

## 計測ひずみによるCFRP翼構造の 荷重・応力同定と損傷モニタリング

東北大学 福永久雄



ひずみ応答の  
計測データ

ひずみゲージ  
or PZTセンサ

静的分布荷重同定  
動的分布荷重同定



応力・ひずみ分布の予測  
損傷発生位置の推定

### 発表内容

- (1) 荷重同定1: 1点衝撃荷重同定
- (2) 荷重同定2: 分布荷重同定
- (3) 今後の予定

1

### 荷重同定問題の分類

#### (1) 同定荷重の種類

点荷重・分布荷重 静的荷重・動的荷重

例: 1点衝撃荷重(工具落下、雹・小石衝突、鳥衝突等)

静的分布荷重(定常水平飛行時の空力荷重)、

動的分布荷重(変動する運動荷重、突風荷重等)

#### (2) 実験的荷重同定と解析モデルに基づく荷重同定

実験的荷重同定: 実験的なデータのみを用いてひずみセンサ  
応答より荷重を同定

解析モデルに基づく荷重同定: FEM等の解析モデルに基づい  
て、ひずみ実験データと解析データの誤差を最小化

実験的荷重同定法の利点: 複雑な構造に適用可能

2

## 荷重の種類

### (1) 1点集中衝撃荷重

- ・工具落下、雹・小石衝突、鳥衝突(小領域の分布荷重)
- ・衝撃損傷の発生・CAI強度の低下
- ・飛行中の実時間モニタリング
- ・危険の回避
- ・地上での詳細な検査および修理

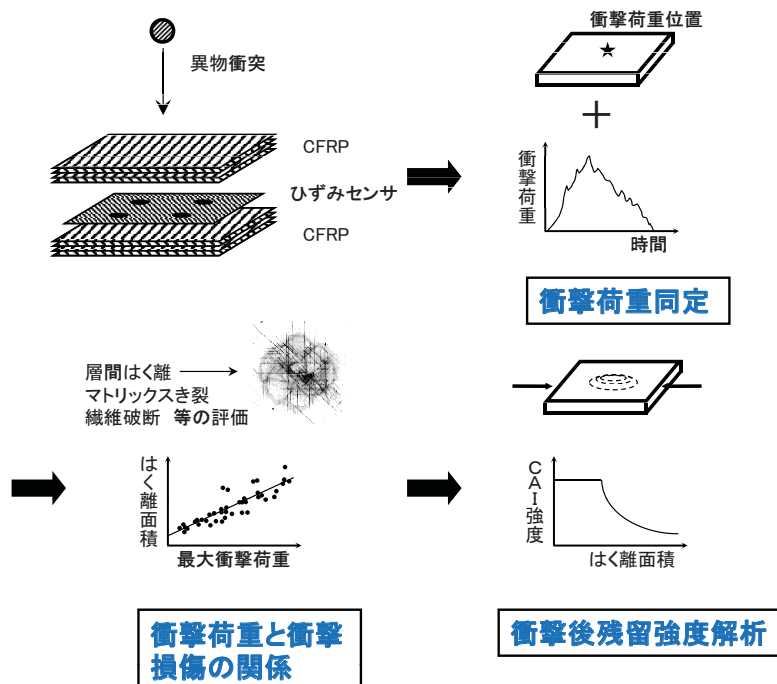
### (2) 分布荷重

- ・飛行中の実時間モニタリング
- ・静的空力荷重～応力状態のモニタリング
- ・動的空力荷重～応力・変形状態のモニタリング、  
疲労損傷、制御

➡ 少ないセンサ数で高精度の荷重同定法の確立

3

## CFRP構造の実験的衝撃荷重同定



4

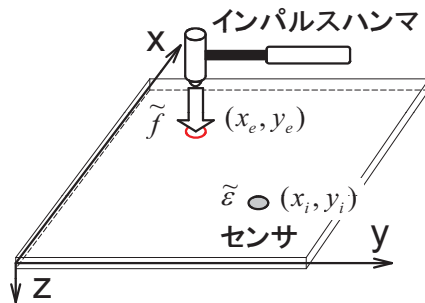
### 衝撃荷重とひずみ応答との関係

$$\{\tilde{\varepsilon}\} = [G(x_i, y_i, x_e, y_e)] \{\tilde{f}\}$$

↑  
ひずみ応答

↑  
インパルスハンマ

(PZT センサ or ひずみゲージ)



