

第10回

生物材料の物理的特性の計測 －力学的特性－

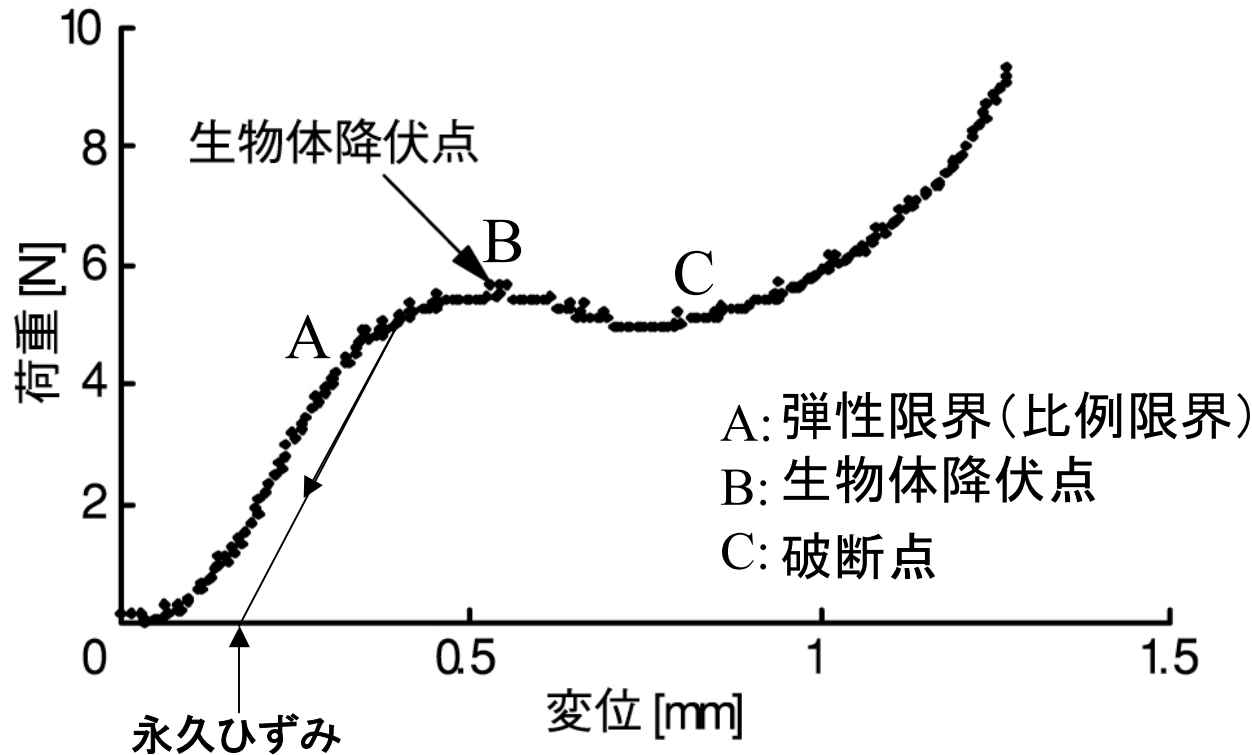
授業の目的: 植物の圧縮、引っ張り、曲げなどの挙動とそれら力学的特性の計測方法を学習する。



生物材料の物理的特性 (Physical Properties on Biomaterials)

基礎的物理的特性	寸法、比重、密度、体積、表面積、形状
力学的特性	圧縮、引張、粘性、弾性、振動、剪断、摩擦
光学特性、音波特性	反射、透過、吸収、蛍光、減衰
電気的特性	電気抵抗、誘電、導電、静電
熱および物質移動特性	伝熱、乾燥、吸湿
流体力学的特性	粉体、粒体、液体

生物材料の応力ひずみ曲線 (S-S Curve)



