

# 共振・反共振周波数変化を利用した2段階はく離同定法の開発\*

稲田 貴臣<sup>\*1</sup>, 島村 佳伸<sup>\*2</sup>  
轟 章<sup>\*2</sup>, 小林 英男<sup>\*2</sup>

## Development of a Two-step Delamination Identification Method Using Resonant and Anti-Resonant Frequency Changes

Takaomi INADA<sup>\*3</sup>, Yoshinobu SHIMAMURA,  
Akira TODOROKI and Hideo KOBAYASHI

<sup>\*3</sup>Department of Mechanical Sciences and Engineering, Tokyo Institute of Technology  
2-12-1 O-okayama, Meguro-ku, Tokyo 152-8552, Japan

Delamination identification is very important for structural health monitoring of composite laminated structures. In the present study, a two-step delamination identification method using resonant and anti-resonant frequency changes is proposed. The present method can identify the location of delamination and the size nondestructively. As a preparation for delamination identification of a CFRP laminated beam, the beam is divided into two domains. At the first step, the delaminated domain is identified using the anti-resonant frequency changes. At the second step, the delamination location and the size are identified in the delaminated domain using the resonant frequency changes. Delamination identifications of CFRP cantilever beams are conducted using both FEM analysis data and experimental data. As a result, effectiveness of the present method is shown.

*Key Words* : Composite Material, Laminated Construction, Delamination,  
Delamination Identification, Resonant frequency, Anti-Resonant Frequency

### 1 緒 言

CFRPをはじめとする繊維強化プラスチックは金属等の従来材料と比較して比強度・比剛性の面で優れており、航空宇宙分野をはじめとする大型構造への適用が拡大している。しかし、積層構造では層間強度が低いいため、外部からの衝撃や疲労による層間はく離の形成が問題となる。一般に層間はく離は目視困難で構造の圧縮強度・剛性を大きく低下させるため、非破壊的にその位置・大きさを同定する必要がある。そこで近年、はく離に伴う構造の振動特性変化を利用したはく離同定法が検討されている<sup>(1)-(10)</sup>。なかでも、固有振動数（共振周波数）は安価な装置で容易に測定可能であるため、はく離同定用パラメータとして有望視されている<sup>(1),(6)-(9)</sup>。

FOD (foreign object impact damage) では衝突面積に比して大きなはく離がハット型に発生し、曲げ剛性低下に起因する共振周波数低下が生じる。はく離に

よる曲げ剛性低下は、ハットのつばに相当する部分のはく離の影響が大であることから、はく離に伴う曲げ剛性低下の一次近似モデルとしては単一はく離モデルが妥当であり<sup>(9)</sup>、著者らはこれまでに単一方向貫通はく離を有するCFRP積層梁を対象として、実機でも測定が容易と推測される1~3次の曲げモードの共振周波数変化を利用したはく離同定法を検討してきた。はく離の大きさ一定におけるはく離位置に関する各モードの共振周波数変化（低下）はそれぞれのモードせん断力分布に従い、非対称構造である片持ち梁においても共振周波数変化は対称性を有しており、共振周波数変化のみによるはく離位置同定は困難である<sup>(8),(9)</sup>。片持ち梁では一對の共振周波数変化対称領域が存在するが、あらかじめはく離がどちらの領域に存在するかを判定可能ならば、共振周波数変化からはく離位置を同定することも可能である。そこで著者らはFEM解析データに基づき反共振周波数変化を利用したはく離領域判定法を考案し、両端固定梁、片持ち梁を対象とした検討においてその有効性を明らかにした<sup>(10)</sup>。ただし、簡便のためにはく離の大きさを一定としており、実機への適用性検証のためにははく離の大きさを変化させた場

\*原稿受付 2001年11月22日。

<sup>\*1</sup>正員, 東京工業大学大学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)。

<sup>\*2</sup>正員, 東京工業大学大学院理工学研究所  
E-mail: tinada@ginza.mestitech.ac.jp

合、データに測定誤差等が含まれる場合についての検討も必要である。また、共振周波数変化と組み合わせはく離同定を行うためのはく離領域判定基準の構築、同定アルゴリズムの検討も必要である。

本稿では単一方向貫通はく離を有する CFRP 積層梁を対象として、はく離発生に伴う共振・反共振周波数変化を利用した2段階はく離同定法を考案し、その有効性を検証する。本手法では共振周波数変化の対称軸を境界として梁を2つの領域に分割し、第1段階において健全状態からの反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定し、第2段階において共振周波数変化を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する。FEM 解析データを利用してはく離の大きさと同定精度の関係を検討するとともに、実測データを利用して測定誤差を含むデータに対する本手法の有効性を検証した。

