講座 座

塗料用樹脂入門講座 (15)*

UDC
667.621.633'12
:532.135
:539.61Guided Lecture of Synthetic Resins
for Paint Industry (XV)

塗装と接着のレオロジー

Rheologies of Painting and Adhesiveness

垣 内 弘**
Hiroshi KAKIUCHI

12.1 レオロジーとは

高分子物質が他の固体表面にへばりつくという現象はなかなか複雑な機構をもっている。この現象は塗装や接着というような実際の作業においても重要な一つのプロセスでもある。このようなプロセスは液体の形で固体表面に塗布することによって初めて可能となるが、塗料や接着剤には高分子物質が用いられているから実際に用いる液体は、高分子溶液か融液であろう。これらの特徴は高分子量の物質の溶液と融液であるから非常に粘いことであり、またその他にも低分子物質の溶液などに比べていろいろな特徴をもっている。高分子溶液については高分子溶液論として高分子の学問体系の一つになっていて、主に熱力学や統計力学の問題として取扱われている。本稿では塗装という力学的な仕事として高分子溶液などを考えていくためにレオロジー的な面からの解説をしよう。

レオロジー (Rheology) とは簡単にいえば物質の変形と流動に関する科学であり、もっとわかりやすくいえばある一つの物体が固体の性質である弾性と液体の性質である粘性とを兼ね備えている。これらはその時に応じてどちらかの性質が強くなるが、その表らわれる条件や、そのときの両者の関係を研究するのがレオロジーである。固体の水が集った水河は流動している。静かに傾けてもちっとも出てこないトマトケチャップのびん詰めを、激しく振り廻してから傾けると、ケチャップは簡単に流出してくるというような事柄を体系づけてい

く学問である。

レオロジーを勉強していくには基礎として物体の変形というものを勉強していく必要がある。固体の変形と流体の変形は様子が異なっていて、前者を弾性変形、後者を流動変形と呼んでいる。

12.2 弾性変形と流動変形

まず始めに固体の引張り変形を考えてみよう。固体たとえばポリエチレンの細い棒に力を加えて引張っていくと図-1 のような曲線が得られる。

図-1 外力-変形曲線

引張るために加えた外からの力 S は、太い棒や細い棒という差をなくするために単位断面積 (1cm^2) あたりの値としておくと、 S の単位は kg/cm^2 となる。横軸の変形量 ϵ は棒の初めの長さ l_0 と、伸びたあとの長さ l との差を元の長さで割った $l-l_0/l_0=\epsilon$ とする。図-1 で OY 間は直線的に変化しているから S と ϵ との間につぎのような比例関係が成立する。

$$\frac{S}{\epsilon} = E \quad (1)$$

式(1)をフックの法則 (Hook's Law) といい、完全

昭 45.1.26 受理

* (14) 本誌 43 [2] 90~96 (1970)

** 横浜国立大学工学部

横浜市南区大岡町

な弾性変形の成立する部分である。 $E = \tan \theta$ であり、物質によって決まった一定の値をもっていてこれを弾性率 (modulus) と呼んでいる。外力の加え方、たとえば引張り力のときは引張り弾性率 (この場合は特にヤング率 (Young's modulus) と呼ぶ) となり、圧縮力なれば圧縮弾性率と呼ぶ。弾性率の単位は kg/cm^2 である。アメリカでは外力 S を断面積 1 平方インチに対し何ポンドという値で示すことがある。このとき S の単位は pound per square inch (psi) [lb/in^2] であり、弾性率も psi になる。

主なプラスチックのヤング率は表-1 (次月号) に示しておいた。

図-1 の Y 点をすぎると少しの外力の増加で変形は大きくなる。Y 点を通りすぎると固体の内部で流動が始まり、内部構造が外力のためにずるずる滑ってくる。だから A 点や C 点で外力を取去っても、変形は幾分回復するが OB とか OA という永久変形が残ってくる。内部構造が変化しているからである。Y → A → C → U という変化は、わずかの外力の増加に対して変形の大きな状態、すなわち物体内に内部流動が起こり易くなり、次に新しい配列ができて、たとえば線状ポリマーでは内部で分子の再配列が起こり結晶化して、外力の増加に対してあまり変形しない状態を通して、場後に U 点で切断される。このときの外力 S_U が切断強度 (一般には破壊強度) であり、 ϵ_U が極限伸度 (一般には極限変形度) である。

