

8 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

北川 泰士^{*}, ボンダレンコオレクシー^{**}, 福田 哲吾^{**},
出口 誠^{*3}, 藤原 真^{*3}, 大宮 知起^{*4}, 柿原 聡明^{*4}
宮川修二郎^{*5}, 宮地 健^{*5}

R&D state of Digital Twin for Ship Propulsion Plant

by

KITAGAWA Yasushi, BONDARENKO Oleksiy, FUKUDA Tetsugo
IDEGUCHI Makoto, FUJIWARA Makoto, OMIYA Tomoki, KAKIHARA Toshiaki,
MIYAKAWA Shujiro and MIYACHI Ken

Abstract

The digital twin of a ship propulsion plant (DT-SPP) would dramatically improve the operation and management of a ship's main engine. Potential uses of the DT-SPP include monitoring engine states or automatic diagnosing engine failure. Research and developments on the DT-SPP is being conducted internationally; in this paper, we briefly describe the research conducted by NMRI for the DT-SPP, which includes collaborative research with Nabtesco, MOL, and Mitsui E&S Machinery, as well as future research tasks. We also explain the two main components of the DT-SPP: the mathematical model for the ship propulsion plant, which enables real-time computation, and the engine observer, which enables estimation of the engine states even without measurement equipment. We then introduce how the parameters of the mathematical model for the DT-SPP are identified using the measured engine states from one actual ship in operation. Additionally, we developed a method for detecting anomalies in the engine states and investigated the effectiveness of the method using the measured data from the shop trial test.

* 流体性能評価系, ** 環境・動力系, *3 ナブテスコ株式会社 船用カンパニー, *4 株式会社商船三井 スマート SHIPPING 推進部, *5 株式会社三井 E&S マシナリー R&D センター

原稿受付 令和2年4月30日

審査日 令和2年6月8日

1. 研究背景

国際海事機関(IMO)に導入された EEDI 規制を満足するため合理的な方策として低出力主機の搭載が有力視されている。これを受け、運航の安全性の観点からは荒天下の保針性能の確保に関する国際的な議論が発展し、効率的な船舶運用の観点からは低速運航へのシフトが進められている。船舶産業が斯様な状況に対応していく中、船舶の主機関も更なる性能向上や効率的な保守運用が求められる状況である。このための技術開発として、船用主機のデジタルツイン化に関する研究開発が進められている。デジタルツインとはデジタル空間上で再現された物理空間上の対象物を指し、物理空間上の対象物より得られる情報に基づいてデジタル空間上で再現された対象物の特性が定期的にアップデートされることが“ツイン”たる所以である。船用主機デジタルツインの導入により従前よりも先進的な船用主機の運用が期待される一方、海外メーカーからはデジタルツインを活用したサービス提供が既に開始される等、船用主機デジタルツインを取り巻く状況は各社の競争領域に突入している。例えば、WinGD は船用主機のデータ収集と主機状態見える化及び異常診断システムを備えた WiDE (WinGD Integral Digital Expert) システムを提案している¹⁾。DNV-GL は、船用主機のみならず、船舶システム全体やウィンドファームのデジタルツイン化による総合的なソリューション提供を掲げている²⁾。また、海上技術安全研究所においてもデジタルトランスフォーメーション PT が 2020 年 3 月に新たに設置され、船舶産業の総合的なデジタル化促進に貢献するための部門横断的な研究開発が進められているところである。

本論文では海技研がこれまで実施してきた船用主機デジタルツインに関する研究開発の成果を要素ごとに紹介し、今後に取り組みられるべき技術的課題についてそれぞれ簡潔に示す。2 節では船用ディーゼル主機の応答特性を表現する主機特性数学モデルとカルマンフィルターを活用した主機状態オブザーバーによる主機状態推定計算手法について解説する。3 節では実運航データを用いたモデル係数の同定に関する取り組み事例を紹介し、4 節では主機異常診断技術の基礎となる主機異常検知手法の開発について紹介する。なお、各節の研究内容は、2 節の一部はナプテスコ株式会社、3 節は株式会社商船三井、4 節は株式会社三井 E&S マシナリー、共著者各社との個別の共同研究によるものである。

