

高高度気球用2.8 μm 厚フィルムの開発

齋藤 芳隆¹・飯嶋 一征¹・井筒 直樹¹・川崎 朋実¹・
松坂 幸彦¹・並木 道義¹・鳥海道 彦¹・山上 隆正¹・
市村 晃司²・小林 勉³・松嶋 清穂⁴・中田 孝⁴

Development of A 2.8 μm Polyethylene Film For High Altitude Balloons

By

Yoshitaka SAITO, Issei IJIMA, Naoki IZUTSU, Tomomi KAWASAKI, Yukihiko MATSUZAKA,
Michiyoshi NAMIKI, Michihiko TORIUMI, Takamasa YAMAGAMI, Kouji ICHIMURA,
Tsutomu KOBAYASHI, Kiyoho MATSUSHIMA, and Takashi NAKADA

Abstract : Development of a balloon to fly at higher altitudes is one of the most attractive challenges in scientific balloon technologies. We have been engaged in the development of the high altitude balloon with a thin film since 1991. After reaching the highest record setting balloon altitude of 53.0 km using the film with a thickness of 3.4 μm and a width of 160 cm in 2002, we tried to make a thinner balloon film. In 2003, we developed a forming die and an air-ring and succeeded in forming a film with a thickness of 3.0 μm and a width of 220 cm. Using this film, we manufactured a balloon with a volume of 5,000 m^3 and succeeded in flying the balloon up to an altitude of 43.8 km. We then searched for a good combination of resins to make a thinner and wider film and obtained films with widths of 280 cm, and a thickness of 3.0 μm at first, and then 2.8 μm . In 2004, we performed balloon experiments making a 30,000 m^3 balloon with the 3.0 μm film and a 5,000 m^3 balloon with the 2.8 μm film. Both balloons were well manufactured and reached the highest altitudes of 50.7 km and 42.6 km, respectively.

概 要

より高い高度を飛翔する気球の開発は、気球が発明されて以来、最重要開発項目の一つである。我々は気球用フィルムを薄く軽くすることでより高い高度を飛翔する気球の開発を行っており、2002年には3.4 μm 厚、折径80 cmのフィルムを用いることで世界最高高度気球高度記録、53.0 kmを樹立している。2003年、成膜装置のダイスとエアerring部分の改良を行い、厚み

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部

²宇部興産株式会社

³柴田屋加工紙株式会社

⁴藤倉航装株式会社

3.0 μm 、折径110 cmのフィルムを製作した。このフィルムを用いて体積5,000 m^3 の気球を製作し、高度43.8 kmに到達させることに成功した。さらに、樹脂の密度を変更させ、より薄いフィルムに適した配合比を見つけだし、折径140 cm、厚さ3.0 μm および2.8 μm のフィルムを製作することができた。2004年、これらのフィルムを用いて、3.0 μm 厚フィルムで体積30,000 m^3 、2.8 μm 厚フィルムで体積5,000 m^3 の気球を製作し、気球実験を行った。これらの気球は、それぞれ、高度50.7 km、および、42.6 kmに到達し、今回製作したフィルムが気球用フィルムに適していたことを実証した。

重要語：科学観測用気球、高高度気球、超薄膜型ポリエチレンフィルム

1. はじめに

気球をより高い高度に到達させるためには、その皮膜をより薄く、軽くすることが本質的に重要である。宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部大気球観測センターでは1991年以来、気球皮膜をより薄くすることで気球到達高度を向上させる研究に取り組んできた。Raven社より5.8 μm 厚フィルムを購入し、順次、気球を大型化しつつ飛翔実験を行い、1997年には体積120,000 m^3 を用いて高度50.2 kmに到達するに至った[2]。この課程では大型気球の製作を簡便にする自走式熱接着機、軽量搭載機器、薄膜型高高度気球用放球装置などの開発も行ってきた。1998年からは宇部興産、柴田屋加工紙と協力して薄いフィルムの開発を開始し、メタロセン触媒により合成したポリエチレン樹脂を用いることで3.4 μm 厚、折径80 cmのフィルムの成膜に成功した。翌年よりこのフィルムを用いた気球を製作し、飛翔性能試験を重ねた[3][4]。2002年には、体積60,000 m^3 の気球を飛翔させ、高度53.0 kmに到達させることに成功している[5]。この高度は1972年に作られた気球到達最高高度51.8 kmを実に30年ぶりに更新したものであった。

我々は、2003年より、再度、フィルムの薄膜化に挑戦しはじめた。むろん、体積の大きな気球を製作すれば、より高い高度に到達させることは可能である。しかし、気球の到達可能高度はほぼ体積の対数に比例しており、少々、体積を大きくしたところで高度はさほどは向上しない。上記の体積60,000 m^3 の気球の長さは74 mにおよび、これは、三陸大気球観測所の全長160 mの半分に相当している。そこで、高高度を達成するために本質的に重要である、薄いフィルムの開発に立ち返ることにした。

我々は成膜装置の改良を行い、まず3.0 μm 厚、折径110 cmのフィルムの製作に成功し、それを用いた気球実験を行った。さらに、より薄くするために適した樹脂を探し、成膜装置も改良することで、折径140 cm、3.0 μm 厚および2.8 μm 厚のフィルムを製作することができ、これらを用いた気球飛翔実験を行った。本論文では、これらの装置の改良と製作されたフィルムの特性および新しいフィルムを用いた気球の飛翔実験について述べる。

2. 3.0 μm 厚フィルムの開発

我々は、1998年に薄膜型気球用フィルムの開発を始め、厚み3.4 μm 、折径80 cmのフィルムを開発した。この時にもフィルムをより薄くしようと試みたが3.4 μm が当時の限界であった。フィルムが薄くなるよう、フィルムの巻き取り速度を増したり、ダイスから樹脂を押し出すスリット幅を狭したりしてみたが、フィルムが立ち上がらなかつたり、時には縦方向に裂けてしまつたりして成膜を安定させることができなかつた。フィルムの冷却を詳細に制御できればフィルムの成膜を安定させられる可能性もあったが、成膜に用いていた装置は、元来、より厚い商用フィルムを製作する目的で設計されており、冷却の制御はさほど詳細にはできなかつた。また、気球を製作する上でフィルムの折径が80 cmと狭く、接着の手間がかかるのも問題であった。たとえば、Raven社の5.8 μm

厚フィルムは折径140 cmである。フィルムの幅を広くすることも試みたが、成膜に用いていたダイスの直径は30 cmであり、安定成膜ができたBlow Up Ratioが1.7程度であったことから、折径が80 cmに限られてしまっていた。

これらの問題を解決するため、我々は既存の成膜装置に取り付けられる直径40 cm、スリット幅2.5 mmのダイス、詳細な温度制御が可能なエアーリングを製作した。まず、エアーリングのみを交換し成膜を試みたところ、3.0 μm 厚、折径100 cmのフィルムを製作することができた。さらに、ダイスを交換することで3.0 μm 厚、折径110 cmのフィルムまで製作することができた。表1に、フィルムの引っ張り試験結果を示す。試験片は狭い部分が5 mm、長さ2.5 cmのダンベル型を用い、速度100 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ で引っ張り、応力ひずみ曲線を得ている。これらのフィルムの厚みは、マイクロメーターの分解能では評価できないため、面積あたりの重量を測定し、密度を0.920 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ と仮定して求めている。これらのフィルムは低温でも十分な伸びを示し、気球フィルムとして問題ないことがわかった。なお、強度-伸び曲線、最大強度と最大伸びの温度依存性は補遺に示した。

表1 3.0 μm 厚フィルムの引っ張り試験特性

厚み (μm)	折径 (cm)	最大強度 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)		最大伸び (%)	
		MD	TD	MD	TD
25°C					
3.4	80	410 \pm 40	370 \pm 30	520 \pm 50	960 \pm 60
3.0	100	370 \pm 40	360 \pm 20	660 \pm 30	900 \pm 40
3.0	110	270 \pm 60	210 \pm 10	550 \pm 80	780 \pm 30
-40°C					
3.4	80	610 \pm 80	460 \pm 20	330 \pm 30	570 \pm 30
3.0	100	450 \pm 40	410 \pm 20	360 \pm 30	500 \pm 30
3.0	110	580 \pm 60	450 \pm 40	450 \pm 30	460 \pm 70
-80°C					
3.4	80	690 \pm 50	640 \pm 70	220 \pm 20	380 \pm 30
3.0	100	460 \pm 30	420 \pm 40	170 \pm 50	150 \pm 50
3.0	110	460 \pm 20	310 \pm 30	150 \pm 20	140 \pm 40

3. 3 μm 厚フィルムを用いた5,000 m^3 気球実験

2003年、我々は3.0 μm 厚、折径110 cmのフィルムを用いて体積5,000 m^3 の気球を製作した。従来の3.4 μm フィルムで製作した場合と比較すると、気球のパネル数は48枚から42枚へ減少し、重量も6.82 kgから6.10 kgへ減少した。気球製作の信頼性は、接着部の信頼性に大きく依存しており、パネル数の減少により接着線の長さを減少したことは、信頼性の向上にもつながっている。

2003年9月18日、この気球を用いて、三陸大気球観測所にて飛翔試験を行った。図1に飛翔構成を示す。この気球は気球底に排気口をつけていたが、より安全に気球を破壊するため、排気口は縛った後に飛翔させている。測距装置を搭載し、これにより飛翔位置、高度を測定した。気球へのガス注入は新組立室内で行い、ガスが完全に注入された後、屋外に持ち出し、ダイナミック放球法により放球した。図2に高度曲線を示す。従来の薄膜型高高度気球と同様に上昇速度が当初の260 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ から順次増加し、最後には350 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ となり、高度43.8 kmまで到達した。おそらく、ここで気球が破裂し下部に小さな穴があったものと思われ、以後、気球は降下した。この実験により、本フィルムが気球用として実用に耐えることがわかった。

