食品の力学的性質（I）

力学的性質の表現法

岡　部　　巍*

I　前　が　き

食品の味は狭義には舌面の味覚神経が食品により刺戟される事によつて起る感覚であるけれども，食品の「うまい」「まずい」等の評価は其の様な狭義の味覚だけによつて定まるものではない。嗅覚神経を刺戟する臭気，香気。視神経によつて感知される食品の形状色相等によつて影響される外，触覚によつて感知される食品の状態等が広く関係して来る事が多い。

パンやケーキの良否を判定する為の一つの評点法[1]を之等の感覚によつて区分すると第1表の様になり，食品の評価に味覚以外の感覚の占めるパーセンテーヂが相当大きく，又触覚によつて感得される要素も又多い事がわかる。

第1表　パン，ケーキの評点法の感覚による分類

感覚		味覚（点）	嗅覚（点）	視覚（点）	触覚（点）	満点計
パン	外観			外観計 30		30
	内容	味 15	香気10	肉質の色10 すだち(grain)10	啞しやくの感じ 10 手触り 15	70
	合計	15	10	50	25	100
ケーキ	外観			外観計 20		20
	内容	香味 10		すだち 25 肉部の色15	軟らかさ15 手触り 15	80
	合計		10	60	30	100

かまぼこ等の魚肉ねり製品に於いては，歯ごたえ，或は舌触り等で感得される性質が足と云う言葉で表現されて居り，品質評価の重要な要素となつている。又餅等の食品では，腰が強いとか弱いとか云う様な言葉が使われている。

此の様な口腔の諸器管や手等から触覚によつて感得される状態は，食品の表面の平滑，粗雑等の表面状態もあるが，食品の持つ力学的性質が大いに関係している。

食品の「味わい」について，其の各々の感覚を定性的のみならず定量的に表現出来る事が理想的ではあるが，味や臭については方々で之等の点に関して努力が払われている様であるが，現在のところ確立されたものはなく定性的，或は比較的な表現が用いられているだけであり，其の本質については判然としていない。例えば味や臭については「甘い」とか「辛い」とか「酢い」とか或は「なまぐさい」と云う様な種類と，「強い」とか「弱い」とか云う比較的な表現しか行われていない。然しながら食品の持つ力学的性質については味や臭と異なり，もう少し定量的な表現が可能である様に思われる。

又食品の力学的性質は味の面だけでなく，食品加工の面に於いても重要な問題である。之の場合，原料，副材料，或は之等の混合物や中間製品等を粉砕したり，攪拌混合したり，輸送したりする事が必要になつて来るが，之の様な場合，他の化学工業に於けると同様，加工される物の力学的性質を熟知して，それに適した機械で適した運転を行い，効率よく操業される事が必要になつて来る。

それではこの様な食品のもつ色々な力学的性質を表わすのにどの様にすればよいであろうか。最近プラスチツクスや合成繊維の躍進に伴い，之等の物質の力学的性質を検討するためにレオロジーが活用され，之がひいてはレオロジー自体の進展を齎らしている様な状況であるが，食品の力学的性質を表現するのにもレオロジーの概念を導入すると便利であると考えられる。

II　レ オ ロ ジ ー

レオロジー（rheology）は日本語では**流動学**と云われ，物質の変形と流動を取扱う領域の学問である。一般に物体に外から力を加えると形や大きさが変化するが，この様な変化を**変形（deformation）**と云う。全く同じ外力を作用しても変形の仕方は物によつて大いに異なり，例えば同じ形をした豆腐，こんにやく，羊甘，バター，沢庵，牛肉，等を同じ庖丁で同じ操作で等い力を加えて切ろうとしても切れ方は物によつて非常に異なる。しかし之等のものは其の各々に対し加

* 本学講師

えた力が極く小さい間は，加える力を大きくしなければ変形は進んでいかないし，又力を加えるのを止めると元へ戻ろうとする。之の様な物は**固体（solid）**である。

之に反して同じ大きさの力を加えているだけであるのに変形がどんどん進み，力を加えるのを止めても変形が元に復しない物がある。この様な変形を**流動（flow**と）云い。どんな小さな力を加えても流動する様なものが**液体（liquid）**である。例えば，水や水飴や卵白等は液体であるが，チューブ入のチョコレート等はある程度以上力を加えないと流動しないから固体である。即ち固体でもある程度以上大きな力を加えると流動する。又同じ液体であつても，同じ力を加えた時の流動の仕方は，水，水飴，卵白等，物によつて異なる事が認められる。

我々の周囲にある色々な物，例えば家屋や其の構成要素，更に身近な衣服等にしてもある形態乃至強さを持つている事が好ましい。又其れ等を使用するに際しては其の力学的性質をよく知つている事が望まれる。レオロジーはこの様な物を対象として変形と流動を論じて行く学問であるから，プラスチツクスや繊維はもとより，ゴム，塗料，印刷インクやガラス等の化学工業製品は勿論，土木，建築工学的な分野から医学領域まで適用範囲が及んでいる。この為レオロジーの研究は化学工業技術者は勿論，膠質化学，物理化学，応用物理学者，建築，土木，機械，金属，電気，等の技術者や，更に生物学者，医学者，心理学者等により夫々専門的な立場から遂行されており，幾多の興味ある報告がされている[2]。

