

## 体内臓器計測用プローブの開発と柔らかさ測定

### Development and measuring method of softness probes for internal organs measurement

○酒井陽介\*, 長尾光雄\*\*, 横田理\*\*

○Yosuke Sakai\*, Mitsuo Nagao\*\*, Osamu Yokota\*\*

\* 日本大学大学院工学研究科, \*\* 日本大学工学部

\*Graduate school, College of Engineering, Nihon University

\*\*College of Engineering, Nihon University

キーワード: 硬さ試験機 (Hardness Tester), 圧子 (Indenter), 風船 (Balloon), 圧力 (Pressure),  
平坦面 (Flat plate), 柔らかさ (Softness)

連絡先: 〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地

日本大学 工学部 機械工学科 工作研究室

酒井陽介, Tel.: (024) 956-8772, Fax.: (024) 956-8860, E-Mail: g15305@cc. ce. nihon-u. ac. jp

#### 1. はじめに

今日の医療現場において、臓器の硬さあるいは柔らかさは、医師の触診によって測られるのが一般的である。しかし触診は、医師の経験や主観的な感覚によるため、硬さを定量的に評価することができない。そこで測定機器を用いて、硬さを数値化することが求められている。

ある物体の硬さとは、それが他の物体を押し付けたとき、前者の呈する抵抗力の大小で表されるものと定義されている<sup>1)</sup>。現在金属やセラミックスの硬さ測定には、圧子を押し付けて変形を与え、その変形量から硬さを測

定する方法などが用いられている<sup>2)</sup>。またゴム、合成樹脂などの硬さ測定には、圧子を押し込み、その圧子の侵入深さから硬さを測定する方法がある<sup>3)</sup>。

これらの圧子はダイヤモンドや鋼球で作られていて非常に硬く、被測定物よりも硬い。それに対して柔らかい圧子でそれよりも硬い被測定物の硬さを測定する方法は今のところ行われていない。

そこで被測定物よりも柔らかい圧子としてバルーンを用いて、被測定物の硬さを測定する装置を製作した。この装置を使って食品の硬さを測定したので報告する。

## 2. 測定原理および膜理論

### 2.1 測定原理

測定原理を図1に示す。柔らかいバルーンとそれよりも硬い被測定物を接触させると、図1(a)のように風船は凹面に変形する。このときバルーンの内圧( $P_B$ )は被測定物の内圧( $P_O$ )よりも低い。接触を維持しながらバルーンの内圧を静的に加圧するに従い、図1(b)のように接触面は凹面から平坦になる。さらにバルーンの内圧を高めて被測定物よりも高圧にすると、図1(c)のように接触面は凸面になる。

図1(b)で接触面が平坦のとき、バルーンの内圧は被測定物の内圧と等しく、互いの力はつりあっている。このときのバルーンの内圧を被測定物の柔らかさ(kPa)と定義する。

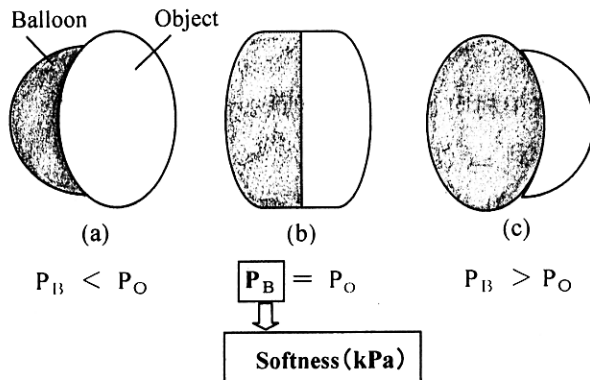


図1. 測定原理

### 2.2 膜理論

バルーンの薄膜論を図2に示す。バルーンの内圧、外圧にそれぞれ $P_1$ 、 $P_2$ が加わり、かつ $P_1 > P_2$ なる条件を与える。またバルーンに働く応力を $\sigma$ 、バルーンの半径、厚さをそれぞれ $R$ 、 $t$ とすると、図2(a)において、

$$\pi R^2 (P_1 - P_2) = 2\pi R \sigma t \quad (1)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{2\sigma t}{R} \quad (2)$$

