

# 腱の機能的役割と可塑性

生命環境科学系 久保啓太郎

## はじめに

2020年に予定されていた東京オリンピックがコロナ禍により延期され、現時点でも開催が危ぶまれている。そのような状況においても、さまざまなスポーツ種目における競技力の向上は目覚ましい。なかでも記録(タイム)で競う競技種目では日本記録や世界記録が次々と更新され、昨今のスポーツパフォーマンスの向上に疑いの余地は無いと言える。一方で、陸上競技の跳躍系種目においては、表1に示すとおり世界記録が1990年代前半から約30年間にわたって更新されておらず、陸上競技種目のなかでも特異的である(ちなみに投擲系種目については別の要因が噂されているが、本項では割愛)。この事象の要因として色々なことが考えられるが、その中の1つとして所謂「バネ」のトレーニング法が不明な点が挙げられる。スポーツ現場において「バネ」と表現される身体能力は、実は科学的には十分に検討されていないのが現状である。後述するように、この「バネ」には筋と骨をつなぐ腱が大きな役割を果たしており、筆者がこれまでにやってきたヒト生体における腱に関する研究を紹介させて頂く。

## 腱特性の定量法

従来は、腱の力学的特性は動物やヒト屍体からの摘出腱を用いた引っ張り試験などにより調べられてきた(e.g., *Benedict et al 1968 J Biomech*)。1990年代後半に入り、等尺

表1 主な陸上競技種目の世界記録(男子, 2021年1月8日現在)

種目	記録	選手名	年
100m	9秒58	ウサイン・ボルト	2009
200m	19秒19	ウサイン・ボルト	2009
400m	43秒03	ウエイド・バンニーキルク	2016
5000m	12分35秒36	ジョシア・チェプテゲイ	2020
10000m	26分11秒00	ジョシア・チェプテゲイ	2020
マラソン	2時間1分39秒	エクウド・キプチョゲ	2018
走高跳	2.45m	ハビエル・ソトマヨル	1993
走幅跳	8.95m	マイク・パウエル	1991
三段跳	18.29m	ジョナサン・エドワーズ	1995
砲丸投	23.12m	ランデイ・バーンズ	1990
ハンマー投	86.47m	ユール・セデイフ	1986
やり投	98.48m	ヤン・ゼレズニー	1996

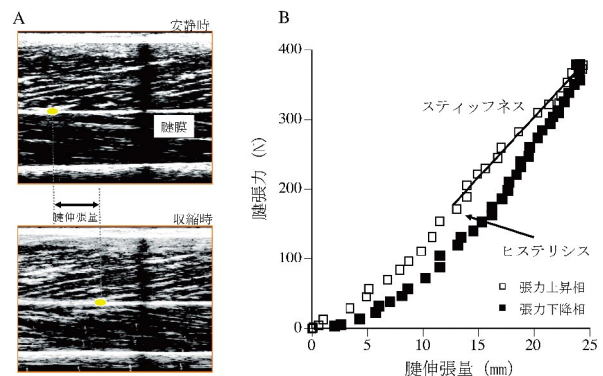


図1 安静時および収縮時の超音波縦断面画像(A)および腱張力—伸張量関係の典型例(B)

性収縮(関節角度を固定した状態で力発揮)中における筋線維と腱膜(筋内に存在する腱で膜状の組織)の交点の移動量(すなわち腱の伸張量)を超音波画像から実測する方法が確立された(*Kubo et al 1999 J Appl Physiol*; 図1A)。この手法を用いることによりヒト生体で「腱張力—伸張量関係」が得られ、硬さの指標であるステイフネスや主に粘性に由来する腱内に蓄えた弾性エネルギーが逸脱する量の指標であるヒステリシスを算出することが可能になった(図1B)。この手法を用いたヒト生体の腱に関する研究はこの20年間で急増しており、運動生理学やバイオメカニクス分野において新たな知見が蓄積されつつある。しかし、本手法にも未だに改善すべき点が多々残されており、「腱張力の算出」および「腱伸張量の実測」にはヒト生体を対象にした研究ならではの限界も含めた解決すべき問題が含まれている(詳細は割愛)。そのなかで、測定時の腱伸張速度が実際の運動中における腱伸張速度とはかなり異なる点は、後述する腱特性とパフォーマンスとの関係を検討する際には注意を要する。この点に関して最近筆者らは、実際の運動中に近い高い伸張速度条件(バリストイック条件)で測定された腱特性は、従来の低い伸張速度条件(ランブ条件)に比べて伸張量が小さくヒステリシスが大きくなることを明らかにした(e.g., *Kubo et al 2017 Physiol Rep*)。ただし、腱ステイフネスに関しては伸張速度の影響は認められず、これまで数多く報告されてきた遅い伸張速度のランブ条件で測定された腱ステイフネスとパフォーマンス

との関係に関する研究結果には影響しないと言える。一方、腱ヒステリシスが速い伸張速度のバリスティック条件ではかなり大きくなることから、バイオメカニクス分野でモデル計算などからヒトの運動中の腱の仕事量（貢献度）を算出する際には注意が必要である。

