

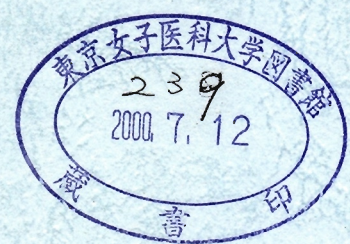
# 科学研究費補助金研究成果報告書

## 「頭頸部外科手術におけるメスの力学的解析」

基盤研究 (C) (2)

課題番号 No.10671618

研究年度 平成10年度～平成11年度



東京女子医科大学 医学部 教授

石井 哲夫



頭頸部外科手術におけるメスの力学的解析

- 手術時の皮膚切開における力学的解析 -

はじめに

外科手術における皮膚切開は、手術手技の基本的な行為である。しかし切開の優劣、方法、手技、深度などについては一般に経験的に評価されているのみである。また、切開時のメスにかかる力や切開をする対象物の組織、器官に及ぼす力学的分析は科学的にはほとんど行われていなかった。そこで、本研究では切開時の力学的な解析を行うに当たり、切開を行う場合の2方向の力を計測する目的で、力の測定が可能なセンサを具備した2軸センシングメスの作製を行うとともに、切開時に皮膚にかける張力の計測も可能な2軸張力測定装置の作製も行った。さらにこれらのセンサ付きメスによって、切開の力学的分析を行うための基礎実験と、実際に耳鼻咽喉科の手術の際の皮膚切開について、切開部位による力学的相違と切開時の適切な条件について力学的に解析することが本研究の目的である。

## 研究組織

研究代表者：石井哲夫（東京女子医科大学 医学部 教授）

研究分担者：高山幹子（東京女子医科大学 医学部 教授）

研究分担者：篠 昭男（東京女子医科大学 医学部 講師）

研究分担者：広瀬理恵子（東京女子医科大学 医学部 助手）

## 研究経費

平成10年度 1,900千円

平成11年度 300千円

計 2,200千円

## 1. 力学的分析を行うための装置

### 1) 力センシングメスの作製

切開時の力の計測を行うために使用する力センシングメスは、平行平板により加わった力によって生じたひずみを、電気信号に変換して力を測定するひずみゲージが内蔵されている（図1 a、b）。この平行平板を使用したセンサは、Z方向センサとX方向センサの2つがあり、Z方向のセンサで、切開時の下方に加わる力、つまり垂直方向の力 $F_z$ 、X方向センサでは切開する力、つまり水平方向の力 $F_x$ の力を測定することができる。またメスの柄となるカバーは、アルミニウム合金で出来ており取り外しができ滅菌消毒が可能である。柄の先端の部分には従来のメスと同様に着脱が可能な替え刃のメスを使用出来るようにした（図2）。なお力センシングメスの重量は46グラムで従来のメスの重さの約2倍である。

### 2) 張力センサ

皮膚切開時に母指および示指によって皮膚にかける張力を測定する張力センサ（図3 a)の構造とその模式図を示した（図3 b）。張力センサも力センシングメスと同様、力を検出するためのひずみゲージが内蔵されている。張力センサは実際の手術時に行うと同様の左手母指と示指で個々に張力をかけ、しかもそれぞれの張力を測定する（ソケットと呼ぶ）必要がある。このソケットには左手母指および示指を入れ、ソケット底部の金属板で切開の対象物を押し広げることにより、対象物に対する母指の張力と、示指の張力を測定することができる（図4 a）。またソケットは自由に角度が調整出来るように作製されている。

