織物ガラスーエポキシ積層材料の極低温引張特性

熊谷 進, 進藤 裕英[†], 堀口 勝三

東北大学大学院工学研究科材料加工プロセス学専攻
仙台市青葉区荒巻字青葉02 ([†]E-mail : shindo@msws.material.tohoku.ac.jp)

(2000年6月30日受理)

Cryogenic Tensile Properties of Woven Glass-epoxy Laminates

Susumu KUMAGAI, Yasuhide SHINDO and Katsumi HORIGUCHI

Department of Materials Processing, Graduate School of Engineering, Tohoku University,
Aoba-yama 02, Sendai 980-8579

(Received June 30, 2000)

Synopsis: The cryogenic tensile behavior of SL-ES30 woven glass-epoxy laminates has been discussed through theoretical and experimental characterizations. The tension tests were conducted in accordance with JIS K 7054 at room temperature and liquid nitrogen temperature (77 K). The general specimen geometry was a rectangular dog-bone shape with constant gage length, but with each specimen size having a different specimen width. The experimental finding provides the data for analytical modeling. The model uses two damage variables that are determined from experimental data. A finite element method coupled with damage was adopted for the extensional analysis. The effects of temperature, specimen geometry and gripping method on the tensile properties are examined.

Keywords: cryomechanics, damage mechanics, tension testing, finite element method, woven glass-epoxy laminate

1. 緒 言

極低温等の苛酷な環境下における有機複合材料の力学特性評価が、超伝導応用・航空宇宙機器の健全性評価・強度設計上重要な課題となっている^{1,2)}。また、核融合用超伝導マグネット等の電気的熱的絶縁材料、構造支持材料さらに浸水防止材料として最も多く使用されている織物ガラスーエポキシ積層材料は、ガラス繊維束を平織形状に織込みエポキシ樹脂を含浸させて成形される積層材料で、(1)複雑な三次元構造、(2)顕著な物性値温度依存性、(3)著しい異方性等の特徴を有し、従来の金属材料のような延性がないため、極低温

引張・圧縮試験方法でさえも問題点を残している。その他、核融合用超伝導マグネット構造健全性評価上重要な極低温破壊力学的挙動、層間せん断挙動解明のための試験方法についても、未検討部分が多く今後の開発が期待されている。

最近、著者ら^{3,4)}は、核融合用超伝導マグネットの絶縁材料として開発された織物ガラスーエポキシ積層材料 G-10CR の極低温層間せん断試験(両面ノッチ圧縮・ショートビーム試験)および数値シミュレーション(最大せん断応力)を行い、物性値としての極低温層間せん断強度評価に成功した。また、得られた成果を踏まえ、極低温層間せん断強度を評価するための適切な

試験片形状を提案し、VAMAS(Versailles Project on Advanced Materials and Standards)国際ラウンドロビンをテストを実施している。さらに、織物ガラスーエポキシ積層材料 G-10CR および SL-ES30 の室温、液体窒素温度 (77 K) および液体ヘリウム温度 (4 K) における圧縮試験を行い、圧縮特性に及ぼす試験温度、試験片形状の影響を解明した⁵⁾。極低温引張特性に関しては、一方向炭素繊維強化プラスチックの極低温引張試験方法が提案され⁶⁾、タブ付き短冊形試験片を対象に、引張特性に及ぼすタブ形状・材料の影響について検討が行われている。Kasen⁷⁾は、各種ガラス繊維強化プラスチックの極低温引張試験結果をまとめ、試験方法について考察を加えている。また、Walsh ら⁸⁾は、極低温における一方向ガラス繊維強化プラスチックの引張試験を行い、引張特性に及ぼす試験温度、ガラス繊維体積含有率の影響を検討している。さらに、Tschegg ら⁹⁾は、極低温における織物ガラスーエポキシ積層材料の引張試験を行い、引張特性に及ぼす試験片寸法の影響について検討している。その他、極低温用に開発された三次元織物構造を有するガラス繊維強化プラスチック¹⁰⁾の引張特性についても試験片寸法に関する検討が行われ、従来の織物ガラスーエポキシ積層材料と同様な傾向を示すことが報告されている¹¹⁾。