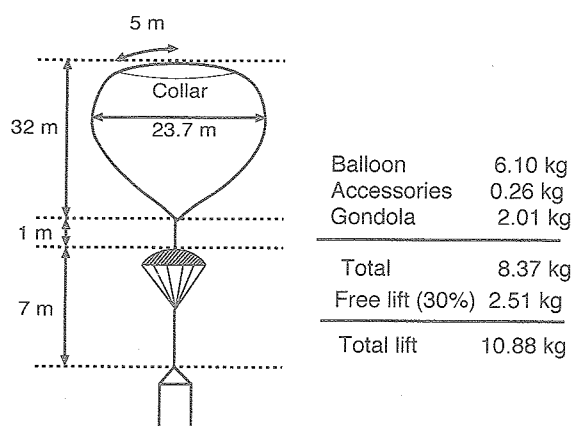


図1 3.0 μm 厚、折径110 cmフィルムによる
体積5,000 m^3 気球の飛翔構成

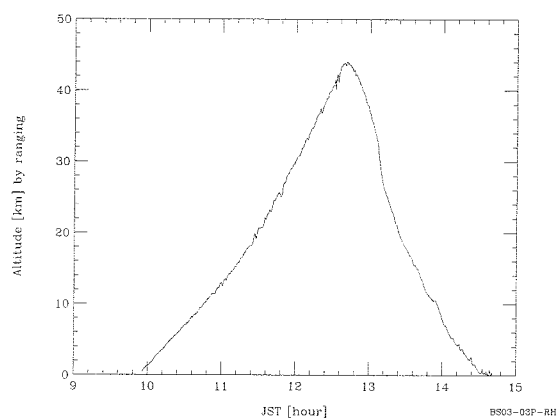


図2 3.0 μm 厚、折径110 cmフィルムによる
体積5,000 m^3 気球の高度曲線.

4. 2.8 μm 厚フィルムの開発

我々は、さらに薄いフィルムを製作するため、Blow Up Ratioを大きくすること、よりよい樹脂の配合を調べることで、二点の改良を行った。今回製作したフィルムの折径が110 cmであったのは、Blow Up Ratioで制限されているのではなく、フィルムの巻き取り機の幅が120 cmであったことによるものであった。そこで、巻き取り機の幅が150 cmの成膜装置を用い、宇部スーパーポリエチレンUMERITの異なる密度の樹脂の配合をいくつか試して、薄膜フィルムに適した配合を探した。表2に樹脂の配合比と製作されたフィルムの厚み、幅をまとめた。表にあるように最終的には2.8 μm 厚、折径140 cmのフィルムを製作することができた。なお、強度-伸び曲線、最大強度と最大伸びの温度依存性は補遺に示した。

表2 気球フィルム番号と樹脂の配合

フィルム番号	バッチ名	樹脂の混合比					厚み [μm]	折径 [cm]
		520F ^{a)}	2525F ^{b)}	3520F ^{c)}	43039M ^{d)}	53021M ^{e)}		
No.9	ZM056	46.5%	46.5%	0%	7%	0%	3.0	140
No.10	EX3392	47.0%	47.0%	0%	0%	6%	3.0	140
No.11	EX3469	0%	94.0%	0%	0%	6%	3.0	140
No.12	EX3470	0%	0%	94.0%	0%	6%	3.0	140
No.13	EX3469	0%	94.0%	0%	0%	6%	2.8	140
No.14	EX3470	0%	0%	94.0%	0%	6%	2.8	140
No.1	ZM056	46.5%	46.5%	0%	7%	0%	3.4	80
No.4	EX3392	47.0%	47.0%	0%	0%	6%	3.0	100
No.5	ZM056	46.5%	46.5%	0%	7%	0%	3.0	110

a) UMERIT密度0.913 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の樹脂。

b) UMERIT密度0.926 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の樹脂。

c) UMERIT密度0.931 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ の樹脂。

d) 宇部興産のスリップ剤。ベースポリマーはULTZEXで重量比3%のエルカ酸アミドを含む。

e) 宇部興産のスリップ剤。ベースポリマーはUMERITで重量比3%のエルカ酸アミドと2%のエチレンビスオレイン酸を含む。

3.0 μm のフィルムにて製作の難易度を比較するとNo.11が最も容易であり、容易な順に並べるとNo.10, No.9, No.12の順であった。No.12の場合、成膜は不安定であり、時に縦方向に裂けてしまうことがあった。No.9も縦方向に裂けてしまうことがあり、多くのフィッシュアイが生じてしまっている。そこでNo.11とNo.12の配合にて、より薄いフィルムの成膜に挑戦しNo.13, No.14の2.8 μm 厚フィルムを得た。製作はNo.13の方がNo.14より容易であった。

表3に、これらの3.0 μm 厚, 2.8 μm 厚フィルムの引っ張り試験結果を示す。強度-伸び曲線, 最大強度と最大伸びの温度依存性は補遺に示した。これらのフィルムは低温でも伸びを示し、気球用フィルムとして十分な特性を持っている。気球の製作にあたっては成膜が最も容易であったNo.11とNo.13の配合を用いることとした。

5. 2004年の気球実験

2004年の気球実験にあたり、我々は二つの気球を製作した。一つは2.8 μm 厚, 折径140 cmのフィルムで製作した体積5,000 m^3 の気球 (BVT5-1), もう一つは3.0 μm 厚, 折径140 cmのフィルムで製作した体積30,000 m^3 の気球 (BV30-2) である。表4に体積5,000 m^3 の気球の諸元の比較を示す。

気球実験終了時に確実に気球を破壊するため、我々は、錘を用いた破壊方式を開発した。この錘は気球頭部および引き裂きパネルへと紐で結ばれており、通常は気球頭部のガス注入口にカッターを通した紐で固定されている。気球破壊時には、固定している紐をカッターで切断し、引き裂きパネルを引き裂く。従来、高高度気球でも通常の気球と同様に搭載機器の落下衝撃を利用してパネルの引き裂きを行ってきた。しかし、高高度気球の場合、

表3 3.0 μm 厚と2.8 μm 厚フィルムの引っ張り試験特性

フィルム番号	最大強度 ($\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$)		最大伸び (%)	
	MD	TD	MD	TD
25°C				
No.9	360±10	280±10	540±20	770±40
No.10	310±40	240±20	450±40	840±30
No.11	360±20	270±10	570±20	720±30
No.12	290±30	240±20	550±40	690±40
No.13	340±20	250±20	610±20	790±20
No.14	330±20	250±20	560±20	770±30
-40°C				
No.9	430±30	350±40	290±20	370±50
No.10	500±30	470±30	380±20	540±40
No.11	420±20	310±20	360±20	310±40
No.12	410±30	330±30	330±20	380±60
No.13	440±10	440±30	400±10	460±70
No.14	500±40	320±20	350±20	300±40
-80°C				
No.9	610±40	630±50	200±30	160±30
No.10	490±40	500±40	140±30	140±20
No.11	490±40	520±60	230±60	230±30
No.12	700±30	490±30	250±10	150±30
No.13	660±40	460±20	230±20	210±30
No.14	570±50	420±20	240±20	150±30

通常、搭載重量が数kgと軽いため、気球下部のフィルムと引き裂き紐との摩擦の影響によっては引き裂けない可能性があるという問題があった。今回、開発した方法はこの問題を解消している。さらに、気球と搭載機器を分離しないため、気球に搭載機器の重量がかかっており、生じた穴からガスが放出されやすいこと、搭載機器と同一の場所に気球が降下するため、気球の回収が容易であるというメリットもある。詳しくは補遺に示した。

2004年5月22日、三陸大気球観測所より2.8 μ mフィルムで製作したBVT5-1気球の飛翔実験を行った。図3に気球の飛翔構成を示す。気球が膨張し破壊される様子を撮影するためITVカメラを搭載し、飛翔位置、高度を測定するためGPS受信機および測距装置を搭載した。気球へのガス注入は新組立室にて行い、ガス注入後に屋外に出し、ダイナミック放球法にて放球した。図4に気球の高度曲線を示す。最初、上昇速度は210 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ であり、徐々に加速して最終的には350 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ となり高度42.6 kmに到達した。図5に示すように、気球は下部が破裂したため、気球破壊コマンドを送信し、錘でパネルを引き裂き、気球を破壊した。

表4 体積5,000 m^3 の気球の比較

フィルム製作会社	柴田屋加工紙		Raven Industries Ltd.	
フィルム名		UMERIT		StratoFilm
フィルム厚	2.8 μ m	3.0 μ m	3.4 μ m	5.8 μ m
フィルム折径	40 cm	110 cm	80 cm	140 cm
気球製作会社			藤倉航装	
気球名	BVT5-1	BV5-1	BT'5-5	BT5-31
パネル数	28	42	48	28
直径	23.3 m	23.7 m	22.9 m	23.7 m
全長	32.8 m	32.8 m	33.1 m	32.3 m
重量	5.70 kg	6.10 kg	6.82 kg	12.14 kg
ガス注入口	20 \times 1	20 \times 1	20 \times 1	20 \times 1
排気口	なし	1	なし	なし

もう一方の3 μ m厚フィルムを用いた体積30,000 m^3 の気球 (BV30-2) は2004年5月22日に三陸大気球観測所にて飛翔実験を行った。図6に飛翔構成を示す。こちらにもITVカメラを搭載し、気球の膨張と破壊をモニターした。気球の飛翔位置と高度はGPS受信機および測距装置を用いて測定した。この気球は大きいため、気球へのガス注入は屋外で行い、エアバックを用いた放球装置で気球を保持し、ダイナミック放球法にて放球した。気球は当初、速度230 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ で上昇し、最終的には390 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ まで速度を上げ、高度50.7 kmに達した (図4)。気球は図5に示すように下部が破裂したため、気球破壊コマンドを送信し、錘でパネルを引き裂いた。我々は1997年に5.8 μ m厚フィルムを用いて高度50.2 kmに到達しているが、この気球の体積は120,000 m^3 である。実に1/4の体積で同様の高度に到達しており [2]、薄いフィルムを開発した成果が着実にあがっていることがわかる。

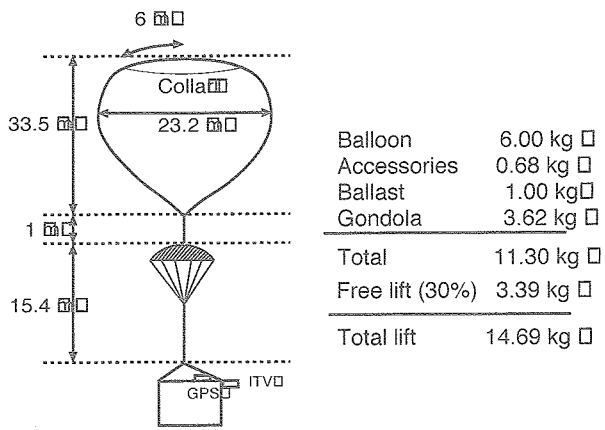


図3 BVT5-1気球の飛翔構成.

