

データ同化手法による 構造物に作用する荷重分布の推定 に関する基礎的検討

Fundamental Investigation on Estimation of Load Distribution Acting on Structure
by Using Data Assimilation

大阪府立大学 工学域
海洋システム工学課程
生島研究室

B4 宮本安啓

課題

過大な荷重により発生する応力やひずみは船体の損傷に繋がるため把握することが重要

- 破壊の原因となる応力の計測は運用中の船舶では極めて困難
→現状では計測部位のデータしか取得できない
- 計算機によるシミュレーションにおいても運用中の構造の力学的な状態を再現することは、荷重条件や境界条件などの不確実性により困難
→波浪の観測データのみでは得られない実海象及び船速、針路など多くの不確実性

2013年に発生したMOL COMFORTの折損事故

船体振動により船体に加わる荷重増加



横方向に加わる力による縦方向の船体強度の低下



安全基準を上回る船体強度をもつ設計であったが荷重が船体強度を上回り折損



事故当時のMOL COMFORT全体像

研究目的

- 構造的に**安全な**船舶の設計・運航
- 設計時の余剰な強度を防ぎ、燃費の向上といった**競争力の高い船舶**の設計

本研究のアプローチ

データ同化手法を用いたデジタルツイン技術

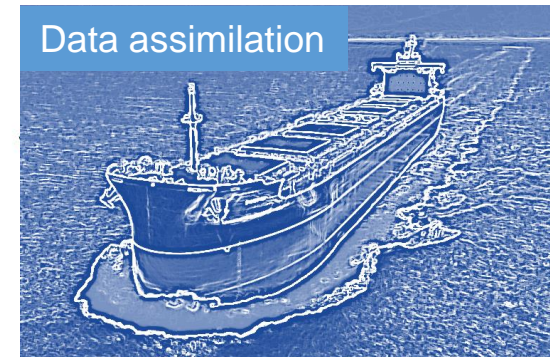
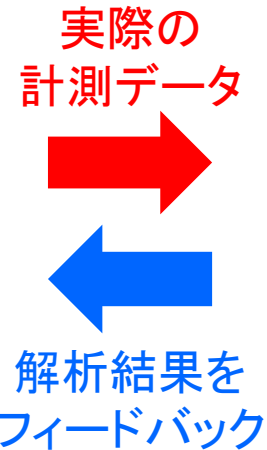
- 物理空間にある情報をIoTなどで収集し、そのデータを基に**仮想空間で物理空間を再現する技術**
- これまでの予測よりも現実空間をさらに**リアルタイム**で再現することが可能



現実空間

引用：JMU

ひずみゲージ等で計測を行う



仮想空間

計測結果と解析結果を融合し
実際の状態を推定する

本研究

- 現在の同様の研究とは異なり、**破壊・損傷**のより詳細な解析が可能であるソリッド要素を用いた**非線形構造解析**のデータ同化手法によるデジタルツインシステムの構築を目指す
- 本研究では、データ同化手法や計測条件などの基礎的検討を行う

カルマンフィルタ

シミュレーションに対象物の計測データを逐次的に反映させることで、対象物の状態をリアルタイムに推定可能

FEM解析などによる予測値とひずみなどの計測値を融合させデータ同化値(推定値)を表現

カルマンフィルタの基本式

$$\mathbf{X}_t^a = \mathbf{X}_t^f + \mathbf{K}_t (\mathbf{Y}_t^o - \mathbf{H}_t \mathbf{X}_t^f)$$

データ同化値 = FEMの値 + カルマンゲイン × (計測値 - FEMの値)

観測行列 \mathbf{H}_t : 行列のサイズを計算可能な形にそろえる係数

a → assimilation: データ同化値

f → forecast: 予測(FEM)

o → observation: 計測

カルマンゲイン \mathbf{K}_t で重み付け



データ同化値 \mathbf{X}_t^a は FEMの値 \mathbf{X}_t^f と計測値 \mathbf{Y}_t^o の最適な加重平均により求まる

カルマンゲインの定義式

FEMの値と計測値の重みを表現

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T (\mathbf{H}_t \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t)^{-1}$$

T : 行列の転置

カルマンゲイン = FEM予測誤差共分散行列 ÷ (FEM予測誤差共分散行列 + 計測誤差共分散行列)

カルマンフィルタの基本式に代入すると

$$\mathbf{X}_t^a = \frac{\mathbf{R}_t}{\mathbf{H}_t \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t} \mathbf{X}_t^f + \frac{\mathbf{P}_t^f}{\mathbf{H}_t \mathbf{P}_t^f \mathbf{H}_t^T + \mathbf{R}_t} \mathbf{Y}_t^o$$

FEM予測値と計測値に対する不確かさがそれぞれの値に作用し、誤差を最小にしている

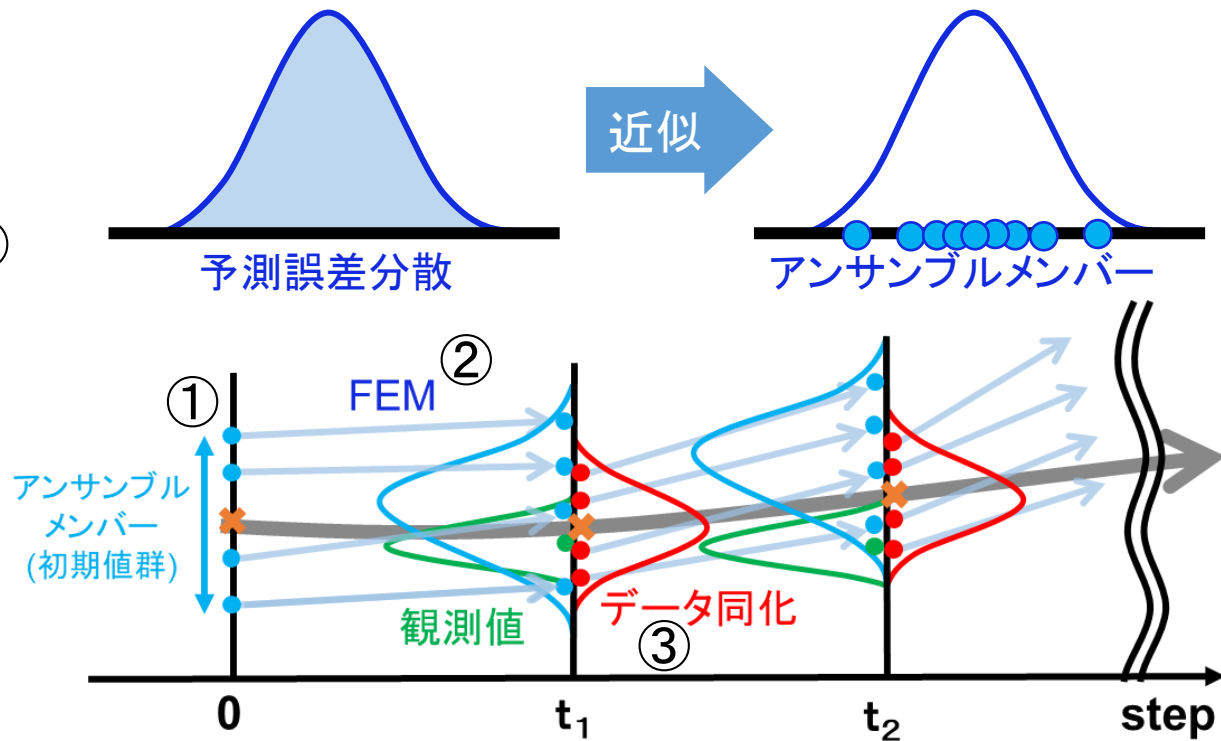
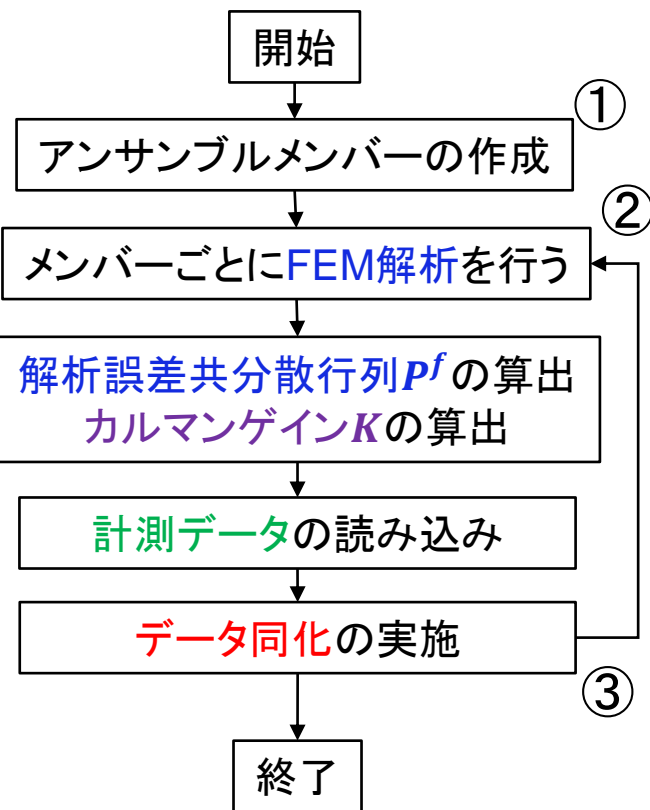
カルマンフィルタ 欠点

