

DB
1996
2003
HG

MR I Tagging Snapshot法による
筋運動解析に関する基礎的・臨床的研究

2003
きぬ医師会病院
日置 繁

寄贈
日置
繁氏

04010942

目次

付図一覧

付表一覧

第 I 章 序論	1
I-1 筋の静的形態計測の歴史	1
I-2 筋の動的形態計測の歴史	3
第 II 章 研究目的	6
第 III 章 健常者における筋動態に関する基礎的研究	9
III-1 大腿四頭筋等尺性運動	9
III-1-1 目的	9
III-1-2 対象および方法	9
III-1-2-1 対象	9
III-1-2-2 撮像方法	10
III-1-2-3 計測方法	15
III-1-3 結果	17
III-1-3-1 筋コンポーネント別の移動量	17
III-1-3-2 筋移動量の部位別比較	18
III-1-3-3 筋移動量の部分別比較	19
III-1-4 考察	20
III-1-4-1 筋コンポーネント別の移動量	20
III-1-4-2 筋移動量の部位別比較	21
III-1-4-3 筋移動量の部分別比較	21
III-1-5 小括	23

III-2	大腿四頭筋等張性運動	24
III-2-1	目的.....	24
III-2-2	対象および方法.....	24
III-2-2-1	対象	24
III-2-2-2	撮像方法	24
III-2-2-3	計測方法	28
III-2-3	結果.....	28
III-2-3-1	膝関節屈曲 45 度から 30 度の範囲の伸展運動 ...	28
III-2-3-1-1	筋コンポーネント別の移動量.....	28
III-2-3-1-2	筋移動量の部位別比較.....	29
III-2-3-1-3	筋移動量の部分別比較.....	31
III-2-3-2	膝関節屈曲 15 度から 0 度の範囲の伸展運動.....	32
III-2-3-2-1	筋コンポーネント別の移動量.....	32
III-2-3-2-2	筋移動量の部位別比較.....	33
III-2-3-2-3	筋移動量の部分別比較.....	34
III-2-4	考察.....	36
III-2-4-1	大腿四頭筋等尺性運動との比較	36
III-2-4-2	膝屈曲角度による移動量の差	36
III-2-5	小括.....	37
III-3	膝屈筋群等張性運動	38
III-3-1	目的.....	38
III-3-2	対象および方法.....	38
III-3-2-1	対象	38
III-3-2-2	撮像方法	39
III-3-2-3	計測方法	42

III-3-3	結果	43
III-3-3-1	筋別の移動量	43
III-3-3-2	半腱様筋、薄筋移動量の部位別比較	45
III-3-3-3	半腱様筋、大腿二頭筋短頭、薄筋移動量の 部分別比較	46
III-3-3-4	半膜様筋、大腿二頭筋長頭内部の筋移動量	47
III-3-4	考察	49
III-3-4-1	半腱様筋、大腿二頭筋短頭、薄筋の筋移動様式	49
III-3-4-2	半膜様筋、大腿二頭筋長頭の筋移動様式	50
III-3-5	小括	51
III-4	下腿三頭筋の等張性・等尺性運動	52
III-4-1	目的	52
III-4-2	対象および方法	52
III-4-2-1	対象	52
III-4-2-2	撮像方法	53
III-4-2-3	計測方法	56
III-4-3	結果	56
III-4-3-1	筋別の移動量	56
III-4-3-2	筋移動量の部位別比較	59
III-4-3-3	筋移動量の部分別比較	60
III-4-3-4	アキレス腱部の移動量	63
III-4-4	考察	64
III-4-4-1	筋別の移動量	64
III-4-4-2	筋移動量の部位別比較	65
III-4-4-3	筋移動量の部分別比較	65

III-4-4-4 運動様式による筋移動量の差	66
III-4-5 小括	68
第 IV 章 膝屈筋腱採取例における術後の筋動態の解析	
一 腱採取の影響一	69
IV-1 目的	69
IV-2 対象および方法	69
IV-2-1 対象	69
IV-2-2 撮像方法	70
IV-2-3 計測方法	70
IV-3 結果	70
IV-3-1 半腱様筋、薄筋の収縮様式	70
IV-3-2 半腱様筋の収縮様式と膝機能評価	72
IV-3-3 半膜様筋、大腿二頭筋長頭	73
IV-4 考察	74
IV-5 小括	76
第 V 章 総合考察	77
V-1 撮像方法	77
V-2 下肢の筋の収縮様式	78
V-3 今後の展望	81
第 VI 章 総括	83
引用文献	84
謝辞	97

付図一覧

図 1	Tagging Snapshot 法による標識.....	11
図 2	MRI 撮像と筋収縮のタイミング	12
図 3-1	Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋中央部矢状断像（等尺性運動）	13
図 3-2	Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋冠状断像（等尺性運動）	14
図 4	移動量の測定項目.....	16
図 5	大腿四頭筋等尺性収縮時の遠位部と近位部の移動量の比較 .	18
図 6	大腿四頭筋等尺性収縮時の骨や皮膚に接する部と筋膜部の移動量の比較	19
図 7	大腿四頭筋等尺性収縮時に移動量が多い部分.....	22
図 8	大腿四頭筋等張性運動用下肢固定装具.....	25
図 9-1	Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋中央部矢状断像（等張性運動）	26
図 9-2	Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋冠状断像（等張性運動）	27
図 10	大腿四頭筋の遠位部と近位部の移動量の比較（膝屈曲 45 度から 30 度への伸展時）	30
図 11	大腿四頭筋の骨や皮膚に接する部と筋膜部の移動量の比較(膝屈曲 45 度から 30 度への伸展時）	31
図 12	膝屈筋群等張性運動用下肢固定装具	39
図 13-1	Tagging Snapshot 法による膝屈筋群冠状断像.....	40
図 13-2	Tagging Snapshot 法による半腱様筋矢状断像.....	41

図 14	半膜様筋、大腿二頭筋長頭の二方向性収縮	48
図 15	二方向性収縮様式の予想図	51
図 16	下腿三頭筋計測用の下肢固定装具	53
図 17-1	Tagging Snapshot 法による下腿冠状断像.....	54
図 17-2	Tagging Snapshot 法による下腿矢状断像.....	55
図 18	足関節能動底屈運動時の遠位部と近位部の移動量の比較 .	59
図 19-1	足関節能動底屈運動時の前方部と後方部の移動量の比較	61
図 19-2	足関節能動底屈運動時の内側部と外側部の移動量の比較	62
図 20	足関節等尺性底屈時のアキレス腱部	63
図 21-1	足関節底屈運動.....	67
図 21-2	足関節背屈運動.....	67
図 22	腱採取後の半腱様筋の形態	71
図 23	腱採集された半腱様筋の移動量	72
図 24	半腱様筋の形態別の膝屈筋筋力	73
図 25	腱を採取されていない大腿屈筋群の移動量	74
図 26	運動様式と大腿四頭筋移動量	79

付表一覧

表 1	大腿四頭筋等尺性収縮時のコンポーネント別移動量.....	17
表 2	大腿四頭筋等尺性収縮時の部位別移動量.....	18
表 3	膝関節屈曲 45 度から 30 度への伸展時の大腿四頭筋コンポー ネント別移動量.....	29
表 4	膝関節屈曲 45 度から 30 度への伸展時の大腿四頭筋部位別移 動量.....	30
表 5	膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋コンポーネ ント別移動量.....	33
表 6	膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋部位別移動 量.....	34
表 7	膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋部分別移動 量.....	35
表 8	膝関節等張性屈曲運動時の各筋の移動量.....	44
表 9	膝関節受動屈曲運動時の各筋の移動量.....	45
表 10	膝屈曲運動時の部位別移動量.....	46
表 11	膝屈曲運動時の部分別移動量.....	47
表 12	膝等張性屈曲時の半膜様筋、大腿二頭筋長頭内部の筋移動量	47
表 13	足関節底屈運動時の下腿三頭筋移動量.....	58
表 14	足関節背屈運動時の下腿三頭筋移動量.....	58
表 15	足関節運動時の下腿三頭筋の部位別移動量.....	60
表 16	足関節底屈運動時の下腿三頭筋の部分別移動量.....	62

第 I 章 序論

I-1 筋の静的形態計測の歴史

運動医学や老年医学の進歩に伴い骨格筋の働きが重要視されるようになり、筋電図を用いた電気生理学的手法¹⁻⁵⁾や筋力・持久力測定による力学的手法⁶⁻¹¹⁾、形態計測、組織学的検討¹²⁻¹⁴⁾、代謝産物の測定による生化学的アプローチ¹⁵⁾など様々な研究がなされている。

このうち筋の断面積・体積などの詳細な形態計測が行われ始めたのは1800年頃からとされ、1846年 Weber は足関節底屈筋の単位断面積あたりの筋力を算出するために屍体の筋の体積と長さより足関節底屈筋の断面積を算出する研究を行った¹⁶⁾。100年後の Haxton (1944)¹⁷⁾の研究においてもその断面積の算出は屍体によっていた。生体において筋の形態を計測するには、摘出し直接計測するという方法がとれないため、なんらかの画像による計測に頼らざるを得ない。

最初に画像による筋の計測が行われたのは Stuart (1942) ら¹⁸⁾や Reynolds (1948)¹⁹⁾の単純X線による児童の下腿筋の最大横径の計測であった。Rarick (1956) ら²⁰⁾は、やはり児童において下腿の2方向の単純X線撮影により筋の面積や最大横径を計測し、足関節底屈筋力との関係を報告している。しかし、これらは筋の透写像において観察している程度であり、放射線による被曝の問題も無視できなかった。

その後、放射線被曝のない超音波による人体の断面像が1952年 Howry ら²¹⁾により報告された。彼らは超音波により前腕の軸位像を画像化した後方コンパートのみの描出で骨や骨膜に阻まれた対側の画像

化はできなかった。1958年には Fry²²⁾が超音波を用いて下肢の断面画像を報告した。ここでは粗くはあるが全周性の画像化がされているが、腫瘍への応用の報告であり詳細は述べられていない。この時点では単に画像を得ただけであり、断面積などを数値的に現したものでは無かった。1965年勝木ら²³⁾は超音波の端子が水槽の周囲を水平移動する装置を開発し、前腕の完全な断面画像の撮像に成功し、皮下脂肪厚を数値化した。1969年に福永²⁴⁾は勝木らの研究を発展させ筋断面の定量評価を行い報告した。その後も超音波は筋断面積の計測や筋線維の配列や形状に関する研究に応用されている²⁵⁻³¹⁾。ただし、完全な軸位像を描出し筋断面を計測するには特殊な撮像装置が必要であり²⁴⁾³²⁾広く用いられるには限界があった。

1972年にX線による人体の断面像を描出できる Computed Tomography (CT)が開発され筋断面の画像化と定量評価が容易になった。1978年には Häggmark ら³³⁾が9人の健常者において大腿の筋断面より外側広筋の面積を計測し、その形態計測上の有用性を報告した。その後四肢の筋断面積と筋力や筋組織との関係³⁴⁾³⁵⁾、トレーニング効果の評価³⁶⁾、障害四肢や術後の筋断面積³⁷⁻³⁹⁾や筋の走行の評価⁴⁰⁾などがCTを用いて定量的に行われている。しかし、単純X線と同様にCTによる筋の形態計測は放射線を使用するため被爆の問題が存在し、児童における計測やスライスを多く撮って体積を計算したり、複数の箇所を計測する場合などには配慮が必要である。

1946年に Bloch らと Purcell らによりMR (核磁気共鳴)現象が発見され、これを画像化することによりMagnetic Resonance Imaging (MRI)として1980年ごろより医学に応用されるようになった。MRIは放射線を用いず低侵襲であり、軟部組織間コントラストや空間分解能

が高いため筋の形態計測にすぐれている。1985年 Vock ら⁴¹⁾はトレーニングされている2名とされていない2名のボランティアにつき大腿部のMRI軸位像を撮像し、その形態計測上の有用性を報告した。1988年 Narici ら⁴²⁾は健常男子6名において膝の伸展筋・屈曲筋群の横断面積と筋力の関係を検討した。以後も筋断面積と筋力の検討⁴³⁾⁴⁴⁾やトレーニングによる筋体積変化の評価¹⁵⁾⁴⁵⁾、連続スライス像のコンピューター処理による3次元画像⁴⁶⁾⁴⁷⁾、障害肢での筋萎縮程度の評価⁴⁸⁾や筋の走行に関する研究⁴⁹⁾などが行われている。

著者は、腸脛靭帯を用いた膝前十字靭帯再建術後患者における大腿四頭筋の萎縮の程度と腸脛靭帯採取による影響とを、MRIの連続軸位像によって三次元的に定量評価を行った。その結果、内側広筋では筋萎縮が残存し、腸脛靭帯採取部では外側広筋の突出があり、大腿四頭筋が全体として外旋していることを認め、この外旋変形は大腿四頭筋の収縮により消失する事を報告した⁵⁰⁾。また、健常者にてMRIの連続軸位像により大腿四頭筋の体積と等速度膝伸展筋力、膝屈筋群の体積と等速度膝屈曲筋力の相関を検討し、協同作用をするコンポーネントや筋の間に機能の差異が存在する可能性を報告した⁵¹⁾。

1-2 筋の動的形態計測の歴史

通常の画像計測は筋の静止した状態を撮像し計測しており、筋がどのような形で収縮し、形状を変化させて作用するかを画像化し計測することはできなかった。こうした動的な形態計測の研究は心筋にて始まり、1970年代より外科的にマーカーを埋め込む方法⁵²⁾⁵³⁾や、超音波による計測⁵⁴⁾が行われてきた。しかし、マーカーの埋め込みは侵襲を伴い、超

音波では動きのため筋の同一部分の追跡ができなかった。1987年 Fellowsら⁵⁵⁾は上腕二頭筋の筋内に針を打ち込んでその動きを観察し、同年、Amisら⁵⁶⁾はやはり上腕二頭筋の筋腱移行部に造影剤を入れて動的に観察したが、どちらも外科的侵襲や放射線被曝の問題があった。1988年 Zerhouniら⁵⁷⁾はMRIにて低侵襲に生体組織に目印である標識‘tag’を付け心筋においてその運動を解析した。以後、心筋に標識を印加しその運動を解析する様々な方法が報告された⁵⁸⁻⁶⁰⁾。1991年 Pipeら⁶¹⁾は心臓と大腿の軸位像において撮像面に垂直および傾斜をかけた格子状の‘tag’を印加し、その偏位より計算上の三次元の動きを解析する方法を報告した。しかし、その偏位量は2つの画像より得られるデータから連立方程式にて求める計算上の数値であるため、その過程は煩雑で理論上も誤差が生じる場合があった。また、軸位像よりの情報のため長軸方向全体での観察には向かなかった。この時点までの Tagging の方法は無信号の領域を標識として印可するものであったため‘tag’は低輝度に描出され、中間から低輝度を示す骨格筋組織においては画像上‘tag’の識別が難しく、筋組織には応用が困難であった。1992年、新津ら⁶²⁾⁶³⁾は二度磁場を反転させて高輝度の標識を行うMRI Tagging Snapshot法を開発・報告した。この方法では筋組織内での‘tag’の識別は容易で、任意の方向で撮像断面を設定する事が可能であった。

‘tag’によらない低侵襲な筋収縮の形態計測の方法として1994年に Draceら⁶⁴⁾⁶⁵⁾はMRIのPhase-Contrast画像を用いた前腕の筋の移動を観察・報告した。これは、筋の長軸方向にかけられた傾斜磁場のため部位により位相にずれが生じている状態、つまり筋の近位と遠位で距離に応じた位相の差が存在する状態で軸位像を撮像するものである。筋の収縮による移動が起これば移動距離に応じた位相の差が画像上に現れ、

移動量と方向が解析可能となる。しかし、Pipe らの方法と同様に軸位像を用いたものであるため、長軸方向全体での観察には向かず、また、筋内部での細かい計測も不可能であった。1995 年に Fukashiro ら²⁵⁾は筋線維が腱膜に付着する部分をマーカーとして筋収縮による腱の移動量を超音波にて計測した。この方法は筋腱移行部の長軸方向への移動は観察できるが、筋腱移行部以外つまり筋線維内部にはマーカーを設定できず移動量の定量評価はできないものであった。

第Ⅱ章 研究目的

下肢の障害に伴う下肢の筋力低下・筋萎縮はしばしば遭遇するものであり、特に膝関節障害後の大腿四頭筋の筋力低下・筋萎縮については多くの報告がある⁸⁾¹⁴⁾³⁷⁾³⁸⁾⁴⁸⁾⁶⁶⁾。大腿四頭筋は大腿直筋・内側広筋・中間広筋・外側広筋の四つのコンポーネントより構成され、すべて大腿神経により支配され、四頭筋腱膜－膝蓋骨－膝蓋靭帯を介して脛骨結節に停止する。大腿直筋は起始が下前腸骨棘・寛骨臼上縁に存在し、股関節屈曲と膝関節伸展を担う二関節筋であるが、残りのコンポーネントは大腿部に起始が存在し膝関節の伸展を行う⁶⁷⁾⁶⁸⁾。膝関節外傷後の大腿四頭筋萎縮では筋全体が萎縮するのはもちろんであるが、なかでも内側広筋の萎縮が強く回復も不良とされている³⁸⁾⁶⁶⁾。この大腿四頭筋萎縮の評価は膝関節伸展位における膝蓋骨上端より5ないし10cm近位部での大腿周囲径または同部でのCTやMRIでの一枚のスライス像により行われている⁸⁾³⁷⁾³⁹⁾⁴⁸⁾。

大腿四頭筋の萎縮を起こす膝関節障害の主要な疾患の一つとして膝前十字靭帯損傷が存在する。膝関節には主に左右動揺性を制御する内側側副靭帯・外側側副靭帯と前後の動揺性の制御を主作用とする前十字靭帯・後十字靭帯の四つの主要な靭帯があり、このうち前十字靭帯を損傷した場合「膝が抜ける」「踏ん張りがきかない」と表現される膝の前後動揺性や回旋不安定性が引き起こされることにより、スポーツ活動中ではもとより日常生活においても支障をきたすことがあり、医療機関での治療の継続を余儀なくされる。保存的療法が無効の場合は膝前十字靭帯の再建術が行われるが、この術式は基本的には大腿骨と脛骨の至適位置の

間に靭帯を作成し、前十字靭帯の機能を代用させるものである。靭帯の再建材料として大腿四頭筋腱膜、膝蓋靭帯、膝屈筋腱、腸脛靭帯など様々な方法が存在し、それぞれ採取腱や靭帯の力学的・形態学的特性や採取部におこる機能障害などが異なっている。

大腿四頭筋のそれぞれのコンポーネントにどのような機能分化が存在するかについては未だ定説がなく、一般に内側広筋は膝伸展位近くで膝伸展や膝蓋骨の安定化機能が大きいとされているが詳細は不明である²⁾³⁾⁵⁾⁶⁹⁻⁷¹⁾。この大腿四頭筋を含め、上腕三頭筋、上腕二頭筋、膝屈筋群、下腿三頭筋など、人体の中で一つの関節を動かすために、複数の筋や筋コンポーネントが協同して働く部位は多いが、やはり各筋やコンポーネントごとの機能の差異に関しては定説が無い。この機能分化を含めた筋の運動機能に関する研究にあたり、筋全体の形状計測する単なる形態計測でのアプローチでは限界があり、腸脛靭帯を用いた膝前十字靭帯再建術後に認められた大腿四頭筋の外旋のごとく⁵⁰⁾、静止状態での観察のみでも不十分と思われた。

1992年に新津らの開発したMRI Tagging Snapshot法を応用すると、生体の筋内部での筋収縮形態の観察や収縮時の筋移動量の定量評価が可能である。従って、本法を用いると関節障害や手術が及ぼす筋運動機能への影響の分析、さらに協同作用をする筋やコンポーネント間の比較も可能と考えられる。しかし、この観点からの先行研究は存在していない。そこで次の点を検討することが重要であると考えられた。

1) MRI Tagging Snapshot法により正常例における筋の収縮形態の観察や収縮時の筋移動量の定量評価を下肢の大関節である膝の伸展筋である大腿四頭筋・膝の屈筋群、足関節の底屈筋である下腿三頭筋において行う。

2) 正常例を評価した上で、膝前十字靭帯再建手術患者において腱採取の影響の評価を行う。

本研究は以上の2点を目的とした。

第 III 章 健常者における筋動態に関する基礎的研究

III-1 大腿四頭筋等尺性運動

III-1-1 目的

正常膝関節の運動や疾患を持つ膝の病態において大腿四頭筋は大きな役割を担っている。大腿四頭筋は四つのコンポーネントから構成されておりそれぞれ筋線維の方向が異なるが、生体内での収縮様式の相違は観察されていない。外傷後の初期の訓練で導入される四頭筋セッティングと呼ばれる等尺性収縮を行わせ、MRI Tagging Snapshot 法をもちいて生体内で各コンポーネントの移動量や収縮様式を計測することを目的とした。

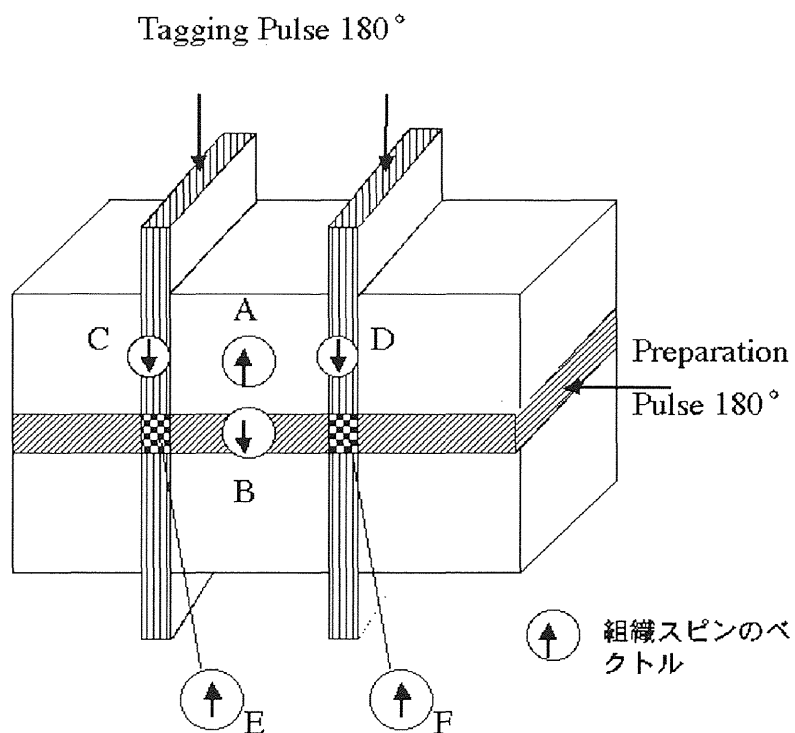
III-1-2 対象および方法

III-1-2-1 対象

膝に外傷歴のない健常成人のボランティア 6 例 6 膝を対象とした。男女 3 名ずつ、右側 5 例、左側 1 例。年齢は平均 23.5 歳 (22-26 歳)、平均身長は 170.0cm (162-179cm)、平均体重は 66.2 kg (52-79kg)であった。各人には口頭にて目的・手技・危険性を説明し承諾を得た。

III-1-2-2 撮像方法

使用MR装置は静磁場が超伝導 1.5 T (tesla) の General Electric 社製 SIGNA 1.5-T であり、受信コイルは全身を対象とする body coil を用いた。撮像は Tagging Snapshot 法と呼ばれる特殊な方法で、従来の spin echo (SE) 法で用いた 180°パルスの代わりに磁場勾配を反転させて信号 (gradient echo 信号) を得る高速撮像法のひとつである T1-weighted snapshot-GRASS (gradient recalled acquisition in the steady state)法を基本としている。まず、撮像面に 180° inversion pulse を preparation pulse として印加し、スライス面の磁場を反転し、次にこの面に垂直な selective 180° pulse を tagging pulse として印加することにより組織を標識する。模式図で示す (図1)。上方の向きに静磁場がかかっているとす。Preparation pulse や tagging pulse を受ける前の組織は静磁場により上方向きのベクトルをもつ。撮像スライス面となる部のベクトルは preparation pulse を受けて反転され下方を向き、さらにこの面に垂直な tagging pulse を受ける標識部のベクトルは再び反転され上方を向く。ここで撮像が preparation pulse を受けた面で行われ、標識部は周辺より上方 (正) の方向に大きいベクトルをもち高輝度に描出される。1本の tagging pulse を印加するのには9ミリ秒かかり、通常10本程印加するため標識には約0.1秒を要する。この間、被検者には標識音が聞こえる。この後、画像コントラストを描出するのに適当な800~1000ミリ秒 (待機時間) をおいて、先に述べた snapshot-GRASS 法にて信号を収集することにより画像を作成する。標識部は高輝度の帯として描出されるため、中~低輝度の筋組織では観察・計測がしやすい。

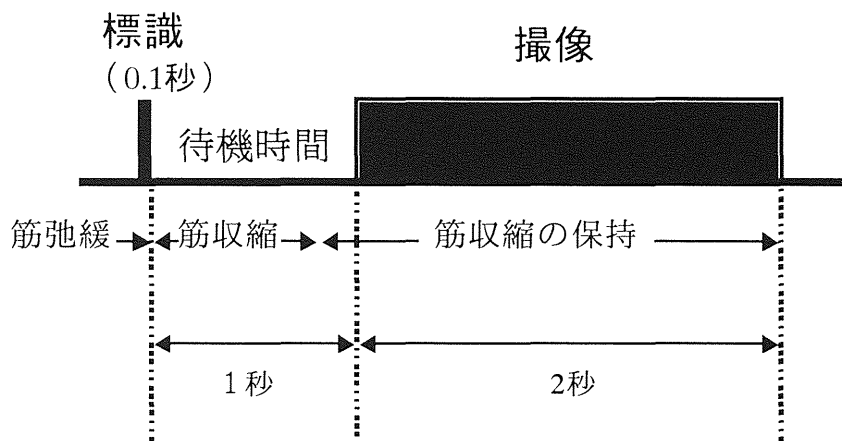


図中上方の向きに静磁場がかかっている。preparation pulse や tagging pulse を受ける前の組織はA部と同様に静磁場により上方向きのベクトルをもつ。撮像スライス面となるB部のベクトルは preparation pulse を受けて反転され下方を向き、さらにこの面に垂直な tagging pulse を受ける標識部 E・F部のベクトルは再び反転され上方を向く。ここで撮像が preparation pulse を受けた面で行われ、標識部は周辺（B部）より上向きに大きいベクトルをもち高輝度に描出される。