## 2 共振周波数変化の対称性と領域分割

**2.1 共振周波数変化の対称性** 本研究では単一の幅方向貫通はく離を有する CFRP 積層片持ち梁を対象とする(図1参照)。積層構成は $[0_2/90_2]_s$ で片側090層間にはく離が存在する場合を想定した。梁の全長 $L$ 、幅 $b$ 、板厚 $h$ はそれぞれ200mm、19mm、1.45mmとした。また、梁の固定端からはく離中央までの距離をはく離位置 $l$ 、梁長手方向のはく離の大きさを $a$ で定義する。便宜上、はく離の位置と大きさはそれぞれ梁の全長で正規化した値 $l/L$ 、 $a/L$ で表現する。

FEM 解析で計算した、はく離の大きさ一定( $a/L=0.1$ )における各モードの共振周波数とはく離位置の関係を図2に示す。図2において縦軸は健全時の値でそれぞれ正規化した梁の共振周波数(固有振動数)であり、横軸は梁の全長で正規化したはく離位置( $l/L$ )である。はく離の大きさ一定の場合、はく離に伴う各モードの共振周波数低下量はそれぞれのモードせん断力分布に従う<sup>9)</sup>。そのため、図中のハッチング領域を中心に2次、3次モードの共振周波数変化は、はく離位置が梁中央と一致する $l/L=0.5$ に関してほぼ対

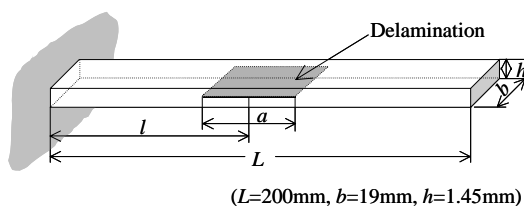


Fig.1 CFRP cantilever beam with delamination  
(laminate configuration:  $[0_2/90_2]_s$ )

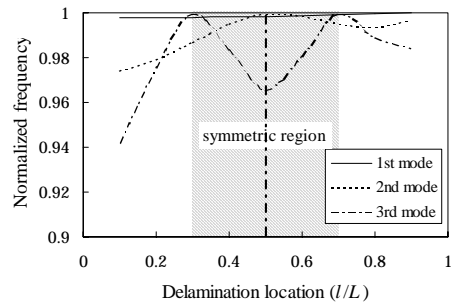


Fig.2 Resonant frequency changes as a function of delamination location (size=0.1)

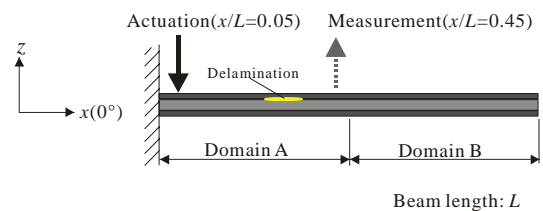


Fig.3 Definition of the domain  
(Domain A:  $0 < x/L < 0.5$ , Domain B:  $0.5 \leq x/L < 1$ )

称となり、共振周波数変化のみによるはく離位置同定は困難である<sup>8),9)</sup>。

**2.2 領域分割と加振点・応答点の位置** 前述のようにはく離位置に関する共振周波数変化が図2のような対称性を有する構造では、1~3次モードの共振周波数変化を利用したはく離位置同定は困難である。しかし、あらかじめはく離がどの領域に存在するかを判定可能であれば、共振周波数変化を利用したはく離位置同定も可能である。本研究では図3に示すように共振周波数変化の対称軸である梁中央を境界として梁を2つの領域A、Bに分割し、反共振周波数変化を利用してはく離が存在する領域(はく離領域)を判定する。

任意の加振点-応答点間のはく離発生は、健全状態からの反共振周波数変化に基づき判定可能である<sup>10)</sup>。図3のように片持ち梁の中央で領域を分割する場合には、加振点を梁の固定端近傍、応答点を領域境界(梁中央)として求めた周波数応答の反共振周波数変化を利用することで、はく離領域を判定可能である。しかし、梁中央( $x/L=0.5$ )は3次モードの節に近く、3次共振点とそれに隣接する反共振点の特定が困難であるため、本研究では加振点を $x/L=0.05$ 、応答点を $x/L=0.45$ としてはく離領域を判定する。領域境界からの応答点のオフセット量は梁の全長の5%であり、はく離同定結

