

【要約】

The mechanical strength of side-to-side tendon repair
using a modified Krackow method

(Krackow変法を用いた腱側々縫合の力学的評価)

千葉大学大学院医学薬学府
先端医学薬学専攻
(主任：高橋和久 教授)

上野 啓介

【背景】

マットレス縫合を用いた腱側々縫合は通常前腕部における手指の腱延長術などに用いられる。この手技は手関節や手指の屈曲拘縮の矯正を目的としてVolkmann拘縮、脳性麻痺後の拘縮などに用いられる。しかしそれらの術後には腱の著明な癒着が生じることもある。その原因として再断裂などを防ぐため一定期間固定を行う事が原因の一因となっており、術後に早期運動療法を行うことが出来るような強固で確実な固定法の必要性は他の報告でも論じられている。また変形性もしくはリウマチ性手関節症に伴う陳旧性の腱断裂などに対して腱移植術や腱移行術を用いる際には腱の端々縫合よりむしろ ”weave technique” が用いられるが、腱の長さが短い場合や、腱が細い場合にはweave techniqueを用いることが困難な場合もある。そのような際には単純な側々縫合にマットレス縫合を用いることもあるが、一般的にその強度はweave techniqueより弱いとも言われている。しかし近年の報告では腱の長さが十分に得られる場合にはcross-stich縫合を用いた側々縫合などを行いweave techniqueと同等もしくはより強い固定力をもつ縫合方法も試みられている。だが、腱の長さが十分に得られない際に十分な強度が得られる縫合法の報告は少ない。

Krackowらはpull out suture法として強固な固定が可能な縫合法であるKrackow法を報告している。今回我々はKrackow法を腱側々縫合に用いたKrackow変法を考案し、その固定虚度を従来行われているweave techniqueと比較し評価することとした。

本研究の目的は腱延長術や腱移行術、腱移植術における使用を想定したKrackow変法の力学的強度を評価することである。

【対象と方法】

<腱の採取>

対象は新鮮凍結屍体8体16肢。男性3人女性5人（平均年齢81.5歳）である。

示指、中指、環指の浅指屈筋腱（FDS）および長母指屈筋腱（FPL）、小指FDSを各指のPIP関節と筋腱移行部のレベルで採取し、虫様筋と腱滑膜組織は除去した。手根管遠位レベルで採取した腱を分割し、示指から環指に関しては同指FDSの遠位側とFDPの近位側、FDSの近位側とFDPの遠位側を組み合わせ、FPLと小指FDSに関しては各腱の遠位側と近位側を組み合わせた。

<縫合法>

すべての腱はKrackow変法、weave suture、mattress sutureの3種類の縫合法の内1つを用いて作成した。Krackow変法群は側々縫合において重複部にKrackow法を参考にして8つのlocking loopを作成した。2つのsegmentから形成されており、segmentの作成はまず重複部の外側から中央に向かって片側に2つのlocking loopを作成し、その後折り返したのちに反対側で中央から外側に再度2つのlocking loopの作成を行った。この方法により一つのsegmentに4つのlocking loopを作り、かつ2つのsegmentを作成することで腱重複部は合計8つのlocking loopにて固定した。weave suture群はFDPに2つweaveつくり、FDSをFDPに編み込むことで作成した。weaveの間隔は5mmとし、水平mattress sutureを各weaveに2針、両端に各2針施行し固定した。

mattress suture群は腱重複幅に水平mattress sutureを5mm間隔で計8針行い固定した。3群ともに腱重複幅は25mm、connection pointは8つ、縫合糸には4-0ナイロン糸を用いた。

<Biomechanical testing>

本研究では3群で計72組作成した。single loading testではKrackow変法群15組、weave suture群15組、mattress suture群11組を用い、cyclic loading testではKrackow変法群16組、weave suture群15

組を用いた。2つの試験は万能試験機（AG-Xplus; Shimadzu Corporation）を用い、作成した腱はFDP側を下にして両端を重複部から5mm離してクランプで把持した。

<single loading test>

試験はまずpreloadingとしてWelbeehmらの報告を参考に0Nから15Nのcyclic loadingを50m/minで5回行ったのちに20m/minの速度で破断が生じるまで持続牽引を行った。その結果得られた各検体の破断強度とstiffnessの数値を計測した。破断様式は縫合糸の破綻と腱の破綻の2つに分類し破断強度の定義はグラフ上最も高い値とした。stiffnessは最も高い傾きの値とした。破断強度、stiffnessの値、そして破断様式の傾向を3群間で比較した。また腱の大きさに関する群間差を評価するため縫合前に重複部中央の長径と短径を計測し、腱断面積の形状を楕円形と仮定して得られた数値から近似値を計算した。

<cyclic loading test>

試験ではまず10Nのpreloadingを1分間行ったのちに5Nから75Nのcyclic loadingを200回行いKrackow変法群とweave suture群の2群間での変位量の差を比較した。数値の上限値に関しては術後早期運動療法の際に腱周囲に生じる摩擦力を想定し設定した。腱の大きさに関する群間差の評価に関しては、同一検体の左右の上肢を2群に振り分けており、同一検体の左右の腱の状態に差はほとんどないと判断し、腱断面積の計測は行わなかった。採取した腱は全行程において室温で生食に湿らせた状態を維持した。