レオロジーは近年急速に発展して来た学問ではあるが，其の沿源は遠く17世紀に於けるフツクの弾性法則や，ニュートンの粘性法則に端を発している。レオロジーは現在，上述の様な物質の変形や流動の状況を正確に表現して物の力学的性質を明らかにし様とする現象論的な立場と，この様にして表わされた力学的性質から物質構造を探究し様とする物性論的な立場とから研究が進められている。

レオロジーに関する書物は多くあるが[3)4)]，簡単な解説的な書物もあり[2)5)]，特に食品関係のみを対象とした書籍もある[6)7)]。

パンや練粉（dough)，或はバター，チーズ等に於いては其の品質判定にレオロジカルな手段が取り入れられて来ているが[6)8)]，今後この様な傾向が増大するものと見られ，又食品関係の報文にレオロジーに関する用語が現われて来る事も多いと思われるので[9)]，レオロジーの極く初歩の部分について用語を解説しながら其のアウトラインを眺める事にする。

Ⅲ　基本的な変動と流形

一般に物体に外力が作用すると変形を起すが，同じ力が作用しても其の変形は物によつて異なる。故にこの変形の模様をしらべる事によつて物の力学的性質をしらべる事が出来る。

1　弾性変形（Elastic deformation）

こんにやくや，牛肉塊の様な物を指先で軽く押すと凹むが，指先を放すと又元通りになる。この様に外力を加えると変形するが，外力を除くと元の形に戻る様な性質を**弾性（elasticity)**と云い，この様な変形を**弾性変形（elastic deformation）**と云う。

我々が見受ける一般の諸現象に於いて物に力の加わる様子は複雑多岐，且不規則的である。しかし物の力学的性質をしらべる場合は出来るだけ単純な外力を規則的に作用さして其の時に出来る変形をしらべるのがよい。物に外から加える力を**荷重（load）**と称する事があるが，一般に単純な荷重方式として固体の場合，第1図aの様な引張り，bの様な圧縮。cの様な剪断（ずり）等が行われる。物体に荷重が作用した時，物体内には之に対応して内力が生じる。この内力を**応力(stress)**と云う。今第1図の様に物体内に引張りと圧縮の場合は垂直な，剪断の場合は平行な断面を考える。この時引張り，或は圧縮の荷重をW，剪断の荷重をFとし，断面積を共にAとすると，引張り応力（tensile stress）及び圧縮応力（conpressive stress）の σ，及び剪断応力（shearing stress）τ は次の様になる。

$W = A\sigma$ 又は $F = A\tau$ より

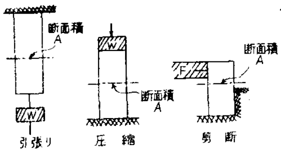
$$\sigma = \frac{W}{A} \quad 又は \quad \tau = \frac{F}{A} \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

註．本文中には色々の物理量が出て来るが，之等の物理量は基礎的な物理量即ち，長さ〔L〕，質量〔M〕，時間〔T〕，の乗除関係で表わす事が出来る。之を**元（dimeision）**と云う。又之等の物理量は夫々単位があるが其の基本的なものに長さ（cm），質量（g)，時間（sec）で表わす**C. G. S. 単位**がある。しかしこの単位系では不便なものは実用単位が用いられる。本文に出て来る物理量の元や単位について終りの第3表にまとめて置いたので参考され度い。

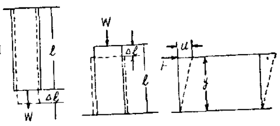
物体に荷重が作用すると物体内に応力を生じ第2図の様に変形する。変形量は図a，bに於ては Δl，c に於いては，u であるが，単位長に対する変形を歪（strain）と云い，引張り歪（tencile strain)，及び圧縮歪（conpresiue strain）の ε，剪断歪（shearing strain）の γ は夫々次の様に表わされる。

$$\varepsilon=\frac{\Delta l}{l}\quad \text{又は}\quad \gamma=\frac{du}{dy}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

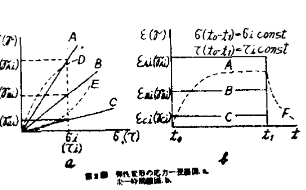
弾性固体に対して **フツクの法則（Hooke' s law,** 1676年）がある。之は物体に応力が作用した時歪が瞬間的に生じ，其の歪の大きさは応力に比例し，応力を取り去ると瞬間的に歪が消失すると云う性質である。之の関係を図示すると第3図の様になる。図aは**応力一歪線図（stress-strain diagram）**で σ—ε，或は τ—γ の関係を示している。A，B，Cは ε—σ，又は γ—τ が直線関係で表わされ，同じ応力 σ_i 又は τ_i を作用した時の歪はA＞B＞CであつてAが一番変形し易く，Cが一番変形し難い事を示している。図bは**歪一時間線図（strain-time diagram）**であつて t_0 に於いて一定応力 σ_i 又は τ_i が作用し，t_1 に於いて応力が除かれた場合の $\varepsilon(\gamma)$—t 関係を示している。A，B，C は応力が作用すると直ちに一定歪 ε_{Ai}（γ_{Ai}），ε_{Bi}（γ_{Bi}），ε_{ci}（γ_{ci}）に達し，応力の作用している間は歪は変化せず，応力が取り去られると一挙に歪が消失する。この様にフツクの法則に随う物体を**理相弾性体（ideal elastic body）**又は**フツクの固体（Hookian body）**等と云う。



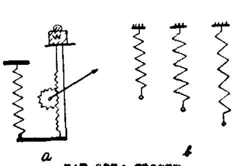
第1図



第2図 歪（ひずみ）



第3図 弾性変形の応力—歪線図, a. 歪—時間線図, b.



