

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) 静的分布荷重同定(数値シミュレーション+実験)
- (2) 動的分布荷重同定(数値シミュレーション)
- (3) 今後の予定

1

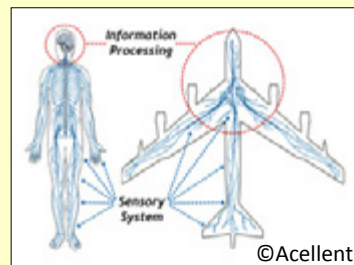
研究背景

構造ヘルスマニタリング

センサを構造に表面貼付あるいは内蔵

- 健全性を常時監視
- 荷重を実時間でモニタリング

⇒ 安全性・信頼性の向上
整備コストの削減



ひずみ応答の計測データ

ひずみゲージ
PZTセンサ

荷重同定

衝撃荷重(点荷重)

小石・雹・鳥の衝突

静的分布荷重

定常飛行時の空力荷重

動的分布荷重

離着陸時等の変動する
運動荷重、突風荷重

2

従来の研究

衝撃荷重同定に関する研究

- 宮澤ら、日本複合材料学会誌、**33**(2007)
→ CFRP複合材構造の実験的衝撃荷重位置・履歴同定
- Changら、AIAA Journal, **47**-9(2009)
→ Monitoring Impact Events Using a System-Identification Method

分布荷重同定に関する研究

- 中村ら、日本航空宇宙学会論文集、**56**-659(2008)
→ ひずみデータを用いた連続分布荷重逆解析法の研究

- ⇒
- 点荷重の同定手法に関する研究は数多く報告されている
 - 連続分布荷重の同定手法に関する研究は少なく、基礎的な研究段階にある

3

本研究の目的

分布荷重同定

構造各部の応力・ひずみ状態の予測
損傷発生位置の推定



より高精度な
構造ヘルスマニタリング

本研究の目的

- 計測ひずみにより翼構造に作用する**分布荷重**を同定する手法の提案
 - 静的分布荷重同定
 - ・ 数値シミュレーションにより同定手法の妥当性の検証
 - ・ 実験により同定手法の妥当性の検証
 - 動的分布荷重同定
 - ・ 数値シミュレーションにより同定手法の妥当性の検証

4

本発表の構成

1. 研究背景
2. 静的分布荷重同定
 - 2.1 解析手法
 - 2.2 数値シミュレーションによる検証
 - 2.3 実験による検証
3. 動的分布荷重同定
 - 2.1 解析手法
 - 2.2 数値シミュレーションによる検証
4. まとめ
5. 今後の課題

5

静的分布荷重同定：二つの手法

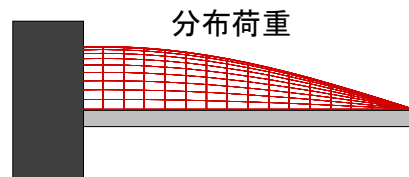
片持ち板翼に対して垂直に連続分布荷重が作用する場合

有限要素法の静的変形の基礎式



ひずみと節点荷重の関係

$$\{\varepsilon_i\} = [G_i] \{p\} \quad (1)$$



- 同定手法①：圧力分布の**離散近似**による手法

最小化問題

$$\min_{\{p\}} \sum_{i=1}^m \|\{\tilde{\varepsilon}_i\} - [G_{di}] \{p\}\|^2 \quad (2)$$

$\{\varepsilon_i\}$: 計測点 i におけるひずみ
 $[G_i]$: 計測点 i に対応する変換行列
 $\{p\}$: 節点における圧力ベクトル

- 同定手法②：圧力分布の**多項式近似**による同定手法

$$p(x, y) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S c_{rs} x^r y^s \quad (3)$$

$$\{c\}^T = \{c_{00} \quad c_{10} \quad c_{01} \quad \dots \quad c_{RS}\}$$

最小化問題

$$\min_{\{c\}} \sum_{i=1}^m \|\{\tilde{\varepsilon}_i\} - [G_{pi}] \{c\}\|^2 \quad (4)$$

6

数値シミュレーション：解析モデル

FEM

要素：9節点アイソパラメトリック平面要素
 要素分割：x方向24 y方向8
 境界条件：一辺固定(x=0)

