

2009 年度 修士論文

膝前十字靱帯再建術後の

加圧トレーニングを用いたリハビリテーションの効果

Effect of the rehabilitation

by the KAATSU training after ACL reconstruction

早稲田大学大学院 スポーツ科学研究科

スポーツ科学専攻 スポーツ医科学研究領域

5008A018-8

加藤 淳也

Kato Junya

研究指導教員：福林 徹 教授

目次

第1章 緒言	1
1. 膝前十字靱帯損傷と治療法	1
2. ACL再建術後のリハビリテーション	2
3. 組織学的構造から見た半腱様筋腱の再生	5
4. 加圧トレーニングのメカニズム	6
5. 研究の目的	7
第2章 —実験1— 再生半腱様筋腱形態の性差における検討	9
第3章 —実験2— 加圧トレーニングが再生半腱様筋腱の形態に及ぼす影響	23
第4章 総合考察と今後の展望	39
第5章 結語	41
《補足研究》加圧マスターミニと医療用ターニケットカフの圧比較	42
第6章 参考文献	47
謝辞	53

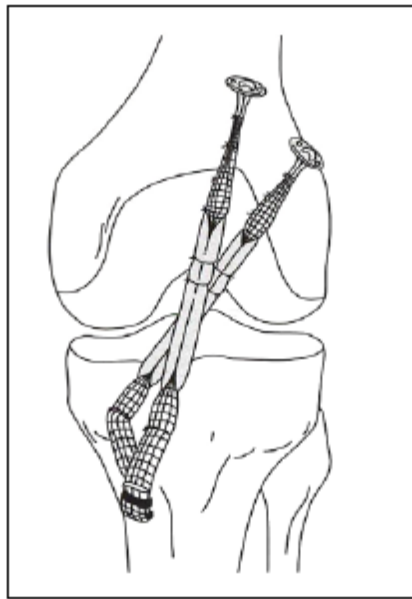
第1章 緒言

1. 膝前十字靱帯損傷と治療法

膝前十字靱帯(anterior cruciate ligament :ACL) は、膝関節の安定性を保つ上で非常に重要な靱帯である。ACLは一度損傷すると復帰までに長い時間を要するため、スポーツ外傷の中でも特に注目されてきた傷害の一つである。特に、バスケットボール、サッカー、スキーなどにおいてよく見られ、その受傷機転はノンコンタクトプレーでの損傷が多いという報告がある。^{1,2)}受傷機転としては急激なストップやカッティング動作、またはバランスを崩しての片脚着地などが挙げられる。また、女性の損傷率が高いことも報告されており、男性の2～8倍であるとされている。^{1,2,3,4)}

ACL損傷後、膝関節の安定性を保つことが困難となるため、日常生活やスポーツ復帰を目指し、靱帯再建手術を行う場合が多い。ACL再建に利用できる再建材料として、生物学的素材と人工素材に大別される。人工素材を使用する場合、自己組織を犠牲にしないという点や初期強度が大きいという点で魅力的であるが、経時的な強度低下や生体との親和性不良などの問題から国内では自家腱を用いる場合がほとんどである。再建に用いる自家組織の種類としては膝蓋腱(bone-patellar tendon-bone:BTB)、半腱様筋腱(Semitendinosus tendon:ST腱)、薄筋腱(Gracilis tendon:G腱)などが挙げられるが、近年、国内ではST腱やG腱など内側ハムストリング腱を使用するST/G法がGolden standardとされている。ST/G法はBTB法に比べ脛骨の前方移動量や膝関節伸展及び屈曲筋力等の術後成績が良好であるという報告もある。^{5,6,7,8)}このように、現在国内において数多く行われているST/G法は1994年にRosenbergら^{5,6)}によって開発されたものに基づいたものである。遠位ST腱を全て採取し、鏡視下において4重折りにしたST腱を脛骨と大腿骨に一箇所ずつ空けた骨孔に通し、大腿骨をEndobutton、また脛骨側をFixation postを用いて固定する

という方法である。また、現在では本来の靭帯付着部に移植腱を設置し、できる限り元の前内側繊維束と後外側繊維束の靭帯繊維の走行に従って移植靭帯を設置するという解剖学的靭帯再建術が主流となってきた。 (図1) ⁹⁾ 今後、いかに解剖学的付着部を正しく認識し、移植腱に適切な初期張力を与え固定できるかが術後の膝関節機能を高く保つ上で重要なポイントである。

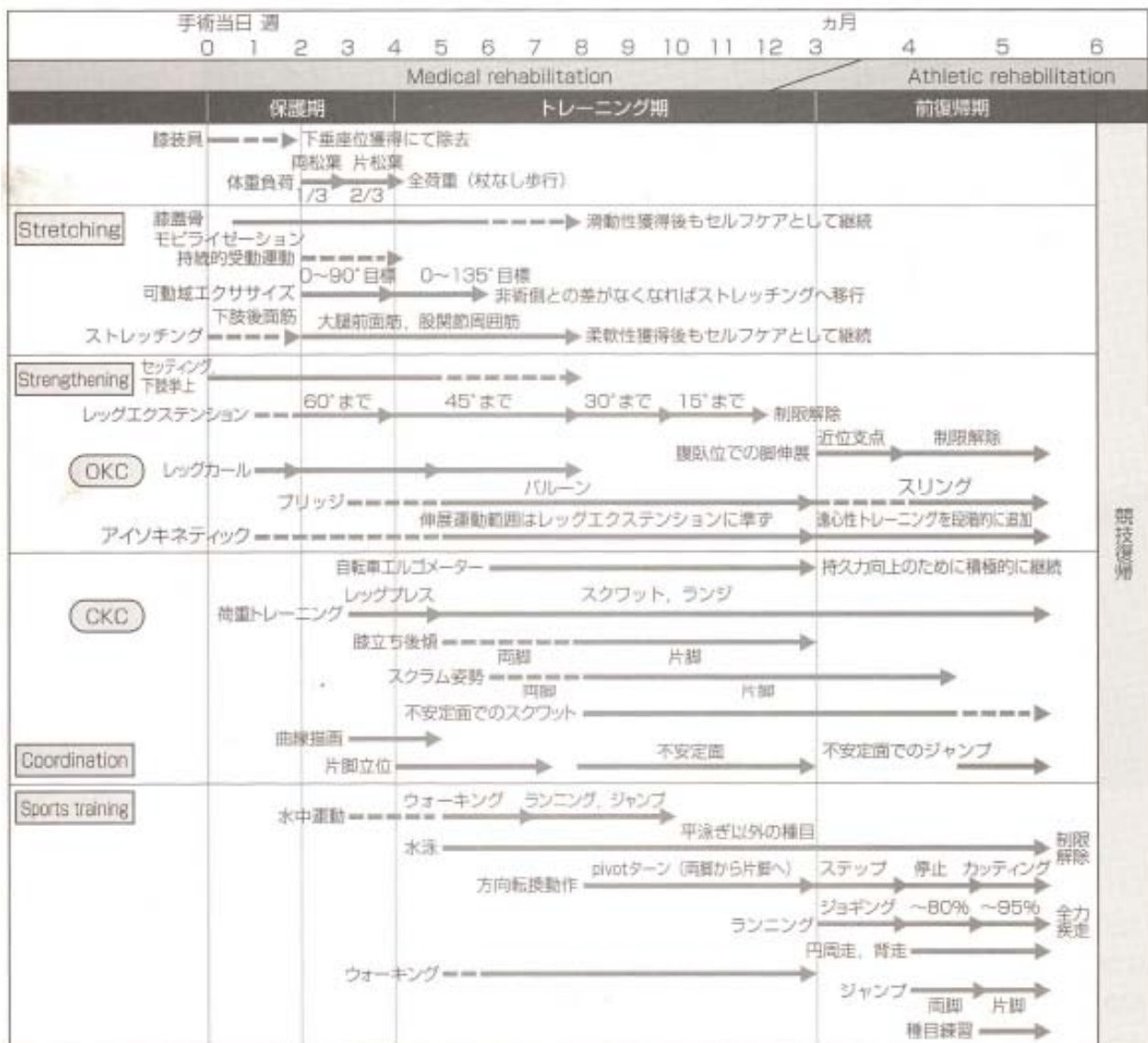


(図1) 解剖学的に再建された前内側および後外側繊維束⁽⁹⁾

2. ACL再建術後のリハビリテーション

近年、ACL再建術後のリハビリテーションは早期競技復帰を目的として徐々に加速化が図られてきている。リハビリテーションメニューや復帰時期に関しては様々な議論があるものの、一般的には再建靭帯の治癒過程に応じて、**Stretching**、**Strengthening exercise**、**Coordination exercise**、**Sports exercise**を組み合わせで行っていき、現在では最短で約6ヶ月で復帰させるというのが主なものである。(図2)¹⁰⁾ 術直後から2週目までは手術による炎症の沈静化をはかり関節可動域訓練 (ROM exercise) からはじめ、徐々に**Strengthening exercise**を開始する。

Strengthening exerciseを行う場合、大腿四頭筋の収縮は脛骨の前方牽引力となり、移植腱に負荷を与えるため^{11,12,13)}、移植腱に生物学的固定が得られるまで力学的負荷を与えないようにすることが重要である。術後4週目以降からはCKC (closed kinetic chain) エクササイズから初め、徐々にOKC(Open kinetic chain)エクササイズも取り入れていく。術後3ヶ月からはランニングやジャンプ、筋力トレーニングも等速性や遠心性のものを開始し、また、各競技復帰を目指した競技特性を考慮したりリハビリテーションメニューを組み込んでいく。さらには、採取したST腱の再生を考慮し膝深屈曲トレーニングもこの時期に開始するのが望ましい。¹⁴⁾ 術後5ヶ月目以降はアジリティトレーニングを開始し、各競技における練習への部分参加を段階的に行っていき術後6～9ヶ月を目処に復帰を目指す。ただし、このような術後のリハビリテーションプロトコルはあくまでも目安であり、再建された靱帯の生物学的定着や選手の競技レベル、復帰目標を考慮し、医師や理学療法士と相談しながら進めていくのが望ましいとされる。

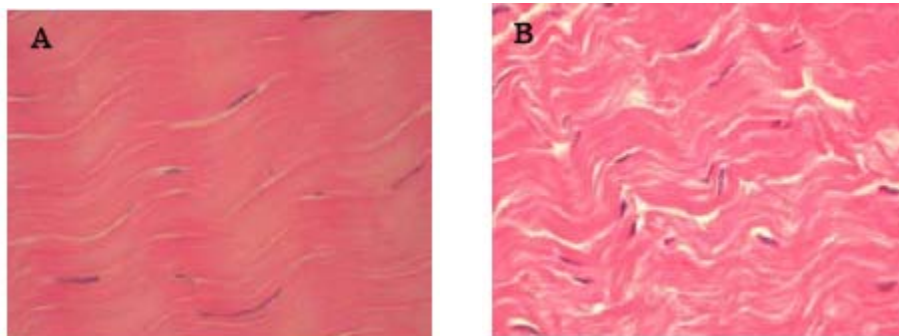


(図2) 標準的リハビリテーションプロトコル⁽¹⁰⁾

3. 組織学的構造から見た半腱様筋腱の再生

靱帯や腱などの結合組織はそのほとんどが繊維性組織から成り立ち、組織の基本は膠原繊維である。腱の主な作用としては筋の収縮を伝えることであり、そのために牽引力のかかる方向に膠原繊維が平行に配列されている。腱が損傷を受けた場合には、腱自体に血行が存在することから治癒能力があるとされて

いる。通常、腱などの結合組織が損傷を受けると、近くの繊維芽細胞が損傷部に集まり、コラーゲンなどの細胞外マトリックスを大量に生産し組織の修復を行おうとする。(図3) 腱断裂の場合、3～4週で繊維芽細胞は著しく増加し、5～6週で正常組織とは異なる瘢痕組織が形成され腱の癒合はほぼ完成するとされている。ACL再建術のために採取されたST腱においても、術後、腱に類似した組織が再生すると言われており、近年の研究では、その再生率は約8割程度であると報告されている。^{15,16,17,18)} また、再生したST腱の形態を縦断的に評価した研究では、再生した腱の横断面積は通常の腱に比べ約3～5倍大きくなり、術後3ヶ月目までが再生のピークであるという報告もされている。¹⁴⁾ さらに、術後STの筋長が短縮し筋体積が減少することも報告されており、再生腱の横断面積と筋体積や筋力との相関があることも報告されている。^{16,19)} これらの先行研究から、ST腱の再生は比較的術後早期に決定されると考えられており、再生が盛んな術後初期には再生腱を考慮したりハビリテーションが重要であると考えられる。¹⁴⁾ しかし、腱の再生の有無や再生腱の成熟過程を決定付ける要因として、その詳細は未だ解明されていないのが現状であり、組織の修復を促す上で重要であると考えられる内分泌系やホルモン動態などが大きく関わっていることが予想される。



