

船用主機デジタルツインに関する研究開発と技術的課題

流体性能評価系 北川 泰士*

環境・動力系 ボンダレンコ オレクシー, 福田 哲吾

ナブテスコ(株)船用カンパニー 出口 誠, 藤原 真

(株)商船三井 スマート SHIPPING 推進部 大宮 知起, 柿原 聡明

(株)三井E&Sマシナリー R&Dセンター 宮川 修二郎, 宮地 健



本発表は共著者各社との個別の共同研究内容を紹介するものです



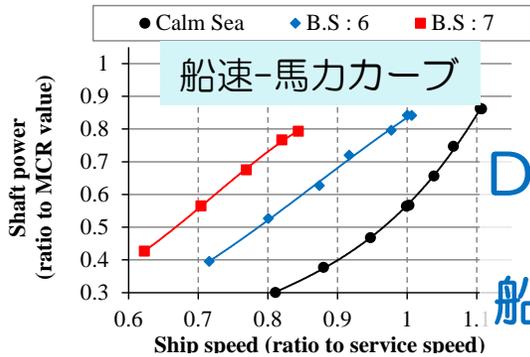
発表目次

1. 主機デジタルツインの活用例と開発情勢(スライド.3-5)
2. 海技研と共同研究者による主機デジタルツイン関連研究(スライド.7)
 - 2-1. 主機状態オブザーバーによる主機状態計算手法(スライド.8-11)
 - 2-2. 実運航データによるモデル係数同定(スライド.12-15)
 - 2-3. 因子分析による主機異常検知手法の開発(スライド.16-20)
 - 2-4. 技術的課題(スライド.21-22)
3. まとめ(スライド.23)

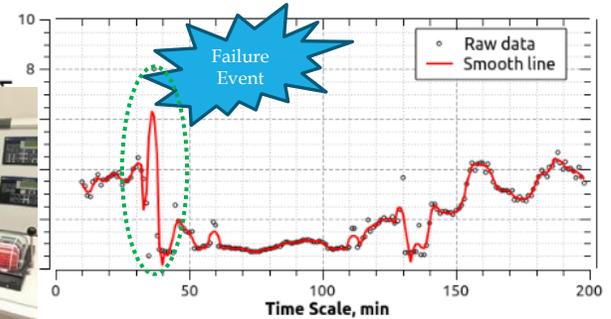
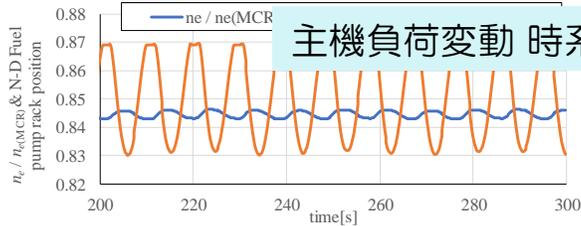
1. 主機デジタルツインの活用例と開発情勢

1. 主機デジタルツイン (DT-SPP) の活用

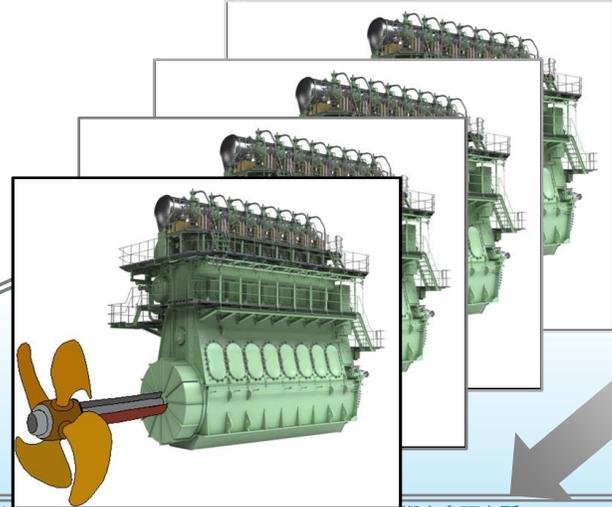
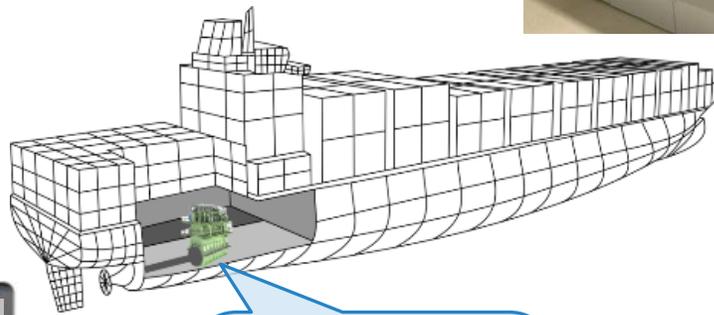
Digital Twin of a Ship Propulsion Plant