- $\tilde{\varepsilon}$  : センサ応答
- $\tilde{f}$  : 衝撃荷重
- $G$  : 変換行列
- $(x_i, y_i)$  : センサ位置
- $(x_e, y_e)$  : 荷重位置

5

### 実験的変換行列の決定法

#### 衝撃荷重とセンサ応答との関係

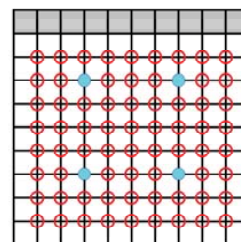
$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & & & 0 \\ \varepsilon_2 & \varepsilon_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \varepsilon_m & \varepsilon_{m-1} & \dots & \varepsilon_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_m \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 & & & 0 \\ f_2 & f_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ f_m & f_{m-1} & \dots & f_1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_m \end{Bmatrix}$$

$$\{\varepsilon_i\} = [G_i] \{f\} = [F] \{g_i\}$$

#### 最小二乗法

$$\min_{\{g_i\}} H = \sum_{k=1}^K \|\{\varepsilon_i\} - [F_k] \{g_i\}\|^2 \Rightarrow \{g_i\}$$

計測データ

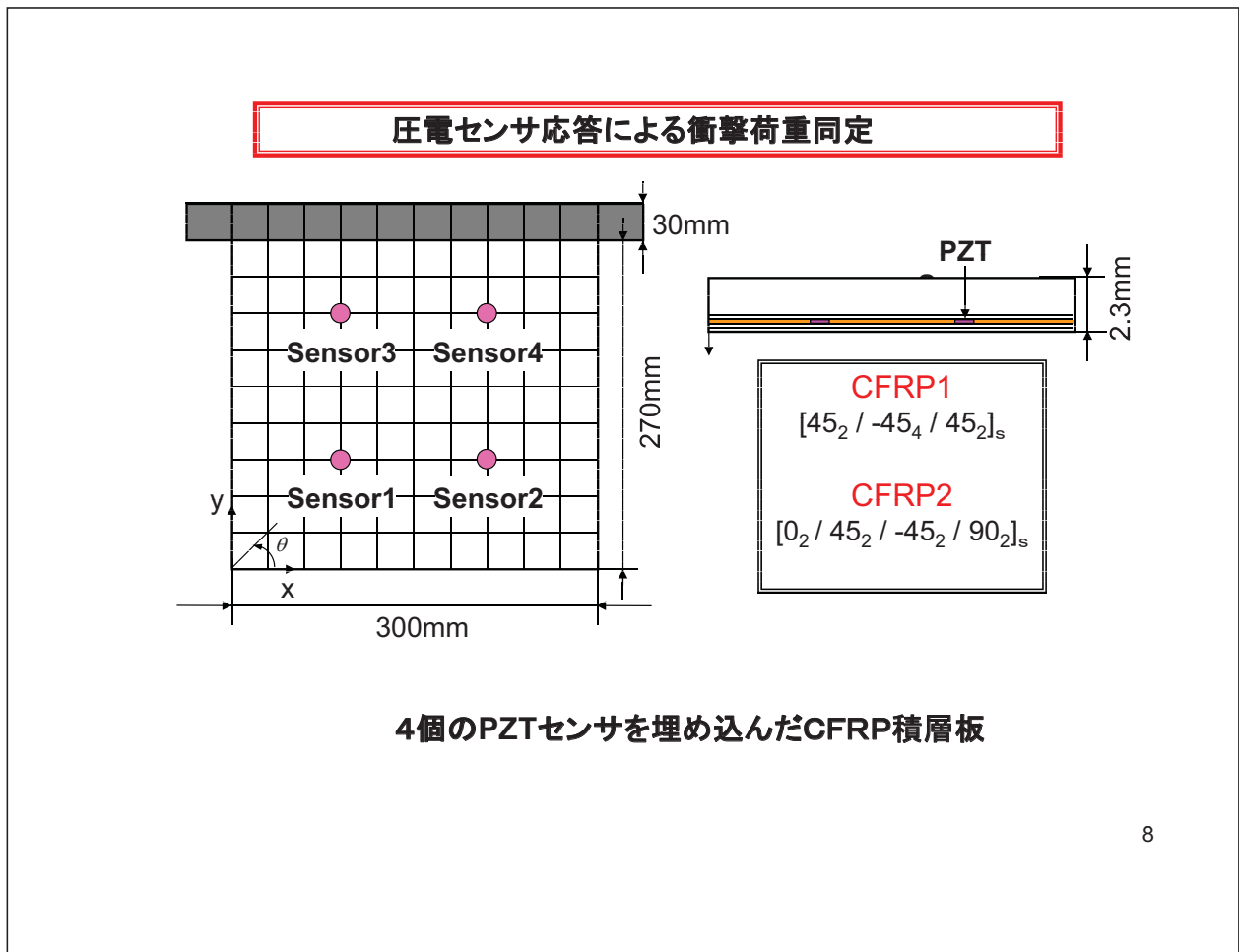
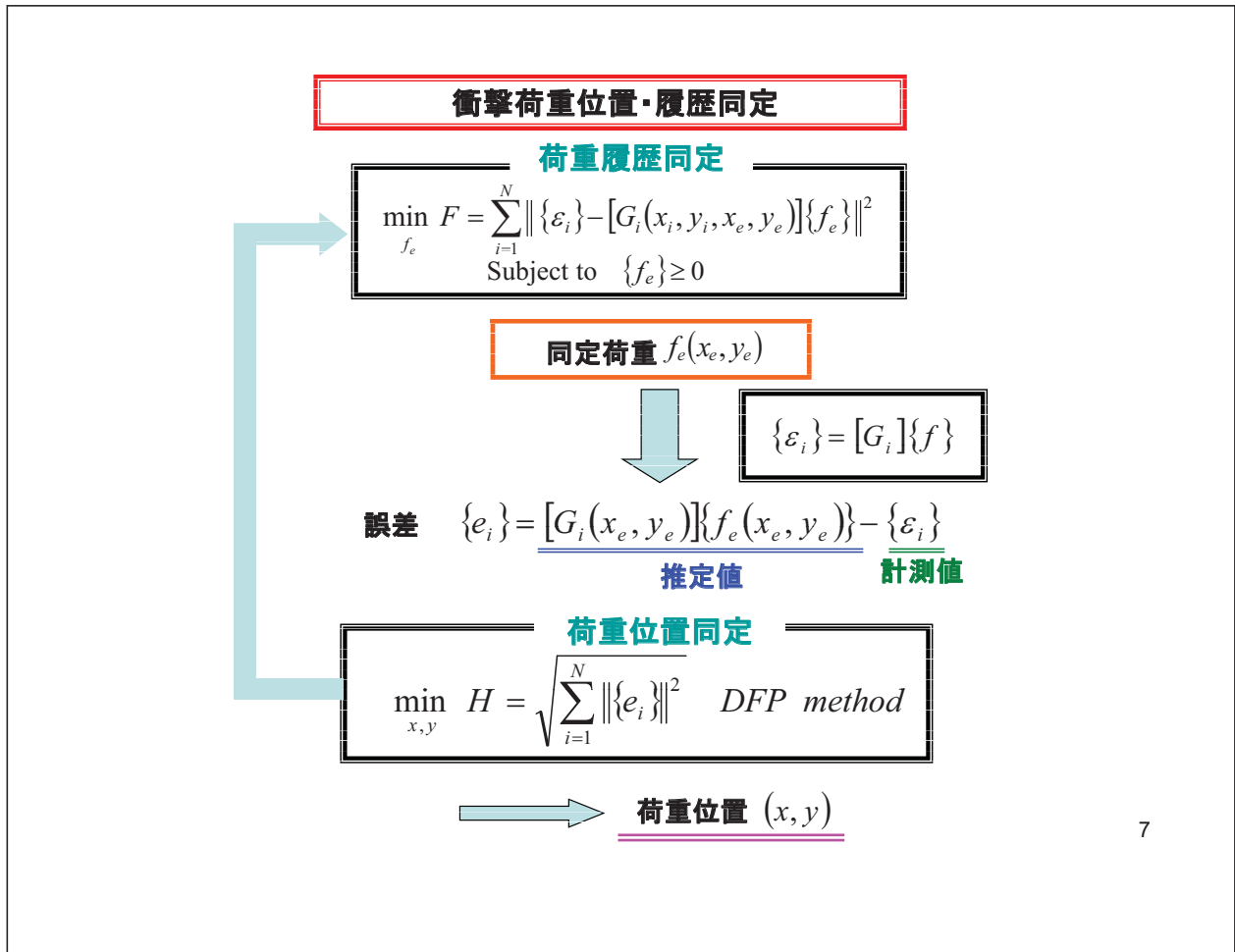


