

肌の弾力の測定について

概要

「肌の弾力」の定義は必ずしも明確にはなっていない。「硬さ」と「弾力」が混同されることがしばしばあるが、「硬さ」は力を加えたときの変形のし難さと考えられ、「弾力」は、変形を生じたあとの復元のし易さと考えられる。つまり、「弾力」の測定は、復元性を測定することであり、物体の粘弾性特性を測定することになる。

物体の硬さを表す材料定数の一つとして弾性率の一つであるヤング率がある。「接触インピーダンス法」を利用すれば、ゴムから金属のヤング率を簡単に測定することができる。

一方、物体の粘弾性特性は、物体を変形させたときの応力（反発力）が時間とともに減少するいわゆる応力緩和特性を測定することによって得られる。

ビーナストロンは、ヤング率の測定と応力緩和特性の両方の特性の測定が可能な装置であり、「肌の弾力」を定量的に評価することができる装置である。

1. 硬さと柔らかさ

パソコンに「かたい」と入力すると、似たような意味の漢字として、「硬い」、「堅い」、「固い」、「難い」などが表示され、同様に、「やわらかい」と入力した場合にも、「柔らかい」と「軟らかい」の二つの漢字が表示され、目的とする漢字がどれかを迷うことがある。

これだけ漢字が多いと言うことは、やはり、物の「かたさ」や「やわらかさ」を表すことがとても難しいと言うことを示しているように思える。

例えば、鍋や食器に使われているアルミニウムは、プラスチックの容器と比較して間違いなく硬いが、焼き芋を包むアルミ箔になると、プラスチックの容器より柔らかいと感じる。つまり、「硬さ」と「柔らかさ」は、その物の形や使われる場所と場合によって意味が違ってしまいうため、定義することは意外と難しい。

やはり、硬さや、柔らかさについての説明としては、「同じ力を加えたときに変形する量が大きい方をより柔らかく、変形量が小さい方が硬いとする。」と言う説明が誰でもが納得しやすい説明と思われる。

2. 硬さを表す弾性率（ヤング率）

力を加えると変形し、その変形量が加えた力に比例し、力を除くともとの形に戻るような材料のことを弾性体と呼んでいる。後で述べるように、厳密な意味での弾性体は存在しないようであるから、特に理想弾性体と呼ぶ方がふさわしいかも知れない。

図1に示すように、断面積が S 、長さが L の直方体の端面から荷重 F を印加したとき、直方体の長さが ΔL だけ縮んだとすると、そのときの荷重 F は、(1)式で与えられる。

$$F = E \cdot \frac{\Delta L}{L} \cdot S \quad (1)$$

つまり、一定量の縮み ΔL を生じさせるための荷重 F は、縮み量 ΔL と断面積 S に比例

し、長さ L に反比例する。このときの比例定数 E がヤング率と呼ばれる物体に固有の材料定数である。(1)式からわかるように、ヤング率 E が大きいほど、 ΔL の縮みを生じさせるためにより大きな荷重 F が必要になり、その物体がより硬いことを示している。

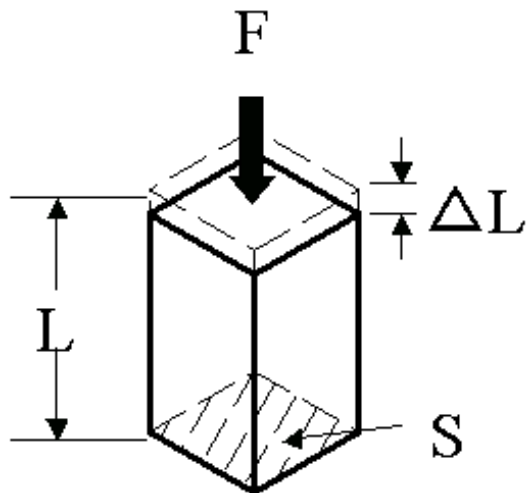


図1 直方体の変形

3. 肌のハリと弾力

インターネットで「肌×弾力」で検索すると、多くの場合、「ハリや弾力」という言葉に当たる。そこで、今度は、「肌×ハリ」で検索すると、やはり、「ハリや弾力」と表現される。「ハリ」と「弾力」が同じ意味であるならば、どちらか片方だけでも良さそうなものなのに、いつも「ハリと弾力」は一緒である。

