

膝前十字靭帯張力測定プローブの開発 (3 点式試作の機能調査実験)

内藤哲 長尾光雄 横田理 (日本大学)

Development of Tension Probe for Anterior Cruciate Ligament (Experiment on Investigation of Function of Trial Model by 3 Point Support)

*T. Naitou, M.Nagao and O. Yokota (Nihon University)

Abstract - Tendon graft receives the initial tension and is fixed. The tension in the knee joint is not fixed by the case. It is the probe which detects the size of the tension in the joint by the mechanism inserted in 3 points. The condition in which tilting angle θ of the T-W chart became $45[\text{deg}] \pm 10$ was proven in the relationship between measured value and calibration value. And, the evaluation method was also determined. Design data of the new probe were obtained.

Key Words: Knee, Anterior cruciate ligament, Tension probe, 3 point support, Calibration, Design

1 緒言

前十字靭帯(以下 ACL と呼ぶ)を断裂した場合には自家組織により ACL の再建術が行われる。このとき移植腱には関節外から一定な初期張力が付与されるが、関節内移植腱の張力が症例により異なることが推定される。これらを改善し確実な張力付与のためには関節内測定システムの提案が必要である。これが可能になれば生理的に近い初期張力や術後の張力評価または他に応用できるなどの有効性が期待できる。関節内張力測定プローブには 1 点式と 3 点式を考案し幾つかの試作により性能評価とその改善を試みている。1 点式は被測定物を L 字形先端で引掛けたり押し込んだりする探り針方式の試作であり、ひずみゲージ方式とロードセル方式で実施している[1]。3 点式とは被測定物を挟み込む方式で張力の大きさを検出する方法である[2]。今回は既存の試作プローブに新たな付加機能及び改善対策を目的に実用状況における測定形態を考慮し、測定形態による張力と出力信号の関係を調査した。その結果から測定初期の設定条件や付加機能及び測定条件など新たな検討事項が提案されたので報告する。

2 測定システムの概要

2.1 3点式張力測定方法

この測定方法は関節内移植腱の張力を直接測定する提案である。ACL 移植腱を 3 点式で挟み込んで測定する概要を Fig.1 に示す。図中のパラメータは被測定物の太さ(d)、剛性(E)、長さ(l)、3 点支持の 2 点間長さ(l_1)、測定軸の位置(l_0)、測定軸との傾き角(θ_1)、変位(x)、荷重(W)、ばね定数(κ)、測定軸押し込み変位(l_2)、張力(T)及び張力軸との傾き角(θ_2)、スリーブ径(d_1)、押し込み量($\delta=1-d/l_0$)である。測定の基本は 2 支点間 l_1 離れた中央から第 3 の支点である測定軸を被測定物に押し当てて挟み込む方法である。被測定物の張力の大きさでその剛性が変わるためたわみ量(x)も変わる。

この剛性の変化を測定軸と反対の軸端に納められたロードセルで検出する。押し込み量 l_2 が一定なため被測定物の太さにより l_2 を押し込む力が大きく押し込めない場合も想定し、ロードセルとの間にばねを介することで l_2 を与えても測定可能な機構になっている。測定値は剛性の高い被測定物ほど測定軸に対する反発力も大きくなり、ばねがたわみそのばね荷重をロードセルで検出している。

2.2 校正値と測定値

被測定物の太さや剛性は症例により個体差がありその都度その測定パラメータについて校正を行いその校正線図が新たに作成される(Fig.2(a))。

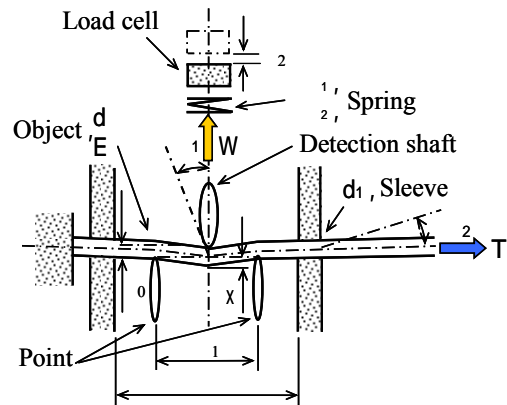
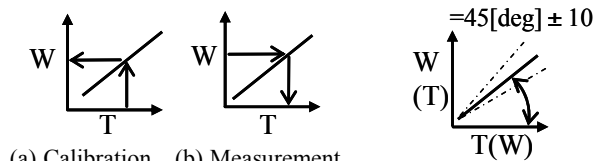


Fig.1 Outline of 3 point support function measuring system.



