

卒業論文

**応答曲面法を用いた CFRP 積層平板の
衝撃モニタリング**

1 P ~ 5 2 P 完

平成 1 7 年 2 月 4 日提出

指導教官 酒井 信介 教授

3 0 2 2 0 松下 竜大

目次

第1章	序論	4
1.1	研究背景	5
1.2	研究の目的	5
1.3	本論文の構成	6
第2章	基礎理論	7
2.1	応答曲面	8
2.1.1	緒言	8
2.1.2	2変数の多項式	8
2.2	最小二乗法による回帰曲面	9
2.2.1	最小二乗法 (Least Squares Method)	9
2.2.2	マトリックス表現	12
2.2.3	回帰モデルの検定と最適回帰モデル	13
2.2.4	変数変換	15
第3章	複合材料	16
3.1	複合材料	17
3.1.1	定義	17
3.1.2	種類	17
3.2	CFRP	18
3.2.1	誕生	18
3.2.2	実用例の推移	18
3.3	キーワード	21
3.4	従来の複合材料の損傷検査法	23
3.4.1	X線	23
3.4.2	超音波	23
第4章	応答曲面法を用いたCFRP積層平板損傷同定	25
4.1	目的	26
4.2	加速度センサを用いた衝撃エネルギー同定	26
4.2.1	実験方法	26
4.2.1.1	原理	26
4.2.1.2	試験装置	26
4.2.1.3	試験片	29
4.2.1.4	試験手順	30
4.2.2	出力の処理方法	32

4.2.2.1	波形の到達遅延時間	32
4.2.2.2	変動和	33
4.2.3	応答曲面法を用いた衝撃同定.....	35
4.2.4	同定結果	37
4.2.4.1	衝撃位置同定	39
4.2.4.2	衝撃エネルギー同定	37
4.3	AEセンサを用いた衝撃位置同定.....	43
4.3.1	実験方法	43
4.3.2	同定手法	43
4.3.3	同定結果	45
第5章	結論	48
5.1	結論	49
あとがき	51
謝辞	51

第1章 序論

1.1 研究背景

これまで工業製品は主として木材や金属材料によって作られてきたが、近年それらが誕生したころには予測不能であった利用場所や利用法が出現している。また、例えば航空分野などで、金属材料と同等の強度を持ちながらも軽量化できる材料への期待が高まっている。このため、金属材料の性質以上の優れた性質や特異な性質を持つ材料として、複数の素材にて作られた複合材料が誕生した。今回の研究で使用した複合材料は CFRP 積層平板といわれるもので、炭素繊維と熱硬化性樹脂とを組み合わせで作られた材料であり、軽量かつ高剛性な特性を持つものとして広く知られているものである。

複合材料は、主に繊維と樹脂から構成される繊維方向に異方性のあるプリプレグといわれるシートを、その異方性を考慮して複数枚、熱と圧力によって積層成形されたものである。(詳しくは3章参照)

一般に複合材料は、外界からの大きな衝撃が加わると、層内に目視困難な層間はく離が発生することがわかっており、現在その層間はく離の位置や大きさ等の診断法が確立されていないという大きな問題がある。近年、航空分野等で幅広く利用され始めているため、その衝撃により発生する層間はく離の診断手法の確立は急務である。

1.2 研究の目的

複合材料の層間はく離の診断法には X 線、超音波、電気導電率¹⁾ などさまざま利用されている。

X 線や超音波を利用する損傷診断手法は、精度の高い詳細な損傷同定を行うことができ、非常に有効であるが、スキャン範囲が非常に狭い。たとえば航空機構造等の損傷同定を行う場合構造物全体を走査するため、大規模な構造の場合には高いコストと時間がかかってしまう。また、検査する際は構造物の稼動中は不可能という難点もある。

電気導電率を利用する診断手法は、X 線や超音波を利用する場合に比べ、電気導電率の違いをセンサで計測、診断する手法であり、X 線や超音波で損傷診断する場合に比べ、大きな構造物での利用は有意であるが、実際に稼動中の構造物に対して損傷の診断を行う場合、例えば航空機の診断では燃料タンクのある翼に電気を流すことでの引火、爆発の危険性があるなど、稼動中の構造物での診断には問題がある。

複合材料の診断手法は大きく 2 つに分けられる。1 つはすべての場所を走査し、状態を観測する直接診断手法で、あと 1 つは、センサを利用し、構造物内を伝播してきたものを計測し診断する間接診断手法である。前者の手法は先ほどの X 線、超音波にあたり、有効だがコストがかかる。それに比べ後者の手法は計測機器を工業物製造段階で取り付けてしまえば、容易に調査でき、低コストによって損傷評価ができるが、複合材料には面内の伝播速度や弾性率に大きな異方性があり、センサを利用した間接的に損傷を低コストで評価す

る有効な手法の確立がいまだにされていない。電気抵抗変化法はこれにあたる。

そこで本研究では後者の手法として、低コストな複合材料の損傷の位置と程度の診断手法として、損傷を引き起こす衝撃により発生した振動を利用した新たな損傷診断手法の開発とする。

1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第1章 序論では、研究の背景を概説し、本研究の目的を述べる

第2章 基礎理論では、応答曲面法の基礎理論を述べる

第3章 複合材料では、複合材料や今回使用した CFRP 積層平板の特性、利用範囲、従来の複合材料の損傷検査法について述べる

第4章 応答曲面法を用いた CFRP 積層平板損傷同定では、実際に今回の研究で行った実験手法、それによる同定結果、考察を述べる

第5章 結論では、本研究で得られた結論を示す

第2章 基礎理論

本章では応答曲面法の基礎理論について説明する

2.1 応答曲面

2.1.1 緒言

応答曲面 (Response Surface)²⁾ とは、 n 個 ($n > 1$) の予測変数 (Predictor variables) x_i ($i=1\dots n$) から予測される応答 (Response) y の関係式をさまざまな関数で近似したものである。

$$y = f(x_1 \cdots x_n) + \varepsilon \quad (2.1)$$

ここで、 f は関数、 ε は誤差(error)と呼ばれる。応答曲面法において、関数の形に特に制限はない。応答曲面法は、製品プロセスの最適化やばらつきの減少などの品質工学の分野において特にアメリカで実用化されている手法である。

まず、上記のようにある近似式を作り、それぞれの項の係数を仮定する。そして複数の実験を行い、最小 2 乗法でその近似式の未知係数の推定を実施すれば、求めたい応答である y の近似式が得られる。

先にも述べたように、応答曲面法においては近似関数の形状は固定されていないため、一般の品質工学分野では取り扱いが簡単である多項式が多く用いられるが、変数変換を行うことで線形化可能な非線形関数も多く用いられ、例えば、指数関数、べき乗関数、有理関数、対数関数、ロジスティック関数などがあげられる。また、非線形回帰の手法により、一般的な有理関数やニューラルネットワークなども応答曲面に適用できる。ただし、非線形回帰では一般的に有効な実験計画法が無く、また統計的評価も一般に困難であるため、線形関数を用いる際の有力なツールが使用できないという欠点もある。

以下では 2 変数の多項式、ロジスティック曲線、ニューラルネットワークを例に、その関数形の例を図示する。

2.1.2 2 変数の多項式

2 変数 x_1 、 x_2 の多項式の一般形は次式で表される。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (2.2)$$

$\beta_3 \sim \beta_5$ が全て 0 の時には式 (2.2) は単なる平面となり、ここでは省略する。 $x_1 x_2$ の項は交互作用項 (interaction term) と呼ばれている。簡単な例として、 β_3 と β_4 が 0 の場合の一例を図 2.1 に示す。

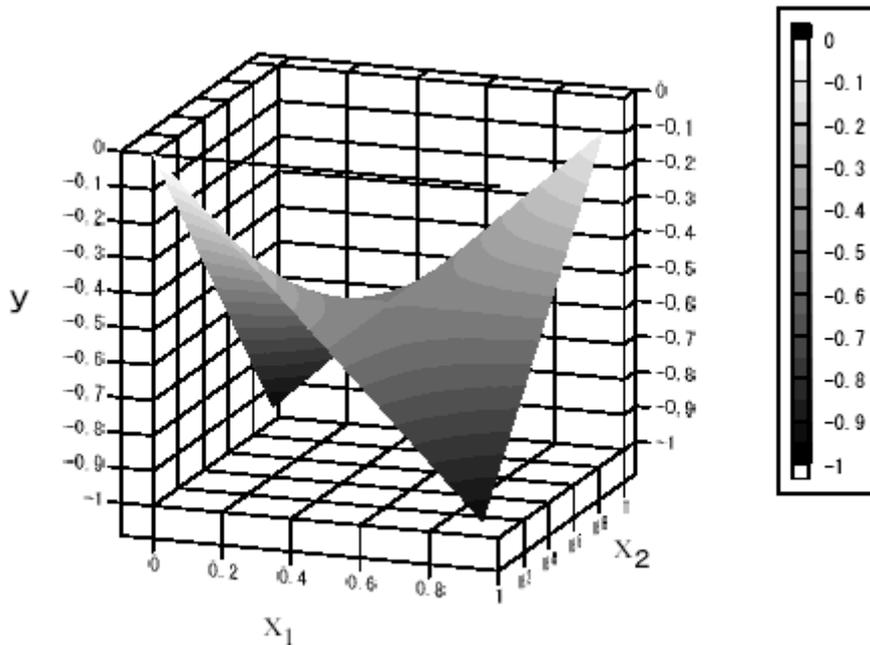


図 2 . 1 交互作用を持つ曲面の例

図 2 . 1 は 4 点 $(x_1, x_2, y) = (0, 0, 0), (1, 1, 0), (0, 1, 1), (1, 0, 1)$ を通る曲面で、次式で表される。

$$y = -x_1 - x_2 + 2x_1x_2 \quad (2.3)$$

2 次多項式 (Quadratic polynomials) の場合には、他に、丘型、円筒型、鞍型などのさらに複雑な曲面を描くことが可能となる。

2.2 最小二乗法による回帰曲面

応答曲面法は関数形状に関係無く、近似関数を求めて最適化に使用する方法であり、その中でも線形関数または線形化変換可能な関数は最小二乗法を用いることで容易にその関数の係数を統計的に推定することができ、統計の評価も可能である。本項目では、最小二乗法を用いた回帰曲面の作成手法に関する統計的手法を述べる。

2.2.1 最小二乗法 (Least Squares Method)

簡単な例として変数が 1 個 (x) で応答 y を直線で近似する場合を考える。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.4)$$

ここで、 β_0, β_1 は未知係数である。

実験を行い、 n 個のデータの組 $(x_i, y_i) (i=1, \dots, n)$ を取得した。これを式(2.4)の直

線で近似する。

n個のデータを代入して、n個の式が得られる。

$$\begin{aligned}y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_1 + \varepsilon_1 \\y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_2 + \varepsilon_2 \\&\vdots \\y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_n + \varepsilon_n\end{aligned}\tag{2.4}$$

ここで、 ε_i は誤差である。誤差 2 乗和SSE (Square Sum of Errors) は次式で表される。

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i)^2\tag{2.5}$$

SSEは の 2 次関数であり、には区間の制限が無いので、SSEを の関数とみなせば、SSEを最小にする は、 $\frac{\partial SSE}{\partial \beta} = 0$ が必要十分である。

$$\frac{\partial SSE}{\partial \beta_0} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0\tag{2.6}$$

$$\frac{\partial SSE}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n x_i (y_i - \beta_0 - \beta_1 x_i) = 0\tag{2.7}$$

式(2.6)、(2.7)から、次式の連立方程式が得られる。

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n y_i &= n\beta_0 + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i &= \beta_0 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^2\end{aligned}\tag{2.8}$$

式(2.8)から が求められる。

$$\beta_1 = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$\beta_0 = \frac{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \right) - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (2.9)$$

誤差の2乗和の最小化と距離の最小化、最大誤差の最小化のそれぞれの違いについて $y = \beta$ という簡単な直線を例にとって考えてみる。

例として図2.2に示す3点 $(0, 0)$ 、 $(1, 1)$ 、 $(2, 0)$ を通る $y = \beta$ を考える。式(2.8)から、 $\beta = 0$ とすれば $y = \beta$ の場合が得られ、それは単に平均値となる。

$$y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{3} \quad (2.10)$$

$y = \beta$ との誤差(距離)の和Lは次式で表される。

$$L = 2\beta + (1 - \beta) = 1 + \beta \quad 0 \leq \beta \leq 1 \quad (2.11)$$

式(2.11)を最小化する β は明らかに $\beta_L = 0$ となる。

最大誤差は次式で表される。

$$M = \max(\beta, 1 - \beta) \quad (2.12)$$

最大誤差を最小にするには、 $\beta_M = 0.5$ とすればよい。

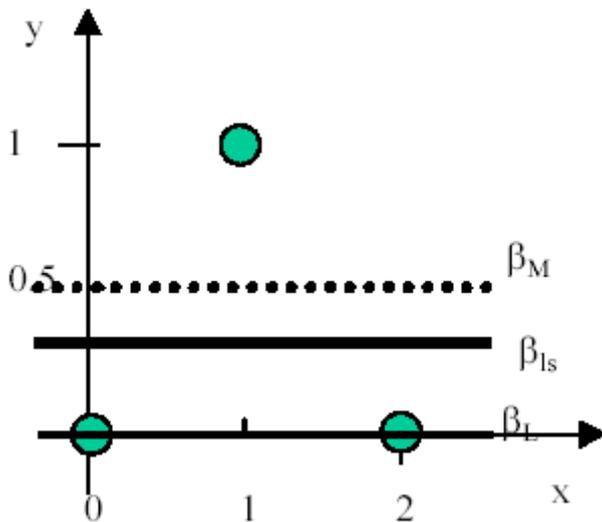


図 2 . 2 $y = \beta$ の近似 (誤差 2 乗和最小、誤差和最小、最大誤差和最小)

