

ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の力発揮能力の役割
～パワー発揮能力向上のための最適なトレーニング方法の検討～

山内潤一郎

目 次

要約	
I. 背景	
II. 目的	
III. 方法	
IV. 結果	
V. 考察	
VI 引用・参考文献	

ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の力発揮能力の役割 ～パワー発揮能力向上のための最適なトレーニング方法の検討～

山内潤一郎

要約

筋力とパワー発揮能力の向上はスポーツ選手のパフォーマンス向上だけでなく、高齢者の転倒を防ぎ、日常生活の質を向上することに貢献すると考えられる。これまで実際の動作において重要と考えられる動作初期の力発揮能力の役割についてはあまり多く検討されていない。パワー発揮能力向上のための最適なトレーニング方法をプログラミングするために、ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の大きな力発揮の必要性について明らかにする必要がある。実際のスポーツ動作と直接的な関わりの深いジャンプパフォーマンスと下肢複合関節動作における筋機能と動作初期の力発揮能力の役割を明らかにすることによって、より効率的にスポーツ動作や日常動作で必要されるパワー発揮能力を向上させることが可能になると考える。日常動作で必要とされる身体機能を調べることは、実生活上の動作で機能を評価することと、身体運動機能の向上のために重要である。本研究では、ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の力発揮能力の役割と、高齢者の転倒予防に必要とされる下肢パワー発揮能力向上のために必要な動作初期の力発揮能力について検討した。垂直ジャンプパフォーマンスが床反力(GRF)に及ぼす影響を検討した結果、ジャンプパフォーマンスでは動作初期の加速時において体重の 2 倍強の大きな床反力(GRF)が瞬時に発揮されており、跳躍高の高さは垂直 GRF の大きさと関係していることがわかった。また、慣性を低減したレジスタンス・トレーニングはジャンプパフォーマンスの向上に貢献しなかった。さらに、下肢の等尺性最大筋力発揮立ち上がり時間(TFD)は、加齢によって低下していた。これら本研究の成果は動作初期の力発揮が実際のパフォーマンスに重要な働きをしていることと、加齢に伴う神経-筋機能低下と関係している可能性を示した。このことは、スポーツ動作や日常動作に実践的なトレーニング方法を開発すること、さらに高齢者の転倒予防を目的とした日常動作に必要な下肢のパワー発揮能力を最適に向上させるために有効な運動処方やリハビリテーション法の発展に貢献することが期待できる。

I. 背景

これまでスポーツ競技におけるパワー発揮能力を向上させるために、等尺性最大筋力発揮条件下でトレーニングすることが薦められてきた。しかし、実際のスポーツの動きでは最大パワー発揮能力が重要であり、その能力を向上させるためには、具体的にどのようなトレーニングをした方がより効果的であるか、についてはっきりとした知見を得られていない。実際のスポーツ動作と直接的な関わりの深い複合関節動作における最大パワーを向上させるために重要な因子を明白にすることによって、より効率的にスポーツ動作で必要されるパワー発揮能力の向上を目指した最適なトレーニング方法を追求することが出来る。速く走るためあるいは高く跳ぶためにはパワーが必要であり、パワーを向上させるためには筋力を増大させる必要がある。しかし、各競技で要求されるパワー能力向上のためには筋力の増大は動作に特異的であり、なおかつ瞬時に筋肉が力を発揮する能力を伴っていないなければならない。

筋が大きなパワーを発揮するためには筋を瞬時に収縮させて大きな力を発揮させなければならない。筋の力-速度関係は直角双曲線で示され(Hill の特性)、最大パワーは最大筋力の 1/3 で発揮されることが筋本来の特性として知られている。したがって、パワー発揮能力向上のためには、筋の力-速度関係を考慮して最適な負荷でパワートレーニングした方が有効であることがわかる。その一方で、実際のスポーツ動作では、瞬時の爆発的な力発揮が要求されている。下肢伸展動作における最大筋力、無負荷最大速度、最大パワーとジャンプパフォーマンスとの間にはそれぞれ高い相関が示された(Figure 1: Yamauchi and Ishii 2007)。しかしながら、ジャンプ時の初期加速に必要な大きな筋力発揮の役割について明らかにされていない。