果に対する応答点のオフセットの影響は実用上問題ない程度である。

### 3 2段階はく離同定法

本研究では、はく離位置に関する共振周波数変化の対称性を有する構造に対しても有効なはく離同定法として、第1段階において健全状態からの反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定し、第2段階において共振周波数変化を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する2段階同定法を提案する。

**3.1 有限要素モデル** 本研究では汎用有限要素法ソフト ANSYS Rev.5.6 を使用し、はく離に伴う共振・反共振周波数変化を求めた。はく離に伴う反共振周波数変化を調べるための周波数応答解析に使用した有限要素モデルの例を図 4(a)に示す。図 1 と同様に、積層構成は $[0_2/90_2]_s$  で片側の  $0/90$  層間に単一の幅方向貫通はく離が存在する場合を想定した。また、梁の寸法も図 1 と同一とした。部分的にはく離を有する梁を模擬するため、積層シェル要素 (shell99) を用いて積層構成が $[0_2/90_4]$ と $[0_2]$ の2つの梁を作成し、積層構成が $[0_2/90_2]_s$  となるようにこれらを重ね合わせる。このとき、Shell99 の節点オフセット機能を利用して、上下の梁の節点を2つの梁の境界面に配置する。上下の梁の要素分割は同一 ( $x$  方向を40分割,  $y$  方向を2分割) であり、上下の梁の節点は重なり合うことから、はく離部近傍を梁端部からみた場合の模式図である図 4(b)に印で示すように、健全部分では上下の梁が完全に一体で振動

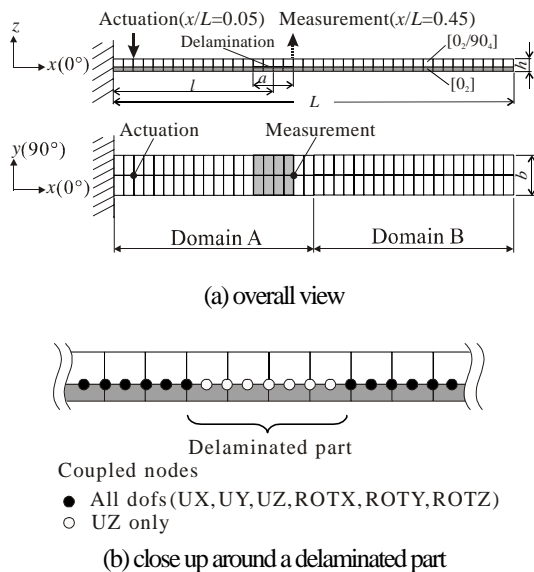


Fig.4 FE model of a CFRP cantilever beam with delamination ( $[0_2/90_2]_s$ )

Table 1 Material properties of unidirectional CFRP lamina

Longitudinal modulus $E_1$	91.5 GPa
Transverse modulus $E_2 (=E_3)$	8.5 GPa
Longitudinal shear modulus $G_{12} (=G_{13})$	4.3 GPa
Transverse shear modulus $G_{23}$	3.15 GPa
Major Poisson's ration $\nu_{12} (= \nu_{13})$	0.31
Transverse Poisson's ratio $\nu_{23}$	0.35
Density $\rho$	1466 kg/m <sup>3</sup>

するように節点の各自由度をそれぞれカップリング (同じ値となるように拘束) する。ここで、UX, UY, UZ はそれぞれ  $x, y, z$  方向の並進自由度であり、ROTX, ROTY, ROTZ は回転自由度である。これに対して、図 4(b)に印で示すように、はく離部では上下の梁が同位相で振動するように UZ のみをカップリングすることではく離を模擬した。図 4 に示す有限要素モデルの総要素数は 160, 総節点数は 650 である。解析で使用した一方向 CFRP ラミナ の材料定数を表 1 に示す。本研究では  $x/L=0.05$  の位置を加振点として周波数応答解析を実施し、 $x/L=0.45$  の位置で測定される変位の周波数応答を利用してはく離領域判定を行う。

例として、図 4 の位置 0.4, 大きさ 0.1 のはく離を有する梁の変位周波数応答を健全な場合と比較した結果を図 5 に示す。図 5 において縦軸は変位 (dB), 横軸は周波数 (Hz) であり、健全な場合を実線、はく離がある場合を破線で示した。図 5 に示す各周波数応答の峰が共振点、溝が反共振点であり、第1段階において反共振点の移動量 (反共振周波数変化) を利用してはく離領域を判定し、第2段階において共振点の移動量 (共振周波数変化) を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する。