図 2 . 2 から明らかに、誤差の和の最小化は多数の類似データに大きく影響を受け、最大誤差最小化は少数の値の異質データの影響を強く受ける。誤差 2 乗和の最小化はちょうどデータの平均となっている。このことから、誤差 2 乗和の最小化が多く用いられている。

2.2.2 マトリックス表現

応答関数として 2 次多項式 (Quadratic Polynomials) を採用した場合、応答曲面は次式となる。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2 . 1 3)$$

簡単化のため、変数が 2 つの場合を例にとると、式 (2 . 1 3) は次式となる。

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 \quad (2 . 1 4)$$

式 (2 . 1 4) において、 $x_1^2 = x_3, x_2^2 = x_4, x_1 x_2 = x_5$ と変数を置き換えることで多変数の 2 次多項式は多変数の 1 次式に変換できる。全く同様に、3 次多項式、4 次多項式などの高次多項式も線形化可能である。

回帰式の係数の推定に用いる実験点の組の総数を n 、変数 (変換後の変数) の数を k とすると線形回帰モデルは行列表示で次式になる。

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (2 . 1 5)$$

$$y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$

$$\beta = \begin{Bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{Bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{Bmatrix}$$

誤差 2 乗和をLとすると次式が得られる。

$$L = \varepsilon^T \varepsilon = (y - X\beta)^T (y - X\beta) = y^T y - 2\beta^T X^T y + \beta^T X^T X\beta \quad (2.16)$$

前項目と同様に、誤差 2 乗和Lを最小にすることから、係数 β の不偏推定量bに関しての最小 2 乗の正規方程式(Least squares normal equations)が求められる。

$$\left. \frac{\partial L}{\partial \beta} \right|_b = -2X^T y + 2X^T Xb = 0 \quad (2.17)$$

式(2.17)から、未知係数 β の最小 2 乗推定量b(Least squares estimations of β) が次式で得られる。

$$b = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (2.18)$$

2.2.3 回帰モデルの検定と最適回帰モデル

SSEは残差 2 乗和、SSRは回帰 2 乗和 (Regression Sum of Squares) であり、次式で定義される。

$$SSE = y^T y - b^T X^T y \quad (2.19)$$

$$SSR = b^T X^T y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n} \quad (2.20)$$

回帰モデルが適切かどうかの判定は一般には決定係数 (Coefficient of multiple determination) を用いる。決定係数 R^2 は次式で定義される。

$$R^2 = \frac{SSR}{S_{yy}} = 1 - \frac{SSE}{S_{yy}} \quad (2.21)$$

ここで、 S_{yy} は応答 y の平均値まわりの変動 (total sum of squares) で、次式で定義される。

$$S_{yy} = y^T y - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n} \quad (2.22)$$

決定係数とは、回帰モデルの適合性を示す指標となっている。例えば、回帰式が完全に応答に一致していれば、式(2.20)のSSRと式(2.22)の S_{yy} は完全に同一となり、決定係数 R^2 は1となる。 $S_{yy}=SSR+SSE$ の関係があるので、残差があれば必ず決定係数は1より小さくなる。つまり、0 - 1の間の数を決定係数はとる。ただし、変数を多くすれば残差は減少するので、決定係数の値が高いものが良い回帰モデルと断定はできない。回帰モデルの良否の比較には、単位自由度あたりの残差を比較する必要があり、一般には自由度調整済み決定係数 R^2_{ad} が使用される。

$$R^2_{ad} = 1 - \frac{SSE/(n-k-1)}{S_{yy}/(n-1)} \quad (2.23)$$

自由度調整済み決定係数は不要な変数が追加されたときには低下する。

回帰モデル中の各係数は回帰係数のt検定でその有意性判定をすることができる。

回帰式のj番目の係数 $\beta_j=0$ つまりj番目の変数が回帰式に寄与していないという仮説をたて、検定を実施する。この場合のt値は次式で表される。

$$t_0 = \frac{b_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \quad (2.24)$$

ここで C_{jj} は正方行列 $(X^T X)^{-1}$ のjj成分である。この仮説係数 $\beta_j=0$ は t_0 の絶対値が $t_{\alpha/2, n-k-1}$

より大きいときに否決される(変数が有効と判定される)。 $t_{\alpha/2, n-k-1}$ は自由度 $n-k-1$ 信頼係数

1- α のt分布の値である。

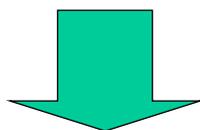
各回帰モデル中の係数の t_0 は一般的には回帰モデルに依存して異なるため、棄却された変数を削除したり、別の変数を追加するごとに各変数の t_0 は変化する。このため、 t_0 は削除や追加によって回帰モデル変更するごとに計算しなおす必要がある。最適な回帰モデルを求めるには、変数を増減してゆく増減法 (step wise) の他に、変数を増加させる方法や減少させていく方法がある。変数を減少させていく減少法は簡単であるが、多くの項が削

減されてしまう場合、削減後に一度削減した項を追加すると回帰が向上する場合もあり、真の最適回帰モデルを提示する保証はない。そのため、比較的高次の項が無く、さらに削除する項数が少ない場合には有効である。一般的には少ない項数から開始して増減させる増減法が多く用いられる。

2.2.4 変数変換

これまでは線形関数かまたは多項式で線形関数に容易に置換可能な関数を取り扱ってきた。実際にはこれらの関数ばかりではなく、非線形関数が必要な場合も多い。非線形関数を用いる場合には、変数変換を行うことで、線形関数に変換が可能であるものがあり、そのような関数は先に延べた正規方程式を用いた最小2乗法で係数を決定できる。図2.3参照

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2$$



$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5$$

図2.3 変数変換例

第3章 複合材料

この章では、複合材料について説明する

3.1 複合材料

3.1.1 定義

複合材料³⁾とは、いくつかの素材を組み合わせることで、素材単体の特性よりもさらに優れた特性、あるいは特異な特性を持たせた材料である。そして、素材は自然のもの、人工のものなど多種多様であり、これらの複合で数多くの複合材料を作ることができる。なお、上記の定義からすると、合金も複合材料といえなくはないが、原子レベルまでミクロに観察すると固溶しているので複合材料とはいわない。つまり、合金がほかの複合材料と大きく異なる点は、界面が見出せないことであり、複合材料は構成する素材同士の界面がはっきりしていることも大きな特徴といえる。

3.1.2 種類

複合材料の種類について広義の解釈をすると、図に示すように三大工業材料である1 金属・合金、2 高分子材料、3 セラミックス・ガラス・セメントを組み合わせた複合材料が存在する。たとえば、1と3の組み合わせで鉄筋コンクリートが作られ、1と2の組み合わせでスチールコードタイヤが作られる。そして、2の高分子材料と3のガラス繊維、炭素繊維などを組み合わせた繊維強化プラスチック（fiber reinforced plastics：FRP）は、広義には繊維で補強されたプラスチックの総称で、強化材としては、無機繊維（ガラス繊維）、有機繊維、金属繊維を、マトリックスとしては、熱硬化性樹脂、熱可塑性樹脂を組み合わせで作られた複合材料である。なお、熱可塑性樹脂をマトリックスとするものは、とくにFRPと区別して繊維強化熱可塑性プラスチック（fiber reinforced thermoplastics：FRTP）という。

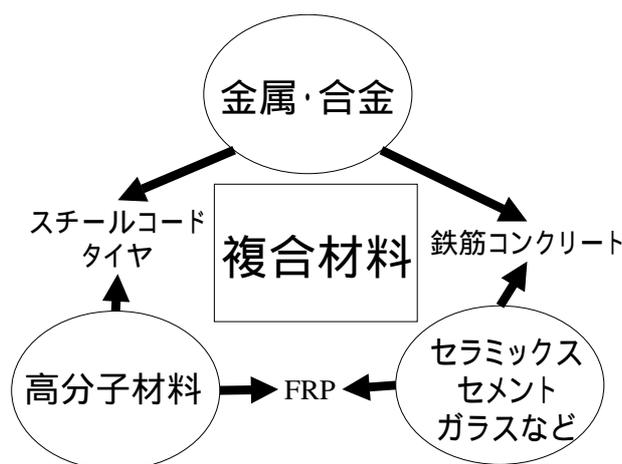


図3.1 三大工業材料と複合材料

3.2 CFRP

CFRP という複合材料について説明する。複合材料が三大工業材料から作られ、その中で高分子材料とガラス繊維などを組み合わせた繊維強化プラスチックが存在することは上記したが、この高分子材料である熱硬化性樹脂と炭素繊維を組み合わせで作られた繊維強化プラスチックが CFRP (carbon fiber reinforced plastics) である。

3.2.1 誕生

第二次世界大戦中に開発されたガラス繊維強化プラスチック (glass fiber reinforced plastics : GFRP) は、1942年に米国で直径約0.1mmの細くてきわめて強いガラス繊維にポリエステル樹脂を含浸させたものであって、軽くて耐食性があり、当時としては画期的な材料開発であった。そして、1960年代の宇宙開発競争の激化とともに、高強度軽量材料に対する要求が高まり、高比弾性率の強化繊維が求められ、炭素繊維が1960年代後半に出現した。そして現在では新しい繊維と樹脂の開発や改善が進み、炭素繊維と熱可塑性樹脂や熱硬化性樹脂を組み合わせ、優れた CFRP が生まれた。

3.2.2 実用例の推移

実用例として、航空機での利用とジェットエンジンへの利用の歴史について述べる。また、ここで登場する ACM とは、先進複合材料 (advanced composite materials) の事を指す。

CFRP を含む複合材料と航空機の関係は深い、高度の信頼性と経済性を要求される民間旅客機の構造に ACM の利用が開始されたのは比較的新しい。世界中で800機以上が飛んでいるおなじみのジャンボ機は、初期型の就航が1970年と古い。最新型の B747-400 (1989年就航) では新設計の主翼端のウィングレット (上に折れ曲がった部分) が CFRP である以外は、2次構造の一部に GFRP が使用されているにとどまっている。

ACM の旅客機への利用は1980年代になり始まった。1982-83年に就航した B767、B757 では、補助翼、フェアリンクなどの2次構造に大幅に CFRP を中心とする ACM が採用された。ヨーロッパでも、1983-84年に就航した A310-200、A300-600 で、2次構造に大幅に ACM が採用されている。

1次構造への ACM 利用は、ヨーロッパが一步リードした。1985年に就航した大型旅客機 A310-300 (乗客220人程度) で、世界で初めて1次構造部材 (垂直尾翼の主構造) に CFRP 積層構造が採用された。その後、1988就航の A320 (乗客170人程度) からは水平尾翼も CFRP となり、最新型の A330、340 (1993-94年就航) へと続いている。また、A310-200、A300-600 も1986-87年ころ製造の機体から垂直尾翼が CFRP に置き換えられた。さらに、1989年就航の小型旅客機 ATR

- 72（乗客70名程度）では主翼外板も CFRP になっている。

米国は非常に慎重な選択をしている。1975年から NASA が中心となり、試験的に B737の垂直尾翼を CFRP で試作し、10年以上にわたり実機の長期耐久性試験を行った。これをふまえ1995年就航の B777（乗客400名程度）では、垂直・水平尾翼により高性能の CFRP が採用された。

ジェットエンジンへの利用の歴史も興味深い。1960年代末に、英国のロールスロイス社は米国ロッキード社の L1011トライスター機向けの大型エンジン RB211の開発において、ファンブレードの CFRP 化をはじめとする新技術の導入を試みた。結局ファンブレードの CFRP 化は失敗に終わり、開発費の増大からロールスロイス社は倒産、また、エンジンの開発の遅れから就航の遅れたトライスター機の売り込みを焦ったロッキード社は、日本の首相を巻き込んだ政治事件を起こした。歴史はめぐり、1995年には B777用のエンジンの一つである米国 GE 社の最新エンジン GE-90で、初めて CFRP 製ファンブレードが実用化された。

