

引裂きテストの破壊力学的解析について

河田 幸三・橋本 彰三・本堂 明

1. まえがき

プラスチック・フィルムの材料試験の一つとして引裂き試験[1]があるが、気球用ポリエチレン・フィルムについて、この試験法の性状の検討を従来の単軸引張り試験と比較して行なってきた[2]、[3]、[4]。

本報では引裂きに要する単位厚さ当りの力 P/t ($g/\mu m$) は、割れが進行してゆく際の破面の表面エネルギーであることをエネルギー・バランスの観点より示す。また、気球用材料として初期の頃のフィルムから更に性能が向上されているものに至るまでの各種のフィルムについて引裂き試験を行なっているので、その結果を紹介する。

2. 引裂き抵抗 P/t の破壊力学的解析

引裂きのモードとしては図1に示す三通りが考えられる。この中、プラスチック・フィルムの引裂きに用いられるⅠとⅢの型について破壊力学的解析を行う。

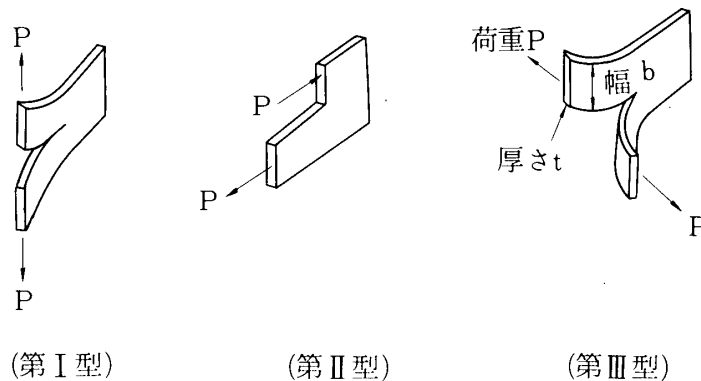


図1 引裂きの基本型

2-1. 第Ⅲ型引裂き試験

解析にあたって次の仮定をおく：

- i) 材料は軟い弾性体である。

- ii) 準静的で定常的に引裂きが進行する。
- iii) 図2でA部の応力分布は局部的に集中しており、引裂き線の延長上はあまり利かないとする。即ち、同じ応力集中部が引裂きに従って図2(b)の右方へ移動してゆくとする。
- iv) 幅 b は十分細いとする。

以上の仮定のもとに、今長さ dl だけ引裂いた時のエネルギー変化 dW , dU , dL を考える。

ただし、

dW : 表面エネルギーの変化

dU : 弾性歪エネルギーの変化

dL : 荷重のポテンシャル・エネルギーの変化

とした。この時の限界条件は

$$dW + dU + dL = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$dW = 2 r t dl \quad (r: \text{破面の表面エネルギー}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{aligned} dU &= \frac{1}{2} [(P/bt)^2 / E] bt \times 2 dl \\ &= \frac{P^2}{Ebt} dl \quad (E: \text{弾性率}) \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

$$dL = -2 \times P dl \left(1 + \frac{P}{Ebt}\right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

式(2), (3), (4)を(1)に代入して、

$$P^2 + 2 E bt \cdot P - 2 r E bt^2 = 0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2} [-2 E bt \pm \sqrt{(2 E bt)^2 + 8 r E bt^2}] \\ &= \frac{1}{2} (2 E bt) \left[-1 \pm \sqrt{1 + \frac{2r}{Eb}}\right] \quad \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

通常のプラスチック・フィルムについて $2r/Eb \ll 1$ と考え、

$$\begin{aligned} P &= Ebt \left[-1 \pm \left\{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{2r}{Eb}\right)\right\}\right] \\ &= r t \quad (\text{符号は正を採る}) \quad \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

