

直交異方性異材界面き裂の層間破壊靱性値評価に関する BEM 解析

BOUNDARY ELEMENT ANALYSIS FOR INTERLAMINER FRACTURE TOUGHNESS OF ORTHOTROPIC-DISSIMILAR INTERFACE CRACK

高木 徹¹⁾, 荒井 政大²⁾, 灘 吉 聡³⁾, 足立 忠晴⁴⁾

Toru TAKAGI, Masahiro ARAI, Satoshi NADAYOSHI and Tadaharu ADACHI

- 1) 信州大学大学院工学研究科, 院生 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: toru@str1.shinshu-u.ac.jp)
 2) 信州大学工学部機械システム工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail: arai@mech.shinshu-u.ac.jp)
 3) 東京工業大学大学院理工学研究科, 院生 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: nadayosi@stu.mech.titech.ac.jp)
 4) 東京工業大学大学院機械物理工学専攻 (〒152-8552 目黒区大岡山 2-12-1, E-mail: adachii@mech.titech.ac.jp)

In the present study, an interlaminar fracture toughness of orthogonal CFRP laminates under mixed mode state are evaluated using 2-Dimensional boundary element analysis. MMB (Mixed Mode Bending) tests are carried out to determine complex stress intensity factors which are defined on the interface crack between dissimilar orthotropic laminates. The complex stress intensity factors and mixed mode ratio are extrapolated from stress distribution around the crack tip, then fracture toughness on the interface are calculated by the critical load of the MMB test. It is shown that the fracture toughness of the orthogonal CFRP laminate depends on mode ratio of the stress intensity factors K_1 and K_2 . The criterion of the delamination growth is discussed from a standpoint of the mode dependency of the fracture toughness.

Key Words: Boundary Element Method, Composite Materials, Fracture Toughness, Delamination, Fracture Mechanics, Dissimilar Interface, MMB Test

1. 緒 論

一方向プリプレグから作製される CFRP 積層板は、織物複合材料などと比較して圧縮強度が高いという特徴を有し、また任意の配向選択が可能であることから、用途に応じた材料設計が可能となるなどの利点を有している。また、従来の金属材料に比べ、高剛性化と軽量化が同時に期待できることから、航空宇宙機器、各種輸送機械、スポーツ用具等への適用も盛んに試みられている。

しかしながら、構造的に強い異方性を有することに起因して、限界を越える負荷を受けた際に積層板に平行な面内を伝播する層間剥離、および面外方向に生じる樹脂割れ(トランスバースクラック)等が連成する複雑な破壊形態を示すことが知られている⁽¹⁾。特に CFRP 積層板の損傷のうち、層間剥離の発生と進展のクライテリアを明かにすることは、CFRP の工学的応用を考える上で重要である。

最も基本的な一方向積層板の層間破壊靱性値については、開口形 (Mode I)⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ およびせん断形 (Mode II)⁽⁵⁾⁽⁶⁾、さらにはそれらの混合モード⁽⁷⁾⁽⁸⁾ について種々の繊維/マトリクス樹脂の組合せにおける層間破壊靱性値が求められており、実用的な解析手法も数多く提案されている⁽⁹⁾。

これに対し、強化繊維の配向角が異なる層間における破壊靱性値の検討は現時点で十分とは言えない状況にある。張ら⁽¹⁰⁾ は、 $0^\circ/90^\circ$ の繊維が直交する層間における破壊靱性値について考察しており、層間剥離とトランスバースクラックが交互に発生しながら進展する場合についてコンプライアンス法を用いて破壊靱性値を算出している。また轟ら⁽¹¹⁾ も直交積層板に

ついて、破壊靱性試験を実施し、 $0^\circ/90^\circ$ 層における層間剥離とトランスバースクラックが交互に発生する同様の傾向が見られることを報告している。

前述の張ら、轟らは一般的な均質材料と同様に CFRP 試験片をはり理論により解析しており、混合モードの破壊靱性値についても均質材料と同様、Mode I と Mode II に分離した上で評価を行っている。しかしながら、一方向プリプレグからなる CFRP の各層を均質異方性材料として取り扱った場合、配向角が異なる層間の剥離は異方性異材界面き裂とみなされ、き裂近傍の応力場は複素応力拡大係数に支配される混合モード場となる⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。すなわち異材界面き裂の前提に立てば、均質材料中の 2 次元き裂のように開口モードとせん断モードに分離してクライテリアを論ずることは本質的には不可能となる。