2. 主機状態オブザーバーによる主機状態計算手法

2. 1 主機特性数学モデル

船用主機デジタルツインを構築するに当たり、主機状態及び運航中の主機応答を再現するための計算モデルは必須である。そのための計算モデルは主機を構成する各要素の相互の干渉特性を考慮した上で要素ごとの応答を表現する物理モデルが望ましい。本研究では船用主機としてディーゼル機関を主な対象としており、この応答特性を物理モデル化する場合、回転数調速機構(ガバナー)・燃料燃焼によるエンジントルク発生系・プロペラトルク等による外乱とエンジン

トルクを考慮した推進軸応答系、の各応答に大別したモデル化が一般的である。船舶が波浪中を航走する際の主機負荷変動を評価したい場合は外乱トルクにおいて波浪中の変動要素を考慮する。挙げた 3 つのモデル化の内、燃焼に関連するモデル化がその物理現象の複雑さ故に多くの研究例がある。Filling-emptying 手法では各シリンダの燃焼室内の熱力学系を計算しており³⁾、CFD で燃焼室内の温度や圧力挙動を計算⁴⁾することも近年では一般的である。

海技研ではこれまで Cycle Mean Value (CMV) モデルを主体に研究開発に取り組んできた。CMV モデルは 1 回転における全シリンダの平均的な応答を表現するものであり、先に挙げた 2 手法に比べて計算速度が速い。このため、波浪中主機負荷変動や後述の主機異常検知のための応答をリアルタイムで評価することに有用である。また、開発した CMV モデルを活用することで、著者らは水槽模型試験ベースで主機設計の検証ができることも示している⁵⁾。以上より、海技研では船用主機デジタルツインに適用する主機特性数学モデルとして CMV モデルを基本線とする次第である。具体的な数学モデルとして、著者らが示したモデルを参考文献⁶⁾に挙げる。

2. 2 主機状態オブザーバーによる主機状態推定計算

前項の主機特性数学モデル内の変数が主機状態を表すものであるため、本モデルを時系列計算すれば主機状態それぞれの時間変化を得ることができる。一方、時系列計算には、各変数に適切な初期値を与える、全体の計算精度向上のためなるべく多くの項目の実計測信号を入力して計算を行う、といった実際上の課題がある。特に、瞬間的な波浪中の状態変動を評価したい場合、プロペラトルク等の外乱による変動を適切に計算に反映させる必要があるが、実計測信号を得るための軸馬力計は全ての船舶に搭載されている訳では無い。

これらの実際上の問題解決の方策として、著者らは主機状態オブザーバー及びこれを用いた主機状態の推定計算手法を開発した。主機状態オブザーバーは主機特性数学モデルとカルマンフィルターを組み合わせた計算により、主機特性数学モデルの時系列計算のために本来必要な入力情報を補完推定しながら全ての主機状態量の時系列計算を可能にさせるものである。このオブザーバーにより、著者らは波浪中プロペラトルク変動の要因となる波浪中プロペラ有効流入速度変動が精度よく推定できることを示している^{7),8)}。この技術により、実計測機器の利用を最小限に抑えた上で主機状態の時間変化をモニタリングすることが可能となる。著者らはこの主機状態オブザーバーを船用主機デジタルツインに適用した主機状態モニタリングシステムと想定海象中の船舶性能予測手法を提案している⁹⁾。

2. 3 主機状態オブザーバーによる主機状態計算例

本項では主機状態オブザーバーによる波浪中の主機状態計算例を示す。対象船は垂線間長 217m のパナマックスサイズのバルクキャリアで、対象主機は 10680kW・117RPM・6 気筒 2 ストロークの仕様である。図-1 に波浪中時系列の計算