第4図 自動秤, a. 弾性の力学的模型スプリング, b.

フツクの法則に随う変形に於ては応力と歪は比例するから

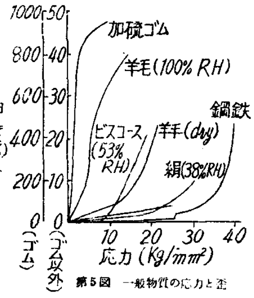
$$\frac{\sigma}{\varepsilon}=\mathrm{E}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

$$\text{又は}\quad \frac{\tau}{\gamma}=\mathrm{G}\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots(3)'$$

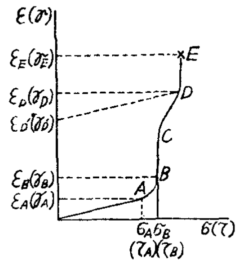
Eは**弾性率（modulus of elasticity）**又は**ヤング率（Yong' s modulus）**と呼ばれ，又 G は**剪断弾性率（modulus of shcar）**又は**剛性率（modulus of rigidity）**と呼ばれるもので，EやGの大きいものは変形し難い物であり，反対に之の小さいものは容易に変形する物である。この様な変形は第4図aの自動秤の機構にみられる如く，スプリングを考えるとよく表現出来るので，同図bの様にスプリングが理想弾性体の力学的模型として用いられる。

フツクの法則は普通の固体では，通常其の物体について小さい歪に対して近似的に成立していると考えてよい。然し歪が其の物体について大きくなつて来るとフツクの法則に随わなくなる。第3図aのD，Eは応力一歪が比例関係を持たない物であり，第3図bのFは時間的に弾性の遅れるものであつて，共に弾性を有しているが理想的な弾性変形ではない。一般の物質の引張り荷重に於ける応力一歪の関係の一例を示すと第5図の様である[10]。之で見ると鋼鉄は非常に変形しにくく，綿や絹も割に変形し難く，反対に加硫ゴムは極端に変形し易く，湿つた羊毛等は比較的変形し易い事が分る。

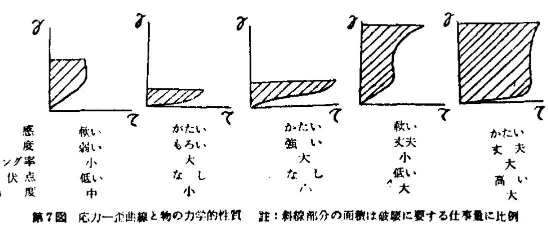
今ある物体の応力一歪線図を作つた所，第6図の様になつたとする。OA は応力と歪とが比例関係にあり，フツクの法則の成立部分，Aからは応力の増加に応じて歪の増加割合が増大してBに到る。OB 間の歪は応力を除くことにより消失する。応力が σ_B,(τ_B) に達すると応力を増加しないのに歪がC迄増加して行く，Cに達すると再び応力を増加しなければ歪は増加しないが，歪の増加割合はOAに比して遙かに大きく，且不規則に変化しDを経てEに到り破壊する。BE間は後に述べる塑性流動をしている部分であつて，流動の初まるB点を**降伏点（yield point)**，其れに対応する応力を**降伏値（yield valud）**と云う。Dに於ける歪は ε_D 又は γ_D であるが，この点で応力を去ると歪は ε_D' 又は γ_D' となる。ε_D' 又は γ_D' は永久歪（permanent strain）である。OABDEε_EO で囲まれる面積はこの物を破壊するに要する仕事に比例する。応力一歪線図は第5図に於いて示した如く物により色々であり，明らかな降伏値を有していない物や，



第5図 一般物質の応力と歪



第6図 応力歪曲線の説明図



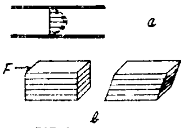
第7図 応力一歪曲線と物の力学的性質　註：斜線部分の面積は破壊に要する仕事量に比例

殆ど直線関係を保つたままで切断して仕舞う物がある。

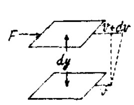
物の力学的性質を表わす為に応力—歪線図を画いたり，弾性率E，或は剛性率Gや降伏値を求めたりする事は重要な手段であつて，第7図に之等のものと力学的性質の表現との関係の数例を示した。

2．粘性流動（Viscous flow）

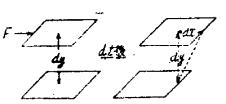
水や水飴の様な液体はどんな小さい応力が作用しても流動し始める。即ち，之等の物の降伏値は零である。しかしこの様な液体内にも流動に対する抵抗力即ち**内部摩擦抵抗力**（**internal frictional resistance**）が存在する。流体の持つこの様な抵抗性を**粘性**（**Viscosity**）と云い，其の流動を**粘性流動**（**viscous flow**）と云う。



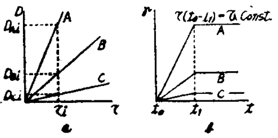
第8図　管中の流れ a. と層流 b.