縦弾性係数

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{Pl}{A\delta}$$

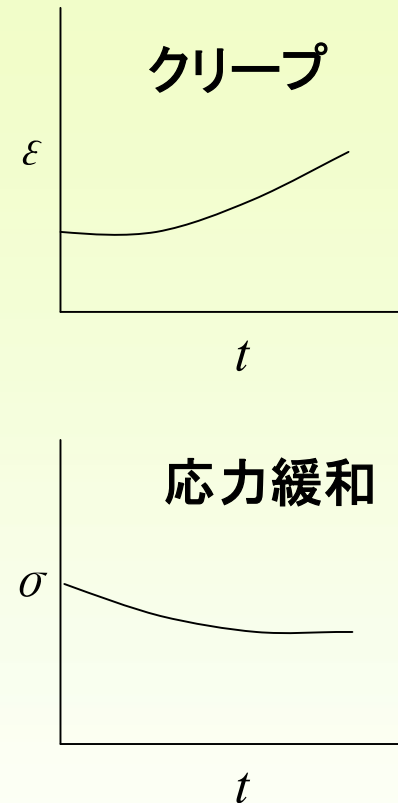
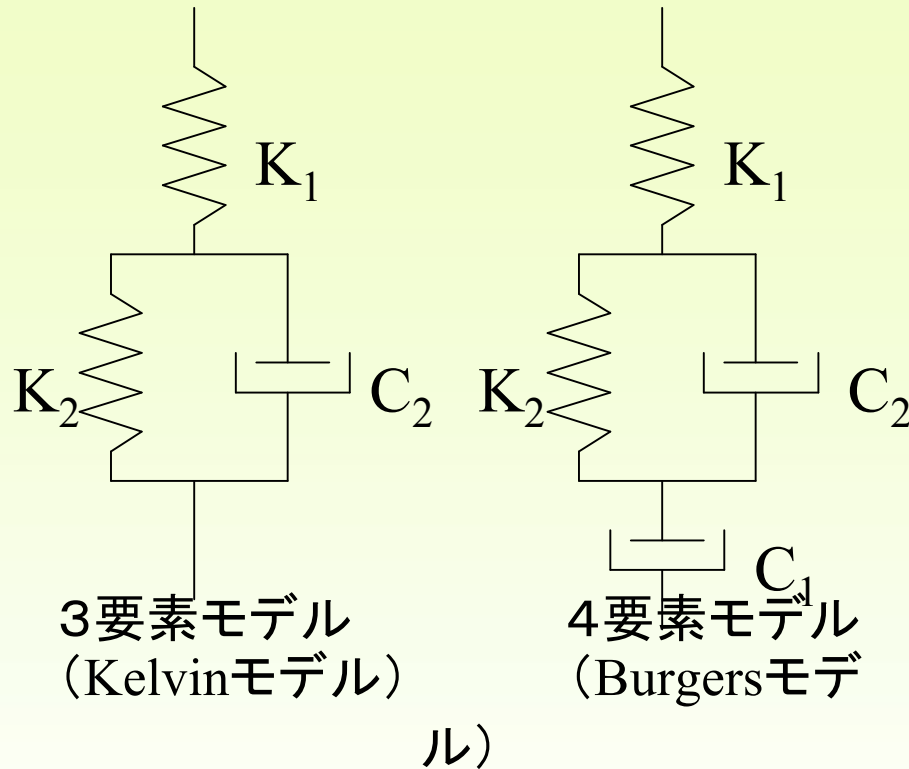
ポアソン比

$$\nu = \frac{l}{m} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon}$$

	ピーマン	バレイショ	ニンジン	サツマイモ	リンゴ	ダイズ	軟鋼
縦弾性係数 (MPa)	2.6	3.1	4.9	5.8	6~8	12~15	200,000
ポアソン比	0.37	0.475	0.45	0.44	0.155~ 0.312	0.253~ 0.321	0.3



粘弾性モデル (Visco-elastic Model)



4要素モデルでの時刻 t におけるひずみ

$$\varepsilon = \sigma / K_1 + (\sigma / C_1) t + (\sigma / K_2) (1 - e^{-(K_2/C_2) t})$$

例: リンゴの場合

$$K_1 = 0.13 \text{ kg/mm}^2 \quad C_1 = 11.17 \text{ kgs/mm}^2 \quad K_2 = 0.397 \text{ kg/mm}^2 \quad C_2 = 0.679 \text{ kgs/mm}^2$$

