

ISSN 0389-4010
UDC 539.014,
539.32,
620.168

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-1254

カーボン／ポリイミド(T800H/PMR-15)複合材料の
室温および300°Cにおける静強度評価

角 田 義 秋 ・ 三 本 木 茂 夫 ・ 下 河 利 行
濱 口 泰 正 ・ 山 本 昌 孝 ・ 三 津 間 秀 彦

1994年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| ABSTRACT | 1 |
| 記 号 | 2 |
| 1. ま え が き | 2 |
| 2. 供試材料，試験片，および試験方法 | 3 |
| 2.1 供試材料 | 3 |
| 2.2 試 験 片 | 4 |
| 2.3 試験方法 | 5 |
| 3. 強度特性と解析方法 | 7 |
| 3.1 強度特性 | 7 |
| 3.2 解析方法 | 7 |
| 3.2.1 無孔積層材の場合 | 7 |
| 3.2.2 有孔積層材の場合 | 8 |
| 4. 試験結果と考察 | 8 |
| 4.1 弾性係数 | 8 |
| 4.2 破壊強度 | 18 |
| 4.2.1 単層材の場合 | 18 |
| 4.2.2 積層材の場合 | 19 |
| 5. 破壊の力学的解析 | 21 |
| 5.1 無孔積層材の場合 | 21 |
| 5.2 有孔積層材の場合 | 25 |
| 6. ま と め | 27 |
| 7. あ と が き | 27 |
| 参考文献 | 27 |

カーボン／ポリイミド(T800H/PMR-15)複合材料の 室温および300°Cにおける静強度評価*

角 田 義 秋^{*1} 三本木 茂 夫^{*2} 下 河 利 行^{*1}
濱 口 泰 正^{*1} 山 本 昌 孝^{*3} 三津間 秀 彦^{*3}

Evaluation of Static Strength of T800H/PMR-15 Carbon/ Polyimide Laminates at Room Temperature and 300°C

Yoshiaki KAKUTA^{*1}, Shigeo SANBONGI^{*2}
Toshiyuki SHIMOKAWA^{*1}, Yasumasa HAMAGUCHI^{*1}
Masataka YAMAMOTO^{*3}, and Hidehiko MITSUMA^{*3}

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the material properties and laminate strength of a T800H/PMR-15 carbon/polyimide composite, which is selected as a candidate material for the primary structures of the unmanned small space vehicle HOPE (H-II Orbiting PlanE). Various static tests were conducted to obtain data on the material properties and the laminate strengths for the unnotched and circular-hole-notched specimens of a quasi-isotropic laminate. These tests were conducted at room temperature and a high temperature (300°C). The material property data include tension, compression, and short beam shear strengths, failure strain, elastic modulus, and Poisson's ratio. The first ply failure and the last ply failure strengths of the unnotched laminate are computed using the material property data obtained and the maximum stress and Tsai-Wu failure criteria. The strength of the laminate with a circular hole is predicted on the basis of the point stress and the average stress criteria. These analytical results are compared with the test results and discussed.

Key words : Carbon/polyimide composite, Static tests, Material property data, Laminate strength, Notched laminate strength, Temperature effect, Strength analysis.

概 要

本研究の目的は、小型の無人有翼宇宙往還機 HOPE (H-II Orbiting PlanE) の主構造用候補材料として選択したカーボン／ポリイミド (T800H/PMR-15) 複合材料の単層材特性データの取得と積層材強度を評価することである。室温 (RT) および高温 (300°C) 下で、単層材の基本特性と擬似等方積層材 (無孔、有孔) の引張や圧縮強度等を調べるために、種々の静強度試験を行った。単層材の基本特性には、引張強度、圧縮強度、層間せん断強度、破断ひずみ、弾性係数およびポアソン比等が含まれる。積層材に対する破壊強度の解析は、得られた単層材の基本特性をもとにして、無孔試験片の場合に最大応力則と Tsai-Wu 則、有孔試験片の場合に Point Stress Criterion 法と Average Stress Criterion 法をそれぞれ用いて予測した。これらの解析結果について、試験結果と比較し、検討した。

* 平成6年8月受付 (received August 1994)

*1 機体部 (Airframe Division)

*2 構造力学部 (Structural Mechanics Division)

*3 宇宙開発事業団 (National Space Development Agency of Japan)

記 号

| | |
|--|-----------------------------------|
| A_{ij} | : 積層材の面内剛性係数 |
| E_1 | : 単層材の繊維方向の弾性係数 (GPa) |
| E_2 | : 単層材の繊維と直交方向の弾性係数 (GPa) |
| E_x | : 無孔積層材の引張弾性係数 (GPa) |
| $F_3, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{12}, F_{66}$ | : 破壊強度のパラメータ (strength tensor) |
| F_R | : 有限幅の補正係数 (円孔) |
| G_{12} | : せん断弾性係数 (GPa) |
| k | : 破壊解析において求めた各層毎の荷重倍数 |
| k_{min} | : 破壊解析において得られた k 値の中の最小値 |
| K_T^∞ | : 無限幅の有孔積層材における応力集中係数 |
| N_x | : 荷重密度 (kN/mm) |
| P_u | : 最終破壊荷重 (kN) |
| R | : 有孔の半径 (mm) |
| S | : 単層材の面内せん断強度 (MPa) |
| S_H | : 三点曲げの層間せん断強度 (MPa) |
| V_f | : 繊維体積含有率 (%) |
| W_f | : 繊維目付 (gf/mm ²) |
| W | : 板幅 (mm) |
| X_c | : 単層材の繊維方向の圧縮強度 (MPa) |
| X_T | : 単層材の繊維方向の引張強度 (MPa) |
| Y_c | : 単層材の繊維と直交方向の圧縮強度 (MPa) |
| Y_T | : 単層材の繊維と直交方向の引張強度 (MPa) |
| a_0 | : ASC 法における特性長 (mm) |
| d_0 | : PSC 法における特性長 (mm) |
| h | : 単層材および積層材の公称板厚 (mm) |
| t | : 1 プライ当たりの公称板厚 (mm) |
| α | : 劣化係数 (Degradation Factor) |
| r | : せん断ひずみ |
| ν | : ポアソン比 |
| ρ_f | : 繊維密度 (gf/cm ³) |
| σ_0 | : 無孔積層材の破壊強度 (MPa) |
| σ_1 | : 繊維方向の応力 (MPa) |
| σ_2 | : 繊維と直交方向の応力 (MPa) |
| σ_B | : 破壊強度 (MPa) |
| σ_N | : 有孔積層材の破壊強度 (MPa) |
| σ_x | : 積層材の初期破壊強度 (MPa) |
| τ | : せん断強度 (MPa) |

1. ま え が き

我が国では、H-II ロケットの先端に小型の無人有翼宇宙往還機 (HOPE: H-II Orbiting PlanE) を取り付けて打ち上げる構想が進められている。航空宇宙技術研究所 (NAL: National Aerospace Laboratory) では、この HOPE に用いられる主構造部材の材料評価を宇宙往還輸送技術の研

究 (その3)、新複合材構造技術の研究(Ⅲ)で取り上げ、宇宙開発事業団 (NASDA: National Space Development Agency of Japan) と共同で進めている。

HOPE の構造は、運用時において大気圏再突入の際に空力加熱等の厳しい高温環境に曝されるため、軽量、高強度で耐熱性の高い材料が要求される。主構造部材の候補材料として、金属材料系では Al 合金と Ti 合金、プラスチック系複合材料ではポリイミド系の CFRP (T800H/PMR-15)、ビスマレイミド系の CFRP, エポキシ系の CFRP などが挙げられている。これらの候補材料を耐熱温度および構造重量比で比較すれば、ポリイミド系の CFRP 複合材料は樹脂の耐熱温度が最高 320°C 程度まであり、高温環境における比強度、比剛性などが優れており、さらに構造重量の軽減も大いに期待できることが報告¹⁾ されている。

この材料は米国のスペースシャトル開発の中で研究され、製造、接着、試験方法、設計、解析等に関するシンポジウムも開催され、Dexter ら²⁾ によってまとめられている。また、炭素繊維と組合わせた樹脂の評価に関連して、ポリイミド樹脂を取り上げた研究^{3)~7)} も数多く発表されている。しかし、成形加工が難しいことや、熱サイクルによるマイクロクラック発生等の問題も抱えており、現在まで一次構造としては実用化に至っていない。一方、破壊強度の解析については、ガラス/エポキシまたはカーボン/エポキシ複合材料の例であるが、無孔積層材の場合が Craddock ら⁸⁾、有孔積層材の場合が Whitney ら⁹⁾、Garber ら¹⁰⁾、Tan¹¹⁾、Erikson ら¹²⁾ によってそれぞれ報告されている。

国内においては、カーボン/ポリイミド (T800H/PMR-15) 複合材料の試作を、NASDA が国内の航空機メーカー各社に委託した。また、同材料を HOPE へ適用する際の検討項目として、素材の継続的な入手性、同材料の成形性、成形材の二次的な切削・接着加工性および擬似等方積層材に対する破壊強度の解析などが要求された。

試作された供試材料に対する各種の強度試験および試験結果の評価は、NAL, NASDA, 航空機メーカー各社が、それぞれ分担あるいは共同して実施している。特に NAL では、各航空機メーカーの成形条件が異なる国産初の T800 H/PMR-15 複合材料に対して、同じ試験実行者が同一の材料試験機、試験治具および恒温槽等を用い、統一的な評価を行っている。

ここでは、NAL が実施した T800H/PMR-15 複合材料の評価試験の一つで、室温 (RT) と 300°C における供試材料の引張強度、圧縮強度、層間せん断強度、破壊ひずみ、弾性係数、ポアソン比等を含む単層材の特性データおよび積層材 (無孔、有孔) 強度の試験結果を示す。さらに、積層材に対する破壊強度の解析を、無孔試験片の場合に最大応力則と Tsai-Wu 則、有孔試験片の場合に Point Stress Criterion 法と Average Stress Criterion 法をそれぞれ用いて

行った。ここでは、その解析結果と試験結果の比較についても報告する。なお、T800H/PMR-15複合材料に関して、本報告のような結果を公表した例は他に存在しない。

2. 供試材料，試験片，および試験方法

2.1 供試材料

評価試験に用いた供試材料は、炭素繊維にT800H（東レ社製）、樹脂としてPMR-15（化成ファイバライト社製）の組合わせを採用した。この材料は、国内の航空機メーカー

A、Bの二社が成形加工を担当し、それぞれA材、B材と呼称する。我が国では初めての経験であるため、最適なキュア条件を確立するまでに多くの試作研究がメーカー側で行われた。

成形工程はメーカーによって若干の相違があるが、概略次の通りである。

① プリプレグシート

例えば、強化繊維として炭素繊維T800Hを用い、これに樹脂PMR-15を含浸させたシート状のもの。

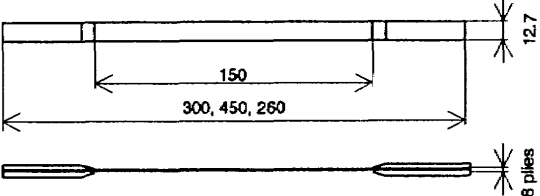
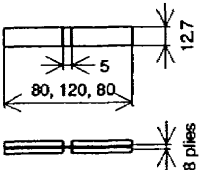
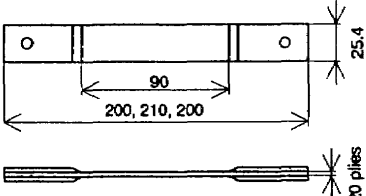
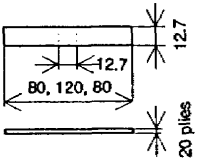
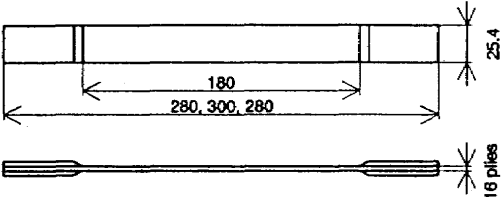
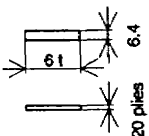
| 試験片形状 (試験片全長は、試験機関A社、B社、NALに対応) | 積層構成 積層方向 | 負荷荷重 |
|---|-----------------------|------|
|  | $[0^\circ]_8$ | 引張 |
|  | 0° | 圧縮 |
|  | $[90^\circ]_{20}$ | 引張 |
|  | 90° | 圧縮 |
|  | $[\pm 45^\circ]_{4s}$ | 引張 |
|  | $[0^\circ]_{20}$ | 三点曲げ |

図 1.1 単層材の試験片形状

② レイアップ

設計仕様書にしたがって、プリプレグシートを任意の配向角、順序に積層する。

③ バギング

高耐熱性バッグ用副資材を用いて、レイアップしたプリプレグシート間に内在するボイドの除去や密着性を強固にすると共に、硬化中の加圧を一定に作用させる。

④ キュア

成形は、オートクレーブ中の高温、高圧下で硬化をさせるが、樹脂の種類、成形品の形状、大きさ等の違いでキュア条件が異なる。ここではキュア条件を約220°Cで2～3時間の保持・脱気した後、圧力を約1.4 MPaに上昇させ、温度300～320°Cの環境下で約3時間硬化させる。

⑤ ポストキュア

キュア後、さらに温度300°Cの雰囲気中で約16時間保持する。

⑥ 成形品

成形された供試材料は、各評価試験用の試験片形状

にそれぞれ切削加工される。

供試材料の繊維体積含有率は、56～60%の範囲にある。

2.2 試験片

各種の評価試験に用いた試験片の形状、積層構成、積層方向、および負荷荷重形式は、単層材の場合を図1.1、積層材の場合を図1.2にそれぞれ示す。ここでは供試材料の基礎的な性質を求めるため、 $[0^\circ]_8$ 、 $[90^\circ]_{20}$ 、 $[\pm 45^\circ]_{16}$ 、 $[0^\circ]_{20}$ を単層材、 $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4s}$ を積層材と定義して、それぞれ分類した。単層材 $[0^\circ]_8$ 、 $[90^\circ]_{20}$ 、および積層材 $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4s}$ の無孔、有孔の引張試験では ASTM D3039、圧縮試験では ASTM D3410、単層材 $[\pm 45^\circ]_{4s}$ の引張試験では ASTM D3518、単層材 $[0^\circ]_{20}$ の三点曲げ試験（層間せん断強度）では ASTM D2344など、すべて米国の ASTM 規格に準拠した試験片形状となっている。なお、各試験片の全長については図1.1および図1.2にそれぞれ示すように、試験機関A社とB社では異なった寸法の例もある。その場合NALで実施した試験片については、NAL仕様の形状寸法にすべて統一した。また、引張用試験片については、積層材の無孔試験片を除いて、チャック

| 試験片形状 (試験片全長は、試験機関A社、B社、NALに対応) | | 積層構成 積層方向 | 負荷荷重 |
|------------------------------------|--|---|------|
| 無孔 | | $[+45^\circ/0^\circ/-45^\circ/90^\circ]_{4s}$ | 引張 |
| | | | 圧縮 |
| 有孔 | | | 引張 |
| | | | 圧縮 |

図1.2 積層材の試験片形状

部に固定される部分に対してタブを接着した。

2.3 試験方法

室温および300°Cにおける各種の評価試験には、負荷容量100kNのインストロン万能試験機1125型を用い、試験片の形状によって25または100kNのロードセルを使い分けた。試験機の外観を図2に示す。

