

第85回鹿屋体育大学学術研究会報告

身体の形と力への興味

福永哲夫*

徳島で高校体育教師をしながら、トレーニングに興味を持ち、大学院に進学し、スポーツ科学の研究を始めて約40年が過ぎた。これまでは、プライオリティをスポーツ科学研究に100%おいた人生であり、そのために周りの人々（特に家内や子供たち）に多くの迷惑をかけてきたことと思うが、それも今になってみれば楽しい思い出である。

昨年夏から鹿屋体育大学に来て約半年がたつが、若いときから最も興味のある「体育」に関わることが出来ていることは大変に喜ばしいと思っている。特に、鹿屋体育大学で体育学に腰を落ち着けて、多くの体育人と様々な考えやアイデアを展開できる事は大変幸せである。

この度、鹿屋体育大学学術研究会で話す機会が得られたので、この機会に、私がこれまで無我夢中に行なってきた研究の流れを見ながら今後の研究の方向を考えてみたい。

研究のスタート

1966年4月東京大学猪飼研究室で体育学の研究をはじめた事になった。子供の頃からスポーツが好きで、徳島大学時代に筋力トレーニングに興味を持ち、2年間の高等学校教師として体育を教える事を経験した。その頃からトレーニングの科学的研究に対する興味はますます高まっていった。当時は東京オリンピック(1964年)をひかえ、世界各国から新しいトレーニング理論などが紹介されていた。特に印象が強かったのが「アイソメトリックトレーニング」(ヘッティンガー著)であっ

た。東大大学院に入学し、意欲的にトレーニング科学の勉強をしようと思っていた矢先、主任教授である猪飼先生から「福永君、超音波をやりなさい」の一言で私の運命は決まった。「やりたいトレーニングの研究」と「体育とはほとんど関係なさそうな超音波」との結びつきがまったく理解できず相当悩んだが、先輩諸氏の励ましで何とか落ちこぼれないで大学院生活に入る事が出来た。「超音波」「筋断面積」「筋力」が同じ土俵の上で考えられるようになるまでは1年以上を要した。実験を進めるうちに、「体育学」での「超音波」の重要性が認識できるようになり、さらに、博士論文を作成する段階になって、「超音波」のテーマを与えてくれた事に心から感謝をした。

その後、大学院生を指導する立場になってみると、当時の猪飼先生は「十分な説明もせず凡そ体育とは関係なさそうな超音波のテーマを投げかけて」私の考え方や人間性をチェックしていたのであろうと推測される。この悩みの1年間で本当の大学院入試であったかもしれない。「超音波」と「体育」との関係について、悩み考え抜いた体験から得られた「メンタルパワー」がその後の研究生生活に随分と役立った。後にケルン体育大学スポーツ医学研究所に留学した時(1973年)、研究所若手医者との方法論に関しての考え方の違いからくる強いストレスに耐えることが出来たのもこの「メンタルパワー」のお陰であった。

研究の指導方法は様々である。若者の「やりたい興味」と指導者の「やらせたい興味」が必ずしも一致するものではない。その場合の「適切な議

*鹿屋体育大学長

論」が研究を大きく飛躍させるケースも多い。「適切な議論」を生むためには、両者が同じ理論的背景を有していることが前提になる。私の場合、大学院入学当時は「ただただトレーニングの研究をしてみたい」程度の知識しかなかったの、先生と議論できるほどの背景を持たなかった。故に、余計な事は考えないで、ただ単純に猪飼先生の考えに全て従うことを決心した。そのように心に決めた時から、悩みが無くなり、実験に没頭できた。武士道の秘本「葉隠れ」に「大雨の戒」がある。外出途中でわか雨にあい、ぬれまいとして道を急ぎ走り、軒下などを通してみたところで、濡れることに変わりはない。最初から濡れるものと心に決めてかかれば、濡れても心は平静でいられる。この心得は万事に共通のものである。いわゆる「開き直りの精神」を説いたものと思われる。その後の私の人生でも、迷った時は「大雨の戒」に従う場合が多い。結果的には「猪飼先生の興味」を十分に理解しようと努力した事がその後の研究生活を乗りきる大きな要因になったようである。

