バレーボール選手を用いて、SJ, CMJおよびDJを行わせた。その結果、CMJはSJよりも高い跳躍高を得ることができ、そのパフォーマンスの向上は、伸張反射による筋の活性化に起因すると報告した。

また、Bosco and Komi (1981a) は、14名の鍛練された競技者を用いて、SJおよびCMJを行わせた。ここでも反動動作を伴うCMJが、SJよりも平均力およびパワー出力において、それぞれ66%および81%の向上がみられ、それらの絶対値は、伸張局面における伸張速度に大きく依存していると報告した。その有効性は、活動筋の素早い伸張による筋紡錘からのIa感覚ニューロンを介した伸張反射の増大によるものであると報告した。

Bosco and Komi (1981b) は、10名のバレーボール選手を用いて、膝関節角度が 27° から 90° の範囲内にある最大努力のSJおよびCMJを行わせた。その結果、SJおよびCMJのパフォーマンスに差がみれら、その原因として、反動動作によって伸張反射の増大をもたらし、そのことによって筋が活性化されたことをあげている。

以上のこととは、反動を用いた垂直跳が、反動を用いない垂直跳よりも高い跳

躍高を得ることができ、その効果は、伸張反射による筋の活性化の増加によるものであることを示唆している。

Bosco et al. (1982b) は、3名のトレーニングされた競技者を用いて、膝関節角度が90°からのSJ, CMJおよび5種の台高からのDJを行わせ、その際のEMGを外側広筋、内側広筋および大腿直筋から導出した。その結果、DJにおける伸張局面のEMG活動は、SJよりも非常に大きかったと報告した。したがって、DJにおける高いパフォーマンスは、伸張反射の強化の貢献によるものであり、SSC運動中に効果的に働くことを強調している。

Bosco and Viitasalo (1982a) は、6名の成人男子に、SJ, CMJおよび5つの台高からのDJを行わせ、その際の右脚の大臀筋、大腿直筋、外側広筋、内側広筋および腓腹筋からのEMGを比較検討した。その結果、伸張反射による筋の活性化が、筋の種類によって異なり、また、それは個人差が大きいと報告した。特に、DJにおける接地前の予備緊張状態の程度が、伸張反射による筋の活性化に大きく影響すると報告した。

SSC運動における予備緊張の重要性に関しては、以下に示したようにいくつかの報告がなされている。

阿江ら (1979) は、跳における主動作の開始に先立つ予備緊張が、踏切動作や跳躍高に及ぼす影響を検討し、踏切における効果的な予備緊張のしかたを、実際の動きと関連づけて検討した。その結果、DJにおいて、踏切脚を着地に先立って伸展しながらややかえ込むようにして着地すると、伸筋群に予備緊張が生じるとともに、大きな力を出せるようになると報告した。したがって、大きな衝撃力を伴うような跳の踏切では、接地前の空中局面における踏切脚の先取り動作を行うことによって、筋を予備緊張させておくことが重要であると考え

られる。

Aura and Viitasalo (1989) は、一般的な跳躍運動のバイオメカニクス的および神経生理学的な特性を検討した。ホッピング、DJ、走高跳を含む5種目の異なる跳躍運動を行わせ、その際の地面反力、膝関節角度およびEMGを、踏切時間および膝の関節角度をもとにして、接地の80ms前から接地時までの予備緊張局面、伸張局面および短縮局面に分けて記録した。その結果、着地前の筋放電量が、踏切局面中の各パラメーターと高い相関がみられたことから、跳躍動作における予備緊張の重要性を報告した。

高松ら (1991) は、肘屈曲運動における等尺性および伸張性の予備緊張が、主動作の短縮性活動の速度に及ぼす影響を、主動作の負荷重量および変位と関連づけて検討した。その結果、予備緊張の効果は、主動作開始時点における筋の興奮水準の高さ、主動作前半における弾性エネルギーの再利用と損失エネルギーの減少、主動作前半から中盤にわたる収縮エネルギーの抑制と促進、などのpositiveおよびnegativeな効果の複合されたものによって招来されていると報告した。

図子ら (1995a, 1993, 1992) は、各種スポーツ選手を対象に、典型的なSSC運動であるDJを行わせた。その結果、素早く力を発揮するには、踏切直前の筋の予備緊張が重要であると報告した。また、DJをトレーニング手段として用了場合には、着地に対する予測と踏切前動作を改善することによって、パリティックなSSC運動の遂行能力を高められることを報告した。

Kyröläinen and Komi (1995) は、パワー系および持久系競技者を用いて、DJを行わせた。そして、その際の下肢の各筋群からEMGを導出し、神経・筋システ

ムの制御における差を検討した。その結果、脚伸展筋の高い予備緊張および引き続く接地の伸張局面における活性化は、ジャンプ運動において優れたパフォーマンスをもたらし、パワー系の競技者は、SSC運動の予備緊張局面において、脚伸展筋をより速く活動させる能力をもっていると報告した。

これらのことから、予備緊張は、SSC運動のパフォーマンスに影響する要因の1つであり、特に、跳躍運動の踏切時における伸張反射を効果的に利用するのに極めて重要であると考えられる。

以上のこととは、SSC運動の有効性には、伸張反射が大きく影響していることを示唆しているものであると考えられる。さらに、伸張反射の感受性は、バリスティックな運動条件下で一層高まるものと考えられる。

(5) 伸張一短縮サイクル運動におけるトレーニング手段としての有効性

SSC運動を利用したジャンプトレーニング（プライオメトリックス）は、より大きな筋力およびパワー発揮を可能にすることが認められている（Komi et al., 1982）。SSC運動を利用したトレーニングは、筋組織における代謝的な需要量を減らすことによって機械的効率を高められるだけではなく（Kyröläinen et al., 1991; Aura and Komi, 1986），反復的なSSC運動を行うことによって筋 stiffness の強化および適応が可能になる。筋力およびパワートレーニングの目的は、筋 stiffness の改善であり、爆発的なタイプの力発揮を可能にする。それは、筋紡錐からの長さ変化に対するフィードバックの影響によるものであり、トレーニングによって強化が可能である。これは、より大きな伸張負荷に対する筋の耐性を高め、機械的効率とともにパワーの改善をもたらす。

Kyröläinen et al. (1991) は、SSC運動を用いた長期間のパワートレーニングが、骨格筋の機械的な効率に及ぼす影響について検討した。その結果、長期間のパワートレーニングは、より高い負荷に対する耐性および優れた反動動作能力を筋に生じさせ、さらには代謝的な需要の低下および機械的効率の増加を引き起こすと報告した。このメカニズムとして、伸張局面の反射抑制を修正させることによって、最適な筋stiffnessをもたらすことを可能にしたためであると説明した。

以上のこととは、SSC運動を用いたトレーニング手段は、爆発的な反動動作を行うために必要な筋stiffnessを有効に改善することが可能であることを示唆していると考えられる。