

エバル气球

太田 茂雄^{*1}・松坂 幸彦^{*1}・鳥海道 彦^{*1}・並木 道義^{*1}
大西 晃^{*1}・山上 隆正^{*1}・西村 純^{*2}・吉田 健二^{*2}
松島 清穂^{*3}

On the Feasibility Study of EVAL Balloons

By

Sigeo OHTA, Yukihiko MATSUZAKA, Michihiko TORIUMI,

Michiyoshi NAMIKI, Akira OHNISHI,

Takamasa YAMAGAMI, Jun NISHIMURA,

Kenji YOSHIDA and Kiyoho MATSUSHIMA

Abstract: For a new balloon material, we have been studying the properties of EVAL (Ethylene-Vinyl-Alcohol) film during a past few years. EVAL is a product of KURARE Plastic Company, and has similar mechanical properties of that of Mylar. Besides this strong mechanical strength, we found that the EVAL film has several characteristics which seem to be suitable to the balloon material. Those are:

- EVAL films laminated by Polyethylene can be heat seamed.
- Gas leakage through EVAL film is extremely low, and is almost 100 times less than that of Mylar films for Helium.
- EVAL has strong absorption bands for the Infra-red, which absorbs efficiently infra-red radiations emitted from the earth. This prevents the cooling of the gas inside the balloon at night time. Less ballast consumption is expected for EVAL balloons compared with normal Polyethylene balloons.

After making several tests on the ground, we made a test flight of a small balloon made of EVAL from Sanriku Balloon Center. The performance was satisfactory. Further test flights are now scheduled in 1997.

Possibilities of EVAL balloons as a future vehicle for the long duration flights are also discussed at the end of this paper.

概 要

低温性能に優れたポリエチレンフィルムの出現により、プラスチック气球による宇宙科学の観測は大幅な進歩を遂げてきた。气球の容積も 10^6m^3 級のものが実用化され、2～3トンの観測機器を搭載して高度40 km程度の観測が行われるようになってきた。最近ではその

*1宇宙科学研究所, *2神奈川大学工学部, *3藤倉航装株式会社

成功率はほぼ100%に近い。

ポリエチレン気球は優れた安定性を持っているが、ゼロプレッシャ気球であるために夜間気球内のガス温度が低下して、バラストを投下せねば一定高度を保つ事はできない。

バラストの投下量は緯度にもよるが、日本のような中緯度の上空では一晩に10%弱のバラスト投下が必要である事がこれまでの数多くの実験で確かめられている。したがって数日間の浮遊の後には、バラストは使い果たし、観測を続けることはできない。

この欠点を避けるために提案されたのがスーパープレッシャ気球である。スーパープレッシャ気球は内圧のかかった気球で、夜間気球内のガス温度が低下しても、内圧が低下するだけで容積は変わらず、水平浮遊の高度を保つ事ができる。バラストの投下が不要で、長時間にわたる観測が可能になる。ただし、内圧がかかるために気球被膜はゼロプレッシャ気球に比べて、強度の高いものが必要となり、またガスの漏洩があってはならない。最初に着目されたのはポリエステルフィルム（マイラー）である。ただし、マイラーはポリエチレン気球に比べると低温性能がわるく、また気球製作も難しいので、現在のところ実用上は5000m³程度の小型の気球のものにとどまっている。

より性能の優れた気球用フィルムの研究は現在世界各国で行われており、近い将来、高性能の気球が出現し、観測項目によっては人工衛星にくらべて極めてコストパフォーマンスのよい気球が出現するものと考えられている。

わが国では、クラレ社の EVAL フィルムに着目し、その性質を調べると共に、実際に気球を試作してその性質を調べている。EVAL フィルムの際立った特徴はマイラーとほぼ同じ程度の強度を持つと同時に、熱接着が可能な事、特異な赤外線吸収バンドを持っている点である。スーパープレッシャ気球の材料として有望である。また同時に、赤外線吸収バンドの関係で、夜間での気球内ガス温度の低下がポリエチレン気球に比べてほぼ半減し、バラストの消費量が著しく節約できる事が期待出来る [1]。

1996年の初めに小型の EVAL 気球の試験飛行を行なったが、その結果は良好であった。今後、更に小型気球の飛行試験を行い、大型化して長時間観測のための優れた性能を持つ長時間観測用の気球を完成したいと考えている。

ここではまず長時間観測システムの現状を概括する。ついで EVAL フィルムについての特性、特に熱接着法、低温における接着強度と赤外の吸収バンドについて述べる。

最後に昨年行われた、試験飛行の結果の解析、ついで将来の EVAL 気球の展望について触れる事とした。

1. 長時間気球観測システム

すでに述べたように、ゼロプレッシャのポリエチレン気球は完成の域に達しているが、バラスト投下を必要とするために数日以上は観測を行う事はできない。この困難を避けるためにまず考えられたのはスーパープレッシャ気球である。

もう一つの考え方は、気球の温度環境を変えて、気球内ガス温度の低下を防ぐ方法である。代表的なものはフランスで考案された熱気球で、Mongolfiere Infrarouge (MIR) と呼ばれるシステムである [2]。気球からの熱の出入りを避けるため覆いをかけたサーマルブランケットと呼ばれるシステムも考えられている。

地域を変える事によって、温度環境を変える考えは南極における気球観測で、わが国でポーラーパトロール気球と呼んでいるものである [3]。

以下これらのシステムについて概括する事としたい。

1-1. 気球内ガス圧を利用するシステム

1-1-1. スーパープレッシャ気球

気球の被膜にはガス内圧がかかる為、気球被膜としては強度の高いものが必要になる。まず考えられたのはポ

リエステルフィルム（商品名マイラー）である。マイラーの抗張力はポリエチレンに比べると約10倍である。この性質を使ってマイラーによるスーパープレッシャ気球の開発は1960年代から行われ、一定の成果がもたらされた。ただしマイラーのガラス転移点は常温以上のところにあるので、低温度上空ではほとんど伸度が無い。またポリエチレンと違って熱接着ができないので、GTテープと呼ばれる接着テープを使って熱接着が行われている。大型の気球では気球製作の際に幾分の歪みを生じるのはやむを得ない。伸度が少ないことと、引き裂き強度が弱い事が上昇中に気球の破壊をもたらす原因となっている。スーパープレッシャ気球は5000m³程度のものはほぼ安定に使用され、南半球で約半年程度の浮遊の実績が上げられている。しかし、それ以上の容積のものについてはまだ実用の段階に至っていない。このような状況の下で、世界各国ではポリエチレン、マイラーに代わる新しい気球材料の探索に向けて研究が行われてきている。