超音波との格闘：研究の目的と方法

1966年頃、超音波法による身体内部の映像化の試みは始まったばかりで、超音波診断装置も未熟なものが多く、故障する装置をなだめながら試行錯誤の毎日であった。それにしても、連日の超音波故障の相談に親切に足を運んでくれた当時の日本無線医理学研究所（現在のアロカ株式会社の前身）の会田さんには今も感謝の気持ちを忘れないでいる。当初、意味不明の画像しか撮れず人体解剖の図とにらめっこしながら悩んだ。この頃の人体解剖のテキストは縦断解剖ばかりで、横断解剖の図は殆ど見られなかった。医学部解剖学教室に出かけては死体の切断面の標本を作成し、超音波画像と照らし合わせる作業を繰り返した。修士論文に間に合わないかもしれないプレッシャーとの戦いでもあった。そんな時の川柳「刀折れ矢射尽くして昼寝かな」（猪飼）に心救われる思いがし

た。

測定精度は、高ければ高いほど良いというものではなく、研究の目的に依存する事を実感した頃である。例えば、身長男女差を見る目的での測定に、ミクロン単位の精密計を用いる必要性はない。測定精度は研究の目的が達成出来ればよい。しつこく測定を繰り返す毎日が続けた結果、何とか腕断面らしき画像が撮れるようになり、筋力と筋断面積との関係論文をまとめることが出来た（図1）。

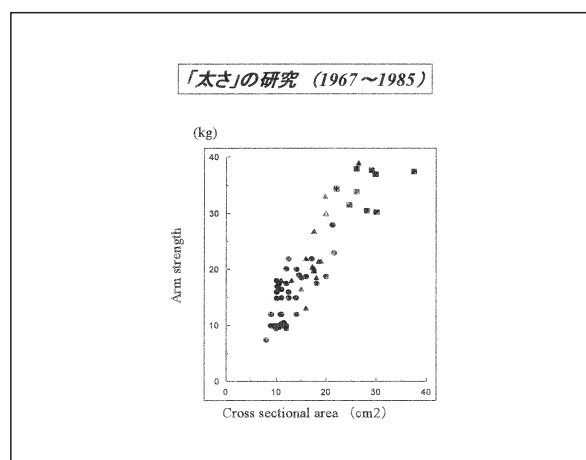


図1. 最大筋力を決定する構造的因子として筋断面積があげられる。

超音波断層法を用いた筋断面積測定法の開発とその応用。(Ikai and Fukunaga, Int. Z. angew. Physiol. 1968)

自分ながらよく修士論文までこぎつけられたと思う。しかし、依然として超音波断面像に対する測定精度の不安はなくなることはなかった。博士論文を書きながらも実験結果に対する不安はつる一方で、論文が完成したものの、研究を終えた満足感は生まれてこなかった。結果に対する測定精度の自信がなかったからである。1976年、東京大学教養学部（駒場）赴任後、5年間くらいかけて博士論文をそのまま追試した。結果は満足のいくものだった。単位断面積あたりの肘屈曲力は以前の論文と同じ約 6 kg/cm^2 であった。更に、1990年代になり Kawakami たちが同じ筋群について MRI 法で測定してもほぼ同じ値であった (Kawakami et al, Eur J Appl Physiol, 1994)。

研究に入る過程は人によって様々ではあるが、

多くの場合、大学院修士課程から始まる。出来れば、修士論文で方法論の骨組みを確立したいものである。しかもオリジナリティの高い方法論が身につけば、博士課程でその方法を用いて博士論文にまでもっていくのはそう困難ではない。博士論文を書き上げてから、一人前の研究がスタートすることになる。運転免許証を持たないでは車を運転できないように、博士号は独立した研究者の免許証のようなものであり、本格的な研究のスタートである。

「輪切り」から「縦切り」へ

博士論文の追試の結果が満足するものだったことから、超音波による断面積測定にかなり自信がつき「輪切りの職人」を自負するようになった。しかし、1980年代後半になり、断面像を精度良く短時間で測定できるCT法やMRI法の出現は「輪切りの職人」にとって大きなショックだった(図2)。

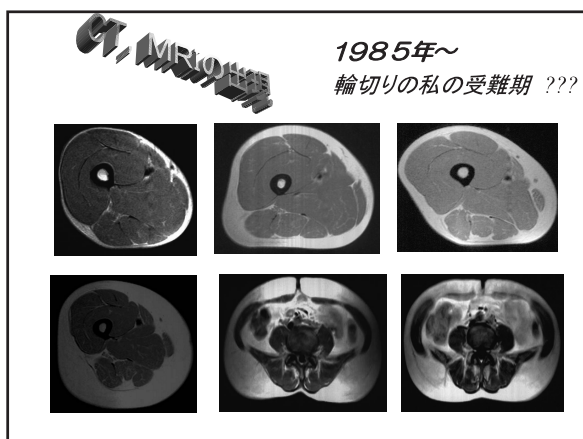


図2. X線CT法及びMRI法の発達は生体内部映像化を画期的に発達させ、その測定精度がアップした。

「筋断面積を超音波法で測る時代は終わった」と思った。そこで、超音波法の生き残る道を「輪切り」から「縦切り」に見出そうと試みたのは1985年頃だった。一方で、MRI法による生理学的断面積の測定に興味が強引かれていた(図3)。

