

独立行政法人

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1457

飛行船用膜材料のひずみ計測と高温における接合部強度評価

角 田 義 秋 ・ 小 松 敬 治 ・ 佐 野 政 明

2003年3月

独立行政法人 航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY OF JAPAN

目 次

概 要	1
1. まえがき	2
2. 膜材料のひずみ計測	2
2.1 膜材料と試験片	2
2.2 試験方法	3
2.3 ビデオ式非接触伸び計	3
2.4 ひずみゲージ法	4
2.5 実験結果と考察	4
2.6 ひずみ計測における問題点	6
2.7 ひずみ計測のまとめ	7
3. 膜材料の引張強度および接合強度の温度依存性	7
3.1 膜材料と試験片	7
3.2 試験方法	7
3.3 試験結果と考察	7
3.3.1 膜材 B 4 の保持時間の影響および母材 (L) の引張強度	7
3.3.2 膜材 B 5 の引張強度および接合強度の温度依存性	7
3.4 まとめ	9
参考文献	9

飛行船用膜材料のひずみ計測と高温における接合部強度評価*

角田 義秋*¹ 小松 敬治*² 佐野 政明*³

Strain and Joint Strength Measurement for Airship Envelope Materials in High Temperature*

Yoshiaki KAKUTA*¹, Keiji KOMATSU*², Masaaki SANO*³

ABSTRACT

Materials ideal for use in pressurized non-rigid airship envelopes would have the following properties: (1) High strength to weight ratio, (2) Resistance to environmental degradation, (3) High tear resistance, (4) Low helium permeability, and (5) Strong, reliable joints not subject to creep. For the stratospheric airship platform, the temperature environment is estimated to be from -80°C to 80°C (maximum under solar cell layer). There has been a need therefore for basic strength data recorded under these conditions.

In this report, the validity of the video extensometer was evaluated by comparing it with the strain-gage method for the use of envelope material tests at high temperature. Tensile strength and overlap joint strength tests were then conducted at 20 (RT), 40, 50, 60, and 80°C . The stress-strain relationship and fracture properties for envelope materials were investigated.

Keywords: airship, envelope, materials, video extensometer, strain-gage, tensile strength, overlap joint, temperature

概 要

成層圏プラットフォーム飛行船は、高度 20 km の成層圏へ到達させるため、高・低温度環境、熱衝撃サイクルや直射日光による紫外線暴露などを受ける。飛行船の主構造材料には、軽量・高強度な膜材料が候補に挙げられ、これらの環境下における基礎的な強度特性データの取得が求められている。

本報告においては、膜材料のひずみ計測を検討するため、ビデオ式非接触伸び計の導入と従来のひずみゲージ法の両者を比較した。次にこのビデオ式非接触伸び計を採用して、飛行船の膜材料について重要な高温(最高 80°C まで)における引張強度と接合強度の温度依存性、荷重-ひずみ線図、および膜材の破壊挙動などを調べた。

* 平成 15 年 2 月 17 日受付 (received 17 February, 2003)

* 1 先進複合材評価技術開発センター (Advanced Composite Evaluation Technology Center)

* 2 構造材料研究センター (Structures and Materials Research Center)

* 3 成層圏プロジェクトセンター (Stratospheric Platforms Project)

1. まえがき

成層圏飛行船プラットフォームは年間を通じて風の少ない高度 20 km あたりの成層圏に飛行船を滞留させて人工衛星のように通信・観測に使用することを目的とする構想^{1,2)}である。飛行船の主構造用材料としては、繊維を強度層とする積層膜材料が使われるが^{3,4)}、ポリウレタン系の保護層を採用する膜材の場合、特に高温強度(クリープ強度を含む)、それも接合部強度がシステム全体の設計強度を支配する。よって膜材のひずみ計測がさまざまな条件下で実行できなければ膜材強度が十分に評価できない。

膜材は等方性の金属材料と違い異方性が強い。また、膜厚が約 0.13 ~ 0.23 mm と非常に薄い。このような薄膜材料に対するひずみ計測は、ひずみゲージや差動トランス式変位計をそのまま適用できない。すなわち、ひずみゲージ法はひずみの追従性、接着剤の選択、ゲージ貼付による補強効果の影響などを把握する必要がある。差動トランス式変位計は器具自体が重く、取り付け方法が薄膜に対してナイフエッジ方式などの問題を抱えている。ひずみ計測には、さらに高・低温度環境下での試験において、薄膜材料に直接的な影響を与えないで使用可能な計測機器等が要求され、その候補としてビデオ式非接触伸び計の導入を試み、ひずみゲージでその検証をおこなった⁵⁾。

飛行船は、成層圏において1日1回の熱サイクルを受けるものと想定されている。すなわち、高度 20 km に滞空予定の飛行船は、夜間が約 -60°C、日中が直射日光による太陽電池裏面で最高約 80°C の熱環境である。飛行船は運用中にこのような温度環境に繰り返し曝されるため、これらの環境下における基礎的な強度特性のデータ取得が

求められている。従って、構造用膜材料の基礎的な引張強度、接合強度、膜材料の変形挙動および強度の温度依存性等を把握することが重要な研究課題となる⁶⁾。

本報告は、飛行船膜材料のひずみ計測としてビデオ式非接触伸び計および従来のひずみゲージ法の2方式を用いて、両者の比較・検討を行うと共にそれらの運用上における問題点を明らかにした。また、このひずみ計測法を採用して、膜材について引張強度および接合強度に対する高温側の温度依存性(室温, 40, 50, 60, 80°C で実施)、荷重~ひずみ線図、膜材の破壊挙動などを調べたので合わせて報告する。

