

レオロジー

一分散系に対する適用を中心として

妹尾 学

1. レオロジー

外力を加えられた物体は、種々様々な力学的応答を示す。その様子は、物体の種類、外力の大きさ、与え方によるのはもちろん、また観測方法によっても大きく左右される。レオロジー\*は、物質の力学的性質を、現象論から分子論にわたる統一的な立場から追求しようとして、物理、化学、工学の境界領域に生れた。

1868年、J. C. Maxwell が弾性をともなう液体の存在を指摘し、W. Thomson (後の Lord Kelvin) は、1879年、固体のもつ粘性について注意をうながした。そして一方、自然にそして日常生活に多くみられる、高粘性液体、半固体状物質の示す特異な変形と流動が、古くからコロイド化学者によって注目されてきた。そして近年、合成高分子科学の発達によって、純粘性流動から、純弾性変形にわたる種々な型の変形と流動を示す、多種多様の高分子物質が作り出されるようになった。レオロジーは、ここに飛躍的な発展をみせたのである。

名刺の鐘の音は、余韻を残してやがて消え去る。地形を注意深く観察する者にとっては、岩石も流動する。重いトラックは舗装道路に跡を残し、コンクリートもやがては流れ、ゆるんだゴム紐は捨てられる。

厳密に物質の性状を記述しようと試みるとき、いかなる固体も純弾性体とみなすことはできなくなる。Maxwell の指摘した場合を考えよう。純弾性を意味するスプリング (弾性率  $E$ ) と、純粘性を代表するダッシュポット (粘性率  $\eta$ ) の直列組合せから成る力学系である (第1図)。  $S$  を加えられた力 (応力) とすると、変位  $r$  は両者の寄与の和として与えられるので、この模型の数式表現は次のようになる。

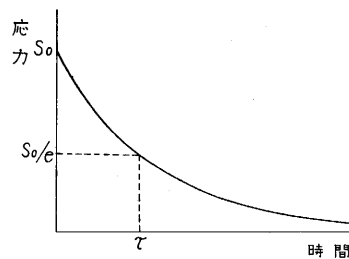
$$\frac{dr}{dt} = \frac{1}{E} \frac{dS}{dt} + \frac{1}{\eta} S \quad (1)$$

変位を一定に保ったとき、 $dr/dt=0$ 、よって  $t=0$  で

\* Rheology. E. C. Bingham の命名になる (1929年)。流動学と訳されることがある。

$$S=S_0 \text{ とすると, } S=S_0 e^{-t/\tau} \quad (2)$$

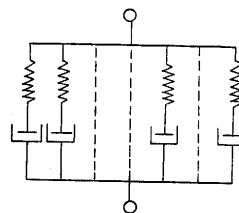
ここで、 $\eta/E=\tau$  とおいた。その模様を第2図に示したように、外力によって物体内に生じた応力は、時間の経過と共に減少し、やがて消滅する。すなわち応力緩和を示すわけである。ゴム紐がやがて使えなくなる現象である。



第2図 Maxwell 模型の応力緩和

図にみられるように、 $\tau$  は初めの応力  $S_0$  が  $1/e$  に減少するまでの時間を示すもので、系の緩和時間といわれる。そして、この緩和時間が非常に大きい系は、通常の観測ではほとんど純弾性挙動を、逆に緩和時間が非常に小さい系は、純粘性挙動を示すことになる。

すなわち、Maxwell 模型によって代表されるような物質は、系の緩和時間よりもはるかに短い時間で観測すれば、純弾性固体として、逆に、緩和時間に比しはるかに長い時間にわたって観測すれば、物体は純粘性流体として挙動する。そして、緩和時間と同程度の観測時間では、系は粘弾性体として挙動することになる。このように物体の力学的性質を論ずるとき、観測上の時間尺度 (experimental time scale) が本質的な意味をもつことを忘れてはならない。



第3図 一般化された Maxwell 模型

実際の物質は、理想的フック固体、理想的ニュートン流体でないと同様、また理想的マクスウェル粘弾性体でもない。一般的には、無限の Maxwell 模型より成る、一般化された Maxwell 模型によって記述される (第3図)。

なお、以上は Boltzman の重畳原理を基礎とする線型粘弾性論で、厳密には無限小変位の場合においてのみ成立する。大変形を問題とする場合、非線型項の寄与が無視できなくなり、そしてさらに破壊、切断のような不連

