FRP 直交積層板におけるマトリックスき裂 発達のメカニズム†

元 木 信 弥* 福 田 武 人* 田 中 基 博**

Mechanism of Matrix Cracking Evolution in Crossply Composite Laminates

by

Shinya MOTOGI*, Takehito FUKUDA* and Motohiro TANAKA**

This paper discusses the mechanism of matrix cracking evolution in crossply composite laminates. The evolution of matrix cracking cannot be understood by the notion of 'strength' of cracking ply, since matrix cracks are sequentially formed above the stress level of the strength of cracking ply. By assuming that the ply has inherently a distribution of defects which act as the nucleation sites of matrix cracks, the cracking mechanism is discussed. This mechanism can explain the behavior of the averaged maximum stress in the whole stage of evolution. A simple numerical simulation is performed in order to visualize the cracking behavior and the change in stress due to cracking.

Key words : Composite laminates, Matrix cracking, Damage evolution, Stress analysis

1 緒 言

FRP 積層板に静的荷重あるいは疲労荷重が負荷された場合、off-axis プライ内に初期損傷としてのマトリックスき裂が発生することはよく知られている。その初期損傷の発達すなわちマトリックスき裂の増加が層間はく離、さらに最終的な荷重方向の繊維の破断を引き起こす直接的原因となる場合が多い。そのため初期損傷としてのマトリックスき裂が重要視され、き裂を含む積層板の応力解析が最近精力的に行われている。せん断遅れ近似を用いた解析は以前から行われていたが、直交積層板のマトリックスき裂の問題では、せん断遅れ近似そのものが不適当であるため、より正確な応力解析理論が求められている。また最近、試験片端面の研磨状態の違いによってマトリックスき裂の発達の様子が大きく異なり、き裂発生数が多い方が積層板全体の強度はかえって上昇する等の興味深い結果も報告されている。^{8),9)}

筆者らは先に、このマトリックスき裂損傷の発達規準について考察し、90°層の荷重方向の垂直応力の最大値が一つの発達規準となり得ることを示した。¹⁰⁾

最も重要な点は、この規準は、90°層の厚さに依存しない形でマトリックスき裂の発達を支配していることであり、このような形で損傷の発展則を定式化できればさまざまな積層構成に対応可能な発展則となることが期待される。

ところで、この発達規準となる 90°層内の荷重方向

の垂直応力の最大値は、き裂密度が小さい領域ではき裂密度に対して単調に増加して最大値をとる。その後さらにき裂密度が増加していくと、応力は徐々に下降していく。これはあたかも、塑性変形における加工軟化現象、あるいはぜい性材料における微視的き裂損傷の発達による軟化現象¹¹⁾であるように見える。そこで、応力が下降している領域で発生するマトリックスき裂は、応力が上昇している部分での対応する応力値でなぜ発生しなかったのか、という疑問がおこる。

本研究では、積層板内の 90°層に内在する微視的な欠陥がマトリックスき裂形成の核となると考えて、き裂発達のメカニズムについて検討する。特に上述の応力の下降領域において、応力が下降しているにもかかわらず、さらにき裂損傷が発達するのはどのような機構によるものかを考察する。

まず次節では Hashin によるき裂を含む直交積層板の応力解析理論を概説し、第 3 節ではき裂発達に関する実験結果に、前節の理論を適用して、90°層内部の応力分布について考察する。第 4 節ではき裂損傷の発達のメカニズムについて検討する。またこれを確認するために、第 5 節で微視的欠陥に簡単な統計分布を与えて、き裂発達のシミュレーションを行う。

2 マトリックスき裂を含む直交積層板の応力解析

ここでは、Hashin⁶⁾による、90°層に分布したマトリックスき裂を含む直交積層板の応力解析理論から求

† 原稿受理 平成 5 年 7 月 16 日 Received July 16, 1993

* 正 会 員 大阪市立大学工学部機械工学科 〒558 大阪市住吉区杉本, Dept. of Mech. Eng., Osaka City Univ., Sumiyoshi-ku, Osaka, 558

** 正 会 員 大阪市立工業研究所 〒536 大阪市城東区森之宮, Osaka Municipal Tech. Res. Inst., Joto-ku, Osaka, 536

Fig. 1. Typical element in a cracked crossply laminate. The y-axis is in the width direction of the laminate.