- 状態空間モデルが非線形の場合適用できない
- カルマンゲインの定義式の共分散行列が自由度 × 自由度モデルサイズの大きいモデルでは実現困難

アンサンブルカルマンフィルタ

本研究においてはデータ同化手法として**非線形問題**に対して用いることが可能なアンサンブルカルマンフィルタを用いる

初期値の周りにばらつかせた初期値群(アンサンブルメンバー)で解析誤差共分散行列を近似的に表現し, 計算の負担が少ない実用可能な領域の行列サイズを実現



本研究では, アンサンブルカルマンフィルタを計算速度で優れる理想化陽解法FEMに実装し, 荷重分布の推定を行った

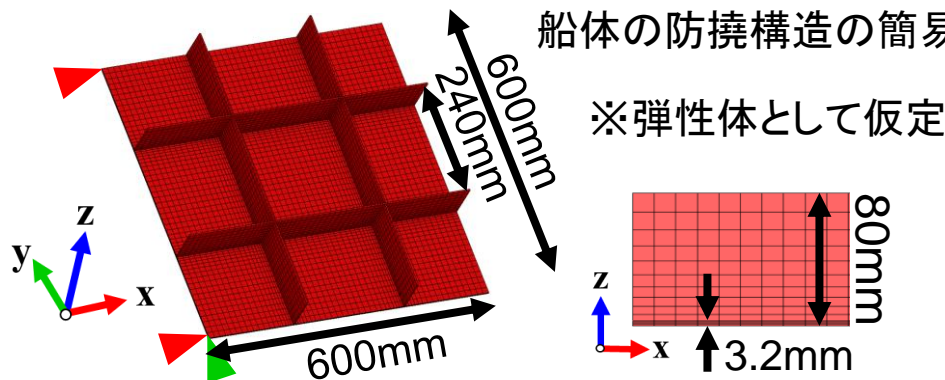
アンサンブルカルマンフィルタによるデータ同化の流れ

荷重推定に関する基礎的検討

解析目的

荷重分布の推定において、各条件を比較し、推定に適した条件を求める。

解析モデル



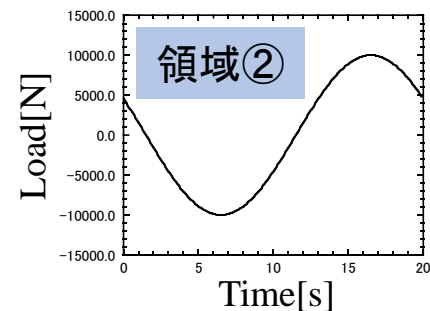
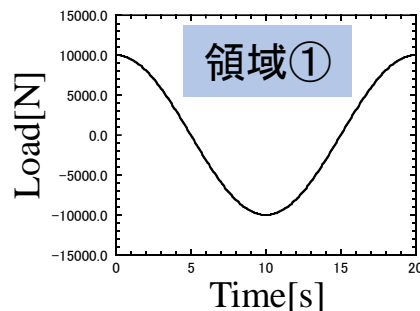
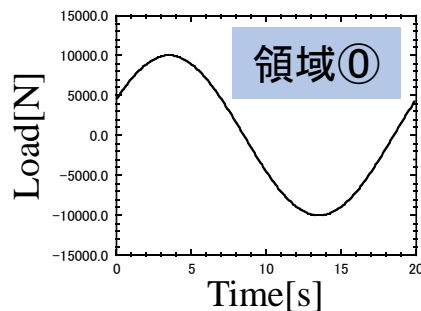
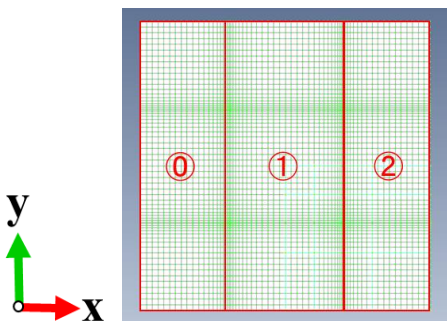
拘束条件

4辺単純支持,
右図の3方向

節点数	24165
要素数	21080
ヤング率	198[GPa]
ポアソン比	0.294

解析条件

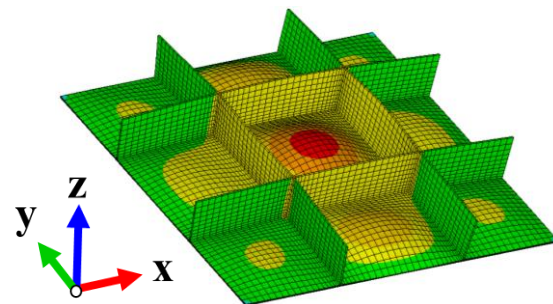
領域を分け荷重を負荷→進行する波を再現



それぞれの領域に対して、底面からz方向に荷重を与えた場合のFEM解析を行う(順解析)

