

## Laplace 変換 BEM による CFRP 積層板の動的層間破壊靱性値の評価

EVALUATION OF DYNAMIC FRACTURE TOUGHNESS OF CFRP LAMINATES  
BY BOUNDARY ELEMENT METHOD USING LAPLACE TRANSFORM

荒井 政大<sup>1)</sup>, 野呂 幸弘<sup>2)</sup>, 高木 徹<sup>3)</sup>  
Masahiro ARAI, Yukihiro NORO, Toru TAKAGI

- 1) 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@shinshu-u.ac.jp)  
2) 信州大学大学院工学系研究科 (院生) (〒380-8553 長野市若里 4-17-1, E-mail : yukihiro@str1.shinshu-u.ac.jp)  
3) 半田重工業株式会社 (〒475-0871 愛知県半田市本町 1-1)

In the present study, boundary element method is applied to the evaluation of interlaminar fracture toughness of CFRP composite. The dynamic fracture toughness of CFRP was measured by split Hopkinson bar method, where the dynamic three point bending tests were carried out using short-beam-type specimens with end notch. In order to evaluate the dynamic deformation of CFRP laminates, Laplace-transformed BEM scheme was employed for the numerical computation, and the extrapolation scheme was applied to obtain the stress intensity factor (SIF) of Mode II in the unidirectional CFRP laminates. The basic formulation of BEM analysis for the anisotropic body of CFRP is introduced, and the experimental results of dynamic fracture toughness obtained from SHPB test and BEM analysis are discussed.

*Key Words:* Boundary Element Method, Numerical Analysis, Fracture Mechanics, CFRP, Fracture Toughness, ENF Test, Laplace Transform

## 1. 緒 論

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP) は, 比強度・比剛性に優れている利点から, 旧来の金属材料に代わる構造材として注目され, 様々な工学分野への応用が試みられている。しかしながら金属等と比較して限界強度を越えた場合における破壊挙動が脆性的であることから, 主に衝撃負荷が作用した場合の耐衝撃性において克服すべき多くの課題がある。特に一方向プリプレグやフィラメントワインディングにより作成される積層板や殻構造物では, 繊維方向の切り替わる層間において剥離が生じやすいことから, 層間に生じた剥離・き裂進展のクライテリアを正確に把握したうえで, CFRP 積層板の損傷許容設計を行うことが重要となる<sup>(1)(2)</sup>。

著者らはこれまで, エポキシ樹脂を母材とする CFRP 積層板の層間破壊靱性値を定量的に評価することを目的として一連の実験的研究を行ってきた<sup>(3)(4)</sup>。CFRP 積層板が衝撃負荷を受ける場合の破壊靱性値測定に関しては, Split Hopkinson bar 法<sup>(5)(6)</sup>(以下, Hopkinson 棒法と略記)により CFRP 積層板の衝撃 3 点曲げ試験を行い, 動的はり理論を用いた数値解析を実施して, 破壊靱性値の算出を試みている。

しかしながら, 種々の繊維配向を有する CFRP 積層板中の剥離, すなわちき裂先端近傍の応力場は, 一般に複素応力拡大

係数で表される混合モード場となるため, 従前のように単純なはり理論を用いた近似では, 層間破壊靱性値の評価精度が低くなることが懸念される。

そこで本研究では, Hopkinson 棒法による衝撃 3 点曲げ試験における CFRP 試験片の解析に対して境界要素法の適用を試みた。境界要素法の定式化には静弾性問題の基本解を用いる方法を導入し, 慣性力項については領域全体に対して体積積分を実行する領域一境界積分法を適用した。また時変数の取り扱いには Laplace 変換法を適用し, Laplace 逆変換の処理には高速 Fourier 変換 (FFT) を用いた数値的手法<sup>(7)</sup>を適用した。本論文では, 実験結果から得られる衝撃荷重のデータを用いて CFRP 試験片の動的変形解析を実施し, モード II 動的層間破壊靱性値を求めた事例について示すとともに, CFRP 積層板の動的解析に対する境界要素法の有効性について基礎的な検討を行った。

