

# 接触・非接触式柔らかさ測定方法および試験装置の開発

酒井陽介 長尾光雄 横田 理 (日大工)

## Development of softness measuring method and testing equipment with contact and non-contact

\*Y. Sakai, M. Nagao and O. Yokota (College of Engineering, Nihon University)

**Abstract** - Two kinds of testing equipments have been developed for measuring the softness of sort objects. One has been measured the softness of sort objects by contact method using balloon and the other has been measured it by non-contact method using compressed air. We found that the softness of sort objects can be measured with these testing equipments.

**Key Words:** Testing equipment, Softness, Contact, Non-contact, Balloon, Compressed air

### 1 緒言

現在,日本人女性が一生のうちで乳がん罹患する割合は約25人に1人で[1],2003年の乳がんによる死亡者数は9,802人,死亡率は15.2%であった[2].予防方法は現在のところ発見されておらず,早期発見・早期治療が最善法である.乳がんの初期症状の8割が「しこり」であり,自分で乳房を触ることで唯一発見できるがんである.また病院における初期診断でも触診が一般的である.しかし触診は主観的な方法のため定量的に評価できない.そこで硬さまたは柔らかさを定量的に測定できる機器が必要となる.

そこで本研究では,二つの測定方法および装置を提案する.一つは,風船を使用した接触による測定方法で軟体物の柔らかさを測定する装置である.他方は,医療全般において接触感染に対する認識が高まっているので,圧縮空気を利用した非接触による測定方法で軟体物の柔らかさを測定する装置である.

本稿では,接触式および非接触式による軟体物の柔らかさを測定する原理,装置の構成,および実験結果について報告する.

### 2 測定原理

接触式柔らかさ測定および非接触式柔らかさ測定の原理について以下に述べる.

#### 2.1 接触式柔らかさ測定の原理

測定原理をFig.1 に示す[3].半球状のバルーンと丸みを帯びた被測定物を接触させる.このときバルーンの内圧( $P_B$ )を被測定物の内圧( $P_O$ )よりも低くしておくと,バルーンは凹面に変形する(Fig.1 (a)).接触を維持しながらバルーンの内圧を静的に加圧していくと,接触面は凹面から平坦になる(Fig.1 (b)).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,接触面は平坦から凸面になる(Fig.1 (c)).ここでFig.1 (b)のように接触面が平坦になったとき,バルーンの内圧と被測定物の内圧は等しく,互いの力はつりあっている.このバルーンの内圧を被測定物の柔らかさ(kPa)と定義する.

バルーンの薄膜論をFig.2 に示す[4].バルーンの内圧を $P_1$ ,外圧を $P_2$ とし,かつ $P_1 > P_2$ なる条件を与える.またバルーンの薄膜に働く応力を $\sigma$ ,バルーンの半径

を $R$ ,バルーンの厚さを $t$ とすると, Fig.2 (a)の状態は,

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

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

と表される.次に Fig.2 (b)のように,バルーンと被測定物との接触面が平坦になると,式(2)は,

$$R = \infty$$

$$P_1 - P_2 = \frac{2 \sigma t}{\infty} = 0 \quad (3)$$

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

となる.すなわち,バルーンの接触面が平坦になったときバルーンの内力は外力と等しくなるので,バルーンの内圧を計測することから被測定物の圧力がわかる.