一方、織物ガラスーエポキシ積層材料を極低温環境で使用する場合には、内部損傷による変形の非線形挙動を考慮した特性評価が必要である。このため、Kriz and Muster¹²⁾は、室温および 77 K における織物ガラスーエポキシ積層材料の引張試験を行い、力学特性に及ぼす損傷の影響を検討した。また、Shan ら¹³⁾は、二次元織物 SiC/SiC 複合材料の引張試験を行い、実験で得られた応力-ひずみ曲線から求まる損傷パラメータを考慮して、主軸から 45° 方向への引張試験および 4 点曲げ試験に関する有限要素解析を実施し、実験結果との比較・検討を行っている。さらに、H.F. Wu and L.L. Wu^{14,15)}は、アラミド繊維強化プラスチックとアルミニウムからなるハイブリッド複合材料の引張試験結果をまとめ、引張試験に関する有限要素解析を実施し、試験片形状の影響について理論的・実験的検討を行っている。

本研究は、国際熱核融合実験炉 (ITER) の超伝導マグネット用に開発された織物ガラスーエポキシ積層材料 SL-ES30 を対象に、室温および 77 K における引張試験を JIS K 7054 規格¹⁶⁾に準拠して行ったもので、引張特性に及ぼす試験温度、試験片幅、試験片固定方

法の影響について解明することを目的としている。また、SL-ES30 の極低温引張試験で得られた応力-ひずみ曲線より求まる損傷パラメータを考慮し、二次元有限要素法による極低温引張挙動の損傷力学解析を行い、損傷挙動に及ぼす試験条件、試験片形状の影響について考察を加えた。

2. 実験方法

2.1 供試材および試験片形状

引張試験に供した織物ガラスーエポキシ積層材料 SL-ES30 (日東シンコー) は、ビスフェノール A 型エポキシ樹脂を E ガラスクロスに含浸させた有機複合材料であり、エポキシ樹脂の硬化剤は、芳香族アミンである。Fig.1 に、warp・fill 繊維束方向に垂直な断面の写真を示す。E ガラスクロスは、fill 繊維束 2 束を引きそろえて平織り (斜子織り) したものである。warp 繊維束の数は 25.4 mm 当たり 44 束、fill 繊維束の数は 25.4 mm 当たり 64 束、ガラス繊維重量含有率は 86% である。

試験片は、JIS K 7054 規格¹⁶⁾に準拠した A 型試験片であり、引張方向が、warp 繊維束方向あるいは fill 繊維束方向となるように採取した。Fig.2 は、試験片形状および寸法を示したもので、B は試験片平行部の幅である。また、試験片形状の影響を検討するため、試験片平行部の幅 $B=10, 15, 25$ mm と変化させた。

Fig. 1 Photomicrograph of woven-glass epoxy laminates cross-section.

Fig. 2 Tensile specimen design.

2.2 極低温引張試験

極低温引張試験は、試験片を電気サーボ式 50 kN 万能試験機および油圧サーボ式 100 kN 万能試験機に組み込んだクライオスタット内の液体窒素に浸し、77 K まで十分冷却して行った。ひずみは、試験片表面にひずみゲージを接着して計測し、荷重・ひずみを直接パーソナルコンピュータに入力・記録した。また、77 K では、最終破壊までのひずみゲージによるひずみ計測が困難であるため、クリップゲージを用いて試験片の伸びを計測した。荷重は、warp 繊維束方向あるいは fill 繊維束方向にクロスヘッド速度 0.5, 5.0 mm/min のストローク制御で負荷した。Fig.3 は、試験治具の形状を示したもので、(a) は試験片肩部を固定した場合 (試験治具 I)、(b) は試験片つかみ部を固定した場合 (試験治具 II) である。JIS K 7054 規格では、試験片つかみ部を固定する方法を推奨しているが、高ガラス含有率の SL-ES30 の場合、引張強度が高く、試験片がつかみ具中で滑ることが予想されるため、二種類の試験治具を用いた。試験治具 I では、試験片を治具に挟み、ボルトとナットで強く固定した。また、試験治具 II では、荷重の増大に伴って締付け圧が増大するつかみ部に試験片を挟み、固定した。

3. 実験結果および考察

3.1 引張特性

Table 1 は、室温 (R.T.) および 77 K における SL-ES 30 の縦弾性係数、ポアソン比および引張強さを示したもので、試験片平行部の幅 $B=15$ mm、クロスヘッド速度 0.5 mm/min の引張試験結果である。また、縦

Fig. 3 Schematic of tension test fixtures.

