

気球用皮膜材料の二軸応力下の降伏基準と 低温引張破断について

河 田 幸 三・岡 本 智*
橋 本 彰 三・本 堂 明

概 要

科学観測気球の皮膜材料は高圧（低密度）ポリエチレンの薄いフィルムが多く使用される。皮膜には二軸応力が作用するにもかかわらず、いまだ二軸応力下の降伏基準が明らかにされていない。原料樹脂と成形条件の異なる代表的気球フィルム4種類を試料とし、溶接した円筒試験片に内圧と引張を加え、 -80°C での降伏基準を求め、異方性金属と同じく拡張された Mises の降伏基準に従うことを初めて明らかにした。

また低温引張破断の実験結果により、低温二軸延伸性の良好なフィルムの -80°C での等二軸引張破断応力は単軸引張破断応力の約 $1/2$ であるが、破断伸びは $1/2$ よりも若干大きいことも明らかにされ、皮膜材の降伏基準とともに気球の極限設計に有益な資料が得られている。

ま え が き

科学観測用ポリエチレン気球は科学観測の有力な一手段であるが、高度 $10\sim 20\text{ km}$ を飛昇中に破裂することがあり、特に人口密度の高いわが国では、気球観測の可否にもつながる問題である。したがって、破裂の原因については種々の推測があった。排風計の測定により、気球は上記の高度で、内圧が脈動的に変化し、瞬間内圧が推定破壊内圧に達し得ることがわかり [1][2]、ロックオン用気球の強度について論じ、皮膜用高圧ポリエチレン（以下 LDPE）フィルムについて、低温における膜の伸びが特に大切な性質で、この点今後さらに検討する必要があることが指摘されている [3]。球皮の軽量化と応力分布を緩和する方向では、気球上部の円錐形を落下傘型（アクア型）にした例があり [4]、現在では自然型に改められ [5][6][28]、さらに細部の改良も加えられている。飛揚中の無排風口気球の内圧と皮膜の歪の同時直接測定も行われ、満膨張時の内圧と歪の急激な同時上昇が確認され、歪については [7][8]、内圧上昇については [9] の報告がある。

皮膜材料の組織的検討は気球材料懇談会の発足によって始められ、主としてフィルムの縦、横方向（以下 MD, TD と記す）の単軸引張データから、初期の LDPE 皮膜については、特に低温時の TD 破断伸びのはなはだしい過少が指摘され、これが気球破壊につながると推測され [10][11]、その強度異方性に及ぼす成形上の諸因子特に縦横加工比の重要性が指摘された [12]。フィルム成形法に工夫を加え、皮膜用 LDPE フィルムの強い力学的直交異方性の等軸化と低温延伸性向上に努め、破裂し難いので定評のある Strato Film をバランスの

* 東大生産技術研究所

とれた低温伸びの点で凌駕するまでに至った [13][14][15][16].

現在では飛揚中の破壊率はほとんど0となっている [17]. しかし, LDPE フィルムの二軸応力下の基本的力学物性や降伏基準等は, 基礎的知見としてはもちろん, 今後, 信頼性の高い高性能気球の開発にも必要であるが, 筆者らの知る限りでは, まだ十分には知られていないようである. Hopkins らは円筒試験片と周囲固定の円形膜に側圧を加える diaphragm 試験とにより低温二軸高速変形での歪速度の影響を扱っているが [18], 降伏基準は求めている. また他にも見当らないようである.

このため, 筆者らは原料樹脂, 成形条件の異なる4種類の代表的な球皮用および試作 LDPE フィルムについて, 加熱収縮試験 [13] から見て, 異方性の最大, 最小と見られる2種類の -80°C の降伏応力の異方性を測定し, 4種全部について, 同じ -80°C での円筒試験片による二軸引張の降伏基準を求め, さらに未降伏部を含まない, できる限り破断部近辺のみの破断歪と応力を測定する. このため MD, TD の特殊型単軸引張試験片と diaphragm による等二軸引張試験を行う.

この報告の大部分は第10回 ISTS に発表したものの詳報である [19].

この球皮フィルムの diaphragm 低温試験は, 他にフィルムの低温延性脆性転移が何度で起るかを測定するためにも使われている [20] が, ここでは, この方式を等二軸引張応力下の低温破断伸びと応力の測定の用途に用いる.

1. 二軸引張応力によるポリエチレン・フィルムの降伏基準

1.1 試験温度と試験材料フィルム

高圧ポリエチレン (低密度ポリエチレンあるいは分枝ポリエチレン) フィルムは, 常温での引張試験では明瞭な降伏点を示さないが, 低温になるにしたがって次第に明瞭な降伏点を示し, 降伏基準を求めるには好都合である. またポリエチレン気球が上昇中に破裂して問題になる上空の気温は $-60^{\circ}\text{C}\sim-80^{\circ}\text{C}$ である. したがって -80°C を試験温度に選べば, 気球破裂の対策上も, 直接的に有効な資料となるはずである. これらの観点から, 本研究での試験温度を -80°C に選定した.

試験材料の LDPE フィルムは, ポリエチレン気球用の球皮フィルムの力学的直交異方性が強く, そのために, 低温で気球破裂を起しやすいとして, 従来から筆者らが注意して来た初期の球皮フィルムの代表で, 昭和 43 年製の DFDJ 5505 B で吹いた厚さ 25μ のインフレーション・フィルム, 当時すでに気球破裂を起し難いことで定評を得ていた Winzen 社製の Strato Film 19μ (以下略して SF と記す), および前記国産気球フィルムの欠点である強い力学的直交異方性の改良を試み, 同時に低温延伸性の向上を目的に筆者らの開発した試作 LDPE フィルム 45-6-3, さらにこれと同一樹脂を普通一般の加工条件でインフレーション成形した比較用フィルム 45-6-5 の以上4種類である.

DFDJ 5505 B と 45-6-5 は異方性が大きく, SF と 45-6-3 は異方性が小さく, 低温での二軸延伸性が良好である [14].

これら4種のフィルムの諸元を表 1-1 に, -80°C での単軸引張試験結果を表 1-2 に示す.

表 1-1 試験材料フィルムの諸元一覧表 [14]

材 料 名	M. I.	比 重	膜厚 (μ)	α	β	加熱収縮比	備 考
DFDJ 5505 B	0.75	0.920	25	2.1	5.8 _s	5.6 _s	S43気球に使用
45-6-3	0.15	0.916 ₉	20	4.7 ₆	0.8 ₉	1.0 ₈	S45試作
45-6-5	0.15	0.417 ₀	23	4.4	0.9 ₄	1.3 ₃	同 上
S.F. 19 μ (S 43)	0.23	0.918 _s	19	—	—	1.4 ₁	S43米国より輸入

M.I.: melt index

α : inflation ratio, β : 縦横加工比 [13] forming ratio と呼ぶことにする.

加熱収縮比: [13] 本文 113 頁参照.

表 1-2 試料フィルムの単軸引張試験 (-80°C) 結果比較表 [3]

材 料 名		膜 厚 (μ)	σ_1 (kg/mm ²)	σ_2 (kg/mm ²)	ϵ_1 (%)	ϵ_2 (%)
DFDJ 5508 B	M	26.2	5.65	7.58	7.5	138
	T	23.9	5.63	—	6.7	—
45-6-3	M	20.6	5.84	6.06	10.2	242
	T	22.5	5.89	7.03	10.4	225
45-6-5	M	22.6	5.48	4.21	8.0	71
	T	22.8	5.64	3.83	9.6	114
S.F. 19 μ (S 43)	M	20.7	5.12	3.83	9.72	106
	T	19.9	5.07	4.30	9.40	206

σ_1 : 降伏応力 引張速度 500 mm/min 以下同じ;

σ_2 : 破断応力

ϵ_1 : 降伏点伸び

ϵ_2 : 破断伸び

4種の中、加熱収縮比 [13] から見て、直交異方性の最も強いフィルムと最も弱いと思われるフィルム、DFDJ 5505 B と 45-6-3 について、それらの異方性の具体的計測値として単軸引張の降伏応力を求めた。

求めたのは、フィルムのインフレーション成形時の MD、これと 22.5° 、 45° 、 67.5° および 90° すなわち TD の5方向について、ダンベル型単軸引張試験片 (平行部の幅 10 mm、長さ 40 mm) を切り取り、引張速度 50 mm/min、試験温度 -80°C での降伏応力である。

試験片には $1\sim 3\mu$ 程度の膜厚のばらつきがあるから、できる限り正確な降伏応力を求めるため、偏光板を取り付けた観測二重窓 (図 1-5 参照) から、最初に降伏のすべり模様の現われる位置を見定め、事前に測定したその部分の膜厚で降伏応力を算出した。

これらを整理して 図 1-1 に示す。二種類のフィルムとも共通して最大の降伏応力は TD で、最小は 45° 方向であり、MD の降伏値はその中間である。

降伏値の最大と最小の差は、最大値の TD の降伏応力を 100% としたとき、異方性の強いと思われる DFDJ 5505 B では 12%，異方性の弱いと見られる 45-6-3 では 7% 小さく、各方向での降伏応力がより均等化していることがわかる。

他の 2 種類のフィルム 45-6-5 と SF については測定しなかったが、前述の加熱収縮試験からの推定では、多分上記の中間値を示すものと考えられる。このような異方性に大小のある LDPE フィルムの降伏基準はそれぞれいかなる降伏基準を示すか明らかでなく、試料としてはなほだ興味あるものである。

1.2 円筒状試験片と実験装置

種々の応力比の二軸引張試験を行うには円筒状試験片に引張と内圧を加える方法が普通である。

しかし、余り大きくない低温槽内で -80°C の試験を行うには、インフレーション成形された円筒状フィルムをそのままでは使用できない。したがって適当寸法の小型円筒状試験片を溶接する必要がある。溶接線部分は応力分布、材料の組織構造に変化を生ずるから、その影響をできる限り小さくする配慮が必要となる。矩形フィルムを長軸のまわりに丸めて 1 箇所溶接するか、2 枚の矩形フィルムを、互いに長辺どうし溶接するかの問題もある。フィルムの膜厚は呼称 20μ のものでも $18\sim 26\mu$ 前後のばらつきがあるから、膜厚の均一化の方が溶接線による不均一よりも重視しなければならない。

これらを総合的に判断して、できる限り一様な円筒状試験片を作るには、2 枚の矩形フィルムの膜厚のばらつきが小さくなるように組合せて、できる限り繊細な溶接をするのが最も一様性が高いと考えられる。

この円筒状試験片は、2 本の母線が溶接線となるから、溶接線の影響を少なくする点で、降伏時の円周方向の応力を軸方向の応力より大きくしないことが望ましい。このためには、円筒状試験片の軸方向を、試料フィルムの MD にした MD 型と、TD に採った TD 型の両種を作って試験すればよいことになる。(図 1-8 説明図参照)

さらに、円筒状試験片両端の取付部分は、何れにしても圧縮応力も加わるから、何らかの補強策が必要である。しかし別のフィルムを全周に溶接する補強等は、上記の降伏時の応力比の観点から避けるべきである。そこで、確認する必要があるが、インフレーション・フィルムは成形の際、膜厚方向に大きい収縮歪を受けて、圧縮降伏応力が高いはずであるから、