計測点：等間隔に配置
 計測誤差： $\{\tilde{\varepsilon}_i\} = \{\varepsilon_i\} \times (1 + e \times E_{max}/100)$
 e：一様乱数 (-1 ≤ e ≤ 1) **E_{max}：最大誤差 [%]**

同定に用いるひずみ成分： $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$

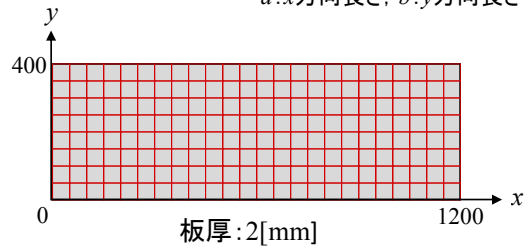
材料定数

$$E = 72[\text{GPa}] \quad \nu = 0.3 \quad \rho = 2710[\text{kg/m}^3]$$

与える外力(圧力分布)

$$p(x, y) = \left\{ 1 - \left(\frac{x}{a} \right)^2 \right\} \times \frac{y}{b} \left(1 - \frac{y}{b} \right) \left(2 - \frac{y}{b} \right) \quad (10)$$

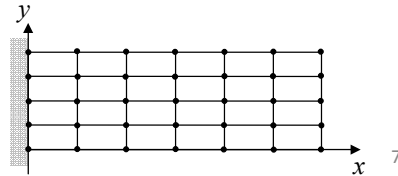
a:x方向長さ, b:y方向長さ



圧力分布同定

離散近似 要素分割:x方向5 y方向4

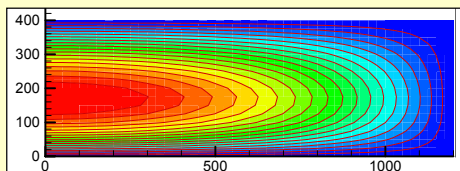
多項式近似 多項式の次数:x方向2 y方向3



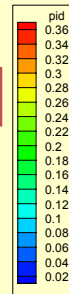
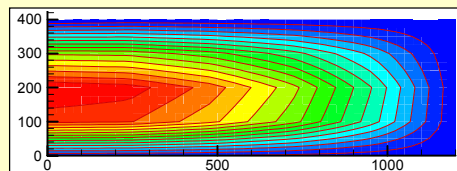
同定手法①(圧力の離散近似)

圧力分布の同定結果

想定した圧力分布



同定結果 計測誤差なし(E_{max}=0)



ひずみ情報に誤差が含まれない場合



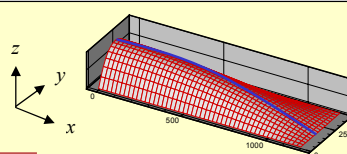
本手法により高精度に同定可能

※誤差は離散点の間で線形近似による誤差のみ

同定手法① (圧力の離散近似)

圧力分布の同定結果

x方向の圧力分布の同定結果
(y方向200mm)

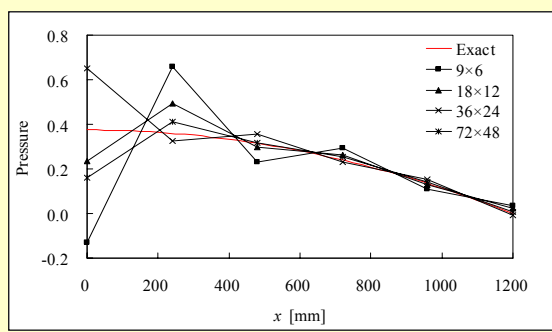
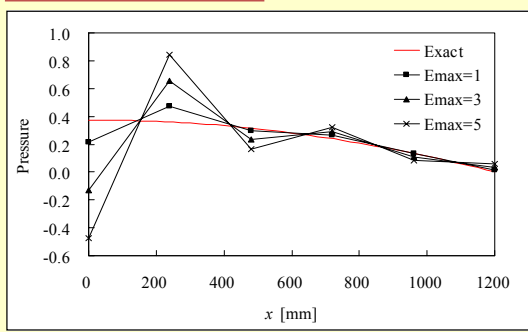