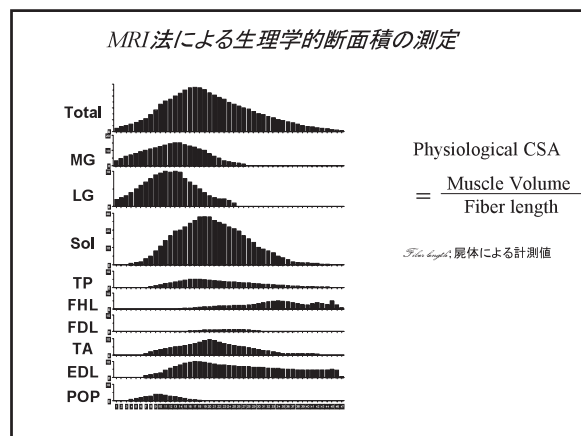


図3. MRI法の発達により、ヒト生体での断面積の測定が容易になり、その結果、連続する筋の断面積の測定が可能になった。このことから、ヒト生体における筋の生理学的断面積の測定が可能になった。(Fukunaga et al. J Orthop Res 1992)

超音波で縦断画像は「鱈のひらき」の様で、斜めに走る白いエコーが筋線維からの情報であるとは思えなかった。屍体で確かめようと試みたが、研究の方向性に迷いが生じていて、十分に実験に集中できず論文にまとめるまでには至らなかった。1989年の国際バイオメカニクス学会(UCLA)で超音波法によるpennation angle(羽状角)測定の論文が発表された。不十分な研究ではあったが、あわてて、それまでの「縦切り超音波像」を見直すことから、羽状角及び筋束長の測定に踏み出すことになった(図4, 5)。

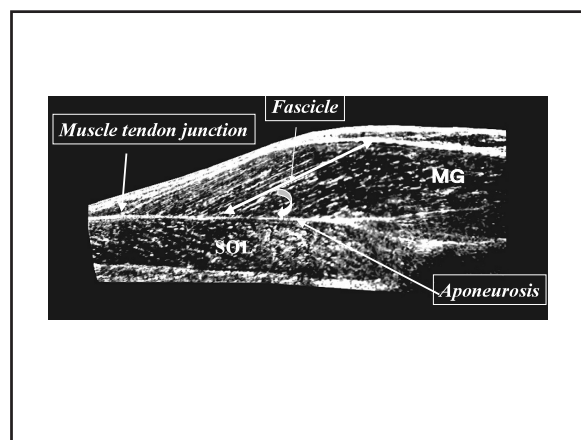


図4. 超音波断層法を用いての3次元画像の構築。超音波縦断画像から筋線維の走行角度(羽状角, Pennation angle)や筋線維長の計測が可能になった。(若原 原図)

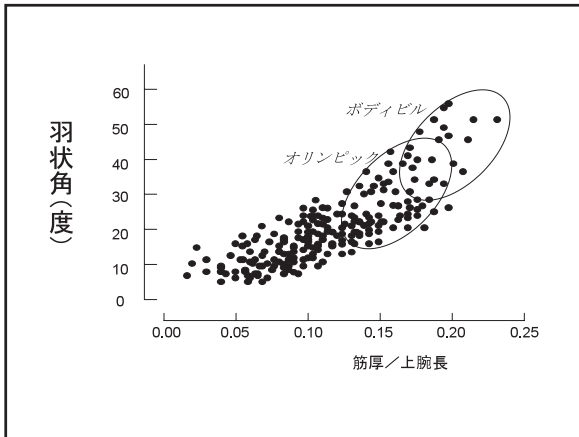


図5. 羽状角は筋厚に依存することが明らかになった。(Kawakami et al. J Appl Physiol 1993)