そこで本研究では、直交繊維配向の CFRP 積層板の解析に対して境界要素解析を適用し、前述の異方性異材界面き裂の定義に従って界面き裂の破壊靱性値を評価した。試験法には、混合モード比を幅広く変化させることのできる MMB 試験 (Mixed Mode Bending Test)⁽⁷⁾ を採用し、き裂進展の臨界荷重を計測することで破壊靱性値の算出を行った。熱硬化性マトリクスを有する 2 種の CFRP 積層板について、混合モード比と破壊靱性値の関係について明かにした。

2. 試験法および試験片

MMB 試験は、図 1 のようにレバーを介して試験片中央およびき裂開口部の 2 点に荷重を加えることによって、開口モードとせん断モードの混合状態での破壊靱性値試験が行える手法である⁽⁷⁾。今回制作された MMB 試験治具は図 2 の通りで

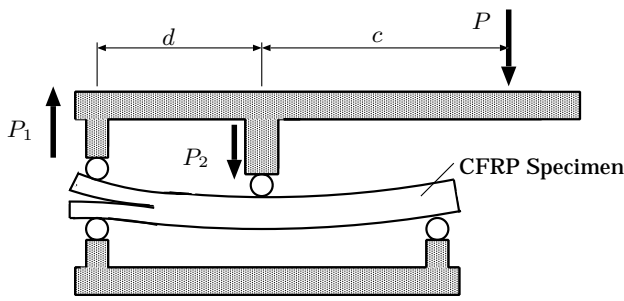


Fig.1 Schematic of MMB Test

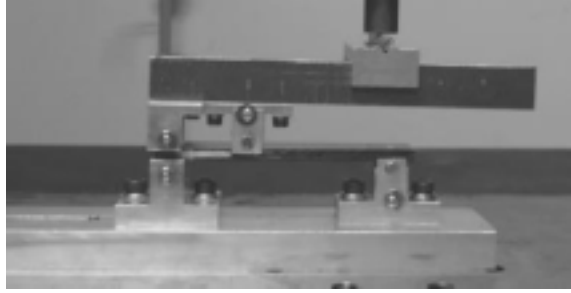


Fig.2 Picture of MMB Test Equipment

0 °Young's Modulus :	E_L	97.8[GPa]
90 °Young's Modulus:	E_T	7.10[GPa]
Shear Modulus :	μ_{LT}	3.30[GPa]
Poisson's Ratio :	ν_{LT}	0.35
Poisson's Ratio :	ν_{TT}	0.5

あり、島津万能材料試験機 AGE-100kNE にてレバー部に荷重を加えて試験を実施した。

本研究で用いる試験片は Carbon/Epoxy 一方向 CFRP プリプレグ (T700S/#2500:東レ) を 24 枚積層したものであり、その配向は $[0_4^{\circ}/90_4^{\circ}/0_4^{\circ} // 90_4^{\circ}/0_4^{\circ}/90_4^{\circ}]$ 、寸法は、幅 20mm、長さ 115mm、厚さ 5.6mm である。予き裂は試験片の作製時に、カプトンフィルムを用いて人工的に作製され、その長さは 25mm である。なお、試験片の繊維配向を表す角度は試験片の長手方向を 0° として定義され、下付添字はプリプレグ数を意味する。また、二重線“//”はき裂の位置を表す。弾性定数は表 1 に示されるとおりである。

3. CFRP 積層板の境界要素解析

本研究では CFRP 積層板の 2 次元解析に対し、直交異方性材料に対する境界要素法を適用する。境界要素法では、境界上の変位 $u(Q)$ と表面力 $t(Q)$ の間に成立する以下の積分方程式を用いる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}u_i(P) + \int_{\Gamma} T_{ij}(P, Q)u_j(Q)d\Gamma \\ = \int_{\Gamma} U_{ij}(P, Q)t_j(Q)d\Gamma \quad (P \in \Gamma) \end{aligned} \quad (1)$$

上式において、P は基本解 U_{ij}, T_{ij} における基準点であり、一般にソース点と呼ばれる。Q は境界 Γ 上の積分点を表し、 $u_j(Q), t_j(Q)$ は点 Q において定義される変位と表面力である。