順解析から得られた結果を荷重推定の際、推定精度の検証のために、データ同化における計測データとして用いる

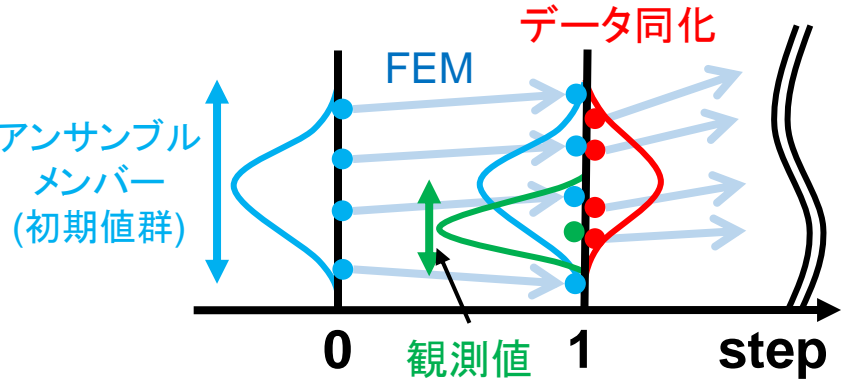
[mm]



z方向変位分布(3分割)
変形倍率: 100倍

計測誤差とシステムノイズの影響に関する検討

検討内容 アンサンブルメンバーと観測値の正規分布のばらつきの変化による推定精度の影響



システムノイズQ : アンサンブルメンバーに与える誤差
 計測誤差R : 観測値(計測データ)に与える誤差

本検討では, 荷重推定を行う



システムノイズQ → 荷重に対する誤差
 計測誤差R → 計測データ(ひずみ)に対する誤差

誤差を与える対象が異なる場合の
 適した値の設定を求める

システムノイズQ・計測誤差Rを用いて
 正規分布のばらつき具合を変化させる

・アンサンブルカルマンフィルタにおけるQ,Rの関係



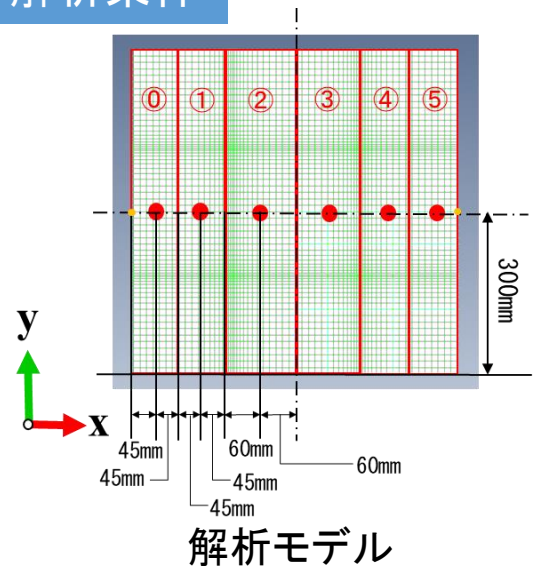
カルマンフィルタ・カルマンゲインに関する式

a → assimilation: データ同化値
 f → forecast: 予測(FEM)
 o → observation: 計測

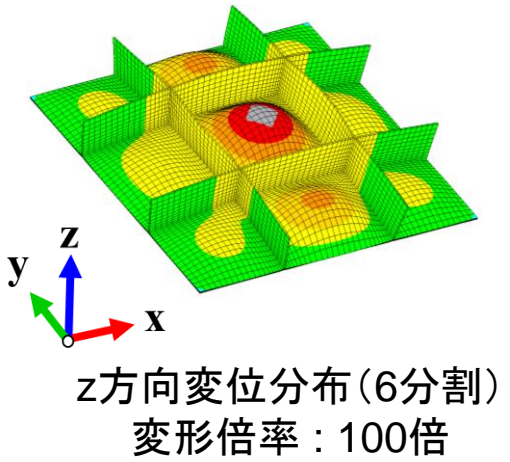
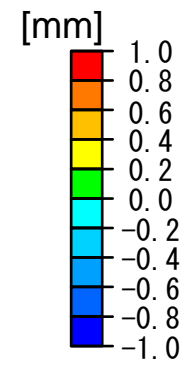
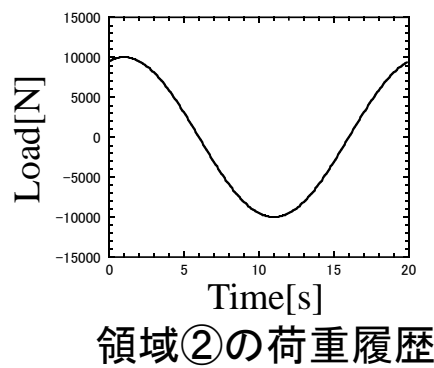
$$X_t^a = X_t^f + K_t (Y_t^o - H_t X_t^f) \quad \text{データ同化値} = \text{FEMの値} + \text{カルマンゲイン} \times (\text{計測値} - \text{FEMの値})$$

$$K_t = \frac{P_t^f H_t^T}{H_t P_t^f H_t^T + R_t} \quad \text{カルマンゲイン} = \frac{\text{FEM予測誤差共分散行列}}{\text{FEM予測誤差共分散行列} + \text{計測誤差共分散行列}}$$

解析条件



アンサンブルメンバー数: 50
 計測点: ● の位置 (x方向ひずみ)
 荷重推定: ①, ②, ③, ④, ⑤



解析結果

システムノイズQ → 荷重に対する誤差
 計測誤差R → 計測データ(ひずみ)に対する誤差

システムノイズQ, 計測誤差Rをそれぞれ、**荷重とひずみに対して同じ割合**で誤差を与えたときに誤差の小さい推定結果を得られた

Q \ R	1.0×10^7	1.0×10^6	1.0×10^5
10	372,732,461	2,025,996,786	3,038,005,002
100	2,337,368,441	361,204,141	529,385,750
1000	1,704,793,198	1,539,941,055	299,375,800

荷重推定値と真値における誤差二乗和

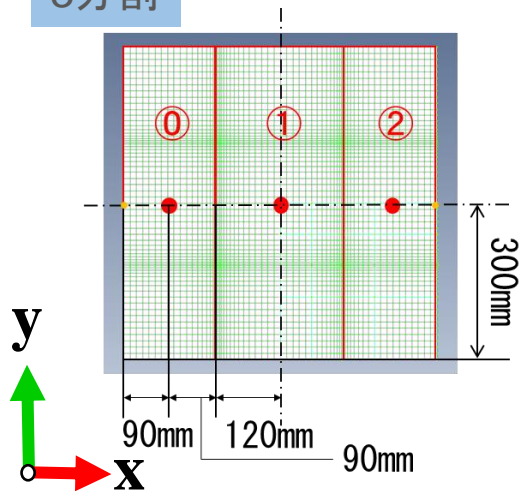
荷重解像度に関する検討

解析内容

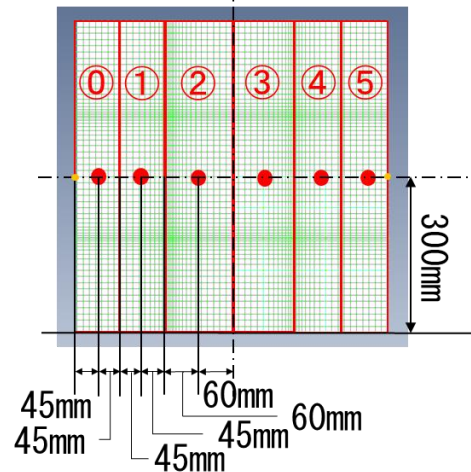
荷重分布の解像度を変化させ、推定精度に与える影響を調べる

計測点：●の位置(x方向ひずみ)

