

気球皮膜材料研究の進歩(1965~1975)

河 田 幸 三

1. ま え が き

東京大学宇宙航空研究所において最初の気球シンポジウム [1]~[3](1965. 11. 26) が開催されてから、ほぼ10年になる。

この間宇宙研を中心とした気球研究は長足の進歩を遂げ、世界でもトップ・レベルに到達しつつあることは誠に喜ばしい。これはひとえに、歴代所長初め、初代の委員長河村教授、第2代委員長西村教授を中心とする大気球専門委員会、推進の中心となった気球工学部門及び協力した関係者の一致協力とたゆまぬ努力によるものと考えられる。

以下、話を気球皮膜材料の研究に限定する。この分野においてもこの10年間の進歩は著しい。気球皮膜材料の研究は関心をもつ研究者の集り：気球材料懇談会で、よりより討議を重ねつつ進められた。構成員は時により多少変動があったが、河村、西村、石井、平尾(収)、神戸、倉谷、河田、小原、小林(昭)、藤井、岡本、橋本、大谷、本堂等であった。

研究の進展につれて、内容は大気球シンポジウム論文集(昭和41年度~49年度)、宇宙研報告大気球特集号などに順次公表されたが、未公表或いは同懇談会メモの形でしか発表されなかったものもかなりの数にのぼるので、これらをも紹介しつつ10年間の研究の過程及び現在到達している見解を記録に止めておくのもあながち無益ではあるまい。なお簡単のためここでは骨子の記載に止め、公表済み原論文のあるものは詳細を参照して頂く方針をとったので予めご了承をお願い致す次第である。

2. 気球の環境条件と破壊原因

以下考える気球は科学観測に主用されている下端に開口部のあるゼロ気圧気球(zero pressure balloon)が主対象で、形状は自然形(natural shape)が多い(閉じた高圧力気球(super pressure balloon)は別途考える)。この気球の上昇中高度1万~2万mで破壊がおこることがあり、この信頼性向上は1965年当時世界的な問題であった[1]~[4]。

温度はこの範囲で-80°Cまで見ておけば十分である。この高度では気球は5~15%程度ふくらんでいるだけで完全にふくらんだ状態には程遠い。気球の上昇中NCARが破断の模様をカメラでとった結果によると、破断か所は必ず赤道より上の方であり、top fittingを外れたところが多い。割れ目の入り方は縦方向で横応力の存在を予想させる。これらの状況を考慮し、1965年当時[3]この低温環境で皮膜が瞬間的に高応力(過渡的動応力)をうけて、きわめて伸びの小さい皮膜の場合破断するものと推測された。過渡的動応力の原因としてはジェット・ストリームが考えられ、気球のfolding、傾きは横応力を増強する働きがあり得るであろう。材料自体の低温脆性の他接着部の強度低下も重要であろう。この推論は現在10年を経て、実験結果及び懇談会の討論の集積により正しいものと考えられている。

3. 気球の形状と横応力

自然形気球については詳しく応力解析がなされている [5][6]. 完全にふくらんでいる時には横応力は無視してよいが, 完全にふくらんでいない時には横応力は生じ得るはずである.

球形近似 [3] では, 横合応力 N_θ が縦合応力 N_ϕ と同じオーダーの値となることが示されている. 六角形, 球形近似については [7] も参照されたい.

4. 水モデル・テスト

水モデル・テストにより実際の気球と張力分布が等しいモデル気球で, 皮膜の強度を測定できるとされている [8]. 補強テープの効果も調べられ, 例えば, 補強テープ数本を入れることにより強度を実質的に2~3倍に出来ることなどが明かとなった. SF [9], 5505 [8], 6775 [9] 皮膜に対する測定結果があり, 厚さ20 μ の6775, SF共に裸強を入れない場合に浮力換算約600 kgの強度をもつことが知られた. なお [10] も参照されたい.

5. 飛翔中破壊後回収された気球の皮膜の検査

1) 昭和41年度第二次観測 (昭41. 9) で高度15 kmまで飛翔し回収された B₀₁-3気球の皮膜は, 縦方向にササラの様にさけており, 破断部の光弾性解析の結果, 塑性変形が検出できないことが示された. 平行して, 地上で小型気球モデルの-80 $^{\circ}$ C及び20 $^{\circ}$ Cでのシミュレーション・テストの結果20 $^{\circ}$ Cでは著しい塑性変形を示すのに, -80 $^{\circ}$ Cでは塑性変形がほとんど検出できないことが確認された. したがって上記の高度での破壊は脆性破壊である [11].