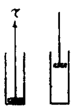
第9図　速度勾配



第10図　剪断速度



第11図　粘性流動の応力—速度勾配線図 a. 歪時間線図 b.



第12図　粘性流動の力学的模型ダッシュポット

第13図　非ニュートン粘性の流動曲線

管の中をゆつくり液体が流れる様な場合，液体の速度は管壁では零で中心では最も早くなつている。この様に速度の遅い流動では**層流**（**laminar flow**）になつていて，各液層は互に規則正しくすべつている。之等の模様を第8図に示す。図aは管内の液体の速度分布を表わし，図bは層流を示す。今第5図の様に層流の中に dy の距りを有し，共に流れに平行な面 S_1，S_2 を考える。S_2は v なる速度で流れ，S_1は S_2 に対して剪断力Fが働らいている為に $v+dv$ で流れる。S_1，S_2 の面積をAとすれば剪断応力 τ は

$$\tau=\frac{F}{A} \cdots\cdots\cdots\cdots(4)$$

である。この応力の為に dy の距りのある二面S_1，S_2 に dv だけの速度差を生じているから**速度勾配**（**velocity gradient**）Dは

$$D=\frac{dv}{dy}\cdots\cdots\cdots\cdots(5)$$

註　速度勾配Dの代りに剪断速度（rate of shear）を用いてもよい。第10図より

$$剪断速度=\frac{d\gamma}{dt}=\frac{\frac{dx}{dy}}{dt}=\frac{\frac{dx}{dt}}{dy}=\frac{dv}{dy}$$
$$=D\cdots\cdots(6)$$

弾性変形に於いてフツクの法則がある様にこの場合，理想的な粘性流動に対して**ニュートンの法則**（**N-ewton's law**, 1687）がある。之の法則によれば，一つの液体に作用する剪断応力 τ と，それによつて生ずる液層間の速度勾配の間には比例関係が存在する。

$$\frac{\tau}{D}=\eta \cdots\cdots\cdots\cdots(7)$$

又は　$$D=\frac{\tau}{\eta}=\phi\tau\cdots\cdots\cdots\cdots(7)'$$

(7) 式の比例常数 η を**粘性係数**（**coefficient of viscosity**）或は**内部摩擦係数**（**coefficient of internal friction**）と云い，簡単に**粘性**或は**粘度**（**viscosity**）と呼ぶ事がある。又 ϕ は η の逆数であつて**流動度**（**fluidity**）と云われる。

この様な流体について剪断応力——速度勾配又は剪断速度の関係図を示すと第11図aの様になり，直線関係にあつて同じ応力に対してAは速度勾配或は剪断速度，随つて η の逆数の流動度 ϕ が最も大となり流動し易いものであり，反対にCは最も流動しにくいものである。又粘性流動は (6)，(7)' 式より

$$(D=)\ \frac{d\gamma}{dt}=\phi\tau$$

であるから，之を時間について積分すると

$$\gamma=\phi\tau t=\frac{\tau}{\eta}\,t \cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

となり図示すると第11図bが得られ，歪は時間と共に増加し，t で応力を除くと以後一定値を保つ，

ニュートン液体の流動性を表わす力学的模型として，第12図の如く粘性液体の満されたダツシユポツト（dash pot）と其の中を動く重さのないピストンを考える。このピストンの動きが歪の変動を表わす。

水，ベンゼン，グリンセリン等は通常この法則に随い，ニュートン液体（Newtonian liquid），純粘性液体或は単純液体（pure viscous or simple liuid）と云われる。

然し液体の中にも上述のニュートンの法則に随わないものがある。例えばD—τ 線図を画いた時この関係が直線とならず第13図の様な曲線になる。この様なD—τ 曲線を**流動曲線**（**flow cune**）と云う。流動曲線が直線とならない流体は粘性係数で定義されるものが得られず，之に相当するものは剪断応力によつて異なつて来る。この様な液体を**非ニュートン液体**（**non Neutonian biquid**）或は**準粘性液体**（**quasi-viscous liquid**）と云う。