弾性係数 E_W^I 、ポアソン比 ν_W^I 、引張強さ σ_W^I (warp 繊維束方向試験片、室温 2 本、77 K 2 本)、 E_F^I 、 ν_F^I 、 σ_F^I (fill 繊維束方向試験片、室温 2 本、77 K 4 本) は、試験治具 I の引張試験、 E_W^{II} 、 ν_W^{II} 、 σ_W^{II} (warp 繊維束方向試験片、室温 2 本、77 K 1 本)、 E_F^{II} 、 ν_F^{II} 、 σ_F^{II} (fill 繊維束方向試験片、室温 2 本、77 K 1 本) は、試験治具 II の引張試験より求めた結果であり、平均値を用いている。SL-ES30 の場合、fill 繊維束の数は warp 繊維束の数に比べて多いが、fill 繊維束を 2 本引きそろえて織っているため、warp 繊維束の屈曲は、fill 繊維束に比べて少なくなっている。室温の場合、試験治具 I の引張強さ σ_W^I 、 σ_F^I は、試験治具 II の引張強さ σ_W^{II} 、 σ_F^{II} とほぼ一致し、試験片固定方法の影響は小さいようである。これに対し、77 K の場合、試験治具 II では試験片がつかみ具中で滑り、良好な引張特性を得ることができない

Table 1 Tensile properties of SL-ES30 at room temperature (R.T.) and 77 K.

	R.T.	77 K
E_W^I (GPa)	42.1	55.0
ν_W^I	0.208	0.282
σ_W^I (MPa)	480	930
E_W^{II} (GPa)	41.7	47.7
ν_W^{II}	0.191	0.219
σ_W^{II} (MPa)	484	—
E_F^I (GPa)	41.3	51.8
ν_F^I	0.178	0.239
σ_F^I (MPa)	421	816
E_F^{II} (GPa)	40.0	44.5
ν_F^{II}	0.180	0.220
σ_F^{II} (MPa)	411	—

かった。室温および77 Kの引張強さ σ_W^I は、 σ_F^I に比べて高い値を示し、77 Kの引張強さ σ_W^I 、 σ_F^I は、室温の結果に比べて約2倍に増大している。また、室温および77 Kの縦弾性係数 E_W^I 、ポアソン比 ν_W^I も同様に E_F^I 、 ν_F^I に比べて大きな値を示し、77 Kの E_W^I 、 E_F^I 、 ν_W^I 、 ν_F^I は、室温の結果に比べて増大している。

Fig.4は、室温(R.T.)における引張強さに及ぼす試験片平行部幅 B の影響を示したもので、試験治具II(試験片つかみ部を固定する方法)、クロスヘッド速度0.5 mm/min ($B=15$ mm), 5.0 mm/min ($B=10$, 25 mm) の場合である。また、試験片数は、warp 繊維束方向引張の場合、 $B=10$ mm(3本), 15 mm(2本), 25 mm(4本)であり、fill 繊維束方向引張の場合、 $B=10$ mm(4本), 15 mm(3本), 25 mm(7本)である。warp・fill 繊維束方向の引張強さは、試験片平行部幅 B の増大に伴い減少する傾向を示しているが、これは、応力集中の影響を受けて試験片肩部が破壊したためである。Fig.5は、77 Kの引張強さに及ぼす試験片平行部幅 B の影響を示したもので、試験治具I(試験片肩部を固定する方法)、クロスヘッド速度0.5 mm/min ($B=15$, 25 mm), 5.0 mm/min ($B=25$ mm) の場合である。極低温では引張強さが増大し、試験治具IIの場合、試験片がつかみ具中で滑るため、試験治具Iを用いた。また、試験片数は、warp 繊維束方向引張の場合、 $B=15$ mm(3本), 25 mm(3本)であり、fill 繊維束方向引張の場合、 $B=15$ mm(4本), 25 mm(3本)である。試験片肩部を固定した試験片の引張強さは、試験片平行部幅の影響を強く受け、試験片平行部幅の増大に伴い減少し、応力集中による試験片肩部の破壊が顕著になっている。

3.2 破壊形態観察

Fig.6は、77 Kにおける warp 繊維束方向引張試験片の試験治具I(試験片肩部を固定する方法)による引張試験の破壊形態観察結果を示したもので、(a)は $B=25$ mm, (b)は $B=15$ mm の場合である。77 Kの場合、試験片平行部には、応力-ひずみ曲線の非線形挙動の原因であるエポキシ樹脂の微視破壊による損傷が生じている。また、適切な引張強さ評価には、試験片が平行部で破壊する必要があるが、すべての試験片の破壊は、応力集中のため試験片肩部で生じている。さらに、 $B=15$ mm の試験片に比べて、 $B=25$ mm の試験片は、試験片平行部に対して試験片肩部の損傷が顕著であり、応力集中による損傷が引張強さ減少の一因になっているようである。従って、試験片肩部を固定して引

Fig. 4 Effect of specimen width on tensile strength of SL-ES30 at room temperature (Jig II).