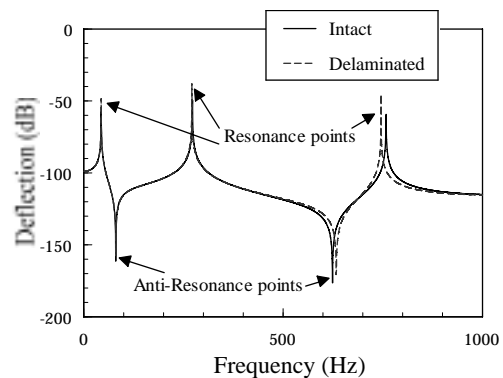


Fig.5 Displacement frequency response change caused by delamination ( $a/L=0.1, l/L=0.4$ )

**3.2 共振周波数変化応答曲面** 第2段階において共振周波数変化を利用してはく離の位置・大きさを同定する際に本研究では誤差最小法を利用する<sup>(8),(11)</sup>。誤差最小法は測定した共振周波数と解析値との誤差が最小となるようにはく離の位置・大きさを同定する方法であり、A、Bの各領域においてあらかじめはく離の位置、大きさを説明変数とした各モードの共振周波数変化の近似関数が必要となる。本研究では多項式応答曲面を使用する<sup>(12)</sup>。

応答曲面作成に使用したデータは図4の解析モデルよりも梁長手方向をさらに細かく分割(50分割)した有限要素モデルで作成した。はく離の大きさについて0.04, 0.06, ..., 0.16の7通り、はく離位置について0.1, 0.2, ..., 0.9の9通りの合計63通りのはく離梁のモーダル解析を実施して共振周波数を求めた。本研究では領域Aの共振周波数変化の応答曲面を1次モードから順に $\Omega_{1A}(x_1, x_2)$ ,  $\Omega_{2A}(x_1, x_2)$ ,  $\Omega_{3A}(x_1, x_2)$ , 領域Bの共振周波数変化の応答曲面を同様に $\Omega_{1B}(x_1, x_2)$ ,  $\Omega_{2B}(x_1, x_2)$ ,  $\Omega_{3B}(x_1, x_2)$ で表現する。ここで、 $x_1, x_2$ はそれぞれ梁の全長で正規化したはく離位置( $l/L$ )、大きさ( $a/L$ )であり、共振周波数は健全状態での値を利用して各モードとも最大値が1となるように正規化した。なお、境界上のデータ( $x_1=l/L=0.5$ )はいずれの領域の応答曲面にも含むようにした。領域A、Bともに1次モードの応答曲面には3次多項式、2次モードの応答曲面には4次多項式、3次モードの応答曲面には5次多項式を用いており、近似精度の指標となる自由度調整済み決定係数の値は全て0.99以上と高い。

**3.3 同定手順** はく離同定の流れを図6に示す。

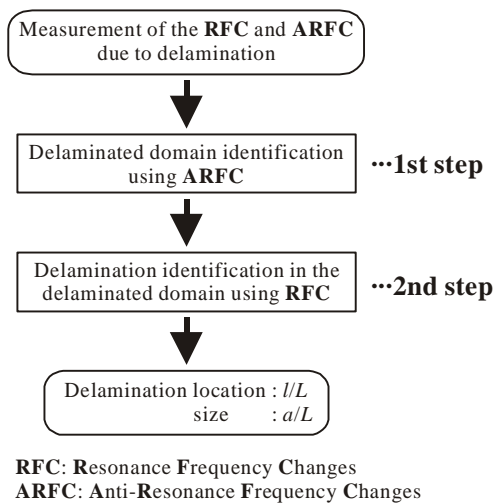


Fig.6 Flow of a two-step delamination identification method

本手法では健全状態からの共振・反共振周波数変化を求め、第1段階において反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定し、第2段階において共振周波数変化を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する。

**3.3.1 はく離領域の判定(第1段階)** はく離発生と推測されるCFRP積層片持ち梁の周波数応答を測定し、第1段階において健全状態からの反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定する。ただし、任意の1つの反共振点ではく離の影響を受けにくい場合もあるため、はく離領域判定には複数の反共振点の周波数変化を利用する<sup>(10)</sup>。