2. 膜材料のひずみ計測

2.1 膜材料と試験片

供試材料は、飛行船の主構造用候補材料の1つとして取り上げられたポリアリレート繊維(商品名:ベクトラン)を強度層とする膜材料である。繊維の機械的性質を表1に示すが、密度が 1.4 g/cm³ と小さい。

著者の佐野らはこれまで多くの組み合わせで膜材を試作しているが、その中で今回試験に用いた膜材 B4 と B5 の積層構成と仕様を表2に示す。表2に見られるように膜厚がそれぞれ約 0.23 mm, 0.13 mm と非常に薄い。積層構成は強度層、ガスバリア層、保護層、それに各層間に接

表1 膜材料繊維の機械的性質

材料名	ベクトラン
メーカー	備クラレ
密度 (g/cm ³)	1.4
引張強度 (GPa)	3.6
弾性率 (GPa)	83.4
伸び (%)	3.9

表2 積層構成と仕様

膜材 B4(ベクトラン)		膜材 B5(ベクトラン)	
220 dtex	102 g/m ²	110 dtex	30 g/m ²
(t=0.23)	(270 g/m ²)	(t=0.13)	(120 g/m ²)

着剤が配置された組み合わせである。強度層には先に述べたようにポリアリレート繊維、ヘリウムガスのバリア層としてはエチレン・ビニルアルコール共重合樹脂 (EVOH樹脂, 商品名: エバール) フィルム, また強度繊維層とガスバリア層を保護するためにポリウレタンをそれぞれ採用している。

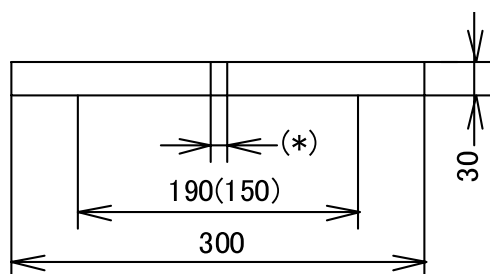
試験に用いた膜材 B 4 は, 母材 (L: ロール縦方向) 試験片を用いて, 室温 (RT) 環境下におけるひずみ計測法について評価した。試験片の大きさは, 長さ 300 × 幅 30 mm で, その形状を図 1 に示す。

2.2 試験方法

薄膜材料に対するひずみ計測は, ビデオ式非接触伸び計と金属材料で実績のあるひずみゲージの 2 つの方式を比較した。引張試験は, 荷重容量 100 kN のデジタル油圧サーボ式疲労試験機 (インストロン社製) に, 最大荷重 5 kN のロードセルを取り付けて実施した。

膜材料の強度は, 金属材料と異なって試験片の形状, 負荷条件, 試験片のグリップ方法等によって大きな影響を受けるようである。膜材料の引張速度は, JIS K 1096 に準拠して 200 mm/分とした。試験片のグリップ方法は, 推奨されているエアーチャック方式だと高・低温環境の試験を実施する上で問題となるため, 特殊なグリップ・フェイス (高温用ブレーキライニングフェイス) を採用した。

試験状況を図 2 に示すが, 右側がビデオ式非接触伸び計, 左側が試験片とチャック部, その後方が温湿度環境槽 (タバイエスベック製) である。環境槽は, 槽内の大きさが幅 380 × 高さ 600 × 奥行 380 mm で, 試験可能な温度範囲が $-70 \sim 150^{\circ}\text{C}$ までとなっている。高温環境下での引張試験および破断状況の一例を図 3 に示す。槽内の照明は, 装置備え付けの電球と観測窓の外側から蛍光灯を準備した。試験片の破断は, 特殊なグリップ・フェイスを採用したため, チャック部際からでなく全て評定部で生じている。



(*) は、接合試験片の接合幅 B を示す。
膜材料 B5 (ベクトラン) の場合は B=20

図 1 膜材試験片の形状

2.3 ビデオ式非接触伸び計

ビデオ式非接触伸び計 (島津製作所製: モデル DVE-200) は, 試験片表面の標点間距離 190 mm (または 150 mm) の位置に貼付したシール式標線を 2 台の CCD カメラで監視し, 負荷荷重の増加に伴って移動する標線画像の変化量を計測するものである。荷重～変位曲線は, 測定された標点間移動量であるアナログ出力と試験機からの負荷荷重, これら 2 つの信号を取り込むことによって得られる。実際のひずみは, 測定された変形量を最初の標点間距離で補正することによって導かれる。ビデオ式非接触伸び計の較正曲線を図 4 に示すが, 0 ~ 30 mm まで良好な線形関係が得られている。本ビデオ式非接触伸び計は, 薄膜材料の試験片と約 600 mm の間隔を保って計測できるた