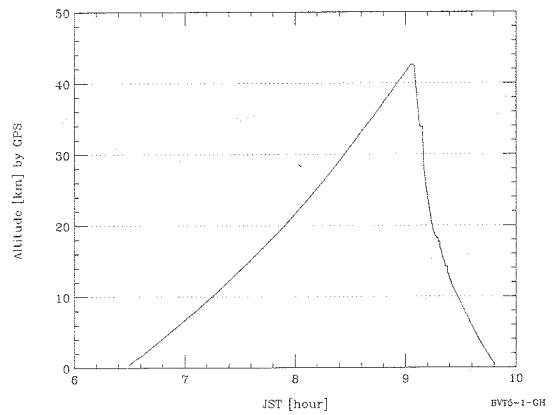


図4 BVT5-1気球の高度曲線.

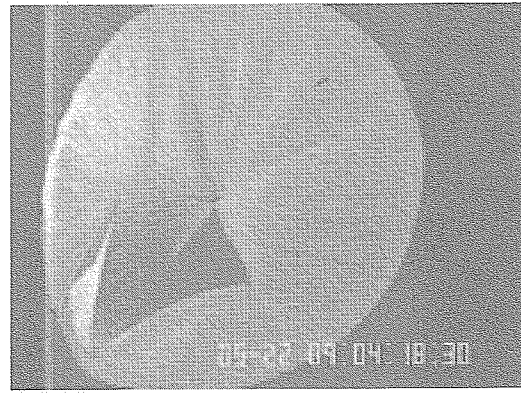
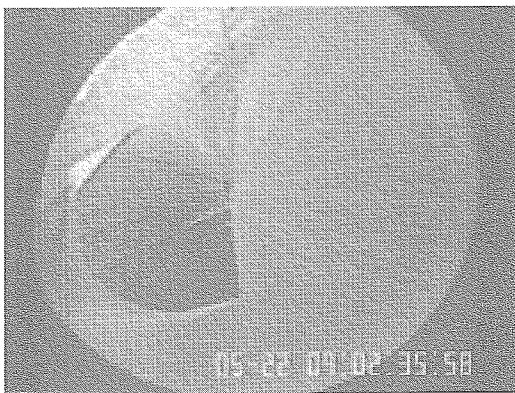
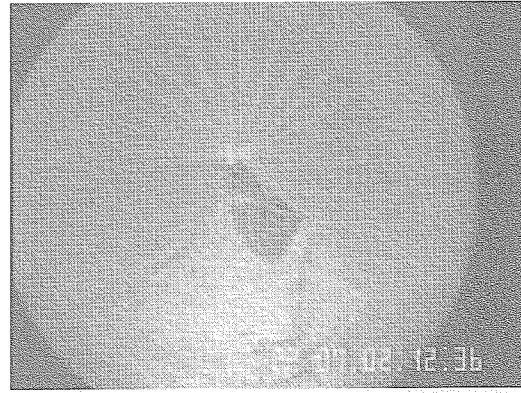
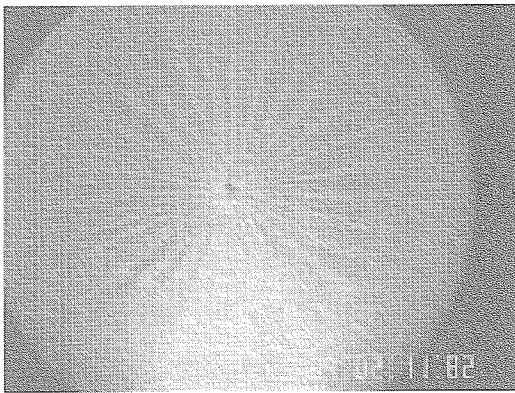


図5 BVT5-1気球の満膨張と破壊の様子.

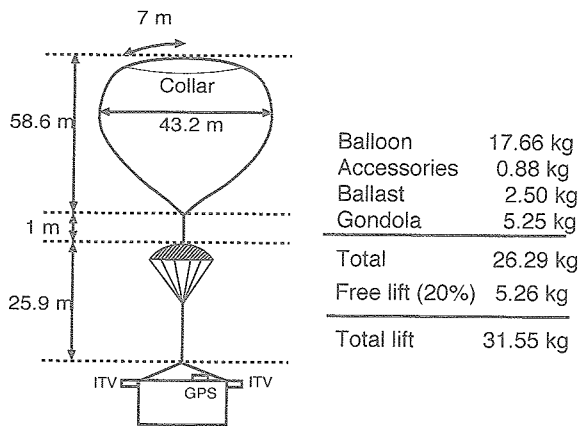


図6 BV30-2気球の飛翔構成.

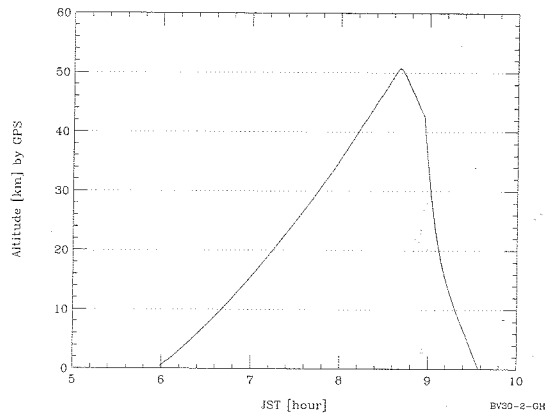


図7 BV30-2気球の高度曲線.

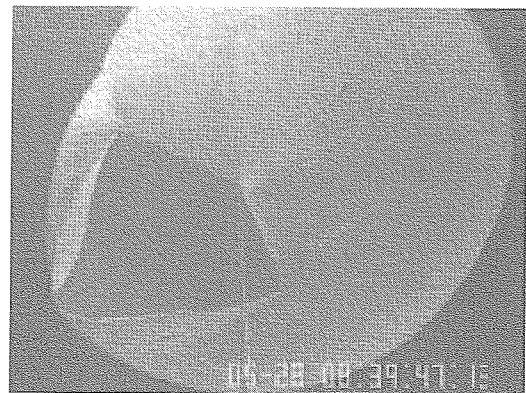
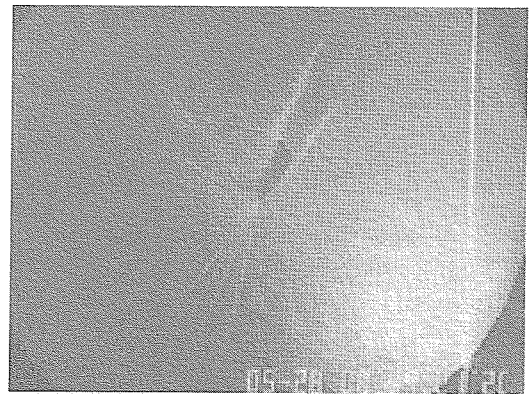


図8 BV30-2気球の満膨張と破壊の様子.

6. まとめ

3.4 μm 厚フィルムを用いた気球により世界最高気球高度53.0 kmに到達した後、2003年より我々はフィルムをより薄くする改良を再開した。既存の装置に取り付けられるような直径40 cm、スリット幅2.5 mmのダイスおよびインフレーション時に、より詳細な温度制御ができるエアリングを製作した。これらの装置を用いて、薄いフィルムの製作に挑戦したところ、厚み3.0 μm 、折径110 cmのフィルムを製作することができた。このフィルムは気球用として十分な特性を持っており、このフィルムを用いて製作した体積5,000 m^3 の気球は高度43.8 kmまで上昇させることができた。この後、より薄いフィルム製作に適した樹脂の配合を探し、Blow Up Ratioを大きくする改良を加え、現在のところ、厚み2.8 μm 、折径140 cmのフィルムまで製作できるようになった。2004年、このフィルムを用いた体積5,000 m^3 の気球と、厚み3.0 μm 、折径140 cmのフィルムを用いた体積30,000 m^3 の気球の気球を製作し、飛翔試験を行った。いずれの気球も順調に上昇し、それぞれ、高度42.6 km、50.7 kmまで到達させることができた。日本の気球は1997年に膜厚5.8 μm で体積120,000 m^3 で初めて高度50 kmに到達したが、現在では1/4の体積の気球で50 kmに到達することができるようになり、フィルムの薄膜化の成果は着実にあがっている。

今後、2.8 μm のフィルムを用いて大型の気球を製作し、再度、世界最高気球高度記録の更新に挑戦する所存である。

謝 辞

気球フィルムの薄膜化は、ISAS/JAXAと宇部興産、柴田屋加工紙の共同研究によるものであり、気球の製作は藤倉航装が行っている。本研究の成功は、それぞれの会社の技術者の努力の賜であり、ここに多大な感謝を申し上げる。本研究にあたり必要とされた費用の一部は、文部科学省の科学技術研究費 (No. 14205142) により助成されている。

[1]西村 純, 他, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第10巻, 第1号, 89, 1974

