

CFRP 直交積層板におけるトランスバースクラック発生の温度依存性*

川田 宏之** 小柳 潤*** 細井 厚志**** 梶原 俊作*****
 石岡 義和***** 佐藤 成道*****

Temperature Dependence of Transverse Cracking in Cross-Ply CFRP Laminates
by

Hiroyuki KAWADA,

(Department of Applied Mechanics and Aerospace Engineering, Waseda University, Tokyo)

Jun KOYANAGI,

(Institute Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Sagami-hara)

Atsushi HOSOI,

(Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University, Nagoya)

Syunsaku KAJIWARA, Yoshikazu ISHIOKA

(Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University, Tokyo)

and Narumichi SATO

(Composite Materials Research Laboratories, Toray Industries, Inc., Iyo, Ehime)

This study describes a temperature dependence of transverse cracking in cross-ply CFRP laminates. A temperature-dependent transverse strength of the unidirectional composite is measured in order to discuss the temperature-dependent transverse crack occurring. The temperature dependence of transverse cracking is correlated with the temperature dependences of 90° layer strength and thermal residual stress in the cross-ply laminate under elevated temperature. The stacking sequence of the cross-ply laminates is also varied as a parameter. Whether the transverse crack occurs at relatively low load or high load at elevated temperature is then predicted considering the relationship between the temperature-dependent 90° layer strength and thermal residual stress.

(Received December 1, 2009)

キー・ワード：CFRP，直交積層板，トランスバースクラック，温度依存性

Key Words : CFRP, Cross-Ply Laminates, Transverse Cracking, Temperature Dependence.

1 緒 言

燃費削減の観点から航空機の機体重量や自動車の車体重量の更なる軽量化を図るため、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）積層板は一次構造材料として適用され始めた。近年では、航空機のエンジン付近や超音速旅客機の構造部材として、高温環境下における適用も検討されている。CFRP 積層板の破壊は、その積層構成にも依存するが、一般的に最初にトランスバースクラックが生じる。トランスバースクラック発生により、クラック先端の応力集中により隣接層の層間剥離

が引き起こされる。内部損傷が蓄積された後、最終的に繊維破断が起こり積層板の破壊に至る。高温（常温以上－ガラス転移温度近傍）状態においては、樹脂の機械的特性や熱残留応力等が変化し、損傷形態が常温と大きく異なると考えられる。特にトランスバースクラックはCFRP 積層板において最初に誘発される損傷であり、積層板の力学的特性を変化させ、層間剥離や繊維破断を引き起こす要因となる。そのため、高温状態におけるトランスバースクラックの発生及び成長挙動を定量的に評価することは重要である。

積層板におけるトランスバースクラックの発生及び成長に関する研究は数多く行われてきた。Nairn¹⁾はHashin²⁾が提案した変分原理を用いた応力解析を応用し、熱残留応力を考慮にいれ、Cross-ply 積層板におけるトランスバースクラック増加に伴うエネルギー解放率を導出した。この解析を用いて、常温の静的引張荷

* 原稿受理 2009年12月1日

** 早稲田大学基幹理工学部 東京都新宿区大久保

*** 宇宙航空研究開発機構 相模原市由野台

**** 名古屋大学大学院工学研究科 名古屋市千種区不老町

***** 早稲田大学大学院 東京都新宿区大久保

***** 東レ株式会社 愛媛県伊予郡松前町

重下におけるトランスバースクラック成長挙動が、積層構成の異なる Cross-ply 積層板においても等価に評価できることが示された。一方で、Takeda ら^{3),4)}は、常温及び80℃環境下で $[0/90_2]$ 、及び $[0/90_4]$ 、 $[0/90_6]$ 、Cross-ply 積層板を用いて、準静的引張試験を行い内部損傷の評価を行った。また、Birur ら⁵⁾は80, 180, 240℃環境下で、 $[0/90/0]$ 、 $[0/90_2]$ 、Cross-ply 積層板及び $[\pm 45/90_2]$ 積層板を用いて、準静的引張試験及びクリープ試験を行いトランスバースクラック成長挙動の観察を行った。Nairn¹⁾の解析に従うと、高温環境下では熱残留応力の解放に伴いトランスバースクラックは生じにくくなると推測される。しかし、上記研究の実験結果によると、高温環境下で必ずしもトランスバースクラックの成長が抑制されるわけではなく、積層構成によっては高温環境下でトランスバースクラックが生じやすくなるケースも観察されている。高温環境下におけるトランスバースクラック成長挙動について定量的に議論した研究は少なく、これまで十分な検討がなされていない。