3要素モデルでの時刻 t における応力緩和

$$F(t) = 0.235 + 0.048 e^{(-t/7.9)}$$

例: リンゴの表皮の場合

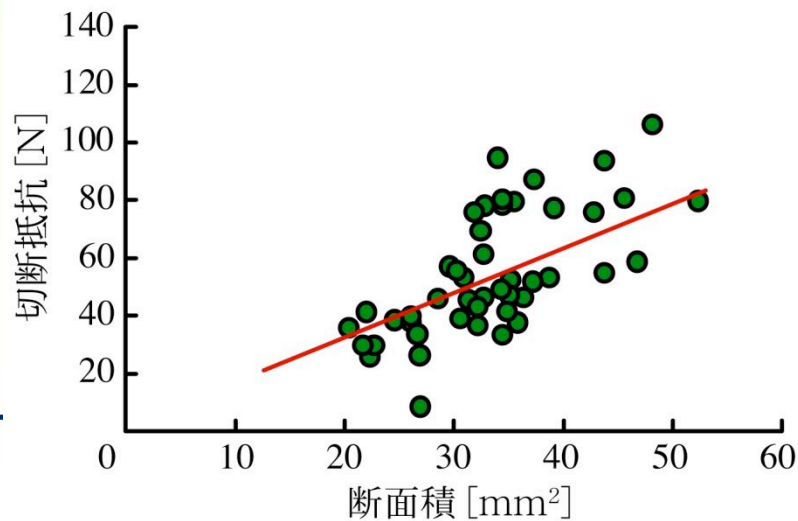
$$K_1 = 0.0629 \text{ kg/mm}^2 \quad K_2 = 0.307 \text{ kg/mm}^2 \quad C_1 = 2.93 \text{ kgs/mm}^2$$



摩擦特性と切断特性 (Frictional and Cutting Properties)

キャベツの動摩擦係数

部位 (含水率)	葉の上部 (90%)	葉の下部 (90%)	切り株 (91%)
仕上げ鉄板	0.79	0.94	0.57
塗装鉄板	0.53	0.54	0.33
鉄板	0.30	0.39	0.30
合板	0.36	0.22	0.29
布	0.33	0.33	0.28
ゴム	0.50	0.41	0.47

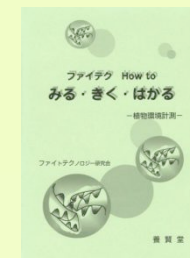


穂軸の切断抵抗



茎の強さを測る

茎の強さは植物体の支持能力に密接に関連する。支持能力の低下によって曲がりや折れが生じると、収穫量の減少や品質の低下など栽培上大きな問題となる。ここではデジタル(ストレイン)ゲージを用いて茎の強さの測定方法と茎の力学的特性の評価方法について述べる。



P. 42

STEP1 茎の強さ

一般に茎の強さは**挫折強度**、**挫折抵抗**、**破壊強さ**などで表現され、茎が挫折した時や組織が崩壊した時の荷重値の大きさを表される。茎の強度は、曲げ、圧縮、引っ張り、せん断、ねじり荷重のそれぞれを与えて評価することが理想であるが、作物生産において問題となる倒伏や茎の挫折の多くは曲げ荷重と密接な関連を持つことから、ここでの強度の評価は**曲げ荷重**を与えて計測するものとした。

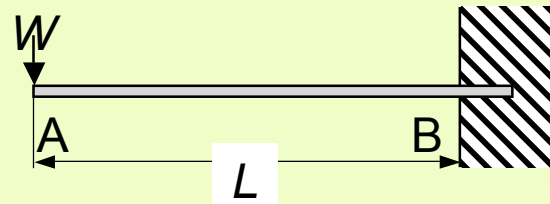
STEP2 デジタルゲージによる測定方法



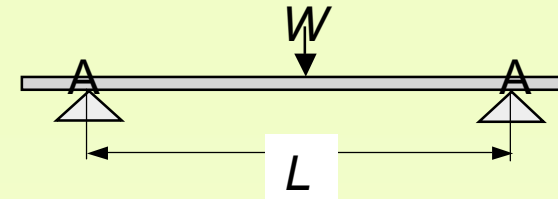
図1 デジタルゲージと自作の両端支持ばり固定台
(アイコーエンジニアリング(株), デジタルプッシュゲージ9520A)

倒伏試
験器
p161

茎の強度の測定方法にはピーク値保持型の**デジタルゲージ**を用いると良い(図1)。採取茎を一本ずつ測定する場合には固定台を用意するが、固定台を用いた測定方法には大きくわけて片支持ばりによるものと両端支持ばりによる2つがある(図2)。茎の固定が容易な両端支持ばりの方法を例にとると、茎を固定台に置き、支点間の中央部にデジタルゲージのフックを架けて引き、茎が挫折したときの最大荷重値 W を測定し茎の強度とする。支点間の