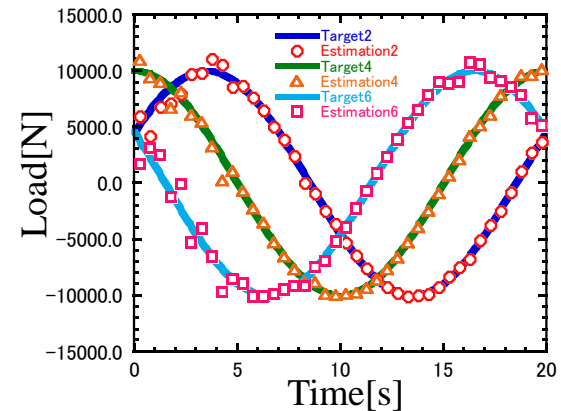
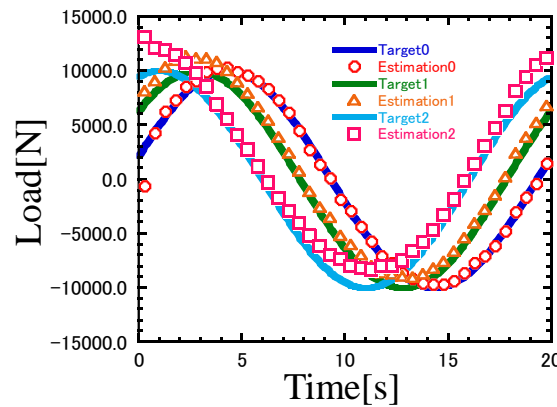
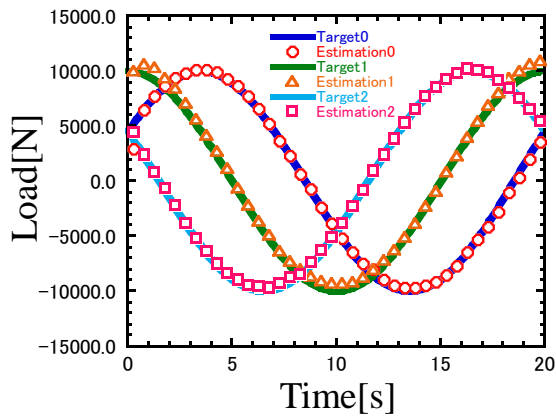
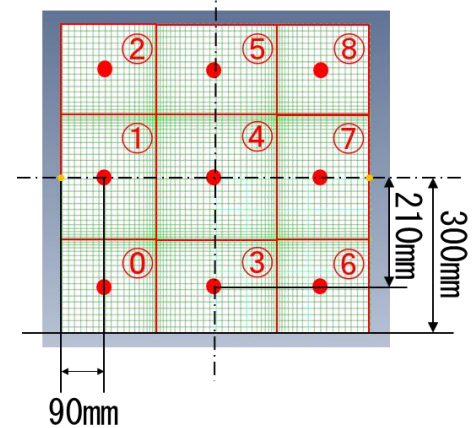
3分割



6分割



9分割

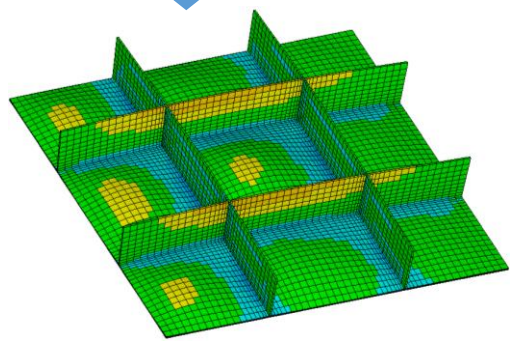
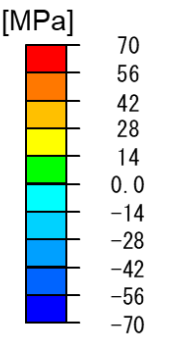
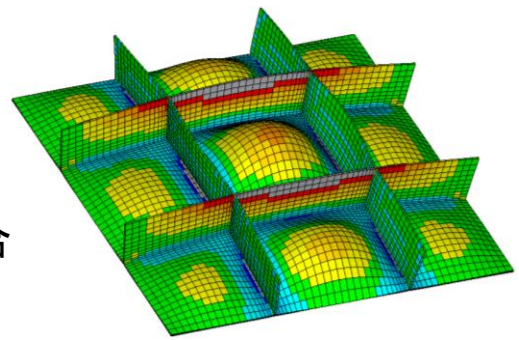
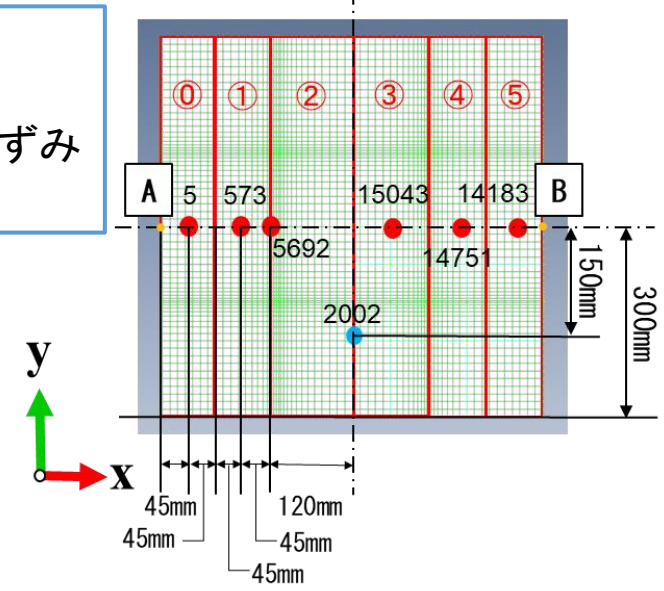
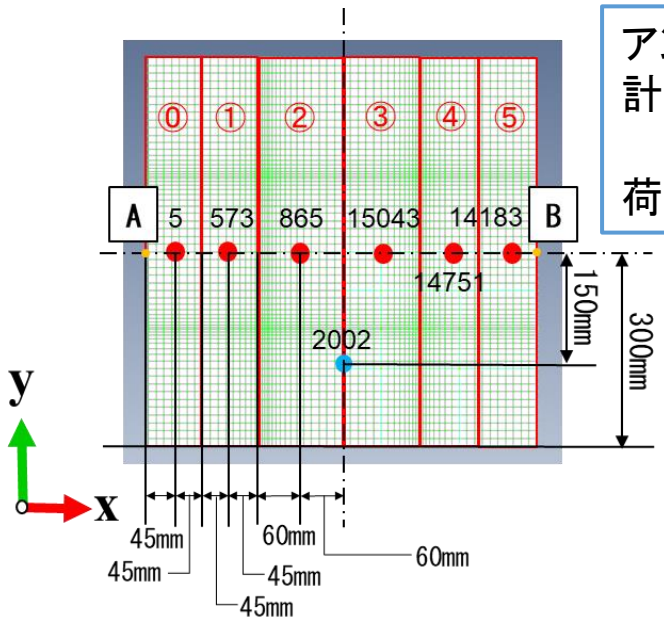


解像度に依らず真値と荷重推定値は良好に一致

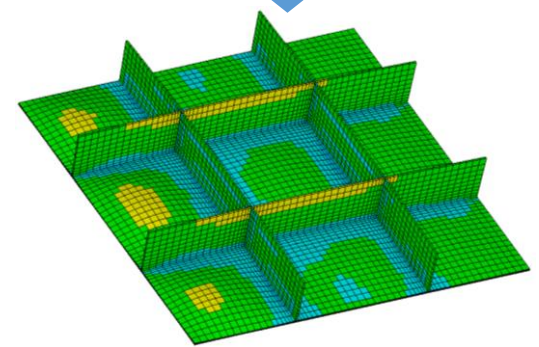
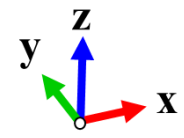
センサー位置・個数に関する検討