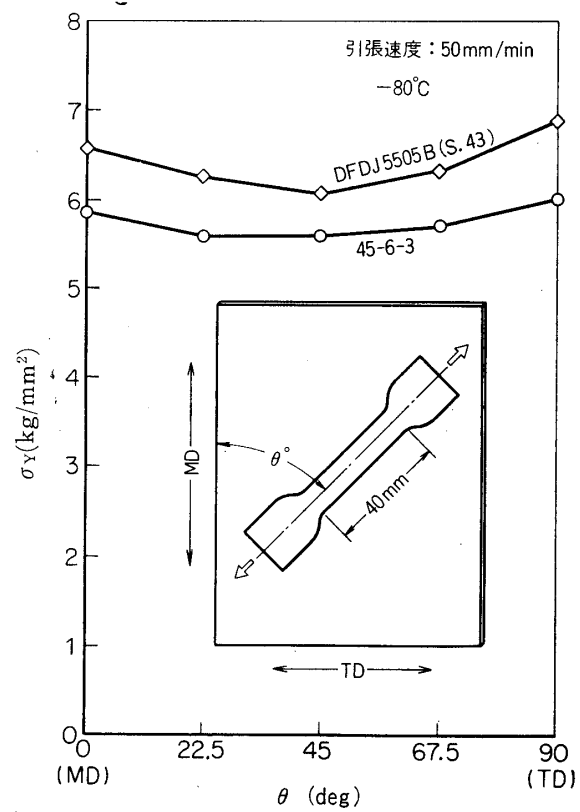


図 1-1 試料フィルム 2 種類の降伏応力の異方性

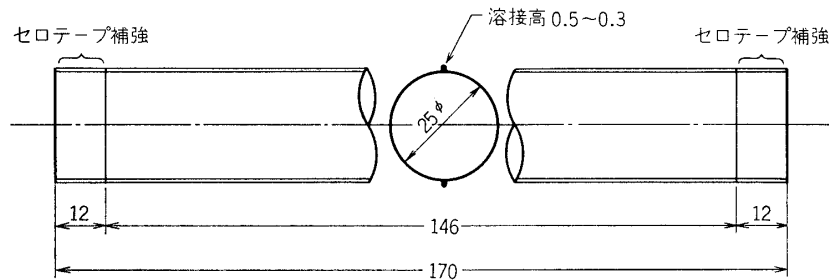
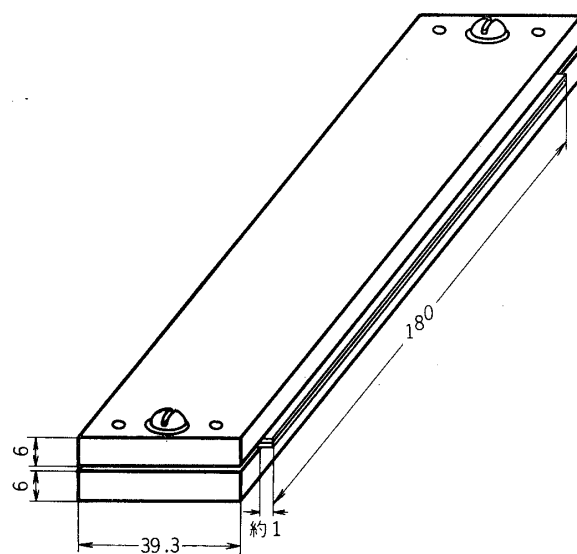


図 1-2 25φ フィルム円筒試験片

図 1-3 二軸引張試験用チューブ製作用溶接治具
(真ちゅう製)

極端な応力集中を避けるためのわずかな補強で縛る取付方法の可能性がある。

種々予備テストの結果、後述の実験装置の観測丸窓の寸法を考え、図 1-2 に示す、円筒の直径 25φ、L/D を 6 にとり、両端を幅 12 mm のセロテープで全周を補強し、端末金具の浅い溝に被せて縛る方式にした。

円筒状試験片の作製は次の方法によった。まず試料生地フィルムから、50 mm×180 mm の矩形フィルムを、長辺が MD と TD になるものをそれぞれ数十枚切り抜き、各点の膜厚を測定し、最大値と最小値の差が 3 μ 以内になるように、MD のもの、または TD のものどうしを 2 枚ずつ組合せ、MD 型と TD 型の素材を作る。次に各 1 組ずつ、図 1-3 の真鍮製の溶接治具にそろえてはさみ、治具の長手方向両側にはみ出した部分を、幅 1 mm 残して、安全かみそりの刃で切り落とす。この残した幅 1 mm の溶接代を、改装したヘヤー・ドライヤーの約 130°C の熱風を吹き付けて、一端から順次溶融収縮させながら進むと、2 枚の溶接代は互いに完全に融着する。溶接治具の両側をこの方法で溶接した後、治具から取りはずすと、細いが確実な 2 本の溶接線のあるフィルム円筒ができる。両端を切り落して長さ 170 mm

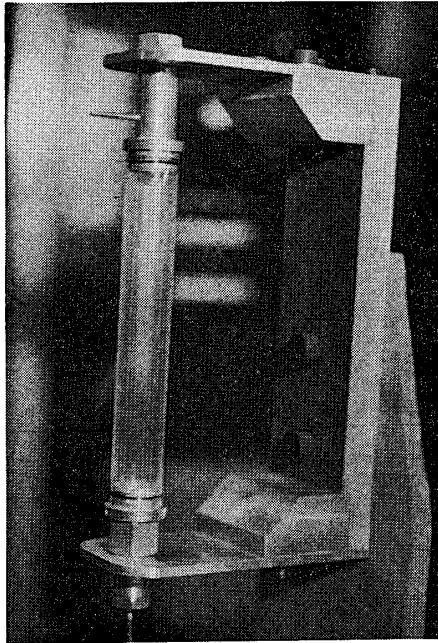


写真 1-1(a)
円筒試験片組立治具

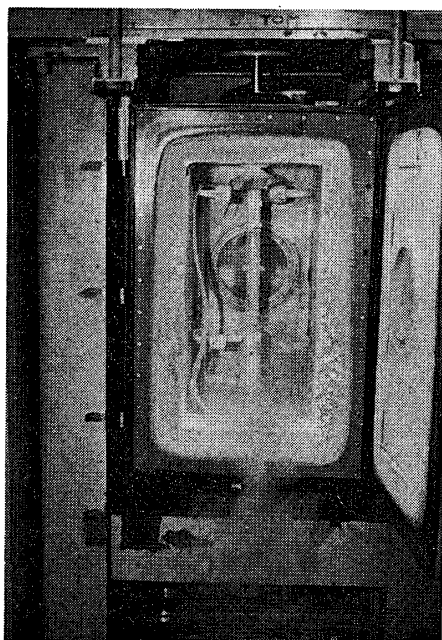


写真 1-1(b)
低温槽内の円筒試験片

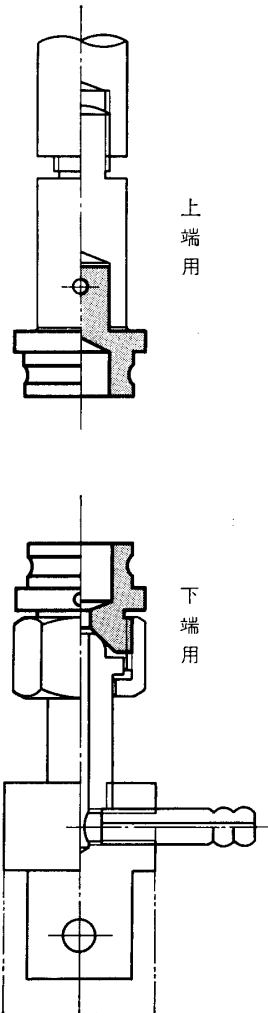


図 1-4 フィルム円筒試験
片取付金具

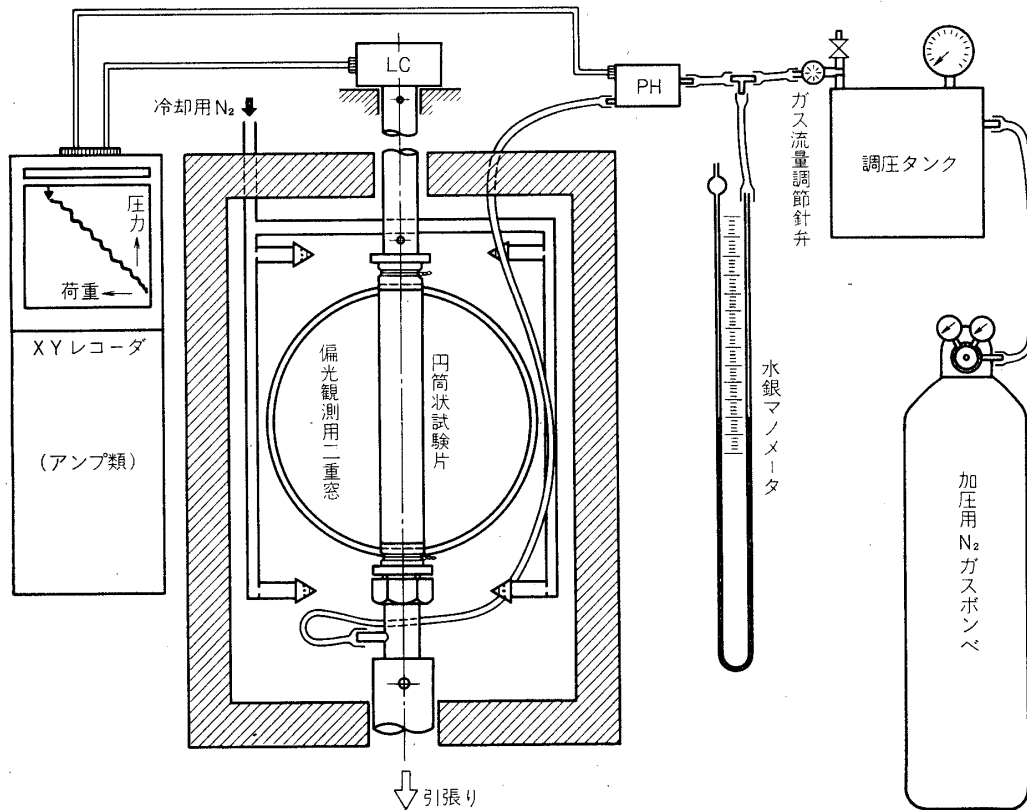


図 1-5 -80°C フィルム円筒二軸引張降伏実験装置

にし、その端に幅 12 mm のセロテープをはり付けて補強すると、 $25\phi \times 170\text{ mm}$ の円筒状フィルム試験片が完成する。