(図3) 正常腱 (A)

術後12ヶ月目、再生腱 (B) ²⁰⁾

4. 加圧トレーニングのメカニズム

近年、加圧トレーニングは様々な分野で着目されてきている。加圧トレーニングの主な効果とされているのが筋肥大であり、それに関する報告は多数されている。^{21,22,23,24)}また、その臨床や研究も、競技レベルのもの^{22,23,24)}、リハビリテーションにおけるもの^{22,25,26)}、アンチエイジングや健康、美容といった分野のもの²⁷⁾まで多岐にわたっている。そのメカニズムとしては、四肢の基部を圧迫し適度な血流制限下で運動を行うことによって、少ない負荷でも筋肥大が起こるというものである。通常、筋肥大や筋力増強を目的とする場合には、**65% 1RM**以上の負荷強度を必要とするのが一般的であるが、加圧トレーニングでは**20% 1RM**というほぼ日常レベルの負荷強度でも著しい筋肥大と筋力増大が起こるとされている。²⁸⁾ 筋力トレーニングを実施してから筋肥大や筋力増強が引き起こされるまでのメカニズムやその要因は、未だに全容は明らかにはされていないが、筋力トレーニングを行う上では、筋に対するメカニカルストレスが最も重要であるとされている。また、それに加え神経系、内分泌系、循環系、代謝系などの活性が変化し、これらが複雑に相互作用した結果として筋肥大や筋力の増強が起こるものと考えられている。極めて低負荷の強度で行う加圧トレーニングにおいては、筋肥大に必要とされているメカニカルストレスの要因は排除される。しかし、それでも筋肥大や筋力増強を引き起こしていることから、加圧トレーニングにおいてはメカニカルストレス以外の何らかの要因が筋肥大に深く関わっていると考えられる。²⁸⁾

筋肥大を刺激する因子でよく知られているものとして、成長ホルモンやインスリン様成長因子（IGF-1）、肝細胞増殖因子（HGF）が挙げられる。また、反対に筋肥大を抑制する因子としてはミオスタチンなどが一般的に知られているものである。**McCall**ら²⁹⁾の研究によれば、トレーニングによる筋肥大のうち、

約50%がトレーニング直後に分泌される成長ホルモンに依存した効果であると推定されており、Takaradaら³⁰⁾の研究では、下肢筋の加圧トレーニングを行ったところ、低強度でもトレーニング直後に成長ホルモンが著しく増加したと報告されている。また、Kawadaら³¹⁾の研究によると、血流制限モデルのマウスでは肥大した筋においてHGFの増加やミオスタチン量の減少が見られたという報告がされている。これらの報告の他にも、様々な加圧トレーニングによる内分泌系活性化の結果が報告されており、その全容の解明が試みられている。このように、近年では内分泌系の活性化を初めとする加圧トレーニングの様々な特徴に多くの期待が寄せられている。

5. 研究の目的

ACL再建術後、ST腱の再生状態は膝関節の機能を保つ上で重要であると考えられる。早期の競技復帰を目指すためには、ST腱の再生が決定する術後初期に腱の成熟を促進する何らかのアプローチが必要である。そのための方策として、我々は加圧トレーニングに着目した。内分泌系の活性化をはじめとする加圧トレーニングの様々な効果は、再生ST腱の成熟を促進させうると予想される。これまで、ACL再建術後に加圧トレーニングを行った研究は他にもあるが、それらは筋肥大に着目したもので、再生ST腱の成熟に着目して行われたものは見当たらない。また、ST腱の再生、成熟が促進されることがあれば、腱と似た組織学的構造を持つ靱帯または再建靱帯にも同じようなことが起きていると考えることができる。再建靱帯の成熟が促進されれば、早期のリハビリテーションが可能なることから、早期競技復帰も可能となりうる。

以上より、本研究では「ACL再建術後の加圧トレーニングが筋と同様に再生ST腱の成熟・肥大を促進させうるか」を検討する目的で以下の実験を行った。

—本論文の構成と概要—

—実験1— 再生半腱様筋腱形態の性差における検討

本研究では、まずACL再建術後の再生ST腱及びハムストリングスの形態について、その現状と傾向を把握する目的として実験1で性差の検討を行った。

—実験2— 加圧トレーニングが再生半腱様筋腱の形態に及ぼす影響

実験1の結果を受けた上で、実験2としてACL再建術後に加圧トレーニングを用いたリハビリテーションを導入した実験を行ない、再生ST腱及びハムストリングスの形態の検討を行った。

また、実験2で行った加圧トレーニングについて、圧設定に関しての補足研究を行ったので《補足資料》として本論文の末尾に掲載した。

なお、本研究は早稲田大学スポーツ科学部倫理委員会「人を対象とした研究」の承認を受けた上で実施した。さらに、全ての実験において被験者には実験内容を十分に説明し、文書にて実験参加への同意を得た上で実験を行った。

第2章

—実験1— 再生半腱様筋腱形態の性差における検討

1. 背景と目的

ACL 再建術後、採取された ST 腱は再生するとされており、その組織学的構造も通常の腱に酷似したものであることが報告されている。また、再生 ST 腱の形態を縦断的に追った研究ではその成熟過程なども徐々に分かってきている。しかし、腱の再生の有無や成熟過程には個人差も大きく、その詳細については十分な考察がなされていない。腱の再生には内分泌系の要因が大きく関わっていることが予想されるが、内分泌系には性差があることから、腱の成熟過程にも性差が生じていることが考えられる。さらに、ACL 再建術後の ST 腱の再生において、性差について検討している研究はほとんど見当たらない。そこで、本実験では ACL 再建術後における再生 ST 腱形態の性差について検討することを目的として、次のような実験を行った。

2. 方法

【対象】

片側ACL再建術を受けた男女15名（男性7名、女性8名）とした。

再建術式は同側のST腱を用いた解剖学的な二重束再建法によるものである。

また、被験者は競技レベル、レクリエーションレベルのいずれかのスポーツ活動に参加している者とした。

被験者の特徴

No.	性別	年齢	種目	患側
1	男性	21	テニス	右
2	男性	22	サッカー	右
3	男性	19	ハンドボール	右
4	男性	19	バドミントン	左
5	男性	19	ラクロス	左
6	男性	21	フットサル	左
7	男性	20	サッカー	左
8	女性	20	ハンドボール	左
9	女性	21	バスケットボール	右
10	女性	19	サッカー	右
11	女性	19	サッカー	左
12	女性	19	ラクロス	左
13	女性	19	チア	右
14	女性	19	チア	右
15	女性	21	サッカー	左

【リハビリテーション】

リハビリテーションはACL再建術後に行われる一般的なもの(図2参照)を採用し、医師や理学療法士の指示の元で行った。また、復帰目標は6～9ヶ月とした。術後3ヶ月目以降のダッシュやアジリティトレーニングは、個々の回復に応じて医師が判断するものとした。また、それに加え等速性膝伸展・屈曲運動でピークトルク値を測定し、患側が健側の80%に回復した時点で許可するものとした。

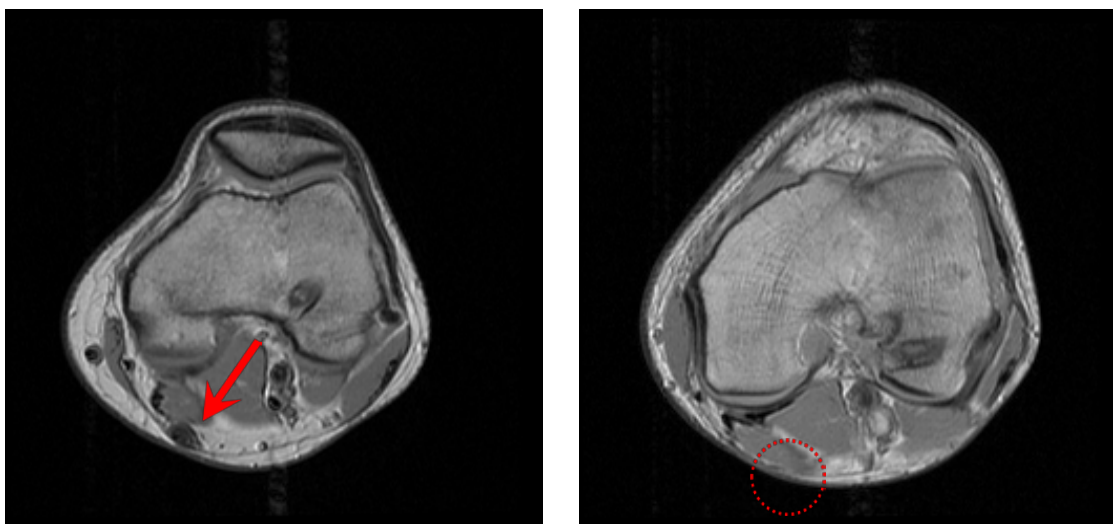
【評価方法】

評価方法は真田ら¹⁷⁾や野村ら¹⁴⁾の先行研究を参考にした。術後1～6ヶ月まで毎月MRI(1.5 Tesla、SIGNA EXCITE XI, GE, USA)撮像を実施し、再生腱の評価を行った。撮像は仰臥位で行い、膝関節は伸展位で撮像した。撮影範囲は膝関節裂隙より遠位6cm～近位12cmとし、大腿骨に垂直面の連続スライス画像を撮像した。また、撮像条件はプロトン強調画像(TE: 10,20,30 ms, TR: 3000 ms, Matrix: 256*192, FOV: 16*16, Thickness: 5.0mm, Space: 1.0mm)とした。

【評価項目】

① 再生ST腱の有無

MRI画像上において、本来ST腱が存在する位置、膝関節後内側から鷲足部に向けて腱の再生が見られるかどうかを確認した。(図4) 筋腱移行部まで連続性のある再生腱が確認できた場合を「再生」と定義し、再生腱に連続性が見られない場合、または再生が確認されなかった場合を「未再生」と定義した。



(図4) ST腱再生例(左図)と未再生例(右図)

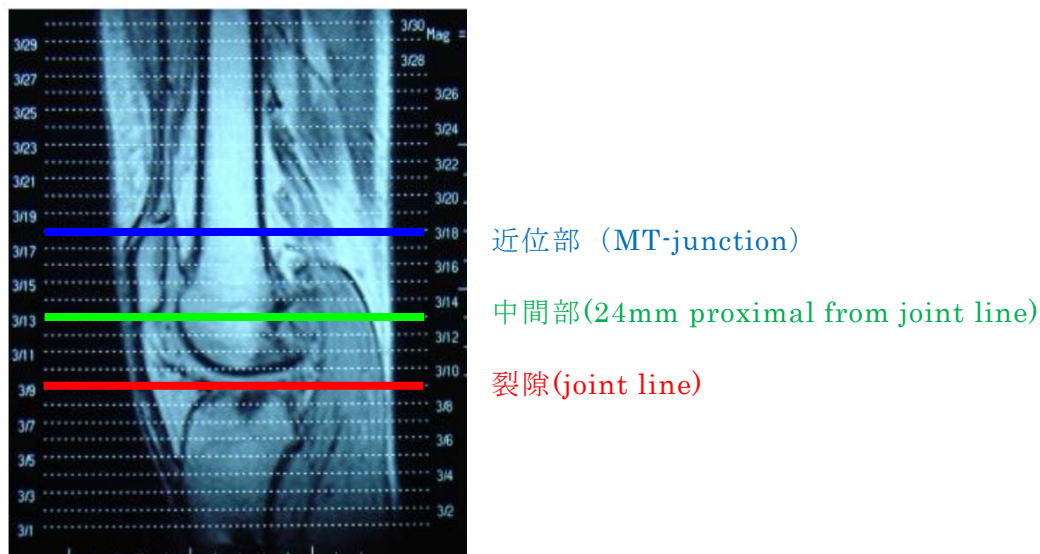
② 再生ST腱の筋腱移行部の位置

筋腱移行部(MT-junction)の位置は、関節裂隙から筋腱移行部までの距離によって評価した。MR画像上で再生ST腱を遠位から近位に確認していき、初めて筋が確認された位置を筋腱移行部とした。関節裂隙から筋腱移行部までのスライス枚数に（スライス厚＋スライス間隔）を乗じることにより腱長を算出した。