図 1 Tagging Snapshot 法による標識

実際の撮像ではまず被検者に筋を弛緩させた状態（安静時）で fast-GRASS sequence (TR/TE = 9.0/ 4.5 msec, flip angle=30 deg)を用い信号収集を行うと、T1強調画像の中に10本程度の高輝度で直線の tagging bands が印加された像が得られる。スライス厚は15mm、標識される tagging band の1本の幅は3mmである。次に、標識音を合図に約1秒の待機時間に被検者に筋の等尺運動を行わせ（収縮時）信号収集を行う（図2）。この信号収集の間、被検者は筋収縮を維持することになる。標識から信号収

集の開始までの待機時間に行わせた等尺性運動による筋の移動はtagging bands の偏位・変形として描出される。標識からのスキャン終了までの時間は3秒で、被検者に苦痛なく繰り返し再試行可能である。安静時と収縮時のtagging bands の位置を比較することにより移動量を把握する事が可能である。



被検者は標識音を合図に筋の収縮を開始し、撮像の開始までに運動を完結させ、その後撮像の終了まで筋の収縮を保持する。

図 2 MRI 撮像と筋収縮のタイミング

被検者をマグネットの中に仰臥位に寝かせ、踵部と膝窩部に固定具を置き、股関節屈曲伸展中間位、膝蓋骨を正面に向け、膝完全伸展位に保持した。この状態で大腿四頭筋の等尺性運動を最大努力による収縮の80%程度の力で標識音のあと瞬時に行わせ、大腿直筋・中間広筋・内側広筋・外側広筋の各コンポーネントごとに大腿骨軸と平行な冠状断・矢状断のスライス像を Tagging Snapshot 法にて撮像し、フィルムに焼き付けた(図 3-1、3-2)。冠状断像は矢状断の位置決め画像より、矢状断像は冠状断の位置決め画像よりスライス面を決定し、試験撮像後に微調整した。スライス面決定後、4 から 5 回の試技を行わせて、安静時

と収縮時に大腿骨の位置とその骨髄内の tagging bands の位置にずれが生じないこと、及び同じ筋移動が繰り返されていることをモニター上で確認した。



安静時

収縮時

大腿直筋 中間広筋

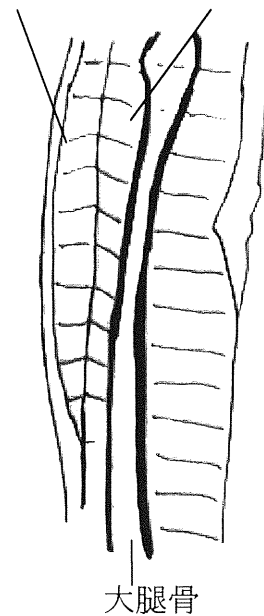
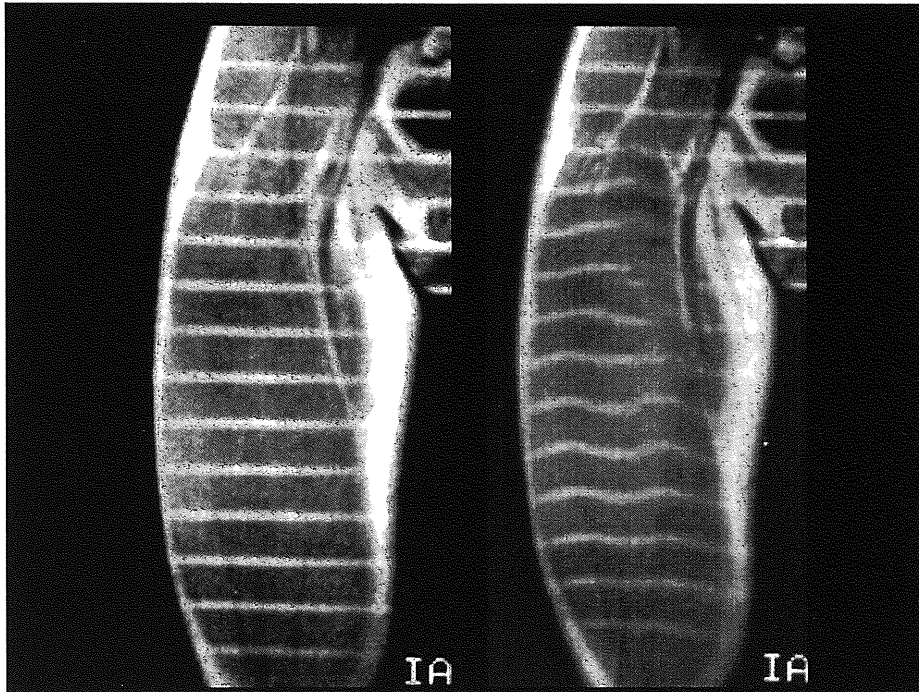


図 3-1 Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋中央部矢状断像 (等尺性運動)

図中左が前方。安静時と収縮時を比較すると大腿直筋と中間広筋が近位方向に移動している。



安静時

収縮時

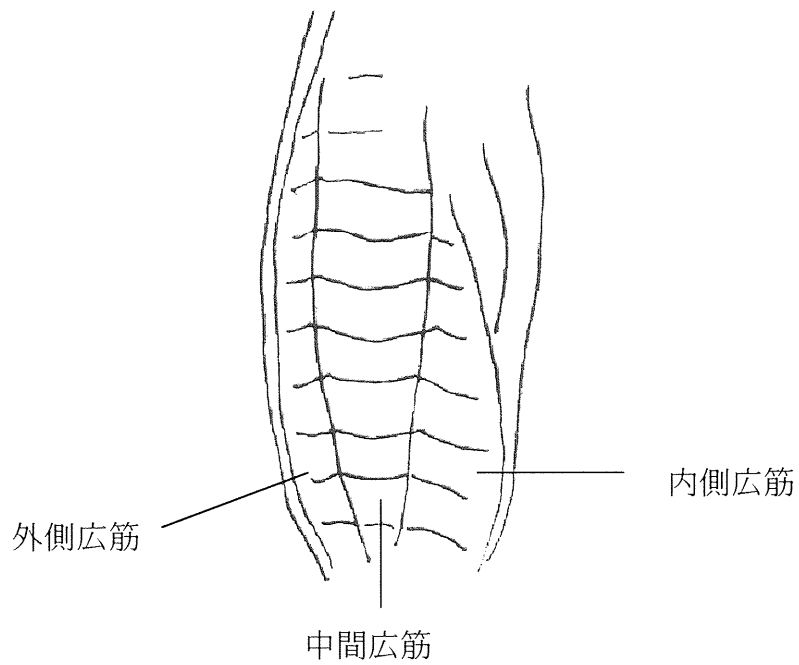


図 3-2 Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋冠状断像
(等尺性運動)

図中左が外側。収縮時には内・外側広筋と中間広筋が近位方向に移動している。

III-1-2-3 計測方法

画像解析装置は Avionics 社製、SPICCA-II Image Command 5098 を用いた。安静時と収縮時の画像フィルムを画像解析装置に取り込み、二つの画像を大腿骨や各画像の同じ位置に焼き付けられているスケールを基準に重ね合わせ、安静時と収縮時の tagging band を抽出する。安静時の tagging band を基準線として収縮時の tagging band の移動量を計測した（図4）。収縮時の画像では tagging band そのものの幅も変化する。そのため、安静時の tagging band における筋移動方向と反対（中枢に移動の場合は遠位）側の線縁から収縮時の tagging band の同じ線縁までの距離を移動量とした。

計測項目は、基準線からの移動量を最大・最小移動距離、両端部（皮膚や骨、隣接する筋の筋膜と接する部）、筋腹中央部での移動距離、全体の積分値より算出される平均移動距離とし、各筋コンポーネントごとに各 tagging band につき計測した。

計測値は以下の3点につき比較検討した。

- (1) 各コンポーネントに印加されたすべての tagging bands の最大移動距離および平均移動距離を平均した値を、それぞれ各コンポーネントごとの最大・平均筋移動量として比較した。
- (2) 大腿直筋・中間広筋・外側広筋の筋腹部分を長軸方向に三等分し近位部・中央部・遠位部に分け、内側広筋は大腿近位部から遠位部にかけて存在するため二等分し中央部・遠位部に分け、各部に含まれるすべての tagging bands の最大移動距離および平均移動距離を平均した値を各部位ごとの平均移動量・最大移動量として比較した（以後、部位別比較）。

(3) 大腿直筋および中間広筋を含む矢状像において大腿直筋の tagging bands の前方端を皮膚に接する部、後方端を中間広筋と接する筋膜部、中間広筋の tagging bands の前方端を大腿直筋と接する筋膜部、後方端を骨に接する部とした。外側広筋、中間広筋、内側広筋を含む冠状断において外側広筋の tagging bands の外側端を皮膚部、内側端を中間広筋と接する筋膜部、内側広筋の tagging bands の内側端を皮膚部、外側端を中間広筋と接する筋膜部とした。これらのスライスにて各コンポーネントのすべての tagging bands の両端部・筋腹中央部での移動量を平均した値を皮膚や骨に接する部・筋腹中央部・互いに接する筋膜部の各々の部分での筋移動量として比較した（以後、部分別比較）。

2 群間の比較には Student-t 検定を、多群間の比較には分散分析を用いて検定した。

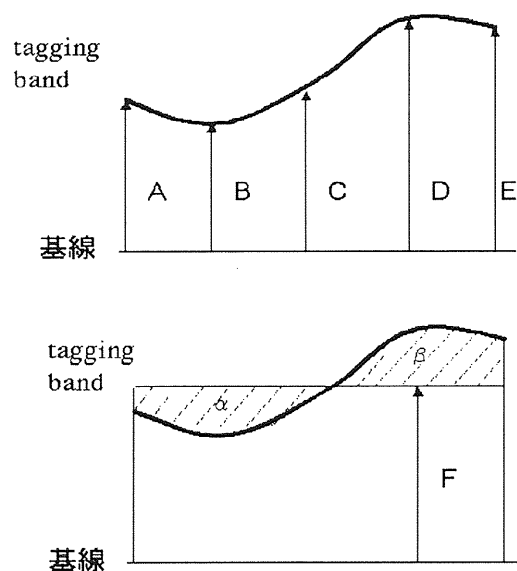


図 4 移動量の測定項目

基線より tagging band までの距離を測定する。A,E : 両縁での移動距離。B : 最小移動距離。C : 中央での移動距離。D : 最大移動距離。F : 平均移動距離（面積 α = 面積 β , 距離の積分値と底辺より算出する）。

III-1-3 結果

III-1-3-1 筋コンポーネント別の移動量

どのコンポーネントも近位側へ移動しており、平均移動量では中間広筋で $9.7 \pm 1.2 \text{ mm}$ と最も大きく、次いで内側広筋($7.9 \pm 1.9 \text{ mm}$)・大腿直筋($7.4 \pm 1.4 \text{ mm}$)・外側広筋($7.2 \pm 1.5 \text{ mm}$)の順で大きかった。最大移動量で比較しても同様に中間広筋($13.3 \pm 1.6 \text{ mm}$)で最も大きく、次いで内側広筋で大きかったが統計的有意差は認めなかった(表1)。

表 1 大腿四頭筋等尺性収縮時のコンポーネント別移動量

症例	平均移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	7.6	9.6	9.5	8.8
No.2	8.0	11.9	7.9	8.6
No.3	5.3	8.6	5.4	4.8
No.4	9.2	10.5	10.9	8.2
No.5	8.5	9.3	8.1	7.0
No.6	5.8	8.5	5.8	5.9
平均	7.4	9.7	7.9	7.2
標準偏差	1.4	1.2	1.9	1.5

単位 mm

症例	最大移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	11.8	13.3	13.8	13.6
No.2	10.6	15.8	12.8	13.7
No.3	7.1	11.3	9.2	8.4
No.4	13.4	14.6	16.9	13.1
No.5	11.0	13.2	12.6	11.6
No.6	6.7	11.4	9.7	9.4
平均	10.1	13.3	12.5	11.6
標準偏差	2.4	1.6	2.6	2.1

単位 mm

III-1-3-2 筋移動量の部位別比較

各筋コンポーネントの近位部・中央部・遠位部に分けた比較では平均移動量では中間広筋では遠位部 $9.5 \pm 0.8 \text{ mm}$ ・中央部 $10.0 \pm 1.6 \text{ mm}$ ・近位部 $9.7 \pm 2.0 \text{ mm}$ と差を認めないものの、大腿直筋では近位部 $5.9 \pm 3.1 \text{ mm}$ ・中央部 $7.5 \pm 1.7 \text{ mm}$ ・遠位部 $8.5 \pm 1.2 \text{ mm}$ と遠位部で移動量が大きく、内側・外側広筋においても遠位部での動きが大きかったが近位部・中央部・遠位部の間に統計的有意差は認められなかった（図5）。最大移動量でも同様に、大腿直筋、内側・外側広筋では遠位部で筋移動量がより大きかったが、やはり近位部・中央部・遠位部の間に統計的有意差は認めなかった（表2）。

図 5
大腿四頭筋等尺性収縮時の
遠位部と近位部の移動量の
比較

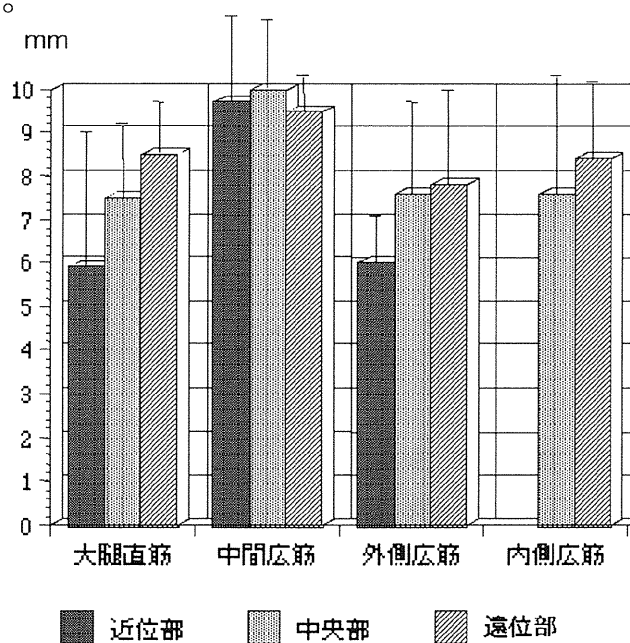


表 2 大腿四頭筋等尺性収縮時の部位別移動量

	大腿直筋			中間広筋			外側広筋			内側広筋	
	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	中央部	遠位部
平均移動量 (標準偏差)	5.9 (3.1)	7.5 (1.7)	8.5 (1.2)	9.7 (2.0)	10.0 (1.6)	9.5 (0.8)	6.0 (1.1)	7.6 (2.1)	7.8 (2.2)	7.6 (2.7)	8.4 (1.8)
最大移動量 (標準偏差)	9.2 (4.9)	10.4 (2.8)	10.7 (2.0)	14.0 (2.6)	14.2 (2.3)	11.9 (1.3)	10.3 (1.6)	12.5 (2.9)	11.8 (3.0)	11.9 (3.0)	13.3 (2.8)

単位 mm

III-1-3-3 筋移動量の部分別比較

皮膚や骨に接する部、筋腹中央部、互いに接する筋膜の部分に分けた比較では、大腿直筋では皮膚と接する部で 3.3 ± 2.4 mm、隣接筋に接する部で 10.4 ± 3.0 mmの移動量を認め、中間広筋では骨と接する部で 1.0 ± 0.8 mm、隣接筋に接する部で 12.3 ± 2.1 mmの移動量を認めた。外側広筋、内側広筋では皮膚と接する部でそれぞれ 0.2 ± 0.4 mm、 0.1 ± 0.3 mm、隣接筋に接する部でそれぞれ 10.4 ± 1.2 mm、 12.7 ± 2.9 mmの移動量であった（図6）。4コンポーネントとも皮膚や骨の部分の移動は小さく、これに比較し、互いに接する筋膜部での移動が大きく、有意差を認めた（大腿直筋のみ $p < 0.05$ 、他は $p < 0.01$ ）。

個体間で、これらの傾向に差は認めなかった。

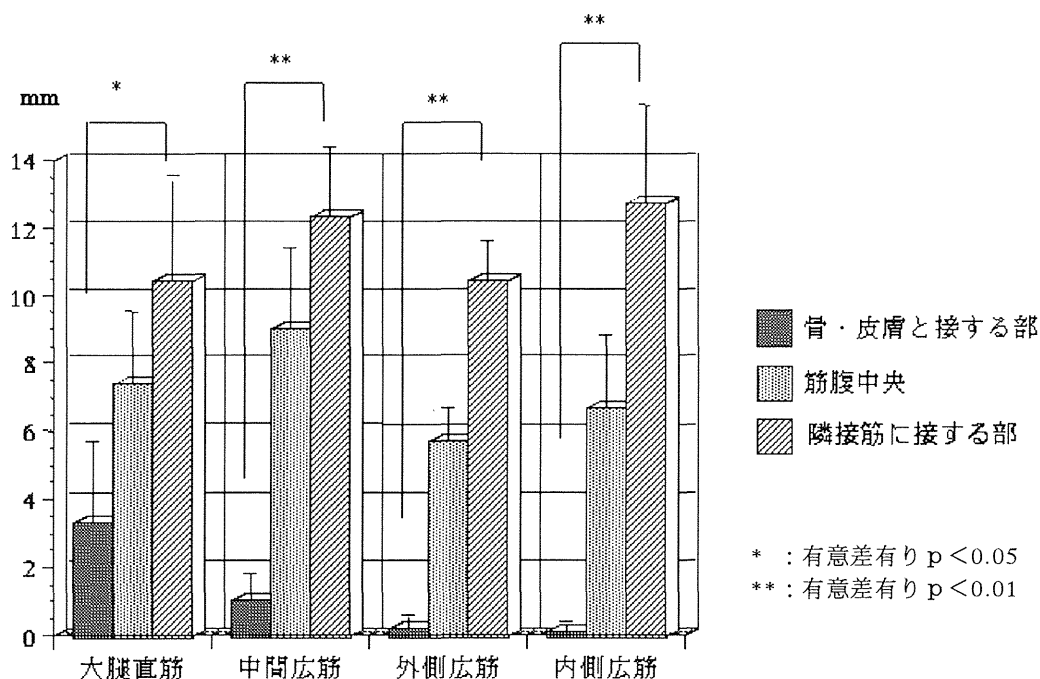


図 6 大腿四頭筋等尺性収縮時の骨や皮膚に接する部と筋膜部の移動量の比較

III-1-4 考察

III-1-4-1 筋コンポーネント別の移動量

大腿四頭筋等尺性運動は四頭筋の訓練としては最も基本的な運動のひとつであり、関節の実際の動きを伴わないため関節や骨への影響が少なく、変形性関節症で関節痛のある者はもとより、外傷後の固定されたギプス内や下肢の手術直後においても導入される運動である。

大腿四頭筋の四つの筋コンポーネントのうち内側広筋は解剖学上は遠位部の斜走線維と近位部の縦走線維に分けられるが、今回の撮像ではこの斜走線維と縦走線維の区別はつけられなかった。Lieb ら⁷²⁾は屍体膝を用いた力学的実験においてコンポーネントのうち単独では中間広筋、組み合わせでは中間広筋と大腿直筋の組が最も効率が良く膝を伸展させるとした。今回の計測では中間広筋が最大の移動を示し、力学上最も膝伸展効率の良い筋が最大の移動をしていたことになる。次いで大きな移動量を示した内側広筋については Smillie⁷¹⁾は 10 から 15 度の最終膝伸展での作用が大きいと述べた。内側広筋斜走線維・縦走線維は Lieb ら⁷²⁾によれば 50—55 度・15—18 度、Scharf ら⁷³⁾によれば 46—52 度・15—18 度それぞれ線維の走行方向が大腿骨軸から傾いているとし、内側広筋全体を一塊として扱い大腿骨軸の方向に移動量を計測した今回の測定方法で得た数値は、実際の線維方向の移動量より小さい値となっているはずであり、特に斜走線維を含む遠位部では中間広筋より大きな移動量となっている可能性がある。

III-1-4-2 筋移動量の部位別比較

移動量がより大きかった筋の遠位部の付着する四頭筋腱・腱膜は種子骨である膝蓋骨、膝蓋靭帯を経て脛骨結節に連なり長い腱膜・腱—膝蓋靭帯複合体を形成する。この腱膜・腱—膝蓋靭帯複合体は膝伸展位の安静時にはゆるんだ状態にあるため筋の緊張で容易に牽引され、同時に特に腱膜部分はコンプライアンスが高いため⁷⁴⁾⁷⁵⁾に筋の収縮による張力で伸張し遠位部の移動量が大きくなっていると思われる。

また今回の計測方法は安静時の元位置から収縮後の最終到達点までの移動量を観察している。連続した筋線維が収縮し全体に近位方向に移動する場合、観察点局所の筋組織は収縮しなくても、より近位部の筋組織の収縮がおこれば、この牽引作用により観察点は近位方向に移動する。実際には観察点局所での筋線維の収縮もおこるため、観察点の移動量はより近位部での筋線維の収縮に伴う牽引による移動と観察点局所での筋線維の収縮による移動量に加わったものである。このため、遠位部になるに従い近位部での移動量も加算され移動量が大きくなっていると考えた。

III-1-4-3 筋移動量の部分別比較

大腿四頭筋の等尺性運動で筋の移動量の大きい部分を総合すると各筋コンポーネントの接する筋膜部で筋の移動が大きく、骨や皮膚に接する部分は移動が小さい。大腿直筋は起始が下前腸骨棘・寛骨臼上縁に存在し起始からの腱膜は筋の前面つまり皮下の部分に位置し、停止部は筋の後面から発する大腿四頭筋腱となっている⁶⁷⁾。外側広筋は大腿骨の粗線

外側唇から大転子にいたる部分を起始とする腱膜が筋の表面つまり皮下の部分に被い、筋線維はこの筋膜や外側筋間中隔より起こり、深部の四頭筋腱と癒合しつつ膝蓋骨外側縁に至る腱膜に付着する。内側広筋は粗線内側唇や内側筋間中隔より起こり、深部の四頭筋腱と癒合しつつ膝蓋骨内側縁に至る腱膜に付着する。中間広筋は大腿骨の前面や外側筋間中隔より起こり、四頭筋腱を形成する前面の腱膜に付着する⁶⁸⁾。移動の小さい部分は筋の起始に近い部分であり、移動の大きい部は大腿四頭筋の作用点である四頭筋腱に連なる筋腱移行部や筋膜である(図7)。筋の収縮時にはこの四頭筋腱に連なる筋腱移行部や筋膜部が大きく移動するものと思われた。

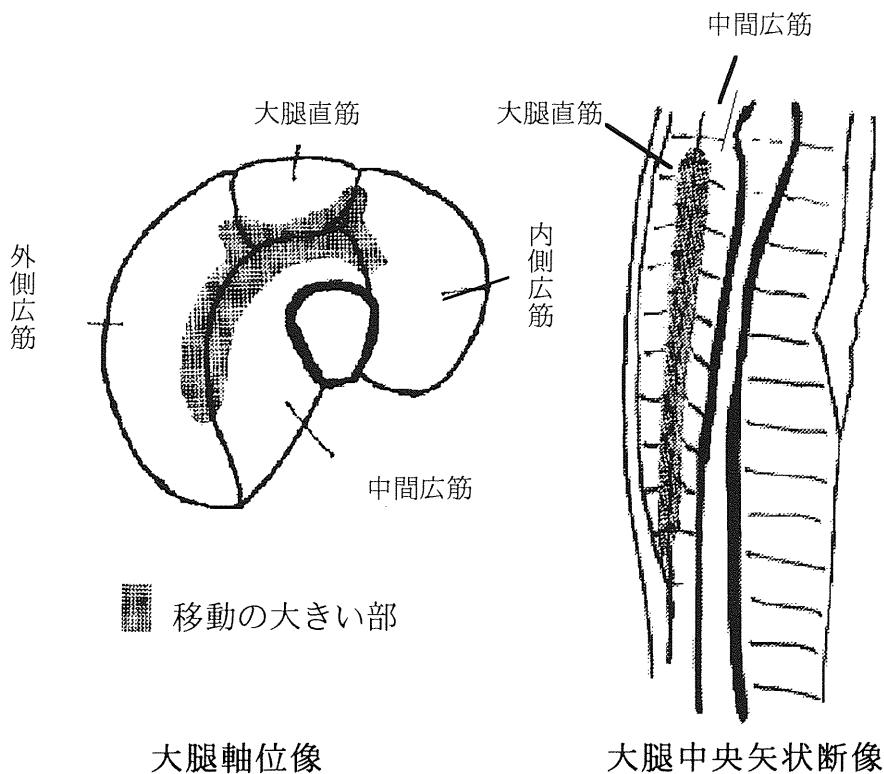


図 7 大腿四頭筋等尺性収縮時に移動量が多い部分

III-1-5 小括

健常成人における大腿四頭筋等尺性運動時の筋収縮様式の検討より以下の結果を得た。

1. Tagging Snapshot 法により、生体内での筋及び筋内部の動的形態評価が可能であった。
2. 大腿四頭筋の等尺性運動では、中間広筋・内側広筋の動きが大きかった。
3. 大腿四頭筋は全体として近位方向へ動き、中間広筋では近位・遠位部での差がなく、他の筋コンポーネントでは遠位部での筋移動が比較的大きかった。
4. 皮膚・骨に接する部分の移動は小さく、各コンポーネントの接する筋膜部での移動が大きかった。