統現象が入ってくる。しかしこのよう[な場合の一般論は、まだ確立していない。

2. 粘弾性の測定<sup>2)</sup>

実際問題が科学の対象として取り上げられるには、問題を正確に記述する方法が必要である。物体の力学的挙動の統一的解釈が、期待されながらも、その発展が遅々とした大半の責任は、適切な測定手段がなかったことに帰せられよう。

粘性流動の測定に、古くから使用されてきた、Ostwald の粘度計で代表される毛管粘度計、および種々の回転粘度計は、定常流粘性 (steady flow viscosity) の測定法として、今日なおその価値を失っていない。

弾性の測定法として、従来用いられてきた種々の静的方法は、そのまま一定変位の下における応力緩和、ならびに一定応力の下におけるクリープの測定に利用され、系の静的粘弾性 (static visco-elasticity) が与えられる。

系の重要な力学的特性—動的粘弾性 (dynamic visco-elasticity) を測定する方法は、近年目覚ましい発展をとげ、自由減衰振動の周期、減衰比の測定、および強制振動の共振点 (共振振幅と共振振動数) あるいは位相差と振幅比の測定等を利用することができる。ここでは筆者の使用した、位相差法による強制振動型レオメーターについて説明する<sup>3)</sup>。

液状物質の粘弾性を測定するために、同心二重円筒を用いる。試料を満たした半径  $r_2$  なる円筒中に、半径  $r_1$ 、慣性モーメント  $I$  なる内筒を、針金 (振れ定数  $k_0$ ) で吊し、その上端に正弦波振動変位  $\theta = \theta_0 \sin \omega t$  を加える。試料の慣性抵抗を無視し得る条件で、内筒の変位  $\theta$  は、次の運動方程式で記述される。

$$I\ddot{\theta} + R\dot{\theta} + (K + k_0)\theta = k_0\theta_0 \sin \omega t \quad (3)$$

ここで、 $K\theta$  は試料からうける弾性力、 $R\dot{\theta}$  は粘性抵抗力で、 $\omega$  は角振動数、そしてドットは時間についての微分を意味する。

定常状態における内筒の運動は、(3) の特殊解として、次式で与えられる。

$$\theta = \frac{k_0\theta_0}{\sqrt{R^2\omega^2 + (k_0 + K - \omega^2 I)^2}} \sin(\omega t - \phi) \equiv A \sin(\omega t - \phi) \quad (4)$$

$$\tan \phi = \frac{R\omega}{k_0 + K - \omega^2 I} \quad (5)$$

よって、振幅比  $m = A/\theta_0$  と、位相差角  $\phi$  とを実験的に求めることによって、試料の粘性  $R$ 、弾性  $K$  は次式によって計算される。

$$R = k_0 \sin \phi / \omega m \quad (6)$$

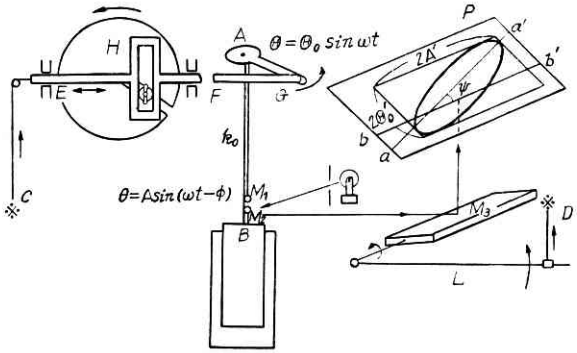
$$K = k_0 \{ (\cos \phi / m) - 1 \} + \omega^2 I$$

試料の形状因子を考慮して、試料物質の動的粘性率  $\eta$ 、および動的剛性率  $G$  は、

$$\eta = \frac{R}{4\pi l} \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \text{ poise (dyn}\cdot\text{sec/cm}^2) \quad (7)$$