ニュートン液体に於ける粘性係数 η や，非ニュー

トン液体の流動曲線は，液体の力学的性質を示す上に重要なものである。

3．塑性流動（Plastic fcow）

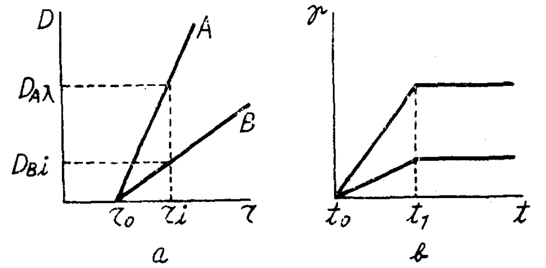
チユーブ入のチヨコレート等は水や水飴と異なり，蓋をあけて逆にしただけでは出て来ない。しかしチユーブを押えると液体の様に流れ出て来る。又第6図の如く固体に降伏値以上の応力を作用すると流動を示す。この様に小さい応力では流動を示さないが，ある応力以上になると流動する様な性質を**塑性**（**plasticety**）と云い，其の様な流動を**塑性流動**(**plastic flow**）と云う。塑性流動に対してはビンガムの方程式（Bingham equation, 1922）が提出されている。之は降伏値 τ_o 迄は流動を示さず，降伏値以上の応力の作用では剪断速度又は速度勾配が応力から降伏値を差引いた値に比例する様な流動を示す様な物に対する式であつて，(9)式及び第14図a，bで表わされる。

$$D=\frac{d\gamma}{dt}=\frac{(\tau-\tau_o)}{\eta'}=m\ (\tau-\tau_o)\ \cdots\cdots(9)$$

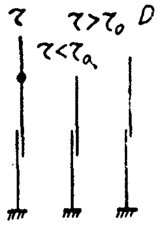
η' は**擬粘性**（**pseudo-viscosity**）あるいは**塑粘性**（**plastic viscosity**）と云われる定数であり，m は其の逆数で**易動度**（**mobility**）と呼ばれる。流動がこの方程式に随う物を理想的な塑性体（ideal plastic solid）あるいはビンガム固体（Bingham solid）等と呼ぶ。

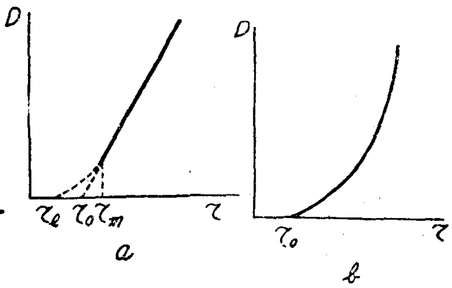
ビンガム流動に対ける模型として広く用いられているものはないが，堪木[11]等は塑性流動に対してスライダー（固体摩擦機構）を導入する事を提唱している。スライダーは応力が τ_o になる迄はすべらないが，τ_o に達した後はいくらでもすべり，其の抵抗は τ_o 以上にならないものである。

一般の物質の塑性流動は降伏値がビンガム流動の様に明らかでなく，第16図 a の様になるのが普通である。この場合直線部分ＢＣを反対に延長して横軸との交点を τ_o とすると直線部分は(9)式によつて表わす事が出来る。この時の τ_o を**ビンガム降伏値**（**Bingam yield value**）と云い，図の τ を**真の降伏点**（**true yieldpoint**）或は**下限降伏値**（**lower yielol value**），又 τ_m を**見掛けの降伏点**（**apparent yield qoint**）或は**上限降伏値**（**upper or top yield value**）と云う。又他の物質では第16図 b の様に降伏値より大きい応力での流動曲線が全然直線とならない様な流動を示す事がある。この様な流動を**準塑性**或は**擬塑性**（**quasi or pseudo-plasticity**）と云う。



第14図　塑性流動に於ける応力—速度勾配線図. a,　歪—時間線図. b,





第15図　塑性流動の力学的模型スライダー　　第16図　非ビンガム塑性流動曲線

塑性流動に於いては擬粘性 η' や降伏値 τ_o，或はビンガム方程式に随わない塑性流動に於ける流動曲線等は物の力学的性質を示す重要な要素である。

第2表　変形の三基本型の特徴

型	最も単純な場合	歪の特徴	降伏値との関係	法則
弾性変形	理想弾性（Hookean）	一時的，応力を止めると完全且瞬間的に消失，時間に無関係	降伏値以下で起る	フツクの法則 $\sigma/\varepsilon=E=\mathrm{const}$ $\tau/\gamma=G=\mathrm{const}$
塑性流動	ビンガム塑性 (Bingham flow)	永久的，変形量は時間に比例	降伏値以上で起る	ビンガム方程式 $D=\frac{d\gamma}{dt}=\frac{1}{\eta'}(\tau-\tau_o)$
粘性流動	ニユートン（純）粘性 (Newtonian flow)	永久的，変形量は時間に比例	降伏値＝O	ニユートンの法則 $D=\frac{d\gamma}{dt}=\frac{1}{\eta}\tau$

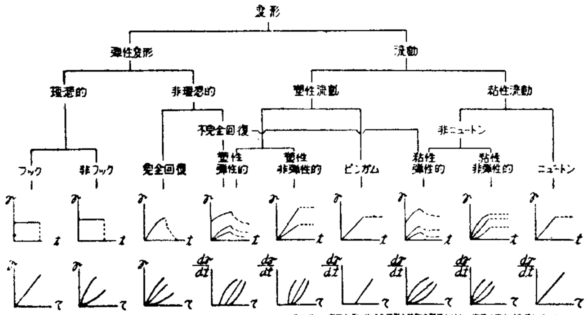
4．基本的な変形と流動

フツクの法則に随う弾性変形，ニユートンの法則に随う粘性流動，ビンガムの方程式に随う塑性流動は変形の基本形であつて，夫々弾性変形，粘性流動，塑性流動に於ける最も単純な形である。この三つの変形について其の特徴をまとめると第2表の様になる。