2) B₀₁-7気球 (昭42. 7. 28放球)は高度13.4 kmまで飛翔し回収されたが, 検査の結果, 破壊か所は熔接部の二番を走っていることが認められた [12].

6. 飛翔中の気球皮膜歪の直接測定

ポリエチレン皮膜の剛性はきわめて小さいので, 引張り剛性の極端に小さいスライド・ゲージを開発し, B₀₁-7気球の皮膜部4か所に取付け, 飛翔中の皮膜歪の直接測定を行った [12]. スライド・ゲージは摺動抵抗を利用したもので, 感度は25 $^{\circ}$ Cで1.48~1.57 k μ /mm, 大きさ30 ϕ にまとめられた. この時の気球は下端開口部を閉じたもので, 満膨脹内圧上昇時に2~3.5%歪への上昇が横方向歪について見られた. また内圧上昇は高感度の微差圧計で同時に測定を行った [13].

以後 [14], 下端を閉じた気球で満膨脹破壊に至らせる実験を数回行い, 内圧Pの上昇と歪の上昇が満膨脹時に起る事を観測した. ゲージ間隔内を破断部が走ることはきわめて難しいので, 実際の破断歪そのものの測定は困難である.

また下端を閉じた気球は特にこの実験のために用いられたもので, 通常の科学観測用気球は前述したように下端に開口部のあるものであり, その破壊原因は明かに満膨脹破壊ではないと考えられるので, 蛇足ながらお断りしておく.

7. 皮膜材料の低温脆性、直交異方性と皮膜改善の方向

皮膜材料はポリエチレンが主用されているが、その異方性と低温脆性について明確に国内の材料について示されたのは [15] が最初であろう。初めて取上げられたのは 41 年度の DFD 5505 皮膜で、室温 (20°C) ~ -100°C での単軸引張り測定が行われ、M 方向破断伸び ϵ_T の大小が室温 ($\epsilon_T > \epsilon_M$) と -80°C ($\epsilon_T \ll \epsilon_M$) では逆転すること、したがって常温のテストで低温特性の推測を試みるのは全く意味がなく、20°C と -80°C の測定を標準化する必要があること、一般に低温になるに従い強さは上昇するが、伸び減少の仕方は M 方向、T 方向でかなり異なること、従って常温、低温で力学的直交異方性の著しいことが示された。特に -80°C での $\epsilon_T = 7 \sim 8\%$ できわめて小さい点改善の必要が認められた。この事実から皮膜改善の方向として、-80°C での ϵ_T の増大がまず第一に考えられ、極端な一軸配向の状態ではなく、二軸配向の方向に進め低温での伸びを T 方向についても増大すべきことが指摘された [15]。この方針は懇談会の一致した意見となっている。以後皮膜の改善はこの線で進められた。

8. ポリエチレン皮膜の配向度

ポリエチレン皮膜の力学的性質の直交異方性がわかったので、更に次の測定が進められ、その配向が証明された。

1) 赤外吸収スペクトル測定 [16]

42. 7. 1 配向がありその弱→強の順は 4 種の試料で、SF, HE 60, ZE 31, 5505 (サーモ) の順である。

43. 4. 25 730 cm^{-1} で $D_{\parallel} < D_{\perp}$ のものがあった。SF, XE65, HE 60。

2) X線回析測定 [17]

高圧ポリエチレンの結晶化度約 60% であることを利用し、ポリエチレン皮膜の結晶配向度を X 線回析により測定している。XE 65, HE 60 が比較的良好。融液から皮膜の延伸過程において冷却されるが、延伸時の捲速を速くし、また風速を大にして冷却速度を増大させると結晶配向度が小さくなることが討議された。

3) X線極点図形による解析 [18]

成形条件を変えたポリエチレン皮膜の X 線による極点図形を得、(200): a 軸配向, (020) b 軸配向より 45-6-3 皮膜のよいことを示している。

4) 結晶化度に関する DSC 測定 [19]

融解温度、結晶化温度について、ZE 31 が HE 60 より高い結果を得ている。絶対値を出すには完全結晶が必要である。

9. 成形パラメータ [20]