そこで、本研究では、Cross-ply 積層板のトランスバースクラック成長挙動の温度依存性について評価を行った。Cross-ply 積層板を構成する90°材及び0°材の機械的特性に対する温度依存性を評価し、高温環境下における熱残留応力の解放及び90°層の強度劣化を考慮した上で、Cross-ply 積層板に生じるトランスバースクラック蓄積挙動について考察を行った。

2 実験方法

2・1 試験片

材料には、繊維体積含有率約57%の T800H/#3631 (東レ製)の炭素繊維強化プラスチックを用いた。試験片の母材は180℃硬化型のエポキシ樹脂であり、オートクレーブ成形にて作製されている。プリプレグ 1 枚あたりの厚さは0.144mmである。試験片寸法は ASTM D3039を参考に決定した。一方向材 $[0_1]$ 及び一方向材 $[90_{12}]$ の寸法は、長さ210mm、幅12.5mmとし、Cross-ply 積層板 $[0/90_6]_s$ の寸法は、長さ210mm、幅25mmとした。試験片のつかみ部での応力集中を防ぐために長さ55mmの GFRP タブを取り付けた。試験片形状・寸法を Fig. 1 に示す。本研究では、損傷の評価の簡易化のために、トランスバースクラックが発生と同時に幅方向へ貫通する $[0/90_6]_s$ 積層構成を採用した (Fig. 2)。なお、試験片端部に生じる損傷を観察するために、試験片端部は6 μm のダイヤモンドパウダーを研磨剤としたバフ研磨が施されている。

2・2 試験方法

各積層構成において、試験温度は常温 (25℃) 及び、50℃、75℃、100℃とし、それぞれ引張速度は0.5 mm/min とした。積層板に負荷されたひずみは、試験

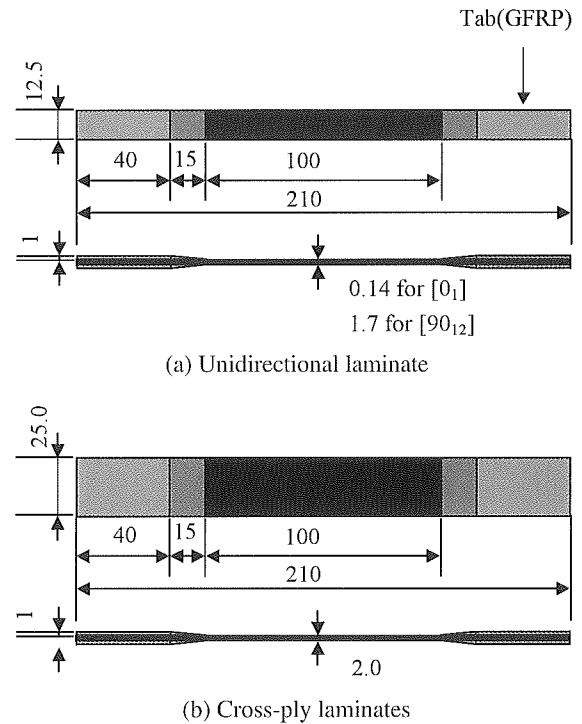


Fig.1 Specimen's dimensions.

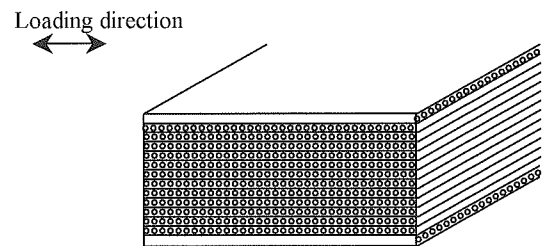


Fig.2 Schematic of stacking sequence for cross-ply laminates.

片中央部に貼り付けたひずみゲージより測定した。Cross-ply 積層板において、引張負荷中に発生するトランスバースクラックの成長挙動を観察するために、任意のひずみレベルで試験を中断し、損傷観察を行った。試験片端部に生じた損傷は光学顕微鏡を用い、試験片内部に進展した損傷は軟 X 線探傷装置を用いて観察を行った。試験片ゲージ長さ当たりのトランスバースクラック数をトランスバースクラック密度と定義し、トランスバースクラック蓄積挙動を評価した。

