

# 膝前十字靭帯張力測定プローブの開発 (試作 L 字形先端の性能評価)

長尾光雄 横田理 (日本大学) 長総義弘 (福島県立医科大学)

## Development of Tension Probe for Anterior Cruciate Ligament (Performance Evaluation of Trial Model L-Type Head)

\*M. Nagao, O. Yokota (Nihon University) and Y. Nagaosa (Fukushima Medical University)

**Abstract** - This is reconstructed by the private use organization, if the anterior cruciate ligament of knee joint is damaged. The initial tension is given and is fixed in tendon graft. This tension is taken by the tension meter from the knee joint outside. The tension in the joint may be not fixed by the operation case. The development of the probe which measures the tension in the joint is required. Then, tension measurement probe of the probe rod with the L-type head was produced experimentally. For example, they are strain gauge system and load cell system. The performance evaluation of these prototypes was carried out. As the result, the improvement is indicated, and it becomes feasible, if these are improved.

**Key Words:** Knee, Anterior cruciate ligament, Tension probe, Strain gauge, Load cell, Bearing, L-type head

### 1 緒言

前十字靭帯(以下 ACL と呼ぶ)を損傷[1]した場合は、自家組織や人工靭帯を用いて ACL 再建術が行われる。自家移植腱を用いた再建術では術中に脛骨側関節外(Fig.1 参照)から Tension Meter により一定な初期張力[2]を付与し、Interference Screw によって脛骨骨孔に固定される。この移植腱に関節外から一定な張力を与えて固定しても、移植腱の太さ、関節の大きさ、骨孔間距離の長短や固定部位の長さなどが症例により異なるなどの要因で関節内緊張度が一定でないことが推定される。骨孔間移植腱の張力が測定可能になれば症例に因らず一定な張力の付与や時系列的な評価に応用できるなど、その効果が期待できる。本研究では関節内移植腱の張力を定量化する測定方法について検討しており[3~5]、本報では L 字形先端形状の張力測定プローブの信号検出方法についてひずみゲージ方式とロードセル方式を用いた試作を行い、その性能評価から試作開発の検討を加えた中間報告である。先端を L 字形に折り曲げた形状は医師が手術中に用いている探り針先端形状をモデルとしている。

### 2 測定システム

ACL 移植腱と試作プローブ測定モデルを Fig.1 に示す[4]。被測定物固有の太さ(d)、長さ(l)、剛性(E)、先端部の角度( $\theta$ )と変位(x)さらに付与する張力(T)と荷重(W)などのパラメータについて個体差ごとに校正値を与えて測定することが前提である。

### 3 試作プローブの実験と検討

試作の第一段階の目標は被測定物に当てた L 字形先端の当り方(太さ、角度)により与えた荷重と出力信号が一定になる手法を検討することにあり、この検討プロセスを示す。

#### 3.1 ひずみゲージを用いた例[4]

L 字形先端部詳細とその寸法を Fig.2 に示す。

##### (1) 1 ゲージ方式 (試作 No.1)

探り針軸方向右側に 1 枚用いた場合には先端に

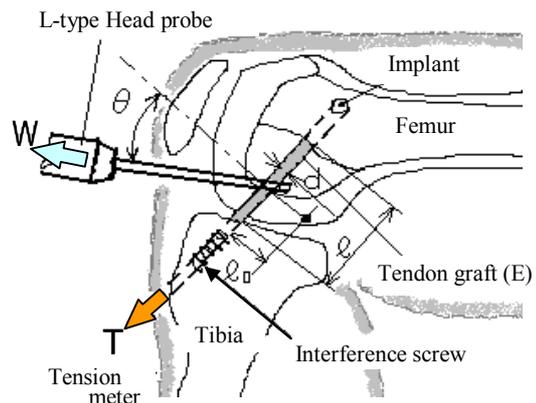


Fig.1 Measuring method of the trial model probe.

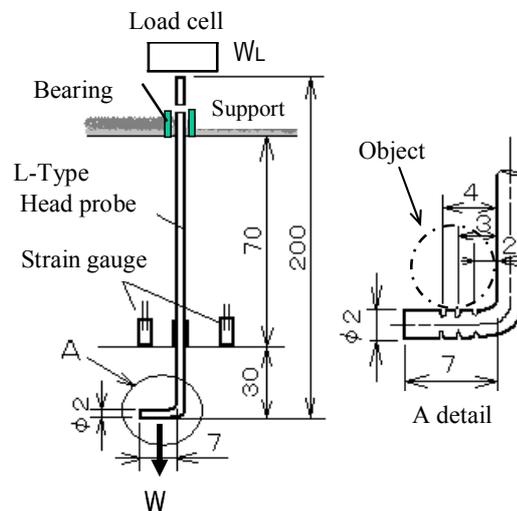


Fig.2 Trial model L-type head probe outline.