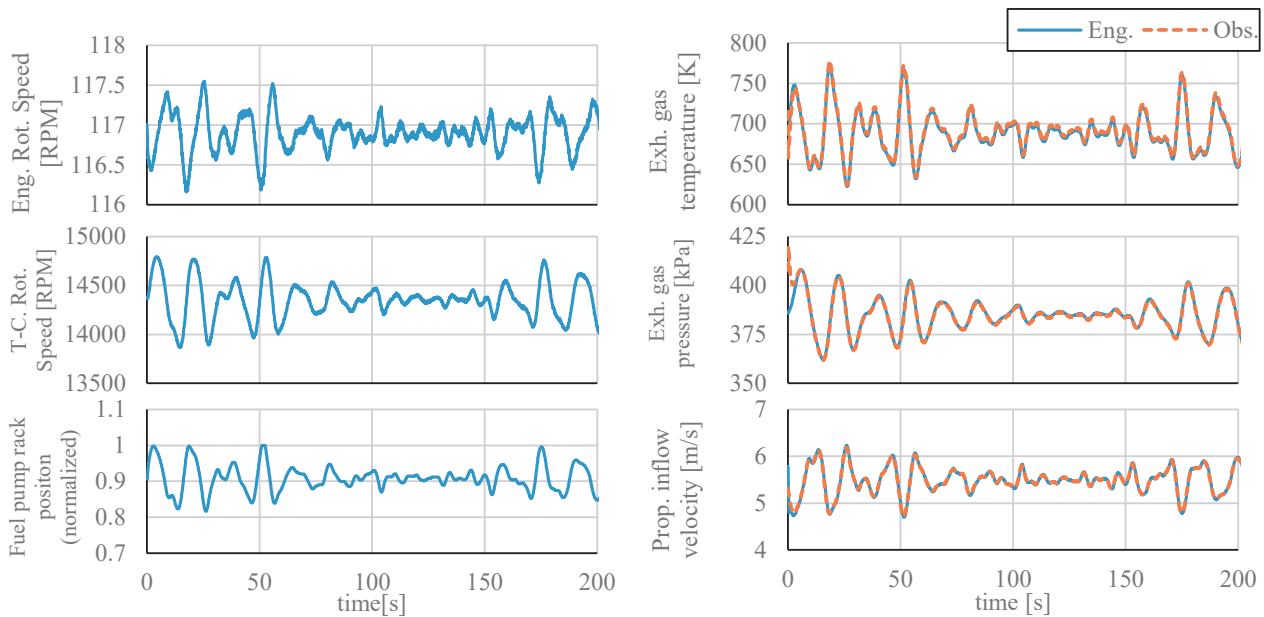


図-1 主機状態オブザーバーによる波浪中主機状態計算例（左上：主機回転数，左中央：過給機回転数，左下：燃料投入量（無次元値），右上：排気温度，右中央：排気圧，右下：プロペラ有効流入速度）

例を示す．適用したカルマンフィルタは Unscented Kalman Filter である．波浪中主機負荷変動として有義波高 4m 相当のプロペラ有効流入速度変動を与えている．本例では 6 種の主機状態を対象としており，青実線(Eng.)は主機特性数学モデルによる計算結果で，橙点線(Obs.)はオブザーバーによって推定計算された結果である．本例では左列をオブザーバーへの入力項目とした，排気圧の初期値付近のみ差が確認できるものの時間経過によりモデルによる計算結果とすぐに一致しており，オブザーバーの計算結果は総じてモデルによる計算結果と一致していることが確認できる．これは，実機においても計測可能な信号を入力すれば主機状態を精度良く推定計算することが可能と言えるものである．

2. 4 実証のための課題

前項の通り，主機状態オブザーバーを適用することで主機特性数学モデルにおいて変数となっている主機状態のモニタリングが可能であることは示された．次段階の検証として，このオブザーバーを搭載した実船でリアルタイム作動するモニター装置の開発及びその実証が挙げられる．この開発と実証のためには，計測機器による実入力信号の取得やデータ保存を含めたシステム設計，システム全体を通じた動作のリアルタイム性の確保，対象船ごとの計測可能信号を考慮したオブザーバー内の計算仕様の設定，モニタリングデータの妥当性検証，が想定される．

3. 実運航データによるモデル係数同定に関する研究

3. 1 概要

主機状態オブザーバーの主機特性数学モデルは実機に忠実にリアルタイム計算に耐えうる計算負荷の低いモデルであることが肝要である．モデルの具体的な作成のためには，

各個船のデータや陸上運転，海上運転のデータを用いて，主機特性数学モデルあるいは Black Box モデル（例えばニューラルネットワーク）の係数（パラメータ）を設定する．しかし，実海域実運航上では運転範囲や周囲条件が多様でモデルが実状態に追従しない可能性が低くない．また，実運航では主機の各部の経年劣化等の変化があるため，主機そのものも変化していく．このため，状態推定オブザーバーのみでは，生涯に渡った主機状態の精度よい推定及び見える化を推進することは困難である．そこで，カルマンフィルタのエンジン状態推定機能以外のもう一つの機能であるパラメータの追跡機能を使い，モデル内パラメータを実運航データから同定するための手法開発を行った．前節の通り，主機モデルに基づきオブザーバーが設計され標準状態の主機性能や計測されていない主機状態（空気過剰率等）が見える化される．更に進んで，本節の手法開発によりオンラインで主機非線形モデルのパラメータを調整できるようになれば，時々刻々変化する主機状態をオブザーバーで推定し，現在の運転状況だけでなく近い将来のエンジン状態を予測することが可能となり，最適で安全な運転が可能となる．