DT-SPPと流力モデルを用いた想定海象中の船舶性能+主機状態予測

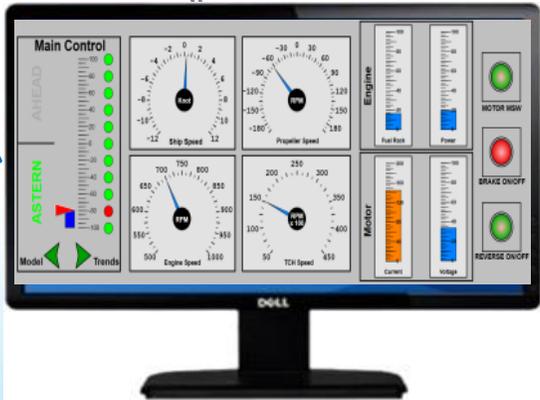


主機状態の異常検知 + 診断の自動化



経年劣化状況の把握による最適保守タイミングの検討

先進的な主機状態モニタリング



1. 主機デジタルツインの開発例

DT-SPPの研究開発は既に競争領域に突入！

海技研の強み（主機状態高速計算手法）を生かした取り組みを行うべし

- WinGD : WiDE (WinGD Integral Digital Expert) *1
 - ✓ 船用主機のデータ収集
 - ✓ 主機状態見える化
 - ✓ 主機異常診断システム
- DNV-GL : DIGITAL TWINS AT WORK IN MARITIME AND ENERGY *2
 - ✓ 船用主機含めた船舶システム全体のデジタルツイン化によるソリューション

*1 https://www.wingd.com/getattachment/Digital-Solutions/WiDE/WiDE_Brochure_8pp_FINAL.pdf/?lang=en-GB

*2 https://www.dnvgl.com/Images/DNV%20GL%20Feature%20%2303%20ORIG2b_tcm8-85106.pdf