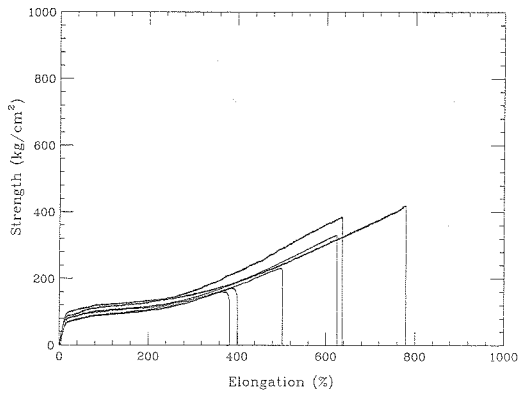
[2]松坂 幸彦, 他, 宇宙科学研究所報告特集第37号, 1, 1998

[3]斎藤 芳隆, 他, 宇宙科学研究所報告特集第40号, 1, 2000

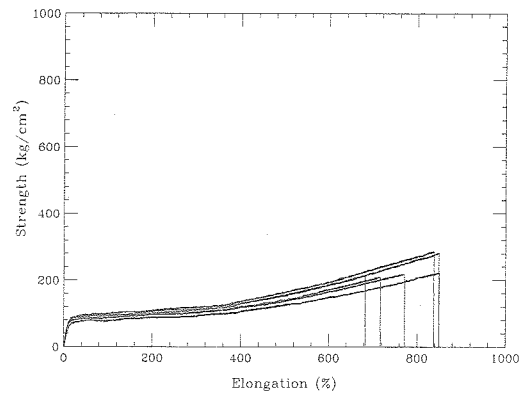
[4]斎藤 芳隆, 他, 宇宙科学研究所報告特集第44号, 17, 2002

[5]斎藤 芳隆, 他, 宇宙科学研究所報告特集第45号, 1, 2003

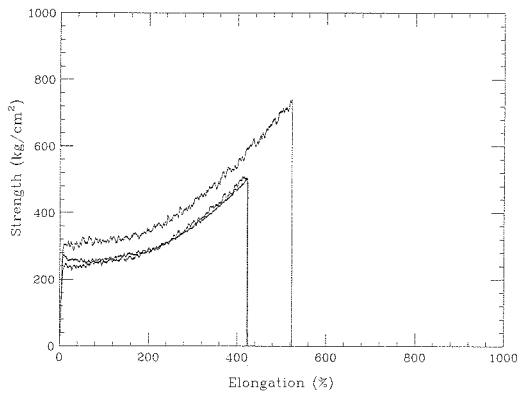
A 薄膜型フィルムの強度-伸び曲線



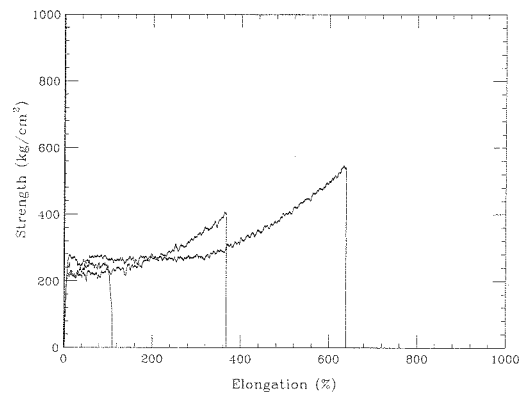
a) MD 25°C



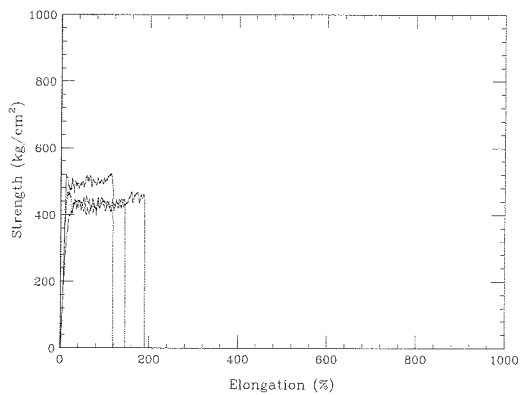
b) TD 25°C



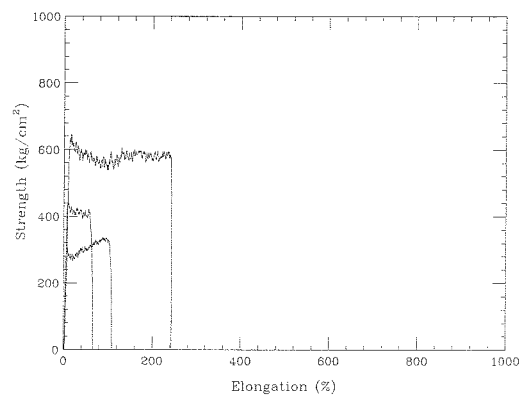
c) MD -40°C



d) TD -40°C

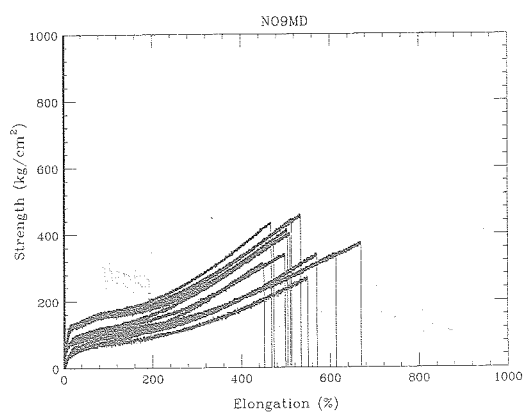


e) MD -80°C

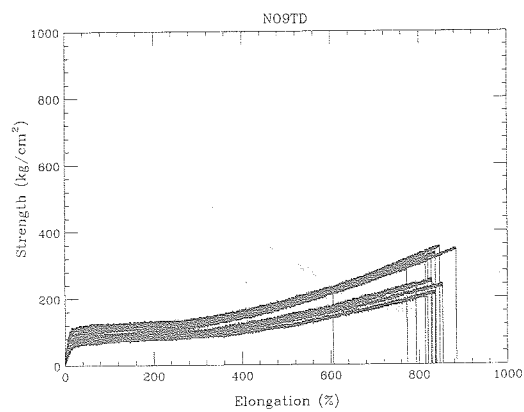


f) TD -80°C

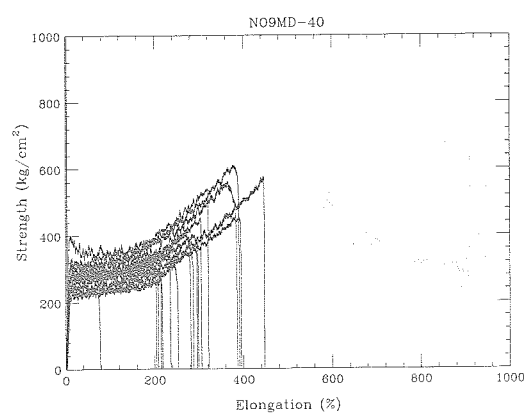
図9 3 μ m厚, 折径110 cmフィルムの強度-伸び曲線.



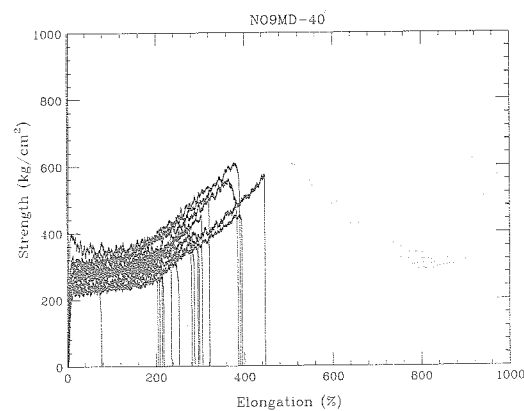
a) MD 25°C



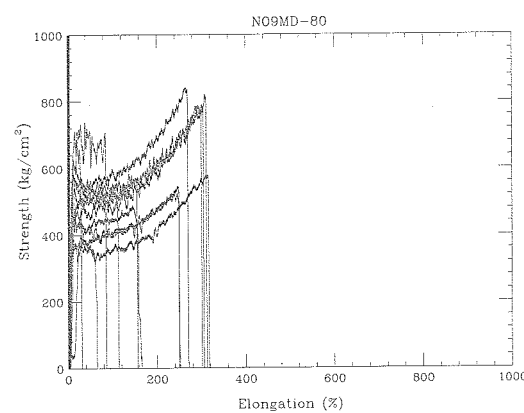
b) TD 25°C



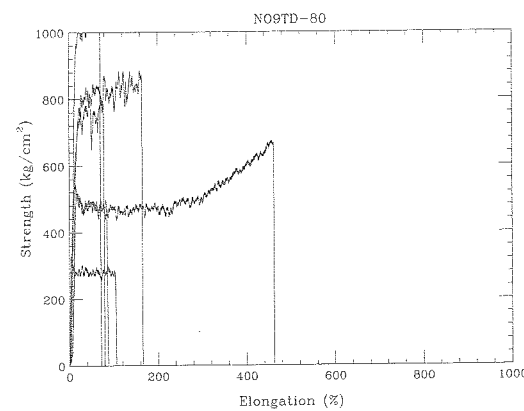
c) MD -40°C



d) TD -40°C



e) MD -80°C



f) TD -80°C

図10 No.9 フィルムの強度-伸び曲線.

