

ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第6報)
ヤング率と見かけの弾性比例限内の荷重緩和挙動

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2012-01-18 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 木村, 里雄, 和田, 善男, KIMURA, Sato, WADA, Yoshio メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10098/4837

ポリプロピレンフィルムの機械的性質 (第6報)

ヤング率と見かけの弾性比例限内の荷重緩和挙動

木 村 里 雄^{*}・和 田 善 男^{*}

Mechanische Eigenschaften der Polypropylenfilme (VI)

Statischer Yungscher Koeffizient und Belastungsrelaxationsvorgänge innerhalb der scheinbaren Elastizitätsgrenze

Satoo KIMURA, Yoshio WADA

(Eingegangen am 15. April 1969)

Abstraktion

In dieser Arbeit haben wir untersucht die statischen Yungschen Koeffizienten und die Belastungsrelaxationsvorgänge innerhalb der scheinbaren Elastizitätsgrenze in Polypropylenfilme. Hierbei sind die wichtigen Versuchsergebnisse wie folgende:

i) In dem Gebiete zwischen der scheinbaren Elastizitätsgrenze und der oberen Streckgrenze, mit den zunehmenden Dehnungen nehmen die scheinbaren Yungschen Koeffizienten exponentialfunktionenartig ab.

ii) Nach der Dehnung bestehen die stabilen Relaxationswerte. Es gibt aber nicht die echten Elastizitätsgrenze.

1 緒 言

高分子物質,特にポリプロピレンフィルムについての応力—伸び率曲線はその鎖状分子の構成によって変化するが,またこれの製造時における条件によって結晶化度および配向度も大きく変えることができるので,それらの影響によって著しく様相を異にしている。

応力—伸び率曲線において,特に上降伏点までの挙動において応力,伸び率,弾性率などの関係は,このような高分子材料を利用する場合考慮しなければならない重要事項である。そこで,本報ではポリプロピレンフィルムについての応力—伸び率曲線の各過程の現象学的研究や各過程からの応力緩和挙動についての現象学的研究によって内部構造の変化する様相を究明

し,その関連性を明らかにすることが必要である。したがって,ポリプロピレンフィルムの機械的性質の一つである上降伏点までの応力—伸び率曲線を詳細に求め,見かけの弾性比例限と上降伏点の引張速度依存性を調べ,その応力—伸び率曲線から静的ヤング率を求める。また弾性比例限からの荷重緩和現象について究明し,前報にて用いた力学モデルによって現象論的に検討することにした。

2 実験方法

2・1 試料の採取方法と作成

試料はその製造時にカレンダー方向にある程度延伸されている厚さ27.6μのポリプロピレンフィルムを用いた。試料の作成は農業用塩化ビニルフィルムに対して

* 繊維工学科

は JIS K 6732 によってダンベル型にするよう規定されているが、本実験ではフィルムを繊維の形状に近づけることを目的として前報で報告しているように、その幅を $\frac{3}{4}$ に縮めたダンベル型を採用することにした。一般にフィルムは製造時にカレンダー方向に延伸されているため試料の採取方向によってその物理的機械的性質は均一でないで、カレンダー方向に平行な方向を基準にして 0° 方向とし、それより 45° および 90° 傾いた方向の3種類の試料を作成し実験を行なった。

2.2 実験装置

試験機は島津製作所製のオートグラフ I M-100を、記録計は日本電機機材のXYレコーダXYT-1をそれぞれ使用した。また、試料の幅と厚さの変化を読むために誘導顕微鏡(精度 1/100 mm)とマイクロメータ(精度 1/1000 mm)を用いた。このレコーダの性能は、指示速度 625mm/sec 以上で確度 $\pm 5\%$ 、感度 $\pm 1\%$ であり、ペン追従性はきわめて良好である。

2.3 引張速度とゲージ長さの決定

「ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第1報)変形と破壊について」によって、荷重緩和の実験では、ゲージ長さ 80mm, 引張速度 80mm/min すなわち 100%/min とした。また引張速度依存性を調べる実験では、ゲージ長さ 80mm, 引張速度 80mm/min を基準にして、40 mm/min, 20 mm/min および 10 mm/min の4種類について行なった。

2.4 見かけの弾性比例限内における荷重緩和

引張方向 0° , 45° および 90° 方向に対する試料を引張速度 80mm/min にて引張した場合に生ずる弾性比例限の伸び率は前回の報告のとおり、それぞれ0.78%, 0.69%および0.78%である。そこで、本実験ではそれらの弾性比例限内で 0° 方向引張に対しては0.74%, 0.61%, 0.40%, 0.20%および0.12%の5点, 45° 方向引張に対しては0.73%, 0.41%, 0.35%, 0.19%および0.10%の5点, 90° 方向引張に対しては0.74%, 0.40%, 0.32%および0.11%の4点を選出し、それぞれの点から荷重緩和を行なってその挙動について検討することにした。緩和観測時間については、前報により弾性限付近の緩和時間は30minとし、それ以後では荷重緩和が起らないことが明らかになっているので、すべて30minで完全に緩和したとみなした。

2.5 静的ヤング率について

引張試験によりえられる応力—伸び率曲線の初期部の傾斜から見かけの弾性を示す部分の見かけのヤング

率を求めることができる。また見かけの弾性比例限から上降伏点までのヤング率の変化を調べてみた。実験に当たっては、ばらつきが少ないために各引張方向ともに試料10本ずつ取ってこれらの算術平均したもののから応力—伸び率曲線をうることにした。

弾性がフック的でない弾性比例限から上降伏点にいたる間のヤング率は、一般に伸長率の関数として表わすのが便利である。本実験では、試験初期の断面積と上降伏点の断面積との関係は、線型的に変化するものと仮定して、初期の試料厚さおよび幅と、上降伏点における試料の厚さおよび幅を測定した。その場合試料の厚さの変化は、各引張方向試料ともに1~1.5 μ であって、幅の変化は110~240 μ であった。したがって試料の厚さは変化しないものとし、すべて28 μ として計算を行なって応力を求めた。

3 実験結果および考察

3.1 応力—伸び率曲線および静的ヤング率

引張方向 0° , 45° および 90° 方向試料を引張速度 80 mm/min, 40mm/min, 20mm/min および 10mm/min にて引張した場合の応力と伸び率との関係を示すと図1, 2, 3および図4のようである。また 0° , 45° および 90° 方向の各引張速度に対する応力—伸び率曲線を示したものが図5, 6および図7である。

次にヤング率と伸び率の関係については、引張速度 80mm/min, 40mm/min, 20mm/min および 10mm/min における各方向の上降伏点までのヤング率の変化状況を図8, 9, 10および図11に示し, 0° , 45° および 90° 方向の各引張速度に対するヤング率の変化状況を図12, 13および図14に示している。

次に実験でえた応力—伸び率曲線の近似式を力学的モデルから求めてみる。そこで前報(第3報)の図23の②に示しているように、凝結バネ5をダッシュポットにおきかえた4要素モデル(図15)に対する関係式は圧縮バネ1, バネ3およびダッシュポットのそれぞれの定数をじゅうらいにならって K_e , K_3 および η_5 で表わし、その間に $K_e < K_3$ の関係があるとする、次のようになる。