③ 再生ST腱の横断面積

再生ST腱の横断面積は、MR画像上から再生ST腱をトレーシングペーパーに書き写し、スキャナ(Canon Scan 9950FV, Cannon)でパーソナルコンピュータへ取り込み、画像解析ソフトScion Image (Scion Corporation, USA)を用いて算出した。計測部位は遠位部（関節裂隙: JL）、中間部（関節裂隙より24mm近位部: Intermediate）、近位部（筋腱移行部: MT-j）の三点を計測した。(図5)

再生ST腱の中間部を関節裂隙より24mm近位部と定義したのは、被検者間の個体差を考慮し、どの被検者においても筋腱移行部まで達することなく、再生ST腱の横断面積が計測可能な位置である理由からである。また、再生ST腱が未再生の者、画像が不鮮明なことからトレースが困難なものについては、横断面積の正確な計測が不可能なため解析対象から除外した。



(図5) ST腱横断面積計測位置

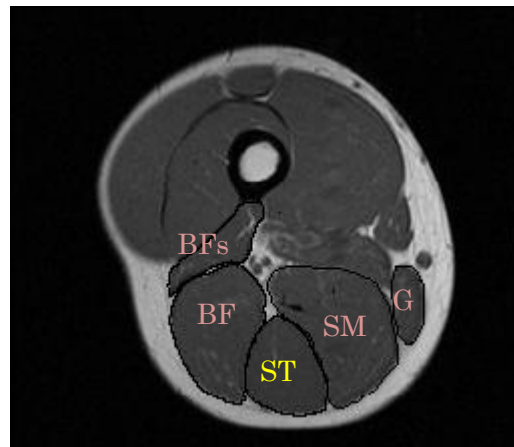
④ 再生ST腱の成熟度 (T2値緩和時間)

再生ST腱の成熟度の評価は真田ら¹⁷⁾の方法を参考にT2値緩和時間により検討を行った。計測部位は関節裂隙と中間部の二点とし、信号強度の計測は、各TEの画像上で再生ST腱の全体を含むようにRoiをとり、計測位置がずれることのないよう留意した。また、本来であれば健側ST腱との比較が好ましいが、正常ST腱の信号強度が低く T2値が算出できないため比較対象としてPCLの値を算出した。腱が未再生の者については、T2値の計測が不可能であるため解析の対象から除外した。

$$\text{【T2緩和時間計式】} \quad \text{傾き} = \frac{\log SI^1 - \log SI}{TE1 - T} \quad T2\text{値} = \frac{-1}{\text{傾き}}$$

⑤ハムストリングス筋体積

STの筋体積を評価するために、術後6ヶ月目でハムストリングスの筋体積を算出し評価した。筋体積の算出方法は野村ら¹⁴⁾の方法を参考にした。STの筋長と同様の撮影条件とし、対象筋はST（半腱様筋）、G（薄筋）、SM（半膜様筋）、BF（大腿二頭筋）、BFs（大腿二頭筋短頭）の5筋とした。(図6) 算出方法としては、建断面積と同様の方法で筋の断面積を算出し、円錐近似法により算出した。大転子付近など筋の確認が困難な部位では、解析者が確実に筋を確認できた位置より計測を行った。



(図6) ハムストリングス横断画像

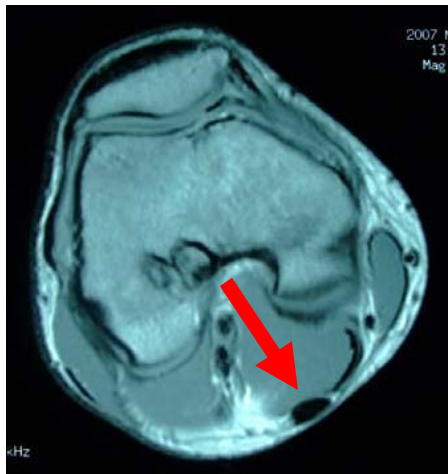
3. 統計処理

統計処理には、統計解析ソフトDr.SPSS IIを用いた。筋腱移行部位置、再生ST腱横断面積、T2値、筋体積の各月における群間比較に対応のないt検定を行った。また、有意水準は5%未満とした。

4. 結果

① 再生 ST 腱の有無

男性では7例中7例で「再生」(100%)、女性では8例中5例で「再生」(62.5%)、3例で「未再生」(37.5%)という結果であった。(図7)



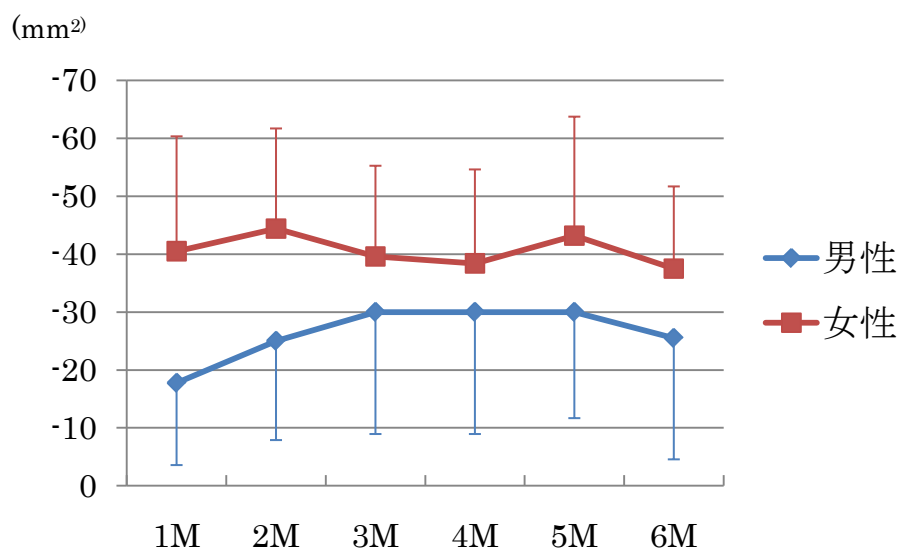
(図 7) 再生例



未再生例

② 再生 ST 腱の筋腱移行部の位置

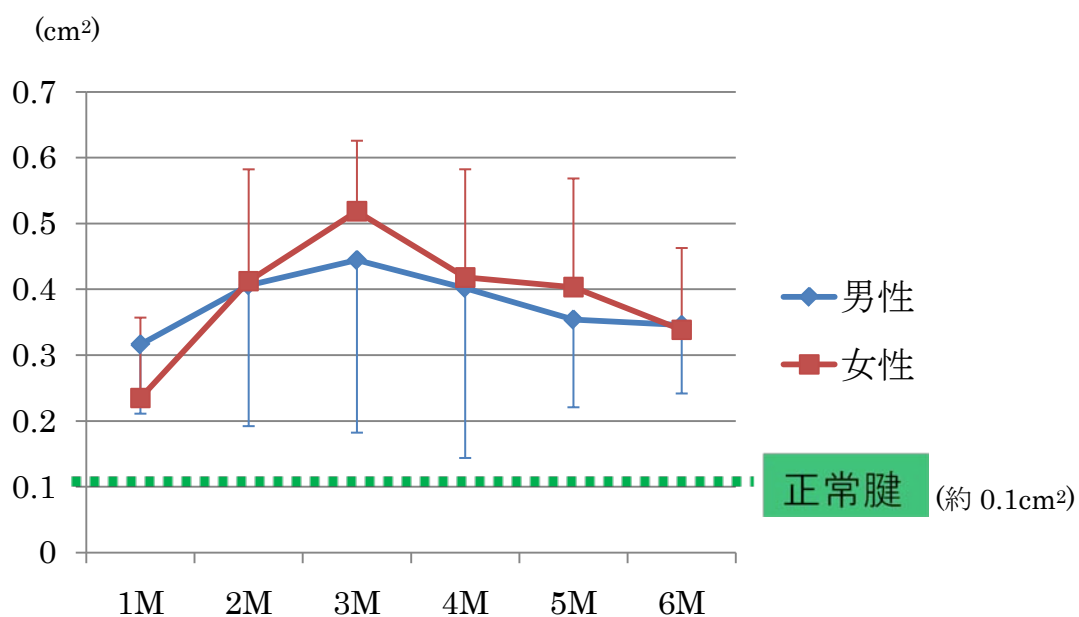
筋腱移行部の位置は、全ての月で女性に比べ男性の方が筋腱移行部の近位方向への移動量が少なかったが有意差は無かった。男性群では約20~30mm近位方向へ移動し、女性群では約40mm近位方向へ移動していた。(図8) また、経時的な変化としては、両群共に規則性のある変化は確認されなかった。



(図 8) 筋腱移行部位位置の経時的変化(患健差)

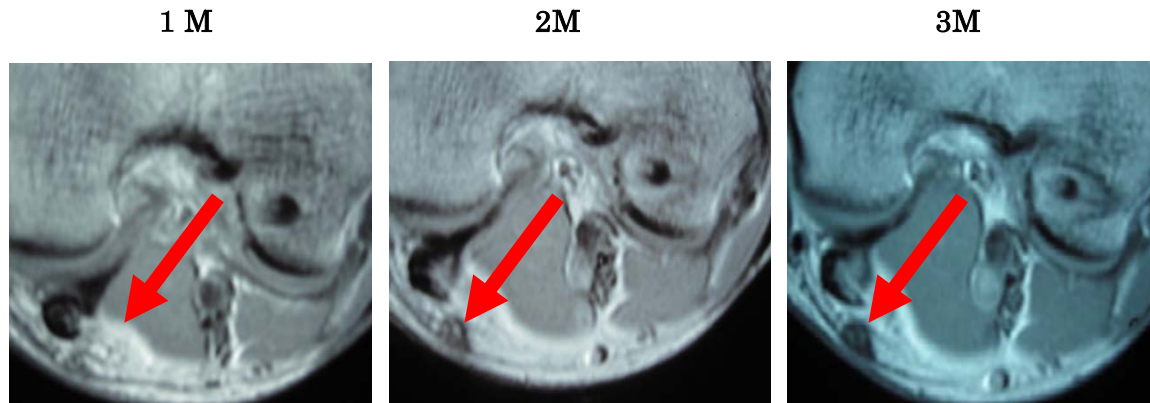
③ 再生 ST 腱の横断面積

各撮影部位での差は見られずほぼ同様の推移となっていた。各部位を平均した値では、両群とも術後 3 ヶ月でピークを迎え、その後徐々に減少傾向であった。ピーク値は男性では 0.44cm^2 で健側の約 4.5 倍、女性では 0.52cm^2 で健側の約 5 倍であったが、どの月においても有意差は見られなかった。(図 9)



(図 9) 腱断面積の経時的変化

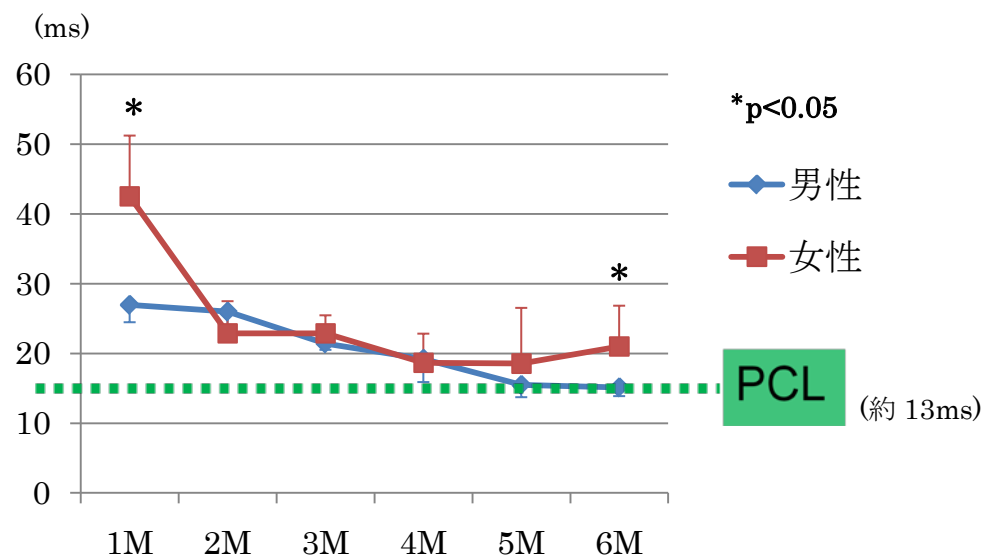
また、術後1ヶ月の時点では再生腱の辺縁の画像が不鮮明なため、正確にトレースすることが困難であった。(図10) そのため、確実に腱の再生が確認できる部分だけをトレースしたことから、術後1ヶ月の値は参考値とする。