計測誤差の影響

計測点数
x9点 y6点

計測点数の影響

計測誤差
E_{max}=3



計測誤差の増加 → 同定精度**低下**

計測点数の増加 → 同定精度**向上**

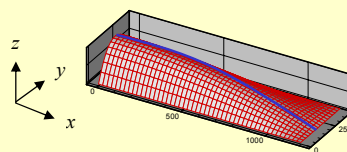
⇒ 逆問題の不適切性の改善(L-Curve法等)で若干精度改善可

9

同定手法② (圧力の多項式近似)

圧力分布の同定結果

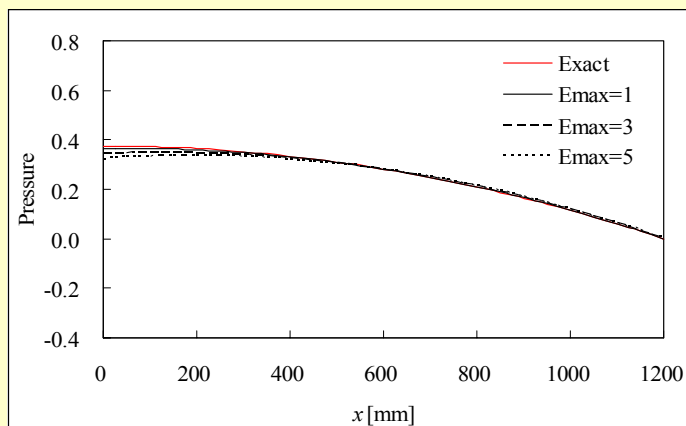
x方向の圧力分布の同定結果
(y方向200mm)



計測誤差の影響

計測点数:x方向6点、y方向3点

$$\text{多項式: } p(x, y) = \sum_{r=0}^R \sum_{s=0}^S c_{rs} x^r y^s \quad (R=2, S=3)$$

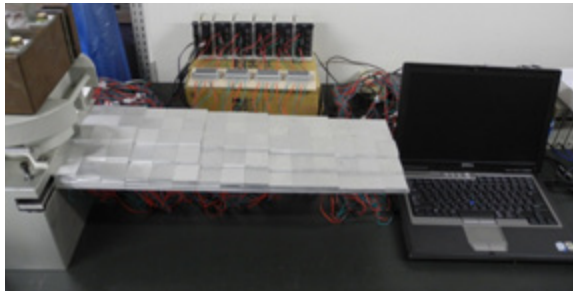


離散近似による手法に比べて
より大きな計測誤差に対して
より少ない計測点数で

⇒ 精度良く同定可能

10

静的荷重試験



試験片(アルミニウム)

長さ: 600 mm
幅: 200 mm
厚さ: 5 mm

センサ(二軸ひずみゲージ)

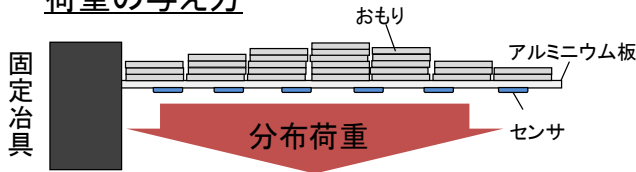
数: x方向15個、y方向5個

おもり(アルミニウム)

長さ: 40 mm
幅: 40 mm
厚さ: 5 mm
重量: 22 g/枚

x方向: 15列
y方向: 5列

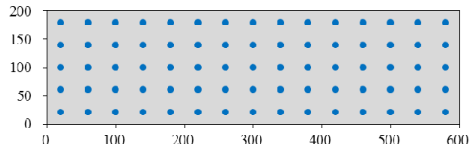
荷重の与え方



おもりの配置

2	2	2	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2	2
3	3	3	4	4	4	6	6	6	4	4	4	3	3
4	4	4	6	6	6	7	7	7	6	6	4	4	4
3	3	3	4	4	4	6	6	6	4	4	4	3	3
2	2	2	3	3	3	4	4	4	3	3	2	2	2

センサ配置

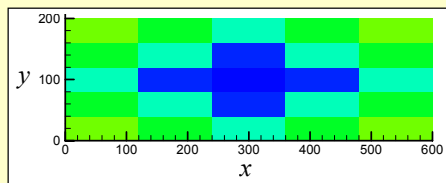


静的分布荷重同定

圧力分布の同定結果

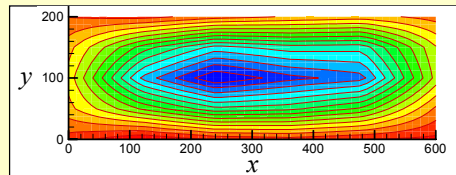
計測点数: x方向15点 y方向5点 (二軸ひずみゲージ)