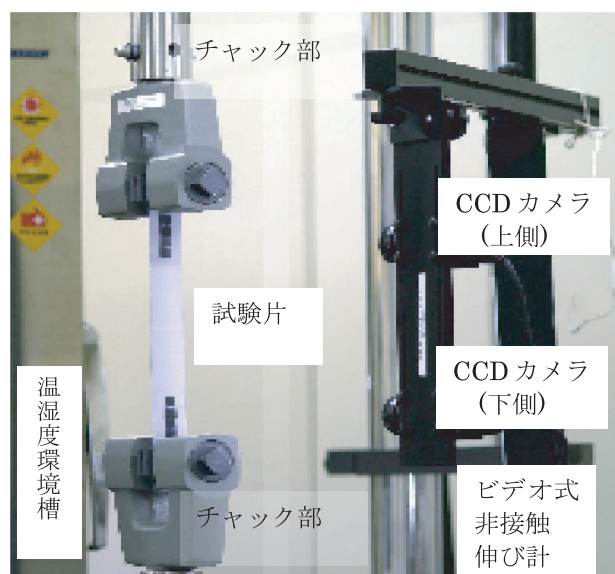
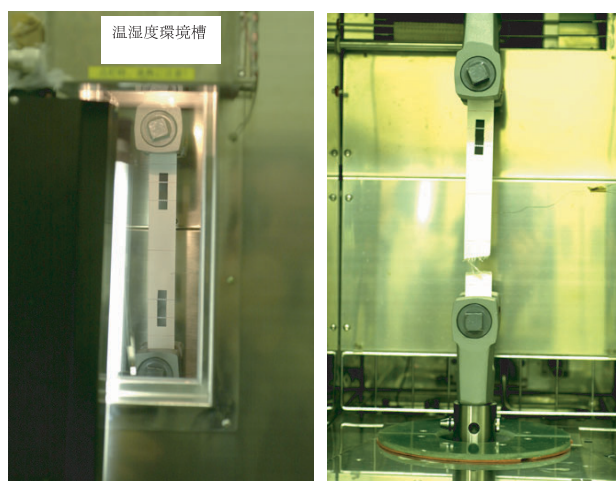


図 2 試験状況



(a) 高温試験の様子

(b) 槽内での破断例

図 3 高温環境下での引張試験および破断状況

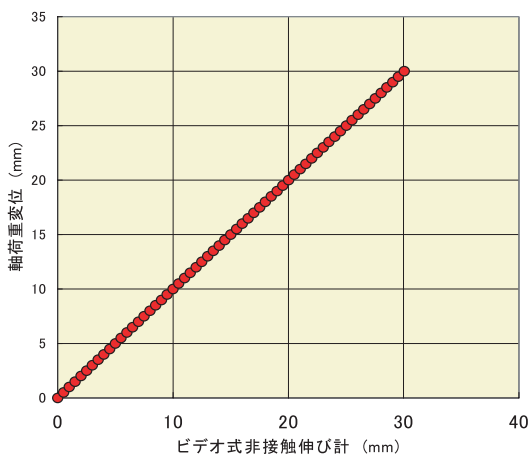


図4 ビデオ式非接触伸び計の較正

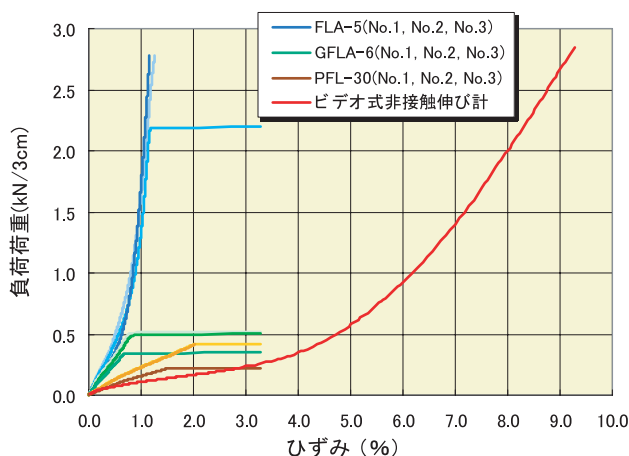


図5 膜材料の荷重～ひずみ線図

め、試験片に対して有害な影響を直接与えない。従って、高・低温度環境における静強度試験への適用が可能である。膜材 B 4 におけるひずみ計測の標点間距離は、RT の試験だと比較的大きめな 190 mm の設定が可能である。

2.4 ひずみゲージ法

薄膜材料に対するひずみは、ひずみゲージ法によって測定することが可能かどうか、次の4項目について検討した。

1) ひずみゲージの選択

ひずみゲージは、一般用ゲージ FLA-5、プラスチック用ゲージ GFLA-6、ポリエステル箔ゲージ PFL-30 の3種類と、さらに塑性域ゲージ YFLA-5 を追加して比較した。

2) 接着剤の選択

接着剤の評価は、同一の塑性域ひずみゲージ YFLA-5 を用いて、シアノアクリレート系の CN(No. 1)、特殊シリコーン変成ポリマーのスーパー X(No. 2)、クロロプレンゴム系の N-1(No. 3) など3種類について比較した。

3) 接着表面の影響

接着表面の影響は、試験片の表面被膜(ポリウレタン)にひずみゲージをそのまま貼付した場合と、ポリウレタン層を除去して基布面(ベクトラン繊維)に直接貼付した場合について比較した。