しかし実際に存在する色々な物質は遙かに複雑な変形を示す。この様なレオロジー的変形の分類は第17図[12]の様になる。

Ⅳ　粘　弾　性

第16図に示す如く色々な物の示す変形の模様は到底上述の弾性，粘性，塑性の夫々の概念だけでは表わす事は出来ない。之等の変形の二つ或は三つが互に重畳して複雑な変形の模業を示す。即ち粘弾性，塑弾性，或は粘塑弾性[10]等で示される変形がある。この内**粘弾性**



第17図　レオロジー的性質の分類

註：上段の曲線は一定応力下に於ける変形と時間の関係を示し，実線は応力が作用している時，破線は応力を除いてからの曲線を示す。γ=歪，t=時間　$d\gamma/dt$=剪断速度，τ=応力

(**visco-elasticity**) は19世紀の後半に既に其の理論が提出されて居り，現在でもレオロジー現象論の最も花々しい分野の一つになつている。

それ故発端期の理論はすでに古典的になりつつあるが，基本的，且典型的なものであつて理解し易いものであるから，ここでは主として初期の粘弾性理論について簡単に説明する事にする。

1．Maxwell 緩和 (Maxwell relaxation)

応力が作用すると直ちに弾性変形と粘性流動を行う様な物を考える。ある一定の応力 τ が t_0 に於いて作用し初め，t_1 に於て除かれる時の歪と時間の関係は，第18図aに於ける弾性変形（細実線）と粘性変形（細破線）の和(太実線)で表わされる。之を式で示すと，弾性変形の(3)'式

$$\frac{\tau}{\gamma}=G \quad より \quad \gamma_1=\frac{\tau}{G} \cdots\cdots\cdots\cdots (10)$$

之を t について微分して

$$\frac{d\gamma_1}{dt}=\frac{1}{G}\frac{d\tau}{dt} \cdots\cdots\cdots\cdots (10)'$$

又粘性流動の(6)式及び(7)式

$$D=\frac{\tau}{\eta} \quad 及び \quad D=\frac{d\gamma}{dt} より$$

$$\frac{d\gamma_2}{dt}=\frac{1}{\eta}\tau \cdots\cdots\cdots\cdots (11)$$

全変形 γ は

$$\gamma=\gamma_2+\gamma_1 \cdots\cdots\cdots\cdots (12)$$

$$\frac{d\gamma}{dt}=\frac{d\gamma_2}{dt}+\frac{d\gamma_1}{dt}=\frac{\tau}{\eta}+\frac{1}{G}\frac{d\tau}{dt} \cdots (12)'$$

(12)' は Maxwell 緩和の基礎式である。

いまこの様な性質を持つている物に急激に初応力 τ_0 を作用して一定歪を与え，以後この歪を保たせる。この場合歪の時間による変化はないから $d\gamma/dt=0$ 故に(12)' 式より

$$\frac{1}{G}\frac{d\tau}{dt}+\frac{\tau}{\eta}=0 \cdots\cdots\cdots\cdots (13)$$

此の微分方程式を解くと

$$\tau=\tau_{0}e^{-Gt/\eta} \cdots\cdots\cdots\cdots (14)$$

但しeは自然対数の底で2.718…である。随つて応力は t=0 に於ける τ_0 から時間と共に指数函数的に低下する。この現象を**応力緩和** (**stres relaxation**) と云い，第18図bで示される。

(14)式に於いてeの指数は $-Gt/\eta$ であるが，t が η/G に等しくなると $-Gt/\eta=-t/t=-1$ となるから(14)式は

$$\tau=\tau_0/e \cdots\cdots\cdots\cdots (14)'$$

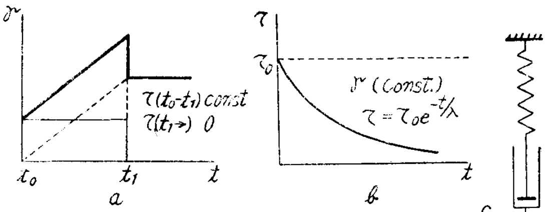
となり，η/G 時間経過した時の応力は元の応力 τ_0 の 1/e になる。この時間を λ で表わすと

$$\lambda=\eta/G \cdots\cdots\cdots\cdots (15)$$

であつて，λ は其の物の緩和時間 (time of relax-ation) と云われるものである。之を用うると(14)式は

$$\tau=\tau_0 e^{-t/\lambda} \cdots\cdots\cdots\cdots (14)''$$

この様な物の示す現象は第18図cの様な力学的模型で示す事が出来る。之は弾性を示すスプリングと粘性を示すダツシユポツトが直列に接続されて居り。Maxwell 要素 (Maxwell element) と呼ばれている。この模型の上端を固定し，下端を一定の応力 τ で引張るとスプリングは τG だけ伸び，ダツシユポツトは $\tau\eta$ の速度で一様に伸び初め，其の下端は第18図の様な変形を示す。又下端を急激に一定の伸び迄伸ばして固定すると，初めスプリングだけが伸び，時間と共にスプリングの張力でダツシユポツトが伸ばされ，スプリングは収縮して第18図bの様な応力緩和をして来る。曳糸性を示す様な液体は主にこの型の粘弾性体である。



第18図　Maxwell 緩和の歪—時間. a，応力—時間. b，Maxwell要素. c.

