

バルーンを用いた柔らかさの測定方法と装置の試作

横田 理 長尾光雄（日本大学工学部）

1. 緒 言

現在、JISに制定されている硬さ試験法は、ブリネル、ビッカース、ロックウェル、ヌープ、ショアの5種類であり、圧子を試料表面に押し込んだときのくぼみや鋼球のはね上がり高さなどを計測して硬さを求めている。硬さの定義は「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」と述べられていて^(1, 2)、金属やセラミック材料の硬さ評価に採用されている。また、ゴム、合成樹脂などの高分子材料の硬さ試験機は、押針を被測定物に押し込み変形させ、その押針の侵入深さを測定し、それを数値化する方法で硬さを求めている⁽³⁾。

ところで、硬さの対語「軟らかさ」あるいは「柔らかさ」の定義は曖昧で、その測定方法や尺度は確立されていない。広辞苑によると、「軟らかい」という言葉は力を加えると変形しやすく元に戻らない場合との意を表し、「柔らかい」は力を加えて変形しても元に戻る場合によく使われると書かれている。したがって、「軟らかさ」は、材料自体が変形して砕けたり、傷が付くので、塑性的特性を表す言葉と考える。「柔らかさ」は、変形後に形状が概ね元に戻り、傷がなく、機能が維持できるので、粘弾性的性質を表すため生体機能計測や食品品質には「柔らかさ」を使うことが適切であろう。

今日の食品分野や生体医療分野では、省人化、衛生面、感染等の諸問題から、ディスポーザブル用具が使われている。すなわち、滅菌の必要性がないこと、緊急時でもすぐに対応できること、種々の形状、サイズ、物性が安定して得られること、低価格などが挙げられ、使用した用具の廃棄化が急速に進展している。例えば、ディスポーザブル医療用具の一つとして使用されているゴムは、強度、弾性、耐熱性、安全性を含む高性能化、そして感光性、親水性、生体適合性を含む高機能化が付与されている。ゴムの用途^(4, 5)は、注射器やバイアル瓶栓などの生体組織に直接接触しないもの、コンタクトレンズや気管チューブなどの皮膚、粘膜に接触するもの、人工肺用膜、人工弁、人工心臓のように体内に短長期間埋め込まれるもの、センサとして用いられるものに分

けられ、ゴム材は主にポリウレタン、シリコンゴム、天然ゴム、合成ゴムが生体適合材として採用されているので、医療用材料に占めるゴムの比重は大きい。

硬さを測定する圧子あるいは押針はダイヤモンド、超硬合金鋼などで作られていて、被測定物よりも硬い材料であり、硬い押し込み材料で柔らかい材料に変形を与え、その変形量から硬さを測定している。また、柔らかい材料の測定には、PVDF (Polyvinylidene Fluoride) フィルムを受感材として用いた皮膚性状計測用センサ^(6, 7) や圧電素子を用いた皮膚表面の圧電型バイプロメータ⁽⁸⁾ 等がある。これらの試験方法は、センサ自体が被測定物よりも硬く、また被測定物に接触させるため、被測定物を損傷させてしまう可能性や感染の危険性が高い。したがって、センサが柔らかく、かつディスポーザブル材料であることが望まれるが、柔らかい圧子材料を用いて硬い被測定物を測定する試験方法は今のとこと行われていない。

そこで、ここでは被測定物の硬さよりも柔らかい圧子材料を用いて、被測定物の柔らかさを調べる測定原理、およびその測定方法を提案する^(9, 10)。これに基づいた試験機を製作し、食品や生体部位の軟質材の測定を行った。その結果、圧子よりも柔らかい材料の測定が可能であり、またその性能及び特長を確認することができたので報告する。