当時、「超音波縦切り画像」測定の意味に関して、水曜ミーティング（研究仲間のミーティング）においても賛否両論があった。様々な議論を闘わしながらも、この手法に関して興味を示す院生が現れ始め、次々と論文が掲載され始めた。試行錯誤を繰り返しながら、羽状角や筋束長の測定がリアルタイムで計測されるようになり、筋力発揮中の筋線維や腱組織の動態が様々な角度から研究されるようになった。その結果、従来から言われていた基礎生理学での筋の収縮特性（等尺性、短縮性、伸張性、等速度性）をヒト生体に当てはめた場合の新しい事実が解明される事となった。（図6, 7, 8, 9）

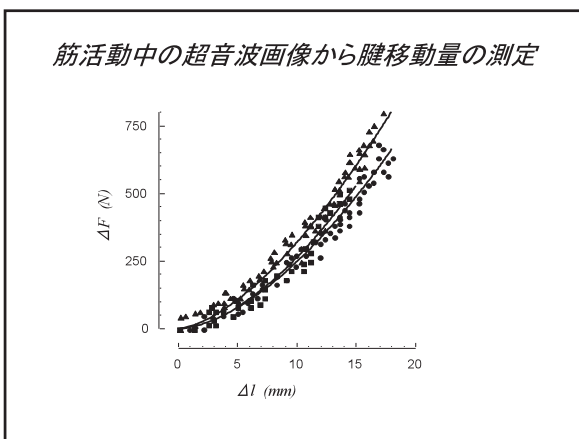


図6. リアルタイム超音波断層法の活用により筋が収縮中の腱の伸長量が測定できるようになった。関節を固定しての筋収縮（等尺性収縮）中に腱が伸長する傾向が見られた。（Fukashiro et al. Eur J Appl Physiol 1995）

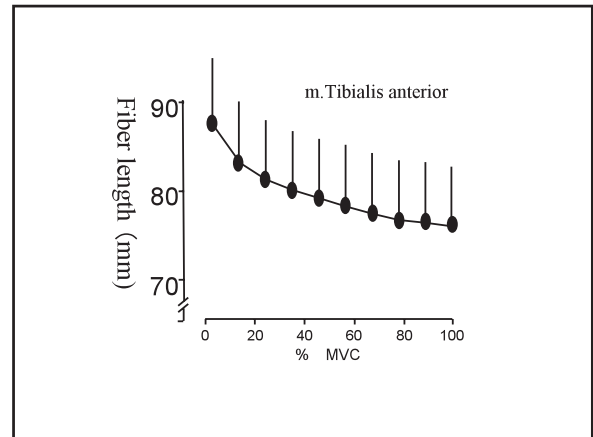


図7. 等尺性筋活動中（関節の角度一定）に筋線維長が短縮する傾向が見られた。これは、筋力により腱が伸長した結果であると考えられている。（Ito et al. J Appl Physiol 1998）

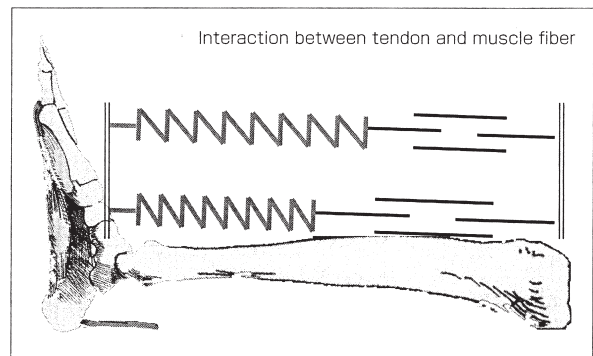


図8. 等尺性筋活動においては関節角度が一定であるために、筋腱複合体長は一定であるが、腱組織が筋力により伸長される結果として筋線維が短縮する。これを Internal Shortening という。（福永原図）

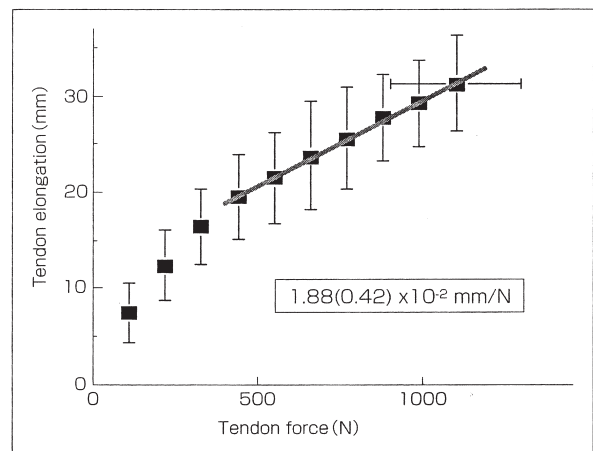


図9. 等尺性脚伸展筋力発揮中の腱に作用する力と腱伸長量との関係。両者の関係がある一定張力以上では直線的になるので、この回帰直線の勾配が腱のコンプライアンス（伸展性）を表わす指標として利用される。（Kubo et al. J Appl Physiol 2000）