4) 補強効果

補強効果は、試験片の片面に貼付したひずみゲージと、同一箇所の表裏面に貼付したひずみゲージの場合について比較した。

2.5 実験結果と考察

1) ひずみゲージの選択

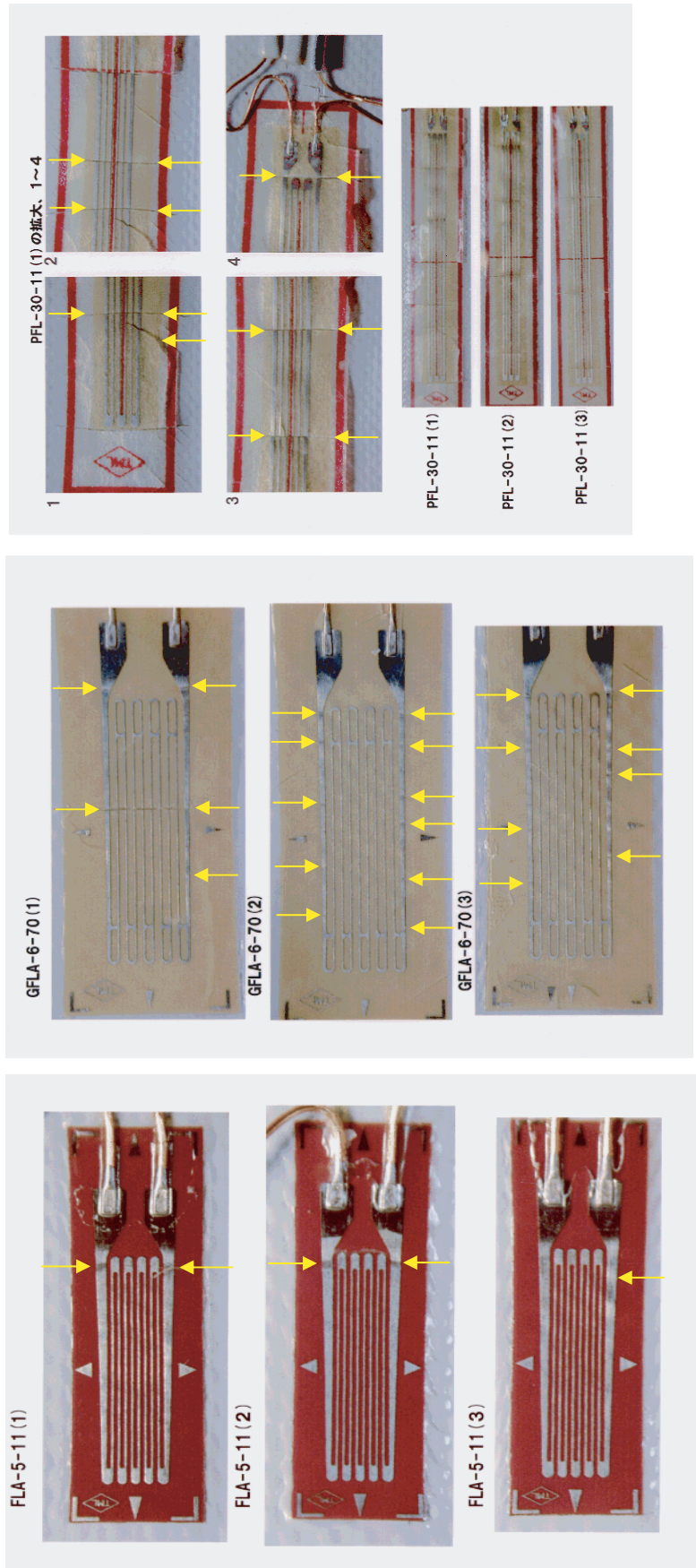
ひずみゲージ FLA-5、GFLA-6、および PFL-30 の3種類と CN 接着剤によって評価した膜材料(膜材 B 4)の荷重～ひずみ線図を図5に示す。その結果、各ひずみゲージは

FLA-5 の No. 3 が 1 % 強、GFLA-6 の全てが 1 % 未満、PFL-30 の全てが 1.5 ~ 2 % 強のひずみ値で、それぞれ断線を生じることが明らかになった。ひずみゲージの断線状況を図6に示す⁷⁾。一般用ゲージ FLA-5 は、ひずみゲージ3種類の中でゲージの断線箇所が最も少なく、リード線タブ部近傍で断線が見られた。プラスチック用ゲージ GFLA-6 とポリエステル箔ゲージ PFL-30 は、ひずみゲージ全面にわたって断線が多く認められた。

ビデオ式非接触伸び計では、これら断線したひずみゲージに対応する試験片のひずみ量として、約 3 ~ 5 % と計測された。この大きなひずみ値は、負荷荷重が比較的低いにもかかわらず、膜材料の編み目交差におけるたるみ部分が最初に変形を生じるためと考えられる。また、ひずみ感度としては3種類のひずみゲージで評価したが、ゲージ・ベースの長い PFL-30 が比較的良好な測定結果を得た。これはゲージ・ベースの長さだけでなく、ベース素材(和紙)の相違によってひずみの計測感度へ影響を及ぼしたもののなのか、さらに詳細な検証を行う必要がある。

大変形する膜材料に対しては、普通のひずみゲージを使用すると断線を生じてひずみ計測が不能になることが確認された。したがって、それ以後の試験では、降伏域まで使用可能な塑性ゲージ YFLA-5 に変更して評価した。その結果、図7に示すように試験片の最終破断近傍まで全て測定できた。塑性ゲージは、ビデオ式非接触伸び計のひずみに比べて大きな相違を示すが、約 4.7 倍の補正値を用いるとほぼ等しくなる。このことから、ひずみゲージ法はビデオ式非接触伸び計との相関関係を予め求めておけば、取得データの補正によって膜材料のひずみ評価に適用することも可能である。ただし、ひずみゲージは、ある特定位置の小さな領域を測定しているため、膜材料の破壊位置とひずみ測定箇所が一致しない場合、最終的に不正確なひずみ値となる。