ほかにも表のような用途で使用されている。

表 3 . 1 CFRP 特性と用途例

分野	利用特性	用途例	分野	利用特性	用途例
一般産業用途	剛性 低慣性 寸法安定性 精度 低摩耗性	(a) 繊維機械部品 ルーバー・アセンブリー ピッキングスティック レピアロッド等	航空・宇宙用途	比強度 比剛性	(a) 航空機 戦闘機 民間機 ヘリコプター
	振動減衰性 低騒音	(b) 事務機器部品 端末機 複写機 自動製図機		軽量化	(b) 宇宙 ロケット部品 衛星部品 スペースシャトル
	低摩擦・摩耗性 疲労特性 耐薬品性	(c) 摺動部材 軸受 ギヤー バルブ (d) 産業機械部品 振動板ばね 耐食材料 耐熱材料	医療機器用途	比強度 比剛性 X線透過性 形状安定性	(a) X線装置関係 ベッド カセット カセットレススロント板
自動車用途	軽量化 耐疲労性 摺動特性 低騒音	競争車 ラリー車(シャフト、スプリング、エンジン部品等) シャーシ、ホイール、バン 高速車両	オーディオ他	振動減衰性 比剛性	(b) 補装具 車椅子 義手 義足 (c) 生体関係 骨材料等
					(a) オーディオ部品 トーンアーム スピーカーコーン 振動板 ヘッドシェル (b) 楽器部品
スポーツ・レジャー用途	比強度 比剛性 軽量化 振動減衰性	ゴルフシャフト、ヘッド 釣竿、釣用リール テニスラケット等のラケット アーチェリー スキー アイスホッケースティック スケートボード ヨット ボート 自転車部品 オートバイ部品	エネルギー関係	比強度 比剛性 耐食性	遠心分離機ローター フライホイール 風車
			海洋その他	比強度 比剛性	船体補強 耐圧容器 導線ロッド 長大トラフ
				導電性 寸法安定性	アンテナ 電子機器 マイクロメーター

3.3 キーワード

複合材料が素材同士の界面がはっきりしていることは述べたが、ここで、多種多様に存在する複合材料に共通した基本的な術語について述べる。

- ・強化材 (reinforcement) とマトリックス材 (母材)

複合材料は、強化材とマトリックス材からなり、強化材 (reinforcement) または分散材 (dispersed material) とは、ある素材の特性を改良するか変えるために加える微小型素材や繊維のことをさし、マトリックス材とは、その改良を加えるもののことをさす。図3.2参照

- ・等方性と異方性

金属のように、どの方向に対しても性質が同じであることを等方性という。これに対して、方向が異なると強さや弾性率が異なる性質を異方性という。例として表3.2を見ると、炭素T300 エポキシ樹脂3601の0°方向の引張強度が1630MPaであるのに対し90°方向では60MPaと約27倍もの差がある。

- ・積層板

異方性材料は特殊な用途を除いては、そのままの形で使われるよりもこれらの異種材料を任意の厚さおよび角度を変えて接着積層し、異方性の影響を小さく抑えた積層複合材料のことをさす。図3.2参照

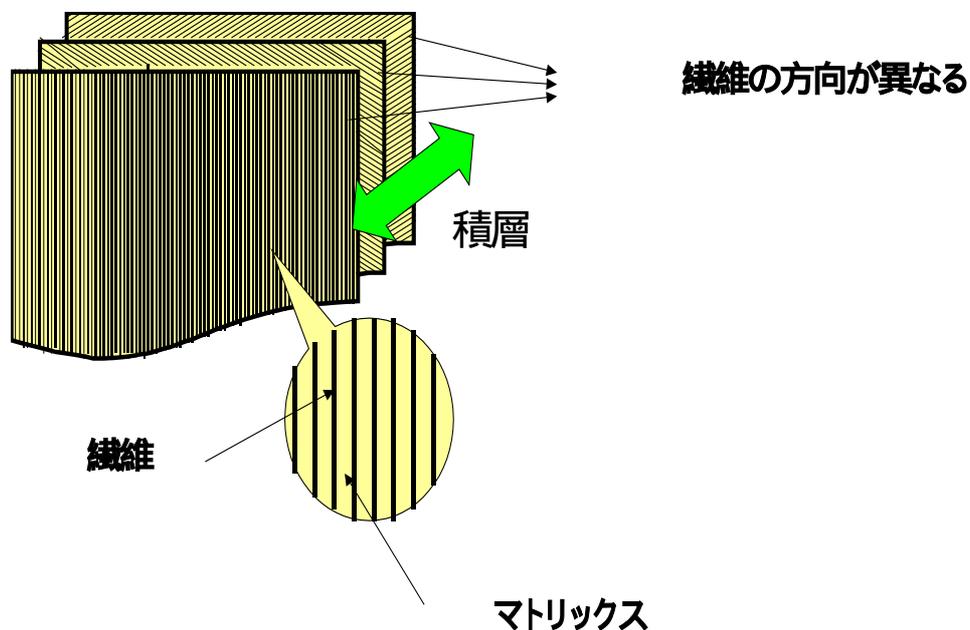


図3.2 複合材料の原理

表 3 . 2 代表的な一方向強化材の強度・弾性率とその異方性

繊維の種類			炭素			
商標			T300		T800	M40J
エポキシ樹脂		単位	3601	3620	3630	3631
密度 $V_f = 60\%$		10^3 kg/m^3	1.54		1.57	1.55
0°	引張強度	<i>MPa</i>	1630	1770	3060	2250
	引張弾性率	<i>GPa</i>	136	128	167	215
	引張破断歪	%	1.17	1.26	1.59	1.00
	ポアソン比		0.35	—	0.34	0.3
	繊維体積含有率	%	60	60	60	60
0°	圧縮強度	<i>MPa</i>	1490	1360	1600	1080
	圧縮弾性率	<i>GPa</i>	125	125	146	205
	圧縮破断歪	%	1.34	1.10	1.24	—
	繊維体積含有率	%	64	60	62	60
	90°	引張強度	<i>MPa</i>	60	53	84
引張弾性率		<i>GPa</i>	9	9.1	9	6.9
引張破断歪		%	0.67	0.61	1.08	0.70
繊維体積含有率		%	60	66	62	60
90°		圧縮強度	<i>MPa</i>	280	—	248
	圧縮弾性率	<i>GPa</i>	10	—	10.5	—
	圧縮破断歪	%	—	—	4.4	—
	繊維体積含有率	%	60	—	62	—
	0°	層間せん断強度	<i>MPa</i>	122	123	114
繊維体積含有率		%	60	66	60	—
面内せん断強度		<i>MPa</i>	93	126	98	59
面内せん断弾性率		<i>GPa</i>	—	4.3	5.0	3.9
繊維体積含有率			60	62	62	60
線膨張係数						
	(繊維方向)	$10^{-6} / K$	0.9		—	—
	(繊維直角方向)		30		—	—
熱伝導率						
	(繊維方向)	<i>W/m·k</i>	3.1		5.9	2.4
	(繊維直角方向)		0.59		0.59	1.0

3.4 従来の複合材料の損傷検査法

3.4.1 X線

X線⁴⁾での損傷診断は、医療の分野で広く使われているレントゲンと同じ原理である。X線は波長が極めて短く、物質を透過する性質があり、複合材料にX線を当てることにより、そのX線の透過する量が損傷の程度に応じて変化する。そのため、その透過したX線が反対側の蛍光板の発光程度やフィルムの感光程度に反映され、損傷が写しだされる。しかし、この検査方法では詳細な検査ができるのではあるが、大規模な構造に対して全体を検査する場合、構造物全体を囲う大掛かりな装置が必要となり、非常に大きなコストがかかってしまう。

3.4.2 超音波

超音波検査法は、検査する構造物に対して超音波を当て、その超音波の反射波の度合いによって損傷の程度や位置を検査する手法である。この検査法も精度の高い詳細な検査を行うことができるが、スキャン範囲が非常に狭く、大規模な構造を検査する場合には全体を走査しなくてはならず、大きなコストがかかってしまう。例として図3.5に240mm四方の大きさの試験片の一部での計測の様子を示す。全面の診断にかかる時間は約1時間半である。



図3.3 超音波診断装置（試験片は240mm四方）

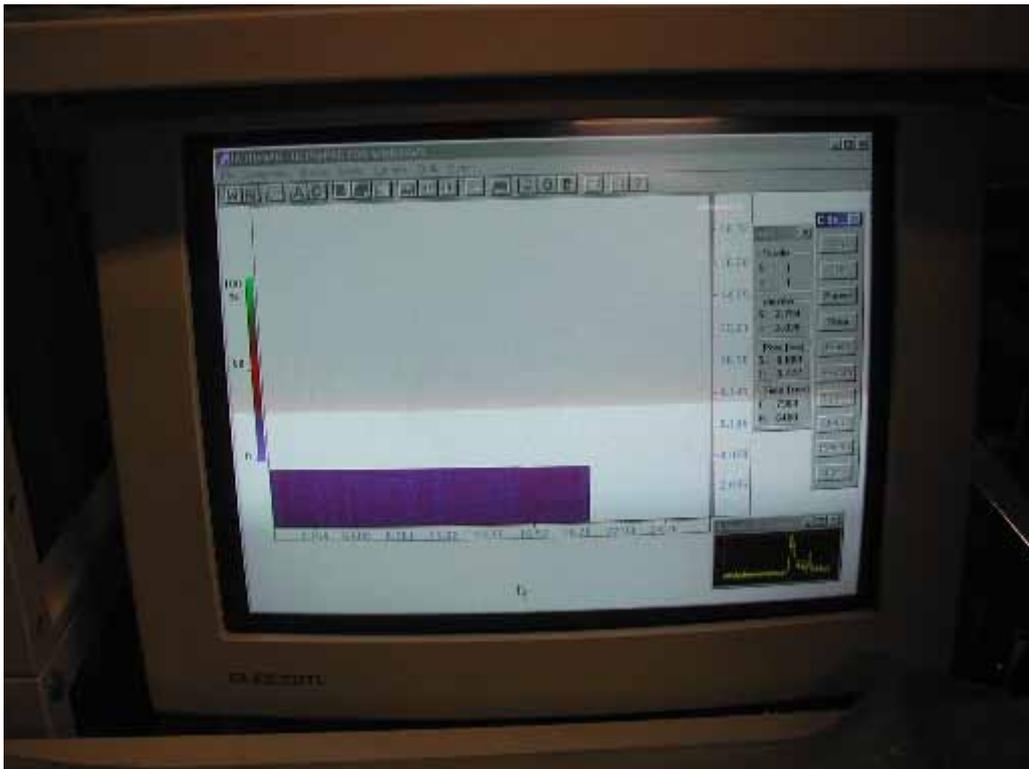


図3.4 超音波診断装置（計測中のパソコン画面）

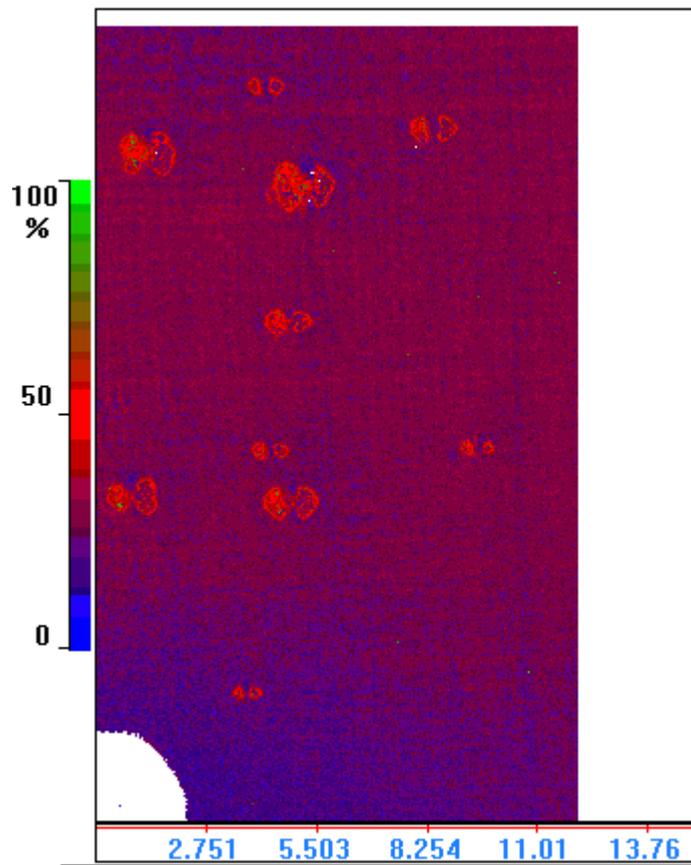


図3.5 超音波検査結果例

第4章 応答曲面法を用いた CFRP 積層平板衝撃同定

本章では、今回の研究で行った応答曲面法を用いた CFRP 積層平板での衝撃同定について実験方法、同定手法、同定結果について述べる

4.1 目的

金属材料よりも優れた性質や特異な性質を持った材料として近年使用され始めている CFRP 積層平板であるが、外界からの大きな衝撃により積層された層内に目視困難な層間はく離が発生する。そして現在ある検査法は、構造のすべての場所を走査し状況を観測する直接診断手法の高コストなものや、稼動中に診断できないものなどすべての検査対象に対して利用するには問題がある。また、低コストな診断法としてセンサを利用し構造物内を伝播してきたものを計測し診断する間接診断手法は、CFRP 積層平板の面内の伝播速度や弾性率の異方性などの性質が障害となり、検査法としての確立された手法は存在していない。

そこで本研究では、間接手法のうち加速度センサを利用し、振動を計測してすべての検査対象に対して稼動中でも容易に頻繁に損傷を診断する、低コストな CFRP 積層平板の損傷の位置と程度の診断手法の開発とする。これは、工業製品製造時に内部にセンサを設置することで、稼動中にリアルタイムに振動を計測しメンテナンス時期や交換時期の判断が可能となる。