たとえば、二軸延伸ナイロン、および色々なフィルムに高強度ポリエチレン繊維を組み合わせたものなどである[4]。ことにポリエチレン繊維を組み合わせたフィルムの強度は極めて高く、接着の方式が確立すれば、大型のスーパープレッシャ気球の実現の可能性は極めて高い。NASAではこのような気球が完成し、将来100日に及ぶ気球観測を可能にし、人工衛星に比べて極めてコストパフォーマンスのよい宇宙科学観測を行おうと研究が続けられている。

1-1-2. オーバープレッシャ気球

スーパープレッシャ気球でバラスト投下を不要にする為には、外気圧に比べて10%以上の内圧を掛けておく必要がある。このため気球被膜にたいする負担が大きくなり、ポリエチレンフィルムでは耐える事ができない。内圧が外気圧の2~3%程度の場合にはポリエチレン気球でも耐える事ができる。その程度の内圧を掛ける方式が数年前にNASAで提案されている[5]。オーバープレッシャ気球でも一晩で2~3%のバラストを節約できるので、結果的に、搭載機器を増やすか、観測時間を増加する事ができる。特に、次に述べる極地域での気球観測では、日没の効果は中緯度に比べて少ないために、その効果は絶大であり、うまくゆけばスーパープレッシャ気球と同様な機能を持たせる事が可能となる。

NASAはこの方式を実用化すべく数々の試験飛行を行ってきた。試験飛行の結果では排気口を閉じたポリエチレン気球は外気圧の4~5%で破壊する事が確かめられている。この結果に基づいて、本年（1996）アラスカのフェアバンクスから北極圏を回る試験飛行を行ったが、残念なことに予定内圧以下で破壊してしまった。気球の製作上に問題があったとされている。

オーバープレッシャ気球の実用化にあたって問題となるのは、適正なガス圧を保つためのガス圧コントロールである。NASAは気球内圧を圧力センサーで測定し、排気弁をコントロールする方式を採用している。気球が上昇して水平浮遊に入る時には2~3分間に気球容積の10%程度のガス量を排気する必要があり、数m²の排気口が必要となる。現存する排気弁に比べて桁違いに大きな排気能力が要求される。このため、NASAは改めて新型の大型排気弁を開発し、また水平浮遊に入る前から徐々に排気しておく方式をとっている[6]。ガス圧センサーと排気弁のフィードバックシステムは一般に考えられる方式であるが、実際はやや複雑なシステムとならざるをえない。

日本におけるオーバープレッシャ気球の研究もすでに行われてきている。一つは気球形状に最適設計を行うことにより、気球被膜にかかる張力を減らす提案である[7]。ガス圧コントロールについてはマグネットゴムの吸引力を利用して排気口を開閉し全くパッシブにガス圧コントロールを行う方式で、極めて安定でかつ単純なシステムである。これらの開発については別の機会に述べたいと考えている。

1-2. 温度環境を変えるシステム

1-2-1. Mongolfiere Infra-rouge および Thermal Brancket

Mongolfiere Infra-rouge はフランスの CNES で提案し、すでに1970年代から何回にもわたって実験が行われている [2]。地表からの赤外線を利用して夜間も気球内ガスを温め、外気温度より高くする。したがって原理的には熱気球である。初めの上昇時にはヘリウムを使用するが、上空での浮遊は暖められた空気の浮力を利用している。このため、搭載能力は少ないが極めて安定した浮遊を長期間にわたって行う事ができる。もちろん昼間は太陽光の影響を受け、気球内ガスの温度は上昇するので気球はより高い高度に昇る。高度は30km から20km の範囲を上下するが、最近では排気弁を付けて一定高度に保つような工夫も凝らされている。実績としては南太平洋の上空を数か月浮遊している。また、北極圏での観測に使用すべく、試験浮遊を行ってきている。

Thermal Brancket 気球はこの考えをさらに進めて、気球上部に太陽光の反射と断熱をかねて薄いアルミホイルをウレタンフォームに付けたものをかぶせた気球である。

1-2-2. 南極気球（ポラーパトロール気球）

1985年に日本で提案されたもので、南極圏では夏期（12月中旬から1月一杯程度）に日没がない事を利用する [3]。日没がないので、気球内ガスの温度の変化は少なく、ゼロプレッシャのポリエチレン気球でバラストの投下なしに水平浮遊が可能となる。またこの時期は気球高度では（20km 以上）では極点を中心として偏東風が循環しているので、放球した気球は何日かの後に放球点付近に戻るメリットを持っている。

日本は国立極地研究所と宇宙科学研究所が共同して昭和基地（69°00′008S, 39°35′E）から放球を行い、すでに十数回にわたって観測を行っている [3]。一周する期間は15日程度である。日本がこの計画を始めた直後アメリカでもこの実験を始めた。放球はマクマード基地（77°51′S, 166°40′E）から行っている [8]。マクマードは昭和基地に比べると極点に近いので、一周に要する期間は約10日である。

緯度の関係で、昭和基地からの放球ではやや日没の影響を受け、平均して一日に2～3%のバラストを消費しているが、中緯度の放球に比べるとその量は約1/3にすぎない。マクマード基地からの放球では、事実上バラストの投下は必要ないと報告されている。現在の長時間気球観測の本命として、アメリカは年間2～3機の放球を恒久的に行い、観測後降下した機器は輸送機を動員してほぼ完全に回収を行い、数々の成果を上げている。日本はこれまで機材の関係で、回収は行わなかったが、本年度から積極的に回収を行う方針をとり、これからの発展が期待される。

この方式の長時間観測は、偏東風のある期間が12月中旬から1月一杯であるため、1か月程度に限られている。

2. EVALフィルムについて

高性能気球開発にあたって、新しい気球材料の探索をこの数年行ってきたが、そのなかでクラレ社製の EVAL フィルムが可能性の高い候補として取り上げる事になった [1]。EVAL は Ethylene-Vinyl-Alcohol の商品名で、食品保存用の袋として広く使われている。またこのフィルムで作った気球はすでに宣伝用の小さな風船として市販されている。

我々が気球材料の候補として着目した理由は、

1. 機械的強度が高くマイラー程度であること、
2. マイラーに比べると引き裂き強度が高いこと、
3. ポリエチレンをラミネートしたフィルムが製造されており、熱接着が可能である