2) 接着剤の選択



(a) ひずみゲージ FLA-5 の場合

(b) ひずみゲージ GFLA-6 の場合

(c) ひずみゲージ PFL-30 の場合

矢印は、ひずみゲージの断線位置を示す。

図6 ひずみゲージの断線状況

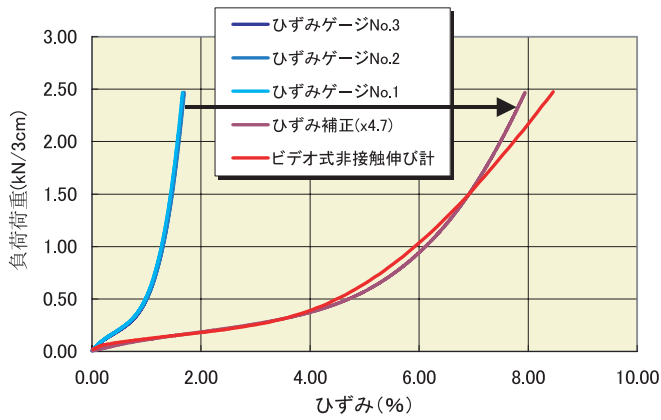


図7 ひずみゲージとビデオ式非接触伸び計の関係

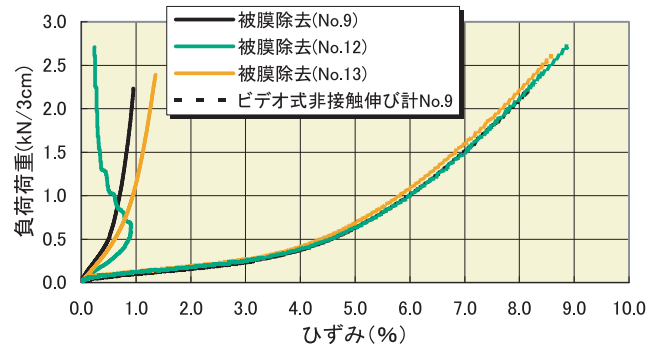


図9 接着表面の評価

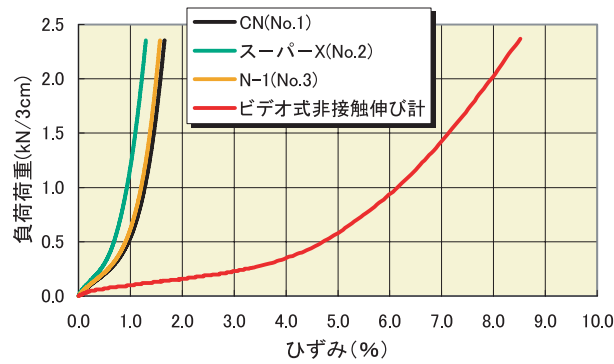


図8 接着剤の評価

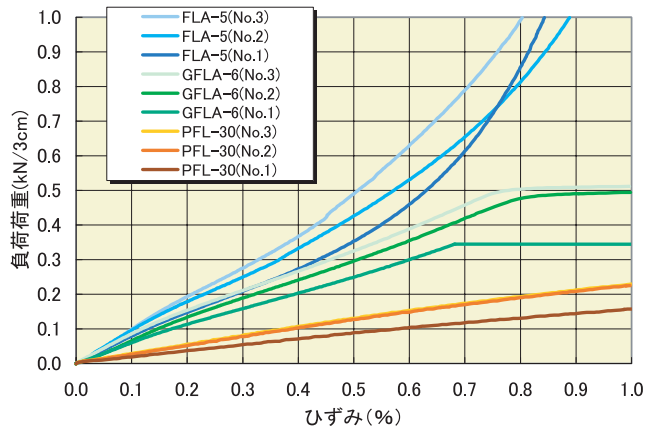


図10 ひずみゲージによる補強効果の評価

接着剤 CN, スーパー X, および N-1 の 3 種類と塑性ゲージ YFLA-5 によって評価した膜材料(膜材 B 4) の荷重～ひずみ線図を図 8 に示す。接着剤としては, CN と N-1 が若干良いひずみの追従性を示すが, それ程大きな差でない。この結果から, これ以後のひずみ評価試験においては, 取扱いの簡単な瞬間接着剤 CN を採用した。

3) 接着表面の影響

膜材料最外層のポリウレタンを除去したベクトラン繊維面に直接貼付したひずみゲージによって評価した荷重～ひずみ線図を図 9 に示す。接着表面の影響は, ポリウレタン表面とベクトラン繊維面ではほぼ同じひずみ値が計測されるため, 両者にそれほど顕著な相違が認められない。ただし, 瞬間接着剤を使用した場合には前者だと接着剤が均一に塗布されるが, 後者だと繊維間に接着剤の浸透むらが認められた。その結果, ベクトラン繊維面に直接貼付したひずみゲージが, 試験の途中で剥離を生じる場合もあった(図 9 のひずみゲージ No. 12)。

4) 補強効果

補強効果は, ひずみゲージ FLA-5, GFLA-6, および PFL-30 の 3 種類と CN 接着剤によって, 試験片の片面 (No. 1) および同一箇所の表裏面 (No. 2 と No. 3) に貼付し