2. 海技研と共同研究者による 主機デジタルツイン関連研究



2. DT-SPPに関する共同研究（基礎研究＋実証研究）

主機状態モニタリングに関する研究

ナブテスコ(株)
船用カンパニー

主機特性数学モデルとカルマンフィルタ技術を組み合わせた主機状態オブザーバーを用いた主機状態計算によるモニタリング手法の開発

実運航データを用いた主機特性モデルのパラメータ同定に関する研究

(株)商船三井
スマート SHIPPING
推進部

モデルパラメータの同定手法の開発と実運航データを用いた検証

主機状態異常の自動検知手法に関する研究

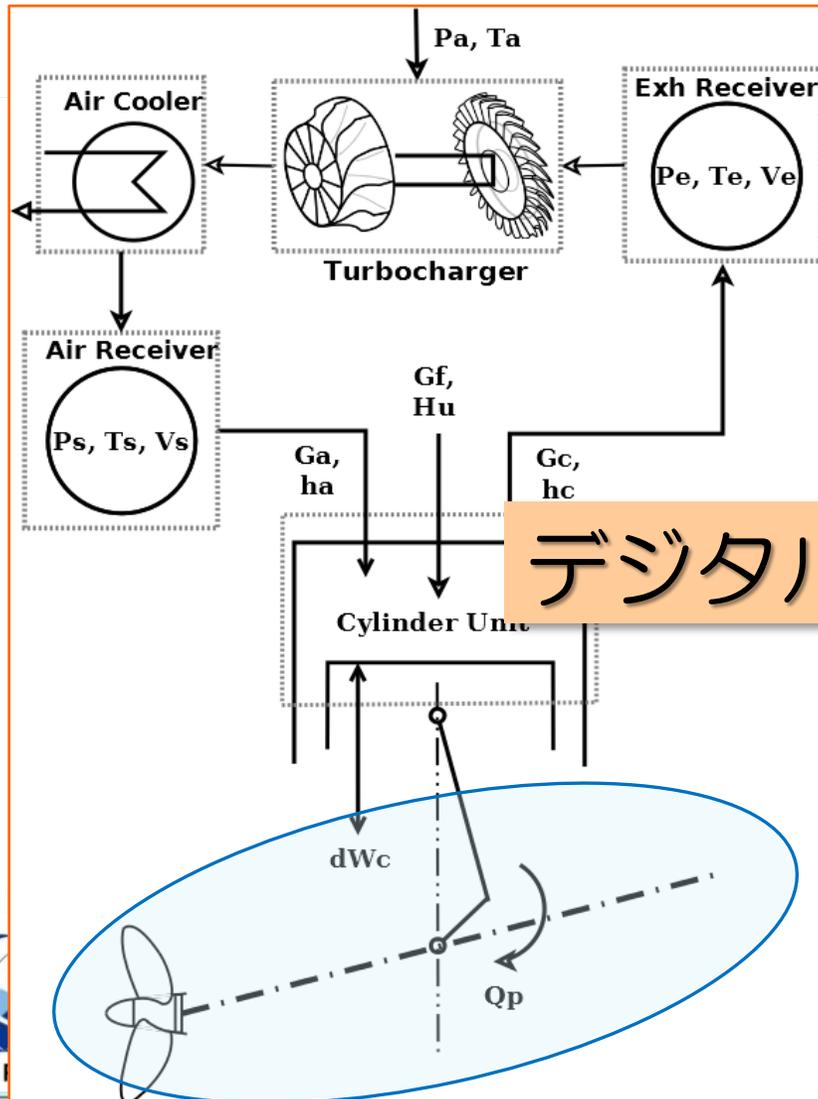
(株)三井E&Sマシナリー
R&Dセンター

因子分析を用いた主機異常の自動検知技術の開発と陸上試験による検証実験

海技研

2-1. 主機状態オブザーバーによる主機状態計算手法

2-1. DT-SPPのための主機特性数学モデル



- ▶ Cycle-Mean Valueモデルを適用* (主機状態の1回転における平均的な応答を評価する計算モデル)
- ▶ リアルタイム時系列計算が可能

デジタル空間上の主機特性を表現

課題：軸トルク（負荷トルク）の評価

*ボンダレンコ オレクシー，福田哲吾，北川泰士：船舶推進プラントとしての主機デジタルツインの開発，海上技術安全研究所報告，第19巻別冊，(2019)，pp.39-46.

2-1. 主機状態オブザーバーの開発

目標：主機特性数学モデルを応用した実船主機状態の高精度モニタリング

主機モデル中変数（状態量）

主機回転数
過給機回転数

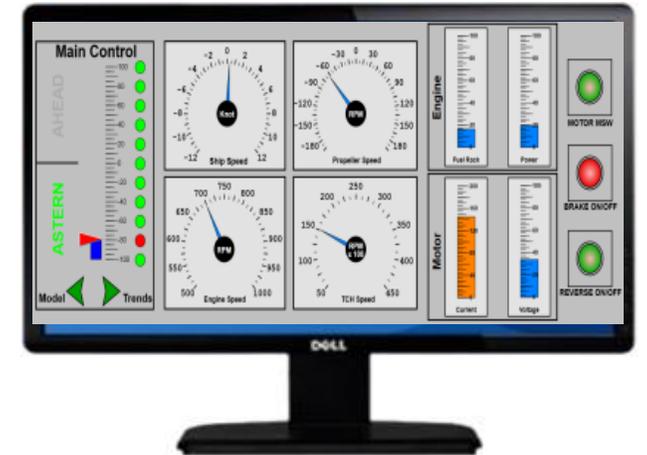
燃料投入ラック位置
掃気圧，排気温度 等

燃料流量，空気過剰率
プロペラ流入速度（主機
負荷トルク評価のため）



主機状態オブザーバー
(カルマンフィルタを応用した
主機状態観測器)

モニター装置で表示



（計測が困難なもの）
通例では計測しない項目

- * プロペラ流入速度をカルマンフィルタで推定して外乱プロペラトルクを評価*
- * 主機モデルとカルマンフィルタを組み合わせた状態推定により精度よい状態評価が可能 → 計算ベースの拡張的モニタリング手法