(a) Calibration (b) Measurement

Fig.2 Calibration value and measured value.

Fig.3 Tilt angle of the input/output signal.

手術後の張力はこの校正線図から得られるため校正時と同等の測定環境の再現は必然である。高い信頼性が得られる測定条件は理想的な信号の入出力 T-W に対して Fig.3 のような関係を最適と定めている。傾き角 $\theta=45[\text{deg}]\pm 10$ となる入出力信号の設定パラメータを与える条件の調査は必然であり、一方の軸に片寄った校正線図からは信頼できる測定値を得るのは困難であり誤差の要因が大きく再現性も難しい環境である。

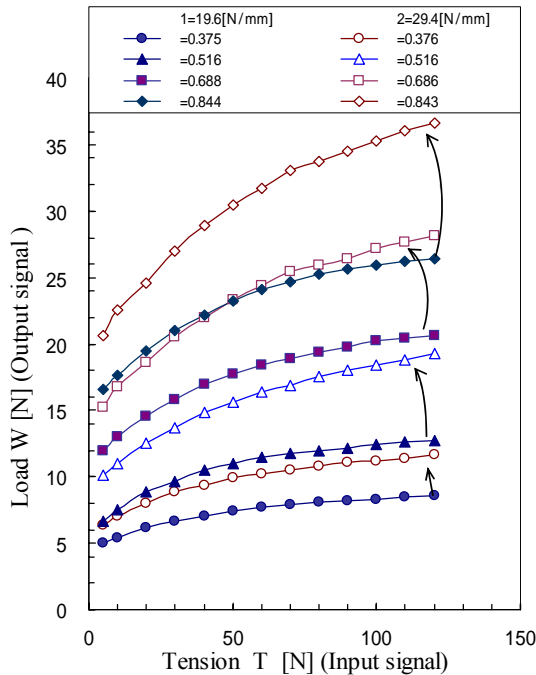


Fig.4 T-W of every δ at $l_1=12[\text{mm}]$, $\kappa_1=19.6[\text{N/mm}]$ and $\kappa_2=29.4[\text{N/mm}]$.

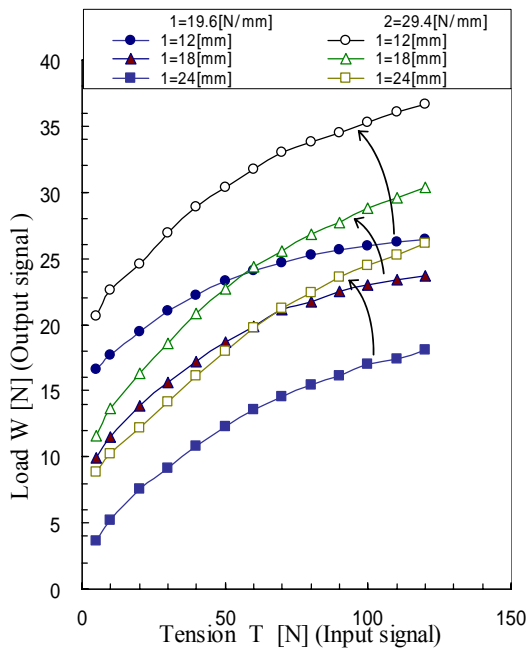


Fig.5 T-W of every l_1 at $\delta=0.844$, $\kappa_1=19.6[\text{N/mm}]$ and $\kappa_2=29.4[\text{N/mm}]$.

2.3 測定条件の設定

(1) 傾き角 $\theta=45[\text{deg}]\pm 10$ の再現

Fig.1 のパラメータから Fig.2(a) の関係が Fig.3 になるための設定条件について d を一定とした δ と l_1 の関係を実験1と実験2で調査する。

(2) 校正値と測定値の再現

Fig.2 の関係における再現性に対する信頼度を Fig.3 との関係から検証したのが実験3である。

(3) 測定軸との傾き角 θ_1 の影響

Fig.1 の $\theta_1=0[\text{deg}]$ の測定値 T-W と任意の θ_1 に対する差から θ_1 の許容可能な範囲の調査が実験4である。

(4) 張力軸との傾き角 θ_2 の影響

Fig.1 の $\theta_2=0[\text{deg}]$ の T-W と任意の θ_2 に対する T-W との W の差から損失 T の調査が実験5である。