近年、加齢に伴う筋力とパワーの低下が社会的に大きな問題となっている。ヒトの筋力とパワーの発達と低下は成長や加齢の過程と共に変化している。一般的にヒトの筋力は男女ともに 20 代から 30 代の間にピークに達するといわれている。その後は歳をとるとともに筋力は下降線をたどり、60-65 歳あるいはそれよりも早い時期に急に筋力の低下が始まる(Hakkinen et al. 1995, 1997; Lindle et al. 1997)。筋力の低下は筋収縮タイプ、筋線維タイプ、性別によって多少異なってくる。男女ともに短縮性筋力(concentric muscle force generation)の方が伸張性筋力(eccentric muscle force generation)よりも早く衰え始めるようだ(Bassey & Short, 1990; Hakkinen et al. 1995, 1997)。伸張性筋力とは筋肉が引き伸ばされながら発揮する筋力のことをいい、いわゆる耐える筋力の方が歳を取っても必要とされているのかもしれない。この伸張性筋力はおもしろいことに男性の方が女性より早く衰えは始めているようだ(Lindle et al. 1997)。一方、我々は複合関節動作である脚伸展動作の筋力やパワーは加齢に伴って低下するが、無負荷短縮速度はそれ程加齢に影響されないことを報告した(Figure 2: Yamauchi et al. 2009, 2010)。このような加齢に伴う脚伸展動作における筋力低下は、日常で瞬時に要求される力発揮などの機能に障害を引き起こしていると考えられる。脚の筋力が衰えるとすり足になり、転倒やつまずきの原因になり、誣いては寝たきりになってしまう人も多い。

筋力とパワー発揮能力の向上はスポーツ選手のパフォーマンス向上だけでなく、高齢者の転倒を防ぎ、日常生活の質を向上することに貢献すると考えられる。これまで実際の動作において重要と考えられる動作初期の力発揮能力の役割についてはあまり多く検討されていない。そこで、パワー発揮能力向上のための

最適なトレーニング方法をプログラミングするために、ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の大きな力発揮の必要性について明らかにする必要がある。実際のスポーツ動作と直接的な関わりの深いジャンプパフォーマンスと下肢複合関節動作における筋機能と動作初期の力発揮能力の役割を明らかにすることによって、より効率的にスポーツ動作や日常動作で必要されるパワー発揮能力を向上させることが可能になると考える。