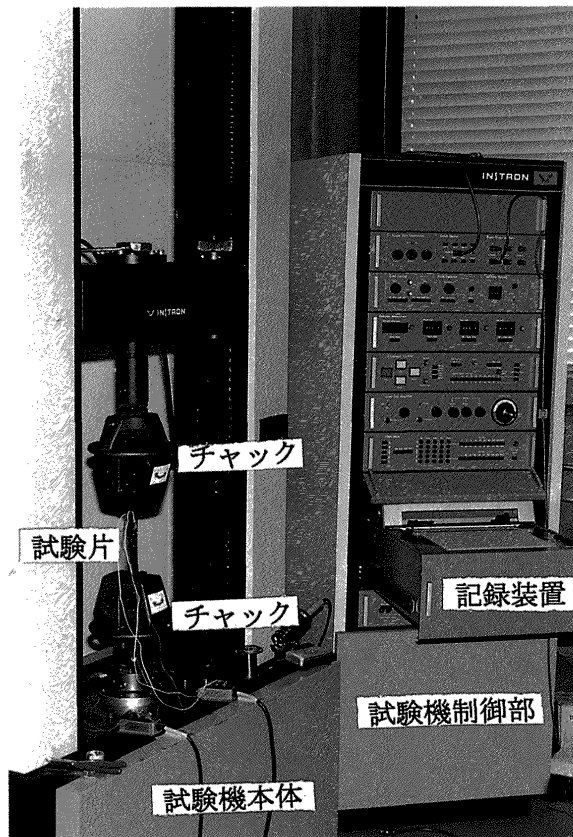
300°Cの高温環境における試験は、同図(b)に示すように安定した温度制御が可能である恒温槽（温度範囲：-60～350°C、内部寸法：幅350×奥350×高650mm）を用いた。室温から300°Cまでの昇温時間は、負荷治具等を恒温槽内に入れない空の状態、すなわち無負荷で約25分、負荷治具等を含めた試験条件と同じ状態で約55分となっている。試験は、恒温槽が設定温度300°Cに到達してから槽内の負荷治具部に試験片を取り付け、その後、試験片が300°Cに約15分間保持されたのを確認して行った。

試験片ひずみの計測は、室温環境の場合はひずみゲージ FLU-1L-5（東京測器製）と接着剤 CC15A を用い、高温環境の場合には高温用のひずみゲージ ZFLA-3.350（東京測器製）と接着剤 NP-50 またはポリイミド系 FM35、

高温用リード線 L-8 をそれぞれ使用した。ひずみと負荷荷重は共に X-Y レコーダで記録した。

単層材、積層材の評価試験における引張および圧縮試験の状況を図3.1 および図3.2 に示す。単層材[0°]、[±45°]、無孔および有孔積層材の引張試験は、同図(a)に示すように試験片の両端をチャックに直接取付けた。単層材[90°]の引張試験では、試験片が面外曲げ荷重の影響を強く受ける恐れがあるため、試験片の下部に同図(b)に示すような約0.2mmの薄い板パネを介して固定した。単層材[0°]の三点曲げ試験（層間せん断強度）は、同図(c)に示すような三点曲げ治具を用いた。単層材[0°]、無孔および有孔積層材の圧縮試験は、図3.2(a)および(b)に示すような軸面座あるいは半球面座を介して負荷する方式で行った。球面座の使用は、試験片の両端面に作用する負荷荷重が均一になるように補正するためである。単層材の圧縮試験には、座屈を防止するためにキ字形の負荷治具を用いた。また、圧縮荷重の負荷中心軸を一定にするため、位置決めが容易かつ速やかにできる治具を併用した。

各評価試験に用いた試験片の本数は、室温および300°Cともに2～4本である。

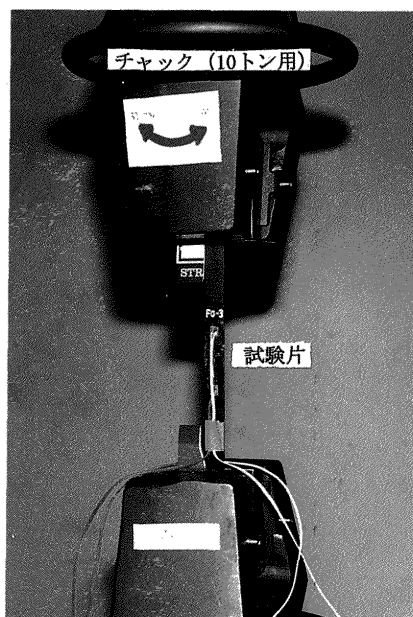


(a) 室温の場合



(b) 300°Cの場合

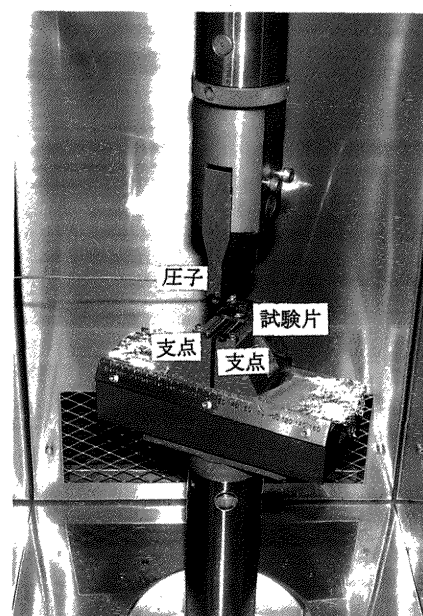
図2 試験機および恒温槽



(a) 単層材 [0°, ±45°], 積層材
[無孔, 有孔] 引張の場合

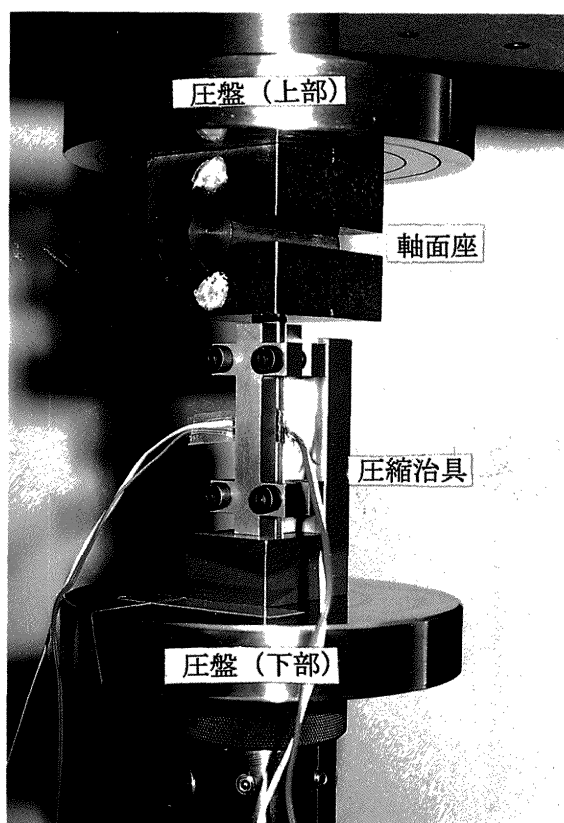


(b) 単層材 [90°] 引張の場合



(c) 単層材 [0°] 三点曲げの場合

図 3.1 評価試験の状況(1)



(a) 単層材 [0°, 90°] 圧縮の場合



(b) 積層材 [無孔, 有孔] 圧縮の場合

図 3.2 評価試験の状況(2)

3. 強度特性と解析方法

3.1 強度特性

弾性係数および破壊強度の計算には、供試材料の成形ロットによって実測板厚に相違があるため、次式にプライ数を掛けて求めた公称板厚 h を用いた。一般的に設計現場では、複合材料の強度が繊維体積含有率の影響を受けるため、公称板厚で整理する方法が採用されている。

$$t = W_f / (\rho_f \cdot V_f) \quad (1)$$

T800H/PMR-15複合材料の場合は、 $W_f = 1.45 \times 10^{-4} \text{ gf/mm}^2$, $\rho_f = 1.81 \text{ gf/cm}^3$, $V_f = 60\%$ であるため、1 プライ当たりの板厚として $t = 0.134 \text{ mm}$ が導かれている。

弾性係数は、単層材 $[0^\circ]$ の圧縮と三点曲げ（層間せん断）の場合を除いて、試験片の標定部における表裏に貼付したひずみゲージからの出力と負荷荷重との関係から求めた。その場合ひずみとして $1,000\mu$ と $6,000\mu$ の2点を選び、その間では直線的関係が存在するとみなし、それぞれに対応した荷重との関係から弾性係数を計算した。単層材 $[\pm 45^\circ]$ の場合には、せん断弾性係数 G_{12} を次の関係から導いた。すなわち、

$$G_{12} = \tau / r \quad (2)$$

せん断弾性係数は、 r が原点から $2,000\mu$ に至る τ 値を用いて計算した。

破壊強度は、すべて試験機に内蔵されている記録装置の“荷重－変位”線図から、次式を用いて求めた。

単層材 $[0^\circ]$, $[90^\circ]$, 無孔および有孔積層材の引張および圧縮試験による破壊強度 σ_B の場合：

$$\sigma_B = P_u / (W \cdot h) \quad (3)$$

単層材 $[\pm 45^\circ]$ の引張試験により導かれるせん断強度 τ の場合：

$$\tau = P_u / (2W \cdot h) \quad (4)$$

単層材 $[0^\circ]$ の三点曲げ試験による層間せん断強度 S_H の場合：

$$S_H = 3P_u / (4W \cdot h) \quad (5)$$

3.2 解析方法

3.2.1 無孔積層材の場合

積層材の破壊機構は、積層構成や荷重条件と関連して極めて複雑である。積層材に対する破壊強度の解析は、単層材の静的な基本強度特性を用いて求める幾つかの方法が提案されている。これまでの検討結果¹³⁾によれば、層間剝離が生じやすい積層構成の場合を除いて、実験値と解析値の良い一致が多く示されている。今回採用した解析法は、初期破壊強度に対応する First Ply Failure (以後 FPF と略称する) 解析および終極破壊強度に対応する Last Ply Failure (以後 LPF と略称する) 解析の二つである。

FPF 解析では積層板理論に基づいて、荷重密度 N_x によ

って生じる各層の材料主軸系における応力 ($\sigma_1, \sigma_2, \tau_{12}$) を計算する。次に後述の破壊則を満たす荷重倍数 k を各層毎に導き、その中から k_{\min} 値を求める。その結果、式(6)から積層材の初期破壊強度 (σ_x) が導かれる。

$$\sigma_x = N_x \cdot k_{\min} / h \quad (6)$$

LPF 解析は、終極破壊が繊維破壊によって生じることが前提とし、繊維方向の弾性係数 E_1 以外を最初から減少させて、以下のようにおく。

$$\begin{aligned} E_1^* &= E_1 \\ E_2^* &= \alpha \cdot E_2 \\ G_{12}^* &= \alpha \cdot G_{12} \\ \nu^* &= \alpha \cdot \nu \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで α は、擬似等方積層材の場合に $\alpha = 0 \sim 0.3$ 程度の範囲であれば解析結果にそれほど違いがないため、 $\alpha = 0.2$ を採用した¹³⁾。式(7)の弾性係数を用いて FPF 解析と同様な計算を行うと、結果として繊維方向の応力 (σ_1) が最も高くなり、繊維破壊モードに対応した終極破壊強度が得られる。

単層材に対する破壊則は、多くの式が提案されているが、これを積層材の FPF 解析に適用する場合、単軸荷重であれば解析値にそれほどの差異を生じない⁸⁾。したがって今回の解析では、応力成分毎に独立して扱う最大応力則および応力成分間の連成が含まれている Tsai-Wu 則の二つを使用した。

最大応力則は、各応力成分が次の式(8)いずれかの等号を満たせば、積層材に破壊が生じたものとして解析している。

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\geq X_T \text{ or } |\sigma_1| \geq X_C \\ &\quad (\text{繊維の破壊}) \\ \sigma_2 &\geq Y_T \text{ or } |\sigma_2| \geq Y_C \\ &\quad (\text{マトリックスの破壊}) \\ |\tau| &\geq S \\ &\quad (\text{マトリックスの破壊}) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Tsai-Wu 則は破壊強度のパラメータ (strength tensor) が、次式(9)の条件を満たせば破壊したものとして定義している。

$$\begin{aligned} F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 \\ + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + F_{66} \cdot \tau_{12}^2 = 1 \end{aligned} \quad (9)$$

ただし、これらの破壊強度のパラメータ ($F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{12}$, および F_{66}) は、繊維方向の引張試験と圧縮試験、直交方向の引張試験と圧縮試験、繊維方向のせん断試験における結果から、次式のように求められる。

$$\begin{aligned} F_1 &= (1/X_T - 1/X_C) \\ F_2 &= (1/Y_T - 1/Y_C) \\ F_{11} &= 1/(X_T \cdot X_C) \\ F_{22} &= 1/(Y_T \cdot Y_C) \\ F_{12} &= -0.5(F_{11} \cdot F_{22})^{1/2} \\ F_{66} &= 1/S^2 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.2.2 有孔積層材の場合

有孔積層材の破壊強度を予測する手法としては、有限要素法を使用するものと、実験データに基づく簡易解析法とが研究されている。後者のWhitneyら⁹⁾によって提案された方法は、多くの研究者による追試験および改良研究がなされた結果、その妥当性がある程度確認されている。ここではこれらの研究成果との比較も兼ね、次に示す二つの簡易解析法を用いて試験結果の評価を行った。

(a) PSC (Point Stress Criterion) 法

PSC法は、孔縁から少し離れた位置(特性長 $=d_0$)における応力が積層材の破壊強度と等しくなった時、有孔積層材に破壊が生じるものと仮定している。有孔積層材における破壊強度 σ_N と無孔積層材における破壊強度 σ_0 の比は、次式で表わされる。

$$\sigma_N/\sigma_0 = 2/[\{ 2 + \xi_1^2 + 3\xi_1^4 - (K_T^\infty - 3)(5\xi_1^6 - 7\xi_1^8) \} F_R] \quad (11)$$

ここで、

$$\xi_1 = R/(R + d_0)$$

$$K_T^\infty = 1 + [2 \{ (A_{11} A_{22})^{1/2} - A_{12} + (A_{11} A_{12} - A_{22}^2)/2A_{66} \} / A_{22}]^{1/2}$$

$$F_R = \{ 2 + (1 - 2R/W)^3 \} / \{ 3(1 - 2R/W) \} \quad \dots\dots\dots (12)$$

(b) ASC (Average Stress Criterion) 法

ASC法は、孔縁から少し離れた位置(特性長 $=a_0$)までの平均応力が積層材の破壊強度と等しくなった時、有孔積層材に破壊が生じるものと仮定している。有孔積層材における破壊強度 σ_N と無孔積層材における破壊強度 σ_0 の比は、次式で表わされる。

$$\sigma_N/\sigma_0 = 2(1 - \xi_2) / [\{ 2 - \xi_2^2 - \xi_2^4 + (K_T^\infty - 3)(\xi_2^6 - \xi_2^8) \} F_R] \quad (13)$$

ここで、

$$\xi_2 = R/(R + a_0) \quad (14)$$

である。

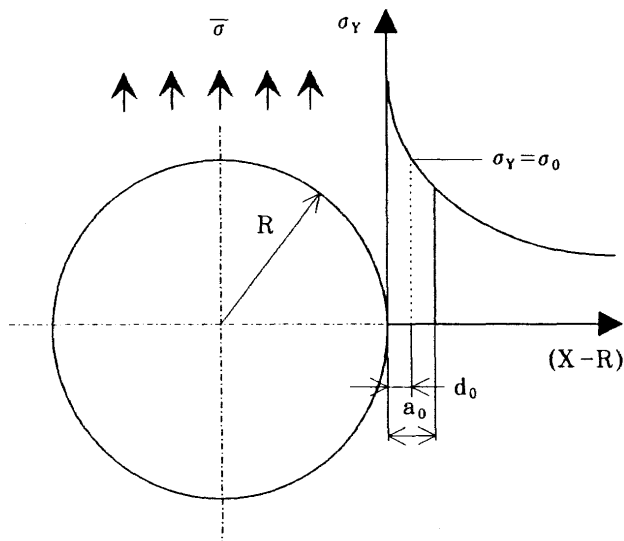


図4 PSC法およびASC法の特性長

特性長 d_0 あるいは a_0 は、孔径を変えた幾つかの試験結果から求まるもので、供試材料である積層材に固有の値と仮定している。これら特性長 d_0 あるいは a_0 と円孔の位置関係を図4に示す。