解析内容 センサー位置・個数を変化させ、推定精度に与える影響を調べる

アンサンブルメンバー数: 50
 計測点: ● の位置 (x方向ひずみ)
 立板上の点のみ y方向ひずみ
 荷重推定: ①, ②, ③, ④, ⑤

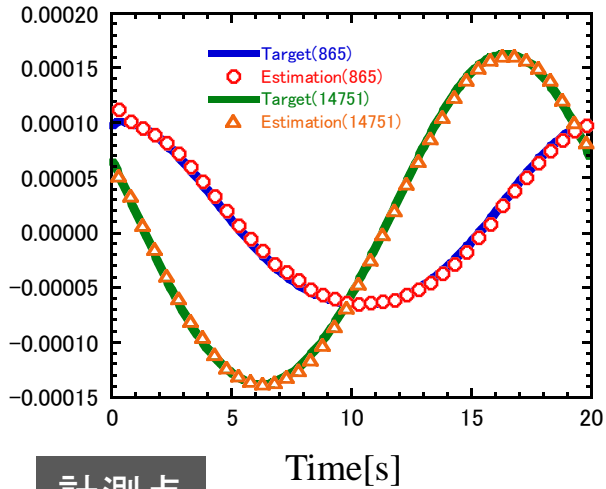


x方向応力分布
 変形倍率: 100倍

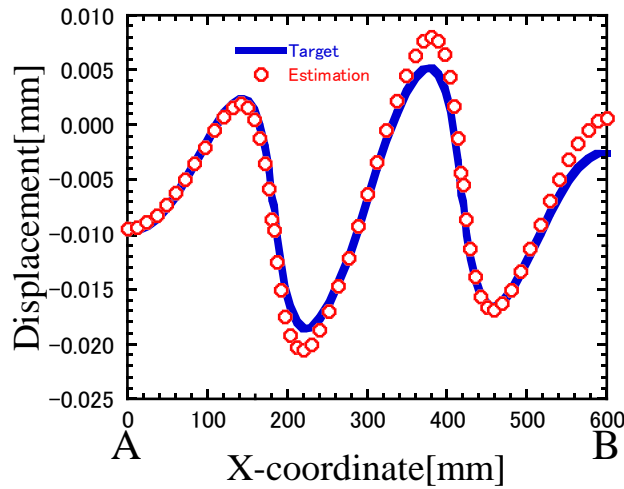


以下に示す全ての比較において、真値と推定値が良好に一致

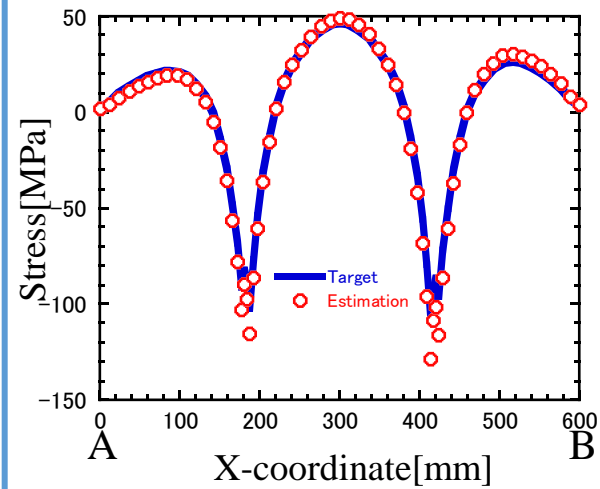
x方向ひずみ比較



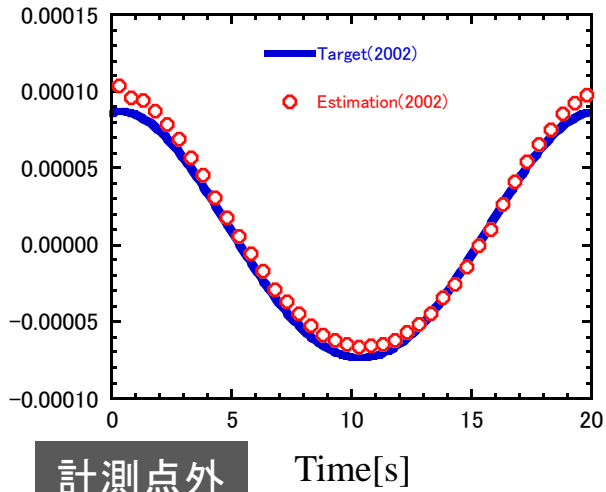
x方向変位比較



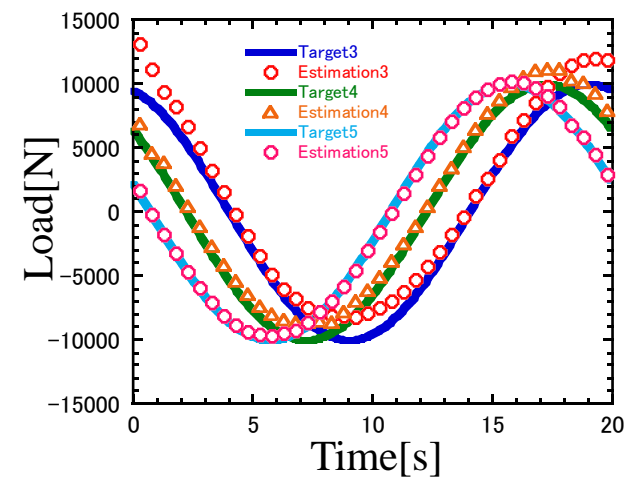
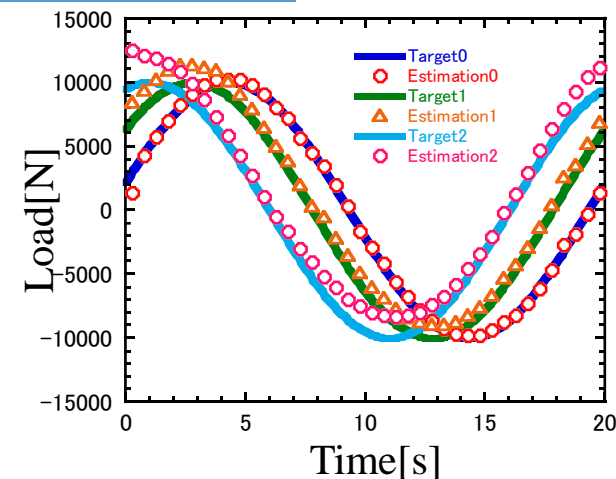
x方向応力比較