められる応力分布について概説する。

まず、90°層に幅方向に貫通したき裂が多数分布した直交積層板が、0°層の繊維方向に一樣な面内引張を受ける場合を考える。その直交積層板から、Fig. 1のような一組のマトリックスき裂に囲まれた要素を取り出し、座標系を同図のようにとる。き裂が存在しない場合の各層の応力成分を $\sigma_{xx,yy}^{(m)}$ とすればこれは、古典的な積層板理論によって計算できる。ただし、 m は層の指標であり、 $m=1$ が90°層を、 $m=2$ が0°層を表わしている。き裂が存在する場合には、 $\sigma_{xx,yy}^{(m)}$ という3つの撓乱応力成分が現れ、全応力は次式のようにこれらの和で与えられる。

$$\sigma_{ij}^{(m)} = \sigma_{ij}^{(m)} + \sigma_{ij}^{(m)} \quad (1)$$

ここで負荷方向に垂直な方向の撓乱応力成分 $\sigma_{xx}^{(m)}$ は板厚方向すなわち z 方向に関して一樣であるという仮定を設ける。平衡方程式と境界条件を用いると、撓乱応力の各成分はすべて、未知関数 $\phi(x)$ およびその微分を用いて次のように表せる。

$$\sigma_{xx}^{(1)} = -\sigma^{(1)}\phi(x) \quad (2)$$

$$\sigma_{xz}^{(1)} = \sigma^{(1)}\phi'(x)z \quad (3)$$

$$\sigma_{zz}^{(1)} = \frac{1}{2}\sigma^{(1)}\phi''(x)(ht_1 - z^2) \quad (4)$$

$$\sigma_{xx}^{(2)} = \lambda'\sigma^{(1)}\phi(x) \quad (5)$$

$$\sigma_{xz}^{(2)} = \lambda'\sigma^{(1)}\phi'(x)(h-z) \quad (6)$$

$$\sigma_{zz}^{(2)} = \frac{1}{2}\lambda'\sigma^{(1)}\phi''(x)(h-z)^2 \quad (7)$$

ここで、 $\sigma^{(1)}$ は非損傷の場合の90°層の負荷方向 (x 方向) の垂直応力成分 (すなわち $\sigma_{xx}^{(1)}$) を表し、 $\phi(x)$ の肩の (') は x に関する微分を表す。また、 $\lambda' = t_1/t_2$ である。これらの応力から補足ひずみエネルギー汎関数が求められ、さらに変分原理を用いて $\phi(x)$ に対する Euler-Lagrange 方程式が得られる。この方程式を解くことによって次に示す解が得られる。

$$\phi(\xi) = A_1 \cosh \alpha \xi \cos \beta \xi + A_2 \sinh \alpha \xi \sin \beta \xi \quad (8)$$

ここで、 $\xi = x/t_1$ であり、また次のように置いた。

$$A_1 = \frac{2\alpha \cosh \alpha \rho \sin \beta \rho + \beta \sinh \alpha \rho \cos \beta \rho}{\alpha \sin 2\beta \rho + \beta \sinh 2\alpha \rho}$$

$$A_2 = \frac{2\beta \cosh \alpha \rho \sin \beta \rho - \alpha \sinh \alpha \rho \cos \beta \rho}{\alpha \sin 2\beta \rho + \beta \sinh 2\alpha \rho}$$

$$\alpha = q^{1/4} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad \beta = q^{1/4} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

$$\tan \theta = (4q/p^2 - 1)^{1/2}$$

$$p = (C_{02} - C_{11})/C_{22}, \quad q = C_{00}/C_{22} \quad (9)$$

$$C_{00} = 1/E_T + 1/(\lambda E_A)$$

$$C_{02} = (\nu_T/E_T) \left(\lambda + \frac{2}{3} \right) - (\nu_A \lambda / 3 E_A)$$

$$C_{22} = (\lambda + 1)(3\lambda^2 + 12\lambda + 8)/(60 E_T)$$

$$C_{11} = \frac{1}{3} (1/G_T + \lambda/G_A)$$

$$\lambda = t_2/t_1 (= 1/\lambda'), \quad \rho = t_1/a$$

である。 E , ν , G はそれぞれ一方向材のヤング率、ポアソン比、せん断弾性率であり、添字 A , T はそれぞれ繊維方向、およびその垂直方向を表す。(ただし、 $G_A = G_{AT}$, $G_T = G_{TT}$ である。) またここでは、 ρ の逆数 $1/\rho$ をき裂密度とする。式(8)の $\phi(\xi)$ を式(2)から式(7)に代入することにより、それぞれの撓乱応力成分を求めることができる。非損傷の場合の応力は複合則により求められるので、き裂を含む積層板の応力は式(1)から完全に決定される。