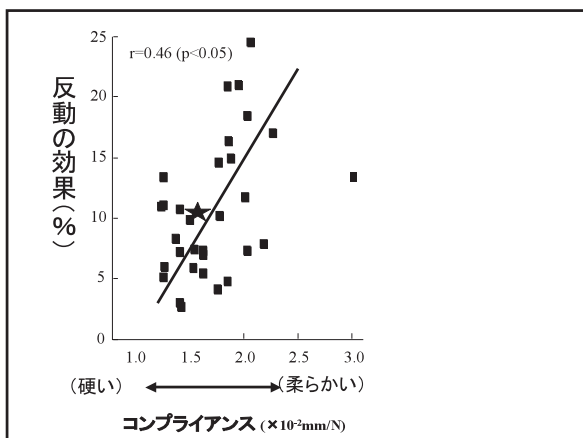


図10. 垂直とび動作の反動の効果は腱のコンプライアンスと有意な関係がある (Kubo et al. J Physiol 2001)

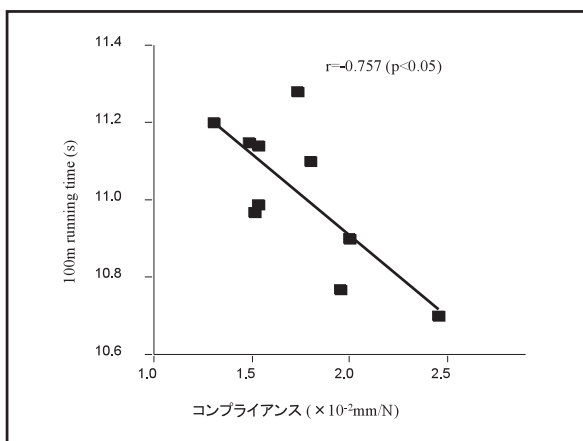


図11. 短距離走タイムは腱のコンプライアンスと有意な関係にある。(Kubo et al. Act Physiol Scand 2001)。

現在は「超音波縦切り画像法」はほぼ世の中で認められてきたようである。しかし、今後も「超音波縦切り画像」の精度と意義に関する研究を怠ってはいけないと思う。いかなる場合においても、常に、方法論のチェックをする姿勢が必要である。そのチェック過程から新しい研究テーマも出現するであろう。研究の目的と方法論との関係を常に考えておきたいものである。

1998年12月末で1965年以来33年間親しみ可愛がってきた超音波断層装置 (SSD-120 Echo Vision (Circular Compound Scanning System) のセッティングを解除する決心をしたのは、同じ超音波で携帯型の輪切り撮影が可能な装置が開発され、その論文 (体力科学) が発表されたからである。我々の実験結果が他人により追試される事を妙に楽し

く感じたのは、それまでに十分にデータを集積できた満足感からであった。

身体運動における腱の働きの面白さ

リアルタイム超音波断層法を用いた筋や腱の縦断面撮像法の開発は身体運動における筋線維及び腱組織の動態を明らかにする上で大変面白いデータを提供してくれた。

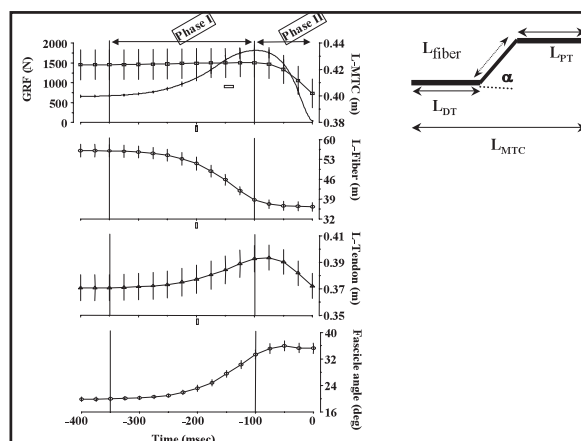


図12. 垂直とび動作中に見られる、筋腱複合体長、筋線維長、腱長および羽状角の変化。垂直とび動作の前半では筋線維が短縮し、腱が伸長するがふみきり直前では筋線維長は一定で腱が短縮しながら垂直とび動作が行われる。(Kurokawa et al. J Appl Physiol 2001)