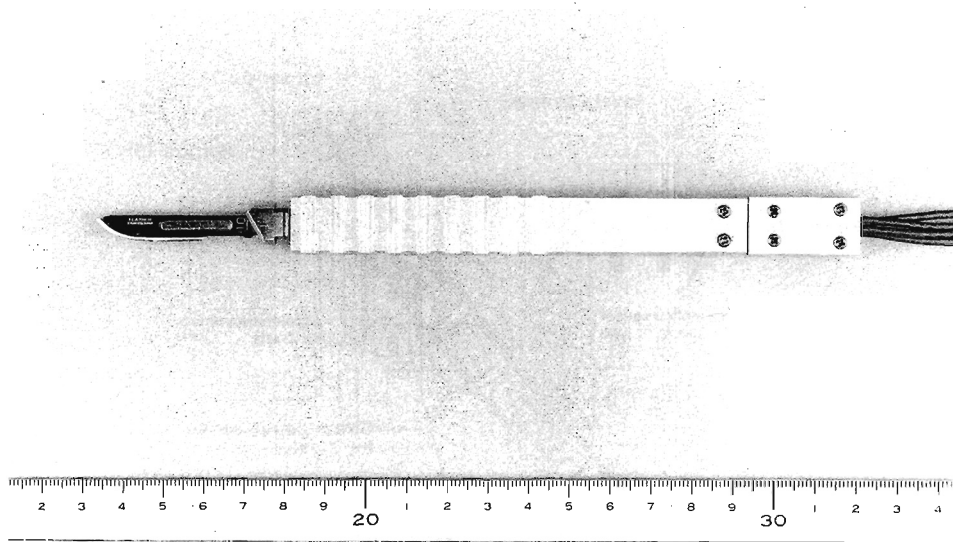


図1a：カセンシングメスの全体図  
先端には替刃のメスがとりつけられている

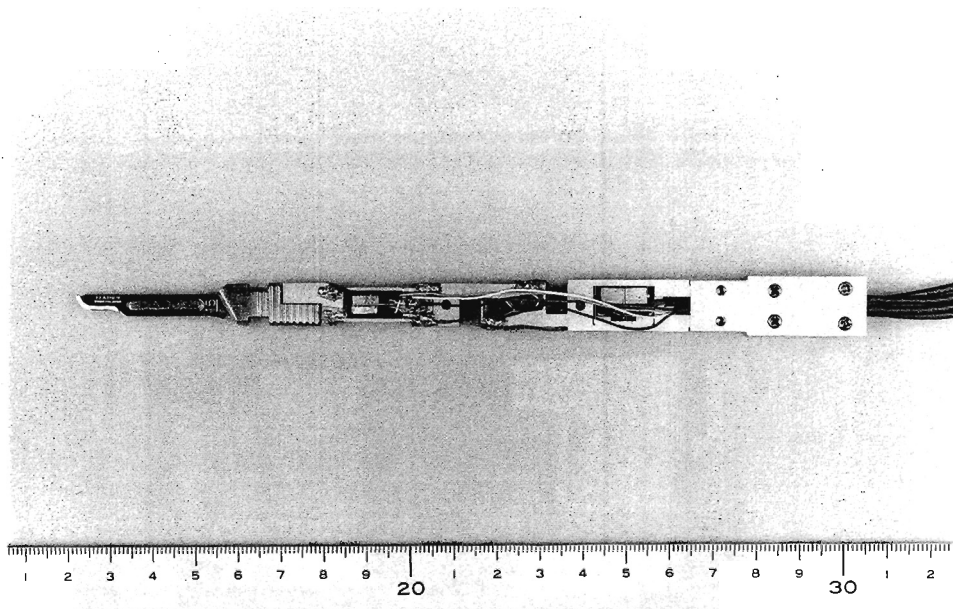


図1b：カセンシングメスの内部センサ

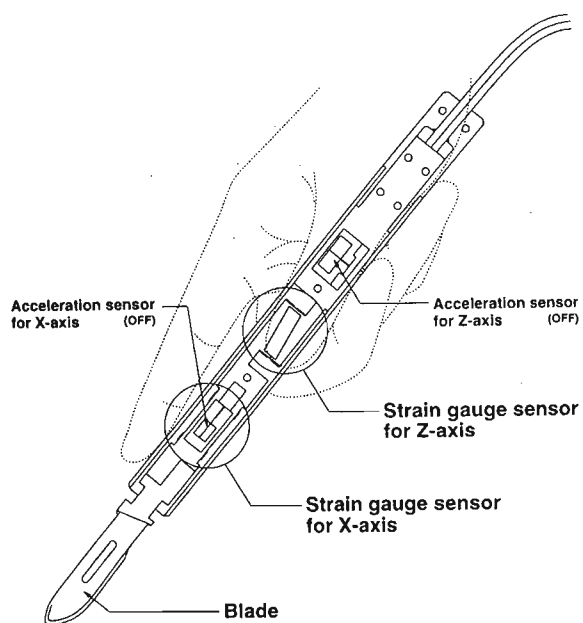


図2：2方向力センシングメスの内部構造の模式図

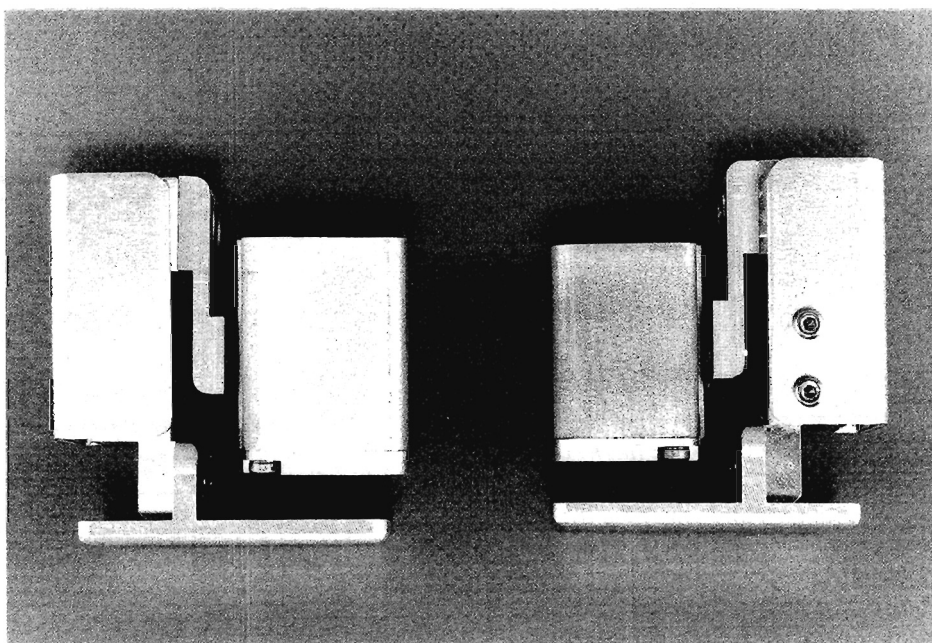
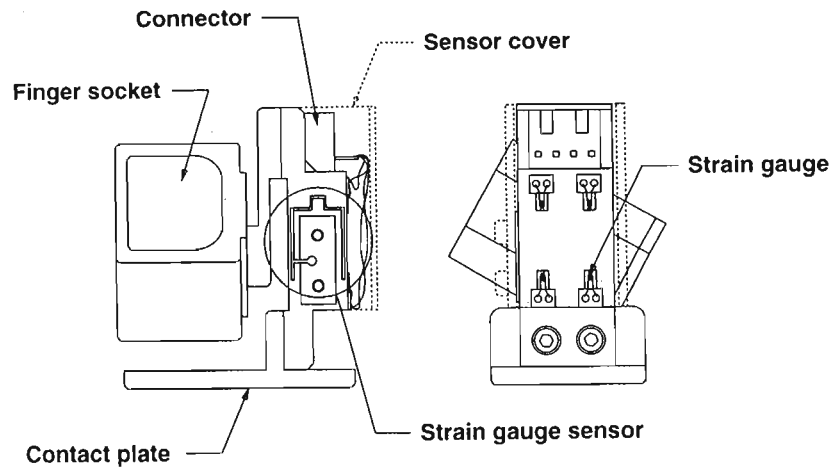