Fig. 5 Effect of specimen width on tensile strength of SL-ES30 at 77 K (Jig I).

Fig. 6 Fracture appearance of tension test specimens (Jig I, Warp) : (a) $B=25$ mm, (b) $B=15$ mm.

張試験を行う場合、試験片平行部の幅は、JIS K 7054 規格に規定された寸法 ($B=25 \text{ mm}$) よりも小さくする必要がある。

4. 引張試験の損傷力学解析

4.1 損傷パラメータ

Fig.7 に示す直角座標系 $O-x, y, z$ において、JIS K 7054 規格に準拠した引張試験片を考え、板の中央面と $z=0$ の xy 面を一致させる。また、異方性主軸と座標軸を一致させ、 x 軸を warp 繊維束方向、 y 軸を fill 繊維束方向、 z 軸を積層方向とし、 xy 面内擬似等方性弾性挙動を仮定する。 x 方向引張応力 σ_{x0} による微小体積要素における損傷の指標として、縦弾性係数 E 、体積弾性係数 K を次のように定義する。

$$E = \frac{\sigma_{x0}}{\epsilon_{x0}} = E_x = E_y \quad (1)$$

$$K = \frac{\sigma_{x0}}{3\epsilon} \quad (2)$$

ここに、 E_x, E_y は x, y 方向縦弾性係数、 $\epsilon = \epsilon_{x0} + \epsilon_{y0} + \epsilon_{z0}$ は体積ひずみ、 $\epsilon_{x0}, \epsilon_{y0}, \epsilon_{z0}$ はひずみ成分である。引張試験片が xy 面内の平面応力状態にあり、垂直ひずみ ϵ_{z0} が xy 面内の損傷進展に影響しないと仮定すると、体積弾性係数 K は、次式で表わされる。

$$K = \frac{\sigma_{x0}}{3(\epsilon_{x0} + \epsilon_{y0})} = \frac{E}{3(1-\nu)} \quad (3)$$

ここに、 $\nu = \nu_{xy} = \nu_{yx}$ はポアソン比であり、 $\nu_{xy}(\nu_{yx})$ は $x(y)$ 方向に引張ったときの $y(x)$ 方向の縮みの割合を示すポアソン比を示す。 x 方向引張による弾性係数の低下を考慮するため、損傷変数 d, δ を次のように定義する^{13,17)}。

$$d = 1 - \frac{E}{E^0} \quad (4)$$

$$\delta = 1 - \frac{K}{K^0} \quad (5)$$

ここに、上添字 0 は初期の値を示す。縦弾性係数 E 、ポアソン比 ν と損傷変数 d, δ の関係は、式 (3)~(5) より、

Fig. 7 Coordinate system for tensile specimen.

次のように得られる。

$$E = E^0(1-d) \quad (6)$$

$$\frac{E}{3(1-\nu)} = \frac{E^0}{3(1-\nu^0)}(1-\delta) \quad (7)$$

引張試験片のひずみエネルギー密度 U は、形状変化および体積変化を考慮して次式で与えられる。

$$U = \frac{1+\nu}{2E} \left\{ \frac{3}{4}(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) + 2\sigma_{xy}^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{2} \right\} + \frac{1-3\nu}{8E}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 \quad (8)$$

ここに、 $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ は応力成分である。損傷によるひずみエネルギー密度の変化を考慮するため、損傷パラメータ d_1, d_2 を次のように導入する。

$$\frac{E}{1+\nu} = \frac{E^0}{1+\nu^0}(1-d_1) \quad (9)$$

$$\frac{E}{1-3\nu} = \frac{E^0}{1-3\nu^0}(1-d_2) \quad (10)$$

式 (8)~(10) より損傷引張試験片のひずみエネルギー密度 U_d は、次のように表される。

$$U_d = \frac{1+\nu^0}{2E^0(1-d_1)} \left\{ \frac{3}{4}(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) + 2\sigma_{xy}^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{2} \right\} + \frac{1-3\nu^0}{8E^0(1-d_2)}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 \quad (11)$$