III-2 大腿四頭筋等張性運動

III-2-1 目的

大腿四頭筋の等尺性運動において各筋コンポーネントごとに収縮様式や移動量に差を認め、作用の違いが示唆された。等尺性運動は姿勢の保持や訓練の一部として行われる運動であるが、日常生活やスポーツ動作は殆どの場合、膝の屈曲や伸展を伴う動作であり、等尺性運動が行われていることは少ない。このため日常行われる動作を想定して、膝の伸展を伴う大腿四頭筋の求心性等張性収縮を行わせ筋内部の収縮様式を解析することを目的とした。

III-2-2 対象および方法

III-2-2-1 対象

膝に外傷の既往のない健常成人のボランティア10名10膝を対象とした。男性7名7膝、女性3名3膝、全例右膝を計測した。平均年齢23.6(22-25)歳、平均身長168.7(162-183)cm、平均体重64.3(52-78)kgであった。各人には口頭にて目的・手技・危険性を説明し承諾を得た。

III-2-2-2 撮像方法

III-1-2-2のMRI撮像方法に従って行った。

被検者をマグネットの中に仰臥位に寝かせ、膝の可動域を任意の角度

に制限できる非磁性体の固定具にて股関節屈曲45度、膝蓋骨を正面に向け下肢を固定した（図8）。この状態で次の2種類の大腿四頭筋能動伸展運動を行わせた。

（1）膝関節屈曲45度から30度の伸展運動。

（2）膝関節屈曲15度から0度の伸展運動。

被検者の下肢の重量のみを負荷として特に重りは加えず、標識音を合図に瞬時に膝の伸展運動を行わせ、Tagging Snapshot 法にて各コンポーネントごとに冠状断・矢状断のスライス像を作成した（図9-1、9-2）。

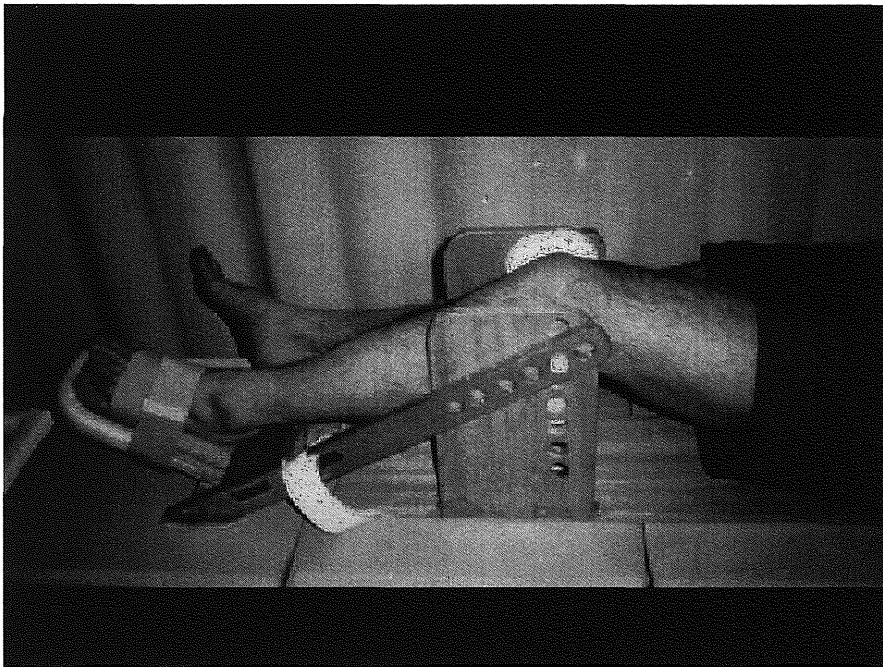


図 8 大腿四頭筋等張性運動用下肢固定装具

膝窩部と大腿骨兩顆、足部が器具に固定される。膝関節部に軸があり、膝の伸展が可能である。



安静時

収縮時

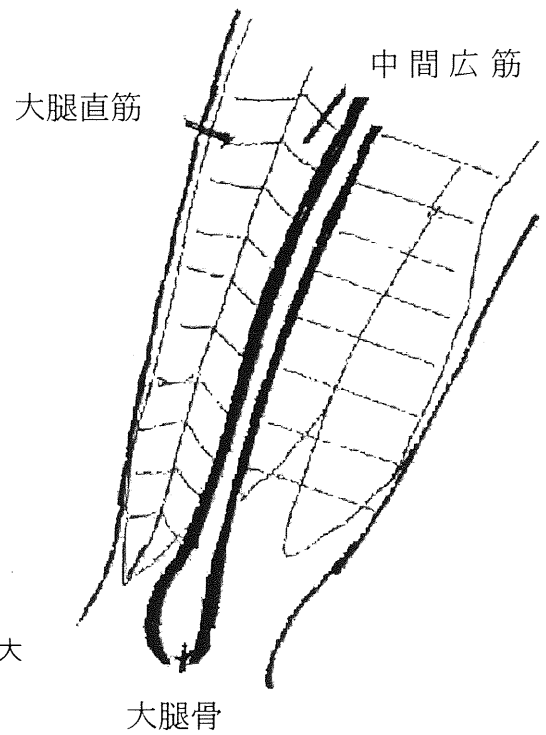


図 9-1 Tagging Snapshot 法による
大腿四頭筋中央部矢状断像
(等張性運動)

図中左が前方。安静時と収縮時を比較すると大腿直筋と中間広筋が近位方向に移動している。

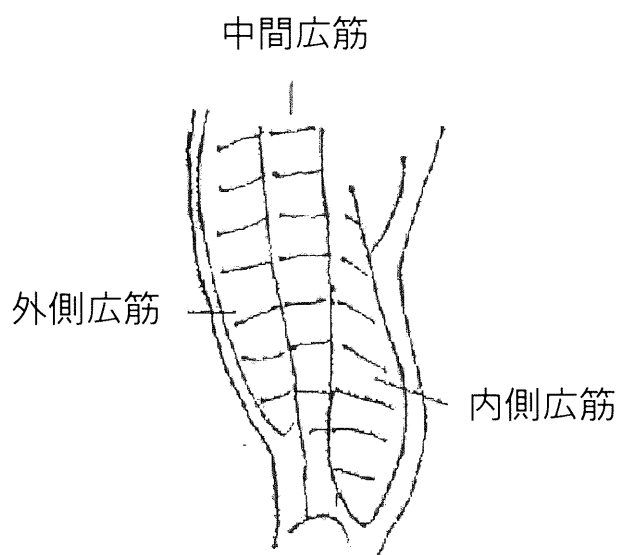
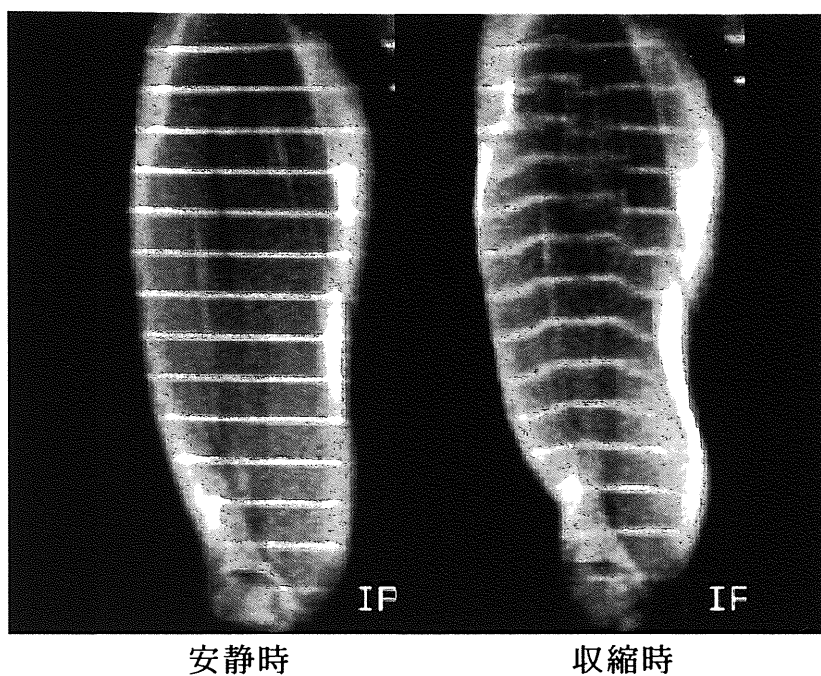


図 9-2 Tagging Snapshot 法による大腿四頭筋冠状断像
(等張性運動)

図中左が外側。収縮時には内・外側広筋と中間広筋が近位方向に移動している。

III-2-2-3 計測方法

計測・解析については III-1-2-3 と同様の方法にて行った。

III-2-3 結果

III-2-3-1 膝関節屈曲 45 度から 30 度の範囲の伸展運動

III-2-3-1-1 筋コンポーネント別の移動量

大腿直筋、中間広筋、外側広筋、内側広筋のどのコンポーネントのどの分部も近位方向へ移動していた。

平均移動量においては中間広筋が $12.9 \pm 1.6 \text{ mm}$ と最も大きく移動し、次いで大腿直筋($12.6 \pm 1.9 \text{ mm}$)・外側広筋($12.5 \pm 1.5 \text{ mm}$)・内側広筋($11.1 \pm 1.8 \text{ mm}$)の順で移動量が大きかった。内側広筋の移動量は中間広筋・外側広筋 ($p < 0.01$) や大腿直筋 ($p < 0.05$) と比較して有意に小さいものであった。

最大移動量でも同様に中間広筋で最も移動量が大きく、次いで大腿直筋・外側広筋、内側広筋の順で大きかった(表 3)。統計学的には内側広筋と中間広筋の移動量の間有意差 ($p < 0.05$) を認めた。

表 3 膝関節屈曲 45 度から 30 度への伸展時の大腿四頭筋コンポーネント別移動量

症例	平均移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	11.7	13.1	11.5	13.6
No.2	15.6	15.4	11.9	13.6
No.3	11.9	12.2	11.7	10.9
No.4	11.9	12.7	12.7	13.7
No.5	10.8	12.3	10.8	11.7
No.6	14.3	14.7	13.1	13.1
No.7	15.7	14.7	12.0	14.7
No.8	11.9	12.3	10.2	11.9
No.9	11.9	11.0	9.8	11.0
No.10	10.2	10.7	6.8	10.4
平均	12.6*	12.9**	11.1	12.5**
標準偏差	1.9	1.6	1.8	1.5

単位 mm

症例	最大移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	14.5	16.3	16.6	16.0
No.2	18.5	19.3	15.7	18.3
No.3	14.6	15.3	15.6	13.8
No.4	15.2	16.7	16.2	17.9
No.5	14.9	15.5	14.1	15.4
No.6	17.6	18.4	17.0	16.0
No.7	19.8	18.6	18.1	19.1
No.8	15.1	14.7	12.6	15.0
No.9	15.4	13.9	13.4	13.9
No.10	12.9	13.9	9.2	13.6
平均	15.9	16.3*	14.9	15.9
標準偏差	2.1	2.0	2.6	2.0

単位 mm

* : 内側広筋に比して有意差あり (p<0.05)

** : 内側広筋に比して有意差あり (p<0.01)

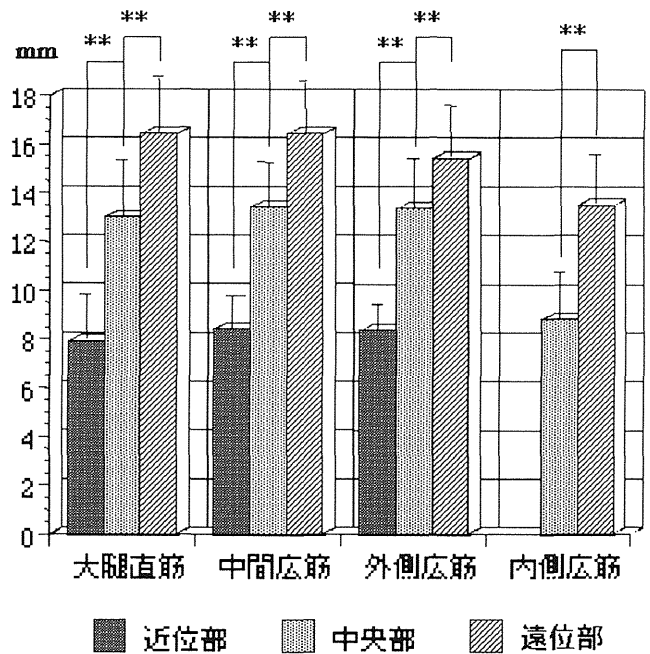
III-2-3-1-2 筋移動量の部位別比較

各コンポーネントの近位部・中央部・遠位部に分けた比較では、平均移動量で大腿直筋の遠位部が $16.4 \pm 2.3 \text{ mm}$ と移動量が大きく中央部 $13.0 \pm 2.3 \text{ mm}$ ・近位部 $7.9 \pm 1.9 \text{ mm}$ とそれぞれの間有意差 (p <

0.01) を認めた。中間広筋においては、遠位部 $16.4 \pm 2.2\text{mm}$ ・中央部 $13.4 \pm 1.8\text{mm}$ ・近位部 $8.4 \pm 1.3\text{mm}$ 、外側広筋では遠位部 $15.4 \pm 1.8\text{mm}$ ・中央部 $13.3 \pm 1.6\text{mm}$ ・近位部 $8.3 \pm 1.4\text{mm}$ 、内側広筋においては、遠位部 $13.5 \pm 2.1\text{mm}$ ・中央部 $8.8 \pm 1.9\text{mm}$ とやはり遠位部での動きが大きく、それぞれ統計的有意差 ($p < 0.01$) を認めた (図 10)。

最大移動量でも同様に、中間広筋、大腿直筋、内側・外側広筋とも遠位部で筋移動量がより大きく、それぞれ遠位部・中央部・近位部の間に統計的有意差 ($p < 0.01$) を認めた (表 4)。

図 10
大腿四頭筋の遠位部と近位部の移動量の比較 (膝屈曲 45 度から 30 度への伸展時)



** : 有意差有り $p < 0.01$

表 4 膝関節屈曲 45 度から 30 度への伸展時の大腿四頭筋部位別移動量

	大腿直筋			中間広筋			外側広筋			内側広筋	
	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	中央部	遠位部
平均移動量 (標準偏差)	7.9** (1.9)	13.0## (2.3)	16.4 (2.3)	8.4** (1.2)	13.4## (1.8)	16.4 (2.2)	8.3** (1.4)	13.3## (1.6)	15.4 (1.8)	8.8## (1.9)	13.5 (2.1)
最大移動量 (標準偏差)	11.1** (2.2)	17.0## (2.4)	18.9 (2.5)	11.7** (1.8)	17.6## (2.1)	18.9 (2.7)	11.7** (2.1)	17.4## (2.2)	18.4 (2.2)	12.3## (2.6)	17.6 (3.0)

単位 mm

** : 中央部に比して有意差あり ($p < 0.01$)

: 遠位部に比して有意差あり ($p < 0.01$)

III-2-3-1-3 筋移動量の部分別比較

皮膚や骨に接する部、筋腹中央部、互いに接する筋膜の部分に分けた比較では大腿直筋において最も移動量が大きかったのは、隣接筋に接する部 ($17.2 \pm 3.4 \text{ mm}$) で、次いで筋腹中央部 ($14.0 \pm 2.8 \text{ mm}$)、皮膚と接する部 ($9.1 \pm 2.8 \text{ mm}$) の順であり、それぞれの間には有意差 ($p < 0.01$, $p < 0.05$) を認めた。中間広筋においても隣接筋に接する部 ($16.3 \pm 2.2 \text{ mm}$) で最も大きく移動し、次いで筋腹中央部 ($12.0 \pm 2.1 \text{ mm}$)、骨と接する部 ($8.3 \pm 2.3 \text{ mm}$) の順であり、それぞれの間には有意差 ($p < 0.01$) が認められた。外側広筋では、隣接筋に接する部 ($15.6 \pm 2.1 \text{ mm}$)、筋腹中央部 ($12.4 \pm 1.9 \text{ mm}$)、皮膚と接する部 ($7.2 \pm 1.7 \text{ mm}$) の順で移動量が大きく、それぞれの間には有意差 ($p < 0.01$) が認めら

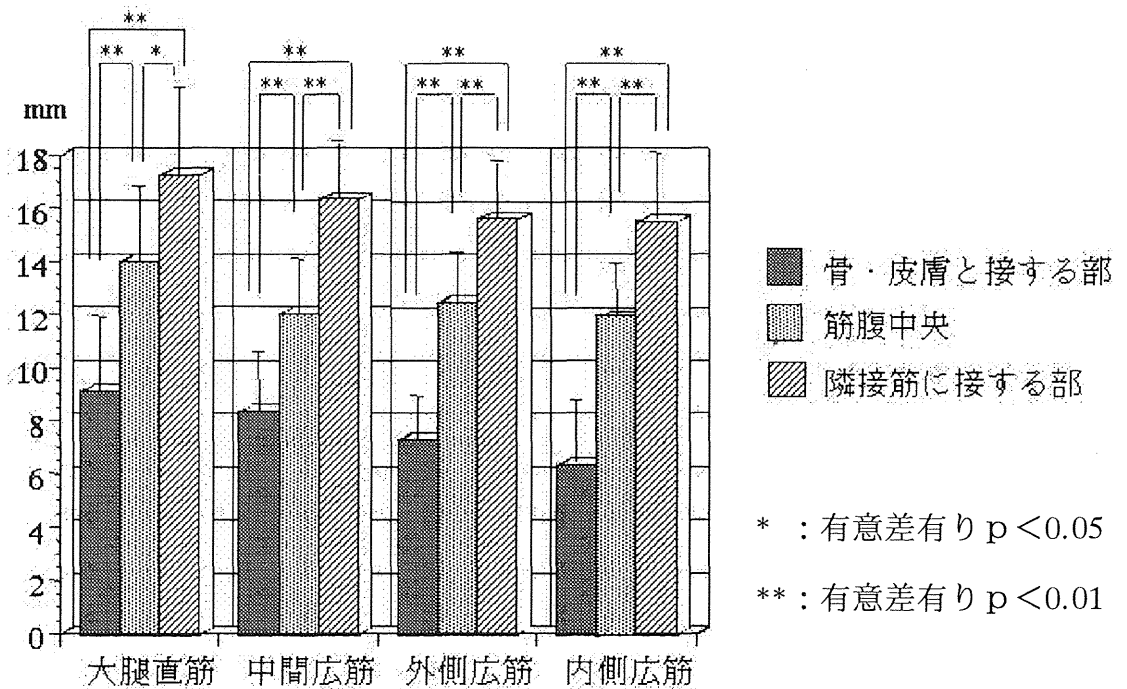


図 11 大腿四頭筋の骨や皮膚に接する部と筋膜部の移動量の比較
 (膝屈曲 45 度から 30 度への伸展時)

れた。内側広筋においても最も大きく移動したのは隣接筋に接する部
($15.5 \pm 2.6\text{mm}$) で、次いで筋腹中央部 ($11.8 \pm 2.1\text{mm}$)、皮膚と接
する部 ($6.3 \pm 2.4\text{mm}$) の順であり、それぞれの間には有意差 ($p < 0.01$)
を認めた (図 11)。

III-2-3-2 膝関節屈曲 15 度から 0 度の範囲の伸展運動

III-2-3-2-1 筋コンポーネント別の移動量

大腿直筋、中間広筋、外側広筋、内側広筋のどのコンポーネントのど
の部分も近位側へ移動していた。

平均移動量では中間広筋で $10.8 \pm 2.1\text{mm}$ と最も移動量が大きく、次
いで大腿直筋 ($10.6 \pm 2.2\text{mm}$)・外側広筋 ($9.7 \pm 1.8\text{mm}$)・内側広筋 (9.3
 $\pm 1.7\text{mm}$) の順であった。内側広筋の移動量は中間広筋 ($p < 0.01$) や
大腿直筋 ($p < 0.05$) と比較して有意に小さかった。中間広筋と外側広
筋 ($p < 0.01$)、大腿直筋と外側広筋の移動量の間にも有意差 ($p <$
 0.05) を認めた。

最大移動量でも同様に中間広筋で最も大きく移動し、次いで大腿直筋、
外側広筋、内側広筋の順で大きかった。統計学的には中間広筋と内側広
筋・外側広筋の移動量に有意差 ($p < 0.05$) を認めた (表 5)。

表 5 膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋コンポーネント別移動量

症例	平均移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	10.5	9.7	6.8	9.9
No.2	15.6	15.4	11.9	13.6
No.3	11.9	12.2	11.7	10.9
No.4	10.4	9.4	8.1	8.6
No.5	10.3	9.4	9.8	8.7
No.6	9.3	9.8	9.7	9.2
No.7	11.6	12.9	10.6	11.3
No.8	9.9	10.8	9.0	8.5
No.9	7.1	9.7	7.5	7.2
No.10	9.1	8.8	8.0	9.4
平均	10.6*	10.8**	9.3	9.7
標準偏差	2.2	2.1	1.7	1.8

単位 mm

症例	最大移動量			
	大腿直筋	中間広筋	内側広筋	外側広筋
No.1	13.7	13.8	10.7	13.5
No.2	18.5	19.3	15.7	18.3
No.3	14.6	15.3	15.6	13.8
No.4	13.8	13.2	11.2	11.9
No.5	13.3	12.1	13.4	12.2
No.6	12.0	12.9	13.5	12.3
No.7	14.9	16.5	15.3	16.0
No.8	12.5	14.0	12.0	11.6
No.9	9.8	13.1	11.7	9.7
No.10	12.1	11.9	10.9	12.1
平均	13.5	14.2*	13.0	13.1
標準偏差	2.3	2.3	2.0	2.4

単位 mm

* : 内側・外側広筋に比して有意差あり (p<0.05)
 ** : 内側・外側広筋に比して有意差あり (p<0.01)

III-2-3-2-2 筋移動量の部位別比較

各コンポーネントの近位部・中央部・遠位部分けた比較では、平均移動量では大腿直筋は遠位部で $13.9 \pm 2.4 \text{ mm}$ と移動量が大きく中央部 $10.4 \pm 2.2 \text{ mm}$ ・近位部 $6.2 \pm 2.3 \text{ mm}$ とそれぞれの移動量の間有意差 (p<0.01) を認めた。中間広筋では、遠位部 $14.4 \pm 2.0 \text{ mm}$ ・中央部

10.4±2.3mm ・近位部 6.7±1.9mm、外側広筋では遠位部 12.6±1.9mm ・中央部 9.9±2.3mm ・近位部 5.9±1.4mm、内側広筋においては、遠位部 11.6±2.3mm ・中央部 6.9±1.0mm とやはり遠位部での動きが大きく、それぞれ統計的有意差 (p<0.01) を認めた。

最大移動量でも同様に、中間広筋、大腿直筋、内側・外側広筋とも遠位部で筋移動量がより大きく、それぞれ遠位部・中央部・近位部の間に統計的有意差 (p<0.01) を認めた (表6)。

表 6 膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋部位別移動量

	大腿直筋			中間広筋			外側広筋			内側広筋	
	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	近位部	中央部	遠位部	中央部	遠位部
平均移動量 (標準偏差)	6.2** (2.3)	10.4## (2.2)	13.9 (2.4)	6.7** (1.9)	10.4## (2.3)	14.4 (2.0)	5.9** (1.4)	9.9## (2.3)	12.6 (1.9)	6.9## (1.0)	11.6 (2.3)
最大移動量 (標準偏差)	9.0** (2.6)	14.2## (2.3)	16.5 (2.4)	9.7** (2.7)	14.9## (2.3)	17.2 (1.9)	9.0** (2.4)	14.2## (3.0)	15.5 (2.5)	10.3## (1.3)	15.5 (2.3)

単位 mm

** : 中央部に比して有意差あり (p<0.01)

: 遠位部に比して有意差あり (p<0.01)

III-2-3-2-3 筋移動量の部分別比較

皮膚や骨に接する部、筋腹中央部、互いに接する筋膜の部分に分けた比較では、大腿直筋において最も高値を示したのは隣接筋に接する部 (13.2±1.8mm) であり、次いで筋腹中央部 (10.5±1.6mm)、皮膚と接する部 (6.9±1.5mm) の順で、それぞれの移動量の間には有意差 (p<0.01) を認めた。中間広筋において最も高値を示したのは、隣接筋に接する部 (12.9±1.5mm) で、次いで筋腹中央部 (8.9±1.3mm)、

皮膚と接する部 (5.0±1.9mm) の順であり、それぞれの移動量の間には有意差 (p<0.01) が認められた。外側広筋においても隣接筋に接する部 (12.0±1.6mm)、筋腹中央部 (9.0±1.2mm)、皮膚と接する部 (3.4±1.3mm) の順で高値であり、それぞれの移動量の間には有意差 (p<0.01) 認めた。内側広筋においても最も高値を示したのは、隣接筋に接する部 (14.4±2.1mm) で、次いで筋腹中央部 (10.5±1.1mm)、皮膚と接する部 (4.1±1.4mm) の順であり、それぞれの移動量の間には有意差 (p<0.01) が認められた (表7)。

表 7 膝関節屈曲 15 度から 0 度への伸展時の大腿四頭筋部分別移動量

	皮膚(骨)と接する部@	筋腹中央部	隣接筋に接する部
大腿直筋 (標準偏差)	6.9** (1.5)	10.5## (1.6)	13.2 (1.8)
中間広筋 (標準偏差)	5.0** (1.9)	8.9## (1.3)	12.9 (1.5)
外側広筋 (標準偏差)	3.4** (1.3)	9.0## (1.2)	12.0 (1.6)
内側広筋 (標準偏差)	4.1** (1.4)	10.5## (1.1)	14.4 (2.1)

単位 mm

@ : 中間広筋のみ骨と接する部

** : 筋腹中央部に比して有意差あり (p<0.01)

: 隣接筋に接する部に比して有意差あり (p<0.01)

