



Title	I. 腱・靭帯に作用する張力のin vivo計測のためのバックルトランスデューサの試作
Author(s)	石坂, 高英
Citation	北海道大学電子科学研究所技術部技術研究報告集, 1, 47-51
Issue Date	1992
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/1444
Type	departmental bulletin paper
File Information	KJ00000697020.pdf



I. 腱・靭帯に作用する張力の in vivo 計測のための バックルトランスデューサの試作

石坂 高英 (生体制御部門)

1. はじめに

最近、食生活の向上や運動不足などから、肥満等による成人病が問題になっている。それに伴ってジョギングなどのスポーツが大変普及してきている。しかし、これらのスポーツや交通事故などによって腱や靭帯を損傷する怪我が増加してきており、少し前の例で言えば、相撲取りの小錦や野球選手の吉村が共に膝の前十字靭帯を破断したことが、新聞などに報道され一時話題になった。また、バスケットボール選手の中でも、靭帯を損傷する人が増えてきている。このような、腱や靭帯の損傷や破断の治療を行う時に、生体にはどのような力が働いているかを知ることが、大変重要な課題となる。しかし、この生体組織の力学的負荷の正確な計測は、まだ in vivo では行われていない。そこで今回は、家兎の膝蓋腱計測専用のバックルトランスデューサを試作し、この家兎の膝蓋腱に in vivo で作用する張力の計測を行った結果について報告する。

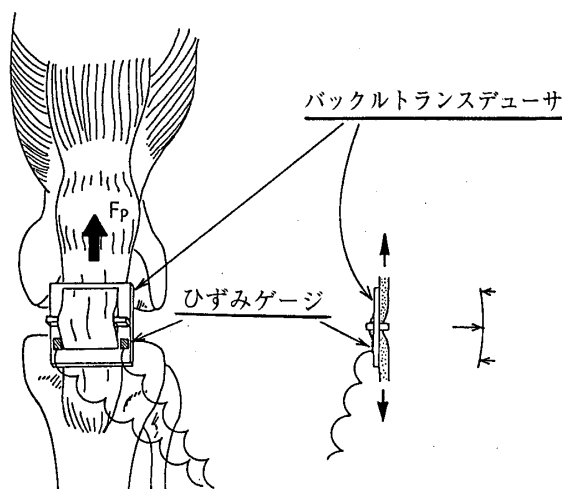


図1. 家兎膝蓋腱に作用するバックルトランスデューサによる in vivo 計測の概略

2. 試作バックルトランスデューサ

図1に家兎膝蓋腱に作用する試作バックルトランスデューサによる in vivo 計測の概略を示す。同図のように、試作バックルトランスデューサを家兎膝蓋腱に取り付けると、家兎膝蓋腱に作用する張力によってフレームに曲げが生じる。この時生じる曲げひずみをフレームに張り付けたひずみゲージを用いて検出することによって、作用する張力を測定することができる。試作バックルトランスデューサはステンレス鋼製のフレームとクロスバーからできており、その形状と寸法は図2の通りである。家兎膝蓋腱の形状、ひずみゲージの寸法、使用したステン

レス鋼の弾性係数などを考慮して、膝蓋腱に作用する張力によって十分な出力が得られるように設計した。エポキシ樹脂系接着剤（アラルダイト）で、ひずみゲージ（共和電業、KFR-02-C1-16）をフレームに張り付け、これにリード線を接続したのち、ゲージを体液から保護し、リード線が引っ張られてもゲージが剥離したり、リード線が断線しないように同じ接着剤で被覆した。ひずみゲージには、金属箔の抵抗温度係数を被測定物の線膨張係数に合わせた自己温度補償型を用いたので、温度変化による零点変動は $1.0\mu\text{s}/\text{C}$ と極めて小さく、安定で精度の高い測定が可能である。