図3a：張力センサの全面図



*Structure of the Tension Sensor*

図3b：張力測定装置の内部構造

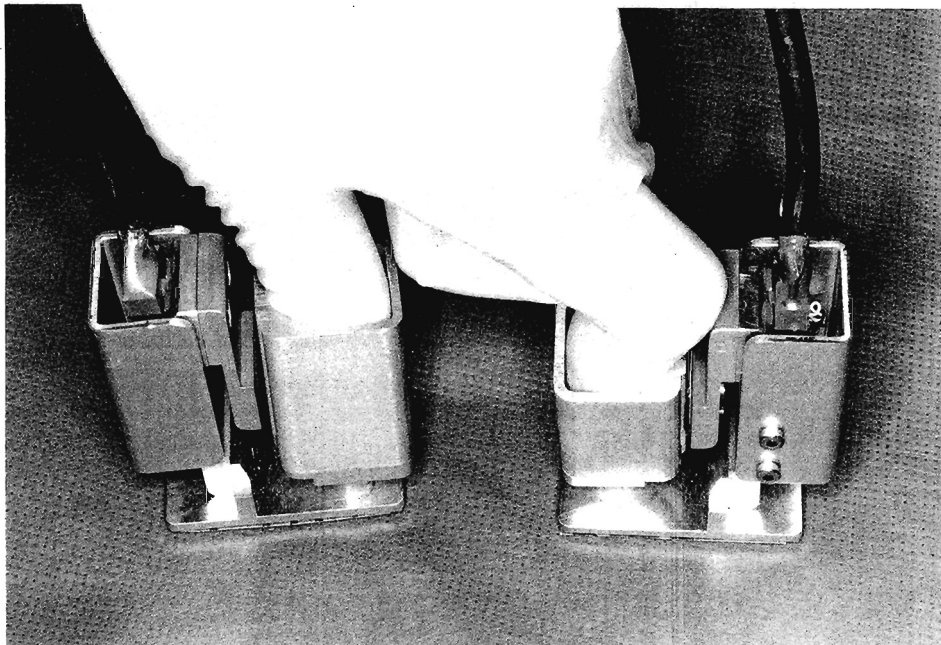


図4a：張力測定装置の拇指および示指の装着の実際

つまり指と皮膚表面との間に生じる力はメスのY軸方向（切開方向に対し直角方向に加わる力）の一方向の力を測定することになる。さらに皮膚表面に接したソケットの底部はソケットが皮膚の表面を滑ること無く、しかも切開する皮膚面に発生する力の伝達と測定を効率よく行うために紙やすりを接着した（図4b）。この紙やすりおよび底部の金属板は取り外しが可能で、滅菌消毒が可能である。