などの点であった。

また、ガスバリア性は著しく高く、20 μ 厚の EVAL フィルムは20°C でヘリウムに対して

$$160\text{cc/m}^2 \cdot 24\text{hr} \cdot \text{atm.}$$

という値を持っている。これはマイラーに比べると1桁近く低い値である。「脚注」これが装飾用の風船に使われている理由で、一度ヘリウムを詰めると、暫くはしばむことはない。ただし、大型気球で高々度を浮遊する気

球については、この性質は不可欠なものではなく、マイラー程度のガスバリア性を持っていれば十分実用に耐える事が出来る。

EVALの性質を調べているうちに、我々はEVALの赤外線領域の吸収バンドが、極めて長時間気球の材料として望ましい性質を持っていることに気が付いた[1]。後に詳しく述べるように、赤外線領域の吸収バンドは地上から放射されて気球高度に達する赤外線の波長領域とはほぼ一致している。このため日没後も気球は地上からの赤外線を有効に吸収し、夜間の気球内ガス温度の低下を防ぐ事が可能であると考えられる。したがって、ポリエチレン気球と比較して必要なバラスト消費量を減少させる事ができると期待される。この性質が、気球材料として他のフィルムに無いEVALが持つ最も優れた性質である。

以下、EVALの常温および低温下での機械的性質、熱接着性能、赤外線吸収スペクトルについて述べることにする。

材料として使用したのは商品名EF-XLとよばれる二軸延伸EVALを基盤とし、ポリエチレン(LLDPE)をラミネートしたフィルムである。

各々の厚さは

EVAL・・・10 μ 、ポリエチレン・・・15 μ

である。

2-1. EVALとポリエチレンのラミネートフィルムの機械的性質と熱接着性能

ここで使用した機器および資料は次に示したとおりである。

- ・機器 : インテスコ精密万能試験機201-B (宇宙科学研究所設置)
- 常温では一部テンシロン-100, オリエンテック社製, (神奈川大設置)
- ・熱接着器 : ベルトシーラー HS-CE 型 (New Long 社製)
- ・引張り速度: 100mm/min
- ・資料切り抜きダンベル: SDK-300-D型 (図1に示した)
- ・試験した資料は

- a. SF373 : 20 μ 厚
- b. EF-XL: EVAL (10 μ) +LLDP (15 μ)
- c. Fin Siem (EF-XL:EF-XL)
- d. Lap Siem (EF-XL:EF-XL)
- e. Lap Siem (EF-XL:SF373 (長さ1cm) :EF-XL)

ここでeのLap Siemに使用したSF373はWinzen社製の気球用ポリエチレンフィルムで厚さは50 μ である。図2に各資料の熱接着の方式を示した。

素材SF373およびEF-XLについては常温で約200サンプルについてはテンシロン-100, オリエンテック社製, (神奈川大学設置)で測定を行ったが, さらに低温の測定はインテスコ精密万能試験機201-B (宇宙科学研究所

脚注: クラレの資料によれば

資料	引き裂き強度 (kg/cm)	Heにたいするガスバリア性
2軸延伸のEVAL	10kg/cm	160 (cc・20 μ /m ² ・24hr・atm)
ポリエチレン	100	28000
ナイロン	5	2000
マイラー	2	3100

の程度である

設置) を用いて各サンプルについて5個ずつ測定を行った。

これらの結果の代表的な値をまとめて、表1および図3に示した。

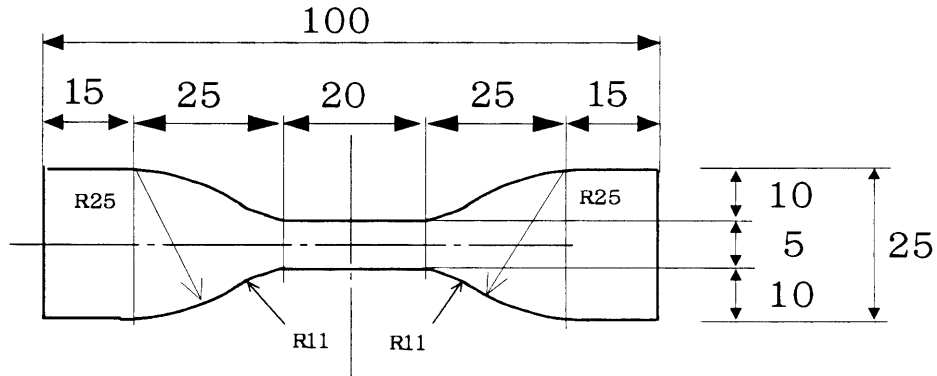


図1 ダンベル SDK-300-D 型の形状

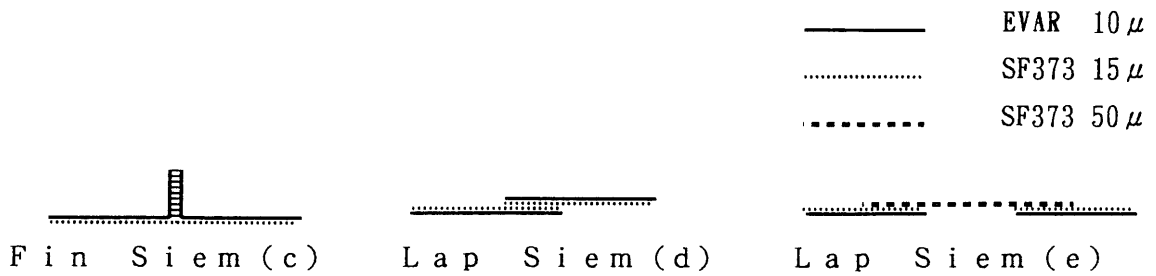


図2 フィルムの熱接着方式 (Lap Siem と Fin Siem)

表1 温度20°C および -80°C における機械的性質
引張り速度: 100 mm/min, 資料については図2に示した

EVAR は二軸延伸されているが縦横の方向で強度と伸びは違っている。気球は頂上から下部に向けて縦方向のフィルムを使う、接着される部分は横方向にあたるので、ここでは横方向の特性を示した。測定の結果によれば、常温では縦方向の破断強度は80%程度、破断伸びは2倍程度を示している。