## 2. 衝撃試験法

本研究では CFRP 積層板のモード II 動的層間破壊靱性値を評価するため, Fig.1 に示されるような Hopkinson 棒法による試験装置を用い, Fig.2 に示される一端にき裂を挿入した ENF(end-notch flexure) 試験片を用いて衝撃 3 点曲げ試験を実施した。Hopkinson 棒法では, 圧縮空気により加速された軟鋼製の衝撃棒 (Strike Bar : 長さ 750mm, 直径 10mm)

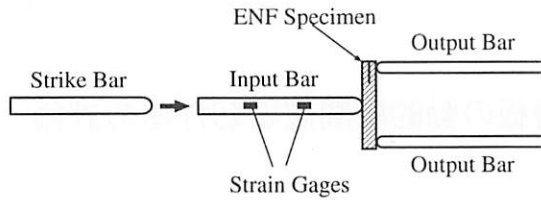


Fig.1 Split Hopkinson pressure bar method

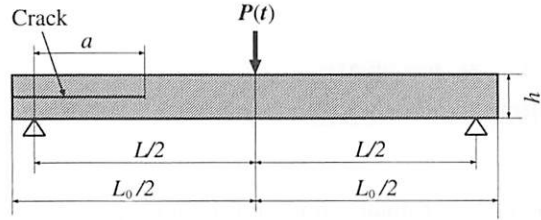


Fig.2 ENF specimen of unidirectional CFRP laminate beam

を入力棒 (Input Bar : 長さ 1500mm, 直径 10mm) に衝突させることによって応力波を発生させ、試験片に接して置かれた入力棒を通して試験片に衝撃荷重を作用させる。また試験片は Fig.1 に示されるように 2 本の出力棒 (長さ 1500mm, 3mm × 10mm: 矩形断面) によって支えられている。なお、出力棒の右端の支持条件は自由とした。

なお、一般には単純に衝撃棒と入力棒を衝突させただけでは、得られた衝撃荷重に高周波成分が複雑に重畳し、解析誤差が大きくなるだけでなく衝撃荷重の履歴よりき裂が進展した時刻を判別することが困難となる。この問題を回避するために、通常は入力棒と衝撃棒との間にバッファと呼ばれる干渉材を挿入し、衝撃荷重の高周波成分を除去する操作を行う。本論文では、著者らのグループによりこれまで用いられている SBR (スチレン・ブタジエンゴム) 系の制振用の合成ゴム (厚さ約 10mm) を挿入して、後述のようになめらかなランプ状の荷重を得ることに成功している。

本測定装置では、試験片に作用する入力荷重を求めるため、入力棒の 2 箇所のひずみを計測することとした。棒の長さの 1/3 および 2/3 の位置に、表と裏の 2 枚ずつ、計 4 枚の半導体ひずみゲージが貼られている。一次元波動伝播理論による逆計算を適用し、2 箇所のひずみ応答より棒先端の荷重が算出される。ここでは、荷重の算出方法について簡単に述べる。

棒の一次元波動方程式は以下の通りである。

$$\frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

ここで  $u(x, t)$  は棒の軸方向変位、 $c$  は縦波の伝播速度 ( $c = \sqrt{E/\rho}$ ,  $E$ : Young 率,  $\rho$ : 密度),  $t$  は時間である。時刻  $t = 0$  において棒は静止しているものとし、かつ変形がないものとするれば、式 (1) の Laplace 変換形は次式で表される。

$$s^2 \bar{u}(x, s) = c^2 \frac{d^2 \bar{u}(x, s)}{dx^2} \quad (2)$$

ただし  $s$  は Laplace 変換パラメータ、 $\bar{\cdot}$  は物理量の Laplace 変換を表す。上式をさらに以下のように変形する。

$$\frac{d^2 \bar{u}(x, s)}{dx^2} = \kappa^2 \bar{u}(x, s) \quad (3)$$

ただし、 $\kappa = s/c$  である。上式の一般解は次式で与えられる。

$$\bar{u}(x, s) = Ae^{\kappa x} + Be^{-\kappa x} \quad (4)$$

ここで  $A, B$  は境界条件により決まる未定係数である。

2 つの未定係数は、通常は棒の両端の境界条件により決定されるが、本解析においては棒内における 2 箇所のひずみの時刻歴を測定することにより決定する。

棒の左端を  $x = 0$  とし、 $x = l_1$  および  $x = l_2$  におけるひずみの時刻歴をそれぞれ  $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$  とすると、棒中 2 箇所の位置における条件式が以下のように得られる。

$$\bar{\varepsilon}_1(s) = \frac{d\bar{u}}{dx} \Big|_{x=l_1} = \kappa Ae^{\kappa l_1} - \kappa Be^{-\kappa l_1} \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}_2(s) = \frac{d\bar{u}}{dx} \Big|_{x=l_2} = \kappa Ae^{\kappa l_2} - \kappa Be^{-\kappa l_2} \quad (6)$$