2. 測定原理

軟らかい圧子としてバルーンを用い、この圧子で圧子よりも硬い被測定物を測定する原理⁽¹⁰⁾をFig.1に示す。ゼリー、こんにやく等の軟体物、胃、腸等の生体部位を対象にした被測定物にバルーンを面接触させる。このときバルーンの圧力 P_a を被測定物のそれ P_0 よりも低く維持しておくと、接触面はバルーン側に凹面で、 $P_0 > P_a$ となる(Fig.1(a))。次に接触を維持しながら、バルーン内圧を静的に加圧して、接触面をバルーン側に凹状から平坦またはほぼ平坦にすると、 $P_0 \simeq P_a$ になる(Fig.1(b))。さらにバルーンの圧力が被測定物のそれよりも高くなると、接触面は平坦またはほぼ平坦からバルーン側に凸状で、 $P_0 < P_a$ となる(Fig.1(c))。ここで、接

接触面は平坦またはほぼ平坦になったときのバルーンの圧力を被測定物の柔らかさ (kPa) と定義する. 一方, これとは逆に, 被測定物の抵抗力よりも高い圧力のバルーンを被測定物と面接触させ, 接触面がバルーンに凸面から平坦またはほぼ平坦になるようにバルーン内圧を静的に減圧させることにより, 柔らかさを測定することもできる (測定順序は Fig. 1 (c) → (b) → (a)).

Fig. 2 には, バルーンの膜理論を示す. バルーンの内圧, 外圧にそれぞれ P_0 , P_a が加わり, かつ $P_0 > P_a$ なる条件をあたえる. また, バルーンに働く応力を σ , バルーンの半径, 厚さをそれぞれ R , t とすると, Fig. 2(a) において,

$$\pi R^2 (P_0 - P_a) = 2 \pi R t \sigma \quad (1)$$

$$P_0 - P_a = 2 \sigma t / R \quad (2)$$

ここで, Fig. 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あるいはほぼ平坦になると, 式 (2) は

$$R = \infty, 2t/R \approx 0 \quad (3)$$

$$P_0 = P_a \quad (4)$$

すなわち, バルーンの接触面が平坦あるいはほぼ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.

3. 測定装置

Fig. 3 には, 実験に用いた物体の柔らかさを測定する本システムの構成を模式的に示す. 本試験装置は, 被測定物に面接触させるバルーン, バルーン内を加圧・減圧するコンプレッサとレギュレータ, バルーン内の圧力を測定する圧力センサ, バルーンと被測定物との接触面が平坦またはほぼ平坦になったことを検出する赤色半導体レーザー ($\lambda = 650\text{nm}$) を利用した平坦検出部, 平坦検出部をモータおよびカムから構成された駆動部, 水平移動距離と変位センサの信号をデジタルスコープに入力する表示部から構成されている. なお, バルーンの下方向にある XYZ ステージに被測定物を載せ, 高さの調整を行う.

測定装置本体の拡大写真を Fig. 4 に示す. バルーンは本体中央に下向きに凸の状態を設置しており, バルーン内側までの距離 (垂直距離 y) を検出する平坦検出レーザーはバルーンの上方向約 40mm の位置にある. この設定は平坦検出レーザーの検出中心距離が 40mm の仕様による. モータとカムで構成されている駆動部は平坦検出レーザーをガイドレールに沿って水平方向に 4mm 往復移動させる. レーザの移動距離 (水平距離 x) は変位センサで測定する. なお, アクリル板をバルーン上部に設置して, アクリル板にチューブを取り付け, このチューブからの空気はエアコンプレッサからレギュレータを介してバルーン