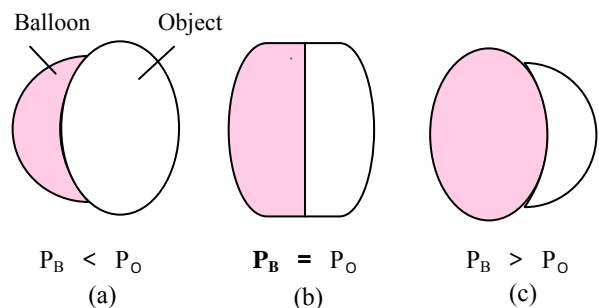


Fig.1 Measurement principle  
Thickness  $t$

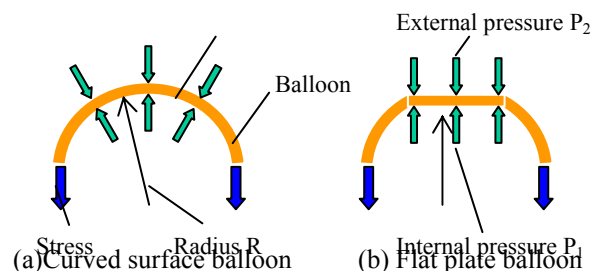


Fig.2 Theory of balloon

## 2.2 非接触式柔らかさ測定原理

測定原理は、金属の硬さを測定するブリネル硬さ試験にヒントを得ている。ブリネル硬さは、超硬合金球を試料に押し込み、その試験力をできたくぼみの表面積で除した値と定義している[5]。本測定原理を Fig.3 に示す。空気圧が P の圧縮空気を平坦な軟体物に向かって吹き付ける。すると軟体物は空気圧を受け、平坦から凹状のくぼみに変形する。このとき軟体物に加わる荷重を F とする。くぼみが球状であると仮定し、くぼみの直径を d、くぼみの深さを h とすると、くぼみの表面積 S は

$$S = \pi dh \quad (5)$$

となる。軟体物に加わる荷重をくぼみの表面積で除した値を柔らかさ  $H_a$  と定義すると

$$H_a = \frac{F}{S} \quad (6)$$

$$= \frac{F}{\pi dh} \quad (7)$$

となる。

上記の結果、軟体物の柔らかさ  $H_a$  は軟体物に加わる荷重 F、くぼみの直径 d、およびくぼみの深さ h を計測することから求められる。

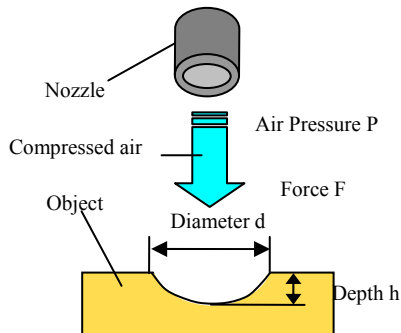


Fig.3 Dent produced by compressed air

## 3 装置の構成

接触式柔らかさ測定装置および非接触式柔らかさ測定装置の構成について以下に述べる。

### 3.1 接触式柔らかさ測定装置の構成

接触式柔らかさ測定装置の構成を Fig.4 に示す。圧縮空気がエアコンプレッサからレギュレータを介して、下向きに凸の状態を設置してあるバルーンに流入する。バルーン上部はアクリル材で密封してある。その上方にはバルーン膜の内側までの距離を計測する平坦検出レーザーがある。平坦検出レーザーはモータおよびカムから構成された駆動部によって往復運動し、その移動距離は変位センサで計測される。この平坦検出レーザーおよび変位センサの信号を読み取り、バルーン接触面の形状を二次元波形としてデジタルスコープに表示する。バルーンの下方にはXYZステージがあり、ここに被測定物を載せる。

バルーンは半球状の形状をしており、その内径は 8(mm)、膜厚は 0.1(mm) である。材質はシリコンゴム、ゴム硬度は 30°、色は白色である。Fig.5 にはバルーンの写真および正面図を示す。