計測点



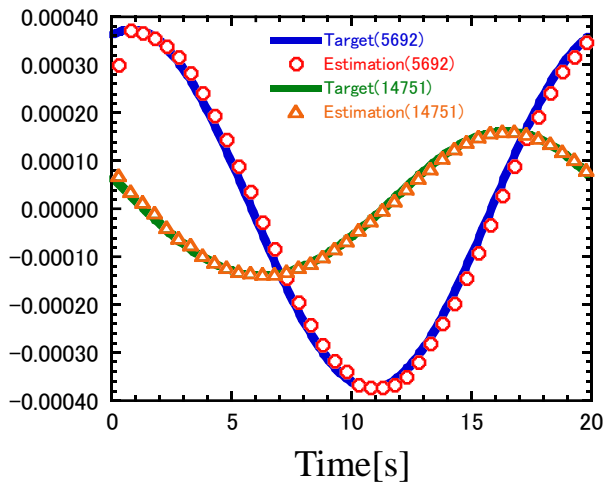
荷重推定比較



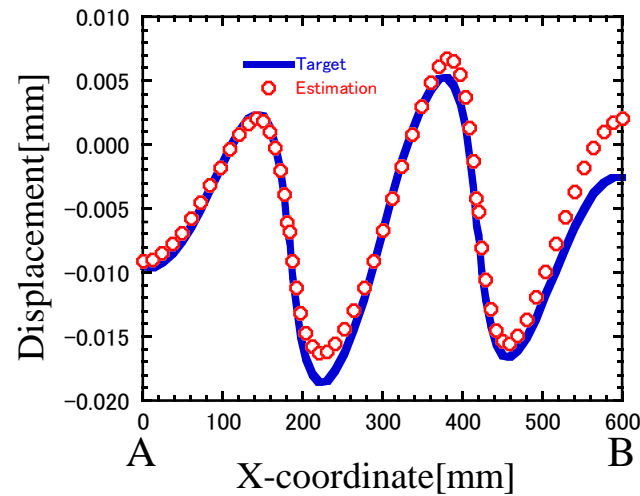
計測点外

以下に示す全ての比較において、真値と推定値が良好に一致

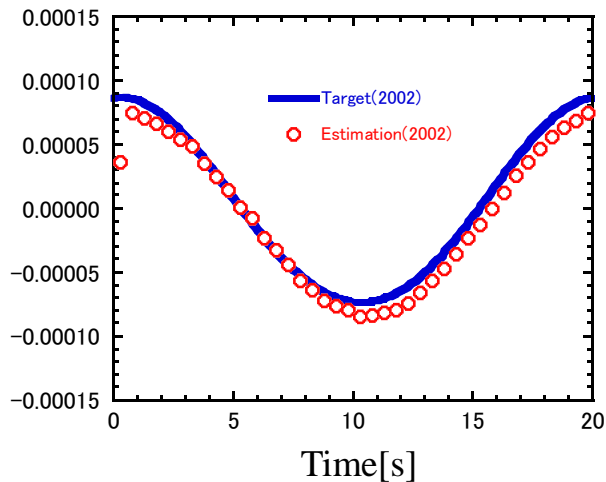
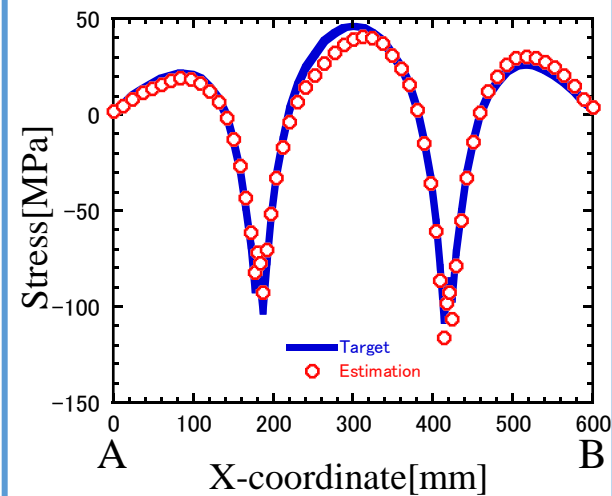
x方向ひずみ比較



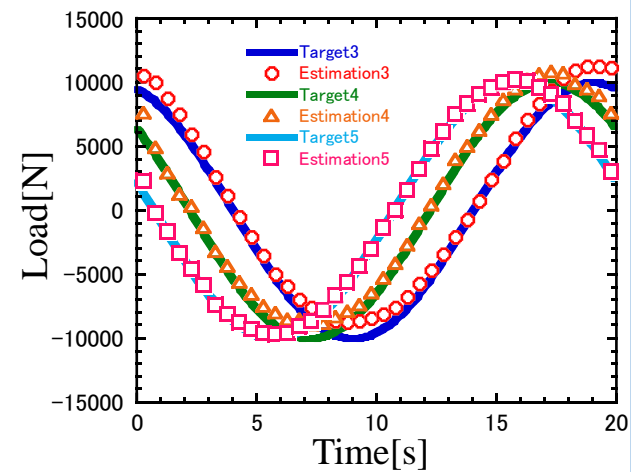
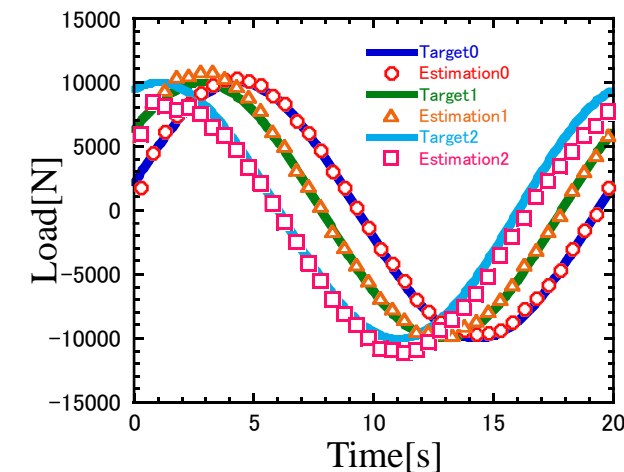
x方向変位比較