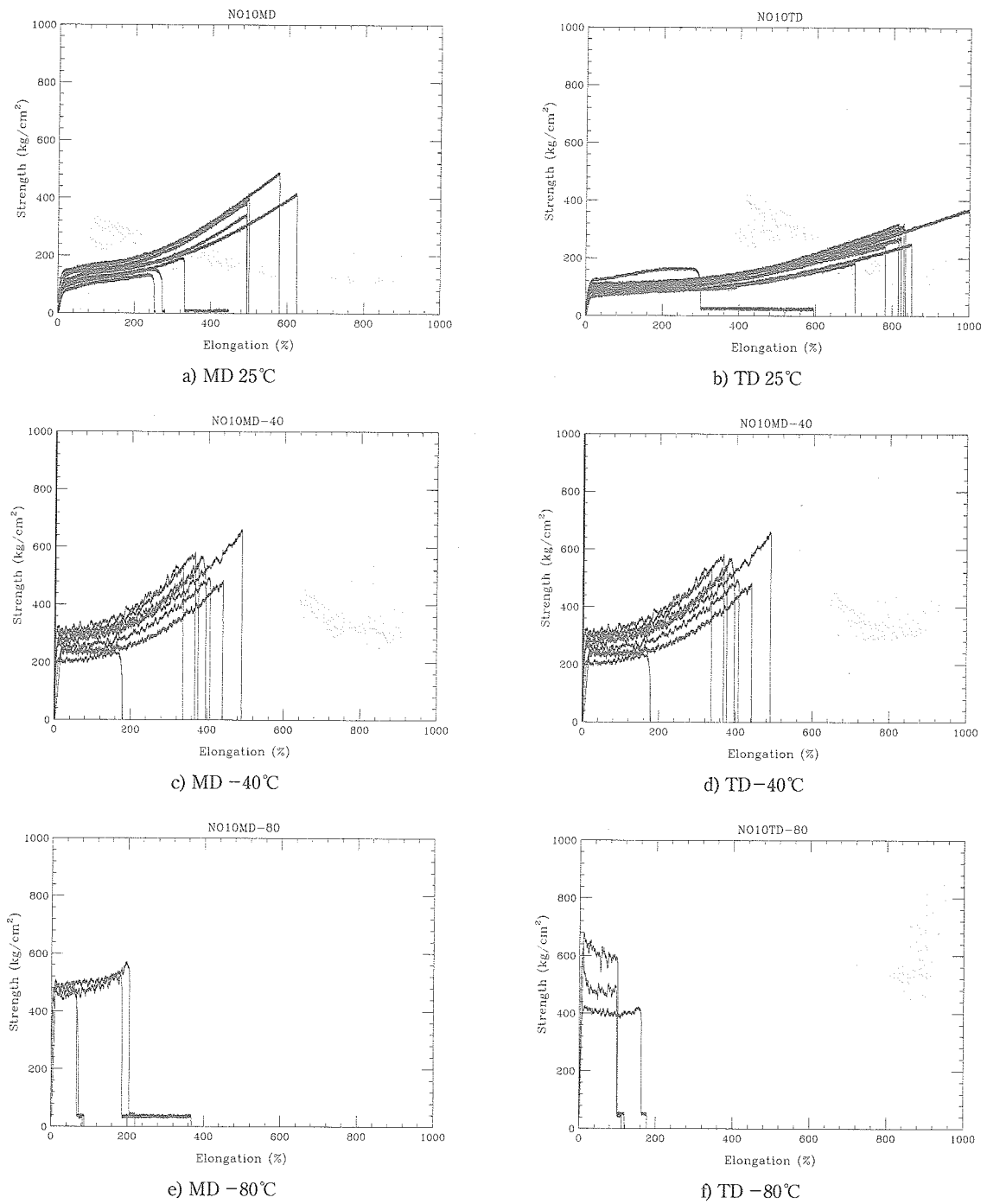
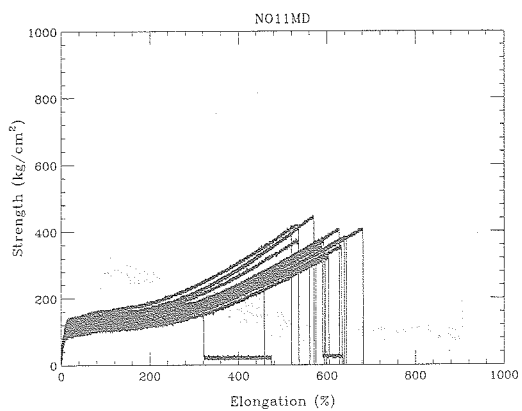
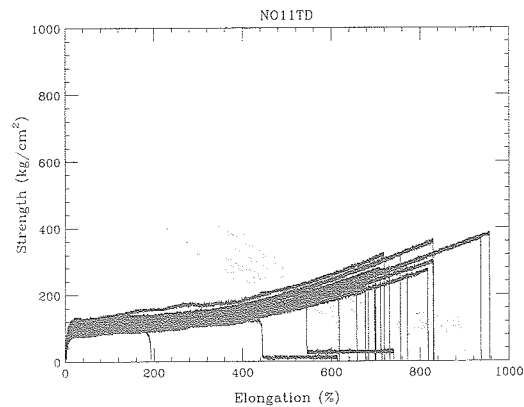


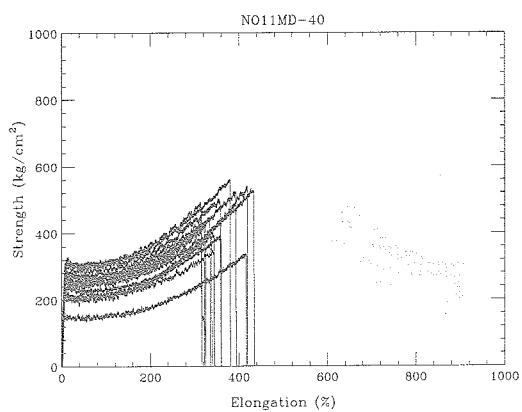
図11 No.10 フィルムの強度-伸び曲線.



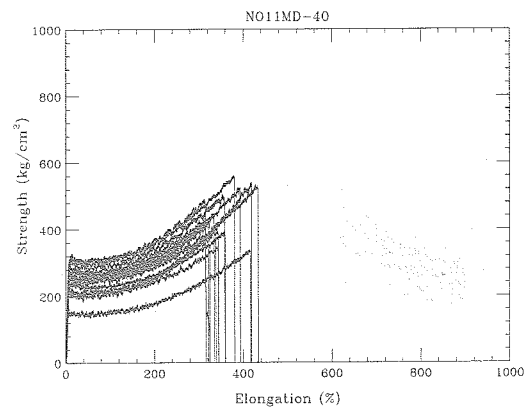
a) MD 25°C



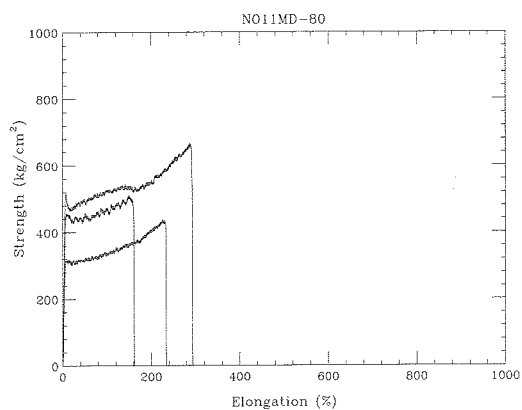
b) TD 25°C



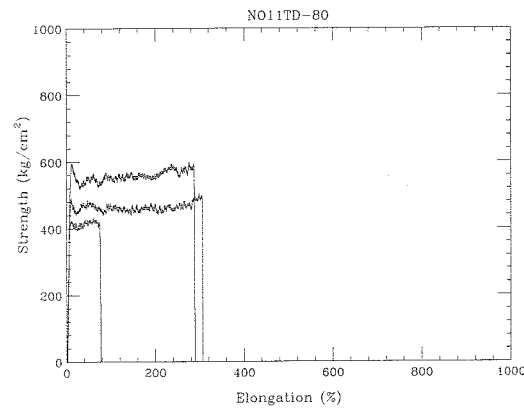
c) MD -40°C



d) TD -40°C



e) MD -80°C



f) TD -80°C

図12 No.11 フィルムの強度-伸び曲線.