たひずみゲージで評価した。膜材料(膜材 B 4) の荷重～ひずみ線図を図 10 に示す。3 種類のひずみゲージにおける各 No. 2 と No. 3 は, 同程度のひずみ値を示した。負荷荷重が一定として評価すれば, 表裏面ひずみゲージ (No. 2, No. 3 : ひずみゲージ 2 枚) の方が片面ひずみゲージ (No. 1 : ひずみゲージ 1 枚) に比べてひずみが小さく計測された。従って, ひずみゲージは 2 枚貼付した方が 1 枚貼付に比べてひずみ感度が低くなるため, 補強の影響が認められる。

なお, 石田らはひずみゲージ近傍を有限要素法によって解析し, その応力状態を明らかにしている⁸⁾。

2.6 ひずみ計測における問題点

ビデオ式非接触伸び計は, 測定機器自体の問題点としてでなく, 運用上の改善として次の項目が挙げられる。

- (1) 観察窓は, 環境槽の高・低温度設定時に結露による曇りを生じる場合がある。
- (2) 観察窓は, 環境槽における槽内の大きさによって制約されるため, 試験片のひずみ測定範囲が限定される。
- (3) 試験片への照明は, 均一で十分な光量を確保する必要がある。

ひずみゲージは、膜材料のような特殊材料に適用する場合、ゲージ・ベースの素材、接着剤の種類、および箔ゲージ素材などの検討が予め必要となる。

2.7 ひずみ計測のまとめ

膜材 B 4 (ベクトラン) を用いて、以下の知見を得た。

- (1) ビデオ式非接触伸び計は、膜材料のひずみ計測に有効であることが確認された。
- (2) ひずみゲージ法は膜材料のひずみ計測に不向きであるが、ビデオ式非接触伸び計との相関関係を予め求めておけば、取得データの補正によって使用できる可能性がある。

3. 膜材料の引張強度および接合強度の温度依存性

ビデオ式非接触伸び計を用いて膜材料の引張強度および接合強度の温度依存性を評価した。

3.1 膜材料と試験片

供試材料は膜材 B 4 に加えて膜材 B 5 も採用し、母材 (T: ロール横方向)、接合 (L) および接合 (T) 試験片を用いて、それぞれ引張強度の温度依存性を調べた。膜材 B 5 の場合はひずみ計測の標点間距離を 150 mm とした。これは高温環境下での試験を実施する際、環境槽の観測窓によって制約を受けるため、室温の場合に比べて標点間距離を短く設定した。接合部の評価は、試験片 (長さ 300 × 幅 30 mm) の大きさに対して、評定部中央の箇所まで接合幅 20 mm を一定として実施した。

3.2 試験方法

引張試験は、2.2 試験方法で述べた同じデジタル油圧サーボ式疲労試験機を使用し、負荷速度として 200 mm/分 で実施した。

高温環境については、温湿度環境槽 (タバイエスベック社製) を使用して、40、50、60、および 80°C の温度における強度評価試験を実施した。なお、高温環境における膜材料の強度試験は、設定温度に到達してからどの時期で試験を実施すればよいか、予め確認しておく必要がある。保持時間の影響は膜材 B 4 を用いて調べた。環境槽が設定温度に到達してから、試験片を試験機に取付ける。次に環境槽が再度の設定温度に達した後、その 10 分および 20 分経過後の 2 例について調べた。

膜材料のひずみ計測には、金属・複合材料などで実績のあるひずみゲージ法がそのまま適用できないため、ビデオ式非接触伸び計を採用した⁵⁾。

3.3 試験結果と考察

3.3.1 膜材 B4 の保持時間の影響および母材 (L) の引張強度

膜材 B 4 を用いた母材 (L) 試験片における RT および 80°C の試験結果と保持時間の影響を表 3 に示す。

80°C における試験では、保持時間 10 分と 20 分で引張強度がほぼ等しい。従って、高温試験では環境槽が設定温度に到達してから試験片を取付け、さらに再度の設定温度から 10 分経過後に実施することとした。

母材 (L) の引張強度は、RT および 80°C でそれぞれ 2.89 kN/3 cm、1.76 kN/3 cm が得られ、高温側で約 39 % の強度低下が認められる。

3.3.2 膜材 B5 の引張強度および接合強度の温度依存性

膜材 B 5 を用いた母材 (T)、接合 (L)、および接合 (T) 試験片の RT、40、50、60、および 80°C における温度環境で評価した試験結果を表 4 および図 11 に示す。

母材 (T) 試験片の引張強度は、RT および 80°C でそれぞれ 0.81 kN/3 cm、0.54 kN/3 cm が得られ、高温側で約 33 % の強度低下が認められる。

接合 (L) 試験片の引張強度は、RT および 80°C でそれぞれ 0.98 kN/3 cm、0.55 kN/3 cm が得られ、高温側で約 44 % の強度低下が認められる。破壊箇所は、RT ~ 60°C までが母材の部分、60°C の一部について接合部と母材の境界、80°C の場合だと全て接合部における剥離破壊をそれぞれ生じた。

接合 (T) 試験片の引張強度は、RT および 80°C でそれぞれ

表 3 膜材 B 4 (ベクトラン) における保持時間の影響

試験温度 (°C)	保持時間 (min.)	引張強度 (kN/3cm)	伸び (%)
RT (23)	—	2.89	12.0
80	10	1.75	6.5
	20	1.77	—