外から物体に加える力に対して、反作用として物体の内部に外力に抵抗してつり合った力を生じる。これを応力と呼んでいるが、両者の大きさは等しく方向は反対である。物体中の構造単位の流動などを取扱うときには応力に注目したほうがよいが、いまのように系全体を議論するときは外力と応力とを区別しなくてもよい。

弾性変形というものは物体に外力を加えて変形させたとき、OY 間のように外力を取去ると元に戻るというような可逆的な変形のことであり、この変形量はゴムのような特殊な例をのぞいてあまり大きくはなく、外力と比例関係にある。金属では原子と原子との間の距離が伸びたりすることであり、ポリマーではその分子を構成している原子の結合角の変化や化学結合の伸びなどによる変形に起因している。力を加えると変形し、力を取去ると元に戻る性質を弾性 (elasticity) と呼び、上述の変形のしかたを弾性変形というわけである。

液体の変形は流動変形である。ごくわずかの力で変形しつづける。力を加えている間ずっと変形しつづけるから時間が関係してくる。固体の場合は力を加えた瞬間に一定量の変形を生じたのであるが、さらに液体では力を

図-2 ニュートン流動における速度こう配

取去っても元の形に戻らないという特徴をもっている。この変形はさきの図-1 で Y 点を通りすぎたあとの Y → A → C というカーブに似ている。このことは固体でもある条件では流動変形が起こり得るということを暗示している。

流動は次の式で与えられる (ニュートンの式)。

$$\text{外力} = \text{粘性} \times \text{変形速度} \quad (2)$$

粘性とはその流体の粘度のことであり、流動に対して抵抗するところの流体の内部摩擦係数である。式(2)はつぎのように表わされる。

$$S = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \frac{d\epsilon}{dt} = \eta D \quad (3)$$

(dv/dy) は図-2 に示したように一つの固定底から y という距離の上層面が、 S という外力によって底に平行に流れるときの線速度を v とすれば、 v という速度で流れている面にくっついて他の面も、それに引張られて v よりちょっと小さい速度で流れる。その差を dv とし、二枚の面の距離を dy とすれば (d という字はその差が小さく連続しているということを示した記号と考えていただきたい)、(dv/dy) は速度こう配となる。

$$\frac{dv}{dy} = D \quad (4)$$

D は単位の距離あたりいくら速度が異なるかを示している。式(3)より S が大きければ D も大きくなる。 η は比例定数で一つの流体によって決まった値をもっている。 η が大きいと S も大きくなるから、流動に対する固有抵抗みみたいなもので、これを粘性係数と呼ぶわけである。

図-3 平行板のずれ変形

一方式(3)の変形速度 $d\epsilon/dt$ は図-3 のようなモデルから理解できる。

$\Delta\epsilon$ という変形は Δt 時間で S によっておこる。 $\Delta\epsilon/\Delta t$ は単位時間におこる変形量であり、これは y という距離によっても異なるから、

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{dy} \left(\frac{\Delta\epsilon}{dt} \right) = \frac{dv}{dy} \quad (5)$$

となる。

流動変形を取扱うには、流れるものを平面の重なったものと考えたと便利であった。それぞれの平面が互いに滑りあって流れる。力を加えた平面が最も速く流れ、次第におそくなり、器壁では静止している平面と考える。その滑りに抵抗するものが内部摩擦であり、粘性係数 η であり、また平面の滑り難さの割合は速度こう配 D は、変形速度 $d\epsilon/dt$ で示される。最後に式(3)で S の単位は g/cm^2 であり、 v は cm/sec 、 y は cm であらうから D は sec であり、 η は $g \cdot sec/cm^2$ であるが、習慣として $1g$ は約 980 ダイン (dyne) という流体力学的な単位があり、換算して η は $dyne \cdot sec/cm^2$ という単位をよく使う。そのわけは粘度の単位にポイズ (poise) というものがあり、

$$1 \text{ poise} = 1 \text{ dyne} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2$$

である。 $1/100$ poise を centipoise といい cp で表わす。水は $20^\circ C$ で 1.002 cp であり、ヒマシ油は 9.62 p である。