3 実験結果

3・1 Cross-ply 積層板に生じるトランスバースクラック

Fig. 3 は、90°層に発生する微視的損傷の観察結果、Fig. 4 は、軟 X 線による内部損傷観察結果の代表的な写真を示している。Fig. 3 より試験片端部にトランスバースクラック及び層間剥離が発生していることが見て取れる。Fig. 4 より、発生したトランスバースクラックは試験片幅方向にすべて貫通していることが観

察される。一方、試験片内部で層間剥離は観察されず、層間剥離は試験片端部のみに生じており内部まで進展していないと考えられる。

Fig. 5 は静的引張荷重下における Cross-ply 積層板に生じたトランスバースクラック密度と負荷ひずみの関係を示している。[0/90₂] 積層板において常温では破断までトランスバースクラックは確認されなかったため、図からは除外した。常温にてトランスバースクラックの発生が観察されなかった理由については次章で考察を行う。

3・2 一方向材静的引張試験の温度依存性

Table I は、常温及び100℃環境下において、一方向材の準静的引張試験を行い、繊維水平及び垂直方向の引張強度の平均値を示した結果である。Fig. 6 は、常

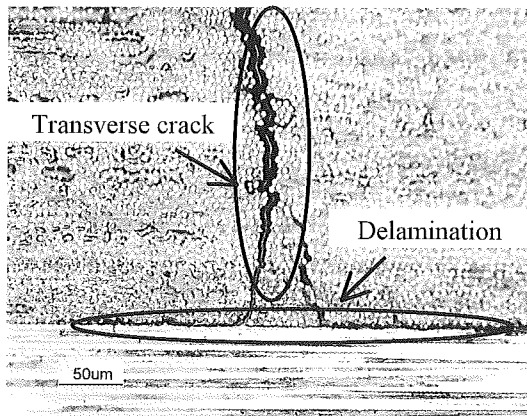


Fig.3 Observation by an optical microscope of transverse crack and local delamination caused under static tensile loading at 100 degrees.

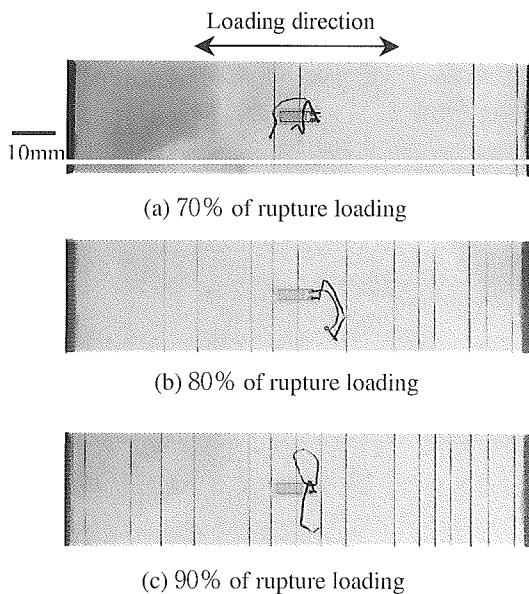


Fig.4 Observation by Soft X-ray photography of transverse crack growth caused under static tensile loading at 100 degrees.

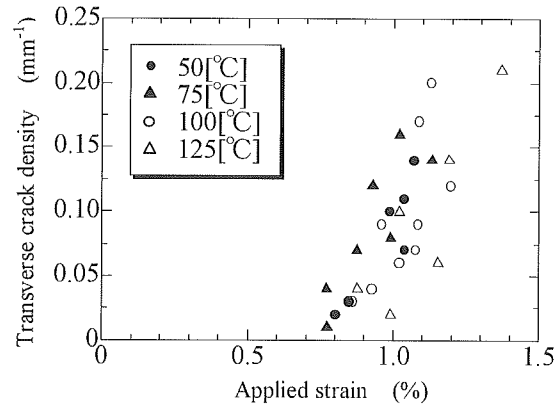
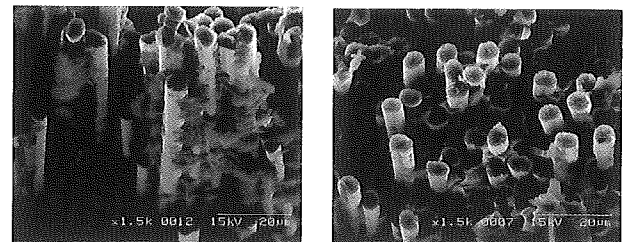


Fig.5 Transverse crack density as a function of the applied strain at each temperature condition.



(a) At room temperature

(b) At 100 degrees

Fig.6 Photos of failure surface for longitudinal tensile test at room temperature and 100 degrees observed by a scanning electron microscope.