表1a 20°C における各資料の機械的性質

資 料	降伏点強度 (kg/cm ²)	降伏点伸び (%)	破断強度 (kg/cm ²)	破断伸び (%)
SF373 (a)	100	10	300	500
ASTRO-E*	100	10	350	600
EF-XL (b)	480	8	850	50
Fin Siem (c)	400	6	640	40
Lap Siem (d)	480	5	820	50
Lap Siem (e)	320	5	750	50

表1b -40°Cにおける各資料の機械的性質

資 料	降伏点強度 (kg/cm ²)	降伏点伸び (%)	破断強度 (kg/cm ²)	破断伸び (%)
S F 3 7 3 (a)	2 5 0	1 0		
A S T R O - E *	2 5 0	1 0		
E F - X L (b)	1 2 0 0	4	1 2 4 0	4 0
F i n S i e m (c)	— — —	— — —	— — —	— — —
L a p S i e m (d)	1 1 2 0	7	1 2 0 0	2 0
L a p S i e m (e)	8 4 0	2	1 2 0 0	4 5

表1c -80°Cにおける各資料の機械的性質

資 料	降伏点強度 (kg/cm ²)	降伏点伸び (%)	破断強度 (kg/cm ²)	破断伸び (%)
S F 3 7 3 (a)	4 5 0	1 0	5 5 0	4 5 0
A S T R O - E *	4 2 0	1 0	5 6 0	4 0 0
E F - X L (b)	1 5 0 0	1 0	1 7 0 0	3 5
F i n S i e m (c)	3 0 0	4	3 0 0	5
L a p S i e m (d)	1 5 0 0	7	1 6 0 0	1 5
L a p S i e m (e)	1 5 0 0	1 0	1 5 5 0	1 5

* ASTRO-Eのデータは文献[5]による。なおSF373とASTRO-Eの性能は差がないとされているが、今回SF373について実測した結果も、表に示すようにASTRO-Eとの間にはその差は認められない。

2-1-1 EVALフィルムの機械的強度

表1および図3の結果から、EF-XLフィルムの強度はポリエチレンに比べて、2～3倍程度である。EF-XLが10 μ のEVALフィルムと15 μ のポリエチレンフィルムをラミネートしたものであるため平均としての強度が下がる事が考えられる。

常温の場合、表1の値を用いて代表的な破壊強度として

ポリエチレンフィルム 300g/cm²

EX-FL 880g/cm²

をとると、EVALの素材の破壊強度として

$$(880 \times 25 - 300 \times 15) / 10 = 1750 \text{g/cm}^2$$

が得られる。この値は、2軸延伸EVALの公称破壊強度

$$2000 \text{g/cm}^2$$

の値に比べるとほぼあっているがやや小さい。しかし延伸していない場合のEVALフィルムEF-F、EF-Eの場合の公称破壊強度は400g/cm²程度であるので、この値よりは明らかに上回って強度の高いフィルムを要求する場合は、EVALの厚さを10 μ から15 μ に増す事を検討している。

2-1-2. 熱接着性について

図3の結果から明らかなように、ポリエチレン気球の時有効であったFin Siem（拌み合わせ）の結果は素材に比べて強度および伸びについても性能が劣化している。ことに低温になるとその傾向が著しい。Fin Siemの場合、引張り試験を行うと、EVALは90度曲げられた状態で力を受ける。EVALの脆化温度は50°C付近にあり、低温になるにつれて脆化の度合いが強くなり、接着部に裂け目を生じやすいためであると考えられる。