3 90°層の垂直応力分布

前節の式(1), (2), (8) および式(9)より、90°層の垂直応力 $\sigma_{xx}^{(1)}$ は

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}^{(1)} &= \sigma^{(1)}(1 - \phi(\xi)) \\ &= \frac{1 + \lambda}{1 + (E_A/E_T)\lambda} \sigma_0(1 - \phi(\xi)) \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、 σ_0 は積層板全体の平均応力を表わす。式(10)より求めた90°層の垂直応力 $\sigma_{xx}^{(1)}$ を規格化した値を、き裂間隔 ρ をパラメータとして GFRP の $[0, 90]_s$ の積層構成に関して表したものを Fig. 2 に示す。(無次元座標 ξ の原点は二つのき裂の中央であるが、Fig. 2 および以下の Fig. 4 では、左側のき裂位置を $\xi = 0$ として表示している。) $\rho = 10$ や 20 の場合の

Fig. 2. Normalized stress distribution in the segment of the 90° layer in $[0, 90]_s$ GFRP. The origin of the normalized coordinate ξ is taken at the position of the left crack. Thick arrows indicate the crack position.

ようにき裂間隔が大きい、すなわちき裂密度が小さい場合は、ほとんどの領域で 90° 層の応力は一様であり、非損傷の場合の応力と等しいが、 $\rho=3$ 以下の場合のようにき裂間隔が小さくなると応力の最大値は小さくなるのがわかる。

筆者らが、マトリックスき裂損傷の一つの発達規準となりえるものとして提案した¹⁰⁾、 90° 層内の荷重方向の垂直応力の最大値 $\sigma_{xx, \max}^{(1)}$ (以下 $\sigma_{\max}$ と記す) は、Fig. 1 の $x=0$ の面において発生する。すなわち、式 (10) において $\xi=0$ の場合の値である。したがって、

$$\begin{aligned}\sigma_{\max} &= \sigma^{(1)}(1 - \phi(0)) \\ &= \frac{1 + \lambda}{1 + (E_A/E_T)\lambda} [1 - A_1] \sigma_0\end{aligned}\quad (11)$$

となる。筆者らは前報において、3種類の GFRP 直交積層板の引張試験を行い、き裂数の増加と積層板の平均応力の関係を求めた。このき裂数から、き裂が試験片の長さ方向に均等に分布していると仮定すると、平均き裂間隔 $2\bar{a}$ が計算でき (以下、試験片長さ方向の全体にわたる平均を $\bar{\cdot}$ で表す)、これから無次元化したき裂間隔 $\bar{\rho} (= \bar{a}/t_1)$ が求められる。 $\bar{\rho}$ と積層板の平均応力 σ_0 に実験値を用いて、式 (11) によって $\overline{\sigma_{\max}}$ を計算した結果を図示すると Fig. 3 のようになる。ただし、式 (11) で

$$\begin{aligned}\overline{\sigma_{\max}} &= \frac{1 + \lambda}{1 + (E_A/E_T)\lambda} [1 - \bar{A}_1] \sigma_0 \\ &= \frac{1 + \lambda}{1 + (E_A/E_T)\lambda} [1 - A_1(\bar{\rho})] \sigma_0\end{aligned}\quad (12)$$

とした (式 (9), 参照)。同図より緒言でも述べたようにこの $\overline{\sigma_{\max}}$ は、ほぼ 90° 層の厚さに依存しない形でマトリックスき裂の発達を支配していることがわかる。