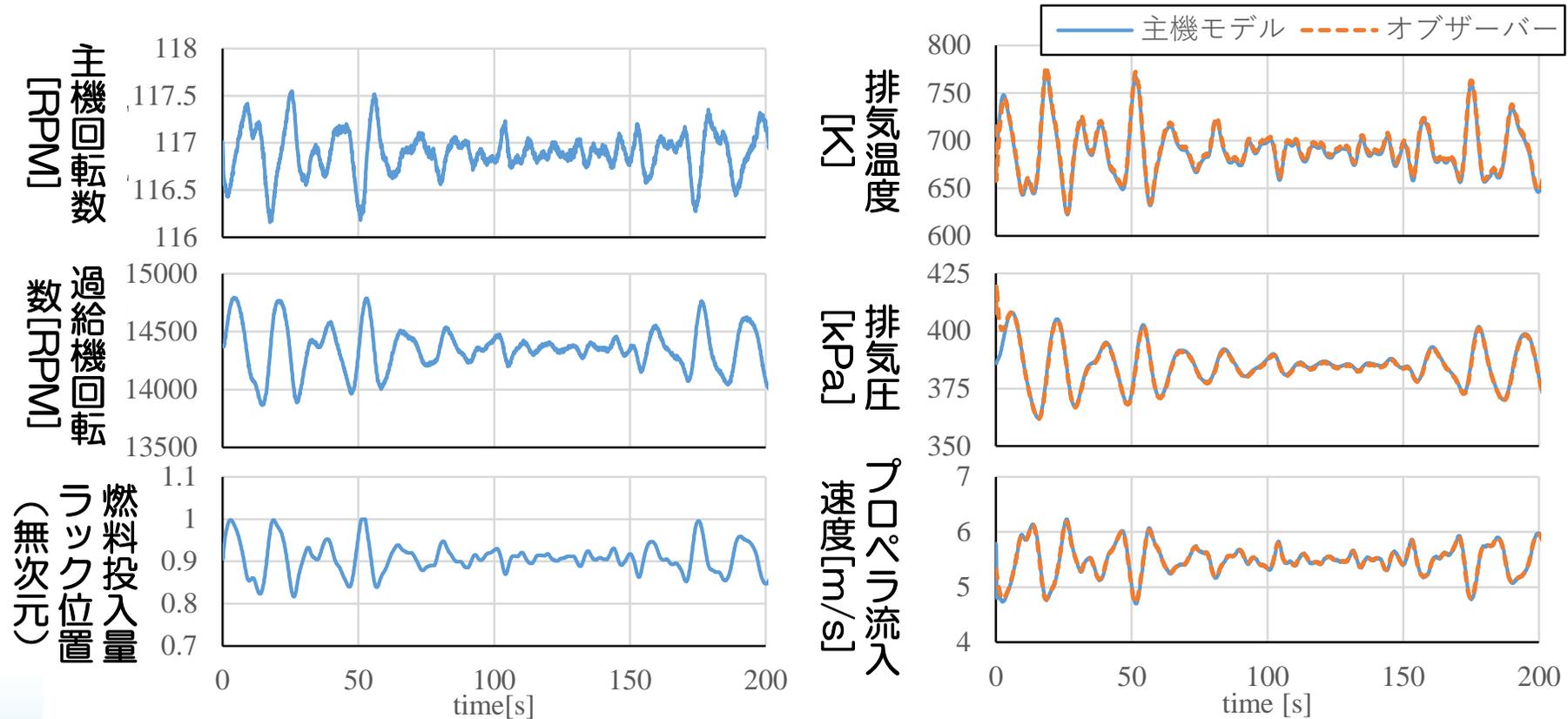
*Bondarenko O., Kitagawa Y. : Estimation of Effective Inflow Velocity into Propeller Utilizing Engine Model and the Kalman Filtering Technique, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第28号, (2019), pp.399-403.



2-1. 主機状態オブザーバー 試計算例

左列：主機状態計算値（青実線） ← オブザーバーへの入力情報
 右列：オブザーバー推定値（橙点線）と主機状態計算値の比較

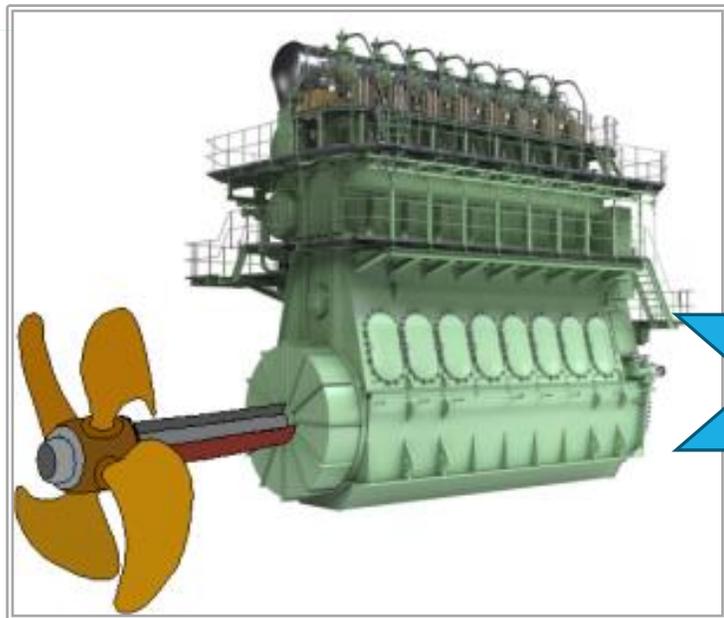
- ▶ 対象：217mのばら積み船 + 10680kW主機
- ▶ 有義波高4m相当のプロペラ流速変動
- ▶ 主機特性数学モデルの時系列計算結果（青実線）とオブザーバー推定結果（橙点線）の比較



両者一致 ⇒ オブザーバーによる主機状態推定計算は有効

2-2. 実運航データによるモデル係数同定

2-2. DT-SPPにおける主機特性経年変化の影響の考慮



～新造時主機モデル

- ▶ 主機仕様や陸上試運転、海上運転のデータを基にモデル内係数・定数を同定

データ不足の問題

就航後



オペレーションによる
経年劣化



主機保守
・メンテ

実運航データによる逐次の
係数・定数アップデートが有力

2-2. 実運航データを用いたモデル内係数・定数推定手法

カルマンフィルタによるDual-Estimation (状態推定と係数+定数の同定)

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\tilde{\mathbf{x}} &= F_d(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\theta}, u) \\ \tilde{\mathbf{y}} &= H(\tilde{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\theta})\end{aligned}$$