(図10) 再生ST腱のMR画像上の経時的変化

④ 再生 ST 腱の成熟度 (T2 値緩和時間)

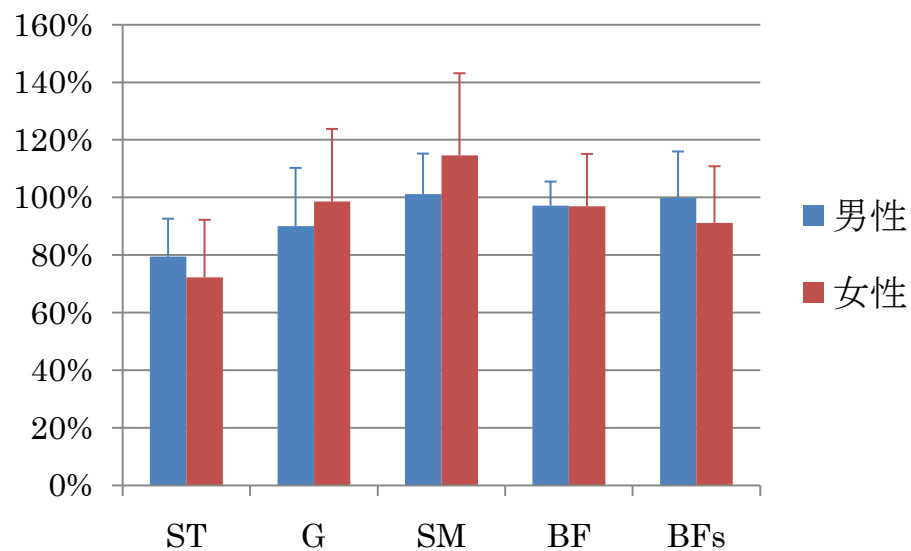
T2 値緩和時間でも各部位における差は見られず、平均した値の比較では術後 1 ヶ月目に女性群が有意に高値を示し、術後 2 ヶ月目以降からはほぼ同等の値であった。また、術後 6 ヶ月目では男性群が有意に低い値を示した。(図 11)



(図11) T2値の経時的変化

⑤ ハムストリングス筋体積

ハムストリングス筋体積は、両群共に ST の萎縮が大きかったが性差における有意差はどの筋でも見られなかった。ST においては、男性群で患側が健側に比べ 21% 萎縮しており、女性では 28% 萎縮していた。また、男性は女性に比べ G が萎縮傾向にあり、女性は BFs が萎縮傾向であった。さらに、女性では SM において患側が健側より大きかった。(図 12)

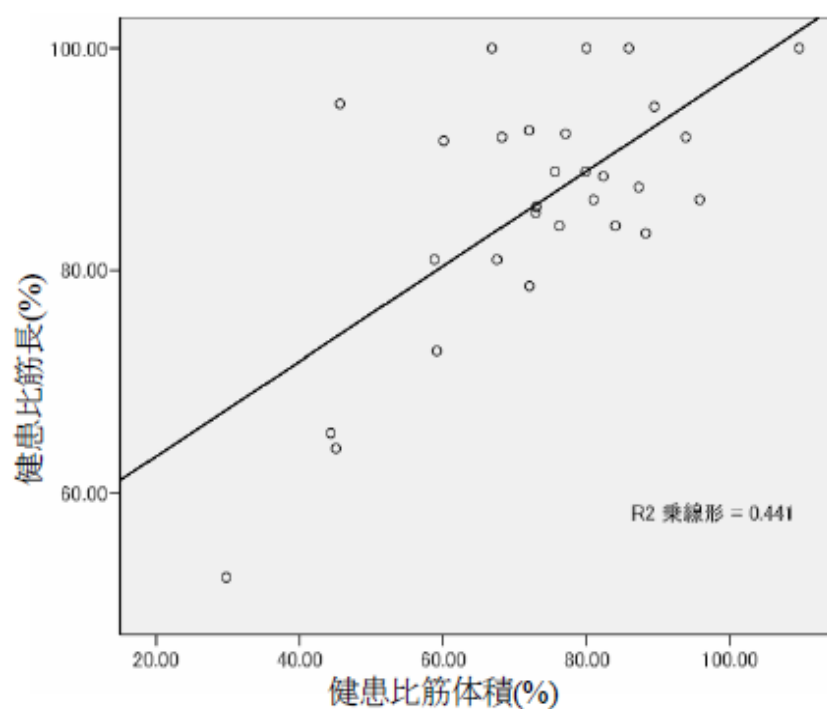


(図 12) ハムストリングス筋体積 患健比

5. 考察

再生 ST 腱の再生率は、Eriksson¹⁵⁾や西野ら³²⁾などの先行研究では男女合わせた再生率が約 80%程度のものがほとんどであったが、本実験では、男性が 7 例中 7 例で 100%、女性では 8 例中 5 例で 62.5%という結果であった。先行研究において性差の検討を行っているものはなかったが、本実験においては男性が女性に比べて再生率が良い傾向にあった。

筋腱移行部の近位方向への移動は筋の短縮を意味することになる。真田ら¹⁷⁾の研究では、筋長の長さと筋体積に正の相関関係が報告されており、筋長を長く保てた群が筋体積も大きい結果となっている。(図 13)



(図 13) ST 筋体積と筋長の散布図¹⁷⁾

本実験においては、ばらつきが大きく有意差はなかったが、男性群で約 20~30mm 近位方向へ移動し、女性群では約 40mm 近位方向へ移動という結果

になり、女性に比べ男性の方が筋腱移行部の近位方向への移動量が少なかった。また、経時的な変化についても本実験からはその規則性は特に読み取れなかった。筋腱移行部の位置は、術後初期の筋腱移行部の組織が不安定な時期に、筋の収縮による負荷でその位置が決定されるものと予想される。各被験者でリハビリテーションメニューが異なることや、日常生活での個人差からこのようなばらつきの大きさになってしまったのではないかと考えられる。

再生 ST 腱の横断面積は、筋腱移行部、中間部、裂隙の各部位での再生過程の差は特に見られず、ほぼ同様な推移であった。各部位を平均した値の推移では、横断面積は術後 3 ヶ月でピークを迎え、その後緩やかに減少する傾向にあった。これは先行研究の野村ら¹⁴⁾と同様の結果であった。術後 4 ヶ月目以降から断面積が減少していくのは、腱の組織学的な成熟が進んでいくことにより収縮していくためであると真田ら¹⁷⁾が考察しており、本実験でも同様のことが考えられる。また、健側比も断面積の約 4~5 倍程度と先行研究と同様の結果であった。男女差については、女性の方が太い傾向にあったが、これも個人差の大きさから一概に女性の方が大きいとは言えない結果となった。腱が再生する過程に、腱自体に力学的な負荷がかかると、まだ成熟しきっていない未熟な腱は、その負荷を面積で補うために太く再生することが考えられる。これらのことから、腱横断面積も術後初期のリハビリテーションや私生活によるハムストリングスへの負荷の違いが関わってくると推察できる。さらに、組織の再生に最も重要に関わってくるのが血液であるが、手術による ST 腱採取の段階でどの程度の出血が起きるかも大きく関わってくると予想される。ST 腱採取の方法としては、Tendon stripper により ST 腱を引っ張ることで腱を採取するが、腱がどの位置で切れるかにより出血量も変わってくる。その出血量の違いが組織の再生過程に影響してくるのではないかと予想することができる。ま

た、もちろん ST 腱採取時の腱の切れる位置が、術後の筋腱移行部の位置にも影響してくることが推察できる。しかし、これについては本研究ではあくまでも推察の域を脱しないので、今後さらなる検討が必要である。

T2 値緩和時間は、これも各部位での推移の差は特に見られなかった。先行研究では、再生 ST 腱は近位から遠位にかけて再生するという、いわゆる「トカゲのしっぽ」のように再生するという報告がいくつかあるが^{33,34,35,36}、本実験では、再生 ST 腱の横断面積と T2 値の各撮影部位での差が見られなかったことから、これらの先行研究とは異なる結果となり、均一に再生していくことが示唆された。腱が均一に再生する可能性と、T2 値が術後初期に高値を示し、術後 5~6 ヶ月目で PCL とほぼ同様な値になっていたのは、真田ら¹⁹と同様の結果であった。性差については、術後 1 ヶ月目は女性が男性に比べ有意に高い値を示し、術後 2~4 ヶ月目ではほぼ同様の値であったが、術後 6 ヶ月目では男性が女性に比べ有意に低い値であった。この結果から、男性は女性に比べ、術後の再生腱の水分含有量が低い傾向にあり、T2 値が安定してくるのもわずかながら早い傾向が示唆された。術後、リハビリテーションを行うためには再建靱帯や再生 ST 腱の成熟・定着が前提になるが、このように成熟過程に差があることからリハビリテーションを行う時期も検討していく必要があるだろう。

ハムストリングス筋体積は、両群共に ST の萎縮が大きかったが、どの筋においても有意差は無かった。ST においては、男性では患側が健側に比べ 21% 萎縮、女性では 28% 萎縮と女性において萎縮が大きい傾向であった。また、男性は女性に比べ G が萎縮傾向にあり、男性では紡錘状筋の特徴を持つ筋が萎縮傾向にあるという結果であった。さらに、女性は男性に比べ SM が健側より大きい値となっていた。これは筋の代償性肥大も考えられるが、過去の先行研

究によると、ハムストリングスの筋萎縮による他の筋の代償性肥大は報告されていない。このことから考えられるのは、ハムストリングスは密集した筋の集まりであるため、ST の萎縮によりスペースができ、隣接している SM が見かけ上大きくなったということも考えられる。

本実験では、再生 ST 腱形態における性差について検討したが、男性は女性に比べ腱の再生率が良好であったこと、T2 値の減少・安定が早期に見られる傾向があったこと、ST の筋萎縮が少ないことから、男性が女性に比べて ACL 再建術後の ST の筋・腱の再生状態が良好であることが示唆された。しかし、術後の ST 腱再生過程はばらつきが大きく、本実験では被験者数が少なかったことから、今後さらに被験者数を増やしての検討が必要になる。

第3章

—実験2— 加圧トレーニングが再生半腱様筋腱の形態に及ぼす影響

1. 背景と目的

ACL 再建術後、ST 腱の再生は術後早期に決定され、その成熟過程が明らかとなってきた。早期の競技復帰を目指すためには、採取された腱の再生および再建靱帯の組織の成熟を促す何らかのアプローチが必要となる。その方策として、我々は近年注目されている加圧トレーニングに着目した。加圧トレーニングとは、四肢の基部を圧迫し、適度な血流制限下でトレーニングを行うことにより、多量の成長ホルモンが分泌されるというものである。腱の再生状態には個人差が大きく存在するが、それを決定付ける要因の一つとして性差などによる内分泌系の違いが挙げられる。大量の成長ホルモン分泌を初めとする加圧トレーニングの様々な効果が、ACL 再建術後の再生腱の成熟を促す可能性があると考えられる。また、腱の成熟を促すようなことがあれば、組織学的構造の似た靱帯に同じような事が起きていると予想できる。また、ACL 再建術後に加圧トレーニングを導入した研究として、術後の大腿四頭筋など筋力に着目して実験が行われたものはいくつかあるが、再生 ST 筋・腱に着目して実験が行われたものはほとんどない。以上のことから、本実験では ACL 再建術後の加圧トレーニングが再生 ST 腱の成熟・肥大を促進しうるかを検討する目的で実験を行った。

2. 方法

【対象】

実験1の結果から、ACL再建術後のSTの筋・腱の再生には性差があることを考慮し、本実験では術後経過が良好な傾向にあった男性被験者だけに絞り対象とした。

本実験での被験者は、片側ACL再建を受けた男性14例とし、通常のリハビリテーションを行う群を一般群（7名）、通常のリハビリテーションに加え、加圧トレーニングを行う群を加圧群（7名）とした。また、一般群の被験者のデータは一部実験1の被験者と同じの者とする。

再建術式は実験1と同様、両群とも同側のST腱を使用した解剖学的な二重束再建法によるものである。競技レベルとしてはレクリエーショナルレベルおよび競技レベルのスポーツ活動に参加している者とした。

被験者の特徴

No.	群	年齢	種目	患側
1	加圧	21	ハンドボール	右
2	加圧	22	アメリカンフットボール	左
3	加圧	22	サッカー	右
4	加圧	21	スキー	左
5	加圧	24	フットサル	左
6	加圧	18	バレー	左
7	加圧	22	陸上	左
8	一般	21	テニス	右
9	一般	22	サッカー	右
10	一般	19	ハンドボール	右
11	一般	19	バドミントン	左
12	一般	19	ラクロス	左
13	一般	21	フットサル	左
14	一般	20	サッカー	左