ただし、 $\bar{\varepsilon}_1(s), \bar{\varepsilon}_2(s)$  は 2 箇所のひずみの Laplace 変換である。未定係数  $A, B$  について解けば、

$$A = \frac{e^{-\kappa l_2} \bar{\varepsilon}_1(s) - e^{-\kappa l_1} \bar{\varepsilon}_2(s)}{\kappa(e^{\kappa l_1} e^{-\kappa l_2} - e^{-\kappa l_1} e^{\kappa l_2})} \quad (7)$$

$$B = \frac{e^{\kappa l_2} \bar{\varepsilon}_1(s) - e^{\kappa l_1} \bar{\varepsilon}_2(s)}{\kappa(e^{\kappa l_1} e^{-\kappa l_2} - e^{-\kappa l_1} e^{\kappa l_2})} \quad (8)$$

実験により計測された棒内の 2 箇所のひずみ応答の Laplace 変換を式 (7), 式 (8) に代入して未定係数  $A, B$  を決定すれば、棒の変位およびひずみがすべて求められることになる。棒の右端 ( $x = l$ ) が試験片に接している場合を考えると、結果として試験片に作用する衝撃荷重は次式により求められる。

$$\begin{aligned} \bar{f}(s) &= S\bar{\sigma}(s)_{x=l} = SE \frac{d\bar{u}}{dx} \Big|_{x=l} \\ &= SE \left\{ \frac{e^{-\kappa l_2} \bar{\varepsilon}_1(s) - e^{-\kappa l_1} \bar{\varepsilon}_2(s)}{e^{\kappa l_1} e^{-\kappa l_2} - e^{-\kappa l_1} e^{\kappa l_2}} e^{\kappa l} \right. \\ &\quad \left. - \frac{e^{\kappa l_2} \bar{\varepsilon}_1(s) - e^{\kappa l_1} \bar{\varepsilon}_2(s)}{e^{\kappa l_1} e^{-\kappa l_2} - e^{-\kappa l_1} e^{\kappa l_2}} e^{-\kappa l} \right\} \quad (9) \end{aligned}$$

ただし、 $S$  は棒の断面積である。

なお、実験で得られたひずみ応答を式 (9) に適用して演算を行う際、ならびに式 (9) より得られた衝撃荷重の Laplace 変換  $\bar{f}(s)$  より、その時刻歴を求めるためには、Laplace 変換および Laplace 逆変換を行う必要がある。本論文ではこれらの演算を数値的に行うものとし、高速かつ精度的信頼性の高い Krings & Waller<sup>(7)</sup> の方法を用いた。

ところで、Fig.2 に示される ENF 試験片の数値解析を行うには、試験片中央部に作用する荷重の条件とともに、試験片支持部の境界条件が必要となる。そこで従来では、出力棒にもひずみゲージを貼り付けることにより支持反力の測定を行い、その値を境界条件として与えることにより解析を行っていた<sup>(3)</sup>。

しかしながら従来では、衝撃荷重の測定に 2 箇所、それに加えて支持反力の測定に 4 箇所と、多くの衝撃ひずみを測定する必要があり、簡便な方法とは言い難い。そこで本論文では以下に示すように棒のインパルス応答関数を用いて支持条件を与えることとし、出力棒のひずみ計測を不要とする計測手法を提案する。

