

## 膝前十字靭帯(ACL)張力測定プローブの開発

## Development of Tension Probe for Anterior Cruciate Ligament

○山内 秀高 (Hidetaka Yamauchi) 長尾 光雄 (Mitsuo Nagao) 横田 理 (Osamu Yokota)  
 日本大学工学部(Nihon University)

キーワード: ACL (Anterior Cruciate Ligament) 3点式プローブ (Expression probe of experimental three points)  
 丸革ベルト (Round eather belt) 校正値 (Calibration value) 測定値 (Measurements)

## 1. 緒言

破断した膝前十字靭帯 (ACL : Anterior Cruciate Ligament) は, 自家組織や人工靭帯により再腱する際に, 関節外から適度な張力を与えて固定される. この初期張力は移植腱の太さや関節の大きさなどの症例により異なる要因となり, 関節内緊張度が一定でないことが推定される. そこで, 固定された再腱靭帯の張力を定量化できる測定システムが望まれている. 本研究では, 関節内張力測定プローブとして, 試作した3点式プローブとそのPC測定システム(現在, ソフトウェア上で表示される校正式は1次式を用いている)について示す. 本実験では, ACL 移植腱の代わりに丸革ベルトを用いた術中測定を想定した. 測定点は設定張力  $T$  の前後各2点を含む5カ所で測定(5点測定法)した場合と, 各1点を追加した3カ所で測定(3点測定法)した場合を比較し, その有効性および再現性について検討したので報告する.

## 2. 実験装置及び実験方法

## 2.1 実験装置

Fig. 1 に3点式プローブの概観, Fig. 2 に3点式機能調査試験装置とデータ処理システムを示す. 3点式プローブとはACL移植腱を3点で挟み込んで測定する方法で, 内蔵されたロードセルによって剛性の変化を検出する. ここでは, 移植腱の線形及び非線形の  $T$ - $W$  (張力-荷重) 線図を比較するため  $\phi 5$  と  $\phi 6$  の丸革ベルトを用いた.

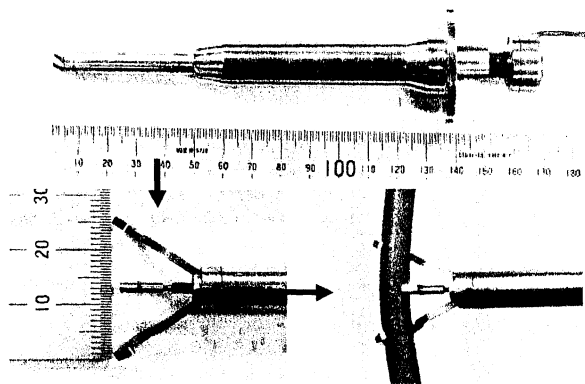


Fig. 1 General view of expression probe of experimental three points.

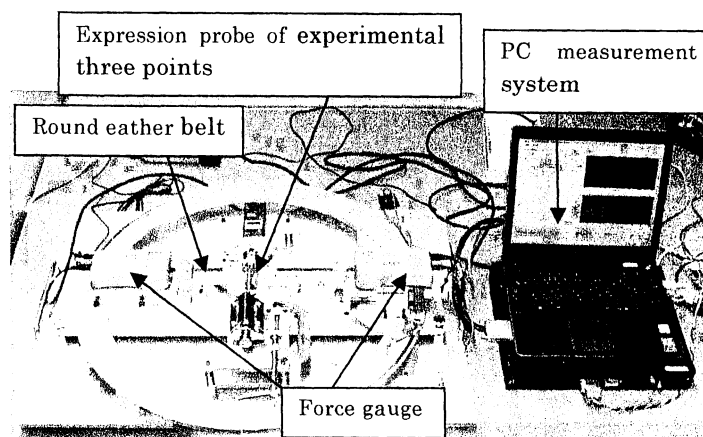
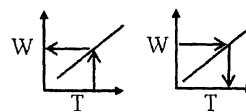


Fig. 2 Three point expression function investigation examination device and data processing system.