【リハビリテーション】

全被験者が同一のリハビリテーション施設に通い、医師及び理学療法士の下でリハビリテーションを行った。通常行うリハビリテーションメニューとしては、両群共に実験 1 と同様である ACL 再建術後に行われている一般的なものを採用した。(図 2 参照) また、実験 1 と同様に術後 12 週目で等速性膝伸展・屈曲筋力を測定し、医師の判断の下ランニングを開始した。また、本来であれば、実験期間中の被験者のリハビリテーションやトレーニングメニューを全て統一するのが望ましいが、実験期間が長いことと、被験者の治癒過程の違いや私生活でのスポーツレベルの差から、リハビリテーションの頻度や強度をすべて統一することはできなかった。今回は、できるだけ被験者全員が毎日一定量のリハビリテーションを行うように指示したことと、普段行っているメニューを記録することで被験者間の差を考察することにした。

【加圧トレーニング】

加圧トレーニング群は、普段は一般群と同様のリハビリテーションを行い、その他に週 2 回、加圧トレーニングを導入した。期間は術後 4 週目から 16 週目までの 3 ヶ月間行い、1 日約 1 時間行った。加圧トレーニングを行う日は、通常のメニューに変わって加圧トレーニングを行うので、普段のリハビリテーションメニューは行わないものとした。また、加圧トレーニングを行う際は、加圧トレーニング本部が認定する特定資格者の指導の下行った。使用機材は加圧マスターミニ《(株) サトウスポーツプラザ製造》(図 14) を使用し、圧は健側患側の両側に加えた。圧の設定は加圧マスターミニの表示で約 260~300mmHg とし、毎回個人の適正圧を探りながら実施した。(加圧マスターミニで加える圧は、手術などで用いられる医療用ターニケットカフ等で加える圧とは表示圧が同じでも、カフの形状や素材の違いから

実際に身体に作用する圧が異なることが考えられる。それについては、補足研究として圧の比較実験を行ったので、補足資料としてページ P42 に掲載した。) 加圧トレーニングで行うメニューとしては、通常のリハビリテーションメニューと同じものを実施し、レジスタンストレーニングを行う場合は加圧での負荷を考慮し負荷は通常のリハビリテーション時の 1/2、回数は同等またはそれ以下と設定した。(図 15,16) これは、加圧トレーニングのトレーニングボリュームが通常のリハビリテーションの総量を超えてしまわないように留意したためである。また、加圧群ではメニューの回数をこなす際には、次のように行った。通常のトレーニング時に、20 回を 3 セットなど合計で 60 回行うようなトレーニングの場合には、1 セット目を 30 回、2 セット目を 20 回、3 セット目を 10 回というように段階的に回数を減らすような設定にして合計 60 回行うような方法でトレーニングを実施した。加圧トレーニングのメニュー例は(図 17)に示した。



(図 14) 加圧マスターミニ



(図 15) 加圧マスターミニ装着の様子



加圧時 スクワットトレーニング

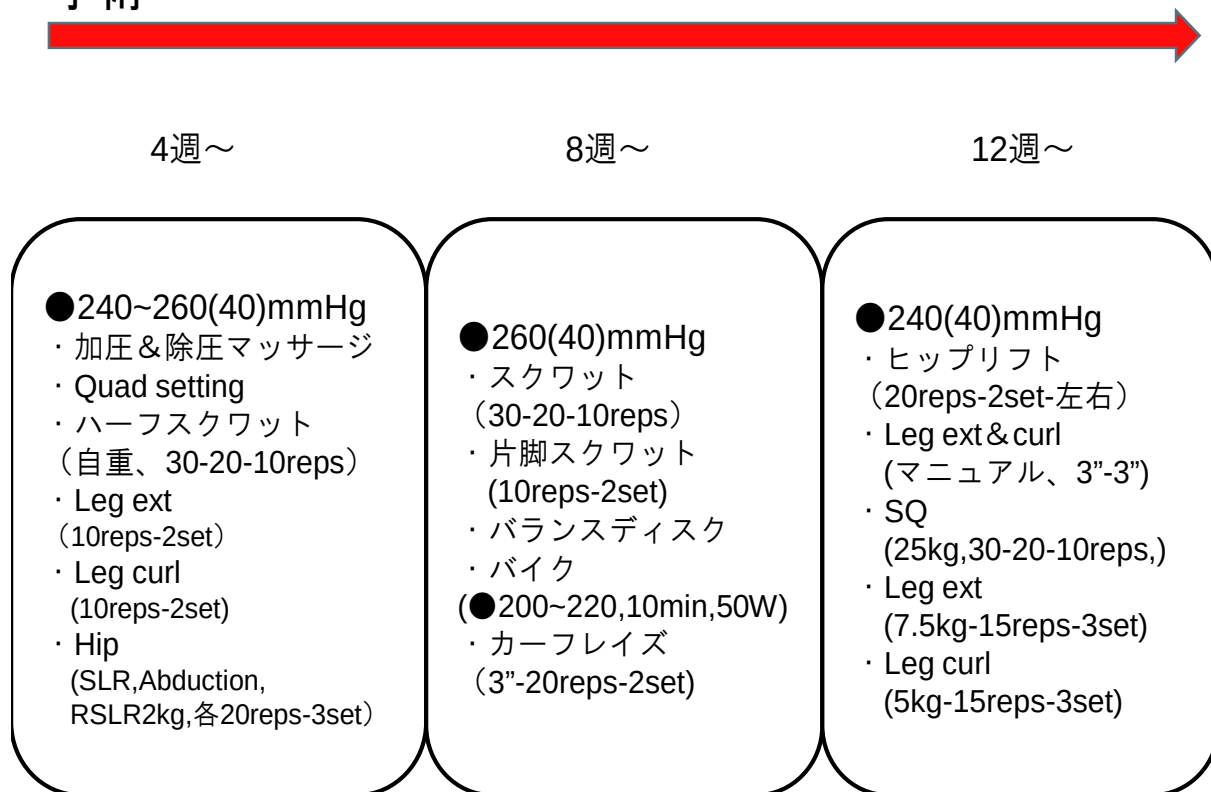


(図 16) 加圧時 ランジ



加圧時 自転車エルゴメーター

手術



(図 17) 加圧トレーニングメニュー例

【評価方法】

実験 1 と同様の方法で MRI を用いて評価を行った。

なお、実験 2 に関しては、被験者によっては術後 6 ヶ月に達していない者がおり、
全ての月で全被験者のデータは揃えることができなかった。

【評価項目】

評価項目も実験 1 と全て同様の項目で評価した。

- ① 再生 ST 腱の有無
- ② 再生 ST 腱の筋腱移行部の位置
- ③ 再生 ST 腱の横断面積
- ④ 再生 ST 腱の成熟度（T2 値緩和時間）
- ⑤ ハムストリングス筋体積

ただし、ハムストリングス筋体積に関しては、諸事情により加圧群の 6 ヶ月のデータを十分に揃えることが出来なかったため、術後 6 ヶ月の撮影が出来なかった被験者に関しては術後 5 ヶ月目のものとし、一般群の 6 ヶ月目のデータと比較・検討することとした。

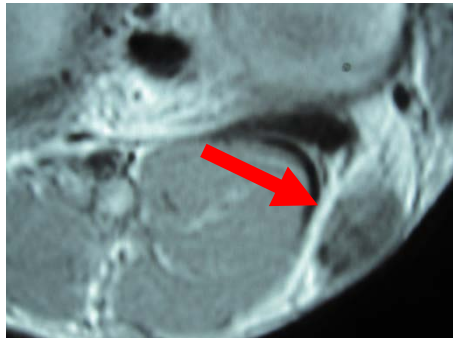
3. 統計処理

統計処理には、実験 1 と同様に統計解析ソフト Dr.SPSS II を用い行い、筋腱移行部位置、再生 ST 腱横断面積、T2 値、筋体積の各月における群間比較に対応のない t 検定を行った。また、有意水準は 5% 未満とした。

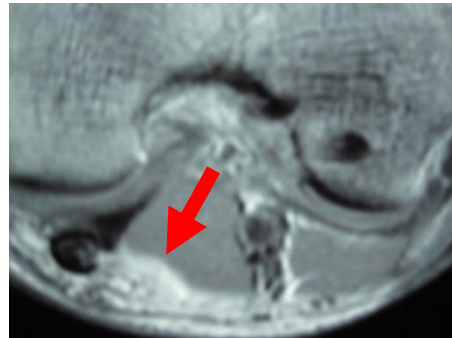
4. 結果

① 再生ST腱の有無

加圧群では7例中6例で「再生」(85.7%)、1例が「未再生」(14.3%)という結果であった。(図18) また、一般群では7例中7例で「再生」(100%)であった。



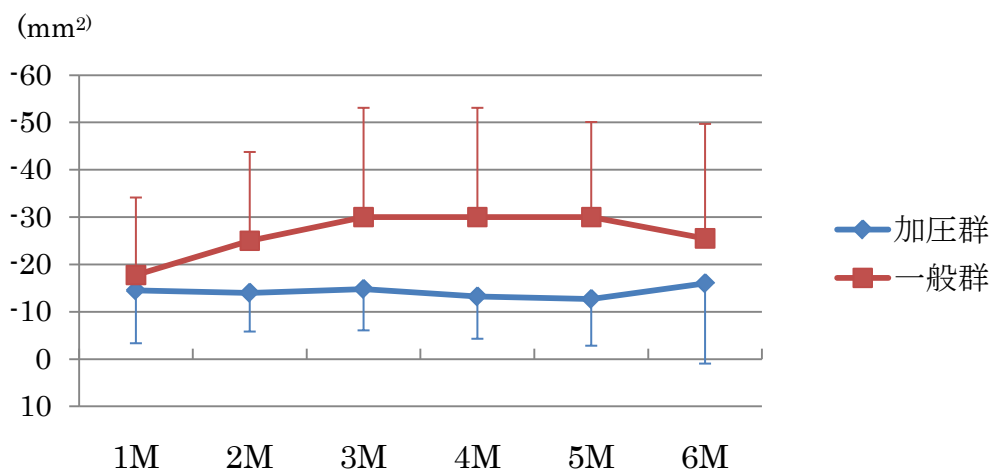
(図18) 加圧群 再生例



加圧群 未再生例

② 再生ST腱の筋腱移行部の位置

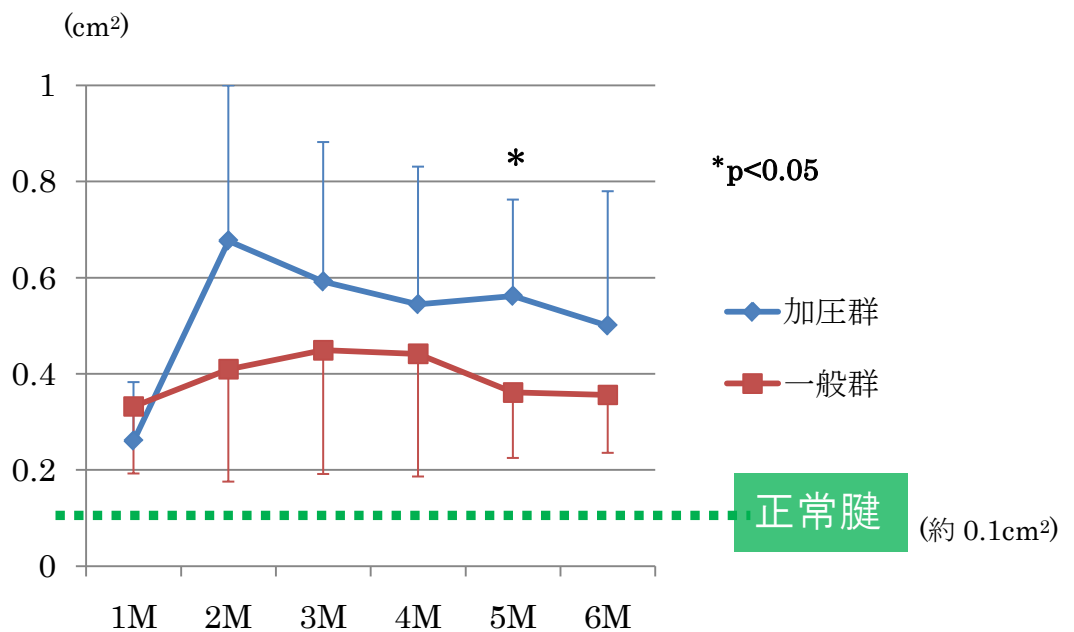
筋腱移行部の位置は、一般群に比べ加圧群の方が、筋腱移行部の近位方向への移動量が少なかった。加圧群では約15mm近位方向へ移動し、一般群では約-20~-30mm近位方向へ移動していた。(図19) また、経時的な変化としては、どちらの群も規則性のある変化は確認されなかった。