損傷の同定として位置同定に関しては振動波形の到達遅延時間を計測することで同定を行い、程度同定では損傷を引き起こす衝撃の大きさを計測することを試み同定を行った。

4.2 加速度センサを用いた衝撃エネルギー同定

今回加速度センサを用いた損傷の同定として、損傷を引き起こす衝撃のエネルギーと位置の同定を行うことを試みる。実験は CFRP 積層平板のほかに、面内伝播速度に異方性がないアルミニウム板でも同様の実験を行った。アルミニウム板での試験では衝撃により損傷を発生しないため衝撃エネルギーと応答にほぼ線形の関係があるが、CFRP 積層平板では発生する層間はく離によりエネルギーの吸収が起こり、非線形性が生じる。

4.2.1 実験方法

今回衝撃の同定を行うにあたって利用した、落下実験の手法について具体的に述べる。

4.2.1.1 原理

試験片に鉄球を落下させることによって衝撃を与え、それにより発生した振動を平板の 4 隅に設置した加速度センサで計測し、鉄球の位置エネルギーを試験片に与えられた衝撃エネルギーとして考え、計測された振動のデータからその衝撃の位置とエネルギーを同定する。

4.2.1.2 試験装置

試験装置は、毎回さまざまな高さからほぼ同じ位置に鉄球を落下させるため、鉄球の直径よりも多少大きい内径の金属パイプを、アルミフレームを組み合わせた縦 700 mm 横 7

00 mm 高さ 1550 mm の装置の高さを自由に変更できるバーの中央部に取り付けた。また、できる限りノイズの影響を小さくするため、装置よりも大きく分厚いアルミ台の上にゴムシートを引き、その上に装置を設置した。なお、今回利用した高さは 0.4 mm、0.68 mm、1.05 mm、1.55 mm の 4 種類である。そしてその装置の中央部に、4 隅に加速度センサを両面テープにより取り付けた試験片をおき、加速度センサにはシグナルコンディショナ、KEYENCE データ収集装置 NR2000、ノートパソコンの順でつなぎ、センサの出力をパソコンまで送り、保存、同定できるものにした。図 4.1、図 4.2 参照。なお、加速度センサ⁵⁾は PCB 社製の 353B12、シグナルコンディショナ⁶⁾も PCB 社製の 482A22 を使用した。仕様は表 4.1、表 4.2 参照。

表 4.1 加速度センサ仕様

型式	単位	353B12
性能仕様		
電圧感度(1)		0.5
周波数範囲(±5%)	Hz	1~10000
周波数範囲(±10%)	Hz	0.7~20000
共振周波数	kHz	70
測定レンジ		10000
分解能(広帯域)		0.1
機械的対衝撃		100000
温度範囲		-54~121
振幅直線性	%	±1
横軸感度(2)	%	5
ベース歪み感度		0.05
電氣的仕様		
駆動電圧	VDC	18~30
駆動定電流	mA	2~20
出力インピーダンス		<100
出力バイアス電圧	VDC	8~12
放電時定数	秒	0.5

(1) 感度の許容範囲は基準値の±10%以内

(2) 加速度計の横軸感度は一般的に3%以下

表4.2 シグナルコンディショナ仕様

型式	482A22
特長	ローノイズ AC, DC電源駆動
チャンネル	4ch
センサ駆動(1)	2.6V 2~20mA
ゲイン	×1
低周波応答(-5%)	<0.1Hz(2)
高周波応答(-5%)	>1MHz
広帯域ノイズ(ゲイン×1時)	<3.25μVrms
電源	3.6Vdc 120mA
入出力コネクタ	BNC / BNC
外部DC駆動	yes
DC電源入力端子	DIN
形状(h×w×dmm)	160×61×280
重さ(g)	759

(1) 定電流値は2~20mAまで可変設定可能。工場出荷時は4mAに設定

(2) 接続機器の入力インピーダンスが1Mオームの場合

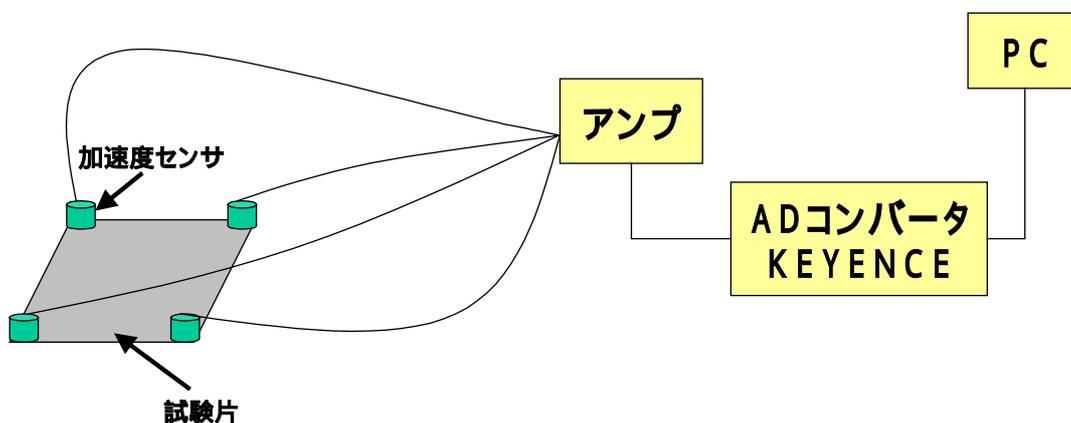


図4.1 実験装置概念図



図4.2 試験片写真

4.2.1.3 試験片

試験片としてはアルミニウム板とCFRP積層平板を用いた。以下に両者の詳細を示す。

アルミニウム板：500 mm 四方、厚さ5 mm

CFRP積層平板：240 mm 四方、厚さ0.9 mm

作成は、東レUDプリプレグ P8051F-5を使用した。特性は表4.3参照。

工程（図4.3参照）：1. 250 mm 四方に切ったプリプレグのプライを $[0_290_2]_s$ の積層構成になるよう積層する。

2. 大きさが250 mmで片面にテフロンシートを貼ったアルミ板2枚で、積層したプリプレグをはさむ。
3. オープンにセットし、5 Mpaの圧力をかけ、設定温度100度で30分熱する。（予熱なし）
4. 圧力はそのままでオープンの設定温度を130度にし、オープンの温度計（アルミ板の表面温度）が130度になった時点で圧力を8 Mpaにし、それから1時間半熱し続ける。
5. 1時間半経過したら装置の電源を切り自然冷却し、ダイヤモンドカッタにて240 mm四方に切る。

表4.3 プリプレグの特性

	P8051F-5
使用炭素繊維	M30 ($E_f = 30000 \text{ kg/mm}^2$)
使用樹脂	#2500
樹脂含量 Wt%	36
炭素繊維目付け g/m^2	55
硬化温度	130

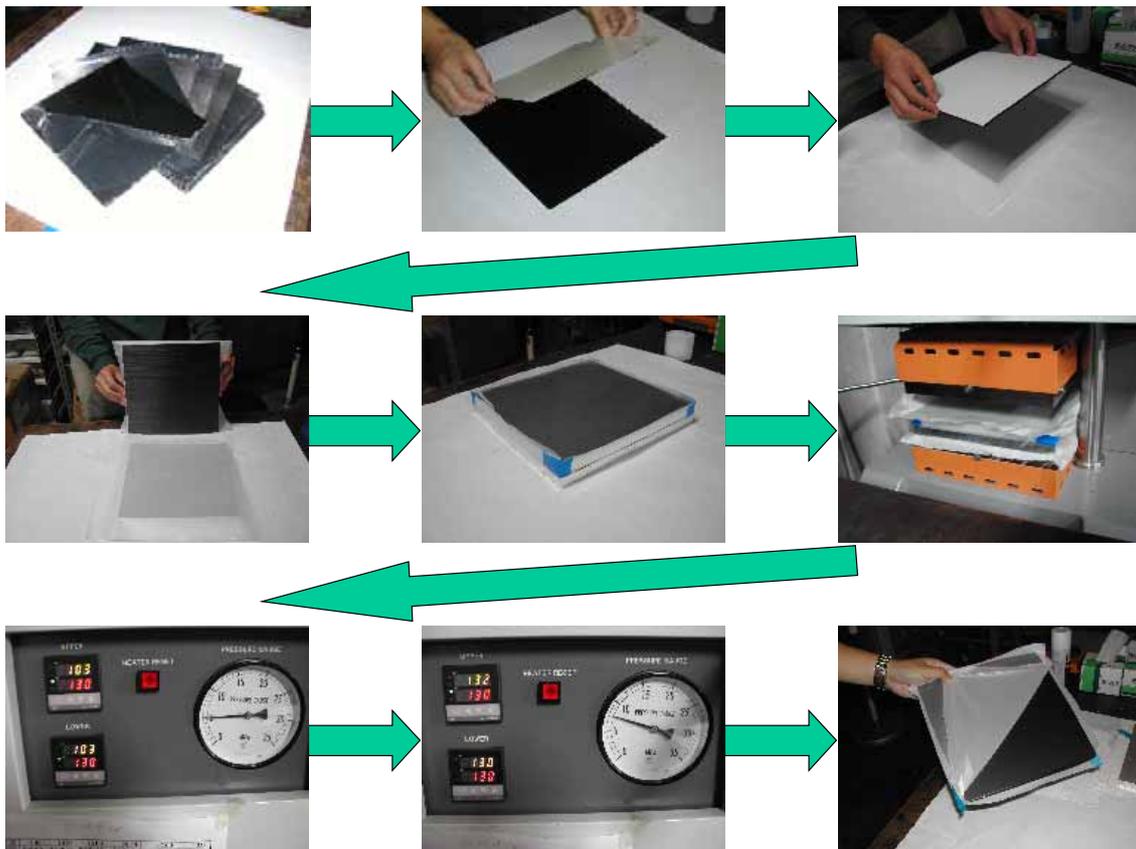


図4.3 積層工程

4.2.1.4 試験手順

まず、試験片上で鉄球を落下させたい位置を決定し、鉄球の落下が予想される位置に試験片のその位置を合わせ、KEYENCEデータ収集装置NR2000をスタートさせ、鉄球を落下させる。今回は、衝撃点はアルミニウム板が500mm四方のものを使用しその内部約300mm四方に16点、CFRP積層平板は240mm四方のものを使用しその内部120mm四方に9点とした。KEYENCEデータ収集装置NR2000の設定はサンプリング周期が10 μ s、サンプリング数が125000である。また、試験片は左上の頂点を原点とし、加速度センサは左上をCh1、右上をCh2、左下をCh3、右下をCh4とした。図4.4参照。

鉄球落下後は原点に従い落下位置のX座標、Y座標を計測し、加速度センサにより計測した振動波形は、落下時の波形の部分抽出してEXCELデータとして保存した。図4.5参照。

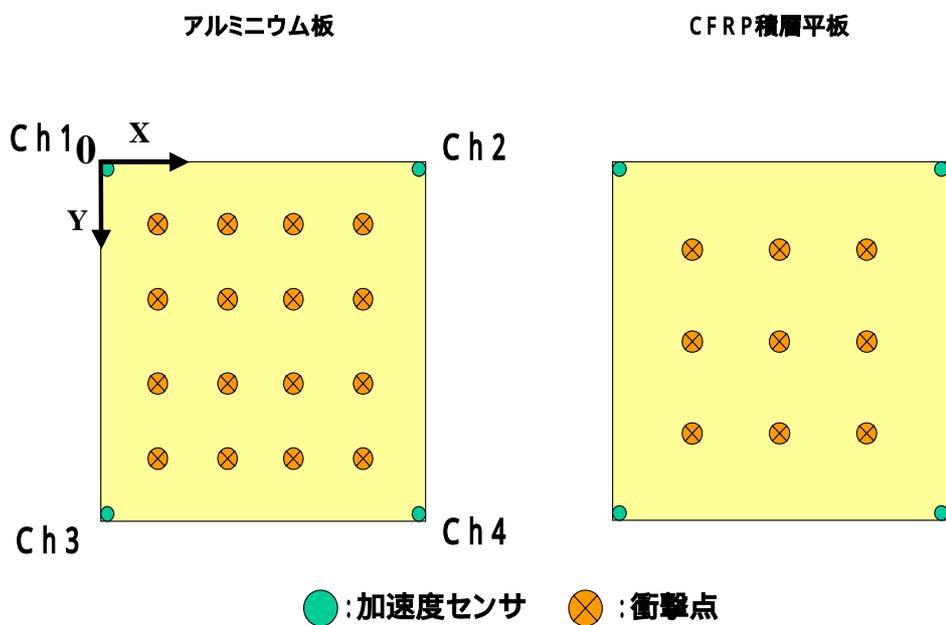


図4.4 衝撃点

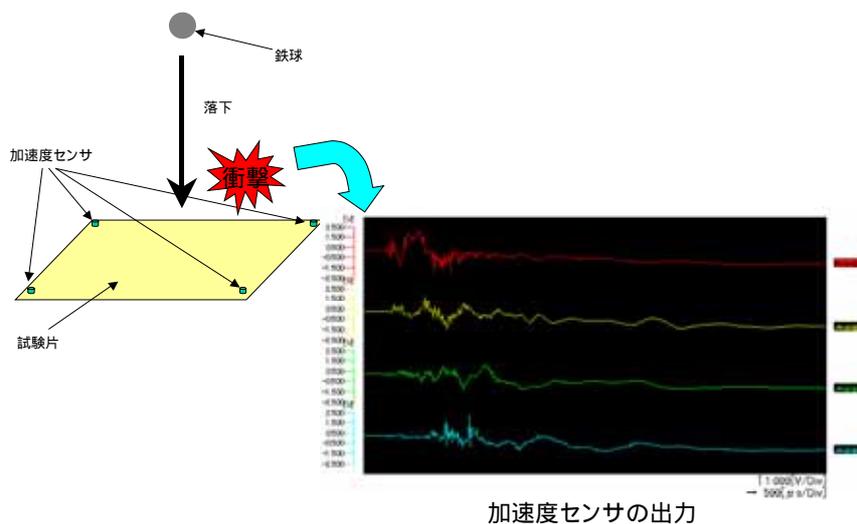


図4.5 計測波形

4.2.2 出力の処理方法

4.2.2.1 波形の到達遅延時間

波形の到達遅延時間は、4つのセンサが計測した4つの振動波の到達時間をそれぞれ調べ、その4つの到達時間のうち一番早く到達した波形の到達時間を0とし、残りの3つの波形の到達時間との差を計算する。図4.6、図4.7参照。将来的にはプログラムを組んで自動的に到達時間を割り出し、遅延時間を計算するのが妥当ではあるが、今回は手作業で行った。