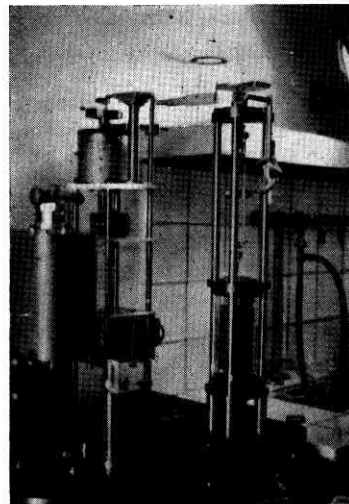
$$G = \frac{K}{4\pi l} \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right) \text{ dyn/cm}^2$$

によって与えられる。 $l$  は内筒の長さである。



第 4 図 強制振動型レオメーター

装置の実際は第 4 図に示した。モーターからの回転運動はカム H によって正弦波回転振動に変えられて、針金の上端 A に与えられる。内筒 B に固定した鏡  $M_2$  からの光線を、鏡  $M_3$  にうけ印画紙 P にうつす。 $M_3$  はレバー L によって振動する。L は連結棒 E の一端につけたひもによって C—D と伝導することによって、針金上端と同じ位相で振動する。この時印画紙上にうつるものは、駆動振動  $\theta = \theta_0 \sin \omega t$  と、内筒の振動  $\theta = A \sin(\omega t - \phi)$  が直角に合成されたリサージュ楕円である。この楕円を解



第 5 図 強制振動型レオメーター

析することによって、振幅比および位相差が決定できる。

第 5 図は、理学部 中川助教授がフランス国立高分子研究所において製作された、この型のレオメーターである。なおこの型の装置は機械的操作によっているので、振動周期の長い範囲 (10 秒以上) で使用される。

3. レオロジーの対象

レオロジーが現場の生産管理に対する基礎的データを提供することはいうまでもない。物体の性質が、それを構成する物質の構造の反映であることは常に正しいので、物体の力学的性質の追求が、その構造の解明に役立つ

つこともまた当然である。物体の力学的特性が本質的な要求としてあげられる場合は多い。また、織物の風合、食品の風味のように、肌ざわり、舌ざわりの微妙な要求がだされることがある。これらはすべて、レオロジーの研究対象になるわけである。もちろん、このような要求をすべて解決するほど、レオロジーは進歩していない。しかしこれらの要求を満たすために、一步、一步、基礎的データを集積し、微妙な性質を記述するための試みが企てられつつあるのである。

以下、レオロジーの生みの親であり、そしてまた常に新しい問題を提供しつづけてきたコロイド分散系に対する適用を、筆者の研究内容を中心として述べてゆく。

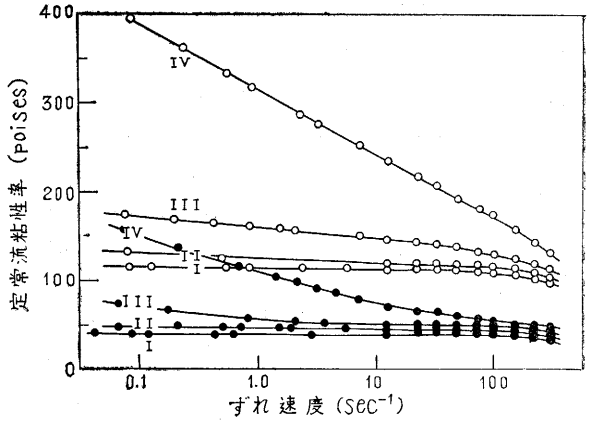
コロイド分散系では、粒子の分散性をもっとも本質的な要因であり、そのレオロジカルな挙動は、粒子の分散度によって大きく支配される。そしてこの問題は、塗料、印刷インク等としてそのまま実用的性質に関連し、さらにゴム等高分子物質の充填剤の補強作用、逆に固体間の結合に与かるバインダーの作用、粘土と高分子電解質の相互作用にみられるような土質改良の問題に対する、有力な実験手段を提供するはずである。

4. 分散系のレオロジー

液状媒質に、カーボン・ブラック、チタン・ホワイトのような粗大粒子を混合分散させた分散系——しばしばサスペンションと云われる——が、ティキソトロピー(thixotropy)、ダイラタンシー(dilatancy)、構造粘性等種々複雑な異常流動性を示すことは昔からコロイド化学者によって注目された。カーボン・ブラックを熱重合アマニ油中に分散させた系について、その見掛けの粘性を回転粘度計によって測定すると、第6図のようになる。粘度は回転速度従って試料内のずれ速度が高くなるにつれて減少する。そしてこの減少の程度は、濃度が高くなるとともに、著るしくなる。