4. 試験結果と考察

試験は、NALおよび航空機メーカーA社、B社の三箇所で行った。試験結果は、供試材料A材およびB材から製作した試験片で、NALが実施したものをそれぞれNA、NBとし、A社およびB社が行ったものをそれぞれAA、BBと呼称した。室温および300°CにおけるT800H/PMR-15複合材料の試験結果詳細を表1.1～表1.5に示す。これらの表から抜粋した弾性係数とポアソン比を表2に、単層材、積層材に対する引張と圧縮の破壊強度を表3にそれぞれ示した。また、試験片の破壊状況を図5.1～図5.4に示す。

4.1 弾性係数

単層材 $[0^\circ]_8$ の引張弾性係数 E_1 を図6(a)に示す。 E_1 は温度環境が300°Cに上昇しても、室温とほぼ同じ値となっている。この理由としては、試験片を構成する繊維(T800H)が主に荷重を受け持つため、温度の上昇による影響が現れないと考えられる。

一方、単層材 $[90^\circ]_{20}$ の引張弾性係数 E_2 は、図6(b)で示すように温度の上昇によって約22～46%の低下が認められる。これは主に樹脂(PMR-15)が荷重を受け持つため、A材、B材いずれも樹脂の温度依存性を示している。無孔積層材の引張弾性係数 E_x を図6(c)に示すが、温度の上昇に対していずれもほぼ同じ値となり、温度依存性が認められない。

単層材 $[\pm 45^\circ]_{4S}$ のせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係を図7(a)に示す。この場合、室温の試験結果を実線、300°Cの場合を破線でそれぞれ表示した。この材料は比較的大きな非線形性を有している関係から、ひずみ γ が原点から何 μ に達した時の値を用いるかで、せん断弾性係数 G_{12} に大きな違いを生じる。ここではせん断弾性係数 G_{12} をひずみが2,000 μ に達した時のせん断応力 τ で導き、それらの計算結果を図7(b)に示す。温度の上昇によって、NA、AA、NB、BBはそれぞれ69%、49%、58%、および38%程度の剛性低下が認められる。これは単層材 $[90^\circ]_{20}$ の引張弾性係数の場合と同様に、樹脂の温度依存性を強く受けている。

単層材 $[0^\circ]$ のポアソン比を図8に示す。ポアソン比は、300°CにおけるNBが0.23の場合を除いて、約0.32～0.35の範囲に含まれる。

表 1.1 T800H/PMR-15 複合材料の試験結果 (I)

[0°]。単層材引張試験結果 (NA)

| 試験片番号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン比 |
|-------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------------|------------|-------|
| 1 | 22 | 12.7 | 1.19 | 1.07 | 32.3 | 2,363 | 13,400 | 169.7 | 0.35 |
| 2 | 22 | 12.7 | 1.21 | 1.07 | 34.8 | 2,540 | 14,200 | 169.7 | 0.36 |
| 3 | 22 | 12.7 | 1.19 | 1.07 | 31.2 | 2,285 | 13,200 | 165.7 | 0.35 |
| 平均値 | | 12.7 | 1.20 | 1.07 | 32.8 | 2,396 | 13,600 | 168.3 | 0.35 |
| 1 | 300 | 12.8 | 1.23 | 1.07 | 25.6 | 1,873 | 10,300 | 162.8 | 0.34 |
| 2 | 300 | 12.7 | 1.23 | 1.07 | 26.6 | 1,942 | 10,400 | 167.7 | 0.30 |
| 平均値 | | 12.8 | 1.23 | 1.07 | 26.1 | 1,907 | 10,350 | 165.2 | 0.32 |

[0°]。単層材引張試験結果 (NB)

| 試験片番号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン比 |
|-------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|--------------------------|------------|-------|
| 1 | 22 | 12.8 | 1.25 | 1.07 | 27.8 | 2,020 | 12,550 | 154.9 | 0.29 |
| 2 | 22 | 12.8 | 1.25 | 1.07 | 27.7 | 2,010 | 12,550 | 153.0 | 0.37 |
| 3 | 22 | 12.9 | 1.27 | 1.07 | 28.4 | 2,059 | 13,000 | 153.0 | 0.31 |
| 平均値 | | 12.8 | 1.26 | 1.07 | 28.0 | 2,030 | 12,700 | 153.6 | 0.32 |
| 1 | 300 | 12.8 | 1.25 | 1.07 | 21.3 | 1,559 | 9,300 | 160.8 | — |
| 2 | 300 | 12.8 | 1.23 | 1.07 | 22.3 | 1,628 | 9,600 | 161.8 | 0.23 |
| 平均値 | | 12.8 | 1.24 | 1.07 | 21.8 | 1,594 | 9,450 | 161.3 | 0.23 |

[0°]。単層材圧縮試験結果 (NA)

| 試験片番号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|-------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | 22 | 12.8 | 1.09 | 1.07 | 18.8 | 1,373 |
| 2 | 22 | 12.8 | 1.11 | 1.07 | 20.5 | 1,500 |
| 3 | 22 | 12.8 | 1.13 | 1.07 | 19.3 | 1,373 |
| 平均値 | | 12.8 | 1.11 | 1.07 | 19.5 | 1,415 |
| 1 | 300 | 12.7 | 1.22 | 1.07 | 15.3 | 1,128 |
| 2 | 300 | 12.7 | 1.24 | 1.07 | 13.0 | 954 |
| 3 | 300 | 12.7 | 1.24 | 1.07 | 14.2 | 1,040 |
| 4 | 300 | 12.7 | 1.20 | 1.07 | 11.9 | 872 |
| 平均値 | | 12.7 | 1.23 | 1.07 | 13.6 | 999 |

[0°]。単層材圧縮試験結果 (NB)

| 試験片番号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|-------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | 22 | 12.7 | 1.20 | 1.07 | 22.5 | 1647.5 |
| 2 | 22 | 12.7 | 1.19 | 1.07 | 22.3 | 1627.9 |
| 3 | 22 | 12.7 | 1.15 | 1.07 | 20.7 | 1520.0 |
| 平均値 | | 12.7 | 1.18 | 1.07 | 21.8 | 1598.5 |
| 1 | 300 | 12.8 | 1.24 | 1.07 | 8.0 | 587.4 |
| 2 | 300 | 12.8 | 1.20 | 1.07 | 9.5 | 694.3 |
| 平均値 | | 12.8 | 1.22 | 1.07 | 8.8 | 640.9 |

表 1.2 T800H/PMR-15 複合材料の試験結果 (Ⅲ)

[90°]₂₀ 単層材引張試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.4 | 3.07 | 2.68 | 3.97 | 58.3 | 8,000 | 8.32 | 0.01 |
| 2 | 22 | 25.5 | 3.07 | 2.68 | 3.38 | 49.6 | 5,600 | 8.81 | 0.01 |
| 3 | 22 | 25.5 | 3.03 | 2.68 | 3.54 | 51.8 | 6,000 | 8.49 | 0.02 |
| 平均値 | | 25.5 | 3.06 | 2.68 | 3.63 | 53.2 | 6,530 | 8.54 | 0.01 |
| 1 | 300 | 25.4 | 3.06 | 2.68 | 1.25 | 18.2 | — | — | — |
| 2 | 300 | 25.4 | 3.09 | 2.68 | 1.24 | 18.1 | — | — | — |
| 3 | 300 | 25.4 | 2.99 | 2.68 | 1.99 | 29.2 | — | 6.48 | 0.01 |
| 4 | 300 | 25.4 | 2.98 | 2.68 | 1.75 | 25.6 | — | 6.63 | 0.01 |
| 平均値 | | 25.4 | 3.03 | 2.68 | 1.55 | 22.8 | | 6.56 | 0.01 |

[90°]₂₀ 単層材引張試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.6 | 3.11 | 2.68 | 4.40 | 64.3 | 7,200 | 8.97 | 0.02 |
| 2 | 22 | 25.5 | 3.11 | 2.68 | 5.15 | 75.2 | 8,700 | 8.89 | 0.02 |
| 3 | 22 | 25.5 | 3.10 | 2.68 | 4.95 | 72.4 | 8,100 | 9.00 | 0.02 |
| 平均値 | | 25.5 | 3.11 | 2.68 | 4.83 | 70.6 | 8,000 | 8.96 | 0.02 |
| 1 | 300 | 25.5 | 3.12 | 2.68 | 1.43 | 20.9 | 3,800 | 5.31 | 0.01 |
| 2 | 300 | 25.5 | 3.11 | 2.68 | 1.55 | 22.7 | 4,300 | 5.42 | 0.01 |
| 平均値 | | 25.5 | 3.12 | 2.68 | 1.49 | 21.8 | 4,050 | 5.36 | 0.01 |

[90°]₂₀ 単層材圧縮試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 12.8 | 2.87 | 2.68 | 5.36 | 156.9 | 29,000 | 9.36 | 0.03 |
| 2 | 22 | 12.8 | 2.80 | 2.68 | 6.02 | 176.5 | 29,000 | 9.06 | 0.03 |
| 3 | 22 | 12.8 | 2.94 | 2.68 | 7.86 | 230.5 | 30,400 | 9.93 | 0.02 |
| 平均値 | | 12.8 | 2.87 | 2.68 | 6.42 | 188.0 | 29,470 | 9.45 | 0.02 |
| 1 | 300 | 12.8 | 2.87 | 2.68 | 3.69 | 107.9 | — | 8.64 | — |
| 2 | 300 | 12.8 | 2.80 | 2.68 | 3.68 | 107.9 | — | 9.68 | — |
| 平均値 | | 12.8 | 2.84 | 2.68 | 3.68 | 107.9 | | 9.16 | |

[90°]₂₀ 単層材圧縮試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 12.3 | 2.81 | 2.68 | 8.43 | 255.0 | 29,000 | 10.4 | 0.02 |
| 2 | 22 | 12.3 | 2.83 | 2.68 | 8.21 | 249.1 | 29,000 | 10.5 | 0.02 |
| 3 | 22 | 12.3 | 2.85 | 2.68 | 7.48 | 227.5 | 24,000 | 10.7 | 0.02 |
| 平均値 | | 12.3 | 2.83 | 2.68 | 8.04 | 243.9 | 27,330 | 10.5 | 0.02 |
| 1 | 300 | 12.3 | 2.81 | 2.68 | 3.75 | 113.8 | — | 14.2 | 0.03 |
| 2 | 300 | 12.3 | 2.83 | 2.68 | 3.57 | 108.9 | — | 10.8 | 0.02 |
| 平均値 | | 12.3 | 2.82 | 2.68 | 3.66 | 111.3 | | 12.5 | 0.03 |

表 1.3 T800H/PMR-15 複合材料の試験結果 (Ⅲ)

[45°]₄₅ 単層材引張試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 (×10 ⁻⁶) | 弾性係数 (GPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | 22 | 25.4 | 2.29 | 2.14 | 8.58 | 78.7 | — | 4.66 |
| 2 | 22 | 25.4 | 2.35 | 2.14 | 11.23 | 103.0 | — | 5.08 |
| 3 | 22 | 25.4 | 2.34 | 2.14 | 11.08 | 102.0 | — | 5.00 |
| 平均値 | | 25.4 | 2.33 | 2.14 | 10.30 | 94.6 | — | 4.91 |
| 1 | 300 | 25.4 | 2.40 | 2.14 | 5.69 | 52.2 | — | 1.52 |
| 2 | 300 | 25.4 | 2.35 | 2.14 | 5.93 | 54.5 | — | 1.50 |
| 平均値 | | 25.4 | 2.38 | 2.14 | 5.81 | 53.3 | | 1.51 |

[45°]₄₅ 単層材引張試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 (×10 ⁻⁶) | 弾性係数 (GPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | 22 | 25.3 | 2.00 | 2.14 | 7.61 | 70.1 | 29,300 | 4.78 |
| 2 | 22 | 25.5 | 2.02 | 2.14 | 7.99 | 73.2 | 29,800 | 4.73 |
| 3 | 22 | 25.5 | 2.02 | 2.14 | 7.94 | 72.7 | 31,300 | 4.57 |
| 平均値 | | 25.4 | 2.01 | 2.14 | 7.85 | 72.0 | 30,133 | 4.69 |
| 1 | 300 | 25.6 | 2.28 | 2.14 | 5.60 | 51.1 | — | 2.12 |
| 2 | 300 | 25.6 | 2.28 | 2.14 | 5.36 | 48.9 | — | 1.78 |
| 平均値 | | 25.6 | 2.28 | 2.14 | 5.48 | 50.0 | | 1.95 |

[0°]₂₀ 単層材三点曲げ試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 6.38 | 3.14 | 2.68 | 2.99 | 131.4 |
| 2 | 22 | 6.35 | 3.03 | 2.68 | 2.78 | 122.6 |
| 3 | 22 | 6.37 | 3.08 | 2.68 | 2.82 | 124.5 |
| 平均値 | | 6.37 | 3.08 | 2.68 | 2.86 | 126.2 |
| 1 | 300 | 6.46 | 3.07 | 2.68 | 0.93 | 40.2 |
| 2 | 300 | 6.41 | 3.00 | 2.68 | 0.89 | 39.2 |
| 平均値 | | 6.44 | 3.04 | 2.68 | 0.91 | 39.7 |

[0°]₂₀ 単層材三点曲げ試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 6.46 | 3.06 | 2.68 | 2.93 | 127.5 |
| 2 | 22 | 6.46 | 3.07 | 2.68 | 3.02 | 130.4 |
| 3 | 22 | 6.47 | 3.08 | 2.68 | 2.89 | 124.5 |
| 平均値 | | 6.46 | 3.07 | 2.68 | 2.95 | 127.5 |
| 1 | 300 | 6.47 | 3.10 | 2.68 | 1.04 | 45.1 |
| 2 | 300 | 6.48 | 3.08 | 2.68 | 1.01 | 43.1 |
| 平均値 | | 6.48 | 3.09 | 2.68 | 1.02 | 44.1 |

表 1.4 T800H/PMR-15 複合材料の試験結果 (IV)

無孔積層材引張試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.5 | 4.63 | 4.29 | 95.8 | 876.7 | 15,100 | 59.2 | 0.33 |
| 2 | 22 | 25.5 | 4.53 | 4.29 | 77.9 | 712.9 | 14,100 | 51.9 | 0.30 |
| 3 | 22 | 25.5 | 4.61 | 4.29 | 87.1 | 797.3 | 14,000 | 58.3 | 0.32 |
| 平均値 | | 25.5 | 4.59 | 4.29 | 86.9 | 795.6 | 14,400 | 56.5 | 0.32 |
| 1 | 300 | 25.5 | 4.62 | 4.29 | 77.5 | 709.0 | -- | 56.4 | 0.21 |
| 2 | 300 | 25.5 | 4.62 | 4.29 | 63.9 | 585.2 | -- | 48.4 | 0.19 |
| 平均値 | | 25.5 | 4.62 | 4.29 | 70.7 | 647.2 | | 52.4 | 0.20 |

無孔積層材引張試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.5 | 4.62 | 4.29 | 87.0 | 793.4 | 14,600 | 55.7 | 0.32 |
| 2 | 22 | 25.6 | 4.70 | 4.29 | 95.8 | 873.8 | 15,800 | 56.6 | 0.32 |
| 3 | 22 | 25.5 | 4.78 | 4.29 | 91.7 | 839.4 | 14,800 | 57.1 | 0.30 |
| 平均値 | | 25.5 | 4.70 | 4.29 | 91.5 | 835.5 | 15,070 | 56.5 | 0.31 |
| 1 | 300 | 25.5 | 4.62 | 4.29 | 84.5 | 770.8 | -- | 55.5 | 0.33 |
| 2 | 300 | 25.5 | 4.78 | 4.29 | 78.6 | 719.8 | -- | 55.3 | 0.30 |
| 平均値 | | 25.5 | 4.70 | 4.29 | 81.6 | 745.3 | | 55.4 | 0.32 |