一方Lap Siem（重ね合わせ）の接着では素材と比べて強度の低下はない。これは、フィルムの脆化が進んで

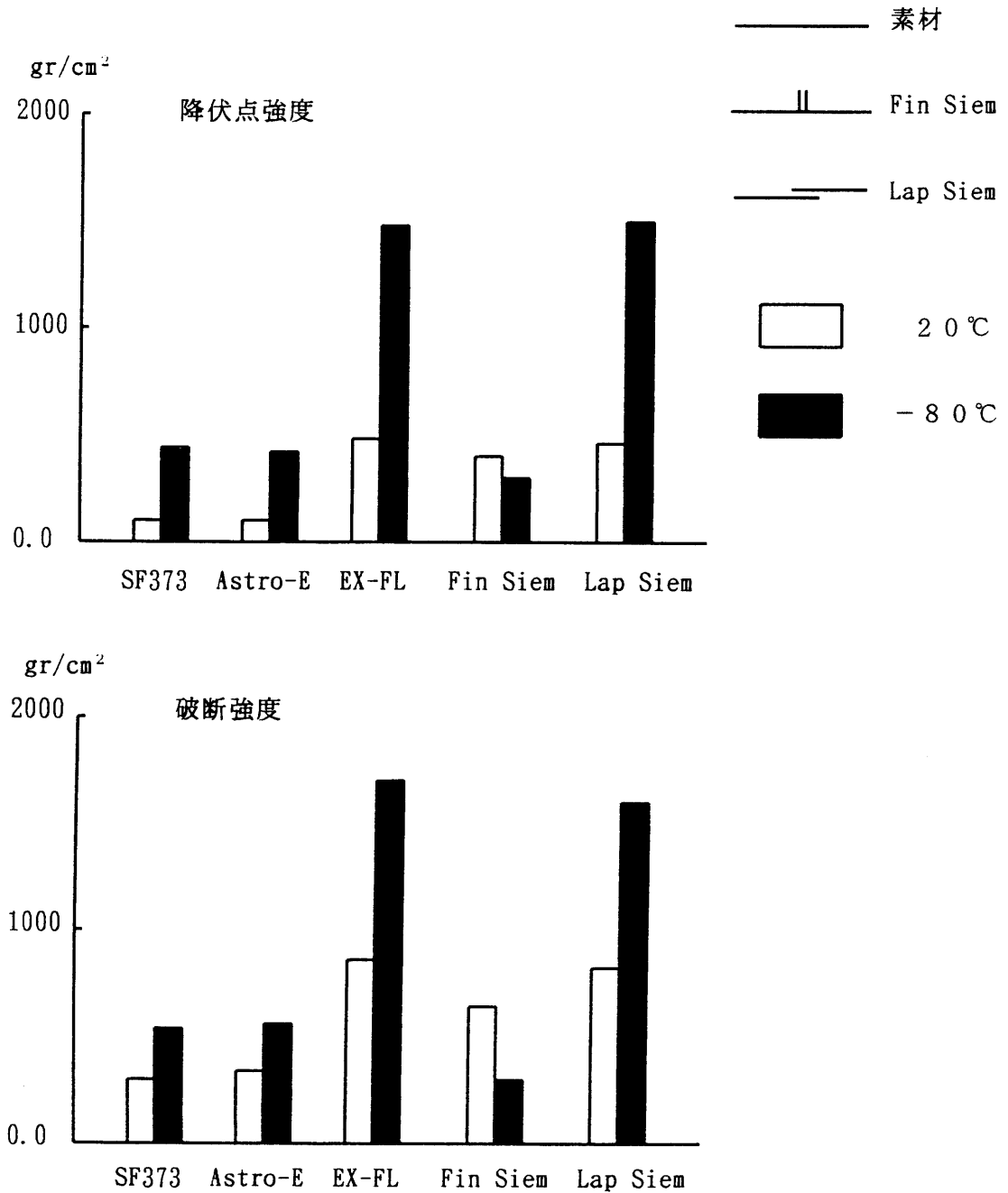


図3 常温と-80°Cにおける降伏点強度と破断強度

も、局所的な力がかからないためであると考えられる。したがって、上空の低温下で上昇する気球に対しては、気球の製作に当って Lap Siem の方式をとる事が必要になる。接着部の歪みを吸収させる狙いで行った図2に示した Lap Siem (e) では、低温下での SF373 の伸びを利用しようとするものである。しかし、1 cm 幅の SF373 を間に入れた Lap Siem の引張り試験の結果は図4に示したように余り効果がみられていない。一つは SF373 部分が短いことが考えられるが、50 μ 厚のポリエチレンフィルムの低温特性は直接測定していないので、そのフィルムでは低温特性が劣化している事も考えられる。今後の検討課題である。

張力 (kg/5mm)

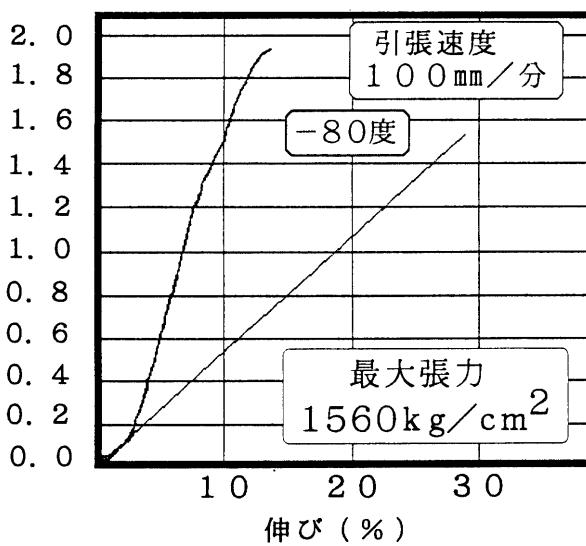
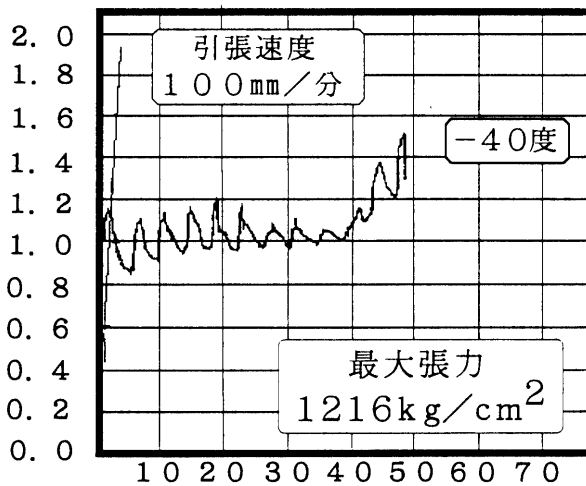
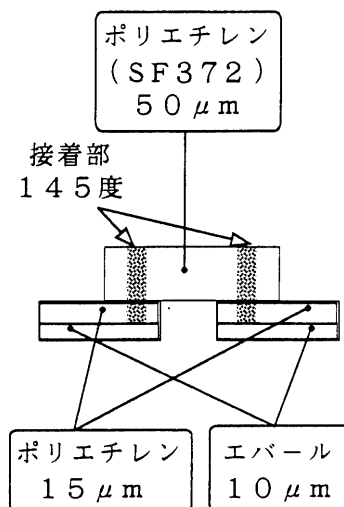
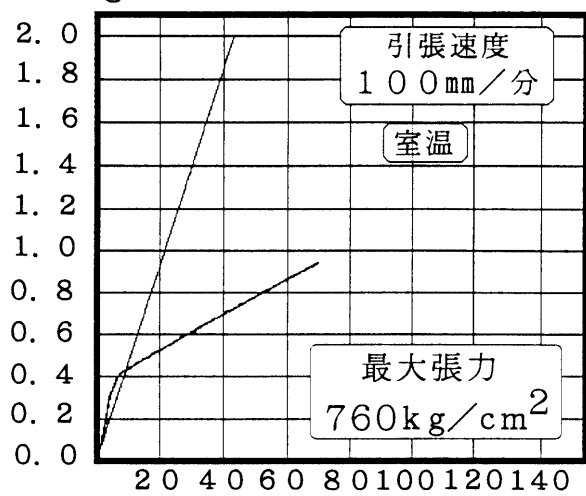


図4 各温度におけるSF373 (50 μ幅1cm) を入れたLap-Siem (e) の歪力-歪曲線

3. EVAL フィルムの赤外線吸収スペクトル

上空で浮遊する気球は図5に示すように、太陽からの輻射、地上からのアルベドおよび赤外輻射を受け、また対流によって熱伝達が行われる。上空にゆくと、大気が希薄となるため、気球の温度は主に輻射過程で決まる事が知られている。したがって気球内のガス温度の決定には太陽の輻射量と地上からの赤外放射量、気球被膜の各々にたいする吸収係数が重要な因子となっている。

地上からの赤外輻射量は人工衛星の観測により、衛星高度で詳しく調べられている。観測された結果は図6に示しておいた。波長が 7μ 以下 14μ 以上の赤外線の量が少ないのは大気中の水蒸気と炭酸ガスの吸収によるものである。気球高度は $30\sim 40\text{km}$ であり、気球の上空にある大気量は少ないので、気球高度での地上からの赤外輻射量は衛星高度とほぼ同じとみてよい。