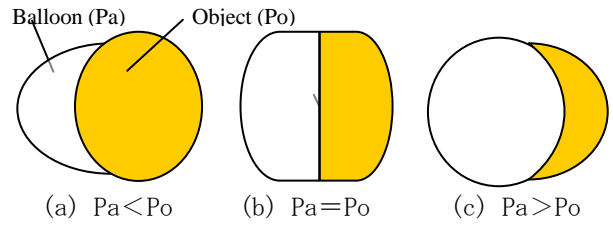


Fig.1 Principle of measurement

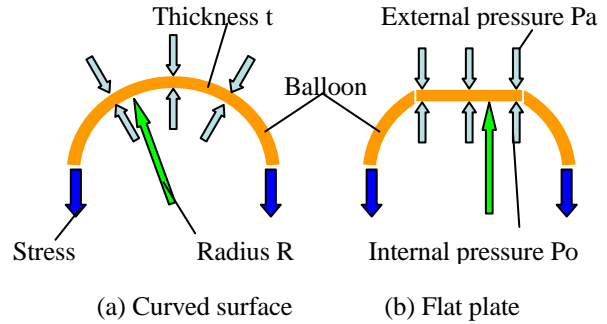


Fig.2 Theory of balloon

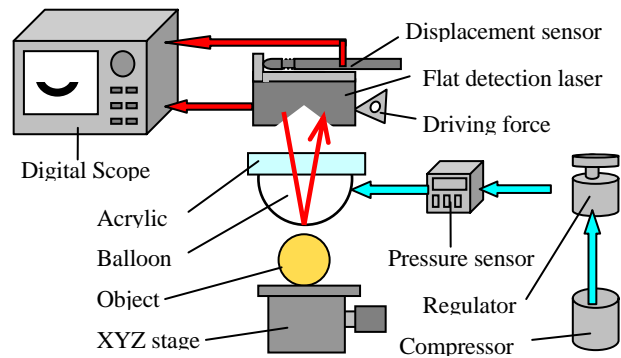


Fig.3 Summary of measuring equipment

内に流入出して密封される. このときレーザー光はアクリル板を透過してバルーンの変形を検出できる.

4. 実験結果

4.1 バルーンの形状

先端形状が平坦と半球型のバルーンを金型により製作して, 被測定物を測定した. その結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5(a) の平坦型バルーンは被測定物の形状が上向きに凸の場合には, バルーンと被測定物と接触するので計測が可能である. しかし被測定物の形状が平坦あるいは下向きに凹の場合には, バルーン取り付け金具が妨げとなりバルーンと被測定物との接触が難しく, 計測が不可能となった. 一方, Fig. 5(b) のバルーン先端の形状を膨らみのある半球形に改良したバルーンの場合, 被測定物の形状に囚われずに計測が可能である. この半球型バルーンの内径の半径は 8mm とし, 膜厚は 0.1mm と 0.3mm のものを製作した. 材質はシリコンゴムで, ゴム硬度は膜厚が 0.1mm のものは 20, 30, および 50°, 膜厚

が 0.3mm のものは 30, および 50° を採用した。

バルーンの表面性状を検討するために、金型表面を鏡面にして作製した光沢のあるバルーン, および金型表面にブラスト加工を施して作製した凹凸表面のあるバルーンにおいて、レーザ光による両者間のバルーン特性を調べた。バルーン半径は 8mm, 膜厚は 0.1mm, 材質はシリコンゴム, ゴム硬度は 20° のものを用いた結果、レーザ光による半球形状に大きな違いはなかった。しかし、バルーン内圧を高めていくとブラストを施したバルーンはブラスト無しのそれよりも早く破裂した。そのときの破裂圧力は、ブラスト有りでは 7.0kPa, ブラストなしでは 11.5 kPa であったので、以下の実験では表面は光沢のあるバルーンを用いた。

4.2 バルーンの色彩

レーザ光で被測定物の変位や距離を計測する場合、被測定物の色彩により投光量に対する受光量の割合が影響すると考えられるので、色彩の異なるバルーンを作製した。用いたバルーンの色は 3 種類 (白, 赤, 黒) であり、それらの色彩の違いによる受光波形の形状を調べた。得られた結果を Fig. 6 に示す。Fig. 6 より、白色バルーンによる受光量の変化は明確にバルーン半円形状を示している。しかし、黒色や赤色ではバルーン形状が明確に示されず、分解能も劣っている。すなわち、白色は全ての光の波長を反射するため光量が多くなるので、測定対象物の色は白色が最も分解能を向上させることになる。よってこれらのことを総合的に考慮し、色彩は白色のバルーンを用いた。このバルーンは形状、肉厚ともに均整であり、傷、気泡、斑点などの使用上有害な欠陥はない。また使用済みのバルーン、汚れや異物混入に対するバルーンの脱着は容易に行える。