次に問題になることは、剛性のない円筒状の試験片を、ねじれ、偏心、片引きが生じない取付け方法である。狭い低温槽内で、手早く、確実にこの操作を行うことはできない。必然的に低温槽外で微妙な取付け段階を済ませることになる。真鍮管製の円筒試験片ゲージであらかじめ正しく心出しした、写真 1-1(a) の円筒試験片組立治具に、まず、図 1-4 に示す試験片の上下両端内にかん入するアルミニウム金具を固定する。この定位置に固定した両端金具に、先に準備したフィルム円筒の両端をはめ、正しい形状に整える。このとき、治具の下端の加圧口から軽く呼気で加圧すると容易に正しい形状が得られ、操作は簡単である。次に、試験片両端の金具にかぶさった補強部分をセロテープの上から、金具の浅い溝に、 0.2ϕ の銅線を軽く数回巻き付けて縛り、組立を終る。

実験装置の概念図を図 1-5 に示す。引張試験機は容量 5 ton の万能引張圧縮試験機に 100 kg 用のロードセルを組合せて使用した。引張速度はシンクロ・サーボ・システムにより最高 500 min/min、最低 0.5 mm/min の 13 段階の速度に設定が可能である。付属の電子管自動平衡式 XY レコーダの X 軸には引張荷重を記録させ、Y 軸は普通の使用法としてはクロス・ヘッドの引張変位を記録させるのであるが、本実験ではこれを止め、代りに円筒試験片に加える窒素ガス圧を圧力変換器 10 kg 用を介して記録させた。XY レコーダの応答速

度はフルスケール 0.35 秒である。

低温槽は、引張試験機の専用付属設備で、内法は高さ 500 mm, 幅 250 mm, 奥行 260 mm で厚さ 100 mm の粉末気密式断熱壁で囲み、前方の開閉扉と後壁には 150 φ の透視用丸窓があり厚さ 8 mm のアクリル樹脂円板各二枚がはめ込んである。本実験ではこの二重丸窓の最も内側で試験片の前後をはさむ位置におおの偏光板を取付け、同時に曇り防止用として、おおのの二重丸窓の内部に 60 W 電気ヒータを封入し、スライダックで調節したが作動良好であった。このため既設の乾燥窒素ガス封入方式の曇り止めは操作せずに目的を十分達した。写真 1-1(b) に低温槽の前扉を開き円筒試験片の装着状況を示す。

低温槽の冷却は写真に見える 4 個の噴出口からの液体窒素を気化させた低温ガスにより、温度調節は低温槽内のサーモカップルに連結した可変温設定式の自動制御によるガス流量調節である。そのバルブ操作は圧縮空気によって行われ、低温槽内の温度は温度設定制御盤のペンレコーダで表示される。

円筒試験片の加圧用には冷却用とは別の窒素ガスをボンベから採り、図 1-5, 写真 1-2 に示す調圧タンクに 1~2 気圧で蓄圧した後、ガス流量調節針弁の手動により、前記 XY レコーダの Y 軸または圧力検定用水銀マンメータを見ながら操作する。加圧用窒素ガス流路は 10 φ ビニール管で、水銀マンメータと前記の 10 kg 用圧力変換器に連結した後、低温槽内に導き、十分蛇行させて、円筒試験片下側取付金具の加圧口にはめた。ビニール管は試験温度 -80°C では硬化するが、クロス・ヘッドの下降するときの変形抗力は測定荷重に全く無関係である。また加圧用窒素ガスの温度は、ガス流量調節針弁を全開しても -80°C で変化しない。

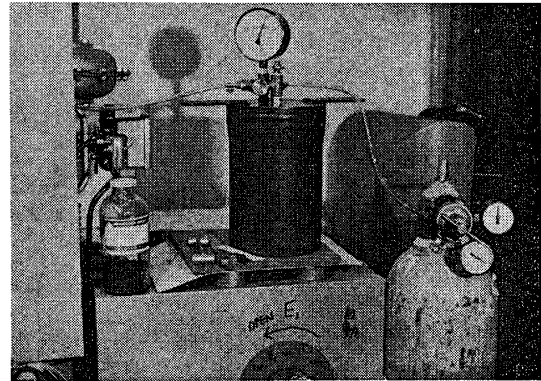


写真 1-2 加圧用調圧タンクと N_2 ガスボンベ

円筒状試験片の降伏時のすべり模様を撮影するために、低温槽後方約 600 mm に 200 W スポットライトを設置し、前述の通り偏光板を装着した観測用二重丸窓を通して透過光により、モータ・ドライブのニコン F 250 に 200 mm 望遠レンズを用いて記録した。

以上は空調した一室に設備してあるが、低温槽冷却用の液体窒素の貯蔵タンクと温度制御用圧縮空気系は別室に設置してある。

1.3 フィルム円筒試験片の低温二軸引張降伏の実験方法

引張試験機上部に取付けたロードセル下面から出た試験片との連結金具が低温槽上面中央部から鉛直に垂れ下がっている。他方、引張試験機のクロスヘッドは低温槽下面中央部から槽内に突出している。これら両者の引張軸の心合せを、先に試験片組立治具の心出しに使用した真鍮製試験片ゲージを用いて正確に行ったあと、ゲージを取りはずす。

引張軸の心出しされた上部金具には 3 φ のピンで、クロスヘッド側は袋ナットで、あらかじめ試験片組立治具で組立てたフィルム円筒試験片を取付ける。低温槽前扉を閉め、試験片が正しく装着されたのを確認したあと、クロスヘッドを約 5 mm 上方に上げて、温度低下に

よる試験片の収縮から生ずる初期引張応力を除き、冷却弁を開き、冷却を開始する。

低温槽内の平衡温度が -80°C に達したあと、約1分以上経過してから引張加圧操作を開始する。

フィルム円筒試験片に生ずる応力は、引張荷重を $W\text{kg}$ 、内圧 $p\text{kg}/\text{mm}^2$ 、膜厚 $t\text{mm}$ とすれば、円筒内径 25ϕ であるから、軸方向引張応力 σ_x 、円周方向引張応力 σ_H はそれぞれ次のようになる。

$$\sigma_x = \frac{W}{(25\pi + 4)t} + \frac{25p}{4t} \quad (1)$$

$$\sigma_H = \frac{25p}{2t} \quad (2)$$

(1)式右辺第1項は引張荷重によるものであるが、円筒溶接の際、幅1mmの溶接代4箇所があるための補正をしたのである。第2項は内圧による軸方向応力である。

内径膨張による補正は、降伏点での弾性歪が、表1-2から約10%以下と推定され、したがって内径膨張は円周応力のみで降伏させた場合でも、 $10/(2\pi) \approx 1.6\%$ に過ぎない。円筒試験片の製作のとき考察した $\sigma_x \geq \sigma_H$ の実験条件では、この膨張はさらに小さくなる。これは円筒試験片の降伏断面内の避け難い膜厚のばらつき2%より小さく、無視することができる。

次に、引張速度の選定であるが、種々予備的なテストを行った結果、一定速度で引張りながら、その荷重上昇をXYレコーダのX軸で見て、これに合わせて、手で内圧を上げた。計画した σ_x/σ_H の応力比を保つ操作は、引張速度が早いと非常に困難であった。特に低温での破断伸びの小さいフィルムでは $\sigma_x/\sigma_H \approx 1$ では降伏点の確認すらできずに破裂する。写真1-3に一例を示す。結局引張速度は全試料ともに $5\text{mm}/\text{min}$ とした。

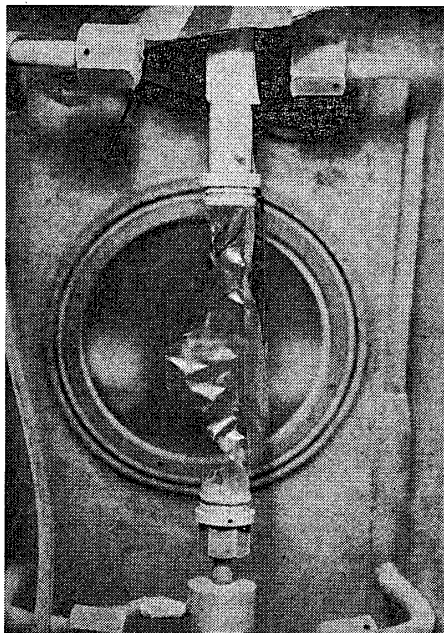


写真 1-3

DFDJ 5505 B のほぼ等軸応力で破裂した円筒試験片

降伏点の判定は、引張荷重の上昇が止った時点とした。この時点では二重窓の偏光視野内の試験片に異常は認められない。調節弁を直ちに絞る、圧力が低下しないよう加圧室素ガスの流量を調節する。偏光視野にすべり模様が現われるまでこの操作を継続し、最初に降伏によるすべり模様が出る位置を確認した。この位置の平均膜厚を以て、(1)(2)の t とし、最大引張荷重とその点での内圧を用いて σ_x, σ_H を算出した。

以上の降伏点を確認した後、すべり模様を観察するために、非常にゆっくりと内圧を上昇させた。単軸引張で上下降伏点を過ぎて下降伏応力が大きく低下した試料では、今回の二軸引張でもXYレコーダの記録に同様な傾向が認められた。降伏点以後の荷