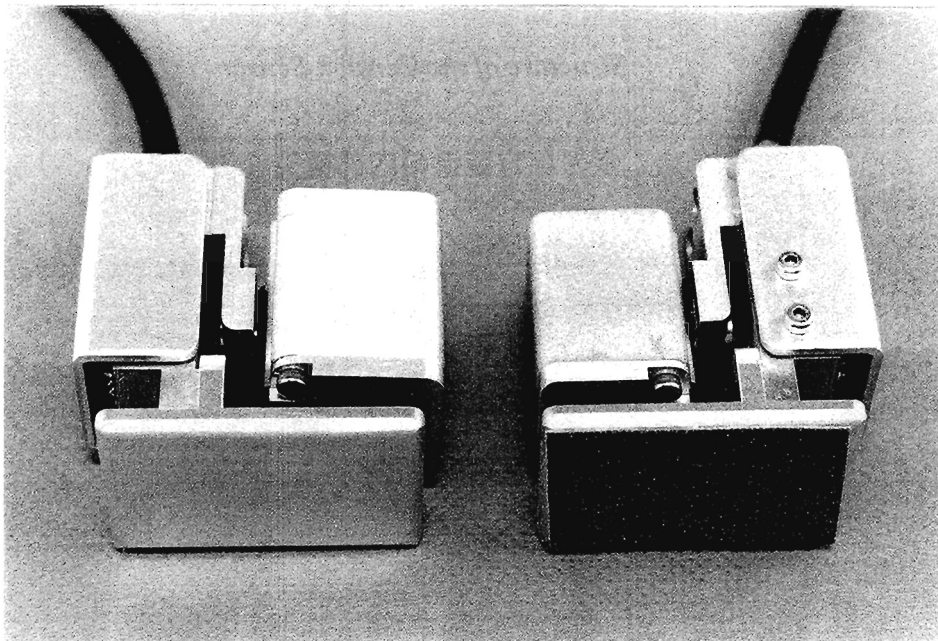


図4b：張力測定のための皮膚接触面への紙やすりの接着



### 3) 切開時の力の測定システム (図5)

力センシングメスおよび張力センサにより、測定されたメスの切開力と対象物を伸展する張力は、同時にモニタにスーパーインポーズされ、リアルタイムに各々のセンサの出力を観察することができる。さらに切開経過と張力との関係をコンピュータおよびビデオに記録し、結果を分析することが出来る。

## 2. 対象および方法

皮膚切開時の力学的計測には動物による基礎実験と実際の頭頸部の手術時のヒト皮膚切開の際の力の計測を行った。

### 1) 基礎実験：ニワトリ大腿部皮膚切開時の力の測定

脱毛したニワトリ大腿部皮膚45例を用いた。この実験では一定条件下にメスで押す力の測定と、切開時のメスを引く力の測定の2項目について計測を行った。またニワトリ大腿部の皮膚付き筋肉60例を用いて張力と切開力を測定した。

(1) 実験方法は図6 a、bに示すような装置を作製し、ニワトリ大腿部皮膚を幅25mm、長さ70mmに切り出し両端を紐付きのバイндаで固定し、下端の紐は一定量の重りで引き試料に一定の張力をかけた後に力センシングメスで切開した。なお対象のニワトリ皮膚を固定する際の張力は、一定条件下にメスで押す力の測定では1 N、4 N、6 N、10 Nの4段階に設定した。実際にはメス