無孔積層材圧縮試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.4 | 4.46 | 4.29 | 51.5 | 471.7 | 10,500 | 53.2 | 0.33 |
| 2 | 22 | 25.4 | 4.26 | 4.29 | 46.9 | 429.5 | 9,300 | 49.4 | 0.32 |
| 3 | 22 | 25.4 | 4.50 | 4.29 | 61.6 | 563.9 | 9,000 | 53.1 | 0.33 |
| 4 | 22 | 25.4 | 4.43 | 4.29 | 57.9 | 530.5 | 11,100 | 53.5 | 0.32 |
| 平均値 | | 25.4 | 4.41 | 4.29 | 54.5 | 498.9 | 9,980 | 52.3 | 0.33 |
| 1 | 300 | 25.4 | 4.46 | 4.29 | 20.6 | 189.3 | -- | 47.3 | 0.29 |
| 2 | 300 | 25.4 | 4.26 | 4.29 | 19.1 | 175.5 | -- | 53.5 | 0.35 |
| 3 | 300 | 25.4 | 4.50 | 4.29 | 18.5 | 169.7 | -- | 47.3 | 0.27 |
| 平均値 | | 25.4 | 4.41 | 4.29 | 19.4 | 178.2 | | 49.4 | 0.30 |

無孔積層材圧縮試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) | 破壊歪 ($\times 10^{-6}$) | 弾性係数 (GPa) | ポアソン 比 |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-----------------------------|---------------|-----------|
| 1 | 22 | 25.5 | 4.57 | 4.29 | 53.3 | 485.4 | 10,400 | 48.8 | 0.30 |
| 2 | 22 | 25.6 | 4.65 | 4.29 | 54.9 | 501.1 | 10,200 | 51.0 | 0.30 |
| 3 | 22 | 25.5 | 4.73 | 4.29 | 61.1 | 560.0 | 11,800 | 50.7 | 0.30 |
| 平均値 | | 25.5 | 4.65 | 4.29 | 56.4 | 515.5 | 10,800 | 50.2 | 0.30 |
| 1 | 300 | 25.6 | 4.57 | 4.29 | 29.0 | 264.8 | 6,000 | 46.9 | 0.32 |
| 2 | 300 | 25.6 | 4.65 | 4.29 | 35.8 | 326.6 | 7,400 | 45.8 | 0.32 |
| 平均値 | | 25.6 | 4.61 | 4.29 | 32.4 | 295.7 | 6,700 | 46.4 | 0.32 |

表 1.5 T800H/PMR-15 複合材料の試験結果 (V)

有孔積層材引張試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 32.2 | 4.51 | 4.29 | 68.6 | 497.2 |
| 2 | 22 | 32.2 | 4.40 | 4.29 | 61.1 | 442.3 |
| 3 | 22 | 32.2 | 4.53 | 4.29 | 67.2 | 486.4 |
| 平均値 | | 32.2 | 4.48 | 4.29 | 65.6 | 475.3 |
| 1 | 300 | 32.2 | 4.63 | 4.29 | 71.8 | 519.8 |
| 2 | 300 | 32.2 | 4.58 | 4.29 | 62.6 | 453.1 |
| 平均値 | | 32.2 | 4.61 | 4.29 | 67.2 | 486.5 |

有孔積層材引張試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 32.2 | 4.50 | 4.29 | 62.1 | 449.1 |
| 2 | 22 | 32.2 | 4.48 | 4.29 | 65.7 | 475.6 |
| 3 | 22 | 32.2 | 4.40 | 4.29 | 60.3 | 437.4 |
| 平均値 | | 32.2 | 4.46 | 4.29 | 62.7 | 454.0 |
| 1 | 300 | 32.2 | 4.50 | 4.29 | 65.9 | 477.6 |
| 2 | 300 | 32.2 | 4.48 | 4.29 | 61.1 | 442.3 |
| 平均値 | | 32.2 | 4.49 | 4.29 | 63.5 | 459.9 |

有孔積層材圧縮試験結果 (NA)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 32.1 | 4.73 | 4.29 | 42.8 | 310.9 |
| 2 | 22 | 32.1 | 4.72 | 4.29 | 43.7 | 318.7 |
| 3 | 22 | 32.0 | 4.69 | 4.29 | 42.2 | 306.9 |
| 平均値 | | 32.1 | 4.71 | 4.29 | 42.9 | 312.2 |
| 1 | 300 | 32.0 | 5.38 | 4.29 | 36.7 | 266.7 |
| 2 | 300 | 32.0 | 5.44 | 4.29 | 31.6 | 230.5 |
| 平均値 | | 32.0 | 5.41 | 4.29 | 34.1 | 248.6 |

有孔積層材圧縮試験結果 (NB)

| 試験片 番 号 | 温度 (°C) | 板幅 (mm) | 実測板厚 (mm) | 公称板厚 (mm) | 破壊荷重 (kN) | 公称応力 (MPa) |
|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 1 | 22 | 32.0 | 4.82 | 4.29 | 44.6 | 325.6 |
| 2 | 22 | 32.0 | 4.75 | 4.29 | 44.9 | 327.5 |
| 3 | 22 | 32.2 | 4.72 | 4.29 | 43.1 | 311.9 |
| 平均値 | | 32.1 | 4.76 | 4.29 | 44.2 | 321.7 |
| 1 | 300 | 32.2 | 4.70 | 4.29 | 31.0 | 224.6 |
| 2 | 300 | 32.1 | 4.69 | 4.29 | 30.5 | 221.6 |
| 平均値 | | 32.2 | 4.70 | 4.29 | 30.7 | 223.1 |

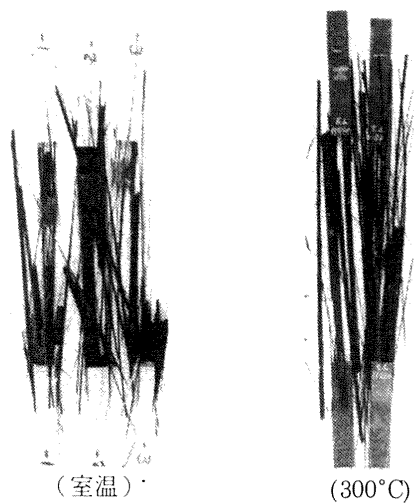
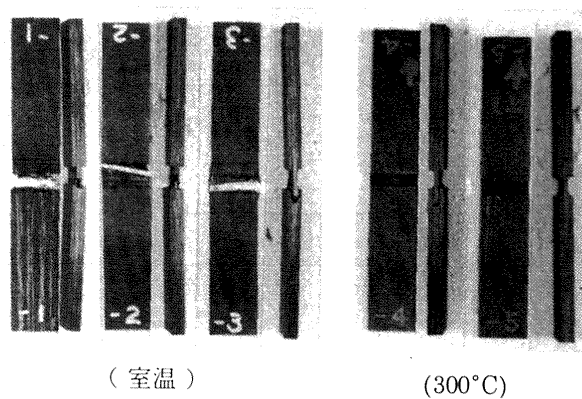
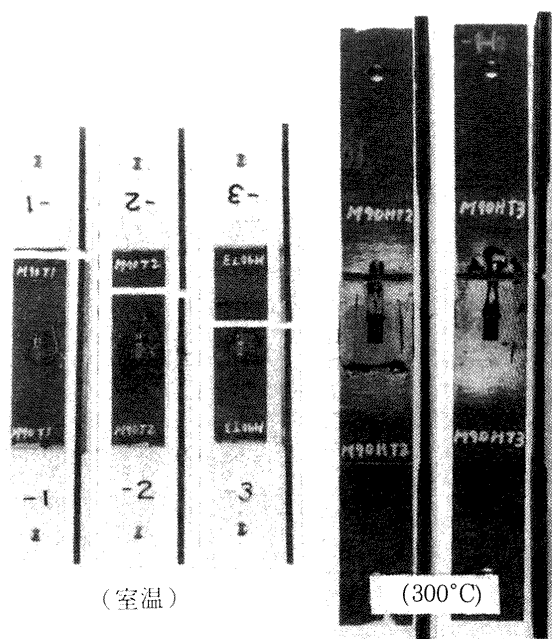
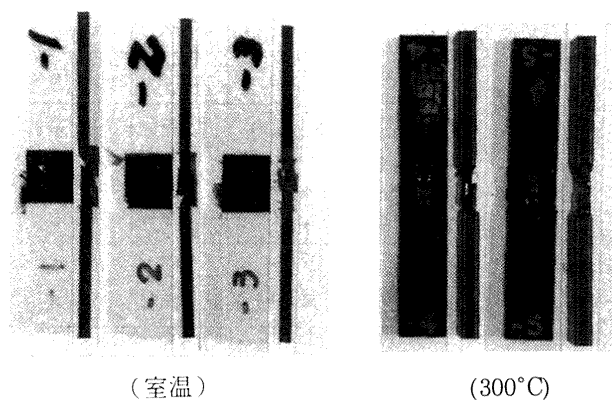
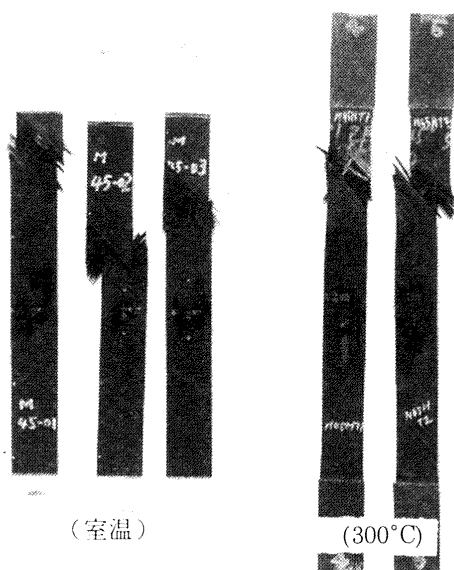
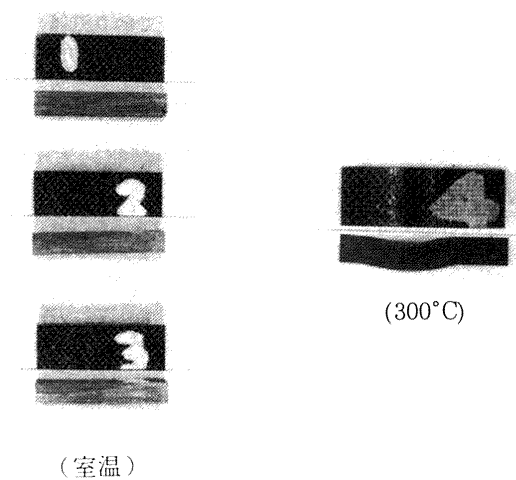
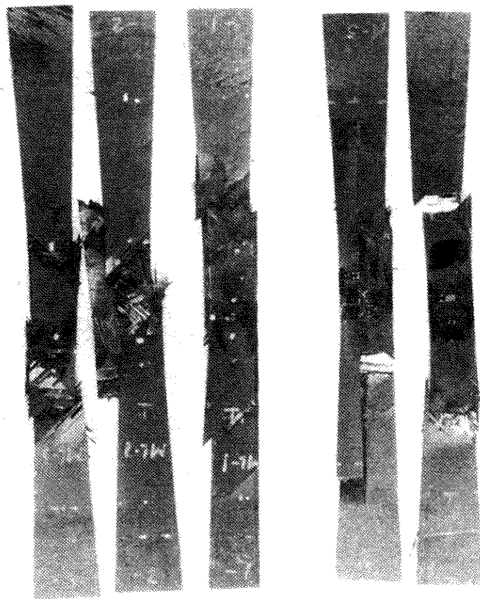
(a) 単層材 $[0]_8$ 引張試験の場合(b) 単層材 $[0]_8$ 圧縮試験の場合(c) 単層材 $[90]_{20}$ 引張試験の場合(d) 単層材 $[90]_{20}$ 圧縮試験の場合(e) 単層材 $[\pm 45]_{4s}$ 引張試験の場合(f) 単層材 $[0]_{20}$ 三点曲げ試験の場合

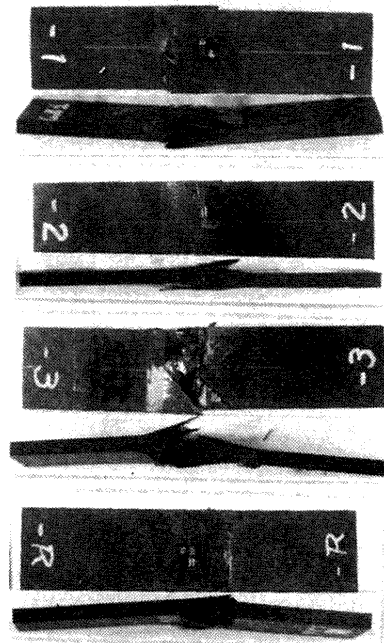
図 5.1 単層材試験片 (NA) の破壊状況



(室温)

(300°C)

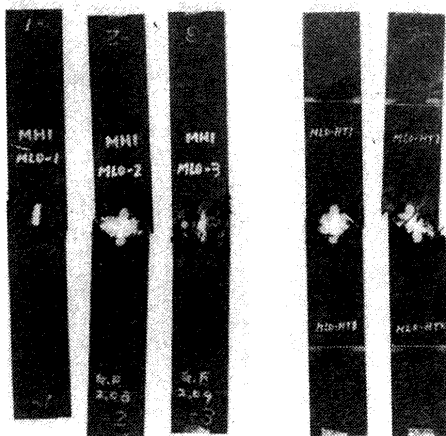
(a) 無孔積層材引張試験の場合



(室温)

(300°C)

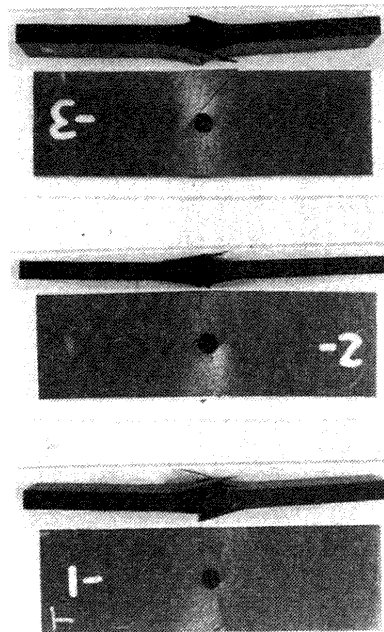
(b) 無孔積層材圧縮試験の場合



(室温)

(300°C)

(c) 有孔積層材引張試験の場合

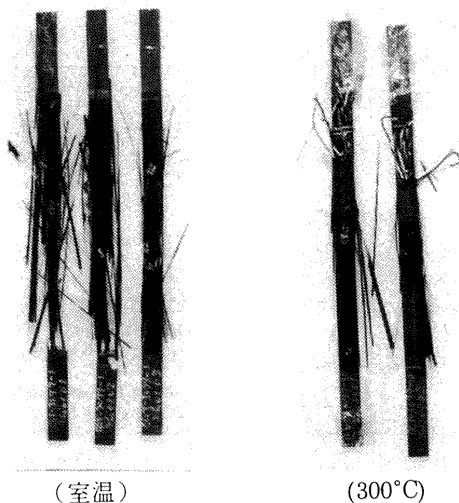


(室温)

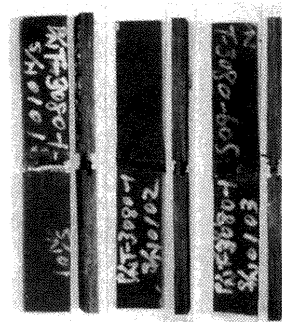
(300°C)