片支持ばり



両端支持ばり

A: 自由端, B: 固定端, W: 荷重

図2 固定台による茎の測定方法

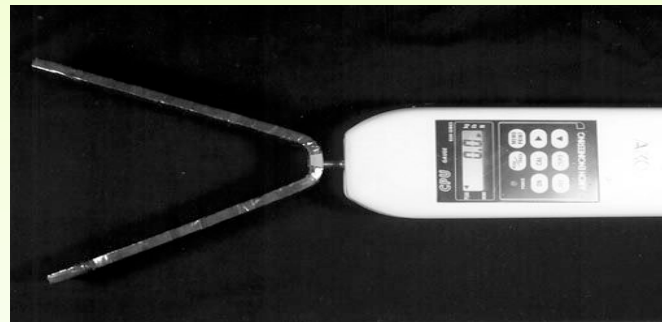


図3 先端に取り付けるアタッチメントの例（水稻株用に塩化ビニル板で作製したもの）

距離 L は4~10cmとする例が多い。つぎに、立毛状態の茎や株の強度を測定する場合にはそれぞれの形状に合わせたアタッチメントを用意すると良い（図3）。アタッチメントを先端に取り付けたデジタルゲージを地面から一定の高さの部位に直角に押し当て、挫折もしくは 45° の角度に傾くのに要した最大荷重値 W を測定し、強度とする。地面からデジタルゲージまでの高さは、10cmあるいは20cmとする例が多い。なお、わが国では力の単位として質量1kgに対する重量キログラム [kgf] が広く用いられているが、近年重力単位系から国際単位系 (SI) による [N] への移行が進んでいる。現在市販のデジタルゲージの多くは表示単位の切り替えができるが、[kgf] で表示される機器は、 $1 \text{ [kgf]} = 9.81 \text{ [N]}$ としてSIへ換算するとよい。

STEP3 茎の力学的特性の評価

植物の茎は工業製品とは異なり材質が均質とはいえないが、茎をパイプと仮定して材料力学で用いるはりの強さの計算と同一の方法にて力学的特性を評価することができる。挫折時の荷重値 W の挫折部に加わる最大の力、すなわち最大曲げモーメント M は、支点間距離 l の両端支持ばりの方法で中央部に集中荷重を加える場合には $Wl/4$ で表すことができ、長さ L の茎に片支持ばりの方法で自由端に集中荷重を加えた場合には固定端で最大となり、 WL で表すことができる。次に外力に対する茎の抵抗力、すなわち曲げ応力（曲げ強さ） σ は、最大曲げモーメントを M 、断面係数を Z として、 $\sigma=M/Z$ で求めることができる。なお、断面係数 Z は茎の断面が中空の場合には

$$Z = \frac{\pi}{32} \times \frac{(d_2^4 - d_1^4)}{d_2}$$

充実している場合には

$$Z = \frac{\pi}{32} \times d^3$$

で求める（図4）。

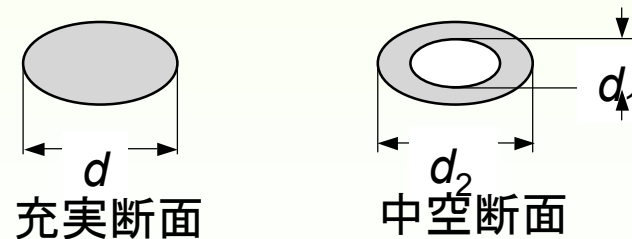


図4 断面の形状

果実の粘弾性を測る

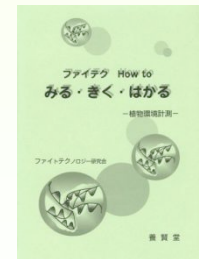
収穫された果実を貯蔵、輸送あるいは選別する場合、果実に様々な外力が加わる。果実の品質を維持するためにも、外力に対する果実の挙動を把握することは重要である。粘弾性は果実の力学的挙動を表す重要な評価方法の一つである。