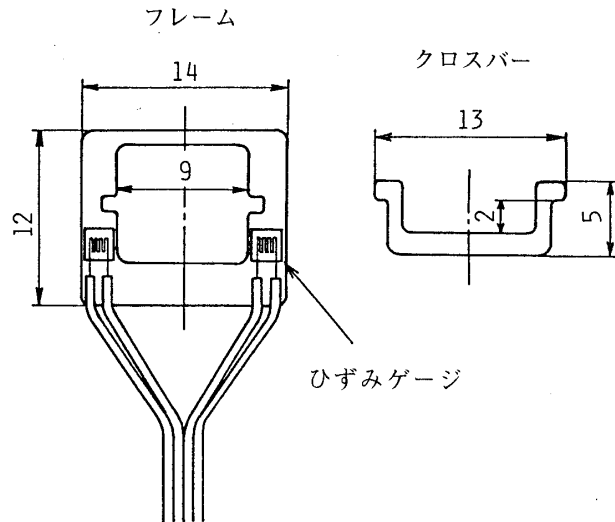


図2. バックルトランスデューサの形状と寸法

3. ひずみゲージの形状と原理および回路構成

ここで、バックルトランスデューサに用いたひずみゲージの形状を図3に示す。下図に示すように樹脂などの絶縁材の上に格子状の金属箔素子を作り、リード線を付けたものである。

次に、図4に示したひずみゲージの原理より、(a)では金属に力の加わらない状態の電気抵抗値を示しており、この金属を引張ることにより、(b)に示すように金属の断面積の減少に伴い電気抵抗が増大し、逆に(c)のように金属を圧縮すると、金属の断面積が増大し、電気抵抗が減少することが分かる。よって、ひずみゲージ素子は、この素子の伸び、縮みにより電気抵抗値が変化することを利用したものである。また、ひずみゲージの抵抗値の変化は小さいので、一般には、図5に示すようにブリッジ回路構成とし、抵抗値の変化を電圧の変化に変換して取り出す。ここで、ひずみゲージにはブリッジ回路の供給電源と出力を増幅する機能を備えた動ひずみ測定器が必要である。