(図19) 筋腱移行部位置の経時的な変化(患腱差)

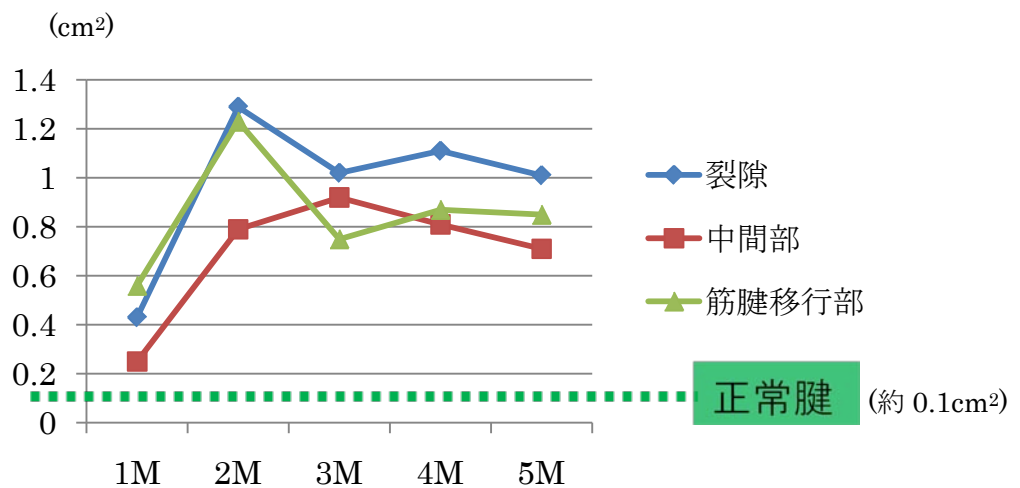
③ 再生ST腱の横断面積

腱横断面積は、両群ともに各部位の差はほとんど見られなかった。各部位を平均した値では、加圧群では術後2ヶ月目に向けて著しく肥大し、 0.68cm^2 となっていた。また、それをピークに3ヶ月目以降は緩やかに減少していた。(図20) 一般群では、術後3ヶ月目をピークに、その後緩やかな減少傾向であった。一般群では横断面積のピーク値が健側の約4倍に対して、加圧群では約7倍になっていた。群間比較では、術後5ヶ月目において、加圧群が有意に大きい値を示した。



(図20) 腱断面積の経時的変化

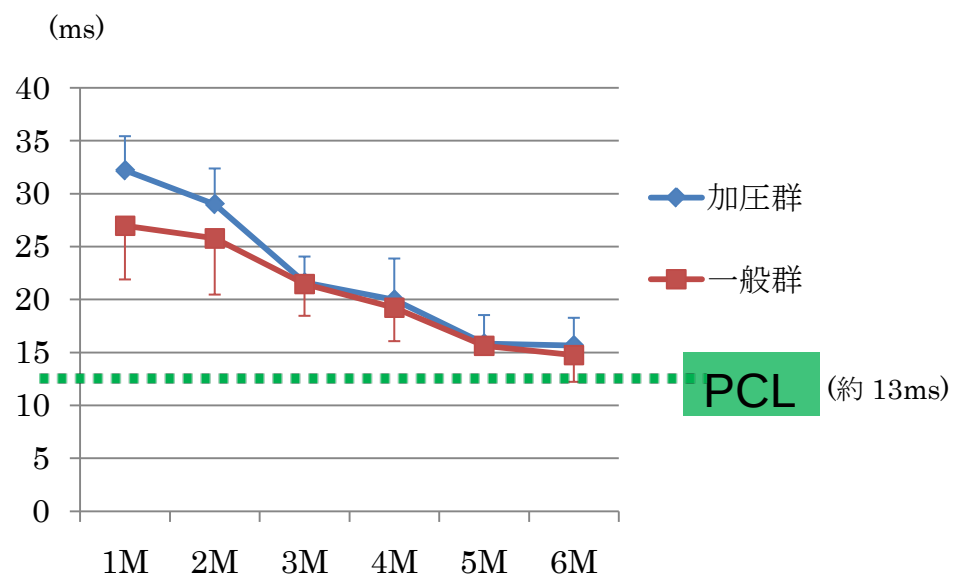
さらに、再生良好例では術後2ヶ月目の時点で腱が健側の約11倍程度大きく再生している例も見られた。(図21)



(図21) 各部位における腱横断面積 (加圧群再生良好例)

④ 再生ST腱の成熟度 (T2値緩和時間)

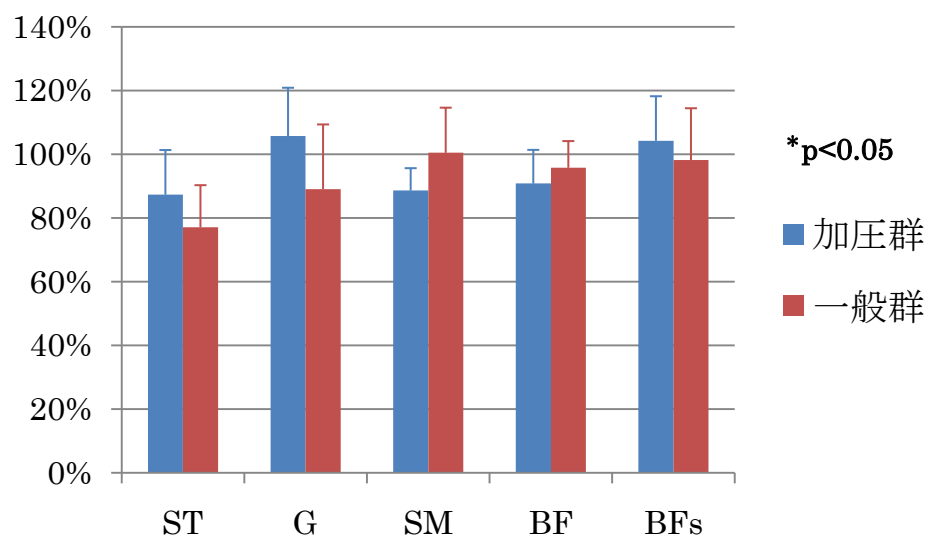
T2値緩和時間でも、各部位の差はほとんど見られなかった。各部位を平均した値の比較では、術後早期は加圧群が高値を示す傾向にあり、術後3ヶ月目で一般群とほぼ同等の値となった。(図22) 術後3ヶ月目以降は6ヶ月目までほぼ同等の値であった。



(図22) T2値の経時的変化

⑤ ハムストリングス筋体積

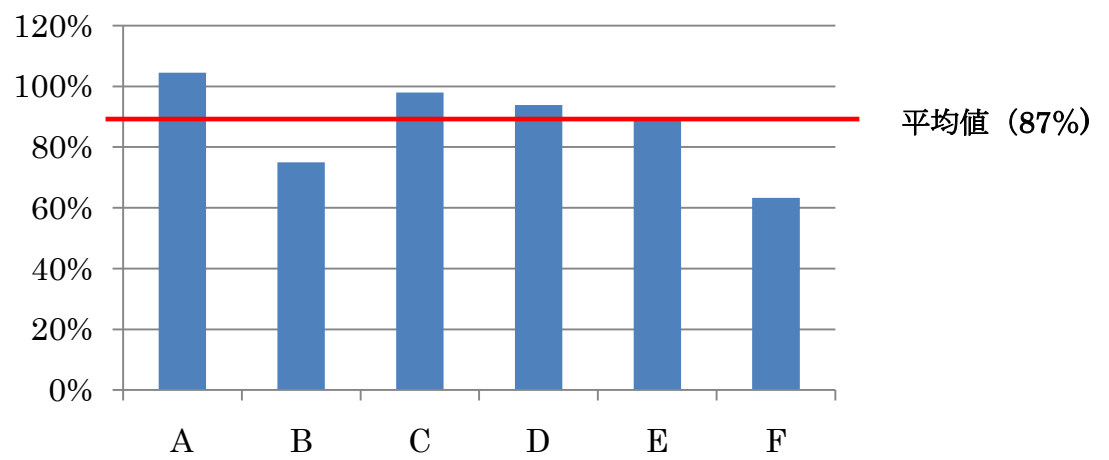
ハムストリングス筋体積のうち、一般群ではSTとGが健側に比べ患側の萎縮が大きい傾向にあり、STでは健側より23%萎縮していた。加圧群では、STが他の筋に比べ萎縮しており、健側より13%萎縮していた。さらに、有意差は無かったが両群間で差が大きい傾向にあったのはSTとGであり、その差はSTで10%、Gでは17%であった。（図23）



（図23） ハムストリングス筋体積 患健比

加圧群の各被験者のSTの筋体積は（図24）の通りであり、患側と健側の差がほとんどない者と萎縮が大きい者と個人差が大きい傾向であった。

ST



(図24) 加圧群筋体積 各被験者内訳

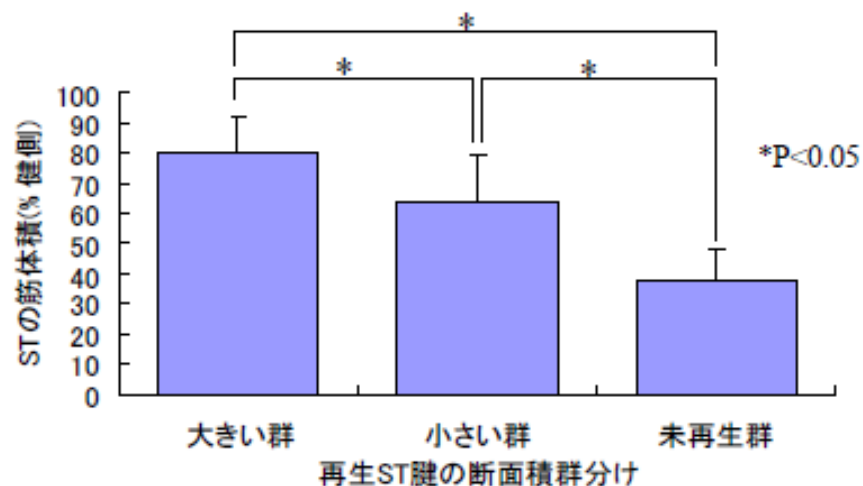
5. 考察

再生ST腱の有無は、加圧群では7例中6例(85.7%)、一般群では7例中7例(100%)で再生が確認された。加圧群における未再生例については、術直後からMR画像上で再生ST腱らしきものが確認できず、数ヶ月が経過しても未確認のままであった。ACL再建術後のST腱の再生において、再生の有無は術後2週から6週で決定するという報告がある。³⁷⁾ 本実験でも術後初期に再生腱が確認できないものは、術後2ヶ月以上経過しても再生を確認することはなかった。このことから、腱の再生の有無は術後約1ヶ月程度のうちに決定するということが示唆された。また、未再生例は加圧群の被験者であったが、本実験では加圧トレーニングの導入は術後1ヶ月後であったことから、加圧トレーニングがST腱の再生の有無自体に関与した可能性は極めて低いと考えられる。

筋腱移行部の位置は、一般群に比べ加圧群が筋腱移行部の近位方向への移動量が少ない結果であった。しかし、各群の経時的な変化を見るとあまり大きな動きはないことから、筋腱移行部の位置も術後初期に決定される可能性が高いと考えられる。真田ら¹⁷⁾や野村ら¹⁴⁾の先行研究でも、術後のST腱筋腱移行部の経時的な変化に有意な変化は確認されなかったと報告している。本実験においても、両群共に大きな経時的変化は見られなかったことから、術後初期にある程度決定された筋腱移行部の位置が、そのまま継続されたものと考えられる。また、筋腱移行部の位置は、実験1と同様に、特に個人差が大きい結果であったので、加圧群が一般群に比べて近位方向への移動が少なかったのも術後初期に決定した個人差であり、加圧トレーニング自体がそれに影響したことは考えにくいと推察される。

再生ST腱横断面積は、両群ともに各部位の差はほとんど見られなかったことから、実験1と同様に、腱はトカゲのしっぽのように近位から遠位にかけて伸びるように再生するのではなく、均一に再生されることが示唆された。各部位を平均した値で