係数・定数値は時間
変化しないと見なす

前提条件: $\frac{d}{dt}\boldsymbol{\theta} = 0 \Rightarrow$ 係数・定数を含めた定式化:
$$\begin{aligned}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix} &= F_d(\hat{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\theta}, u) \\ \tilde{\mathbf{y}} &= H(\tilde{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\theta})\end{aligned}$$

$\tilde{\mathbf{x}}$ - is the n -dimensional approximation of noisy state vector (unknown)
 $\hat{\mathbf{x}}$ - is the n -dimensional *a posteriori* estimate of state vector (true value)
 u - is the m -dimensional input vector (known)
 $\tilde{\mathbf{y}}$ - is the p -dimensional output vector (measurement)
 F_d, H - are non-linear set of system functions (defined by model)
 $\boldsymbol{\theta}$ - is the vector of model parameters

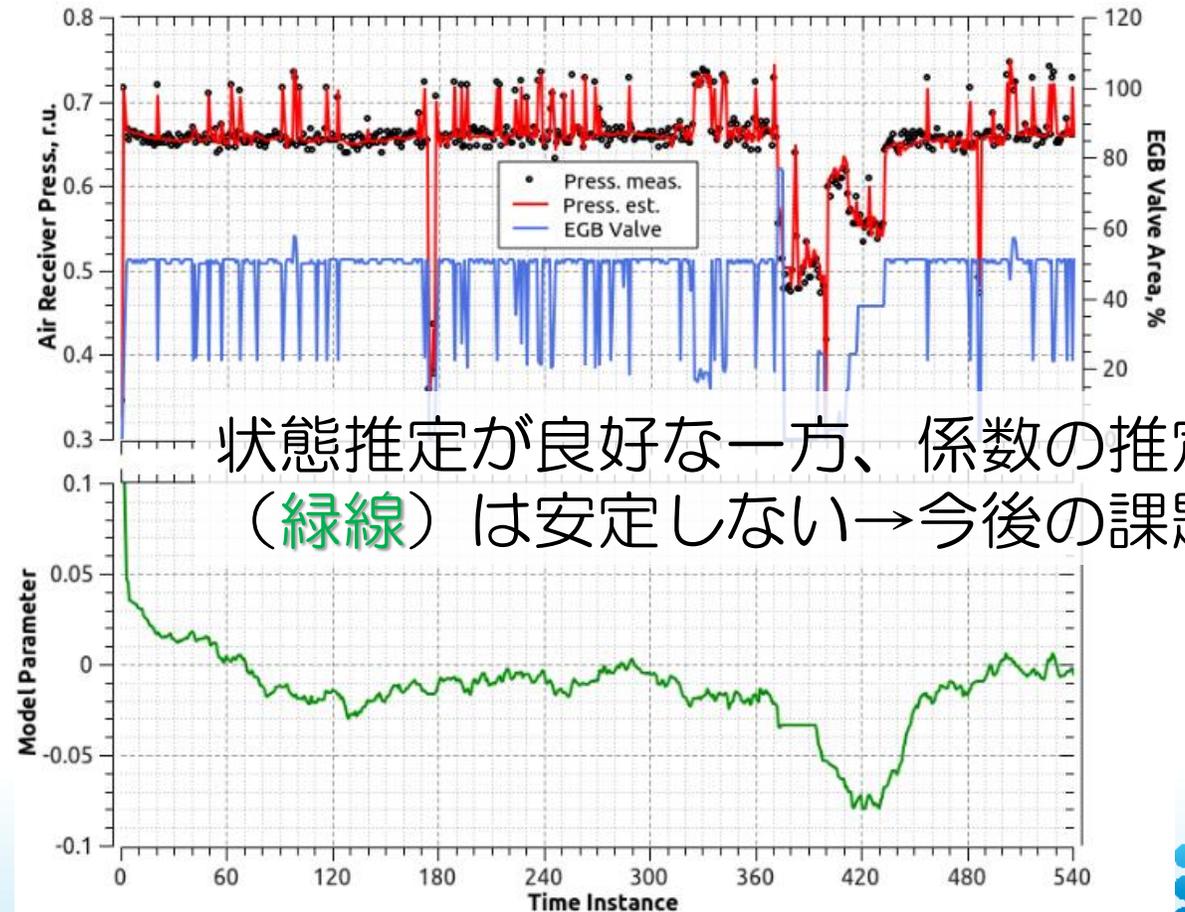
2-2. 実運航データを用いたDual-Simulation例

黒点：掃気圧計測値，赤線：掃気圧推定値，青線：EGB弁開閉度合い

- ▶ 供試船（VLCC）の1年間の実運航データを利用
- ▶ 供試船は排ガス温度を制御する排気バイパス弁（EGB弁）を装備（バイパス弁の開閉状態を高度に制御）

過給機系空気
流量モデル

$$Ps = f(n_{TC}, G_{EGB})$$
$$G_C + G_f = G_T + G_{EGB}$$



状態推定が良好な一方、係数の推定値（緑線）は安定しない→今後の課題

2-3. 因子分析による主機異常検知手法の開発

2-3. 背景と目的～主機異常検知と異常診断

- ▶ ClassNK CMAXS e-GICCSXは主機異常の自動検知及び自動診断のサービスを提供*1, *2
- ▶ アルゴリズム：機械学習による監視用モデルと計測データの相関関係の乖離を監視し、異常度スコアを算出して検知