この粘性挙動は、サスペンション内で分散粒子が“じゅずつなぎ”の構造を作り、それが外力によって破壊されるとして説明される。破壊された構造は、系を静置しておくことによって再び形成される。かくして系の粘性は、静置時間と共に増していく。これは一種のティキソトロピーである。

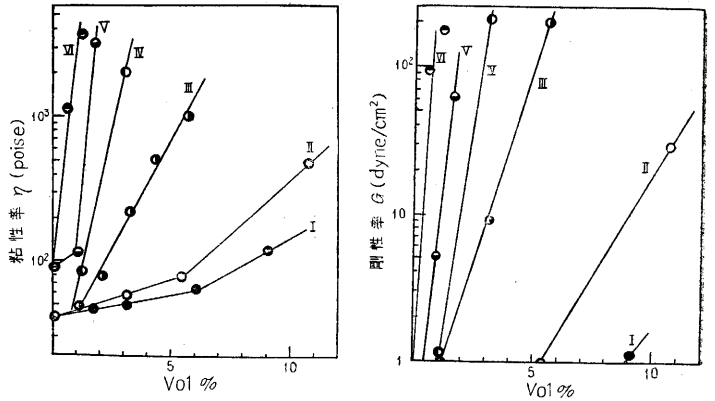
このような分散系の内部構造について、これまで粘度、透電率、



Peerless IIA-litho varnish  
I 0, II 0.56, III 2.7, IV 6.1%, 白丸 25°C, 黒丸 40°C  
第6図 定常流粘度のずれ速度依存性

熱および電気伝導度等の測定によって、追求が試みられてきた。多くの場合、粒子は個々に分散せず、いくつか集合し、特に高濃度では、ほとんど系全体にわたる構造—scaffolding structure (足場構造)を形成しているものと推定された。

このような系の動的粘弾性を、先に紹介したレオメー



I: 酸化チタン-ワニス II: 三池 20 号-ワニス III: Peerless II A-ワニス  
IV: 処理 Peerless II A-ワニス V: 酸化チタン-シリコン油 VI: Peerless II A-シリコン油  
第7図 動的粘弾性の濃度依存性 (40°C, 100sec/cycle)

第1表 動的粘弾性の濃度依存性 (40°C, 100 sec/cycle)

系	弾性出現濃度 <sup>1)</sup>	$K_1$		$K_2$
		屈折点 <sup>1)</sup> 以下, 屈折点以上		
Miike No.20 <sup>2)</sup> -varnish	5.3 vol %	11.0	37	55
Titanox A-WD <sup>3)</sup> -varnish	8.5	8.4	26	—
Peerless IIA <sup>4)</sup> -varnish	1.0	15.0	68	120
Titanox A-WD-silicone oil	0.5	180	380	410
Peerless IIA-silicone oil	~0	—	380	620

- 1) 弾性出現濃度において  $\ln \eta \sim \varphi$  曲線に屈折点を生ずる。
- 2) カーボン・ブラック, 三池合成化学。
- 3) チタン・ホワイト, American Titanium Corp. U. S. A.
- 4) カラー・ブラック, Peerless Carbon Co. U. S. A.

ターによって測定した。結果の概要を説明しよう。

(1) 動的粘弾性の濃度依存性

第 7 図に、数種のサスペンションの動的粘弾性を、粒子濃度を変数として示した。十分希薄な範囲でのみ、系は粘性流体として挙動する。系に特有なある濃度になると、粘性に重畳した弾性が観測されるようになる。この濃度は、カーボン・ブラック Peerless II A 系では特に小さく、容積濃度で 1% 内外 (重量濃度にして 2~3%) である。そして丁度この濃度で、粘性も急激な上昇を始める。この濃度以上で、サスペンションは粘弾性体となるわけである。

系の粘弾性の濃度依存性は、それぞれの濃度範囲ではほぼ次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \eta &= A \exp. (K_1 \varphi) \\ G &= B \exp. (K_2 \varphi) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで  $\varphi$  は粒子の容積分率である。実験的に求められた (8) 式の定数  $K$  の値を第 1 表に示した。