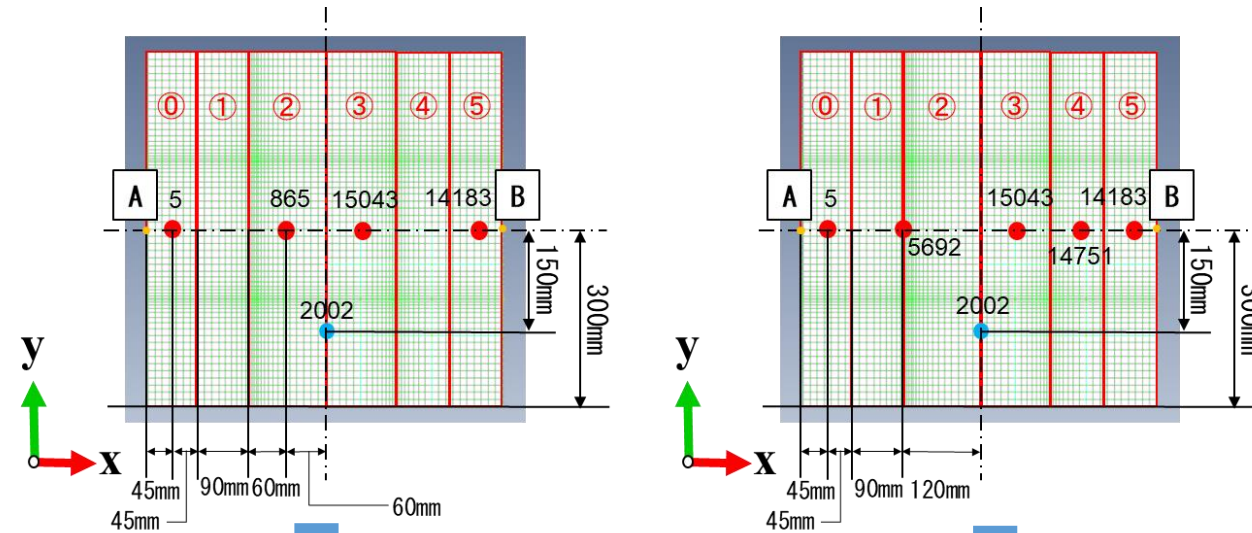
x方向応力比較



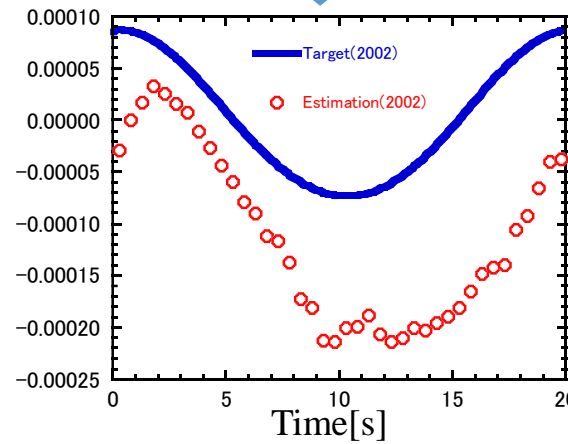
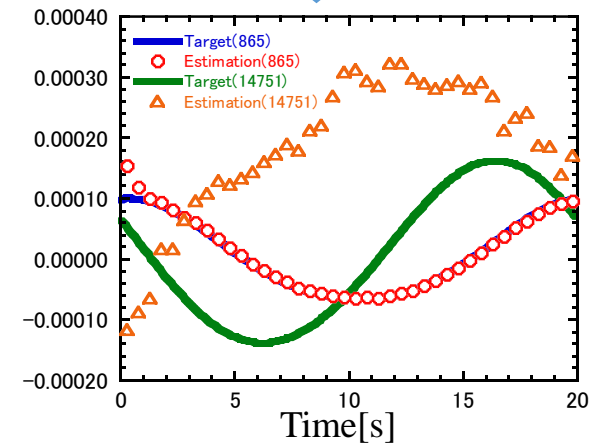
荷重推定比較



領域数より計測点数を減らした場合



計測点外のひずみの
推定において
真値と一致しない結果

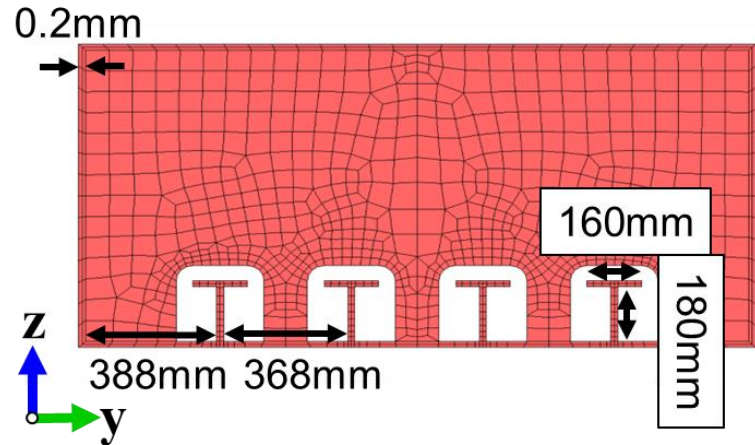
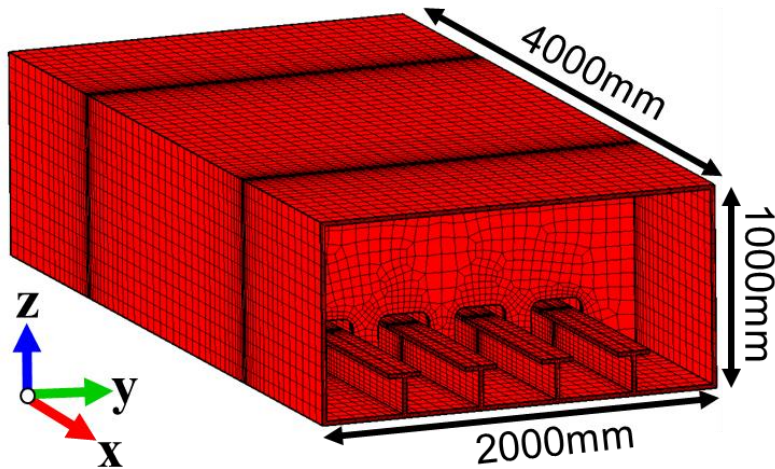


原因として、計測点を持たない領域ではデータ同化に用いるデータがない

荷重値が他の領域のひずみデータに依存し、誤差が生まれている

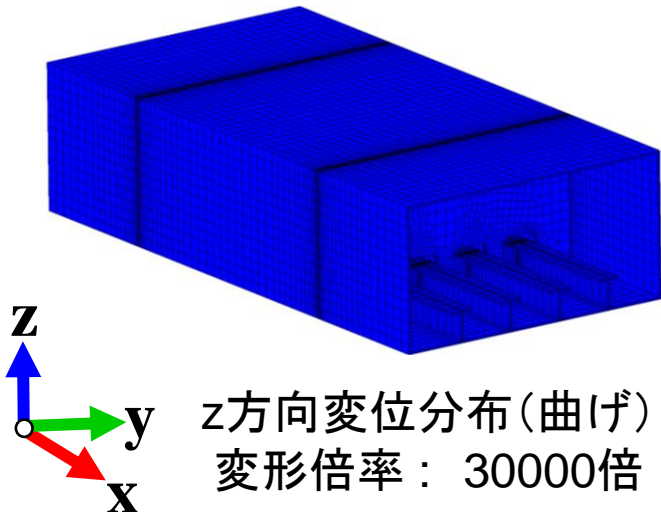
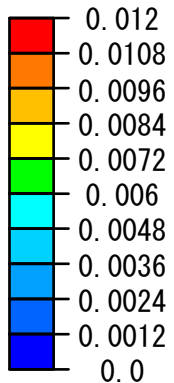
解析目的

船体構造のモデルを用いて荷重分布の推定を行う。

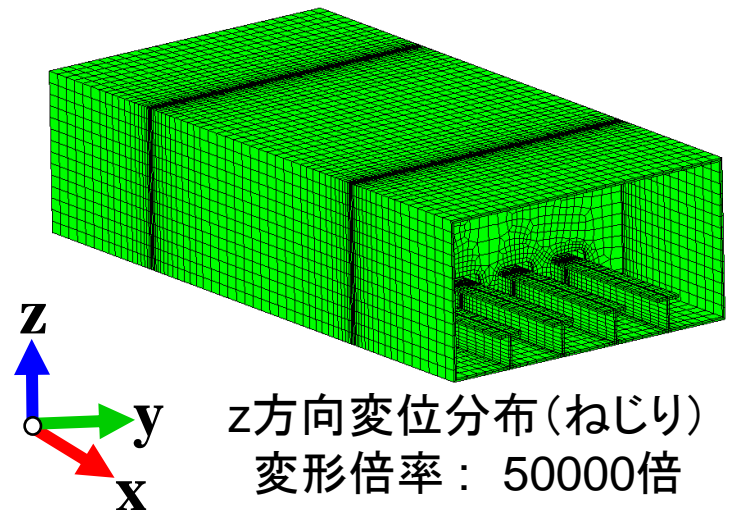
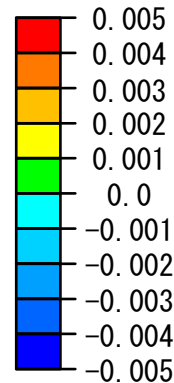