研究目的：主機状態オブザーバーを活用した主機異常の“極短時間”での自動検知・診断手法の開発

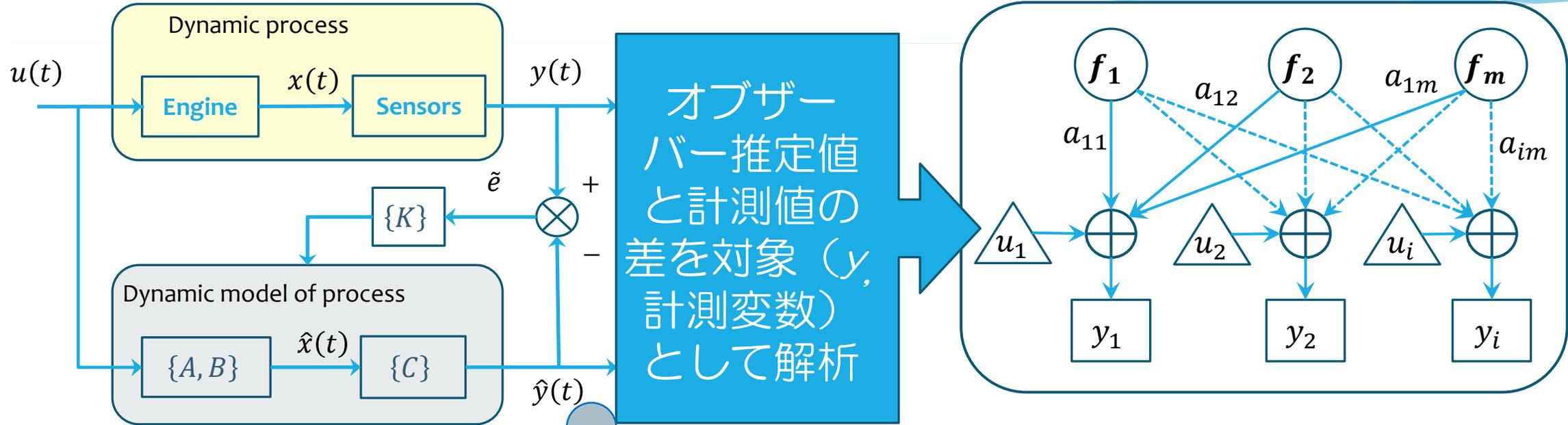


*1 船舶保守管理システムClassNK CMAXSのご紹介, <https://classnkcs.co.jp/archive/pdf/seminar01.pdf>.

*2 光森 渉, 村上 真人：三井造船が提案するIoTを活用した運航支援サービス, Journal of JIME, Vol.52 No.2, (2017), pp.80-85.