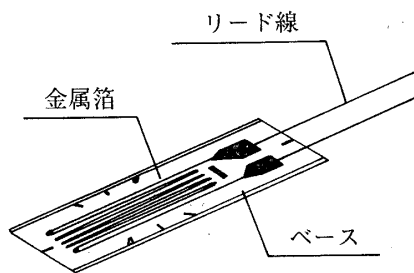


図3. ひずみゲージの形状

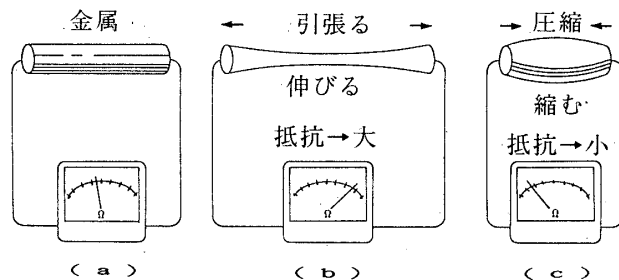


図4. ひずみゲージの原理

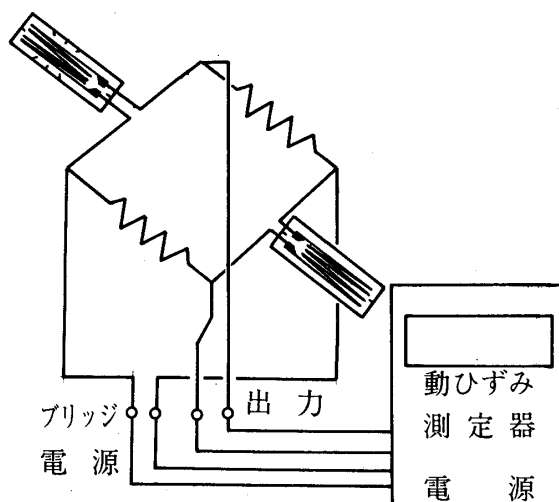


図5. ブリッジ回路の構成

4. 実験動物と膝蓋腱の張力の計測

実験動物には、体重 3.9 ± 0.1 kg (平均±標準誤差) の成熟家兎 (日本白色種, 雌) を使用した。麻酔下で、膝蓋腱の中央の一部を膝蓋下脂肪体から剝離し、この部分にクロスバーを通し、このバーをフレームに取り付けた。この時、フレームやクロスバーが脛骨などに接触してフレームの変形が阻害されると、得られる出力が実際よりも小さくなり、測定誤差の原因となる。そこで、フレームおよびクロスバーが脛骨、大腿骨、膝蓋骨に接触しないように注意して取り付けた。リード線は脛骨の骨膜に縫合糸で固定し、膝の上部から皮膚を貫通させて体外に引出し、動ひずみ測定器に接続した。図6に実験計測システムの概略を示す。手術後

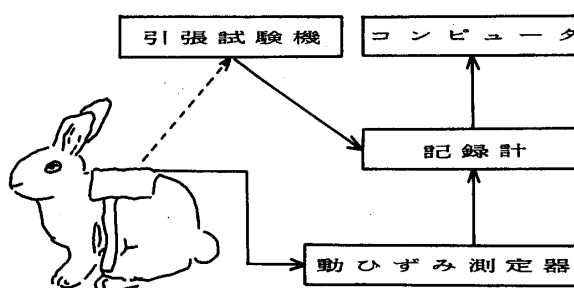


図6. 実験計測システムの概略

24時間経過した家兎を幅30cm, 長さ1.5mの直線通路の中で、一方向に数回、自発的に運動させ動ひずみ測定器からの出力を記録計で計測し、さらにコンピュータに信号を取り込み、データを解析した。一方、腱に作用する張力とバックルトランスデューサの出力は、屠殺後バックルトランスデューサを取り付けた状態のまま、家兎の膝の部位を取り出し、膝蓋骨、膝蓋腱、脛骨とバックルトランスデューサのみを残し、他の組織はすべて取り除く。つぎに、膝蓋骨と脛骨を引張試験機のグリップに固定し、膝蓋腱に負荷をかける。この結果、膝蓋腱に作用する張力とバックルトランスデューサからの出力を同時に記録し、コンピュータに入力してデータ処理を行う。

5. 結果と考察

ここで、家兎の膝蓋腱に装着したバックルトランスデューサからの出力の測定結果例を図7に示す。この図から家兎が約1.5mの通路を端から端まで運動する間に、左右両方とも6回のピークが現れていることが分かる。これによって得られた出力を張力に変換するために、引張試験機を用いて求めた出力と張力の関係の一例を図8に示す。同図から得られた出力と張力の関係を示す曲線は、直線に近く上に凸の形をしており、100Nの張力に対して約500 μ sと十分に大きな出力が得られた。また10回程度の繰り返し負荷を加えるとヒステリシスはほとんど現れなくなり、それ以後さらに負荷を繰り返し加えてもほぼ一定の曲線を描く。そこで本実験では10回目の負荷時に現れる曲線を最小二乗法で近似して検定曲線の係数を求め、2次の曲線にこれを利用して、in vivoで測定した出力を張力に換算した。以上の測定結果を表1に示す。同表において張力ピークの値は、各家兎について30個抽出して平均したものである。これらの家兎6羽(A~F)について、左右の膝蓋腱に作用するピーク張力と、体重および最大荷重に対する比について調べた。同表より、