節点数	44442	ヤング率	198[GPa]
要素数	29224	ポアソン比	0.294

[mm]



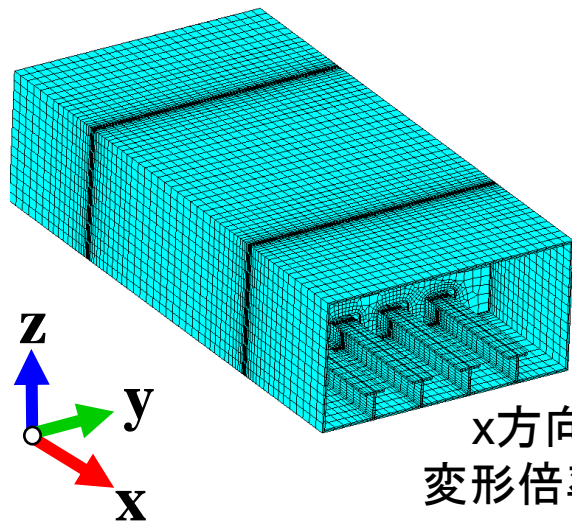
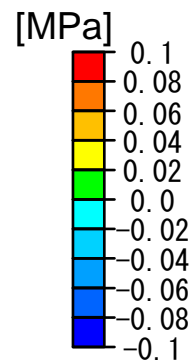
[mm]



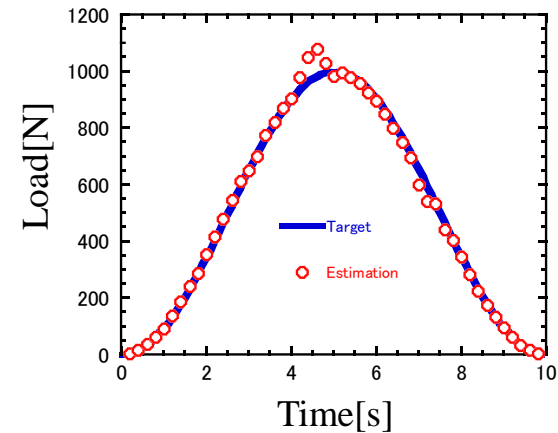
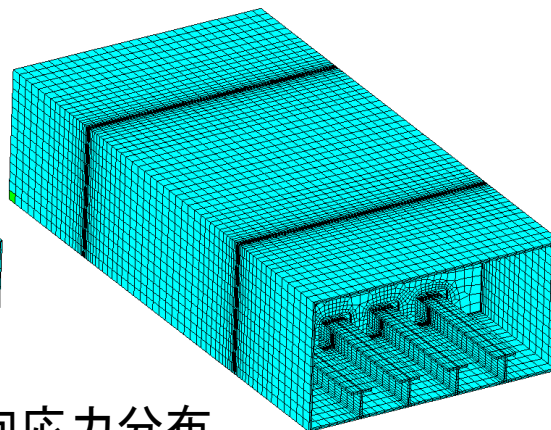
曲げ

順解析 (FEM)

データ同化



x方向応力分布
変形倍率 : 30000倍

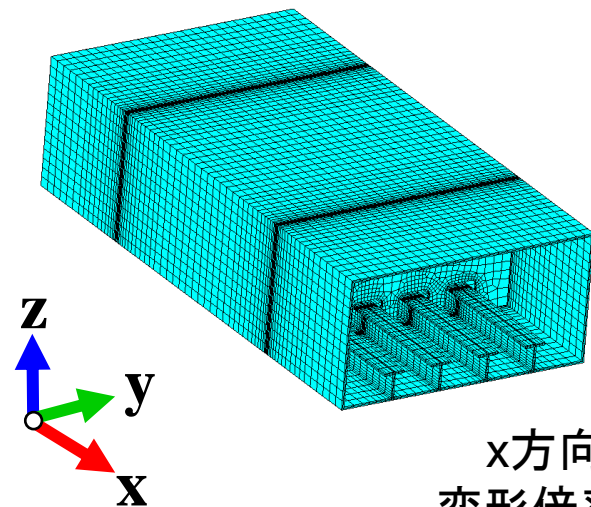
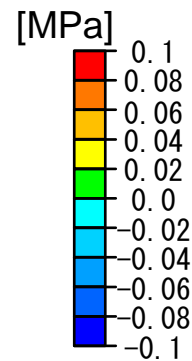


荷重推定結果

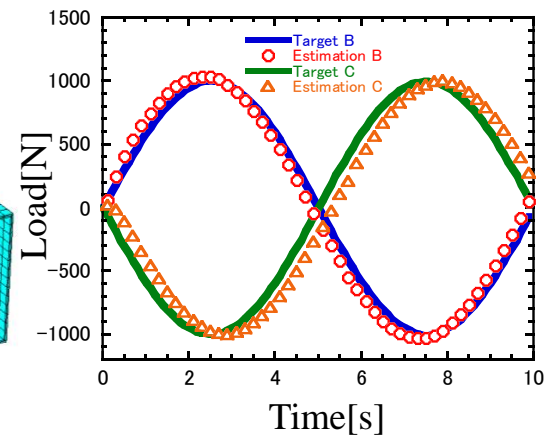
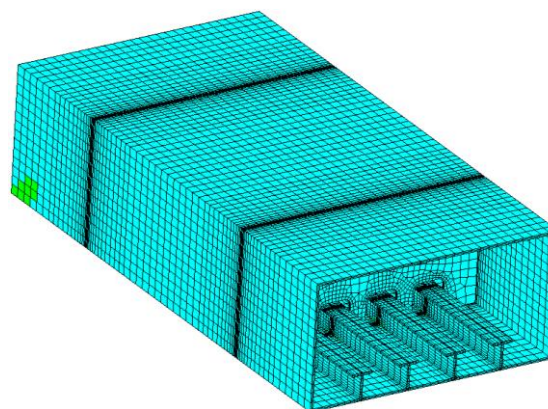
ねじり

順解析 (FEM)

データ同化



x方向応力分布
変形倍率 : 50000倍



荷重推定結果

本研究では限られた計測データから船体構造全体に生じる荷重量の推定が可能な手法の開発を最終目標として、アンサンブルカルマンフィルタをベースとした状態推定手法の開発を行った。これらから、以下の知見を得た。

1. 計測データ数が推定対象の数よりも少ない場合、本研究で検討した範囲ではいかなる場合でも状態推定が不可能であった。
2. 計測データ数が推定対象の数と等しい場合、推定対象数が大きくなると推定精度はわずかながら悪化するものの、ほぼ影響がないことを確認した。また、計測点の位置に関して、構造的に連続な位置に計測点を配置することで推定精度を大きく下げることなく、推定が可能であることを確認した。
3. 曲げ荷重の推定に対して開発手法を適用した結果、荷重負荷面に計測要素を配置した場合とそうでない場合のどちらの場合でも、計測要素の配置位置が構造的に連続であれば荷重の量の推定が可能であることを示した。
4. ふたつの荷重が負荷され、ねじり変形が生じるモデルの状態推定に対して開発手法を適用した結果、荷重負荷面に計測要素を配置した場合とそうでない場合のどちらの場合でも、計測要素の配置位置が構造的に連続であれば荷重の量の推定が可能であることを示した。

ご清聴ありがとうございました。