本研究では次式で定義されるパラメータ  $D$  を用いてはく離領域を判定する。

$$D_{ij} = \frac{\Delta f_{Anti,ij}}{|\Delta f_{R,i}| + |\Delta f_{R,j}|} \times 100 \quad (i \geq 1, j = i + 1) \quad (1)$$

式(1)において、 $\Delta f_{R,i}, \Delta f_{R,j}$ はそれぞれ健全な場合に対する  $i$  次、 $j$  次共振点の周波数変化量 (Hz) であり、 $\Delta f_{Anti,ij}$  は  $i$  次と  $j$  次共振点間に存在する反共振点の周波数変化量 (Hz) である。

はく離領域とパラメータ  $D$  の関係の模式図を図7に示す。はく離が領域Aに存在するCaseIでは、反共振周波数は健全状態と比べて微小ながら上昇または低下するため、 $D$  は絶対値が小さい正または負の値となる。また、はく離が領域Aに存在し、かつ、はく離右端部が領域の境界(応答点)付近に位置するCaseIIでは、健全状態と比べて反共振周波数が大幅に上昇し、 $D$  は絶対値が大きい正の値をとる。一方、はく離が領域Bに存在するCaseIIIでは、健全状態と比べて反共振周波数は大幅に低下し、 $D$  は絶対値が大きい負の値をとる。複数のパラメータ  $D_{ij}$  を用いてはく離領域判定を行う場合には、解析結果に基づき図7中に破線で示したように任意のしきい値  $S$  (負の実数) を設定し、

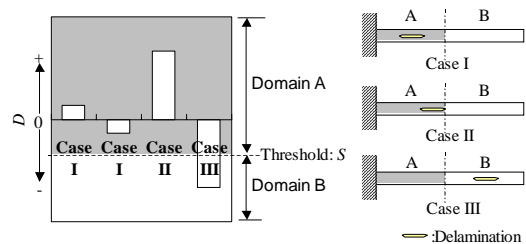


Fig.7 Delaminated domain identification based on parameter  $D$  (Example)

全ての  $D_{ij} \geq S$  ならば領域 A, 少なくとも1つの  $D_{ij} < S$  ならば領域 B をはく離領域と判定する.

### 3.3.2 はく離位置・大きさの同定 (第2段階)

第1段階において反共振周波数変化 (パラメータ  $D$ ) を利用してはく離領域を判定した後, 第2段階において共振周波数変化を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する. 本研究では共振周波数の測定値と解析値との誤差を最小とする誤差最小法ではく離を同定する<sup>(8),(11)</sup>.

測定した梁の共振周波数 ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ) と前述の共振周波数変化の応答曲面から次に示す評価関数  $F$  を作成する<sup>(8)</sup>.

$$F = \sum_{i=1}^3 \left\{ \omega_i - \Omega_{i, Domain}(x_1, x_2) \right\}^2 \quad (2)$$

ここで,  $Domain$  ははく離領域名 (A または B) である. 式(2)は測定された各モードの共振周波数と共振周波数変化応答曲面の二乗誤差の総和を表しており, この評価関数  $F$  を最小化することではく離の位置 ( $x_1$ ), 大きさ ( $x_2$ ) を同定可能である. 評価関数の最小化には Microsoft Excel 2000 のソルバー機能を利用し, 10種類の初期値を与えて収束計算を実施後, 最小となるものを正解として選択する.

## 4 FEM 解析データに基づく同定結果と考察

本手法の有効性 (同定性能) 検証を目的として, 測定誤差を含まない FEM 解析で求めたはく離に伴う CFRP 積層片持ち梁の共振・反共振周波数変化データからはく離同定を実施し, はく離の大きさと同定精度の関係を検討する. 具体的には, はく離の大きさが  $a/L=0.05, 0.1, 0.15$  の3通り, はく離位置が  $l/L=0.1, 0.2, \dots, 0.9$  の9通りの合計  $3 \times 9=27$  通りのはく離について検討した.