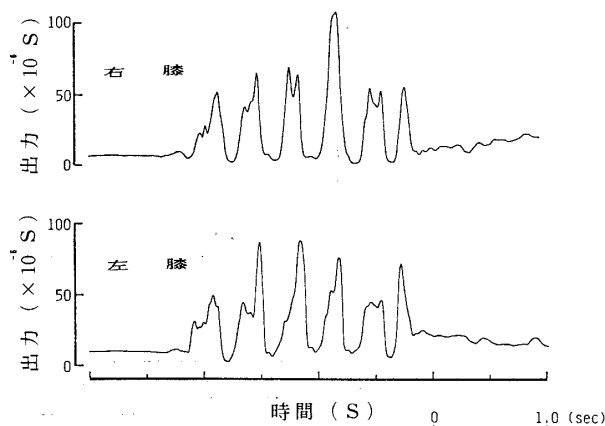


図7. バックルトランスデューサの出力

(1) 左右の膝蓋腱に作用したピーク張力は、最小値44N、最大値123Nで、家兎によってかなり大きく値が異なっており、個体差が大きいことが分かる。しかし、各家兎に於ける右膝蓋腱と左膝蓋腱に作用する張力の差は比較的小さく、また全ての家兎について平均したピーク張力は、右膝蓋腱で 83 ± 11 N、左膝蓋腱で 80 ± 11 Nであり、両者の間に有意差は無かった。また、

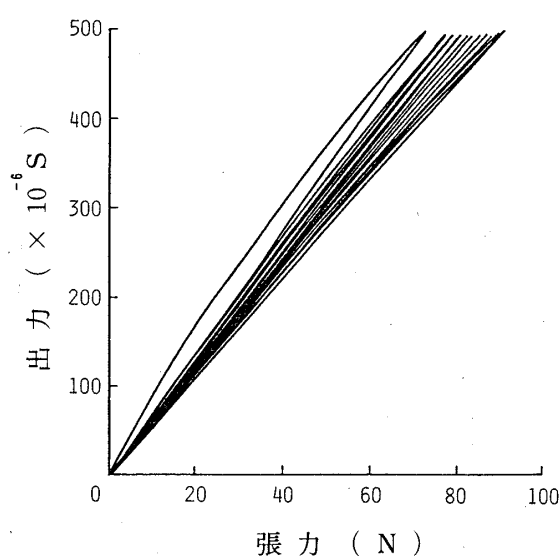


図8. 負荷張力とバックルトランスデューサの検定曲線の一例

表1. 家兎の左右膝蓋腱に作用するピーク張力と、体重および最大荷重(破断時の荷重)に対する比

白色系家兎	張力のピーク(N)		張力のピーク(N)		破断荷重(N)	
	右	左	体 重 (kg)	左	張力のピーク(N)	左
A	57	44	1.7	1.3	14	18
B	114	123	3.6	3.8	7	7
C	68	73	1.8	1.9	12	11
D	86	86	2.1	2.1	9	9
E	56	71	1.6	2.0	14	11
F	116	85	3.3	2.4	7	9
平均±標準誤差	83 ± 11	80 ± 11	2.4 ± 0.4	2.3 ± 0.3	11 ± 1	11 ± 2

また、

(2) 体重に対するピーク張力についても、最小値 1.3N、最大値 3.8N とバラツキは認められるが、この平均±標準誤差は右膝蓋腱では $2.4 \pm 0.4 \text{ N/kg}$ 、左膝蓋腱では $2.3 \pm 0.3 \text{ N/kg}$ であり、これらの値から、運動時において家兎の左右膝蓋腱には、それぞれ体重のほぼ 2 倍程度の張力がかかることが分かる。さらに、

(3) 引張試験によって測定した膝蓋腱の破断荷重（最大荷重）は、 $799 \pm 40 \text{ N}$ （平均±標準誤差）であった。この値をピーク張力で割ることにより安全率を求めた。その結果、安全率は最小で 7、最大で 18、平均では 11 のかなりの大きな値を示した。これらの結果から、通常の運動中においても、家兎の膝蓋腱にはかなり大きな張力が作用しているが、その張力に十分耐えられるだけの強度を持っていることが分かった。

以上の結果から、試作バックルトランスデューサを使用して家兎の膝蓋腱の *in vivo* 計測を行うことが出来た。