4.3 バルーン硬度による押し込み距離変化

バルーンの内圧に対するバルーンの伸びを調べた。Fig. 7 に示すように、圧力 0kPa のときのバルーンの膨らみを基準に、バルーンに内圧を加えて押し込み距離を測定した。その後、折返し圧力までバルーンを加

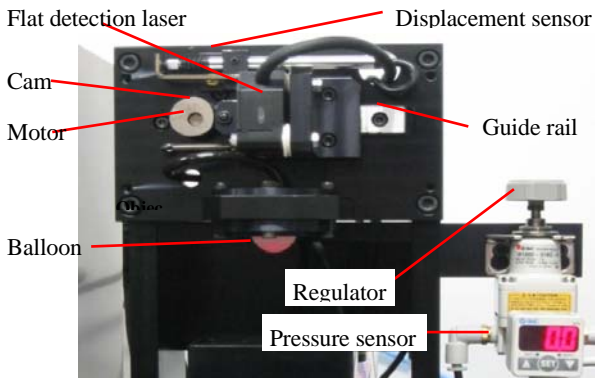


Fig.4 Assembly drawing of main part of measuring equipment

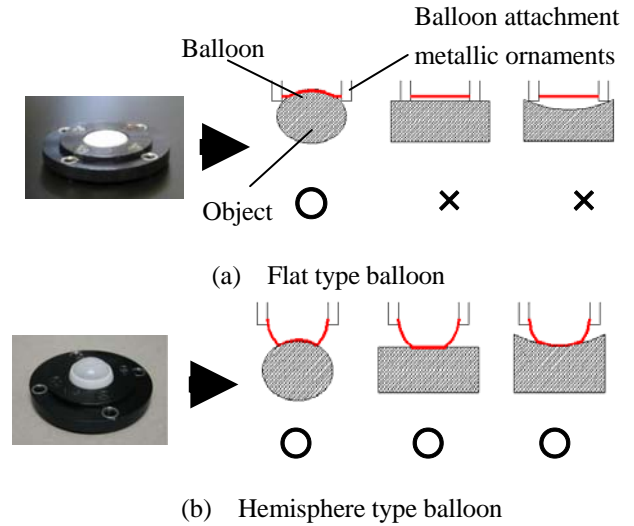


Fig.5 Shape of the balloon

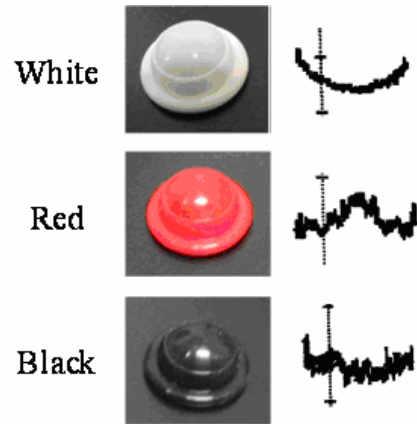


Fig.6 Form measurement color of balloons using detection laser

を測定した。その後、折返し圧力までバルーンを加圧させて計測した後バルーンを減圧したときのバルーンの縮み量も計測した。バルーンは膜厚 0.1, と 0.3mm, ゴム硬度は 30° と 50° の 4 つの組み合わせの組合せのものを使用した。なお、バルーンに空気を注入する行程を加圧行程、バルーンから空気が流出する行程を減圧行程と呼ぶことにする。

膜厚と硬度の組み合わせによるバルーン内圧と押し込み距離との関係を示したのが Fig. 8 である。図よりバルーンの種類により圧力と押し込み距離との関係が異なっている。膜厚 0.3mm, 硬度 50° のバルーンを例にすると、バルーン内圧を 20kPa 付近まで負荷すると押し込み距離は線分 OA のような線形的に増加する。さらにバルーンに内圧を加えると、曲線 AB のように押し込み距離が急激に伸びる。さらにバルーンを加圧すると、曲線 BC のように押し込み距離は減少する。折返し圧力である C 点からバルーン内圧を減圧すると、CD の曲線を描き、加圧行程の曲線 CB 上を戻らない。さらに減圧すると、曲線 DE のように押し込み距離は急に減少する。その後 E 点から 0kPa まで減圧すると、線分 E0 のような線形性を示して原点に戻る。