- Sensor
- Clamped Edge
- Impact Points

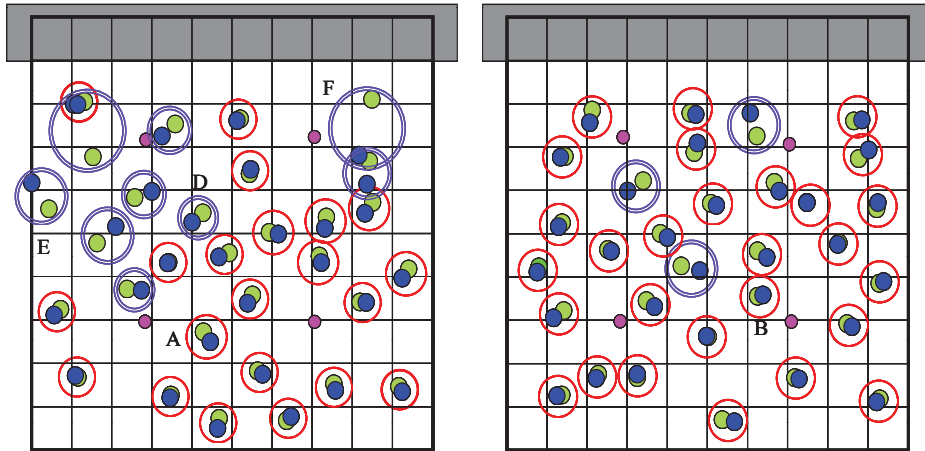
すべての格子点で  
変換行列を決定

↓  
格子点内部は補間

6



### CFRP片持積層板の荷重位置同定結果

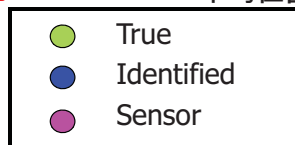


(a) CFRP1:  $[45_2 / -45_4 / 45_2]_s$

平均位置誤差: 8.5mm

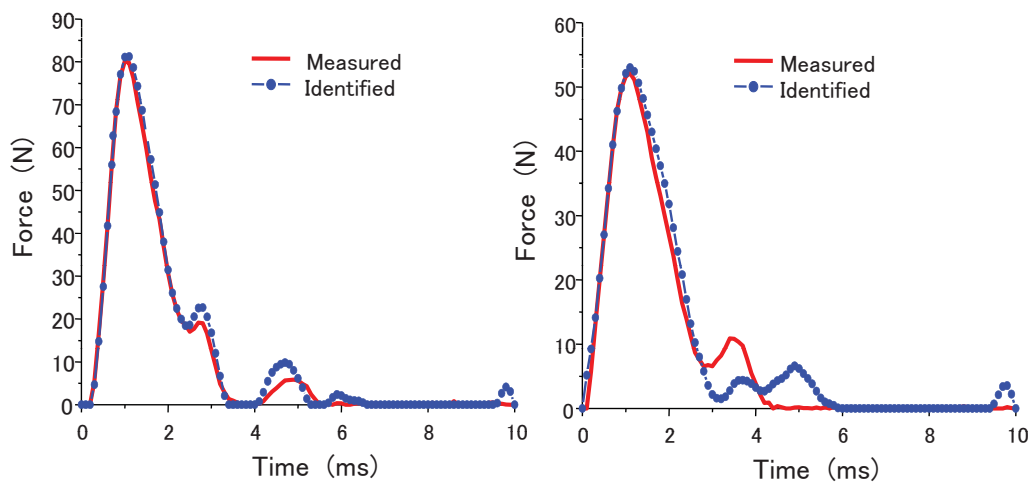
(b) CFRP2:  $[0_2 / 45_2 / -45_2 / 90_2]_s$