12.3 塑性流動

粘性係数を測定するには、半径 r 、長さ L の毛細管に液体を流す。力 S の代りに圧力 p を加え、そのとき毎秒 Q_{cc} が流れ出たとすれば次式が成立する。

$$\eta = \frac{\pi p r^4}{8 Q L} \quad (6)$$

この式はハーゲンポアゼイユの法則といわれている。

水、アルコール、ベンゼンのような一的に液体では圧力 p の大小にかかわらず一定の η の値が得られる。このように式(6)に従うような液体をニュートン液体 (Newtonian liquid)、またこれらに従う流動をニュートン流動という正常な粘性流動と呼ぶものである。

ところが粒子の大きくなったコロイド粒子を液体中に分散してさきの毛細管中に流すと、 η として p の小さいときは大きな値が、 p が大のときは小さい値が得られた。測定条件によって異なった値になる。このような流動を非ニュートン流動といっている。このような現象は分散しているコロイド粒子は普通の液体の分子よりはるかに大きいので、大きい流速の流体中では容易に配列して流れの進行方向に向く。これを配向 (orientation) というが、配向がおこれば流れに対する抵抗が減少し小さ

い η を示す。流速が小さいと粒子はでたらめな方向を向き、その状態に対応する前よりも大きい一定の η を与える。このような例は球状高分子のタバコの葉につくビールス、タバコモザイクビールスの分散液などに見出されている。

もう一つ非ニュートン流動の例がある。粘土やカーボンブラックの分散液は静置しておく、粒子が互いに連なり三次元的な構造をつくり上げている。このような分散液を毛細管に流すと、小さい流速ではその構造が残っているために大きな見掛の η の値を与える。圧力 p を大にして流速を速くすると、この構造が完全に破壊して、各粒子はバラバラになり小さな η 値を与える。このような現象を構造粘性 (structural viscosity) といっている。

構造粘性の極端な例は、粘土を水でこねて陶器の原形をつくる場合である。強い力を加えると液体のように容易に流動するから、いろんな形に成形できる。力を取去ると固体のようにその形を保っているわけである。デンプンのりもその例であろう。強い力に対しては粘性流体であり、弱い力に対しては無限大の粘性をもったもの、すなわち固体の性質が現われてくる。このような性質を塑性 (plasticity) あるいは塑性流れ (plastic flow) と呼んでいる。

塑性をもった物質を可塑物 (plastics) という。しかしこのプラスチック (最近ではプラスチックでもよい) という言葉は、近頃は合成樹脂 (synthetic resin) の代りに用いられるようになっている。それはいわゆる合成樹脂があたかも粘土のようにあらゆる形に成形できる可塑物であるからである。

たとえばポリ塩化ビニルはそのままでは堅い弾性体に近い。硬質塩ビと呼ばれプラスチックタイルや排水管などに用いられている。ポリ塩化ビニルに可塑剤としてジオクチルフタレート (DOP) やトリクレジルホスフェート (TCP) を添加して練ると、図-4 の(A)弾性体から、可塑剤分子が高分子鎖の間に入り込んで鎖同志のからみ合

図-4 塑性発現のモデル

図-5 粒子の充テン形式

いを弱めて(B)のような形になる。このような形が塑性体であろう。強い力によって塑性流動を示すので、成形が可能となる。可塑剤の量が増加すると高分子鎖が可塑剤中に溶解し(C)のような粘性体になり粘性流動を示す。

可塑剤の入っていない硬質塩ビを成形するにはどうしたらよいか、答は簡単である(A)のような形のものを加熱すると、温度上昇によって高分子鎖のからみ合いが弱まって、(D)のような塑性体の構造をとる。この状態で自由に成形できる。もっと温度を上げると(E)のように高分子鎖がばらばらになり液体の形になって流れてしまう。ポリスチレンやポリエチレンなどはこのような方法で成形している。だから熱を加えて可塑性にして成形できる高分子を熱可塑性高分子(thermoplastics)と呼んでいる。

石炭酸樹脂や尿素樹脂は熱硬化樹脂(thermosettings)といわれている。この生成の機構は既に述べたが、いうまでもなく塑性流動を利用して成形をしてはいない。