2．遅延弾性（Retarded elasticity）

ある物に応力が作用した時，其の応力に対応して変形し，応力を除くと元に戻ろうとするが其の変形が瞬間的に起らず遅延して来る物がある。この様な性質を**遅延弾性**（**retarded elasticity**）と云う。

この様な挙動は第19図 c の様な模型で示される。この力学的模型を voigt 要素（voigt element）と呼んでいる。voigt 要素に作用した応力 τ はスプリングの弾性要素とダッシユポットの粘性要素に両分され，又或る時間に於ける両要素の歪は等しい。両要素に配分された応力を夫々 τ_s, τ_D, 或る時間に於ける歪を γ とすると

弾性要素より $\tau_s = G\gamma$

粘性要素より $\tau_D = \eta \dfrac{d\gamma}{dt}$

であるから全応力 τ は

$$\tau = \tau_s + \tau_D = G\gamma + \eta d\gamma/dt \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)$$

之を変形すると

$$\frac{d\gamma}{dt} + \frac{G}{\eta}\gamma = \frac{\tau}{\eta} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)'$$

第二項の係数の逆数 η/G は**遅延時間**（**retardation time**）と呼ばれ之を λ で表わすと

$$\lambda = \eta/G \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (17)$$

之を使うと (16)′ 式は更に

$$\frac{d\gamma}{dt} + \frac{\gamma}{\lambda} = \frac{\tau}{\eta} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (16)''$$

この微分方程式を解いて

$$\gamma = \frac{\tau}{G}\left(1 - e^{-t/\lambda}\right) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (18)$$

となり，一定応力を作用した時の歪と時間の関係が得られ，時間と共に歪は漸時増大し，無限大時間後にはスプリングのみで全応力を受けた時の歪に等しくなる。此の様な一定応力下に於ける歪の変化を**匍匐**又は**クリープ**（**creep**）と云う。

今応力を作用し初めてから t_1 時間後，歪が γ_{t1} になつた所で応力を除去すると歪は次の指数曲線に随つて徐々に元の形に回復する。之をクリープの回復と云う。

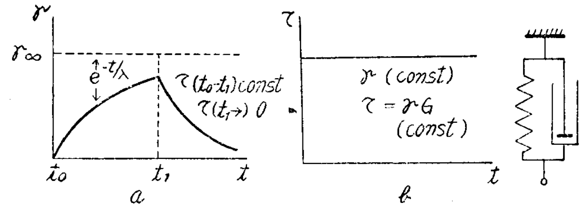
$$\gamma = \gamma_{t1} e^{-(t-t_1)/\lambda} \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (19)$$

之の関係を図示すると第19図 a の様になる。

遅延弾性に於いて最初に瞬間的にある歪を与え，以後之の歪を一定に保つ為の応力は(16)式に於て歪の時間的変化 $d\gamma/dt = 0$ と置けばよいから次式で表わされ一定となる。

$$\tau = G\gamma \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (20)$$

之の関係を図示すると第19図 b の様になる。

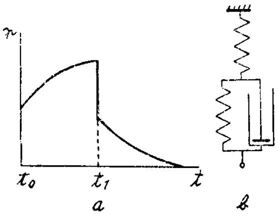


第19図　遅延弾性に於ける歪—時間. a，応力—時間. b，Voigt 要素. c.

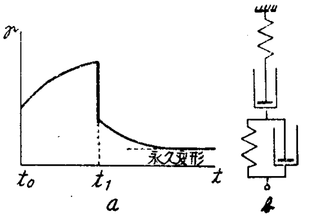
3．力学的模形の組合せ

Maxwell や Voigt の要素で表わされる現象は粘弾性の最も簡単なものである。一般の複雑な変形は更に之等の要素を組合せて考えねばならない。

例えば今 t_0 に於いて応力τを作用し，t_1 に於いて応力を去つた時，第20図 a 及び第21図 a の様な変形を示す物があるとする。説明ははぶくが之等の変形を表わすには夫々第20図 b，及び第21図 b の様な力学的模型を考えることよい。[13] この様に種々な変形を粘性と弾性の組合せとして考えて行くと，大分色々な種類の変形を説明する事が出来，随つて物の力学的性質を明らかにする事が可能になる。



第20図　歪—時間線図と力学的模型（1）



第21図　歪—時間線図と力学的模型（1）

Ⅳ．食品とレオロジー

以上変形と流動に関し基礎的な解説を行つて来たが，之だけで食品の力学的性質のすべてを物語る事は到底出来ない。又食品は殆ど分散系及至膠質系に属しているが，この様な分散系に於いては更にレオロジー的に興味のある問題が多い。例えばチキソトロピー（thixotropy），レオペクシー（rheopexy）等の構造変化を伴う流動や，曳糸性（spinnability）等がある。