したがって、バルーンに空気の流入と流出を行うと、バルーンの内圧と押し込み距離との関係には可逆的な伸縮性を示さないヒステリシス現象が発生した。なお、面積OABCは加圧により被測定物に与えられた仕事であり、面積CDEOは減圧により被測定物のなした仕事であり、グループOABCDEOは被測定物の流動による粘性仕事⁽¹¹⁾と考えられる。なお、膜厚 0.1mm, ゴム硬度 30° のバルーンは圧力 5kPa で破裂した。

4.4 バルーンの折返し圧力による変化

折返し圧力の違いによるヒステリシスループへの影響を調べた。バルーンは鉛直方向に凸であり、空気をバルーンに 0kPa より 0.5kPa ごと負荷させ、任意の折返し圧力に達した後、バルーンの内圧を 0.5kPa ごと 0kPa まで減圧した。なお、折返し圧力を 6, 7, 8, 9, 10, 11, および 17kPa の 7 通りとした。使用したバルーンは膜厚 0.3mm, ゴム硬度 50° のものである。

Fig. 9 にその結果を示す。図より、バルーンの弾性限界圧力は 3.0kPa であるが、加圧行程は折返し圧力にかかわらず同じ加圧曲線上をたどる。しかし、減圧行程では折返し圧力が異なると伸びはそれぞれ異なる曲線をたどり、バルーンの内圧と押し込み距離との関係には可逆的な伸縮性を示さないヒステリシス現象が発生した。さらに、折返し圧力が大きくなるにつれてヒステリシス現象が大きく現れる傾向にある。なお、ゴムの硬度が大きくなるほど、また膜厚が厚くなると、バルーンの伸びは小さかった。そこで、以下の実験では 0.3mm の膜厚、50° のゴム硬度のバルーンを用いた。

4.5 ペンシルゴムの柔らかさ測定

被測定物として臓器のように柔らかい市販のペンシルゴムを用いて柔らかさを測定した。ペンシルゴムは直径 6.0mm, 膜厚 0.3mm, 長さ 30mm の中空円筒形状であり、ゴムの色は臓器に近い赤色を選択した。Fig. 10 にペンシルゴムとその測定例を示す。XYZ ステージ上に載せた被測定物としてのペンシルゴムをバルーンに接触させ、ペンシルゴムがバルーンに 5mm 食い込むまでステージを上昇させた。このとき 0.5kPa ごと、最大 7.0kPa まで順次負荷させた。その後バルーン内圧を 0.5kPa ごと 0kPa まで減圧。バルーン内圧は無負荷状態のため、接触面はバルーン側の凹面となる。その状態よりバルーンにした。その結果を Fig. 11 に示す。

Fig. 11 より、バルーン内圧が 0kPa 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。バルーン内圧を 0.5kPa ごと加圧していくと接触面の凹みは緩やかになっていき、

