

## ヒトの運動における反動動作の効果

小嶋 武次

東京大学教養学部

Effects of a Counter - movement on Human Concentric Motions

Takeji Kojima

Dept. of Sports Sciences, College of Arts and Sciences,  
The University of Tokyo

### Abstract

The purpose of this paper was to review previous research which has been done to clarify some effects of a counter - movement (CM) on human concentric motions in terms of work done and power developed. I reviewed research on the effects of CM on vertical jumps, jumps done by only the plantar flexor muscles and several other movements. Research which has used mathematical models to clarify mechanisms which improve performance of movements with CM was also reviewed. Some unsolved problems were discussed.

## 緒言

この小論の目的は、ヒトの身体運動において、反動動作がそれに続く主動作の仕事量や仕事率に及ぼす影響についてなされた研究を概観することである。

Cavagna ら (13) によるカエルの摘出筋とヒトの肘屈曲運動を用いた研究がきっかけとなり、現在まで数々の反動動作の効果に関する研究が報告されてきた。

日常の運動における反動動作の効果には、直列弾性要素に貯えられたエネルギーの再利用 (8, 13, 14, 29), 筋固有の特性である伸張による筋力増強 (13, 16, 35, 36), 伸張反射による筋力増大 (8, 18, 23, 39), 主動作開始時に既に筋の活動水準が高いこと (14, 15, 16, 24, 35, 41) などの複数の要因が貢献していると考えられている。ヒトの運動では、摘出筋を用いて実験をする場合のように、これらの要因のなかからそのひとつだけを取り出してその影響を調べることが極めて困難である。また、これらの要因と関連の深い器官の多くは非線形的な特性を持っている。そのため、反動動作の有無による運動成果の差は比較的容易に求まるが、運動成果の差を生じさせるメカニズムを明らかにすることは難しい場合が多い。これまでの研究の多くは、多関節運動である垂直跳を用いて行われてきた。そして、この多関節運動を用いたことは、このメカニズムを明らかにするのをより遅らせたと思われる。

複数の要因が複雑に関与している現象のメカニズムを明らかにするために、数学モデルは有力な手段となる。Cavagna ら (14) が垂直跳を用いて反動動作の効果調べてから20年経過した1991年、オーストラリアのパーズで開催された第13回バイオメカニクス国際会議において、垂直跳の数学モデルを用いた反動動作の効果に関する研究が発表された (3)。この発表に対して、反動動作の効果に関する研究に深く関わってきた研究者達から幾つかの批判がなされた。しかし、数学モデルの製作に関する知識は十分とは言えずとも、かなり蓄積されてきた。したがって、幾つかの多関節運動について反動動作による運動成果増大のメカニズムが明らかにされるのは、そう遠くないことであろう。

以下では反動動作の効果に関して、垂直跳を用いた研究と垂直跳以外の運動を用いた研究について別々に見ていく。次にモデルを用いた研究について見る。そして最後に、これらの研究の幾つかの問題点について考えてみたい。

## 垂直跳を用いた研究

Cavagna ら (13) は、十分に興奮している筋を外部から力を加えて一定速度で強制的に伸張し、次いで間を置かずと同じ速度で短縮させると、一定の筋長で十分に興奮している状態から短縮させたときよりも仕事量が大きくなることを、カエルの摘出筋とヒトの肘屈曲運動を用いて明らかにした。この研究の目的は、跳躍や走で反動動作を用いたときに身体の弾性をどのくらい利用できるかを調べることであった。しかし、日常行われる反動動作を伴った運動は、必ずしも彼らが行った実験条件とは一致しない。つまり日常の運動では、筋の短縮速度は多くの場合一定ではない。また、反動動作中の筋の活動水準は一定ではなく、漸次上昇する。そこで Cavagna ら (14) は、あらためて垂直跳を用いて反動動作の効果に関する研究を行った。そして、この研究は Asmusen ら (5) によって引き継がれ、さらに主として Komi と Bosco のグループによって展開された。

緒言でも述べたが、垂直跳は多関節運動であり、反動動作の効果には複数の要因が関与している。そのため、必ずしもこれらの研究の全てが反動動作の効果のメカニズムの解明に貢献したわけではなかった。