$\overline{\sigma_{\max}}$ は、き裂密度の増加に伴って上昇し、最大値をとった後下降する。さらに $\overline{\sigma_{\max}}$ がき裂の発生応力まで下降すると、き裂の発生が停止する。ただし、 $[0, 90_3]_s$ 、 $[0, 90_1]_s$ については、荷重方向から傾いた斜めき裂も発生するので、最終的な“有効き裂間隔”をもとにして、き裂発生が停止するき裂密度を求めると

Fig. 3. Experimental result for averaged maximum normal stress in the 90° layer vs. averaged crack density.¹⁰⁾

$[0, 90_2]_s$ の場合とほぼ一致する。¹⁰⁾

同図より、 90° 層のき裂損傷の発達、単に 90° 層の“強度”の概念だけでは理解できないことは明らかである。つまり、“強度”は統計的なバラつきはあるにせよ単一の値であるが、直交積層板の 90° 層には“強度”よりも高い応力が負荷されてもつぎつぎにき裂 (90° 層の破壊) が発生している。このような現象は、もともと 90° 層内に存在する微視的な欠陥が、その有効な大きさが大きいものから順にき裂発生の核として作用し、応力の増大につれてつぎつぎに小さい欠陥からもき裂が発生していく過程であると解釈することによって正しく理解することができる。^{12), 13)}

4 き裂発達の機構

き裂の発達を支配している因子はいろいろ考えられるが、 $[0, 90_2]_s$ の積層構成の積層板では、発生したマトリックスき裂は、そのほとんどが荷重方向に垂直なき裂であった。このことは、き裂形成に最も大きく寄与している応力成分は $\sigma_{xx}^{(1)}$ であることを示している。そこで、 $[0, 90_2]_s$ 積層板の $\sigma_{xx}^{(1)}$ のみを考えることにする。

Fig. 3 の結果を確認するために、式 (10) 中の積層板の平均応力 σ_0 に実験値を用いて応力分布を計算すると Fig. 4 のようになる。き裂密度が増加するにつれて応力の最大値 $\sigma_{\max}$ は上昇し、 $1/\rho=0.3$ 程度で最大に達し、その後 $1/\rho=0.5$ では実際に減少していることがわかる。ここで注意すべきことは、Fig. 4 からわかるように、積層板の平均応力 σ_0 はき裂密度 $1/\rho$ の増加にともない単調に増加していることである。すなわち、き裂密度が 0.3 を超えると積層板の平均応力 σ_0 が増加しているにもかかわらず、 90° 層の最大応力 $\sigma_{\max}$ は下降し始める。これは、き裂間隔が短くなると、Fig. 1 の隣りあう 1 組のき裂に囲まれた領域 (以下セグメントと呼ぶ) の両き裂面で応力が 0 となるため、その影響がセグメント内部までおよび (き裂の相互作用)、その結果として最大値が下降するためである。上述したように、セグメント内の応力の最大値

Fig. 4. Normal stress distribution calculated from experimental data of σ_0 and $1/\rho$.¹⁰⁾

$\sigma_{\max}$ はセグメントの中央面でおこり, その値は式 (11) で与えられるが, 係数 A_1 が正になるのは $\rho \leq 3.45$ ($1/\rho \geq 0.29$) のときであり, この値は Fig. 3 の最大値を与える ρ とほぼ等しい.

ここで上述の議論は, それぞれのき裂密度の段階で, き裂が均等に入っていると仮定した場合のものであることに注意しよう. 実際には, き裂発達初期の段階でも短い間隔のセグメントも存在する. そこで, 例として, まず $1/\rho = 0.05$ ($\rho = 20$) として, き裂が等間隔で並んでいる場合を考えよう. この状況はき裂発達のごく初期の段階であり, き裂の間隔は $[0, 90]_0$ の積層構成の場合では約 1.6 cm である. この時の積層板の平均応力 σ_0 は約 50 MPa であり, この値から非損傷の場合の 90° 層の応力 $\sigma^{(1)}$ は約 32.3 MPa と求められる. セグメント内の 90° 層の垂直応力 $\sigma_{xx}^{(1)}$ の応力分布は, この段階ではほとんど一様であり, 最大値は $\sigma^{(1)}$ と等しい. つぎに, この応力が負荷されているときに, あるき裂の近傍に新たなき裂が発生したと仮定する. このとき, 既に存在していたマトリックスき裂と新たに発生したき裂の間のセグメント内の最大応力は, 式 (11) から $\sigma^{(1)}(1 - A_1)$ で与えられる. A_1 がセグメントの間隔を表すパラメータ ρ の関数であるので, この最大応力は ρ の関数となり, ρ が小さいほど応力の低下が大きくなる. その後, 負荷応力が増加するにしたがって, このセグメント内の最大応力 $\sigma_{\max}$ も増加していく. その関係は, やはり式 (11) で与えられる. 最大応力 $\sigma_{\max}$ は, 積層板の平均応力 σ_0 に比例するが, その比例定数は ρ によって異なる. 注意しなければならないことは, ここで述べている ρ は, 今対象としているセグメント内でのき裂間隔を表すパラメータであり, 積層板全体の平均き裂間隔 $\bar{\rho}$ を表すものではないことである. 式 (12) に関して, き裂密度 $1/\rho$ をパラメータとした $\sigma_{\max}$ の σ_0 による変化を Fig. 5 に示す. 横軸の $\sigma_0 = 50$ MPa での各直線の値, すなわち y