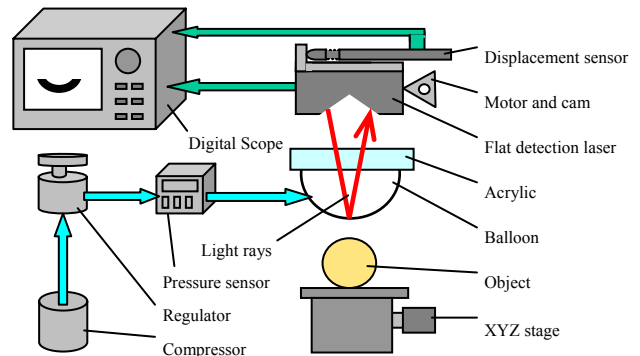


Fig.4 Summary of measuring equipment

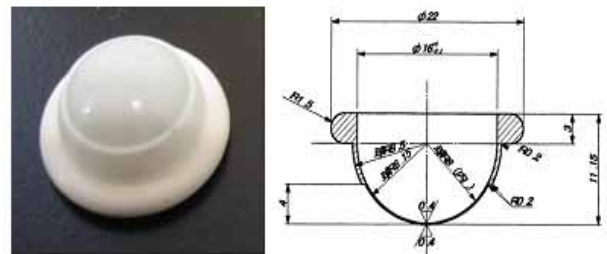


Fig.5 Form of balloon

### 3.2 非接触式柔らかさ測定装置の構成

非接触式柔らかさ測定装置の構成を Fig.6 に示す。圧縮空気がエアコンプレッサからレギュレータを介してノズルから吹き出し、軟体物にくぼみを発生させる。そのときの空気圧は圧力センサで、軟体物に加わる荷重は荷重計で計測する。くぼみの直径およびくぼみの深さは上方に設置してある形状計測レーザーで計測し、テレビモニタに表示する。

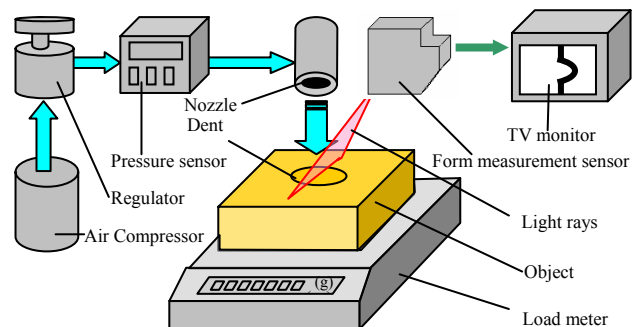


Fig.6 Summary of measuring equipment

## 4 実験方法

接触式柔らかさ測定装置および非接触式柔らかさ測定装置を用いて、軟体物の柔らかさを測定する方法について以下に述べる。

#### 4.1 接触式柔らかさ測定装置を用いた測定方法

身近にある軟体物の柔らかさを測定した。軟体物にはゼリー、木綿豆腐、コンニャク、ペンシルゴム、およびソーセージを用いた。軟体物の形状は直径6(mm)、長さ30(mm)の円筒形とした。ただしペンシルゴムは肉厚0.3(mm)の中空円筒形である。

Fig.7に実験方法を示す。XYZステージに軟体物を設置する。このとき軟体物の円周方向と平坦検出レーザーの走査方向とを合わせる(Step 1)。XYZステージを上昇させ軟体物とバルーンを接触させる(Step 2)。接触させた位置から5(mm)上昇させる(Step 3)。このときバルーンには内圧が負荷されていない状態なので軟体物がバルーンに食い込み、バルーン接触面は凹面となる。その後バルーンの内圧を加圧していき、バルーン接触面が平坦になる圧力を求めた(Step 4)。

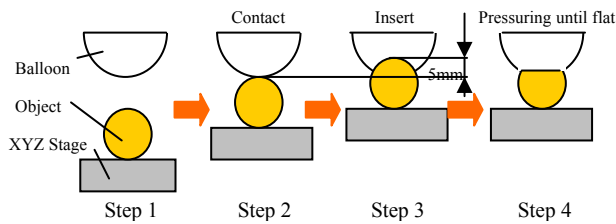


Fig.7 Experiment process

#### 4.2 接触式柔らかさ測定装置を用いた測定方法

##### 4.2.1 濃度の異なるゼラチンの柔らかさ測定

装置の基本的な特性を調べるため、濃度の異なるゼラチン 2~5(%)を用いて、空気圧に対する柔らかさを求めた。

Fig.8に実験方法を示す。ノズルに対して垂直に被測定物を配置する(Step 1)。圧縮空気を軟体物に向かって吹き付けてくぼみを作る(Step 2)。軟体物に加わる荷重、くぼみの直径、およびくぼみの深さを計測し、その測定値を式(7)に代入して軟体物の柔らかさを求めた(Step 3)。

実験条件としてノズルの口径は 1.0(mm)、ノズル先端から被測定物表面までの距離は 5.0(mm)、被測定物が受ける荷重、くぼみの直径、およびくぼみの深さの測定は圧縮空気を吹き付け始めてから 30(s)後とした。