これらの一連の研究にたいしてなされた批判は以下の通りである。

第1に、反動動作の有無により、主動作開始時点の筋の活動水準が異なる。つまり反動動作を用いない場合は、主動作開始時点の筋の活動水準は丁度体重の保持に必要な活動水準と一致している。一方、反動動作を用いた場合は、身体の下方向への速度を減速させる必要上、体重の保持以上の水準が要求される。そのため、反動動作を用いない場合は主動作開始直後の筋の活動水準は低く、また運動全体を通じての平均的な活動水準も低くなる。したがって、反動動作を用いない場合は運動成果も小さくなるというものである (15, 37)。

Cavagna ら (14) や Asmussen ら (5) はこの点を考慮に入れていた。しかし、それに続く Komi と Bosco のグループは、反動動作の有無による跳躍高や平均パワーなどの差を直接弾性エネルギーの利用率の差と関連づけた。そのため、彼らによるほとんどの研究 (8-12, 29, 39) は批判の対象となった。

第2に Komi と Bosco のグループは、弾性エネルギーが貯えられる場所をサルコメア内のクロスブリッジと考えた (10, 12)。しかし、その部分の弾性は極めて小さい (2, 20)。したがって、そこに貯えられるエネルギー量は、反動動作の有無による垂直跳の仕事量の差を説明できるほど多くはなかった (37)。

第3の点は、運動範囲の規定についてである。たとえば、一定の範囲内で脚の屈曲が深いほど垂直跳の跳躍高は大きい (21)。しかし、佐川ら (31) が両様式の跳躍の主動作開始時点の腰、膝、足の各関節角度を等しくして、それらの関節回りの筋群の貢献度を明らかにするまで、運動の範囲の規定はなされていないか、その時点での膝関節角度のみを等しくするという研究がほとんどであった。そのため、腰関節または足関節の運動範囲の差が反動動作の有無による運動成果の差に影響を及ぼしている可能性があった (6, 15, 31)。

第4の点は、身体のどの部所が反動動作の効果に関与しているかが不明な点であった (15)。垂直跳には主に腰、膝、足の各関節回りの筋群が関与しているが、指標としてよく用いられてきたのは跳躍高 (5, 14, 29, 39)、平均パワー、平均床反力など (8, 10, 11, 12) の全体的な運動成果や膝関節の動き (10, 11) であった。

その後これらの論議と関連して、反動動作の有無による垂直跳中の各関節回りのトルク発揮の違いが明らかにされた (22, 31)。また、運動範囲を以前よりも厳密に規定した実験が垂直跳 (31) やその模擬動作 (6) を用いて行われた。

Fukashiro and Komi (22) は、垂直跳について反動動作の有無により腰、膝、足の各関節回りで発揮されたトルクの違いを明らかにした。それによれば、反動動作を用いると用いない場合より腰関節回りのトルクだけが大きかった。Komi と Bosco のグループは、反動動作の効果は膝関節伸

展筋群の筋組成 (12) や膝関節が屈曲から伸展へ移る速さ (カップリングタイム, 10) などと関連づけようとしていたので、Fukashiro ら (22) にとってもこの結果は意外であったに違いない。結局 Fukashiro ら (22) は、垂直跳における反動動作の有無による運動成果の差は、弾性エネルギーの再利用の差よりもむしろ腰関節伸展筋群による仕事量の差によることを示唆した。

Komi と Bosco のグループは垂直跳の運動成果の指標として、仕事量と密接に関連している跳躍高の他に、仕事量や床反力を垂直跳に要した時間で除した平均パワーや平均床反力なども用いた。これらの指標は仕事量よりもむしろ筋の発揮したパワーと密接な関係にある。したがって、少なくとも平均パワーや平均床反力の違いについては、各関節回りに貯えられた弾性エネルギーの再利用の差も関係しているであろう。

ところで、Fukashiro ら (22) の研究では運動範囲の規定があいまいであり、被験者も1名であったこともあり、最終的な結論は佐川ら (31) の研究を待つことになった。