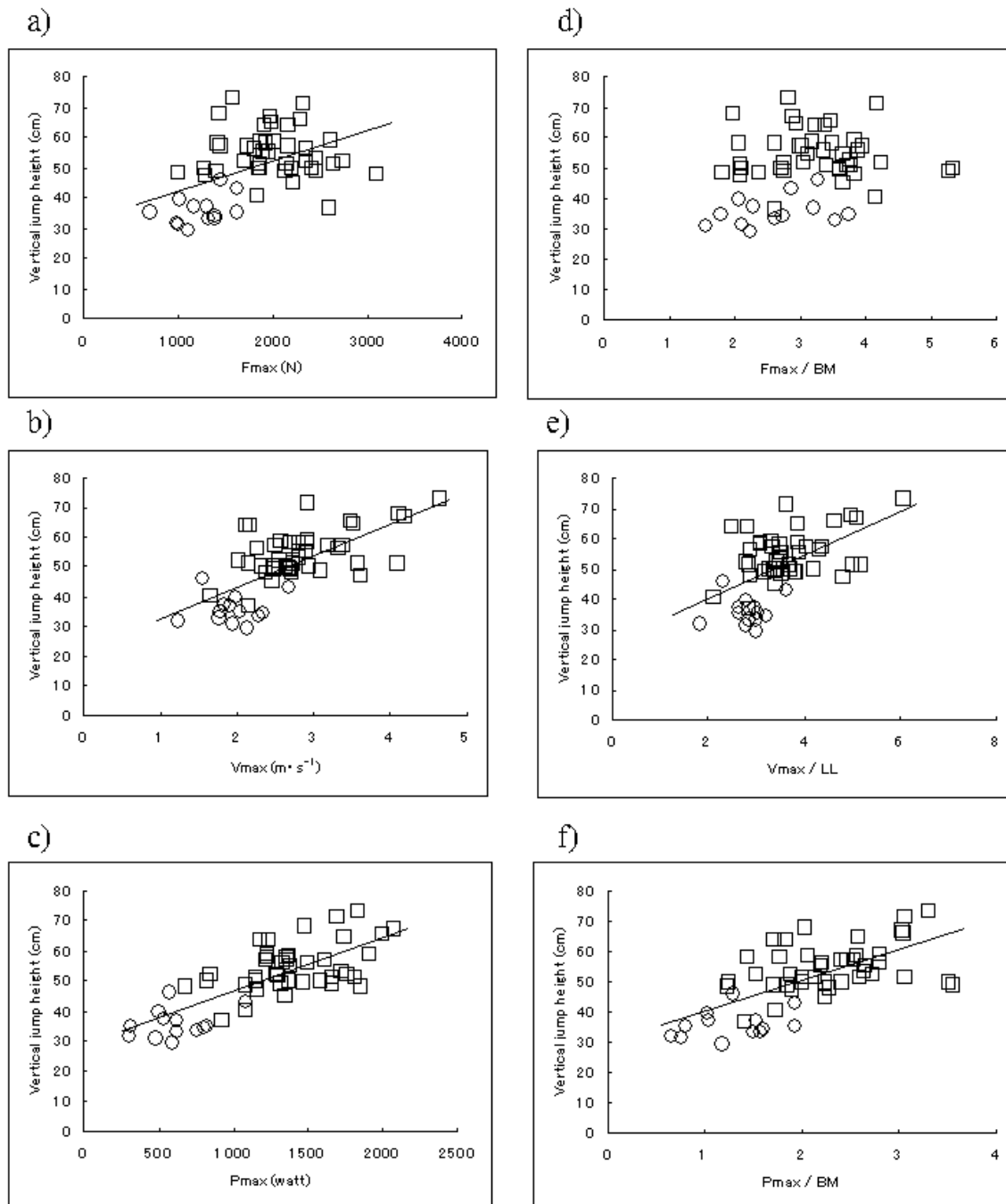


Figure 1. Relations between vertical jump height and Fmax (a), Vmax (b), Pmax (c), Fmax/BM (d), Vmax/LL (e), Pmax/BM (f) of the knee-hip extension movement (Yamauchi and Ishii 2007). Squares, men; Circles, women. Lines represent least squares regressions for both men and women. Significant correlations ($p < 0.001$) were found between all three parameters except Fmax/BM (d) and vertical jump height.

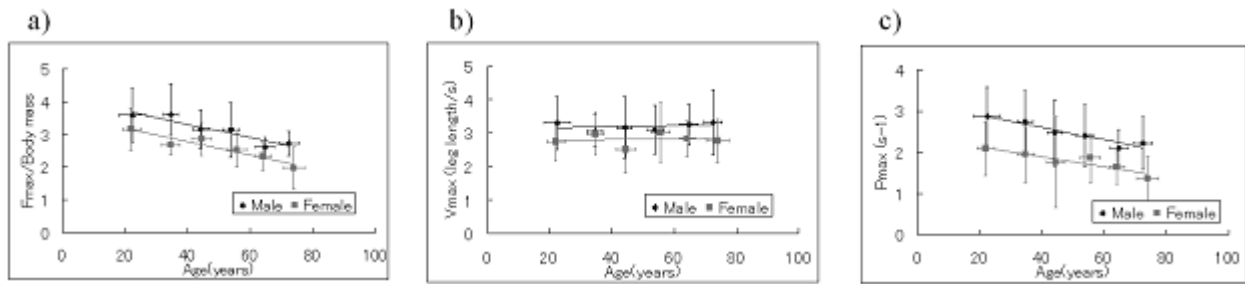


Figure 2: Aging related changes in muscle functions - Fmax/BM (a), Vmax/LL (b), Pmax/BM (c) - of lower limb multi-joint movements (modified from Yamauchi et al. 2010)