与えた荷重  $W$  の作用点位置が異なると曲げモーメントの影響を受け、信頼できない出力信号であった。

(2) 複数ゲージ方式 (試作No2)

1 ゲージ方式の曲げを除去するため対称な位置に1枚追加したことで、作用点の位置に因らず信頼できる出力信号が得られた。但し、図 Fig.1 に示す角度  $\theta$  が変化すると出力信号は信頼できないが、 $\theta$  を一定にすれば作用点の影響はない。

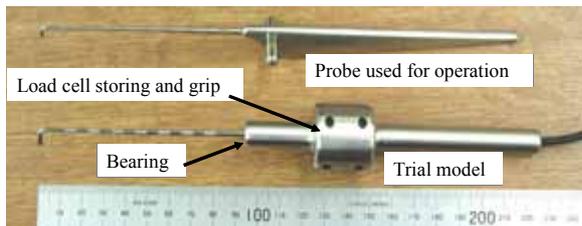
3.2 ロードセルを用いた例

ひずみゲージ方式ではゲージ位置とその加工及びリード線取り出し方法の簡略化と探り針軸方向の荷重が直接検出できないかとの要求から探り針軸方向の反対側(Fig.2の固定部)にロードセルを用いる方法を検討した。試作したプローブの外観は Fig.3(a)のように測定軸の固定部には軸受を設け先端からの曲げ荷重を支持する構造とし、(b)のようにロードセル収納部(ホルダー)は片手で握りやすい樽型形状である。(a)上部に示す探り針が手術中に用いられる形状である。与える荷重  $W = 0 \sim 30$ [N]、負荷方法は被測定物の代用として太さ 4、6と 8の丸棒によりL字形先端に与え(Fig.2)、荷重は増荷後直ちに減荷する方法で行いロードセル荷重  $W_L$  を読み取る方法である。

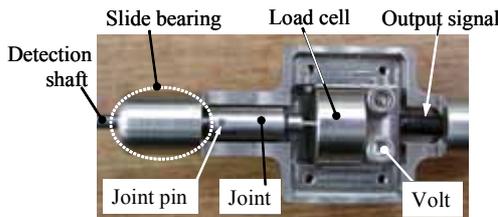
(1) すべり軸受を用いた例(試作No3)

1) 軸受と軸の隙間及び摩擦抵抗( $\theta=0$ [deg], Fig.4)

- $W=0 \sim 8$ [N]: 増荷時では軸と軸受部の僅かな隙間によって曲げモーメントにより軸受に当たるまでの  $W$  の大きさまたは減荷時は軸が軸受から離れる  $W$  の大きさになるまでの  $W$  と見られ、この範囲は引張荷重が主となり丸棒の太さの差は見られない。
- $W=8 \sim 30$ [N]: 増荷時では軸は曲げモーメントにより軸受に当たりながら引張荷重をロードセルに伝達



(a) Probe appearance



(b) Load cell holder

Fig.3 Appearance of trail produced L-type head probe.

するメカニズムとなる。この曲げ荷重による接触で相対的に摩擦抵抗が発生し軸方向引張荷重の損失となりロードセルの荷重  $W_L$  が小さい。 $W$  が増荷すれば曲げ荷重による摩擦抵抗も増し、丸棒の太さによる曲げ荷重も加わりさらに  $W_L$  を小さくしたと見られる。減荷時では  $W_L$  が鈍化する鈍化帯が丸棒の太さ(曲げ荷重の大きさ)に依存しており、僅かな減荷では摩擦力の減少にならないためヒステリシス現象の発生になったと見られる。

2) 軸受と軸の摩擦抵抗を軽減( $\theta=0$ [deg])

ヒステリシス発生の原因が摩擦抵抗の増減によるためこれを除去または軸を滑らせる方法として、曲げ荷重の方向と反対方向の軸に振動を与えて見た結果が Fig.5 である。