**4.1 はく離領域判定結果** 反共振周波数変化を利用したはく離領域判定の例として,  $a/L=0.05$

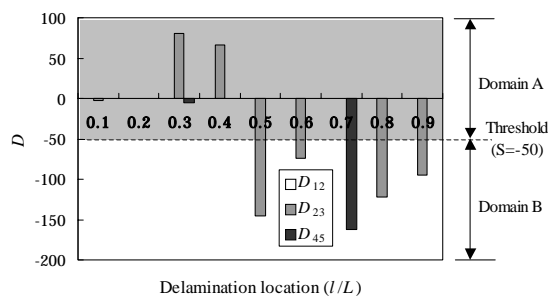


Fig.8 Delaminated domain identification results based on parameter  $D$  (Analysis,  $a/L=0.05$ )

の場合について横軸にはく離位置 ( $l/L$ ) をとり  $D$  値を比較した結果を図 8 に示す. 図 8 において,  $D_{12}, D_{23}, D_{45}$  はそれぞれ 1-2 次共振点間, 2-3 次共振点間, 4-5 次共振点間に存在した反共振点の周波数変化量に相当する. なお,  $D_{45}$  は  $l/L=0.3$  と  $l/L=0.7$  の場合についてのみ計算した.

図 8 において, はく離の大きさが  $a/L=0.05$  と小さいために 1 次, 2 次モードの共振周波数変化は小さく, その 2 つの共振点の間に存在する反共振点の周波数変化もほとんどないため,  $D_{12}$  ははく離位置 (はく離領域) に関係なくほとんどゼロとなる.  $D_{23}$  ははく離が領域 A に存在する場合, すなわち,  $l/L=0.1, 0.2$  の場合にはゼロとなり,  $l/L=0.3, 0.4$  の場合には大きな正の値を示すことが確認できる. 一方, はく離が領域 B に存在する場合, すなわち,  $l/L \geq 0.5$  の場合には,  $l/L=0.7$  の場合を除き  $D_{23}$  は大きな負の値を示すことが確認できる.  $l/L=0.7$  の場合には, 2 次, 3 次モードの共振周波数低下量が小さく, 2-3 次共振点間の反共振周波数もほとんど変化が見られないために  $D_{23}$  はほぼゼロとなる. しかし, このような場合にも  $l/L=0.7$  と  $l/L=0.3$  の結果を比較すると明らかなように, さらに高次モード (高周波数) 側の反共振周波数変化を表す  $D_{45}$  を利用することではく離領域を正しく判定可能である. 本稿で対象とする片持ち梁では, 領域 A にはく離が存在する Case1 (3.3.1 節参照) における任意の反共振点の周波数は, 隣接する 2 つの共振点の周波数変化量の平均程度は低下する場合があると考え, 式(1)より領域判定のしきい値  $S=-50$  とした.  $S=-50$  とすることで, はく離の大きさが 0.1, 0.15 の場合についても同様にはく離領域を正しく判定可能であった.

**4.2 はく離位置・大きさの同定結果** 27 通りの解析データそれぞれについて, 反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定後, 共振周波数変化を利用してはく離の位置・大きさを同定した. はく離位置の同定結果を図 9 に, はく離の大きさの同定結果を図 10 に示す. それぞれの図において, 縦軸は同定した値, 横軸は実際の値であり, 対角に引かれた実線は正しい同定を意味する. はく離位置同定結果である図 9 では, はく離の大きさが 0.05 の場合を  $\times$  印, 0.1 の場合を  $\square$  印, 0.15 の場合を  $\triangle$  印で示した.

図 9 より, はく離の大きさが 0.05 の場合を除き, はく離位置は高精度で同定可能である. はく離の大きさが 0.05 の場合には, 図 8 に示したように反共振周波数変化からはく離領域の判定は可能であるが, 相対的に低下量の大きい 3 次モードの共振周波数で

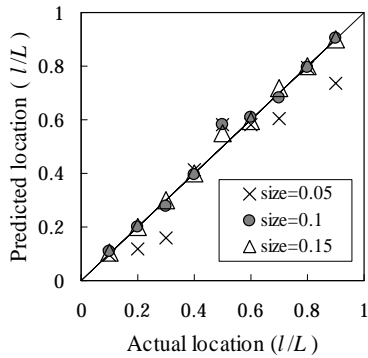


Fig.9 Identification results of delamination locations (Analysis)

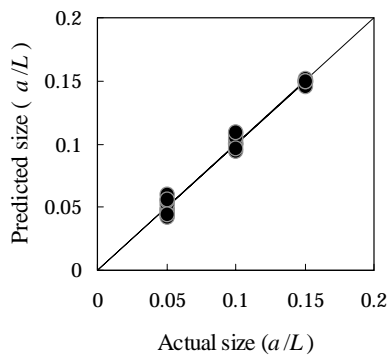


Fig.10 Identification results of delamination sizes (Analysis)