STEP1 粘弾性

バネに外力を加えると瞬時に変形し、外力を取り除くと再び元に戻る。この性質を**弾性**という。ダッシュポットに外力を加えると、時間をかけて徐々に変形する。この性質を**粘性**という。**粘弾性**はこれら両者の性質を持ったもので、外力に対して複雑な挙動を示す農産物などの力学的モデルに用いられる。Hookeの法則に従う完全弾性体、Newton則に従う完全流体は(1)式、(2)式でそれぞれ表現され、その力学的モデルは図1のバネとダッシュポットの基本要素で表される。このとき、 x は変形量、 F は外力、 k は**バネ定数**、 c は**粘性係数**で t は時間である。

$$x = \frac{1}{k} F \quad \dots (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{c} F \quad \dots (2)$$



P. 54

STEP2 クリープと応力緩和

2つの基本要素を図2のように直列につなぎ (Maxwellモデル), 外力を加えると, バネは瞬時に伸びるがダッシュポットの部分は dx/dt の割合で徐々に変形する。外力を取り除くとバネは元に戻るが, ダッシュポットは復元せず永久に変形が残る。このモデルを指で少し引っ張り, その位置を変えずに保持した場合にモデルから受ける力がどうなるか想像してみよう。引っ張った瞬間にバネが伸び, 伸ばした距離に比例する力が指に加わる。時間が経つにつれ, ダッシュポットがバネの力で徐々に変形し, 最終的にはモデルから受ける力は0になる。つまり, モデルに外力を加えてその変形量のまま保っていると, 時間とともにモデルから受ける力がなくなっていく。この現象を**応力緩和**という。

次に, 図3のように2つの要素を並列につないだ場合を考える (Voigtモデル)。このモデルに錘をぶら下げた場合, 指数曲線を描きながら徐々に変形していく。錘を取り除くと, 同様に指数関数的な曲線で, 永久変形することなく元に戻る。このように, 一定の外力によって変形量が時間とともに増加していく現象を**クリープ**という。

STEP3 4要素モデル

MaxwellモデルとVoigtモデルを直列につなぎ, 農産物の挙動に近づけたものが図4に示す4要素モデルである。このモデルに外力を加えた場合の変形量は(3)式で表され, $t=t_1$ の時に外力を取り除いてからの回復過程における変形量は(4)式で表される。

$$x = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{c_2} t} \right) + \frac{F}{c_1} t \quad \dots (3)$$

$$x = \frac{F}{k_2} \left(1 - e^{-\frac{k_2}{c_2} t} \right) e^{-\frac{(t-t_1)k_2}{c_2}} + \frac{F}{c_1} t_1 \quad \dots (4)$$



STEP4 測定とパラメータの推定

計測システムの一例を図5に示す。まず、サンプルを一定荷重で圧縮し、応力緩和が生じるとさらに圧縮して荷重を一定に保つ。回復過程では、荷重を極めて小さな値になるまで荷重を減少させ、微小荷重を一定に保つ。この間の、変形量の時間的変化を記録しておく。得られたデータから、4要素モデルのパラメータ（バネ定数、粘性係数）を最小2乗線形Taylor微分補正法¹⁾などで推定する。

図6はトマトを約3Nで圧縮した場合の実測値と4要素モデルから求めたパラメータを用いた近似曲線である。このように果実の粘弾性は4要素モデルによって近似でき、パラメータ観察することで果実の挙動の変化を知ることができる。図中には各パラメータの値を示してある。