それでは、「ハリや弾力」とは何?と思って説明文を読んでも、簡単に多くの人を納得させられるような良い説明文には中々出会うことができない。

そこで今度は、「弾力」という言葉で検索を行ってみると、弾力性という言葉が使われている例をいくつか見つけることができた。

「需要の価格弾力性」、「通学区域制度の弾力的運用」、「ダムの弾力的管理」などがそれで、これらの言葉の説明文から、「弾力」とは、融通性、変化への対応性などの意味があることが分かる。

ここまで来て、ようやく、「肌の弾力」とは、肌を押したときの変形のしやすさと元に戻りやすさ(復元性)という言葉がしっくりするように思える。

3. 肌の弾力を表す粘弾性特性(応力緩和特性)

生体やゴムなどに一定の変形を与え、そのときの反発力を時間の経過かとともに測定すると、およそ図2に示すように、変形を与えた直後に反発力が急激に減少し、時間の変化とともに変化の仕方は緩やかになりやがてほぼ一定の値に落ち着く。この関係はヤング率が時間とともに(2)式で与えられるように変化したと考えられる。

$$E = E_e + E_1 \cdot \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (2)$$

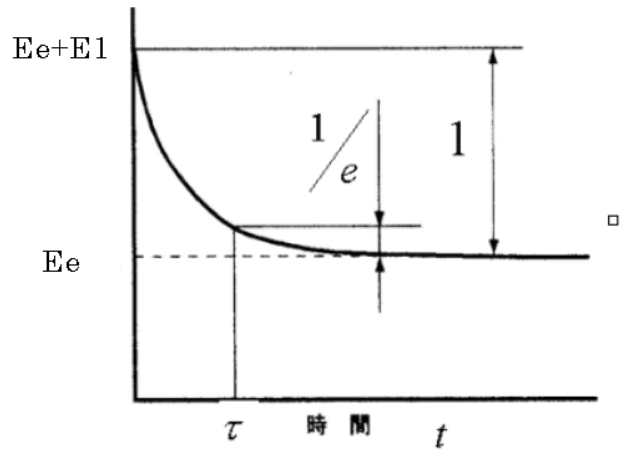


図2 応力緩和特性

(2)式において、 E_e は永久弾性率、 E_1 は緩和弾性率、 τ は応力緩和の時定数である。

粘弾性特性は生体やゴムなどでは、応力変化の時間の単位が「秒」なので、容易に観察することができるので、理解しやすいが、硬くて、とても変形を起こしそうに無い金属やセラミックスも、時間の単位を「年」や「千年」とすると、同じように変形を起こし、広い意味で「粘弾性体」と考えられている。

肌のハリや弾力も、皮膚の「粘弾性特性」として考えることにより、定量的に評価できるようになる。

以下、粘弾性特性を評価する方法について簡単に説明する。

図2に示した粘弾性体の性質を簡単に表現するモデルとして、一般に図3に示すバネとダンパーから構成される「Maxwellモデル」が使用されている。

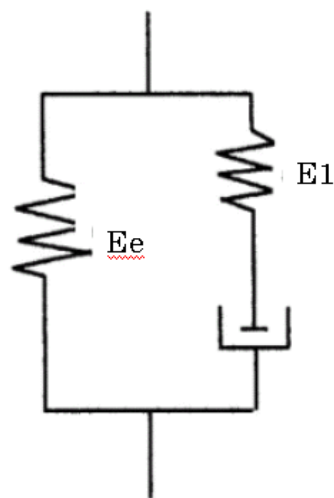


図3 Maxwellモデル

バネに力が加わると変形するが、力が除かれると再び元の形になる。一方、ダンパーは、「水鉄砲」のようなものと考えられ、急激な力が加わった場合は固体のように反発するが、ゆっくりと時間を掛けて力を加えると小さい力で完全に押し込むことができる。

このバネとダンパーを組み合わせると、ゴムを押し込んだときの反発力の変化などの粘弾性体特有の性質を簡単に説明することができる。

物体の粘弾性特性は、図2に示した応力緩和特性のほかに、力を加えて変形させたときの「変形－荷重特性」におけるヒステリシスを示す。

図4、図5、図6は、物体の応力緩和特性において、永久弾性率 E_e を固定し、緩和弾性率 E_1 、応力緩和の時定数 τ および押し込み速度 v を変化させた場合の、応力緩和特性と、変形－荷重特性の計算例を示している。