## 2.2 3点式プローブの測定

症例により被測定物の太さや剛性には個体差があり, その都度測定パラメータについて校正線図が新たに作成される (Fig. 3-(a)). 手術後の張力はこの校正線図から測定値 (Fig. 3-(b)) が得られるため校正時と同等の測定環境の再現が問題となる. なお, 再現性は入出力信号の傾きが  $\theta = 45[\text{deg}] \pm 10$  以内になる線形な信号が理想的である (Fig. 4).



(a) Calibration value (b) Measurements

Fig. 3 Calibration value and measurements

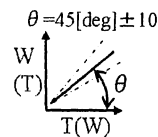


Fig. 4 Inclination of I/O signal

## 2.3 実験方法

設定張力  $T$  は術用される 40, 60, 80 と 100 [N],  $T$ - $W$  線図と  $W$ - $T$  線図の相関の程度を校正式で検討した. 校正式の補正を検討するため,  $\phi 5$  丸革ベルトの場合は1次式と2次式で与え,  $\phi 6$  丸革ベルトの場合は1次式, 2次式, 3次式および4次式で与え, Excel で校正式を算出する際に表示されるフィット値  $R^2$  の程度を調べた. また,  $T$ - $W$  線図の校正式  $W_c$  と  $W$  との誤差率は式(1)となる.

$$\left| \frac{\Delta W}{W} \right| = \frac{W - W_c}{W} = 1 - \frac{W_c}{W} [\%] \quad (1)$$

X軸とY軸を入れ替えて与えた校正式  $T_c$  に測定荷重  $W$  を与え、同時測定した真の張力  $T'$  から再現性の誤差率は式(2)となる。

$$\left| \frac{\Delta T_M}{T'} \right| = \frac{T' - T_c}{T'} = 1 - \frac{T_c}{T'} [\%] \quad (2)$$

ここで、評価は校正式のフィット値  $R^2 \geq 0.98$ 、誤差率  $\leq 10$  [%] の条件で再現性を調べた。

### 3. 結果及び考察

式(2)から与えた5点測定法 ( $T=40, 50, 60, 70, 80$  [N]) と3点測定法 ( $T=40, 60, 80$  [N]) において、 $T=60$  [N] を一例として Fig. 5 および Fig. 6 に示す。また、Table. 1 に各校正式  $T_c$  における最大誤差率  $|\Delta T_M/T'|$  を示す。