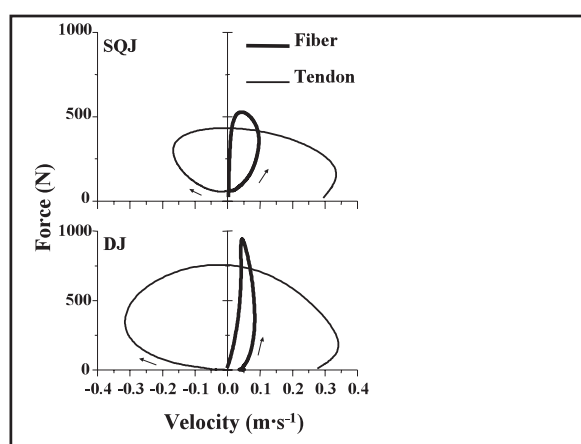


図13. 垂直とび動作中の筋線維及び腱の力-速度関係図。筋線維は速度が低い範囲で力を発揮し、腱は速度の変化が非常に大きいことが明らかである。(Kurokawa et al. J Appl Physiol 2001)。

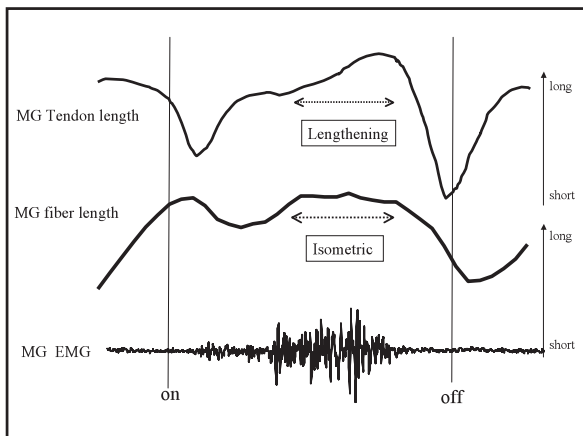


図14. 歩行中の筋線維及び腱の長さ変化筋が強く収縮している相では筋線維の長さ変化がほとんどなく一定であり、その間に腱は長く引き伸ばされている状況が観察される。(Fukunaga et al. Proc Roy Soc Lond 2000)

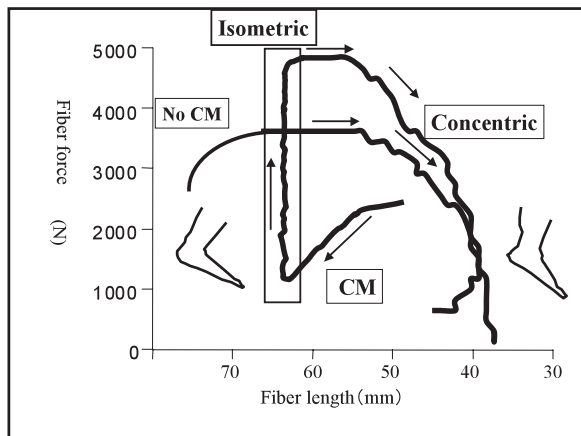


図17. 反動を伴う場合と伴わない動作における筋線維の力-長さ関係。反動を伴う動作ではそうでない場合に比較して同一筋線維長での力が高い傾向が見られるが、その理由として、等尺性収縮によることが考えられる。(Kawakami et al. J Physiol 2002)。

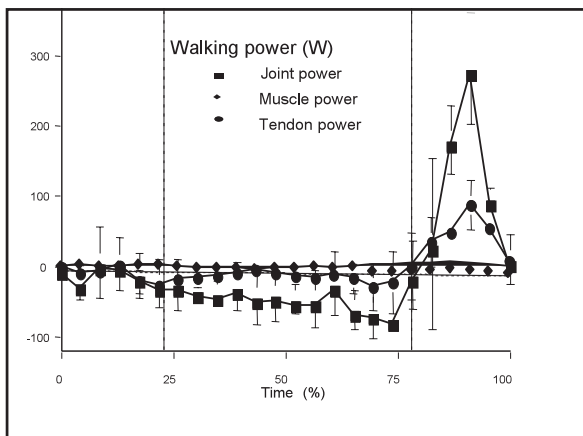


図15. 歩行中の筋線維、腱、及び関節のパワー変化歩行中筋線維はほとんどパワーは発揮していない（力が出ているときに速度はなく、速度が多いときには力が発揮されていない）。この間に腱がパワーを発揮している（負から正へのパワー発揮の切り替え）(Fukunaga et al. Proc Roy Soc Lon 2000)