(d) 有孔積層材圧縮試験の場合

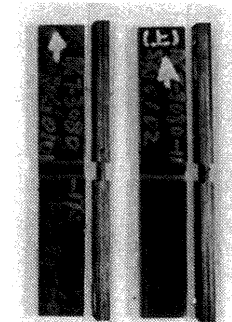
図 5.2 積層材試験片 (NA) の破壊状況



(室温) (300°C)
(a) 単層材 $[0^\circ]_8$ 引張試験の場合

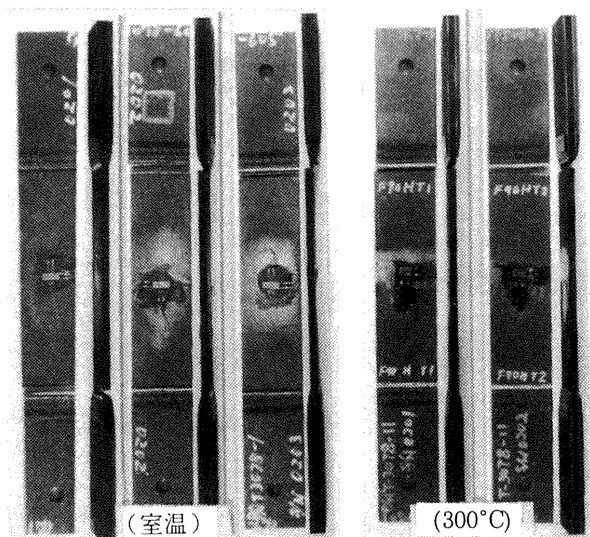


(室温)

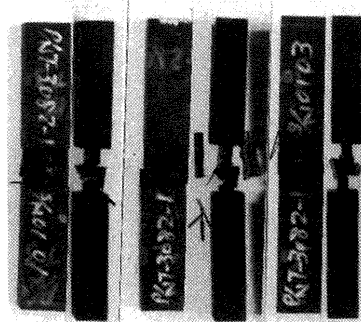


(300°C)

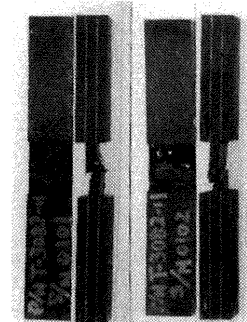
(b) 単層材 $[0^\circ]_8$ 圧縮試験の場合



(室温) (300°C)
(c) 単層材 $[90^\circ]_{20}$ 引張試験の場合

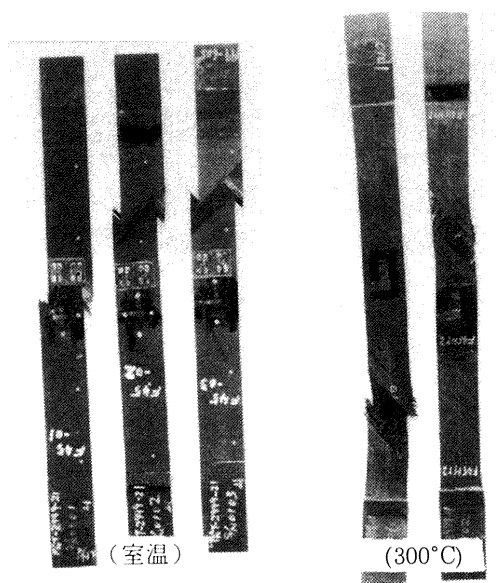


(室温)

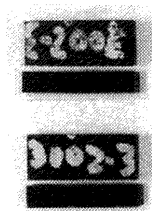


(300°C)

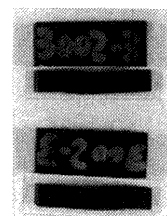
(d) 単層材 $[90^\circ]_{20}$ 圧縮試験の場合



(室温) (300°C)
(e) 単層材 $[\pm 45^\circ]_{4s}$ 引張試験の場合



(室温)



(300°C)

(f) 単層材 $[0^\circ]_{20}$ 三点曲げ試験の場合

図 5.3 単層材試験片 (NB) の破壊状況

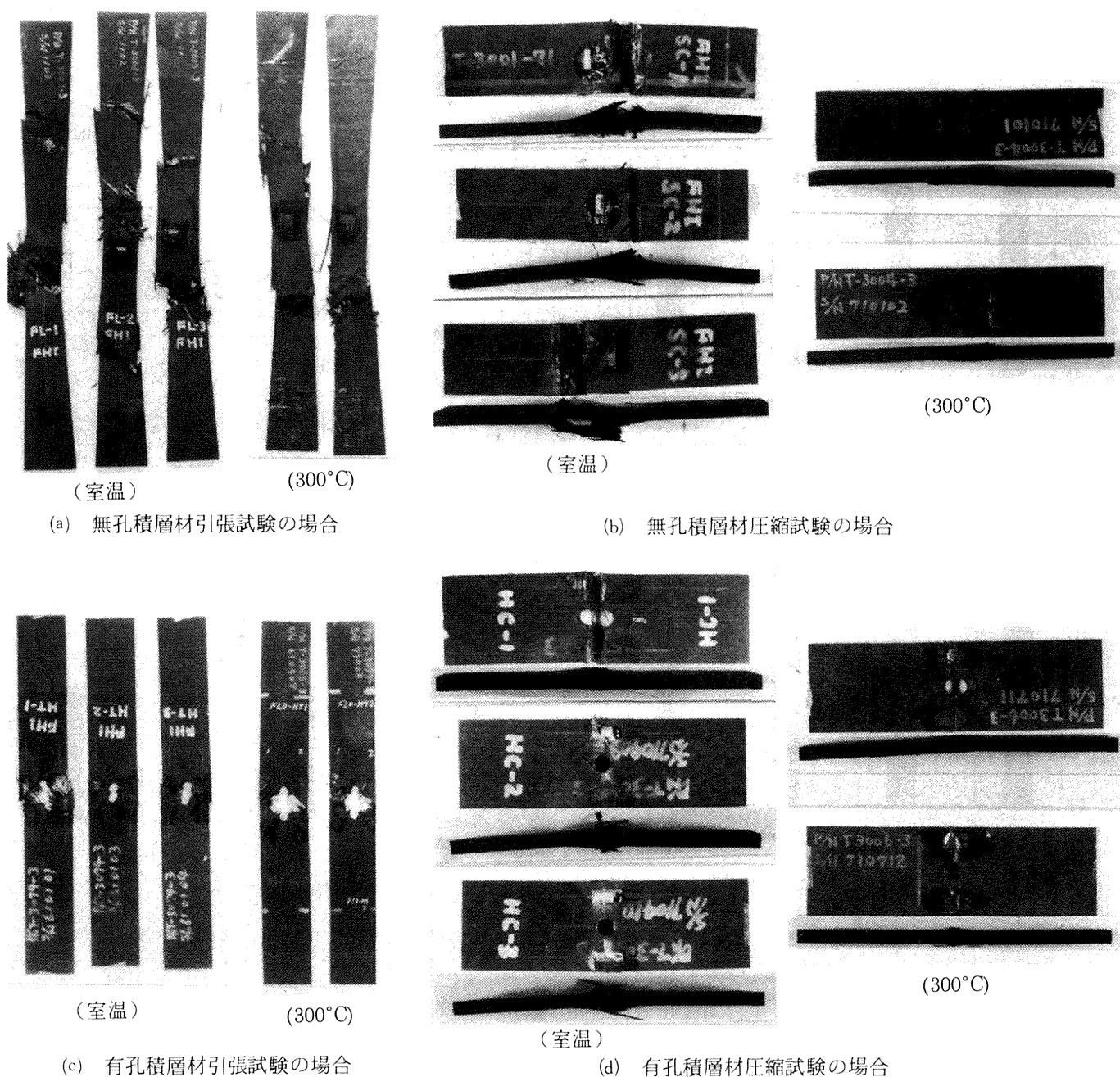
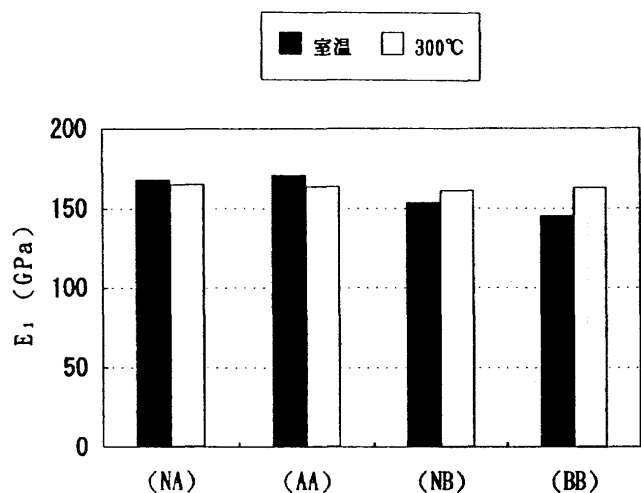
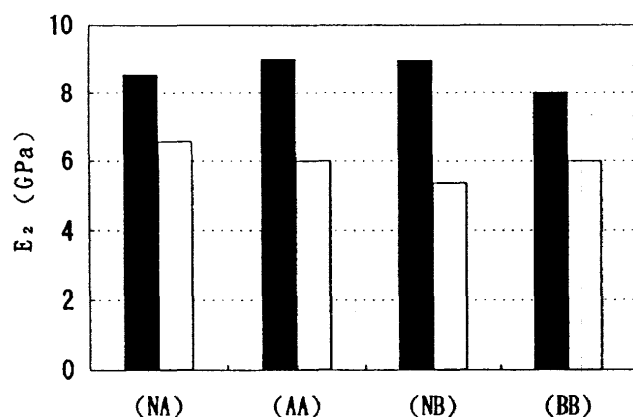
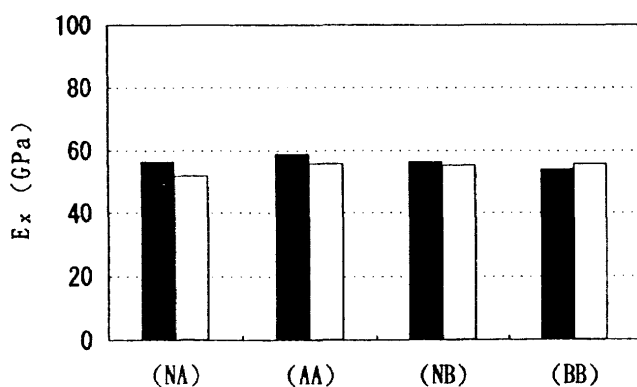


図 5.4 積層材試験片 (NB) の破壊状況

表 2 T800H/PMR-15 複合材料の弾性係数とポアソン比

| 弾性係数 (GPa) | 試験機関 | NAL (NA) | A 社 (AA) | NAL (NB) | B 社 (BB) |
|---|------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | |
| 単層材 $[0^\circ]_8$ の弾性係数 E_1 | 室温 | 168 | 171 | 154 | 145 |
| | 300℃ | 165 | 164 | 161 | 163 |
| 単層材 $[0^\circ]_8$ の弾性係数 E_2 | 室温 | 8.53 | 8.69 | 9.02 | 8.47 |
| | 300℃ | 6.57 | 6.27 | 5.00 | 6.41 |
| 無孔積層材の弾性係数 E_x | 室温 | 56 | 59 | 56 | 54 |
| | 300℃ | 52 | 56 | 55 | 56 |
| 単層材 $[\pm 45^\circ]_{4S}$ のせん断弾性係数 G_{12} | 室温 | 5.10 | 4.74 | 4.78 | 4.76 |
| | 300℃ | 1.51 | 2.18 | 2.06 | 2.91 |
| 単層材 $[0^\circ]_8$ のポアソン比 ν | 室温 | 0.35 | 0.32 | 0.32 | 0.33 |
| | 300℃ | 0.32 | 0.30 | 0.23 | 0.32 |

(a) 単層材 $[0^\circ]_8$ の弾性係数(b) 単層材 $[90^\circ]_{20}$ の弾性係数

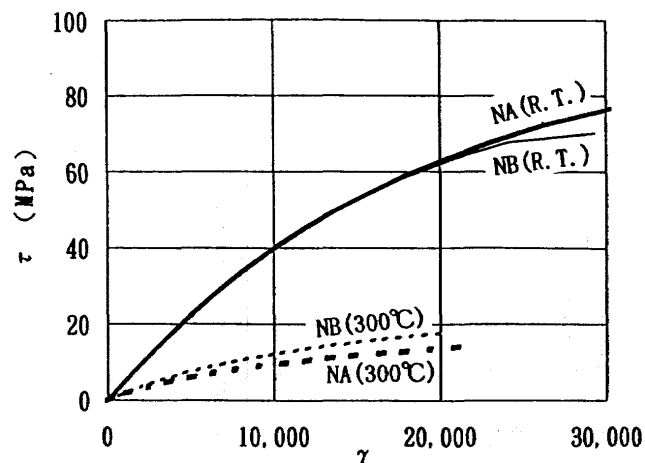
(c) 無孔積層材の弾性係数

図6 T800H/PMR-15複合材料の弾性係数

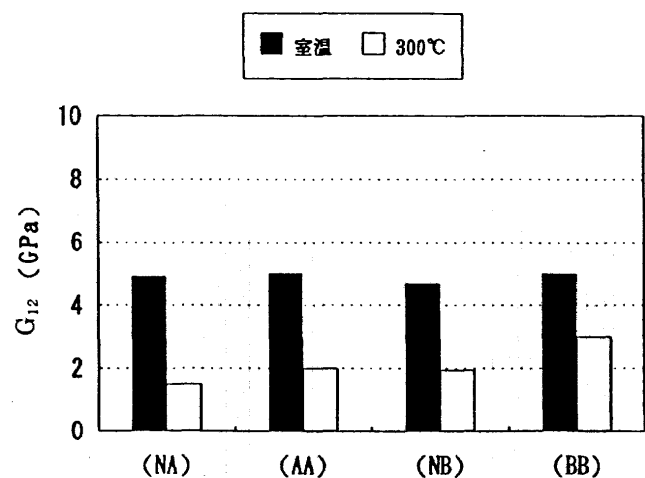
4.2 破壊強度

4.2.1 単層材の場合

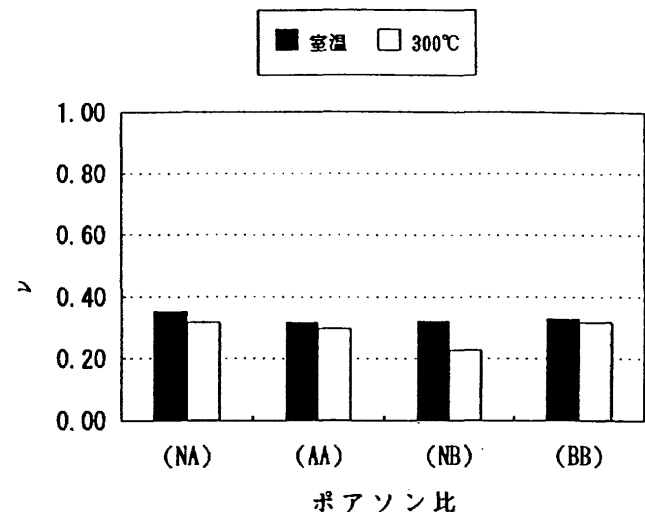
単層材 $[0^\circ]$ の引張試験における破壊の様子を図 5.1(a) および図 5.3(a) に示す。破壊は最初にタブ近傍の表面層から局所的な損傷を生じ、その後 0° 層繊維がばらばらに分離・飛散した。圧縮試験における破壊の様子を図 5.1(b) および図 5.3(b) に示す。破壊は評価部分で生じる場合と、圧縮治具に固定したタブ内部で生じる場合の 2 つの形態があ



(a) せん断応力とひずみの関係



(b) せん断弾性係数

図7 単層材 $[\pm 45^\circ]_{4S}$ のせん断弾性係数図8 単層材 $[0^\circ]_8$ のポアソン比

った。また、タブの接着部分で剝離を生じた例も認められた。単層材 $[0^\circ]$ の破壊強度を図 9 に示す。同図(a)引張強度において、BB 材のみは室温と 300°C ではほぼ同じ強度となっており、単層材 $[0^\circ]$ の引張弾性係数と同じ傾向を示し