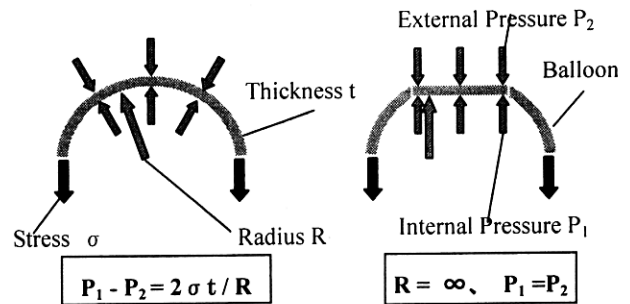
ここで、図2(b)のように、バルーン内に作

動流体が注入されたとき、バルーンと被測定物の接触面が平坦になると、式(2)は、

$$R = \infty, \quad \frac{2\sigma t}{R} \doteq 0 \quad (3)$$

$$P_1 = P_2 \quad (4)$$

すなわち、バルーンの接触面が平坦になったときには、バルーン内の圧力は外部の圧力と等しくなるので、バルーン内の圧力が被測定物の柔らかさを測定することになる。



(a) Curved surface balloon (b) Flat plate balloon

図2. 膜理論

## 3. 測定装置

### 3.1 装置の構成

図3に実験装置の概略図を示す。本体は制御部、平坦検出部、表示部およびバルーンから構成されている。制御部は、バルーン内を加圧するエアコンプレッサ、圧力を調整するレギュレータ、バルーン内圧を測定する圧力センサからなる。平坦検出部は、レーザからバルーン内膜までの距離を測定する平坦検出レーザ、平坦検出レーザを平坦になる接触面に対して平行に往復移動させる駆動部、その移動距離を測定する変位センサから構成されている。表示部では、平坦検出部の二つの変位センサからの信号をパソコンとデジタルスコープで読み取り、バルーンと被測定物の接触面形状を二次元波形として表示する。バルーンは、下向きに凸の形に設置されている。バルーン上方にはアクリル材が設け

られていて、平坦検出レーザのレーザ光が透過できるようにしている。

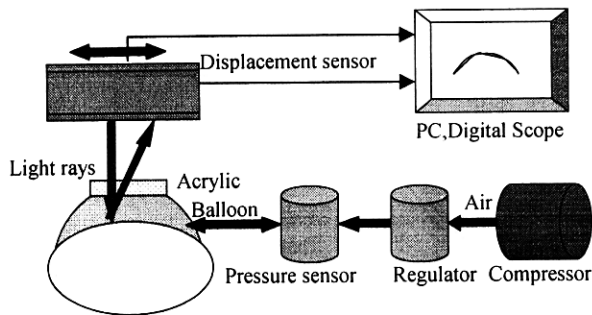


図 3. 装置の構成

### 3.2 バルーン的设计

バルーンはシリコンゴムであり、色は白色、ゴム硬度は 30° と 50° である。バルーン形状は半球型で、その内径は 8mm、膜厚は 0.1mm と 0.3mm の二種類を製作した。図 4 にバルーンの写真と正面図を示す(硬度: 30°, 膜厚: 0.1mm のバルーン)。

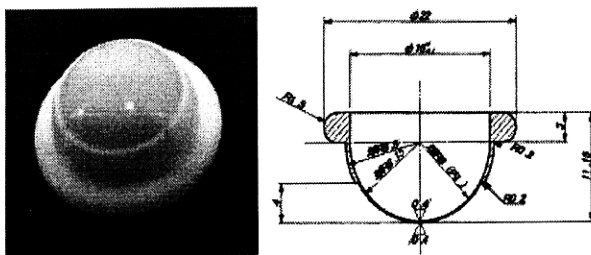


図 4. バルーンの形状

### 4. 被測定物および実験方法

被測定物にはペンシルゴム、ソーセージ、コンニャク、木綿豆腐、ゼリーを用いた。ペンシルゴムの形状は中空円筒形で直径 6mm、肉厚 0.3mm、長さ 30mm である。その他の被測定物は中実円筒形で直径 6mm、長さ 30mm である。

実験方法を下記に示す。平坦検出レーザの走査方向と被測定物の円周方向を合わせた被測定物を圧力が負荷されていない状態の

バルーンに 0.5mm 食込ませる。この状態からバルーンが被測定物に食込むまで、バルーンの内圧を 0.5kPa ずつ加圧する。このバルーンの内圧を負荷していく工程を加圧工程と呼ぶ。その後 0.5kPa ずつ 0kPa まで減圧する。この内圧を徐荷していく工程を減圧工程と呼ぶ。

### 5. 実験結果と考察

一例として図 5 にペンシルゴムとバルーンの接触面の変形過程を示す。使用したバルーンはゴム硬度 30°、膜厚 0.1mm である。接触面が平坦になった圧力は、加圧工程で 4.5kPa、減圧工程で 3.5kPa である。この圧力がペンシルゴムの柔らかさである。