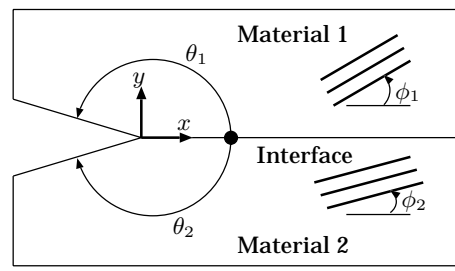


Fig.3 Definition of orthotropic-dissimilar interface crack

なお、式 (1) の点 P は滑らかな辺上に位置するものとする。解析に際しては式 (1) を離散化し、境界上の変位・応力を数値的に算出した。離散化要素には二次非適合型要素を用い、数値積分には Gauss の数値積分公式を用いた。

次に、異材界面き裂におけるエネルギー解放率の導出までの概略を述べる。CFRP 積層板内の繊維配向の異なる層間に生ずる層間剥離は、異方性異材の界面き裂とみなすことができる。図 3 において、両直交異方性材の主軸が界面上の x, y 軸と一致する場合 ($\phi_1 = \phi_2 = 0$)、き裂前縁の引張応力 σ_y 、せん断応力 τ_{xy} 、き裂面の相対変位 δ_x, δ_y 、およびエネルギー解放率 G はそれぞれ次式のように定義される⁽¹³⁾。

$$\sigma_y + i\sqrt{\frac{H_{11}}{H_{22}}}\tau_{xy} = \frac{K_1 + i\sqrt{\frac{H_{11}}{H_{22}}}K_2}{\sqrt{2\pi r}}\left(\frac{r}{l}\right)^{i\varepsilon} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta_y + i\sqrt{\frac{H_{11}}{H_{22}}}\delta_x \\ = \frac{2H_{22}\left(K_1 + i\sqrt{\frac{H_{11}}{H_{22}}}K_2\right)\sqrt{r}}{(1 + 2i\varepsilon)\sqrt{2\pi}\cosh(\pi\varepsilon)}\left(\frac{r}{l}\right)^{i\varepsilon} \end{aligned} \quad (3)$$

$$G = \frac{H_{22}K_1^2 + H_{11}K_2^2}{4\cosh^2(\pi\varepsilon)} \quad (4)$$

ここで、 H_{11}, H_{22} および ε は材料の組合せによって決まる定数であり、その具体形は文献⁽¹³⁾に示されるとおりである。また、 K_1, K_2 は異材界面き裂において定義される複素応力拡大係数であり、均質等方性材中のき裂の場合のモード I(き裂開口形) およびモード II(面内せん断形) と対応しない点に注意が必要である。また、 r はき裂先端からの距離、 l は代表長さ、 i は虚数単位である。

式 (2) ~ 式 (4) に示されるように、異材界面き裂では振動項 $(r/l)^{i\varepsilon}$ が存在することにより、引張応力 σ_y と K_1 、およびせん断応力 τ_{xy} と K_2 が直接対応しておらず、均質材中のき裂のようにそれぞれの基本変形モードに分離して評価することができない。そこでまず、式 (4) を以下のように書き換える。

$$G = \frac{H_{22}K_i^2}{4\cosh^2(\pi\varepsilon)} \quad (5)$$

ただし、 $K_i = \sqrt{K_1^2 + S^2K_2^2}$ 、 $S = \sqrt{H_{11}/H_{22}}$ である。すなわちパラメータ K_i が求めれば、き裂のエネルギー解放率 G が決定できることがわかる。パラメータ K_i は、き裂前縁の応力分布により、次式のように外挿法により求められる。

$$K_i = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r(\sigma_y^2 + S^2\tau_{xy}^2)} \quad (6)$$