正解値



同定結果

■ 同定手法① 要素分割: x方向5 y方向4



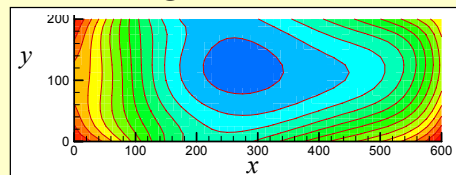
ERMS=0.538

ERMS (Error Root Mean Square)

$$ERMS \equiv \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (p_n - p_{0n})^2}{\sum_{n=1}^N p_{0n}^2}}$$

p_n : 逆解析で得られる節点での圧力値
 p_{0n} : 式より得られる節点での圧力値(正解値)
 n : 節点番号

■ 同定手法② 多項式の次数: x方向6 y方向4



ERMS=0.337

動的分布荷重(荷重とひずみの関係)

順解析

有限要素法に基づく薄板の運動方程式

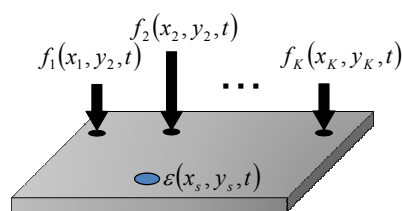
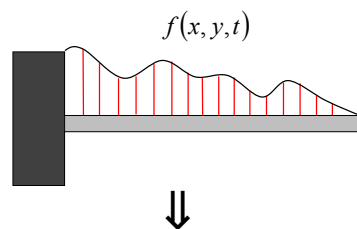
↓ モード解析法

ひずみ履歴と荷重履歴の関係

$$\{\tilde{\varepsilon}\} = [G(x_s, y_s, x, y)] \{\tilde{f}\}$$

$$\{\tilde{\varepsilon}\} = [\varepsilon(t_1) \ \varepsilon(t_2) \ \dots \ \varepsilon(t_m)]^T \quad [G(x_s, y_s, x, y)] = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & \dots & 0 \\ g_2 & g_1 & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & 0 \\ g_m & g_{m-1} & \dots & g_1 \end{bmatrix}$$

$$\{\tilde{f}\} = [f(t_1) \ f(t_2) \ \dots \ f(t_m)]^T \quad t = t_m (= m\Delta t)$$



分布荷重 = 複数の荷重

複数の荷重(K個)が作用する場合

$$\begin{bmatrix} \varepsilon(t_1) \\ \vdots \\ \varepsilon(t_m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11} & \dots & 0 & g_{K1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ g_{1m} & \dots & g_{11} & g_{Km} & \dots & g_{K1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1(t_1) \\ \vdots \\ f_1(t_m) \\ \vdots \\ f_K(t_1) \\ \vdots \\ f_K(t_m) \end{bmatrix}$$

$$\{\tilde{\varepsilon}_i\} \quad [G_1] \quad [G_K] \quad \{\tilde{f}_K\}$$

13

動的分布荷重(同定式)

逆解析

分布荷重を点衝撃(点荷重)として同定

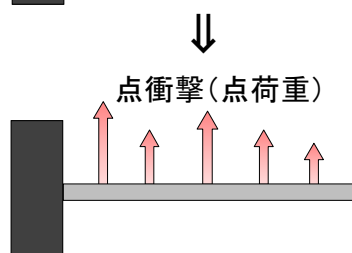
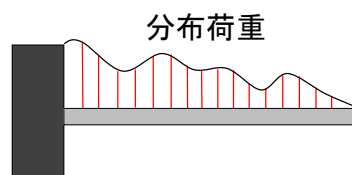
i番目センサ ($i=1,2,\dots,N$)におけるひずみ履歴

$$\{\tilde{\varepsilon}_i\} = [[G_{i1}] \ \dots \ [G_{iK}]] \begin{Bmatrix} \{\tilde{f}_1\} \\ \vdots \\ \{\tilde{f}_K\} \end{Bmatrix}$$