ここで、 $(1+\nu)/E, (1-3\nu)/E$ を縦弾性係数 E 、体積弾性係数 K を用いて次のように表わす。

$$\frac{1+\nu}{E} = \frac{2}{E} - \frac{1}{3K} \quad (12)$$

$$\frac{1-3\nu}{E} = -\left(\frac{2}{E} - \frac{1}{K} \right) \quad (13)$$

式 (12), (13) より式 (3), (6), (7), (9), (10) を考慮すると、 d_1, d_2 と d, δ, ν^0 の関係が次のように得られる。

$$\frac{1+\nu^0}{1-d_1} = \frac{2}{1-d} - \frac{1-\nu^0}{1-\delta} \quad (14)$$

$$\frac{1-3\nu^0}{1-d_2} = -\frac{2}{1-d} + \frac{3(1-\nu^0)}{1-\delta} \quad (15)$$

従って、式 (11) より、損傷引張試験片のひずみエネルギー密度 U_d は、損傷変数 d, δ 、ポアソン比 ν^0 を用いて次のように表される。

$$U_d = \frac{1}{2} \left\{ \frac{2}{E^0(1-d)} - \frac{1-\nu^0}{E^0(1-\delta)} \right\} \left\{ \frac{3}{4}(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) + 2\sigma_{xy}^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{2} \right\} - \frac{1}{8} \left\{ \frac{2}{E^0(1-d)} - \frac{3(1-\nu^0)}{E^0(1-\delta)} \right\} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 \quad (16)$$

また, U_d が熱力学ポテンシャルであることを考慮し, 損傷パラメータ d_1, d_2 に関する損傷変数 Y_1, Y_2 を次のように定義する.

$$Y_1 = (1-d_1)^2 \frac{\partial U_d}{\partial d_1} \quad (17)$$

$$= \frac{1+\nu^0}{2E^0} \left\{ \frac{3}{4}(\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2) + 2\sigma_{xy}^2 - \frac{\sigma_{xx}\sigma_{yy}}{2} \right\}$$

$$Y_2 = (1-d_2)^2 \frac{\partial U_d}{\partial d_2} = \frac{1-3\nu^0}{8E^0} (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})^2 \quad (18)$$

Y_1, Y_2 は, 応力と初期の弾性特性のみに依存する変数である.

損傷状態のひずみは, 弾性エネルギーを用いて次のように表される.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_d}{\partial \sigma_{xx}} \quad (19)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_d}{\partial \sigma_{yy}} \quad (20)$$

$$2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial U_d}{\partial \sigma_{xy}} \quad (21)$$

式(16)を式(19)~(21)に代入すると応力とひずみの関係式が次のように得られる.

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & -a+b & 0 \\ -a+b & a & 0 \\ 0 & 0 & 4a-2b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$a = \frac{1}{E^0(1-d)}$$

$$b = \frac{1-\nu^0}{E^0(1-\delta)}$$

SL-ES30の損傷変数 d, δ および損傷パラメータ d_1, d_2, Y_1, Y_2 は, 試験片主軸方向の一軸引張試験を行い, 引張応力, 縦ひずみ, 横ひずみを測定することにより求まる. まず最初に, 式(3)を考慮し, 引張試験初期の非損傷状態における E^0, ν^0, K^0 および損傷進展に伴い変化する E, ν, K を求める. 次に, 式(4), (5)より損傷変数 d, δ を求め, 式(14), (15)に代入して損傷パラ

メータ d_1, d_2 を決定する. 最後に, 試験片主軸方向の一軸引張応力のみを考慮すると, 式(17), (18)より, 損傷変数 Y_1, Y_2 が次のように求まる.

$$Y_1 = \frac{3}{8}(1+\nu^0) \frac{\sigma_{xx}^2}{E^0} \quad (23)$$

$$Y_2 = \frac{1}{8}(1-3\nu^0) \frac{\sigma_{xx}^2}{E^0} \quad (24)$$

Figs. 8, 9は, 室温における試験片つかみ部を固定した warp 繊維束方向引張試験(クロスヘッド速度 0.5 mm/min)より得られた損傷パラメータを示したもので, それぞれ d_1 と Y_1 および d_2 と Y_2 の関係である. Y_1 の増大に伴い d_1 は増大しており, d_2 と Y_2 の関係にお

Fig. 8 Plot of $d_1 - Y_1$ for SL-ES30 at room temperature (Fig II).

Fig. 9 Plot of $d_2 - Y_2$ for SL-ES30 at room temperature (Fig II).