平均位置誤差: 4.1mm



9

### CFRP片持積層板の衝撃荷重履歴同定

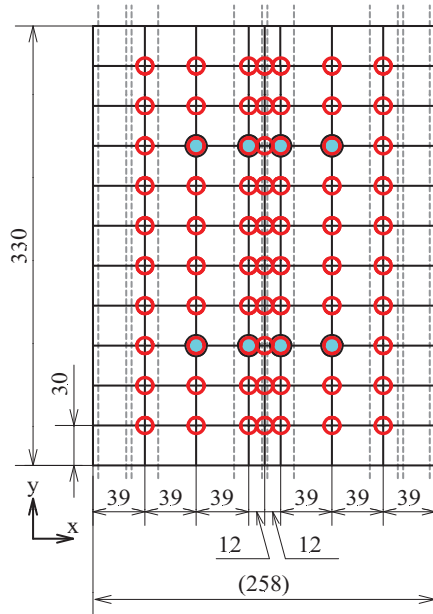
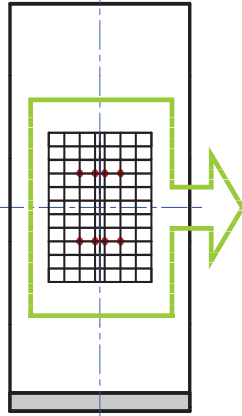
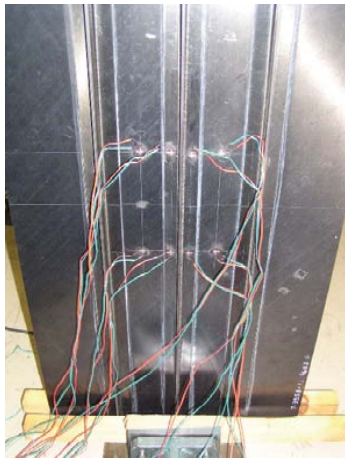


(a) CFRP1: point A

(b) CFRP2: point B

10

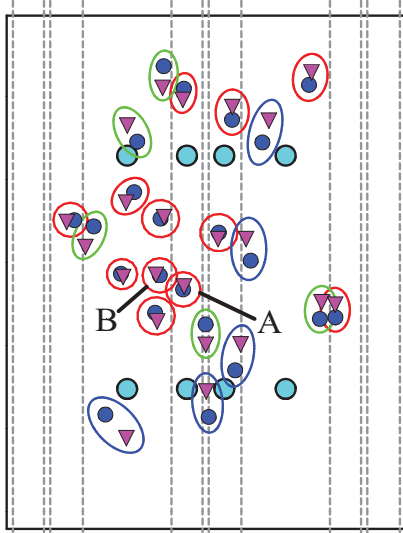
**CFRP補強パネル(CF/PEEK)**



- Strain Gauge
- Impact Points
- Clamped Edges

11

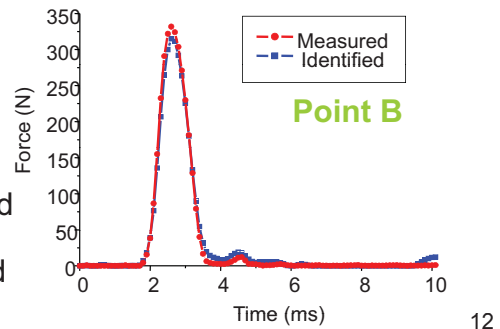
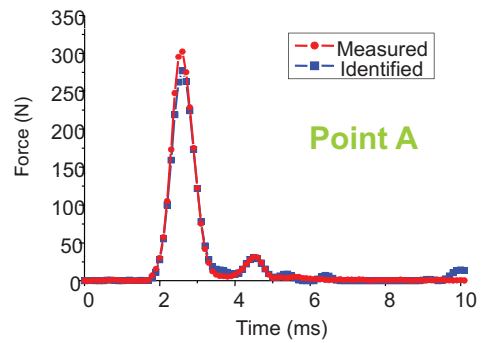
**CFRP補強パネルの衝撃荷重位置・履歴同定**