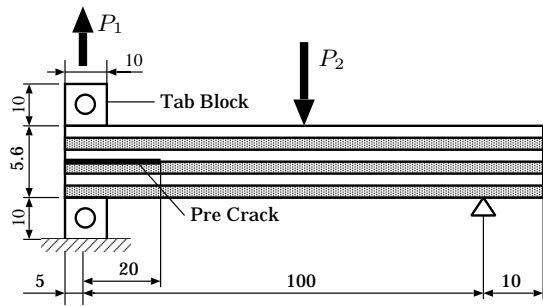


Fig.4 CFRP Specimen

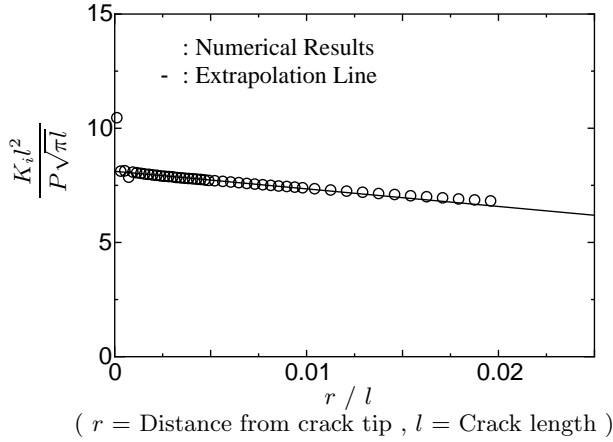


Fig.5 Extrapolation of parameter K_i

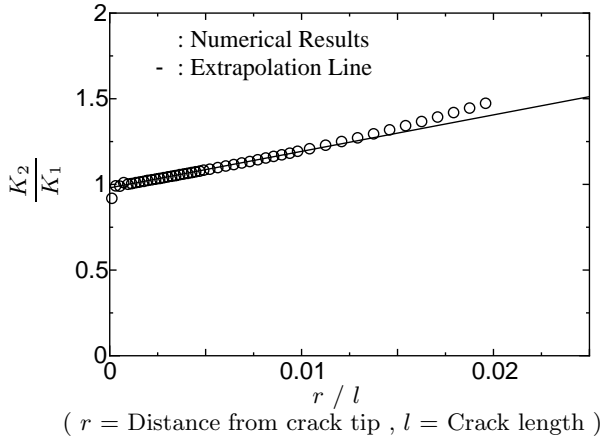


Fig.6 Extrapolation of mode ratio K_2/K_1

さらに複素応力拡大係数のモード比 K_2/K_1 も次式により求められる。

$$\frac{K_2}{K_1} = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{S} \frac{S \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} - \tan Q}{1 + S \frac{\tau_{xy}}{\sigma_y} \tan Q} \quad (7)$$

ただし、 $Q = \varepsilon \ln(r/l)$ である。結果的に、き裂進展時の臨界荷重 P_c が MMB 試験により求められれば、解析により得られるき裂先端近傍の応力に対して外挿式 (6) を適用し、得られた応力拡大係数のパラメータの臨界値 K_{ic} を式 (5) に代入すれば、破壊靱性値 G_c が決定できる。本研究では、CFRP 積層板の解析に 2 次元直交異方性材に対する境界要素法⁽¹⁵⁾ を適用し、

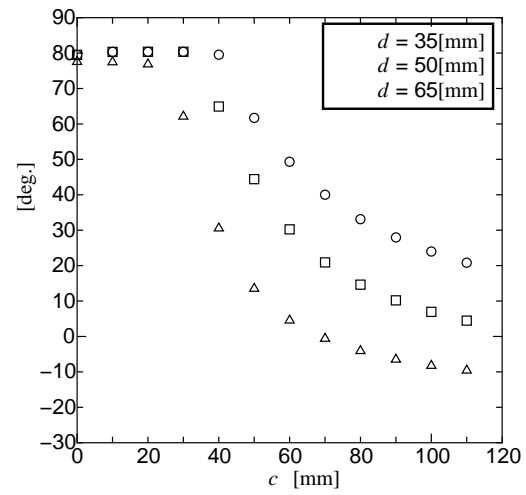


Fig.7 Relation between mode angle θ , parameter c and d

解析で得られたき裂近傍の応力場に対して、前述の外挿法を適用して破壊靱性値ならびに混合モード比の算出を行った。

4. MMB 試験の境界要素解析

ここでは、図 4 に示される MMB 試験片に対して数値解析を行い、外挿法を適用した場合の結果について示す。解析に際して、CFRP 試験片を配向の異なる層ごとに 6 つの領域に分割し、アルミニウム製タブについて 2 領域、計 8 領域について領域結合解法を適用して境界要素解析を行った。

き裂部については、初期条件として摩擦無しすべりの条件を与えた上で繰り返し計算を行う。き裂面における各節点の接触圧力が負、すなわち引っ張り応力が生じた場合には口開き状態として再計算し、また口開き状態と仮定された節点における相対変位が負となった場合は、再びすべり条件として計算を繰り返す。き裂部の節点のうち、95%の節点が口開き状態ないしは摩擦なしすべり条件を満足した段階で計算を終了するものとして収束判定を行った。