4.5kPa の加圧では接触面はほぼ平坦あるいは平坦になった。さらに加圧するとバルーン接触面は下向

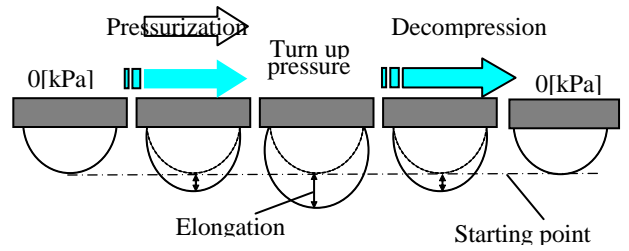


Fig.7 Measurement of swelling elongation by internal pressure of balloon

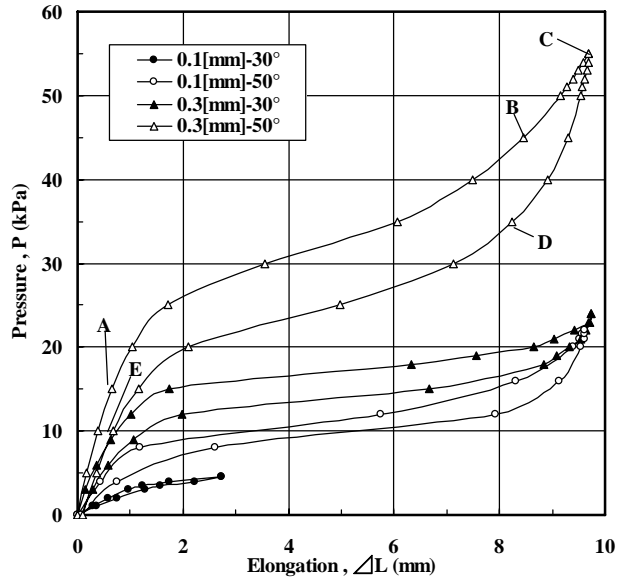


Fig.8 Hysteresis property for various balloons

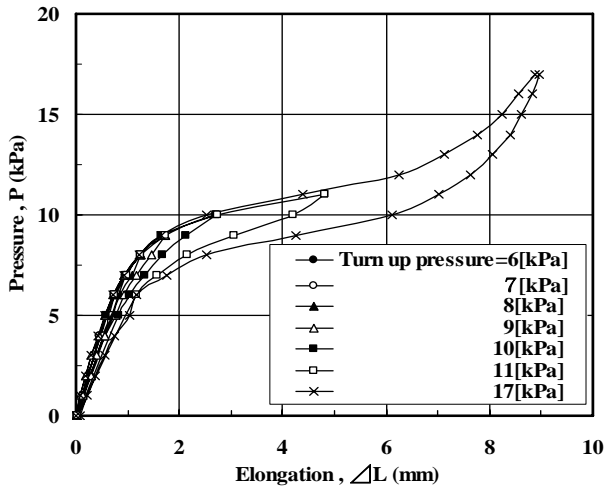


Fig.9 Hysteresis property by balloon internal pressure

向きの緩やかな凸の形状になっている。バルーン内の圧力がペンシルゴム内圧よりも大きくなったため、バルーンがペンシルゴムに食い込み、接触面がバルーン側の凸面になる。さらに 7.0kPa までの加圧行程ではバルーンは明確な凸面になる。その後 7.0kPa よりバルーンを減圧すると凹面の高さが小

さくなり、3.5kPa の圧力では平坦、あるいはほぼ平坦になった。さらに減圧するとバルーン接触面は平坦から凹面の形状になっていき、0kPa でほぼもとの形状に戻った。なお、接触面が平坦、あるいはほぼ平坦になるときの加圧行程の圧力、および減圧行程の圧力は異なっている。バルーン接触面が平坦になったときのバルーン圧力を被測定物の柔らかさと定義したので、ペンシルゴムの柔らかさは加圧行程で4.5kPa、減圧行程で3.5kPa となる。しかし、加圧行程と減圧行程の圧力と伸びにはヒステリシスループが生じているので、今後の柔らかさ測定は再現性のある加圧工程のみで行うことにし、ペンシルゴムの柔らかさは加圧行程での4.5kPa となる。