Average error

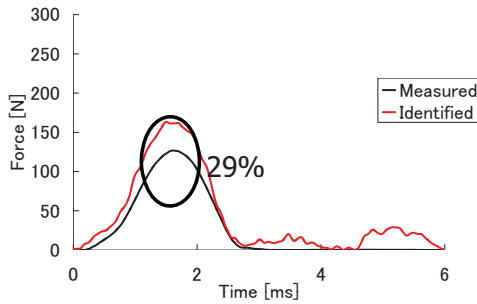
$$\Delta d_{average} = 9.2mm$$

- Measured
- ▼ Identified
- Sensor

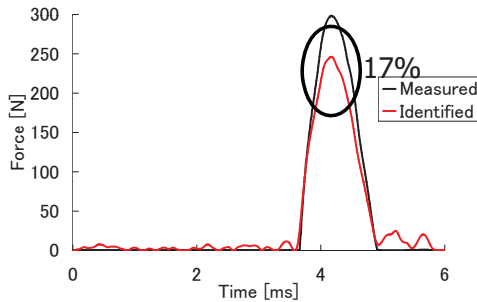


12

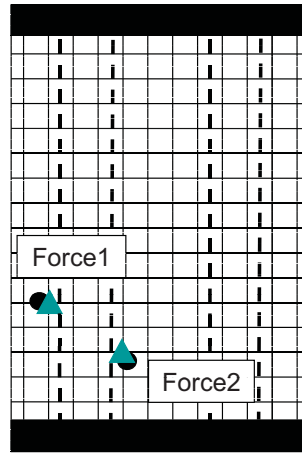
**二点荷重を受けるCFRP補強パネルの衝撃荷重位置・履歴同定**



Force1(インパクトB)荷重履歴同定結果



Force2(インパクトA)荷重履歴同定結果



●: True location  
▲: Identified location

Force	Error [mm]
Force1	8.1
Force2	9.9

13

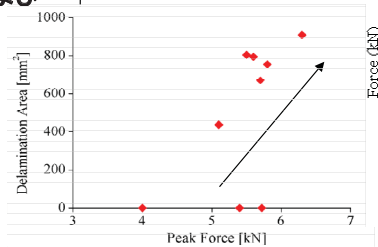
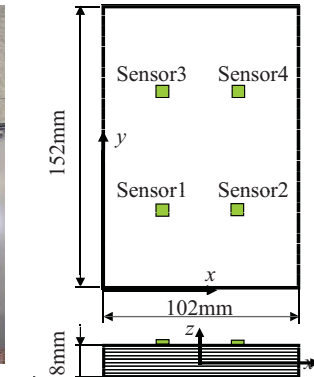
**CFRP積層板の衝撃荷重同定による損傷モニタリング**