故に $P/t = r$, 即ち P/t は破面の表面エネルギー r を与える。

2-2. 第I型引裂き試験

2-1と同様の4個の仮定のもとに、

$$dW = 2 r t dl$$

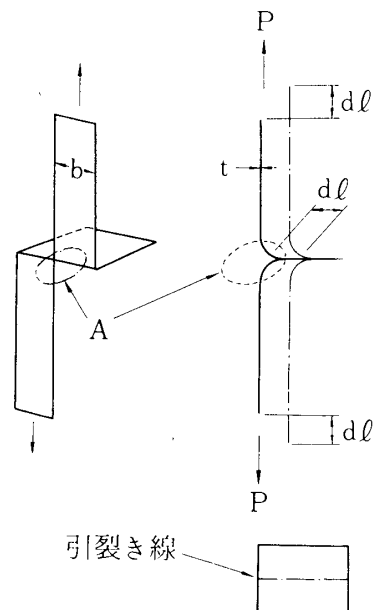


図2 軟いPlastic filmの引裂きテスト(Tear test)の破壊力学的解析

$$dU = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{P}{bt} \right)^2 / E \right] bt \times 2 dl = \frac{P^2}{Ebt} \times dl$$

$$dL = -2 \times P dl \left(1 + \frac{P}{Ebt} \right)$$

これらは 2-1 の式：(1), (2), (3), (4)と同一で，結果は同じく

$$P / t = r \dots\dots\dots (8)$$

となる。即ち，この型式の引裂きでも P / t は r を与える。

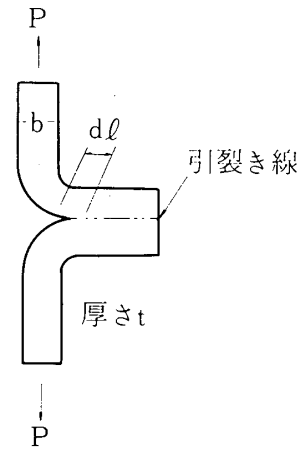


図3 第I型の場合

3. 実 験

3-1. 引裂き試験法

図4(a)に示すような試験片を，引張り速度 250 mm/minで同(b)のように引張り，裂けてゆく時の荷重 P の最大値を測定すれば r が得られる。

試験したフィルム材料は表1に示す通りで型として25種類であり，宇航研における大気球研究初期の頃の国産フィルムから外国製のものおよび国産で性能向上がなされているものを含んでいる。尚，試験は室温および低温（ -80°C ）で行った。

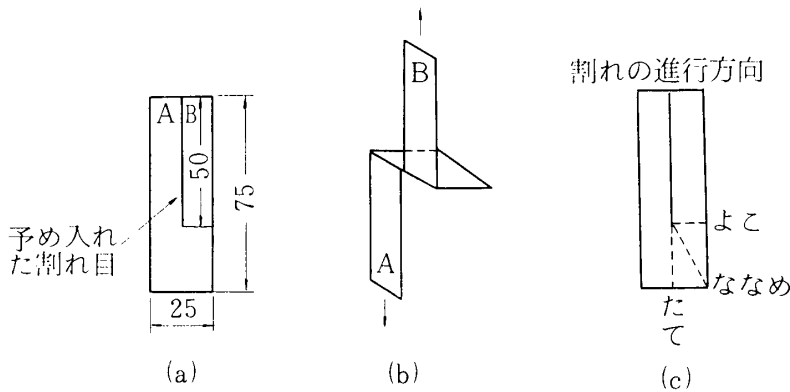


図4 試験片，引裂き方法，割れの方向

3-2. 試験結果

ここには低温（ -80°C ）での結果を単軸引張り試験の結果と併せて表1に示す。試験片

No.16から20まではナイロン・フィルムであるが、その他は全てポリエチレンである。No.21, 22および25は低温での二軸延伸性を著しく向上させたフィルムであって、No.25は実際に使用されたものである。裂けた方向とは図4(c)の点線の方向にそれぞれ割れの進行したことを示す。

この表から r ($g/\mu m$) が単軸引張り試験の破断伸び ϵ_{max} (%) と如何なる関係にあるかを見るために、 T 方向の ϵ_{max} (即ち、 ϵ_T) を横軸にとり、 M および T 方向の r を縦軸にプロットしたものが図5である。

4. 結果の分析

図5には M 方向の試片で割れが横にそして T 方向に進むものを \times 印、 M 方向に直進するものを \circ 印、ななめ方向に進むものを \triangle 印とし、 T 方向の試片で T 方向に直進するものを \bullet 印で示してある。