II. 目的

本研究では、ジャンプパフォーマンスにおける動作初期の力発揮能力の役割と、高齢者の転倒予防に必要なとされる下肢パワー発揮能力向上のために必要な動作初期の力発揮能力について検討することを目的とした。日常動作で必要とされる身体機能を調べることは、実生活上の動作で機能を評価することと、身体運動機能の向上のために重要である。

III. 方法

研究 1:

垂直ジャンプパフォーマンスが床反力(GRF)に及ぼす影響:

健常な被験者を対象として、ジャンプパフォーマンス時の跳躍高と床反力を垂直跳び測定器機と床反力計 (Figure 3)を用いて測定した。また、下肢反動の有と無のジャンプパフォーマンス能力の比較を行った。



Figure 3: Force plate (Kistler).

研究 2:

慣性の影響を低減したレジスタンス・トレーニングがジャンプパフォーマンスへ及ぼす効果:

トレーニング経験のない被験者 20 人を、トレーニングをしないコントロール群(Con)と慣性の影響を低減したエクササイズを実施するトレーニング群(Tr)に別けた。トレーニング群は力を任意に制御できるダイナモメータ(Yamauchi et al. 2007)を用いて、動作初期の慣性の影響を低減したエクササイズを短期間実施した。エクササイズ・トレーニングは脚伸展動作を短縮動作時には最大筋力の 50-60%の負荷を一定の等張力条件下で、伸張動作時には短縮時と同等の力発揮を等速性条件下(0.1 m/s)で実施した。トレーニング頻度は週 2 回、期間は 10 週間とした。トレーニング・プロトコルは低負荷のウォーミングアップ後に、15 回×3 セットを 1 分間のレストインターバルを挟んだ。トレーニング期間前後に、垂直跳び測定器機を用いてジャンプパフォーマンス能力を計測した。

研究 3:

加齢に伴う下肢動作初期力発揮能力の変化:

健康な若齢者(n=10; average 23 years old)と健康な高齢者(n=10; average 67 years old)被験者とし、両脚膝・股関節伸展動作の等尺性最大筋力を測定した。膝・股関節伸展動作における等尺性最大筋力発揮立ち上がり時間(TFD)を力-時間曲線より決定した

IV. 結果

研究 1:

ジャンプパフォーマンスでは動作初期の加速時において体重の 2 倍強の大きな床反力(GRF)が瞬時に発揮されていることを確認した(Figure 4)。また、下肢反動有りのジャンプは、反動なしのジャンプに比べ跳躍高が高く垂直 GRF も大きくなることがわかった。

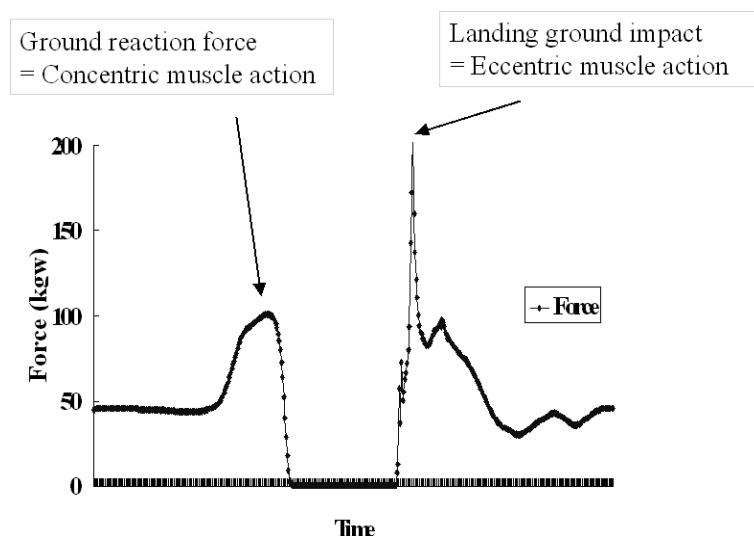


Figure 4: Force generation pattern during jump performance

研究 2:

エクササイズ・トレーニング期間後、Tr 群は最大筋力が増加したにも関わらず、Tr と Con 両群ともにジャンプパフォーマンスの跳躍高に有意な変化はみられなかった(Figure 5)。

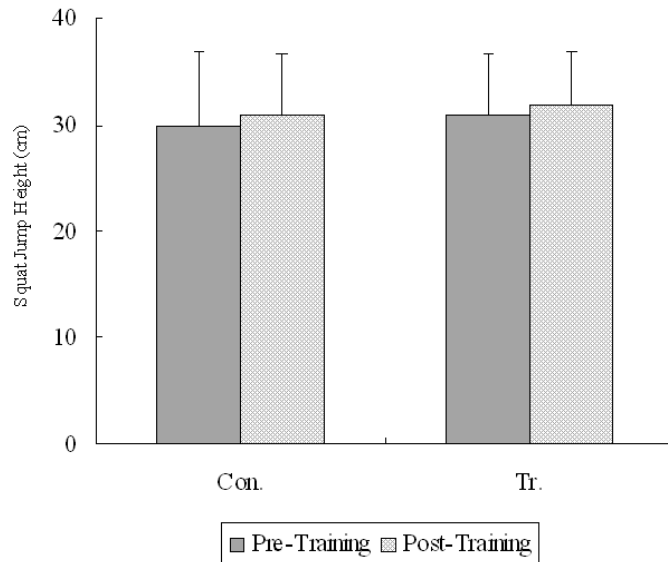


Figure 5: Jump performance after the training

研究 3:

両脚膝・股関節伸展動作の等尺性最大筋力は若齢者の方が高齢に比べ有意に大きかった。TFD は若齢者の方が高齢に比べ有意に短かった(Figure 6)。

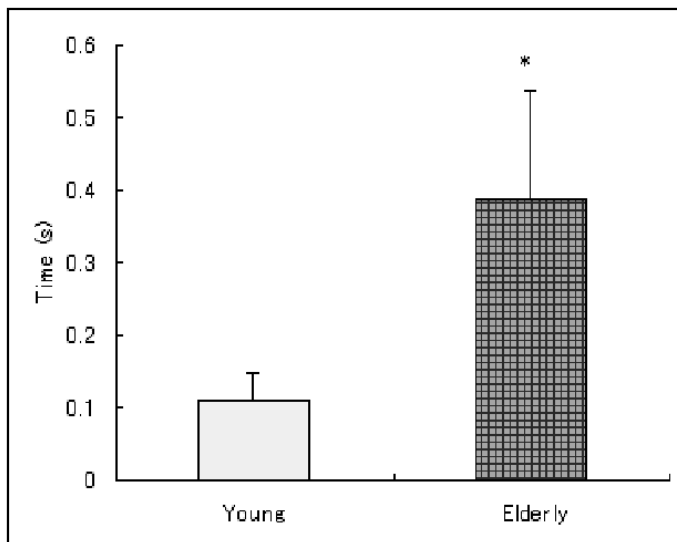


Figure 6: Time required for force development from 30% to 60% of maximum isometric force (TFD) in young and elderly individuals. * represents $p < 0.001$.

V. 考察

これまで下肢複合関節動作の初期加速に着目した研究は少ない。垂直ジャンプパフォーマンスが床反力 (GRF) に及ぼす影響を検討した結果、ジャンプパフォーマンスでは動作初期の加速時において体重の 2 倍強の大きな床反力 (GRF) が瞬時に発揮されており、跳躍高の高さは垂直 GRF の大きさと関係していることがわかった。また、慣性を低減したレジスタンス・トレーニングはジャンプパフォーマンスの向上に貢献しなかった。さらに、下肢の等尺性最大筋力発揮立ち上がり時間 (TFD) は、加齢によって低下していた。これら本研究で明らかにされた動作初期の力発揮と実際のジャンプパフォーマンスの関係性とその高齢者への影響は、スポーツ動作や日常動作に実践的なトレーニング方法を開発することに貢献すると考えられる。