さえも最大低下量は 0.8%と微小であるため、位置の同定誤差が大きい。一方、図 10 に示すようにはく離の大きさについては比較的高精度で同定できており、はく離が大きくなるにつれて同定誤差は小さくなる。

はく離の位置・大きさの同定誤差の計算結果を表 2 に示す。ただし、同定誤差の計算には次式を用いた。

$$Error(\%) = \frac{|X_{Identified} - X_{Actual}|}{L} \times 100 \quad (X: l/L \text{ or } a/L) \quad (3)$$

ここで、 $X_{Identified}$  は同定値、 $X_{Actual}$  は正解を意味する。表 2 より、はく離の大きさが  $a/L=0.05$  の場合の位置同定誤差も 6.7%と実用上問題ない程度であることがわかる。

以上より、共振・反共振周波数に測定誤差が含まれない FEM 解析データを用いた場合には、はく離の大きさが  $a/L=0.05$  と小さい場合にもはく離の位置・大きさともに実用上十分な精度で同定可能である。また、はく離が大きくなるにつれてはく離の位置・大きさと

Table 2 Delamination identification errors

Actual size ( $a/L$ )	Error (%)	
	Location	Size
0.05	6.7	0.5
0.1	1.8	0.4
0.15	0.9	0.1

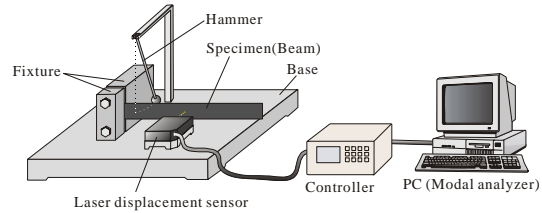


Fig.11 Experimental setup of vibration test

もに同定精度は向上する。これは、はく離が大きいほど共振周波数低下が明確になるためである。

### 5 実測データに基づく同定結果と考察

測定誤差を含む共振・反共振周波数に対するはく離同定性能の検証を目的として、実測した共振・反共振周波数変化のデータについてははく離同定を試みる。

**5.1 試験方法** 共振・反共振周波数を測定する周波数応答測定試験の概要を図 11 に示す。治具に固定した状態での梁の寸法、積層構成等は解析データを用いた場合と同一である。梁の全長を  $L$  とすると、解析と同様に  $x/L=0.05$  の位置を加振し、 $x/L=0.45$  の位置での応答変位をレーザー変位計で測定し、パソコン上で FFT 処理を実施して周波数応答を求めた。なお、測定した周波数応答の周波数分解能は約 1.2Hz である。

試験ではまず、健全状態での梁の周波数応答を測定後、試験片を治具に固定した状態で 3 点曲げにてはく離を作成し、はく離後の梁の周波数応答を測定した。測定時のノイズ軽減を目的として周波数応答の測定は健全状態、はく離後ともに 8 回ずつ実施してそれぞれ平均を求め、平均化処理後の両者を比較してはく離に伴う共振・反共振周波数変化を求めた。ただし、はく離の大きさは  $a/L=0.1$  の 1 種類のみとし、はく離の位置を 0.1~0.9 の範囲で約 0.1 ごとに变化させた 9 本のはく離試験片を用意し、解析データを用いた場合と同様に反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定後、共

振周波数変化を利用してはく離の位置・大きさを同定した。

**5.2 はく離領域判定結果** 実測したはく離に伴う周波数応答変化に基づき  $D$  値を計算し、横軸をはく離位置 ( $l/L$ ) として比較した結果を図 12 に示す。図 12 において  $D_{12}$ ,  $D_{23}$  はそれぞれ 1-2 次共振点間, 2-3 次共振点間に存在した反共振点の移動量に相当する。得られた  $D$  の絶対値は解析データを用いた場合よりも比較的大きい傾向にあるが、解析と同様にしきい値  $S=50$  とすることではく離領域を正しく判定可能であった。

**5.3 はく離位置・大きさの同定結果** はく離位置同定結果を図 13 に示す。ここで、はく離同定の際に使用した評価関数は 4 節で使用したものと同一であり、解析データから作成した共振周波数変化応答曲面を使用している。図 13 において縦軸は同定した値、横軸は実際の値であり、実測データに基づく同定結果を印、比較のための FEM 解析データに基づく同定結果 ( $a/L=0.1$ ) を印で示した。FEM 解析データについて同定した場合と比べて誤差の大きい点がいくつか見受けられるが、実