インフレーション成形で気球用ポリエチレン皮膜が成形されるが、通常成形パラメータとしてインフレーション比 a/c がとられているが、縦横加工比 (forming ratio) として定義される b/a をとる方が現象の表示に便利で、 $b/a \rightarrow 1$ により縦横の異方性を少なくする傾向が認められる事が示された。ただし、 c : 溶解ポリエチレンの面素の一辺の長さ、 $a, b : c \times$

c の面素が辺長 a , b の矩形, 厚さ t の皮膜に固化すると仮定する辺長. e : ダイス隙間, t : 膜厚, ρ_0 , ρ : 溶解状態と常温に固化したポリエチレンの密度. $a/c = \alpha$, $b/a = \beta$

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{e}{t} \cdot \frac{1}{\alpha^2} \cdot \frac{\rho_0}{\rho}$$

縦横加工比は以後成形パラメータとして, 成形された皮膜異方性の解析に有効であった.

10. インフレーション成形の基準

成形は -80°C ϵ_T の小さい値を改善し, 直交異方性を少なくする方向でその基準が逐次検討された. ダイスに関する検討は懇談会内の担当グループ (西村, 藤井, 岡本, 他にメーカー側) で進められた. 一例を挙げれば 70. 1. 14 の相該会では, 直径 300ϕ , リップ 0.6, 0.8, 1.0, インフレーション比 4.2, 折径 2 m, リップ 0.8 とすると縦横加工比 1.8, 予想収縮比 1 程度のもを検討している [21]

二軸方向に延伸するための種々の検討が進められた:

1) プラスチック・フィルムの延伸について (二軸配向のための条件) [22].

二軸配向を実現するためには, フロスト・ラインの所でバブルが球形に近くなればよいことが理論解析の結果導かれた.

2) 低温二軸延進皮膜の成形の条件について

分子鎖の縦横配向比及び結晶配向の観点から考察を進め, 標記の皮膜を得るための条件として, 縦横加工比 $\beta \rightarrow 1$ とすること, b 軸の大多数を膜面に極力垂直に配向すること (b 軸則として帰納), この為には $\alpha = 5 \sim 6$ にすればよいことが Lindenmeyer の研究 [23] より推測されるので, これに近い値をとらせることなどを導いている [18].

3) M. I. について

M. I. は分子量の一つの目安で, M. I. の小さいことは分子量の大きいことを意味する. 5505 では M. I. は 0.75 であった. SF の良好な力学的特性は知られているが [24], M. I. は比較的低い. M. I. = 0.15 の DFDJ 6775M のような分子量の比較的大きいペレットにより 45-6 系皮膜のように伸びの大きい結果を得ている [25][26].

11. 皮膜の力学物性測定

1) 単軸引張り

気球皮膜の受ける応力は引張り応力が主であるから, 単軸引張りが最も基本的なもので, 皮膜の評価に主用している. 降伏点及び破断での応力, 伸びが主に計測され, ヤング係数 E も必要に応じ測られる. 温度は室温 (20°C) と -80°C が基準としてとられている. 後者は LN_2 を気化して試験室に吹込む方式で方式として確立されている (例: [31]). 試験片は M 方向, T 方向の両者を少なくともとる必要がある. 単軸引張り試験により, 低温脆性などにおける異方性が明かにされ, 初期においては $\epsilon_T (-80^\circ\text{C})$ の特に小さいことが改良すべき問題点として指摘された [15] ことは 7. に既述の通りである. 以後各種成形条件による皮膜が本法で測定され [12][14][25][27]~[29], 例年大気球シンポジウムに報告されている. 成形法は別項のように逐次改善された. 例えば 6775-M での低温引張り伸びは十分

満足すべき域に到達している [28]. 成形条件によってポリエチレン皮膜の低温での破断応力はほとんど変らぬのに対し, $\epsilon_T(-80^\circ\text{C})$ は著しく向上し得, 破断までの吸収エネルギー $\int \sigma d\epsilon$ (靱性) の向上が気球破壊率の低下にきわめて有効であることが分析されている [30].

-80°C での ϵ_T (ϵ_M は十分大きいとして)の許容限界としては, Hauser (NCAR) らは20%程度と考えている. 著者らの10年間の経験によると, 20%ではよいが更に余裕を見て最低50%に抑えるのがよいのではなかろうか.