式 (3) で示される棒の波動方程式の一般解より得られる出力棒のインパルス応答関数を  $I(t)$ , その Laplace 変換を  $\bar{I}(s)$  とすると, 出力棒端の変位  $\bar{u}_r(s)$  と反力  $\bar{R}(s)$  の関係は以下のように表される。

$$\bar{u}_r(s) = \bar{R}(s)\bar{I}(s) \quad (10)$$

出力棒のインパルス応答関数  $\bar{I}(s)$  は, 棒の左端に単位インパルス荷重が作用し, 右端の境界条件を自由として式 (3) を解くことにより求められる。その具体形は以下ようになる。

$$\bar{I}(s) = \frac{1}{\kappa SE} \frac{e^{-\kappa l} + e^{\kappa l}}{e^{\kappa l} - e^{-\kappa l}} \quad (11)$$

解析を Laplace 像空間にて行うものとするれば, その際の棒による支持点の境界条件に上式を適用することにより, CFRP 試験片の衝撃応答解析が可能となることがわかる。

### 3. 数値 Laplace 変換・逆変換

数値 Laplace 変換とその逆変換には種々の方法があるが, 最も代表的な手法が高速 Fourier 変換 (Fast Fourier Transform: FFT) を用いる方法<sup>(8)(9)</sup>である。本論文では理論展開の容易な Krings & Waller<sup>(7)</sup> の数値 Laplace 逆変換を用いるものとし, その手法について以下に概説する。

はじめに, 関数  $f(t)$  の Laplace 変換および逆変換の定義式について以下に示しておく。

$$\bar{f}(s) = \int_0^{\infty} f(t) \exp(-st) dt \quad (12)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma-i\infty}^{\gamma+i\infty} \bar{f}(s) \exp(st) ds \quad (13)$$

ただし,

$$f(t) = 0 \quad (t < 0) \quad (14)$$

を仮定するものとする。また,  $i$  は虚数単位である。

ここで, Laplace 変換パラメータ  $s$  を  $s = \gamma + i\omega$  ( $\gamma = \text{const}$ ) と書き換えたのち, 式 (12) および式 (13) に代入すれば, それぞれ次式に帰着する。

$$\bar{f}(s) = \int_0^{\infty} [f(t) \exp(-\gamma t)] \exp(-i\omega t) dt \quad (15)$$

$$f(t) = \exp(\gamma t) \left[ \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \bar{f}(\gamma + i\omega) \exp(i\omega t) d\omega \right] \quad (16)$$

よって, Laplace 変換 (15) および逆変換 (16) は Fourier 変換を用いて計算し得ることになる。

時間  $0 \leq t \leq T$  の範囲を解析対象の時間範囲とし, サンプル数  $N_p$  で離散化する。  $t \geq T$  において  $f(t) = 0$  であるとするれば, サンプル数の定理により  $\Delta t$  および  $\Delta \omega$  は次式のように定められる。

$$\Delta t = \frac{T}{N_p}, \quad \Delta \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (17)$$

最終的に離散 Fourier 変換を用いた Laplace 変換対の定義式が以下のように得られる。

Table 1 Specification of ENF specimen

Length ( $L_0$ )	70	mm
Thickness ( $h$ )	3.5	mm
Support Span ( $L$ )	60	mm
Delamination Length ( $a$ )	15	mm
Width ( $b$ )	10	mm
Young's Modulus ( $E_L$ )	97.8	GPa
Young's Modulus ( $E_T$ )	7.1	GPa
Shear Modulus ( $G_{LT}$ )	3.3	GPa
Poisson's Ratio ( $\nu_{LT}$ )	0.35	
Density ( $\rho$ )	$1.6 \times 10^3$	kg/m <sup>3</sup>

$$\begin{aligned} \bar{f}_n &= \bar{f}(\gamma + in\Delta\omega) \\ &= \frac{T}{N_p} \sum_{k=0}^{N_p-1} [f(k\Delta t) \exp(-\gamma k\Delta t)] \exp\left(-\frac{2\pi ink}{N_p}\right) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} f_k &= f(k\Delta t) \\ &= \frac{1}{T} \exp(\gamma k\Delta t) \sum_{n=0}^{N_p-1} [\bar{f}(\gamma + in\Delta\omega)] \exp\left(\frac{2\pi ink}{N_p}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

以上のように, Laplace 変換対は離散 Fourier 変換型に書き換えられ, 高速 Fourier 変換 (FFT) のアルゴリズムによって高速な演算が可能となる。よって式 (19) の右辺  $\bar{f}_n : n = 0, \dots, N_p - 1$  の  $N_p$  個の像空間解から,  $N_p$  個の時系列データ  $f_k$  を計算することができる。