(5) ばね定数と傾き角 θ の関係

(1) のばね定数より硬いばねを用いて Fig.2 と Fig.3 の関係を調査する実験が実験6と実験7である。

3 実験と検討

(1) 実験1と実験2

実験1では Fig.1 から $d=3.2$ (マウスコード), $\kappa_1=19.6[\text{N/mm}]$, $l_1=12[\text{mm}]$, $l=27[\text{mm}]$, $d_1=4[\text{mm}]$, 初期張力 $T_0=5[\text{mm}]$, T の最大値は $120[\text{N}]$, $\theta_1=\theta_2=0[\text{deg}]$ において押込み量 δ の $2.0, 1.5, 1.0, 0.5[\text{mm}]$ とした T-W を Fig.4 に示す。 δ 及び l_1 を大きく取らないと T-W の関係は Fig.3 の形とならないため、実験2で $l_0=0.5[\text{mm}]$ ($\delta=0.844$) の $l_1=18, 24[\text{mm}]$ に条件を変更した結果が Fig.5 である。 δ が大きい条件で l_1 を許容される寸法にすることで Fig.3 の傾き θ を押し上げ押込み荷重 W も小さい。この事例のように要求の $T=30 \sim 80[\text{N}]$ に対する最適とされる $W=5 \sim 15[\text{N}]$ に設定する方法が示された。

(2) 実験3

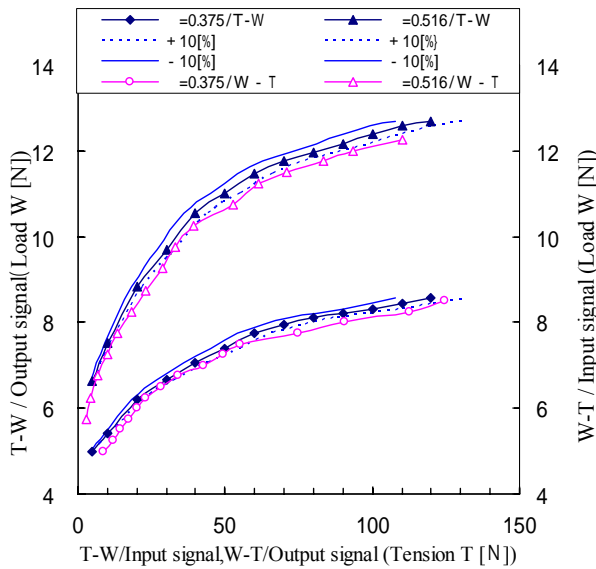
Fig.6 と Fig.7 は実験1で与えた条件で得られた Fig.4 を校正値とにおいて、Fig.2 の信頼度について Fig.3 の傾き角との関係を検討している。T-W に対する測定値 W-T は T-W 線図と比較のため右縦軸に W を表す。再現性に対する信頼度の評価は T-W の T に対する許容範囲とこれを満足する割合で以下のように定め検討した。

校正の T-W において W-T を評価する基準は、

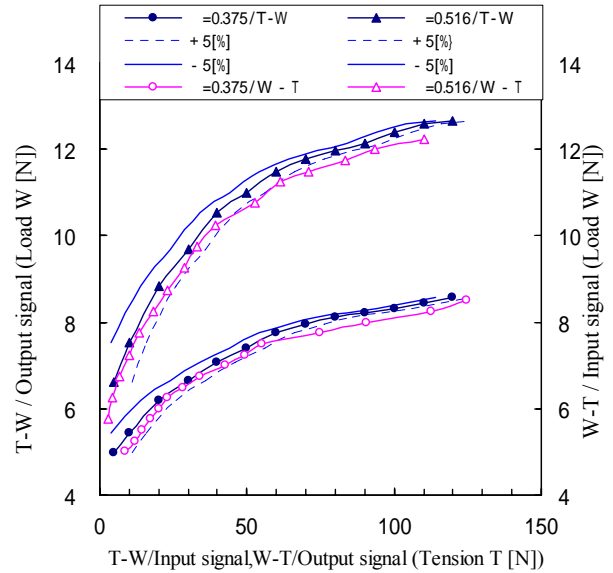
- 1) T に対して $\pm 5[\%]$,
- 2) T に対して $\pm 10[\%]$
- 3) $T=120[\text{N}]$ フルスケールの $\pm 5[\%]$
- 4) $T=120[\text{N}]$ フルスケールの $\pm 10[\%]$