研究 1 では、ジャンプパフォーマンスにおける跳躍高を高めるためには体が地面から受ける反力を大きくすることが重要であることが示唆された。ジャンプパフォーマンスは、走り幅跳び、走り高跳び、バレーボール、バスケットボールなど様々なスポーツの局面で使われており、競技成績やパフォーマンスに大きな影響を与えている。跳躍動作は、重力による下向きの力より大きな推進力を地面に加えることで達成される。この二つの力の差分が跳躍高を決定する要因となり、ジャンプパフォーマンスにおけるパワー発揮では動作初期の力発揮が重要となる。今後、跳躍高を高める方策として、どのように動作初期の垂直 GRF を増加させることができるのかというメカニズムの解明に取り組んでいく必要がある。

研究 2 では、下肢伸展動作における最大筋力とジャンプパフォーマンスとの間には高い相関が示された (Yamauchi and Ishii 2007) にも関わらず、慣性の影響を低減したレジスタンス・トレーニングによる筋力の増加はジャンプパフォーマンスへ影響を及ぼさなかった。このことから、ジャンプ時の初期加速に必要な大きな筋力発揮の重要性が示唆された。多くのアスリートやコーチは筋力をつけさえすればパワーが向上すると考えているかもしれない。パワーを向上させるためには最大筋力と最大速度の向上が必須条件となる。筋の最大短縮速度は筋線維そのものの性質としてある程度決まっており、それをさらに大きく向上させる余地は持っていない。しかし、神経-筋系の向上によって、力発揮時間などを高めることが出来る。スポーツ競技におけるパワー発揮能力の中でも特に重要な能力は動作初期の力発揮能力といえる。これをしばしばスターティング・ストレングスとエキスパロシブ・ストレングスと大別して説明されている。スターティング・ストレングスとは動作がゼロの状態から出来るだけ速く、大きな力を発揮するために必要な神経-筋系の能力のことである。筋収縮の初期に筋肉を速く短縮させ、大きな力発揮させるためには出来るだけ多くの運動単位と、それに伴う筋線維を即座に活性化させる必要がある。特に fast タイプの運動単位と筋線維の動員が不可欠になってくる。高いスターティング・ストレングス能力のあるアスリートは、短い時間で大きな力を発揮できる。一方、エキスパロシブ・ストレングスとは動作初期に発揮された力を引き続き発揮し続けるために必要な神経-筋系の能力のことである。動作初期に筋肉を活性した後にも連続して長い間筋線維を活動させる必要がある。この能力ではいかに多くの fast タイプの運動単位と筋線維を長期間連続的に動員することができるかが鍵になってくる。エキスパロシブ・ストレングスは加速のことでもある。これらの 2 つのパワー発揮能力を最大限に向上させるために、どのようなトレーニングをしたら良いかを見極めることは大変重要である。走る、跳ぶなどの複合関節動作では多くの筋の相互作用が関係しており、これらの筋を理想条件下でそれぞれ力発揮できるようにすれば、動作全体のパワーは向上することになる。今後、本研究の成果をいかして、動

作初期の力発揮に必要な複合要素をうまく段階的に融合させ、最適にパワーを向上させるためのトレーニング方法を体系化していくことが大切になっていくと考える。

研究 3 では、高齢者が最大筋力を瞬時に発揮させる能力、つまり動作初期の力発揮能力が低下していることが示唆された。最大筋力の低下は筋の大きさの減少とともに神経系の機能低下、特に速筋線維の減少と神経機能の低下が大きいと考えられる。特に高齢者は大きな力発揮や瞬発力に必要な速筋線維の機能低下や萎縮が大きい。速筋タイプ(fast twitch type: FT)の筋の萎縮が遅筋タイプ(slow twitch type: ST)に比べて大きいと報告されている(Hakkinen et al. 1995, 1997)。運動単位(motor unit)の数も加齢に伴って同様にタイプ別の減少がみられる(McComas et al. 1993)。したがって、加齢に伴うパワーの低下は FT タイプの筋繊維の萎縮と運動単位数の活動低下に起因しているといえる(Hakkinen et al. 1995)。これらの能力は、歩行や階段の昇り降り、物を持ち上げるのに必要なだけでなく、特に転倒しそうな時にすばやく立ち直るための動作などで大切な役割をしている(Earles et al. 2001)。転倒事故は高齢者の間で最も深刻な問題である。このことが原因で寝たきりになってしまい、早期の死につながっていることもある(Guralnik et al. 1995)。速筋線維を鍛えるためには筋力トレーニングなどである程度強い負荷をかけてあげる必要がある。筋線維を強くすることによって、つまりいた時に大きな力を瞬時に発揮し身体を支えることが出来るようになり、転ばなくなりにくくなると考える。そこで、高齢者は筋へ日常生活以上の刺激を定期的に与え、速筋線維を活性化し、動作初期に必要な神経-筋機能を高めていくようにしなければならない。