佐川ら (31) は垂直跳の主動作開始時点での腰、膝、足の各関節角度を反動動作を用いた場合と用いない場合とでそれぞれ等しくし、各関節回りの仕事量を求めた。その結果、反動動作の有無によりコンセントリックな運動の開始時点での筋力については各関節で差がみられたものの、仕事量については Fukashiro ら (22) と同様に腰関節回りのみに差がみられた。この差は、反動動作を用いたときの仕事量の約12%であり、3つの関節回りの仕事量の総和の約5%に相当していた。そして佐川ら (31) は、反動動作を用いた方が各関節回りに貯えられた弾性エネルギーは多いにもかかわらず、膝及び足の両関節回りでそれぞれ仕事量に差がみられなかったことから、Fukashiro ら (22) と同様の見解に達した。しかし、コンセントリックな運動の開始時点での筋力差は、仕事量に差のみられた腰関節回りで最大であったのも事実である。また、膝及び足の両関節で余分に貯えられた弾性エネルギーの行方についての疑問も生ずる。この疑問の一部は、数学モデルを用いた研究によって解決されることになる。

### 垂直跳以外の運動を用いた研究

垂直跳以外の運動を用いた研究では、Cavagnaら(13)の等速の肘屈曲運動の他に、慣性負荷に対する上肢の伸展(7)、肘屈曲(28, 35, 38)、前腕の回外(16)、荷重負荷に対する肘屈曲(30)、膝伸展(24)、等速の膝伸展(34)、荷重負荷と身体を慣性負荷として用いた脚伸展(6)、足関節のみを用いた跳躍(23, 32, 41)などがある。これらの研究のうち、上肢の伸展と脚の伸展以外は単関節運動であった。そして、足関節のみを用いた跳躍の一部の結果(32)を除き、反動動作を用いた方が運動成果が大きかった。しかし、両様式での運動成果の差は様々である。例えば、仕事量の差は4%(6)から約70%(13)にまで広範囲にわたっている。

慣性負荷に対する前腕の回外運動では、反動動作中の負仕事(ネガティブワーク)量が増しても、主動作中の仕事量がほとんど増加しないことから、Chapmanら(16)は、反動動作が有効な点は主動作開始時点で既に筋の活動水準が高い点にあると結論した。また、Jaricら(24)も荷重負荷に対する脚伸展運動を用いて同様の結論に達した。

Chapmanら(16)や高松ら(35)は上肢の筋を用い、そして伊藤(23)は足関節伸展筋群を用いることにより、主動作開始時点の筋力が最大等尺性筋力より大きくなったことを観察している。これらの結果は強制伸張による筋力増強または伸張反射による筋力の増大が生じていたことをうかがわせる。前腕の回外筋群に対して強制伸張を行い筋力を増大させると、強制伸張終了後の等尺性の状態において、その筋力は伸張反射が有効な時間帯をはるかに越えて徐々に減少していった(36)。このことは、同様の運動を用いたChapmanら(16)の研究で少なくとも強制伸張による筋力増強があったことを推察させる。

Avisら(6)は垂直跳を模擬した、荷重負荷と身体を慣性負荷とした水平方向への脚伸展運動を用いて反動動作の効果を調べた。この研究方法の特徴は、多関節運動を用いたにもかかわらず、両様式の運動の範囲を厳密に同一にしたことである。また、彼らは反動動作を用いない運動において、主動作開始時点で既に筋に荷重負荷がかかっている方法(前荷重法)を用いた。そして、反動動作

を用いた場合の主動作開始時点での筋力は、最大等尺性筋力よりも小さかった。その結果、仕事量の差は最大でも4%以下であった。

Yamazakiら(41)によると、足関節の底屈のみを用いた跳躍運動(つま先ジャンプ)では、離地時の足関節角速度や滞空時間は主動作開始時点で発揮されていた筋力と密接な関係があったが、反動動作の有無には関係がなかった。つまり、ストッパーを用いて等尺性に筋力を発揮している状態から、ストッパーを解除(急速解放法)して跳躍をした場合と、つま先立ちの状態から反動動作を用いて跳躍をした場合、主動作開始時点の筋力が同じであれば、運動成果に差がみられなかった。彼らの結果は、反動動作が主動作開始時点の筋の活動水準と筋力を高めること以外に特別の役割を持っていなかったことを示している。この結果は、慣性車輪に対する肘屈曲運動を用いて得られた結果(28)と類似している。