試片形状としては通常の平行部とフィレットよりなる型がスクリーニングに主用され, 特殊な研究用には, 規格にこだわらず特殊の形状も用いられる [31][32].

2) 二軸引張り

二つの方法: *a*) 周辺固定円板試片に側圧を加える方法, *b*) 円筒の内圧, 引張り同時負荷による方法, が用いられている. それぞれをダイアフラム型, シリンダー型と呼ぶこともある. *a*), *b*) を低温での二軸試験として用い, 同じペレットでも成形条件で脆化温度に差の出ることが結論されている [33].

a) により二軸引張りでの破断応力, 伸びを求め, 単軸引張りに比し, 一般に小さい値を得ることが示されている [31][32]ので設計上注意が必要である. ナイロン-12の二軸引張り及び同疲労にも用いられている [34][35].

b) は降伏基準の研究に特に有用である [31][32].

3) 落下鋼球による動的破断 (cold brittleness test)

低温での皮膜の延性又は脆性を定性的に見るのに用いられる [25]. 高さ91.5cm, 横方向距離53cmの斜面の下端に15Rをつけた斜面を 2ϕ , 11bの鋼球を落下させ, 斜面の末端で周辺固定皮膜円板の中央に衝突させ, 生じた破面全長の和が或る限界値 l_0 (tear length) より大又は小となることにより脆性又は延性と判定する方法で, 1972. 8. 28の実験[36]によると, -80°C で Visqueen, SF, 6775, ZE, HEは延性であったが, -90°C ではSFのみ延性, -100°C では45-6-3フィルムがなお延性である結果を得ている.

4) 引きき

あらかじめ割れ目を入れた試片の引張りにより, 割れ目伝播抵抗 r を測定する方法で, 割れの進行方向と異方性の関係 [37], M , T 方向についての r_M , r_T の両者について, 割れ目直進時は小さく, それる場合が大きいので, 割れ目がそれるように成形条件を調整するのがよいこと [38]が知られている. 皮膜材料により r の小さいものがありこれらは使用上割れの原因となる引かき傷などに特に注意を要する(14参照).

5) 熱変形収縮試験

1968年 NUC, 50×50 試片, グリセリン浴 (130°C), 1970年以降大日本樹脂 KK, 100×100 , グリセリン浴 ($120^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, 5秒)での熱変形収縮観察例がある [39]. このとき5505 M 方向収縮が T 方向に比しかなり大きいことを知った. Visqueen は正方形に収縮した. 試片を円形にしての試験も行われている ([20]: 熱風, [40]グリセリン浴).

12. 皮膜材料の降伏基準

ポリエチレン皮膜の降伏基準が円筒の内圧, 引張り同時負荷による二軸引張りでの引張り一

引張り域について求められ、大半の金属と似て、拡張ミーゼス則に従うことが明かにされている [31][32].

13. 気球皮膜の性能と飛揚結果 [30]

西村研究室藤井氏提供の昭和41~46年度の飛揚結果のデータによると、国産フィルムによる気球破壊率は昭和42年度の31.5%をピークに漸減、昭和45、46年度は共に0となり、以後この傾向が続いている。

この間の皮膜材料や構造設計上の変遷は第1表の通りである。

第1表 昭和41~46年度の気球皮膜の変遷など

1. 気球破壊の原因には気球材料と設計の両者が関係していると考えられる。
2. 42年度：材料は5505、 -10°C で脆化、 -80°C での $\epsilon_T \cong 7\%$ できわめて低い。設計面では、エスケープ・チューブが頭部より出ており、折曲り部の破壊と思われるデータが多い。
3. 43年度：材料は5505、一部SF導入。エスケープ・チューブは下方へ移す。
4. 44年度：材料は6775 ($-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ で脆化)が登場。 -80°C での ϵ_T は大となった。SFはB₁₅以上に使用。この年度において気球性能は格段に安定化した。
5. 45年度：新ダイスにより6775性能向上 (-40°C 脆化)。切離し後気球の生残りが多くなり、積極的に気球を引裂く必要性が問題となって来た。
6. 46年度：6775-M登場。 -80°C $\epsilon_T \rightarrow 200\%$ となり、少なくともB₁₅までは国産で十分だと思われる。冬(地上、 -5°C)での放球も問題が起きていない。