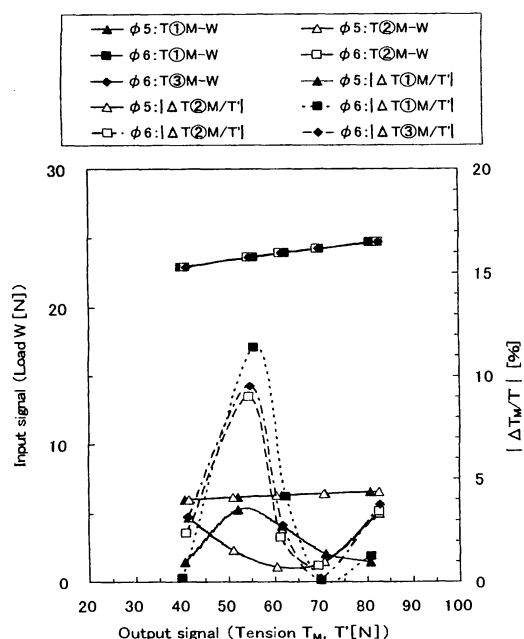


Fig. 5 Five point method,  $d=5, d=6, T-W, |\Delta T_M/T'|$

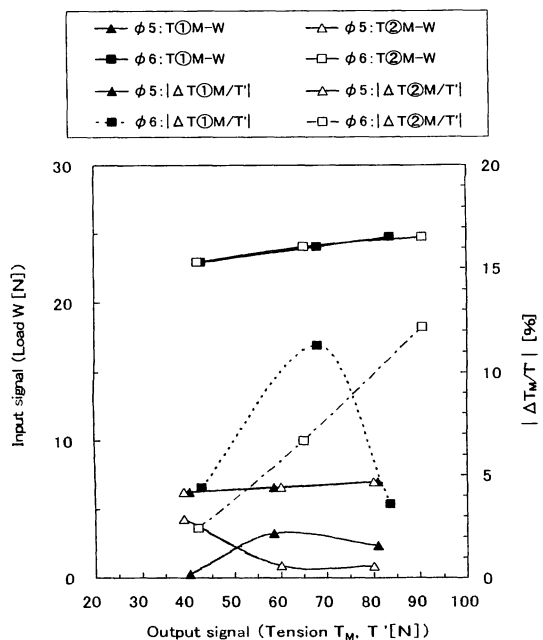


Fig. 6 Three point method,  $d=5, d=6, T-W, |\Delta T_M/T'|$

#### (1) 5点測定法

φ5丸革ベルトの校正値は線形T-W線図の代表例であり、φ6丸革ベルトの校正値は非線形T-W線図の代表例である。Fig. 5は設定張力  $T=60$  [N] のT-W校正式(多項式)とその測定値  $T_c$  から式(2)より誤差率  $|\Delta T_M/T'|$  を与えた。線形なT-W線図の誤差率は、最大誤差率が7.01 [%] なので1次の校正式で満足している。非線形なT-W線図では、最大誤差率が9.00 [%] の2次と9.54 [%] の3次の校正式で満足し1次と4次は11.42 [%] と55.72 [%] なので満足していない。

#### (2) 3点測定法

Fig. 6から線形なφ5丸革ベルトは、最大誤差率が2.71 [%] なので1次の校正式で満足し5点測定法の誤差率と同等である。これに対して非線形なφ6丸革ベルトでは1次と2次は15.12 [%] と12.19 [%] なので誤差率の基準を満足しない。非線形の場合は5点測定法が有利である。ただし、他の設定張力  $T$  では満足する例も見られた。

Table. 1 The maximum error margin rate in each  $T_M, |\Delta T_M/T'|$

	Five point method					
	φ5 round leather belt		φ6 round leather belt			
	$T_{①M}$ [%]	$T_{②M}$ [%]	$T_{①M}$ [%]	$T_{②M}$ [%]	$T_{③M}$ [%]	$T_{④M}$ [%]
40[N]	5.61	3.10	7.21	4.90	4.60	55.72
60[N]	3.54	3.35	11.42	9.00	9.54	-
80[N]	7.01	10.47	2.60	2.39	1.83	13.75
100[N]	4.82	3.02	0.66	0.82	1.92	16.57
	Three point method					
	φ5 round leather belt		φ6 round leather belt			
	$T_{①M}$ [%]	$T_{②M}$ [%]	$T_{①M}$ [%]	$T_{②M}$ [%]		
40[N]	2.25	2.77	15.12	9.68		
60[N]	2.17	2.87	11.29	12.19		
80[N]	2.71	2.76	10.21	6.53		
100[N]	2.08	2.23	0.75	1.15		

### 4. 結言

5点測定法と3点測定法の誤差率  $\leq 10$  [%] を満足する線形及び非線形なT-W線図を適正に表す多項校正式が存在する。得られた測定値  $W-T$  から5点測定法は非線形なφ6丸革ベルトの再現性に有利であり、3点測定法は線形なφ5丸革ベルトの再現性に有利であった。線形なT-W線図では両者の差異は見られなかった。PC測定システムは線形処理のため非線形に対応したPC測定システム修正用プログラムが必要である。

今後の予定は、鏡視下膝関節模型による本測定方法の有効性の確認及び試作改良の検討、測定方法とデータ処理プログラム修正の検討が挙げられる。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) 新津守, 膝MRI, 医学書院, 2002
- 2) Don Johnson, ACL Made Simple, Springer, 2004