Yamazakiら(41)の反動動作を用いたつま先ジャンプの跳躍高は、最大努力で行うつま先ジャンプの跳躍高より低く、反動動作の効果を十分に利用していない可能性があった(41)。

伊藤(23)によれば、最大努力で連続つま先ジャンプをしたときの仕事量は、反動動作を用いない立位時からのつま先ジャンプでの仕事量の約1.5倍に達した。反動動作を用いない跳躍に要する時間は0.18秒~0.20秒であり、垂直跳の場合に比べて短かった。したがって、反動動作を用いない跳躍の初期に筋の活動水準が低かった影響は、垂直跳の場合に比べれば大きいであろう。しかし、それとは別にここで興味深いのは、連続ジャンプ中の主動作開始時点で発揮された筋力が最大等尺性筋力の約1.5倍~2倍にも達したことである。カエルの摘出筋では、伸張の速度を適当に選ぶと、最大等尺性筋力の約1.8倍の力が発揮されることが知られている(19)。したがって、連続ジャンプにおいて筋が急激に伸ばされることにより、その収縮機構が活性化され、それが反動動作の効果となって現れたことは十分に考えられる。また、連続ジャンプ(23)やそれと類似した運動である短距離走の着地(18)に際して伸張反射が生じることが知られている。したがって、この反射も筋の活動水準を高めて跳躍高を大きくすることに貢

献したと考えられる。

なお、体操選手、陸上競技選手、一般人、水泳選手について、つま先ジャンプを用いて反動動作の効果について調べてみると(32)、その効果はこの順に小さくなっていった。また、水泳選手17名中7名は、反動動作を用いた方が跳躍高が小さかった。一方、反動動作を用いないときの跳躍高は体操選手が大きく、残りのグループ間で差はみられなかった。この結果は練習が反動動作の利用の仕方に影響を及ぼすことを示唆している。水泳選手が反動動作を上手に利用できない理由が、単に抗重力的な運動をする機会が一般人よりも少ないためなのか(32)、それとも水泳のある種の運動がそのような影響を及ぼすのか、大変興味深い問題である。

#### 数学モデルを用いた研究

Chapman ら(16)が指摘したように、貯えられた弾性エネルギーが再利用されるメカニズムは、数学モデルを用いると理解し易い。

Chapman(15)は、筋の強制伸張による筋力増強や伸張反射による筋力の増大が無くとも、主動作開始時点の筋の活動水準が高く筋力も大きければ、反動動作を用いた方が主動作開始直後のパワーや運動全体の平均パワーが大きいことを明解に示し、Cavagna ら(14)の示唆を裏づけた。

一方 Avis ら(6)は、前述した水平方向の脚伸展運動を単一の筋モデルを用いてシミュレートした。すると、動作範囲が同じであれば反動動作を用いた方が直列弾性要素がなした仕事量は多くなったが、逆に収縮要素がなした仕事量は少なくなった。そして、両要素の仕事量の和は反動動作を用いない場合のそれより最大でもわずか1%大きいだけであった。この理由は以下の通りである。つまり、反動動作を用いた方が主動作開始時点の筋力が大きいため、直列弾性要素もより伸張されて長くなっている。実験条件から、その時点での筋全体の長さは反動動作の有無によらず等しい。したがって、収縮要素は直列弾性要素が長くなった丁度その分だけ短くなっている。そして、反動動作を用いると、主動作開始直後の筋の活動水準が高いにもかかわらず収縮要素が短いことが原因となり、その時の収縮要素の仕事量は少なくなる。