さらに濃厚になると、系の粘弾性値は飽和していく傾向がみられる。

(2) 動的粘弾性の温度依存性

サスペンションの粘弾性は、温度の上昇とともに減少する。比較的せまい温度範囲で、ほぼ Andrade の式

$$\eta = A \exp. (E_T/RT) \quad (9)$$

が妥当する。(9) 式で定義される粘性流動の活性化エネルギー  $E_T$  の測定値を第 2 表に示した。

第 2 表 粘性流動の活性化エネルギー

Titanox-A-WD-litho varnish			Peerless II A-litho varnish		
濃度	0~25°C	25~50°C	濃度	0~25°C	25~50°C
vol%	kcal	kcal	vol%	kcal	kcal
0	15.7	13.1	0	15.7	13.1
1.2	16.0	13.1	0.56	15.5	13.0
2.8	16.4	13.2	2.7	15.4	12.3
5.9	17.1	13.6	6.1	13.3	11.0
9.6	19.4	13.7	12.2	—	—
14.1	22.2	15.4	—	—	—

(3) 動的粘弾性の振動数依存性

初めに述べたように、系の力学的性質は観測のタイム・スケールによって著しく左右される。動的測定の場合、振動数によって系の粘弾性は著しく変わるわけで、一般に振動数が高くなると、弾性は増大し、粘性は減少する。振動数依存性から、系の緩和時間の分布  $E(\tau)$  を実験的に求めることができる。使用した低周波領域 (角振動数  $1 \sim 0.02 \text{ sec}^{-1}$ ) では、サスペンションは、ほぼ次のような分布をもつ

$$E(\tau) = C/\tau^k \quad (10)$$

系に固有な定数  $k$  は、大体 1~2 の範囲にある。

(4) ワイセンベルグ効果<sup>5)</sup>

粘弾性体は、種々特有な力学的現象を示し、その一つ



Peerless II A-varnish 20 wt %

第 8 図 ワイセンベルグ効果

にワイセンベルグ効果がある。これは弾性体におけるポインティング効果と類似の現象で、粘弾性体に切線応力(剪断力)を加えたとき、法線応力が生ずる。例えば第 8 図のように、粘弾性体に浸した棒を回転すると、液は回転棒に這い上がってくる。

カーボン・ブラック分散系では、10%以上で著るしい、しかも永続するワイセンベルグ効果を示す。逆にチタン・ホワイト分散系では、いかに高濃度でも、永続するワイセンベルグ効果を示さない。これは、系の内部構造の安定性の反映と思われる。

(5) 分散系の内部構造

サスペンションの粘性の濃度依存性については、これまで多くの理論的、実験的追求が試みられた。その一致した結論として、粒子間の相互作用を無視し得る十分な低濃度領域では、系の粘度は、分散粒子の形状と、その(厳密には系中の運動単位、すなわち媒質の吸着層をもっている場合にはその吸着層を含めた)容積濃度とによって一義的に定まる。すなわち

$$\eta = \eta_0(1 + K\varphi) \quad (11)$$

ここで、 $\eta_0$  は媒質の粘性率で、 $K$  は形状因子と云われ、球状粒子分散系のとき、2.5 で、いわゆる Einstein の式<sup>6)</sup>となる。

先に示した実験式 (8) を展開し、二次項以上を無視すれば (11) 式と一致する。すなわち (8) 式の  $K_1$  は、(11) 式の  $K$  と同じ内容をもつ。

カーボン・ブラック、チタン・ホワイトはいずれも、電子顕微鏡で観察すれば、その一次粒子はほとんど球形である。しかも観測された  $K$  の値が、2.5 よりはるかに大きいということは、これらのサスペンションでは、極めて低濃度でも、粒子は個々に分散せず、数個集り集合体を作っていることを、明らかに示すものである。

$K$  の値がこのように大きくなる、もっとも重要な原因として、次の二つの場合が考えられる。第一に、著るしく非球形な集合体を形成する場合、第二に、集合体自身は球形に近くても、その中に媒質を内包 (immobilization) し、見掛けの容積濃度が大きくなる場合である。

第一の場合、線形集合体を仮定すれば、Simha<sup>7)</sup> に従って、

$$K = \frac{P^2}{15(\ln 2P - 3/2)} + \frac{P^2}{5(\ln 2P - 1/2)} + \frac{14}{15} \quad (13)$$