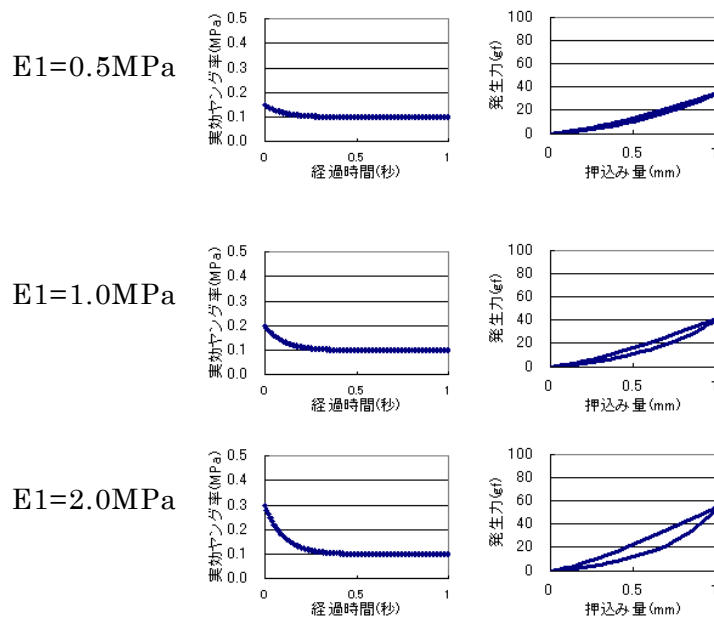


図4 緩和弾性率を変えた場合

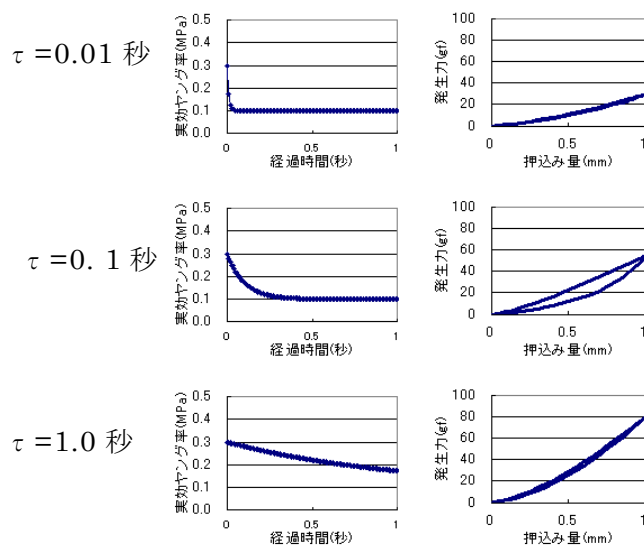


図5 時定数を変えた場合

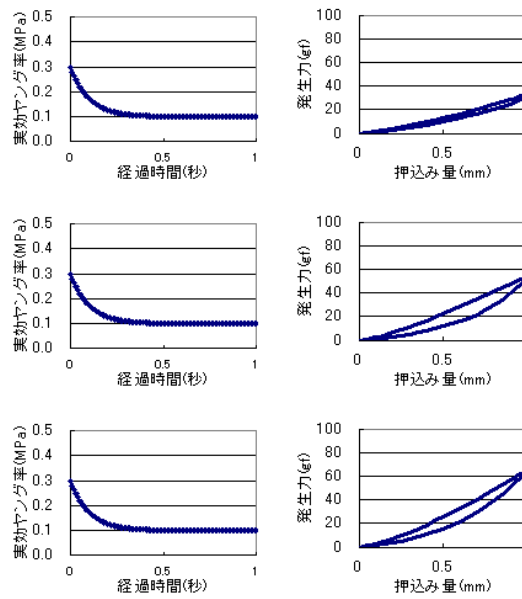


図6 押し込み速度を変えた場合

図4から、緩和弾性率を大きくすると、最大押し込み量における荷重が大きくなるとともにヒステリシスの面積が大きくなる。また、図5より、時定数 τ を増やすと、最大押し込み量における荷重が大きくなり、ヒステリシスの面積は一度増えてその後小さくなる。さらに、図6より、押し込み速度を増やすと、応力緩和特性は同じなのに、最大押し込み量における荷重が増加し、ヒステリシスの面積は、図5の場合と同様に、一度増えてその後小さくなる。

図4から図6の特性は、粘弾性特性を示す材料の特性を良く表しており、肌の弾力の測定の場合にも、肌の弾性率や緩和時定数のおよその値を別の方法で確認した上で、適切な押し込み速度を選定する必要があることを示している。

4. 接触インピーダンス法

接触インピーダンス法は、圧電振動子の一部を物体に押し付けたときに、物体のヤング率の大きさにより、圧電振動子の共振周波数が変化するという物理現象を利用して、その物体の硬さを測定する方法であるが、青柳らはさらに研究を進めて、ゴムから金属まで、広い範囲のヤング率を測定できることを示している。