↓ 各センサについて成立

$$\begin{Bmatrix} \{\tilde{\varepsilon}_1\} \\ \{\tilde{\varepsilon}_2\} \\ \vdots \\ \{\tilde{\varepsilon}_N\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [G_{11}] & [G_{12}] & \dots & [G_{1K}] \\ [G_{21}] & [G_{21}] & \dots & [G_{2K}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [G_{N1}] & [G_{N1}] & \dots & [G_{NK}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\tilde{f}_1\} \\ \{\tilde{f}_2\} \\ \vdots \\ \{\tilde{f}_K\} \end{Bmatrix}$$

$$\{\tilde{\varepsilon}\} \quad [G] \quad \{\tilde{f}\}$$



荷重履歴同定(荷重位置は既知と仮定)

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

$[G_{i,k}]$: センサ*i*と f_k を関係づける変換行列

14

数値シミュレーション：解析モデル

FEM

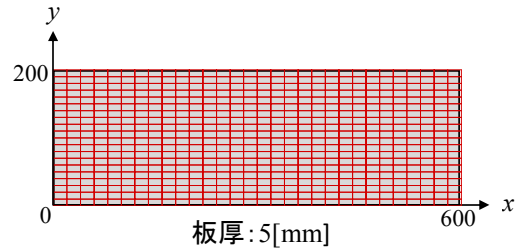
要素：9節点アイソパラメトリック平面要素
 要素分割：x方向30 y方向20
 境界条件：一辺固定(x=0)

計測点数：x方向15 y方向5
 計測誤差： $\{\tilde{\varepsilon}_i\} = \{\varepsilon_i\} \times (1 + e \times E_{max}/100)$
 e：一様乱数 (-1 ≤ e ≤ 1) Emax：最大誤差 [%]

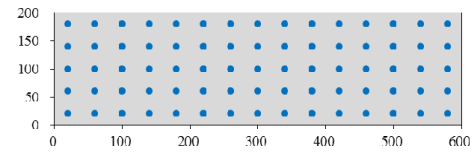
離散時間の間隔：1 μs
 計算時間：15 ms

材料定数

$$E = 72[\text{GPa}] \quad \nu = 0.3 \quad \rho = 2710[\text{kg/m}^3]$$



計測位置 (x方向ひずみとy方向ひずみを取得)



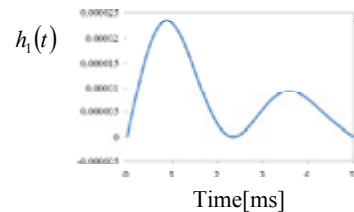
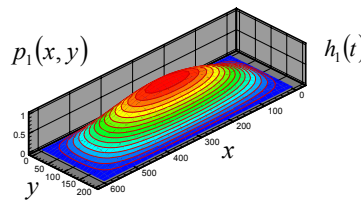
解析モデル

FEM

与える外力 (圧力分布)

$$p(x, y, t) = \sum_{i=1}^9 p_i(x, y) h_i(t)$$

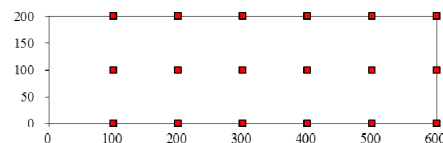
i: 基底の番号 a: x方向長さ
 h_i(t): 時間の関数 b: y方向長さ



荷重履歴同定

点荷重：x方向6 y方向3
 同定時間の間隔：50 μs
 同定時間：15 ms
 同定に用いるひずみ成分：面内ひずみ(ε_{xx} + ε_{yy})