第二の場合、でたらめに (at random) 三次元的に一次粒子が集合した球状集合体を仮定すれば、高分子溶液の粘性に対する取扱いと類似な方法によって、

$$K = 20(0.756P^{3/2} - 0.733P^{-1/2} + 0.268P^{-3/2})^{3/2}$$

上式で、 $P$  は一つの集合体を形成する一次粒子の数である。 $K$  の実測値より、算出した  $P$  の値を第 3 表に示した。

第 3 表 サンペンジョンの内部構造

系	集合体を形成する一次粒子の数 ( $P$ )		集合体が独立に存在する濃度範囲 vol%	飽和濃度 ( $\varphi_{lim}$ ) vol%
	線状	球状		
Miike No. 20-varnish	8.6	3.5	0~5.5	18
Titanox A-WD-varnish	7.0	2.6	0~8.0	25
Peerless II A-varnish	10.8	5.1	0~1.0	14
Titanox A-WD-silicone oil (~50)		(~200)	0~0.5	1

ある濃度に達すると、系の粘性は急激に増加を始め ( $\log \eta \sim \varphi$  曲線に屈折点を生ずる)、弾性が観測されるようになる。この濃度の前後で、粒子の分散状態が一変することは、明らかである。

低周波領域で観測される弾性は、分散粒子が形成する系全体にわたる構造から起因する。よってこの濃度で、これまで独立に分散していた集合体が、接触し、さらに大きな集合体—系全体にわたる構造が形成されると結論される。

一次集合体として、球状集合体を仮定すると、この濃度  $\varphi_{crit}$  は次式で与えられる。

$$\varphi_{crit} = 7.5 \rho / (s+1) K \quad (14)$$

ここで  $\rho$  は充填率 (packing density),  $s$  は最密充填状態で一つの集合体が相接する他の集合体の数である。さらに、

$$\varphi_{lim} = 2.5 \rho / K \quad (15)$$

で表わされる濃度に達すると、集合体が全空間を掩い、この濃度以上では、系の粘弾性値は飽和する傾向が期待される。以上の推論は、いずれもよく実験事実を再現する。

以上の考察から明らかのように、サスペンションにおける流動単位は、電子顕微鏡的に観察される一次粒子でなく、多少の媒質を伴った集合体である。この集合体は必ずしも安定なものでない。この安定性は、動的粘弾性の温度依存性、ならびに定常流粘度の速度勾配依存性から、ある程度推論することができる。

流動単位が、濃度の変化によ

って、その形状および大きさを変えなければ、流体力学的取扱いから予想されるように、サスペンションの粘度の温度依存性は、分散媒の性質によって定まる。実験事実は、第 2 表に示したように、カーボン・ブラック系では、濃度の増加とともに活性化エネルギーは減少し、逆にチタン・ホワイト系では増加する。

流動の活性化エネルギーに影響を与える多くの因子が考えられるが、現在取り扱っているような系では、そのもっとも重要なものは、流動単位の温度変化に対する安定性である。サスペンションがかなり強い構造をもち、これが温度によってあまり影響されないとする、温度の変化による媒質の粘度の変化ほど著しくは、系の粘度は変化しない。逆に温度の上昇により、媒質の粘度が減少し、粒子の熱運動が盛んになり、粒子の集合形成が弱くなる場合には、流動の活性化エネルギーは、濃度が高くなると減少する。

以上の諸事実から、また他の知見と合わせて、Peerless II A-varnish 系では、一次粒子 10 ケ程度より成るかなり安定な線形集合体が、Titanox A-WD-varnish 系では、一次粒子 3 ケ程度より成る。そしてかなり不安定な球状集合体が、比較的低濃度における流動単位であることが結論される。

### (6) 分散系の粘弾性

分散系の粘弾性は、粒子の分散状態によってほとんど一義的に支配される。粘性に対する以上の考察、および弾性に対するラーメン模型を仮定しての考察から結論されるように、粒子の分散度が悪いとき、系の粘弾性値は大きい。

