

データ同化手法を用いた構造崩壊挙動の デジタルツインシステムの構築

生島研究室 M2 里 明起照



- ・研究背景・目的
- ・シミュレーション手法~理想化陽解法FEM~
- ・データ同化手法~アンサンブルカルマンフィルタ~
- ・構造デジタルツインシステムの計算プロセス
- ・順解析条件 順解析結果
- ・データ同化結果
- ・結言

研究背景

巨大構造物である船舶 運用中の波浪荷重により部材に変形が加わる 詳細な変形の計測、シミュレーションは困難

➡ 予期しない構造破壊

 ・2013 MOL COMFORT 事故 船体外板を起点として折損した構造破壊事故 同型船の船底外板部に座屈変形を確認 建造時の強度評価よりも低い荷重で座屈変形 が発生する可能性

正確な強度推定を含むモニタリング システムの開発が急務

従来の強度評価

国土交通省, コンテナ運搬船安全対策検討委員会 最終報告書, https://www.mlit.go.jp/common/001081291.pdf, (2015)

計測:破壊の原因となる応力の計測は運用中の船舶には不可能 ドック作業においても全船計測は困難 シミュレーション:応力の予測はできるが運用状態を再現できない

船舶の現実状態を再現できるシミュレーションが必要





研究背景

デジタルツイン

シミュレーションモデルに、現実世界での状態を反映させた サイバー・フィジカル・シミュレーションにより課題を解決、最適化するアプローチ

→船舶のモニタリングシステムとして期待 機関状態、船体抵抗 etc...

船体の構造状態を可視化するための 「<mark>船体構造デジタルツイン</mark>」 が提唱されている

弾性を仮定した模型船モデルを用いて 波浪荷重推定を行う先行研究などが存在

局所的な座屈変形や強度を評価するためには 弾塑性、非線形現象のデジタルツインが必要





船体構造デジタルツイン 成果報告動画・前編(日本船舶技術研究協会) https://www.youtube.com/watch?v=3055w9Ou21c

研究目的

防撓構造の構造崩壊挙動のデジタルツイン

防撓構造 船底などに用いられる撓みを抑制する構造



最終強度 防撓構造に圧縮荷重をかけ荷重ストローク線図から 防撓構造の最終強度を決定する



本研究 座屈変形を伴う構造崩壊挙動のデジタルツイン →船体構造の4次元的力学状態推定、正確な強度推定が可能に



データ同化手法~アンサンブルカルマンフィルタ~

<u>デジタルツイン技術の核:データ同化</u>

気象分野で多く使われるシミュレーションに観測データを取り入れ

etc...

シミュレーション精度を向上させる手法

<u>データ同化手法</u>

- ・カルマンフィルタ
- ・アンサンブルカルマンフィルタ
- ・粒子フィルタ
- ・4次元変分法(非逐次型)



逐次型フィルタ非線形対応計算コストカルマンフィルタ×大アンサンブルカルマンフィルタO小粒子フィルタ〇大

<u>アンサンブルカルマンフィルタをデータ同化</u> <u>手法として採用</u>



データ同化手法~アンサンブルカルマンフィルタ~

・本研究で用いたデータ同化手法 アンサンブルカルマンフィルタ

シミュレーションによる誤差、計測ノイズの正規分布を 離散的にアンサンブルメンバーで表現

5を 計測 〒う



7

シミュレーション手法~理想化陽解法FEM~

<u>シミュレーション手法:理想化陽解法FEM</u>

・計算の大規模化、またデータ同化による計算負荷を考慮して高速なFEMを採用

<u>理想化陽解法FEM(IEFEM)</u>

理想化陽解法FEMでは剛性方程式 $\{K\}{\Delta u\} = \{F\}$ に仮想的な質量マトリクスおよび減衰マトリクスを用いて各荷重ステップにおいて変位が収束するまで反復計算を行う

GPUを用いた並列計算をすることで従来手法に比べ約250倍高速なFEM



構造デジタルツインシステムの計算プロセス



<u>数値実験</u>

順解析(通常のFEM解析)を行い、疑似計測データの作成 →データ同化を行い、3次元弾塑性場の推定可能性を検討

順解析条件

座屈を伴う崩壊挙動、強度推定の数値実験を行うために以下のモデルを用意



順解析結果

<u>解析の様子</u>



順解析結果



推定対象パラメータを強制変位量とし 要素**E3**のひずみを疑似計測データとしてデータ同化を行う



- ・研究背景・目的
- ・シミュレーション手法~理想化陽解法FEM~
- ・データ同化手法~アンサンブルカルマンフィルタ~
- ・構造デジタルツインシステムの計算プロセス
- ·順解析条件順解析結果
- ・データ同化結果
- ・結言

強制変位量推定結果



Q=1.0 × 10^-4 R=1.0 × 10^-6

Q=1.0 × 10^-6 R=1.0 × 10^-6

ノイズ共分散の影響の検討

O=1.0 × 10^-5 R=1.0 × 10^-6



Q=1.0 × 10^-5 R=1.0 × 10^-5



Q=1.0 × 10^-5 R=1.0 × 10^-4



Q=1.0 × 10^-5 R=1.0 × 10^-3



システムノイズ共分散 計測ノイズ共分散

:Q :R









荷重-ストローク線図、ひずみ共に良好に一致







・本研究は大変形を考慮した弾塑性解析FEM、およびアンサンブル カルマンフィルターを用いたデータ同化により座屈を伴う構造崩壊 挙動のデジタルツインの数値実験を行った。

・その結果、1点のみの計測データから座屈崩壊挙動、ひずみ履歴、 および荷重ストローク線図、最終強度も順解析と一致を示し、良好 に3次元弾塑性場が推定できているといえる。

・ノイズ共分散の検討を行ったが、数学的にノイズを一意に確立す る手法は確立されていないものの経験的にノイズを与えることに よっても十分にシステムが機能することが分かった。

・それらから、本デジタルツインシステムは、実構造物に応用した 場合座屈崩壊挙動を同定し強度評価に有用である可能性があり、今 後大規模化、及び実試験データを用いたデジタルツインの実施によ る妥当性検証がのぞまれる。