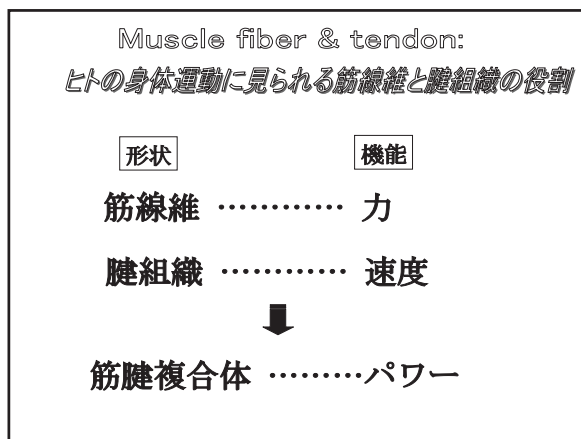


図18. 筋と腱の役割として、身体運動中に筋は力を発揮し、腱が動きを生み出し、関節としての筋腱複合体はパワーを発揮することが出来ると考えられる（福永原図）

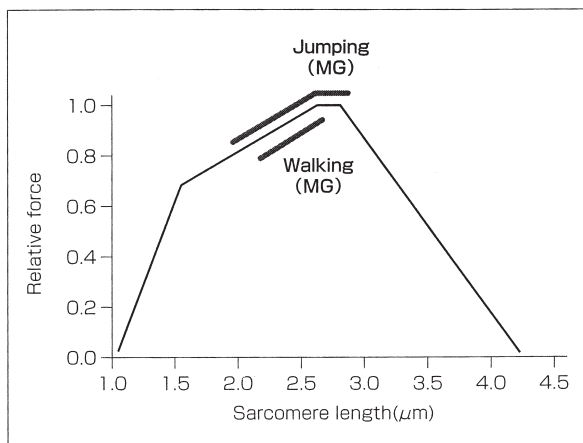


図16. 歩行中及び垂直とび動作中に見られるサルコメア（腓腹筋）の力-長さ関係歩行及び跳躍中に筋線維は最も力発揮のポテンシャルの長さで活動している傾向が見られる。(Fukunaga et al. Exerc Sport Sci Rev 2002)。



図19. 我々の研究チームでのこれらの研究成果が認められ、2003年に ISB Muybridge Medal が授与された。

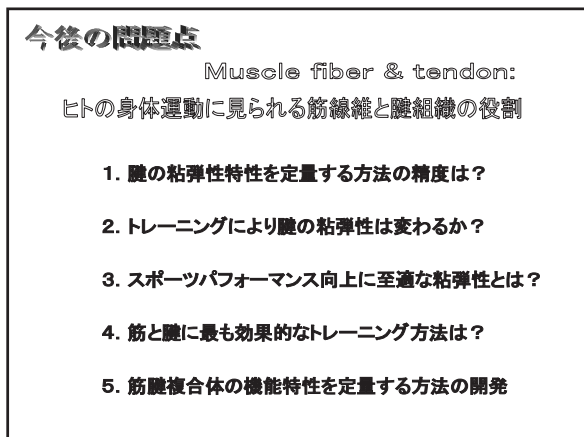


図20. これらの筋と腱の相互関係に見られる研究の今後の方向としては、いくつかの点が課題として残されている。

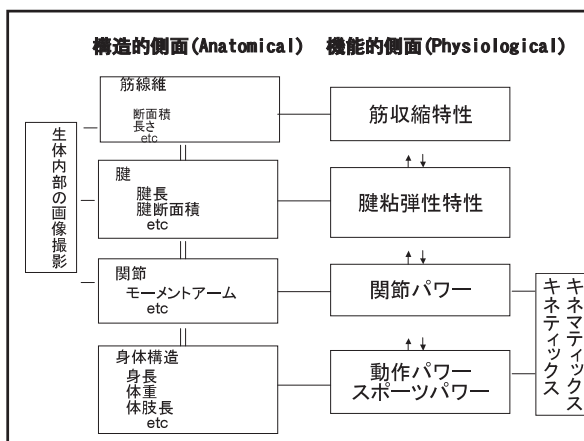


図21. 身体運動における構造と機能との関係
筋線維；筋線維の断面積は力を決定し、筋線維の長さは速度を決める構造的因子である。腱；腱の弾性特性を決定する構造的因子は腱の長さや断面積である。（福永原図）

