# 動的粘弾性とは何か

五十野 善信\*

### 1. は じ め に

ゴム材料の面白さは弾性(エネルギー貯蔵)と粘性(エネルギー損失)という2つの異なる性質をうまくバランスさせることができる点にある.このような粘弾性はタイムスケールに強く依存する.ここではゴムの粘弾性をタイムスケール依存性の点から整理し,動的粘弾性の意味,動的粘弾性から何が分かるのかについて解説する.

## 2. ゴムの弾性・粘性・粘弾性

ゴム分子はモノマーが共有結合によりたくさんつながったものである。炭素 - 炭素単結合はかなり自由に回転できる。炭素 - 炭素二重結合は回転できないが、回りの空間的ゆとりを生み出し、単結合まわりの回転を助けている。ゴムの柔軟性はこのゆとりと自由回転による¹)。そのため、図1に示すように、ゴム分子はまっすぐ伸びた配置を取らず、曲がりくねった糸まり状(コイル状)の配置を取らず、曲がりくねった糸まり状(コイル状)の配置を取る。このときゴムのエントロピーは最大になり最も安定した状態になる。力を加えて変形させると、伸長、圧縮いずれの場

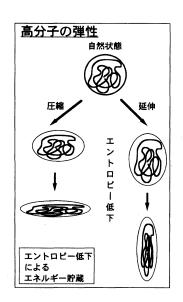


図1 高分子のエントロピー弾性

合にもコイルはつぶれた形になり $^2$ )、エントロピーが減少して不安定な状態になる。力を取り除けば元のエントロピー最大の状態に戻る。ゴム分子が弾性を示す理由はここにある。ここで、ゴム分子の形が少々変わっても、ガラス転移温度 $(T_g)$ 以上ならば、内部エネルギーの変化はほとんどない。ゴム分子が球状の形を取ろうが、つぶれた形になろうが、結合まわりの回転が容易に起こることに変わりがないことに注意すべきである。

ゴム分子の運動が何の制約も受けないのであれば、弾性しか現れないはずである。しかし、実際には、ゴム分子の周囲には別の分子が存在する。そのため、分子が動くときには摩擦を受ける(図2)。摩擦があるということはエネルギー損失があることを意味する。ゴムの粘性(エネルギー損失)は内部摩擦によるものであり、ゴムはエントロピー弾性と摩擦による粘性を同時に示す粘弾性体である。ただ、条件により、弾性が目立つこともあれば、粘性が目立つこ

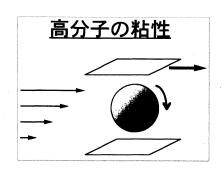


図2 高分子の粘性.摩擦によるエネルギー損失.



\*長岡技術科学大学工学部化学系(〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1)教授.工博.昭和54 年名古屋大学大学院工博士課程合成化学専攻 修了.昭和55年名古屋大学助手,昭和56年 より長岡技術科学大学講師に転じ,同助教授 を経て,平成7年より現職.専門は高分子・ ゴムの物性.日本ゴム協会関東支部常任幹事, 日本レオロジー学会理事.日本ゴム協会誌, 高分子・日本レオロジー学会誌各編集委員. ともある.

応力-ひずみ関係から粘弾性体の特徴を考えてみよう.弾性体では変形によるエネルギーがすべて蓄えられるので、ひずみを一定に保てば応力も一定になる.一般に刺激が小さければ応答は刺激の大きさに比例する.これは弾性体の場合にもあてはまり、応力はひずみに比例する.

$$\sigma = G\gamma \tag{1}$$

よく知られたフックの法則であり、比例定数は 弾性率と呼ばれる.

一方, 粘性体では変形により与えられたエネルギーはすべて失われてしまうので, ひずみを

一定に保つと応力はなくなるはずだ. したがって応力はひずみが一定のときゼロになるような物理量(ひずみ速度)に比例するはずである.

$$\sigma = \eta \left( \frac{dy}{dt} \right) \tag{2}$$

式(2)はニュートンの法則と呼ばれ、比例定数 $\eta$ が粘度である.