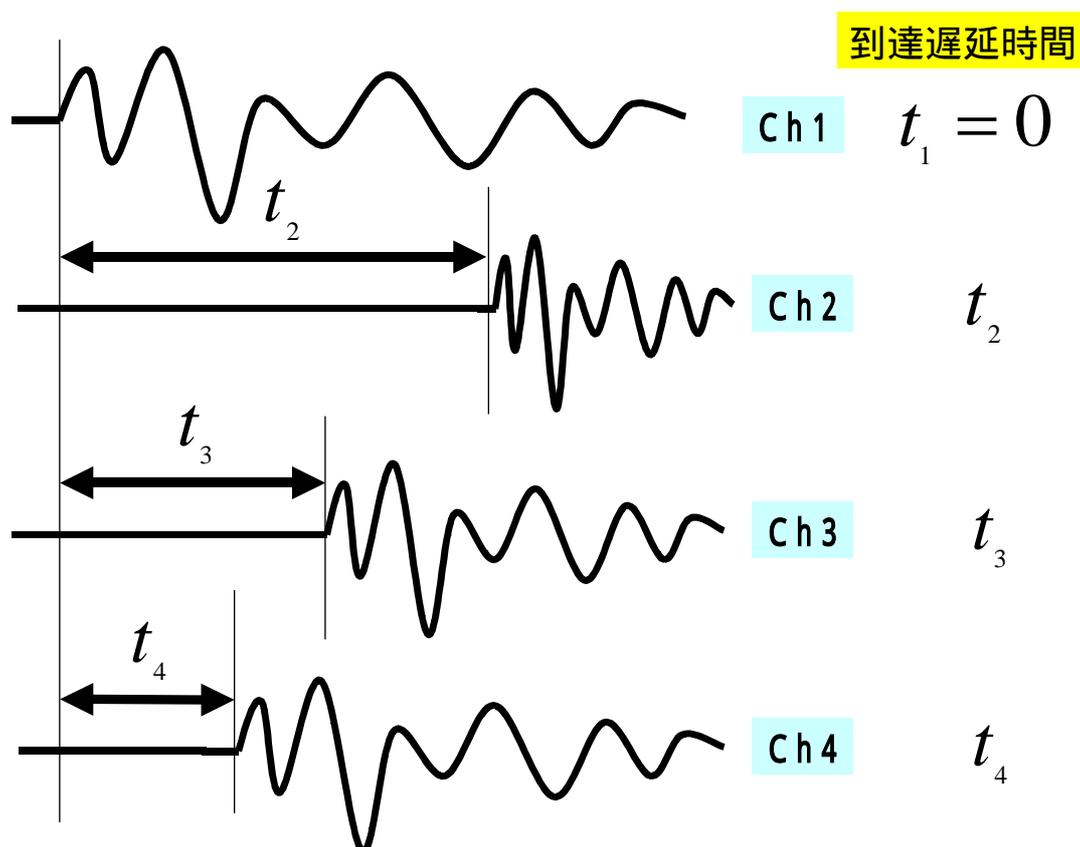


図4.6 振動波形の到達遅延時間計測概念

加速度センサ出力

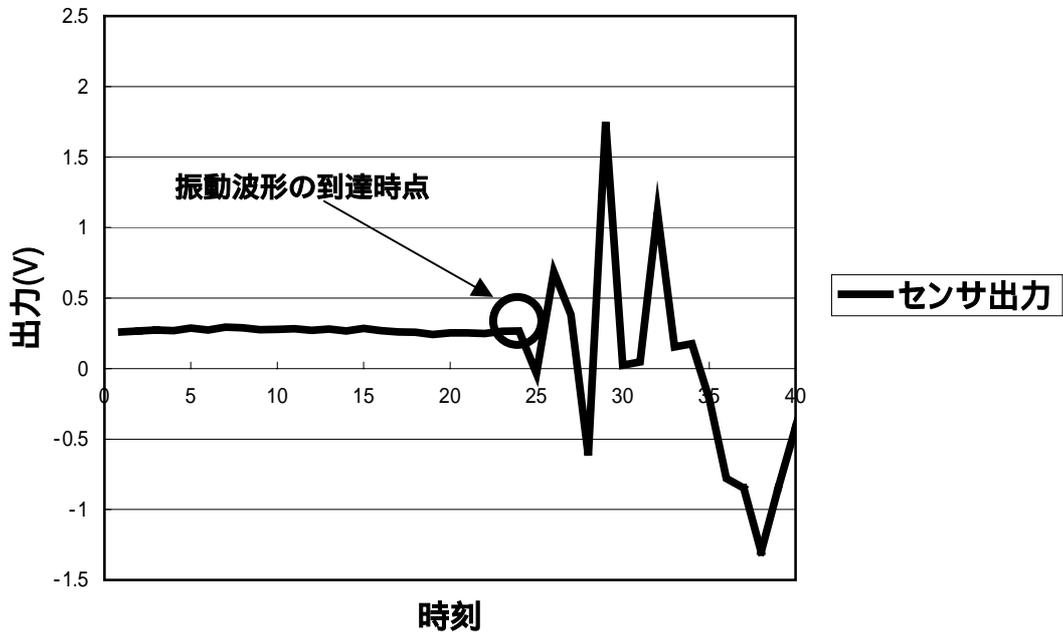


図4.7 振動波形の到達時点

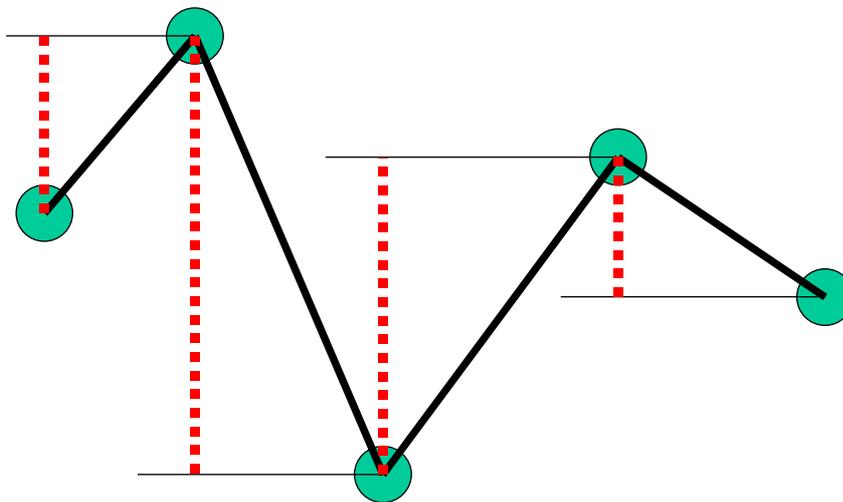
4.2.2.2 変動和

計測時間中のある一定時間を、振動波形が収まる範囲で区切る。そしてその区切った時間内の各チャンネルごとに、それぞれ振動波形計測データの時刻歴応答の変動の絶対値を足していき、その総和をそれぞれのチャンネルごとの振動波の変動和とした。図4.8参照

振動波形が低周波ノイズにのっていた場合に、積分値ではノイズが時刻歴応答の値に含まれてしまい計測時点により値が大きく変化するのに対し、変動和では変化しない。また、衝撃が強い場合の波は弱い場合の波に比べて出力の変動が大きいことも利用の一因である。

図4.9 参照。

この変動和の計算に関しては、VBAのプログラムを作成した。



点線の和が変動和

図4.8 変動和

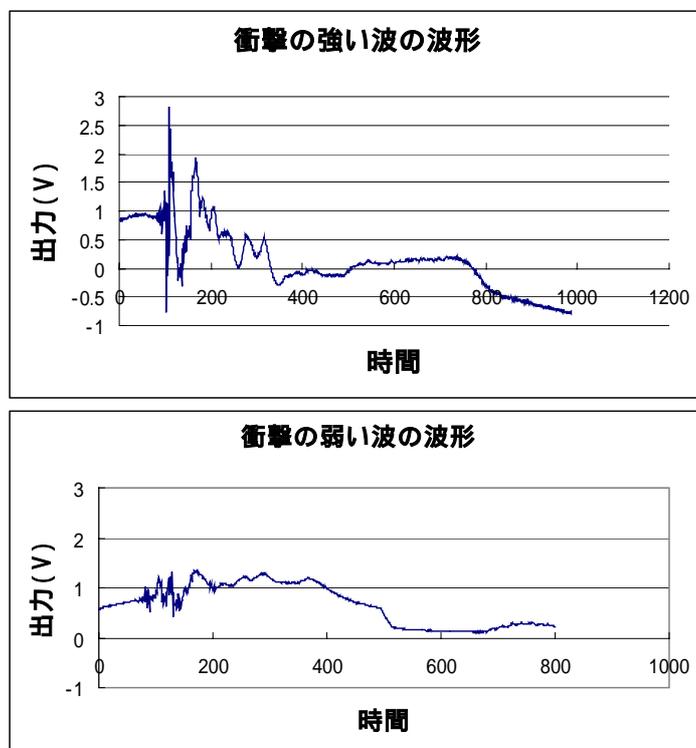


図4.9 衝撃エネルギーによる波形の違い

4.2.3 応答曲面法を用いた衝撃同定

今回応答曲面法を利用するに当たって、予測変数は衝撃の位置同定の場合は各チャンネルごとの到達した波形の到達遅延時間（一つは0）の4個の値であり、衝撃のエネルギー同定の場合はそれぞれの変動和の4個の値である。また、衝撃のエネルギー同定では、空気抵抗や誤差は全くないものとして考え、同じ高さで鉄球を落下させた場合、すべて等しい位置エネルギー、すなわちまったく等しい衝撃エネルギーとして同定する。衝撃の位置同定もエネルギー同定も2次の応答曲面を利用した。鉄球の質量 m 高さ h から衝撃エネルギー E は次式に従い導出する。

$$E = mgh \quad (4.1)$$

応答曲面の最適化を行う係数検定では減少法を用いた。結果としては

全データを学習データとして用いて同データの同定を行った結果

1つのデータを除いて応答曲面を作成し、1つのデータを新規データとして応答曲面で同定を行った結果（交差推定：図4.11参照）

の二つを示す。図4.10参照。

データ数は位置同定ではアルミニウム板が6段階の衝撃で93データ、CFRP積層平板は6段階の衝撃で90データ、衝撃エネルギー同定ではアルミニウム板が3段階の衝撃で46データ、CFRP積層平板は4段階の衝撃で57データを同定に利用した。ただし、CFRP積層平板の位置同定では、平板の対称性を利用し、元々45のデータ数を90にし、同定を行っている。また、出力された波形が明らかに異常なものは除外した。

衝撃の位置、エネルギーを
それぞれ2次多項式で近似

$$x = \underbrace{\beta_0}_{\substack{\text{衝撃位置} \\ \text{OR} \\ \text{衝撃エネルギー}}} + \sum_{i=1}^4 \underbrace{\beta_i t_i}_{\substack{\text{振動波到達遅延時間} \\ \text{OR} \\ \text{振動波の変動和}}} + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 \beta_{ij} t_i t_j$$