Table I Tensile strength of unidirectional laminates.

Temperature	℃	R.T. (25)	100
Longitudinal tensile strength	MPa	2.2×10^3	2.4×10^3
Transverse tensile Strength	MPa	69	57

温及び100度環境下における、[0₁] 一方向材の静的引張試験後の破断面の SEM 写真を示している。Fig. 6 より常温と100℃環境下では破壊形態が変化していることが確認できる。

4 考 察

4・1 環境温度と強度の関係

小柳ら⁶⁾により提案された Simultaneous Fiber-Failure (SFF) model に従うと、繊維-樹脂間の界面強度が相対的に弱い時は、複合材料強度は界面強度とともに上昇するが、界面強度がある値を超えると界面強度の上昇が複合材料強度の低下を引き起こす。本研究で用いた一方向複合材料は、T800を用いており、繊維強度は5.7GPa程度と考えられ、この値に単純に繊維堆積含有率をかけるとその強度は3.2GPaになる。しかし実験結果により得られた [0₁] 一方向材の引張強度は2.3GPa程度であり、このことから、本複合材料は界面強度が強い範囲、もしくは極めて弱い範囲である

と考えられる⁶⁾。ここで、本材料の界面が強い側なのか弱い側なのかを議論する。

例えば、界面せん断強度が0.2MPaと仮定し、SFFモデルを使用すると、一方向材の強度は2.3GPaを得る。一方、界面強度を100MPaと仮定すると同じく複合材の強度2.3GPaを得る（このときマトリクス強度を80MPaと仮定している）。現段階では、界面強度は強い範囲にあるのか弱い範囲にあるのか両方の可能性を残す。一般に一方向複合材料を繊維方向に引っ張るとマトリクスのポアソン収縮によって、界面には圧縮応力が作用し、みかけの界面強度が上昇する。従来の研究⁷⁾によると、一方向CFRPのポアソン収縮の界面圧縮応力は10~20MPaとされており、さらに別の従来の研究結果⁸⁾に従うと、この圧縮応力により5~10MPaの界面せん断強度上昇が起こる。従って、マトリクスのポアソン収縮の効果のみからでも界面強度は5MPa以上存在することになり、SFFに界面強度5MPaを入力すると、複合材強度は3.2GPaとなり（10MPaのときは3.3GPa）、結果的に、「界面が弱い」という仮定では試験結果と矛盾する。従って、本研究に用いた材料はSFFに従う限り、界面強度が強い範囲の複合材料であると考えられる。

温度上昇により見かけの界面強度が低下し、[0₁]一方向材の引張強度は100℃環境下で上昇したと考えられる。なぜなら温度の上昇に伴って、界面の圧縮応力が減少し、その結果先述とは逆に界面強度が小さくなったためである。Fig. 6の写真からも100℃環境下における試験片破断面観察から、繊維の引き抜けが相対的に多く、見かけ上の界面強度が下がったであろうことが確認できる。一方、繊維直角方向の一方向複合材料の強度は温度の上昇にともなって低下している。温度上昇に伴って、樹脂強度及び見かけの界面強度ともに低下したと考えると定性的に妥当である。一方、直交積層板の最終破断は0°層破壊に支配されている。従って、高温環境下では積層板強度は上昇し、90°層強度は低下するため、トランスバースクラックの発生が先行して生じた後、試験片が破断する。一方、常温以下の環境では、積層板強度が相対的に低下、90°層強度は相対的に上昇するため、トランスバースクラックが生じる前に積層板が破断する可能性も考えられる。本研究にて、常温でトランスバースクラックが発見できなかった理由は、以上の温度特性に起因すると考えられる。

4・2 環境温度とトランスバースクラック発生の関係

環境温度とトランスバースクラック発生の関係について考察する。本試験に用いた90°材の引張強度は常温環境下で69MPaであり、100℃環境下で57MPaであった。環境温度が75℃上昇することにより、12MPa強度が低下し、これを線形挙動と見なす。この結果は、

温度上昇に伴い、Cross-ply 積層板におけるトランスバースクラックの発生を促す要素と考えられる。一方で、Cross-ply 積層板の90°層は、温度上昇にともなって、圧縮応力が発生する（実際には存在している引張熱残留応力の一部が解放されることになるが、本研究ではストレスフリー温度・初期の熱応力は考えず、新しく発生する「圧縮応力」が重ね合わされると解釈する）ため、トランスバースクラックを発生させるためには積層板により大きな負荷を与えなければならず、すなわち見かけ上トランスバースクラックの発生が抑制される要素となる。つまり、温度の上昇はトランスバースクラックの発生を促進する要素と抑制する要素が混在し、これらを定量的に比較することで、温度とトランスバースクラックの関係を検討することが可能である。