表 3 T800H/PMR-15複合材料の破壊強度

| 破壊強度 (MPa) | 試験機関 | NAL | A 社 | NAL | B 社 |
|-----------------------------|------|-------|-------|-------|-------|
| | | (NA) | (AA) | (NB) | (BB) |
| 単層材 [0°] ₈ 引張 | 室温 | 2,393 | 2,609 | 2,030 | 2,138 |
| | 300℃ | 1,902 | 1,716 | 1,589 | 2,069 |
| 単層材 [0°] ₈ 圧縮 | 室温 | 1,432 | 1,451 | 1,569 | 1,442 |
| | 300℃ | 1,000 | 981 | 637 | 863 |
| 単層材 [90°] ₂₀ 引張 | 室温 | 53 | 63 | 71 | 71 |
| | 300℃ | 23 | 23 | 22 | 24 |
| 単層材 [90°] ₂₀ 圧縮 | 室温 | 188 | 227 | 244 | 255 |
| | 300℃ | 108 | 105 | 112 | 111 |
| 単層材 [±45°] _{4S} 引張 | 室温 | 94 | 99 | 73 | 78 |
| | 300℃ | 54 | 61 | 50 | 72 |
| 単層材 [0°] ₂₀ 三点曲げ | 室温 | 126 | 105 | 127 | 140 |
| | 300℃ | 40 | 39 | 44 | 62 |
| 無孔積層材引張 | 室温 | 796 | 738 | 836 | 789 |
| | 300℃ | 647 | 729 | 745 | 685 |
| 無孔積層材圧縮 | 室温 | 499 | 687 | 516 | 594 |
| | 300℃ | 178 | 400 | 296 | 449 |
| 有孔積層材引張 | 室温 | 475 | 494 | 454 | 455 |
| | 300℃ | 486 | 477 | 460 | 504 |
| 有孔積層材圧縮 | 室温 | 312 | 349 | 322 | 320 |
| | 300℃ | 249 | 246 | 223 | 261 |

ている。NA, AA, NB については温度の上昇によって約 20～34% 強度の低下が見られ、温度の依存性が認められる。強度のばらつきを変動係数で表わすと、室温の場合で NA が約 14%, NB が約 3% である。300℃ の場合には NA, NB とほぼ同じで約 5% である。図 9 の (b) 圧縮強度においては、A 材、B 材ともに温度の上昇によって約 30～60% 強度の低下が見られる。室温の場合には NB が最も高い破壊強度を示し、NA, AA, BB がほぼ同じ強度である。300℃ の場合には逆の傾向を示し、NB が最も低い破壊強度となり、NA, AA, BB がほぼ同じ強度である。強度の変動係数は室温の場合で NA が約 7%, NB が約 6% である。300℃ の場合には NA が約 11%, NB が約 8% である。

単層材 [90°] の引張試験における破壊の様子を図 5.1(c) および図 5.3(c) に示す。破壊は評価部とタブの境界部分、それに評価箇所内で生じる 2 つの損傷形態が認められた。圧縮試験における破壊の様子を図 5.1(d) および図 5.3(d) に示す。破壊はすべて評価箇所の範囲内で生じている。単層材 [90°] の破壊強度を図 10 に示す。同図 (a) 引張強度においては、温度の上昇によって約 57～69% 強度の低下が見られ、単層材 [90°] の引張弾性係数と傾向が一致している。強度の変動係数は室温、300℃ いずれの温度環境下においても NA, NB とともに 1% 未満である。図 10 の (b) 圧縮強度におい

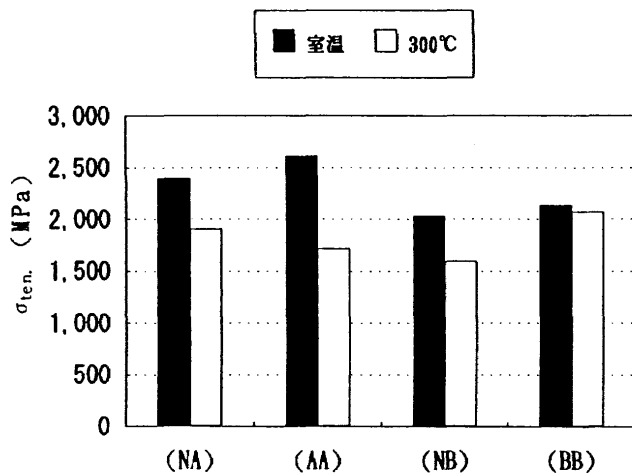
ては、温度の上昇によって約 43～57% 強度の低下が見られる。300℃ の場合には NA, AA, NB, BB がほぼ同じ破壊強度を示す。強度の変動係数は、引張強度の場合と同じく、いずれの温度においても NA, NB とともに 1% 未満である。

単層材 [±45°] の引張試験における破壊の様子を図 5.1(e) および図 5.3(e) に示す。破壊はすべて評価箇所の範囲内で生じている。単層材 [±45°] の破壊強度を図 11 に示す。引張強度は、温度の上昇によって約 9～48% の低下が認められる。強度の変動係数は、室温、300℃ いずれの温度環境下においても NA, NB とともに 1% 以下である。

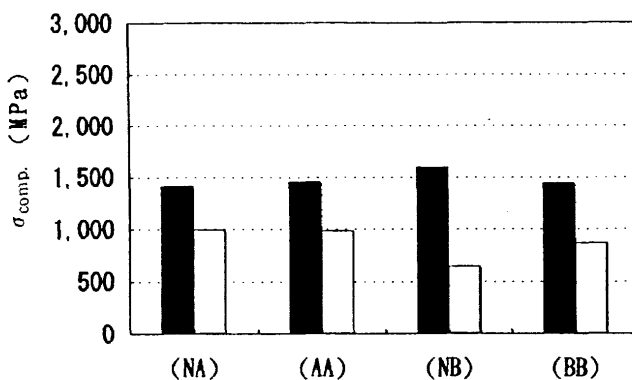
単層材 [0°] の三点曲げ試験における破壊の様子を図 5.1(f) および図 5.3(f) に示す。室温の場合には、曲げ荷重による損傷の痕跡があまり明確でない。しかし、300℃ の場合には、大きく変形した様子が荷重除荷後でも容易に確認できる。単層材 [0°] の層間せん断強度を図 12 に示す。層間せん断強度は、温度の上昇によって約 56～68% の低下が認められた。強度の変動係数は室温、300℃ いずれの温度環境下においても、NA, NB とともに 0.5% 以下である。

4.2.2 積層材の場合

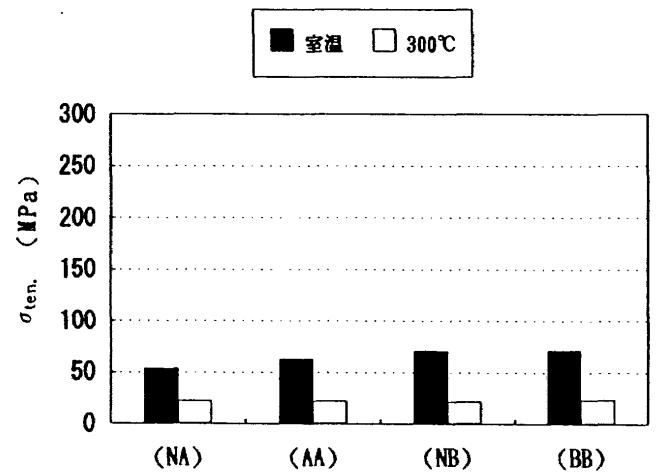
無孔積層材の引張試験における破壊の様子を図 5.2(a) および図 5.4(a) に示す。破壊は評価部内あるいはテーパ部との交点から発生し、層間剥離を伴いながら 1 か所あるいは



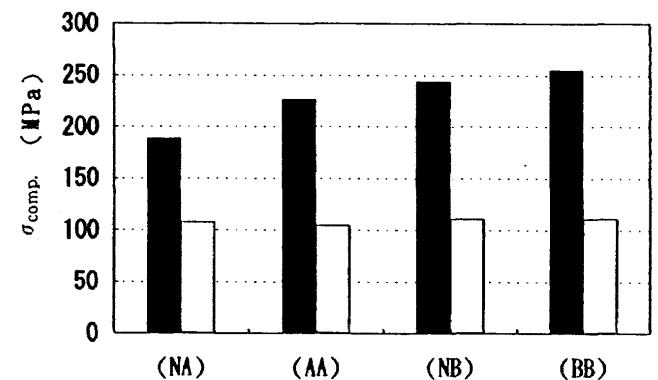
(a) 引張強度



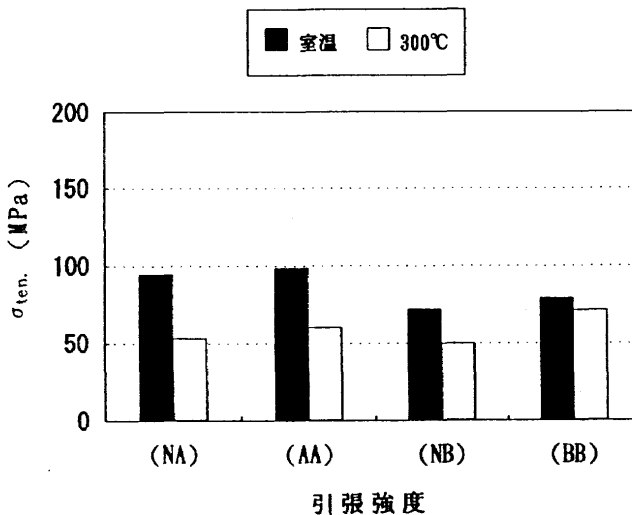
(b) 圧縮強度

図9 単層材 [0°]₈の破壊強度

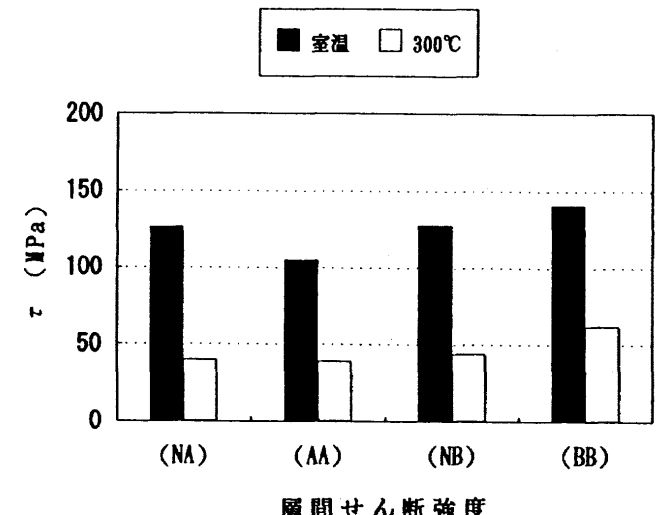
(a) 引張強度



(b) 圧縮強度

図10 単層材 [90°]₂₀の破壊強度

引張強度

図11 単層材 [±45°]_{4S}の破壊強度

層間せん断強度

図12 単層材 [0°]₂₀の層間せん断強度

2か所で分離・破断を生じている。2か所で破断した場合、一方は引張による破断、他方はこの破断による反力すなわち圧縮で破断したものと考えられる。また、このような破壊挙動は室温、300°Cいずれの温度環境下でも認められた。圧縮試験における破壊の様子を図5.2(b)および図5.4(b)に

示す。破壊はすべて評価部内であるが、圧縮治具との境界部近傍での破断が多数見られた。無孔積層材の破壊強度を図13に示す。同図(a)の引張強度においては、AAのみが室温と300°Cではほぼ同じ強度となっているが、その他は約11～19%強度の低下が見られる。強度の変動係数は室温、

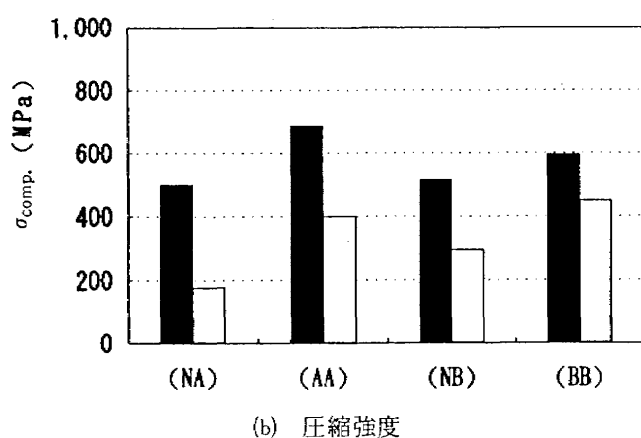
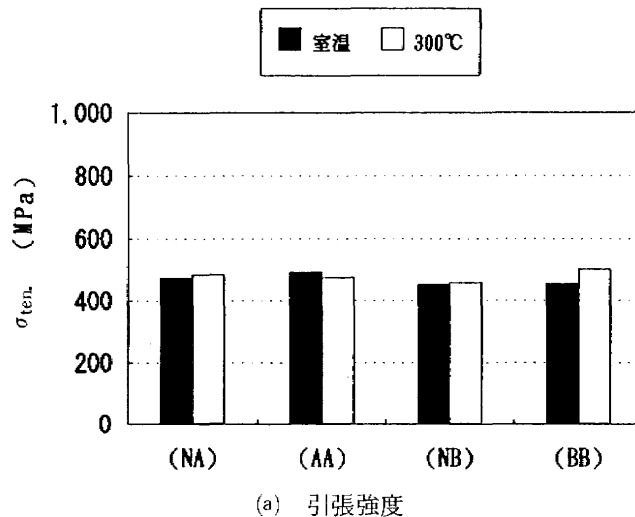
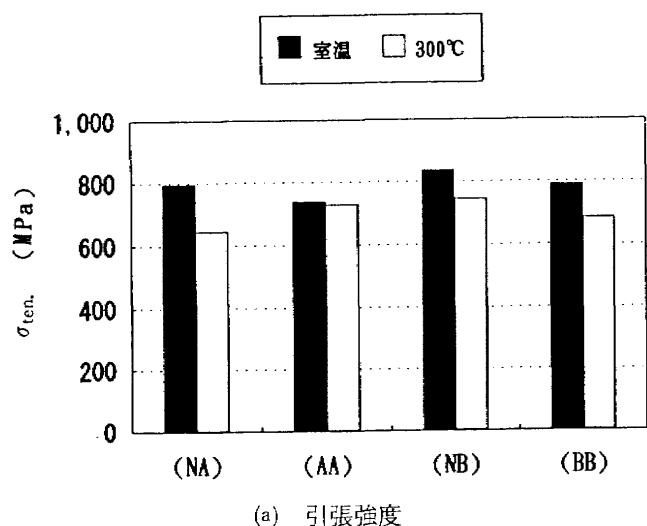


図13 無孔積層材の破壊強度

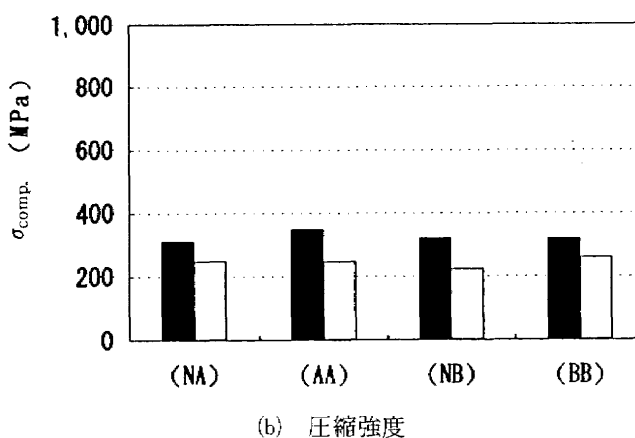


図14 有孔積層材の破壊強度

300°Cともほぼ同じで、NAが約8%、NBが約4%である。同図(b)の圧縮強度においては、温度の上昇によって約24~64%強度の低下が見られ、NAが著しい温度の依存性を示した。強度の変動係数は、室温の場合でNAが約6%、NBが約4%である。300°Cの場合には、NAが約1%、NBが約4%である。