III-2-4 考察

III-2-4-1 大腿四頭筋等尺性運動との比較

膝の伸展を伴う大腿四頭筋の収縮においても、等尺性収縮と同様にすべて近位側に移動し、大腿四頭筋の作用点である四頭筋腱に連なる筋腱移行部や筋膜での移動量が大きかった。また、大腿直筋、外側広筋、内側広筋の遠位部での移動量が近位部に比べ大きく有意差を認め、中間広筋でもこの傾向を示した。大腿四頭筋の停止は四頭筋腱・腱膜から膝蓋骨、膝蓋靭帯を経て脛骨結節に連なる長い腱膜・腱性部分からなり特に腱膜部ではコンプライアンスが高いため筋の収縮によりこの部分が引き延ばされ、さらに関節運動による停止部の移動も加わり遠位部の移動が大きかったと考える。また単一方向への移動であるため、より近位部の移動量は遠位部の移動量に加算されることも遠位部の移動が大きかった一因と考える。

起始からの腱膜に近い皮膚や骨に接する部分での移動量が小さく四頭筋腱に連なる筋膜の移動量が大きかったことは、等尺性運動と同様であり、屈曲角度によらない大腿四頭筋の一貫した収縮様式と思われた。

III-2-4-2 膝屈曲角度による移動量の差

膝の屈曲角度と筋の移動量の関係を考えると、膝関節屈曲15度から0度の伸展運動より屈曲45度から30度への伸展運動で大腿四頭筋の移動量は大きくなっていた。通常膝屈曲30度を越えるころから膝蓋骨は大腿骨の膝蓋大腿関節面に引き込まれる⁷⁶⁾。このため膝蓋骨の厚みに

より四頭筋腱・腱膜—膝蓋骨—膝蓋靭帯複合体の支点は大腿骨より遠位前方に移動し、下腿を伸展させるレバーアームは大きくなり力学的には有利になる反面、筋・筋腱の移動量が大きくなる可能性がある。また、屈曲角度がより深い運動で他の筋コンポーネントに対する内側広筋の相対的な移動量は小さくなっていた。一般に内側広筋は膝伸展位近くで大きく作用すると言われ³⁾⁷¹⁾⁷²⁾、今回の結果は、この内側広筋の作用を支持するものと考えた。

III-2-5 小括

健常成人における大腿四頭筋等張性膝伸展運動時の筋収縮様式の検討より以下の結果を得た。

1. 各コンポーネントは遠位部で移動量が大きく、中間広筋にもこの傾向が見られた。
2. 皮膚や骨に接する部分での移動量が小さく四頭筋腱に連なる筋膜の移動量が大きかった。
3. 膝の屈曲角度が大きくなると大腿四頭筋の移動量は大きくなった。
4. 膝の屈曲角度が大きくなると内側広筋の相対的な移動量が小さくなった。

III-3 膝屈筋群等張性運動

III-3-1 目的

大腿屈筋群は大腿四頭筋の拮抗筋群であり、起始や停止の異なる複数の筋が共同して膝関節を屈曲する特異な形態をもつ。半腱様筋はその腱性部分の有用性よりアキレス腱再断裂、足関節の靭帯再建、膝十字靭帯再建術など様々な靭帯手術のドナーとなり、しかも、採取しても膝の屈曲力は低下しないとされてきた⁷⁷⁻⁷⁹⁾。しかし、これに異を唱える報告もあり⁹⁾¹⁰⁾、個々の筋の作用の違いは未知なものである。このため、これまで述べてきた Tagging Snapshot 法を用いて膝屈曲運動時の大腿屈筋群の収縮様式とその差異を検討することを目的とした。

III-3-2 対象および方法

III-3-2-1 対象

膝に外傷歴のない健常成人のボランティア10例10膝を対象とした。男性8名女性2名、全例右側で行った。年齢は平均23.0(21-25)歳、平均身長は171.0(162-183)cm、平均体重は66.7(52-78)kgであった。各人には口頭にて目的・手技・危険性を説明し承諾を得た。

III-3-2-2 撮像方法

III-1-2-2 のMRI撮像方法に従った。

被検者を腹臥位に寝かせ、股関節屈曲伸展中間位で非磁性体の装具で膝の可動域を制限し、足関節部に2kgの負荷をかけて屈曲0度から15度の能動屈曲運動を標識音後に瞬時に行わせ(図12)、大腿二頭筋長頭、短頭、半腱様筋、半膜様筋、薄筋について Tagging Snapshot 法にて各筋ごとに冠状断・矢状断のスライス像を作成した(図13-1、13-2)。また、うち7人に対して屈曲0度から15度の受動屈曲運動を行い同様に撮像を行った。

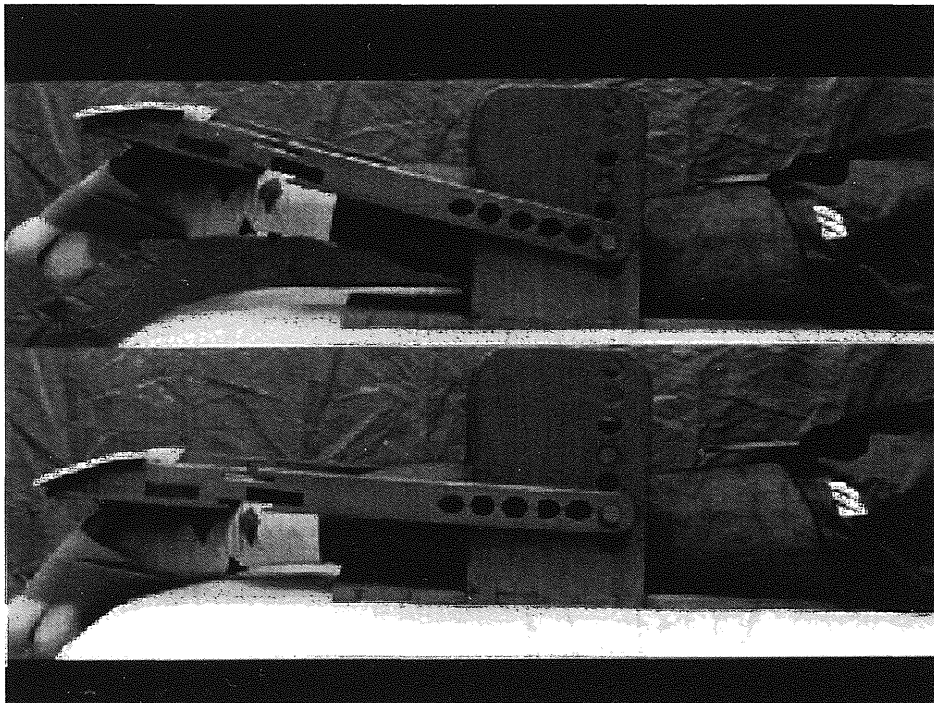
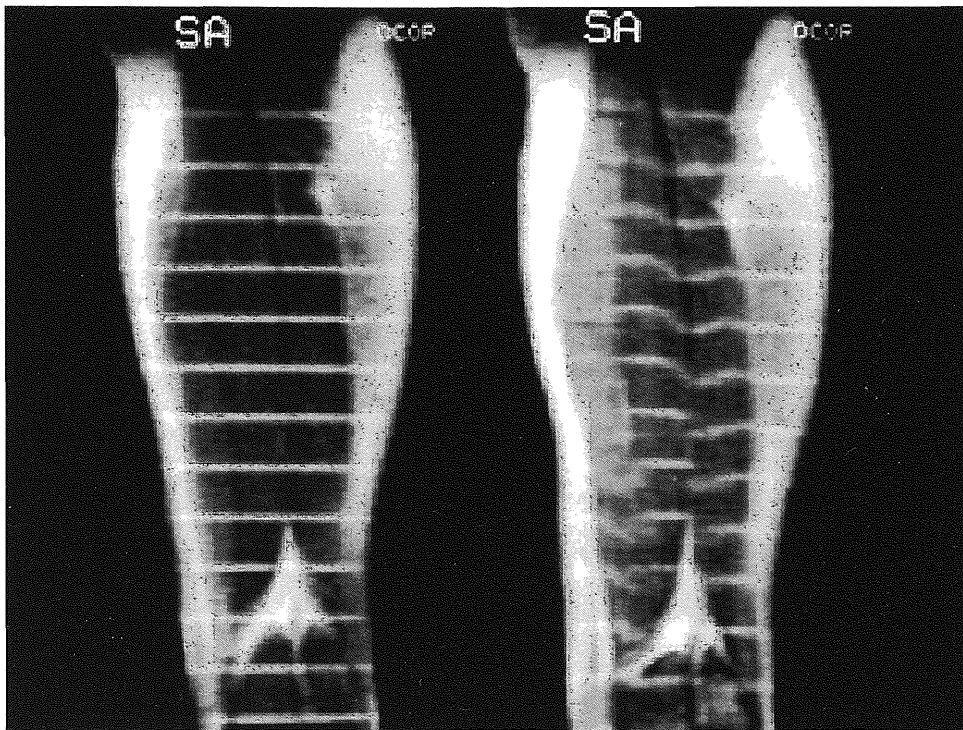


図 12 膝屈筋群等張性運動用下肢固定装具

腹臥位にて被検者の下肢を固定する。下段が安静時、上段が膝屈曲時である。



安静時

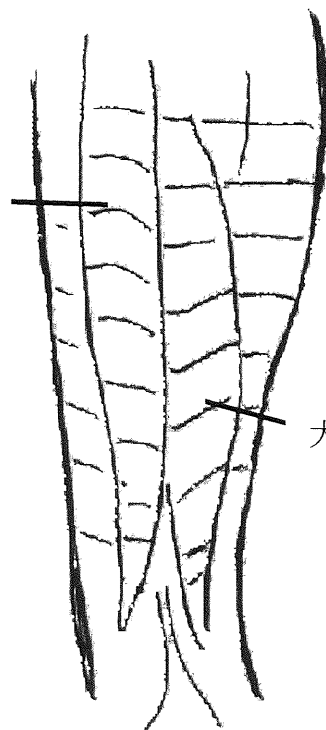
収縮時

図 13-1

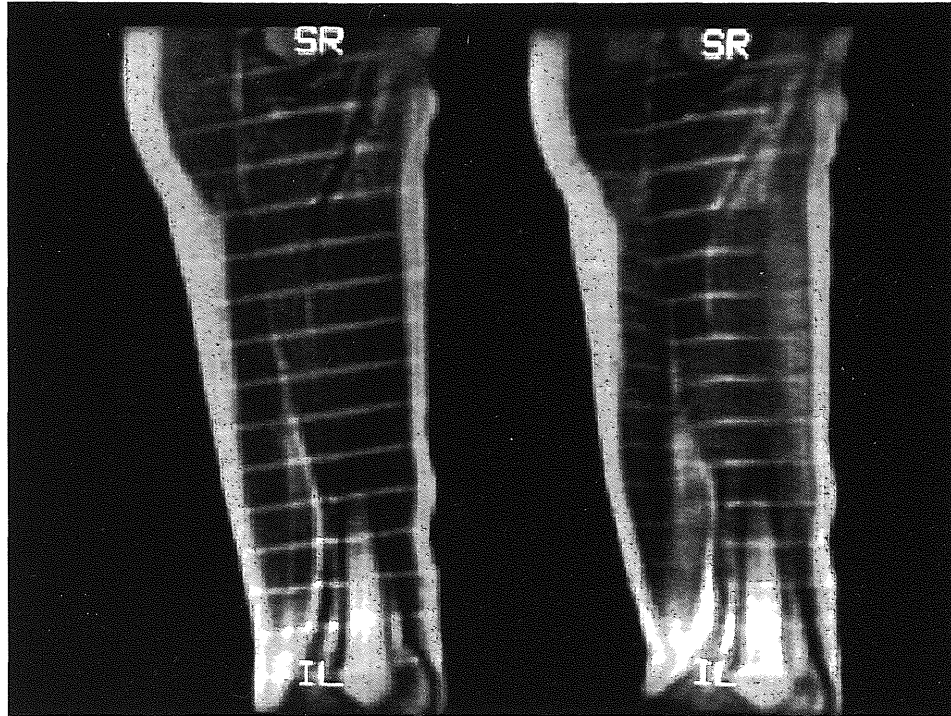
Tagging Snapshot 法による膝屈筋群冠状断像

図中左が内側。半腱様筋、大腿二頭筋長頭の筋内移動が認められる。大腿二頭筋長頭の収縮時の像では、より外側の移動していない基線と比較して、外側部が中枢内側部が遠位方向に移動していることが観察できる。

半腱様筋



大腿二頭筋長頭



安静時

収縮時

図 13-2

Tagging Snapshot 法による半腱様筋矢状断像

図中左が後方。収縮時に半腱様筋の収縮を認める。



III-3-2-3 計測方法

計測・解析については III-1-2-3 と同様の方法にて行った。計測値は以下の点につき検討した。

- (1) 各筋ごとの筋移動量の比較を各筋に印加されたすべての tagging bands の最大移動距離および平均移動距離を平均した値を、それぞれ各筋ごとの最大・平均筋移動量として比較した。(半膜様筋・大腿二頭筋長頭では近位方向・遠位方向への移動を別々に計測した)。
- (2) 半腱様筋・薄筋を筋腹長軸方向に二等分し近位部・遠位部に分け、それぞれの部位に印加されたすべての tagging bands の最大移動距離および平均移動距離を平均した値を、それぞれ部位ごとの最大・平均筋移動量として比較した(部位別比較)。
- (3) 半腱様筋・大腿二頭筋短頭・薄筋にて、矢状像における各 tagging band の両端部および筋腹中央部を前方部・後方部・中央部とし、冠状断における各 tagging band の両端部および筋腹中央部をそれぞれ外側部・内側部・中央部とした。これらのスライスにて各筋のすべての tagging bands の両端部・筋腹中央部での移動量を平均した値を、前方部・後方部・中央部または外側部・内側部・中央部の部分での筋移動量として比較した(部分別比較)。
- (4) 半膜様筋・大腿二頭筋長頭の矢状像において各 tagging band の両端部の値を前方・後方の値とし、さらに筋腹長軸方向に二等分し近位部・遠位部に分けて近位前方・近位後方・遠位前方・遠位後方とし、冠状断像においても同様に近位内側・近位外側・遠位内側・遠位外側の各々4部位にわけて各部のすべての tagging

bands 両端部の移動量の平均値を比較した。また、tagging bands の基線の間隔は同じであることから各 tagging band の近位・遠位方向移動部の基線部の長さは近位・遠位方向に移動する部分の面積と相関する。各 tagging band ごとに近位方向移動部・遠位方向移動部分の基線部の長さを計測し、その平均値の比率を近位方向移動部・遠位方向移動部分の面積比として検討した（半膜様筋、大腿二頭筋長頭内部の筋移動量）。

III-3-3 結果

III-3-3-1 筋別の移動量

膝の能動屈曲運動では大腿二頭筋短頭・半腱様筋・薄筋は大腿四頭筋と同じように近位方向へのみ移動をしたが、大腿二頭筋長頭・半膜様筋では近位方向・遠位方向に移動する部分が存在する二方向性の移動を示した。

近位方向への平均移動量は半腱様筋で 8.3 ± 2.7 mm と最も大きく、次いで半膜様筋の近位方向への移動 (5.4 ± 1.9 mm)、大腿二頭筋長頭の近位方向 (4.9 ± 2.0 mm) への移動、薄筋 (4.5 ± 1.6 mm)、大腿二頭筋短頭 (3.7 ± 1.0 mm) が続いた。半腱様筋と他の筋の間に有意差を認めた ($p < 0.01$)。最大移動も同様の傾向であり、半腱様筋と大腿二頭筋短頭の間にも有意差を認めた ($p < 0.01$) (表 8)。

受動屈曲運動では、大腿二頭筋長頭の二方向性の動きは認められず、半膜様筋でも一部のものにのみ遠位方向の移動が見られた。移動量は平均移動で半腱様筋 3.2 ± 0.7 mm、半膜様筋 2.9 ± 1.2 mm、大腿二頭筋長

頭 2.7±1.0mm、薄筋 1.7±1.8mm、大腿二頭筋短頭 1.4±0.8mmと能動屈曲運動時の半分以下であるが、能動屈曲運動での移動量との相関は無かった。各筋の移動量の間にも有意差は認めなかった。最大移動量においても、やはり能動屈曲運動時の半分以下の移動量であるが、能動屈曲運動での移動量との相関は認められなかった。各筋の移動量の間には有意差は認めなかった（表9）。

表 8 膝関節等張性屈曲運動時の各筋の移動量

症例	平均移動量						
	半腱様筋	半膜様筋 (近位方向)	半膜様筋 (遠位方向)	二頭筋長頭 (近位方向)	二頭筋長頭 (遠位方向)	二頭筋短頭	薄筋
No.1	8.1	4.3	-2.3	5.3		3.5	3.8
No.2	8.3	7.2		9.0		3.0	6.0
No.3	7.4	5.6	-3.5	2.9	-2.1	2.8	4.1
No.4	9.7	3.8	-1.4	5.0	-2.4	4.4	6.0
No.5	9.2	6.2	-4.1	3.9	-3.4	3.5	2.9
No.6	11.0	3.3	-6.7	6.0	-5.5	2.2	5.9
No.7	1.9	3.8	-3.5	5.0	-2.7	4.7	1.2
No.8	9.1	4.5	-4.9	5.7	-5.2	3.6	4.4
No.9	7.4	5.4	-5.4	1.7	-1.9	4.2	4.7
No.10	11.3	9.4	-3.9	4.2	-2.6	5.6	6.3
平均	8.3	5.4*	-4.0	4.9*	-3.2	3.7*	4.5*
標準偏差	2.7	1.9	1.6	2.0	1.4	1.0	1.6

単位 mm

症例	最大移動量						
	半腱様筋	半膜様筋 (近位方向)	半膜様筋 (遠位方向)	二頭筋長頭 (近位方向)	二頭筋長頭 (遠位方向)	二頭筋短頭	薄筋
No.1	9.1	7.6	-3.1	7.1		4.4	3.8
No.2	9.4	9.6		10.9		3.6	6.9
No.3	8.4	9.2	-4.6	3.8	-2.3	3.8	4.3
No.4	10.4	5.5	-1.8	6.6	-3.1	5.3	6.5
No.5	11.6	9.1	-5.5	5.4	-4.6	4.1	2.8
No.6	14.0	5.0	-8.8	7.3	-6.9	2.8	6.4
No.7	5.1	6.1	-4.9	6.0	-3.8	5.4	1.3
No.8	10.2	7.5	-15.2	7.8	-8.5	6.9	4.9
No.9	8.4	7.8	-7.1	2.3	-2.4	4.4	4.7
No.10	13.8	11.7	-5.5	5.8	-3.5	6.4	6.7
平均	10.0	7.9	-6.3	6.3	-4.4	4.7*	4.8
標準偏差	2.6	2.1	3.9	2.3	2.2	1.3	1.8

単位 mm

中枢方向への移動を正の値、遠位方向への移動を負の値で示した。
* : 半腱様筋に比して有意差あり (p<0.01)

表 9 膝関節受動屈曲運動時の各筋の移動量

平均移動量							
症例	半腱様筋	半膜様筋 (近位方向)	半膜様筋 (遠位方向)	二頭筋長頭 (近位方向)	二頭筋長頭 (遠位方向)	二頭筋短頭	薄筋
No.1	3.2	3.2		3.5		1.6	1.4
No.2	4.1	4.4		4.5		1.3	3.9
No.3							
No.4							
No.5	2.4	3.4		1.7		0.8	2.6
No.6	2.6	0.8	-1.3	1.6		0.5	0.0
No.7	3.9	2.2		2.2		0.6	0.0
No.8							
No.9	3.6	3.6	-2.6	2.7		2.5	3.9
No.10	2.7	2.9		2.4		2.3	0.0
平均	3.2	2.9	-2.0	2.7		1.4	1.7
S D	0.7	1.2	0.9	1.0		0.8	1.8

単位 mm

最大移動量							
症例	半腱様筋	半膜様筋 (近位方向)	半膜様筋 (遠位方向)	二頭筋長頭 (近位方向)	二頭筋長頭 (遠位方向)	二頭筋短頭	薄筋
No.1	3.6	4.4		4.4		1.9	1.5
No.2	4.6	5.3		5.4		2.4	3.9
No.3							
No.4							
No.5	2.6	4.9		2.3		1.3	3.0
No.6	2.7	1.4	-1.5	1.7		0.8	0.0
No.7	4.1	2.3		2.9		0.9	0.0
No.8							
No.9	3.8	6.0	-3.6	2.7		2.5	3.9
No.10	3.1	4.0		2.8		2.4	0.0
平均	3.5	4.0	-2.6	3.2		1.7	1.8
S D	0.7	1.7	1.5	1.3		0.8	1.8

単位 mm

III-3-3-2 半腱様筋、薄筋移動量の部位別比較

近位部・遠位部の比較では、能動運動の平均移動量で半腱様筋では近位部 5.1 ± 2.0 mm、遠位部 11.3 ± 3.4 mm で、遠位部の移動量が有意 ($p < 0.01$) に大きかったが、薄筋では近位部 (3.9 ± 2.0 mm)、遠位部 (5.2 ± 1.6 mm) に差を認めなかった。最大移動でも同様に半腱様筋では近位部 6.7 ± 2.4 mm、遠位部 13.1 ± 2.9 mm で、遠位部の移動が有意 ($p < 0.01$) に大きかったが、薄筋では近位部 (4.2 ± 2.2 mm)、遠位部 (5.4 ± 1.7 mm) に差を認めなかった (表 10)。

受動運動でも、平均移動で半腱様筋で近位部 2.1 ± 1.0 mm、遠位部 4.5 ± 0.8 mm で遠位部の移動量が有意 ($p < 0.05$) に大きかったが、薄筋では近位部と遠位部の間に差を認めなかった。最大移動でも同様に半

腓様筋で近位部 2.3 ± 1.0 mm、遠位部 4.9 ± 0.9 mmで遠位部の移動が有意 ($p < 0.05$) に大きかったが、薄筋では差を認めなかった (表 10)。

表 10 膝屈曲運動時の部位別移動量

	能動運動				受動運動			
	半腓様筋		薄筋		半腓様筋		薄筋	
	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部
平均移動 (標準偏差)	5.1 (2.0)	11.3** (3.4)	3.9 (2.0)	5.2 (1.6)	2.1 (1.0)	4.5* (0.8)	1.5 (2.0)	1.9 (2.1)
最大移動 (標準偏差)	6.7 (2.4)	13.1** (2.9)	4.2 (2.2)	5.4 (1.7)	2.3 (1.0)	4.9* (0.9)	1.5 (2.0)	2.0 (2.4)

単位 mm

* : 近位部に比して有意差あり ($p < 0.05$)

** : 近位部に比して有意差あり ($p < 0.01$)

III-3-3-3 半腓様筋、大腿二頭筋短頭、薄筋移動量の 部分別比較

半腓様筋の能動運動において前方部 5.5 ± 2.3 mm・中央部 8.3 ± 2.7 mm・後方部 8.7 ± 3.0 mm、外側部 6.3 ± 1.4 mm・中央部 9.1 ± 1.7 mm・内側部 10.3 ± 2.9 mmと各部に有意差を認めなかった。二頭筋短頭の能動運動 (前方部 1.1 ± 1.0 mm・中央部 3.1 ± 1.7 mm・後方部 4.3 ± 1.6 mm、外側部 4.3 ± 2.5 mm・中央部 5.1 ± 2.3 mm・内側部 4.1 ± 2.9 mm)、薄筋の能動運動 (前方部 3.6 ± 2.4 mm・中央部 4.0 ± 2.2 mm・後方部 3.9 ± 2.4 mm、外側部 5.0 ± 1.9 mm・中央部 5.1 ± 1.9 mm・内側部 5.2 ± 2.0 mm) とともに各部に有意差を認めなかった。

受動運動においても半腓様筋・二頭筋短頭・薄筋とも各部の移動量に有意差を認めなかった (表 11)。

表 11 膝屈曲運動時の部分別移動量

	能動運動						受動運動					
	縦断像			冠状断像			縦断像			冠状断像		
	前方部	中央部	後方部	外側部	中央部	内側部	前方部	中央部	後方部	外側部	中央部	内側部
半腱様筋 (標準偏差)	5.5 (2.3)	8.3 (2.7)	8.7 (3.0)	6.3 (1.4)	9.1 (1.7)	10.3 (2.9)	2.7 (1.5)	2.9 (1.6)	2.9 (1.4)	2.5 (1.4)	3.5 (0.5)	3.7 (0.5)
二頭筋短頭 (標準偏差)	1.1 (1.0)	3.1 (1.7)	4.3 (1.6)	4.3 (2.5)	5.1 (2.3)	4.1 (2.9)	0.5 (0.9)	0.9 (0.9)	1.4 (1.0)	1.5 (2.1)	2.2 (2.6)	1.8 (2.2)
薄筋 (標準偏差)	3.6 (2.4)	4.0 (2.2)	3.9 (2.4)	5.0 (1.9)	5.1 (1.9)	5.2 (2.0)	0.7 (1.1)	1.0 (1.5)	1.0 (1.6)	2.1 (2.4)	2.1 (2.4)	2.1 (2.4)