この項目において、測定値の $80[\%]$ 以上が満足する δ ごとの満足度を判定する。

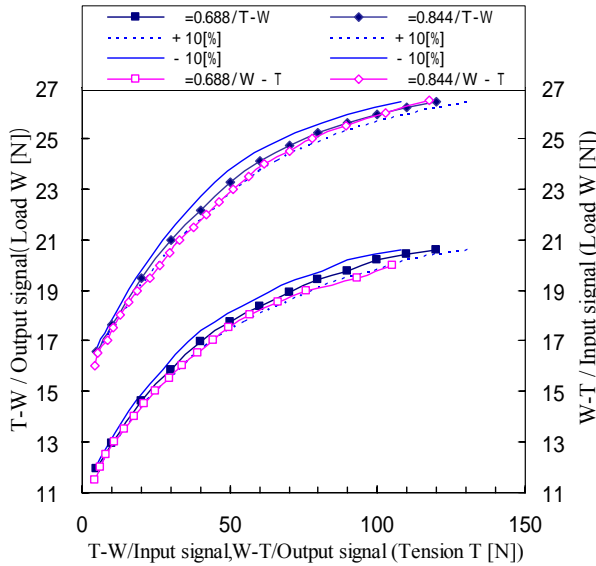
- 1) 全ての δ が満足しない。 $\delta=0.844$ は $23[\%]$ 満足。
- 2) 全ての δ が満足しない。 $\delta=0.844$ は $61[\%]$ 満足 (Fig.6 参照)。



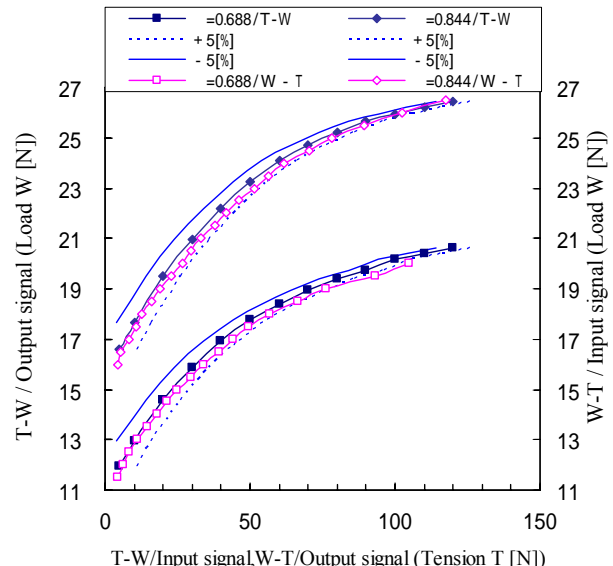
(a) $\delta=0.375$ and $\delta=0.516$



(a) $\delta=0.375$ and $\delta=0.516$



(b) $\delta=0.688$ and $\delta=0.844$



(b) $\delta=0.688$ and $\delta=0.844$

Fig.6 T-W, W-T of every δ at $\ell_1=12[\text{mm}]$ and Within $\pm 10[\%]$ for T.

Fig.7 T-W, W-T of every δ at $\ell_1=12[\text{mm}]$ and Within $\pm 5[\%]$ for FS=120[N] of T.

3) $\delta=0.688$ は 83[%], $\delta=0.844$ は 96[%]満足している (Fig.7 参照) .

4) 全ての δ が満足しており評価できる .

δ と T-W 線図の傾き角と W-T 線図の判定(80[%]) を整理する . T-W の傾きが小さい $\delta=0.375$ と 0.516 では上位と比べ 20[%]以上低下する . T-W 線図の $\theta=45[\text{deg}]\pm 10$ の関係を満足する設定条件の必然性が確かめられた .

(3) 実験 4

Fig.8 に θ_1 に応じた T-W 線図を示す . Fig.4 と Fig.5 で見られたように θ_1 が大きいと δ を大きくした効果と同じ出力信号は得られている . 3 点式では θ_1 の

効果が入らない相対位置関係の確保は必然であり , 実用においては $\theta_1=0[\text{deg}]$ となる先端形状または機構の検討が必要である .