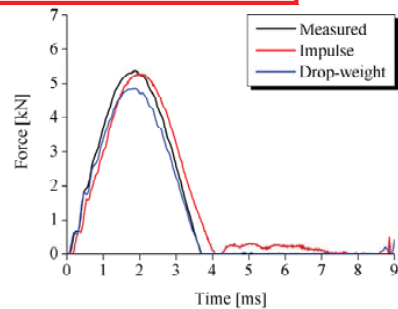
落錘衝撃試験機 (JAXA) および SACMA試験片

・同定荷重による損傷有無の判定～荷重履歴形状からの推定

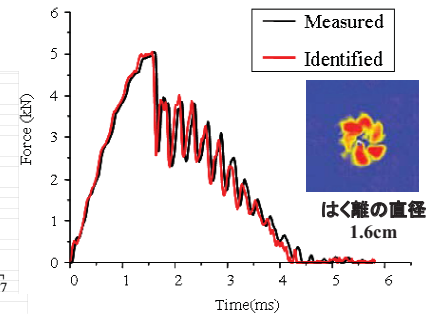
・最大衝撃荷重からの損傷面積の推定



最大衝撃荷重とはく離面積の関係



4.8J(損傷無し): 半正弦波状荷重形状



4.8J(損傷あり): 刃状の荷重形状

14

### 計測ひずみによる荷重分布同定

#### ■FEMモデル

□圧力分布から節点荷重を計算

$$\{f\} = [H]\{p\}$$

□有限要素法モデルの作製

$$[K]\{u\} = \{f\}$$

□節点におけるひずみを計算

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}$$

計測点でのひずみ値を取得  
 → ひずみ × (1 + 乱数 × 最大誤差)  
 を計測値として与える

#### ■逆解析

□ひずみ応答と荷重の関係式

$$\{\varepsilon\} = [G]\{f\}$$

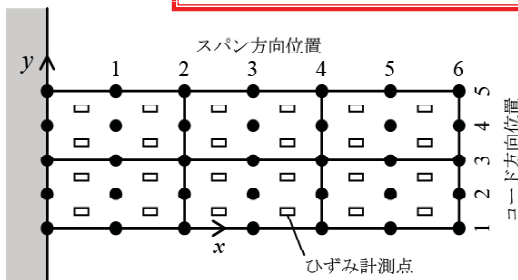
□節点荷重の同定

$$\min_{\{f\}} \|\{\varepsilon\} - [G]\{f\}\|^2$$

□圧力分布の同定

$$\{p\} = [H]^{-1}\{f\}$$

### 静的計測ひずみによる圧力分布同定

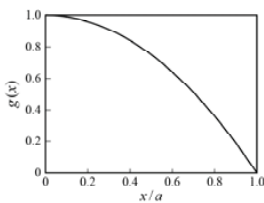


FEM解析モデル

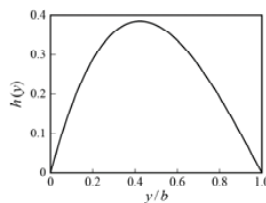
外力(圧力分布)

$$p(x, y) = g(x) \times h(y)$$

$$g(x) = \left\{ 1 - \left( \frac{x}{a} \right)^2 \right\}, \quad h(y) = \frac{y}{b} \left( 1 - \frac{y}{b} \right) \left( 2 - \frac{y}{b} \right)$$



(a) スパン方向



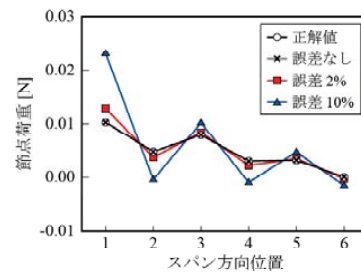
(b) コード方向

圧力分布形状 (a=1.2, b=0.4)

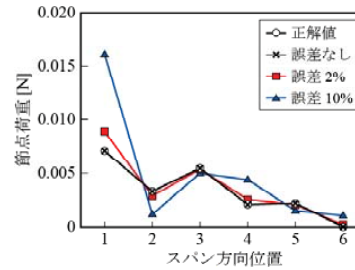
同定結果 (節点力を最小二乗法で同定)

荷重点:30点, 計測ひずみ ( $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ ):48点

計測誤差:各点ひずみ × (1+乱数 × 最大誤差)



(a) コード方向位置:2



(b) コード方向位置:3

分布外力同定結果(計測誤差の影響大)



### 多項式近似による圧力分布の表示

#### ■圧力分布の多項式近似

$$p(x, y) = g(x) \times h(y)$$

$$g(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m$$

$$h(y) = b_0 + b_1y + b_2y^2 + \dots + b_ny^n$$

#### ■係数決定問題に帰着

$$\{f\} = [H]\{c\}$$

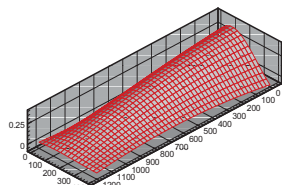
$$\{c\}^T = \{c_1 \quad c_2 \quad \dots \quad c_n\} \quad c_1 = a_0b_0, \quad c_2 = a_0b_1, \quad c_3 = a_0b_2, \quad \dots$$