12.4 異常な流動

波打際の砂をふむと、足のまわりの砂が急に乾いたように見える。そして足を離れた後時間が経つと再びヌレてくる。この現象について次のように説明されている。

砂粒は重力によって図-5の(A)のように最も密に充テンしている。これに外力(足でふむこと)が加わると粒子が流動して充テン様式が変化して図-5の(B)のようになったとすると、図から明らかなように、粒と粒との間のすきまが大きくなり、そのすきまに水が入り込む。そのため砂層表面にあった水分が内部に吸い込まれ、乾いてみえるようになる。

つぎに外力を取り去ると、再び振動や重力によって元の(A)のような最密充テンにかえり、すきまに入った水分は表面にしみ出てヌレてみえるようになる。

この場合は外力によって、全体の目掛けの体積は膨張増大したことになるから、この現象をダイラタンシー(dilatancy)といっている。dilaというのは“ふくらむ”という意味である。

ダイラタンシーの例は他にもある。ジャガイモデンプンを少量の水でこねたものは、これをかきまぜると固体のような状態(ゲル状態という)にあるが、それをやめると液体状(ゾル状態という)になる。だからダイラタンシーとは外力によってゲル状になり、外力のないとき

はゾル状という現象である。

ダイラタンシーは工業的にも重要な現象であろう。大量の沈殿物を口過しようとしたとき、このダイラタンシーが起ると、静置していると多量の液体を含んでいることがわかるのに、いざ吸引口過しようと、吸引力を加えると固化してしまう。顔料粒子の入った塗料をパイプ輸送しようとして圧力を加えたとき、パイプがつまってしまうような例もある。ダイラタンシーは堅い無機物の球状でない結晶粒子が含まれているときにおこりやすい。粒子同志のすべりが悪く、かくはんによって粗雑な構造になりやすいからである。

いま一つの異常な流動の例で有名なのはチキソトロピー(thixotropy)である。初めに例にあげたトマトケチャップや、化粧用乳液などで静置しておくとき固化してゲル状となり、振ると液状のゾルとなって流出するような現象である。

塗料工業でもチキソトロピーを利用している。ペンキには適度のチキソトロピーがほしい。ブラシで塗るときは軟化して液状になっているのが塗りやすい。塗り終わった後はすぐ固化してもらわないと壁面から流れて落ちてしまう。といって余り早く固化するとハケ目が残って見苦しい。適当なチキソトロピーを持ったものが望ましいということになる。

12.5 粘弾性

さきに述べたようにある物質が完全弾性体であれば、一定の外力 S に対して一定の変形 ϵ が瞬間的に発生し、それ以上変形は増えも減りもしない。また外力を取去ると変形は瞬間的に消失する。このような場合はさきに述べた式(1)の関係が成立する。

$$S = E\epsilon \quad (1)$$

またニュートンの完全粘性流体であれば一定の外力 S に対して一定の流動が起こって止まることがない。そのときの式はさきの(3)である。

$$S = \eta \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) = \eta \cdot D \quad (3)$$

図-6 クリープ曲線Aと回復曲線B

図-7 応力緩和曲線

高分子物質、たとえばポリエチレンのひもに一定の荷重をぶらさげておくと、図-6 のような変形 ϵ と時間との関係が得られる。

まず一定の荷重 S を加えたときに、変形 ϵ_1 を生じる。この変形 ϵ_1 は式(1)の関係を満足している。一定の荷重 S を加えたままにしておくと次第にひもはたれ下って曲線Aのような経過をたどる。変形 ϵ が時間 t と共に増加することは、あたかも流動しているようである。弾性変形と粘性流動が重なっている。このよに一定荷重に対して変形が時間と共に次第に増加していく現象をクリープ (creep) という。長く坐ったあとに衣服にしわがよるのは繊維のクリープである。

曲線Aの途中P点で外力 S を取除く (S は時間 t によって変化しない)。変形 ϵ は瞬間的になくなる部分PQと時間の経過と共になくなっていく曲線Bの部分とから減少していくが、一般には変形が0にまで下らない。ある値 ϵ_∞ に近づく。この曲線Bの過程をクリープの回復 (creep recovery) といい、 ϵ_∞ を永久変形という。

