ポリエチレンフィルムの非線形粘弾性挙動*

木 村 博** 山 口 拓 治**
井 町 正 樹** 柳 川 昭 明**

Nonlinear Viscoelastic Behavior of Polyethylene Films

by

Hiroshi KIMURA, Takuji YAMAGUCHI,
Masaki IMACHI and Teruaki YANAGAWA
(Faculty of Engineering, Fukui University, Fukui)

In this paper, the adaptability of multiple integral equation of the constituents to nonlinear viscoelastic behaviors in uniaxial stretching, for two kinds of polyethylene having different crystallinity, has been investigated. And the principle of a generalized superposition has been tested in respect of its stress relaxation, of its constant rate of elongation, and its two steps-stress relaxation experiments made by using only kernel functions $G_1(t)$, $G_2(t, t)$, $G_3(t, t, t)$, $G_4(t, t, t, t)$.

The first kernel $G_1(t)$ is obtained from the data on nonlinear stress relaxation test, which agrees fairly well with the stress relaxation modulus in linear range. The calculated value of $G_1(t)$ from the relation between the stress and the strain rate in the constant rate of elongation test, also agrees with both the above mentioned values. These result mean that the superposition in the linear terms in the integral equation of the constituent holds true.

The behaviors under the two steps-stress relaxation tests depend strongly on the additional strain, and the effects of the first strain are irregular. These tendencies differ from the analytical results given out in the fourth order theory. Only the dependencies of input time of additional strain is, but quantitatively, qualitatively similar to the theory. Then, the fourth order theory in the integral equation of its constituent is not efficient enough to describe the complex nonlinear viscoelastic behaviors of polyethylene.

(Received Jan. 28, 1972)

1 緒 言

ボルツマンの重畳原理を仮定した線形粘弾性理論により、無限小ひずみ領域の高分子の粘弾性挙動は十分に記述される。しかし、結晶性高分子は比較的微小変形で非線形粘弾性挙動が顕微であり、今日これらについての研究が要請されている。山口らは、ポリエチレンフィルム¹⁾のひずみ5%までの緩和弾性率が20~100℃の温度範囲において、ひずみの一次式あるいは二次式で充分近似できることを示した。この結果は、Green²⁾と Rivlin^{3)~5)}の理論から出発した多重積分型構成方程式を見かけ上満足し、核関数の一部が求められたことを示す。しかし、多重積分展開は広義の重畳原理であるので、直ちにこの結果が理論に一致したと認めることは

できない。この型の構成方程式の適用の可否は、材料の挙動の重畳性を検討する必要がある。結晶性高分子に対して、高次の重畳性を検討した研究は、Ward^{(6)~(8)}らと Lifshitz と Kolsky⁽⁹⁾の報告があるが、いずれもクリープ実験に応用したもので、応力緩和実験に応用した研究は見あたらない。構成方程式に含まれる核関数の決定には、きわめて大きな労力を必要とするので、本報では引数の異なる核関数の決定は行なわず、応力緩和と挙動と定速伸長挙動の間の関係、および二段応力緩和と挙動を重畳原理の観点より解析し、多重積分型構成方程式の適用性を検討する簡便な方法を求め、ポリエチレンフィルムに対する実験結果との比較を行なう。

2 解析方法

2·1 構成方程式

4) Pipkin は等方性でかつ非圧縮性物体の具体的な構

* 原稿受理 昭和47年1月28日

** 福井大学工学部 福井市文京

成方程式を、有限微小変形の場合について提出している。そこで提出された構成方程式は、テンソルを用いた三次元的なものであるが、本報で取り扱うような比較的微小変形の一軸伸長に対しては、中田の発表した一次元構成方程式で充分近似できる。すなわち、応力を $\sigma(t)$ 、ひずみを $\varepsilon(t)$ で表わすと、構成方程式は、

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & \int_{-\infty}^t G_1(t-\tau_1) \frac{d\varepsilon}{d\tau_1} d\tau_1 \\ & + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t G_2(t-\tau_1, t-\tau_2) \frac{d\varepsilon}{d\tau_1} \frac{d\varepsilon}{d\tau_2} d\tau_1 d\tau_2 \\ & + \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t \int_{-\infty}^t G_3(t-\tau_1, t-\tau_2, t-\tau_3) \cdot \\ & \frac{d\varepsilon}{d\tau_1} \frac{d\varepsilon}{d\tau_2} \frac{d\varepsilon}{d\tau_3} d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \cdots \quad (1) \end{aligned}$$