$e < e_1$ すなわち弾性比例限までは

$$P = K_e e_1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$e > e_1$ すなわち弾性比例限から上降伏点までは

$$P = P_1 + P_2$$

$$\frac{de}{dt} = \frac{1}{K_3} \frac{dP_1}{dt} + \frac{P_1}{\eta_5}$$

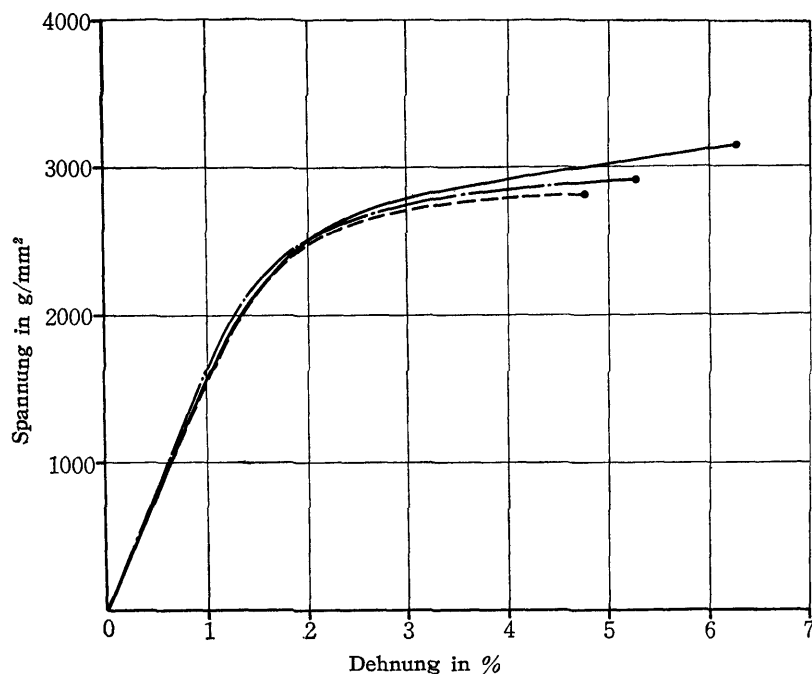


Abb. 1. Spannungs-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 80mm/min. — 0°-Zugrichtung, —·— 45°-Zugrichtung, ---- 90°-Zugrichtung, ● obere Streckgrenze.

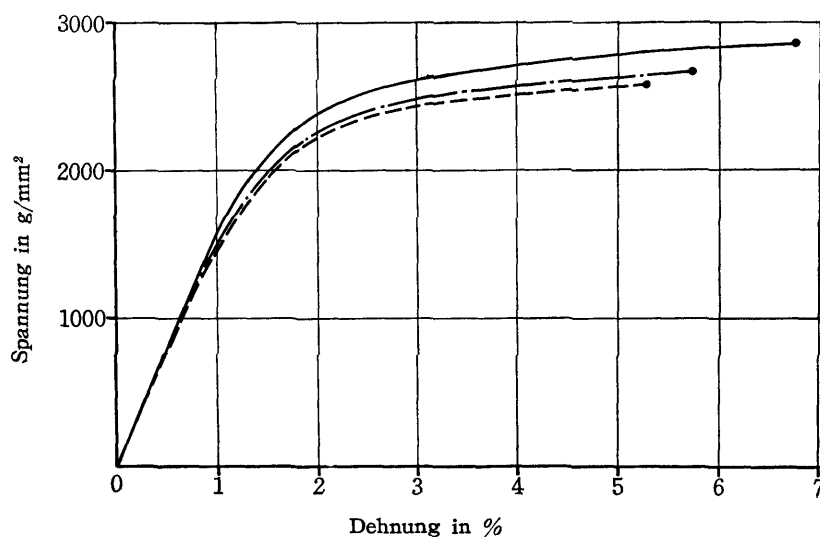


Abb. 2. Spannungs-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 40mm/min. — 0°-Zugrichtung, —·— 45°-Zugrichtung, ---- 90°-Zugrichtung, ● obere Streckgrenze.

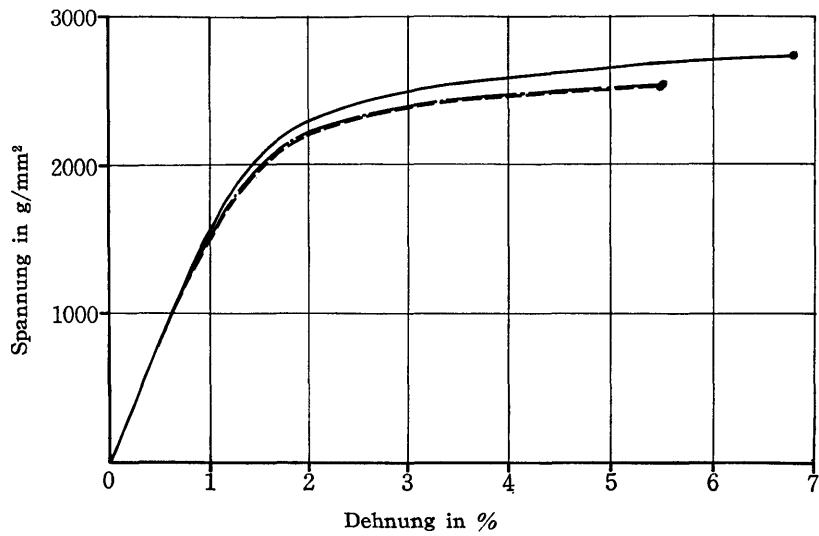


Abb. 3. Spannungs-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 20mm/min. — 0°-Zugrichtung, -·-·- 45°-Zugrichtung, ---- 90°Zugrichtung, ● obere Streckgrenze.

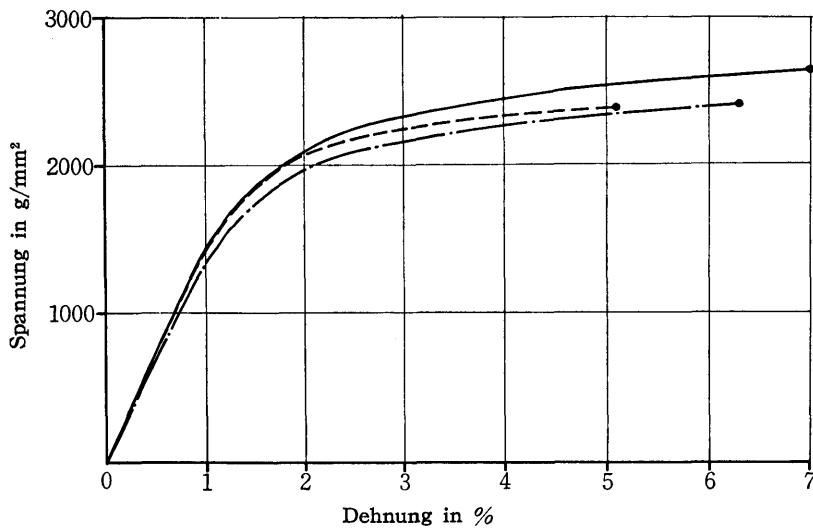


Abb. 4. Spannungs-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 10mm/min. — 0°-Zugrichtung, -·-·- 45°-Zugrichtung, ---- 90°-Zugrichtung, ● obere Streckgrenze.

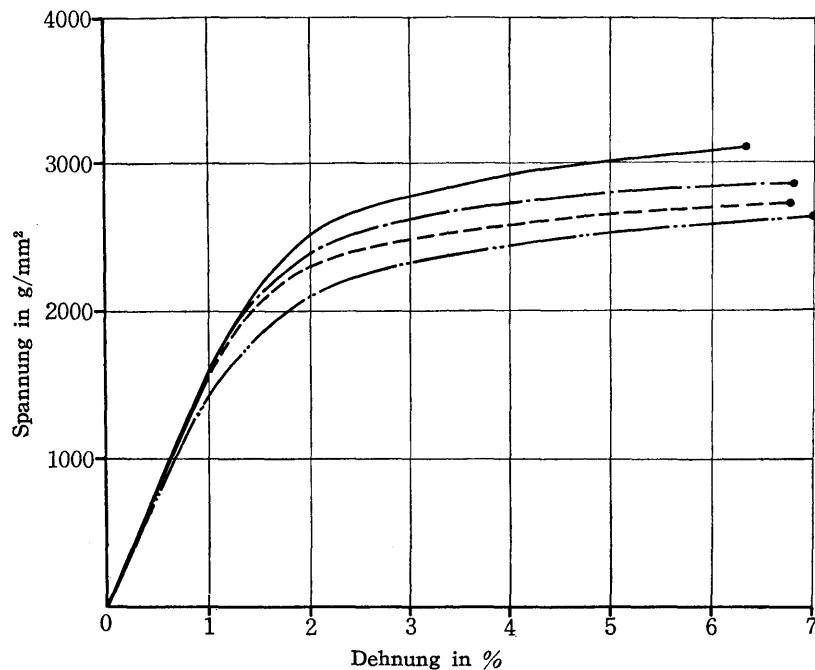


Abb. 5. Spannungs-Dehnungskurve beim 0°-Richtungszuge.
 — Zuggeschwindigkeit 80mm/min, - - - 40mm/min, ----
 20mm/min, ····· 10mm/min, ● obere Streckgrenze.