Fig. 5. Maximum normal stress in the 90° layer vs. applied laminate stress. 32.3 MPa is the stress value at the formation of a matrix crack.

切片は, 新たなき裂が発生したときの, そのき裂とその両側に既に存在していた2つのき裂に囲まれた2つのセグメントのうち, 間隔の短い方のセグメント内の最大応力 $\sigma_{\max}$ を表している. 平均応力 σ_0 が大きくなるにつれてこの状態から $\sigma_{\max}$ は, き裂密度 $1/\rho$ によって異なる傾きで, 各直線で示したように増加していく. たとえば $\rho = 1.4$ ($1/\rho = 0.7$) の場合には, $\sigma_{\max}$ がもとの応力値 32.3 MPa まで増加するためには積層板の平均応力 σ_0 は 132 MPa まで上昇しなければならない. この応力値は, すでにき裂の発生が停止している応力である¹⁰⁾. また例えば, $\rho = 2$ ($1/\rho = 0.5$) の場合は, もとの応力値を越えるのは $\sigma_0 = 71$ MPa であり, これは積層板全体の平均き裂密度では Fig. 3 において $1/\bar{\rho} = 0.4$ の状態に対応する. この場合, σ_0 がこれ以上増加すればこのセグメント内に新たにき裂が発生する可能性がある. なぜなら, このセグメントにはそれまでに 32.3 MPa までの応力が負荷されており, セグメント内に存在する欠陥からはこの応力値ではき裂は発生しなかったが, 32.3 MPa 以上の応力値になれば, このセグメント内の最大の欠陥から新たにき裂が発生することが可能になるからである. $1/\bar{\rho} = 0.4$ の状態は Fig. 3 の平均最大応力が既に下降している状態に対応している.

一方, $\sigma_0 = 50$ MPa の時に新たに発生したき裂とその両側に既に存在していた2つのき裂に囲まれた2つのセグメントのうち, 間隔の長い方のセグメント (以下補足セグメントと呼ぶ) の応力は, 上述した狭い方のセグメントに比べ広い領域で一様であるので, 応力の最大値の降下はおこらず, 平均き裂密度が増加すると $\sigma_{\max}$ は σ_0 とともにそのまま上昇していく. したがって, この補足セグメントはこれまでよりも大きな応力を受け続け, もし有効な欠陥が存在すれば, いつでもき裂の発生が可能である. このようにして, 広い間隔のセグメントには初期段階でつぎつぎにき裂が発生していくことになる.

上述の $\sigma_{\max}$ はセグメントの中央での値であるが, 実際の積層板では必ずしもこの値によってき裂の発生が決まるわけではない. なぜなら新たなき裂は, セグメントの中央に発生するとは限らないからである. そこで次に, セグメントの平均応力 $\langle \sigma_{xx}^{(1)} \rangle$ の変化を見てみることにする. (以下, セグメント内での平均値を $\langle \cdot \rangle$ で表す.) 平均応力は式 (10) から次のように求められる.