いても同様な傾向を示している。また、 d_1 と Y_1 および d_2 と Y_2 の関係を近似式で表すと、次式が得られる。

$$d_1 = 0.0207Y_1^3 - 0.093Y_1^2 + 0.107Y_1 \quad (25)$$

$$d_2 = -256Y_2^4 + 177Y_2^3 - 45.9Y_2^2 + 6.33Y_2 \quad (26)$$

図中、実線は近似式の結果である。この近似式を有限要素解析プログラムに組み込んで、引張試験に関する損傷力学解析を実施した。Figs. 10, 11 は、77 K における Figs. 8, 9 と同様な図であり、試験片肩部を固定した引張試験より得られた結果である。77 K においても室温と同様に、 Y_1 , Y_2 の増大に伴い d_1 , d_2 は増大している。また、室温に比べて、77 K の場合の d_1 , d_2 , Y_1 , Y_2 は高い値を示している。さらに、 d_1 と Y_1 お

Fig. 10 Plot of damage parameters ($d_1 - Y_1$) for SL-ES30 at 77 K (Jig I).

Fig. 11 Plot of damage parameters ($d_2 - Y_2$) for SL-ES30 at 77 K (Jig I).

および d_2 と Y_2 の関係を 3 つの領域において 1 次式で近似すると、次式が得られる。

$$\begin{aligned} d_1 &= 0 & (0 \leq Y_1 < 0.489) \\ d_1 &= 0.0749Y_1 - 0.0366 & (0.489 \leq Y_1 < 2.22) \\ d_1 &= 0.00893Y_1 + 0.110 & (2.22 \leq Y_1) \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} d_2 &= 0 & (0 \leq Y_2 < 0.0440) \\ d_2 &= 9.44Y_2 - 0.415 & (0.0440 \leq Y_2 < 0.115) \\ d_2 &= 0.435Y_2 + 0.625 & (0.115 \leq Y_2) \end{aligned} \quad (28)$$

図中に、近似式の結果を実線で示した。この近似式を用いて、引張試験に関する損傷力学解析を同様に実施した。

4.2 解析モデルおよび解析方法

SL-ES30 の引張試験に関する二次元有限要素解析を行った。まず最初に、線形弾性解析より求めた応力から、式 (23), (24) を用いて要素毎の損傷変数 Y_1 , Y_2 を求める。次に、室温の場合式 (25), (26), 77 K の場合式 (27), (28) を用いて損傷パラメータ d_1, d_2 を求め、式 (14), (15) より、損傷変数 d , δ を決定する。最後に、応力とひずみの関係式 (22) を用いて損傷力学解析を行い、応力値を再計算する。全ての要素に関して、前回求めた応力と比較して、誤差が 1/1000 になるまで繰り返し計算を行い、応力・損傷状態を決定した。Fig. 12 に、解析モデルおよび境界条件を示す。解析は、問題の対称性を考慮し、1/4 領域について実施した。また、8 節点アイソパラメトリック要素を用い、総節点数は 605~779、総要素数は 178~232 である。model I は、試験片肩部を固定した引張試験に対応しており、B は

Fig. 12 Finite element models of the tensile test.

試験片平行部幅, B_0 はつかみ部幅, L は平行部長さ, L' はつかみ部の長さ, L_0 は試験片長さである. 境界条件は, 対称性から $x = 0$ 上の節点を x 方向拘束, $y = 0$ 上の節点を y 方向拘束とし, また, 治具の回転を防ぐために $L/2 \leq x \leq L_0/2 - L'$, $y = B_0/2$ 上の節点を y 方向拘束とし, $x = L/2$, $B/2 \leq y \leq B_0/2$ に作用する単位面積当たりの x 方向一様分布荷重 p は, 合力が P となる等価節点力として与え, 治具部分は剛体と仮定した. model I を用いた解析では, 損傷の分布に及ぼす試験片平行部幅の影響について検討するため, $B = 15, 25$ mm と変化させた. model II は, 試験片つかみ部を固定した引張試験に対応しており, R は試験片肩の丸みの半径, L_1 はつかみ部間の長さである. つかみ部は治具で固定されているため変形しないと仮定し, つかみ部を無視した. 境界条件は, 対称性から $x = 0$ 上の節点を x 方向拘束, $y = 0$ 上の節点を y 方向拘束, $x = L_1/2$, $y = B_0/2$ 上の節点を y 方向拘束とし, $x = L_1/2$ に作用する単位面積当たりの x 方向一様分布荷重 p は, 合力が P となる等価節点力として与えた. model II を用いた解析では, $B = 15$ mm, $R = 30, 60, 90, 120$ mm とし, 損傷の分布に及ぼす試験片肩の丸みの半径の影響について検討した. 解析に用いた繊維ガラス-エポキシ積層材料 SL-ES30 の縦弾性係数 E_x^0 , ポアソン比 ν_{xy}^0 は, warp 繊維束方向引張試験で得られた実測値を用い, $E_x^0 = 45.0$ GPa(室温), 55.5 GPa(77 K), $\nu_{xy}^0 = 0.190$ (室温), 0.263(77 K) とした.