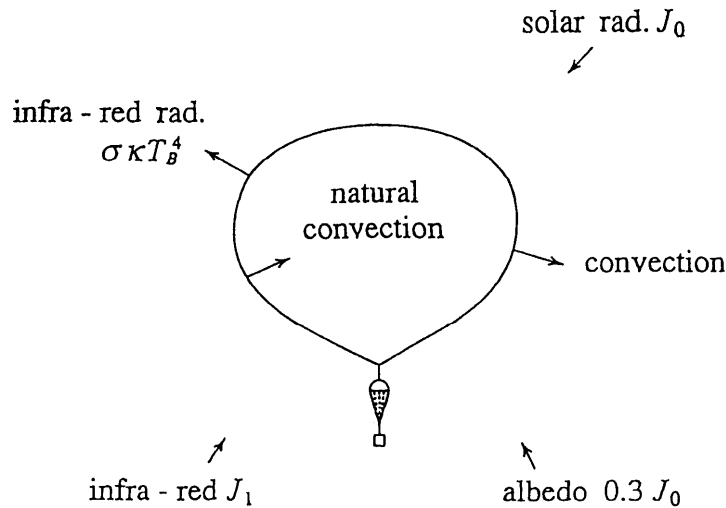


図5 上空に浮遊する気球の熱伝達

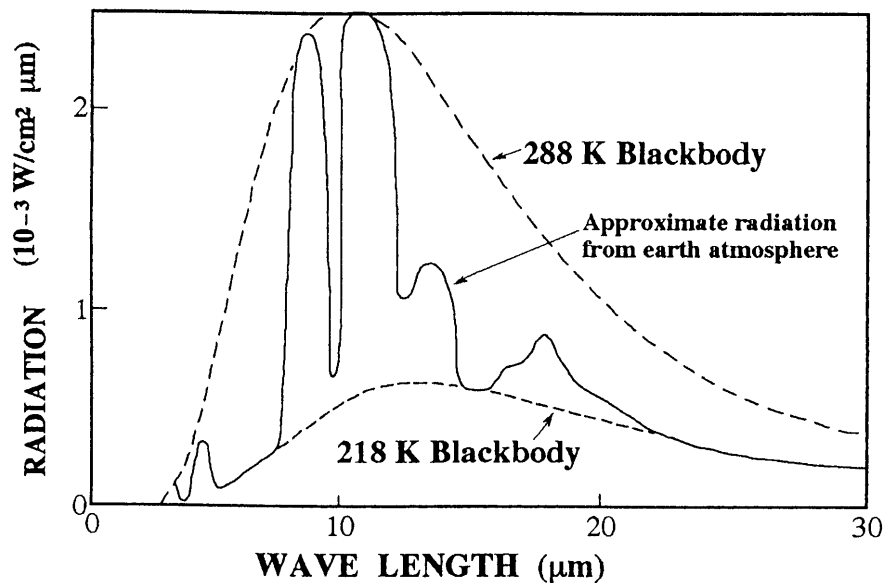


図6 気球高度での地表からの赤外線強度

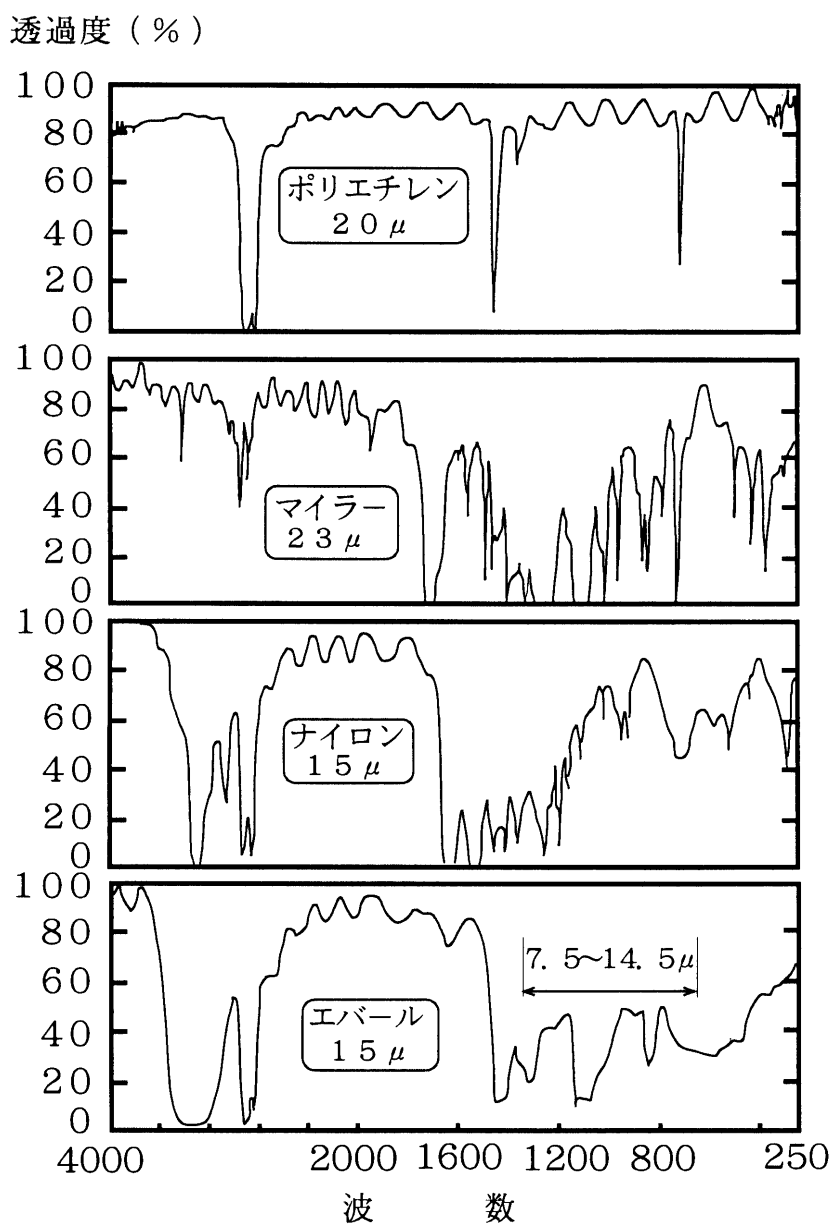


図7 気球用フィルムの赤外線吸収特性

ここではこれまで使われてきた気球皮膜として、ポリエチレン、マイラー、ナイロンと比較してEVALラミネートフィルムのフィルムについて吸収係数の測定を行った。結果は図7に示しておいた。測定はSS50型Jasco社製（宇宙科学研究所に設置）を用いて行った。