彼らはこの結果から、動作範囲が同じであれば、反動動作中に貯えられた弾性エネルギーによる効果は収縮要素の短縮距離が短いことによりほとんど相殺されてしまうと考えた。

Avis ら(6)のシミュレーション結果では反動動作を用いても仕事量の増加は1%以下であった。しかしヒトの単関節運動を用いた結果では、例えば慣性負荷に対する肘屈曲運動(38)で11%~39%、足関節のみを用いた跳躍運動(23)で56%という値が報告されている。Avis ら(6)の実験では、反動動作を用いた主動作開始時点での筋力は最大でも最大等尺性筋力の77%であった。また、反動動作を用いない場合は前荷重法を用いたので、両運動様式におけるその時点での筋力差は、最大でも最大等尺性筋力の38%であった。そのため、主動作開始時点で貯えられていた弾性エネルギーの差は、他の多くの研究の場合に比べると少なかったと考えられる。また、筋の活動水準は実際には漸次上昇するが、彼らはシミュレーションに際して活動水準は運動開始後瞬時に最大に達すると仮定した。そのため、反動動作を用いない場合の収縮要素の仕事量が過大に算出されたと思われる。これらのことが、Avis ら(6)のシミュレーション結果で仕事量の差が少なかったことの理由の一部であると考えられる。

この点を明らかにするため、筆者は Avis ら(6)のモデルを用い、主動作開始時点の筋の活動水準を反動動作の有無によりそれぞれ最大と0としてシミュレーションを行った(未発表資料)。なお、活動水準の立上りは指数関数的(28)で、その時定数を0.065秒とした。その結果、Avis ら(6)のTable 2に相当する正仕事量( $W_{pos}$ )の反動動作の有無による差は最大で7.9%であった。また、彼らの用いた全条件の範囲では、その差の最大値は14.4%であった。これらのことから、コンセントリックな運動の開始時点に両様式の運動で筋力に大きな差がある場合は、反動動作中に貯えられた弾性エネルギーの主動作への効果は完全には相殺されないと言える。

Avis ら(6)の報告では、ヒトの脚伸展運動における仕事量の差は最大でも全仕事量の4%であった。また、佐川ら(31)の報告によれば、膝関節及び足関節回りの仕事量に両様式の跳躍で差

がみられなかった。これらのことは、コンセントリックな運動の開始時点での筋力差が比較的小さかったことで、その一部を説明できるであろう。

1991年12月に開催された第13回国際バイオメカニクス会議において、Andersonら(3)は8つの筋モデルを組み込んだ垂直跳の数学モデルを用い、反動動作の効果に関する研究を発表した。Avisら(6)の結果と同様に、反動動作を用いた方が収縮要素の仕事量は少なかったが、さらに跳躍高も低くなった。Andersonら(3)も活動水準をステップ関数を用いて近似していた。Avisら(6)の場合と同様に、このことが跳躍高を低くした理由のひとつであると考えられる。

### 研究上の問題点

#### 後荷重法と急速解放法

反動動作の効果のメカニズムを調べるため、最大等尺性筋力を発揮している状態からの急速解放による運動成果をその対照とすることが行われている(13, 35)。この方法による運動が対照とされたのは、主動作開始時点での筋の活動水準が随意的に最大であり、且つそれが以後の運動でも維持されるという仮定によっていると思われる。しかし、荷重負荷を用いた肘屈曲運動では、最大等尺性筋力の10%から60%に相当する負荷の範囲で、筋がリラックスしている状態からの運動(後荷重法)による肘屈曲速度の方が急速解放法によるそれよりも大きかった(25)。また、慣性負荷を用いた肘屈曲運動で後荷重法を用いた場合に、急速解放法の場合より筋の短縮速度と筋力の両方が同時に大きいと考えられる現象が観察された(35)。

これらの結果は、運動中の主動筋の活動水準は急速解放法を用いた場合の方が後荷重法を用いた場合より低かったか、または急速解放法を用いた方が拮抗筋の活動水準が高かったことを示唆している(26)。その理由は明らかではない。しかし、急速解放のタイミングが被験者に予期できなければ、拮抗筋の伸張反射が大きな影響を及ぼすことが考えられる(1)。また、急速解放法では静的な動きからバリスティックな動きにすみやかに移らねばならない。一方、反動動作を用いた場合には、一連の運動を通じてバリスティックな運動が可能である。この違いが運動中の筋の活動水準に