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij}$: 係数

図4.10 応答曲面法同定手法

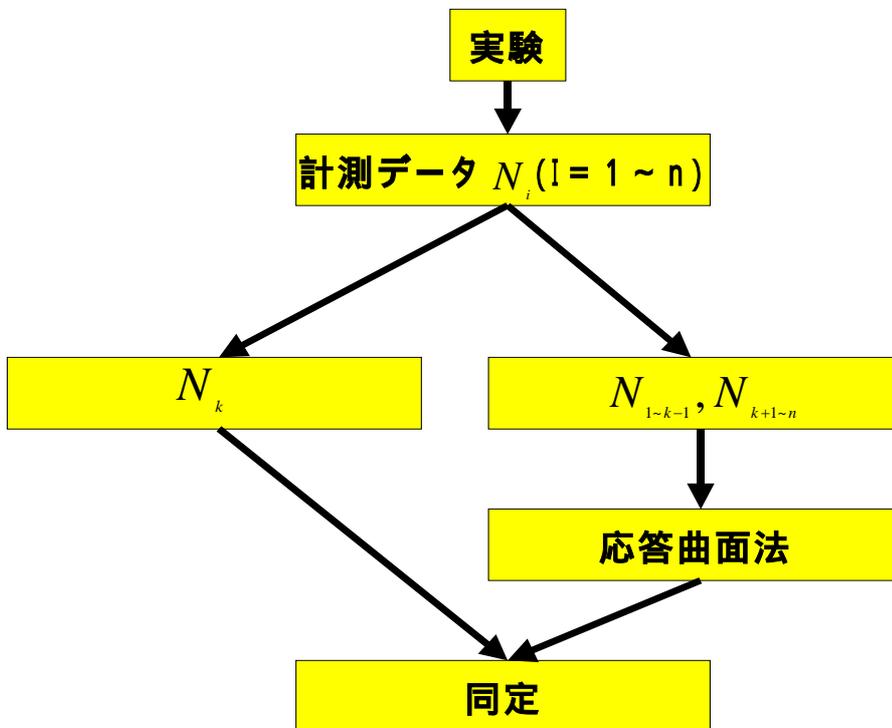


図4.11 交差推定の流れ

4.2.4 同定結果

4.2.4.1 衝撃エネルギー同定

衝撃エネルギー同定結果を示す。図4.12の左図にアルミニウム板での衝撃エネルギー同定結果、右図にその交差推定結果、図4.13の左図にCFRP積層平板での衝撃エネルギー同定結果、右図に交差推定結果を示す。そしてグラフはすべて、横軸が実際の衝撃エネルギーを表し、縦軸が同定した衝撃エネルギーを表す。

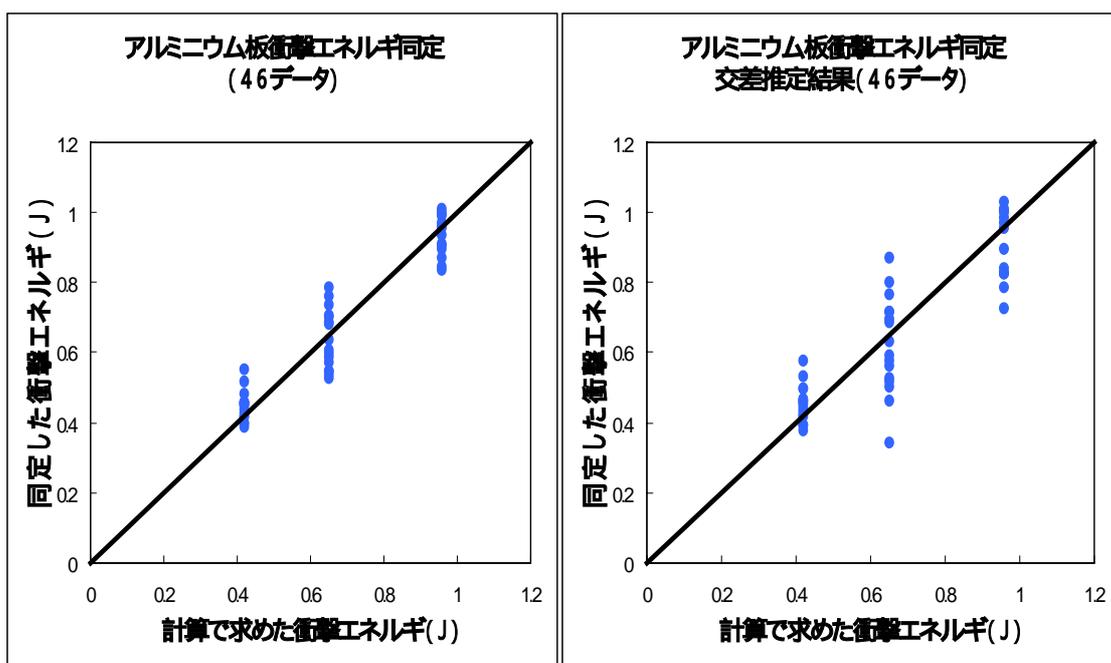


図4.12 アルミニウム板衝撃エネルギー同定・交差推定結果(46データ)

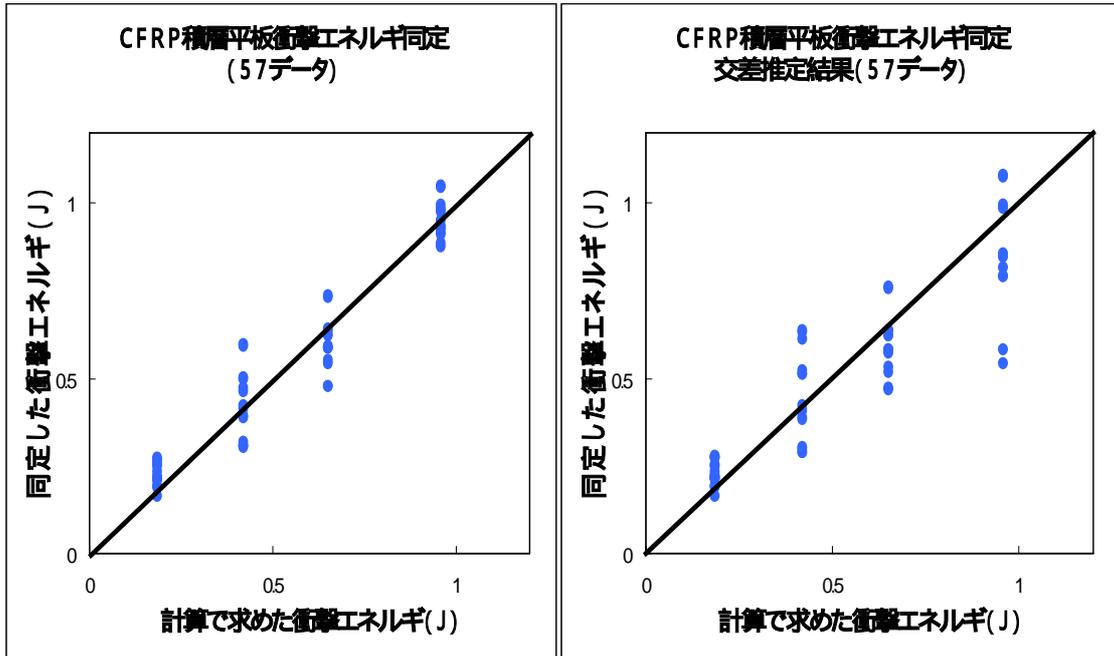


図4.13 CFRP積層平板衝撃エネルギー同定・交差推定結果(57データ)

アルミニウム板の衝撃エネルギー同定では自由度調整済み決定係数が0.88353、残差平方和0.201213、CFRP積層平板の衝撃エネルギー同定では自由度調整済み決定係数が0.91310、残差平方和0.312715となった。そして今回アルミニウム板では3種類の衝撃レベル、CFRP積層平板では4つの衝撃レベルにて同定を行った。

図4.16のアルミニウム板での同定では計算で求めたエネルギーに対し、多少同定したエネルギーには幅があるが、ほぼ計算で求めた衝撃エネルギーに近い値を同定できている。

また、CFRP積層平板での同定もアルミニウム板と同様計算で求めたエネルギーに対し、多少同定したエネルギーには幅があるが、ほぼ計算で求めた衝撃エネルギーに近い値を同定できしており、4水準でも同定ができているといえる。また今回の計算で求めたエネルギーレベルの一番低い場合では層間はく離が入らない程度のエネルギーであり、それ以外の層間はく離の入っているエネルギーレベルとあわせて同定しても同定がうまくいくことから、応答曲面法での衝撃エネルギー同定では層間はく離のある無しにかかわらず同定できることといえる。

今回はデータが少なく例としてしか示せないのだが、図4.14に示す様に、発生するはく離寸法と衝撃エネルギーの間には非線形ではあるが、明確な相関がある。すなわち同定した衝撃エネルギーからCFRP積層平板の損傷を診断することができるといえる。

今後は本手法による衝撃エネルギーからはく離損傷の程度を同定するデータベースを期待したい。ただし、その相関は材料により異なるため、使用する材料、積層構成毎にデータベース化が必要である。

衝撃エネルギーとはく離の相関

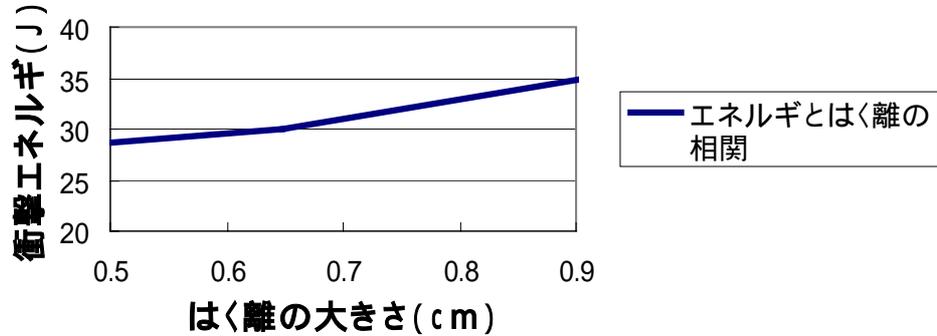


図4.14 エネルギーとはく離の相関

4.2.4.2 衝撃位置同定

位置同定結果を、図4.15、図4.16、図4.17、図4.18に示す。図4.15の左図はアルミニウム板でのX方向の同定結果、右図がY方向の同定結果を表わし、図4.16の左図はアルミニウム板でのX方向の交差推定結果、右図がY方向の交差推定結果を表わす。そして、図4.17の左図にCFRP積層平板のX方向の同定結果、右図にY方向、図4.18の左図にCFRP積層平板でのX方向の交差推定結果、右図にY方向を表す。また、グラフはすべて横軸に衝撃が与えられた実際の位置のX座標、Y座標をあらわし、縦軸に応答曲面法により同定した位置のX座標、Y座標を表し、実線が実際の座標と同定した座標が一致することを表す。