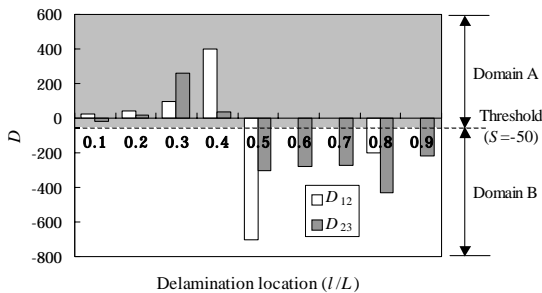


Fig.12 Delaminated domain identification results based on parameter  $D$  (Experiment,  $a/L=0.1$ )

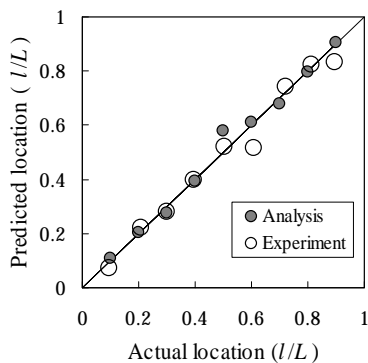


Fig.13 Identification results of delamination locations (Experiment,  $a/L=0.1$ )

測データについても実用上十分な精度で同定可能である。はく離の大きさについては、解析データを用いた場合に比べて式(3)で計算される平均同定誤差は約 3 倍の 1.3%と大きい実用上問題ない程度であった。解析データから作成した応答曲面を利用しているにもかかわらず実用上十分な精度で同定可能であるのは、共振周波数変化の応答曲面自体が最小二乗法による近似関数であり、誤差を含んだ状態にあるためと推測される。

以上より、測定誤差を含む実測データを用いた場合にも、実用上十分な精度ではく離の位置と大きさを同定可能であることが明らかとなった。

## 6 結 言

第 1 段階において反共振周波数変化を利用してはく離領域を判定し、第 2 段階において共振周波数変化を利用してはく離領域内ではく離の位置・大きさを同定する 2 段階同定法を考案した。そして、CFRP 積層片持ち梁のはく離同定に本手法を適用し、解析・実験の両面からその有効性を検証した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 測定誤差を含まない FEM 解析データを用いたはく離同定の結果、梁の全長の 5%程度のはく離についても位置・大きさともに実用上十分な精度で同定可能であることが明らかとなった。また、はく離が大きいくらいはく離に伴う共振周波数低下が明確となり、位置・大きさともに同定精度は向上する。
- (2) 測定誤差を含む実測データを用いたはく離同定の結果、解析データから作成した応答曲面を利用した評価関数を用いた場合にも、実用上十分な精度ではく離の位置・大きさを同定可能であることが明らかとなった。

謝辞：本研究は平成 13 年度科学研究費補助金（特別研究員奨励費，自己励振スマート複合材料によるヘルスマニタリング）の一部によるものである。

## 参考文献

- (1) 邊，西，黄，藤川，機論 A，62，602(1996)，2338-2343
- (2) 邊，山口，福田，青木，K. C. Park，機論 A，66，644(2000)，721-726
- (3) 金原，影山，鈴木，大沢，伊出，材料，43，487(1994)，476-481

- (4) F. Lalonde, Z. Chaudhry, F. P. Sun and G. A. Rogers, *J. Intelligent Material Systems and Structures*, 7(1996), 176-181
  - (5) 荻, 福永, 亀山, 日本複合材料学会誌, 26, 6(2000), 236-242
  - (6) Abu S Islam and K. C. Craig, *Smart Mater. Struct.* 3(1994), 318-328
  - (7) A Chukwujekwu Okafor, K Chandrashekhara and Y P Jiang, *Smart Mater. Struct.* 5, (1996), pp.338-347
  - (8) 稲田, 島村, 轟, 小林, 中村, 機論 A, 65, 632(1999), 776-782
  - (9) 稲田, 島村, 轟, 小林, 日本複合材料学会誌, 27, 6(2001), 264-270
  - (10) 稲田, 島村, 轟, 小林, 機論 A, 67, 664(2001), 1929-1935
  - (11) J. Lee, R. T. Haftka, O. H. Griffin, Jr., L. T. Watson and M. D. Sensmeier, *Structural Optimization* 8, (1994), pp.93-100
  - (12) R.H. Myers and D. C. Montgomery, "Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments", John & Sons. Inc., (1995)
-