

2011年1月6日

博士学位申請論文審査報告書

大学名 早稲田大学
研究科名 スポーツ科学研究科
申請者氏名 平山 邦明
学位の種類 博士(スポーツ科学)
論文題目 反動動作による筋腱複合体のパフォーマンス増強効果の個人差と練習効果
Performance enhancement of muscle-tendon unit by counter-movement:
variability and trainability
論文審査員 主査 早稲田大学教授 川上 泰雄 博士(教育学)(東京大学)
副査 早稲田大学教授 矢内 利政 Ph.D.(アイオワ大学)
副査 早稲田大学教授 彼末 一之 工学博士(大阪大学),
医学博士(大阪大学)

本論文は第1章から第4章までの本論と文献から構成されている。

主動作に先行する反対方向への動きを反動動作という。スポーツや日常の身体運動においては、反動動作が頻用される。反動動作を伴う運動では、反動動作を伴わない運動に比べ、より高い運動パフォーマンスが発揮されることが広く知られている。反動動作を伴う運動においては、筋腱複合体(: MTU)は一度伸長した後に素早く短縮し(SSC)、この間、筋線維は大きな長さ変化を示さず、腱が伸長-短縮する(筋腱相互作用)。SSC中の筋腱相互作用によって、1)筋は力-速度関係において力発揮に有利な状態で収縮することが可能になるため、2)弾性エネルギーの利用が可能になるため、MTUは、事前の伸長を伴わずに短縮のみを行う場合よりも大きな機械の仕事や力積を生み出すが可能となる(反動効果)。身体運動は、筋腱複合体が引き起こす関節運動によって生み出されることから、MTUにおける反動効果が、反動動作による運動パフォーマンス向上効果のメカニズムの一端を担っていると考えられている。

反動効果の大きさには個人差があり、また、練習やトレーニングによって個人内においても変化し得るものである。これまでの研究では、反動効果の個人差や個人内での変化の要因について、筋腱複合体の機能特性における個人差やトレーニングによる変化に着目した議論がなされてきたが、一致した見解が得られていない。そもそも、反動効果の個人差や個人内での変化に直接関わるのはSSC中の筋腱動態であり、筋腱動態はMTUの機能特性のみならず、神経筋活動にも影響される。そこで本論文では、筋腱複合体の機能特性と神経筋活動、ならびにSSC中の筋腱動態に着目して、反動効果の個人差の要因および練習によ

る個人内の変化の機序について検討することを目的とした。本論文の概要と主な知見は以下の通りである。

第2章第1節では、反動動作を伴うことによって生じるMTUの機械的仕事の増加量を反動効果として、その個人差の要因を検討することを目的とした。測定項目間の関係を検出しやすくすることを目的に、運動特性の異なる複数種目の男性アスリート21名を被験者として採用した。関節間の協調性の影響を排除するため、足関節のみを用い、反動を伴うジャンプ(CMJ)と反動を伴わないジャンプ(noCMJ)を行わせた。先行研究の結果から予想される個人差の要因として、腱スティフネス、静的最大底屈トルク、跳躍動作中の下腿三頭筋の筋活動を測定した。その結果、腱スティフネスや静的最大底屈トルクといったMTUの機能特性は反動効果の大きさと関連が認められなかった。一方、CMJの抜重局面(動作開始から床反力増加開始まで)に続くブレーキ局面(床反力増加開始から足関節底屈動作開始まで)および底屈局面(底屈動作開始から離地まで)の筋活動と反動効果の大きさとの間に正の相関関係が認められた。この結果から、反動効果の個人差は、筋腱複合体の機能特性の個人差ではなく、CMJ中の筋電図活動の個人差が影響を及ぼすことが示唆された。

上記の研究は以下の学術論文として国内誌に掲載されている。

平山邦明, 杉崎範英, 加藤えみか, 金久博昭, 福永哲夫, 川上泰雄. 腱スティフネス, 筋力および筋活動が反動動作による機械的仕事量増強の個人差に与える影響. 体育学研究, 55: 33-43, 2010.

第2章第2節では、筋腱動態の違いと反動効果の個人差の関係を検討することを目的とした。第1節の測定項目(腱スティフネス、静的最大底屈トルク、跳躍動作中の下腿三頭筋の筋活動)に加えて、超音波法を用いてCMJおよびnoCMJ中の腓腹筋内側頭の筋束動態を観察し、さらに腱の動態の推定を行い、反動効果の個人差との関係を検討した。その結果、先行研究同様に、ブレーキ局面および底屈局面前半に筋束の長さ変化がMTUの長さ変化よりも小さいことが確認された。さらに、反動動作を伴うことによる腱の機械的仕事の増加量と反動効果の間に正の相関関係が認められた。底屈局面前半に筋束の短縮が少ない被験者ほど(筋線維の収縮が等尺性収縮に近いことを意味する)CMJ中の腱の機械的仕事ならびに反動動作を伴うことによる増加量が多かった。一方、腱スティフネスなどMTUの機能特性に関する指標は、いずれの項目とも有意な相関関係を示さなかった。なお、この実験を通じて、反動効果の個人差はCMJにおけるパフォーマンスの個人差を反映することが確認された。これらの結果から、反動効果の個人差には、筋腱動態の違いが関与しており、SSC中の筋腱相互作用(筋束の長さ変化が少なく、腱の短縮ならびに仕事が多い)がより強調されている被験者ほど反動効果が大きいことが明らかになった。