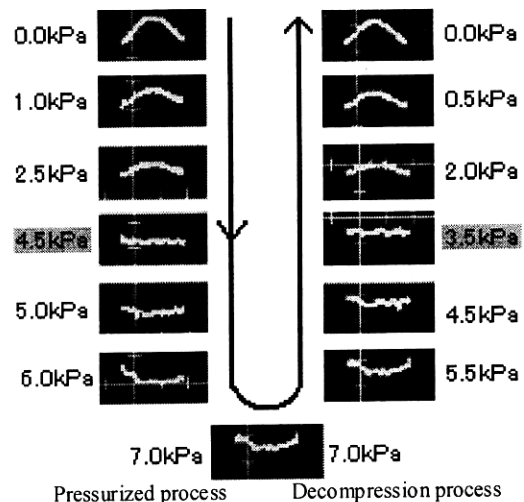


図 5. ペンシルゴムとバルーンの接触面の変形過程

ここで加圧工程と減圧工程に圧力差が現れるのは、ペンシルゴムが柔らかい粘弾性体であるためのヒステリシス現象によるものと考えられる。このことを図 6 のバルーンの内圧と押し込み距離の関係から説明する<sup>4)</sup>。押し込み距離とは、バルーン内圧 0kPa におけるバルーンと被測定物の接触面の最高位置を原点とし、内圧が負荷したときの原点からの

移動距離を示す。図6を見ると、加圧工程と減圧工程では、同じ軌跡をたどらないヒステリシス現象が顕著に現れている。

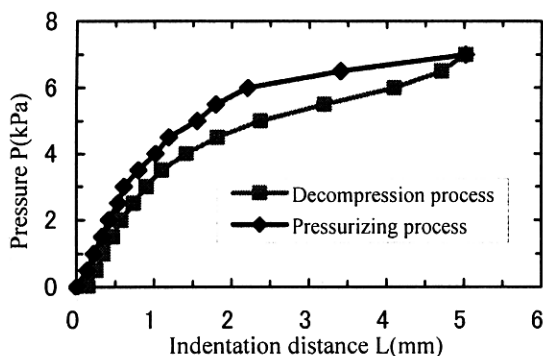


図6 バルーンの内圧と押し込み距離

またこのヒステリシス現象は、圧子のバルーン自体が粘弾性体であることも影響していると考えられる。そこでバルーンの特性を調べた。その結果を図7に加圧工程から減圧工程に折返す圧力を変えたバルーンの内圧と伸びの関係として示す。ここで伸びとは、下向きに凸の状態を設置してあるバルーンに内圧が負荷したときに、内圧 0kPa 時のバルーンの最低位置からどれだけ伸びたかを示す。使用したバルーンはゴム硬度 50°、膜厚 0.1mm である。図7よりバルーン自体もヒステリシス現象を示していることがわかる。また加圧工程での伸び(伸長)は折返し圧力に関係なくほぼ同一の曲線で表わされるのに対して、減圧工程の伸び(収縮)は折返す圧力によって異なっている。

これらのバルーンの特性から、被測定物の柔らかさは、再現性のある加圧工程のみで測定することが適切であると考えられる。よって前述したペンシルゴムの柔らかさは、加圧工程のみで判断し 4.5kPa となる。ペンシルゴム以外の被測定物の柔らかさも同様に測定したので、その結果を表1に示す。ソーセージは硬過ぎて使用したバルーンでは測定

できなかつた。ゼリーは柔らか過ぎて使用した圧力計では測定できなかつた。

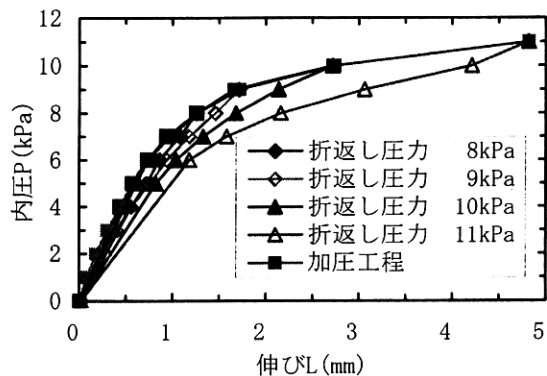


図7. バルーンの特性

表1. 各被測定物の柔らかさ

被測定物	柔らかさ (kPa)
ペンシルゴム	4.5
ソーセージ	7.0 以上
コンニャク	1.5
木綿豆腐	1.0
ゼリー	0.1 以下

## 6. おわりに

- (1) 被測定物の硬さよりも柔らかい圧子材料を用いて、被測定物の硬さを調べることができる。
- (2) 加圧工程での平坦になる圧力を被測定物の柔らかさとする。

## 7. 参考文献

- 1) 機械工学便覧基礎編、A4 材料力学、日本機械学会編 (1984)
- 2) 寺澤正男、岩崎昌三：硬さのおはなし (改訂版)、日本規格協会 (2001)
- 3) JIS K 6253(1997) 加硫ゴム及び熱可塑性ゴムの硬さ試験方法
- 4) 占部誠亮、高橋栄、戸原春彦、山崎升：ゴムの性質と加工、高分子工学講座 7、地人書館 p61