温度上昇に対して、新しく90°層に発生する圧縮熱応力を下記のように求める。Fig. 7 (b)より、0°、90°層のそれぞれの層における繊維の熱膨張により、変位 λ_{T0} 、 λ_{T90} 分だけ伸びようとする。また $\lambda_{T90} > \lambda_{T0}$ より、90°、0°層間において反力 R_1 、 R_2 が生じる。この反力による伸びを λ_{R0} 、 λ_{R90} とする。

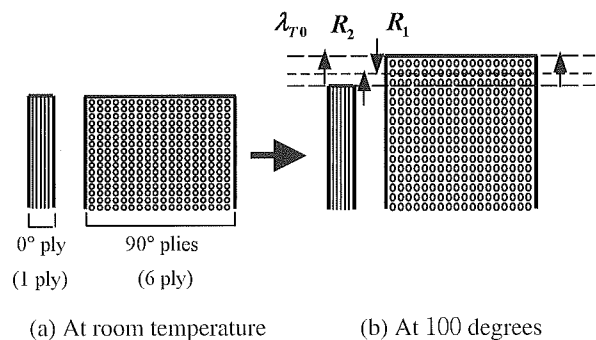


Fig.7 Schematic of thermal deformation for cross-ply laminates

$$\lambda_{T90} = \alpha_{90} \Delta T L \quad (1)$$

$$\lambda_{R90} = \frac{R_1 L}{A_{90} E_{90}} \quad (2)$$

$$\lambda_{T0} = \alpha_0 \Delta T L \quad (3)$$

$$\lambda_{R0} = \frac{R_2 L}{A_0 E_0} \quad (4)$$

α は線膨張係数、 ΔT は温度変化、 L は試験片長さ、 E は弾性率、下添え字の数字は層の繊維方向を示す。変位は次の関係式を満たす。

$$\lambda_{T90} - \lambda_{R90} = \lambda_{T0} + \lambda_{R0} \quad (5)$$

力の釣り合いより $R_1 = R_2 = R$ を用いて整理すると、

上式は,

$$R = A_0 \frac{A_{90} E_0 E_{90} (\alpha_{90} - \alpha_0) \Delta T}{A_0 E_0 + A_{90} E_{90}} \quad (6)$$

となる. 温度変化に伴い90°層で新しく発生する圧縮熱応力 σ_{Th} は次式で表わされる.

$$\sigma_{Th} = A_0 \frac{E_0 E_{90} (\alpha_{90} - \alpha_0) \Delta T}{A_0 E_0 + A_{90} E_{90}} \quad (7)$$

式(7)を用いて, 75℃の温度上昇に対して90°層に発生する熱応力 σ_{Th} と積層板の積層数に対する90°層数の割合の関係を Fig. 8 に示す. このとき, $E_0 = 150$ GPa, $E_{90} = 8$ GPa (100℃環境における実測値), $\alpha_0 = 0$, $\alpha_{90} = 3.0E-05$, $\Delta T = 75^\circ\text{C}$ を用いた. $\alpha_0 = 0$ は繊維の長手方向線膨張係数を0とし, 繊維とマトリクスの弾性率の比を考慮して, 繊維の線膨張係数に完全に支配されると仮定して用いた. $\alpha_{90} = 3.0E-05$ については, 繊維の半径方向, マトリクスの線膨張係数を $1.0E-05$, $6.0E-05$ とし, V_f を0.6と仮定し, $1.0E-05 \times 0.6 + 6.0E-05 \times 0.4$ から求めた. Fig. 8 より, 90°層の割合の増加に伴い, 圧縮熱応力は減少することがわかる. 本研究に用いた積層構成では90°層の割合は0.86であり, 75℃の温度上昇に対して90°層には約14MPa 圧縮熱応力 (図中の矢印). この応力は先述の通り, 常温の結果と比べて, さらに約14MPa 引っ張らなければトランスバースクラックが発生しないことになるため, トランスバースクラック発生を抑制させる効果を持つ. 一方で, 90°材の強度は3・2節に述べた通り75℃の温度上昇に対して12MPaの低下が見られ, これは積層板においてトランスバースクラック発生を促進させる効果を持つ. 本試験片はこれらのプラスとマイナスの効果が同等な数値関係であったため, Fig. 5 に示すように各環境温度条件下でトランスバースクラックの発生挙動が顕著な変化を示さなかったと考えられる.