2-3. 主機状態オブザーバーと因子分析による主機異常検知手法



アプローチ：

因子分析指標（スコアや因子荷重度）をリアルタイム算出し、その挙動により状態異常を検知する

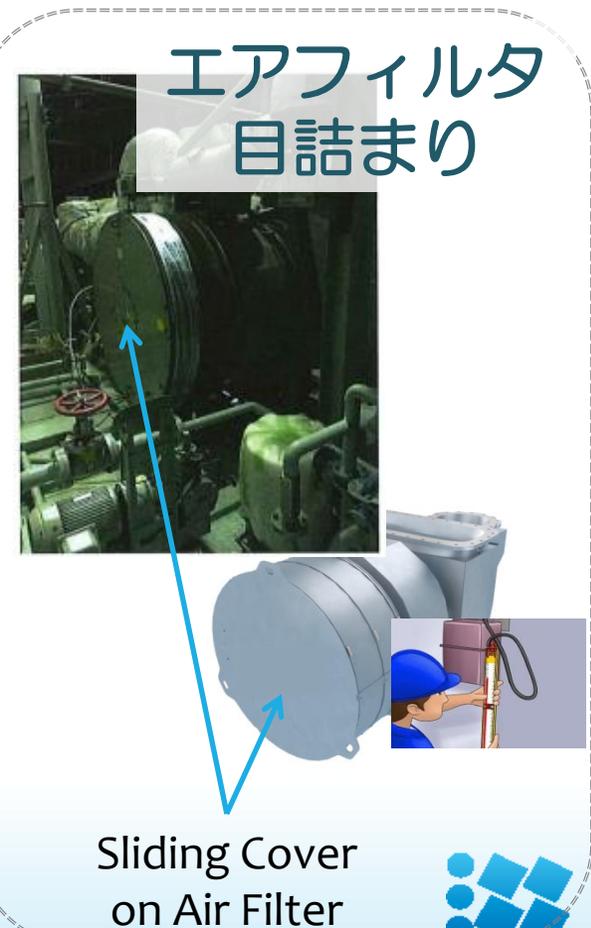
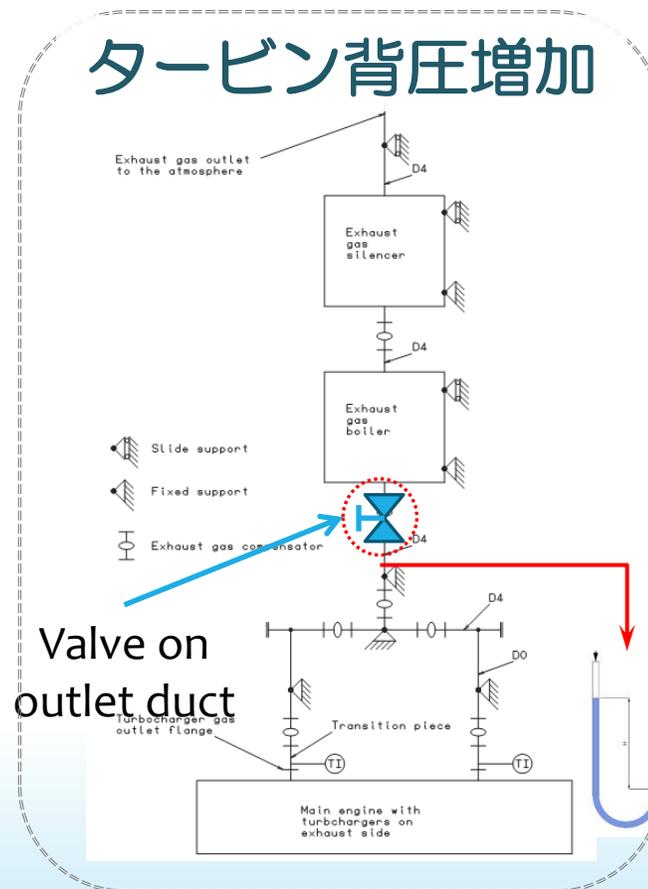
$$y_i = a_{i1}f_1 + a_{i2}f_2 + \dots + a_{im}f_m + u_i$$

- f_m : 潜在変数
- y_i : 計測変数
- a_{im} : 因子荷重度
- u_i : 説明できない差（計測誤差やノイズに相当）

2-3. 模擬異常を与える実機実験による検証

三井E&Sマシナリー R&Dセンターの陸上試験機を利用

- ▶ 対象主機：4S50ME-T9実験機
- ▶ 出力7120kW、回転数117RPM
- ▶ 与えた模擬異常
 1. 過給機のフィルタに徐々に目詰まりを与える（過給機の性能劣化）
 2. 冷却水流量を徐々に絞る（冷却器の劣化）
 3. 過給機タービンの背圧を徐々に増加