表 4 膜材 B 5 (ベクトラン) の試験結果

試験片	試験温度 (°C)	引張強度 (kN/3cm)	伸び (%)
母材 (T)	RT (23)	0.81	2.6
	50	0.69	3.0
	80	0.54	2.2
接合 (L)	RT (23)	0.98	2.9
	40	1.02	3.0
	50	0.90	2.8
	60	0.94	3.0
	80	0.55	2.6
接合 (T)	RT (23)	0.85	3.0
	40	0.85	3.1
	50	0.79	2.9
	60	0.67	2.7
	80	0.51	2.8

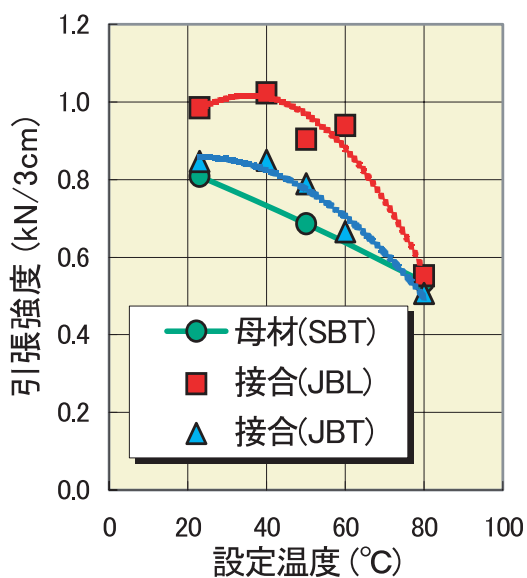


図11 膜材 B5(ベクトラン)の温度依存性

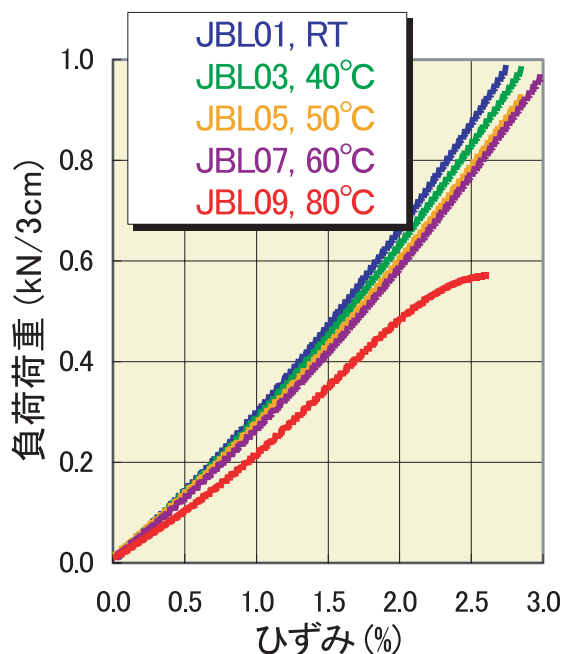


図13 接合(L)試験片の荷重-ひずみ関係

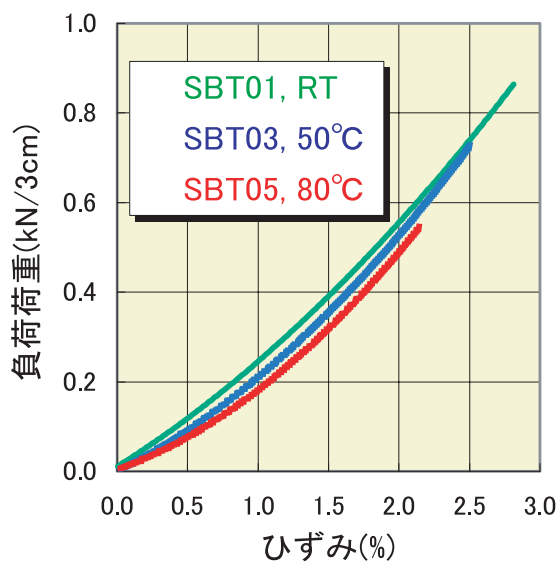


図12 母材(T)試験片の荷重-ひずみ関係

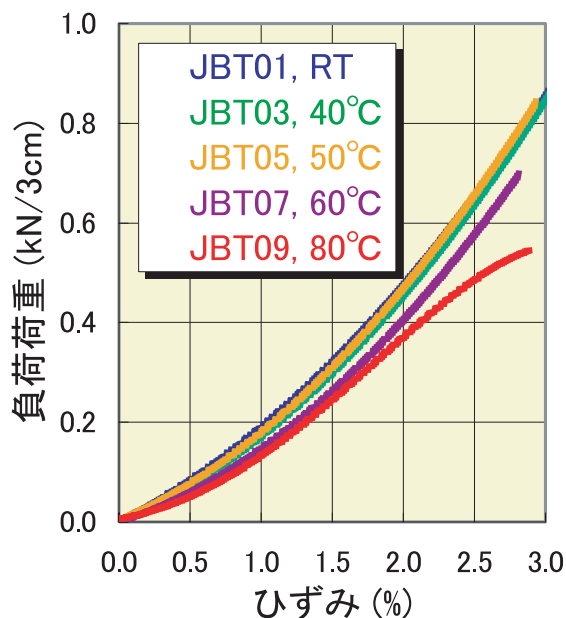


図14 接合(T)試験片の荷重-ひずみ関係

れ 0.85 kN/3 cm, 0.51 kN/3 cm が得られ, 高温側で約 40 % の強度低下が認められる。また, 採取方向が同じである母材 (T) 試験片との比較では, RT と 80°C において引張強度がほぼ等しい。破壊箇所は, RT ~ 80°C まで母材で生じた。ただし, 80°C の場合には接合部から剥離破壊を生じた例がある。