粒子の分散状態を大きく支配するものは、分散粒子—分散媒質間の相互作用である。一例として、分散粒子として Peerless II A をもつ数種のサスペンションの粘弾性を、第 4 表に示した。粒子の表面状態、および媒質の極性、ならびに第三物質の添加が、系の粘弾性を、したがって粒子の分散状態を大きく変えることが明らかである。これらの点について、さらに実験データを集積し、理論的追求を試みるのが、分散系のレオロジーに課せられた。大きな課題である。

第 4 表 Peerless II A 分散系の粘弾性

3.2 vol %, 40°C, 100 sec/cycle

系	動的粘性率 (poise)	動的剛性率 (dyn/cm <sup>2</sup> )
Peerless II A-varnish	230	7
Heat treated Peerless II A <sup>1)</sup> -varnish	3000	340
Peerless II A-varnish-benzidine <sup>2)</sup>	90	0.5
Peerless II A-silicone oil	(10 <sup>5</sup> )	(10 <sup>6</sup> )

1) 真空中 850°C, 5 時間 加熱処理

2) ベンジジン濃度 1%

以上、分散系のレオロジーに対する筆者の研究を中心として述べたが、今後に残された問題が、数限りなく生れてくる感を深くする。例えば、従来しばしば取り扱われてきたティキソトロピーの測定法すら、確立していない。印刷インキ、塗料の実用特性を問題にすると、その要因を整理することさえ、容易でない。しかし道遠しいいども、そのための着実な歩みは、常に続けられている。

本稿では、高分子物質のレオロジーについてはふれなかったが、その進歩は実に目覚ましいものがある。これらについては、多くの成書<sup>8)</sup>を参照されたい。

(1958. 12. 24)

文 献

1) 岡小天, “高分子の粘弾性” 岩波講座, 現代物理学 (1955)  
 2) 日本化学会編, 実験化学講座, 高分子化学(下), 丸善 (1956)

高分子学会編, 高分子実験学講座, 高分子の物性 I, III, 共立出版 (1958)  
 3) T. Nakagawa and M. Senō, Bull. Chem. Soc. Japan **29** 471 (1956)  
 4) 妹尾, 日化 **78** 66, 70, 1374 (1957), 一部は未発表.  
 5) K. Weissenberg, Nature, **159** 310 (1947)  
 6) A. Einstein, Ann. Phys. **19** 289 (1906), **34** 591 (1911)  
 7) R. Simha, J. Phys. Chem. **44** 25 (1940)  
 8) R. Houwink, “Elasticity, Plasticity and Structure of Matter”, Cambridge Univ. Press, (1937); T. Alfrey, Jr, “Mechanical Behavior of High Polymers”, Interscience. N. Y. (1948); H. Green, “Industrial Rheology and Rheological Structures”, John Wiley & Sons. N. Y. (1949); M. Reiner, “Deformation and Flow” H. K. Lewis & Co. London, (1949) P. J. Flory, “Principles of Polymer Chemistry” Cornell Univ. Press, N. Y. (1953)

表 紙 写 真

水銀スルホサリチル酸の水溶液は、ゲル状で、著るしい粘弾性、ワイセンベルグ効果を示す。これは、写真にみられるように、分子が網目構造を形成しているためと思われる。

正 誤 表 (1月号)

頁	段	行	種 別	正	誤
4	左	1	本 文	…来, したがって…	…来したがって…
”	”	9	”	いわゆる巨視的の現象で……	いわゆる微視的の現象で……
”	右	34	”	…固体論とか……	…個体論とか……
7	右	29	”	…お互いにインターラクション……	…お互いにインターラクション……
20	左	22	”	カメラの場合は値段だつてドイツのものより……	カメラだけ非常に値段もね、ドイツのものより……
23	右	下11	”	ということでした……	ということをして……
24		下4	表紙写真の説明	…16 カウントを……	66 カウントを……

次 号 予 告 (3月号)

研 究 解 説

亜音速における補助翼振動について……………玉木 章夫  
 基礎地盤調査に用いる各種のサウンディング方法について……………三木五三郎  
 研究所付属工場の工程管理について……………鈴木 正吾

海 外 事 情

欧州に於いて……………金森 九郎

研 究 速 報

Ni80-Cr20 合金の抵抗焼結……………原 善四郎・島崎 俊治  
 セン継によって体積が変化する土の力学理論……………星 埜 和  
 イオン交換における総括物質移動係数について……………山本 寛・丸山 隆・有吉 繁樹