<統計学的検討>

腱断面積、破断強度、stiffnessにおいてはanalysis of variation (Tukey honestly significant difference test) を用い、cyclic loading testにおける変位量に関してはunpaired t-testを用いて統計学検討を行った ($p < 0.05$)。

【結果】

single loading testにおいて腱断面積 (mm^2)は3群間に統計学的な有意差は認めなかった [Krackow変法群: 14.2 ± 4.1 , weave sutures群: 13.4 ± 2.2 , mattress縫合群: 15.9 ± 5.8 , $p = 0.12$]。破断様式はweave suture群では15例中14例、mattress suture群では11例中10例が腱の破断であったが、Krackow変法群においては15例中6例のみで腱破綻が認められ、残りは縫合糸の破綻であった。平均破断強度はKrackow変法群 $155 \pm 45\text{N}$, weave sutures群 $122 \pm 18\text{N}$, mattress suture群 $94 \pm 36\text{N}$ であり、Krackow変法群はweave sutures群とmattress suture群より統計学的に有意に高かったが、weave sutures群と、mattress suture群の2群間には統計学的な有意差は認めなかった。stiffnessに関してはKrackow変法群 $26.5 \pm 5.9 \text{ N/mm}$, weave sutures群 $16.6 \pm 3.4 \text{ N/mm}$, mattress suture群 $18.9 \pm 4.9 \text{ N/mm}$ であり、Krackow変法群は他2群より有意に高く、weave sutures群とmattress suture群の2群間には有意差を認めなかった。cyclic loading testにおける変位量はKrackow変法群は $6.1 \pm 0.5 \text{ mm}$, weave suture群 $8.7 \pm 1.6 \text{ mm}$ でKrackow変法群が有意に変位量が少なかった。またweave suture群は112回目に、Krackow変法群は160回目にそれぞれ縫合糸破綻例を一例認めた。

【考察】

手外科領域の手術において、術後の早期可動域訓練は良好な可動域を獲得する為に有効である事は一般的に知られているが、腱の癒合が得られる前の過度なリハビリは縫合した腱の弛みを生じさせるリスクを伴う。よって手術の際には腱の弛みが生じにくい縫合法が選択されるべきである。Weave sutureは腱移行術などにおいて良好な固定力を獲得できる方法として認識されているが、前腕部の腱延長術などの際には十分な重複幅をとることが困難な場合や、陈旧性の腱断裂に対する腱移行術の際には断端が短い、もしくは編み込みが困難となることもある、その際には側々縫合での修復をせざるを得ない場合もあるが、その固定力に関しては経験的に

も不安を残す事が多く、Hashimotoらは側々縫合におけるmattress sutureは腱繊維に対して剪断力として働くとも述べている。

Krackow法は1986年にKrackowらによって報告された縫合方法であり、原法はpull out suture法として用いられている。多くの文献でKrackow法での優れた固定力が証明されており、腱線維方向への牽引には強い縫合法であると考えられる。また酒井らはKrackow法は牽引により糸が腱を圧迫する作用があると報告している。我々のKrackow変法はpull out法ではないが、このようなKrackow法の圧迫作用が腱側々縫合での腱間の圧着力として作用している可能性が考えられる。この作用は締結部が重複部から離れようとする際に縫合糸に軸方向の緊張が生じ、それによりloop内に圧迫力が加わり、結果的にスライドは制御され、腱の剪断が生じにくくなると推察している。weave sutureの強度に関してはその形状により圧着力が生じるとの報告もあるが、腱を編み込むことで生じる腱交差部の摩擦力やweaveを水平と垂直面の異なる方向に複数編み込む事で腱が捻れて生じる摩擦力、縫合部の部分的な摩擦力なども考えられる。しかし本研究では腱重複幅が短いためにweaveの作成は2つのみであり、その場合は腱伸長時に編みこまれているレシピエント腱が緩む方向に簡単に捻れてしまう。その結果編み込んでいるドナー腱は緩み圧着力は軽減し、重複部が容易にずれる事で縫合糸で腱が剪断されてしまうと推察している。single loading testとcyclic loading testの双方で腱重複幅が短い場合にはKrackow変法はweave sutureより固定性が強いことが判明したが、cyclic loading testでの変位量の相違は早期運動療法を行う際には影響を及ぼすと考えられる。Silfverskiöldらは約1.5mmの屈筋腱の滑走で10度の関節屈曲が生じると述べており、軽度の腱の緩みが可動域に影響を及ぼすことを示唆している。また術後早期の可動域訓練の際には腱周囲の浮腫などの影響もあり75Nもの摩擦力が加わるとの報告もある。これらの事から強固で緩まない固定が臨床的にも重要である事が示唆される。McKeonらはKrackow原法においてはlocking loopsの数を増やすと縫合糸が緩むリスクが増えると述べており、Krackow変法では連続したloopの数は2つまでとしている。仮にこれ以上数を増やしたとしても緩みなどのリスクが増えると考えている。

本研究のlimitationは新鮮凍結屍体を用いているため、側々縫合における癒合に関する組織学的な評価が行われていない事、Krackow変法による腱内の微小循環障害の程度を評価していない事である。したがって追加実験等は必要となるであろう。

【結論】

Krackow変法は同重複部の際にはweave techniqueより固定性が高い事から腱側々縫合の縫合法の選択肢の一つとなり得る。