単位 mm

III-3-3-4 半膜様筋、大腿二頭筋長頭内部の筋移動量

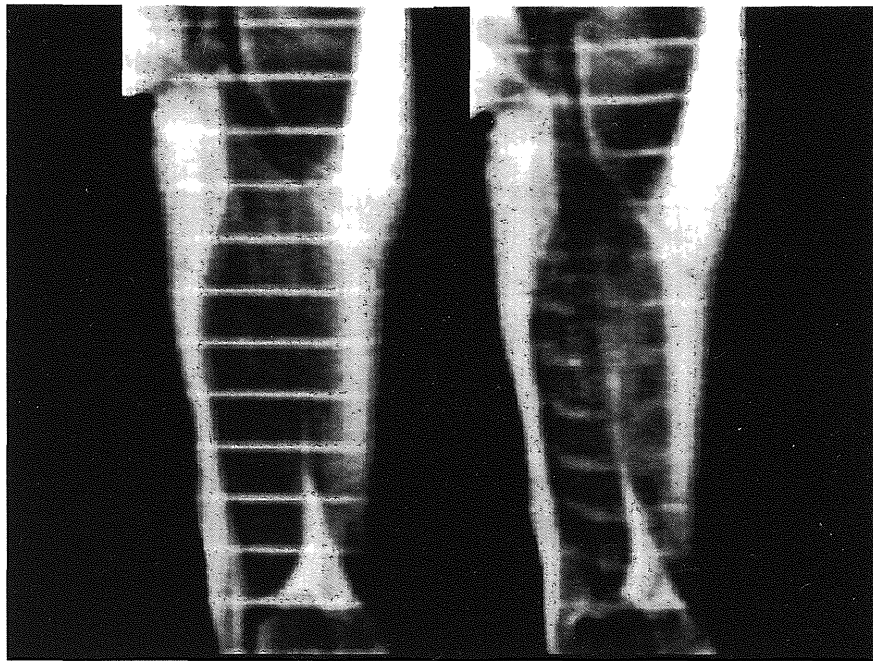
半膜様筋では外側部、大腿二頭筋長頭では内側部が遠位方向に移動しており、この部分は冠状断で接する部分である（表 12）。半膜様筋・大腿二頭筋長頭の近位・遠位方向移動部の面積比では、半膜様筋の矢状像で近位方向の移動部は $73.1 \pm 38.8\%$ 、遠位方向の移動部は $26.9 \pm 38.8\%$ 、冠状断でそれぞれ $71.3 \pm 31.1\%$ 、 $28.9 \pm 31.1\%$ であった。大腿二頭筋長頭の矢状像で近位方向の移動部は $79.4 \pm 23.7\%$ 、遠位方向の移動部は $20.6 \pm 23.7\%$ 、冠状断でそれぞれ $68.6 \pm 26.3\%$ 、 $31.4 \pm 26.3\%$ であった（図 14）。

表 12 膝等張性屈曲時の半膜様筋、大腿二頭筋長頭内部の筋移動量

	矢状断像				冠状断像			
	近位前方	近位後方	遠位前方	遠位後方	近位内側	近位外側	遠位内側	遠位外側
半膜様筋 (標準偏差)	1.0 (4.4)	1.2 (3.5)	3.8 (6.2)	4.2 (6.1)	6.2 (3.9)	-2.7 (4.0)	8.4 (2.2)	-2.0 (3.6)
二頭筋長頭 (標準偏差)	-0.2 (3.7)	2.3 (3.9)	4.9 (3.9)	7.4 (4.1)	-3.4 (3.2)	3.4 (2.6)	-0.6 (4.0)	7.5 (2.7)

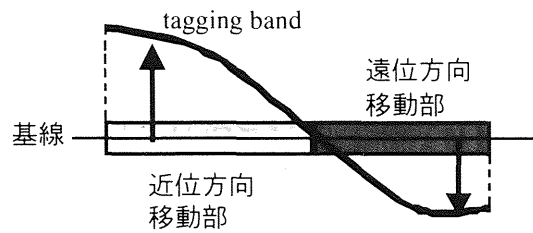
単位 mm

近位方向への移動を正の値、遠位方向への移動を負の値で示した

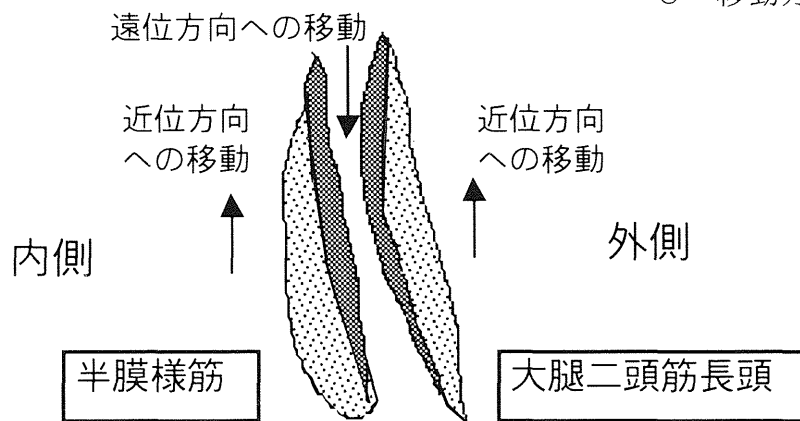


A 安静時

B 収縮時



C 移動方向の決定法



D 冠状断での模式図

図 14 半膜様筋、大腿二頭筋長頭の二方向性収縮

A, B : 大腿屈筋の冠状断像。C : 移動方向の決定法。D : 冠状断での模式図。
半膜様筋の外側と大腿二頭筋長頭の内側に遠位方向への移動を認める。

III-3-4 考察

III-3-4-1 半腱様筋、大腿二頭筋短頭、薄筋の筋移動様式

今回膝屈筋群として検討した大腿二頭筋長頭、短頭、半腱様筋、半膜様筋、薄筋は大腿二頭筋短頭をのぞき骨盤に起始をもち、主に脛骨・腓骨に停止を持つ二関節筋であり、股関節伸展作用と膝関節屈曲作用を併せ持っている。

半腱様筋では一様に近位に移動し、作用点の遠位腱性部でより移動が大きく大腿四頭筋と同様な収縮様式を示した。この半腱様筋は筋腹中央に腱膜部をもつ二腹筋であり、Markee ら⁶⁷⁾は、犬では二腹筋の近位筋腹部分が股関節伸展、遠位筋腹部分が膝関節屈曲を個別に担い、股関節と膝の同時屈曲では遠位部が収縮し、近位部が伸張されると報告した。今回の運動は股関節は中間固定位の膝関節のみの屈曲運動であるが、画像上の近位筋腹と遠位筋腹の区別はできず、機能分化も観察できなかった。

また半腱様筋、大腿二頭筋短頭および薄筋は筋の全長に対する筋線維長の比率が大きいいわゆる平行筋であるため⁸⁰⁾前方部と後方部、内側部と外側部の移動量の違いに差がなかったものと推察する。

大腿二頭筋短頭および薄筋では遠位部と近位部で差がなく近位方向へ収縮移動する大腿四頭筋の等尺性運動における中間広筋と同じ収縮様式であった。今回の屈曲運動は、15度から0度という非常に浅い角度での運動であり、薄筋は深い屈曲角度でその作用が顕著になるとも言われており、更に深い角度での運動や範囲の大きい運動を行えば、膝の屈曲角度が大きくなったときの中間広筋のように、遠位部が有意に大きく動

くことも考えられる。また、薄筋は股関節の内転筋でもあり⁶⁷⁾⁶⁸⁾、膝の屈曲作用は従である可能性も否定できない。今後、深い屈曲角度での運動の評価が課題である。

III-3-4-2 半膜様筋、大腿二頭筋長頭の筋移動様式

半膜様筋・大腿二頭筋長頭は起始・停止から筋腹に長く伸びる腱性部分があり、この腱性部分は互いに筋腹中央部を越えている単羽状筋の形態をとっており⁶⁷⁾、腱性部分の走行方向と筋の機能的な収縮軸（長軸）はずれている。さらに半膜様筋では筋の長軸と筋線維配列の方向も異なっている。起始からの長い腱性部は移動性が高いため、筋線維の収縮により開いた傘の軸が閉じるように筋の長軸に近づくと同時に末梢の方向へ移動し、二方向性の筋の移動のうち遠位方向への移動を引き起こしていると考えた（図15）。

半膜様筋・大腿二頭筋長頭の近位・遠位方向移動部の面積比は、スライス厚が同じであることを考えると、ほぼ両方向への移動部の体積比を示すもので、今回の検討では20から30%の部分が遠位方向に移動すると思われる。しかし、ばらつきが大きく、このことは全体積の大きくない筋のなかで二方向性の移動がおこっているため、撮像面の筋中心からの少量のずれで値が変化する可能性は否定できない。

また、大腿二頭筋には膝関節の屈曲作用のほかに下腿外旋作用および下腿の前方引き出しの抑制作用が存在し⁸¹⁾、半膜様筋には大腿二頭筋による下腿外旋を抑える作用もある⁸²⁾とされ、両筋は膝関節の屈曲では協同作用を持つが下腿の回旋には拮抗する作用をしており、今後、下腿の回旋を加えての検討も必要と思われる。

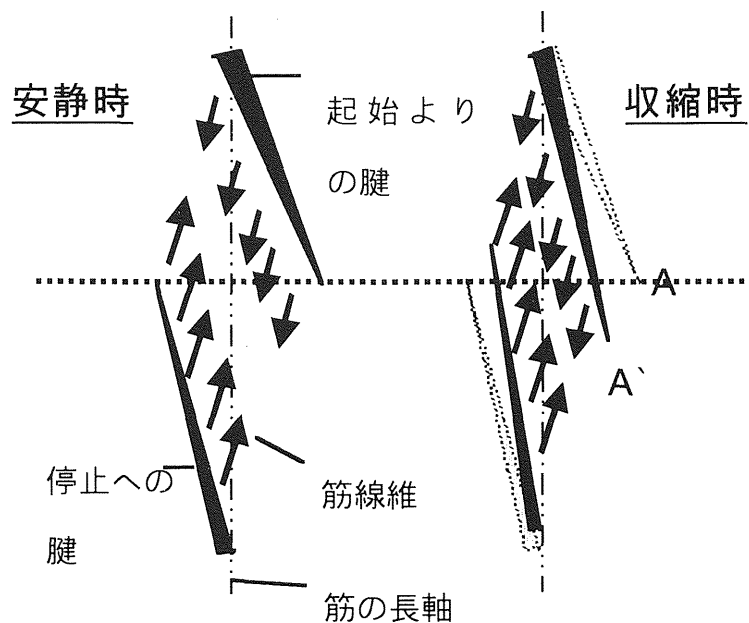


図 15 二方向性収縮様式の予想図

起始よりの長い腱性部は移動性が高く、筋線維の収縮により筋の長軸に近づくと同時に末梢の方向へ移動し（AからA´への移動）、二方向性の収縮を引き起こしている。

III-3-5 小括

健常成人における膝屈筋群等張性運動時の筋収縮様式の検討より以下の結果を得た。

1. 膝の屈曲運動において半腱様筋・大腿二頭筋短頭・薄筋では近位方向へのみの移動を示したが、半膜様筋・大腿二頭筋長頭では二方向性の収縮を認めた。
2. 浅い屈曲角度においては半腱様筋の移動量が大きく、さらに半腱様筋遠位部での移動量が有意に大きかった。
3. 半膜様筋はその外側部・大腿二頭筋長頭ではその内側部において遠位方向の移動が認められた。

III-4 下腿三頭筋の等張性・等尺性運動

III-4-1 目的

スポーツによるアキレス腱断裂・腓腹筋損傷、脳性麻痺や脳梗塞による下腿三頭筋の拘縮と足関節の背屈障害、腓骨神経麻痺による前脛骨筋機能不全など下腿の筋の障害に伴う足関節運動の問題は、日常診療上たびたび遭遇するものである。下腿三頭筋は人体内で最も強い筋の一つでヒラメ筋、腓腹筋内側頭・外側頭の三つの筋によりなるものであるが、その機能や収縮様式の違いは明らかではない。膝の屈曲運動では能動運動と受動運動の間には筋移動量の差があり、しかも能動運動と受動運動の移動量には相関が認められなかった。運動様式による筋の移動量や移動様式の変化をさらに詳しく検討するため、足関節底屈運動に加え拮抗筋による足関節背屈運動時の下腿三頭筋の移動様式を膝の伸展・屈曲筋の解析に使用したMRIの手法を用いて計測する事を目的とした。

III-4-2 対象および方法

III-4-2-1 対象

膝に外傷歴のない健常成人のボランティア8例8膝を対象とした。男性6名女性2名、全例右側で行った。年齢は平均23.5(22-25)歳、平均身長は170.9(150-184)cm、平均体重は66.4(50-78)kgであった。各人には口頭にて目的・手技・危険性を説明し承諾を得た。

III-4-2-2 撮像方法

III-1-2-2 のMRI撮像方法に従った。

被検者を仰臥位に寝かせ、股関節45度屈曲位・膝45度屈曲位で非磁性体の装具で足関節の可動域を制限し(図16)、2kgの負荷にて足関節底屈0度から15度の等張性能動底屈運動・受動底屈運動及び底屈15度での等尺性底屈運動、足関節底屈15度から0度の等張性能動背屈運動・受動背屈運動及び0度での等尺性背屈運動を行わせて、Tagging Snapshot法により腓腹筋内側頭・外側頭、ヒラメ筋につき矢状断・冠状断を撮像し観察した(図17-1、17-2)。また、アキレス腱部の伸張を確認するため、4例にて底屈15度での等尺性底屈運動時にアキレス腱部の矢状断を撮像した。

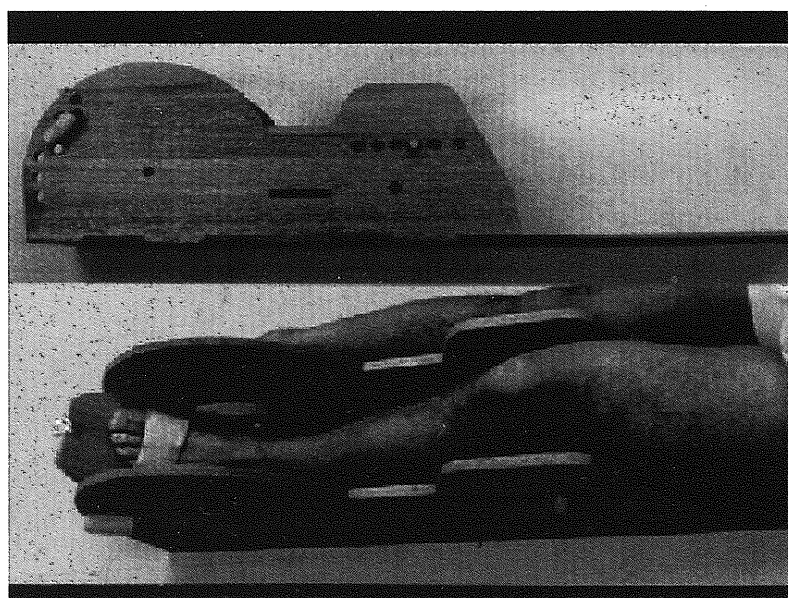
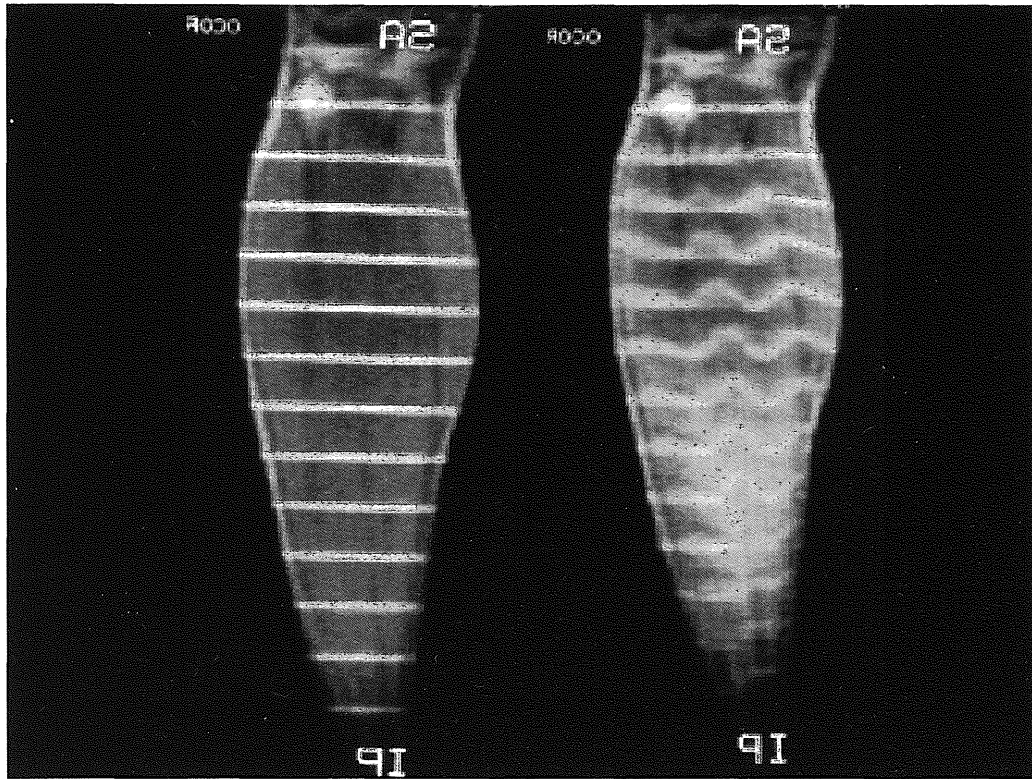


図 16 下腿三頭筋計測用の下肢固定装具

上段が側面像。下段で被検者が乗っている。足関節部に軸があり、足関節の運動が可能である。



安静時

収縮時

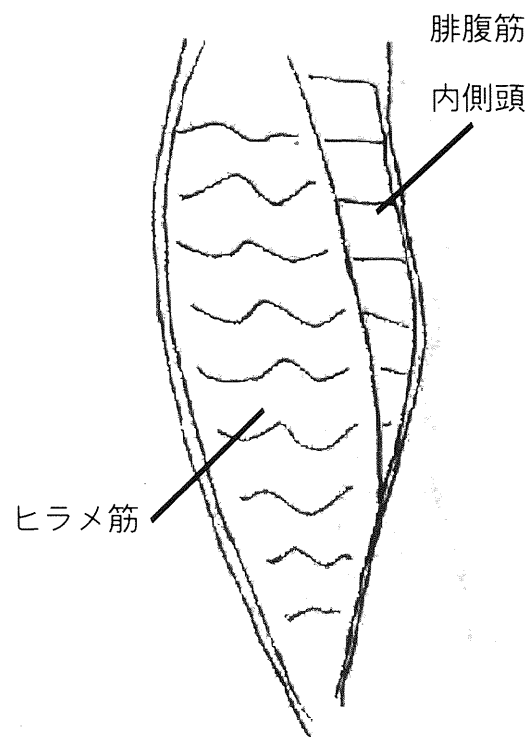


図 17-1

Tagging Snapshot 法
による下腿冠状断像

収縮時に腓腹筋内側頭とヒラメ筋
の近位方向への移動を認める。



安静時

収縮時

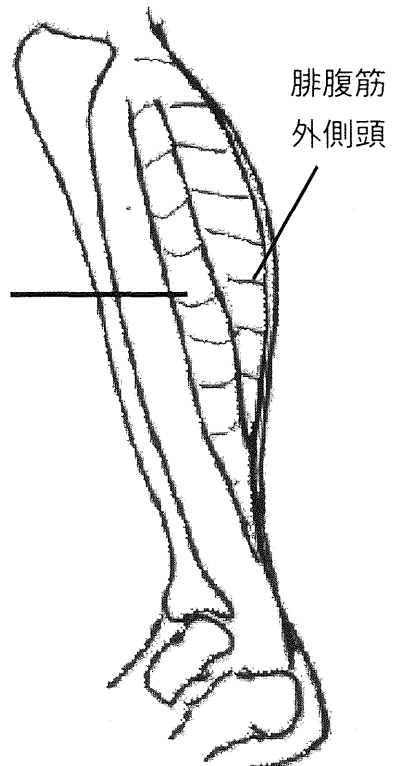


図 17-2

Tagging Snapshot 法による

下腿矢状断像

収縮時に腓腹筋外側頭とヒラメ筋の近位方向への移動を認める。

III-4-2-3 計測方法

計測・解析については III 1-2-3 と同様の方法にて行った。計測値は以下の点につき検討した。

- (1) 能動運動・受動運動・等尺性底背屈運動の各運動様式での各筋ごとに印加されたすべての tagging bands の平均・最大移動距離の平均値をそれぞれ平均移動量・最大移動量として比較した。
- (2) 能動運動・受動運動・等尺性底背屈運動の各運動様式における各筋腹を近位・遠位に二等分し、それぞれの部位に印可された tagging bands の平均移動距離の平均値をそれぞれの部位の平均移動量として比較した（部位別比較）。
- (3) 各筋にて、矢状像における各 tagging band の両端部・筋腹中央部の移動距離を前方部・後方部・中央部の移動量とし、冠状断における各 tagging band の両端部・筋腹中央部の移動距離を外側部・内側部・中央部の各々の部分での筋移動量として能動底屈・受動底屈・等尺性底屈運動にて比較した（部分別比較）。また、ヒラメ筋の冠状断像でのW型の収縮の中央凸部の能動底屈運動における移動量と横径に対する位置を計測、検討した。
- (4) 等尺性底屈運動時のアキレス腱部の移動量を計測、検討した。

III-4-3 結果

III-4-3-1 筋別の移動量

足関節の能動底屈運動にて腓腹筋内側頭・腓腹筋外側頭・ヒラメ筋は

すべて近位方向に移動しており、平均移動にて腓腹筋内側頭 8.1 ± 1.1 mm、腓腹筋外側頭 9.1 ± 2.1 mm、ヒラメ筋 7.3 ± 1.4 mm、最大移動で腓腹筋内側頭 10.0 ± 1.6 mm、腓腹筋外側頭 10.9 ± 2.6 mm、ヒラメ筋 10.1 ± 2.1 mmと各筋の移動量に有意差は認められなかった。各運動様式での移動量は能動運動・受動運動・等尺性運動の順に大きく、能動運動と受動運動間、能動運動と等尺性運動間に有意差 ($p < 0.05$) を認めた (表 13)。

足関節の能動背屈運動にて腓腹筋内側頭・腓腹筋外側頭・ヒラメ筋はすべて遠位方向に移動しており、平均移動にて腓腹筋内側頭 -7.1 ± 1.0 mm、腓腹筋外側頭 -6.6 ± 0.9 mm、ヒラメ筋 -5.6 ± 1.1 mm、最大移動で腓腹筋内側頭 -8.9 ± 1.4 mm、腓腹筋外側頭 -8.0 ± 1.3 mm、ヒラメ筋 -8.5 ± 1.6 mmと各筋の移動量に有意差は認められなかった。各運動様式での移動量は能動運動・受動運動・等尺性運動の順に大きく、能動運動と受動運動、能動運動と等尺性運動それぞれの間有意差 ($p < 0.05$) を認めた (表 14)。

表 13 足関節底屈運動時の下腿三頭筋移動量

症例	平均移動量								
	腓腹筋内側頭			腓腹筋外側頭			ヒラメ筋		
	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動
No.1	7.6	5.3	4.5	6.6	4.4	4.1	5.0	4.3	3.3
No.2	7.9	6.6	5.3	13.2	7.5	7.4	8.6	5.3	4.6
No.3	5.8	4.6	3.1	7.7	5.5	4.0	6.7	4.3	3.7
No.4	8.5	6.4	4.1	10.1	7.0	5.5	8.7	7.1	4.4
No.5	9.5	7.1	5.0	9.9	7.8	6.3	8.5	6.3	4.7
No.6	8.7	4.1	3.5	6.9	4.4	3.8	5.8	3.9	3.6
No.7	8.4	5.8	4.4	8.6	6.2	4.9	7.3	5.2	3.9
No.8	8.2	6.8	4.9	9.5	6.2	4.9	7.6	5.6	4.5
平均	8.1	5.8*	4.4*	9.1	6.1*	5.1*	7.3	5.3*	4.1*
標準偏差	1.1	1.1	0.8	2.1	1.3	1.2	1.4	1.1	0.5

単位 (mm)

症例	最大移動量								
	腓腹筋内側頭			腓腹筋外側頭			ヒラメ筋		
	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動
No.1	9.6	6.5	5.4	7.8	5.1	4.6	6.6	5.5	4.4
No.2	10.2	8.3	6.4	16.0	8.9	8.7	13.0	8.0	7.1
No.3	6.8	5.5	3.3	9.0	6.6	4.8	9.5	5.6	5.2
No.4	10.2	7.9	4.6	12.2	8.4	6.4	12.2	9.3	5.5
No.5	12.5	9.2	6.7	12.4	9.3	7.4	11.3	7.0	6.0
No.6	10.5	4.4	3.9	9.1	4.9	4.6	8.2	4.5	4.5
No.7	9.9	7.0	5.2	9.6	7.2	5.8	9.5	6.7	5.5
No.8	10.0	7.6	5.5	11.3	7.4	5.8	10.3	7.2	5.7
平均	10.0	7.1*	5.1*	10.9	7.2*	6.0*	10.1	6.7*	5.5*
標準偏差	1.6	1.6	1.2	2.6	1.6	1.5	2.1	1.5	0.9

単位 (mm)

近位方向への移動を正の値、遠位方向への移動を負の値で示した。

* : 能動運動に比して有意差あり (p<0.05)

表 14 足関節背屈運動時の下腿三頭筋移動量

症例	平均移動量								
	腓腹筋内側頭			腓腹筋外側頭			ヒラメ筋		
	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動
No.1	-6.2	-4.3	0.0	-6.4	-4.3	-0.2	-3.8	-3.6	-1.9
No.2	-8.2	-5.9	-0.9	-6.1	-4.2	-0.6	-5.5	-4.1	-2.8
No.3	-6.0	-4.4	-1.4	-5.5	-4.3	-1.2	-4.8	-3.7	-0.9
No.4	-5.8	-4.5	0.0	-6.8	-6.3	0.0	-7.0	-5.8	-2.4
No.5	-8.5	-4.9	-1.3	-8.2	-5.5	-1.1	-6.4	-4.5	-1.9
No.6	-7.7	-5.4	-1.2	-5.7	-3.2	-1.3	-4.7	-3.9	-0.9
No.7	-7.2	-4.8	0.0	-7.2	-4.8	-0.4	-6.2	-4.8	-1.9
No.8	-6.8	-4.4	0.0	-6.9	-4.0	0.0	-6.6	-4.8	-2.8
平均	-7.1	-4.8*	-0.6*	-6.6	-4.6*	-0.6*	-5.6	-4.4*	-1.9*
標準偏差	1.0	0.6	0.7	0.9	1.0	0.5	1.1	0.7	0.7

単位 (mm)