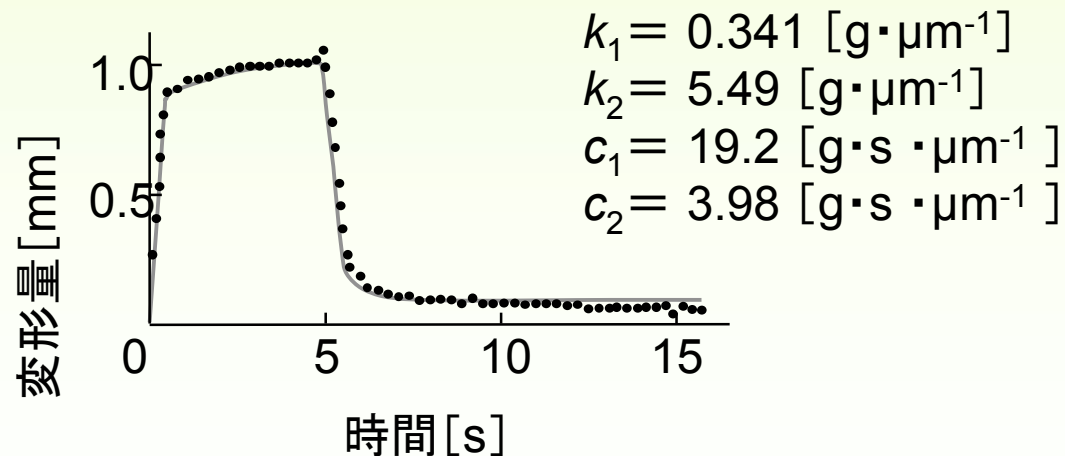
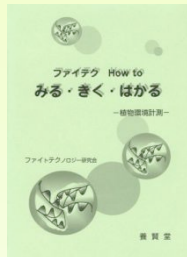


図6 計測結果と近似曲線

穀物の圧縮特性を測る

穀物は収穫以降、様々な外力を受けて調製加工される。穀物に作用する力と変形の関係は、基本的な力学特性であり、穀物の種々の力学的挙動を解析するときに重要である。ここでは、穀物に最も頻繁に作用し、測定容易な圧縮力と変形の関係測定対象とした。

STEP1 応力, ひずみ, 縦弾性係数



P. 68

図1のように、物体が外力（荷重） F を受けると力は内部に伝わり、仮想断面XXを考えたとき内力 F となる。単位面積当たりの内力を応力といい、断面積が A のとき圧縮応力 σ は(1)式となる。

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots (1)$$

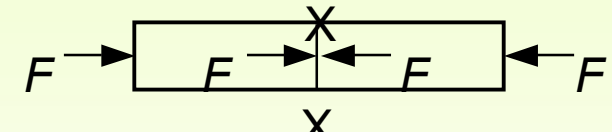


図1 外力と内力

そのとき、物体は変形する。変形量の原寸法に対する比をひずみといい、変形の程度を表す。図2における縦ひずみと横ひずみはそれぞれ(2)と(3)式で定義される。

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \dots (2) \quad \varepsilon_1 = \frac{\Delta d}{d} \dots (3)$$

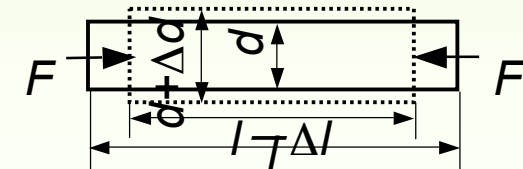


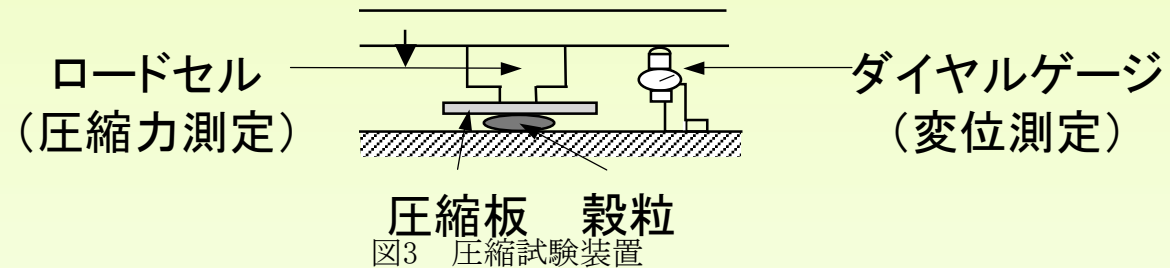
図2 縦ひずみと横ひずみ

応力を取り去るとひずみも消え、原形に戻る性質を弾性という。弾性範囲内の変形では、上記の応力と縦ひずみとの間に比例関係がある。その比例定数を縦弾性係数 E といい、(4)式で定義される。また、弾性範囲内では同一材料の ε_1 と ε の比は一定で、ポアソン比 ν と呼ばれ、(5)式で示される。

