

論文の内容の要旨

Contractile properties of human skeletal muscles *in vivo*: a study with newly developed 'slack test'.

(ヒト生体における骨格筋の収縮特性：「スラックテスト法」による研究)

佐々木 一茂

【第1章：緒言】

骨格筋は力学的あるいは生理生化学的な環境変化に柔軟に適応するという可塑性と、身体運動の源となるその収縮性によって特徴付けられる。しかし、これまでの多くの研究によって明らかにされてきた筋の収縮特性が、ヒト生体においてどのような修飾を受けて発揮されているのかについては、未だ不明な点が多く残されている。特に、ヒトの身体運動は神経系が各筋の活動レベルを巧みに調節することで遂行されるという事実を考えると、筋の活動レベルがヒト生体における筋の機能に大きな影響を及ぼしていることは明らかであるが、従来の研究手法のみからこの影響、およびそのメカニズムを調べることは困難である。そこで本研究ではスラックテスト法 (Edman, 1979) という *in vitro* の研究手法を、ヒト骨格筋収縮特性の生体内測定 (*in vivo*) に応用することにより、筋の活動レベルと収縮特性の関係について検討した。

【第2章：スラックテスト法によるヒト足底屈筋群無負荷短縮速度の測定】

単一筋線維の無負荷短縮速度を測定する方法として知られているスラックテスト法をヒト足底屈筋群に適用し、筋の活動レベルと無負荷短縮速度の関係について検討するため、高速度の急速解放を可能とする特殊なダイナモメータを開発した。被検者は健康な男女 10 名であり、筋の活動レベルは急速解放を与える直前の等尺性トルクの値として定義し、等尺性随意最大トルク (MVC) に対して 5, 10, 20, 40, 60% の 5 段階に設定した。急速解放を与えることにより足底屈トルクは急激にゼロまで低下し、ある時間の後に再び上昇した。この時間 (Δt) と急速解放による足関節角度変位 (ΔL) との関係を図表上にプロットし、回帰直線の傾きから無負荷短縮速度を測定した。その結果、個人差やばらつきはあるものの、筋の活動レベル増大に伴い無負荷短縮速度の有意な増大が認められた。このメカニズムとして、筋の活動レベルが低い時には遅筋線維が優先的に使われ、筋の活動レベルが増大することにより次第に速筋線維が使われるようになるというサイズの原理 (Henneman et al. 1965) の関与が示唆された。

【第3章：足底屈筋群の収縮特性における腓腹筋の貢献：筋長と活動レベルの効果】

足底屈の主働筋であると同時に膝屈曲筋でもある腓腹筋の筋長を膝関節角度変化によって変えた際の、足底屈筋群の活動レベルと収縮特性の関係について検討した。健康な男性13名を被検者とし、(1)足底屈トルクと表面筋電図の関係、(2)足底屈無負荷短縮速度、(3)足底屈最大短縮速度、(4)足底屈単収縮応答、について膝関節伸展位と屈曲位で比較を行なった。その結果、膝屈曲により腓腹筋の筋活動は低下し、足底屈随意最大トルクも30%ほど低下した。これらは先行研究の結果とよく一致していた。しかし、足底屈の短縮速度は、いずれの筋活動レベルにおいても膝関節角度による差が認められなかった。また、電気刺激法によって随意収縮前後および随意収縮中に足底屈筋群の単収縮を誘発し、随意収縮における運動単位の動員特性を推定したところ、膝関節角度による違いは認められなかった。以上のことから、腓腹筋の筋長短縮による足底屈動作への貢献度の低下は、筋の発揮張力に大きく依存することが明らかとなり、これは筋と腱の相互作用から説明できることが示唆された。また、膝関節角度を変えても腓腹筋運動単位の動員特性は本質的には変化しないことが示唆された。

【第4章：随意収縮および電気刺激下での足背屈筋群の無負荷短縮速度】

第2章で開発したダイナモメータを改良し、足背屈筋群の無負荷短縮速度をスラックテスト法により測定した。健康な男女6名について随意収縮条件および電気刺激条件によって発揮された足背屈トルクと無負荷短縮速度の関係について検討を行なった結果、(1)スラックテスト法は、従来から広く行なわれている随意最大筋力測定と同程度の再現性があること、(2)足底屈筋群と同様に、随意収縮条件における足背屈筋群の無負荷短縮速度は筋の活動レベルとともに増大すること、(3)電気刺激条件における足背屈筋群の無負荷短縮速度は筋の活動レベルに依存せず常に高い値を示すこと、が明らかとなった。以上の結果から、ヒト生体における筋の無負荷短縮速度は単純に筋の活動レベルによって決まるわけではなく、使われている運動単位のタイプ（収縮特性）に依存することが示唆された。