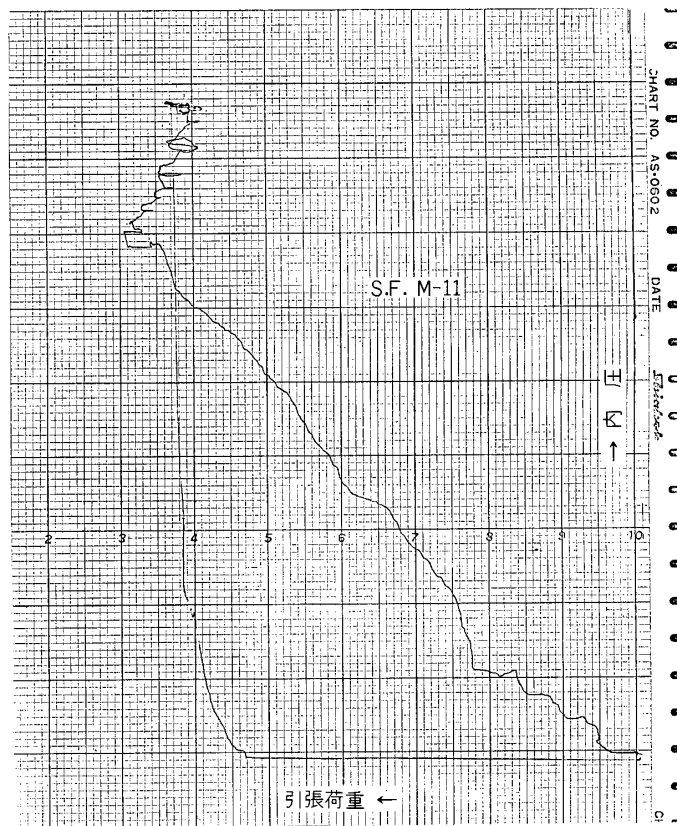


図 1-6 円筒試験片 (SF) の引張荷重と内圧

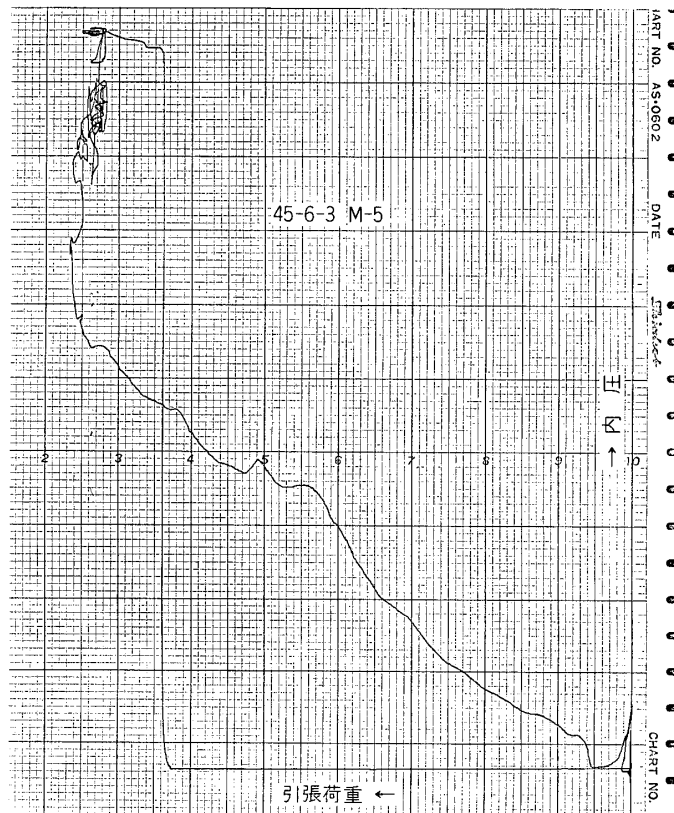
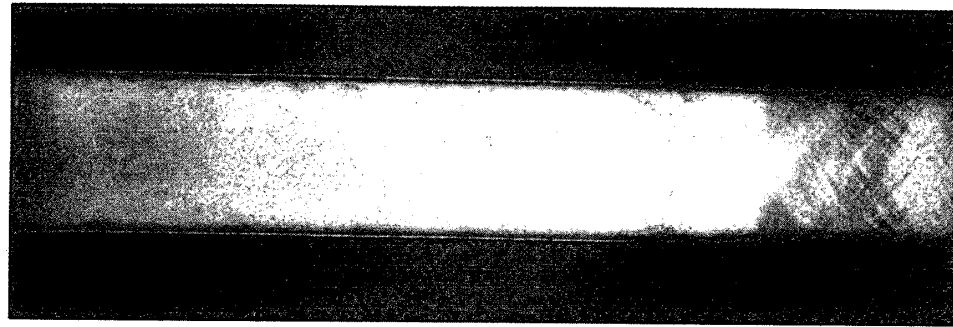
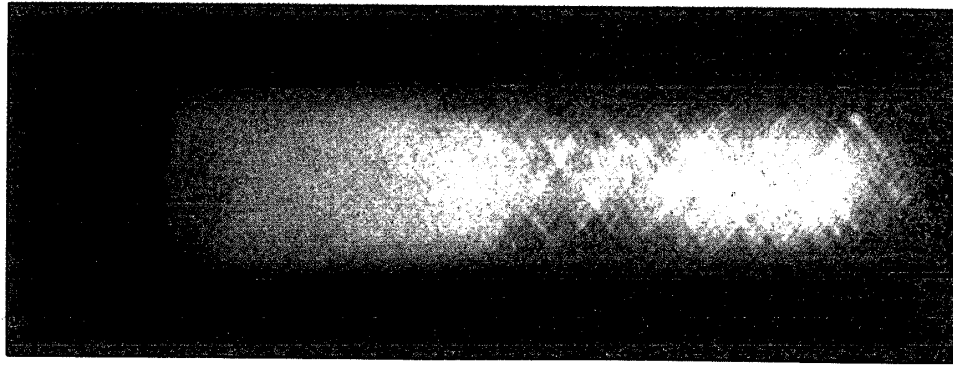


図 1-7 円筒試験片 (45-6-3) の引張荷重と内圧



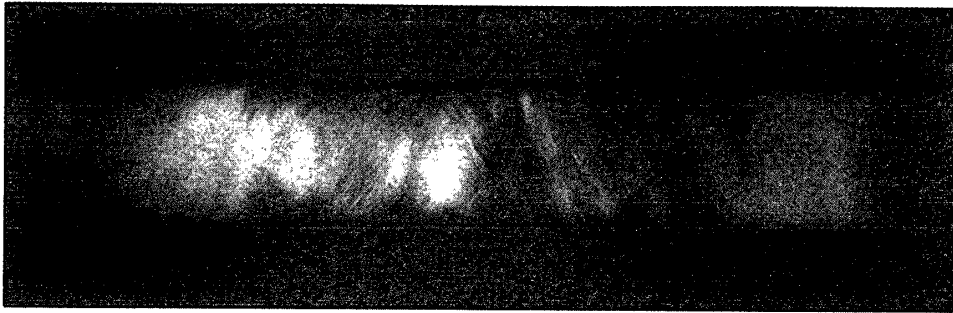
TD 型



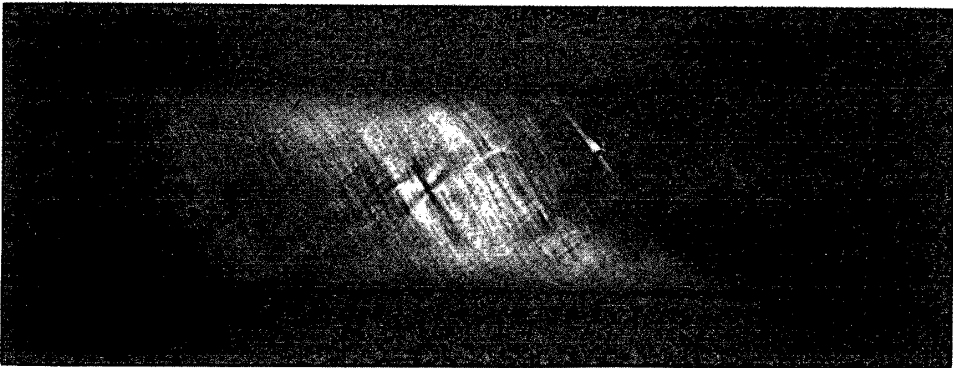
MD 型

S. F.

写真1-5



TD 型



MD 型

45-6-3

写真1-4

フィルム溶接円筒試験片に引張と内圧を加えた降伏すべり模様(-80°C). MD 型のすべり模様は両者似ているが, 45-6-3 のものは偏光軸を回転して一方向のすべり模様のみを見たものである。TD 型での両者の相違は著しく, 45-6-3 には全面に細密な模様が出る。

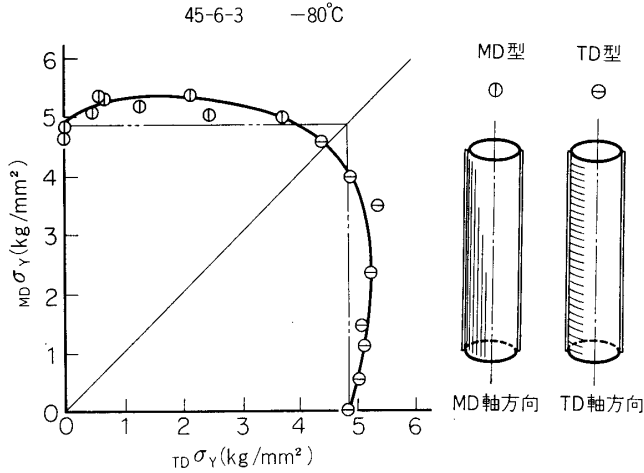


図 1-8 二軸引張降伏曲線(45-6-3)

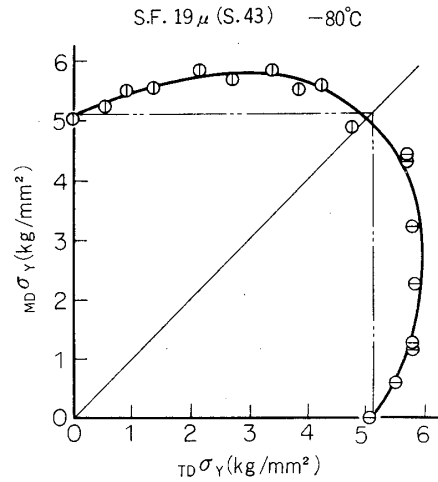


図 1-9 二軸引張降伏曲線 (S. F. 19 μ (S. 43))

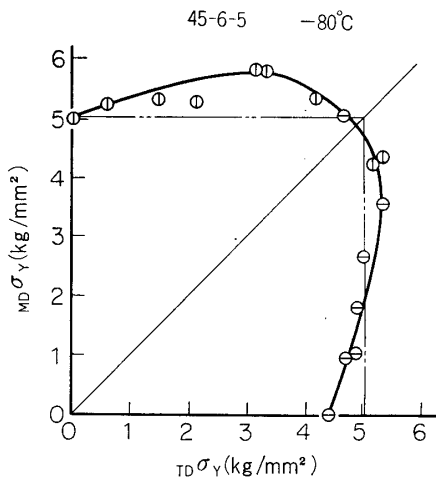


図 1-10 二軸引張降伏曲線(45-6-5)

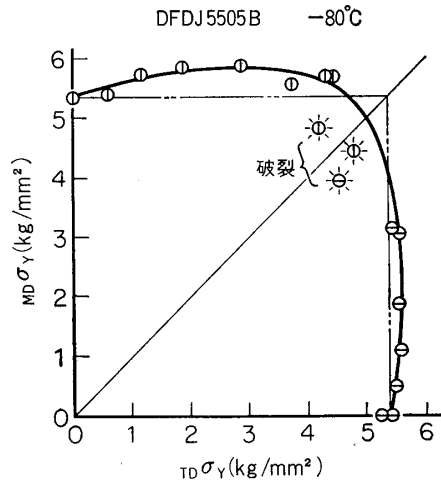


図 1-11 二軸引張降伏曲線 (DFDJ 5505 B)

重変化の小さい試料は同様に今回も同じであった [14][15]. その例を図 1-6, 7 に示す. この観察は軸方向伸び 25% まで行った.

1.4 低温二軸引張降伏基準の測定結果

上記の測定を各試料 LDPE フィルム 4 種類について, 円筒軸を MD と TD にした試験片を種々の応力比で実験した結果を, 縦軸を MD の降伏応力, 横軸を TD の降伏応力とした直角座標に整理すると, 図 1-8, 9, 10, 11 になる.

図中二点鎖線で書き入れた正方形は, Tresca の降伏基準(例えば[21])に相当するものである. これと比較して, 測定結果の分布は, Mises の降伏基準である楕円に近いものであることが初めて明らかになった.