5. 数値シミュレーション結果および考察

5.1 応力-ひずみ曲線

Fig.13 に, 77 K における warp 繊維束方向引張試験片の試験治具 I (試験片肩部を固定する方法) による引張試験で得られた応力-ひずみ曲線および数値シミュレーション結果を示す. 図中, 実線はひずみゲージ, 破線はクリップゲージにより得られた実験結果であり, ○は数値シミュレーション結果である. また, 数値シミュレーション結果は, 試験片平行部中央の要素の結果であり, ひずみゲージ設置位置に対応している. 損傷を考慮した場合の数値シミュレーション結果は実験結果と良く一致している.

5.2 応力・損傷分布シミュレーション

Fig.14 は, 77 K における warp 繊維束方向引張試験片の試験治具 I による引張試験の損傷分布シミュレーション結果を示したもので, (a) は損傷変数 d , (b)

Fig. 13 Comparison between prediction and experiment on stress-strain curves (Jig I).

は損傷変数 δ の場合である. また, $B = 15$ mm とし, 荷重は実験より得られた最大荷重 31 kN を負荷している. 損傷は, 試験片肩部から平行部に生じており, 実験で得られた試験片の損傷状態とほぼ一致している. また, 肩部と平行部の境界付近で損傷が最も高くなっており, この部分からの破壊発生が予想される. 実験においても肩部と平行部の境界で破壊が生じており, 数値シミュレーション結果は実験結果と定性的傾向が一致している. Table 2 は, 室温および 77 K における試験治具 I による warp 繊維束方向引張試験の引張応力・損傷の数値シミュレーション結果を示したもので, 破壊が予想される試験片肩部と平行部の境界における応力集中係数 ($\alpha = \sigma_b/\sigma_0$) および損傷集中係数 ($d_b/d_0, \delta_b/\delta_0$) を示している. σ_b, d_b, δ_b は, 試験片肩部と平行部境界の要素における x 方向引張応力, 損傷変数, σ_0, d_0, δ_0 は, 試験片平行部中央の要素における x 方向引張応力, 損傷変数である. また, 荷重は実験で得られた最大荷重とし, 室温の場合 15 kN, 77 K の場合 31 kN を与えた. 室温の場合, 試験片肩部の損傷は試

Table 2 FEM results for tensile stresses and damage variables (Jig I).

Temp.	B (mm)	α	d_b/d_0	δ_b/δ_0
R.T.	15	1.36	1.09	1.20
77 K	15	1.03	1.97	1.76
	25	1.35	1.84	1.81

Fig. 14 Damage distributions in specimens with (a) d and (b) δ (Jig I).

験片平行部と比較して大きく、応力集中も顕著となっている。また、77 K の場合、 $B=15$ mm では、室温に比べて、応力集中係数は1.03 と低くなっているが、損傷は増大している。これは、試験片肩部で損傷による応力緩和が生じているためと考えられる。さらに、試験片平行部幅の増大に伴い損傷集中はほとんど変化しないのに対し、応力集中は顕著になっており、これが引張強さを過小評価する原因と考えられる。したがって、試験片肩部を固定した引張試験を行う場合、試験片平行部の幅は、JIS K 7054 規格に規定された寸法 ($B=25$ mm) よりも小さくする必要がある。Fig.15

は、77 K における warp 繊維束方向引張試験片の試験治具 II (試験片つかみ部を固定する方法) による引張試験の数値シミュレーション結果であり、試験片肩の丸みの半径を $R=30, 60, 90, 120$ mm と変化させた場合である。また、 $B=15$ mm とし、荷重は、肩部を固定した実験より得られた最大荷重の 90 % に相当する荷重 28 kN を負荷している。 R の増大に伴い、応力集中および損傷は減少しており、肩部を有する試験片を用いた引張試験を行う場合、試験片肩の丸みの半径を JIS K 7054 規格に規定された寸法 ($R=60$ mm) よりも大きくする必要がある。極低温引張試験では、試験片がつかみ具中で滑る等の問題点があり、試験片の小型化も重要であるため、有効な引張特性を得るための適切な試験片形状・試験方法を十分検討する必要がある。