特徴的な事は、EVALのフィルムの吸収係数は地上からの赤外線スペクトルの強い領域に対応する波長7μから14μの範囲で著しく大きくなっている事である。これは夜間でも放射されている地上からの赤外線の影響が大きくなっている事を示しており、気球内ガスの温度変化を少なくする作用をもたらす事になる。

4. 上空での気球内ガス温度の推定

気球内のガス温度は図5に示したように

- ・ 太陽からの輻射 : $J_0=3.3\times 10^{-2}\text{cal/cm}^2\text{sec}$
- ・ 太陽光のアルベド係数 : $A, A\sim 0.3$
- ・ 地表からの赤外輻射 : $J_1\sim 0.3 J_0$
- ・ 気球表面からの輻射 : $\kappa\sigma T_B^4$

ここで σ はステファンボルツマンの係数, κ は赤外吸収係数

- ・ 大気との対流熱伝達
で決められる.

高層大気に浮遊する大型気球では, 輻射の効果が対流の熱伝達に比べて支配的である事が分っている [9]. 対流効果を見無視すると半径 R の気球の輻射平衡の式は

$$4\pi R^2 \kappa\sigma T_B^4 = \pi R^2 (2\kappa J_1 + (1+A)\varepsilon J_0) \quad (1)$$

で与えられることになる. ただし, ここで ε は可視光に対する吸収係数である. EVAL のように赤外線吸収係数が波長 7μ から 14μ に集中している場合には, 赤外の放射, 吸収については赤外線スペクトルにたいして各波長での放射および吸収の総和の平均をとる必要がある. したがって平均値としてとった左辺の κ は右辺の κ より小さい値を持つ事になり, これは気球の温度の絶対値の上昇をもたらすことになる. ポリエチレン気球の場合に比べると $20\sim 30^\circ\text{C}$ 高くなると推定されるが, 昼夜の温度差を議論する際には余り影響しないので, ここでは κ として同じ値をとる事にして議論を進める.

(1)式は変形して

$$\begin{aligned} T_B &= [J_1 / (2\sigma)]^{1/4} (1 + \varepsilon / \kappa (1+A) J_0 / (2J_1))^{1/4} \\ &= T_0 (1 + \varepsilon / \kappa (1+A) J_0 / (2J_1))^{1/4} \\ &\sim T_0 (1 + 2\varepsilon / \kappa)^{1/4} \end{aligned}$$

と書く事ができる. ここで T_0 は夜間の輻射温度であり, T_B は日中の気球の輻射温度となっている [9]. したがって日中と, 夜間の輻射温度の差 ΔT は

$$\Delta T = T_0 [(1 + 2\varepsilon / \kappa)^{1/4} - 1]$$

気球ガス温度変動率, つまり必要バラスト量の値は

$$\Delta T / T_B = 1 - 1 / (1 + 2\varepsilon / \kappa)^{1/4} \sim 0.5 (\varepsilon / \kappa) \quad (2)$$

で与えられる事になる. ここでは大気の対流の効果を見無視したが, 外気温度は日中と夜間では変動しないので, 実際の気球ガス温度は与えた $\Delta T / T_B$ よりやや小さい数値を与える事が期待される.

ε と κ の値は誤差を伴っていて, ことに ε についての測定の実験は難しく研究者によって若干異なる値を与えている. 表2にこれまでの観測の中で一応もっともらしいとされている値を掲げておいた. 試みにポリエチレン気球について(2)式から計算すると, 9.6%という値が得られる. ここではポリエチレン気球では, 約10%のバラストが必要である実験事実から, ポリエチレン気球にたいする温度の変動率を10%に規格化しておくことにする. 表2に示した推定から見ると, EVAL気球のガスの温度変化はポリエチレン気球の場合とくらべて約半分

表2 20 μ 厚さにフィルムの可視光および赤外線に対する吸収係数

ε : 可視光に対する吸収係数

κ : 赤外線に対する吸収係数 ($7\mu\sim 14\mu$ の範囲)

本文に述べた理由で, ポリエチレン気球の $\Delta T / T_B$ を10%に規格化してある.

フィルム	ε	κ	ε / κ	$\Delta T / T_B$ *
ポリエチレン	0. 05	0. 20	0. 25	$\sim 10\%$
マイラー	0. 10	0. 60	0. 16	~ 7
EVAL	0. 10	0. 90	0. 11	~ 5

あり、バラストの消費が約半分に節約される可能性のあることを示している。具体的に述べると中緯度地方の長時間観測で従来5日程度が限界であったのが10日程度に延長できる事、またこの場合総重量の約50%のバラストを搭載する必要があるのが約半減し、その重量を観測機器に回す事が可能となる事を示している。

南極のポーラーパトロール气球については、一周するためにはかなりのバラストの搭載を必要としていた。一例として1993年1月5日に放球したPPB6では21日間の長時間フライトを行ったが、その際総重量の約40%のバラストを必要とした。この際観測機器の重量は総重量の約20%であったので、EVAL 气球を使うことにより同じ条件であれば観測機器を倍増する事が可能となる[1], [3]。

5. 試験飛翔について

5-1. 試験飛翔

EVAL 气球については熱接着性能、气球強度を調べるために1996年1月29日に試験飛翔を行った。この气球は一回目の試験ということで、製作の便のために、まずFin Siemで接着を行った。以下実験の概要について述べることにする。

- ・放球日時 : 1996年1月29日 8時16分
- ・放球場所 : 三陸大気球観測所 (39°09'30"E, 141°49'30"E)
- ・气球について
 - 气球形状 : ハート型自然型
 - 接着方式 : Fin Siem
 - 气球容積 : 100m³
 - 材料 : EF-XL EVAL (10 μ) + LLDP (15 μ)
- ・重量
 - 气球 : 6.3kg
 - 観測器 : 5.1kg (内圧計, ITV, レメーター, コマンド, 電池等)
- パラシュート : 0.9kg
- 計 : 12.3kg
- ・到達高度 : 16.4km 107.0hpa

この气球は排気口をもたず、排気高度で内圧がかかり破壊する際の内圧を測定し、破壊時の内圧として3.2gr/cm²が観測された。

5-2. 実験データからの EVAL 試験气球の評価

气球破壊時に气球皮膜にかかる張力についてはNASAではオーバープレッシャ气球開発のために数回にわたり試験飛翔を行い、理論からの推定値との比較を行いよい一致を得ている[6]。表3にその結果を示しておいた。