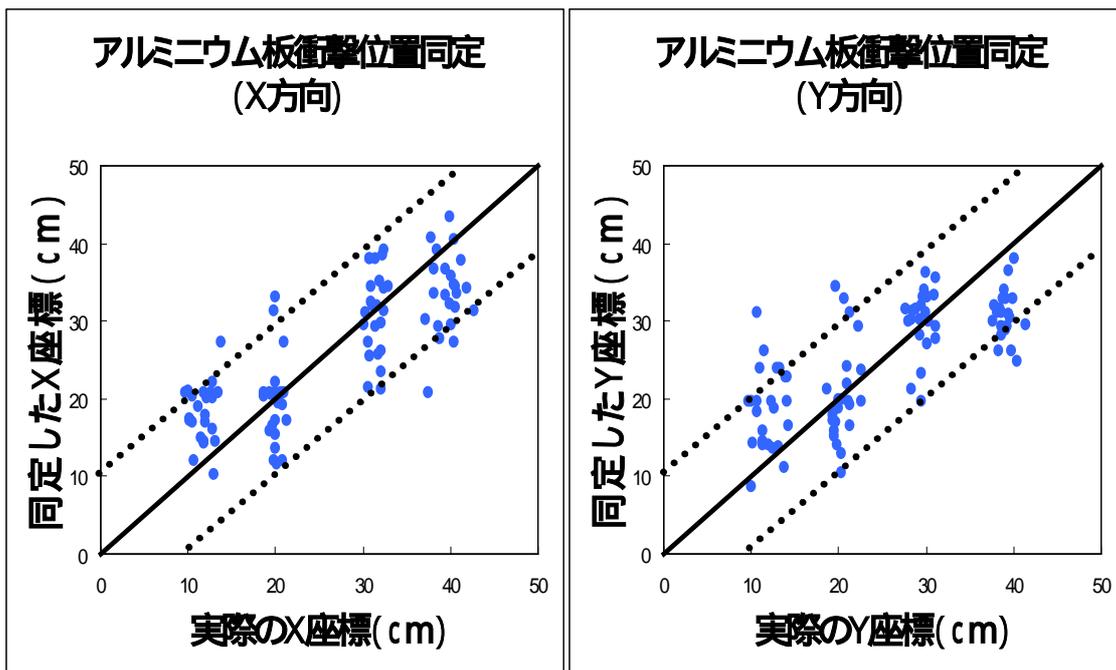


図4.15 アルミニウム板衝撃位置同定結果

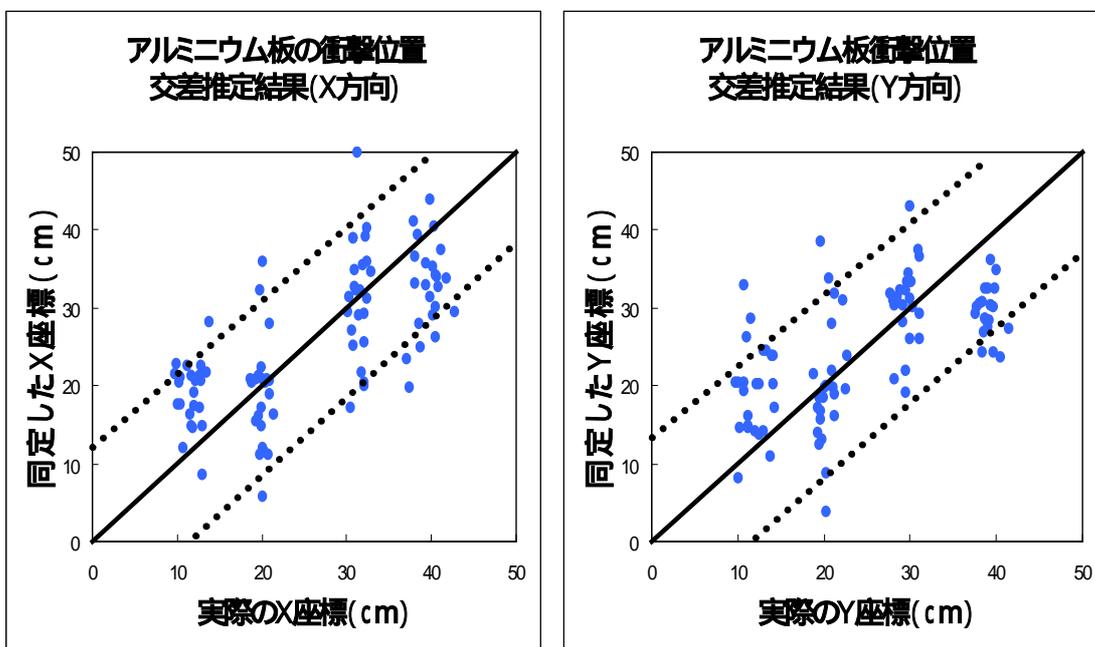


図4.16 アルミニウム板衝撃位置交差推定結果

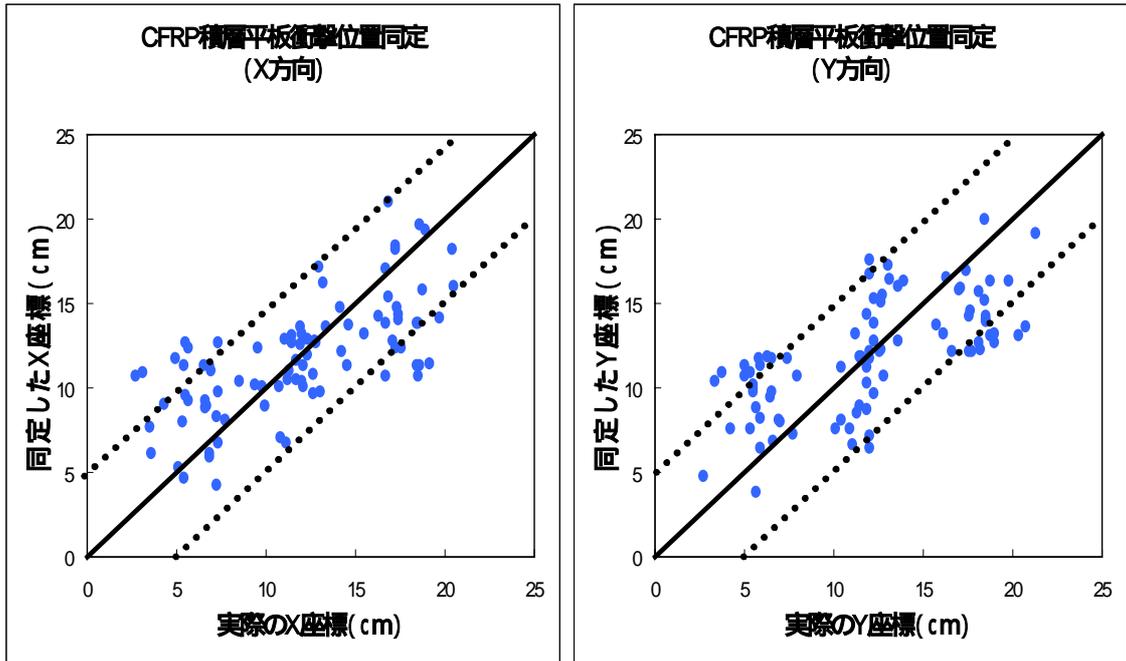


図4.17 CFRP積層平板衝撃位置同定結果

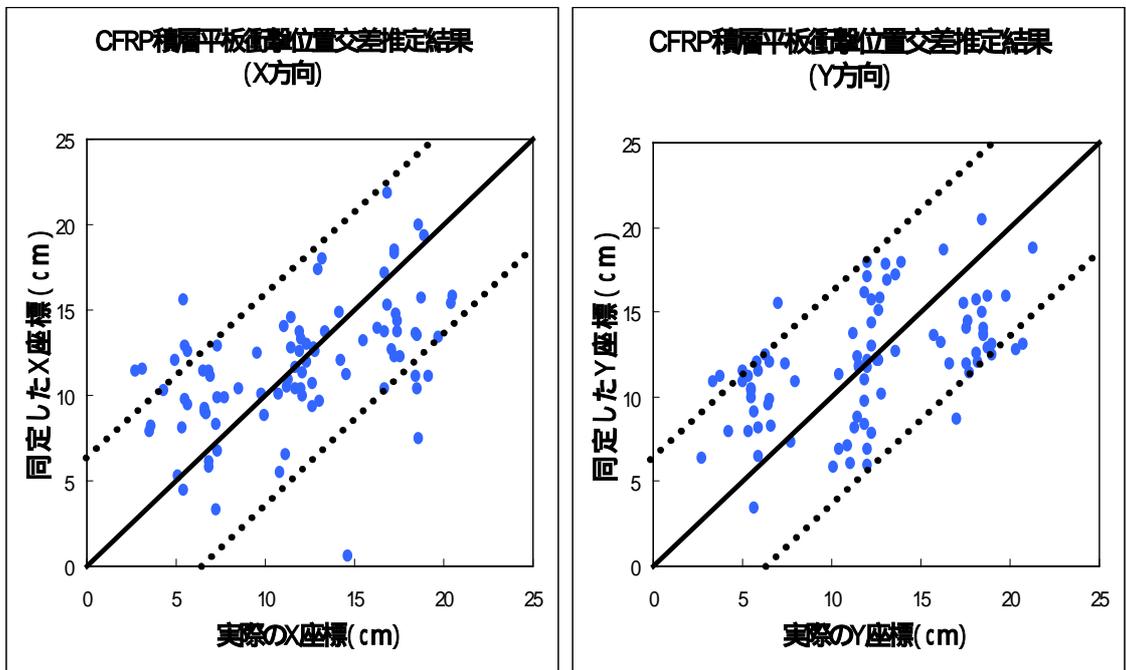


図4.18 CFRP積層平板衝撃位置交差推定結果

アルミニウム板の位置同定結果を見ると、位置同定の自由度調整済み決定係数がX方向0.5737、Y方向0.4525、残差平方和がX方向3980.525、Y方向4660.026となり、ほとんど同定できてはいない。そのため、交差推定結果も位置同定結果とあまり変化ない。データの傾向を見てみると位置同定結果が誤差約±10cmの範囲内に分布、交差推定結果が少し範囲が広がり、誤差が約±12.5cmほどの範囲内に分布していると言える。

CFRP積層平板の位置同定結果も、アルミニウム板とほとんど同様の結果である。自由度調整済み決定係数がX方向0.4201、Y方向0.3705、残差平方和がX方向1159.359、Y方向1230.427であり、交差推定結果も位置同定結果とあまり変化なく、データの傾向は位置同定結果が誤差が約±5cmの範囲内に分布、交差推定結果が少し範囲が広がり、誤差が約±7cmほどの範囲内に分布している。ここで、CFRP積層平板の分布の範囲はアルミニウム板の約半分であるが、試験片の大きさがCFRP積層平板が240mm四方に対しアルミニウム板は約2倍の500mmであるため、精度が良いというわけではない。

これまでの主な原因として考えられるのが、伝播速度があまりにも速いことである。これには二つの要因が大きくかかわっている。ひとつは計測機器の計測精度が1つのセンサあたりサンプリング周期10μsであり、また、計測機器がセンサごとに2.5μsずつずれて階段状に計測している性質を持っていること、そしてもうひとつは試験片が小さいことである。表4.2は衝撃点と波形の到達遅延時間の実験データから抜粋してきたものである。例えば1番ではセンサ4に衝撃点が最も近くセンサ1に最も遠くであるが、最初に波が到達するのがセンサ2であり、順序が入れ替わり数値も計測機器の性質がそのまま表れてしまった形となっている。このデータはほんの一部であるが、往々にして実験データの大部分にこれらの傾向が見受けられた。次節で高速計測を行った場合の位置同定の結果を示す。

表4.2 矛盾した実験データ

番号	衝撃位置のX座標	衝撃位置のY座標	センサ1	センサ2	センサ3	センサ4
1	40.4	39.7	7.50E-06	0.00E+00	2.50E-06	5.00E-06
2	10.2	41.4	1.50E-05	7.50E-06	0	2.25E-05
3	10.4	39.4	1.50E-05	7.50E-06	0	1.25E-05
4	10.1	13.2	0.00E+00	1.25E-05	5.00E-06	7.50E-06
5	39.8	10.6	1.75E-05	0	1.25E-05	2.50E-05

4.3 AE センサを用いた衝撃位置同定

本節では宇宙航空研究開発機構 (JAXA)⁷⁾ との共同で行った AE センサを用いた CFRP 積層平板での実験データを用い、本手法を用いた衝撃位置同定を行った。

4.3.1 実験方法

実験内容は、図 4.19 のように、 $478 \times 516 \times 2$ (mm) の大きさの直交積層板に近い CFRP 積層平板の四隅に AE センサを取り付け、その内部 27 点にパルサーでパルスを入射して衝撃エネルギーを与え、それにより発生し 4 つの AE センサに伝播してきた波形をそれぞれ計測した。また、この CFRP 積層平板には、図 4.19 に見られる様に裏面にスティフナが張られており、部分的に剛性が異なり、伝播速度も異なる。

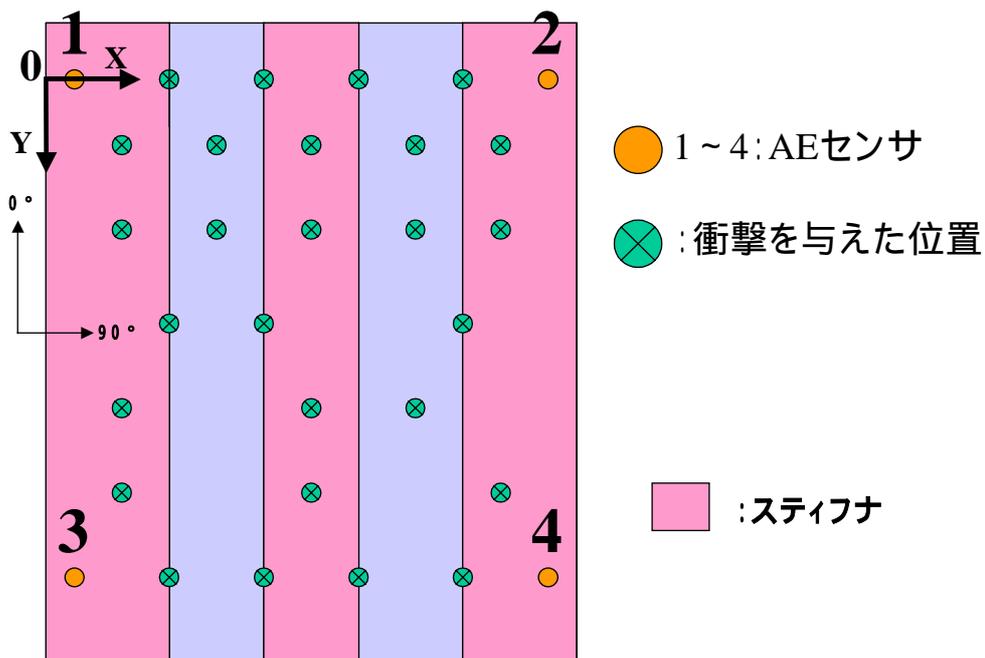


図 4.19 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) での実験概要

4.3.2 同定手法

4 隅に設置したそれぞれの AE センサによって出力された振動波形から、波形の到達時間を 4.2.4 と同様に計測を行った。最初に到達した波形の到達時を 0 とし、その他の 3 つの到達時間との差を、それぞれのセンサに到達した波形の到達遅延時間とする。そ

して今回利用した応答曲面法では、その4つの到達遅延時間(最速は0)を予測変数として、その衝撃を与えた点のX座標、Y座標を別々にそれぞれ応答として同定するという手法を試みた。データ数は27データで、2次の応答曲面を利用し、係数検定は減少法を利用した。図4.20参照