で与えられる。上式の各項は、現在の応力がそれ以前の n 時点 ($n=1, 2, \dots$) におけるひずみの相関として与えられることを示し、核関数 $G_n(t_1, t_2, \dots, t_n)$ は多時間高次緩和弾性率であり、 $t_i < 0$ のとき $G_n = 0$ となる。また $G_n(t_1, t_2, \dots, t_n)$ は引数に関して対称性を有している。

2・2 応力緩和挙動

$H(t)$ を単位階段関数とし、入力 $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 H(t)$ を(1)式に代入すると、応力緩和弾性率は

$$E(t) = G_1(t) + \varepsilon_0 G_2(t, t) + \varepsilon_0^2 G_3(t, t, t) + \cdots \quad (2)$$

と ε_0 のべき級数になる。

2・3 定速伸長挙動

ひずみ速度を v_0 とすれば、入力 $\varepsilon(t) = v_0 t H(t)$ を(1)式に代入して、

$$\begin{aligned} \sigma(t) = & v_0 \int_0^t G_1(t-\tau_1) d\tau_1 \\ & + v_0^2 \int_0^t \int_0^t G_2(t-\tau_1, t-\tau_2) d\tau_1 d\tau_2 \\ & + v_0^3 \int_0^t \int_0^t \int_0^t G_3(t-\tau_1, t-\tau_2, t-\tau_3) \cdot \\ & d\tau_1 d\tau_2 d\tau_3 + \cdots \quad (3) \end{aligned}$$

を得る。両辺を v_0 で除し、積分値を t の関数で表わすと

$$\frac{\sigma(t)}{v_0} = F_1(t) + v_0 F_2(t, t) + v_0^2 F_3(t, t, t) + \cdots \quad (4)$$

となり、 v_0 のべき級数になる。

上式の F_i と(2)式の G_i の間には

$$G_1(t) = \left. \frac{\partial F_1(t_1)}{\partial t_1} \right|_{t_1=t} \quad (5a)$$

$$G_2(t, t) = \left. \frac{\partial^2 F_2(t_1, t_2)}{\partial t_1 \partial t_2} \right|_{t_1=t, t_2=t} \quad (5b)$$

などの関係がある。通常の定速伸長実験では、 $t_1 = t_2 = \dots = t_n = t$ における F_i しか求まらないので、(5a) 式によって $G_1(t)$ しか求まらない。この方法で G_n ($n > 1$) を求めるためには、伸長過程でひずみ速度を $(n-1)$ 回変速する n 段定速伸長実験を行なう必要が

ある。(5b)式は、非線形領域の実験結果から線形項を分離して、その領域の重量性を検討する方法として有用である。

2・4 二段応力緩和挙動

Fig. 1 を参照すると入力は、

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_1 H(t) + \Delta \varepsilon H(t-t_1) \quad (6)$$

で与えられ、上式を(1)式に代入して $\Delta \varepsilon$ の四次項までとって、二段ひずみ印加後の応力 $\sigma'(t)$ と一段ひずみ印加後の応力 $\sigma(t)$ の差 $\Delta(t)$ を近似計算すると、

$$\begin{aligned} \Delta(t) = & \Delta \varepsilon \{ G_1(t-t_1) + 2\varepsilon_1 G_2(t, t-t_1) \\ & + 3\varepsilon_1^2 G_3(t, t, t-t_1) + 4\varepsilon_1^3 G_4(t, t, t, t-t_1) \} \\ & + (\Delta \varepsilon)^2 \{ G_2(t-t_1, t-t_1) + 3\varepsilon_1 G_3(t-t_1, \\ & t-t_1, t-t_1) + 6\varepsilon_1^2 G_4(t, t, t-t_1, t-t_1) \} \\ & + (\Delta \varepsilon)^3 \{ G_3(t-t_1, t-t_1, t-t_1) \\ & + 4\varepsilon_1 G_4(t, t-t_1, t-t_1, t-t_1) \} \\ & + (\Delta \varepsilon)^4 \{ G_4(t-t_1, t-t_1, t-t_1, t-t_1) \} \quad (7) \end{aligned}$$