は、一般群が術後3ヶ月でピークを迎えるのに対し、加圧群では術後2ヶ月目でピークを迎え、3ヶ月目には既に減少を始めていることから、腱の再生過程が加速化している可能性が示唆された。さらに、ピークでの大きさが一般群の健側の約4倍であったのに対して、加圧群では約7倍になっていたことから、より強度の強い腱が再生されている可能性が考えられる。真田ら¹⁷⁾の研究では、再生腱の断面積が健側より大きい群、健側より小さい群、未再生群に分けた3群において、STの筋体積を比較すると再生腱の断面積が大きいほどSTの筋体積も有意に大きいという結果が報告されている。(図25)



(図25) 再生ST腱断面積別の筋体積¹⁷⁾

また、膝関節屈曲トルクについても、再生ST腱断面積が大きいほど屈曲トルクも大きい傾向であることが報告されていることから、腱は太く再生する方が筋機能としては良い傾向にあることが考察されている。本実験においては被験者数が少ないためそのような解析は出来なかったが、腱が一般群よりも著しく大きく再生していることから、STの筋体積も一般群に比べ萎縮が小さいこと予想される。ただし、術後2ヶ月目の腱断面積において有意差が見られなかったのはばらつきの大きさが原因と考えられる。腱の断面積の肥大の原因として、組織修復のための線維芽細胞の

増殖が考えられるが、加圧トレーニングによる大量の成長ホルモンの増加に伴いインスリン様成長因子(IGF)や線維芽細胞増殖因子(FGF) など、何らかの他の成長因子も増加し、組織の治癒能力が高まり、腱断面積が著しく増大したものと考えられる。ただ、加圧群において術後1ヶ月目値から2ヶ月目に向けて、グラフ上では断面積が急激に増大しているように見えるが、これは実際に断面積が急激に増大しとは考えにくい。実験1でも述べたように、術後1ヶ月目の時点では、腱の再生の有無が確認できないこともあることや、再生腱の辺縁が不鮮明なために、トレースが非常に困難である場合がある。本実験では、そのような場合は確実に腱として確認できる部分だけをトレースし、曖昧な部分は解析から除外しているために、術後1ヶ月の値が低くなったものと考えられる。つまり、本来であれば後に腱として再生するであろう部分でも、術後1ヶ月の時点では組織が未熟であるために解析の判断が極めて困難となる。そのため、本実験においては術後1ヶ月の値はあくまでも参考値として解釈をした。また、術後5ヶ月目で有意に加圧群が大きい値を示したのは、5ヶ月目になると腱の再生過程も安定してくることから、ばらつきも少なくなり有意差が出たものと考えられた。

T2値緩和時間においても、腱断面積と同様に各部位の差はほとんど見られなかった。各部位を平均した値の比較では、術後初期は加圧群が高値を示す傾向であった。術後1ヶ月目の値は加圧トレーニングを開始する時点での値であるので、加圧による影響ではないと考えられる。術後3ヶ月目には、高い値を示していた加圧群の値が、一般群とほぼ同様の値にまで減少していたことから、減少率を考慮すると成熟のスピードとしてはわずかではあるが早くなっていると推察できる。しかしながら、術後3ヶ月目以降から6ヶ月目までの値を見ると、一般群とほぼ同様の値であることから、加圧トレーニングによる急激なT2値の減少は本実験では確認されなかった。

ハムストリングス筋体積では、一般群ではSTとGが健側に比べ患側の萎縮が大きい

い傾向であったのに対し、加圧群では、STは13%の萎縮に抑えられていた。これは、野村ら¹⁴⁾の先行研究と比較しても、良好な結果であったと言える。本実験では加圧群において、Gも萎縮が抑えられている傾向であった。ハムストリングスの中でGはSTと同じ紡錘状筋であり、STの筋萎縮を補うためにGが代償的に働き、そのために加圧トレーニングの効果も結果的に大きかったのではないかと推察される。また、他の筋ではST、Gに比べ両群間で大きな差は確認されなかった。さらに、加圧群のSTの患健比の内訳を見てみると、4名が約100%に近い良好な結果であったが、被験者Fが63%という結果であった。これは被験者Fが諸事情により、加圧トレーニングを約3週間程度休んでしまったためであると考えられる。それに対して、一般群ではSTの患健比が100%に達している者はおらず、加圧群に比べて平均的に筋が萎縮傾向にあった。加圧トレーニングを休まずに行えた者は、筋の萎縮が極めて少なかったことより、術後リハビリテーションにおけるトレーニングがやはり重要であると考えられる。本実験において、加圧群が一般群に比べSTの筋萎縮が少ない傾向にあることから、加圧トレーニングがACL再建術後のハムストリングスの筋萎縮を防ぐ可能性があることが示唆された。

被験者数の少なさから十分な統計学的考察ができなかったが、術後の加圧トレーニングが再生ST腱の断面積の肥大効果とハムストリングスの筋萎縮を防ぐ可能性があることが示唆された。

第4章

総合考察と今後の展望

本研究では「ACL再建術後の加圧トレーニングが筋と同様に再生ST腱の成熟・肥大を促進させるか」を検討する目的で実験を行い、まず実験1でACL再建術後の半腱様筋腱の再生過程における性差の検討を行い、実験2でACL再建術後の加圧トレーニングを用いたリハビリテーションが再生半腱様筋・腱の形態に及ぼす影響についての検討を行った。

実験1では、男性が女性に比べ、ST腱の再生率が良かったこと、T2値が安定しており、減少がわずかながら早い傾向にあったことから、ST腱の再生・成熟過程が良好な傾向があることが示唆された。それを受け、実験2では被験者を男性に絞り検討を行ったが、加圧群が再生ST腱の断面積が肥大傾向にあり、ハムストリングスの筋萎縮が少なかったことから、ACL再建術後の加圧トレーニングの有用な可能性が示唆された。

本研究では、再生ST腱の成熟促進を主たる目的として研究を行ったが、T2値緩和時間の評価からはそのような結果は得られなかった。T2値のみによる成熟度の正確な評価には限界があることが考えられる。今後の課題としては、さらに先進的なMRI撮影技術を用いることにより、腱のコラーゲン配列を評価するような詳細な生物学的検討をしていくことが重要である。一方、本実験により再生ST腱の断面積を肥大させ、ハムストリングスの筋萎縮を防ぐ効果が示唆されたことは、ACL再建術後の加圧トレーニングの有用性を示唆する結果となった。また、本研究においては加圧トレーニングによって患部に痛みや腫れ、回復の遅れなどの副作用が生じるようなことはなかったことから、加圧トレーニングを用いたリハビリテーションのさ

らなる可能性が示唆された。さらに、加圧トレーニングのようなメカニカルストレスを減少させ、筋内の酸素飽和度などによるケミカルストレスによって負荷を与えるトレーニングであれば比較的術後早期から行える可能性が高い。本実験では、術後リハビリテーションということで安全性を考慮し、術後1ヶ月目から加圧トレーニング導入したが、術後初期から腱の再生が開始されていることを考えると、腱の成熟促進を目的とするのであれば、術直後からの導入を検討する必要があるだろう。

さらに、本研究ではST腱の再生過程が個人差や手術の技術の差から、データのばらつきが非常に大きかった。また、本実験においては加圧トレーニング以外のトレーニングや私生活をほとんどコントロールできなかったことも原因と考えられる。以上のことから、今後さらに被験者数を増やしていき、加圧トレーニングの導入時期や頻度などを再検討し、より詳細な検討をしていくことが必要であると考え。また、成熟度や腱横断面積の算出方法など、より正確な再生ST腱の評価方法についても確立していくことが重要である。

第5章

結語

本研究では、ACL再建術後の加圧トレーニングが再生ST腱の成熟・肥大を促進させるか」を検討する目的でST腱の再生過程における性差の検討と、術後における加圧トレーニングを用いたリハビリテーションが再生半腱様筋・腱の形態に及ぼす効果についての検討を行った。

- ① ST腱の再生率は男性が女性に比べて高い傾向にあり、T2値も安定している傾向であった。
- ② 加圧トレーニングを用いたリハビリテーションは再生ST腱の断面積を肥大させ、ハムストリングスの筋萎縮を防ぐ効果があることが示唆された。
- ③ 加圧トレーニングを行うことによる患部への腫れや痛み、回復の遅れなどの副作用が生じることは無かったことから、リハビリテーションにおける加圧トレーニングの有用性が示唆された。

《補足研究》

「加圧マスターミニと医療用ターニケットカフの圧比較」

【背景と目的】

加圧トレーニングを行う際には、加圧トレーニング本部が製造・販売する専用の器具を用いて行う。加圧マスターミニもその一つであるが、加圧マスターミニに表示される圧と、手術などに用いられる医療用ターニケットの表示圧との間に大きな差があることから、加圧トレーニング時の圧設定に疑問や混乱の声が生じている。加圧マスターミニと医療用ターニケットでは、カフの形状や素材の違いから、表示されている圧と実際に身体に作用する圧の大きさが異なる可能性があることが予想される。また、これまで異なる器具を用いて圧の比較をした研究は他に見当たらない。以上のことから、本実験では、加圧マスターミニと医療用ターニケットでの圧の比較実験を行うことによって、二つの器具の表示圧と実際に身体に加わる圧に差異があるかを確認することを目的として実験を行った。

【方法】

加圧マスターミニと医療用ターニケットによる大腿部加圧を片脚ずつ行い、各表示圧での下肢の血流の有無を確認することで表示圧の差異を検討した。各器具で本来の装着位置が微妙に異なるために、加圧マスターミニにおいては、本来の装着位置である大腿基部と、医療用ターニケットの本来の装着位置と両方において血流を確認することとした。（図25a,b）また、加圧マスターミニは、装着時点での装着圧を設定する特徴があることから、測定時も一般的に加圧トレーニングが行われている装着圧に設定しながら測定した。血流の確認には医療用ドップラーを用いて行い、足部にドップラーのプローブを当て、拍動を確認することで各表示圧での血流の有無を確認した。（図26）対象は健康な成人男性1名である。



(図25a) 右脚：医療用ターニケットカフ 左脚：加圧マスターミニ
それぞれ本来の装着の位置での装着様子



(図25b) 医療用ターニケット本体



(図26) ドップラーによる拍動（血流）確認の様子

【結果】

医療用ターニケットでは、表示圧120mmHgで拍動が弱くなり137mmHgで微弱、145mmHgで完全に停止した。加圧マスターミニを医療用ターニケットカフと同様の位置で巻いた測定では、装着圧40mmHgにおいては、300mmHgで拍動が微弱となり、装着圧50mmHgでは、300mmHgで微弱、320mmHgで極めて微弱、350mmHgで停止する結果となった。また、加圧マスターミニを本来の装着位置である大腿基部に装着した測定では、装着圧40mmHgにおいて、300mmHgで拍動が弱くなり、350mmHgで微弱、装着圧50mmHgでは、300mmHgで微弱、350mmHgでも微弱という結果になった。（図27）

装着位置	加圧マスター		ターニケット	
	mmHg(装着圧)	拍動	mmHg	拍動
ターニケット 装着位置	240(40)	弱	120	弱
	300(40)	微弱	137	微弱
	230(50)	弱	145	停止
	300(50)	微弱		
	320(50)	極めて微弱		
	350(50)	停止		
大腿基部	240(40)	弱		
	300(40)	弱		
	350(40)	微弱		
	300(50)	微弱		
	350(50)	極めて微弱		

（図27）圧比較実験 結果表

【考察】

本実験では、加圧マスターミニと医療用ターニケットでの圧の比較実験を行うことによって、二つの器具の表示圧と実際に身体に加わる圧に差異があるかを確認することを目的として実験を行った。医療用ターニケットでは、137mmHgで拍動が微弱になり、145mmHgで完全に停止した。それに対して、医療用ターニケットと同様の装着位置で加圧マスターミニを使用した結果では、装着圧40mmHgにおいては、300mmHgで拍動が微弱、装着圧50mmHgでは、320mmHgで極めて微弱、350mmHgで拍動が停止するという結果になり、加圧マスターミニと医療用ターニケットでは表示圧と実際に身体に作用する圧とでは非常に大きな差があることを示す結果となった。通常、手術時の止血などに医療用ターニケットを用いる医師などは、本実験で用いた医療用ターニケットでの表示圧に対する感覚が定着していることが予想される。これまで、そういった医師などが加圧トレーニングでの設定圧を目にした際に、その設定圧の高さから加圧トレーニングでは完全に止血をした状態でトレーニングをしていると勘違いが生じる事がしばしば見られた。加圧トレーニング本部では、加圧トレーニングの定義をあくまでも「適度な血流制限状態」としており、完全な止血状態とはしていない。本実験の結果では、加圧マスターミニを本来の装着位置である大腿基部に装着した測定では、装着圧50mmHgにおいて、350mmHgでも微弱に拍動が確認され、止血には至らなかった。加圧マスターミニでは設定圧の限度が350mmHgに設定されており、一般的にそれを超えた負荷での加圧トレーニングを行うことはない。つまり、本実験の結果から通常行われている一般的加圧トレーニングでは、完全に止血してしまう危険性は極めて低いことが推察された。