クリープの起こる系では式(1)の E はもはや定数でなく、外力を加えてから変形を測定しようとする時まで経過した時間 t の関係になる。クリープの起こる試料では外力 S に対して、同じ大きさの内部応力 S が生じて釣り合っているがこの応力が時間と共に減少していくことになる。一定の変形を保つために外力 S をしだいに減らしてやる必要がある、そのときそれに釣り合う内部応力も減少している。一定の変形に対応した応力が減少することを応力緩和 (stress relaxation) といい、その模様は図-7 のようである。応力 S は時間と共に0にならないで S_∞ という一定の値になることが多い。

応力緩和は弾性変形に内部の粘性流動が重なって出てきたものであるから、このような性質を粘弾性 (visco-elastic properties) といい、弾性と粘性の中間の性質であり、図-1 のYA間あたりの物性である。高分子物質はこの粘弾的な物性をもった代表的な物質であろう。金属などに比べて分子構造中に内部で滑りやすい (流動しやすい) 部分をもっているからである。

マクスウェルモデル フォークトモデル

図-8 粘弾性の二要素モデル

プラスチックの板を折り曲げる場合、加える外力は同じであってもゆっくりやればたくさん曲がり、速くやるとあまり曲がらないことがある。同じ力であっても繰り返す速さによって曲がる度合が異なる。加える力が十分に大きいときは、ゆっくりのときはあめのように曲がり、速いときは、ガラスのように割れてしまう。この違いはプラスチックなどはゆっくりした外力に対しては粘性体のように流動し、速い外力に対しては弾性体として変形する。中間の速さでは粘弾性の性質を示す。このように繰り返して行なわれる力学的な刺激に対し、粘性とも弾性ともつかぬ性質を動的粘弾性 (dynamic visco-elasticity) という。これに対しさきのクリープや応力緩和は静的粘弾性 (static viscoelasticity) と呼んでいる。

粘弾性を解釈していくにはさきの式(1)と(3)が基礎となるが、話を簡単にするために模型を考えておこう。弾性はバネで、粘性流動はダッシュポット (dash pot) で表わすと、その力学的組合せは直列と並列があり、それぞれをマクスウェルモデル (Maxwell model) とフォークトモデル (Voigt model) と呼んでいる。(図-8)

まずマクスウェル模型の方を考える。下のにぎりを急に引張ると弾性を表わすバネが伸びる。ゆっくり引張るとバネは伸びずにダッシュポットのピストンだけが伸びる。中間の速度で引張れば両方がある割合で伸びてきて粘弾性が現われてくる。特に引張っておいてそのままの長さに保持していると (変形を一定にしておく)、バネは自然に縮んでピストンを引張り上げていくから (流体の性質が表らわれてくる)、応力はだんだん減少していく。これは応力緩和を表現している。

数式的な取扱いはつぎのようになるバネの変形を ϵ_1 、ダッシュポットの変形を ϵ_2 とすれば式(1)と式(2)とより、

$$S = E \epsilon_1 \quad (7)$$

$$S = \eta \left(\frac{d\epsilon_2}{dt} \right) \quad (8)$$

式(1)を時間 t で微分すると

$$\frac{dS}{dt} = E \left(\frac{d\epsilon_1}{dt} \right) \quad (9)$$

マクスウェル模型では、バネとダッシュポットのそれぞれの変形の和が全体の変形であるから

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{d\epsilon_1}{dt} + \frac{d\epsilon_2}{dt} = \frac{1}{E} \left(\frac{dS}{dt} \right) + \frac{S}{\eta} \quad (10)$$

E と η は時間に関係のない常数である。

いま、変形 ϵ を一定に保つと、

$$\epsilon = \text{定数} \quad \frac{d\epsilon}{dt} = 0 \quad (11)$$

となり、その条件で式(10)を積分すると、

$$S = S_0 \exp(-t/\tau), \quad \text{ただし} \quad \tau = \eta/E \quad (12)$$

となる。 τ の単位は時間であり、これを緩和時間 (relaxation time) と呼び、 L が大きいと応力緩和がしにくく、小さければしやすい物質である。

マクスウェル模型で外力 S を一定にすると、 $dS/dt=0$ となり式(10)は

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{S}{\eta} \quad (12)$$

となる。これはニュートンの粘性流動そのものの式になって粘弾性を表現しない。この場合は粘弾性の表示にこの式はなじまない。

マクスウェルモデルは有名な Maxwell が 1868 年に示した概念であり、やわらかい餅や、溶融しなかったプラスチック類はこのマクスウェル粘弾性に近い。

フォークト模型では、バネとダッシュポットが並列に結ばれた場合で、外力 S によってバネが伸びようとしても並列に付着したダッシュポットの抵抗のために変形が減速されて徐々にしか進行しない。バネが S に対する一定の変形 ϵ に達したところで停止してしまう。その点がマクスウェル粘弾性の場合と異なる。またある時刻で S を取去っても瞬間的には回復しない。弾性と粘性のかね合いでじわじわと縮んでいく。力 S が一定であるからさきのクリープに相当する現象を表わしている。