4.6 加圧行程での柔らかさ測定

今までに述べたように、バルーンにはヒステリシス特性があるため、加圧行程と減圧行程での柔らかさの値は異なる。ここでは、加圧行程での柔らかさを求めることにし、被測定物としてゼリー、木綿豆腐、コンニャク、およびソーセージの食品とタコ、マグロ、ホタテ、およびハマチの刺身類を用いた。被測定物の形状は、直径6.0mm、長さ30.0mmの中実円筒形である。バルーン接触面は鉛直方向に凸であり、この状態の0kPaよりバルーンに0.5kPa ごと、最大5.0kPa まで負荷させた。得られた結果をTable1 に示す。測定面が平坦になる圧力は、ゼリーは0.5kPa以下、木綿豆腐は1.0kPa、コンニャクは1.5kPa、ソーセージは5.0kPa以上となった。また刺身類の柔らかさを求めると、タコとホタテは0.5kPa以下であり、マグロとハマチは1.0kPaを示したので、同じ柔らかさになる。なお、タコとホタテの柔らかさは0.5kPa以下であった。本装置では明確に測定できなかった。そこで、今後、ゴム硬度の低いバルーンの開発と0.5kPa以下の圧力を計測できるレギュレータを採用して新しい試験機を製作する予定である。

5. 結 言

1. 半球型バルーンを用いて、接触面形状が平坦になることで柔らかさが測定できた。
2. バルーンはヒステリシスループを描くので、加圧行程と減圧行程での柔らかさは異なる。
3. 折返し圧力にかかわらず、加圧行程では同じ曲線上をたどるので、柔らかさ測定は加圧行程で計測するとよい。
4. 4種類の軟体物の中で、最も柔らかい軟体物はゼ



Fig.10 The measured object which cut into the balloon at 0.5 mm

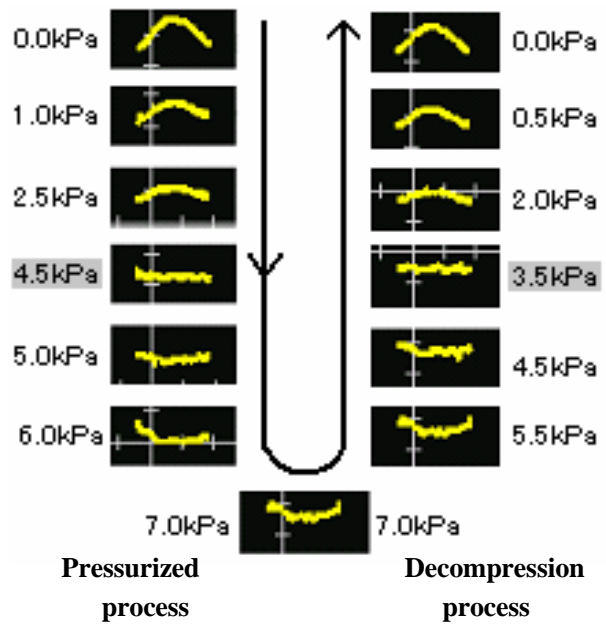


Fig.11 Form change of balloon contact surface

Table 1 Softness by flat pressure

	Object	Softness [kPa]
Soft object	Sausage	5.0 or more
	Pencil rubber	4.5
	Devil's tongue	1.5
	Momen-tofu	1.0
	Jelly	0.5 or less
Row fish	Young yellowtail	1.0
	Tuna	1.0
	Scallop	0.5 or less
	Octopus	0.5 or less

リー、続いて木綿豆腐、コンニャク、ソーセージの順となった。

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), 147. 2) 寺澤正男他: 硬さのおはなし, 日本規格協会(2001), 102. 3) JISK6253(1997) 4) 化学工学便覧(改訂5版), 化学工学協会(1988), 1304. 5) 湯治準一郎他: 感圧ゴムセンサによる多機能的材質識別(硬さと熱伝導性の場合), 計測自動制御学会論文集, 33-7, (1997), 582. 6) 田中真美他: 皮膚性状計測用センサの開発研究, 日本機械学会論文集 C69-6853, (2002), 157. 7) 田中真美: 皮膚性状計測用センサの開発, 設計工学 39-3, (2004), 134 8) 尾股定夫: 圧電型パイロメータによる軟組織の硬さ測定とその解析, 医用電子と生体工学, 28-1 (1990), 8. 9) 日本大学, 特開 2004-77182(2004), 柔らかさ測定方法及び測定装置 10) M. NAGA0: Development of Softness Equipment and Softness Measuring Method, The Inter. J. of INGENIUM, 359-365(2005). 他