図7に示すように、ヤング率 E 、ポアソン比 σ の物質からなる表面が平らで厚さが無限大の物体の表面を、半径 R の半球を用いて荷重 F で押し込んだときの押し込み量は(1)式で与えられる。

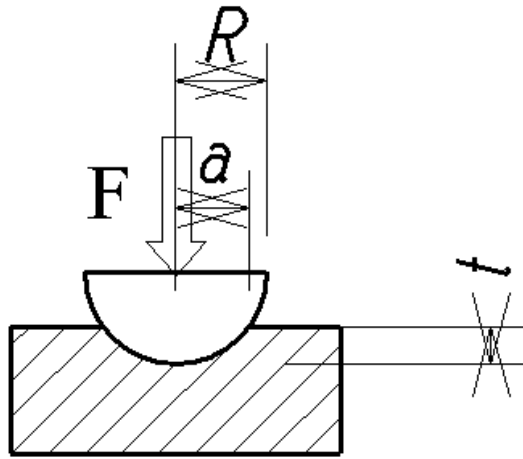


図7 半球押し込みによる変形

$$t = F^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{1 - \sigma^2}{E} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot R^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

押し込み量が t のときの接触半径 a は、(2)式となる。

$$a = \sqrt{t(2R - t)} \quad (2)$$

このとき、付加ステイフネス s_L と付加質量 m_L は(3)式および(4)式で与えられる。

$$s_L = \frac{2aE}{1 - \sigma^2} \quad (3)$$

$$m_L = \frac{0.1}{1 - \sigma} \cdot \rho \cdot S^{\frac{3}{2}} \quad (4)$$

この結果、共振周波数は(5),(6),(7)式で示されるように無負荷時の f_r から f_{r2} に Δf_r だけ変化する。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (5)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s + s_L}{m + m_L}} \quad (6)$$

$$\Delta f_r = f_{r2} - f_{r1} \quad (7)$$

図8に、ヤング率の値が異なるいくつかのゴムの値を測定した場合の荷重- Δf 特性を示す。図中にヤング率の値を示したが、ヤング率の値が小さくなるほど Δf が大きくなっており、荷重が少ない範囲では、測定値が計算値と良く一致している。

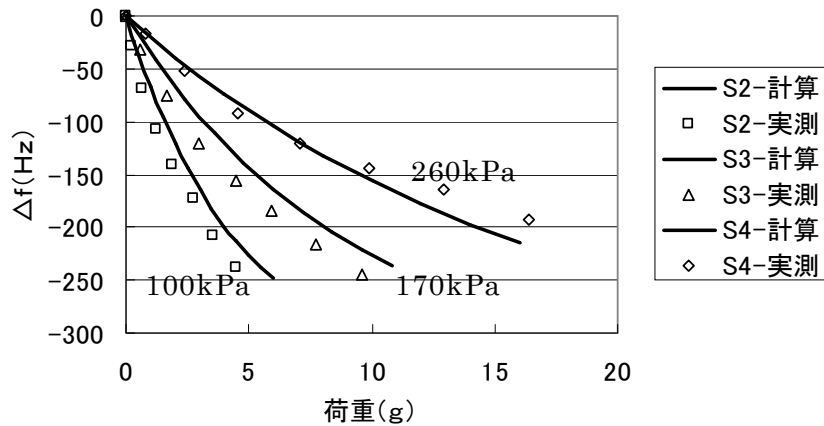


図8 シリコンゴムの荷重- Δf 特性

図9は、同じ原理で、金属について、荷重- Δf 特性を測定した場合の測定結果である。図中に示したように、金属の計測の場合は、接触子としてタングステンカーバイドの $\phi 0.5$ mmの半球を用いている。