応力 – ひずみ関係を具体的に見る. 図 3 (a) のようなひずみを与えるとき, 弾性体の応力はひずみに比例するので,  $\sigma(t)$  曲線は  $\gamma(t)$  曲線と相似形となる(図 3 (d)). 一方, 粘性体ならば,  $\sigma(t)$  曲線は  $\gamma(t)$  曲線の時間微分の形になる(図  $\beta(t)$ ). 粘弾性体では弾性と粘性の両方の性質をもつので,  $\beta(t)$  曲線は図  $\beta(t)$  に示すような中間の形になる $\beta(t)$  変形直後は弾性機構により変形エネルギーが蓄えられて大きな応力を示すが, 時間が経過するとともに蓄えられたエネルギーの一部が粘性機構を通じて徐々に失われ, それにつれて応力も低下していき, 蓄えられたエネルギーがすべて失われたときに応力はゼロになる.

ここで注意すべきなのは、図 3 (d) や (b) のような挙動 (それぞれ完全弾性、完全粘性)を示す物質は実際には存在しないことである。ただ、弾性体に近いか、それとも粘性体に近いのかというだけで、あくまで程度の問題である。ある材料が弾性体に近いのか、それとも粘性体に近いのかは、例えば応力緩和曲線を見るだけで分かる。しかし、これでは余りにも定性的で面白くない。そのときに重要なのが緩和時間  $\tau$  である。  $\tau$  は図 3 (c) に示すように初期応力の 1/e になる時間で定義される。この定義の妥当性は弾性要素と粘性要素を直列につないだモデル (マックスウェルモデル) の応力が式 (3) で示されることからも分かる。

$$\sigma(t) = G\gamma_0 e^{-t/\tau} \tag{3}$$

ここで

$$\tau \equiv \eta / G \tag{4}$$

である.このモデルで,弾性に対応するひずみ  $\gamma_e$ と粘性 に対応するひずみ  $\gamma_v$ の比は  $\tau/t$  に一致する.

$$\frac{\gamma_{\rm e}}{\gamma_{\rm v}} = \frac{\eta}{Gt} = -\frac{\tau}{t} \tag{5}$$

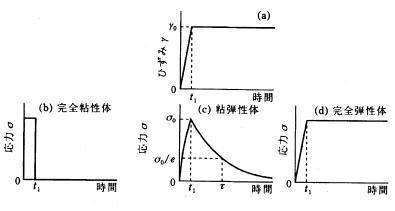


図3 様々な物質に階段状ひずみを与えたときの応力応答

したがって,緩和時間  $\tau$  が観測のタイムスケール t よりはるかに長ければ  $\gamma_e \gg \gamma_v$  なので弾性体に見える (その極限が図 3 (d)). 逆に  $\tau$  が t よりはるかに短ければ  $\gamma_e \ll \gamma_v$  なので粘性体に見える。  $\tau \approx t$  のとき,  $\gamma_e \approx \gamma_v$  となり粘弾性が顕著に現れる (図 3 (c)). ゴムが粘弾性体であるのはゴムの緩和時間が我々の日常のタイムスケールに近いからである。

#### 3. 静的粘弾性と動的粘弾性

図 3 (a)  $\sigma_1$  をできるだけ短くし、瞬間的に一定ひずみを与えれば緩和弾性率G(t) が得られる $^{4}$ .

$$G(t) \equiv \frac{\sigma(t)}{\gamma_0} \tag{6}$$

このように時間依存性のない刺激に対する応答を観測するのが静的測定法である。静的測定法は装置が簡単で、長いタイムスケールでの特徴を調べるのに適している $^{5,6}$ . しかし、ゴム材料では、ある周波数での粘弾性的特徴を知りたいこともよくある $^{7}$ . そのときに役立つのが図 $^{4}$ に示す動的測定法である $^{5,8,9}$ .