となる。

$\Delta \varepsilon > 0$ の場合、 $\Delta(t) \equiv \Delta_+(t)$ 、 $\Delta \varepsilon < 0$ の場合に $\Delta(t) \equiv \Delta_-(t)$ で表わし、 $\Delta_+(t) > 0$ 、 $\Delta_-(t) < 0$ を考慮し、さらに、 $t' = t - t_1$ において、上式の奇数次項を消去すると

$$\begin{aligned} R(t') \equiv & -\frac{\Delta_+(t') + \Delta_-(t')}{2(\Delta \varepsilon)^2} = \frac{\{|\Delta_-(t')| - |\Delta_+(t')|\}}{2(\Delta \varepsilon)^2} \\ = & -\{G_2(t', t') + 3\varepsilon_1 G_3(t', t', t') \\ & + 6\varepsilon_1^2 G_4(t', t', t', t') \\ & + (\Delta \varepsilon)^2 G_4(t', t', t', t')\} \quad (8) \end{aligned}$$

となる。

線形の場合、 $|\Delta_+(t)| = |\Delta_-(t)|$ で $R(t) = 0$ となることは周知のことである。二重積分近似では、 $R(t)$ は一段ひずみ ε_1 、付加ひずみ $\Delta \varepsilon$ 、および二段ひずみ印加時刻 t_1 に依存せず、 $-G_2(t, t)$ となる。本報で用いた材料は $G_2(t, t) < 0$ であり、 $|G_2(t, t)|$ は t の単調減少関数であるから、二重積分近似の場合は、 $|\Delta_-(t)| > |\Delta_+(t)|$ となり、 $R(t)$ は t に対して単調減少する。三重積分近似の場合には、 ε_1 と t_1 に依存するが、 $\Delta \varepsilon$ には依存しない。四重積分近似でさらに $\Delta \varepsilon$ 依存性が現われる。

応力緩和実験より、 $G_2(t, t)$ と $G_4(t, t, t, t)$ が求まるから、

Fig. 1. Diagram of two step stress relaxation program and response.

$$P(t') \equiv \frac{R(t') + G_2(t', t') + (\Delta \epsilon)^2 G_4(t', t', t')}{3\epsilon_1}$$

$$= \frac{1}{6(\Delta \epsilon)^2 \epsilon_1} \{ |A_-(t)| - |A_+(t)|$$

$$+ 2(\Delta \epsilon)^2 G_2(t', t') + 2(\Delta \epsilon)^4 G_4(t', t', t') \}$$

$$= -\{ G_3(t' + t_1, t', t') + 2\epsilon_1 G_4(t' + t_1, t' + t_1, t', t') \} \quad (9)$$

の左辺は計算することができる。右辺で $\Delta \epsilon$ 依存性が消失し、 ϵ_1 の一次式となり、 $G_3(t' + t_1, t', t')$ 、 $G_4(t' + t_1, t' + t_1, t', t')$ を求めることができる。二重積分近似では $P(t) = 0$ となり、三重積分近似の場合は、 ϵ_1 の影響はない。

一般に、 $t_i \geq 0$ で $s_i = t + t_i (i = 1, 2, \dots, n)$ とすれば、 $G_n(s_1, s_2, \dots, s_n)$ は $G_n(t, t, \dots, t) (n > 1)$ と余り大差ないと仮定し、また t が t_i に比して大きくなれば、 t_1 の影響が薄れ、 $G_n(s_1, s_2, \dots, s_n)$ は $G_n(t, t, \dots, t)$ に収れんとすると仮定すると、次のように書くことができる。

$$G_n(s_1, s_2, \dots, s_n) = f_n(s_1, s_2, \dots, s_n) + G_n(t, t, \dots, t) \quad (10)$$

収れんの条件により、 $t \gg \max(s_i - t)$ で、 f_n は 0 になる。あるいは、

$$G_n(s_1, s_2, \dots, s_n) = g_n(s_1, s_2, \dots, s_n) \times G_n(t, t, \dots, t) \quad (11)$$

この場合には、 $t \gg \max(s_i - t)$ で g_n は 1 になる。

f_n 、 g_n は引数がすべて等しい場合に、それぞれ 0、1 になる以外は、対称性、因果律を満足するなどの性質は G_n の性質と同一である。(11)、(12)式のいずれを採用した方が有利であるかは、実験値の処理の際、あるいは理論展開に应用する際に判断される。以上の仮定から、 $P(t')$ は $-\{G_3(t', t', t') + 2\epsilon_1 G_4(t', t', t', t')\}$ に収れんする。このように $R(t)$ あるいは $P(t)$ を求めて、多重積分展開した場合の高次の項の重畳性を検討することができる。