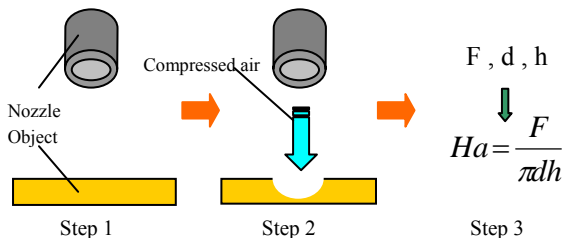


Fig.8 Experiment process

##### 4.2.2 軟体物の柔らかさ測定

身近にある軟体物の空気圧に対する柔らかさを測

定した。軟体物にはプリン、絹ごし豆腐、コンニャク、スポンジ、およびマシュマコを用いた。実験方法および実験条件は4.2.1と同じである。

#### 5 実験結果

接触式柔らかさ測定装置および非接触式柔らかさ測定装置を用いて、軟体物の柔らかさを測定した結果について以下に述べる。

##### 5.1 接触式柔らかさ測定装置を用いた実験結果

Fig.9はペンシルゴムの柔らかさ測定におけるバルーンの内圧およびそのときのバルーン接触面の形状をデジタル波形で表示したものである。バルーンの内圧が0(kPa)のとき、ペンシルゴムがバルーンに食い込み、バルーン接触面は凹面になっている。バルーンの内圧を加圧していくと接触面の形状は緩やかになっていき、4.5(kPa)のとき平坦になった。この4.5(kPa)がペンシルゴムの柔らかさである。さらに加圧するとバルーン接触面は下に凸の形状になっていく。バルーンの内圧の方がペンシルゴムよりも大きくなったので、バルーンがペンシルゴムに食い込んでい

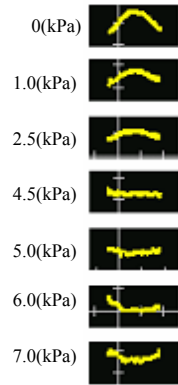


Fig.9 Form change of balloon contact surface

る状態である。

他の軟体物の柔らかさを測定した結果をFig.10に示す。ソーセージにおいては、柔らかさを求めることができなかった。バルーンの内圧を7.0(kPa)以上にするるとバルーンが急激に膨らみ、バルーンが破裂するおそれがあったので測定を中止した。よってソーセージの柔らかさは7.0(kPa)以上であると推定できる。

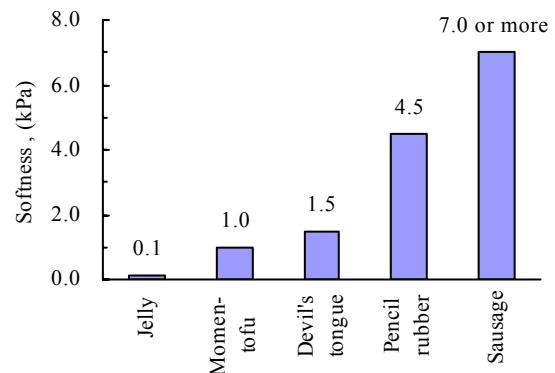


Fig.10 Softness of object

##### 5.2 非接触式柔らかさ測定装置を用いた実験結果

##### 5.2.1 濃度の異なるゼラチンの柔らかさ測定

Fig.11は、ゼラチン2(%)が空気圧P=10(kPa)を受けたときのくぼみの様子を形状計測レーザーで計測し

て、テレビモニタに表示したものである。ゼラチンが圧縮空気を受け、くぼみができていることがわかる。

Fig.12 は圧縮空気を吹き付けたときにゼラチンが受ける荷重を荷重計で測定した結果である。空気圧が増加するとともに荷重も比例して増加した。

Fig.13 には空気圧に対するくぼみの直径, Fig.14 には空気圧に対するくぼみの深さを計測した結果を示す。くぼみの直径およびくぼみの深さは濃度が低いほど、つまり柔らかいほど大きく、また空気圧が高いほど大きい。