正弦波ひずみ  $\gamma = \gamma_0 \sin \omega t$ を与えるとき、弾性体ではひずみ波と同位相の、粘性体ではひずみより位相が  $\pi/2$  rad 進んだ応力振動が現れる. 粘弾性体では中間の位相差  $(0 < \delta < \pi/2)$  をもつ応力振動が現れる $^{10}$ .

弾性体 
$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t$$
 (7)

粘弾性体 
$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) (0 < \delta < \pi/2)$$
 (8)

粘性体 
$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \pi/2)$$
 (9)

したがって、 $\delta$ がゼロに近いか、それとも $\pi/2$ に近いかによって弾性的なのか、粘性的なのかがすぐに分かる。しかし、動的方法の最大の利点は弾性項と粘性項を容易に、かつ定量的に分離できる点にある。式(8)を書き直すと

$$\sigma = \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\cos\delta\right)\gamma_0\sin\omega t + \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0}\sin\delta\right)\gamma_0\sin(\omega t + \pi/2) \quad (10)$$

となり、式(7),(9)と比べれば、式(10)の右辺第1項は弾性項、第2項は粘性項に対応することが分かる。それぞれ

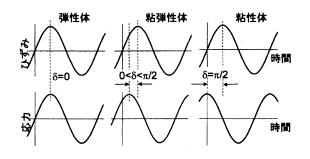


図4 様々な物質に正弦波ひずみを与えたときの応力応答と位相差

の係数をG', G"と書き,

$$G' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \tag{11}$$

$$G'' = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \tag{12}$$

で定義されるものが貯蔵弾性率と損失弾性率である. 損失 正接 tanδ はそれらの比で定義される. 損失正接は弾性項 を基準とするときの粘性項の割合を意味する.

$$tan\delta = \frac{\sin\delta}{\cos\delta} = \frac{G''}{G'} \tag{13}$$

貯蔵弾性率は弾性項を意味するので、周波数に依存しない領域(平坦領域)での値にゴム弾性の式を適用すれば架橋 点間分子量を求めることができる.

$$G' = \frac{E'}{3} = \frac{\rho RT}{M_c} \tag{14}$$

ここで、Eは伸長貯蔵弾性率である。

粘弾性体を振動変形させるのに必要な1周期あたりの仕事Wは次の積分で与えられる.

$$W = \int_0^{2\pi/\omega} \sigma \frac{d\gamma}{dt} dt \tag{15}$$

$$= \int_0^{2\pi/\omega} (\gamma_0 G' \sin \omega t + \gamma_0 G'' \cos \omega t) \, \omega \, \gamma_0 \cos \omega t dt \tag{16}$$

$$=\omega\gamma_0^2\int_0^{2\pi/\omega}\left[G'\frac{\sin 2\omega t}{2}+G''\left(\frac{1+\cos 2\omega t}{2}\right)\right]dt \qquad (17)$$

Gを含む項 [式(16)の右辺第2項]の積分はゼロになる.これは半周期の間に物体になされた仕事が残り半周期の間に外部に戻されるためである.このことからもGが弾性に関する項であることが分かる.結局,1周期における全仕事(=リサージュ図形で囲まれる部分の面積)は次の式(18)で与えられる.

$$W = \pi \gamma_0^2 G'' = \pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta \tag{18}$$

したがって、G''は1周期あたりの散逸エネルギーに対応することが分かる。G''が損失弾性率と呼ばれる理由はここにある。

もう一つ大事なことは、1 周期あたりの散逸エネルギーに対応するのは厳密には $\sin\delta$ であって、損失正接 $\tan\delta$ で

はない (位相差  $\delta$  が極めて小さな値のときにのみ,次の近似式 (19) が成立する) ことに注意する必要がある.物理的に意味があって重要なのは  $\sin\delta$  (つまり,損失弾性率 G'') である.

$$\frac{W}{\pi\sigma_0\gamma_0} = \sin\delta \approx \tan\delta \text{ (if } \delta \ll 1\text{)}$$
 (19)