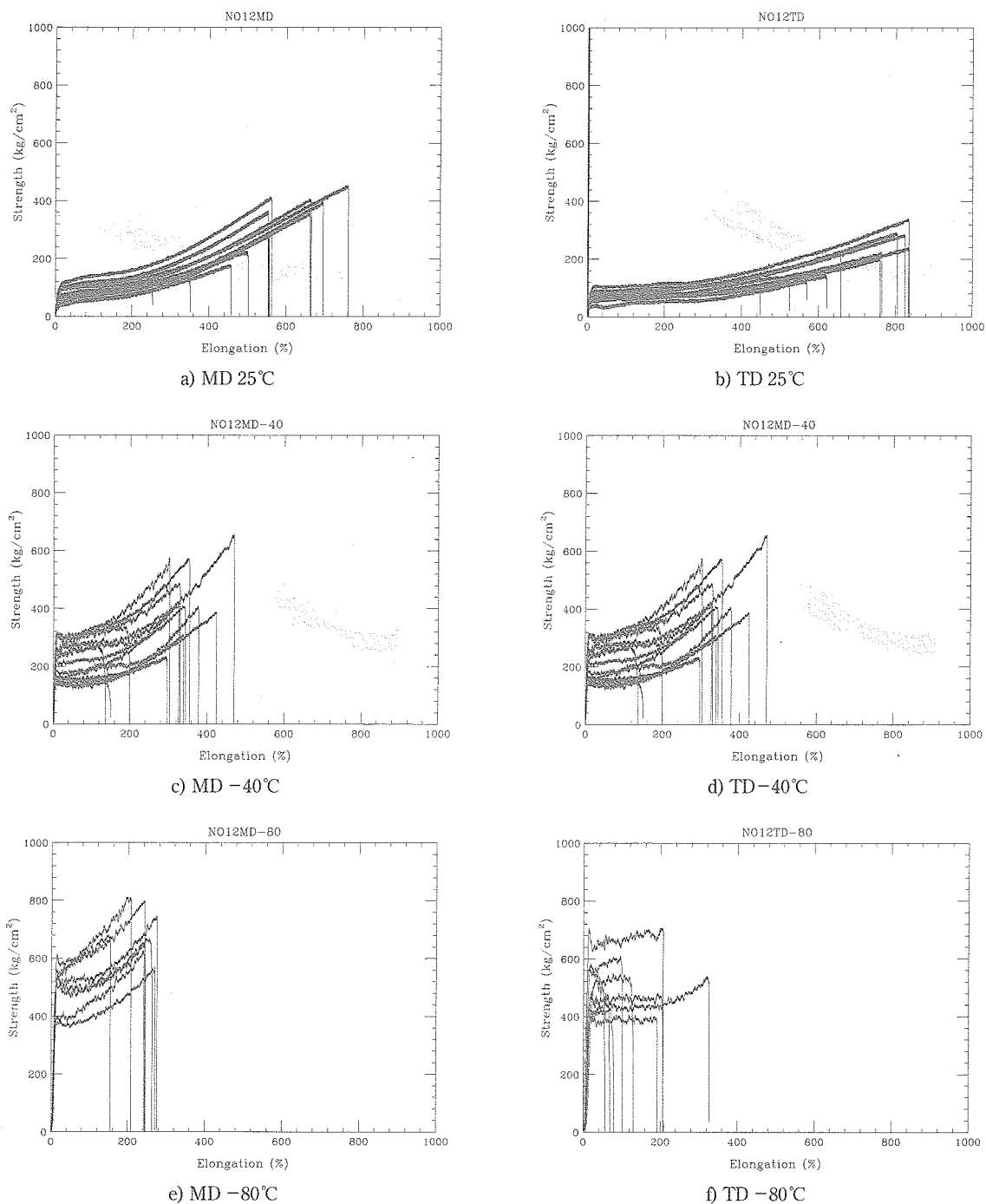
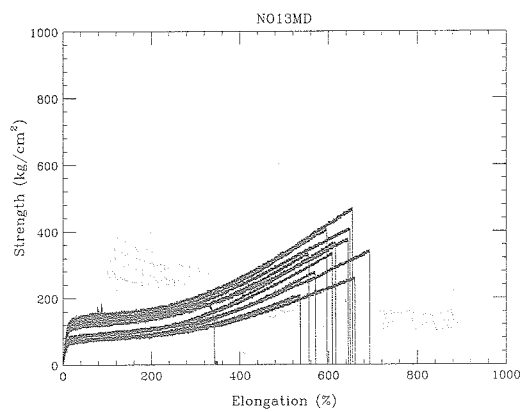
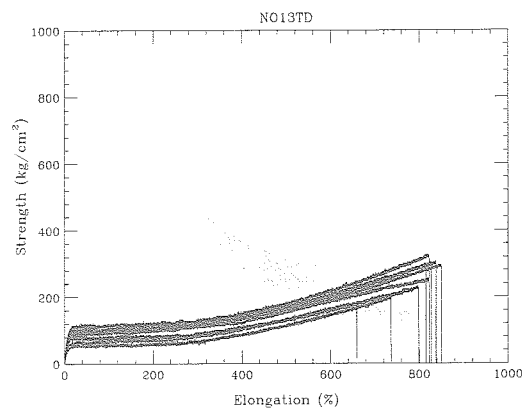


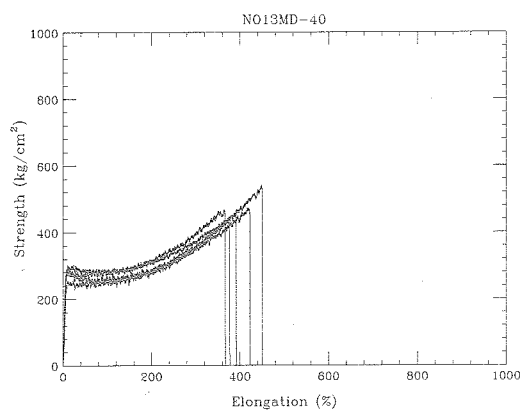
図13 No.12 フィルムの強度-伸び曲線。



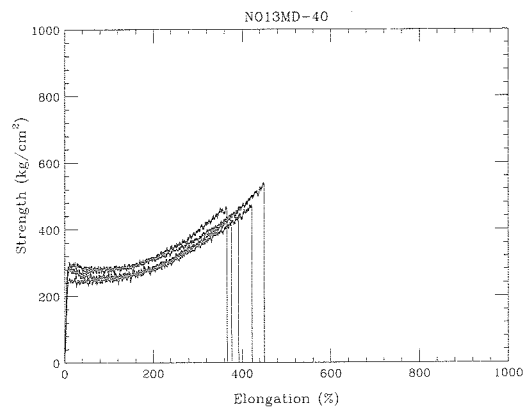
a) MD 25°C



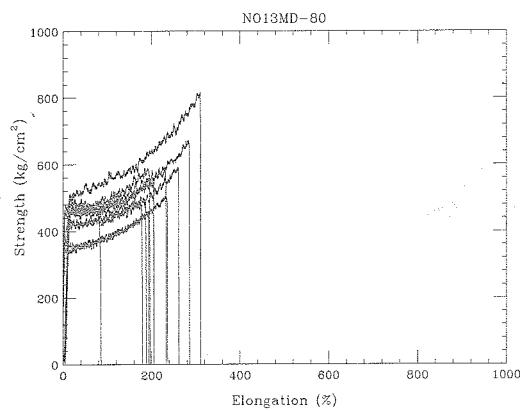
b) TD 25°C



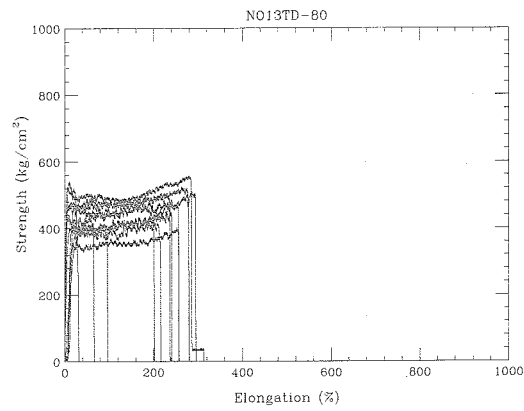
c) MD -40°C



d) TD -40°C

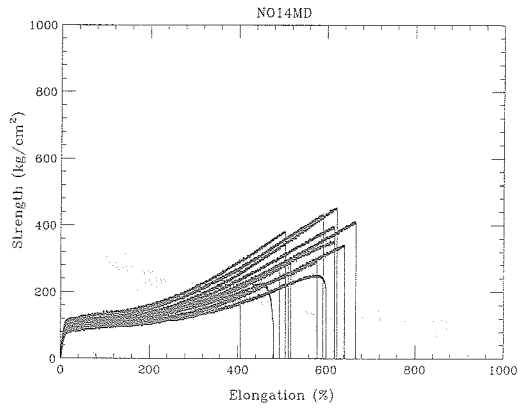


e) MD -80°C

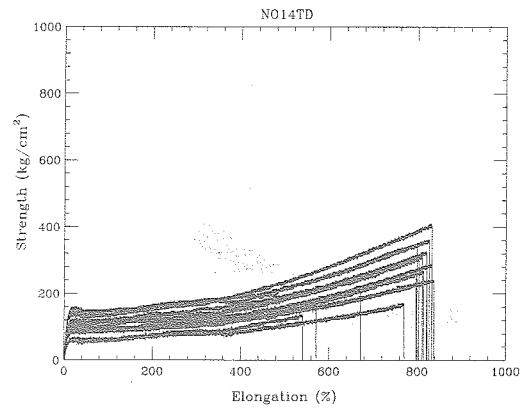


f) TD -80°C

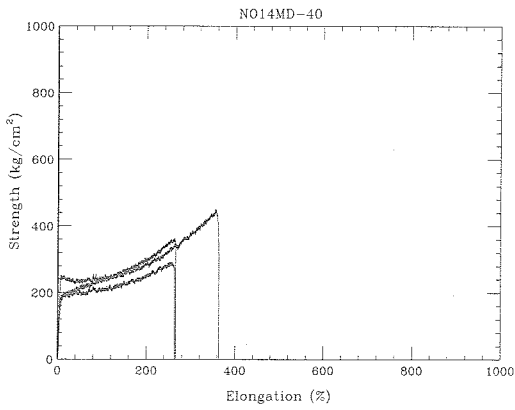
図14 No.13 フィルムの強度-伸び曲線.



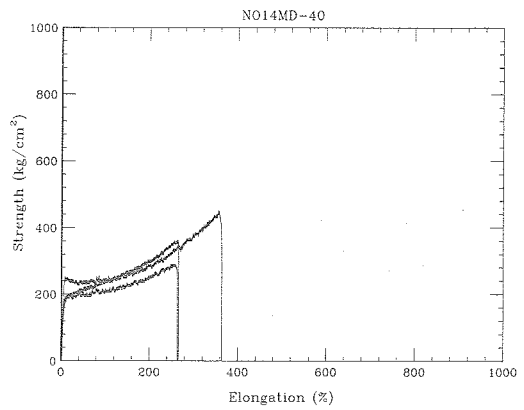
a) MD 25°C



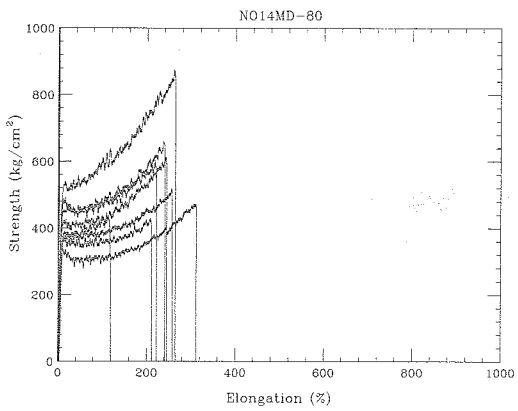
b) TD 25°C



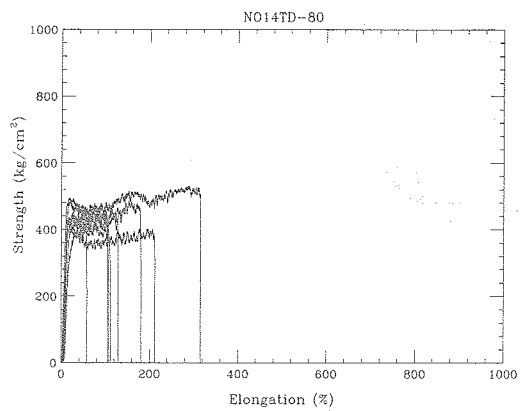
c) MD -40°C



d) TD -40°C



e) MD -80°C



f) TD -80°C

図15 No.14 フィルムの強度-伸び曲線.