単軸引張の荷重—伸び曲線で顕著な上降伏点を示すことで焼鈍軟鋼と類似する試料フィル

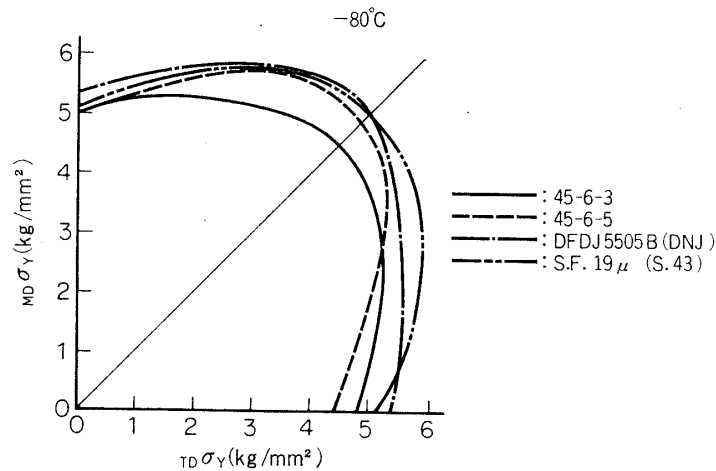


図 1-12 試料 4 種類の降伏曲線の比較

ム、DFDJ 5505 B, 45-6-5, SF の降伏曲線も、Tresca の降伏基準が適合する数少ない例とされている焼鈍軟鋼と異り、やはり Mises の降伏基準に近い事実も明瞭になった。

直交異方性の強い 45-6-5, DFDJ 5505 B の曲線は、等二軸引張直線に関する対称性が崩れてゆがんでいる。この原因は明らかでないが、金属におけるバウシinger 効果に類するものとすれば、フィルム成形時に冷却固定された MD の変形量が TD のそれに比して遙かに大きいことが原因であろうと推定される。図 1-12 に 4 種のフィルムの降伏曲線を重ねて見ると、この推定が明らかになると思われる。

異方性の比較的小さい SF と 45-6-3 を比較すると、前者の降伏応力は後者よりも高いが、単軸引張破断伸びは前者の方が低温では小さい [13][17]。本実験でも、図 1-6 と 7 を比較すると SF の高い降伏点は上降伏点で、伸びの増加によって降伏進行の荷重は次第に低下し、これに反して 45-6-3 のこの荷重低下現象は小さいことがわかる。降伏延伸進行中の応力は、45-6-3 の方がわずかに高くなる試算結果であるが、これは M. I. 従って分子量の大きさが 45-6-3 の方が大きいことから当然予期されることである。

両者の降伏すべり機構の差がわかる偏光観察の数例を、写真 1-4 には 45-6-3 の MD 型と TD 型のすべり模様を、同様に写真 1-5 には SF のそれらを示す。応力比は何れも $\sigma_x/\sigma_H \approx 5/2$ 前後のものである。応力比が 1 に近づくと P_1, P_2 偏光板による直線偏光視野では明らかな模様は認められなくなった。

特徴的な差違は、45-6-3 では試験片のほとんど全領域に微細なすべり模様が現われた後、局所的な延伸部分に少し粗くなったすべり模様が認められる。この部分を、偏光軸を試験片円筒軸に平行と直角に回転して見ると写真 1-4 の MD 型に示す非常に微細なすべり模様が密集して走っている。これに反して SF では最初から局所的に粗いすべり模様が観察される。この傾向は両方の TD 型のすべり模様の比較で特に明瞭である。

偏光観察されるこれらのすべり模様は、主として非晶域分子鎖のすべりによる配向現象と見られるから、最初に広範囲な微細なすべり模様の認められる 45-6-3 は、SF に比較して力学的により均一であることが巨視的に言い得ることはもちろんであるが、LDPE の板状結晶

を非晶鎖が包囲連結した組織構造を、微少平板で強化した一種の複合強化材料とみなせば、微視的にもマトリックスに相当する非晶域と力学的強化役を担当する板状晶とが、力学的により均一化しているものと見ることができる。敢えて具体的に推定すれば、結晶サイズが小さいとか、結晶内の転位分布がより密で非晶域との力学的差違が少いとか、あるいは極端に力学的異方性の強い結晶板の配向自身が、二軸延伸の際、変形抵抗のより小さくなる方向に配位するか、またはそのように配位した板状結晶の分布がより高い等のことが考えられる。現在では、結晶の配向関係以外は適確な測定ができないようであるが、45-6-3の結晶配向がSFより若干無秩序であることはX線回折写真で判明している[14][15]。

本実験でいま一つ興味ある現象は、LDPEフィルムの加熱収縮現象に対応する昇温回復ともいえる現象である。それは、 -80°C の低温槽で約25%の軸方向引張降伏ひずみを与えた円筒状二軸引張試験片のひずみは、除荷し、クロスヘッド位置を原点にもどしても、 -80°C のままでは変化しないが、低温槽を開扉して常温の外気に触れるや否や、数秒間でほとんど原状に復することである。写真1-6の(a)、(b)にこれを示す。(a)はクロスヘッドを原点にもどした状態、(b)は開扉直後でまだ冷気に包まれているが、伸びひずみは大部分回復している。

LDPEの単軸引張で降伏後局部延伸した部分は、繊維組織構造に変化するとされている

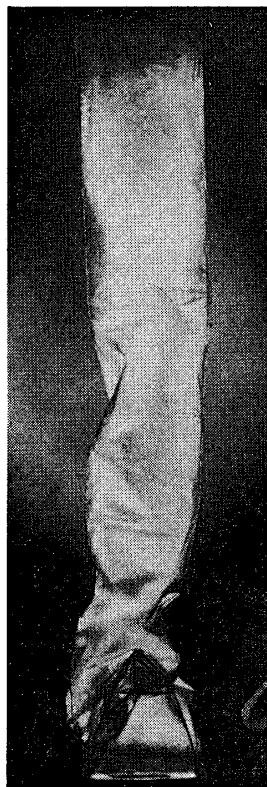


写真 1-6 (a)

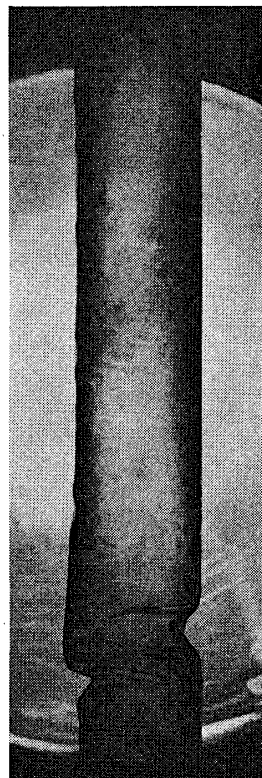


写真 1-6 (b)

低温延伸ひずみの昇温回復

[23] が、本実験のように二軸応力下の降伏延伸ではそれとは異ると見られる。延伸によって完全に別構造の組織に変化するとすれば、変形時の低温で固定された凍結ひずみは分子間緩和を伴い、再び常温にもどしても形状の完全回復はできない。しかし昇温により形状が完全に復元する低温の二軸応力下の降伏ひずみは、主に非晶鎖の種々のオーダのからみ合い (entanglement) が外力によって解除され、単に新しく配向変形する分子内緩和の段階に止り、低温ではこの状態で安定する。ところが再び常温まで昇温すると、分子鎖の熱運動により、加熱収縮比の場合と同様に変形前の相互位置関係を回復し、外形も復元するものと見ることが出来る。

しかし、正確に細部まで復元するのではなく、すべり面の痕跡は残っている。写真 1-7 にこれを示す。2本の溶接線を貫いて一様にすべり線の痕跡が認められる。

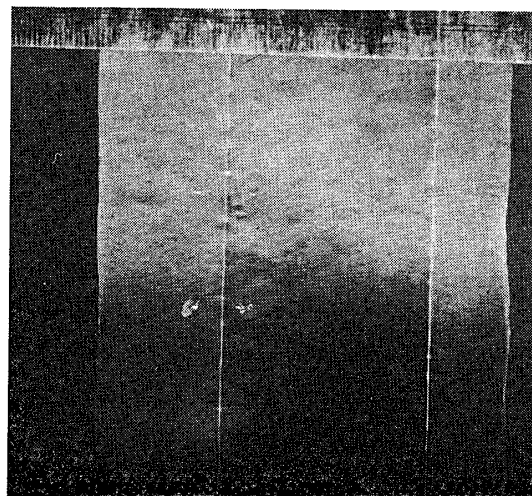


写真 1-7

切り開いた降伏円筒試験片の偏光写真

2. 低温引張破断応力とひずみの測定

2.1 実験の目的と方法

気球皮膜の低温力学物性で、いま一つ重要な性質は、二軸応力下の延伸性能である。これも定量的に測定することはかなり困難で、気球皮膜についてはもちろん、常温の高分子材料全体ですら研究 data は余り多くない [17][23][24][25]。

延伸歪の大きい LDPE フィルムに二軸応力が作用して延伸する場合、破裂寸前の破断部近辺は、ほぼ球面的一部分に近い形状となり、膜厚もほぼ一樣になるから、事実上は近似的に等軸応力状態に漸近する。したがって、任意の二軸応力比での引張破断延伸歪の測定には特別の装置が必要である。

しかし、diaphragm の一側面に加圧する、いわゆるバルジ試験では、最初から破断まで一貫して近似的等軸応力比での実験が可能である。低温引張破断応力と伸びひずみの概要を把握する目的で diaphragm 破裂試験と、MD, TD の単軸引張破断の測定を -80°C で行った。

ところが、この単純な実験条件にもまだ問題が存在する。それは LDPE フィルムが引張降伏の necking 現象によって部分的な大延伸を示すことである。常温での引張では、試験片全域が降伏し塑性変形するが、低温では、降伏域が試験片の標線間全域に波及せず破断する例が多く、極端な場合には降伏点近辺で破断するフィルムもある。単軸引張試験の伸びひずみはチャック間距りの変化から測定されるのが普通で、未降伏の弾性域と降伏した塑性域の混在する標線間距りの変化で、標線間部分がほぼ一樣に伸びたひずみとは意味が異なる。

LDPE フィルムが引張によって、原長の何%延伸するかを測定する目的には、さらに工夫

が必要である。本実験では、標線間がほぼ一様に延伸するときの伸びひずみを測定するため、単軸引張試験では後述する特殊形状の引張試験片を、また延伸性の大きいフィルム二種類についての diaphragm 試験では円形試験片直径の中央約 1/3 の円が、破断前に降伏し、ほぼ球面の一部と見なせる形状となり、これから破断伸びと応力を算出する方法を採った。

2.2 測定試料

前記、降伏基準を求めた4種類の LDPE フィルムについて行った。

2.3 低温等二軸引張試験装置と測定方法

実験装置の大部分は、図 2-1 に示すように、降伏基準の測定に使用した装置を活用した。

フィルム円筒試験片の下端取付金具の代りに、diaphragm 試験片取付金具を取付け、窒素ガス加圧系を連結した。上端取付金具から荷重測定用 LC までを取りはずし、代りに diaphragm の膨張変位測定用に、差動変圧器を用いた行程 100 mm の変位変換器を取り付け、そのシャフトに延長軸を継ぎ足し、先端に接触子として 0.5 mm 厚の 40 φ 円板を取付けて、測定圧を 10 g に調節し、diaphragm 取付金具と軸を一致させ真上に設置した。