# 4. マスターカーブ

ゴム分子は細長い紐のようなものであり、いろいろな運 動単位がある. モノマー程度の短い単位の運動は速い. し かし、長い単位がそろって運動するためには極めて長時間 を必要とする. そのため,変形に対する応答は10桁以上 もの時間にわたる。しかし、このように長いタイムスケー ルでの測定は実際上不可能であり、どのような方法で測定 してもせいぜい4~5桁程度の限られたタイムスケールの 範囲内でしか求められない. 図5はポリイソブチレンでの 測定例である11)。実際の測定タイムスケールは高々4桁で ある.しかし、異なる温度の曲線を、低温での曲線ほど左 へ、高温での曲線ほど右へ平行移動することにより1本の 滑らかな曲線を得ることができる. このような操作を「時 間-温度重ね合わせ」という、今では、ガラス転移温度以 上の無定形高分子に「時間-温度重ね合わせ」が可能であ ることが確かめられている<sup>5)</sup>.この操作により得られる曲 線を合成曲線(マスターカーブ)という.

図5では時間軸に沿った移動だけを説明した。しかし、 実際には弾性率は温度に依存して変化する。そのため、時間軸に沿った移動だけではなく、弾性率軸に沿った縦移動 も必要になる。この縦移動量 $b_T$ は古典的なゴム弾性論と の類推から

$$b_T = (T_{\rho}) / (T_{s\rho_s}) \tag{21}$$

であるとされてきた.ここで $\rho$ および $\rho$ 。はそれぞれ測定温度T,基準温度T。における密度である.しかし,実際にはこれと異なる縦移動が必要な場合もあり,曲線がうまく

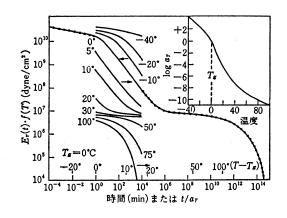


図5 様々な温度におけるポリイソブチレンの伸長緩和 弾性率とそれより得られる合成曲線(マスターカープ) 11)

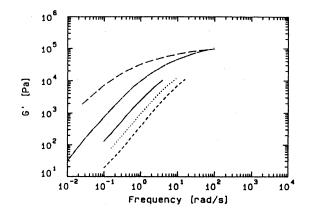


図 6 ポリジメチルシロキサン (PDMS) の  $G'(\omega)$  曲線. 曲線の測定温度は上から順に-60, 0, 60, 120, 180  $\mathbb{C}^{12)}$ .

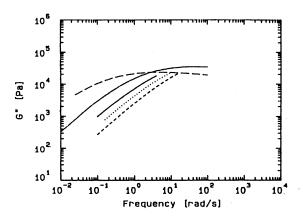


図7 PDMSの $G''(\omega)$ 曲線. 温度は図6と同じ $^{12)}$ .

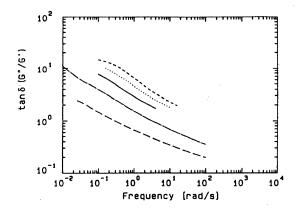


図8 PDMSの $\tan\delta$ 曲線. 温度は図6と同じ $^{12)}$ .

重なるように経験的に求められている。といっても、経験的にうまく横移動量と縦移動量を決めることはかなりの熟練を要し、緩和弾性率などの静的測定により求められる粘弾性関数では重ね合わせ操作に伴う任意性を避け難い。ところが動的弾性率などではこの任意性を避けることができる。

図 6 から 8 はそれぞれポリジメチルシロキサンの貯蔵弾性率,損失弾性率,損失正接の測定例である $^{12)}$ .緩和弾性率の場合と同様に,G', G'' も温度に依存して変化するのでそれぞれ縦移動が必要である。しかし,G'の縦移動量とG''の縦移動量は等しい。そのため,G''とG'の比である

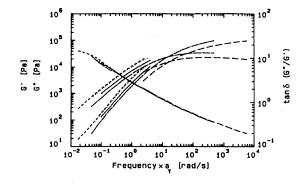


図 9 PDMSの動的弾性率マスターカーブ作成手順 1.  $\tan \delta$  曲線の重ね合わせにより横軸シフト量を決定  $^{12)}$ .