$$\Rightarrow \min_{\{c\}} \|\{e\} - [G][H]\{c\}\|^2$$

⇒ ◆少ない未知数を同定 → 計測点数の減少

17

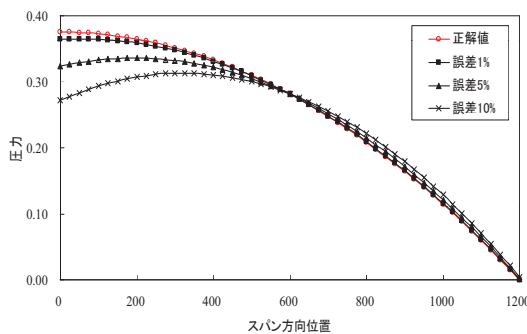
### 圧力分布同定結果: 計測誤差・計測点数の影響



有限要素分割: スパン方向24, コード方向8

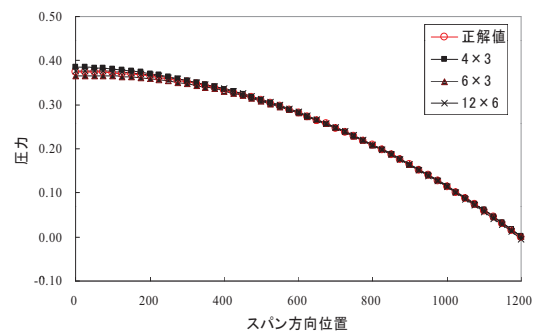
スパン1200xコード400 計測ひずみ ( $\epsilon_{xx}, \epsilon_{yy}$ )

計測誤差: 各点ひずみ × (1 + 乱数 × 最大誤差)



計測誤差の影響 (コード方向位置: 200)

計測点数: スパン方向...6点  
コード方向...3点

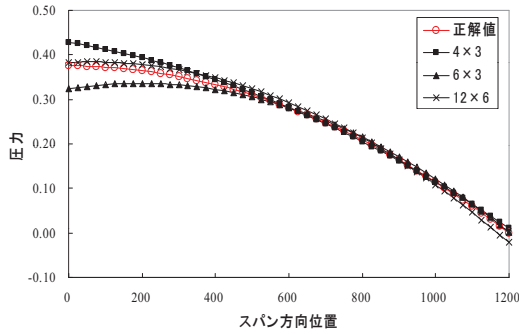


計測点数の影響 (コード方向位置: 200)

計測誤差: 1%

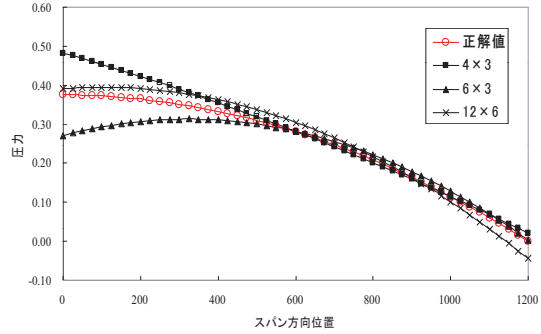
18

**圧力分布同定結果:計測誤差・計測点数の影響**



**計測点数の影響** (コード方向位置:200)

計測誤差:5%



**計測点数の影響** (コード方向位置:200)

計測誤差:10%

**今後の予定**

年度	研究目標	研究課題と方法
H23	ひずみ応答を用いた静的・動的荷重分布の同定法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・1点集中衝撃荷重の衝撃荷重位置と荷重履歴の同定</li> <li>・圧力分布の多項式近似による係数決定問題</li> <li>・最適なセンサ配置</li> <li>・適切化項導入によるill-posed問題の改良</li> </ul> を用いて、少数のセンサ計測により計測誤差にロバストな荷重同定法を開発する
H24	荷重分布同定法の確立と、同定した分布荷重からの応力・ひずみ分布予測法の開発	<ul style="list-style-type: none"> <li>・荷重同定法の片持CFRP板による実験的検証と同定法の改良</li> <li>・同定分布荷重によるFEMによる応力・ひずみの予測</li> <li>・少数のひずみ計測データのみを用いた応力・ひずみ分布の予測</li> </ul>
H25	損傷発生位置推定法の開発、および、本手法の集中荷重問題への適用と妥当性検証	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同定した応力・ひずみ分布から損傷発生位置の推定</li> <li>・CFRP補強パネルおよび落錘衝撃を受ける積層板に適用し、本研究で提案する手法の妥当性の検証</li> </ul>