$$\begin{aligned} \langle \sigma_{xx}^{(1)} \rangle &= \sigma^{(1)} \frac{1}{a} \int_0^a [1 - \phi(x)] dx \\ &= \frac{1 + \lambda}{1 + (E_A/E_T)\lambda} \sigma_0 \left\{ 1 - \frac{\rho^{-1}}{a^2 + \beta^2} \times \right. \\ &\quad \left. [A_1(\beta \cosh a\rho \sin \beta\rho + a \sinh a\rho \cos \beta\rho) \right. \end{aligned} \quad (13)$$

Fig. 6. Averaged normal stress in the segment vs. applied laminate stress.

$$+ A_2(\alpha \cosh \alpha \rho \sin \beta \rho - \beta \sinh \alpha \cos \beta \rho)] \}$$

そこでこの関係を Fig. 5 と同じ設定で図示したものを Fig. 6 に示す。この場合では、 $\rho=5$ ($1/\rho=0.2$) の場合でさえ平均応力は低下し、このセグメントに新たなき裂の発生が可能になるのは $\sigma_0=65$ MPa 以上の時である。特に興味深いのは、 $\rho=1.4$ ($1/\rho=0.7$) の場合であり、セグメントの平均応力が初期応力を越えるのは $\sigma_0 \geq 250$ MPa のときであり、これは積層板の破断応力を越えている¹⁰⁾。したがって、このようなセグメントにはもはや新たなき裂は発生しないことになる。

以上の $\sigma_{\max}$ および $\langle \sigma_{xx}^{(1)} \rangle$ は、どちらも極端な場合であるが、実際のマトリックスき裂の発達は、個々の欠陥位置における現在の応力値と、その位置での応力履歴（特にこれまでに受けた最大応力値）との関係で決まると考えられる。

5 き裂発達過程のシミュレーション

前節で述べたメカニズムによってき裂が発達する様子を具体的に見るために、本節では実験結果を用いたシミュレーションを行う。

まず、ゲージ長 150 mm の $[0, 90_2]_s$ 直交積層板の試験片を想定し、一様乱数を用いて、全長にわたって欠陥位置を決める。発生させた欠陥の総数は 200 個である。さらにそれぞれの欠陥位置に、区間 $[0, 1]$ の一様乱数によって欠陥の大きさ (a_d とする) を割り当てる。つぎに、き裂の発生数に対する平均応力 σ_0 の実験結果（実験では、き裂の発生を一つ一つカウントして、き裂発生数 N とその時の平均応力 $\sigma_{0,N}$ の関係を得た）を用いて、き裂を発生させる。はじめに、 $\sigma_0 = \sigma_{0,1}$ として、最大の欠陥位置に一個だけき裂を発生させる。つぎに式(10)を用いて各欠陥位置での応力値を計算し、この値が、これまでの最大経験応力を越えた欠陥のうち、 $\langle \sigma_{xx}^{(1)} \rangle \times a_d$ が最大となる欠陥位置に次のき裂を発生させる。このような作業を繰返して、実験で得られた N ($N_{\max} \approx 170$) の最大値まで至る。こう

Fig. 7. Simulated result of evolution of matrix cracks and stresses. (a): Generated defect positions and sizes. (b)~(d): Upper column; Solid lines indicate the maximum experienced stress in the defect positions. Bars indicate the present value of normal stress. Lower column; Evolution of matrix cracks. Length of bars shows the sizes of defects at which cracks are formed.

して得られた結果を、Fig. 7 に示す。Fig. 7(a) は、最初に発生させた欠陥の位置と大きさ a_d である。Fig. 7(b), (c), (d) は、それぞれ $N=20, 80, 150$ （それぞれ $1/\rho=0.09, 0.37, 0.69$ に対応している）の場合の各欠陥位置での $\sigma_{xx}^{(1)}$ の値を棒グラフで、各欠陥位置でそれまでに負荷された最大の $\sigma_{xx}^{(1)}$ （以下、最大経験応力と呼び、 σ_{xx}^{exp} と表示する）を実線で表示している。また、Fig. 7(b), (c), (d) の下段には、き裂発生位置とその位置に存在していた欠陥の大きさ a_d を表示している。き裂発達の初期段階 (Fig. 7(b)) では $\sigma_{xx}^{(1)}$ はほとんどの欠陥位置で一様であり、き裂のごく近傍で低くなっている。き裂間隔の大きい領域では、 $\sigma_{xx}^{(1)}$ は σ_0 とともに増加していき、つぎつぎとき裂が発生する。中間段階 (Fig. 7(c)) では、すでにき裂が多数発生しているため、多くの欠陥位置で現在の応力値が低下している。これらの欠陥位置に新たにき裂が発生するためには、 σ_0 が増加して $\sigma_{xx}^{(1)} \geq \sigma_{xx}^{exp}$ の条件が満足されなければならない。最終段階 (Fig. 7(d)) では残っている欠陥位置の応力は大きく低下していることがわかる。（これらの図では、欠陥が存在しないセグメント内部の応力分布は表示していない。また、 σ_{xx}^{exp} は欠陥位