−80℃での各種ポリエチレンおよび
ナイロン皮膜の引裂き試験の結果

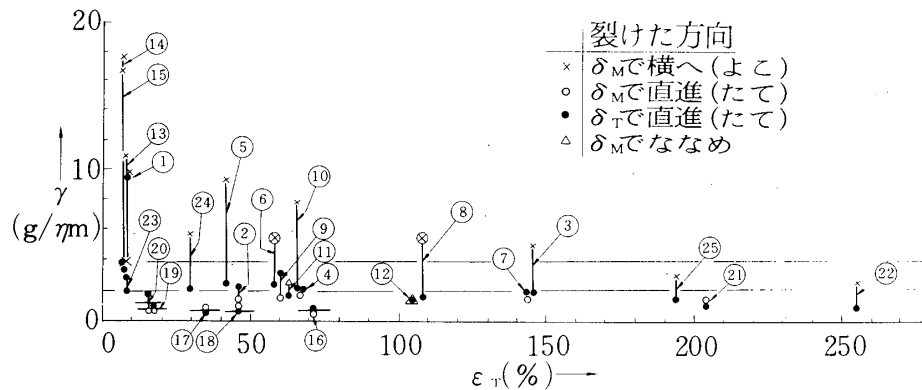


図5 $r \sim \epsilon_T$ 関係 (−80℃)

表1および図5から以下のようなことが言える；

- 1) 上記25種の試料によれば一般に $r_M > r_T$ の傾向が見られる。ただし r_M で直進するものはこの限りでない。
- 2) r_T の値はNo.1を例外として、 ϵ_T の大小に依らず、たかだか3.8以下0.6 ($g/\mu m$) の範囲にある。
- 3) T 方向にとった試料 (即ち、 r_T) の割れはフィルムの種類に依らず全て T 方向に直進している。
- 4) ナイロン・フィルムについては次のような特色が見られる。
 - i) ナイロンの r は M , T ともにポリエチレンに比べて小さい。
 - ii) ナイロンの5種類のフィルムについては異方性の大小に拘らず、また室温・低温ともに全てが割れ目方向に裂けている。即ち r_M , r_T はそれぞれ割れが直進する。
 - iii) このナイロンの場合、低温での ϵ_T の大小に依る r への影響は特には現われていない。