症例	最大移動量								
	腓腹筋内側頭			腓腹筋外側頭			ヒラメ筋		
	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動	能動運動	受動運動	等尺性運動
No.1	-7.4	-5.2	0.0	-7.4	-5.2	-0.2	-5.7	-4.8	-2.8
No.2	-10.6	-7.6	-0.9	-8.1	-6.2	-0.6	-10.3	-6.6	-3.6
No.3	-7.0	-5.0	-1.8	-6.7	-5.0	-1.5	-8.2	-5.8	-2.8
No.4	-8.4	-5.6	0.0	-7.8	-7.3	0.0	-9.6	-7.4	-2.4
No.5	-11.1	-6.4	-1.8	-10.5	-6.7	-1.4	-9.8	-7.0	-2.8
No.6	-8.9	-6.2	-1.4	-6.6	-3.8	-1.8	-6.4	-6.7	-1.9
No.7	-9.2	-6.8	0.0	-8.9	-6.2	-0.4	-8.8	-5.2	-3.4
No.8	-8.4	-5.9	0.0	-7.8	-5.8	0.0	-8.8	-6.2	-2.8
平均	-8.9	-6.1*	-0.7*	-8.0	-5.8*	-0.7*	-8.5	-6.2*	-2.8*
標準偏差	1.4	0.9	0.8	1.3	1.1	0.7	1.6	0.9	0.5

単位 (mm)

近位方向への移動を正の値、遠位方向への移動を負の値で示した。

* : 能動運動に比して有意差あり (p<0.05)

III-4-3-2 筋移動量の部位別比較

底屈運動では能動運動にて腓腹筋内側頭では近位部 6.6 ± 2.9 mm、遠位部 9.2 ± 3.5 mm、腓腹筋外側頭の近位部 9.0 ± 1.4 mm、遠位部 10.9 ± 1.0 mm、ヒラメ筋の近位部 7.6 ± 1.4 mm、遠位部 9.1 ± 2.5 mmと遠位部の移動が大きかった。各運動様式での移動量は能動運動・受動運動・等尺性運動の順に大きく、それぞれ遠位部で移動量が大きかった。中でも腓腹筋内側頭の能動運動では遠位部での移動量が有意 ($p < 0.05$) に大きかったが、その他では統計学的有意差は認めなかった (図 18)。

背屈運動でも同様に遠位部での移動距離が大きく、各運動様式での移動量は能動運動・受動運動・等尺性運動の順に大きかった。腓腹筋外側頭の能動・受動運動にて遠位部での移動量が有意 ($p < 0.05$) に大きかったが、その他では統計学的有意差は認めなかった (表 15)。

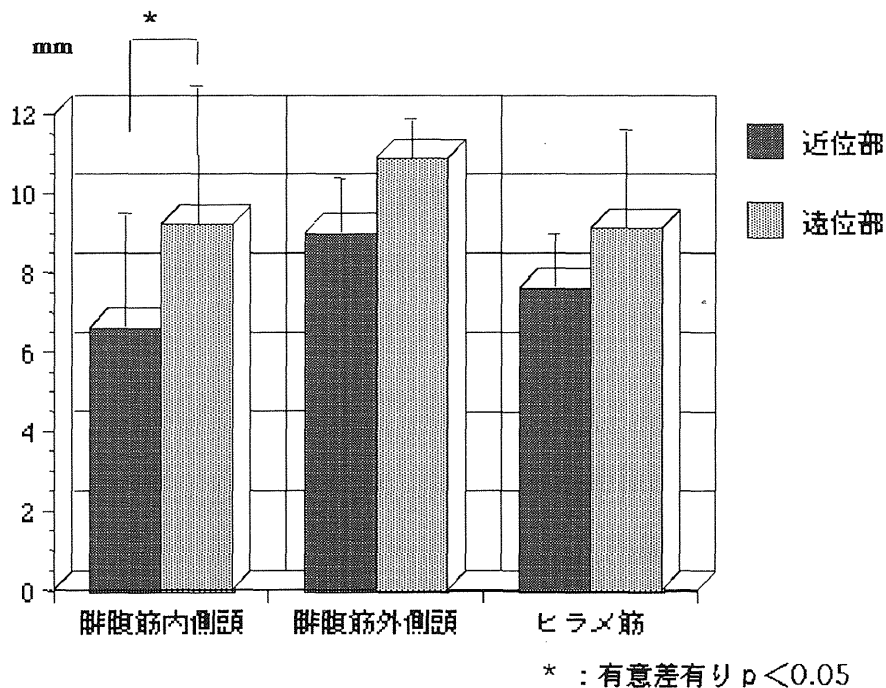


図 18 足関節能動底屈運動時の遠位部と近位部の移動量の比較

表 15 足関節運動時の下腿三頭筋の部位別移動量

	底屈運動						背屈運動					
	腓腹筋内側頭		腓腹筋外側頭		ヒラメ筋		腓腹筋内側頭		腓腹筋外側頭		ヒラメ筋	
	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部	近位部	遠位部
能動運動 (標準偏差)	6.6 (2.9)	9.2* (3.5)	9.0 (1.4)	10.9 (1.0)	7.6 (1.4)	9.1 (2.5)	-6.2 (0.9)	-7.2 (1.2)	-4.8 (0.9)	-6.4* (1.2)	-4.8 (1.1)	-5.8 (1.1)
受動運動 (標準偏差)	5.5 (1.7)	6.1 (1.0)	5.3 (1.1)	6.6 (1.4)	4.7 (0.7)	5.5 (1.5)	-4.5 (0.5)	-5.0 (0.6)	-3.5 (0.8)	-4.9* (1.2)	-3.4 (0.9)	-4.6 (0.8)
等尺性運動 (標準偏差)	4.1 (1.3)	4.8 (1.2)	4.9 (1.2)	5.5 (1.3)	3.9 (0.5)	4.1 (0.6)	-0.4 (0.4)	-0.9 (0.8)	-0.4 (0.5)	-0.6 (0.7)	-1.7 (0.7)	-2.2 (0.8)

単位 mm

* : 近位部に比して有意差あり (p<0.05)

III-4-3-3 筋移動量の部分別比較

腓腹筋内側頭では能動底屈運動にて前方部 9.7 ± 1.5 mm、中央部 8.3 ± 1.2 mm、後方部 4.6 ± 0.5 mmと前方部の移動量が大きく各部間に有意差 (p<0.05) を認め (図 19-1)、内側部 4.6 ± 0.9 mm、中央部 8.8 ± 1.7 mm、外側部 9.4 ± 3.0 mmと外側部・中央部が内側部に対し有意に高値を示した (p<0.01) (図 19-2)。受動・等尺性底屈とも同様の移動形態を示し前方・中央部と後方部の移動量に有意差 (p<0.05) を認め、外側・中央部と内側部の移動量に有意差 (p<0.05) を認めた (表 16)。

腓腹筋外側頭は能動底屈運動にて前方部 12.1 ± 2.7 mm、中央部 9.5 ± 2.1 mm、後方部 5.7 ± 1.8 mmと前方部の移動量が大きく各部間に有意差 (p<0.05) を認めた (図 19-1)。また、内側部 8.9 ± 3.6 mm、中央部 8.7 ± 2.3 mm、外側部 5.1 ± 1.5 mmと内側部での移動量が大きく、内側・中央部と外側部の移動量に有意差 (p<0.05) を認めた (図 19-2)。受動・等尺性底屈運動においても同様の移動形態を示し、前方と

後方部の移動量に有意差 ($p < 0.05$) を認め、内側と外側部の移動量に有意差 ($p < 0.05$) を認めた (表 16)。

ヒラメ筋は能動底屈運動において前方部 8.8 ± 2.0 mm、中央部 7.8 ± 1.0 mm、後方部 9.5 ± 1.4 mmで後方部の移動量が中央部に比べ有意に移動量が大きく ($p < 0.05$) (図 19-1)、内側部 9.2 ± 1.7 mm、中央部 5.0 ± 1.2 mm、外側部 6.8 ± 1.3 mmと内側部が中央部・外側部に比べ有意に移動量が大きかった ($p < 0.05$) (図 19-2)。受動・等尺性底屈運動においてもほぼ同様の収縮形態を示した (表 16)。

冠状断では両側と中央部の移動量が多いW型の収縮を示し (図 17-1)、中央凸部分の移動量は能動底屈時で 9.2 ± 2.0 mmであった。また、中央凸部分のヒラメ筋横断径に対する偏位は筋腹中央より $5.1 \pm 2.6\%$ 内側よりであった。

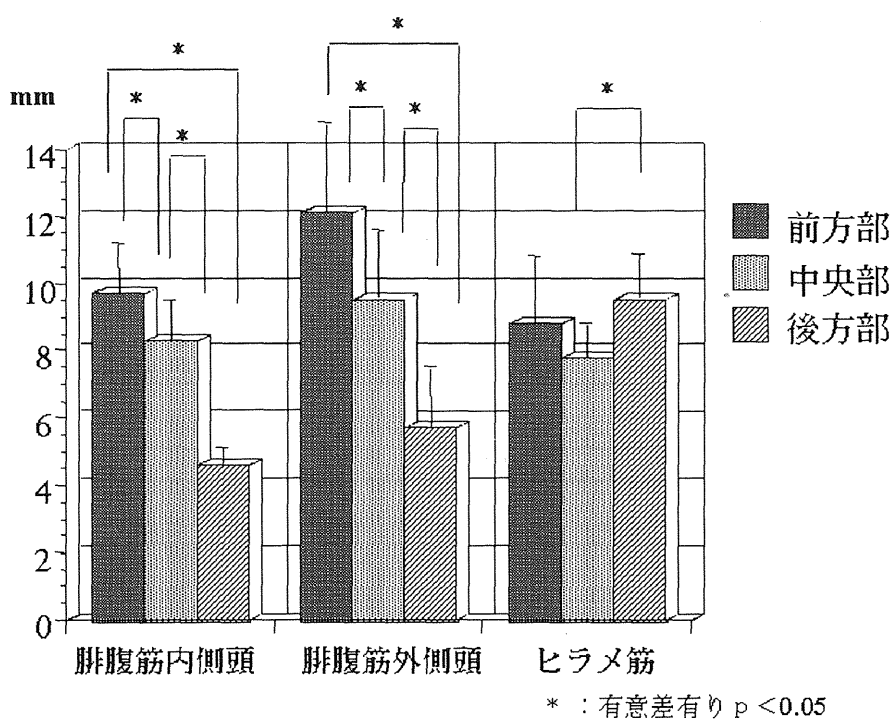


図 19-1 足関節能動底屈運動時の前方部と後方部の移動量の比較

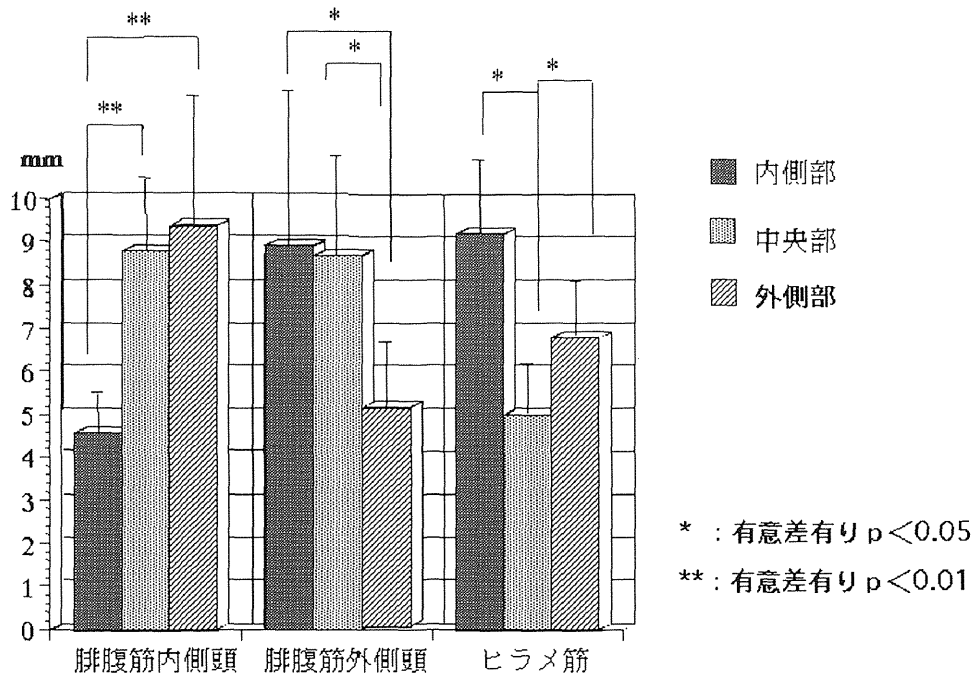


図 19-2 足関節能動底屈運動時の内側部と外側部の移動量の比較

表 16 足関節底屈運動時の下腿三頭筋の部分別移動量

	縦断像								
	能動運動			受動運動			等尺性運動		
	前方部	中央部	後方部	前方部	中央部	後方部	前方部	中央部	後方部
腓腹筋内側頭 (標準偏差)	9.7* (1.5)	8.3# (1.2)	4.6 (0.5)	6.6# (1.9)	5.7# (1.5)	3.3 (0.5)	4.8# (1.0)	4.3# (0.8)	2.8 (0.6)
腓腹筋外側頭 (標準偏差)	12.1* (2.7)	9.5# (2.1)	5.7 (1.8)	7.9# (1.8)	6.7# (1.4)	4.4 (1.0)	6.7* (1.4)	5.4# (1.2)	3.5 (0.7)
ヒラメ筋 (標準偏差)	8.8 (2.0)	7.8# (1.0)	9.5 (1.4)	5.9 (1.7)	5.5# (1.2)	6.5 (1.5)	4.7* (0.9)	3.8# (0.6)	4.5 (1.0)

	冠状断像								
	能動運動			受動運動			等尺性運動		
	内側部	中央部	外側部	内側部	中央部	外側部	内側部	中央部	外側部
腓腹筋内側頭 (標準偏差)	4.6** (0.9)	8.8 (1.7)	9.4 (3.0)	4.0* (1.1)	6.5 (1.4)	6.9 (2.0)	2.5** (1.0)	5.1 (1.6)	5.2 (1.9)
腓腹筋外側頭 (標準偏差)	8.9# (3.6)	8.7# (2.3)	5.1 (1.5)	5.6# (2.0)	5.9# (1.3)	3.9 (1.0)	5.2# (1.9)	5.1# (1.6)	2.5 (1.0)
ヒラメ筋 (標準偏差)	9.2* (1.7)	5.0# (1.2)	6.8 (1.3)	6.5* (1.4)	4.6# (0.9)	5.2 (1.8)	5.1* (1.0)	3.2# (1.2)	4.1 (1.5)

単位 mm

* : 中央部・後方(外側)部に比して有意差あり (p<0.05)

** : 中央部・後方(外側)部に比して有意差あり (p<0.01)

: 後方(外側)部に比して有意差あり (p<0.05)

III-4-3-4 アキレス腱部の移動量

4例ともアキレス腱部の移動は認められず、すぐ近位部のヒラメ筋の付着する筋腱移行部の最遠位端より移動が認められ腱膜が伸張していた。

(図20)

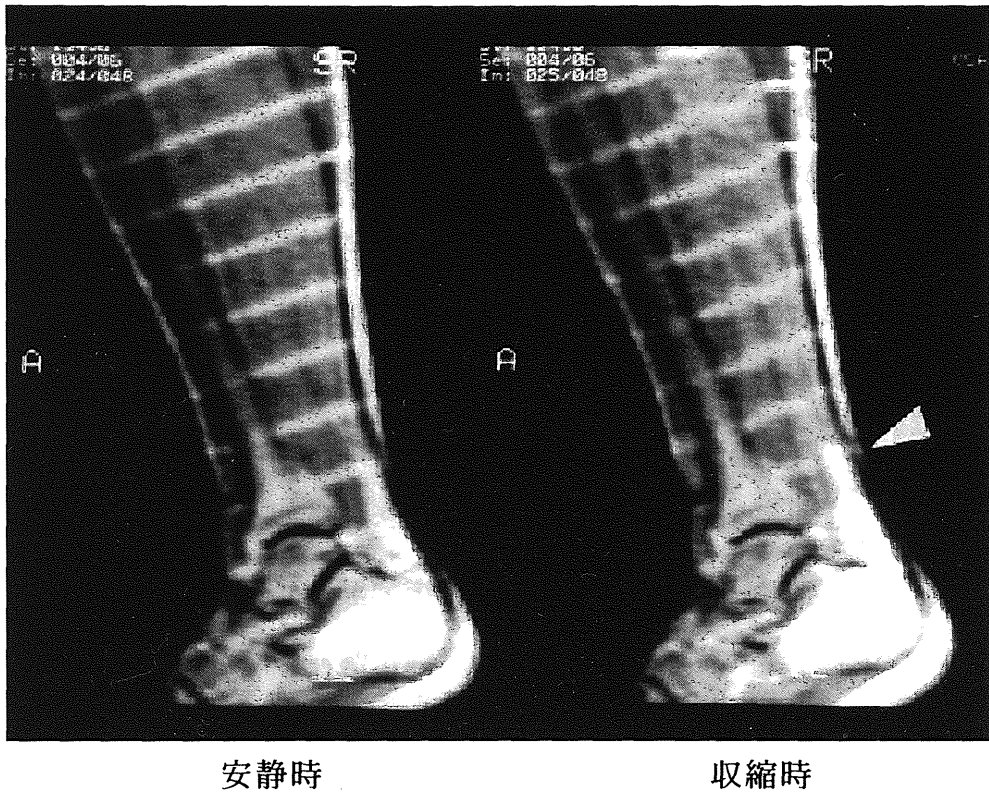


図 20 足関節等尺性底屈時のアキレス腱部

矢印でヒラメ筋筋腹の最遠位端が付着する場所を示している

III-4-4 考察

III-4-4-1 筋別の移動量

下腿三頭筋は大腿骨の内側顆より起こる腓腹筋内側頭、大腿骨の外側顆より起こる腓腹筋外側頭、脛骨・腓骨の近位部やこの間の線維性部より起こるヒラメ筋がアキレス腱という共通の腱を形成し、踵骨に停止する足関節の底屈筋である。腓腹筋内側・外側頭は二関節筋であり膝関節屈曲および足関節底屈をその作用とし、ヒラメ筋は単関節筋である。三つの筋とも底屈運動ではすべて近位方向に、背屈運動ではすべて末梢方向に移動し、底屈・背屈運動とも遠位部の移動量が大きかった。Kawakamiら³⁰⁾は下腿三頭筋において足関節底屈30、15、0度、背屈15度で筋線維長と筋線維の傾きをエコーにて計測し、受動運動にて足関節底屈位では背屈位よりも筋線維長が短く、線維の傾斜は大きいことを報告している。このことから足関節0度では下腿三頭筋は緊張状態にあり、今回の受動底屈による近位方向への移動は筋の弛緩により生じ、受動背屈運動では弛緩状態から牽引されるため遠位方向に移動すると推察した。

下腿三頭筋の損傷は通常アキレス腱断裂か腓腹筋内側頭の損傷で起こる場合が多く、自転車こぎでは腓腹筋内側頭は足関節底屈筋として働き、外側頭はむしろ膝関節屈曲筋としての作用を持つとの報告も存在する¹⁾。このため、腓腹筋の内側頭の移動量が大きいことを予想したが、この3つの筋の移動量に有意差はなく、逆に腓腹筋内側頭の移動量が比較的小さい結果となった。腓腹筋内側頭は形態的には羽状角が大きく³⁰⁾⁸⁰⁾⁸³⁾、膝関節伸展位で機能を発揮しやすいとされ⁹⁵⁾、膝関節屈曲位での運動で、

移動量の筋の長軸方向への成分を計測する今回の方法では移動量が小さくでたものと思われる。今後、膝関節屈曲角度での差異、さらに深い足関節底屈角度での運動や負荷量を増しての検討が課題である。

III-4-4-2 筋移動量の部位別比較

腓腹筋内側頭では遠位部の移動が近位部に比べ有意に大きく、複数の筋が一つの腱につく大腿四頭筋様の収縮形態であった。しかし、ヒラメ筋・腓腹筋外側頭では遠位部で比較的移動量が大きかったものの近位部との有意差を認めなかった。Narici ら³¹⁾は膝関節完全伸展位における足関節 0 度より底屈 60 度までの受動底屈運動にて筋線維長は連続的に短くなり、羽状角は連続的に大きくなると述べた。Kawakami ら³⁰⁾の膝関節 45 度屈曲位における能動および受動底屈運動での検討においても下腿三頭筋は三筋とも足関節背屈 15 度から底屈 30 度まで筋線維長・羽状角とも連続的に変化していた。今回の検討ではヒラメ筋・腓腹筋外側頭では足関節の角度変化が小さかったために移動量が全体に小さく、遠位部と近位部の移動量に有意差がでなかった可能性がある。

III-4-4-3 筋移動量の部分別比較

腓腹筋の内側頭では前方部・外側部で移動量が大きく、後方部・外側部では移動量が小さかった。腓腹筋外側頭では前方部・内側部で移動量が大きく、後方部・外側部の移動量が小さかった。両筋とも移動量が小さい部分は起始からの腱膜の存在する皮膚に近い部分であり、移動量が大きい部分は作用点であるアキレス腱に続く腱膜部であった⁶⁸⁾。これは

大腿四頭筋での四頭筋腱部での移動様式に類似したものであった。しかし、ヒラメ筋では、アキレス腱に続く後方腱膜部での移動量は大きいものの、さらに前方中央部に移動の大きい部分が存在した。ヒラメ筋はその腓腹筋と共通の筋膜のほかに筋の前方に副筋束があり、両羽状筋の形態をもちその中心部に腱性部分が存在する⁸⁴⁾⁸⁵⁾。冠状断でのW型の収縮像もこの副筋の腱性部を反映したものである。

III-4-4-4 運動様式による筋移動量の差

アキレス腱部の検討では、アキレス腱部は伸張しなかった。この結果をふまえて今回の複数の運動様式による筋移動量の差を考察する。足関節底屈運動での能動と受動運動では、下腿三頭筋の起始・停止間の距離の変化は同じにも関わらず能動運動で筋移動量が大きかった。これは、能動底屈では筋の収縮により筋膜部が引き延ばされ、この分移動量が大きいと考えた。足関節の等尺性底屈運動にて生じた筋の移動も筋膜部の伸張によるものと考えた(図21-1)。

能動と受動での背屈運動はともに受動的に下腿三頭筋の伸ばされる距離は同じであるにもかかわらず、その移動量が能動運動でより大きい。足関節底屈筋と背屈筋は拮抗筋であり、この間には片方が収縮すると他方が弛緩する相反神経支配が存在する⁸⁶⁾。大野ら⁸⁷⁾は、下肢に痙性のある脳卒中患者にて前脛骨筋に磁気刺激を加えることにより下腿三頭筋の痙性抑制効果が認められることを報告し、拮抗筋刺激による下腿三頭筋抑制を一因として述べた。今回の検討においても受動背屈運動では下腿三頭筋の伸張反射による収縮がおこるが、能動背屈運動では足関節背屈筋(主に前脛骨筋)の能動収縮により拮抗する下腿三頭筋の収縮が抑制

されることが筋移動量に差が出現した理由の一つと考えた（図 21-2）。

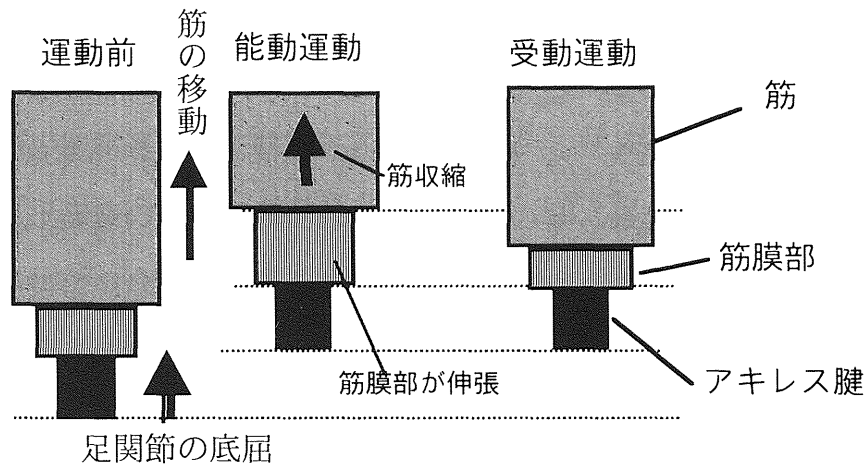


図 21-1 足関節底屈運動

能動運動と受動運動では、起始・停止間の距離の変化量は同じであるが、能動運動では筋の収縮ため筋膜部が伸張され近位への筋の移動量が受動運動に比べ大きい。

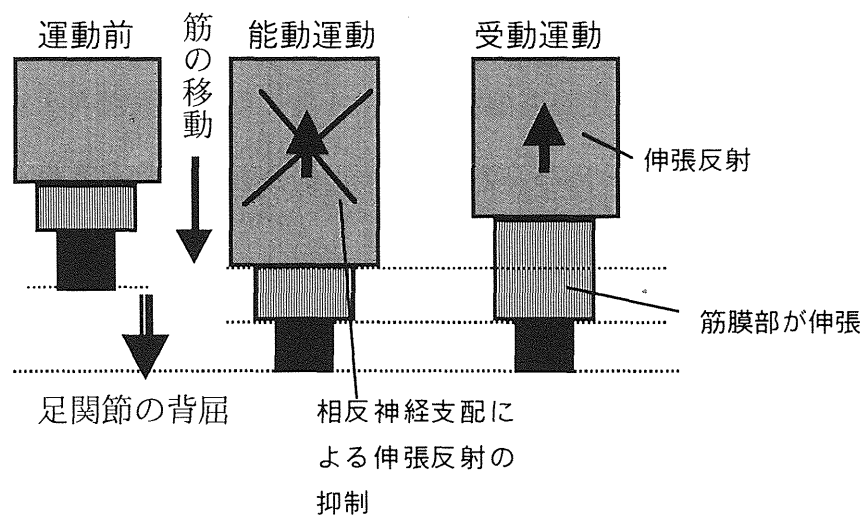


図 21-2 足関節背屈運動

能動運動と受動運動では、起始・停止間の距離の変化量は同じである。受動運動では伸張反射による筋の収縮のため筋の伸張が起りにくく筋膜部がより伸張されるが、能動運動では相反神経支配にある足関節背屈筋の収縮により伸張反射が抑制され遠位への筋の移動量が受動運動に比べ大きい。