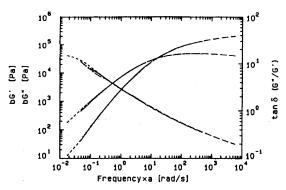


図10 PDMSの動的弾性率マスターカーブの合成手順 2 . 図 9 の G', G"曲線を縦軸シフトすることによりマスター カーブを得る <sup>12)</sup> .

 $tan \delta$  は縦移動を必要としない。したがって,まず  $tan \delta$  曲線を使って横移動量を決める。それと同じ量だけ,G',G'' を横移動させる。この操作により図 9 が得られる 12 。ここで,G',G'' 曲線を重ねるに必要なだけ縦移動させる。もちろん,G'の縦移動量とG''の縦移動量は等しくなければならない。その結果,図 10 に示すようなマスターカーブが得られる 12 。

もし、緩和弾性率などの静的粘弾性関数マスターカーブを作りたいが、重ね合わせ操作に不安を感じるときには、同じ試料で測定した動的弾性率(あるいは動的コンプライアンス)を用いて決めたシフトファクターを使うのが賢明である.

## 5. 損失弾性率のピークの意味

上で述べたようにG''は振動変形 1 周期あたりの損失エネルギーと関係づけられるので、ゴムの発熱や防振の問題を考えるうえで重要な物理量である。図11はG'、G''および $\tan\delta$  の温度依存性を模式的に示したものである。損失弾性率や損失正接がこのようなピークを示すことがよくあるが、本質的なのはG''曲線がピークを示すことである。低温 $(T_g$ 以下の温度)ではゴムも樹脂状でカチカチである。このような状態では振動変形により与えられたエネルギーのほとんどが内部に蓄えられ、熱として散逸するエネルギーはごくわずかである。ここから温度を上げていって、

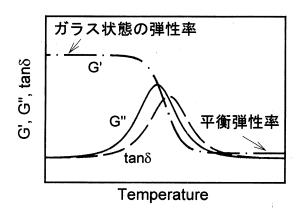


図11 動的弾性率率,損失正接の温度依存性 (模式図)

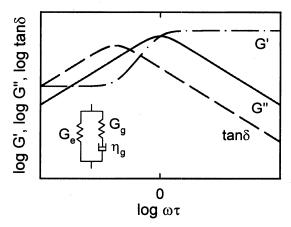


図12 三要素モデルの動的弾性率,損失正接の換算周波数依存性

 $T_g$ 付近になると、ゴム分子は急に活発な運動を始める、このとき散逸エネルギーも大きくなっていく、温度を上げるにつれてゴム分子の運動単位も大きくなっていく、温度をもっと上げると遂にはゴム分子の運動単位が架橋網目全体に及ぶくらいになる、すると、網目のゴム弾性が支配的になり、再び散逸エネルギーが小さくなる、その結果としてG''曲線にピークが現れるのである。

 $\tan \delta$  は式(13)に示したようにG''とG'の比で表される. したがって、G' が大きく変化するところで $\tan \delta$  はピークを示す。そのため、 $\tan \delta$  曲線のピーク温度はG''曲線のピーク温度よりも高めに現れる.

この様子は簡単な三要素モデルで示すことができる(図12). ゴムは低温で樹脂状の粘弾性体,高温ではゴム弾性体である. 前者をガラス域の弾性率 $G_g$ と粘度 $\eta_g$ をもつマックスウェル要素,後者を平衡弾性率 $G_e$ のバネ要素で代表させた並列モデルを考えると,G',G''および $\tan\delta$  はそれぞれ式(22)から(24)のように表される.

$$G' = \frac{\omega^2 \tau^2}{1 + \omega^2 \tau^2} G_g + G_e \tag{22}$$

$$G'' = \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} G_g \tag{23}$$

$$\tan \delta = \frac{G_g \omega \tau}{(G_e + G_g) \omega^2 \tau^2 + G_e}$$
 (24)

ここで  $\tau = \eta_g/G_g$  は緩和時間である.