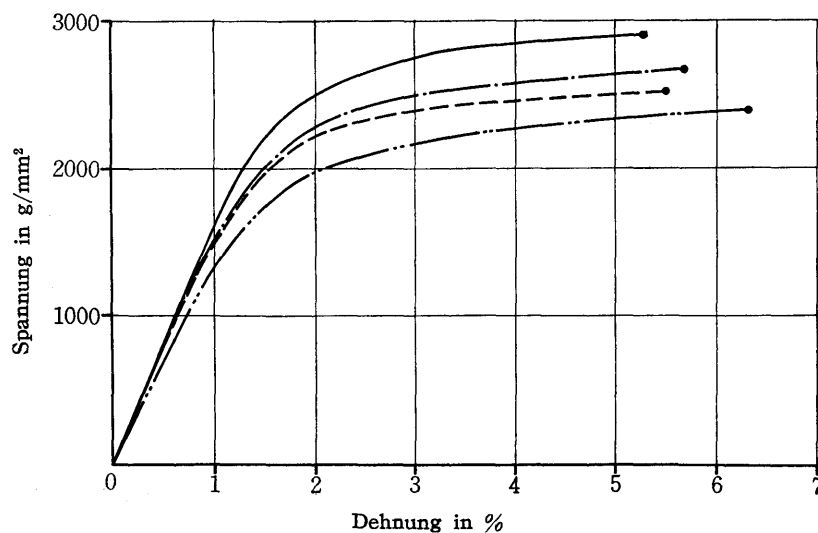


Abb. 6. Spannungs-Dehnungskurve beim 45°-Richtungszuge.
 — Zuggeschwindigkeit 80mm/min, - - - 40mm/min, ----
 20mm/min, ····· 10mm/min, ● obere Streckgrenze.

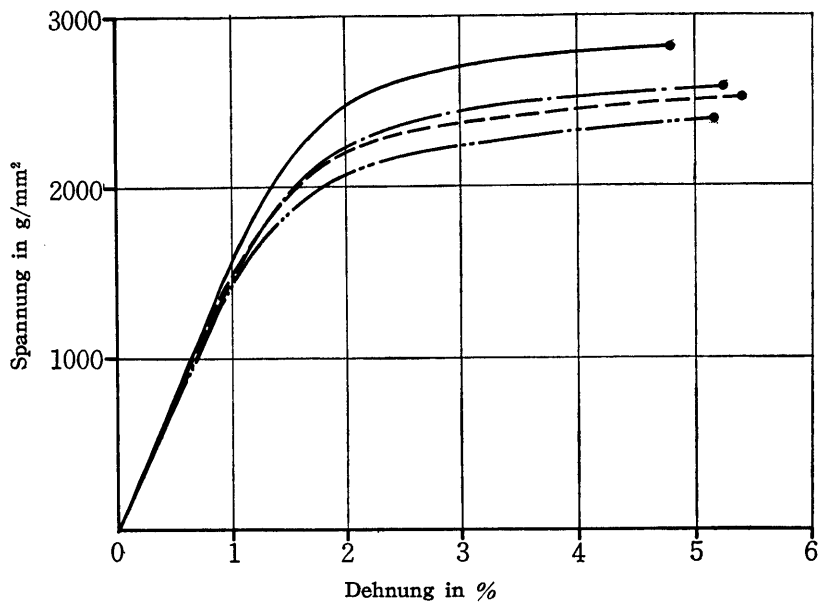


Abb. 7. Spannungs-Dehnungskurve beim 90°-Richtungszuge.
 — Zuggeschwindigkeit 80mm/min, --- 40mm/min, ---- 20mm/min, - · - · - 10mm/min, ● obere Streckgrenze.

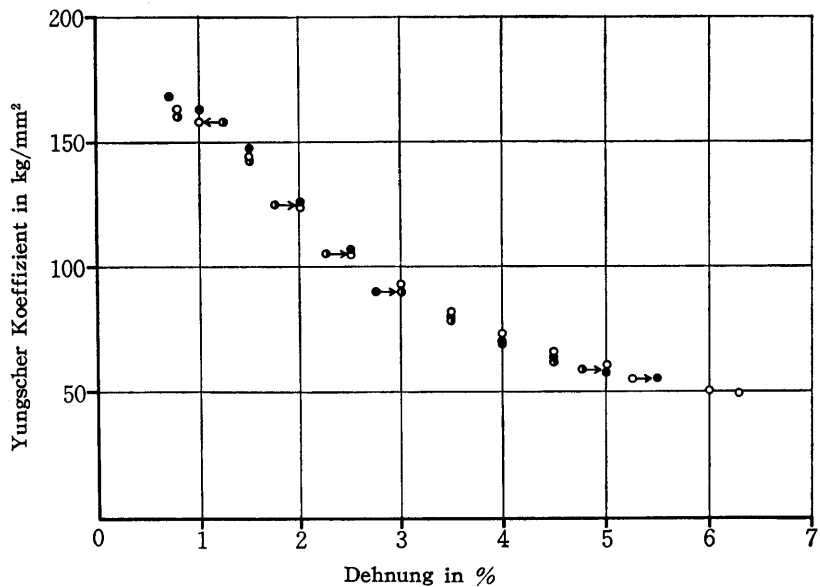


Abb. 8. Yungscher Koeffizients-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 80mm/min, ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

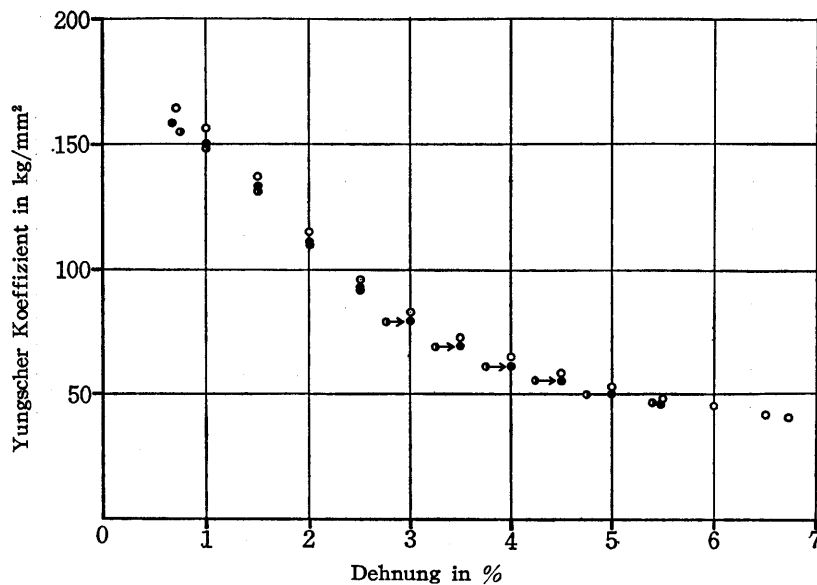


Abb. 9. Yung'scher Koeffizients-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 40mm/min. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

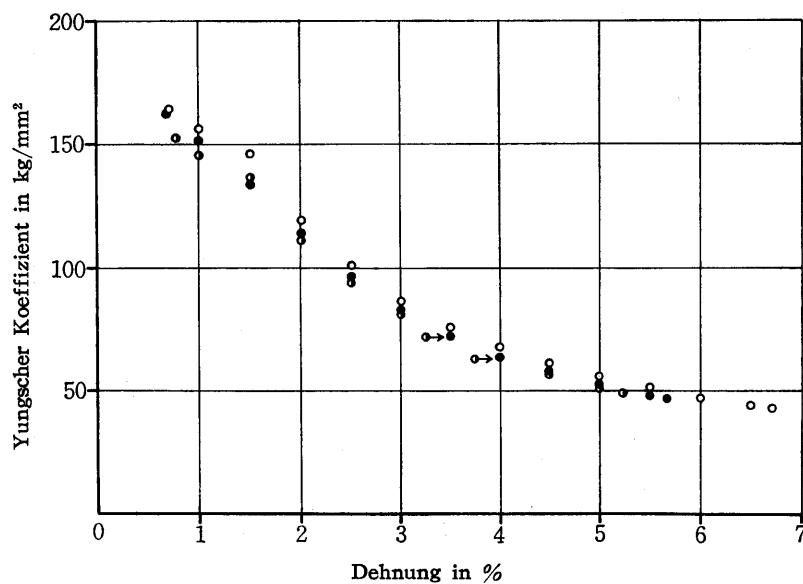


Abb. 10. Yung'scher Koeffizients-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 20mm/min. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug

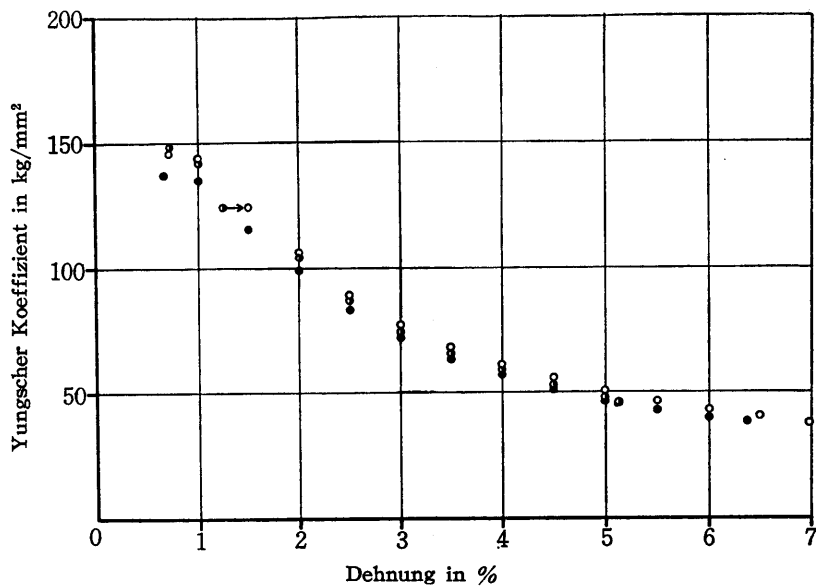


Abb. 11. Yungcher Koeffizients-Dehnungskurve bei der Zuggeschwindigkeit 10mm/min. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

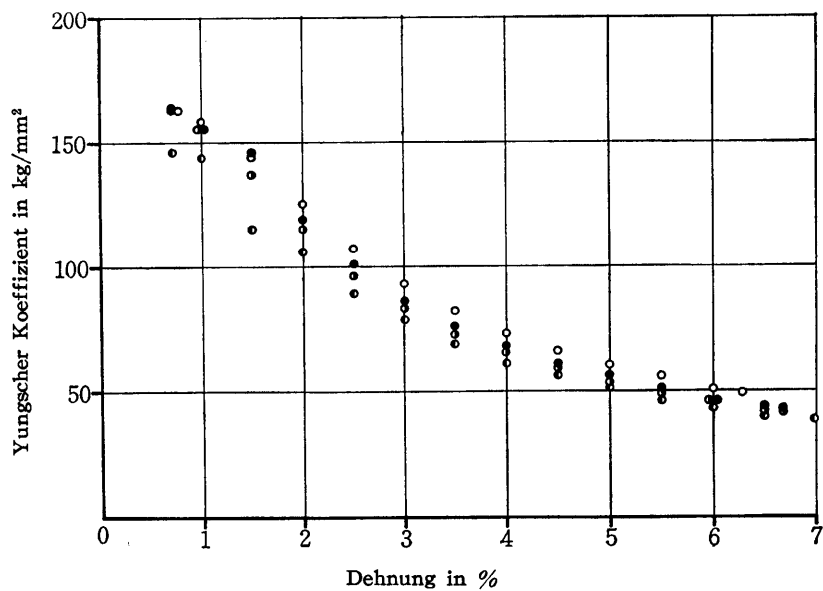


Abb. 12. Yungcher Koeffizients-Dehnungskurve beim 0°-Richtungszuge. ○ Zuggeschwindigkeit 80mm/min, ● 40mm/min, ◐ 20mm/min, ◑ 10mm/min

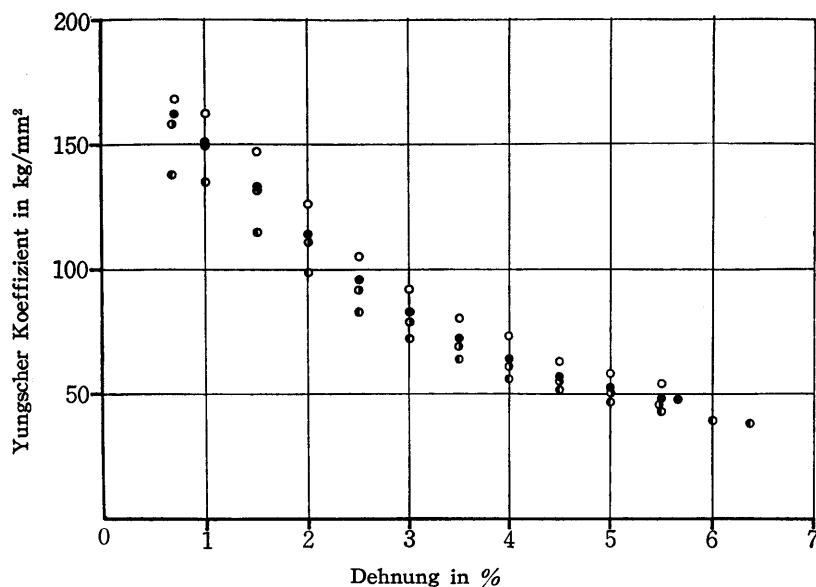


Abb. 13. Yung'scher Koeffizients-Dehnungskurve beim 45°-Richtungszuge. ○ Zuggeschwindigkeit 80mm/min, ● 40mm/min, ◐ 20mm/min, ● 10mm/min.

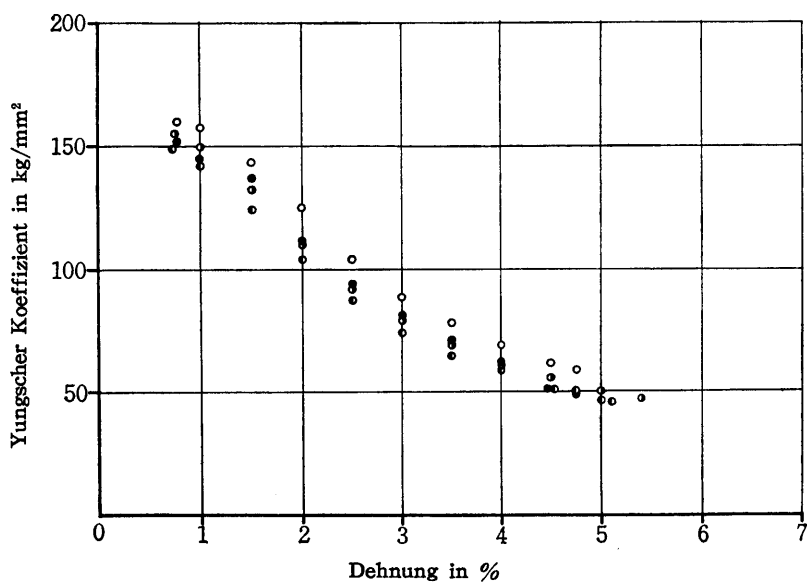


Abb. 14. Yung'scher Koeffizients-Dehnungskurve beim 90°-Richtungszuge. ○ Zuggeschwindigkeit 80mm/min, ● 40mm/min, ◐ 20mm/min, ● 10mm/min.

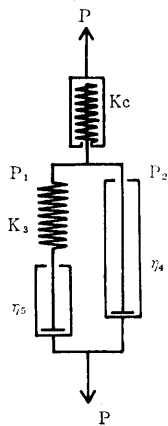


Abb. 15. Modelldarstellung.