図5：皮膚切開時の力学的測定システムの全景

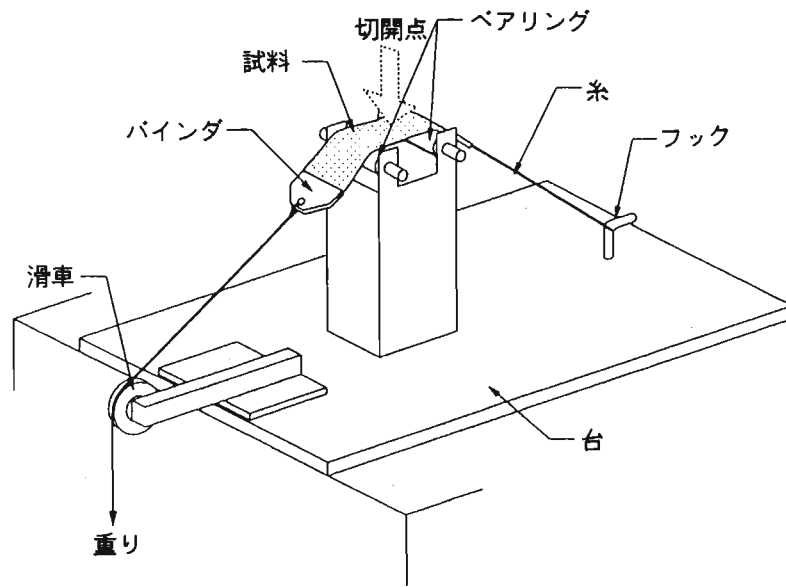


図6 a：皮膚切開の基礎実験の模式図

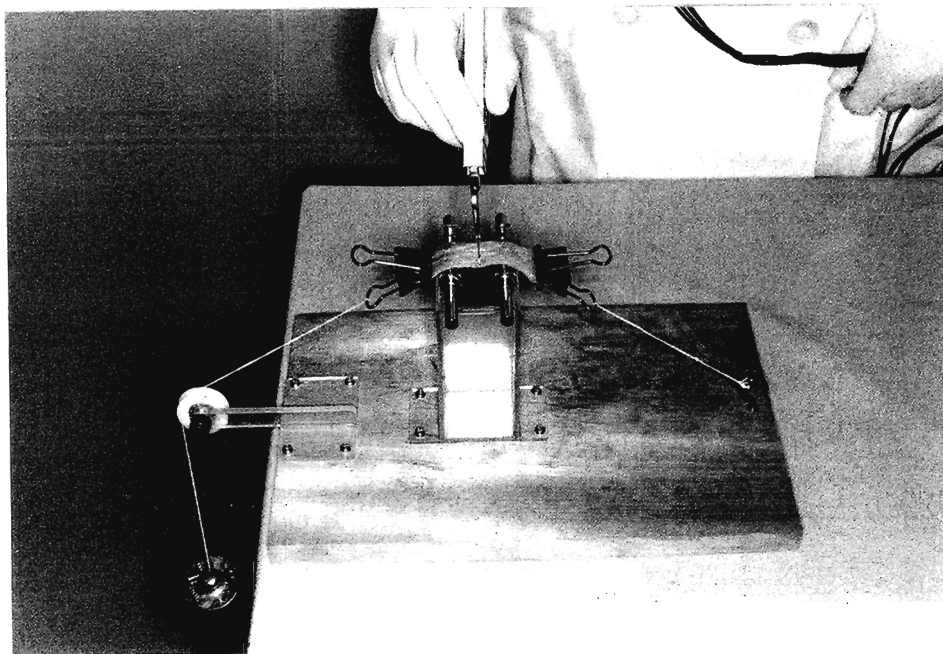


図6 b：皮膚切開の基礎実験の実験装置

を垂直方向（Z方向）に押しつける力 $F_z$ のみで対象を押し切ることができるかどうか実験を行った。切開時のメスはヒトの手術時と同じ角度、つまりニワトリ皮膚とメスの長軸のなす角度が30度になるように押し当てた。

（2）次いで引いて切るという通常の切開方法での張力の影響についての実験では、切開時の引く力の測定を行った。

この実験の方法は、1 Nの力でメスをニワトリ皮膚面に押しつけ、その後皮膚が切断されるまで一定の速度でゆっくり水平方向に引くことにより引く力の測定を行った。対象物にかかる張力は前の実験と同様に試料の幅25 mm、長さ70 mmに対して張力を1 N、4 N、6 N、10 Nの4段階に設定した。メスと切開する対象物のなす角度は30度とした。

（3）さらにニワトリ大腿部筋肉つき皮膚での切開力の測定では、実際の手術に準じて左手母指および示指を張力センサに入れた状態で皮膚を伸展し、右手に把持した力センシングメスにより切開を行い、切開時の張力とメスによる切開力を同時に測定した。なお張力については、張力なし、中等度張力（3 N）、最大張力（6 N）の3段階に設定し、張力の大小で切開力にどのような影響があるかを検討した。

## 2) 手術時ヒト皮膚切開における力の測定

ヒト頭頸部の手術時に皮膚切開を行った症例15例を対象とし、張力と切開力の同時測定を行った。手術症例の内訳は鼓室形成術7例、喉頭全摘出術3例、耳下腺腫瘍摘出術1例、気管切開口拡大術1例、頸部廓清術1例、顎下腺腫瘍摘出術1例、甲状舌管嚢胞摘出術1例であった（表1）。なお対象とした症例には手術前に予め測定の趣旨を説明し同意を得た。