まず、一例として CFRP 積層板に $P_1 = 40$ [N]、 $P_2 = 80$ [N] を幅 1 [mm] で与え、 P_1 と P_2 の距離 d を 50 [mm] とした場合の計算結果を示す。なお、複素応力拡大係数の算出に対し、本論文では代表長さ l を支点からき裂先端までの水平距離である 20 [mm] とし、外挿範囲はき裂長さの 1/100 とした。

き裂前縁の応力分布の計算結果に対して前述の外挿法を適用し、パラメータ K_i ならびにモード比 K_2/K_1 を求めた結果を図 5、図 6 に示した。グラフ中の直線は、き裂先端近傍の精度低下が著しい数点を除いたうえで、最小二乗法により求められたものである。グラフの外挿線と縦軸との交点より、パラメータ K_i ならびにモード比 K_2/K_1 が求められる。き裂の極近傍では、離散化誤差が少なからず生じるため、直線性にやや乱れが生じているものの、概ね直線性よく外挿されていることから、十分に信頼性の高い外挿が行えるものと判断される。

MMB 試験では、試験条件により様々なモードにおける破壊靱性値を計測することができる。そこで、破壊靱性試験に先立ち、図 1 の距離 c および d とモード比の関係性を調べるため、境界要素法により数値実験を行った。数値実験においては、今回制作された MMB 試験治具 (図 2) を想定し、距離 d

Table 2 CFRP test specimens

Index	d [mm]	c [mm]	θ [deg.]	\bar{K}_i
MMB1	35	40	79.5	10.1
MMB2	35	50	61.7	11.6
MMB3	35	60	49.3	13.8
MMB4	35	70	40.0	16.5
MMB5	35	80	33.1	19.5
MMB6	35	100	24.0	26.0
MMB7	50	80	14.6	16.0

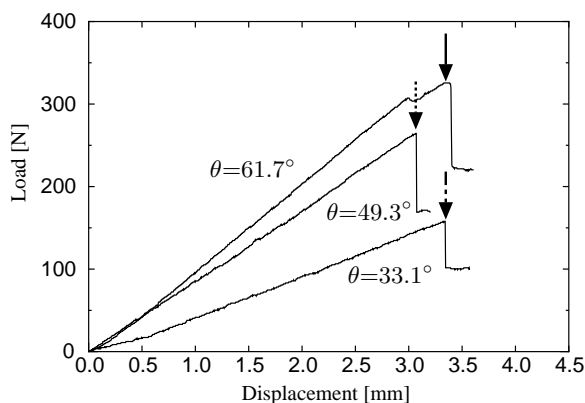


Fig.8 Load vs. displacement of the MMB specimen

を 35[mm], 50[mm], 65[mm] の 3 通り, 距離 c については, $0 < c < 120$ [mm] の範囲で変化させた.

解析結果は図 7 に示されるとおりであり, グラフの縦軸は, モード比の逆正接角 (モード角: $\theta = \tan^{-1}(K_2/K_1)$) を用いて示した. 今回設定された条件下では, $14^\circ < \theta < 80^\circ$ の範囲における破壊靱性値の算出が可能であることがわかる.

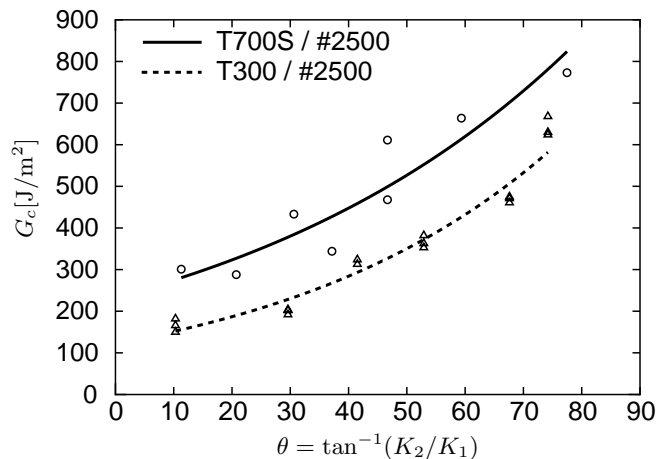
5. MMB 試験結果

MMB 試験を実施して CFRP 積層板の層間破壊靱性値を求めた結果について示す. なお過去の研究により, 開口モードが支配的となる $\theta = 0^\circ$ 付近およびモード角が負となる領域においては層間剥離は進展せず, き裂先端よりトランスバースクラックが発生することが明かにされている⁽¹⁵⁾. そこで本実験では, 図 7 に示される c, d の組合せのうち, 表 2 に示される 7 通りを選んで試験を実施した.