Fig. 9 には Fig. 8 の見解をトランスバースクラック発生の図 (Fig. 5) に反映した定性的な解説を示す. 本研究では75℃の温度上昇に対して12MPaの90°層強度低下があるため, 90°層の厚さ比が0.9以上であれば, トランスバースクラック発生は温度上昇により促進され (プロットが左に移動し), それ以下であればトランスバースクラック発生は抑制される (プロットが右に移動する) ことが予測される. また, 一般的な積層構成 (0°層と90°層のプライ数が同等) の範囲では, 温度上昇によりトランスバースクラック発生が抑制されることが予測され, 本研究の常温の結果のように, トランスバースクラックが発生しない状況もある.

5 結 言

本研究では, Cross-ply CFRP 積層板におけるトラン

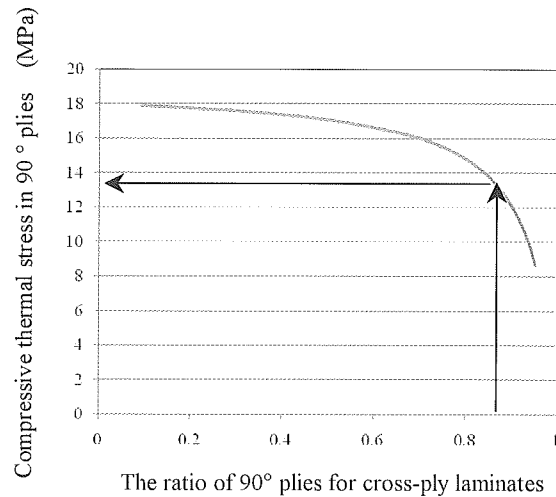


Fig.8 Released residual stress in 90° plies as a function of the ratio of the number of 90° plies at the temperature difference of 75 degrees.

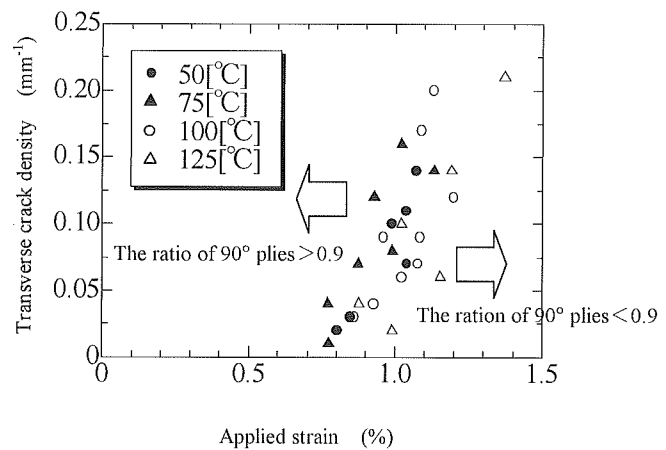


Fig.9 Transition of transverse crack growth at the 90° plies ratio of 0.9.

スバースクラック発生の温度依存性について調査した. その結果, 温度変化に伴い, トランスバースクラック発生が促進または抑制されることを実験により示した. また, 材料物性と90°方向強度の温度依存性及び, 90°層に負荷される熱残留応力を考慮することにより, トランスバースクラックの発生挙動について定量的に説明できることを示した.

参 考 文 献

- 1) Nairn, J.A., Journal of Composite Materials, **23**, (1989), 1106, (and errata: Journal of Composite Materials, **24**, (1990), 223).
- 2) Hashin, Z., Mechanics of Materials, **4**, (1985), 121.
- 3) Takeda, N. and Ogihara S., Composites Science and Technology, **52**, (1994), 183.
- 4) Ogihara, S., Takeda, N. and Kobayashi, A., Composites Science and Technology, **57**, (1997), 267.
- 5) Birur, A., Gupta, A and Raghavan, J., Journal of

- Engineering Materials and Technology, **128**,
(2006), 611.
- 6) Koyanagi, J., Kotani, M., Hatta, H. and Kawada, H.,
Journal of Composite Materials, **43**, (2009), 1901.
- 7) Koyanagi, J., Composites Science and Technology, **69**,
(2009), 2158.
- 8) Koyanagi, J., Yoshimura, A., Kawada, H. and Aoki,
Y., Applied Composite Materials, (In press 2010).