本研究の成果は動作初期の力発揮が実際のパフォーマンスに重要な働きをしていることと、加齢に伴う神経-筋機能低下と関係している可能性を示した。このことは、スポーツ動作や日常動作に実践的なトレーニング方法を開発すること、さらに高齢者の転倒予防を目的とした日常動作に必要な下肢のパワー発揮能力を最適に向上させるために有効な運動処方やリハビリテーション法の発展に貢献することが期待できる。

VI 引用・参考文献

- Bassey EJ & Short AH (1990). A new method for measuring power output in a single leg extension: feasibility, reliability and validity. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 60, 385-390.
- Earles DR, Judge JO & Gunnarsson OT (2001). Velocity training induces power-specific adaptations in highly functioning older adults. *Arch Phys Med Rehabil* 82, 872-878.
- Guralnik JM, Ferrucci L, Simonsick EM, Salive ME & Wallace RB (1995). Lower-extremity function in persons over the age of 70 years as a predictor of subsequent disability. *N Engl J Med* 332, 556-561.
- Häkkinen K, Kraemer WJ & Newton RU (1997). Muscle activation and force production during bilateral and unilateral concentric and isometric contractions of the knee extensors in men and women at different ages. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 37, 131-142.
- Häkkinen K, Pastinen UM, Karsikas R & Linnamo V (1995). Neuromuscular performance in voluntary bilateral and unilateral contraction and during electrical stimulation in men at different ages. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 70, 518-527.
- Lindle RS, Metter EJ, Lynch NA, Fleg JL, Fozard JL, Tobin J, Roy TA & Hurley BF (1997). Age and gender

comparisons of muscle strength in 654 women and men aged 20-93 yr. *J Appl Physiol* 83, 1581-1587.

McComas AJ, Galea V & de Bruin H (1993). Motor unit populations in healthy and diseased muscles. *Phys Ther* 73, 868-877.

山内潤一郎 (2010). Section 5: 運動と筋 - 3.骨格筋機能と筋肥大. 運動生理学のニューエビデンス (宮村実晴編著), 真興交易(株)医書出版部: 123-129.

山内潤一郎 (2010). 未来志向のこころとからだ. NHK シリーズ - こころをよむ. 日本放送協会、日本放送出版協会.

山内潤一郎 (2010). あなたの足腰だいじょうぶ? 栄養と料理 76(10), 10月号: 38-41.

山内潤一郎 (2010). 筋力が若返る!12 分間フィットネス. 栄養と料理 76(10), 10月号: 95-101.

Yamauchi J & Ishii N (2007). Relations between force-velocity characteristics of the knee-hip extension movement and vertical jump performance. *Journal of Strength and Conditioning Research* 21: 703-709.

Yamauchi J, Mishima C, Fujiwara M, Nakayama S & Ishii N (2007). Steady-state force-velocity relation in human multi-joint movement determined with force clamp analysis. *J Biomech* 40: 1433-42.

Yamauchi J, Mishima C, Nakayama S & Ishii N (2010). Ageing related differences in maximum force, unloaded velocity and power of human leg multi-joint movement. *Gerontology* 56: 167-174.

Yamauchi J, Mishima C, Nakayama S & Ishii N (2009). Force-velocity, force-power relationships of bilateral and unilateral leg multi-joint movements in young and elderly women. *Journal of Biomechanics* 42: 2151-2157.