Fig.11 Display of dent

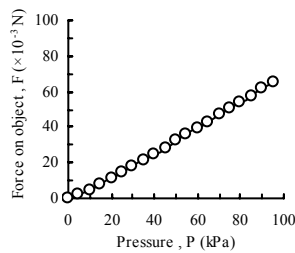


Fig.12 Force on object

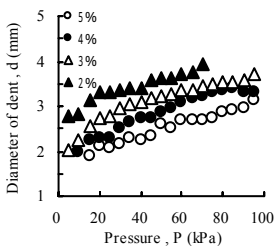


Fig.13 Diameter of dent

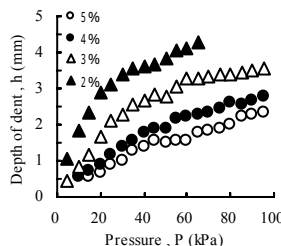


Fig.14 Depth of dent

Fig.15 は Fig.12, 13, 14 のデータを式(7)に代入して、空気圧に対する濃度の異なるゼラチンの柔らかさを求めた結果である。硬さは濃度が高いほど、また空気圧が高いほど大きい。よって濃度の異なるゼラチンの硬軟を識別できると考える。

また濃度が小さいとき、高压領域において柔らかさを求めることができなかつた。これは低濃度ゼラチンが大きな空気圧に耐え切れず破断したためである。逆に濃度が大きい場合でも、低压領域において柔らかさを求めることができなかつた。低い空気圧では高濃度ゼラチンに発生するくぼみが小さいので、くぼみの直径およびくぼみの深さを測定できないためである。

### 5.2.2 軟体物の柔らかさ測定

Fig.16 は空気圧に対する軟体物の柔らかさを測定した結果である。最も硬い軟体物はマシュマロであり、順にスポンジ、コンニャク、絹ごし豆腐、プリンとなった。よって軟体物の硬軟を識別できると考える。

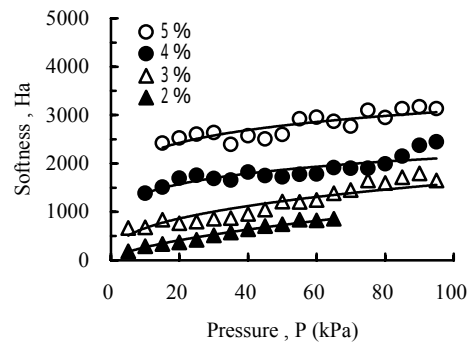


Fig.15 Softness of gelatin

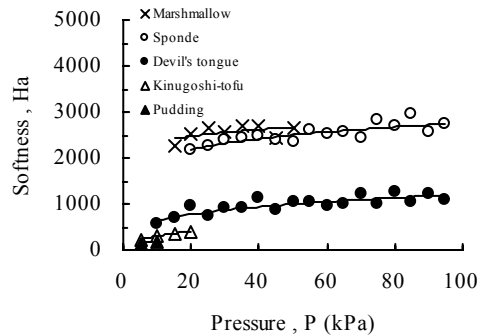


Fig.16 Softness of object

## 6 結言

軟体物の柔らかさを測定するために接触式および非接触式の二種類の試験装置を開発した。

接触式柔らかさ測定装置は、軟体物を食い込ませて凹面状になったバルーンの内圧を加圧していき、バルーンと軟体物との接触面が平坦になったときのバルーンの内圧を計測することから軟体物の柔らかさを測定した。

非接触式柔らかさ測定装置は、圧縮空気を吹き付けて軟体物にくぼみを発生させ、軟体物に加わる荷重およびくぼみの表面積を計測することから軟体物の柔らかさを測定した。

接触式および非接触式の装置を用いて、軟体物の柔らかさを求め、硬軟を識別できると考える。

## 参考文献

- [1] 久道茂, がん検診[からだの科学増刊], pp.77-80, 日本評論社, 1999.
- [2] 厚生労働省, 平成 15 年度人口動態調査, 死因簡単分類別にみた性別死亡数・死亡率(人口 10 万対).
- [3] 特許出願番号 2002-234850, 柔らかさ測定方法及び柔らかさ測定装置.
- [4] 拓植俊一, 流体の科学(上), pp.164-168, 日刊工業新聞社, 1994.
- [5] JIS Z 2243 プリネル硬さ試験 試験方法, 日本規格協会, 1999.