表1. -80℃での各種皮膜の引裂き試験と単軸引張り試験の結果

No.	メーカー	型	方向	裂けた方向	γ (g/ μ m)	単軸引張り試験		EM ET	$\frac{\gamma M}{\gamma T}$
						ϵ_{max}	σ_{max}		
1	NUC	5505	M	よこ T	9.91	108	6.5	12.1	1.05
			T	たて T	9.46	8.9	6.0		
2	Visqueen		M	たて M	1.29	77	5.6	1.67	0.60
			T	たて T	2.17	46	5.4		
3	Raven	X-124 0.5mil	M	よこ T	5.03	108	7.0	0.74	2.86
			T	たて T	1.76	146	6.8		
4	Raven	X-124 1.5mil	M	たて M	1.71	51	6.4	0.76	0.84
			T	たて T	2.04	67	6.3		
5	三菱油化	ZE-31 190-1.5-022	M	よこ T	9.31	141	5.9	3.36	3.91
			T	たて T	2.38	42	5.7		
6	三菱油化	ZE-31 190-3.0-022	M	よこ・たて	5.50	78	5.5	1.34	2.40
			T	たて T	2.29	58	5.4		
7	三菱油化	HE-60 190-2.5-037	M	たて M	1.41	175	5.5	1.22	0.73
			T	たて T	1.94	143	5.4		
8	三菱油化	HE-60 190-2.5-022	M	よこ・たて	5.44	255	5.3	2.36	3.60
			T	たて T	1.51	108	5.3		
9	三菱油化	YF-30 フラット	M	たて M	1.47	498	5.2	8.30	0.46
			T	たて T	3.22	60	5.3		
10	三菱油化	ZE-31 S-1210No.2	M	よこ T	7.86	177	5.6	2.68	3.93
			T	たて T	2.00	66	5.6		
11	三菱油化	HE-60 Y-2266No.8	M	ななめ	2.60	192	5.6	3.05	1.61
			T	たて T	1.61	63	4.9		
12	三菱油化	HE-60 D-2236	M	ななめ	1.45	256	5.2	2.44	0.89
			T	たて T	1.63	105	5.1		
13	積水化学	35 μ	M	よこ T	11.0	42.6	6.0	5.32	3.86
			T	たて T	2.85	8.0	5.9		
14	サーモ化工	NUC 8066 A-No.1	M	よこ T	17.6	119	8.0	17.0	5.29
			T	たて T	3.33	7.0	5.9		
15	サーモ加工	NUC 8066 B-No.2	M	よこ T	16.7	134	6.7	18.9	4.38
			T	たて T	3.81	7.1	5.8		
16	ダイセル	ダイアミド No.1	M	たて M	0.54	126	10.5	1.77	0.92
			T	たて T	0.59	71	8.1		
17	ダイセル	ダイアミド No.2	M	たて M	0.85	84	11.0	2.40	1.54
			T	たて T	0.55	35	10.0		
18	ダイセル	ダイアミド No.3	M	たて M	0.81	64	10.7	1.39	1.28
			T	たて T	0.63	46	10.4		
19	ダイセル	ダイアミド No.4	M	たて M	0.52	112	10.7	6.60	0.57
			T	たて T	0.92	17	9.7		
20	ダイセル	柔らかいもの	M	たて M	0.54	17	11.4	1.06	0.28
			T	たて T	1.90	16	10.7		
21	NUC	45-6-1 M.I.=0.1	M	たて M	1.24	68	5.62	0.33	1.11
			T	たて T	1.12	204	5.67		
22	NUC	45-6-3 M.I.=0.1	M	よこ T	2.39	242	6.06	0.95	3.62
			T	たて T	0.66	255	7.03		
23	三菱油化	ZE-41 B-2,2-2No.2	M	よこ T	4.00	49	6.07	6.05	2.28
			T	たて T	1.85	8.1	6.08		
24	三菱油化	ZE-41 A-4,2-4No.2	M	よこ T	5.77	111	6.02	3.70	2.76
			T	たて T	2.09	30	5.73		
25	DNJ	6775-M 447-12-85	M	よこ T	2.87	356	7.09	1.83	2.16
			T	たて T	1.33	194	6.02		

④ 方向M：皮膜成型のMachine方向にとったもの。
方向T：皮膜成型のTransverse方向にとったもの。

(%) (kg/mm²)

IV) ポリエチレンの r_M / r_T が1より大きく離れて前後しているのに比較して、ナイロンの r_M / r_T の値は大略1に近いと云える。

V) 各型のナイロンはそれぞれの固有の特徴を有しているが、一般的に初期の国産ポリエチレン・フィルムに近い性質をもっている。

5) この結果で見ると、一般に r は低温での ϵ_T が大なるものほど減少する傾向を示している。

5. 結 果

1) 引裂き抵抗 P/t は割れが進行してゆく際の破面の表面エネルギー r であることが破壊力学の観点より示された。

2) 引裂き試験における r はフィルムの破壊現象に対する重要な評価法のひとつである。

3) この評価に当っては、i) r_M , r_T の個々の値が十分大きいか、ii) 割れの進行方向のかたより、などを単軸引張り試験の結果と合わせて考慮すべきである。

4) 低温での ϵ_T が大なるものほど r が減少しているという事実を認めるならば、現状としては ϵ_T , r とともに或る値以上に位する材料を使用することが無難と思われる。

5) ナイロンは今後改良が加えられ性能向上が行なわれれば、気球用フィルムとして使用されることが期待される。

1975年6月10日 材料部

参 考 文 献

- [1] ASTM D 1938 - 62 T
- [2] 河田, 橋本, 本堂, 奥原: ポリエチレン・フィルムの引裂き試験による物性評価, 大気球シンポジウム, 昭和49年度 ('74, 12/12), 11
- [3] 河田, 橋本, 本堂, 奥原: ポリエチレン皮膜の引裂き試験と単軸引張り試験の分析, 第5回宇宙航空材料シンポジウム ('75, 2/25), 13
- [4] 河田, 橋本, 本堂: 引裂きテストの破壊力学的解析について, 大気球シンポジウム, 昭和50年度 ('75, 12/18), 17