有孔積層材の引張試験における破壊の様子を図5.2(c)および図5.4(c)に示す。破壊は円孔部から生じ、損傷領域が±45°方向へ拡大している。このような破壊挙動は、室温、300°Cいずれの温度環境下でも認められた。圧縮試験における破壊の様子を図5.2(d)および図5.4(d)に示す。破壊はすべて円孔部で発生し、円孔部を跨いだ横一線上すなわち最小断面部分で破断した。また、試験片の両端部近傍では、±45°方向にも損傷の領域を広げて生じている様子が観察された。有孔積層材の破壊強度を図14に示す。同図の(a)引張強度においては、室温と300°Cでほぼ同じ強度となっている。強度の変動係数は、室温の場合でNAが約3%、NBが1%未満である。300°Cでは、NAが約4%、NBが約3%である。同図の(b)圧縮強度の変化は、温度の上昇によって約18~31%強度の低下が見られた。強度の変動係数は、

室温の場合でNAが約2%、NBが1%未満である。300°Cの場合には、NAが約1%、NBが1%未満である。強度の変動係数は、円孔による応力集中部が存在するため、無孔積層材の場合と異なってそれほど変動を生じていない。

5. 破壊の力学的解析

今回の解析に用いた単層材の静的な基本強度特性は、定義に従ってまとめなおすと表4となる。

5.1 無孔積層材の場合

FPF解析およびLPF解析に、二つの破壊則すなわち最大応力則とTsai-Wu則を適用した結果は、実験値の平均値と合せて表5および図15.1、図15.2に示した。今回の試験データ(単層材の静的な基本強度特性値および積層材の強度値)は、供試材料の成形加工条件および試験方法が同一でないため、試験グループNA、AA、NB、BBによって大きな差を生じる場合がある。したがって、試験データはグループ別と平均値にそれぞれ分けて示している。ただし、Ave.欄については、表6に示した全グループの静的な基本強度特性の平均値を使用したもので、各グループ毎にお

表 4 T800H/PMR-15 複合材料の破壊解析用基本強度特性

| 負荷 荷重 | 試験 | 温度 (°C) | E ₁ (GPa) | E ₂ (GPa) | G ₁₂ (GPa) | ν | X _T (MPa) | X _C (MPa) | Y _T (MPa) | Y _C (MPa) | S (MPa) |
|----------|----|------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 引張 | NA | 室温 | 168 | 8.53 | 5.10 | 0.35 | 2,393 | 1,432 | 53 | 188 | 94 |
| | | 300°C | 165 | 6.57 | 1.51 | 0.32 | 1,902 | 1,000 | 23 | 108 | 54 |
| | AA | 室温 | 171 | 8.69 | 4.74 | 0.32 | 2,609 | 1,451 | 63 | 227 | 99 |
| | | 300°C | 164 | 6.27 | 2.18 | 0.30 | 1,716 | 981 | 23 | 105 | 61 |
| 圧縮 | NB | 室温 | 154 | 9.02 | 4.78 | 0.32 | 2,030 | 1,569 | 71 | 244 | 73 |
| | | 300°C | 161 | 5.00 | 2.06 | 0.23 | 1,589 | 637 | 22 | 112 | 50 |
| | BB | 室温 | 145 | 8.47 | 4.76 | 0.33 | 2,138 | 1,442 | 71 | 255 | 78 |
| | | 300°C | 163 | 6.41 | 2.91 | 0.32 | 2,069 | 863 | 24 | 111 | 72 |
| 引張 | NA | 室温 | 150 ^{*1} | 9.41 | 5.10 | 0.32 | 2,393 | 1,432 | 53 | 188 | 94 |
| | | 300°C | 144 ^{*1} | 9.22 | 1.51 | 0.36 | 1,902 | 1,000 | 23 | 108 | 54 |
| | AA | 室温 | 150 | 8.73 | 4.74 | 0.32 | 2,609 | 1,451 | 63 | 227 | 99 |
| | | 300°C | 144 | 6.47 | 2.18 | 0.36 | 1,716 | 981 | 23 | 105 | 61 |
| 圧縮 | NB | 室温 | 139 ^{*2} | 10.50 | 4.78 | 0.37 | 2,030 | 1,569 | 71 | 244 | 73 |
| | | 300°C | 139 ^{*2} | 10.80 | 2.06 | 0.27 | 1,589 | 637 | 22 | 112 | 50 |
| | BB | 室温 | 139 | 13.30 | 4.76 | 0.37 | 2,138 | 1,442 | 71 | 255 | 78 |
| | | 300°C | 139 | 6.85 | 2.91 | 0.27 | 2,069 | 863 | 24 | 111 | 72 |

*1) A社のデータを使用。

*2) B社のデータを使用。






表 5 T800H/PMR-15 複合材料の破壊解析〔無孔積層材〕の場合

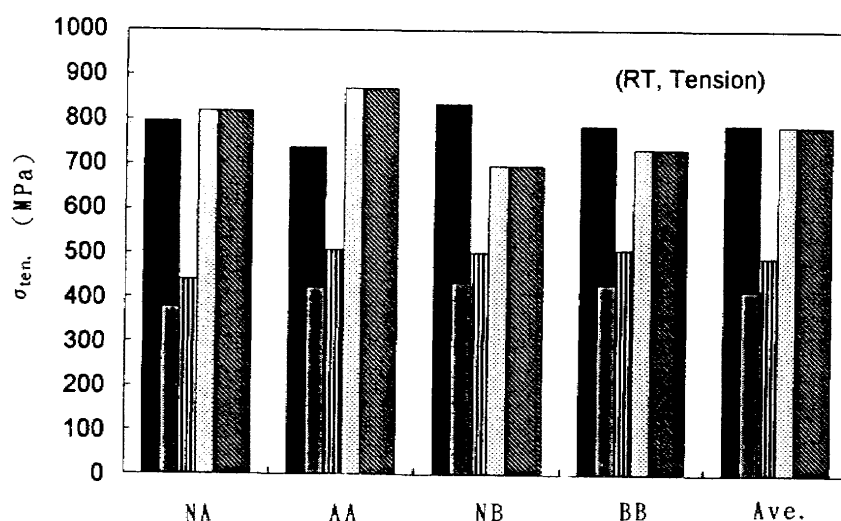
| 試験 機関 | 温度 (°C) | 負荷 荷重 | FPF 解析 | | LPF 解析 | | 実験値 |
|----------|------------|----------|----------|-------|----------|-------|-----|
| | | | Tsai-Wu則 | 最大応力則 | Tsai-Wu則 | 最大応力則 | 平 均 |
| NA | 室温 | 引張 圧縮 | 375 | 440 | 818 | 818 | 796 |
| | | | 552 | 547 | 463 | 492 | 499 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 196 | 225 | 544 | 642 | 647 |
| | | | 366 | 362 | 306 | 339 | 178 |
| AA | 室温 | 引張 圧縮 | 421 | 508 | 870 | 870 | 738 |
| | | | 553 | 549 | 484 | 484 | 687 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 204 | 236 | 556 | 580 | 729 |
| | | | 366 | 353 | 310 | 332 | 400 |
| NB | 室温 | 引張 圧縮 | 433 | 503 | 697 | 696 | 836 |
| | | | 638 | 605 | 511 | 540 | 516 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 206 | 269 | 450 | 536 | 745 |
| | | | 208 | 236 | 198 | 217 | 296 |
| BB | 室温 | 引張 圧縮 | 429 | 510 | 735 | 733 | 789 |
| | | | 592 | 565 | 466 | 498 | 594 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 204 | 243 | 516 | 702 | 685 |
| | | | 296 | 317 | 273 | 294 | 449 |
| Ave. *) | 室温 | 引張 圧縮 | 416 | 493 | 786 | 785 | 790 |
| | | | 585 | 565 | 477 | 506 | 574 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 203 | 242 | 523 | 617 | 702 |
| | | | 307 | 318 | 271 | 296 | 331 |

*) 全試験機関における基本強度特性値の平均を使用。

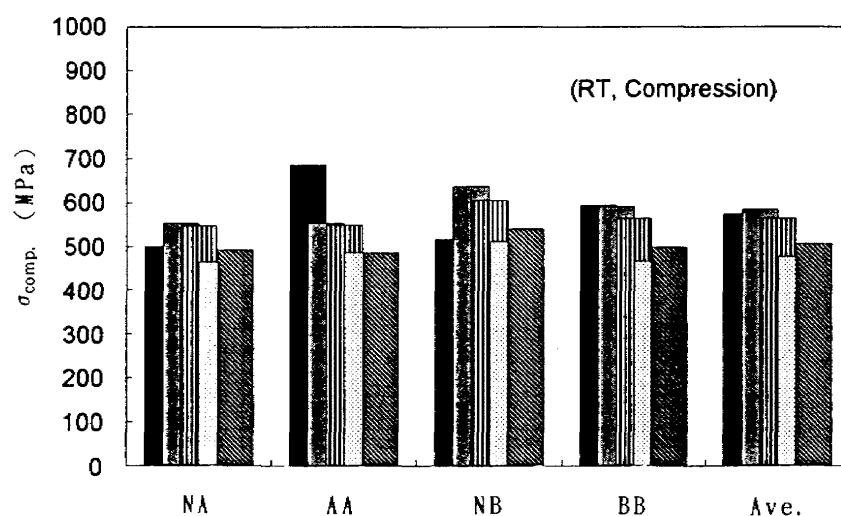
表 6 T800H/PMR-15複合材料の全試験機関における平均基本強度特性

| 負荷荷重 | 温度 (°C) | E_1 (GPa) | E_2 (GPa) | G_{12} (GPa) | ν | X_T (MPa) | X_C (MPa) | Y_T (MPa) | Y_C (MPa) | S (MPa) |
|------|---------|-------------|-------------|----------------|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| 引張 | 室温 | 159 | 8.68 | 4.84 | 0.33 | 2,295 | 1,471 | 64 | 228 | 86 |
| | 300°C | 163 | 6.06 | 2.17 | 0.29 | 1,824 | 871 | 23 | 109 | 59 |
| 圧縮 | 室温 | 145 | 10.48 | 4.84 | 0.25 | 2,295 | 1,471 | 64 | 228 | 86 |
| | 300°C | 142 | 8.34 | 2.17 | 0.32 | 1,824 | 871 | 23 | 109 | 59 |

| 実験値 | FPF解析 | | LPF解析 | |
|---|---|---|---|---|
| | Tsai-Wu則 | 最大応力則 | Tsai-Wu則 | 最大応力則 |
|  |  |  |  |  |



(a) 引張強度



(b) 圧縮強度






図15.1 無孔積層材室温試験結果と解析値の比較

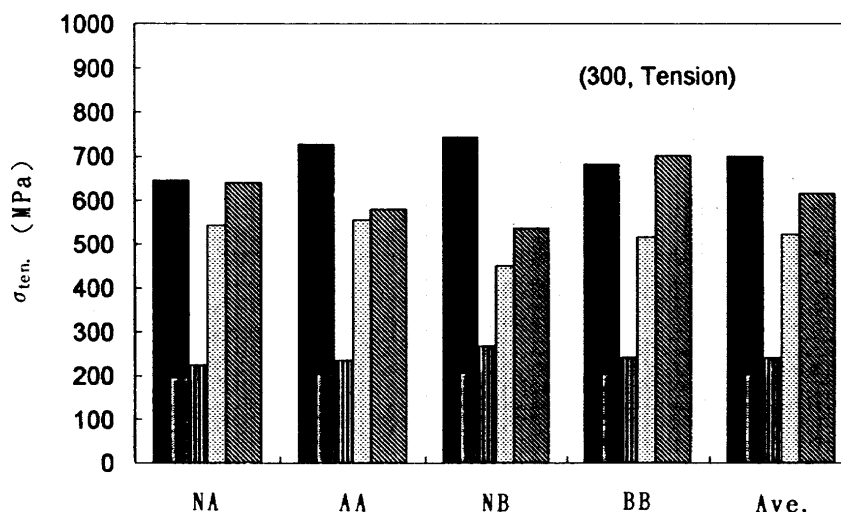
ける解析の平均値ではない。解析値との比較では、次の点についても留意する必要がある。LPF解析ではマトリックスの破壊が先に発生し、その後、繊維の破壊が最終的に生じるものと想定している。そのため、圧縮破壊のように初期破壊が終極破壊になる場合は、LPF解析結果の方がFPF解析結果よりも低い値となる。したがって、圧縮強度については、FPF解析結果と比較するのが妥当である。また、LPF解析は繊維の破壊を想定しているため、最大応力則と

の組合わせが妥当と考えられる。

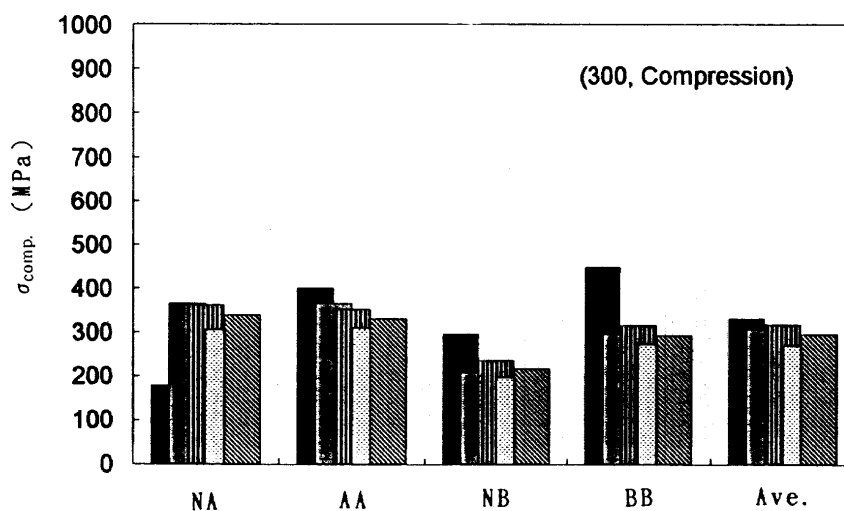
積層材の終極破壊強度は繊維方向の強度に大きく依存するが、単層材の繊維方向引張又は圧縮試験を理想的に行うのが難しく、一般的に試験結果に大きなばらつきを生じる。そのため、全グループの静的な基本強度特性の平均値を使用した解析結果と積層材の試験結果について検討した。

室温における引張強度を図15.1(a)に示す。LPF解析の結果は Tsai-Wu 則と最大応力則がほぼ同じ値を導き、実験

| 実験値 | FPF解析 | | LPF解析 | |
|---|---|---|---|---|
| | Tsai-Wu則 | 最大応力則 | Tsai-Wu則 | 最大応力則 |
|  |  |  |  |  |



(a) 引張強度



(b) 圧縮強度

図15.2 無孔積層材 300°C 試験結果と解析値の比較

値と AA, NB の解析値に若干の差を生じているが、実験値の平均で比較すれば良い一致を示している。FPF 解析では解析値と大きな差を生じ、実験値の約半分の値となる。また、解析値は Tsai-Wu 則で求めた値より最大応力則の方が若干高くなる傾向を示している。

室温における圧縮強度を図15.1(b)に示す。圧縮の場合は FPF 解析の結果が実験値とほぼ一致している。LPF 解析の結果は実験値よりも約15%低くなっている。

高温における引張強度を図15.2(a)に示す。最大応力則による LPF 解析によれば実験値の約88%である。FPF 解析では実験値の約31%で、大幅に低い評価となる。高温における圧縮強度を図15.2(b)に示す。FPF 解析は実験値の約94%であるが、LPF 解析値だとこれよりも少し低くなっている。各グループ毎に比較した各強度の解析値は、実験値と比べて相互の差異が大きい。しかし、実験値の平均を用いて解析値と比較すれば良い対応を示す。