III-4-5 小括

健常成人の足関節底背屈運動における下腿三頭筋の筋内収縮様式の検討により以下の結果を得た。

1. 足関節の底屈運動にて腓腹筋内・外側頭、ヒラメ筋はすべて近位方向に、足関節の背屈運動ではすべて遠位方向に移動しており、各筋の移動量に有意差は認められなかった。
2. 腓腹筋内・外側頭、ヒラメ筋とも、遠位部で比較的移動量が大きかったが近位部との間に有意差を認めなかった。
3. 腓腹筋では皮膚に接する部の移動量が小さく、アキレス腱に続く腱膜部での移動量が大きかった。
4. ヒラメ筋では筋腹の前中央部に移動量の大きい部分を認めた。
5. 腓腹筋内・外側頭、ヒラメ筋とも能動底屈運動では受動底屈運動より移動量が大きかった。
6. 腓腹筋内・外側頭、ヒラメ筋とも能動背屈運動では受動背屈運動より移動量が大きかった。

第 IV 章 膝屈筋腱採取例における術後の筋動態の解析

－ 腱採取の影響 －

IV-1 目的

スポーツ整形外科において膝前十字靭帯再建術は一般的な手術であり、その成績が安定するにつれ、合併症のひとつである再建術に用いられる腱や靭帯の採取による影響がしばしば問題となっている。再建術では半腱様筋・薄筋腱が広く用いられており、これらの腱は採取しても膝の屈曲筋力が低下しないとの報告が多い⁷⁷⁻⁷⁹⁾。しかし、腱採取後に残存する筋の状態に関して述べた報告は少ない⁸⁸⁻⁹⁰⁾。MRI Tagging Snapshot 法にて残存する筋の状態を観察する事を目的とした。

IV-2 対象および方法

IV-2-1 対象

対象は半腱様筋・薄筋腱による前十字靭帯再建術後の運動選手 11 名。男性 5 名、女性 6 名。平均年齢 23.8(19-30)歳、平均身長 169(149-189) cm、平均体重 65.2(43-90) kg。術後平均経過期間は 20.8(10-48)ヶ月であった。各人には口頭にて目的・手技・危険性を説明し承諾を得た。

IV-2-2 撮像方法

MR I の撮像は III-1-2-2 の方法に従った。

被検者を腹臥位に寝かせ、股関節伸展位で非磁性体の装具で膝の可動域を制限し、足関節部に 2kg の負荷をかけて屈曲 0 度から 15 度の能動屈曲運動を行わせる膝屈筋群等張性運動 (III-3-2-2) に準じた方法にて半腱様筋、薄筋、半膜様筋、大腿二頭筋長頭の撮像を行った。

IV-2-3 計測方法

画像の解析は III-3-2-3 に準じて行った。

さらに、立位にて股関節は伸展し足関節は底屈位の姿勢にて膝関節最大能動屈曲角度の左右差 (以下 flexion lag) 、及びうち 8 名にて等速度筋力計であるサイベックス 350 による膝屈曲筋力のピークトルクの測定を角速度 60、180、240deg/sec で行い移動形態との関係を検討した。

IV-3 結果

IV-3-1 半腱様筋、薄筋の収縮様式

腱を採取された半腱様筋は画像上、次の 3 タイプに分類された。1) 遠位まで筋腹が存在し健側と差が無いもの (退縮なし群) が 2 名。2) 大腿中央付近まで退縮するも腱にあたる部分に索状のものが存在し、筋の収縮も認められるもの (中間群) が 4 名。3) 退縮して正常とは逆に遠位に移動するもの (退縮群) が 5 名認められた (図 2 2)。

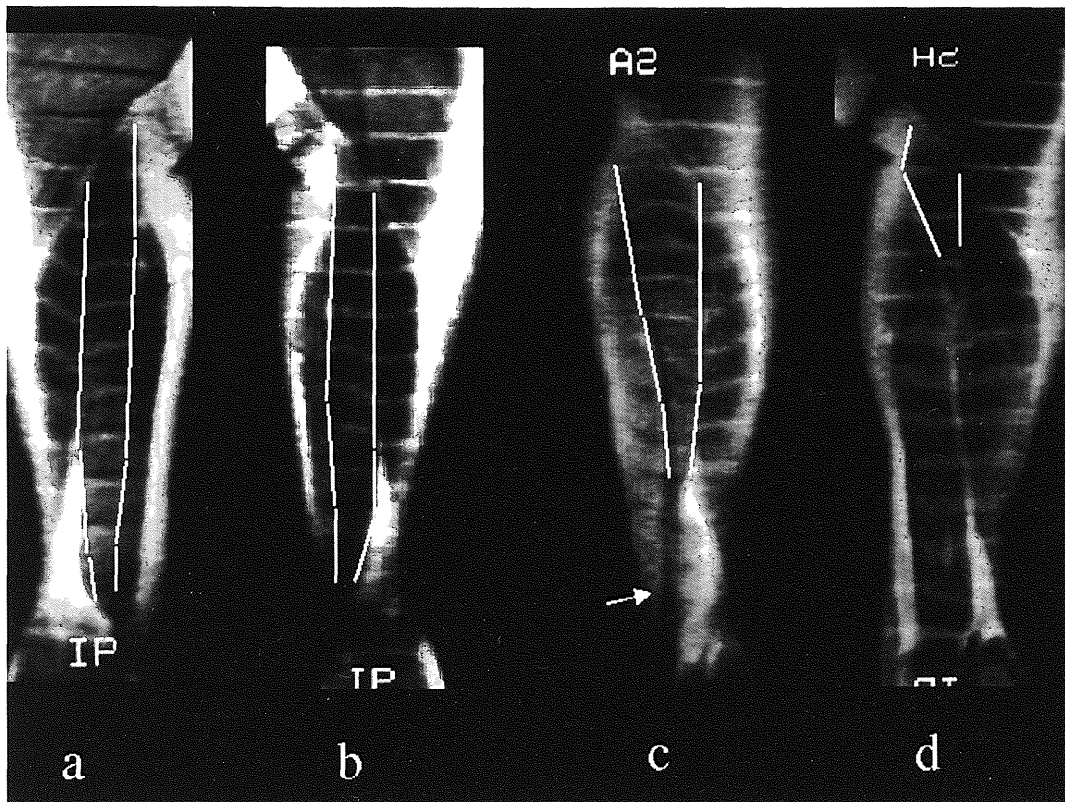


図 22 腱採取後の半腱様筋の形態

a : 健側。b : 退縮なし群。c : 中間群。d : 退縮群。矢印部に索状物を認める。

腱を採取された薄筋においては、腱採取部は縫工筋と重なり観察ができなかったが（1名では全体に計測不可能であった）、残存筋腹は観察可能であり半腱様筋の退縮群で見られたような、退縮や異常な移動は認めなかった。平均移動量にて患側 6.2 ± 2.2 ・健側 5.2 ± 2.2 mm、最大移動量では患側 8.3 ± 2.7 ・健側 6.9 ± 3.4 mm と健側より大きい傾向にあったが、有意差は認めなかった。

IV-3-2 半腱様筋の収縮様式と膝機能評価

半腱様筋の各収縮形態別での移動は、退縮なし・中間群では健側と同様の近位方向の移動を示し、中間群は平均・最大移動量とも健側よりやや大きい傾向にあった。退縮群では正常例と逆に遠位に移動していた(図23)。

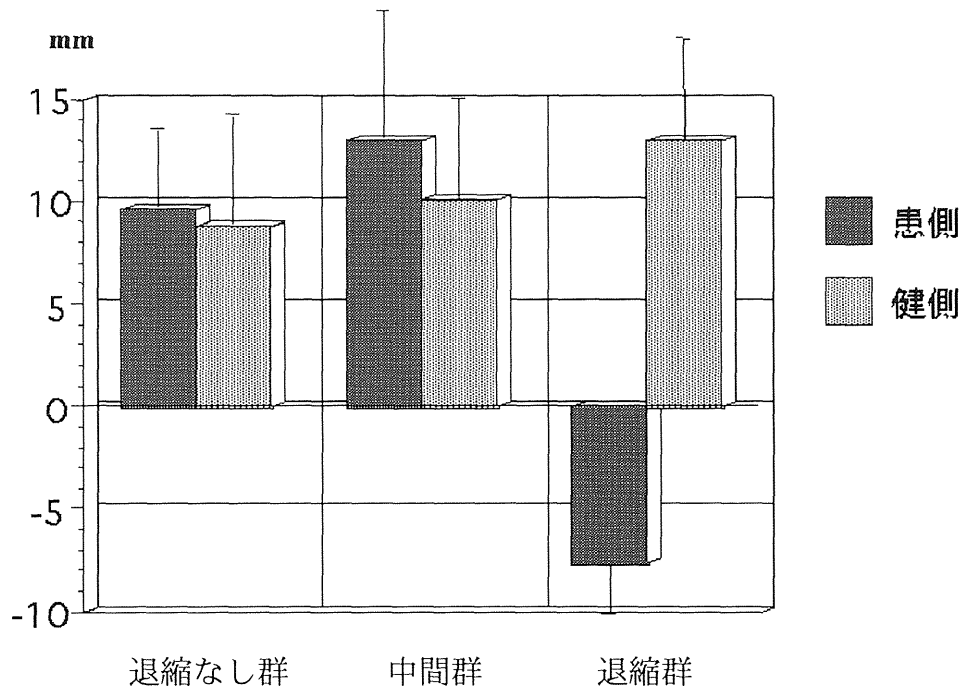


図 23 腱採集された半腱様筋の移動量

flexion lag と半腱様筋の収縮形態との関係では、退縮なし群 7.5 ± 10.6 度、中間群 8.3 ± 2.5 度、退縮群 10.0 ± 7.9 度の順に lag が大きくなる傾向にあった。

膝屈曲筋力ピークトルクの対健側比と半腱様筋の収縮形態との関係では退縮なし群、中間群、退縮群それぞれ 60deg/sec で 96.0 ± 1.4 、 98.8 ± 10.6 、 $93.0 \pm 15.6\%$ 、 180deg/sec で 101.0 ± 5.7 、 92.0 ± 17.1 、

86.5±19.1%、240deg/sec で 108.0±5.7、96.0±9.4、85.5±20.5%と退縮なし群、中間、退縮群の順に筋力が小さくなる傾向にあり、中高速でより差が顕著となったが各群の症例数が少なく統計学的検討はできなかった（図24）。

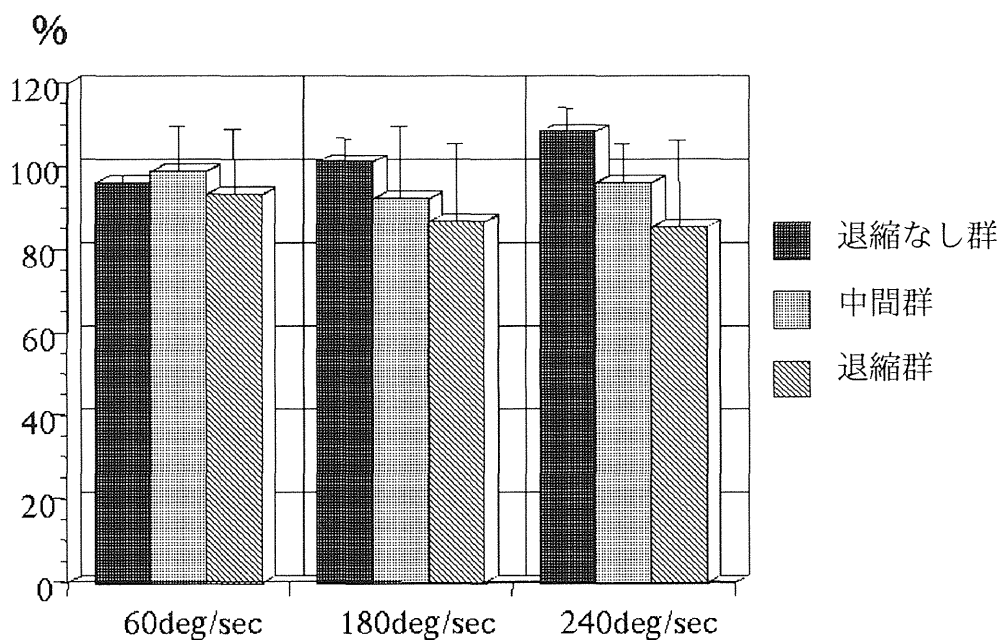


図 24 半腱様筋の形態別の膝屈筋筋力

IV-3-3 半膜様筋、大腿二頭筋長頭

半膜様筋と大腿二頭筋長頭の移動は、双方とも正常と同様の収縮パターンを示していた。平均移動量・最大移動量とも健側と患側の間に移動量の差は認めなかった（図25）。

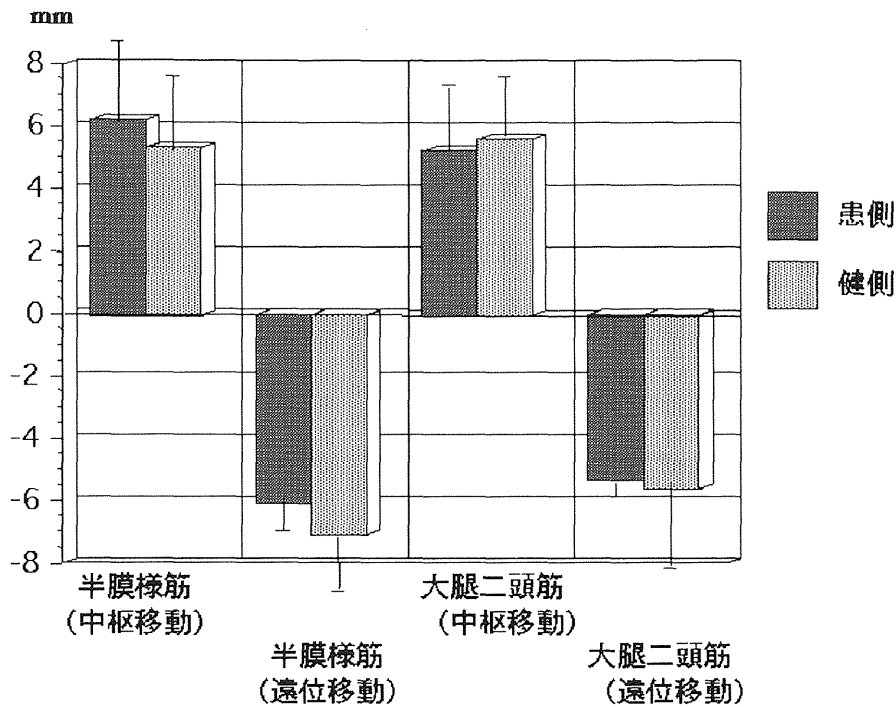


図 25 臑を採取されていない大腿屈筋群の移動量

IV-4 考察

半腱様筋・薄筋臑採取後の膝屈筋群についての報告は、ほとんどが等速度運動での膝の屈曲筋力に関するものであり、その筋力は低下しないとするものが多いが⁷⁷⁻⁷⁹⁾、これに異を唱えるものもあり⁹⁾¹⁰⁾定説は得られていない。中嶋ら¹¹⁾は深い屈曲角度での等尺性屈筋力の低下を flexion lag の存在とともに報告し、濱田ら⁷⁾は等速度運動での深い屈曲角度での仕事量の低下を、安達ら⁶⁾は等速度運動でピークトルクは変わらないものの flexion lag が存在することを報告し、それぞれ膝深屈曲時の問題点としてあげている。また、形態学的には福林ら⁶⁶⁾が半腱様筋・薄筋の萎縮と半膜様筋・大腿二頭筋の軽度の肥大をのべたが、これらの報告はすべて対象を一群として処理している。

今回の検討で腱が採取された半腱様筋には3つの形態が存在した。半腱様筋の起始は大腿二頭筋長頭と共通に坐骨結節より起こり、7.5cmほど大腿二頭筋長頭と腱膜を共有する⁶⁸⁾。半腱様筋の退縮群における正常とは反対の遠位側への移動は隣接する大腿二頭筋長頭の膝屈筋群等張性運動で確認した遠位方向の移動に伴うものであると思われ、膝の屈曲には全く力源として作用していないと考えられる。逆に退縮なし群や中間群では術後2年を越えても腱性部にあたる索状物が存在し正常と同様の移動形態を示し、力源のひとつとして作用していると考えられる。腱採取後の膝屈筋群、特に半腱様筋が退縮したものでは筋力低下やflexion lagが大きくなる傾向があり、これまでの様に一群としてとらえず個別に検討する必要があると思われた。

これまでMRIにより採取半腱様筋腱の再生を認めたとの複数の報告⁸⁸⁻⁹⁰⁾があり、Ferrettiら⁹¹⁾は、生検により再生組織は正常腱組織と類似していると述べている。今回観察された索状部は、この再生腱にあたるものと思われる。

また、腱の採取を受けていない半膜様筋と大腿二頭筋長頭においては収縮形態、移動量とも健側との差を認めなかった。半腱様筋、薄筋の腱採取後は、腱採取による半腱様筋、薄筋の機能低下を残存筋が代償するとの報告もある⁶⁶⁾⁷⁸⁾が、今回の検討ではこのような傾向は観察できなかった。しかし、今回の測定では膝関節の変化角度や負荷量が小さいために代償性の変化が出現しなかった可能性は否めない。

今後症例数を増やし、経時的な変化の計測や、通常MRI撮像(T1, T2強調画像等)での腱採取後の半腱様筋形状の観察を行いたい。

IV—5 小括

半腱様筋・薄筋腱による前十字靭帯再建術後の運動選手の膝屈筋群の等尺性収縮の検討より以下の結果を得た。

1. MRI Tagging Snapshot 法を用いて半腱様筋・薄筋の腱を採取した膝屈筋群の収縮形態を観察した。
2. 半腱様筋には退縮なし・中間・退縮の3つの形態が存在した
3. 退縮なし群・中間群では半腱様筋は健側と同様の移動形態と移動量を認めた。
4. 半腱様筋で退縮を認めるものは、Flexion lag が大きく、筋力が低い傾向にあった。
5. 腱採取された以外の筋の移動量に差を認めなかった。

第 V 章 総合考察

V-1 撮像方法

今回、健常例として膝の伸展・屈曲筋である大腿四頭筋・膝屈筋群、足関節底屈筋である下腿三頭筋を対象として筋の収縮形態の観察・定量計測に用いた MRI Tagging Snapshot 法は、2つの大きな特徴を持っている。まず第一の特徴は撮像時間が短いことである。従来の spin echo (SE)法では $90^\circ - 180^\circ$ パルス系列を使いエコー信号を得るもので、T1 強調画像を得るための TR (繰り返し時間) / TE (エコー時間) は $350 \sim 500 / 10 \sim 20 \text{ msec}$ で一つの画像を得るには数分を要するが、Tagging Snapshot 法は SE 法の 180° パルスの代わりに磁場勾配を反転させて信号 (gradient echo 信号) を得る高速撮像法のひとつである T1-weighted snapshot-GRASS (gradient recalled acquisition in the steady state)法を基本としたもののため 2 秒程度で撮像が可能である。第二の特徴は標識した tagging bands が高信号輝度なことである。これまでの tagging 法は SE 法において、ラジオ波 (RF 波) による飽和効果により無信号の tagging bands を標識する方法であった。しかし今回の撮像ではまず、撮像面に 180° inversion pulse を preparation pulse として印加し、スライス面の磁場を反転し、次にこの面に垂直な selective 180° pulse を tagging pulse として印加することにより組織を標識するため高信号の標識が可能である。これまでの飽和効果による無信号の帯とは違い 2 度の 180° パルスによる標識により高輝度の帯として描出されるため、中～低輝度の筋組織では観察・計測がしやすい。

一方、待機時間（標識から撮像までの時間）に運動が終了せずに信号収集の間に動きがあると、アーチファクトとして画像の乱れを生じさせてしまう。また、筋を最大収縮させて振戦が出現しても同様にアーチファクトとなる。理論上は、標識の間の動きもアーチファクトとなり得るが、人間の反応時間より短い0.1秒間に標識されるため、標識音を聴く以前に運動を開始しない限りアーチファクトは起こらない。新津らによればファントムを用いた試験では、偏位量と実際の移動量は相関係数0.99以上であり信頼性が高い⁶²⁾。

V-2 下肢の筋の収縮様式

大腿四頭筋の各コンポーネントの移動量は等尺性運動および等張性運動を合わせて考察すると、基本的な収縮形態は不変で大腿四頭筋腱に続く筋膜部分の移動量が多い。また、各運動におけるコンポーネントごとの移動量の結果を比較すると膝の屈曲角度が深くなるにつれ各コンポーネントの移動量は大きくなり、膝の屈曲角度が浅くなるにつれて内側広筋の他のコンポーネントに対する相対的移動量が大きくなっている（図26）。Smillie⁷¹⁾は内側広筋は膝屈曲10度ないし15度からの最終膝伸展で大きく力を発揮することが特徴であると述べ、Liebら⁷²⁾は屍体膝の実験にて単独では中間広筋が、組み合わせでは中間広筋と大腿直筋が膝伸展に効率的であり、内側広筋斜走線維は単独では膝の伸展は不可能で膝蓋骨の安定化作用を担っていると報告した。さらに、Liebら³⁾は筋電図を用いた膝屈曲90度から0度の伸展運動にて内側広筋斜走線維は全可動域を通して他のコンポーネントの約二倍の筋活動を示し、結論では角度特異性は無いとしているものの膝屈曲45°で一番活動電位が

低く伸展、屈曲ともに筋活動が高くなっていると述べた。Montgomery III ら⁴⁾はランニング中に内側広筋と外側広筋は膝が伸展位に近くなる遊脚期後期から立脚期早期に活動性が高く、膝関節さらに膝蓋骨の安定化作用に関与すると報告している。多くの膝蓋大腿関節障害の報告でも内側広筋の膝蓋骨安定化作用が述べられている⁹²⁻⁹⁴⁾。内側広筋の筋線維配列が大腿骨軸となす角度が大きく実際の筋の移動量はより大きいことを考慮すれば、膝の屈曲角度が浅くなるにつれて内側広筋の他のコンポーネントに対する相対的移動量が大きくなっている今回の結果は内側広筋の膝伸展位近くでの作用の特徴性を示唆するものと考えられる。

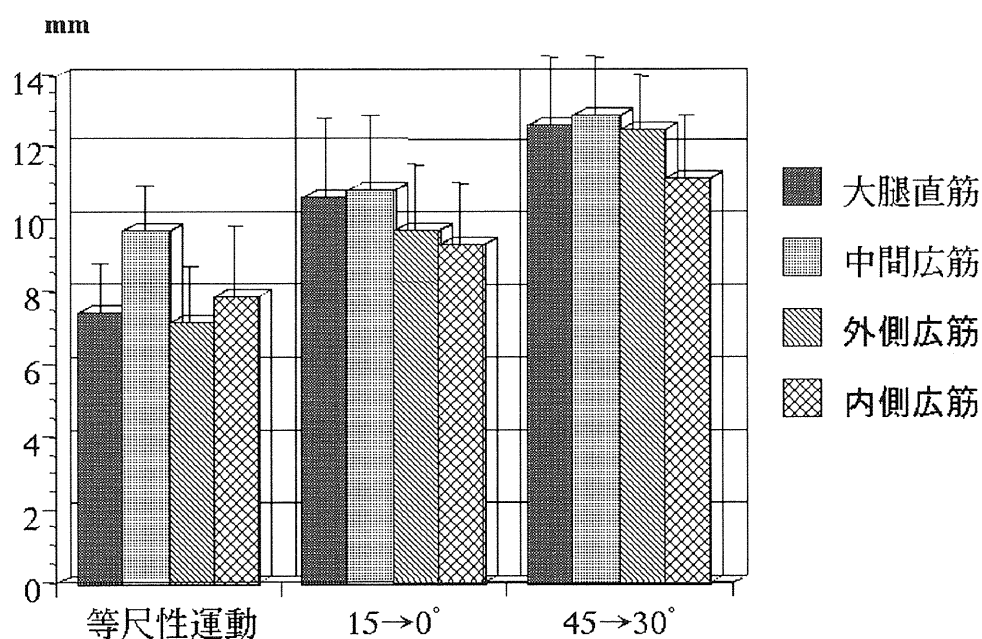


図 26 運動様式と大腿四頭筋移動量

表 1、3、5 の平均移動量の結果をまとめて図示した。膝の屈曲角度が深くなるにつれ各コンポーネントの移動量は大きくなり、膝の屈曲角度が浅くなるにつれて内側広筋の他のコンポーネントに対する相対的移動量が大きくなっている。

Haffajee ら²⁾は 10—90° の範囲での膝の等尺性伸展の実験で内側広筋・外側広筋・大腿直筋は屈曲角度が深くなるにつれ筋活動電位が高く

なると報告し、今回、膝の屈曲角度が大きくなるにつれて各コンポーネントの移動量が大きくなったことと矛盾しない。Richardson ら⁵⁾は膝の屈伸の速度が速いと大腿直筋の活動性高くなり、内側・外側広筋の活動性は不変であったと述べた。今回の計測でも大腿直筋は膝の伸展を伴う等張性運動では比較的移動量が大きくなっている。膝伸展の角速度までは規定できない計測であるが、今回の等張性運動では瞬時に膝の伸展運動を行ったため角速度が大きくなり大腿直筋の活動が高まった可能性は存在する。