なお, 収束座標  $\gamma$  は, 本来は任意にとり得るパラメーターであるが, 実際には適切な値を用いなければ解の発散, 誤差の重畳を招く。足立ら<sup>(10)</sup>, 井上ら<sup>(11)</sup>によれば,  $\gamma$  は関数形やサンプリング数などにより概ね  $3/T \sim 9/T$  の間に最適値があると述べているが, 本論文ではすべて  $\gamma = 6/T$  として計算を行っている。

### 4. CFRP 試験片

試験片はエポキシ樹脂をマトリクスとする CFRP 一方向プリプレグ (東レ T700S/#2500) による積層はりである。プリプレグ層数は 16 層であり, 繊維の向きはすべて試験片の長手方向に一致させている。真空バグ・オートクレーブ法により, 240mm × 240mm の正方形板を成形した後, ダイヤモンドカッターを用いて Table 1 に示される寸法の短冊状の試験片を切り出し, 供試材とした。

なお, 積層板の作成時にプリプレグ間にカプトンフィルムを挿入することにより人工的な剥離を生成させている。試験片の寸法と併せ, 密度, Young 率等の諸元を Table 1 に示しておく。

### 5. CFRP 積層板の数値解析

本報では異方性を有する CFRP 積層板の 2 次元変形の解析に対して境界要素法を適用する。慣性力を考慮すれば, 動的問題に対するつり合い方程式は次式で表される。

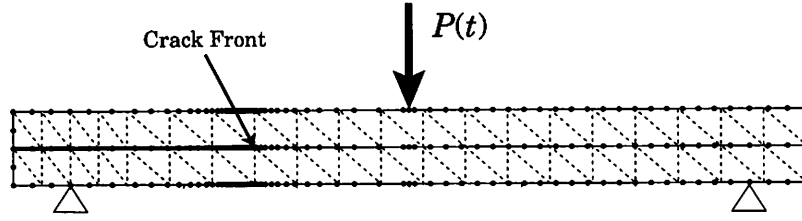


Fig.3 BEM model of unidirectional CFRP laminated beam

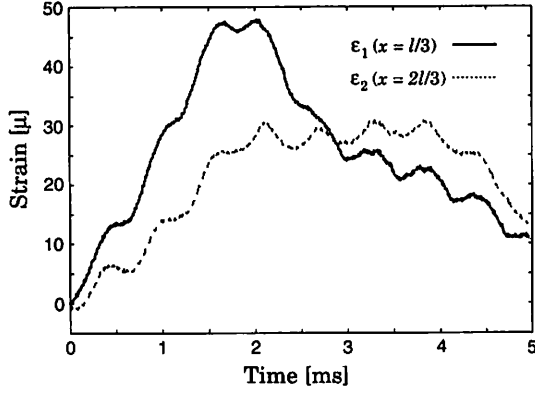


Fig.4 Strain histories on the input bar

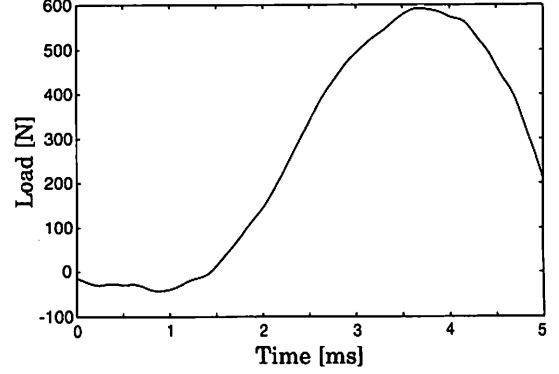


Fig.5 An example of the input load

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = \rho u_{i,tt} \quad (20)$$

ここで  $u_i$  は弾性体の変位であり、 $\lambda$  および  $\mu$  は Lamé 定数である。上式を Laplace 変換すると次式となる。

$$\mu \bar{u}_{i,jj} + (\lambda + \mu) \bar{u}_{j,ji} = \rho s^2 \bar{u}_i \quad (21)$$