ここで等速伸長であるので $\frac{de}{dt} = K$, したがって

$$\frac{dP_1}{dt} + \frac{K_3}{\eta_5} P_1 = K_3 K$$

$$P_1 = K\eta_5 \{1 - \exp(-K_3 e / K\eta_5)\}$$

$$P_2 = \eta_4 \frac{de}{dt} = K\eta_4$$

$$P = K\eta_4 + K\eta_5 \{1 - \exp(-K_3 e / K\eta_5)\} \dots\dots\dots(2)$$

式(2)より弾性比例限から上昇伏点までの接線の傾きを とればヤング率 ϵ が求まる。

$$\epsilon = K_3 \exp(-K_3 e / K\eta_5) \dots\dots\dots(3)$$

これが応力-伸び率曲線からえられるヤング率の近似式である。実験から求めたヤング率は、図8～図11で示されているように、ほぼ指数関数的に減少していることがわかり、近似式の傾向と一致している。

次に弾性比例限の伸び率、応力および初期ヤング率の引張速度依存性と方向依存性を検討してみる。これらの関係は図17に示すように、 0° 、 45° および 90° 方向ともに弾性比例限の伸び率、応力およびヤング率のすべてについて、伸長条件の結果が $80 \text{ mm/min} > 40 \text{ mm/min} > 20 \text{ mm/min} > 10 \text{ mm/min}$ の傾向に顕著に表われている。これは観測タイムスケールが小さいときは、高分子物質はより弾性的挙動を示し、逆の場合はより粘性的挙動を示すためと考えられる。また同一引張速度による各方向の応力は 45° 方向が一番低い。そうしてヤング率については、ほぼ 0° 方向 $> 45^\circ$ 方向 $> 90^\circ$ 方向の傾向をとっている。これは伸長方向と結晶配向方向とが一致している方向ほどより弾性的であることを示しているように思われる。

次に弾性比例限から上昇伏点の中間部分のヤング率については、引張速度が速いほど大きく、伸長方向と

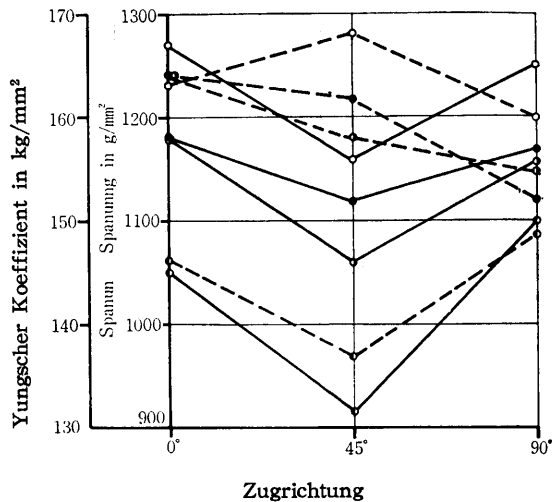


Abb. 16. Zugrichtungsabhängigkeiten von Yungschen Koeffizienten und Zugspannungen. — Spannung, ---- Yungscher Koeffizient, ○ Zuggeschwindigkeit 80mm/min, ● 40mm/min, ⊙ 20mm/min, ⊗ 10mm/min.

結晶配向方向とが一致しているほど大きいことが図9～図13からわかる。

また上昇伏点において3方向ともに

伸び率については $80 \text{ mm/min} < 40 \text{ mm/min}$

$< 20 \text{ mm/min} < 10 \text{ mm/min}$,

応力については $80 \text{ mm/min} > 40 \text{ mm/min}$

$> 20 \text{ mm/min} > 10 \text{ mm/min}$,

ヤング率については $80 \text{ mm/min} > 40 \text{ mm/min}$

$> 20 \text{ mm/min} > 10 \text{ mm/min}$

の傾向がある。これらも観測タイムスケールが小さいときは、高分子物質はより弾性的挙動を示すためであると考えられる。また同一引張速度による3方向の上昇伏点における伸び率、応力およびヤング率については

伸び率は 0° 方向 $> 45^\circ$ 方向 $> 90^\circ$ 方向,

応力は $0^\circ < 45^\circ < 90^\circ$,

ヤング率は $0^\circ < 45^\circ < 90^\circ$ の傾向がある。

3・2 見かけの弾性比例限内からの荷重緩和挙動

0° 、 45° および 90° 方向引張試験を行ない、それぞれ選定された緩和開始点から荷重緩和した曲線を示すと図17、18および図19のようになる。3方向ともに緩和安定に要する時間は見かけの弾性比例限内から初期部

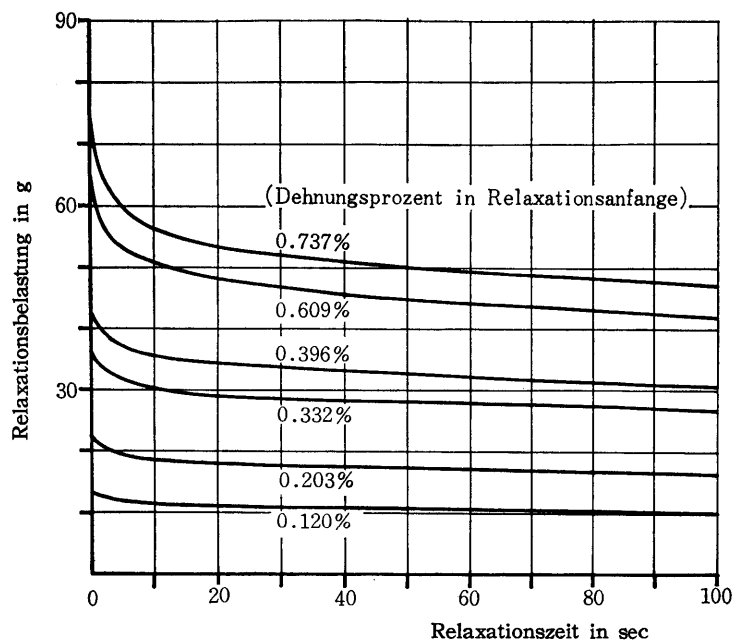


Abb. 17. Relaxationsbelastungs-Zeitskurven beim 0°-Richtungszuge.

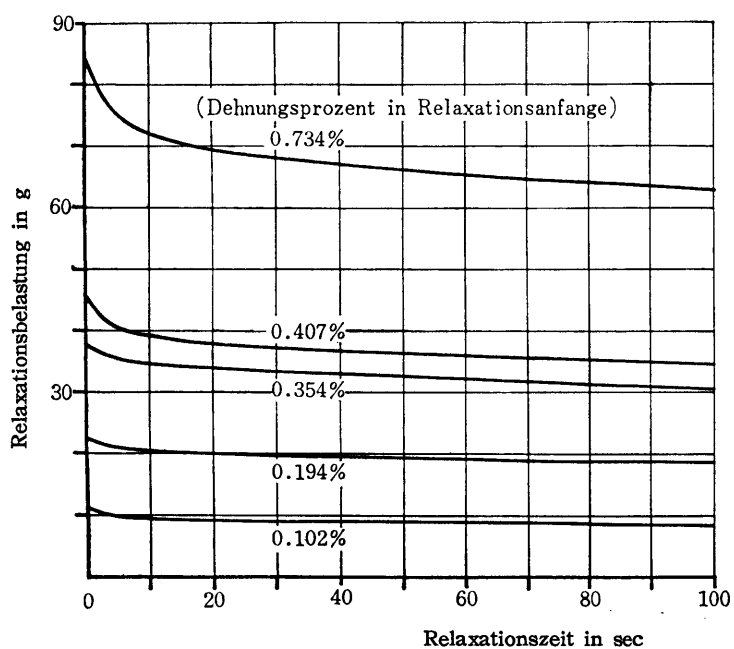
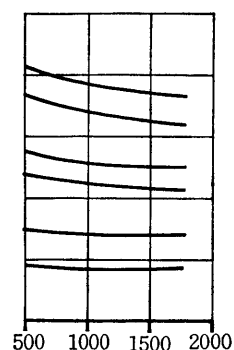
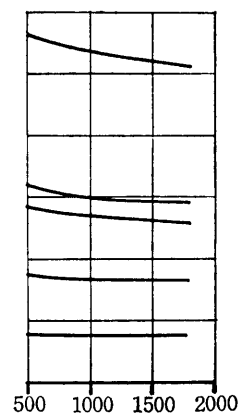


Abb. 18. Relaxationsbelastungs-Zeitskurven beim 45°-Richtungszuge.