3 実験

3.1 試料

用いた試料は、低密度ポリエチレン Yukalon K-3212(三菱油化 K. K. 製) および高密度ポリエチレン Hizex 5000-S(三井石油化学 K. K. 製) の二種類である。試料の製膜条件、密度および結晶化度を Table I に示す。厚みは約 0.3~0.4 mm であった。

3.2 測定

これらの試料を長さ 10 cm、幅 1 cm の短ざく型に切り、テーブル型インストロン試験機(MODEL TM-M)を用い、チャック間距離 5 cm とした。Table II に定速伸長実験に用いた伸長速度とひずみ速度の関係を示す。測定時間は、最低伸長速度で 3000 秒、最高伸長速度で 4 秒とし、最大伸長ひずみは 4~10% とした。Table III に二段応力緩和実験に採用した一段ひずみ ϵ_1 、付加ひずみ $\Delta \epsilon$ 、二段ひずみ印加時刻 t_1 を示

Table I. Casting conditions, density, and degree of crystallinity of the polyethylene films tested.

Sample	Casting	Density (g/cm ³)	Degree of crystallinity (%)
Yukalon K-3212	Melted at 140°C for 10 min, cooled gradually, kept at 105°C for 1 hr, cooled gradually again down to room temperature, and conditioned at 105°C for 2 hr.	0.922	66.2
Hizex	Melted at 180°C for 10 min, cooled gradually, kept at 125°C for 1 hr, cooled gradually again down to room temperature, and conditioned at 125°C for 2 hr.	0.969	89.7

Table II. Cross head speed v and strain rate v_0 used in constant rates of elongation.

v (cm/min)	v_0 (1/sec)	v (cm/min)	v_0 (1/sec)	v (cm/min)	v_0 (1/sec)
0.004	1.33×10^{-5}	0.05	1.66×10^{-4}	0.8	2.66×10^{-3}
0.005	1.66	0.08	2.66	1.0	3.33
0.008	2.66	0.1	3.33	1.333	4.44
0.01	3.33	0.133	4.44	2.0	6.66
0.013	4.44	0.2	6.66	3.0	1.00×10^{-2}
0.02	6.66	0.3	1.00×10^{-3}	4.0	1.33
0.03	1.00×10^{-4}	0.4	1.33	5.0	1.66
0.04	1.33	0.5	1.66	8.0	2.66

Table III. First strain ϵ_1 , additional strain $\Delta \epsilon$, and input time used in two step relaxation.

Yukalon		Hizex	
ϵ_1 (%)	$\Delta \epsilon$ (%)	ϵ_1 (%)	$\Delta \epsilon$ (%)
0.3	0.05, 0.1, 0.15	0.3	0.05, 0.1, 0.15
1.0	0.5	0.7	0.10, 0.2, 0.4
2.0	0.5, 1.0	1.0	0.20, 0.4, 0.6
3.0	0.5, 1.0, 1.5	2.0	0.20, 0.4, 0.6
t_1 (sec)	100, 200, 500		

す。実験はすべて 20°C、65%RH の恒温恒湿室で行なった。

4 実験結果および考察

4.1 応力緩和挙動

Fig. 2 に緩和弾性率の等時曲線の一例を示す。図より明らかなように、ひずみの増加にしたがって、弾性率は低下し、(2)式のようにひずみのべき級数で表わすことができる。これをひずみの三次式で近似して G_n を求めると、 $n=1, 3$ の場合、 $G_n > 0$ 、 $n=2, 4$ の場合 $G_n < 0$ となり、応力緩和弾性率は ϵ_0 の交代級数になる。 $\epsilon_0 < 1$ の範囲では

$$\epsilon_0^{n-1} G_n(t) \geq \epsilon_0^n G_{n+1}(t) \quad (12)$$

Fig. 2. Isochronous stress relaxation modulus plotted against the strain.

Fig. 3. Kernel functions $G_1(t)$, $G_2(t, t)$, $G_3(t, t, t)$, $G_4(t, t, t, t)$ versus time for pure tension.