 $\omega\gg1/\tau~(\omega\tau\gg1)$ のとき、 $G'\sim G_g$ 、 $G''\sim0$ 、 $\tan\delta\sim0$   $\omega\ll1/\tau~(\omega\tau\ll1)$ のとき、 $G'\sim G_e$ 、 $G''\sim0$ 、 $\tan\delta\sim0$  となり、

 $\omega\sim 1/\tau~(\omega\tau\sim 1)$ のとき,G''はピークを示す. しかし, $\tan\delta$ は $\omega\tau\sim\sqrt{G_e/(G_g+G_e)}~(<1)$  でピークを示す.

振動の周期Tと振動数 $\omega$ は $T=2\pi/\omega$ の関係にあるので, $\omega\tau\gg1$ というのは振動がすごく速くて,周期Tが緩和時間 $\tau$ に比べてはるかに短いことに対応する.このとき,ゴム分子は速い変形についていけないので,ほとんど弾性体の挙動を示す.逆に振動がものすごくゆっくりで,Tが $\tau$ に比べてはるかに長いときには,分子運動を支配するのは架橋網目そのものとなり,やはり弾性体として振舞う.振動周期が緩和時間に見合う程度のとき,振動に共鳴してゴム分子は一番活発に動き,損失エネルギーも大きくなる.時間と温度は互いに対応関係にある.低温は高振動数に,高温は低振動数に対応するので,図12の周波数軸を反転させると温度依存性に対応する図(図11)が得られる.

実際のゴムではいろいろな緩和機構があるのでもっと複雑であるが、簡単な三要素模型でもかなり説明できることが分かっていただければ幸いである.

#### 6. 典型的な架橋ゴムの動的粘弾性

ゴムの粘弾性応答は非常に幅広いタイムスケールに渡って観測される。図13は典型的な無定形ゴム架橋物の動的弾性率のタイムスケール依存性(周波数依存性)を示す。曲線は極めて局所的な運動に対応する短時間挙動(高周波数挙動)から網目全体に対応する長時間挙動(低周波数挙動)まで多くの分散挙動(転移)を示す。図13の下の絵は各領域に対応する大まかなサイズを示す。

非常に短い時間(あるいは低い温度)では, G'は高い値 (典型的には $G' \approx 3 \times 10^9 - 5 \times 10^9 Pa$ 程度)を示す. この領 域は共有結合,結合角のゆらぎ程度の局所運動に対応する. それより少し長時間側(少し高温側, ただしTg以下)では 側鎖官能基の回転や主鎖の局所運動が許されるようにな り、G' は少し低下する ( $\approx 1 \times 10^9 - 3 \times 10^9 Pa$  程度). いわ ゆるガラス状態である。ガラス域の終わりに $10^9 Pa$ 程度の 値に至った後, G'が急激に[t-m(0.5≤m≤0.8) 程度で]低 下する領域が重合度の2乗くらいに比例し、4~6桁程度 のタイムスケールに渡って出現する. ここはガラスーゴム 転移挙動と呼ばれ、セグメントから部分鎖程度(重合度で 70~200程度)を単位とする運動に対応する. これよりも 長時間領域になると運動単位が架橋網目全体に対応するよ うになり、一定値( $\approx \rho RT/M_c$ ,  $M_c$ は架橋点間分子量)を示 すようになる. もし架橋がない場合には、絡み合い網目の 弾性率  $(\approx \rho RT/M_e, M_c$  は絡み合い点間分子量)を示したの