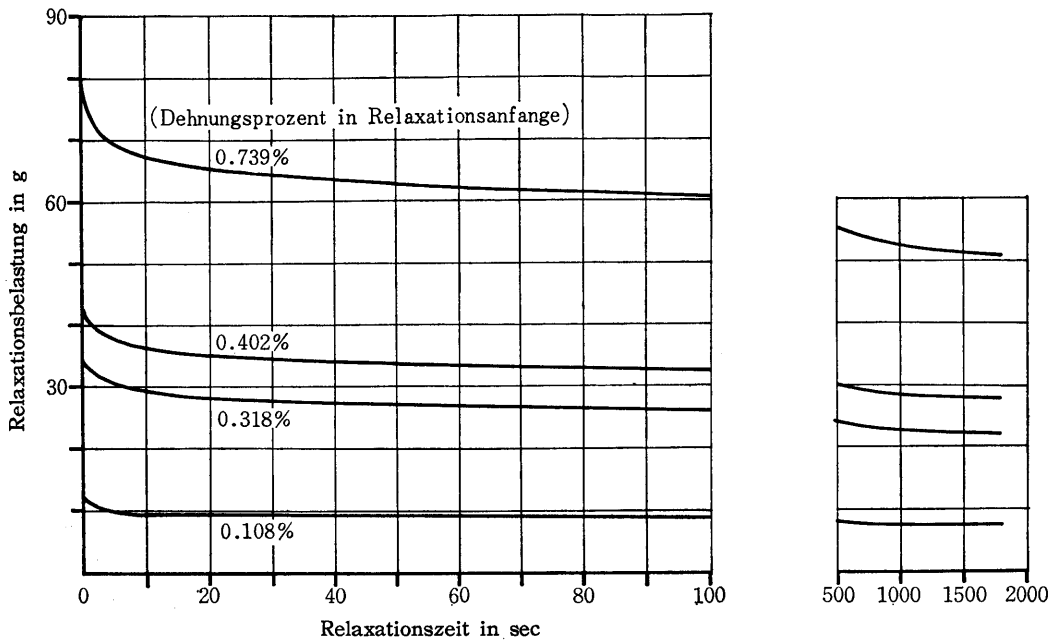


Abb. 19. Relaxationsbelastungs-Zeitskurven beim 90°-Richtungszuge.

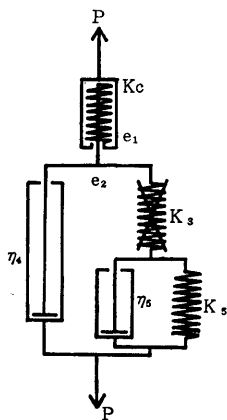


Abb. 20. Modelldarstellung.

の方へさがるにしたがって短くなっていることがわかる。

次に見かけの弾性比例限内の荷重緩和曲線の近似式を力学的モデルから考察してみる。そこで弾性比例限内では、圧縮パネ1が完全に圧縮されてもその復元力でパネ3はまったく変位しないように、パネ定数の関係が $K_c < K_s$ であるとする。

図20に示すように凝結パネは見かけの弾性比例限では、ボアクトモデルでおき

かえられるものとして緩和曲線の近似曲線を求める。

圧縮パネ1の変形に対しては

$$e_1 = \frac{P}{K_c} \text{ したがって, } \dot{e}_1 = \frac{\dot{P}}{K_c}$$

ボアクトモデルの変形に対しては

$$\dot{e}_2 = \frac{\dot{P}}{\eta_4 + \eta_5} - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} e_2$$

ここで $e = e_1 + e_2$ から

$$\dot{e} = \dot{e}_1 + \dot{e}_2 = \frac{\dot{P}}{K_c} + \frac{P}{\eta_4 + \eta_5} - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} e_2$$

$$\ddot{e} = \frac{\ddot{P}}{K_c} + \frac{\dot{P}}{\eta_4 + \eta_5} - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} \dot{e}_2$$

$$\dot{e}_2 = \dot{e} - \dot{e}_1 = \dot{e} - \frac{\dot{P}}{K_c} \text{ を代入して}$$

$$\ddot{e} = \frac{\ddot{P}}{K_c} + \frac{\dot{P}}{\eta_4 + \eta_5} - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} \dot{e} + \frac{K_5}{(\eta_4 + \eta_5)K_c} \dot{P}$$

積分すると

$$\dot{e} = \frac{\dot{P}}{K_c} + \frac{P}{\eta_4 + \eta_5} - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} e + \frac{K_5}{(\eta_4 + \eta_5)K_c} P + C$$

ここで $e = 0$ のとき $P = 0$, したがって $C = 0$

$$\dot{e} = \frac{\dot{P}}{K_c} + \left(\frac{1}{\eta_4 + \eta_5} + \frac{K_5}{(\eta_4 + \eta_5)K_c} \right) P - \frac{K_5}{\eta_4 + \eta_5} e \quad \dots\dots\dots(4)$$

荷重緩和の場合は $e = C$ から $\dot{e} = 0$ を式(4)に

代入すると

$$\dot{P} + \frac{K_c + K_5}{\eta_4 + \eta_5} P = e \frac{K_c K_5}{\eta_4 + \eta_5}$$

これから

$$P = \left(P_0 - e \frac{K_c K_5}{K_c + K_5} \right) \exp \left(- \frac{K_c + K_5}{\eta_4 + \eta_5} t \right) + e \frac{K_c K_5}{K_c + K_5} \quad \dots\dots\dots(5)$$

式(5)が応力緩和曲線の近似式である。式(5)から $t \rightarrow \infty$

のとき $P = e \frac{K_c K_5}{K_c + K_5}$ となり、緩和せずに荷重が残る。この残留荷重は式からは緩和前のひずみ量に比例していることがわかる。そこでこのような弾性比例限

内の荷重緩和挙動を力学的モデルによって説明すると、図21に示すように弾性比例限内では圧縮バネのみが圧縮され、モデルが総体的に伸ばされた状態になる。ここでその状態で一定伸び率が保たれると、ダッシュポットの抗力は直ちにゼロになり、圧縮バネに復元力が生ずる。この復元力によって凝結バネ5は伸ばされ、それによって圧縮バネ1は回復して荷重が緩和するものと解釈される。

次に緩和荷重 F_t と緩和開始時における荷重 F_0 からえられる緩和残留率 F_t/F_0 —緩和時間の関係を示すと図22、23および図24のようである。本実験で使用したポリプロピレンフィルムはカレンダー方向に延伸されているために、ゴムのような非結晶系と繊維のような配向した結晶系の中間のもののようなある程度配向した結晶系の内部構造をもっているものと考えられる。そこで結晶配向方向に延伸された場合、弾性比例限内の初期部分では結晶はあまり伸長されず弾性限に近づくにつれて結晶部分の緊張が次第に大きくなっていくものと考えられる。したがって 0° 方向の場合は図22に示されているように、伸び率が小さい初期部分は結晶

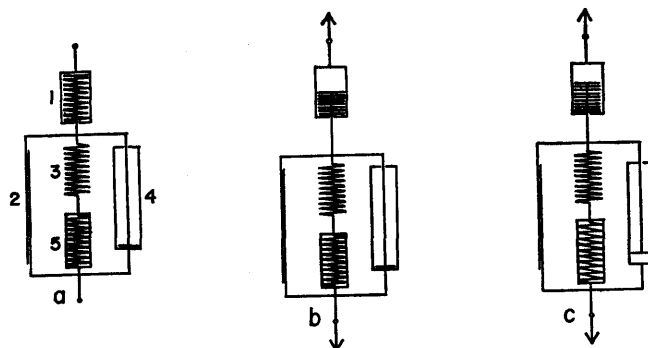


Abb. 21. Modelldarstellung.