3. 2 就航船のデータ解析とパラメータ同定

開発されたカルマンフィルタの二つの機能（状態推定とパラメータ同定機能）を使い，就航船（VLCC）の主機の 1 年間のデータを用いてモデルのパラメータ同定の解析を行った．一方，本船は排ガス温度を制御する排気バイパス弁（EGB 弁）が装備されており，通常の低負荷性能改善用の EGB 弁の ON/OFF 制御ではなく弁の開度が複雑に制御され，モデルを精度よく作成する必要があった．しかし，入手可能なデータは限られるとともに，就航中のデータの不確かさや不足によりモデルパラメータの同定は困難であった．その結果を図-2に

示す。上図は掃気圧の計測値（点）と推定値（赤線）及びEGB弁バルブの開閉度合い（青線）の時系列であり、下図は掃気圧計算モデルにおけるEGB弁の開閉度合い影響に係る線形パラメータの同定結果の時系列である。掃気圧自体は精度よく推定されているが、モデルパラメータは、経年による変化は予想されるものの、対象とした時間範囲では本来は一定値に収束することが予想されるため、本解析においてはパラメータ同定が困難であったと考えられる。また、関連部の特性データ不足により、同定されたパラメータ値が定量的に妥当どうかを判断すること及びモデルの妥当性評価も現状では困難であった。このような複雑なモデルの場合はEGB弁の特性に関する詳細なデータを踏まえた上での解析が改めて必要となる。

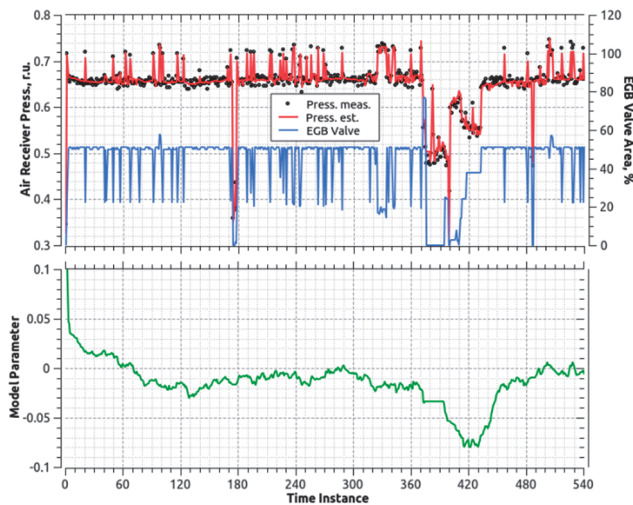


図-2 エンジン状態（掃気圧/EGB弁）とモデルパラメータの推定

3. 3 今後の課題

本研究に関する次なる課題として、モデル同定のための必要データの検討があり、就航時のデータ点数の追加や、取得データの不確かさの解消により、前項中の課題の解決に繋がると考えている。データ不足や陸上運転時と就航時の違いを補うもう一つの方法として、就航中に集積された広範囲な運転データを使い経験的にモデルのパラメータを調整することが挙げられる。図-3は対象船の主機出力の実運航データをfuzzy c-means clusteringアルゴリズムの1種を用いてクラスターに分類して代表点を決定したものであり、よく利用される出力帯ごとに分類できるようにメンバーシップ度を調整している。図に示す通り、本船のデータはいくつかのクラスターに分けられる。また、各クラスターの代表点をベースにモデル同定ができることも現時点で明らかにしている。これらは追って別の機会に報告したい。