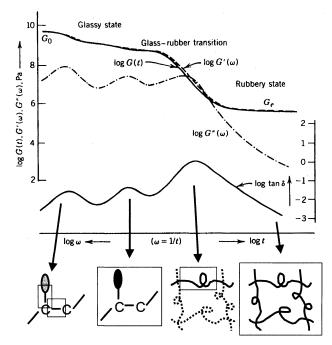


図13 典型的な架橋高分子の動的弾性率,損失正接のタイムスケール依存性<sup>12)</sup> とそれに対応する分子運動モード

ち、やがて分子鎖が互いにすり抜けるような運動が許されるようになり(ゴム - 流動転移)、ついには流動域に至る、G''および $\tan \delta$  は各分散に対応したピークを示す。

# 7. ま と め

また、緩和機構が存在してエネルギー損失の割合が大きくなるとき、G"あるいは $\tan \delta$  にピークが現れる。したがって、周波数を固定し、G"あるいは $\tan \delta$  の温度依存性を

\*

調べればガラス転移温度や結晶融解温度なども分かる.動 的弾性率や $\tan\delta$ がよく使われる理由はここにある.

ただし、動的弾性率の測定で注意を要する点がある. どんな測定装置でも、信頼できる値を得るためには適切な測定条件を考慮する必要がある. 動的粘弾性測定では慣性項 $m\omega^2$  (mは被測定系の慣性質量、 $\omega$ は角周波数 [rad/sec])の寄与を無視できるかどうかチェックしておく必要がある. 慣性項が大きいときには見掛けの位相差が変わるので、慣性項の補正を適切に行わないとG"あるいは $\tan\delta$  に大きな誤差が含まれることに注意が必要である.

## 文献と注釈

- 1) 普通のゴムには架橋点が存在する. 架橋点は分子の運動を妨げる. しかし, 架橋密度をよほど高くしない限り, モノマー単位の数に比べて架橋点の数ははるかに少なく, 架橋点がゴム分子全体の運動を妨げるようなことはない.
- 2) ここでは図に沿った説明の都合上、伸長・圧縮変形だけを取り 上げたが、せん断変形の場合も同様である。
- 3) ここでは緩和本来の意味を明確にするために架橋点がなく,応 力はゼロまで緩和する場合で説明している.架橋網目があれば, 緩和応力はある有限値にとどまる.
- 4) G(t)はせん断変形(ずり変形)時の緩和弾性率に対してよく使われる記号. 伸長変形での緩和弾性率(ヤング率)はE(t)で表現することが多い.
- 5) Ferry, J. D.: "Viscoelastic Properties of Polymers", 3rd ed., Wiley & Sons (1980)
- 6)河合弘迪,堀野恒雄,秀島光夫:高分子実験学,第10巻,力学的性質Ⅱ(高分子学会高分子実験学編集委員会編),共立出版(1983),p.23
- 7)例えば、タイヤの転がり抵抗やウェットスキッド抵抗の指標として50  $\mathbb C$ 、10 Hz  $\mathbb C$ の  $\tan\delta$  , 0  $\mathbb C$  、10 Hz  $\mathbb C$ の  $\tan\delta$  がよく用いられる。エンジンマウント用防振ゴムには 1 kHz 程度の高周波での特性も重要となる。
- 8) 高柳素夫,梶山千里:高分子実験学,第10卷,力学的性質 II (高分子学会高分子実験学編集委員会編),共立出版(1983), n.87
- 9) ゴム関連技術探訪(第9回), 日ゴム協誌, 70,509(1997)
- 10) 応力波がひずみ波に先行する. その理由は本稿でも明らかであるが,より分かりやすい説明は,例えば,Q&A,日ゴム協誌,**73**,617(2000)を参照.
- 11) Nielsen, L. E.: "Mechanical Properties of Polymers and Composite", Marcel Dekker. N.Y. (1975), Ch.3 [小野木重治訳,「高分子と複合材料の力学的性質」, 化学同人(1976), 第 3 章]
- 12) Winter, H. H., Mours, M., Baumgaertel, M., Soskey, P. R.: "Computer-Aided Methods In Rheometry" in "Rheological Measurement", 2<sup>nd</sup> ed., Collyer, A. A., Clegg, D. W., ed.: Chapman & Hall, London (1998), Ch. 2