差をもたらす可能性も考えられる(17)。

以上のことを考慮すると、Cavagnaら(13)の報告にある、ヒトの肘屈曲運動での強制伸張により生じた余剰仕事の比  $\Delta W/W$  は、弾性エネルギーの利用や筋力増強の効果の観点からは過大評価されているかもしれない。また高松ら(35)の結果についても、同様のことが考えられる。なお、Yamazakiら(41)のつま先ジャンプを用いた研究では、反動動作を用いた場合と急速解放法を用いた場合で運動成果に差がみられなかった。彼らの場合、被験者自らが急速解放を行ったことが上述の2つの結果と異なった結果を得た理由のひとつかもしれない。

#### 動作前サイレントピリオッドの効果

Aokiら(4)は荷重負荷に対する肘伸展運動において、動作前サイレントピリオッドによって引き起される筋の強制伸張が主動作中の筋力発揮に及ぼす影響について論じている。彼らによれば、運動前半の筋力はサイレントピリオッドが生じた場合の方が大きく、それには弾性エネルギーの再利用も貢献しているという。

たしかに、主動作開始時点での筋力差はその後の直列弾性要素の動きに影響を及ぼし、筋収縮に違いをもたらす。しかし、それは筋力差が比較的大きいときだけである。彼らの場合、その値はおそらく最大等尺性筋力の1/100以下であった。したがって、彼らが観察した筋力増大の現象には、単なる弾性エネルギーの再利用よりもむしろ他の要因が大きく貢献していると考えられる。相関関係に基づく推定だけでなく、量的に裏付けられた因果関係が明らかにされるのが待たれるゆえんである。

#### 負荷の大きさと反動動作の効果

反動動作中に直列弾性要素に貯えられた弾性エネルギーが主動作中の仕事量に及ぼす影響は、負荷が小さく、運動が短時間に終了するほど大きい(13, 16, 35)。

Van Leemputteら(38)によると、慣性負荷に対する肘屈曲運動を用いた研究では、トレーニングの前後を通じて大きい負荷に対する肘屈曲運動の方が反動動作の効果は大きく、上述の結果とは逆の結果であった。彼らによれば、反動動作により増加した相対的な仕事量は運動中に観察された

筋力の最大値と密接な関係にあった。しかし、これらの筋力の算出にあたっては、前腕や装置の加速度の影響は考慮されていない。それを考慮すると、負荷の大きさの違いによるその筋力差は図示されている差よりも少なくなると考えられる。また、直列弾性要素に貯えられるエネルギーにも限度がある。したがって、彼らの場合、貯えられた弾性エネルギーの差よりも強制伸張による筋力増強や伸張反射の影響が大きかったとも考えられる。

ところで、筆者は小嶋(27)の肘屈曲モデルを一部改変して、Van Leemputteら(38)の用いた運動のシミュレーションを行った(未発表資料)。その結果、反動動作を用いることによる仕事量の増加を彼らの結果と同じく38%にするには、主動作開始時点の筋力を最大等尺性筋力より約70%増す必要があることが解った。上肢の筋についてこれまで報告された随意性の最大伸張性筋力は、最大等尺性筋力より15%~25%大きいだけである(33, 36)ので、この値がいかに大きいかわかるであろう。

van Leemputteら(38)の研究では、被験者の課題は運動終了時にはずみ車の回転速度を最大にするというもので、必ずしも運動中全期間を最大努力で行うというものではなかった。このことが、他の研究結果と異なる結果をもたらしたことに関係があるかもしれない。

#### 今後の課題

反動動作を用いた単関節運動で、主動作開始直後のパワーや運動中の平均パワーが大きくなる点に関し直列弾性要素が果す役割は、Chapman(15)により数学モデルを用いてほとんど解明されたといえる。一方、仕事量の増加に直列弾性要素の果す役割については、Avisら(6)による重要な指摘もあったが、いまだ十分に解明されたとは言えない。例えば垂直跳びで動作範囲が一定にもかかわらず反動動作の有無により腰関節回りの仕事量に差がある(31)ことは、Avisら(6)のシミュレーション結果からは説明不可能である。実際の運動をより近似するようなモデルを用いてのシミュレーションが、この点を解明する有力な手段となるであろう。

多関節運動において、反動動作の効果を生み出

す身体部所を特定することが重要なことをFukashiroら(22)や佐川ら(31)が垂直跳を用いて明らかにした。今後、運動の目的に沿った身体の使い方という文脈の中で、様々な多関節運動における反動動作の有効な使い方やその効果のメカニズムが明らかにされていく必要があるだろう。