食品の品質鑑定や味については従来感覚に頼る所が甚だ多かつた。それ故心理学的な感覚によつて得られた食品の力学的性質と，レオロジカルな現象論的な方法によつて得られた食品の力学的性質との関連については Scot Blair の提唱したサイコレオロジー（psy-[14] [15]

第3表　物理量の元と単位

物理量		元	C.G.S.単位（記号）	実用単位の側
基本	長さ L	$[L]$	cm.（センチメートル）	m.　ft.　尺
	値量 M	$[M]$	g.（グラム）	kg.　lb.
	時間 T	$[T]$	sec.（秒）	miu.　hr.
面積	A	$[A]=[L^2]$	cm^2.	m^2.　in^2.　平方尺
角度	θ	$[\theta]=[L/L]=[1]$	無名数	radian　度
速度	v	$[v]=[L/T]=[LT^{-1}]$	cm/sec	in/sec.　Km/hr.
加速度	a	$[a]=[L/T^2]=[LT^{-2}]$	cm/sec^2	m/sec^2　ft/sec^2
力	F	$[F]=[Ma]=[MLT^{-2}]$	dyne=g. cm/sec⊿	megadyne.　Kg-wt.*
引張り応力	σ	$[\sigma]=[F/A]=[MLT^{-2}/L^2]=[ML^{-1}T^{-2}]$	$dyne/cm^2$	$megadyne/cm^2$. lb/in^2.**
剪断応力	τ	$[\tau]=[F/A]=[ML^{-1}T^{-2}]$	$dyne/cm^2$	kg/mm^2**
引張り歪	ε	$[\varepsilon]=[L/L]=[1]$	無名数	%
剪断歪	γ	$[\gamma]=[L/L]=[1]$	無名数	radian***
弾性率	E	$[E]=[\sigma/\varepsilon]=[ML^{-1}T^{-2}/1]=[ML^{-1}T^{-2}]$	$dyne/cm^2$	kg/mm^2**
剛性率	G	$[G]=[\tau/\gamma]=[ML^{-1}T^{-2}/1]=[ML^{-1}T^{-2}]$	$dyne/cm^2$	lb/in^2**
速度勾配	D	$[D]=[v/L]=[LT^{-1}/L]=[T^{-1}]$	1/sec	
剪断速度	γ/T	$[\gamma/T]=[1/T]=[T^{-1}]$		
粘性係数	η	$[\eta]=[\tau/D]=[ML^{-1}T^{-2}/T^{-1}]=[ML^{-1}T^{-1}]$	$poise=dyne\text{-}sec/cm^2$	c.p.（センチポイズ）
緩和時間	λ	$[\lambda]=[\eta/G]=[ML^{-1}T^{-1}/ML^{-1}T^{-2}]=[T]$	sec	min.
遅延時間	λ	$[\lambda]=[\eta/G]=[T]$	sec	hr.

*　1kg-wt は 1kg の値量のものが標準重力加速度の所で示す重力 1kg-wt=980665 dyne

**　ここの lb, kg, は lb-wt, kg-wt の意味で質量ではなく重力単位である。

***　剪断の角度を α とすれば $\gamma=\tan\alpha$ であるが α の小の時は $\tan\alpha=\alpha$ である。

choreology）の立場からの検討が必要であろう。

之等の事項に関しては紙面の都合上今回は言及する事が出来なかつた。

V. 結　　び

今回はレオロジーの極く簡単な解説に終つて仕舞つたが，次回から食品の力学的性質の表現法について補足しながら，食品の力学的性質についての既往の研究を眺めて見たい。この分野に於ける研究では上述の様な表現を使つているのはむしろ少いが，上述の様な概念を基礎に考えて行く事が有意義であらうと思う。

文　　献

1）木原芳次郎，“最新食品加工書貯蔵” P92, 95 柴田書店東京, 1956

2）中川鶴太郎，神戸博太郎，“レオロジーとは何か”（現代科学叢書22）みすず書房東京，1956.

3）Eirich, F., “Rheology. Theory and Application.” 3 volumes Academic Press. New York, 1956～1957

4）Houwink, R., “Elasticity, Plasticity and Structune of Matter.” Canbridge Univ. Press. Camlbidge, 1937

5）小野木重治’“レオロジー要論.” 槙書店. 東京, 1957

6）Scott Blair, G. W., “Foodstuff, their Plasticity, Fluidity and consistency.” North Holland Publ. Co., Amsterdam, 1953

7）二国二郎，伊勢村寿三共訳’“新食品学.” 朝倉書店 東京，1956（6）の邦訳）

8）Cereal chem. **Vol 1**（1924）以後 **Vol 34**（1957）には多数あり.

9）高橋静枝，木原芳次郎，農化 **30**, 665, 670（1956）

10）山本三郎，樹脂加工 **4**，339（1955）

11）堪木義一，得丸英勝，材料試験 **6**，119（1957）

12）British Rheologist club, Nature, **149**, 702（1942）

13）山本三郎，樹脂加工 **4**, 451（1955）

14）Scott Blin, G. W. “Measurement of Mind and Matter” Dobron, London.（1950）

15）神戸博太郎’高分子 **5**, 96, 134（1956）