20 μ 厚さのAstro-Eの-25°Cから-45°C付近の降伏強度は400~500gr/cmであることから、表4で計算したRAPの約1/2の値になっている。この値は球の形をした气球被膜にかかる張力がよい近似(自明ではない!)になっている事を示している。

以上の実験式から推算すると、試験飛翔を行ったこのEVAL 气球は平均半径は2.88mであるので、气球被膜にかかる張力は

表3 気球破壊内圧（オーバープレッシャ気球開発実験）[6]
 気球皮膜はポリエチレンフィルム（Astro-E）
 平均半径は同じ容積をもつ気球を球とした時の半径

気球番号	気球容積	平均半径	破壊高度と気温	破壊圧（ ΔP ）	R ΔP
# 1493	2MCF	24m	32km -45℃	0.43 gr/cm ²	1.03kgr/cm ²
# 325NT	2MCF	24m	32km -45℃	0.43 gr/cm ²	1.03kgr/cm ²
# 342NT	80MCF	58m	40km -25℃	0.16 gr/cm ²	0.93kgr/cm ²
# 365NT	80MCF	58m	40km -25℃	0.16 gr/cm ²	0.93kgr/cm ²
# 393NT	80MCF	58m	40km -25℃	0.20 gr/cm ²	1.16kgr/cm ²

$$0.5 \times R \Delta P = 1.44m \times 3.2gr/cm^2 = 461gr/cm$$

と推定される。

一方、破壊した高度16km付近では気温は約-60℃であり、この温度での Fin Siem の強度試験の結果は表1に示したように約700gr/cmであり、理論的な期待値の約70%の性能を示している。これは気球の長い接着線の中で、歪みが掛かり、またこの温度での Fin Siem では伸びは3～4%であるために、局所的な応力が掛かり破壊されたものと考えられる。約70%の値が得られたのはほぼ期待値に等しいと言える。

将来は Lap Siem で製作した気球について試験飛翔を行う事になっている。

6. EVAL 気球についての将来の展望

EVAL 気球については将来の展望として2つのことが考えられる。

第1の点はバラスト消費の少ないゼロプレッシャ気球への展開である。この場合には気球皮膜にかかる張力は少ないので、製作は比較的簡単である。上空でポリエチレン気球に比べて気球内ガス温度の変動が予測通り少なくすむのか、近く試験飛翔を行い確認する事になっている。

第2はその機械的強度が優れている点である。今回の試作気球では製作の都合上 Fin Siem で接着を行ったが、Lap Siem の方式を採用することにより、本文の2節に示したように3～5倍の接着強度が期待できる。1997年の1月には Lap Siem で接着した気球の試験飛翔を行う予定である。予測通りの強度が得られれば、破壊内圧として10～30gr/cm²の値が期待できる。これは外気圧100hpaと比較すると約10～30%にあたりスーパープレッシャ気球に要求される内圧に近い。また、これを半径10倍の10⁵m³の気球に換算すると1.0～3.0gr/cm²の破壊内圧となる。10⁵m³の気球の水平浮遊高度は5～10hpaであるので、この内圧は外気圧に比べて10%を越す値が期待できる事になる。したがって、EVAL はスーパープレッシャ気球の材料としての可能性が高いことを示している。現在の EF-XL の EVAL フィルムの膜厚は10 μ であるので、これを倍増することによりさらに強度の高い安定した気球へと発展する事ができる。このためには作業性のよい Lap Siem の方式の開発が不可欠で、現在そのための研究を行っているところである。

これらの試験飛翔の性能を調べつつ、実用化に向けて長時間飛翔用としての EVAL 気球を完成させたいと考えている。EVAL 気球は将来の長時間飛翔気球にむけての高い可能性を秘めている。

謝 辞

EVAL の特性を調べるにあたって、資料の提供および示唆を賜ったクラレ株式会社の植村純一氏はじめ多くの方々にお世話になった。ここに感謝の意をささげたい。また、長期間にわたって資料の特性の測定を行って下さった神奈川大学の卒業生細井貴志（平成4年度卒）、鈴木正治、富岡晃弘（平成5年度卒）、片岡真潮（平成7年度卒）の諸君に厚くお礼を申し上げたい。

参考文献

- [1] J. Nishimura, N. Yajima & T. Yamagami : Long duration Balloon Systems in ISAS, Proc. of 34th AIAA Meeting, Reno, AIAA-96-0698 (1996)
J. Nishimura : Activities of Long Duration Flight systems in Japan, Adv. Space Res.17. 45-49 (1996)
- [2] T. Maraterre : Vol de Longue Duree Sous Mongolfiere Infrarouge MIR, Adv. Space Res. 14, 53-60 (1994)
- [3] J. Nishimura, M. Kodama, K. Tsuruta, H. Fukunishi : Feasibility studies of "Polar Patrol Balloon, Adv. Space Res. 5. 67-90. (1985)
M. Ejiri, J. Nishimura, N. Yajima, T. Hirasawa et al. : Polar Patrol Balloon Project in Japan, Adv. Space Res. 14. 201-210 (1994)
- [4] M.S. Smith, R. Steve Scahallerkamp : Development Revolutionary balloon Materials, 34th AIAA Meeting (Reno) AIAA-96-0575 (1996)
- [5] J.M. Simpson : Overpressurized Zeropressure Balloon System, Proc. of AIAA, International Balloon Technology Conference (Albuquerque), 108-115 (1991)
- [6] G. Dwayne Orr : The long Duration Balloon Vehicle (LDBV) Flight System Development, 34th AIAA Meeting (Reno) AIAA-96-0357 (1996)
- [7] J. Nishimura : Pumpkin Shaped Overpressuried Balloon, Proc. 19th ISTS (Yokohama) 799-802 (1994)
- [8] V.W. Jones : Current Status of the NASA Long Duration Balloon Program. Adv. Space Res. 114, 191-200 (1994)
- [9] 西村 純, 藤井正美, 山上隆正 : 上空における気球動作の温度効果について, 宇宙航空研究所報告, 22号, p167-185 (1973)
H.M. Cathey, Jr. : Advanced in the Thermal Analysis of Scientific Balloons, Proc. of 34th AIAA Meeting (Reno) AIAA-96-0695 (1996)