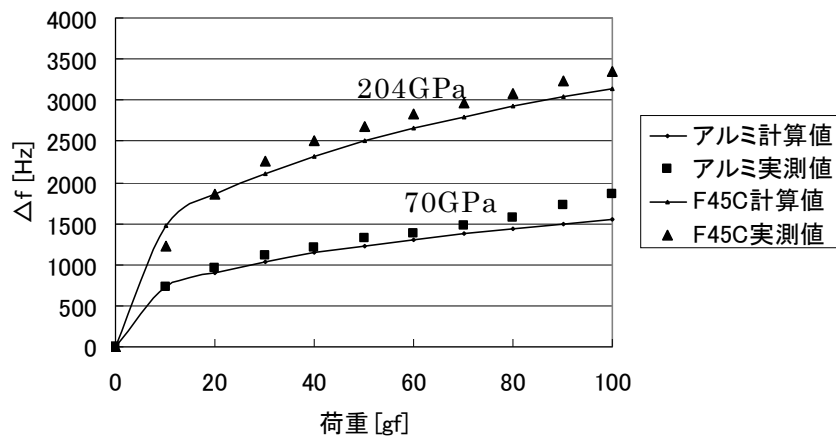


図9 金属の荷重- Δf 特性を測定例

図9の結果も、 Δf の計算値と実測値は良く一致しており、(3)式から(9)式により Δf を求める方法が正しいことを示している。

以上のことから、接触子の半径 R 、材料のポアソン比 σ と密度 ρ を知った上で、押し込み荷重 F とその時の共振周波数の変化量 Δf_r を測定し、ヤング率を与えて(3)→(9)の手順で Δf_r を計算し、計算で求めた Δf_r の値が測定した Δf_r の値に等しくなるようなヤング率の値を求めれば、そのときのヤング率が材料のヤング率になる。

この方法によれば、共振周波数の変化が無い場合すなわち、 $\Delta f = 0$ の場合でも、ヤング率を測定することができる。

5. ビーナストロンによる肌弾力の測定

ビーナストロンは、モータによる精密な押し込み量と、内蔵された荷重計による荷重の精密測定により、荷重-変位特性の測定と、圧電振動子を用いた接触インピーダンス法を組み合わせた、多機能タイプの粘弾性特性測定装置である。

ゴムの硬さを測定する測定器として「デュロメータ」が広く使用されている。「デュロメータ」は、ゴムを押したときの反発力の大きさを測定しているが、これまでの説明で分かるように、ゴムは粘弾性体なので、押した直後と時間が経過した後で反発力の大きさは変化する。したがって、「デュロメータ」を用いてゴムの硬さを測定する場合には、押し込んでから測定するまでの経過時間を一定に管理することが重要になる。

これに対して、「ビーナストロン」では、押し込み量と押し込み速度を制御することが出来るので、図2に示した応力緩和特性やヒステリシス特性の測定が可能である。

図10は、年代の異なる女性の肌の弾力をビーナストロンを用いて測定した測定例である。既に説明したように、肌の弾力は、押し込み量-荷重特性のヒステリシスの大きさによって評価できる。つまり、肌の弾力が高いと言うことは、変形の復元性に優れていることであり、ヒステリシスループで囲まれる面積が小さいと言うことから読み取ることが出来る。

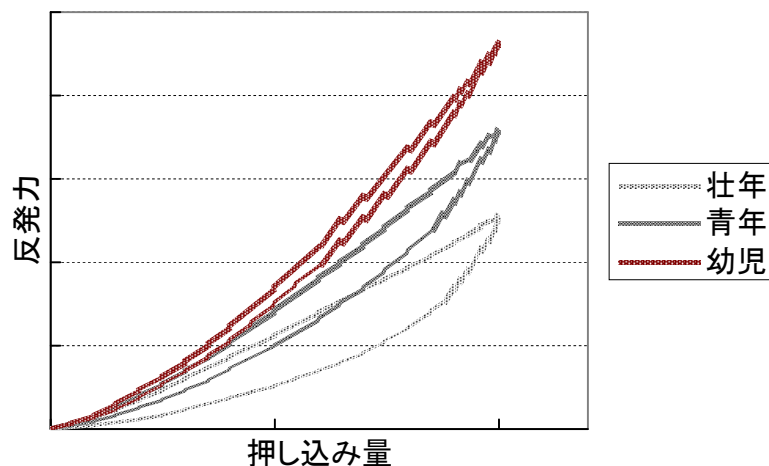


図10 押し込み量-反発力特性例

6. 接触インピーダンス法の応用

接触インピーダンス法を利用すると、ゴムから金属までの硬さの範囲が広い材料のヤング率を簡単に測定することが可能となる。接触インピーダンス法は、低荷重での測定が可能で、被測定サンプルに傷をつけないので、現物の測定が可能となる。

また、プラスチック以上のヤング率の測定では、直径が1 mm以下の接触子を使用するため、曲面状の物体の測定も可能である。既に、錠剤、タイヤ、ブレーキパッドなど、これまでに測定が困難なもの測定に使用されている。

今後、野菜や果物の鮮度のチェックや木材の硬さ、塗料の塗膜の厚さなどの測定への展開が期待されている。