破壊靱性試験においては, き裂が進展する際の臨界荷重 P_c を計測する. 今回行われた試験のうち, 代表的な 3 通りの場合 ($\theta=61.7^\circ, 49.3^\circ, 33.1^\circ$) における荷重-変位線図を図 8 に示す. また, グラフから読み取れる臨界荷重 P_c を矢印で示した.

最終的に得られた層間破壊靱性値とモード角 θ との関係を図 9 に示す. 今回計測された T700S/#2500 試験片の結果が実線で示されており, 過去に計測された T300/#2500 の試験結果⁽¹⁶⁾を破線にて併記した.

グラフより層間剥離の進展を確認できた領域では, 層間破壊靱性値は複素応力拡大係数のモード角によって変化することが確認できる. また, 破壊靱性値はモード角の低い 10° 付近において相対的に低くなる傾向を示し, モード比が増加, すなわちモード角 θ が 90° に近づくにつれて, その値が上昇する傾向が確認される.

Fig.9 Fracture Toughness G_c vs. Mode Angle θ

6. 結論

本研究は, CFRP 直交積層板の層間剥離の進展に関するクライテリアを, 複素応力拡大係数のモード角 $\theta = \tan^{-1}(K_2/K_1)$ との関係から明かにすることを目的とし, 試験片の 2 次元応力場の解析に境界要素法を適用する一連の手法を提案し, その有効性について検討した.

本研究で取り扱った Carbon/Epoxy プリプレグからなる CFRP 試験片では, き裂近傍における引張り応力が支配的となる場合に破壊靱性値が低い値をとり, せん断応力場が支配的になるにつれて, 破壊靱性値が増加傾向にあることが確認された. また, この傾向は過去の Carbon/Epoxy-CFRP 試験片にて得られた傾向と概ね一致することも確かめられた.

参考文献

- (1) 例えば, 盛田英夫, 浜本章, 足立忠晴, 西森顕, 松本浩之, 材料, 44-499 (1995), pp.423-427.
- (2) 影山和郎, 小林孝行, 野中勝信, 機論, 53-494 A(1987), pp.1898-1904.
- (3) 影山和郎, 小林孝行, 柳沢昇, 菊池正紀, 宮本博, 機論, 53-496 A(1987), pp.2386-2393.
- (4) Gillespie Jr, J.W., Carlsson, L.A. and Smiley, A.J., Composite Science and Technology, 28 (1987), pp.1-15.
- (5) Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R.A., Margolis, W.S. and Benson, R.A., ASTM-STP, 775, 1982, pp.168-183.
- (6) 影山和郎, 柳沢昇, 日本複合材料学会誌, 15-2 (1989), pp.71-77.
- (7) Reeder, J.R., ASTM-STP, 1206 (1993), pp.303.
- (8) 菊池正紀・黒田基文, 機論, 57-542 A(1991), pp.2378-2383.
- (9) 例えば, 北條正樹・影山和郎, 材料, 46-5 (1997), pp.568-574.
- (10) 張惟敦, 金原勲, 影山和郎, 大沢勇, 日本複合材料学会誌, 19-3 (1993), pp.109-119.
- (11) 轟章, 小林英男, 足立邦夫, 材料, 43-487 (1994), pp.434-440.
- (12) Yau, J.F., and Wang, S.S., Fracture Mechanics, 20-3 (1984), pp.423-432.
- (13) 結城良治, 石川晴雄, 岸本喜久雄, 許金泉, 界面の力学 (1993), 培風館.
- (14) 結城良治, 許金泉, 機論, 57-539, A(1990), pp.1542-1549.
- (15) 荒井政大, 上村元祥, 足立忠晴, 山路昭彦, 機論, 65-639 A(1999), pp.2238-2245.
- (16) 荒井政大, 灘吉聡, 足立忠晴, 山路昭彦, 日本機械学会 2000 年度年次大会講演論文集 (I), No.00-1 (2000), pp.571-572.