#### 文 献

- 1) 赤沢堅造, 楠本秀忠, 藤井克彦: ヒト骨格筋の収縮力学定数の推定法。信学技法, 87:25-32, 1988.
- 2) Alexander, R. McN. and H. C. Bennet-Clark: Storage of elastic strain energy in muscle and other tissues. *Nature*, 265: 114-117, 1977.
- 3) Anderson, F. C. and M. G. Pandy: Elastic energy storage in vertical jumping. *Book of Abstracts for XIIIth International Congress on Biomechanics*, pp26-28, 1991.
- 4) Aoki, H., R. Tsukahara, and K. Yabe: Effects of pre-motion electromyographic silent in man. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 58: 426-432, 1989.
- 5) Asmussen, E. and F. Bonde-Petersen: Storage of elastic energy in skeletal muscles in man. *Acta Physiol. Scand.*, 91: 385-392, 1974.
- 6) Avis, F. J., H. M. Toussaint, P. A. Huijing, and G. J. van Ingen Schenau: Positive work as a function of eccentric load in maximal leg extension movements. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 55:562-568, 1986.
- 7) Bober, T., E. Jaskolski and Z. Nowacki: Study on eccentric-concentric contraction of the upper extremity muscles. *J. Biomechanics*, 13:135-138, 1980.
- 8) Bosco, C. and P. V. Komi: Potentiation of the mechanical behavior of the human skeletal muscle through prestretching. *Acta Physiol. Scand.*, 106:467-472, 1979.
- 9) Bosco, C., and P. V. Komi: Influence of aging on the mechanical behavior of leg extensor muscles. *Eur. J. Appl. Physiol.*,

- 45:209-219, 1980.
- 10) Bosco, C., P. V. Komi and A. Ito : Prestretch potentiation of human skeletal muscle during ballistic movement. *Acta Physiol. Scand.*, 111:135-140, 1981.
  - 11) Bosco, C., J. T. Viitasalo, P. V. Komi and P. Luhtanen : Combined effect of elastic energy and myoelectrical potentiation during stretchshortening cycle exercise. *Acta Physiol. Scand.*, 114: 557-565, 1982.
  - 12) Bosco, C., J. Tihanyi, P. V. Komi, G. Fekete and P. Apor : Store and recoil of elastic energy in slow and fast types of human skeletal muscles. *Acta Physiol. Scand.*, 116:343-349, 1982.
  - 13) Cavagna, G. A., B. Dusman and R. Margaria : Positive work done by a previously stretched muscle. *J. Appl. Physiol.*, 24:21-32, 1968.
  - 14) Cavagna, G. A., L. Komarek, G. Citterio, and R. Margaria : Power output of the previously stretched muscle. *Medicine and Sport*, vol. 6 : Biomechanics II, pp 159-167, Karger, Basel, 1971.
  - 15) Chapman, A. E. : The mechanical properties of human muscle. *Exerc. Sci. Rev.*, 13:443-501, MacMillan, New York, 1985.
  - 16) Chapman, A. E., G. E. Caldwell and W. S. Selbie : Mechanical output following muscle stretch in forearm supination against inertial loads. *J. Appl. Physiol.*, 59:78-86, 1985.
  - 17) Desmedt, J. E. and E. Godaux : Voluntary motor commands in human ballistic movements. *Ann. Neurol.* 5:415-421, 1979.
  - 18) Dietz, V., D. Schmidtbleicher, and J. Noth : Neuronal mechanisms of human locomotion. *J. Neurophysiol.*, 42:1212-1222, 1979.
  - 19) Edman, K. A. P., G. Elzinga and M. I. M. Noble : Enhancement of mechanical performance by stretch during tetanic contractions of vertebrate skeletal muscle fibres. *J. Physiol.*, 281:139-155, 1978.
  - 20) Ford, L. E., A. F. Huxley and R. M. Simmonds : Tension responses to sudden length change in stimulated frog muscle fibres near slack length. *J. Physiol.*, 269:441-515, 1977.
  - 21) Fukashiro, S., H. Ohmichi, H. Kanehisa, and M. Miyashita : Utilization of stored elastic energy in leg extensors, *Biomechanics VIII-A*, pp258-263, Human Kinetics Pub. 1983.
  - 22) Fukashiro, S. and P. V. Komi : Joint moment and mechanical power flow of the lower limb during vertical jump. *Int. J. Sports Med.* 8:15-21, Suppl., 1987.
  - 23) 伊藤章 : 下腿三頭筋のリバウンド効果, 昭和62年度日本体育協会スポーツ科学研究報告 No VII, プリオメトリック・リアクティブ筋カトレーニングに関する研究, 一第1報一, pp22-28, 1987.
  - 24) Jaric, S., P. Gavrilovic and V. Ivancevic : Effects of previous muscle contractions on cyclic movement dynamics. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 54:216-221, 1985.
  - 25) 金子公有 : 人体筋の力・加速関係に及ぼす短縮前状態の影響. *体育学研究*, 22:295-299, 1978.
  - 26) 小嶋武次 : ヒトの肘屈筋群の負荷-速度関係-数学モデルによる急速解放法と後荷重法との比較- : *体力科学*, 31:299-305, 1982.
  - 27) 小嶋武次 : 慣性負荷に対するヒトの肘屈曲中の肘屈筋群の働き. *Jpn. J. Sports Sci.*, 6: 648-656, 1987.
  - 28) 小嶋武次 : 反動動作を用いた肘屈曲運動における運動成果の増大の機構. 第9回日本バイオメカニクス学会大会論集, pp212-214, 杏林書院, 1989.
  - 29) Komi, P. V. and C. Bosco : Utilization of stored elastic energy in leg extensor muscles by men and women. *Med. Sci. Sports*,