膜材 B5 の伸びは, 母材 (T), 接合 (L), 接合 (T) 試験片において, 各試験温度のいずれの場合も約 3 % 程度である。

図 11 は, 表 4 の試験結果をグラフにしたもので, いず

れの場合も右肩下りの傾向を示し, 温度の影響を強く受けている。接合 (L), および接合 (T) 試験片は, RT ~ 60°C の温度範囲で母材 (T) 試験片に比べて高い強度を示す。80°C の温度環境では, 3 者がほぼ等しい強度である。剥離強度が母材 (T) 試験片の破壊強度と一致していることは, この膜材料の接合幅が 20 mm 程度で十分であるとみなせる。

膜材 B5 の母材 (T), 接合 (L), および接合 (T) 試験片における荷重-ひずみ関係を図 12 ~ 図 14 に示す。荷重-ひずみ関係は, いずれの場合も温度の依存性を示す傾向が

認められる。また、接合(L)および接合(T)試験片における80°Cの場合は、接合部で剥離破壊を生じたため、RT～60°Cまでの各温度における変形挙動と異なる。

3.4 まとめ

膜材B4およびB5(ベクトラン)を用いて試験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 膜材B4の母材(L)は、RTの引張強度が2.89 kN/3 cm、80°Cの場合が1.76 kN/3 cmとなり、高温側で強度が約39%低下する。
- (2) 膜材B5の母材(T)は、RTの引張強度が0.81 kN/3 cm、80°Cの場合が0.54 kN/3 cmとなり、高温側で強度が約33%低下する。
- (3) 膜材B5の接合(L)は、RTおよび80°Cでそれぞれ0.98 kN/3 cm、0.55 kN/3 cmが得られ、高温側で強度が約44%低下する。
- (4) 膜材B5の接合(T)は、RTおよび80°Cでそれぞれ0.85 kN/3 cm、0.51 kN/3 cmが得られ、高温側で約40%の強度低下が認められる。
- (5) 膜材B5の母材(T)、接合(L)、および接合(T)試験片は、いずれも強い温度依存性を示す。
- (6) 80°Cの温度環境では、膜材B5における接合(L)および接合(T)試験片の接合部から剥離破壊を生じる。また、接合幅は接合試験片の剥離強度が母材(T)の破壊強度と一致したため、20 mm程度で十分であるとみなせる。

今後の課題としては、軟式飛行船の主構造用材料として膜材料を採用する場合、飛行船形状に対して荷重軸と成形した繊維方向のずれによる接合強度、高温環境下でのクリープ強度、および紫外線暴露による経年劣化など各強度データの取得が望まれる。

謝 辞

膜材料についてはスカイピア(株)の平秀夫氏、ひずみ計測については(株)東京測器研究所の渡辺智美、岩城勝美両氏からそれぞれ多大なるご支援・ご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 成層圏プラットフォームワークショップ講演前刷集、第1回(1999)、第2回(2000)、第3回(2001、10月)、第4回(2003、2月)、東京、コクヨホール。
- 2) 小松敬治、横幕良生、大垣正信、木村順一、中村平一郎：「成層圏プラットフォーム飛行船の技術課題」、第38回飛行機シンポジウム講演集、pp. 21-24. (2000.10)。
- 3) P. Bradley: Materials, chap. 6 in AIRSHIP TECHNOLOGY (edited by G. A. Khoury and J. D. Gillett), Cambridge University Press, 1999.
- 4) 佐野政明、小松敬治、角田義秋、今川吉郎、中山陽一、南和宏、杉島博、奥山幸成：「成層圏プラットフォーム飛行船の膜材開発」、同上、pp. 25-28. (2000.10)。
- 5) 角田義秋、佐野政明、小松敬治：「飛行船構造用膜材料のひずみ計測」、第43回構造強度に関する講演会講演集、pp. 117-120. (2001.8)。
- 6) 角田義秋、小松敬治、佐野政明：「飛行船構造用膜材料における静引張強度と接合強度の温度依存性」、第40回飛行機シンポジウム講演集、pp. 108. (2002.10)。
- 7) 渡辺智美、岩城勝美：私信、「ひずみゲージにおける断線状況の写真」、(2000.6)。
- 8) 石田良平、角田義秋、佐野政明、小松敬治：「飛行船用膜材料のひずみ測定について」、第44回構造強度に関する講演会講演集、pp. 137-139. (2002.7)。

独立行政法人 航空宇宙技術研究所報告1457号

平成 15 年 3 月 発行

発行所 独立行政法人 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 (0422)40-3935 〒182-8522
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12

© 2002 独立行政法人 航空宇宙技術研究所

※本書（誌）の一部または全部を著作権法の定める範囲を超え、無断で複製、複製、転載、テープ化およびファイル化することを禁じます。
※本書（誌）からの複製、転載等を希望される場合は、情報技術課資料係にご連絡下さい。
※本書（誌）中、本文については再生紙を使用しております。