上式の両辺に静弾性問題に関する単位集中力の基本解  $U_{ij}$  を乗じて考察領域にて積分したのち、Gauss の発散定理を適用すれば、最終的に Laplace 変換された境界上の変位  $\bar{u}(Q)$  と表面力  $\bar{t}(Q)$  の間に成立する以下の境界積分方程式が導出される。

$$\begin{aligned} & C_{ij}(P) \bar{u}_j(P) \\ & + \int_{\Gamma} \left\{ T_{ij}(P, Q) \bar{u}_j(Q) d\Gamma - U_{ij}(P, Q) \bar{t}_j(Q) \right\} d\Gamma \\ & = -\rho s^2 \int_{\Omega} U_{ij}(P, Q) \bar{u}_j(Q) d\Gamma \end{aligned} \quad (22)$$

ただし、本論文では  $U_{ij}$  ならびにその表面力成分である  $T_{ij}$  として 2次元異方性静弾性問題に対する基本解<sup>(4)(12)(13)</sup>を用いる。また、 $C_{ij}$  は着力点  $P$  の位置に関して定義される位置定数であり、点  $P$  が境界上に位置する場合は  $\delta_{ij}/2$ 、領域内部に位置する場合は  $\delta_{ij}$ 、領域の外にある場合は恒等的に 0 となる。

なお、境界積分方程式 (11) を評価するには、左辺の境界積分とともに、右辺の領域積分の評価も必要となる点に注意しなければならない。本研究では境界上の物理量を 2次非適合型要素にて離散化するとともに、領域内部の変位を三角形型の一定要素にて離散化して解析を行った。

CFRP 試験片の BEM 解析モデルを Fig.3 に示す。き裂面およびリガメント面を境界として、上下 2つの領域に分割し

て領域結合解法を適用した。境界要素数は 184、領域要素数は 80 である。また境界条件の Laplace 変換、ならびに境界積分方程式により求められた Laplace 変換解の逆変換に際しては、先の棒の波動方程式の解析と同様に、Kring & Waller の数値 Laplace 変換・逆変換を用いた。

## 6. 試験結果と考察

以下に Hopkinson 棒法による衝撃試験結果の一例を示す。Fig.4 は実験により得られた入力棒中のひずみ変動  $\epsilon_1(x = l/3)$  と  $\epsilon_2(x = 2l/3)$  である。先に述べた一次元波動伝播理論を用い、これらのひずみ応答より入力棒先端の衝撃荷重を求めた結果が Fig.5 である。なお、衝撃荷重を求めるにあたっては、カットオフ周波数付近の高周波ノイズが結果に重畳するため、数値 Laplace 逆変換を施す際に 16kHz 以上の高周波成分の除去を行っている。また、Fig.4 および Fig.5 の実験結果は、予き裂を有しない試験片を用いた予備試験の結果である。

き裂を有する試験片について衝撃試験を実施し、同様の手法により計測された衝撃荷重の結果を Fig.6 に示す。矢印で示された点 ( $t = 2.21\text{ms}$ ) において荷重が急落しており、この時刻の前後においてき裂が進展したものと判断できる。

引き続き、衝撃荷重の計測データを用いて境界要素法により CFRP 試験片の動弾性解析を実施する。各時刻におけるリガメント面のせん断応力  $\tau_{xy}$  に対して応力外挿法を適用し、応力拡大係数の時間変動を算出した。応力外挿の定義式は以下のとおりである。

$$K_{11} = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \tau_{xy} \quad (23)$$

各時刻において求められた応力拡大係数をプロットし、時刻歴を求めた結果が Fig.7 である。応力拡大係数は、時刻  $t = 2.11\text{ms}$  において最大値を示しており、その後値が急落している。この