式で表わすと、バネとダッシュポットが並列に結ばれているから、つねに両者の変形は等しい。

$$S_1 = E\epsilon \quad (13)$$

$$S_2 = \eta \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) \quad (14)$$

全体の力 S は $S = S_1 + S_2$ であるから

$$S = S_1 + S_2 = E\epsilon + \eta \left(\frac{d\epsilon}{dt} \right) \quad (15)$$

S を一定に保っているから、式(15)を積分すると

$$\epsilon = \frac{S_0}{E} \left[1 - \exp \left(-\frac{t}{\lambda} \right) \right] \quad \text{ただし} \quad \lambda = \eta/E \quad (16)$$

となる。 S_0/E はダッシュポットがないと考えたときの

瞬間弾性変形で図-6 の ϵ_1 に相当する。 λ は変形の出現の遅れ方を時間によって示したもので、遅延時間 (retardation time) と呼んでいる。

フォークトモデルでは変形を一定にすると、式(15)で $S = E \cdot \epsilon$ となり、弾性変形だけの式になり粘弾性を示さない。フォークトモデルは Voigt (1890) の考へたもので、非常に粘度の高い液体を吸い込んだスポンジ、包装に使われる軟質ポリエチレンや可塑剤の入ったポリ塩化ビニルのフィルムがこの粘弾性を示す。これらは引張るとゆっくりと伸び、力を取り去るとゆっくりと元に戻る。

粘弾性は粘性と弾性の重なり合ったものであり、これを二つの力学的モデル (マクスウェルとフォークトモデル) をとり入れて重なり方の様子を少しばかり具体化させた。しかし力学的モデルはあくまで物質よりつくられた物体の力学的性質の外見だけを表現するものであって、その物質の内部構造とは直接には関係してこない。また物質の複雑なレオロジー的な性質を簡単な前述の二要素モデルで説明できない。三要素モデルとか四要素モデルなどが考えられる。

たとえば図-9 は四要素モデルの一例であるが、これはさきの図-6 ものクリープ曲線 A と回復曲線 B とをうまく説明できる。図-9 の ϵ_1 は瞬間弾性変形で、 E_1 のヒズミである。曲線 A の P 点までは、 E_2 と η_2 のフォークトモデルと η_3 のダッシュポットのヒズミであり、P 点で充分クリープした状態になっている。ここで力 S

図-9 粘弾性の四要素モデルの一例による変形

を取去るとたちまち PQ だけの瞬間弾性変形が回復する。これは E_1 のバネに対応した ϵ_1 に相当する。それからあとの回復曲線 B は E_2 , η_2 のフォークトモデルによる回復であり、これを遅延弾性回復と呼び、残った永久変形 ϵ_∞ はダッシュポット η_3 が受けもっている。

式で示すと

$$\begin{aligned} [\text{全変形}] &= [\text{瞬間弾性変形}] + [\text{クリープ変形}] \\ &= [\text{瞬間弾性変形}] + [\text{遅延弾性回復}] \\ &\quad + [\text{永久変形}] \end{aligned}$$

のなる。

実際の高分子物質のレオロジー的性質を忠実に表現し

ようとするれば、高分子物質は結晶部と非晶部とが共存している二相系であり、また多分子性で分子の寸法がいろいろと異なっているものの統計的な混合物であり、さらに橋かけしているものもあるし、水素結合などで比較的にかたく結合していたり、単なるからみ合いをしているものもあるのでもっと複雑な多要素モデルが必要となる。しかし実用上はそんな複雑な多要素モデルを考えても、それらはその物質の外観上の力学的性質を再現するだけであって本質的な意味をもっていない。物質の構造に直接関係させた粘弾性理論がまだ完成していないからである。労多くして功少なしといえよう。