## 腱の機能的役割

身体運動の機序を力学的に分析するバイオメカニクス分野では、身体外部から観察可能な関節角度変化から筋の長さ変化を推定してきた (e.g., Bobbert et al 1986 *J Biomech*)。しかし、最近の超音波法を用いた研究により、例えばランニング中の接地時において足底屈筋（ふくらはぎ後部の筋）は前半に伸張、後半に短縮という典型的な「伸張—短縮サイクル」の様式をとるとされてきたが、実際には筋線維はアキレス腱の伸張のために接地期全般にわたって短縮を続けていることが明らかになっている (Ishikawa & Komi 2007 *Gait & Posture*)。さらに、走および跳などの伸張—短縮サイクル運動の短縮相においては、腱の急激な短縮のために筋線維の短縮速度が低く抑えられ（従って発揮張力は大きくなる）、そのために大きなパワー（関節トルク×角速度から算出）発揮を実現している (Kubo et al 2000 *Acta Physiol Scand*)。このように筋線維および腱の動態を直接観察することにより、ヒトのさまざまな身体運動における腱の役割が明らかになりつつある。実際に幾つかの先行研究より、下肢筋群の腱スティッフネスが低い者ほど、陸上競技短距離種目（100m走）および長距離種目（5000m走）の競技成績が優れることも示されている (e.g., Kubo et al 2015 *Eur J Appl Physiol*; 図2)。ただし、前者は膝伸筋群、後者は足底屈筋群においてのみ認められており、同じ走運動でも種目により腱の貢献度に相違があることが示唆され（短距離走では膝蓋腱、長距離走ではアキレス腱が重要）、これらの詳細な機序についてはさらなる検討が必要である。

## 腱の可塑性

関節角度を変えないで力を入れ続ける等尺性トレーニングは、簡便で安全なトレーニング法として1960年代から広く実施されている。等尺性トレーニングは実験条件のコントロールが容易なため、筆者もこれまでに複数回のトレーニング実験を実施してきた。それらの結果によると、筋力増加とともに腱スティッフネスの過剰な増加が認められている (e.g., Kubo et al 2001 *J Physiol*; 図3A)。この結果は、幾つかの先行研究 (e.g., Ball et al 1964 *Res Quart*) で指摘されてきた、等尺性トレーニングにより筋力は高まるものの跳躍能力に効果が無いもしくは悪影響を及ぼす現象の機序を説明し得るかもしれない。一方、

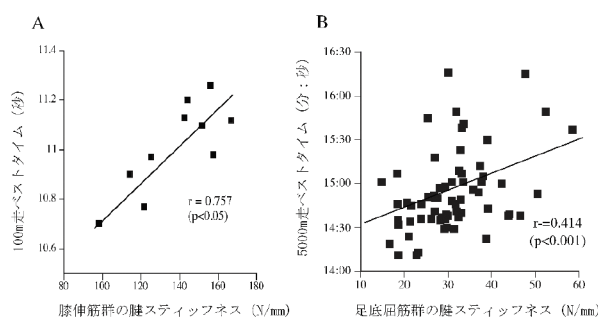


図2 腱スティッフネスと100m走(A)および5000m走(B)ベストタイムとの関係 (Kubo et al 2000 *Acta Physiol Scand*, Kubo et al 2015 *Eur J Appl Physiol*より作図)

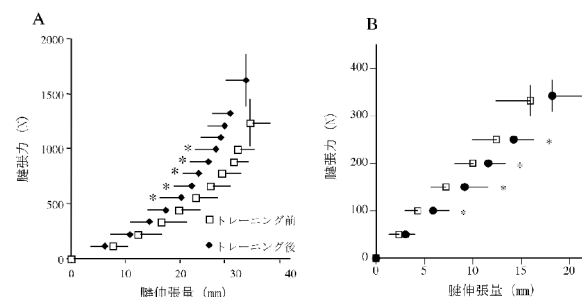


図3 12週間の等尺性トレーニング(A)およびプライオメトリックス(B)前後の腱張力—伸張量関係 (\*  $p < 0.05$  vs トレーニング前) (Kubo et al 2001 *J Physiol*, Kubo et al 2017 *Physiol Rep*より作図)

跳躍能を高めるために、プライオメトリックス（主にジャンプ系種目によるトレーニングの総称）が広く実施されている。足関節のみを用いたプライオメトリックスを12週間実施したところ、速い腱伸張条件で測定された腱伸張量がトレーニング後に有意に増加することが明らかになった (e.g., Kubo et al 2017 *Physiol Rep*; 図3B)。したがって、プライオメトリックスは跳躍などの伸張—短縮サイクル運動に適した腱特性に変化させることが窺えた。今後はさまざまな条件の組み合わせによるプライオメトリックスの影響を明らかにして、バネ向上の最適なトレーニング法を提示することを目指している。

## まとめ

本項ではヒト生体における腱特性の測定法、身体運動における貢献、およびトレーニングに伴う変化に関する知見を紹介したが、もちろん筋の特性も無視することは出来ない。しかし、ヒトの収縮条件下での筋特性を定量することは、神経系の介在もあり非常に困難である。最近筆者らは、筋伸張開始から非常に短時間で一定の角速度に達する測定装置を作成し、伸張反射の介在しない収縮条件下での筋スティッフネスを定量する手法を考案し (Kubo 2014 *J Appl Physiol*)、応用研究を展開している。今後は、冒頭で述べたスポーツ現場で「バネ」と表現されている身体能力の効果的なトレーニング法を明らかにして、より高いレベルのパフォーマンス実現に貢献したいと考えている。