部分の緊張が小さいので、緩和率は小さく、弾性比例限近くでは、結晶部分の緊張が大きくなるので緩和率は大きく、その伸び率により緩和率の分布が散漫になっている。 45° 方向の場合は結晶の配向方向と伸長方向が一致していないため、結晶部分の影響が 0° 方向より小さいため、伸長初期部分と弾性比例限付近の荷重残留率の違いは 0° より小さくなっている。 90° 方向の場合は、伸長方向と結晶配向方向の一致の度合は 45° 方向よりさらに遠ざかる。図24に示しているように弾性比例限界内のどの点における緩和率もほぼ一致していることがわかる。

また、伸び率0.11%, 0.40%および0.74%の3方向

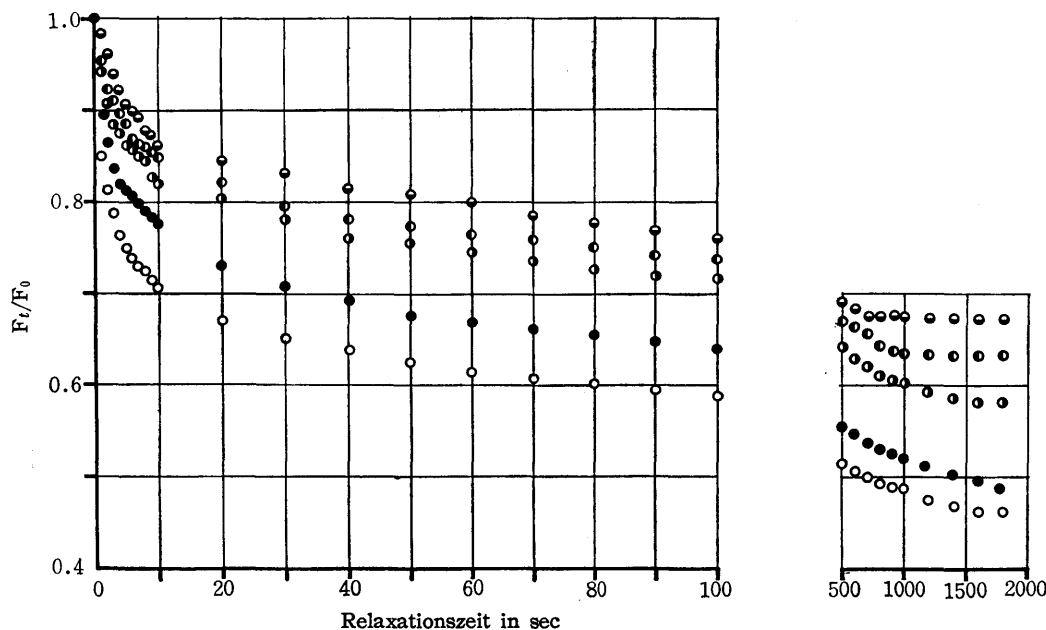


Abb. 22. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven beim 0° -Richtungszuge.

○ Dehnung 0.74%, ● 0.61%, ◐ 0.40%, ● 0.20%, ○ 0.12%.

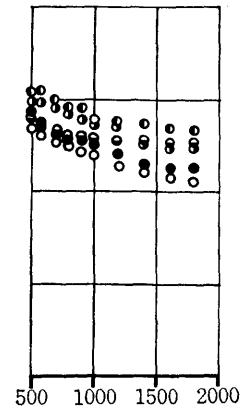
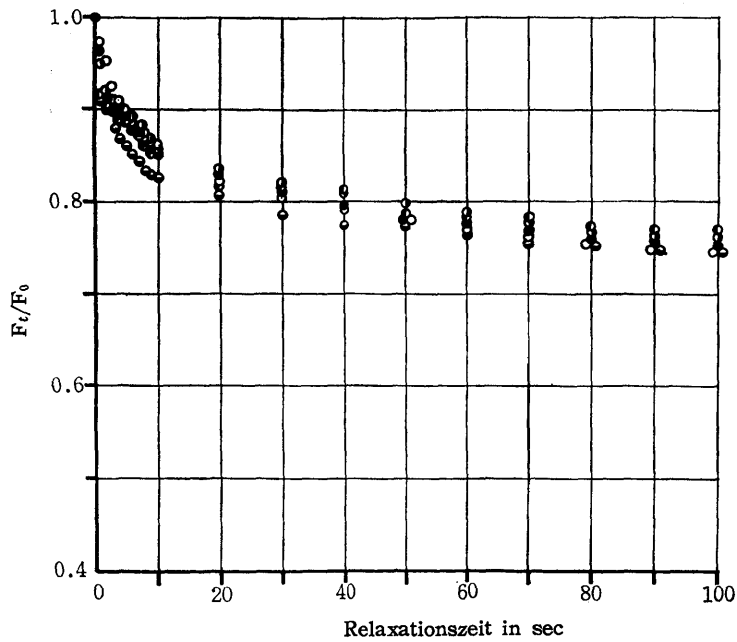


Abb. 23. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven beim 45° -Richtungszuge.
 ○ Dehnung 0.74%, ● 0.61%, ◐ 0.40%, ◑ 0.20%, ◒ 0.12%.

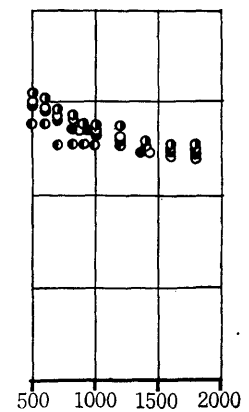
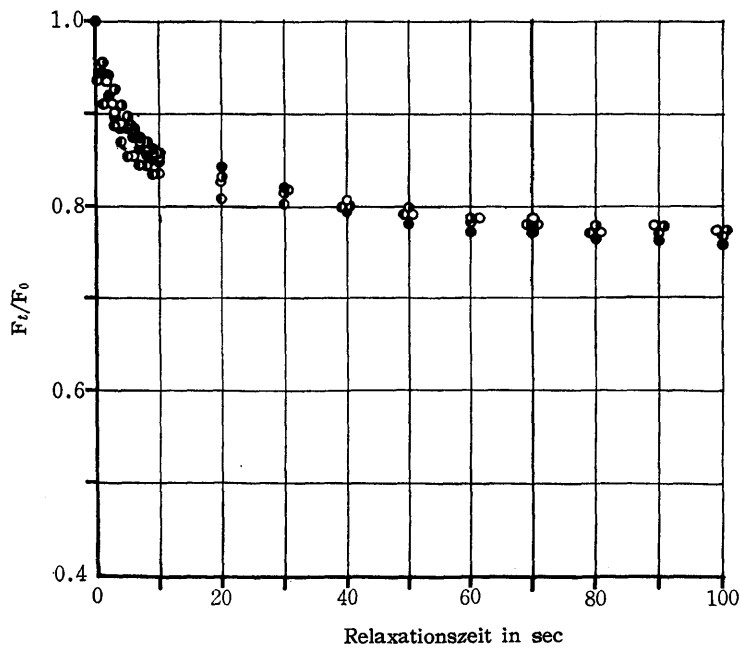


Abb. 24. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven beim 90° -Richtungszuge.
 ○ Dehnung 0.74%, ● 0.61%, ◐ 0.40%, ◑ 0.20%, ◒ 0.12%.

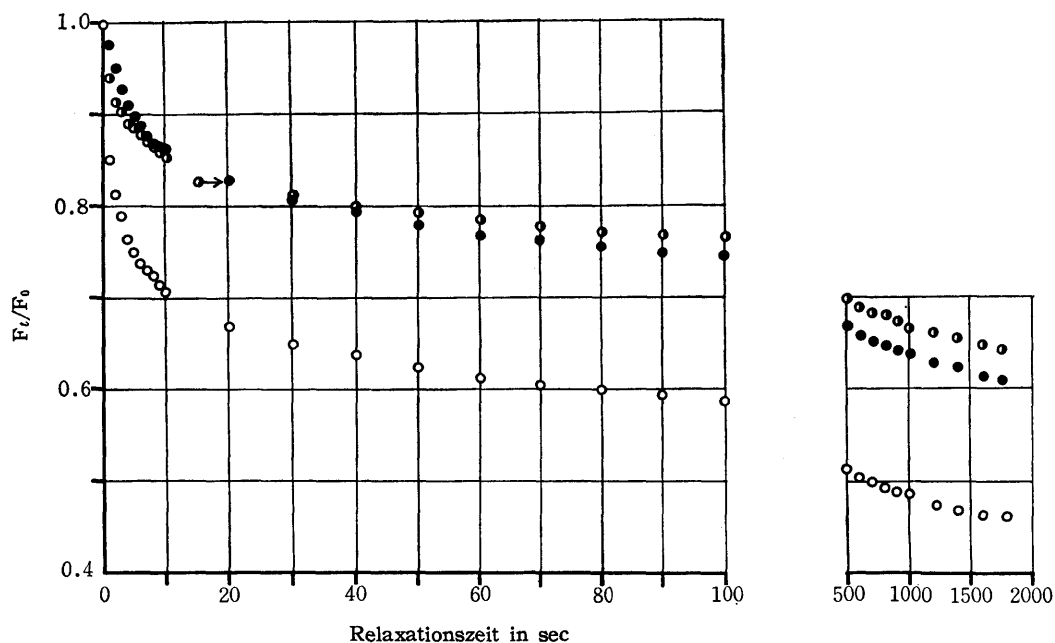


Abb. 25. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven bei der Dehnung 0.74% des Relaxationsanfanges. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