低温槽、観察窓は先の実験通りで、diaphragm の膨張変形の連続撮影による写真測定のため、カメラは同じモータードライブ F 250 ニコンに 200 mm 望遠レンズと接写リング 21 mm を付け、専用の定時間隔作動装置からのパルスで 1~2 秒間隔で撮影し、このパルスは同時に XY レコーダーの X 軸に重畳させた。

カメラの位置は diaphragm の中心点から計り 1,500 mm に望遠レンズの焦点が来る距離

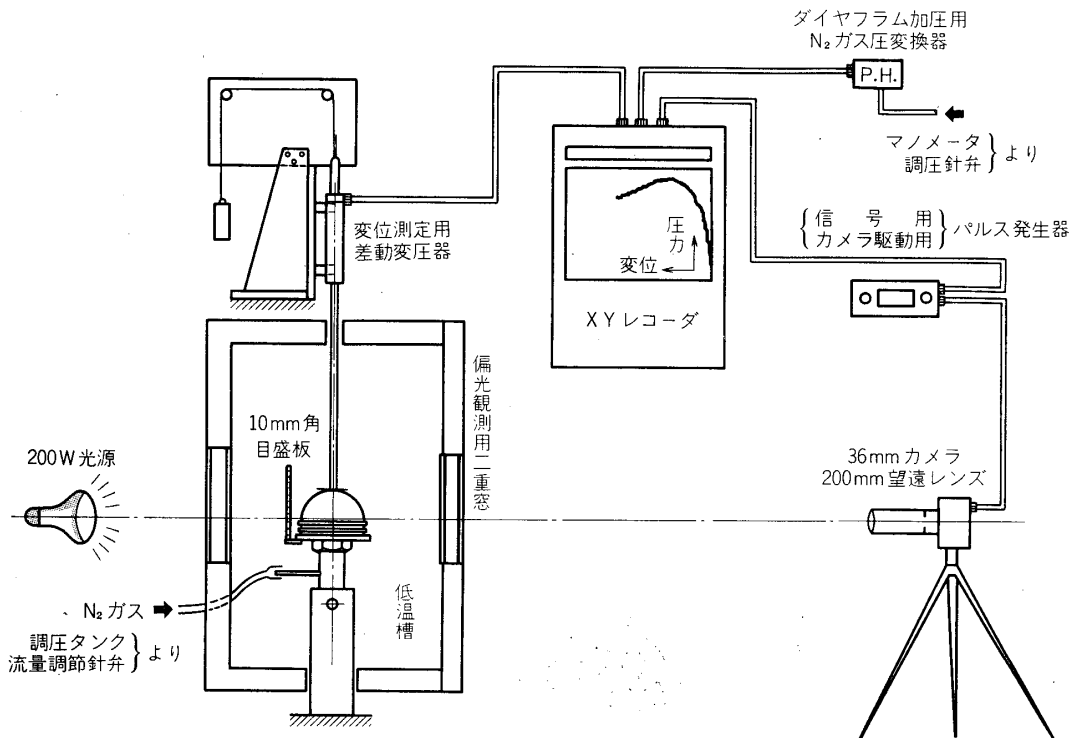


図 2-1 ポリエチレンフィルムの -80°C , 100 φ ダイアフラム破壊実験装置

で、その光軸は、diaphragm 取付金具上面を通る高さにすえ、視差による測定誤差の減少化をはかった。ただし二軸延伸性の大きい 45-6-3 と SF の場合には、視差の減少と形状の正確な撮影の目的でカメラの高さを 20 mm 高くした。さらに、これらの確認と検定のために diaphragm 取付金具の後方に 10 mm 四角の碁盤目盛を切った透明板を、金具の中心から 65 mm の位置に取付け、試験片とともに撮影した。

XY レコーダの Y 軸は前述の通り、diaphragm の中心高変位に、カメラのフィルム送りのパルスを重ねたものであるが、Y 軸は diaphragm を膨らませる加圧窒素ガスの圧力である。前者の変位はブロック・ゲージで、後者は水銀マイメータでそれぞれ検定した。

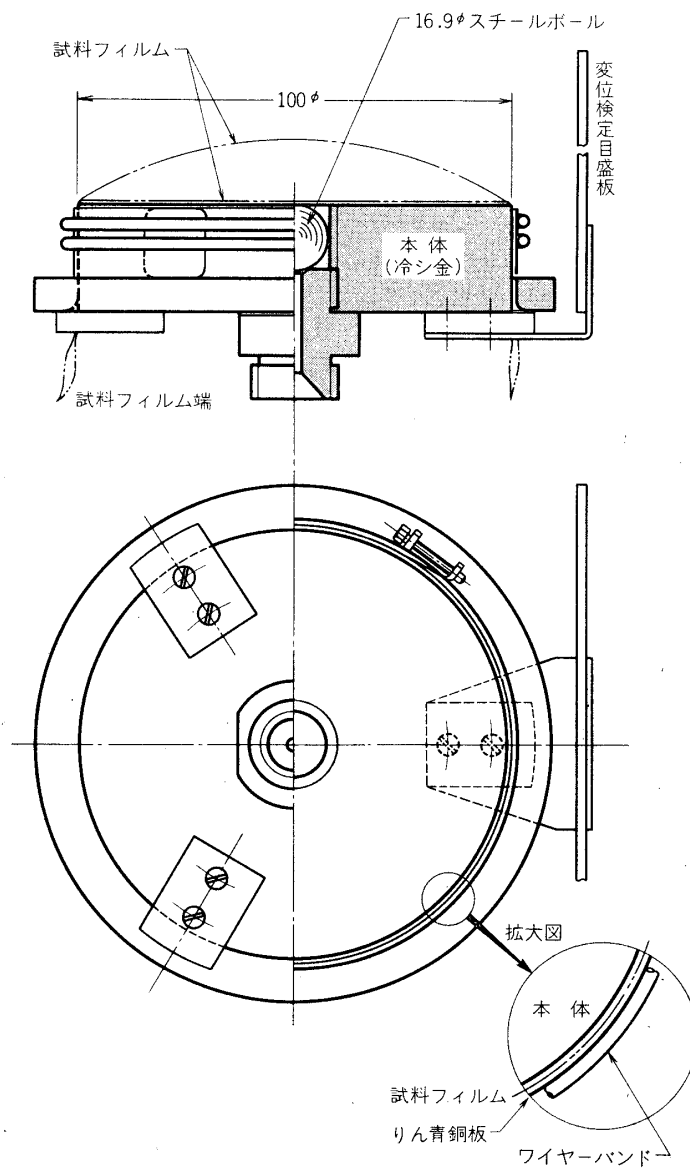


図 2-2 diaphragm 試験片取付金具

diaphragm 試験片は、低温槽の観察用二重丸窓の寸法から制限され、膨れ上がった頂点位置の撮影が確実にできる必要があるため、原形の直径を 100ϕ とした。図 2-2 の取付金具に取付ける締付け代と試験片の心出しを考慮して、一辺の長さ 180 mm の正方形フィルムの中央部の 100ϕ の円内を試験部分とした。

取付金具本体は直径 100ϕ 高さ 25 mm のアルミニウム製で、上端面円周は 0.2 R の面取りを施してある。本体は試験片寸法の基準になると同時に冷し金を兼ねる。LDPE フィルムは種類によって、また MD と TD の方向によっても異なるが、常温から -80°C に冷却されると $1.5\sim 2\%$ 前後収縮する。そこでこの収縮で初期引張応力のかかることを防ぐため、試験片フィルムを一度本体兼冷し金に当てて冷却した後、心出しリングをかぶせ、あらかじめマジックペンで画いた 100ϕ の円を目標にして試験片の位置を決める。次に本体胴部円筒面に沿って自然に折り畳まれ集積したフィルムの外側に 0.3 mm 厚さの燐青銅板を巻き付けて保護し、その上からワイヤー・バンドで締め付けて、試験片を取付金具本体に固定した。

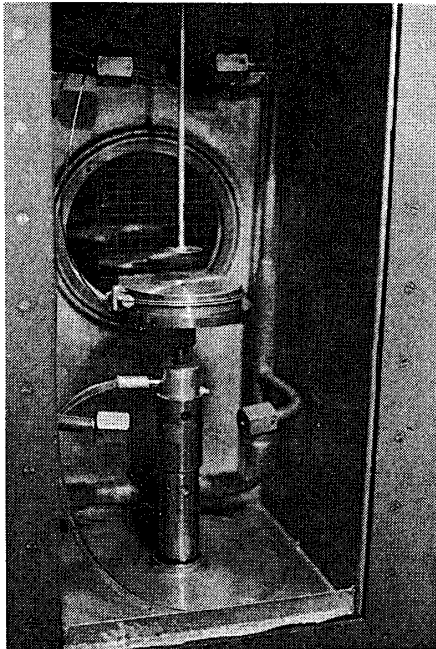


写真 2-1 低温槽内の diaphragm 試験装置

加圧用の窒素ガスは diaphragm 取付金具本体の中央から噴入させるが、窒素ガス流量が増大した場合にも -80°C からのずれを少なくする目的で、噴出口に直径約 17ϕ の鋼球を当てて、細隙を作った。これは流入ガスの分散の役も果すものである。この diaphragm 取付金具と変位測定接触板を低温槽内に設置したところを写真 2-1 に示す。

測定方法は、diaphragm 取付金具に試験片を装着しないで低温槽を -80°C に冷却した後、開扉し、まず正方形試験片の中央の 100ϕ の円を目標にし、取付金具本体の上面に載せて冷却する。約 30 秒間冷した後、心出しリングをかぶせ、前記の手順で本体に締め付けて固定する。変位測定用の接触円板を中央に当てて扉を閉め、再び冷却する。

-80°C に平衡した後、数分して、窒素ガスの加圧を始める。ひずみ速度あるいは加圧速度の決め方は困難であるが、今回の実験では、加圧ガスの圧力検定用の水銀マンメータの下方に下がる側の水銀凸面が平らになる状態を目安として加圧した。XY レコーダの曲線を見ながら、膨張変位を示す X 軸の上昇が急になる時点で加圧を中止し、ほぼ一定に保ちながら膨張させた。この記録の一例を図 2-3 に示す。曲線上のとげ状のマークはフィルム巻上げのパルスで、シャッターはこれに続いて切れる。

二軸延伸の小さい DFDJ 5505 B の膨張変位は小さく、破裂時にも降伏による局部延伸がほとんどない球面の一部として近似できる。二軸延伸の大きい SF と 45-6-3 は写真 2-2、3 に示す形状に延伸膨張する。これらの球面近似は不相当である。前述の通り、中央の 30ϕ の全域が降伏延伸して球面状に延伸する。そこでこの 30ϕ 円形部分について破断伸びを