この間の皮膜材料の力学的性質の変化の大勢を検討すると、主要な力学的性質としてとっている 20°C 及び -80°C での σ_M , σ_T , ϵ_M , ϵ_T についていえば、強度 σ については著しい変化はなく、 -80°C での ϵ_T が7%から200%に向上したのが著しい差異である。NCARでは前出のように、この値は20%以上という一応の基準を設けている(Dr. Hauser)が、我が国の現状はこれを遥かに越えている。我が国の例でも20%を越えた辺りから気球の破壊が激減しているので、20%という基準は一応うなづけるが、我が国としては50%辺をとるのがよりよいと考えられる。

皮膜の破断までの吸収エネルギー：靱性 ($\int_0^{\epsilon_b} \sigma d\epsilon$, toughness) については、5505を1とすると、6775で4~7、6775-Mで29となっている。気球の上昇中の破壊の原因は10数km辺の高度でのwind shearによる動的負荷によるものが多いとすれば、この吸収エネルギーの上昇により、動的擾乱により材料が破断に至る前に擾乱が減衰し、結果においてその環境を通過し切抜けている状況が考えられよう [30]。従って、皮膜の強度の変化がほとんどなく、伸び又は靱性が向上したことにより破壊がほとんどなくなった事は、気球破壊の主因を上述のように考えることを支持するものであろう。

更に破壊率と皮膜縦横加工比との関連も検討が進められている [18].

14. ポリエチレン以外の新材料について

ナイロン-12は従来 zero pressure 用として利用して来たポリエチレンより強度が大きく、super pressure 用として検討されている [34][35][29]。ただし、低温(-80°C)での引裂き抵抗がポリエチレンに比し小さい [41] 点注意を要する。伸びも成型条件により小さいことがあるので、これも成型条件の検討を要しよう。

15. 結 言

最近10年間の気球皮膜材料研究の進展の様態を概観した。我々としては、研究開始の当時目標としたことは基本的にほとんど達成したと考えている。

本原稿作製に当り、ご討議頂いた西村教授、資料を頂いた藤井氏、種々ご助力ご協力頂いた橋本、本堂氏、生研岡本氏、末筆ながら一々記さないが気球材料懇談会のメンバーの方々に厚くおん礼申上げる。

1975年7月3日 材料部

参 考 文 献

- [1] 河村竜馬：気球についての空気力学的考察，東大宇宙研報告，2-1(C)(1966/3)，398。
- [2] 西村純：気球概論，東大宇宙研報告，2-1(C)(1966/3)，364。
- [3] 河田幸三：気球の材料と強度について，東大宇宙研報告，2-1(C)(1966/3)，409
- [4] T. W. Bilhorn：Balloons for Scientific Research，Astronautics and Aeronautics，(Dec.，1965)，42
- [5] 藤本陽一，長谷川俊一，西村純，円生潔他：プラスチック気球についてI，東大核研(1962/10)。
- [6] 荻田直史：気球の自然形，東大宇宙研報告，2-1(C)(1966/3)，403。
- [7] 奥平清昭，玉井英次，中川重雄，藤田文章：宇宙線研究に使われる大型気球，日本物理学会誌，11-8(1965/8)，275。
- [8] 西村純，太田茂雄：気球の水モデル破壊テスト，東大宇宙研報告，3-2(B)(1967)，379。
- [9] 西村純他：B₂₀₀-1号機飛しょう性能試験，同上，10-1(B)(1974)，89。
- [10] 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，東大宇宙研報告，9-1(B)(1973/3)，142。
- [11] 河田幸三：気球皮膜の歪測定，大気球シンポジウム論文集(1966/11)，52。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，東大宇宙研報告，3-2(B)(1967)，398。
- [12] 河田，小林，橋本，本堂，大谷：ポリエチレン皮膜の強度と二，三の気球ひずみ測定実験について，大気球シンポジウム(昭和42年度)論文集(1968/1)，25。
- [13] 西村純，太田茂雄，大塚豊：気球内圧の測定，大気球シンポジウム論文集(昭和41年度)(1966/11)，58；同(昭和43年度)(1968/11)，30。西村純，広沢春任，太田茂雄，藤井正美，大塚豊，奈良禱徳：気球用塔載機器，東大宇宙研報告，4-1(B)(1968/3)，111。
- [14] 河田，小林，橋本，大谷，本堂：ポリエチレン皮膜の強度と気球飛しょう時の皮膜ひずみ測定，東大宇宙研報告，5-1(B)(1969/3)，106。
- [15] 河田：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，大気球シンポジウム論文