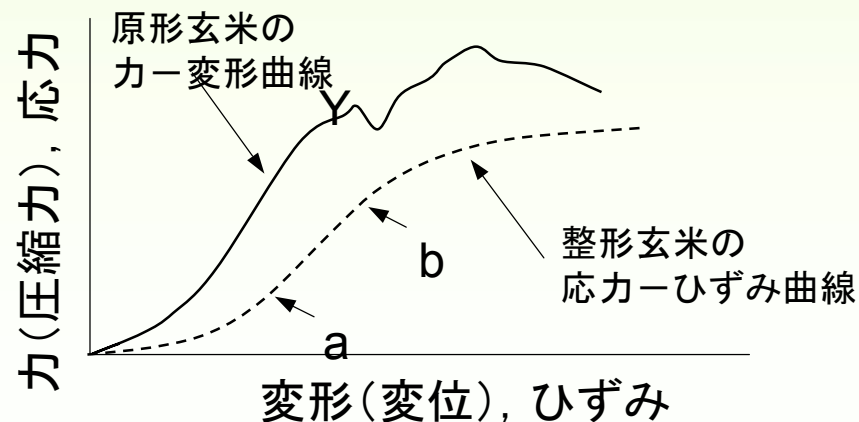
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots (4) \quad \nu = \left| \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon} \right| \dots (5)$$

STEP2 カ-変形及び応力-ひずみ曲線の測定

穀粒を圧縮する方法として、一例を図3に示す。圧縮変位はひずみゲージ式ダイヤルゲージを用いなくても、圧縮速度と記録速度（レコーダのチャートスピードやコンピュータでのサンプリング速度）から圧縮中の変位変化が計算できる。穀粒のような生物体のカ-変形（荷重-変位）曲線の形は、穀粒の種類、水分、試料の状態（原形か整形されたものか）及び圧縮方向等で異なる。



水分14%w. b. の原形玄米を厚み方向に圧縮した例を図4に示す。初期においては圧縮板と試料との接触が不完全なため、下に凸な曲線になった。その後、直線的に力は増加し、やがてY点に達して力は減少するが変形は増加した。このY点は生物降伏点と呼ばれ、最初の細胞組織の破断である。この点において玄米内部に小さな亀裂が生じることが多かった。その後再び力が増加し最大力を示して玄米はつぶれた。原形穀粒を用いることは実用的である



が、圧縮方向の断面積が大きく変化している状態のままに圧縮するので、(1)式より応力を求めて応力-ひずみ曲線を得ることが困難である。そこで、長軸に垂直な面で両端を切断したり (A は平均断面積)、直方体や円柱に整形した穀粒を用いることが多い。ただし、整形によって圧縮特性が原形状態とは異なる可能性は否定できない。玄米を整形して長さ方向に圧縮したときの応力-ひずみ線図の例を図4に破線で示す¹⁾。

STEP3 圧縮特性の評価

原形穀粒の力-変形曲線より得られる生物降伏点での力は、最初に損傷を生じさせる圧縮力の大きさを示す値として、破断点での力とともに実用上有効であると考えられる。整形された穀粒の応力-ひずみ線図における直線に近い部分 (図4のa-b) は、近似的にその範囲で弾性的変形を示すと考えられる。よって、その直線の傾きを最小2乗法によって得て、(4)式で定義された縦弾性係数に相当する値として圧縮特性の評価に用いる。しかし、厳密には穀粒は非弾性体であるため、その値はみかけの弾性係数と呼ばれている。整形された穀粒の圧縮試験では、レーザ変位計により側面の変位を測定することによって横ひずみの変化が同時に得られる。a-b間において縦ひずみと横ひずみの間に比例関係が認められれば、(5)式のポアソン比を求めて圧縮特性の評価に用いることができる。図4の力-変形曲線においても直線に近い領域が存在した。よって、ヘルツの接触理論から得られた(6)式を用いて、原形穀粒の平板圧縮試験からみかけの弾性係数 E_a を求められる¹⁾。ただし、穀粒の支持台との接触面のみ、少し整形し、ポアソン比は整形穀粒を用いて測定する必要がある。

$$E_a = \frac{0.338K^{1.5}F(1-\nu^2)}{D^{1.5}} \sqrt{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_1'}} \dots (6)$$

F : 圧縮力 (力-変形曲線の直線領域内)

D : F に対応した変位

R_1, R_1' : 穀粒の最小, 最大曲率半径

K : R_1 と R_1' から決まる定数