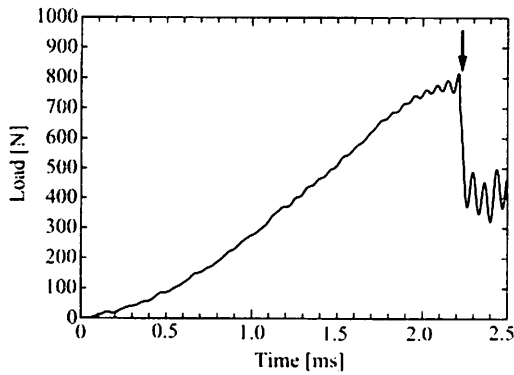


Fig.6 An example of input load history in SHPB test

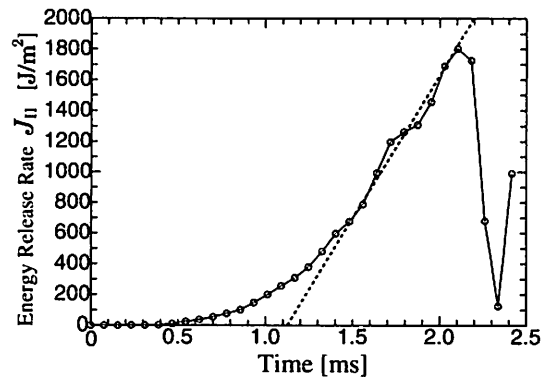


Fig.9 History of mode II energy release rate

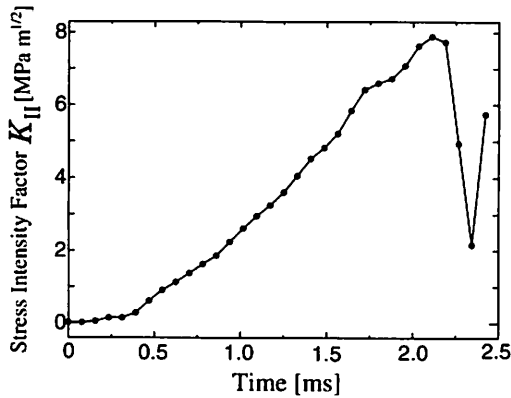


Fig.7 History of the stress intensity factor  $K_{II}$

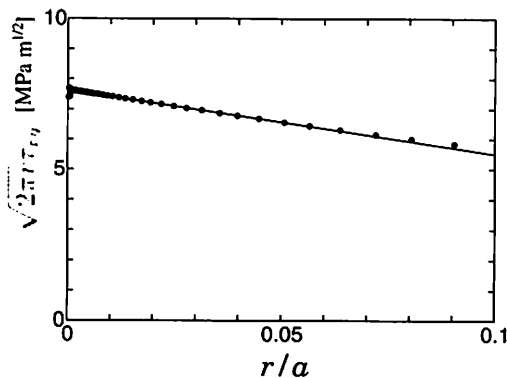


Fig.8 Extrapolation of stress intensity factor  $K_{II}$

時刻は、先程述べた衝撃荷重が最大値を示す時刻よりも若干ではあるが早いことがわかる。き裂が進展した時刻を正確に把握するには、さらに詳細な考察が必要であると考えられるが、本論文においては便宜的に応力拡大係数が最大値を示した時刻においてき裂が進展したとみなすこととした。Fig.8は応力拡大係数が最大値を示した  $t = 2.11\text{ms}$  における応力拡大係数の外挿結果である。き裂端近傍の応力が直線性よく外挿されていることから、得られた応力拡大係数の精度は十分に高いと判断できる。

さて、モード II 応力拡大係数  $K_{II}$  と、モード II エネルギー解放率  $J_{II}$  の関係は次式となる。

$$J_{II} = \frac{1}{4} H_{II} K_{II}^2 \quad (24)$$

上式の  $H_{II}$  は異方性異材界面を構成する材料の組合せによって決定されるパラメータであるが、その計算法については文

Table 2 Results of dynamic fracture toughness of CFRP laminates

Index	$\dot{J}_{II}$ [MJ/m <sup>2</sup> s]	$J_{IIc}$ [J/m <sup>2</sup> ]
Test 1	1.6	1800
Test 2	1.9	1640
Test 3	2.8	1880
Test 4	7.6	1550
Test 5	(Static)	1516
Test 6	(Static)	1499

献<sup>(12)</sup>を参照されたい。破壊靱性値  $J_{IIc}$  は、応力拡大係数の臨界値  $K_{IIc}$  を上式に代入することにより求められる。

さて、破壊靱性値の動的効果を具体的に記述するために、試験片の変形速度やひずみ速度など、種々の指標が用いられている。しかしながら破壊靱性値について考えると、線形破壊力学に基づくき裂近傍のひずみの理論値は無限大となることに起因して、一般に適切な指標を与えることが難しい。