4. 主機異常検知手法の開発

4. 1 概要

主機の状態異常は異常時の状態量が正常時の値から異なることで評価されるが、この異常検知及び異常診断を機

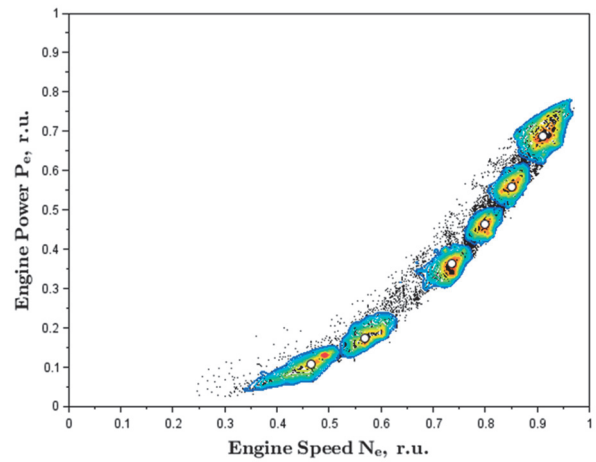


図-3 標準状態における主機出力の作動状況クラスター

械的に自動判定するためのアルゴリズムはこれまでに数多く開発されており、一部は既に社会実装されている。例えば、ClassNK コンサルティングサービスは船舶搭載機器の保守管理のためのCMAXSというサービスを提供しており、その中でCMAXS e-GICSXが主機異常の自動診断機能を有している¹⁰⁾。CMAXS e-GICSXも含め、異常検知アルゴリズムの多くはトレンドデータを統計的に分析して異常スコアを計算し、これがある閾値を超えることで異常と検知するものである。一方、これらのトレンドデータは一定期間で収集されたものが対象であることが基本であり、実際の異常検知は一定の時間経過後ということになる。本研究では、異常発生を瞬時に検知できる手法開発を目的として、船用主機デジタルツインと因子分析を活用した主機異常検知・診断手法を提案する。後項において、その技術的特徴について概説し、ディーゼル主機の陸上試験機による異常模擬実験で取得したデータからその有効性を示す。

4. 2 因子分析を活用した主機異常検知手法

2節で述べた主機状態オブザーバーを用いた主機状態推定計算手法により主機状態をリアルタイムで計算することは可能であるが、主機特性数学モデルの係数等は対象主機のカタログスペックや陸上運転データから決定されるため、異常発生による状態変化を主機特性数学モデルに基づいた計算のみで表現及び検知することには限界があると考えられる。そこで本研究では、計測可能な主機状態とオブザーバーによる主機状態計算のそれぞれの時系列の差を対象に、因子分析によって解析された各指標に基づいて異常を検知する手法を提案した。まず、(4.1)式は因子分析の基本となる表示式であり、 $\mathbf{Y}$ は対象とする主機状態ベクトル、 $\mathbf{A}$ は因子負荷量を表す行列、 $\mathbf{F}$ は各主機状態の因子を表すベクトル、 $\mathbf{u}$ は通例ではノイズとされるベクトル、である。

$$\mathbf{Y} = \mathbf{AF} + \mathbf{u} \quad (4.1)$$

提案手法は、具体的には前述の時系列の差に基づいて対象

の主機状態の因子負荷量と因子の寄与割合（因子スコア）を時々刻々計算し、その値の時間変化から異常発生の検知を試みるものである。計算手法の詳細は本論文では割愛するが、主機状態の時系列はMCR状態の値等で正規化して解析する、因子負荷量行列の計算精度向上のため期待値最大化法を適用する、等の解析精度向上のための工夫も取り入れている。

4.3 実機実験による提案手法の検証

本節の提案手法の検証のため、性能を劣化させる操作により主機状態異常を模擬する実機実験を実施して時系列データを取得した。対象主機は4S50ME-T9の実験機であり、出力7120kW・回転数117RPMの仕様である。異常の模擬は、(1)過給機の性能低下を模擬して、フィルタに目詰まりを徐々に与える、(2)冷却器の劣化で冷却水流量を徐々に絞る、(3)過給機タービンの背圧を徐々に増加する、により与えた。

提案手法に基づく因子分析による指標解析例の一例として、過給機タービンの背圧増加を与えた際の因子スコアの時系列の解析例を図-4に示す。本例の実験条件は、30分付近で模擬操作を始め、100分付近で操作を終了し、200分付近で原状復帰させたものである。点は時間ごとの解析値で、線は解析値に移動平均処理を掛けた結果である。