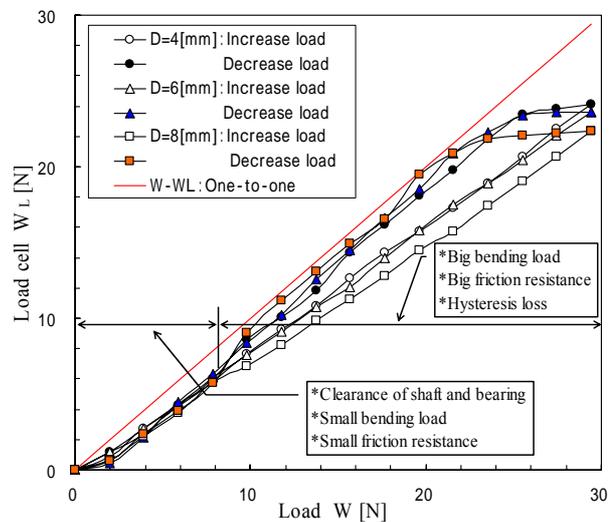


Fig.4  $W-W_L$  of  $\theta=0$ [deg] and pulling load which used the slide bearing (not shaken).

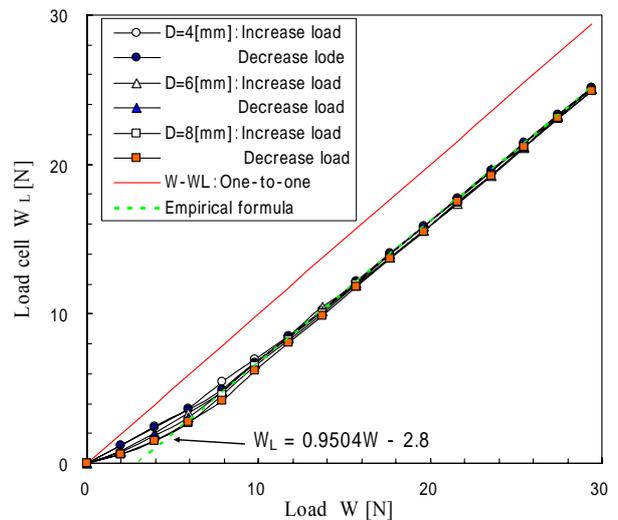
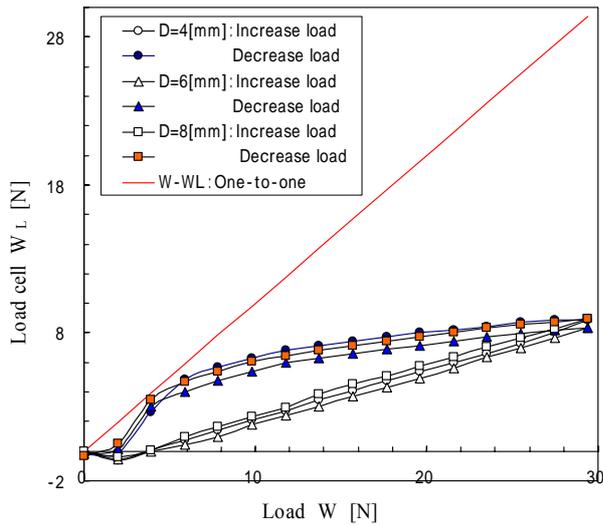


Fig.5  $W-W_L$  of  $\theta=0$ [deg] and pulling load which used the slide bearing (shaken).



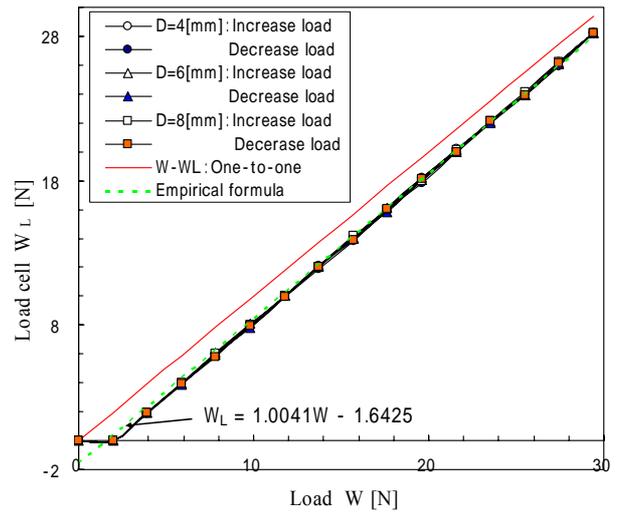
**Fig.6** W- $W_L$  of  $\theta=10[\text{deg}]$  and pulling load which used the *slide bearing* (not shaken).