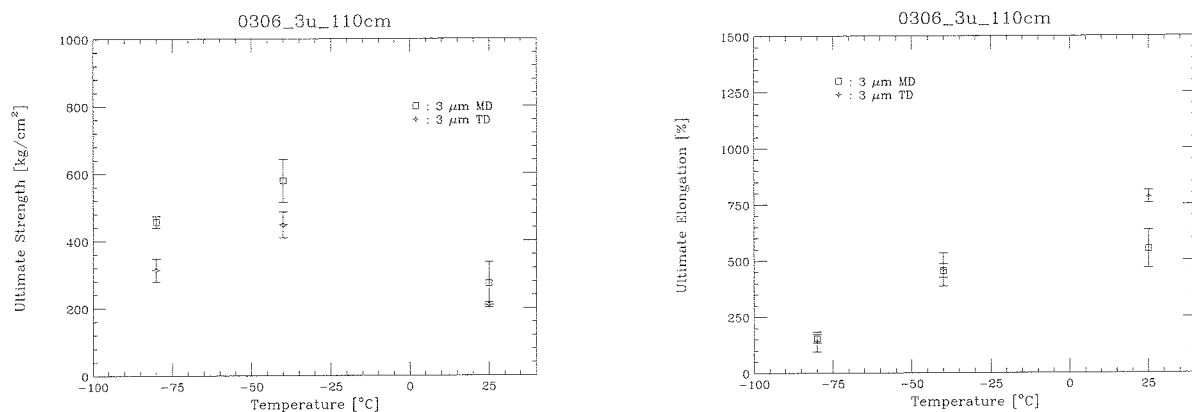


図16 3 μm厚、折径110 cmフィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

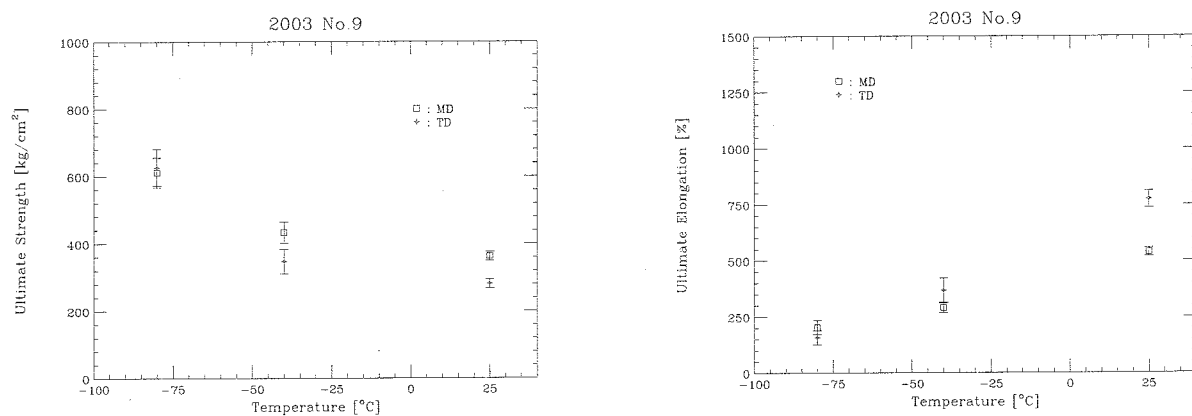


図17 No.9フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

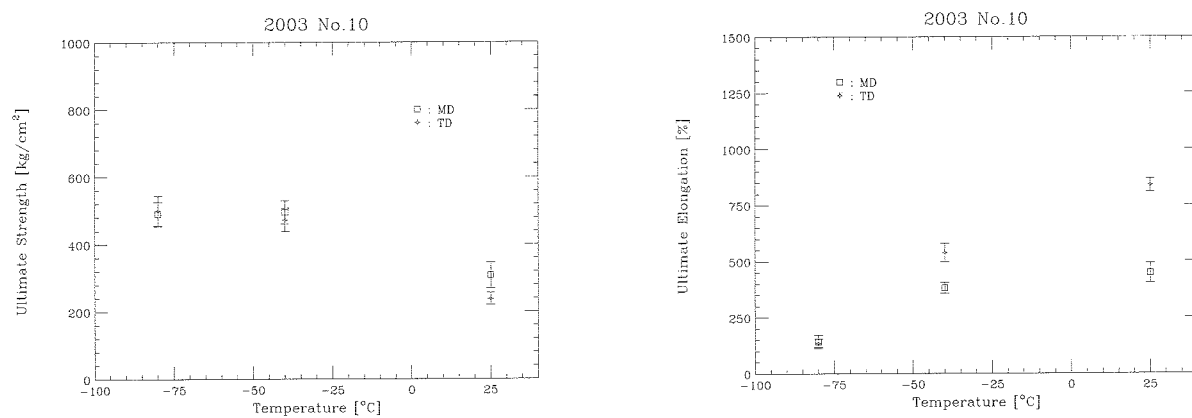


図18 No.10フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

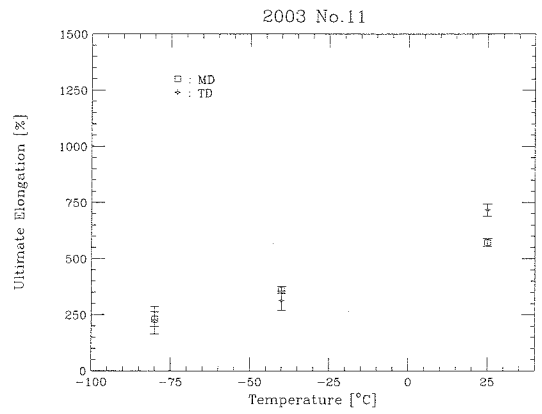
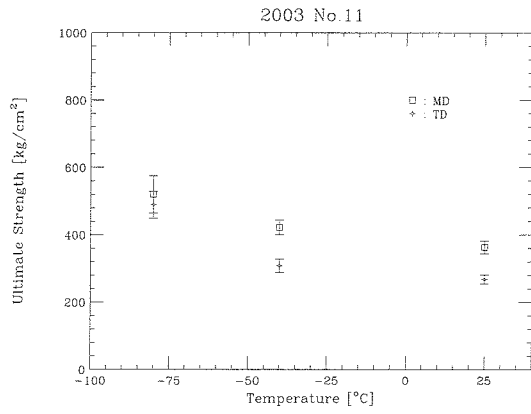


図19 No.11フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

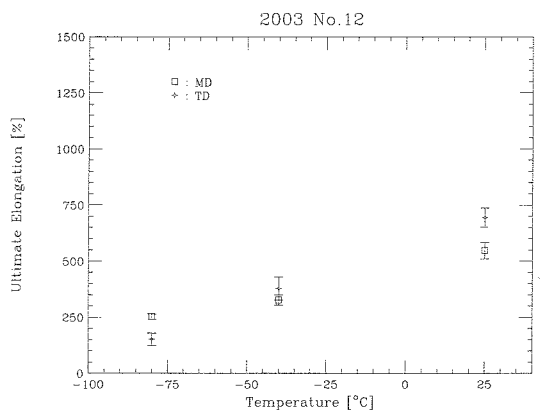
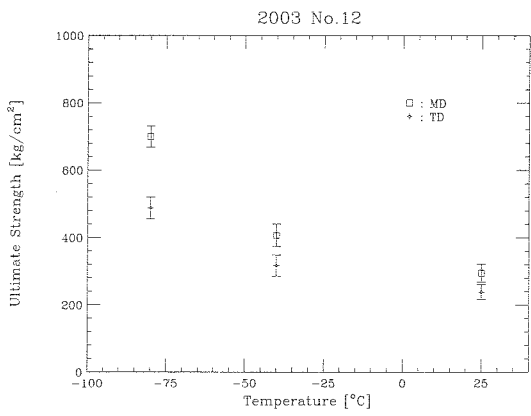


図20 No.12フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

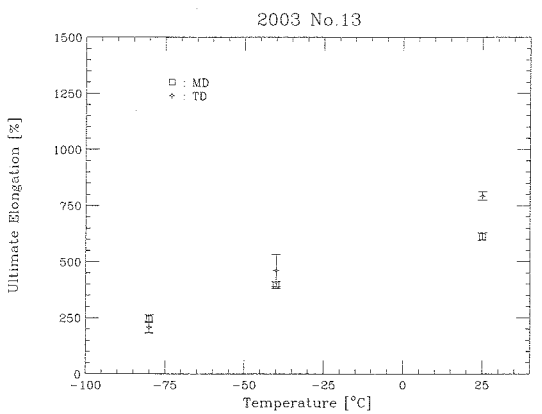
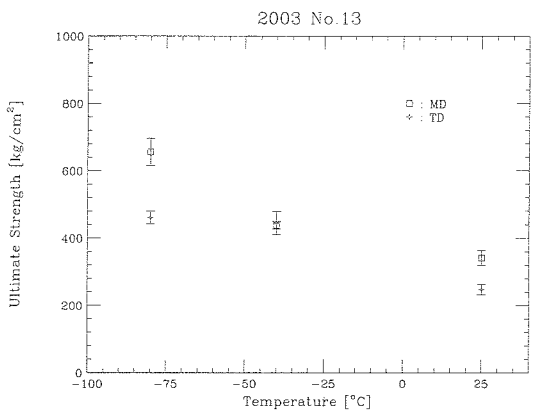