このように表示圧と実際に身体に作用する圧に大きな差が生じた原因として、加圧マスターミニと医療用ターニケットのカフ自体の形状や素材に違いがあること

挙げられる。両機とも共に空圧式ではあるが、本来の装着位置の違いや機器内に用いられているチューブの材質の違いなどから、実際に身体に作用する圧が異なると考えられる。また、使用単位がどちらもmmHgと同じ単位であることも勘違いを起ししやすい原因である。

今回の実験では、二つの機器の間の圧表示に差があることは確認できたが、実際に両機の間にはどのくらいの差があるのかを定量化できなかった。また、本実験では被験者が一名であったが、被験者の体脂肪率などによる個人差による差や加圧マスターを装着する被験者の装着の仕方によっても差が生じることが考えられる。以上のことから、今後は、加圧することによって実際に身体にはどのくらいの圧が加わっているのかを定量化していくことが必要である。

【結論】

加圧マスターミニと医療用ターニケットでは、表示圧と実際に身体に作用する圧に大きな差異があることが示唆された。

参考文献

- (1) Agel J et al : Anterior cruciate ligament injury in national collegiate athletic association basketball and soccer : A 13-year review. Am J sports Med 33 : 524-530, 2005
- (2) Griffin LY et al : Noncontact anterior cruciate ligament injuries : Risk factors and prevention strategies. J Am Acad Orthop Surg 8 : 141-150. 2000
- (3) Arendt E et al : Knee injury patterns among men and women in collegiate basketball and soccer : NCAA data and review of literature. Am J sports Med 23: 694-701, 1995
- (4) Myklebust G et al : A prospective cohort study of anterior cruciate ligament injuries in elite Norwegian team handball. Scand J Med Sci Sports 8 : 149-153, 1998
- (5) Rosenberg, T. Det al. : ACL reconstruction : Semitendinos tendon is the graft of choice. Orthopedics 20 : 396-398, 1997
- (6) Rosenberg, T. Det al. : Anterior cruciate ligament reconstruction with a quadrupled semitendinosus autograph. Sports Med. Arthrosc. Rev. 5:51-58, 1997
- (7) Cooley, V. J. et al : Quadrupled semitendinosus anterior cruciate ligament reconstruction : 5-year results in patients without meniscus loss. Arthroscopy 17 : 795-800. 2001
- (8) Chen, L. et al : ACL reconstruction with hamstring tendon. Orthop. Clin. North Am. 34 : 9-18, 2003

- (9) 安田 和則, 近藤 英司, 市山 廣樹, 遠山 晴一 : 解剖学的膝前十字靱帯
再建術, 臨床スポーツ医学 Vol.22, No3, 265-272, 2005
- (10) 小柳 磨殻, 史野 根生 : 前十字靱帯再建術後のリハビリテーション、ア
スレティックリハビリテーションガイド 文光堂:118-128, 2008
- (11) Beynnon.B.D.et.al : The effect of functional knee-brace on strain on the
anterior cruciate ligament in vivo. J. Bone Joint Surg.【Am.】24A : 1298-1312,
1992.
- (12) Draganich, L. F. ,Vahey, J.W. : An in vitro study of anterior cruciate
ligament strain induce by quadriceps and hamstrings forces. J. Orthp. Res.
8 : 57-63, 1990.
- (13) Dueselen, L. et.al. : The influence of muscle force and external loads on
cruciate ligament strain. Am. J.Sports Med. 23 : 129-136, 1995.
- (14) 野村 由美 : 膝関節前十字靱帯再建術後の半腱様筋腱の再生と膝関節屈
曲機能, 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科, 2008年度 修士論文
- (15) Eriksson K, Larsson H, Wredmark T and Hamberg P. Semitendinosus tendon
regeneration after harvesting for ACL reconstruction. A prospective MRI study.
Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 7: 220-225, 1999
- (16) Nishino, K .et al : Knee-flexion torque and morphology of the
semitendinosus after ACL reconstruction. Med. Sci. Sports Exerc. 38 :
1895-1900, 2006
- (17) 真田 亜希子, 膝前十字靱帯再建術後の半腱様筋腱の再生過程と時期,
2006年度 早稲田大学大学院スポーツ科学研究科 修士論文

- (18) Tadokoro, K. et al : Influence of medial hamstring tendon harvest on knee flexor strength after anterior cruciate ligament reconstruction. A detailed evaluation with comparison of single- and double-tendon harvest. Am. J. Sports Med. 31 : 522-529, 2003
- (19) Makihara, Y. et al. : Decrease of knee flexion torque in patients with ACL reconstruction : combined analysis of the architecture and function of the knee flexor muscles. Knee Surg. Sports Traumatol. Arthrosc. 14 : 310-317, 2006
- (20) K. Okahashi, K. Sugimoto, M. Iwai, M. Oshima, M. Samma, Y. Fujisawa, Y. Takakura : Regeneration of the hamstring tendons after harvesting for arthroscopic anterior cruciate ligament reconstruction: a histological study in 11 patients, Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 14: 542-545, 2006
- (21) 松田 直樹, 小粥 智浩, 奥脇 透: トップアスリートへの加圧リハビリテーションの導入, 臨床スポーツ医学 Vol.21, No3,: 241-252, 2004-3
- (22) 井上 浩一, 佐藤 義昭, 石井 直方: 加圧筋力トレーニング法のリハビリテーションへの応用, 日本臨床スポーツ医学会誌 Vol.10, No3 : 395-403, 2002
- (23) 宝田 雄大ら : 血流制限下での筋力トレーニングが一流選手の筋力、筋持久力及びパワーに及ぼす効果, 日本体育学会大会号 48: 267, 1997
- (24) 宝田 雄大ら : 血流制限下での筋力トレーニングが一流選手の骨格筋肥大と筋力の増大, 体力科学 46 : 616, 1997
- (25) 小田切 研一 : 疾患別による加圧リハビリテーションの有効性, 日本臨床スポーツ医学会誌 Vol.21, No3: 2004

- (26) 藤野 英明ら：血流制限下でのレジスタンストレーニングがACL再建術後早期のリハビリテーションに及ぼす効果：日本体育学会大会号 50：618, 1999
- (27) 石井 直方：抗加齢の観点からみた加圧とトレーニングの効果と可能性：Anti-aging medicine 4(2)：(13)：198-202, 2008
- (28) 石井 直方：加圧トレーニングのメカニズム：臨床スポーツ医学 Vol.21：No.3, 215-223, 2004
- (29) McCall, GE. Et al：Acute and chronic Hormonal response to resistance training designed to promote muscle hypertrophy. Can. J. Appl. Physiol 24：96-107, 1999
- (30) Takarada, Y. et al：Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion.：J. Appl. Physiol. 88：61-65, 2000
- (31) Kawada, S. and Ishii, N：Chronic suppression of muscular venous blood flow induces muscular hypertrophy and changes in growth factors. 投稿中
- (32) 西野 章江, 牧原 由紀子, 福林 徹：膝屈筋腱を使用したACL再建術後の膝関節深屈曲位における筋力低下：臨床スポーツ医学 Vol22：273-281, 2005
- (33) Papandrea P, Vulpiani MC, Ferretti A and Conteduca F.：Regeneration of the semitendinosus tendon harvested for anterior cruciate ligament reconstruction. Evaluation using ultrasonography：Am J Sports Med 28：556-561, 2000
- (34) Rispoli DM, Sanders TG, Miller MD and Morrison WB.：Magnetic Resonance imaging at different time periods following hamstring harvest for anterior cruciate ligament reconstruction：Arthroscopy 17：2-8, 2001.

- (35) Cross MJ, Roger G, Kujiwa P and Anderson IF : Regeneration of the semitendinosus and gracilis tendons following their transaction for repair of the anterior cruciate ligament : Am J Sports Med 20: 221-223, 1992.
- (36) Turhan AU, Kerimoglu S, Dogru A, Aydin H, Yulug E : Tendon regeneration: an anatomical and histological study in sheep. :Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc 12 (5): 406-410, 2004.
- (37) 大井 剛太, 菊池 臣一, 矢吹 省司, 長総 義弘, 大歳 憲一 : 膝前十字靱帯再建術における採取腱の再生 術後超早期のMRIによる経時的前向き検討 : 臨整外 41: 675-681, 2005
- (38) 病態生理学, 菊池 浩吉 監修, 南山堂
- (39) 宝田 雄大 , 高沢 春夫, 佐藤 義昭, 石井 直方:適度な血流制限下での筋力トレーニングがもたらす骨格筋肥大と筋力増大 : 日本体育学会大会号 47 : 261, 1996
- (40) 前田 朗,史野 根生,前 達雄.ACL再建術移植腱の選択と再建方法 : 臨床スポーツ医学 Vol.22 No3 247-255,2005
- (41) 窪田 敦之 : 膝関節周囲筋の筋低下に対する加圧式血流制限の効果, 体力科学, 53(6), 893 , 2004
- (42) M. Karabulut, T. Abe, Y. Sato, M. Bembem : Overreview of neuromuscular adaptations of skeletal muscle to KAATSU Training ,Int. J. KAATSU Training Res. 3 : 1-9, 2007
- (43) Takarada ,Y . Nakamura ,Y. Agura ,S. Onda ,T. Miyazaki ,S. Ishii ,N : Rapid increase in plasma growth hormone after low-intensity resistance exercise with vascular occlusion : J. Appl. Physiol. 88 : 61-65,2000

- (44) Takarada, Y. Takazawa, H. Sato, Y. Takebayashi, S. Tnaka, Y. Ishii, N :
Effects of resistance exercise combined with moderate vascular occlusion on
muscular function in humans : J. Appl. Physiol. 88 : 2097-2106, 2000
- (45) 宝田 雄大 : 血流制限下での筋力トレーニングに関する生理学的研究
—骨格筋の構造と機能に及ぼす効果— : 東京大学大学院 生命環境科学系 博
士論文
- (46) Kawada : What phenomena do occur in blood flow-restricted
muscle? : Int. J. KAATSU Training Res. 1 : 37-34, 2005

謝辞

本論文作成にあたりましては、多くの方々のご指導・ご鞭撻をいただきました。皆様の温かいご協力があったからこそ、本論文を完成させることが出来ました。この場を借りて御礼申し上げます。

特に、多大なるご指導と貴重な経験・勉強をする機会を与えてくださいました早稲田大学スポーツ科学学術院 福林 徹 教授に深謝致します。恩師であり、心より尊敬できる福林先生の下で学べた2年間は何ものにも変え難いものでした。また、副査を快く引き受けて下さった鳥居 俊 准教授、金岡 恒治 准教授にも深謝致します。帝京平成大学 現代ライフ学部 倉持 梨恵子先生には、いつもの確なアドバイスで学会発表や論文作成を導いて下さり多大なるご支援を賜りました。東京大学総合文化研究科 工藤 麻衣子さんには加圧トレーニング指導や研究へのご助言をいただきました。早稲田大学スポーツ科学学術院助手 永野 康治さんにはリハビリテーションの面倒を見ていただき、研究発表へのアドバイスをいただきました。加圧トレーニング本部 佐藤 義昭先生には本研究を行うにあたり多大なるご協力を頂きました。また、快く実験に協力してくださいました被験者の皆様、誠にありがとうございました。中村 千秋 准教授、広瀬 統一 先生はじめとする早稲田大学スポーツ科学部スポーツ医科学クリニックの皆様には実験遂行にあたり多大なるご協力を賜りました。大変お忙しい中、実験協力をしていただきました東京通信病院整形外科部長 沖永 修二先生はじめとする医師やスタッフの方々に感謝いたします。さらに、本研究を引き継ぐにあたり、ご助言をくださいました野村 由美さんをはじめ諸先輩方に感謝致します。そして、大学院生活の2年間を支えて下さった福林研究室の皆様、2年間という短い間ではありましたが大変お世話になりました。皆様と一緒にこの福林研究室で学べたことは私の財産であり、これを誇りに今後と

も精進していきたいと思います。

最後に、大学院修了まであらゆる面で支え続けてくれた両親に心より感謝したい
と思います。ありがとうございました。