【第5章：足背屈筋群の力—速度関係およびその活動レベルとの関係】

第4章で確立した足背屈筋群用のスラックテスト法と従来から広く用いられている等速性筋力測定装置による測定を組み合わせることで、ヒト足背屈筋群における力—速度（トルク—角速度）関係およびその活動レベルとの関係について記述することを目的とした。健康な男女15名から得られた足背屈筋群のトルク—角速度関係はHill（1938）の式でよく近似されたが、等速性筋力測定装置による測定のみから足背屈筋群の最大短縮速度を推定することは困難であるということが明らかとなった。一方、スラックテスト法により得られた無負荷短縮速度は、等速性筋力測定によって得られたトルク—角速度関係とよく対応していた。得られた結果に基づき、ヒト足背屈筋におけるトルク—速度—活動レベルの関係をモデル化した（図1）。

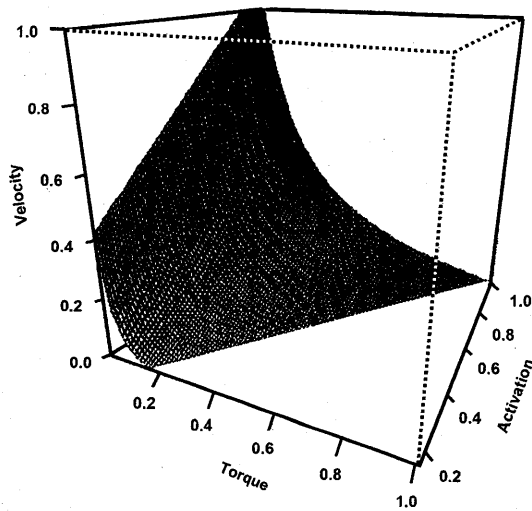


図1：ヒト足背屈筋群から得られたデータに基づいて構築したトルク—速度—活動レベル関係

【第6章：ヒト骨格筋の収縮特性を規定する因子】

第5章では個人差を考慮せずに、集団から得られたデータに基づいてトルク—速度—活動レベルの関係についてモデル化を行なった。本章では、近年スポーツパフォーマンスとの関係から注目を集めている ACTN3 遺伝子の多型が筋の収縮特性や筋形状、さらには無負荷短縮速度の個人差にどのような影響を及ぼしているのかについて検討した。その結果、ACTN3 遺伝子の多型はいずれのパラメータにも統計的に有意な影響を与えていなかった。また、重回帰分析の結果、無負荷短縮速度のばらつきの 38.4% は筋の活動レベルから説明できるということが明らかとなった。その他の因子が無負荷短縮速度のばらつきを説明する割合は、筋線維組成に関係する要因が 6.5%、筋形状に関する要因が 5.2%、ACTN3 遺伝子に関する要因が 2.3%であった (図2)。

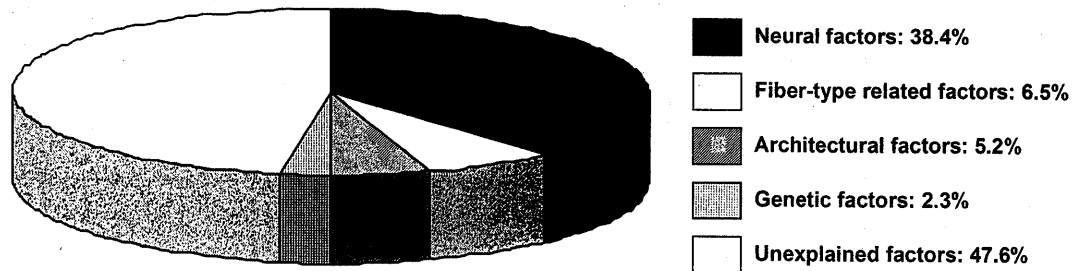


図2：無負荷短縮速度のばらつきに対する各要因の貢献度

【第7章：総括論議】

筋の活動レベルがヒト骨格筋の無負荷短縮速度に影響を及ぼすメカニズムとしては、主に二つのことが考えられてきた。ひとつは、粘性による内的負荷の影響である。粘性抵抗が無負荷短縮速度に及ぼす影響について、先行研究では一致した見解が得られていない。そこで、先行研究で見積もられている等尺性最大筋力の1%に相当する内的負荷の存在が、筋の活動レベルと無負荷短縮速度の関係にどの程度影響を及ぼすかについて、第5章で得られた足背屈筋群のトルク-角速度関係を基に考察した。その結果、粘性抵抗による内的負荷では、本研究で認められた筋の活動レベルと無負荷短縮速度の関係を十分に説明できないことが明らかとなった。

一方、もうひとつのメカニズムとして想定されてきたのが運動単位動員順序の影響である。第2~5章で繰り返し観察された筋の活動レベルと無負荷短縮速度の関係は、随意収縮における運動単位動員の順序性から比較的良好に説明できることから、本研究の一連の結果はこのメカニズムを支持するものであると考えられる。特に、筋の活動レベルが同じであっても随意収縮条件と電気刺激条件における無負荷短縮速度が異なるという第4章の結果は、両条件における運動単位動員順序の違いが無負荷短縮速度に反映されたことを強く示唆するものである。