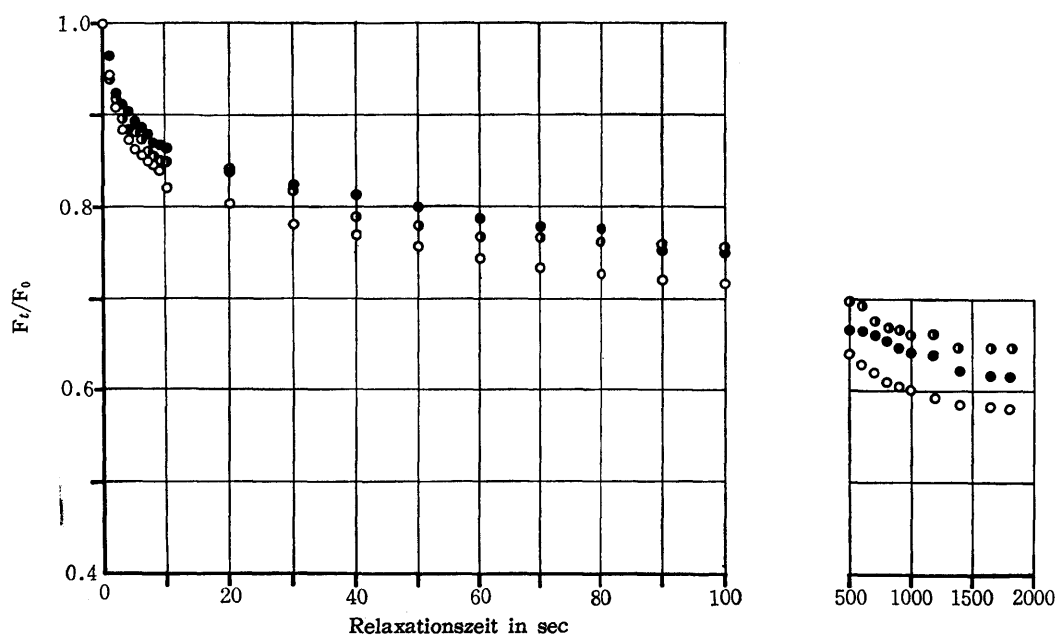


Abb. 26. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven bei der Dehnung 0.40% des Relaxationsanfanges. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

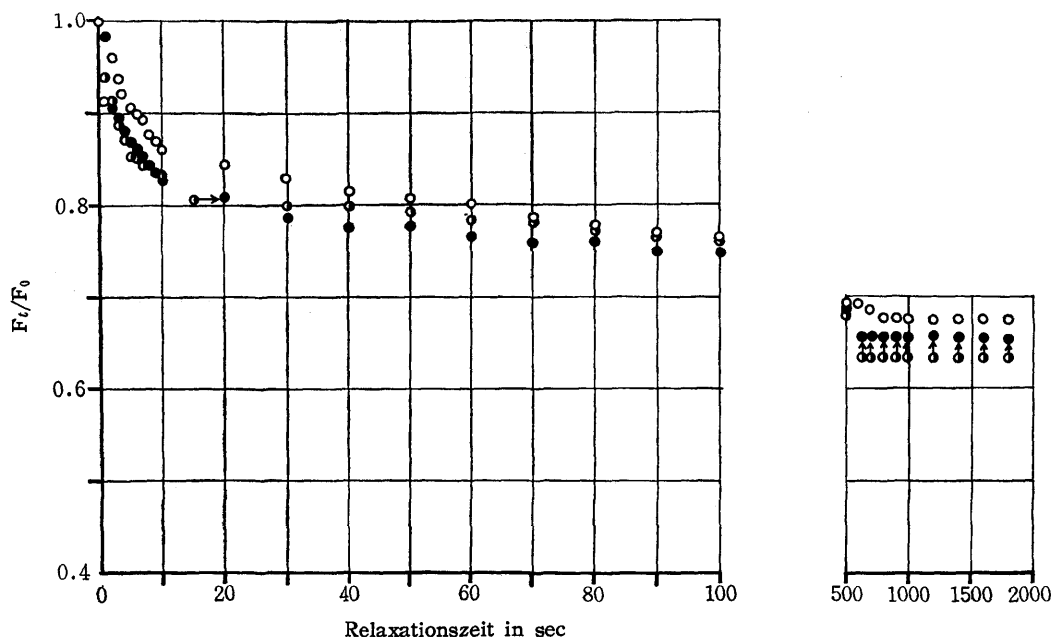


Abb. 27. F_t/F_0 -Relaxationszeitkurven bei der Dehnung 0.11% des Relaxationsanfanges. ○ 0°-Richtungszug, ● 45°-Richtungszug, ◐ 90°-Richtungszug.

における F_t/F_0 -緩和時間曲線を示すと図25, 26および図27のようである。弾性比例限付近の0.74%付近からは、0°方向、45°方向および90°方向の順に伸長方向と結晶配向方向の一致の度合が大きく、結晶の受ける緊張程度も大きいので、0°, 45°および90°方向の順に緩和残留率は大きい(図25)。0.40%付近では結晶部分の伸長が小さくなり、結晶の影響が少なくなり、3方向の緩和率は近づいてくる(図26)。伸び率のごく小さい0.11%付近では3方向とも結晶部分の緊張はごく少ない。したがって結晶の影響はあまりなく、3方向ともに緩和率はほとんど等しくなっていることがわかる(図28)。

4 総 括

本実験の結果をまとめると次のようである。

1 応力—伸び率曲線の引張速度依存性については見かけの弾性限と上降伏点は引張速度が大になると、伸び率は小さく、応力は大きくなる。

2 上降伏点までの静的ヤング率は、0°方向が大きく、ついで45°, 90°方向の順に小さくなるような傾向を示す。また伸び率の増加するにともない指数関数的に減少する。

3 見かけの弾性比例限内のどの部分においても荷重は緩和し、その緩和率については、0°方向は伸び率

により散漫に分布するが、45°および90°方向は次第に集中した曲線群分布となっている。

4 見かけの弾性比例限内から荷重緩和を行なう場合、緩和安定値は緩和開始時のひずみによって左右される。この意味でポリプロピレンフィルムには弾性比例限は存在しない。

最後に本実験に対し、しじゅう熱心に手伝った高尾武君に厚く感謝の意を表わす。

文 献

- 1) 木村・和田：ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第1報) 変形と破壊について 福井大工報, 13, 2 (1965)
- 2) 木村・和田：ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第2報) 塑性流動・繊維状解じょ・繊維状延伸の各過程について 福井大工報, 15, 1 (1966)
- 3) 木村・和田：ポリプロピレン繊維からなる走行糸の物性について(第1報) 定常流束の外乱による挙動 福井大工報, 4 (1966)
- 4) 木村・和田：ポリプロピレン繊維からなる走行糸の物性について(第2報) 加工糸の塑性的挙動 福井大工報, 15, 2 (1967)
- 5) 木村・和田：ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第3報) 上降伏点以下の荷重緩和挙動 福井大工報, 5 (1967)
- 6) 木村・和田：ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第4報) 塑性流動機構 福井大工報, 6 (1968)
- 7) 木村・和田：ポリプロピレンフィルムの機械的性質(第5報) 繊維状延伸過程における荷重緩和挙動 福井大工報, 17, 1 (1968)
- 8) T. Alfreg: Mechanical Behavior of High Polymer, P. 488
- 9) Meclintock-Argon: Mechanical Behavior of Materials, P. 273

(昭和44年4月15日受理)