- $W=0 \sim 10[\text{N}]$ : 増荷時及び減荷時の現象について、曲げを受ける軸は隙間相当部分を移動し軸受に当たるまでは Fig.3(b)に示す継手部分に曲げモーメントが働きその抵抗が損失荷重に表れ直線からシフトした見とられる。
- $W=10 \sim 30[\text{N}]$ : 丸棒の太さや摩擦抵抗の大小によるヒステリシスの発生は無くなり  $W-W_L$  が一対一の対応と平行な関係にある。これは Fig.4 の要因とその対策を説明したことになる。

3) 軸受と軸の摩擦抵抗及びその軽減

( $\theta=10, 20$  と  $30[\text{deg}]$ )

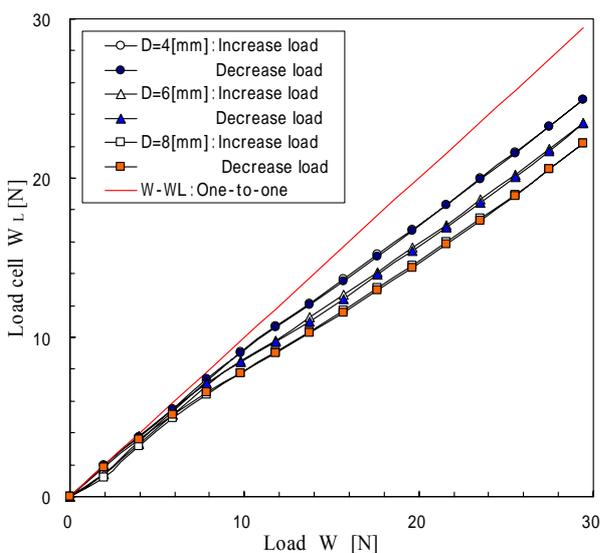
ひずみゲージ方式の場合には角度の大小で出力信号の差異が見られ、この例でも確認した結果が



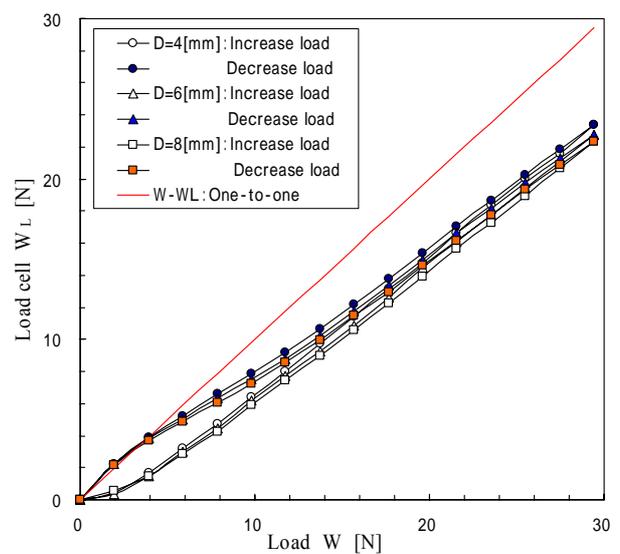
**Fig.7** W- $W_L$  of  $\theta=10[\text{deg}]$  and pulling load which used the *slide bearing* (shaken).

Fig.6 と Fig.7( $\theta=10[\text{deg}]$ の場合)である。

- $\theta$  が増せば軸受を押し付ける曲げ荷重が増大することで摩擦抵抗も大きくさらに丸棒の太さの差異も見られ、 $W_L$  は  $\theta$  の影響を受ける。
- 上記に示す摩擦抵抗の軽減も前述 2)と同様な方法で実施した結果が Fig.7 である。 $\theta=0[\text{deg}]$ と同様なメカニズムにより改善は見られるが  $\theta=20, 30[\text{deg}]$  となれば曲げ荷重も大きくなり振動の与え次第で  $W_L$  のバラツキが大きくなる。
- $W-W_L$  は軸受の摩擦抵抗を除去すれば丸棒の太さの差異による曲げ荷重の影響を受けないが、 $\theta$  の大きさにより  $W-W_L$  は変わるためその改善が求められる。