Fig. 8. Extended view of Fig. 7 in early stages of evolution.

置での値をつないだものである。) 最大経験応力 σ_{xx}^{exp} は、初期段階では一様な部分が多いが、き裂が発達するにつれて凹凸が激しくなる。これは、き裂の近傍では応力の増加が押えられるからであり、例えば Fig. 7 (d) の σ_{xx}^{exp} を示す実線の谷の部分にはき裂の位置に相当し、谷が深いほどその部分のき裂は初期に発生したことになる。

つぎに同じシミュレーション結果から、部分的に拡大して見てみることにする。Fig. 8 は Fig. 7 の試験片の一部を拡大したものである。この図では、 σ_{xx}^{exp} を破線で示している。Fig. 7 と同様に、棒グラフは欠陥位置での $\sigma_{xx}^{(1)}$ の値、(a), (b), (c), (d) 各図の下段は、き裂位置とき裂の核となった欠陥の大きさを示している。これらの図は平均き裂密度 $1/\rho$ が 0.1 付近のものである。まず、Fig. 8(a) で欠陥 d_1 , d_2 に注目してみよう。これらの欠陥位置では、 $\sigma_{xx}^{(1)}$ の値はほぼ同一であるが、

$a_{d1} \leq a_{d2}$ であるため、図 (b) において d_2 が、全長で 24 個目 ($N=24$) のき裂 c_2 となる。近傍の欠陥 d_2 がき裂になったため、 d_1 の $\sigma_{xx}^{(1)}$ は急激に減少する。 σ_0 の増加とともに d_1 の $\sigma_{xx}^{(1)}$ はその後徐々に増加していくが (図 (c), (d)), これが σ_{xx}^{exp} を越えてき裂になったのは、 $N=119$ ($1/\rho=0.54$) のときであった。

一方、Fig. 8(a) の欠陥 d_3 , d_4 , d_5 , d_6 を見ると、 d_3 , d_4 での $\sigma_{xx}^{(1)}$ は、すぐ右にあるき裂のために若干小さくなっている。図 (c) で、き裂 c_4 が形成されて、 d_3 , d_5 の位置の $\sigma_{xx}^{(1)}$ が減少する。特に d_3 は c_4 に非常に近いため、減少の度合いが大きい。図 (b) でみると d_4 の $\sigma_{xx}^{(1)}$ は d_5 , d_6 の $\sigma_{xx}^{(1)}$ より小さいが、欠陥の大きさが大きいために先にき裂になる。図 (d) では、 d_6 がき裂 c_6 になり、 d_5 の $\sigma_{xx}^{(1)}$ がさらに減少する。ちなみに d_5 がき裂になったのは、 $N=95$ ($1/\rho=0.43$) のときであった。

き裂となる欠陥を決めるためにこのシミュレーションで用いた、 $\sigma_{xx}^{(1)} \times a_d$ が最大となる欠陥」という規準は破壊の criterion を与えるものではない。シミュレーションでは、つぎつぎに割り当てる σ_0 の値は、積層板の実験で実際にき裂が発生した応力値を用いたので、 $\sigma_{xx}^{(1)} \times a_d$ の値がどのようなものであろうと、残った欠陥の内でのこの値が最大となる欠陥の位置に必ずき裂が発生することになる。