同定する点荷重の位置



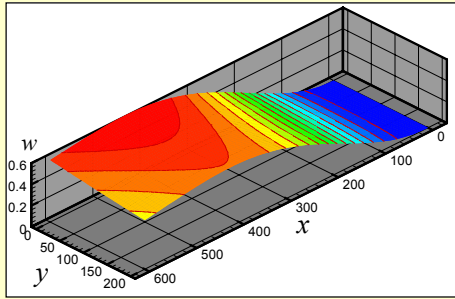
動的分布荷重同定結果 1

変形状態の比較

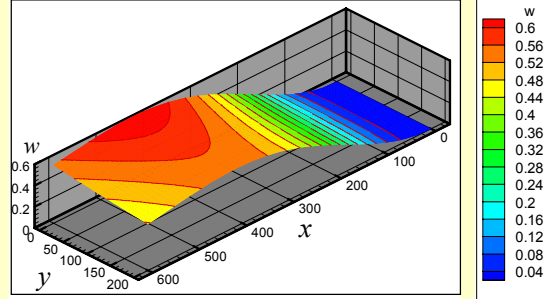
分布荷重を点荷重として同定 → 変形状態で精度を検証

計測誤差: 10% 時刻: 5 ms

想定した圧力分布による変形



同定した荷重による変形

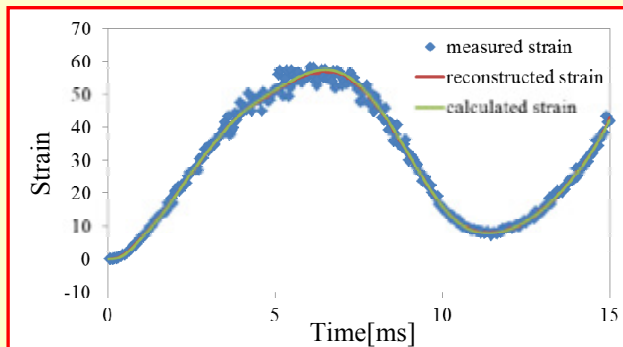


⇒ 精度良く同定可能

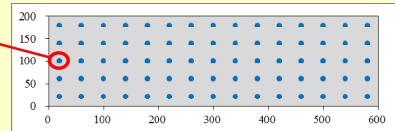
動的分布荷重同定結果 2

ひずみ履歴の比較

計測ひずみと同定した荷重により算出したひずみ履歴の比較



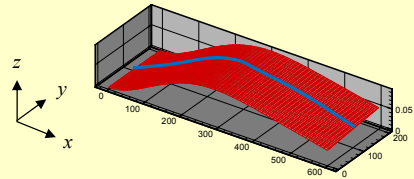
計測位置: (20, 100)



動的分布荷重同定結果3

変形状態

x方向の変位の同定結果
(y方向100mm)

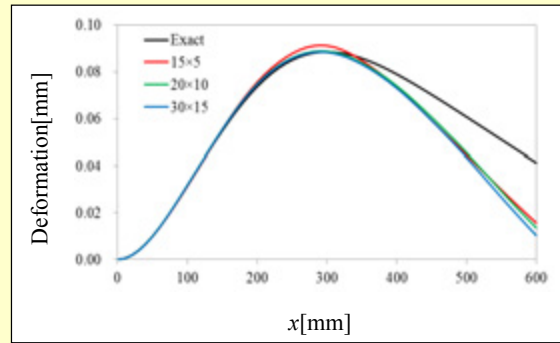
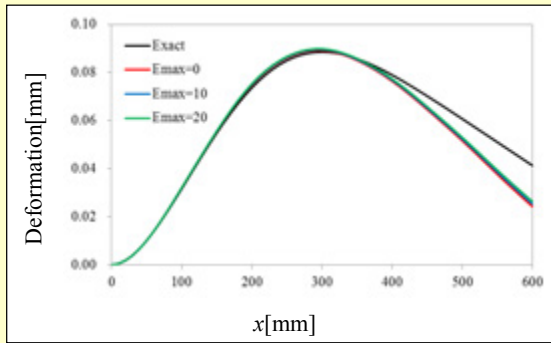


計測誤差の影響

計測点数
x15点 y5点

計測点数の影響

計測誤差
E_{max}=10



まとめ

静的分布荷重同定と動的分布荷重同定の比較

	計測誤差の影響	
静的	非常に大きい 計測誤差が同定荷重の誤差に直接影響	精度向上のためには 膨大な計測点数が必要、 多項式近似等の適用
動的	小さい 時刻歴データを考慮して荷重を同定するため 計測誤差の影響が時間的に平滑化される	

今後の課題

■ 静的分布荷重同定

- 数値シミュレーションによる検証
- 実験による検証

同定精度の向上: 各種パラメータが同定精度に及ぼす影響の検討

- センサ
- ・ 計測点数・位置
 - ・ 計測誤差

21

今後の課題

■ 動的分布荷重同定

- 数値シミュレーションによる検証
- 実験による検証

各種パラメータが同定精度に及ぼす影響の検証

- センサ
- ・ 計測点数・位置
 - ・ 計測誤差

- 荷重
- ・ 同定する点荷重の数・位置
 - ・ 与える外力の種類

- FEMモデルを必要としない実験的分布荷重同定法の構築

22