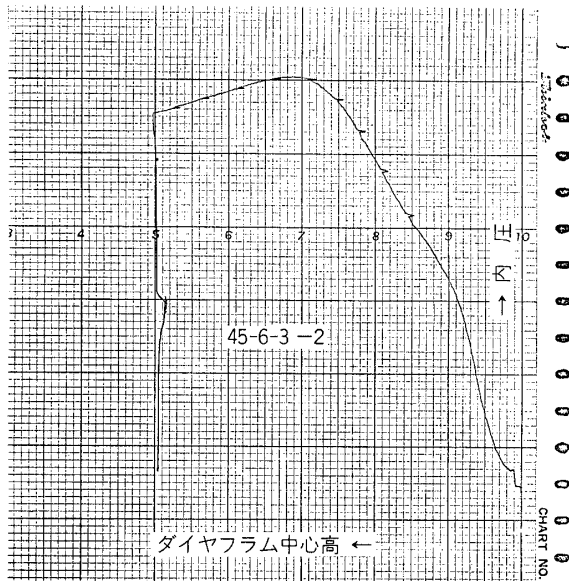


図 2-3 diaphragm 破壊試験の XY レコーダー記録の一例

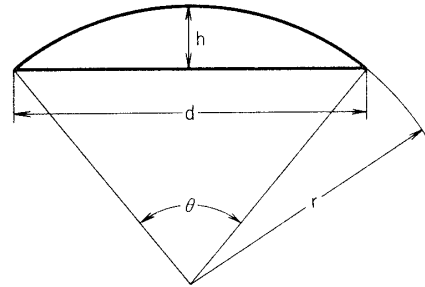


図 2-4 diaphragm 試験片の破裂直前の諸元

- d : diaphragm 試験片直径
- h : diaphragm 破裂直前の中心高
- θ : diaphragm 破裂直前の中心角
- r : diaphragm 破裂直前の半径

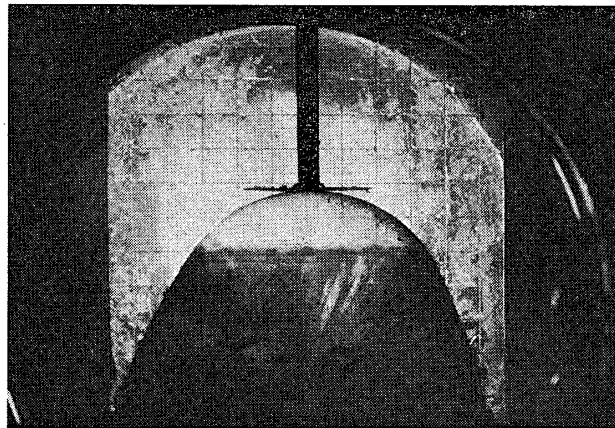


写真 2-2 SF diaphragm の変形

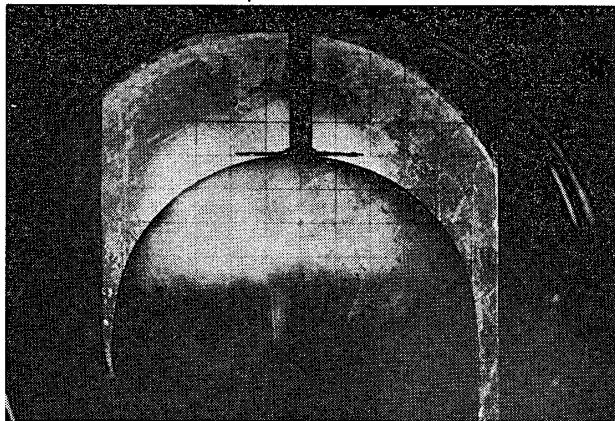


写真 2-3 45-6-3 diaphragm の変形

計測することにした。最も測定困難なのが 45-6-5 である。この場合、適切な方法がないから、MD と TD の曲率の不同を考慮して、両方の近似球面の半径を平均して算出した。

基本的な計算式は図 2-4 に示す諸元を用いれば、

$$r = \frac{1}{2h} \left(\frac{d^2}{4} + h^2 \right) \quad (3)$$

$$\text{また} \quad \sin \frac{\theta}{2} = \frac{d}{2r}$$

$$\theta = 2 \sin^{-1} \frac{d}{2r} \quad (4)$$

であるから、膜の直径の伸びひずみを ε_B とすれば

$$\varepsilon_B = \frac{r\theta}{d} - 1 \quad (5)$$

また膨張した球冠状の膜の面積を S とすれば

$$S = \pi \left(\frac{d^2}{4} + h^2 \right) \quad (6)$$

であるから、延伸部分が一樣な膜厚 t' とみなせば

$$t' = t \cdot \frac{1}{1 + 4 \frac{h^2}{d^2}} \quad (7)$$

t は試験片もとの膜厚である。

公称破断応力を σ_{BO} とすれば

$$\sigma_{BO} = \frac{pr}{2t} \quad (8)$$

であるから、破断真応力 σ_B は

$$\sigma_B = \frac{pr}{2t'} = \sigma_{BO} \left(1 + 4 \frac{h^2}{d^2} \right) \quad (9)$$

である。

写真 2-2, 3 に示す場合には、中心部 30ϕ のマークを焼き出した写真から d, h を求め、背景の 10 mm 角目盛を基準にし、その距離補正として 65/1, 500 \approx 4% を縮めて算出した。

4 種類の試料フィルムについての (5), (8) と (9) の実験値は、次の単軸引張破断の実験値とまとめて示す。

2.4 特殊型引張試験片による低温単軸引張破断の実験

前節の diaphragm による -80°C の等二軸引張破断ひずみに対応する、単軸引張破断ひずみを測定することが本実験の目的である。前にも記した通り薄膜の引張試験で普通に用いられる JIS 規格のダンベル型試験片を、 -80°C の低温引張試験に用いると、その長さ 40mm の平行部全域が延伸しないで破断することが多く、確かな破断ひずみが測れない。

そこで本実験では、種々予備テストの結果、図 2-5 に示す特殊型引張試験片の中央部の長さ 5 mm 間を標線長とし、この全領域がほぼ均等に伸びることを利用して、破断ひずみを測定することにした。

試料フィルムは前節と全く同じ4種類のLDPEフィルムで、それぞれMDとTDの引張破断ひずみと応力を求めた。

最も問題になるのは引張速度の選定である。diaphragm試験でのひずみ速度は、一軸方向について毎秒20~30%で、筆者達がフィルム・テストに用いた、試験長が40mmで引張速度500mm/minすなわち毎秒21%よりも早い。比較的早い毎秒30%の引張速度は試験長5mmの特殊型試験片では、90mm/minのクロスヘッドの移動速度に相当する。しかし二軸引張ではなく単軸引張であるから、引張速度は約2倍が相当するとすれば180mm/minになる。さらに特殊型試験片で試験長部分の形状変化が、比較的緩慢である点を考慮して、引張試験機の引張速度の中から若干大きい値を選び、一応200mm/minの引張速度が相当すると考えた。

2.5 単軸引張破断実験の装置と方法

1.2に記した低温引張試験機に、フィルム用チャックを取付け、2.3で述べたモータードライブ・ニコンF250と定時間隔作動装置を連動させた連続撮影装置を使用した。XYレコーダには荷重とチャック間の移動距離を記録させた。

しかし、特殊型試験片の中央部の試験長5mmの伸びひずみは、図2-6に示す方法で、試験片に密着させた特製の1mm角目盛セルロイド板を標線と重ねて撮影し、フィルムを現像して読み取る方法を探った。

5mm間隔の標線は黒ボールペンで書き入れるが、試験片を傷つけぬ注意が必要で、特に縁の部分は避けた。また1mm角目盛板を重ねるとき、 -80°C に冷却した際の収縮を考慮して、約1mmずらして取付けた。写真2-5に延伸の大きいフィルムの場合の一駒、写真2-6に比較的伸びの小さい場合の一駒を掲げる。