方法は切開時の皮膚表面にはあらかじめ皮膚の変形の有無を確認するため、皮膚面にピオクタニンで1センチ角の格子図形を描いた（図7）。切開刀を右

手術名	症例数
鼓室形成術	7
喉頭全摘出術	3
耳下腺腫瘍摘出術	1
気切口拡大術	1
頸部廓清術	1
顎下腺腫瘍摘出術	1
甲状舌管嚢胞摘出術	1
計	15

表1：ヒト頸部手術時の皮膚切開症例

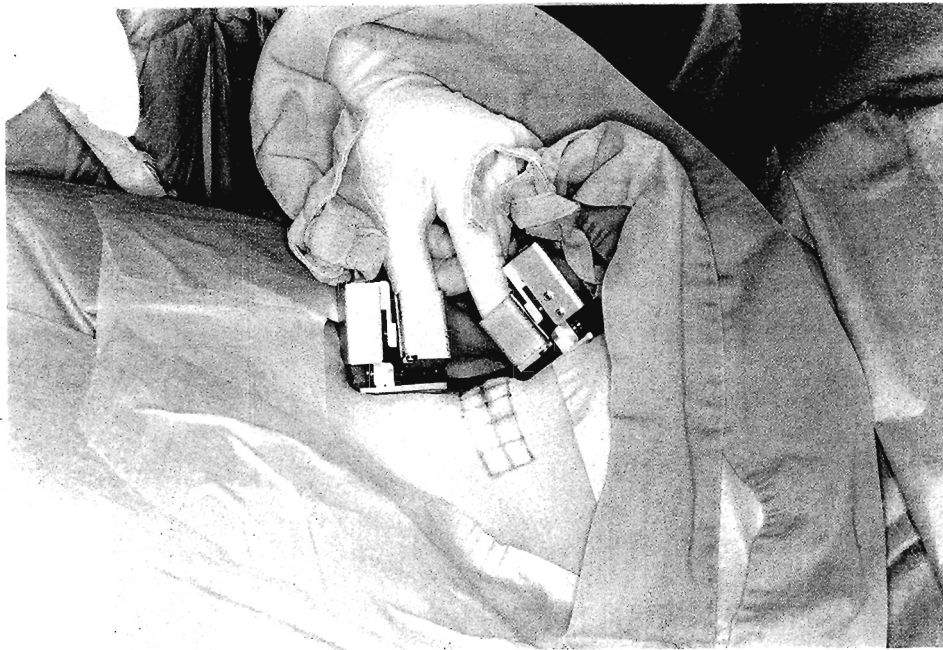


図7：ヒト頸部皮膚切開前の格子

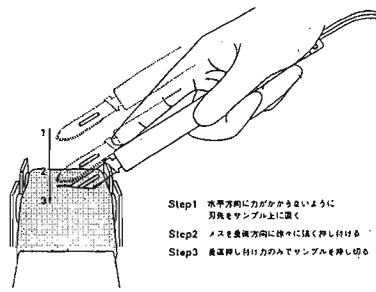


図 8：押し込み切開実験の操作

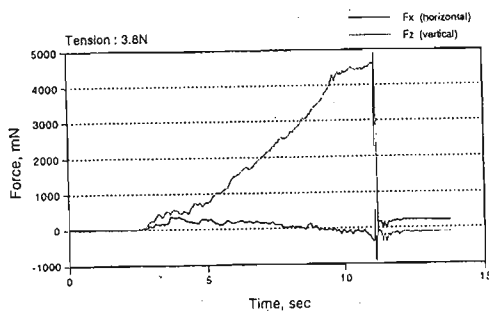


図 9 a：張力3.8Nの時の切開力（押し込み）

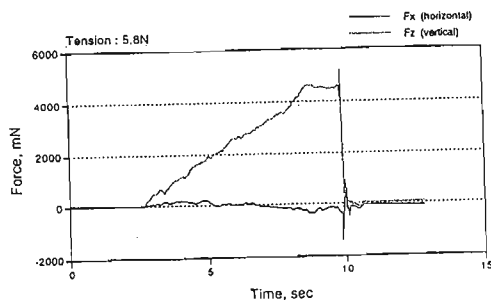


図 9 b：張力5.8Nの時の切開力（押し込み）

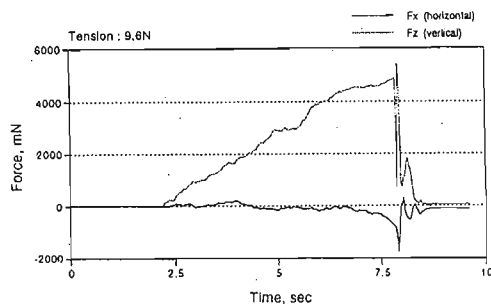


図 9 c：張力9.6Nの時の切開力（押し込み）

手に、左手の母指に $F_1$ 、示指に $F_2$ の張力センサを装着した。また皮膚切開と同時に切開力と張力はモニタに表示される。なお切開の種類は耳後切開、耳下部切開、頸部正中切開、顎下部切開、前頸部U字切開、側頸部切開について行った。

### 3. 結果

#### 1) 基礎実験

(1).ニワトリ大腿部皮膚切開：切開時の押しつける力の測定（図 8）

メスを垂直方向（Z方向）に押しつける力 $F_z$ のみを与えた場合、1 Nの張力下では押しつける力 $F_z$ のみでは皮膚を押し切ることは出来なかった。この場合、切開時の張力の大小には関係なく、4.5～5 Nのほぼ一定の垂直方向の力 $F_z$ がかかったとき突然切断された（図 9 a、b、c）。

この結果より、実際の切開においてはメスを垂直方向に押しつけ

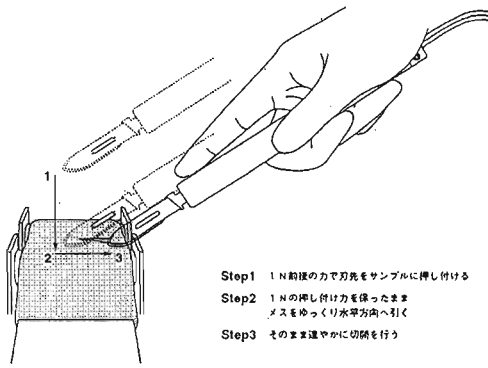


図10：水平切開実験の操作

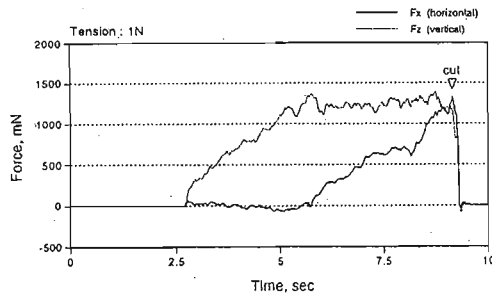


図11a：張力1Nの時の切開力

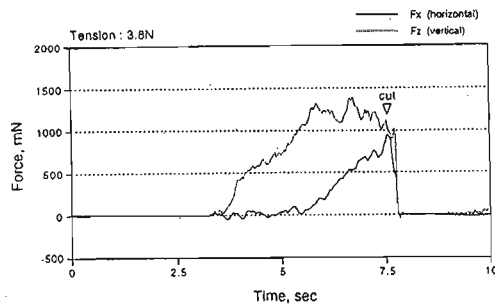


図11b：張力3.8Nの時の切開力

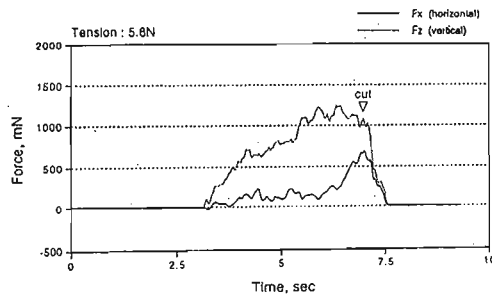


図11c：張力5.8Nの時の切開力

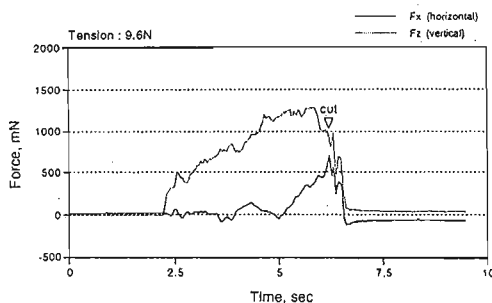


図11d：張力9.6Nの時の切開力

る力 $F_z$ のみではなく対象を押しつけた後水平方向に引く力 $F_x$ が必要であろうと推測された。このための実験として一定の押しつける力を与え、次いで引いて切るという通常の切開方法での張力の影響について実験した。