6. 結 言

織物ガラスーエポキシ積層材料 SL-ES30 を対象に、極低温引張試験および損傷力学解析を行い、SL-ES30 の極低温引張特性を解明した。以下に、得られた結果の要約を示す。

1. すべての試験片の破壊は、応力集中のため試験片肩部で生じた。また、77 K の縦弾性係数およびポアソン比は、試験片固定方法の影響を強く受け、今後課題を残した。
2. 試験片平行部幅の減少に伴い、試験片肩部の損

Fig. 15 Stress and damage concentration study at 77 K (Jig II).

傷が生じにくくなり、引張強さが増大した。

3. SL-ES30の繊維束方向引張試験で得られた応力-ひずみ曲線より、損傷を考慮した極低温引張挙動の二次元有限要素解析に有用な損傷パラメータを求めた。
4. 試験片肩部を固定した引張試験に関する損傷パラメータを用いた二次元有限要素解析を行い、得られた応力-ひずみ曲線は実験結果と良く一致した。また、77 Kにおける損傷分布の数値シミュレーション結果は、実験結果と定性的傾向が良く一致した。
5. 試験片肩部を固定した極低温引張試験の場合、織物ガラス-エポキシ積層材料の有効な引張特性を得るためには、JIS K 7054規格に準拠した試験片よりも、引張試験片平行部の幅が小さい試験片を用いる必要がある。
6. 試験片つかみ部を固定した極低温引張試験の場合、織物ガラス-エポキシ積層材料の有効な引張特性を得るためには、JIS K 7054規格に準拠した試験片よりも、肩の丸みの半径が大きい試験片を用いる必要がある。しかし、試験片がつかみ具中で滑る等の問題点があり、試験方法に課題を残した。

本研究の一部は、科学技術庁科学技術振興調整費知的基盤整備推進制度(極低温用構造材料の特性評価法に関する研究)の助成によるものであることを記し、謝意を表する。また、本研究の遂行に当たり、試料(SL-ES30)の提供を頂いた日東シンコー(株)に感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) S. Nishijima : Proc. of the Sixteenth Int. Cryog. Eng. Conf. / Int. Cryog. Mater. Conf. Part 1(1996) 19
- 2) 野坂正隆, 尾池 守, 菊池正孝 : 低温工学 **31**(1996) 500
- 3) Y. Shindo, R. Wang, K. Horiguchi and S. Ueda : ASME J. Eng. Mater. Technol. **121**(1999) 367
- 4) Y. Shindo, R. Wang and K. Horiguchi : ASME J. Eng. Mater. Technol. (in press)
- 5) Y. Shindo, H. Tokairin, K. Sanada, K. Horiguchi and H. Kudo : Cryogenics **39**(1999) 821
- 6) T.J. Eisenreich and D.S. Cox : Adv. Cryog. Eng. (Materials) **38**(1992) 437
- 7) M.B. Kasen : Cryogenics **21**(1981) 323
- 8) R.P. Walsh, J.D. McColskey and R.P. Reed : Cryogenics **35**(1995) 723
- 9) E. Tschegg, K. Hummer and H.W. Weber : Cryogenics **31**(1991) 312
- 10) Y. Iwasaki, J. Yasuda, T. Hirokawa, K. Noma, S. Nishijima and T. Okada : Cryogenics **31**(1991) 261
- 11) K. Humer, E.K. Tschegg, H.W. Weber, K. Noma, J. Yasuda and Y. Iwasaki : Cryogenics **33**(1993) 162
- 12) R.D. Kriz and W.J. Muster : Materials Studies for Magnetic Fusion Energy Applications at Low Temperatures-VIII, NBISR 85-3025, National Bureau of Standards, Boulder, Co (1985) 49
- 13) H.Z. Shan, P. Pulvinage, A. Parvizi-Majidi and T.W. Chou : ASME J. Eng. Mater. Technol. **116**(1994) 403
- 14) H.F. Wu and L.L. Wu : Composites **27A** (1996) 647
- 15) H.F. Wu and L.L. Wu : J. Mater. Sci. **29** (1994) 5847
- 16) 日本工業規格 : ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法, JIS K 7054-1995
- 17) P. Ladeveze, A. Gasser and P. Allix : ASME J. Eng. Mater. Technol. **116**(1994) 331