であれば、級数は収れんする。 ϵ_0 が5%までの範囲で、上式の条件は満足していた。Fig. 3は $\log |G_n|$ を $\log t$ に対してプロットしたものである。低密度試料の場合、時間の経過とともに高次の G_n の寄与が減少して、

非線形性は減少するのに対し、高密度試料では、ほぼ平行な直線であり、非線形性は伸長初期の状態をそのまま持続する。これは多分、両試料の微細構造の相違ならびそれに伴う変形機構の相違に関連するものと考え

Fig. 4. Isochronous tensile stress/strain rate plotted against the rate of elongation for low density polyethylene.

Fig. 5. Isochronous tensile stress/strain rate plotted against the rate of elongation for high density polyethylene.

えられる。

4・2 等速伸長挙動

Fig. 4 と Fig. 5 は $\sigma(t)/v_0$ の等時曲線を示したもので、伸長速度の増加にしたがって、 $\sigma(t)/v_0$ は減少し顕著な非線形を示し、(4)式のようにひずみ速度のべき級数で表わすことができる。しかし、高速伸長の短時間域の実測値は減少曲線からはずれ、逆に伸長速度の増加にしたがって、 $\sigma(t)/v_0$ の値は増加している。この原因は明確でないが、大体ひずみ 0.5% までにこの現象が見られることから、複雑な微細構造の変形、破壊に基づくものと考えられる。図中の曲線は、 v_0 の三次曲線で近似したものである。(4)式の F_n は G_n と同様に、 n が奇数の場合正で、偶数の場合負となり、 $\sigma(t)/v_0$ は v_0 の交代級数となる。Fig. 6 は $\log |F_n|$ と $\log t$ の関係を示したものである。低密度試料の $\log F_1$ と、高密度試料のすべての $\log |F_n|$ がほぼ直線状に変化していることは、(5)式の関係を実定的に満足していることを示している。

Fig. 7 は(5a)式によって求めた $G_1(t)$ と(2)式の $G_1(t)$ および線形領域の緩和弾性率を比較したものである。両試料とも、三本の曲線は良好な一致を示している。したがって、両試料とも(1)式の線形項の重量性を満足していると考えられる。

Fig. 6. $F_n(t, \dots, t)$ in Eq. (4) versus time curves obtained by constant rates of elongation.

Fig. 7. Comparison of the linear stress relaxation modulus with G_1 obtained by Eq. (2) and Eq. (5. a).

なお、図中の非線形領域の応力緩和実験から求めた $G_1(t)$ の短時間側 (1~100 sec) の値は、10℃の $G_1(t)$ 曲線を $\log t$ 軸に沿って移動し、20℃の $G_1(t)$ 曲線に重ね合わせて得たものである。

4・3 二段応力緩和挙動

$P(t)$ 曲線の代表例を Fig. 8, 9 に示す。 $\epsilon_1 = 0.3\%$ の場合は、測定値の誤差が大きく系統的な結果が得られなかったが、それ以外の ϵ_1 に対する $P(t)$ 曲線の傾向はこの図に類似している。 $\Delta\epsilon$ が小さい場合、実測値がばらついているのは、 $P(t)$ の誤差はいろいろの量の誤差が集積されて大きくなるためである。

これらの図を通じて共通なことは、 $\Delta\epsilon$ が大きいほど、 $P(t)$ の値が小さくなり、明りょうな $\Delta\epsilon$ 依存性が表われていることである。この $\Delta\epsilon$ 依存性は短時間領域で著しく、時間の経過とともに減少していく。この結果は(9)式の理論と一致せず、 $\Delta\epsilon$ についてより高次の非線形を示す。 $(\Delta\epsilon)^2 G_4(t, t, t, t)$ の $P(t)$ への寄与が小さいので、さらに高次の項を加えても、 $P(t)$ の $\Delta\epsilon$ 依存性を記述できる可能性は余り期待できないと思われる。

$P(t)$ と ϵ_1 の一次関係を、Yukalon 試料で $\Delta\epsilon = 0.5\%$ 、Hizex 試料で $\Delta\epsilon = 0.2, 0.4\%$ の結果について調

Fig. 8. Effects of additional strain $\Delta\epsilon$ and input time of $\Delta\epsilon$ on $P(t')$ in two step relaxation test for low density polyethylene.