- 10:261-265, 1978.
- 30) 永見邦篤 : 種々の反動動作とその効果に関する研究. 体力科学, 27:45-55, 1978.
- 31) 佐川和則, 禿 正信, 松本晃雄 : 垂直跳びの反動動作が下肢関節の機械的仕事へ及ぼす効果, Jpn. J. Sports Sci., 8:635-640, 1989.
- 32) 斉藤昌久, 伊藤章 : つま先ジャンプの反動効果, 日本バイオメカニクス学会編, ジャンプ研究, pp147-152, メディカルプレス, 1990.
- 33) Singh, M. and P. V. Karpovich : Strength of forearm flexors and extensors in men and women. J. Appl. Physiol., 25:177-180, 1968.
- 34) Svantesson, U., B. Ernstoff, P. Bergh and G. Grimby : Use of a Kin-Com dynamometer to study the stretch-shortening cycle during plantar flexion. Eur. J. Appl. Physiol. 62:415-419, 1991.
- 35) 高松薫, 会田宏, 関子浩二 : Isometricおよび eccentric な予備緊張が肘屈曲速度に及ぼす影響 - Concentric な収縮中の負荷重量および動作範囲に着目して - . 体育学研究, 36:127-139, 1991.
- 36) Thomson, D. B. and A. E. Chapman : The mechanical response of active human muscle during and after stretch. Eur. J. Appl. Physiol., 57:691-697, 1988.
- 37) van Ingen Schenau, G. J. : An alternative view of the concept of utilisation of elastic energy in human movement. Hum. Mov. Sci., 3:301-336, 1984.
- 38) van Leemputte, M., A. J. Spaepen, E. J. Willems, and V. V. Stijnen : Influence of pre-stretch on arm flexion. Biomechanics VIII-A, 264-270, Human Kinetics Pub. 1983.
- 39) Viitasalo, J. T. and C. Bosco : Electromechanical behaviour of human muscles in vertical jumps. Eur. J. Appl. Physiol., 48:253-261, 1982.
- 40) Yamazaki, Y., G. Mitarai and T. Mano : Segmental stretch reflex activity during hopping movements in man. Biomechanics VIII-A, pp281-288, Human Kinetics Pub., 1983.
- 41) Yamazaki, Y., Suzuki, M. and T. Mano : Performance of noncounter-movement jump with both knee and hip joints full extended. J. Appl. Physiol., 66:1976-1983, 1989.