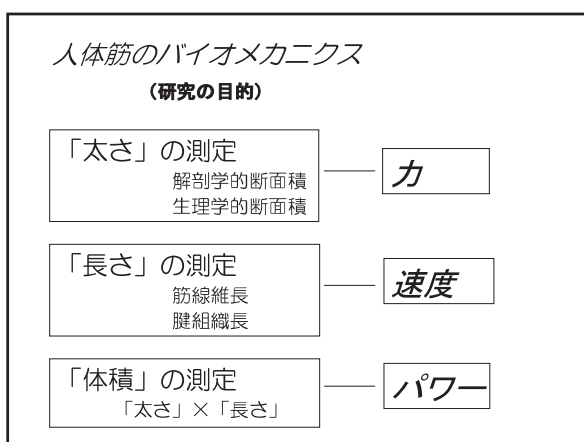


図22. 身体運動は筋の発揮した力及び速度が身体外部に現れることにより引き起こされる。太さが力を決め、長さが速度を決める構造的因子であるので、体積(太さ×長さ)はパワーを決める構造的因子である。(福永原図)

測りつづける人生

研究の進め方には色々なタイプがある。私の場合は「取りあえず測定する」事からスタートする。まず面白そうなテーマに関してデータを収集する事に全力を挙げる。時には単なる「測定屋」と揶揄される事もある。生きている人間の身体や機能を測ろうとする場合、理屈(仮説)通りにいかない事の方が多い。同じ人を同じ方法で測っても同じ値にならない場合も多い。例えば、握力を朝と晩に測ると、日によっては10kg(20%)も異なる場合がある。生きている人間の機能を測ろうとする場合、しつこく測り続ける事にはそれなりの意味がある。測ったデータを処理しながら色々考える。従って、無駄が多い。不要なものを測ったり、必要なものを測らなかったり、後悔する事も多い。研究の効率は悪いが、私の性格に合っている。将来もこの方針を続けるつもりである。実験の前に充分に実験結果を予測し、仮説を立てて研究を進めるのが一般的であろうが、私には向かないようである。

論文にする事の苦しさ楽しさ

実験し、データが出始めるとそれを学会で発表し、論文にまとめる仕事が残っている。一般に、学会発表までは順調に進む事が多いが、それを論文にまとめる段階になるとかなりペースダウンする。私も、実験したり、データ整理したりすることは好きだし、楽しい事が多いが、論文として書き始めると急にストレスがたまり始め、ペースダウンする。高齢者の部類に入ってきた現在においても、依然として論文を書こうとする時のストレスは強い。それだけに、論文が掲載可になった時の感激はひとしおである。その直後は、次々と論文が書けそうな気がする。しかし、次々と論文が書けたためしがないのは何故か、未だよくわからない。テニスやゴルフをする時のような気持ちで論文が書ける日が待ちどろしいが、その日がく

るかどうか。

若い研究仲間の論文作成能力の素晴らしさには眼を見張ることも多い。次々と論文を完成させられるエネルギーとメンタルパワーを日々横で見ていると、自分の能力が向上しているような気になってくるのは不思議なものである。

いずれにしても、有能で善良な人達と過ごす事の幸せを痛感する日々である。

超音波法による筋腱複合体の形状特性測定のあゆみ

力の研究・・・「輪切り」の測定

1968年	解剖学的断面積の計測	Ikai & Fukunaga	Int Z Angew Physiol 26
1992年	生理学的断面積の計測	Fukunaga <i>et al.</i>	J Orthop Res 10

パワーの研究・・・「縦切り」の測定

1993年	羽状角の計測	Kawakami <i>et al.</i>	J Appl Physiol 74
1995年	腱の伸張量の計測	Fukashiro (Ito) <i>et al.</i>	Eur J Appl Physiol 71
1997年	筋束長の計測	Fukunaga (Ichinose) <i>et al.</i>	J Appl Physiol 82
1998年	Internal Shorteningの定量	Ito <i>et al.</i>	J Appl Physiol 85
2001年	腱の粘弾性特性の定量	Kubo <i>et al.</i>	J Physiol 536
2001年	垂直跳中の筋線動態	Kurokawa <i>et al.</i>	J Appl Physiol 90
2001年	歩行中の筋線維動態	Fukunaga (Kubo) <i>et al.</i>	Proc Roy Soc 268
2002年	SSC運動のメカニズム	Kawakami <i>et al.</i>	J Physiol 540

図23. これまで、私の仲間で行ってきた超音波法を用いた筋腱複合体に関する主要論文