Fig. 9. Effects of additional strain $\Delta\epsilon$ and input time of $\Delta\epsilon$ on $P(t')$ in two step relaxation test for high density polyethylene.

べたが、 $P(t)$ と ϵ_1 の間に系統的な関係は認められず、この点でも実測値は理論と一致しない。

t_1 の影響については、全般的傾向として $P(t)$ は短時間領域で増加し、その増加速度は t_1 の大きいものほど大きい。一方、長時間領域では、 $P(t)$ は漸増、平衡、減少の三つの挙動に分かれる。この挙動と $\Delta\epsilon$, t_1 , ϵ_1 の間には定まった関係は認められないが、 t_1 の影響が次第に薄れ、 $P(t)$ はある一定値に収れんする傾向があり、(10), (11)式の仮定と一致する。しかし図中の理論的収れん値 $-\{G_3(t, t, t) + 2\epsilon_1 G_4(t, t, t)\}$ と比較す

ると、実測値はかなり大きい。その理由は、(9)式において $G_2(t, t)$ と $G_4(t, t, t, t)$ が負であることを考慮すれば、 $|A_-|$ が $|A_+|$ に比して大きくなるためと思われる。 $\Delta\epsilon$ が小さい場合に、この傾向が著しいので、初期の除荷で荷重の低下が顕著で、次第にその低下が鈍化する除荷経路が推測される。このような除荷経路は塑性ヒステリシス曲線において見られることから、塑性ひずみが存在するため、実験が理論に一致しない一因とも考えられる。

以上、厳密な解析によって、実測値は高次の重畳性を満足しないことが明らかになった。前述のように、より高次の近似を行なっても、理論と実験の一致を求めることは困難と考えられる。むしろ、三次元的取り扱い、 G_n の対称性、定常性などの検討、塑性を考慮するなどを行なって、逆に低次の近似で充分記述するような理論を案出する方が望ましいように思われる。

終わりに、本研究に対し、有益な助言をいただいた京都大学工学部河合弘勉教授、川端季雄助教教授に感謝を表し、あわせて、実験の一部を協力された鹿島高広氏に謝意を表します。

(昭和46年10月20日 第19回レオロジー討論会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 山口拓治, 高橋哲夫, 柳川昭明, 木村里雄, 繊維学会誌, **27**, 65 (1971).
- 2) Green, A. E., and R. S. Rivlin, Arch. Rat. Anal., **1**, 1 (1957).
- 3) Green, A. E., R. S. Rivlin, and A. J. M. Spencer, Arch. Rat. Anal., **3**, 82 (1959).
- 4) Pipkin, A. C., Rev. Mod. Phys., **36**, 1034 (1964).
- 5) Nakada, O., J. Phys. Soc. Japan, **15**, 2880 (1960).
- 6) Ward, I. M., and E. T. Onat, J. Mech. Phys. Solids, **11**, 217 (1963).
- 7) Hodley, D. W., and I. M. Ward, *ibid.*, **13**, 397 (1965).
- 8) Ward, I. M., and J. M. Wolfe, *ibid.*, **14**, 131 (1966).
- 9) Lifshitz, J. M., and H. Kolsky, Int. J. Solids Structures, **3**, 383 (1967).
- 10) Lockett, F. J., Int. J. Engng. Sci., **3**, 59 (1965).

(458頁より)

250. Viskoelastisches und Gleichgewichtsverhalten des in geringem Grad vernetzten Poly(2-Hydroxyäthylmethacrylates) im kautschukartigen Zustand, J. Janáček, 262.
251. On the stability of viscoelastic fluid flow, IV, A. Giesekus, R. K. Bhatnagar, 266.
252. Anlaufmessungen an Polyvinylacetal-Lösungen, J. Schurz, A. Mavrommatakis, 275.
253. Stromungsdoppelbrechung in Kaolinsuspensionen, D. Hums, R. Bruckner, 289.
254. Dynamisches Verhalten von Elastomeren bei grossen Dehnungen und geringen kleinen Schwingungen, E. A. Meinecke, 302.
255. Analysis of dynamical behavior of viscoelastic fluids, C. D. Han, 326.
256. Stochastic models of relaxation phenomena, D. R. Axelrad, J. Provan, 330.
257. High-elasticity of polyisobutylene and polystyrene solutions, A. Y. Malkin, M. P. Zabugina, V. E. Drevad, G. V. Vinogradov, 336.

(475頁へ)