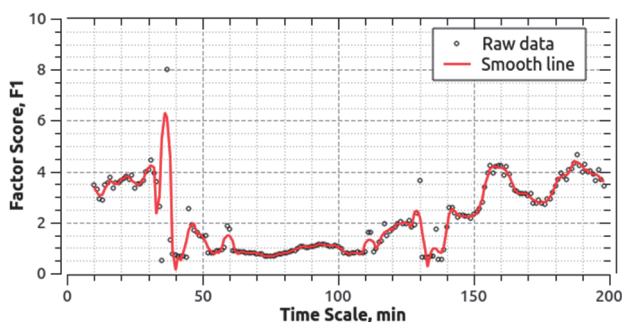


図-4 過給機タービン背圧増加時の因子スコア解析例

因子スコアの挙動を分析すると、異常模擬操作を与えた後に値が急激に変動して0付近で収束している。また、模擬操作が終了した後は徐々に初期値付近に戻りつつある。この結果より、異常模擬操作の間のみ因子スコアは異なる挙動を見せることがわかる。以上の結果より、提案手法は主機状態異常を初期の検知に適用することが可能な手法と言える。

4.4 今後の課題

本節の提案手法は主機異常の極短時間での検知に適用できることを示した。今後の課題として、因子スコアの時間変化から異常発生を定量的に自動検知するための手法の導入や、異常検知の次段階として異常原因特定等の異常診断の自動化に関する手法開発が挙げられる。自動異常診断にはAI技術の適用も視野に入れた研究開発が有効であると考えられ、現状では因子分析による解析結果を機械学習手法の一つである自己組織化マップ（SOM）に入力して異常をクラス分けし、その結果に基づいた異常診断アルゴリズムの開発を目指す

している。このためにも、異常データの蓄積は実際上の重要課題である。

5. 結 言

本論文では船用主機デジタルツインに関する研究開発として、主機状態オブザーバーによる主機状態推定計算手法・実運航データを用いた主機特性数学モデルのパラメータ同定に関する取り組み・リアルタイムで主機状態異常を検知する手法の開発、のそれぞれについて、その概要を解説すると共に将来の課題について述べた。引き続き、基礎研究と並行して実証研究を進め、船用主機デジタルツインの研究開発に貢献していく。

謝 辞

本研究の4節における実機実験は三井E&SマシナリーR&Dセンターの協力の下で実施されました。関係各位に篤く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) WinG: WiDE WinGD Integrated Digital Expert.
https://www.wingd.com/getattachment/Digital-solutions/WiDE/WiDE_Brochure_8pp_FINAL.pdf/?lang=en-GB
- 2) DNV-GL: DIGITAL TWINS AT WORK IN MARITIME AND ENERGY, (2017).
https://www.dnvgl.com/Images/DNV%20GL%20Feature%20%2303%200RIG2b_tcm8-85106.pdf
- 3) 例えば, Medica V., Racic N., Radica G.: Performance Simulation of Marine Slow-Speed Diesel Propulsion Engine with Turbocharger Under Aggravated Conditions, Journal for Theory and Application in Mechanical Engineering, Vol. 51 No. 3, (2009), pp. 199-212.
- 4) 例えば, Grekhov L., Mahkamov K., Kuleshov A.: Optimization of Mixture Formation and Combustion in Two-stroke OP Engine Using Innovative Diesel Spray Combustion Model and Fuel Spray Simulation Software, Journal of SAE Technical Paper, 2015-01-1859.
- 5) Kitagawa Y., Bondarenko O., Tsukada Y., Fukuda T., Tanizawa K.: An Application of the Tank Test with a Model Ship for Design of Ship Propulsion Plant System, Journal of JIME, Vol. 53 No. 3, (2018), pp. 82-88.
- 6) 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.
https://www.nmri.go.jp/_src/22001/PNM2A190008-00.pdf
- 7) 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.
- 8) Bondarenko O., Kitagawa Y.: Application of the

Kalman Filtering Technique for Nonlinear State Estimation in Propulsion System, Journal of Marine Science and Technology, (under review).

9) 北川泰士, ボンダレンコ オレクシー, 福田哲吾, 出口誠, 藤原真: デジタルツイン技術を活用した船舶主機モニタリングシステム及び実海域下船速・主機状態予測システムの開発, 海上技術安全研究所報告, 第 19 巻別冊, (2019).

https://www.nmri.go.jp/event/presentation/R1/poster_6.pdf

10) 船舶保守管理システム ClassNK CMAXS のご紹介,

<https://classnkcs.co.jp/archive/pdf/seminar01.pdf>.