(2).切開時の引く力の測定 (図10)

それぞれの張力下における測定結果では押しつける力が同じ時水平方向に引く力は、大きな張力が作用しているほど小さい力で切開され、また切開に要する時間は短いという結果が得られた (図11a, b, c, d)。しかし張力が6 Nと10 Nとでは切開に要する力と時間はほぼ同じ計測値で、明らかな差は無かった。

(3).ニワトリの大腿部筋肉つき皮膚切開力の測定

実際の手術に準じてニワトリの筋肉つき皮膚切開を行った時の張力と切開力の関係を示すと (図12)、張力をかけた場合は、左手の母指のかける張力 $F_1$ と示指のかける張力 $F_2$ は

ほぼ等しく、この張力は切開の前に急速に上昇し切開が進むにつれ徐々に低下していった。図12の下段のように切開においては最初にメスを垂直方向に押し込む力 $F_z$ が上昇し、次いで水平方向に引く力 $F_x$ が上昇した。また張力が大きいほど切開時の力は小さく、切開に要する時間は短いという結果であった。

## 2) 手術時ヒト皮膚切開における力の測定

### 結果(表2)

手術症例15例のうち、副咽頭間隙型耳下腺腫瘍の症例において側頸部を切開した時の張力と皮膚切開時の力の結果を示す(図13)。上段のように張力は、基礎実験の時と同様に切開を数回に分けて行うが、その都度母指にかける張力 $F_1$ と示指にかける張力 $F_2$ の上昇がみられ、 $F_1$ と $F_2$ は、ほぼ等しくその大きさは約6 Nであった。この6 Nという計測値は基礎実験で切開時にかけた時の最適な張力の値とほぼ一致した。切開前に切開創に直角方向に引っ張られていることがピオクタニンで描いた格子図形の変形より観察された。

甲状腺管嚢胞摘出術症例(図14)では、下段に示すように切開については最初にメスを垂直方向に押し込む力 $F_z$ が上昇し、次いで水平方向に引く力 $F_x$ が上昇した。また切開時の力は皮膚では大きく、脂肪では切開力は小さいことがわかった。

頸部皮膚切開では母指にかける張力 $F_1$ と示指にかける張力 $F_2$ はほぼ等しくその大きさは約6 Nであった。

鼓室形成術の耳後部皮膚切開では母指にかける張力 $F_1$ と示指にかける張力 $F_2$ がほぼ等しい症例もあるが、母指または示指がかける張力が大きい症例もみられた。頸部皮膚切開と同様に、耳後部皮膚切開については最初にメスを垂直方向に押し込む力 $F_z$ が上昇し、次いで水平方向に引く力 $F_x$ が上昇した。

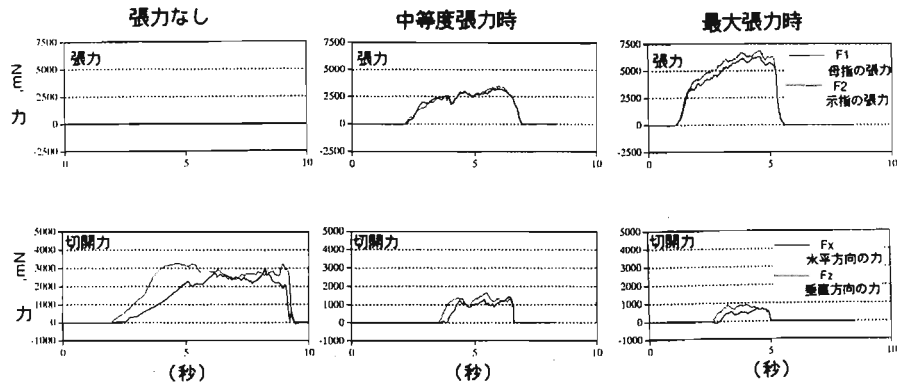
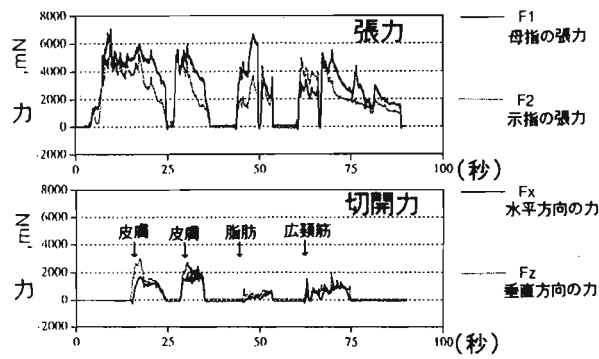


図12：ニワトリ大腿部筋肉付き皮膚切開



切開創の最大の深さ 10 mm  
 切開創の最大の幅 12 mm

図13：耳下腺腫瘍の皮膚切開  
 (70歳女性)