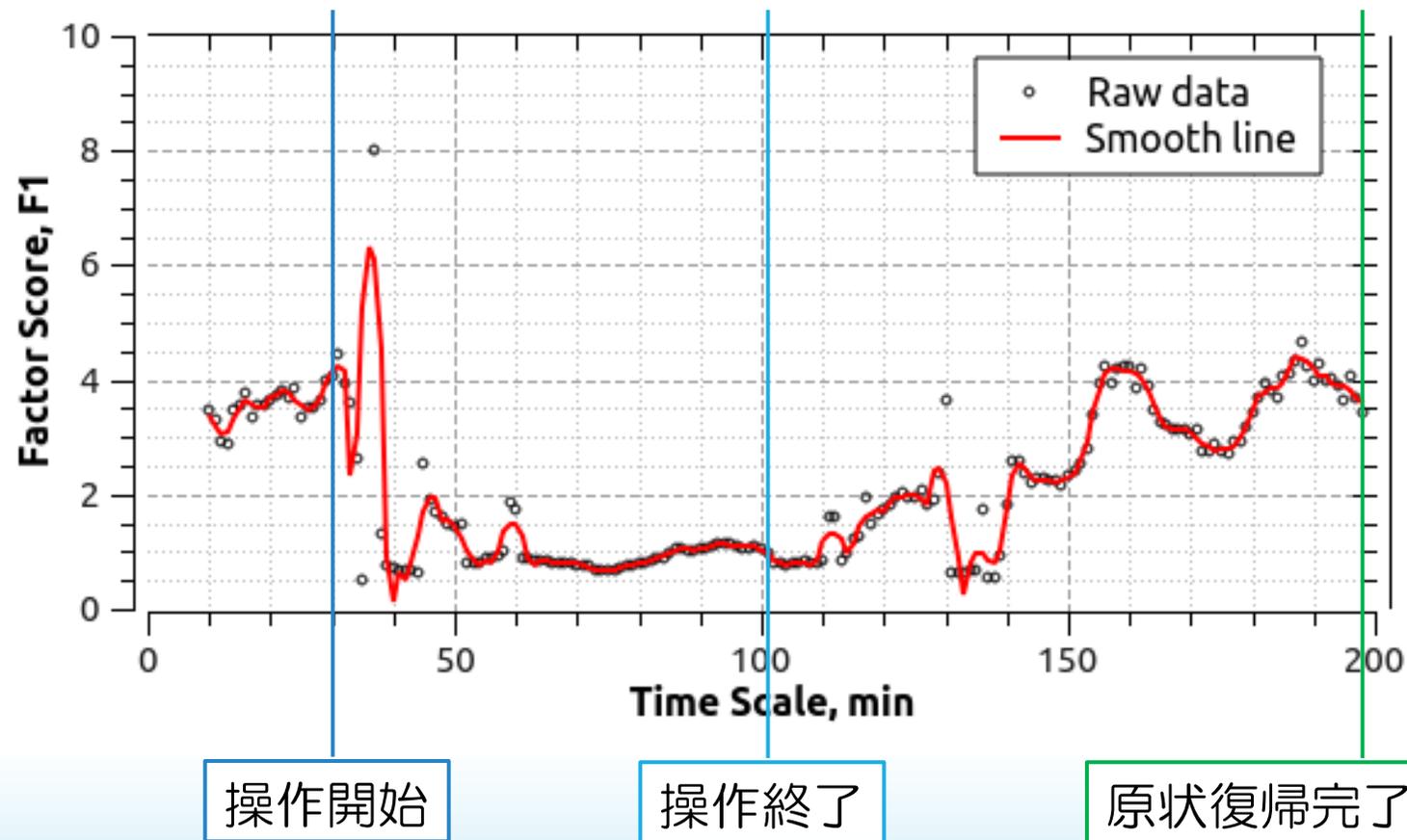


2-3. 解析例：因子スコア（タービン背圧増加）

▶ 異常模擬試験 状況

1. 模擬異常 操作開始：30分付近
2. 模擬異常 操作終了：100分付近
3. 原状復帰完了：200分付近

▶ 操作に応じて因子スコアが変化
⇒ 短時間での異常検知に期待



2-4. 技術的課題

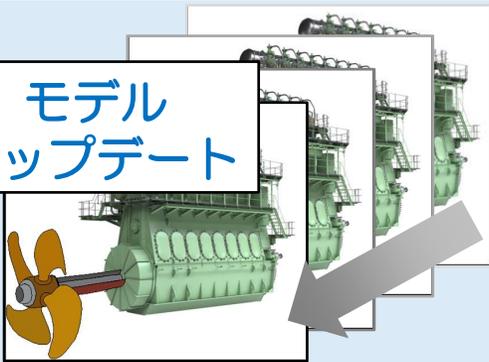
2-4. 技術的課題（高度化＋社会実装のため）

主機状態 モニタリング



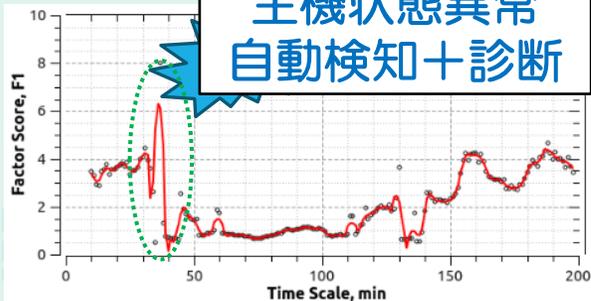
- ✓ 主機状態オブザーバーをインストールした主機状態モニタリング装置の開発と実船搭載による実証
 - システム設計手法の確立（主機モデル構築、計測可能信号、等）
 - モニタリング結果の妥当性検証

モデル アップデート



- ✓ モデル係数・定数同定のための取得データに関する検討
- ✓ 個別の主機システムに応じたモデル構築と妥当性検証
- ✓ （計画中）取得データを主機作動状況に応じてクラスタ分け → モデル同定のための適切なデータ選定（広範囲な作動状況から絞って利用）

主機状態異常 自動検知＋診断



- ✓ （そもそもで）主機異常状態に関するデータの蓄積
- ✓ 因子分析解析値（スコア、荷重度、等）の時間変化から異常検知を判定するための定量的評価
- ✓ 主機異常“自動診断”のためのアルゴリズム開発

3. まとめ

- ▶ 船用主機デジタルツイン（DT-SPP）の想定活用例と開発情勢について述べました
- ▶ 海技研と共同研究者が取り組んだ主機デジタルツインの関連研究について、研究内容と技術的課題をそれぞれ紹介しました
 - ✓ 主機状態オブザーバーによる主機状態計算手法
 - ✓ 実運航データによるモデル係数同定
 - ✓ 因子分析による主機異常検知手法の開発

御清聴ありがとうございました