**Fig.8** W- $W_L$  of  $\theta=0[\text{deg}]$  and pulling load which used the *linear bearing* (not shaken).



**Fig.9** W- $W_L$  of  $\theta=10[\text{deg}]$  and pulling load which used the *linear bearing* (not shaken).

## (2) リニア軸受を用いた例(試作No4)

試作No3 の摩擦抵抗損失を軽減するためリニア軸受に変えた試作である。

### 1) $\theta=0[\text{deg}]$ の場合

- Fig.8 のように  $W=0\sim 6[\text{N}]$ までは一対一の対応であるが  $W=8[\text{N}]$ 以上では丸棒の太さによる曲げ荷重の差異が認められ、軸からの曲げ荷重がロードセルに伝達されている。Fig.4 のヒステリシスが見られないため軸受交換の効果は確認できた。
- Fig.5 と同じ振動を与えた場合は Fig.8 と大差が無く  $W=0\sim 6[\text{N}]$ が一対一の対応の線に寄った程度である。
- 丸棒の太さの影響を除くためには軸支持部で曲げ荷重を受ける強固で摩擦損失の小さい軸受が求められる。

### 2) $\theta=10[\text{deg}]$ の場合

- Fig.9 のように  $W=0\sim 15[\text{N}]$ まではヒステリシスの現象が大きく Fig.6 と同様の傾向であるが摩擦損失は改善されている。
- このヒステリシスは振動を与えた Fig.10 から明らかなように軸とロードセルの継手部などの摩擦損失が残存しており加工寸法や精度の改善も求められる。

## 4 結言

試作No2 からNo4 について出力信号を取り上げて見た点から今後の改善やその検討が示された。

- 1) ひずみゲージ方式もロードセル方式も L 字形先端を持つ探り針軸形状の必然性から曲げ及び被測定物と当る傾き角により、与えた荷重と出力荷重に一対一の対応が保障されていない。
- 2) 測定条件(傾き角や太さ)による校正値を求めその測定条件が再現可能となれば 1)は改善される。
- 3) ロードセルでは軸受に動的な外力を付与する機能を追加することで摩擦損失を除去または軽減できる。例えば圧電素子などで与えることも可能である。
- 4) ロードセル方式ではロードセルに曲げ荷重の関与がないようにするため探り針軸からの曲げ荷重全てを支持できる強固な軸受部に改善する。
- 5) 手術中の傾き角  $30[\text{deg}]$ 前後は必然であり関節内空間に全ての機能を納めた小型化により角度の問題は改善可能となる。但し、被測定物の太さの差異は

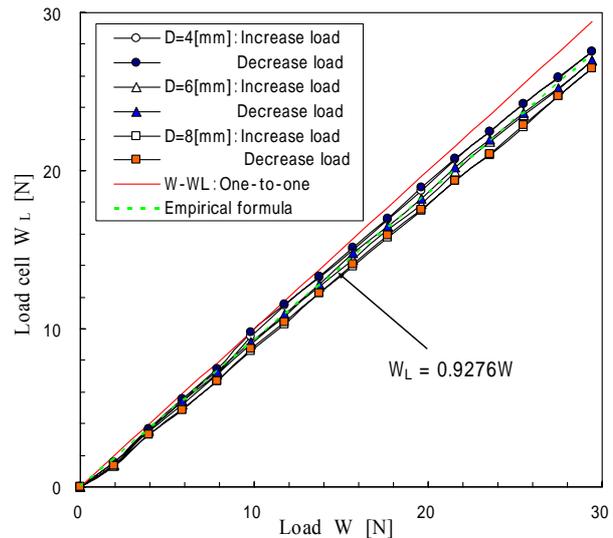


Fig.10  $W-W_L$  of  $\theta=10[\text{deg}]$  and pulling load which used the *linear bearing* (shaken).

残るため 3)と 4)を組合せて測定値の信頼を高める。  
6) 改善すべき検討案 1)から 5)まで示したこれら単独の方法を組合せることでそれ以上の効果が期待できる。

## 参考文献

- [1] 宗田大, 他: 特集スポーツ選手に対する前十字靭帯再建術 - 復帰と問題点 -, 臨床スポーツ医学, 18, pp.503-571, 2001.
- [2] Fleming BC, Abate JA, Peura GD, Beynonn BD: The relationship between graft tensioning and the anterior-posterior laxity in the anterior cruciate ligament reconstructed goat knee, J.Orthop.Res., 19, pp.841-844, 2001.
- [3] 前田朗, 他 4 名: Arthroscopic Force Probe を使用した靭帯の荷重測定法の検証, 日本臨床バイオメカニクス学会誌, 16, pp.139-142, 1995.
- [4] 長尾光雄, 他 2 名: 膝前十字靭帯用張力プローブの開発, 計測自動制御学会東北支部第 212 回研究集会, 資料番号 212-6, 2003.
- [5] 長尾光雄, 他 2 名: 膝前十字靭帯用張力プローブの開発, 日本機械学会東北支部第 39 期秋季講演会講演論文集, No031-2, pp.307-308, 2003.