図21 No.13フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

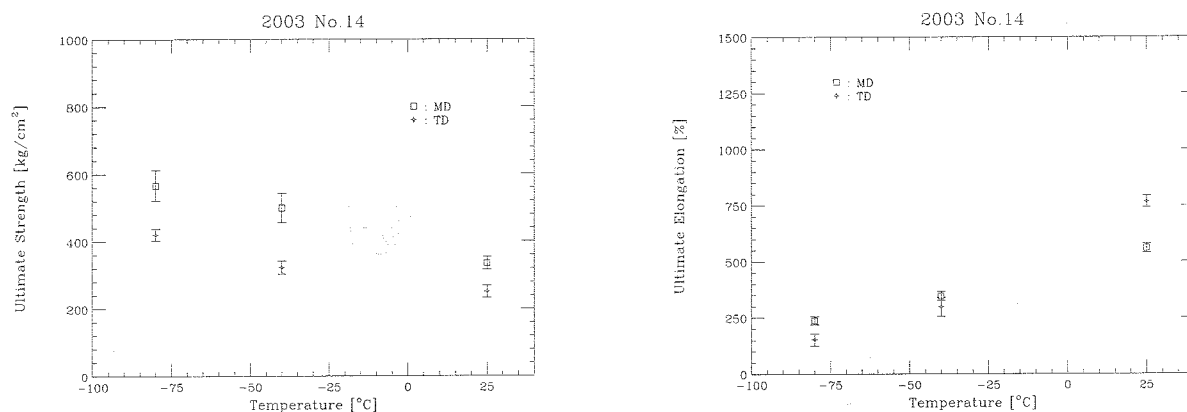


図22 No.14フィルムの最大強度，最大伸びと温度の関係。

B 錘を用いた薄膜型高高度気球破壊機構

気球による観測が終了した後，気球から切り離した観測器の落下を利用して気球フィルムの一部を引き裂き，気球実験を終了させている（図23左）。しかし，搭載機器の重量の小さい薄膜型高高度気球の場合，この方式を用いると，気球下部と引き裂き紐との摩擦や，紐の絡まり等により十分な力が得られず，フィルムを引き裂けない可能性もあった。このため，気球頭部に錘をとりつけ，その落下を利用してフィルムを引き裂く新しい方法を開発した（図23右）。

- この方式の特徴は，以下の通りである。
- 錘の落下を妨げる抵抗がないため，落下のエネルギーがすべて気球フィルムの引き裂くエネルギーとして利用できる。
- 気球の形状に依存せず，上昇中でも利用できる。
- 引き裂き終了後，通常観測器は気球に吊り下がった状態であるため，ヘリウムガスの流出速度が速くなり気球の降下は早い。
- 気球と観測装置が分離しないため，気球を回収するのが容易である。
- 反面，錘の重量が増加し，錘切り離し用のカッター線が気球頭部まで必要である。

錘は，気球頭部の気球フィルムをまとめているプラスチックのリングに取り付けられている。このリングは，ガス注入口を固定するために用いられており，直径7.5 cm，高さ5.0 cmの大きさがある。錘はこのリングの内側にカッターを通した紐で固定した。錘の材質はスペースの都合から，比重の大きい鉛を用いている。図24にリングへ取り付けした状態の写真を示した。現在は気球破壊には従来方式と錘方式を併用している。

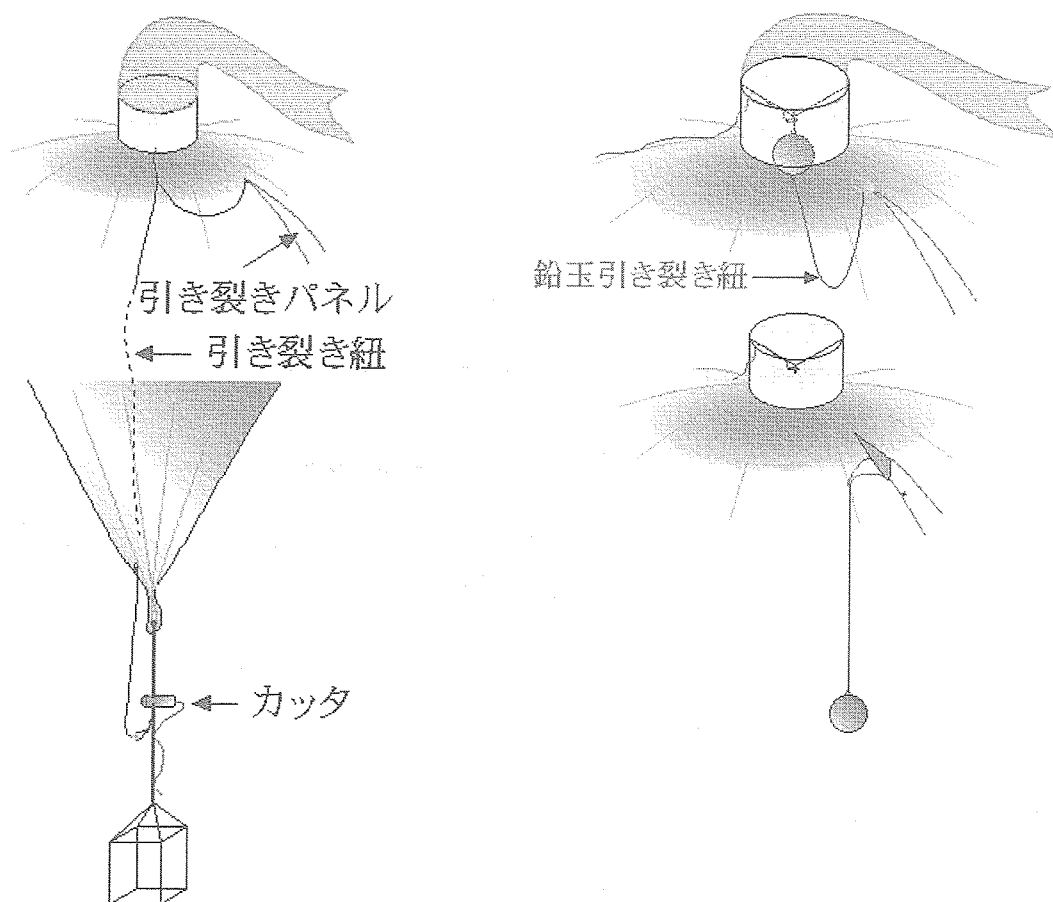


図23 従来の破壊方式（左）と錘を用いた破壊方式（右）の概念図。

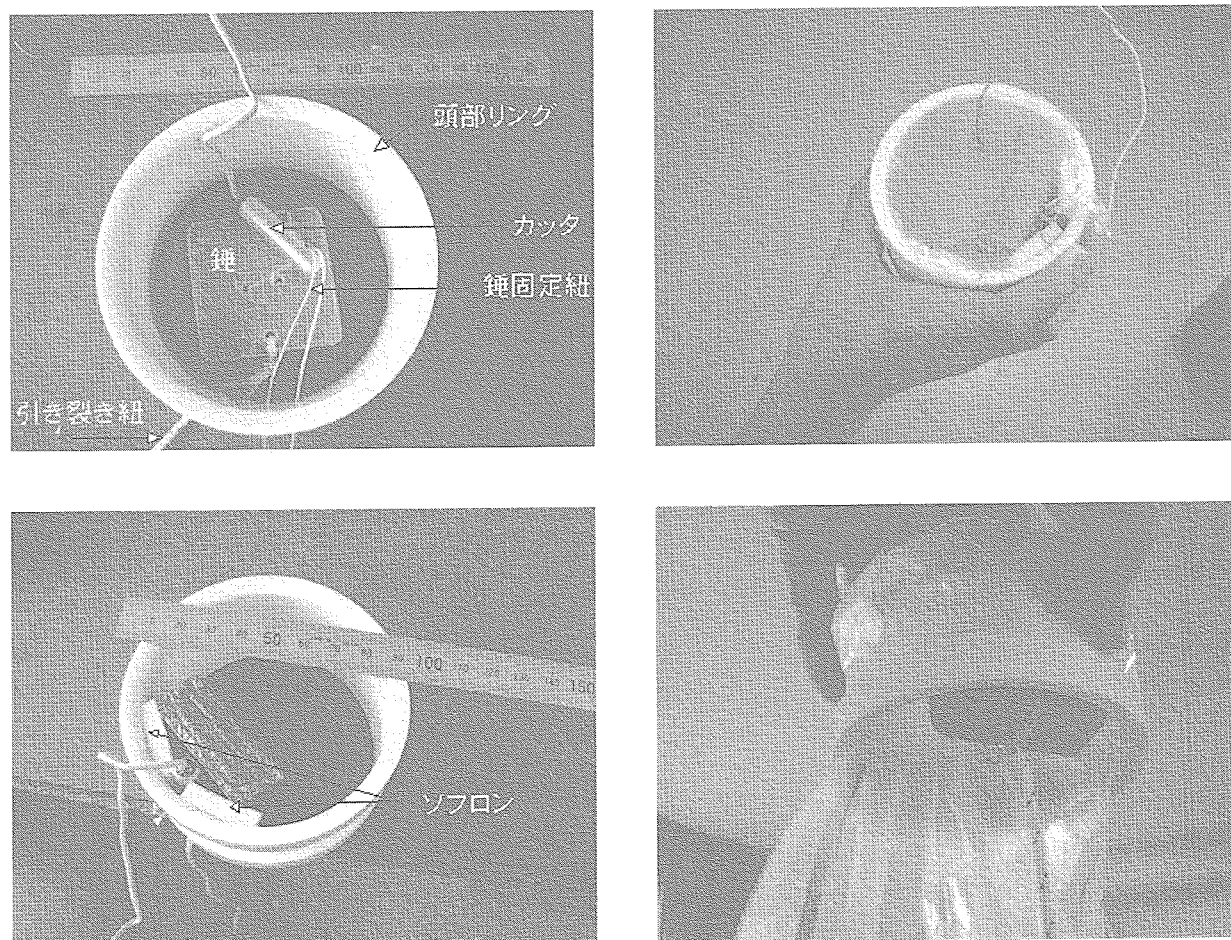


図24 鐘の気球頭部のリングへの固定.