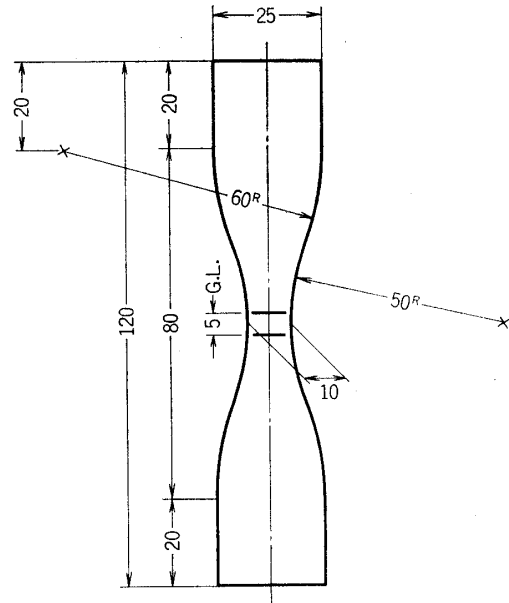


図 2-5 単軸引張破断伸測定用特殊型試験片

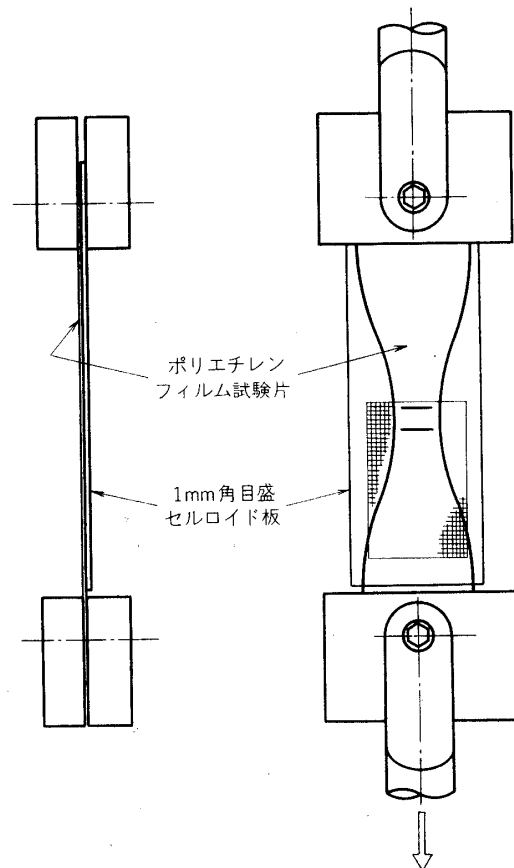


図 2-6 単軸引張破断伸び測定のための試験片と目盛板のクランプ法

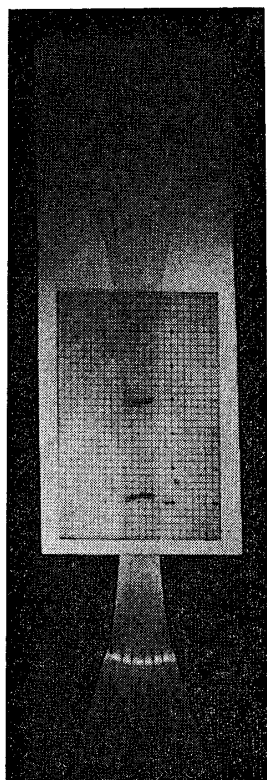


写真 2-5 大延伸した特殊型引張試験片の一駒

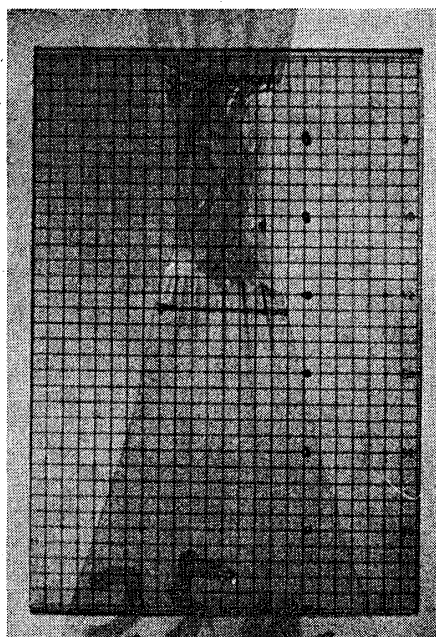


写真 2-6 小延伸の特殊型引張試験片の一駒

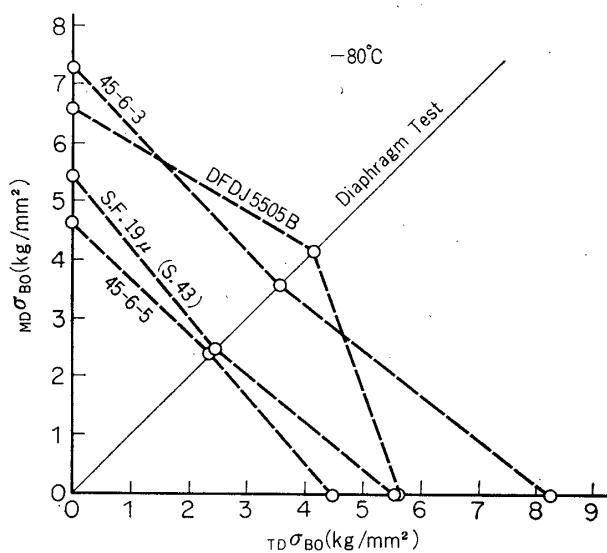


図 2-7 公称破断応力

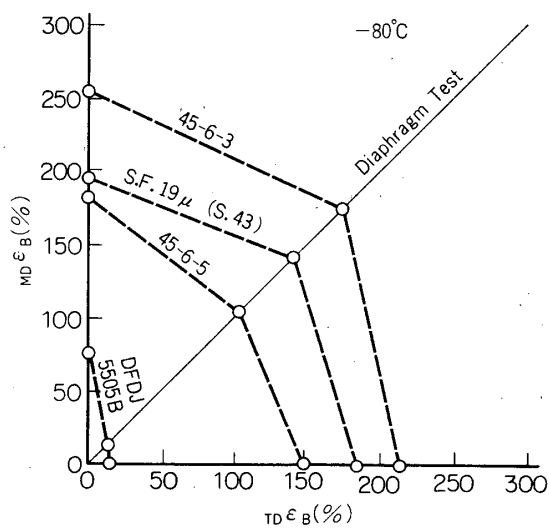


図 2-8 引張破断伸び

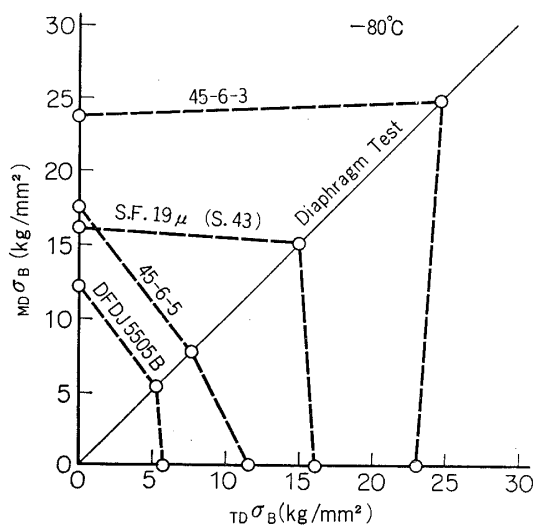


図 2-9 引張破断真応力

2.6 低温引張破断実験の結果

以上の 2-3, 2-5 で実験した測定結果各 3 個の平均値を, MD を縦軸, TD を横軸にとった直角座標に整理して示すと, 図 2-7, 8, 9 となる.

図 2-7 は公称破断応力である. TD の破断伸びが極端に小さい DFDJ 5505 B のみが他と異なり, 他の 3 種類は似た形状である. これら三者の等二軸引張破断応力は大約単軸引張破断応力の $1/2$ の値を示している. このことは, 低温延伸性の大きい LDPE フィルムを気球皮膜として使用する場合, 破壊応力を単軸引張破断応力の約 $1/2$ に見積り得ることを意味し, 気球設計に有益な指針となる.

図 2-8 は破断伸びについての関係である. 気球皮膜には二軸応力がかかるが, 過大荷重に際して十分二軸延伸することは, 変形エネルギーとしてこれを吸収すると同時に, 皮膜の曲率半径を小さくし, 皮膜応力を低下させて, 気球破裂を防ぐ効果がある. この図は LDPE フィルムの等二軸延伸に MD よりも TD の延伸性がより大きく関係し, MD と TD の ϵ_B を等しく, なるべく大きくすることが効果的なことを示す [27].

次の図 2-9 の破断真応力の図を見ると, このことが一層明瞭になる. 物質の力学的強度の利用限界値を示す破断真応力が大きいことは, ほぼ同じ比重の LDPE フィルムを使用して, 気球等を軽量化する limit design の観点から有力な data である. この図では同じ強度の気球を SF 19 μ (S. 43) で作るよりも, 45-6-3 で作れば, 皮膜重量を約 33% 軽く, 同じ重量ならば, 約 50% 許容荷重を増し得ることになる.

結 論

プラスチック・フィルムを利用して, 科学観測用プラスチック大気球が開発され, 幾多の重要な観測結果を上げつつあるが, 気球皮膜の主要材料としての LDPE フィルムは, 古くから使用され性質の知られた金属材料と異なり, その力学的性質およびその製造, 成形条件

との関連は未知の点が多かった。本研究の結果、気球設計に必要な皮膜材料の基本的な力学的性質である降伏基準は拡張された Mises 則であることが明らかになった。また、低温強風層を上昇突破する際起りやすい気球破裂の対策として、筆者らが考えた、LDPE 皮膜の強い直交異方性の等軸化と低温下での二軸延伸性の向上の方針は、皮膜材料の力学的強度を十分に活用し、今後気球の強度と上昇性能の一層の向上に必要と考えられる極限設計をも可能にする有効適切な途であることも明らかになった。

なお、本研究の試料フィルムで、DFDJ 5505 B, SF 19 μ (S. 43) の不足分は西村研究室から御提供戴いた。ここに記して厚くお礼申上げる。

1974年2月1日 材料部

参 考 文 献

- [1] 岡本 智：上昇速度計および排風速度計とその測度結果，生産研究. 12-3 (1960/3), 69.
- [2] O. Hirao and S. Okamoto: Japanese Rockoon System and Techniques. Proc. of the 3rd International Symposium on Rockets and Astronautics. (Tokyo. 1961), 262.
- [3] 大井光四郎，浅野六郎：ロクーン用ポリエチレン気球の強さに関する二三の問題について，生産研究. 12-3 (1960/3), 31.
- [4] 岡本 智：ロクーン（シグマ4型）実験の概要. 生産研究. 14-2 (1962/2), 6.
- [5] 藤本陽一，長谷川俊一，西村 純，丹生 潔，他：プラスチック気球について，I（サイクリング・プロジェクト）東大核研 (1962/10)
- [6] 西村 純：気球概論. 東大宇研報告 2-1(c) (1966/3), 409.
- [7] 河田幸三，小林昭，橋本彰三，大谷信男：気球皮膜のひずみ測定，東大宇研報告. 3-2 (B)(1967/6), 398.
- [8] 河田幸三，小林 昭，橋本彰三，大谷信男，本堂 明：ポリエチレン皮膜の強度と気球飛しよう時の皮膜ひずみ測定，東大宇研報告. 5-1 (B)(1969/3), 106.
- [9] 西村 純，太田茂雄，大塚 豊：気球内圧の測定，東大宇研報告. 大気球シンポジウム，(S. 43), 30.
- [10] 河田幸三：気球の材料と強度について，東大宇研報告. 2-1 (C)(1966/3), 409.
- [11] 河田幸三，橋本彰三，本堂 明，佐藤 正：ポリエチレン系気球皮膜材料の力学的諸性質の評価について. 東大宇研報告. 3-2 (B)(1967/6), 385.
- [12] 岡本 智：ポリエチレンフィルムの強度異方性におよぼす因子. 東大宇研報告 3-2 (B)(1967/2), 402.
- [13] 岡本 智：気球用ポリエチレン・フィルムの直交異方性の向上および加熱収縮比. 東大宇研報告. 6-1 (C)(1970/3), 273.
- [14] 岡本 智：気球用ポリエチレンフィルムの開発(主として低温二軸延伸性を考慮した場合). 東大宇研報告. 7-1 (C)(1971/3), 240.
- [15] 岡本 智：観測気球用ポリエチレンフィルムの開発. 生産研究 23-11 (S. 46/3), 1.
- [16] K. Kawata, J. Nishimura, M. Fujii, S. Okamoto, S. Hashimoto and A. Hondo: Materials for Balloon Use, Proc. of the Ninth International Symposium on Space Technology and Science. (Tokyo. 1971), 1089.
- [17] 河田幸三，橋本彰三，本堂 明：昭和41年以来最近6年間における気球用フィルムの性能と飛

- 揚結果の向上. 東大宇研報告. 9-1 (B)(1973/3), 138.
- [18] I.L. Hopkins, W. O. Baker and J. B. Howard: Complex Stressing of Polyethylene. *J. App. Phys.* 21-MARCH(1950), 206.
- [19] K. Kawata, S. Okamoto, S. Hashimoto and A. Hondo: On the Yielding Fracture Criterion of Balloon Film Materials under Biaxial Stresses, Proc. of the Tenth International Symposium on Space Technology and Science. (Tokyo, 1973), in Printing.
- [20] 西村研未発表
- [21] R. Hill: *The Mathematical Theory of Plasticity*, (1950) Oxford.
- [22] 河田幸三, 本堂 明, 橋本彰三, 佐藤 正: ポリエチレン系気球皮膜材料の力学物性と気球皮膜に必要な強度規格について. 東大宇研報告 7-1 (C) (1971/3), 227.
- [23] Nobutami Kasai, Masao Kakudo: Fine Texture in Necking Portions of Cold-Drawn Polyethylene. *J. Polym. Sci. 2-A*(1964), 1955.
- [24] J. L. Cooney: Effect of Morphology on Biaxial Stress Rupture of Polyethylene. *J. App. Polym. Sci.* 3(1964/4), 284.
- [25] 中田修, 平井忠明, 前田 庸: ポリエチレンのレオロジー. 材料試験 8-67 (S. 34/4), 10.
- [26] 牧野内昭武: プラスチックの塑性変形現象. 機械学会誌 75-639 (1972/4), 568.
- [27] 岡本 智: 縦補強型気球の補強本数の効果と薄いフィルムの開発. 東大宇研報告. 9-1 (B)(1973/3), 142.
- [28] J. H. Smalley: Determination of the shape of a freeballoon, General Mills, Inc. Electronics Division. Report No. 2421. (1963/8)