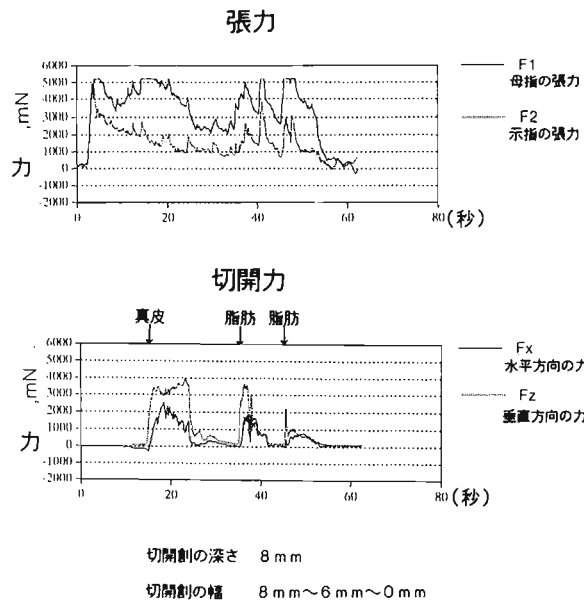


図14：甲状舌管嚢胞の皮膚切開  
(48歳女性)

症例	手術	年齢・性	F1 (最大値) mN	F2 (最大値) mN	FX (最大値) mN	FZ (最大値) mN
1	顎下腺腫瘍摘出術	45♀	5000	5000	1800	2600
2	甲状舌管嚢胞摘出術	48♀	5000	5200	2500	4000
3	耳下腺腫瘍摘出術	70♀	6900	6000	2000	2800
4	気切口拡大術	34♀	4100	5800	1100	3100
5	頸部廓清術	54♂	5800	6200	3500	3100
6	喉頭全摘出術	71♂	3000	4000	2600	2700
7	鼓室形成術	37♀	7400	7000	3400	3300
8	鼓室形成術	76♀	13000	4000	2800	3500
9	鼓室形成術	28♀	4000	7500	3500	1700
10	喉頭全摘出術	57♂	5000	5800	3000	3800
11	鼓室形成術	67♂	8000	7400	3900	4700
12	鼓室形成術	44♀	7000	13000	2000	2800
13	鼓室形成術	58♀	5000	12500	2800	3300
14	喉頭全摘出術	62♂	7600	6000	3200	2800
15	鼓室形成術	52♀	4000	9000	2600	3000

表2：ヒト頸部手術時の皮膚切開症例の張力および切開力

#### 4. 考察

メスを用いて手術時に切開を行う場合、術者の指で切開部位に直角に皮膚に張力をかけることが経験的に行われている。しかしその意義については単に切開の容易さとされており力学的な計測はされていなかった。本実験では2軸の力センサを装備した外科用メス（力センシングメス）および張力センサを作製し、まず皮膚のみの切開時における力学的計測を行うためニワトリの皮膚を垂直に一定の重りをつけて垂直に引き張力をかけても張力の大小に関係なく一定の張力になると全てが切開された。さらに切開時には押し込みのみでなく、引く力の必要性が確認でき、その力は張力と反比例していた。しかし皮膚と筋肉から構成され、その設置状況が本来の切開時のものと同様の場合の力学測定では、皮膚のみと同じく押し込んで水平に引くという動作の順に力が加わり、この力は張力が大きい程小さい力で切開ができた。

この切開に関する力学測定は、ヒトの耳後部および頸部手術時の切開についても同様に計測を行ったところ、耳後部では皮膚は皮下組織が極めて薄く骨面に直接接している事と耳介側の力が掛かっていることにも関係しているであろう。またこのような曲面の皮膚を切開する場合、拇指は対象物を固定する役割が主となり示指が伸展する役割を果たしているためと考えられる。張力センサは対象物を水平方向に伸展する力（水平方向の力）を検出しているためそのような値が得られたと考えられる。十分な張力を加えずに切開を行うと、切開に必要な作業力を発生させるのに時間がかかることが分かった。このことは十分な張力を加えることによって切開時に切開刀と対象物との摩擦を減らすことが可能となり対象物をほとんど変形させずに切開することが出来る。つまり、十分な張力を対象物にかけることにより円滑な切開を行うことが出来、さらに創傷の治癒過程にも影響が生じるであろうと考えられる。

以上より張力のかけ方として、切開創と垂直の方向に等しい力をかけることは切開と同様に熟練しておく必要がある。今回開発した力センシングメスおよび張力センサを使用することにより、将来的には新人医師の外科的手技の教育やロボットによる遠隔操作による手術などに応用し得る可能性がある。

## 5. まとめ

手術時の切開を力学的に解析する目的で2軸力センシングメスと張力センサを作製した。

まず、ニワトリの皮膚付き筋肉に基礎的実験として、切開では切開刀により押し込んでからさらに引く力と、この時に切開方向と直角の方向に張力をかけることにより切開が容易に行われることが確認出来た。これらの実験よりこれまで医師の経験や主観でしか述べられていなかった手術時の切開および張力のかけかたを具体的な数値により評価することが出来た。

なお本研究は、手術対象の患者のインフォームドコンセントを得たものであり、東京女子医科大学倫理委員会で承認の上行われた。