(4) 実験 5

Fig.9 に θ_2 の結果を示す . 比較した $\theta_2=0[\text{deg}]$ は Fig.4(a) の $\delta=0.375$ と $\delta=0.844$ である . スリーブと被測定物表面は乾燥状態にあり , スリーブの穴淵を押し込む荷重が増し両者間による摩擦損失 ΔT も増すためスリーブ間の被測定物の張力はその相当分小さくなることが確認できる . 実用では潤滑または摩擦を小さくする要因が揃っているため僅かな θ_2 5[%] で意識しなくてよい .

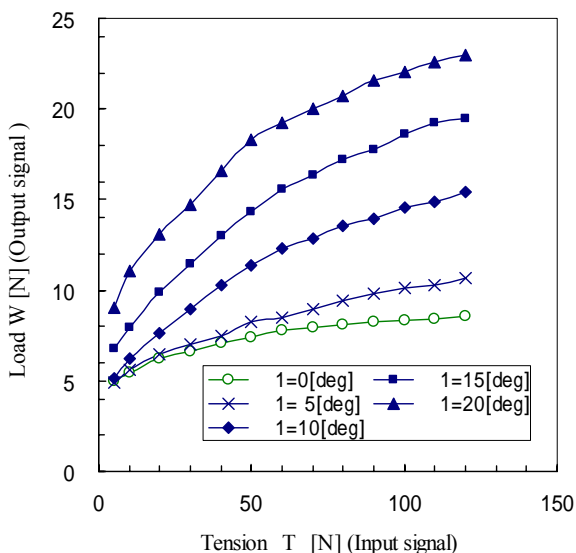


Fig.8 T-W for θ_1 of $\delta=0.375$ in $l_1=12$ [mm].

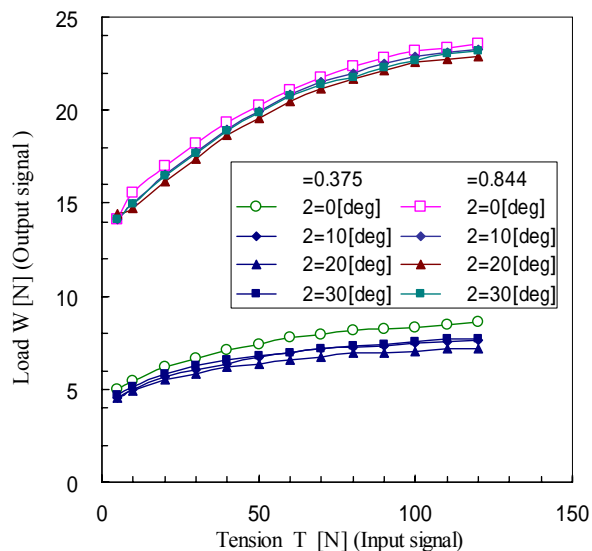


Fig.9 T-W for θ_2 of $\delta=0.375$ and $\delta=0.844$.

(5) 実験 6 と実験 7

Fig.4 と Fig.5 の図中に $\kappa_2=29.4$ [N/mm] の結果を示す。Fig.1 の l_2 が同じであり κ_2 の硬さが測定軸の押し込み荷重 W を押し上げた結果であり、 δ と l_1 に対して全ての T-W の傾き角が押し上げられている。Fig.3 の θ を満足すれば Fig.2 の再現性に対する信頼度評価も高い確率で良好な判定が可能となる。

4 結言

3 点式プローブに新たな付加機能及び実用を想定した測定形態について検討した実験項目から次の改善や提案事項が示された。

- 1) 校正値と測定値の関係から入出力信号には理想的な θ が得られ易い δ と l_1 及び κ の存在を確認した。
- 2) 校正値と測定値を評価する基準とこれを判定する許容範囲を提案した。これが再現性の信頼度評価である。実験事例をこれで判定した結果からも、入出力信号の傾き角 θ の大きさが信頼性を改善することも確認した。
- 3) 測定方法やその環境の同時性、並びにその繰返し精度を確保することも 2) の信頼度改善には必然である。

4) 測定軸との θ_1 は許容できないため 3 点が被測定物に垂直方向から挟み込む機構や信号検出方法などの工夫が必要である。

5) 張力軸と θ_2 は実用上許容可能と見られるが Tension Meter で引くとき $\theta_2=0$ [deg] となる方向へ付与すれば許容される。

6) 被測定物の太さを 4, 6 と 8[mm] とおいた上記 1) と 2) の確認並びにその条件を与える方法について検討する。

最後に、福島県立医科大学医学部整形外科教室長 総義弘先生からのご指導に対しまして謝辞を申し上げます。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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, №031-2, pp.307-308, 2003.