参考として、到達遅延時間と伝播速度から衝撃点とセンサまでの距離を表わしたものと、衝撃点の座標とセンサの位置の座標から三平方の定理でその距離を表わしたものとを4つのセンサそれぞれについて等式で結び、4つの連立方程式を解くことで衝撃点のX座標、Y座標を同定するAE法の位置同定の従来手法である4センサ位置同定法⁸⁾も利用して比較を行った。図4.21参照

衝撃位置の2次多項式の近似式

$$x = \underbrace{\beta_0}_{\text{衝撃位置}} + \sum_{i=1}^4 \beta_i t_i + \sum_{i=1}^4 \sum_{j=i}^4 \beta_{ij} t_i t_j$$

$\beta_0, \beta_i, \beta_{ij} : \text{係数}$
振動波到達遅延時間

図4.20 衝撃位置同定手法

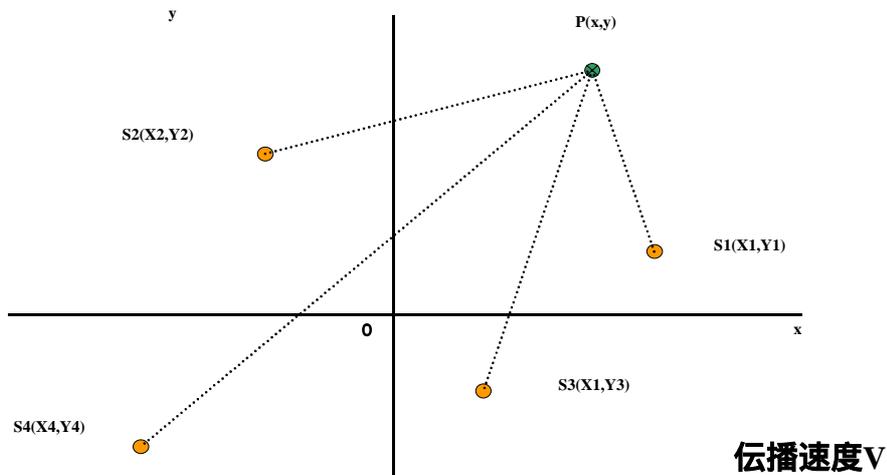


図4.21 4センサ位置同定法

4.3.3 同定結果

図4.22の左図に4センサ位置同定法と応答曲面法での同定結果のX方向を示し、右図にY方向をそれぞれ示す。つまり、上記までの応答曲面法での位置同定はこれに含まれる。図4.22の左図には、X方向の交差推定結果、右図にはY方向の交差推定を行った結果を示す。

横軸は実際のX座標、Y座標を示し、縦軸は同定したX座標、Y座標を示す。そして直線が実際の座標と同定した座標とが一致することを表わしている。

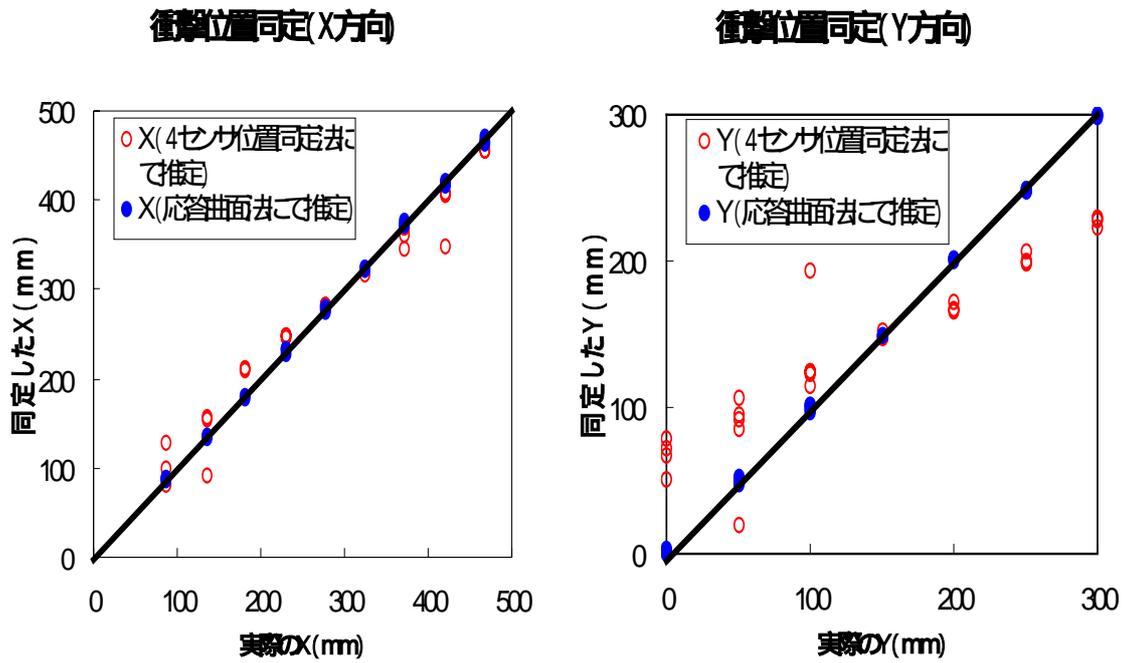


図4.22 4センサ位置同定法と応答曲面法での位置同定結果

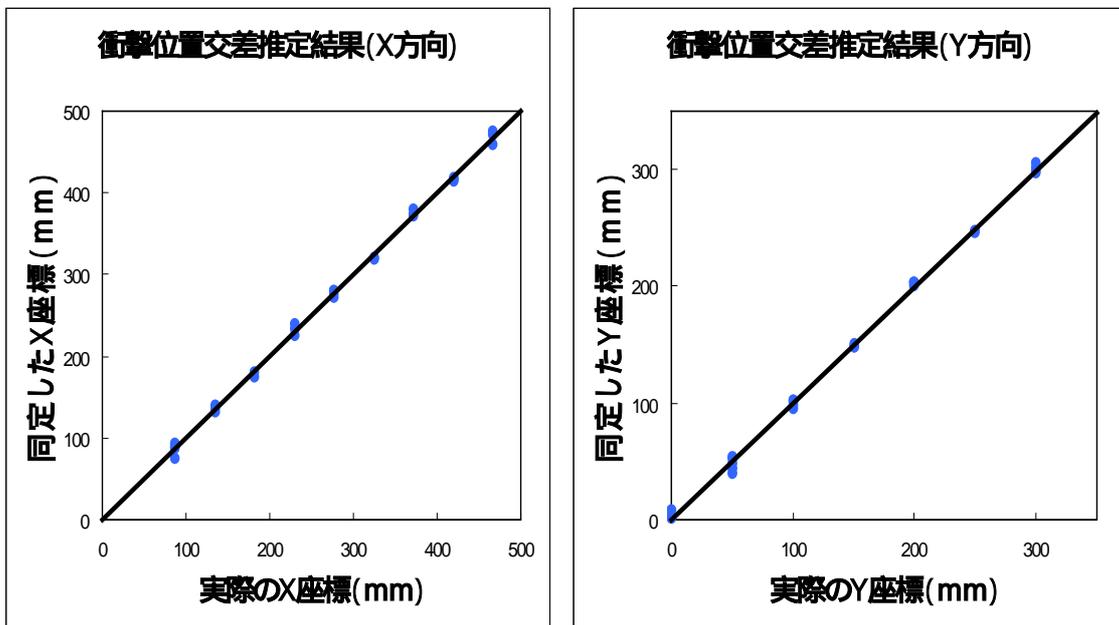


図4.23 衝撃位置交差推定結果

図4.2.2を見るとわかるように、従来の4センサ位置同定法ではX方向の誤差の平均が12.6mm、Y方向が10.1mmであるのに対し、応答曲面法での同定では誤差の平均がX方向では1.77mm、Y方向では1.44mmと非常に高い精度の同定ができることがわかる。また、図4.2.3を見ると交差推定を行ってもほとんど実際の座標を同定できていることがわかる。これは、作成された応答曲面に新たなデータを当てはめ、正確に同定できたことから位置同定が正確にできていることを表す。よって応答曲面法がCFRP積層平板の伝播速度の異方性や、スティフナが張られているなど構造上の特殊性にも対応できていることがいえる。そのため、応答曲面法がCFRP積層平板に加えられた衝撃位置を同定することができ、実際の工業製品に応用するにあたって非常に有意であることを示している。

2.4.2.4に示す加速度センサでの実験との違いは大きさと計測精度の違いである。大きさの違いにより到達遅延時間に差ができ、詳細の計測精度でかなり正確な到達遅延時間が計測された。実際大きさではX方向、Y方向ともに二倍、もしくは二倍以上の違いがある。また、計測精度では、宇宙航空研究開発機構(JAXA)のデータでは、4つのAEセンサへの到達時間が最小0.1 μ sの精度まで容易に計測でき、時間差を割り出すことができたのに対し、他方、加速度センサでの実験の計測精度は、最小10 μ sの精度までしか計測できなかった上、計測機器の性質上センサごとに2.5 μ sずつずれて階段状に計測されている。このため、計測精度の違いが位置同定の結果として表れていると考えられる。エネルギー同定には加速度センサによる低コストな計測機器で十分であるが、位置同定には高精度な計測システムが必要といえる。

第5章 結論

この章ではこれまで行ってきた、応答曲面法による CFRP 積層平板の衝撃モニタリングについての結論を述べる。

5.1 結論

今回、さまざまな分野にてこれから活躍が期待されるであろう複合材料のなかで幅広く利用され始めている CFRP 積層平板に焦点を当てて研究を行った。CFRP 積層平板では、衝撃が加わるとその衝撃の大きさによっては外側から目視不可能な損傷が層内に発生し、最終的には大きな破壊につながるということがわかっており、その CFRP 積層平板において平板に加わった衝撃の位置と程度を同定することは大型構造物への適用には必要不可欠である。提案手法はリアルタイム計測により構造内の衝撃履歴 (= 層間はく離マップ) の同定を目的としている。衝撃履歴の同定は、構造の危険度の判断だけではなく、メンテナンスもしくは交換時の決定など、さまざま活用できると考える。

今回本研究を行い、以下のことを結論とする。

- ・ 衝撃エネルギーレベルに対しての高い精度の同定が可能であり、AE センサを用いた衝撃位置同定は、応答曲面法により非常に高い精度の同定が可能である。
- ・ 衝撃位置同定に関しては、高い精度の計測精度が必要である。

今回 AE センサを用いた衝撃位置同定では、応答曲面法によりかなり精度の高い同定が可能であった。そのため CFRP 積層平板やその構造に特殊性があった場合に対しても、振動波のセンサごとの到達遅延時間を求めることができれば応答曲面法による位置同定は非常に有意である。今後は課題としては、到達遅延時間計測の自動化があげられる。

加速度センサを用いた衝撃同定では、位置同定は失敗に終わったがそれは実験精度に起因するもので今後精度を上げる、もしくは試験片の拡大で AE センサを用いた場合と同様に位置同定ができると考えられる。また衝撃のエネルギーに関しては、応答曲面法と波の変動和を用いることで衝撃のレベルをほぼ同定することができた。そのためこれからは、位置同定もエネルギー同定に関しても計測機器の計測精度を上げることや試験片の拡大、そしてさまざまな衝撃で実験を行うなど、より詳細で実用化に近い形で実験により、現実に診断手法の確立につなげたい。

参考文献

- 1) 岩崎篤, 轟章 : 電気抵抗変化法を用いた CFRP 層間はく離検出の診断手法の検討
応答曲面とニューラルネットワークの比較 : 日本複合材料学会誌 Vol . 27
No . 4 別刷 (2001)
- 2) R.H. Myers & D.C. Montgomery: Response Surface Methodology: Process and
Product Optimization Using Designed Experiments: SECOND EDITION, John Wiley & Sons
Inc., New York (2002)
- 3) 三木光範・福田武人・元木信弥・北條正樹 : 複合材料, 共立出版株式会社,(1997)
- 4) <http://health.yahoo.co.jp/column/detail?idx0=w0802007>
- 5) http://www.toyo.co.jp/pcb/pdf/kasoku01_08.pdf
- 6) http://www.toyo.co.jp/pcb/pdf/kasoku79_80.pdf
- 7) 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) (2004)
- 8) 仲佐博裕 : アコースティックエミッションの理論と実際, 地人書館, (1994)

あとがき

謝辞

今回1年間卒業論文を行うにあたって、指導教官をしていただいた酒井先生、泉先生をはじめ研究室の皆様にご一年間誠にありがとうございました。この場をお借りいたしまして厚く御礼申し上げます。そして、特に岩崎助手には多大なご迷惑をおかけいたしましたが、それにもかかわらず最初から最後まであらゆることに関しましてご指導いただき、本当にありがとうございました。また、CFRP積層平板作成に当たりましては艦装研究室の大沢助手、鵜沢助手、金井技術官にいつも丁寧にご指導いただき誠にありがとうございました。

最後に、この一年間自分がお世話になりましたすべての方々にお礼を述べさせていただいて終わりしたいと思います。

一年間本当にありがとうございました。

以上

1 P ~ 5 2 P 完

卒業論文

平成 1 7 年 2 月 4 日提出

3 0 2 2 0 松下 竜大