上記の研究は、現在、国際誌に投稿し、査読後の訂正中である。

Hirayama, K., Miyamoto, N., Sugisaki, N., Kanehisa, H., Yanai, T., Fukunaga, T., Kawakami, Y. Influence of musculotendinous behavior and tendon properties on individual difference in counter-movement exercise performance. Journal of Applied

Physiology (under revision).

第2章において筋腱動態や筋電図活動が反動効果の個人差に関わっている可能性が示され、MTUの機能特性よりも神経筋活動の違いが筋腱動態ならびに反動効果の大きさに影響を与えていることが予想された。さらに、このことから「人間は神経筋活動を通じて筋腱動態を操作しており、CMJを練習することによって、CMJの筋腱動態ならびにパフォーマンスが改善する」という仮説が導かれ、第3章においては、その検証を行った。CMJの練習を1セッション(3回×6セット)実施し、その前後のCMJとnoCMJ中の床反力の力積を測定した。また、超音波法を用いてCMJ中の腓腹筋内側頭の筋腱動態を観察した。その結果、noCMJ中の力積には変化がなかったが、CMJ中の力積は練習によって増加していた。このとき、CMJ中の筋束の伸長および短縮が減少し、腱の短縮が増加していた。練習前後で静的最大筋力には変化が見られず、先行研究の結果から考えて腱スティフネスが変化した可能性もきわめて低いことから、MTUの機能特性に変化はなかったと推察された。さらに、ブレーキ局面における下腿三頭筋の筋活動の発現が早まっていた。これらの結果は、個人内においても、SSC中の筋腱相互作用がより強調されることで反動効果ならびにCMJのパフォーマンスが改善されることを示しており、筋腱動態の変化は神経筋活動の変化によって生じていることが示唆された。

上記の研究は、現在、国際誌に投稿し、査読後の訂正中である。

Hirayama, K., Yanai, T., Kanehisa, H., Yanai, T., Kawakami, Y. A single practice session modulates musculotendinous behavior during a counter-movement jump. *Journal of Electromyography and Kinesiology* (under revision).

各章で得られた知見から、筋束の長さ変化が小さく、腱が多く短縮(仕事)するCMJ中の筋腱動態が顕著な被験者ほど、大きな反動効果、さらには高いCMJパフォーマンスを発揮することができることが示された。一方、反動効果や筋腱動態の個人差と、MTUの機能特性の個人差との直接的な関連は認められず、むしろCMJ中の神経筋活動の違いが筋腱動態の個人間の違い、ならびに反動効果の個人差に関わっていることが示唆された。さらに、CMJの練習を行うことによって、筋腱動態が変化しCMJパフォーマンスが改善されることが確認され、筋腱動態の変化は神経筋活動の変化によるものと推察された。つまり、本研究の結果は、SSC中に腱の弾性をうまく利用する技術的要素、すなわち、腱の『使い方』の違いが反動効果の個人差に関与しており、それは練習によって改善し得ることを示唆するものであった。第2章、第3章を通して、反動効果やCMJパフォーマンスの低い被験者も、練習を行うことによって腱の機械的仕事が増加し、反動効果やCMJパフォーマンスの高い被験者に近い跳躍を行うことが可能になることが示された。

人間は、神経筋活動を通じてSSC中の筋腱動態を操作している可能性が高く、筋腱動態が合目的的に調整されることによって筋腱複合体の機能特性が引き出され、高い運動パフォーマンスを発揮することが可能になる。本論文のこの知見は、SSC中の筋腱相互作用が、身

体運動パフォーマンスの個人差や練習・トレーニング効果の要因の一つであることを明らかにしたものであり、スポーツ活動やトレーニング、リハビリテーションに新たな示唆を与える点において、新規性とスポーツ科学分野における意義を有すものであると考えられる。この点において、スポーツ科学の発展に大いに寄与するものであると考えられる。本申請者の今後の研究上の活躍が大いに期待できる。

上記のような評価を得て、本審査委員会は、平山 邦明氏の学位申請論文が博士（スポーツ科学）の学位を授与するに十分値するものと認める。

以 上