そこで本論文では、エネルギー解放率の時刻歴  $J_{II}(t)$  の時間導関数、すなわち  $dJ_{II}/dt = \dot{J}_{II}$  を用いて破壊靱性値の動的効果について考察することとした。 $\dot{J}_{II}$  はすなわち、Fig.9に示される  $J_{II}$  の時刻歴における傾きとなる。実際にはグラフに示されるように、 $J_{II}$  の傾きは一定ではなく、高周波振動が重畳するが、今回は試験の試みとして、時間変動の後半部分に関して最小二乗法を適用してその勾配を算出した。

衝撃試験を実施した4本の供試材に関する試験結果とともに、参考結果として2本の供試材に関する静的試験の結果をTable 2にまとめた。今回実施した範囲においては、残念ながら動的破壊靱性値  $J_{IIc}$  と  $\dot{J}_{II}$  との間に相関は確認できなかった。しかしながら静的試験の結果と比較すれば、僅かながら動的破壊靱性値が大きな値を示していることがわかる。この傾向は、過去に測定されたCFRP一方向積層板の試験結果<sup>(3)</sup>と概ね一致することが確認された。

## 7. 結論

本論文では、Hopkinson 棒法による衝撃3点曲げ試験を用いてCFRP積層板のモード II 動的層間破壊靱性値を評価すべく、試験片の解析に対して領域-境界積分法に基づく境界要素法を適用し、実験データに基づく基礎的な考察を行った。本論文の成果を以下に総括する。

- (1) CFRP 試験片の動的解析に対し、境界要素法を適用した。異方性体の静弾性問題の基本解を用いた領域-境界積分法を適用し、時変数の処理として Laplace 変換法を用いた数値解析プログラムを開発した。
- (2) CFRP 試験片の動的解析を行うにあたり、支持点の境界条件を出力棒のインパルス応答関数により与える方法を提案した。本手法の導入により、出力棒におけるひずみ応答の計測が不要となり、動的応力拡大係数の計算手続きが大幅に簡略化された。
- (3) 一方向 CFRP 積層板について、Hopkinson 棒法によるモード II 層間破壊靱性値の測定実験を行った。実際の衝撃荷重を用いてき裂近傍の応力場を計算し、さらに外挿法を用いて動的応力拡大係数を決定した結果、動的応力拡大係数ならびに動的破壊靱性値が十分な精度で求められることを確認した。
- (4) 今回測定対象とした T700S/#2500 プリプレグを用いた一方向 CFRP 積層板においては、動的な層間破壊靱性値が静的な値に比べ、僅かながら上昇する傾向にあることが確かめられた。

## 参考文献

- (1) 例えば、盛田、浜本、足立、西森、松本、材料, **44**-499 (1995), 423-427.
- (2) 荒井、立石、足立、松本、機論, **64**-627, A(1998), 2686-2693.
- (3) Adachi, T., Arai, M., Sakabe, N. and Matsumoto, H., Evaluation of Dynamic Fracture Toughness of Unidirectional CFRP Laminates, JSME International Journal, Ser. A, **43**-2, (2000), 179-185.
- (4) 荒井、上村、足立、山路、機論, **65**-639, (1999), 2238-2245.
- (5) 岸田・中川、材料, **32**-361, (1983), 1096-1101.
- (6) 東田・小川、材料, **39**-445, (1990), 1462-1468.
- (7) Krings, W. and Waller, H., *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **14**, (1979), 1183-1196.
- (8) Wilcox D. J. and Gibson I. S., *Int. J. Num. Meth. Eng.*, **20**, (1984), 1507-1519.
- (9) Durbin, F., *The Computer Journal*, **17**-4, (1974), 376
- (10) 足立・宇治橋・松本、機論 (A), **55**-519, (1989), 2271-2276.
- (11) 井上・上林・岸本・渋谷、機論 (A), **57**-542, (1991), 2523-2528.
- (12) 結城、石川、岸本、許、界面の力学, (1993), 培風館.
- (13) 高木、荒井、灘吉、足立、境界要素法論文集, **18**, (2001), 39-42.