- 集(1966/11), 44.
- 河田, 橋本, 本堂, 佐藤: 東大宇宙研報告, 3-2(B)(1967/6), 385.
- [16] 倉谷健治: 気球材料懇談会メモ(42.7.1, 43.4.25); cf. 藤井正美: 気球皮膜材料に関するメモ(45.2.10).
- [17] 小原嗣朗: 気球材料懇談会メモ(昭和43年) cf. 藤井: 気球皮膜材料に関するメモ(45.2.10); 岡本智: 東大宇宙研報告, 7-1(C)(1971), 240 に引用.
240 に引用.
- [18] 岡本: 科学観測気球の信頼性の向上, 生産研究, 27-4(1975/4), 153. 岡本: 球皮用フィルムの縦横加工比と気球の上空破壊率および極点図形について, 東大宇宙研報告, 11-2(B)(1975), 435.
- [19] 神戸博太郎: 気球材料懇談会メモ(42.3.25, 42.6.30).
- [20] 岡本: 気球材料について, 大気球シンポジウム論文集(1966/11), 39.
岡本: ポリエチレンフィルムの強度異方性におよぼす因子, 東大宇宙研報告, 3-2(B)(1967/6), 402.
- [21] 藤井のメモによる.
- [22] 西村: 気球材料懇談会メモ(1967.2.8).
- [23] P. H. Lindenmeyer et al: J. Appl. Polymer Sci., 9(1965), 227.
- [24] 例えば, [14] 参照.
- [25] 河田, 橋本, 本堂, 佐藤: ポリエチレン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, 東大宇宙研報告, 7-1(C)(1971/3), 227.
- [26] 岡本智: 気球用ポリエチレンフィルムの開発, 東大宇宙研報告, 7-1(C)(1971/3), 240.
- [27] K. Kawata, J. Nishimura, M. Fujii, S. Okamoto, S. Hashimoto, A. Hondo: Materials for Balloon Use, Proc. Ninth International Symposium on Space Technology and Science, (Tokyo, 1971). 1089.
- [28] 河田, 橋本, 本堂: 気球皮膜材料の試験法についての二, 三の考察, 大気球シンポジウム論文集(昭和47年度)(1973/3), 44.
- [29] 河田, 橋本, 本堂: 49年度気球フィルムの力学特性について, 大気球シンポジウム論文集(昭和48年度)(1974/2), 13.
- [30] 河田, 橋本, 本堂: 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, 東大宇宙研報告, 9-1(B)(1973/3), 138.
- [31] 河田, 岡本, 橋本, 本堂: 気球用皮膜材料の二軸応力下の降伏基準と低温引張り破断について, 東大宇宙研報告, 10-1(B)(1974/3), 100.
- [32] K. Kawata, S. Okamoto, S. Hashimoto, A. Hondo: On the Yielding Fracture Criterion of Balloon Film Materials under Biaxial Stresses, Proc. the Tenth International Symposium on Space Technology and Science (Tokyo, 1973), 1215.
- [33] 西村, 藤井: 未発表. 西村研におけるスクリーニング・テスト.
- [34] 福嶋裕, 原俊雄, 堀口太積, 五十嵐真之, 宮垣盛男: 重荷重気球皮膜としてのナイロン-12 フィルムの特性, 東大宇宙研報告, 9-1(B)(1973/3), 159.
- [35] 福島裕他: ナイロン-12 フィルムとポリエチレンフィルムの二軸引張り試験, 大気球シンポジウム論文集(昭和48年度)(1974/2), 17.
- [36] 西村, 藤井: 未発表.

- [37] 河田, 橋本, 本堂, 奥原久和: 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論文集 (昭和49年度), (1974/12), 11.
- [38] 同上: 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論文集 (1975/2), 13.
- [39] 西村, 藤井他: 未発表.
- [40] 岡本: 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, 東大宇宙研報告 6-1 (C) (1970/3), 273.
- [41] 河田, 橋本, 本堂: 未発表.