5.2 有孔積層材の場合

無孔および有孔積層材の破壊強度、およびその強度比 σ_N/σ_0 を表 7 に改めて示す。

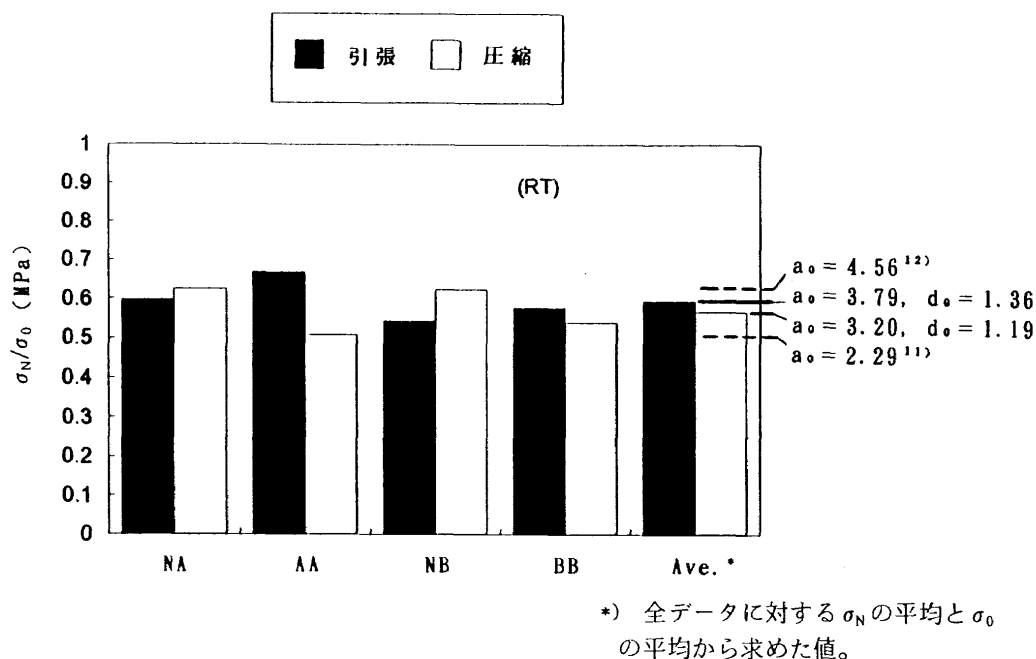
室温環境下における引張および圧縮の各強度比 σ_N/σ_0 を、図16の(a)に示す。今回の試験に供した積層材の有孔径は 6.35mm の一種類であるため、 σ_N/σ_0 の実験値と解析値が

等しくなるように、式(1)および式(3)から反復計算によって特性長 d_0 と a_0 を導いて、表 8 に示した。特性長 d_0 , a_0 は平均値についてのみ求めた。引張強度比 σ_N/σ_0 は約 0.595 で、特性長として $d_0=1.36\text{mm}$, $a_0=3.79\text{mm}$ が得られる。圧縮強度比 σ_N/σ_0 は約 0.568 で、特性長として $d_0=1.19\text{mm}$, $a_0=3.20\text{mm}$ が得られる。また、室温環境下の引張試験に対する文献データ^{9),11),12)}を表 9 に示した。ただし、文献で評価した材料は今回用いた試験材料と異なる。Whitney らはガラス / エポキシ積層材の引張強度の場合 $d_0=1.02\text{mm}$ (0.04 インチ), $a_0=3.81\text{mm}$ (0.15 インチ) を導いた。その後、他の研究者によってカーボン / エポキシ擬似等方積層材の引張強度が求められ、 $d_0=0.762\text{mm}$, $a_0=2.29\text{mm}$ ¹¹⁾ あるいは $d_0=0.982\text{mm}$, $a_0=4.56\text{mm}$ ^{12),14)} 等の何種類かの報告がある。一般に、ASC 法は PSC 法よりも孔径の広い範囲にわたって適合するので、上記の特性長によって σ_N/σ_0 を計算した。その結果を図中に実線で示す。材料は若干異なるが、文献の特性長から求めた σ_N/σ_0 の間に、今回の試験結果は入っている。今までに発表されているデータについては引張強度と圧縮強度の両者を比較した例は見かけない。本試験結果の平均値では両者の σ_N/σ_0 の差は小さく、圧縮強度の方が若干低い値になっているが、各グループ間のばらつきおよび引張と圧縮の破壊現象の違いを考えると、

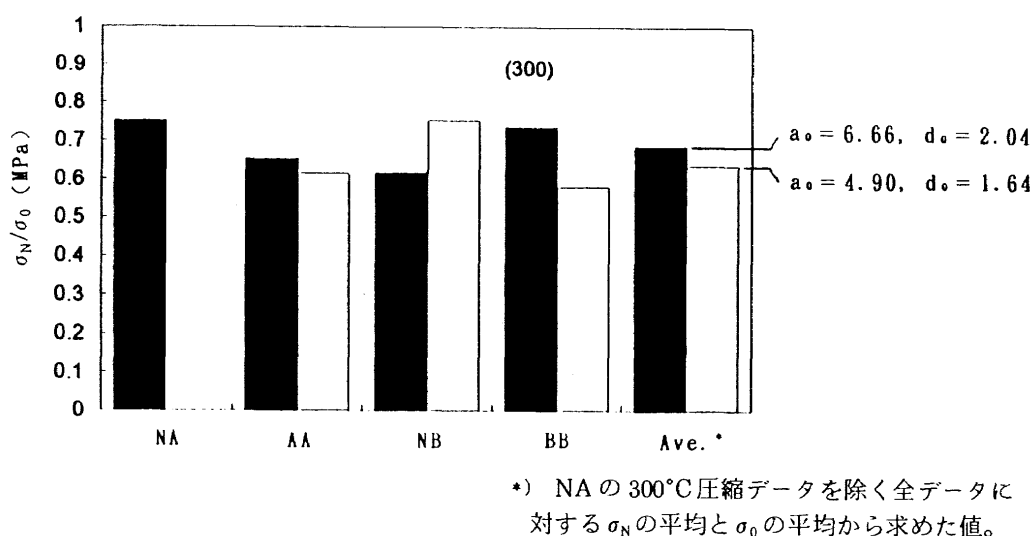
表 7 T800H/PMR-15 複合材料の有孔積層材と無孔積層材の強度比

| 試験 機関 | 温度 (°C) | 負荷 荷重 | 無孔積層材 強度 σ_0 (MPa) | 有孔積層材 強度 σ_N (MPa) | σ_N/σ_0 |
|----------|------------|----------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------|
| NA | 室温 | 引張 圧縮 | 796 499 | 475 312 | 0.597 0.625 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 647 --- | 486 --- | 0.751 ---- *) |
| AA | 室温 | 引張 圧縮 | 738 687 | 494 349 | 0.669 0.508 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 729 400 | 477 246 | 0.654 0.615 |
| NB | 室温 | 引張 圧縮 | 836 516 | 454 322 | 0.543 0.624 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 745 296 | 460 223 | 0.617 0.753 |
| BB | 室温 | 引張 圧縮 | 789 594 | 455 320 | 0.577 0.539 |
| | 300°C | 引張 圧縮 | 685 449 | 504 261 | 0.736 0.581 |

*) $\sigma_0 < \sigma_N$ となるデータがあるため割愛した。



(a) 室温試験の場合



(b) 300°C試験の場合

図16 積層材〔有孔〕と〔無孔〕の強度比 σ_N/σ_0

常にこのような傾向になるとは判断できない。

高温環境下における引張および圧縮の各強度比 σ_N/σ_0 を、図16(b)に示す。高温環境におけるこの種類の文献は見あたらないため、今回の実験値に対する特性長 (d_0, a_0) のみを示した。引張強度比は約0.687で、特性長として $d_0 = 2.04\text{mm}$, $a_0 = 6.66\text{mm}$ が得られる。圧縮強度比 σ_N/σ_0 は約0.637で、特性長として $d_0 = 1.64\text{mm}$, $a_0 = 4.90\text{mm}$ が得られる。引張および圧縮共に特性長は、室温の場合よりも長くなっている。室温の場合と同様に σ_N/σ_0 の平均値は、圧縮の方が引張よりも若干小さいが、両者共に室温の場合よりも10%以上大きい。また、同図においてグループNAの300°Cにおける圧縮試験結果を削除している。これは有

孔積層材が無孔積層材より破壊強度が高くなってしまったため、同図から割愛したものである。一般的には、切欠きの無い無孔積層材の方が高い破壊強度となる。そこで表1.4, 1.5の試験結果を詳細に点検したところ、実測板厚が有孔積層材で約5.41mm, 無孔積層材で約4.41mmとなっており、公称板厚に比べて約18%の違いを生じていた。この実測板厚によって破壊強度の再計算を行っても、有孔積層材は無孔積層材より破壊強度が高くなるという逆転現象を改善できなかった。その他の原因としては、供試材料の成形加工時における潜在的な欠陥および試験片加工時における二次的な損傷の有無、各試験片における繊維体積含有率の多寡などが挙げられる。

表 8 試験データの平均値から求めた強度比 (σ_N/σ_0) と特性長

| 温度 (°C) | 負荷 荷重 | σ_0 (MPa) | σ_N (MPa) | σ_N/σ_0 | PSC 法の特性長 d_0 (mm) | ASC 法の特性長 a_0 (mm) |
|------------|----------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
| 室温 | 引張 | 790 | 470 | 0.595 | 1.36 | 3.79 |
| | 圧縮 | 574 | 326 | 0.568 | 1.19 | 3.20 |
| 300°C | 引張 | 702 | 482 | 0.687 | 2.04 | 6.66 |
| | 圧縮 | 382 | 243 | 0.637 | 1.64 | 4.90 |

表 9 室温引張に対する文献データ

| 文献 番号 | 材 料 | PSC 法 | | ASC 法 | |
|----------|-----------------|------------|---------------------|------------|---------------------|
| | | d_0 (mm) | σ_N/σ_0 | a_0 (mm) | σ_N/σ_0 |
| 9 | ガラス / エポキシ等方積層 | 1.02 | 0.537 | 3.81 | 0.596 |
| 11 | カーボン / エポキシ等方積層 | 0.762 | 0.488 | 2.29 | 0.517 |
| 12 | カーボン / エポキシ等方積層 | 0.982 | 0.531 | 4.56 | 0.625 |

6. ま と め

T800H/PMR-15 複合材料の室温および 300°C 温度環境下における評価試験結果は、次のように要約される。

(1) 引張弾性係数において、単層材 $[0^\circ]_8$ 、無孔積層材の場合では温度上昇の影響を受けないが、単層材 $[90^\circ]_{20}$ 、単層材 $[\pm 45^\circ]_{4S}$ の場合では温度依存性を強く示す。

(2) 単層材 $[0^\circ]$ のポアソン比は、300°C における NB が 0.23 の場合を除いて、約 0.32～0.35 の範囲に含まれる。

(3) 単層材 $[0^\circ]$ の引張強度、圧縮強度は、温度上昇によって強度の低下が見られる。強度の変動係数は室温、高温の場合を含めて約 3～14% の範囲である。

(4) 単層材 $[90^\circ]$ 、単層材 $[\pm 45^\circ]$ の引張強度、圧縮強度および単層材 $[0^\circ]$ の三点曲げ試験における層間せん断強度は、温度上昇による影響を強く受け、室温強度の約半分以下の値となる場合もある。強度の変動係数はいずれの場合も約 1% 未満である。

(5) 無孔積層材の引張強度、圧縮強度は、温度上昇によって強度の低下が見られる。破壊強度の変動係数は、室温の場合だと約 6% 以下、300°C の場合が約 4% 以下である。

(6) 有孔積層材の引張強度は、室温と 300°C でほぼ同じ強度となっている。圧縮強度は、温度上昇によって約 18～31% 強度の低下が見られる。強度の変動係数は、円孔による応力集中部が存在するために小さく、無孔積層材の約半分である。

(7) 無孔積層材の室温における引張強度は、LPF 解析の場合 Tsai-Wu 則と最大応力則がほぼ同じ値を導き、実験値の平均と比較すれば良い一致を示している。FPF 解析では解析値と大きな差を生じ、実験値の約半分の値となる。圧縮強度では、LPF 解析が実験値よりも約 15% 低くなり、

逆に FPF 解析が実験値とほぼ一致している。

(8) 無孔積層材の高温における引張強度は、最大応力則を用いた LPF 解析によれば実験値の約 88% である。FPF 解析では実験値の約 31% となる。圧縮強度では、LPF 解析、FPF 解析ともに実験値の平均と良い対応を示す。

(9) 有孔積層材の室温における平均的引張強度比 σ_N/σ_0 は約 0.595 で、特性長として $d_0=1.36\text{mm}$ 、 $a_0=3.79\text{mm}$ が得られる。同じく圧縮強度比 σ_N/σ_0 は 0.568 で、特性長として $d_0=1.19\text{mm}$ 、 $a_0=3.20\text{mm}$ が得られる。

(10) 有孔積層材の高温における平均的引張強度比 σ_N/σ_0 は約 0.687 で、特性長として $d_0=2.04\text{mm}$ 、 $a_0=6.66\text{mm}$ が得られる。同じく圧縮強度比 σ_N/σ_0 は 0.637 で、特性長として $d_0=1.64\text{mm}$ 、 $a_0=4.90\text{mm}$ が得られる。

7. あと が き

今回の評価試験に用いた T800H/PMR-15 (カーボン / ポリイミド) 複合材料は、HOPE 主構造の候補材料として挙げられ、試行錯誤によって製作された国内生産の初期段階における製品である。現在では、国内航空機メーカー各社いずれも成形・加工技術等の蓄積が図られ、安定した性能が得られるようになってきている。

参 考 文 献

- 1) 昭和 61・62 年度 NAL/NASUDA 共同研究成果報告書「回収技術の研究」, (1988.3).
- 2) Dexter, H. B., and Davis, J. G., Jr. ; Graphite/ Polyimide Composites, NASA CP-2079 (1979.3).
- 3) Serafini, T. T., and Hanson, M. P. ; Environmental Effects on Graphite Fiber Reinforced PMR-15 Polyimide, ASTM STP 768, N. R., Adsit, Ed., 1982,

- pp.5-19.
- 4) Kunz, S. C. ; Thermomechanical Characterization of Graphite/Polyimide Composites, ASTM STP 768, N. R., Adsit, Ed., 1982, pp.33-53.
 - 5) Campbell, M. D. and Burleigh, D. D. ; Thermophysical Properties Data on Graphite/Polyimide Composite Materials, ASTM STP 768, N. R., Adsit, Ed., 1982, pp.54-72.
 - 6) Nelson, J. B. ; Thermal Aging of Graphite/Polyimide Composite, ASTM STP 813, T. K., O'Brien, Ed., 1983, pp.206-221.
 - 7) Erikson, I. and Aronson, C. G. ; Jour. of Composites Materials, Vol.24 (1990), pp.456-482.
 - 8) Craddock, J. N. and Champagne, D. J. ; AIAA 92-0739 (1982).
 - 9) Whitney, J. M. and Nuismer, R. J. ; Jour. of Composites Materials, Vol.8 (1974), pp.253-265.
 - 10) Garber, D. P., Morris, D. H., and Everett, R. A., Jr. ; Elastic Properties and Fracture Behavior of Graphite/Polyimide Composites at Extreme Temperatures, ASTM STP 768, N. R., Adsit, Ed., 1982, pp.73-91.
 - 11) Tan, S. C. ; Jour. of Composites Materials, Vol. 22 (1988), pp.322-340.
 - 12) Erikson, I. and Aronson, C. G. ; Jour. of Composites Materials, Vol.24 (1990), pp.456-482.
 - 13) 三本木茂夫 ; 積層板の強度推定法の比較, 第31回構造強度に関する講演会講演集, (1989), pp.68-71.
 - 14) 三本木茂夫 ; 複合材料構造部材の強度評価, 日本機械学会講習会 No.940-2 (1994), pp.15-21.

航空宇宙技術研究所報告1254号

平成6年11月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話三鷹(0422) 47-5911(大代表) ㇿ182
印刷所 株式会社三興印刷
東京都新宿区西早稲田 2-1-18

Printed in Japan