本節で行ったシミュレーションは、前節で考察したき裂発達のメカニズムの証明になっているわけではないが、緒言で述べた 90° 層の最大応力の平均 $\overline{\sigma_{max}}$ が下降している領域でもき裂の発生が可能であることが、前節の考えで説明できることを例示したものである。また、欠陥の位置と大きさには一様乱数を割り当てたが、Fig. 7 (d) の最終段階でのき裂の位置を見ると、欠陥位置のランダムネスがそのまま現れているようにみえる。しかし、よく知られているようにき裂の発達が停止した段階では、き裂はほぼ等間隔で並んでおり (Characteristic Damage State¹⁾)、この特性は本節で行ったシミュレーション結果には現れていない。今後さらに、欠陥の統計的分布を検討する必要があると思われる。

6 結 言

直交積層板のマトリックスき裂の発達機構について考察し、つぎの結論を得た。すなわち、マトリックスき裂の発達は、現在の応力値、欠陥の大きさおよびそれまでに欠陥位置に負荷された最大の応力 (最大経験応力) との関係によって支配されていると考えられる。このような機構を考えることによって、発達の初期段階で発生したき裂の、比較的近傍の欠陥からは、平均最大応力が下降している領域でも新たなき裂の発生が可能であることが明らかになった。

(平成5年3月17日 日本材料学会第22回 FRP シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) A. L. Highsmith and K. L. Reifsneider, ASTM STP, **115**, 103 (1982) ASTM
- 2) N. G. Laws, G. J. Dvorak and M. Hejazi, Mech. of Materials, **2**, 127 (1983).
- 3) S. Motogi and T. Fukuda, Proc. ICM-6, ed. M. Jono and T. Inoue, 357 (1991) Pergamon
- 4) J.-W. Lee, D. H. Allen and C. E. Harris, J. Comp. Materials, **23**, 1273 (1989).
- 5) Z. Hashin, Eng. Fracture Mech., **25**, 771 (1986).
- 6) Z. Hashin, Mech. of Materials, **4**, 121 (1985).
- 7) J. A. Nairn, J. Comp. Materials, **23**, 1106 (1989).
- 8) 吉岡健一, 北野彰彦, 野口健一, 第17回複合材料シンポジウム講演要旨集, 87 (1992).
- 9) 吉岡健一, 北野彰彦, 野口健一, 日本機械学会第70期講演論文集, 632 (1993).
- 10) 元木信弥, 福田武人, 田中基博, 材料, **41**, 694 (1992).
- 11) D. Krajcinovic, Mech. of Materials, **8**, 117 (1989).
- 12) 元木信弥, 福田武人, 日本材料学会第21回 FRP シンポジウム講演論文集, 127 (1993).
- 13) 元木信弥, 福田武人, 和田明浩, 日本機械学会第70期講演論文集, 252 (1993).

書 評

“トゥモローズ・マテリアル”

ケン・イースタリング (著)

石 崎 幸 三 (訳)

(1992年, (株)内田老鶴園発行, A 5 判, 173ページ, 2060円)

本書は最近の材料科学の発展とこれからの可能性を平易に, かつ簡潔に紹介したもので, 三つの章からなっている。

第1章では「これからの材料の基礎」として, まず結晶質材料とアモルファス材料を固体の熔融状態から凝固にいたるプロセスと原子配列から説明し, ついで, 本質的に性質の異なる複合材料とセル状材料の構造や特性の概要を述べている。さらに, 材料の選択法や各種材料の特性とその評価法についても解説している。

第2章では「新材料の応用」として, 現在開発中の各種先進材料につき, その構造・製法・用途について述べている。例えば, 飛行機の軽量化のためのアルミニウム合金や繊維高分子複合体, コンクリートの強化のために圧延で作られた梁, また近き将来に金属材料と置き換わるであろう高分子複合材料や機械工具, 電気自動車やエンジンに大変革をもたらすであろう先進セラミックス。さらに光ファイバーやトランジスターを始め, 酸化物超伝導体からハイテクスポーツ用品材料などについて言及している。

第3章「これからの世界のために」では, 地球の資源や環境問題を課題として, 今後の材料開発の在り方や資源保護や環境保全について述べている。また, その一端として, 材料のリサイクルや生分解性高分子材料についての展望が述べられている。

このように, 本書は単に先進材料やその応用といった観点だけでなく, その開発からリサイクル問題を含めて論述されている。しかし, 読者を高校卒業者や科学技術の勉強を志す人達を対象にしているので, 通勤時間やリフレッシュ時間に気楽に読める材料学の入門書である。

(大阪大学基礎工学部 三好 良夫)