膝屈筋群においては半腱様筋と半膜様筋・大腿二頭筋長頭との間に明らかに違う収縮形態を認めた。すなわち半腱様筋は大腿四頭筋と同様の近位への一方向性収縮・移動であるが、半膜様筋と大腿二頭筋長頭では二方向性の収縮を認めた。半腱様筋と半膜様筋・大腿二頭筋長頭の力発揮方向と筋線維のなす角度（羽状角）は、Wickiewicz⁸⁰⁾らによればそれぞれ5、15、0°、Freiderich ら⁸³⁾によれば6、16、7°である。羽状角だけでは半腱様筋と大腿二頭筋長頭の違いは認められず、やはり起始部からの腱・腱膜部の長さ及びその走行と筋の機能的収縮軸とのずれが収縮形態に影響しているものとする。半腱様筋と半膜様筋は内側ハムストリングとして協同作用を担うが、形状や収縮形態の違いが存在した。半膜様筋は膝屈筋および下腿の内旋筋として働き、羽状角が大きく筋線維長は短い筋線維数が多い。このため短縮する距離は短いものの強い力を供給しやすい⁷⁴⁾。逆に半腱様筋は収縮時に短縮できる距離は長く、移動量も大きい。膝の広い可動域について膝屈筋として働きうるものとするれば、半腱様筋を犠牲にした膝前十字靭帯再建術後の患者における膝深屈曲位での障害も納得できるものである。

下腿三頭筋は大腿四頭筋と同様の近位への一方向性収縮・移動する筋

群であるが、三つの筋の機能の移動量に差は認めなかった。腓腹筋内側頭・外側頭・ヒラメ筋の羽状角は Wickiewicz ら⁸⁰⁾によればそれぞれ16.7、8.3、25°、Kawakami ら³⁰⁾によれば24、13、21°であり、腓腹筋内側頭やヒラメ筋では計測方向と筋線維の収縮方向が違っているため実際の筋の収縮による移動量より小さい値を算出している可能性がある。また、Tamaki ら⁹⁵⁾による筋電図での研究ではヒラメ筋は足関節底屈の速度が速くなると活動電位が低下し、腓腹筋内側頭は膝が屈曲するに従い足関節底屈時の活動電位が下がったと報告した。また、Johnson ら¹³⁾によればヒラメ筋の86.4—89.0%、Edgerton ら¹²⁾によれば70%はtype Iすなわち遅筋線維である。このため、ヒラメ筋は羽状筋の構造上も1秒未満に終了する早い運動という動作においては移動距離が生じにくいものと思われる。

前十字靭帯再建術にて腱を採取された半腱様筋にはこれまでの方法では確認し得なかった3つの形態、すなわち退縮なし群・中間群・退縮群が存在し、退縮を認めるものではFlexion lagが大きく、筋力が低い傾向にあった。形態に差がでる要因に関しては不明であるが、退縮を起こさせない術式が確立されれば腱採取による障害を最小限に留めることが可能かもしれない。

V-3 今後の展望

今回、筋の運動解析に用いたTagging Snapshot法は、基本的には筋の解剖学的構造に基づく収縮形態を定量的に表現するものであり、その移動量は下肢の肢位や運動様式での各筋の収縮様式の違いや神経支配・抑制を反映するものであった。しかし、いくつかの制約は存在する。ま

ず第一に MRI での撮像・計測を行うため運動の再現性を確保し、四肢を固定する装具はすべて非磁性体でないとならない。次に、音を聞いて 1 秒以内に筋の収縮を行い、その収縮を維持しなければならず、幼児や高齢者では施行できない可能性もある。また、筋の振戦は撮像の障害となるため、最大努力での筋収縮の観察には適さない。しかし、tagging band が高輝度なため、ある程度画像がぶれても判読は可能であり、定性評価まで含めれば、広範囲に適応可能と思われる。膝前十字靭帯再建術における半腱様筋・薄筋腱採取後の膝屈筋群の検討では、これまでの方法では証明し得なかった残存半腱様筋の 3 種の形態と収縮様式を観察・分類する事が可能であり、短縮型では収縮様式も異なり収縮様式からだけでも判別が可能であった。今後、身長や脚長による補正での筋移動量の標準化も検討し、膝外傷患者における大腿四頭筋萎縮や筋挫傷患者での回復過程やリハビリテーションによる効果、大腿四頭筋内側頭の機能不全の存在が病因のひとつとされる膝蓋骨亜脱臼患者⁹⁾⁶³⁾⁹⁰⁾の病態解析、さらには筋・腱移行術における donor の excursion の術前評価などに応用可能と考えている。

第VI章 総括

健常成人の膝伸展運動時の大腿四頭筋収縮様式、膝屈曲運動時の膝屈筋群収縮様式、足関節運動時の下腿三頭筋の収縮様式および半腱様筋・薄筋腱による前十字靭帯再建術後の運動選手の膝屈筋群収縮様式の検討より以下の結果を得た。

1. MR I Tagging Snapshot 法にて生体内の筋の収縮様式の解析が低侵襲に可能であった。
2. 膝の伸展運動において大腿四頭筋は近位方向に移動し、四頭筋腱に続く腱膜部での移動量が大きく、遠位部での移動量がより大きかった。膝の屈曲角度が浅くなるにつれ大腿四頭筋内側頭の移動量が相対的に大きくなった。
3. 膝の屈曲運動において半腱様筋の移動量が最も大きく、遠位部での移動量が大きかった。半膜様筋と大腿二頭筋長頭では二方向性の収縮形態を認めた。
4. 足関節底屈運動における下腿三頭筋は全て近位方向に移動し、遠位部の移動量が比較的大きかった。足関節背屈運動における下腿三頭筋は全て遠位方向に移動した。足関節底背屈運動では、受動運動より能動運動で筋移動量が大きくなっていた。
5. 膝前十字靭帯再建術において腱を採取された残存半腱様筋をこれまで報告されていない3種の形態・収縮様式に分類する事が可能であった

引用文献

- 1 Ericson M.O.: Muscular function during ergometer cycling. Scand J Rehab Med 1988; 20:35-41.
- 2 Haffajee U.M., Svantesson G.: Isometric knee extension strength as a function of joint angle, muscle length and motor unit activity. Acta orthop. Scandinav. 1972; 43:138-147.
- 3 Lieb F.J., Nevada R., Perry J. : Quadriceps function . an electromyographic study under isometric condions. J Bone Joint Surg 1971; 53-A:749-758.
- 4 MontgomeryIII W.H., Pink M., Perry J.: Electromyographic analysis of hip and knee musculature during running. Am J Sports Med 1994; 22:272-278.
- 5 Richardson C., Bullock M.I.: Canges in muscle activity during fast, alternating flexion-extension movements of the knee. Scand J Rehab Med 1986; 18: 51-58.
- 6 安達伸生, 酒井康生, 内尾祐司, 河崎賢三, 岩佐潤二, 山口英敏, 藤原淳詞, 越智光夫 : 膝前十字靭帯再建術において自家膝屈筋腱採取が術後膝機能に与える影響. 日整会誌 1998 ; 72(2) : S274.
- 7 濱田雅之, 三岡智規, 堀部秀二, 史野根生 : 自家内側ハムストリング筋腱を用いた膝前十字靭帯再建術における術後筋力評価－薄筋腱併用の影響－. 臨床スポーツ医学 1998 ; 15(4) : 182-184.
- 8 星川吉光, 川上明, 勝本弘, 黒沢尚, 村瀬研一, 清水直史 : 前十字靭帯再建術後の大腿四頭筋の筋萎縮と筋力低下. 日本整形外科スポ

- 一ツ医学会誌 1990 ; 9 : 13-16.
- 9 Kramer J., Nusca D., Fowler P., Webster-Bogaert S.: Knee flexor and extensor strength during concentric and eccentric muscle actions after anterior cruciate ligament reconstruction using the semitendinosus tendon and ligament augmentation device. *Am J Sports Med* 1993; 21:285-291.
 - 10 Marder R.A., Raskind J.R., Carroll M.: Prospective evaluation of arthroscopically assisted anterior cruciate ligament reconstruction. Patellar tendon versus semitendinosus and gracilis tendon. *Am J Sports Med* 1991; 19:478-484.
 - 11 中嶋理子, 丸山裕一郎, 一青勝雄, 山内裕雄, 中嶋寛之: 半腱様筋と薄筋による前十字靭帯再建術後の膝屈筋力の筋力低下. *臨床スポーツ医学* 1996 ; 13(6) : 1-6.
 - 12 Edgerton V.R., Smith J.L., Simpson D.R.: Muscle fibre type populations of human leg muscles. *Histochemical Journal* 1975; 7:259-266.
 - 13 Johnson M.A., Polgar D., Weightman D., Appleton D.: Data on the distribution of fibre types in thirty-six human muscles an autopsy study. *J Neurol Sci* 1973; 18:111-129.
 - 14 中村利孝, 渡会公治, 宮下裕芳, 河原元, 黒沢尚: 膝関節障害における大腿四頭筋萎縮について. *臨整外* 1985; 20(10):1144-1151.
 - 15 Leblanc A.D., Schneider S., Evans H.J., Pientok C., Rowe R., Spector E.: Regional changes in muscle mass following 17 weeks of bed rest. *J Appl Physiol* 1992; 73(5):2172-2178.
 - 16 福永哲夫: ヒトの絶対筋力—超音波による体肢組成・筋力の分析—.

- 杏林書院，東京 1978 : 5-22.
- 17 Haxton H.A.: Absolute muscle force in the ankle flexors of man. *J Physiol* 1944; 103:267-273.
 - 18 Stuart H.C., Dwinell P.H.: The growth of bone, muscle and overlying tissues in children six to ten years of age as revealed by studies of rentgenograms of the leg area. *Child Development* 192; 13:195-213.
 - 19 Reynolds E.L.: Distribution of tissue components in the female leg from birth to maturity. *Anat Rec* 1948; 100:621-630.
 - 20 Rarick L., Thompson J.A.J.: Roentgenographic measure of leg muscle size and ankle extensor strength of seven-year-old children. *Res Quart* 1956; 27(3):321-332.
 - 21 Howry D.H., Bliss R.: Ultrasonic visualization of soft tissue structures of the body. *J Lab Clin Med* 1952; 40:579-585.
 - 22 Fry W.J.: Biological and medical acoustics. *J Acust Soc* 1958; 30(5):387-393.
 - 23 勝木新次，芝山秀太郎，猪飼道夫，近藤四郎：超音波による Body Composition 測定装置. *体力研究* 1965 ; 4 : 34-41.
 - 24 福永哲夫：超音波測定法による筋の単位面積あたりの筋力の算出. *体育学研究* 1969 ; 14 : 28-32.
 - 25 Fukashiro S., Itoh M., Ichinose Y., Kawakami Y., Fukunaga T.: Ultrasonography gives directly but noninvasively elastic characteristic of human tendon in vivo. *Eur Appl Physiol* 1995; 71:555-557.
 - 26 Fukunaga T., Ichinose Y., Ito M., Ichinose Y., Kuno S.,

- Kawakami Y., Fukashiro S.: Tendinous movement of a human muscle during voluntary contractions determined by real-time ultrasonography. *J Appl Physiol* 1996; 81(3):1430-1433.
- 27 Fukunaga T., Ichinose Y., Ito M., Kawakami Y., Fukashiro S.: Determination of fascicle length and pennation in a contracting human muscle in vivo. *J Appl Physiol* 1997; 82(1):354-358.
- 28 Häkkinen K., Häkkinen A.: Muscle cross-sectional area, force production and relaxation characteristics in women at different ages. *Eur J Appl Physiol* 1991;62:410-414.
- 29 Kawakami Y., Hirano Y., Fukunaga T.: Effect of leg extension training on concentric and eccentric strength of quadriceps femoris muscles. *Scand J Med Sci Sports* 1993; 3:22-27.
- 30 Kawakami Y., Ichinose Y., Fukunaga T.: Architectural and functional features of human triceps surae muscles during contraction. *J Appl Physiol* 1998;85(2):398-404.
- 31 Narici M.V., Binzoni T., Hiltbrand E., Fase J., Terrier F., Cerretelli P.: In vivo human gastrocnemius architecture with changing joint angle at rest and during graded isometric contraction. *J Physiol* 1996; 496(1):287-297.
- 32 Sipilä S., Suominen H.: Muscle ultrasonography and computed tomography in elderly trained and untrained women. *Muscle & Nerve* 1993; 16:294-300.
- 33 Häggmark T., Jansson E., Svane B.: Cross-sectional area of the thigh muscle in man measured by computed tomography. *Scand J Clin Lab Invest* 1978; 38:355-360.

- 34 Maughan R.J., Watson J.S., Weir J.: Relationships between muscle strength and muscle cross-sectional area in male sprinters and endurance runners. *Eur J Appl Physiol* 1983; 50:309-318.
- 35 Schntz P., Fox R., Norgren P., Tydén A.: The relationship between the mean muscle fibre area and the muscle cross-sectional area of the thigh in subjects with large differences in thigh girth. *Acta Physiol Scand* 1981; 113:537-539.
- 36 Alway S.E., Stray-Gundersen J., Grumbt G., Gonyea J.: Muscle cross-sectional area and torque in resistance-trained subject. *Eur J Appl Physiol* 1990; 60:86-90.
- 37 Gerber C., Hoppeler H., Claassen R.L.T., Robotti G., Zehnder R., Jakob R.P.: The lower-extremity musculature in chronic symptomatic instability of the anterior cruciate ligament. *J Bone Joint Surg* 1985; 67-A(7):1034-1043.
- 38 Lorentzon R., Elmqvist L., Sjöström M., Fagerlund M., Fuglmeyer R.: Thigh musculature in relation to chronic anterior cruciate ligament tear: muscle size, morphology, and mechanical output before reconstruction. *Am J Sports Med* 1989; 17:423-429.
- 39 Rosenberg T.D., Franklin J.L., Baldwin N., Nelson K.A.: Extensor mechanism function after patellar tendon graft harvest for anterior cruciate ligament reconstruction. *Am J Sports Med* 1992; 20(5):519-526.
- 40 玉木満智雄, 古賀良生, 浅井忍, 中村尚, 島垣斎, 朴鐘大, 高橋栄

- 明：膝蓋骨脱臼例における下肢CT像による大腿四頭筋走行の検討。
東北整災紀要 1986 ; 30(1) : 6-11.
- 41 Vock P., Hoppeler H., Hartl W., Fritschy A.: Combined use of magnetic resonance imaging and spectroscopy by whole body magnets in studying skeletal muscle morphology and metabolism. *Invest Radiol* 1985;20:486-491.
- 42 Narici M.V., Roi G.S., Landoni L.: Force of knee extensor and flexor muscles and cross-sectional area determined by nuclear magnetic resonance imaging. *Eur Appl Physiol* 1988; 57:39-44.
- 43 秋間広, 久野譜也, 福永哲夫, 勝田茂 : MR I によるヒトの膝伸筋・膝屈筋における形態学的特性および生理学的断面積当りの筋張力。
体力科学 1995 ; 44 : 267-278.
- 44 Fukunaga T., Roy R.R., Shellock F.G., Hodgson J.A., Day M.K., Lee P.L., Kwong-Fu H., Edgerton V.R.: Physiological cross-sectional area of human leg muscles based on magnetic resonance imaging. *J Orthop Res* 1992; 10:926-934.
- 45 Narici M.V., Roi G.S., Landoni L., Minetti A.E., Cerretelli P.: Changes in force, cross-sectional area and neural activation during strength training and detraining of the human quadriceps. *Eur Appl Physiol* 1989;59:310-319.
- 46 McColl R.W., Fleckenstein J.L., Bowers J., Theriault G., Peshock R.M.: Three-dimensional reconstruction of skeletal muscle from MRI. *Comput Med Imaging Graphics* 1992; 16: 363-371.
- 47 鮫島菜穂子, 福林徹, 宮永豊, 久野譜也, 新津守, 大森健一, 大門芳行 : MR I による大腿四頭筋形状解析—収縮時と弛緩時の大腿四

- 頭筋横断像上での重心を用いた定量計測－．体力科学 1996 ; 45 : 111-118.
- 48 Kariya Y., Itoh M., Nakamura T., Yagi K., Kurosawa H.: Magnetic resonance imaging and spectroscopy of thigh muscles in cruciate ligament insufficiency. *Acta Orthop Scand* 1989; 60(3):322-325.
- 49 後藤直史, 中川研二 : MR I による膝蓋骨脱臼例の大腿四頭筋の位置と走行に関する研究. *日関外誌* 1991 ; 10 : 217-226.
- 50 日置繁, 福林徹, 村松俊樹, 下條仁士, 水沢克子, 久野譜也, 阿武泉 : 腸脛靭帯を用いた前十字靭帯再建術後の筋萎縮－MR I を用いた定量的検討－．*日本整形外科スポーツ医学会誌* 1993 ; 12 : 45-48.
- 51 日置繁, 福林徹, 村松俊樹, 下條仁士, 鮫島菜穂子, 久野譜也, 阿武泉 : 女子バスケットボール選手における膝伸展・屈曲力とMR I による筋体積との相関. *臨床スポーツ医学* 1993 ; 10 : 209-211.
- 52 Ingels Jr. N.B., Daughters IIG.T., Stinson E.B., Alderman E.L.: Measurement of midwall myocardial dynamics in intact man by radiography of surgically implanted markers. *Circulation* 1975; 52:859-867.
- 53 LeWinter M.M., Kent R.S., Kroener J.M., Carew T.E., Covell J.W.: Regional differences in myocardial performance in the left ventricle of the dog. *Circ Rec* 1975; 37:191-199.
- 54 Falsetti H.L., Marcus M.L., Kerber R.E., Skorton D.J.: Quantification of myocardial ischemia and infarction by left ventricular imaging. *Circulation* 1981; 63:747-751.

- 55 Fellows S.J., Rack P.M.H.: Changes in the length of the human biceps brachii muscle during elbow movement. *J Physiol* 1987; 383:405-412.
- 56 Amis A., Prochazka A., Short D., Trend P.S.J., Ward A.: Relative displacements in muscle and tendon during human arm movements. *J Physiol* 1987; 389:37-44.
- 57 Zerhouni E.A., Parish D.M., Rogers W.J., Yang A., Shapiro E.P.: Human heart: tagging with MR imaging-a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 1988; 169:59-63.
- 58 安野直子, 安野泰史, 近藤武, 板倉一義, 片田和廣, 黒川洋, 菱田仁, 渡辺桂彦, 水野康, 木造大夏, 古賀佑彦, 山田和弘, 杉石宗隆, 山口弘次郎, 五老健彦: 心筋 tagging 法を用いたシネ MRI による心臓動態の検討. *日本磁気共鳴医学会雑誌* 1991; 11:159-165.
- 59 Axel L., Dougherty L.: MR imaging of motion with spatial modulation of magnetization. *Radiology* 1989; 171:841-845.
- 60 Bolster B.D., NcVeigh E.R., Zerhouni E.A.: Myocardial tagging in polar coordinates with use of striped tags. *Radiology* 1990; 177:769-772.
- 61 Pipe J.G., Bose J.L., Chenevert T.L.: Method for measuring three-dimensional motion with tagged MR imaging. *Radiology* 1991; 181:591-595.
- 62 Niitsu M., Compeau N.G., Holsinger-Bampton A.E., Riederer S.J., Ehman R.L.: Tracking motion with tagged rapid gradient-echo magnetization-prepared MR imaging. *J MRI* 1992; 2:155-

163.

- 63 新津守, 阿武泉, 吉岡大, 久野譜也, 高橋英幸, 松本邦彦, 板井悠二: Tagging Snapshot - GRASS Imaging - 人体組織の随意運動の抽出、定量化の試み-. 日本磁気共鳴医学会雑誌 1992 ; 12 : 219.
- 64 Drace J., Pelc N.J.: Measurement of skeletal muscle motion in vivo with phase-contrast MR imaging. JMRI 1994; 4:157-163.
- 65 Drace J., Pelc N.J.: Tracking the motion of skeletal muscle with velocity-encoded MR imaging. JMRI 1994; 4:773-778.
- 66 福林徹, 池田耕太郎, 新津守: 半腱様筋と薄筋腱による前十字靭帯再建術後の筋体積の変化. 膝 1994 ; 20 : 124-127.
- 67 Markee J.E., Logue Jr. J.T., Williams M., Stanton W.B., Wrenn R.N., Walker L.B.: Two-joint muscles of the thigh. J Bone Joint Surg 1955; 37-A(1):125-142.
- 68 Warwick R., Williams P.: Gray's anatomy, 35th edition. Rongman, Edinburgh. 1973:559-585.
- 69 Hanten W.P., Schulthies S.S.: Exercise effect on electromyographic activity of the vastus medialis oblique and vastus lateralis muscles. Phys Ther. 1990; 70: 561-565.
- 70 Karst G.M., Jewett P.D.: Electromyographic analysis of exercises proposed for differential activation of medial and lateral quadriceps femoris muscle components. Phys Ther. 1993; 73:286-299.
- 71 Smille I.S.: Injuries of the knee joint. Churchill Livingstone, New York. 1978; 1-11.
- 72 Lieb F.J., Nevada R., Perry J. : Quadriceps function . J Bone

- Joint Surg 1968; 50-A : 1535-1548.
- 73 Scharf W., Weinstbl R., Orthner E.: Anatomical separation between two different heads of the vastus medialis muscle and their applied anatomy. Acta Anat 1985; 123:108-111.
- 74 Lieber R.L.: Skeletal muscle structure and function. Implications for rehabilitation and sports medicine. Williams & Wilkins, Baltimore 1992;1-48,111-158..
- 75 Stäubli H.U., Schatzmann L., Brunner P., Rincón L., Nolte L.: Mechanical tensile properties of the quadriceps femoris tendon and patellar ligament in young adults. Am J Sports Med 1999; 27:27-33.
- 76 福林徹：膝関節の機能解剖とバイオメカニクス，ヴォアラ膝．小林晶編集，南江堂，東京．1989：3-20.
- 77 Liscomb A.B., Johnston R.K., Snyder R.B., Warburton M.J., Gilbert P.P. : Evaluation of hamstring strength following use of semitendinosus and gracilis tendons to reconstruct the anterior cruciate ligament. Am J Sports Med 1982; 10:340-342.
- 78 Ohkoshi Y., Inoue C., Yamane S., Hashimoto T., Ishida R.: Changes in muscle strength properties caused by harvesting of autogenous semitendinosus tendon for reconstruction of contralateral anterior cruciate ligament. Arthroscopy 1998; 14:580-584.
- 79 Zarins B., Rowe C.R.: Combined anterior cruciate-ligament reconstruction using semitendinosus tendon and iliotibial tract. J Bone Joint Surg 1986; 68A:160-177.

- 80 Wickiwick, T.L., Roy R.R., Powell P.L., Edgerton V.E.: Muscle Architecture of the Human Lower Limb. Clin Orthop Rel Res 1983; 179:275-283.
- 81 Terry G.C., LaPrade R.F.: The biceps femoris muscle complex at the knee. Its anatomy and injury patterns associated with acute anterolateral-antromedial rotatory instability. Am J Sports Med 1996; 24(1):2-8.
- 82 Bejiui J., Walch G., Gonon G.P., Carret J.P., Neidhardt J.H., Fischer L.P.: Anatomical and functional study on the musculus semimembranosus. Anat Clin 1984; 6:215-223.
- 83 Friederich, J.A., Brabd R.A.: Muscle fiber architecture in the human lower limb. J Biomechanics 1990; 23:91-95.
- 84 Jager K.W., Moll J.: The development of the human triceps surae. Observations on the ontogenetic formation of muscle architecture and skeletal attachments. J Anat 1951; 85: 338-349.
- 85 Sekiya S.: Muscle architecture and intramuscular distribution of nerves in the human soleus muscle. Acta Anat 1991; 140:213-223.
- 86 真島英信：生理学．文光堂，東京．1978：134-146．
- 87 大野重雄，池田聡，丸山道男，木原薫，紫藤泰二，伊藤多枝子，沖田五月，堤隆治，紫垣光久，田中達朗，浅山滉：前脛骨筋磁気刺激による下腿三頭筋痙性抑制効果．リハビリテーション医学 1996；33(1)：64．
- 88 Cross M.J., Roger G., Anderson I.F.: Regeneration of the

- semitendinosus and gracilis tendons following their transection for repair of the anterior cruciate ligament. *Am J Sports Med* 1992; 20:221-223.
- 89 Eriksson K., Larsson H., Wredmark T., Hamberg P.: Semitendinosus tendon regeneration after harvesting for ACL reconstruction. A prospective MRI study. *Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc* 1999; 7:220-225.
- 90 Simonian P.T., Harrison S.D., Cooley V.J., Escabedo E.M., Deneka D.A., Larson R.V.: Assessment of morbidity of semitendinosus and gracilis tendon harvest for ACL reconstruction. *Am J Knee Surg* 1997, 10: 54-59.
- 91 Ferretti A., Conteduca F., Morelli F., Mase V. : Regeneration of the semitendinosus tendon after its use in anterior cruciate ligament reconstruction. A histologic study of three cases. *Am J Sports Med* 2002, 30:204-207.
- 92 Boucher J.P., King M.A., Lefebvre R., Pépin A.: Quadriceps femoris muscle activity in patellofemoral pain syndrome. *Am J Sports Med* 1992; 20:527-532.
- 93 Møller B.N., Jurik A.G., Tidemand-Dal C., Kerbs B., Aaris K.: The quadriceps function in patellofemoral disorders, a radiographic and electromyographic study. *Arch Orthop Trauma Surg* 1987; 106:195-198.
- 94 Thomeé R., Grimby G., Svantesson U., Österberg U.: Quadriceps muscle performance in sitting and standing in young women with patellofemoral pain syndrome and young

healthy women. *Scand J Med Spors* 1996; 6:233-241.

- 95 Tamaki H., Kitada K., Akamine T., Sakou T., Kurata H.:
Electromyogram patterns during plantarflexions at various
angular velocities and knee angles in human triceps surae
muscles. *Eur J Appl Physiol* 1997; 75:1-6.

謝辞

本研究において、ご指導ならびにご校閲を賜りました筑波大学臨床医学系落合直之教授に深甚なる謝意を表します。また、終始ご指導を賜りました筑波大学臨床医学系林浩一郎前教授、東京大学大学院総合文化研究科福林徹教授、MRIの測定にあたり大変なご尽力をいただいた筑波大学臨床医学系新津守講師、越後純子先生に深謝いたします。数々のご助言をいただきました茨城県立医療大学小磯謙吉前学長、筑波大学体育科学系宮永豊教授、筑波大学臨床医学系池田耕太郎講師、並びに被検者としてご協力いただいた方々にお礼申し上げます。最後に心身共に支えとなってくれました妻安代に心から感謝いたします。