

運航船舶のメンテナンスルール変更を考慮した船舶性能モニタリング技術の経済価値定量化に関する研究

A Study on Economic Value of Ship Performance Monitoring Technology considering Change of Maintenance Rule during Operation

穂方和夫¹ 満行泰河² 上野隆治¹

Kazuo Hiekata¹, Taiga Mitsuyuki², and Ryuji Ueno¹

¹ 東京大学大学院新領域創成科学研究科

¹ Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo

² 東京大学大学院工学系研究科

² Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

Abstract: Ship performance monitoring technology which is able to detect the change of ship performance is being developed in shipbuilding field. Although this technology has a possibility of enabling to set appropriate maintenance period, the ways of setting rule and evaluating economic value are not established. In this study, the way of maximizing the economic value of the fouling monitoring technology for ship hull and propeller is proposed, considering options of the maintenance rule. In order to set optimal maintenance rule, simulation was conducted considering maritime market, meteorology and operation.

1 緒言

造船分野において、運航船舶の性能変化を検知するモニタリング技術の研究開発が進んでいる。この船舶性能モニタリング技術によって、従来は不明であった燃料消費量変化の要因を、図1のように船体・プロペラ・エンジン・気海象に詳細化して分析することが可能になる。つまり、船舶の劣化・汚損による性能変化への影響を定量化することができ、運航中船舶のメンテナンス時期の合理化が期待できる。

このようにモニタリング技術はそれ自身には経済的価値は無く、メンテナンスルールの変更などの運用方法との組み合わせで経済価値が生まれる。しかしながら、適切なメンテナンスルールの設定は市場や気海象、運航状況によってその経済効果が変動するため、従来の属人的な判断や一律ルールの下でのメンテナンス実施との優劣を判断するのは困難である。船舶の実海域性能推定手法の研究[1]や市場変動や気海象を考慮した船舶ライフサイクル価値の研究[2]はいくつか行われているが、メンテナンスルール変更の影響を経済価値定量化の研究は存在しない。

本研究では、モニタリング技術のなかでも船体・プロペラ汚損モニタリング技術導入の経済的価値をメンテナンスルールの提供を考慮して最大化する手法を提案することを目的とする。またアプローチと

して海運市場、気海象、運航状況を考慮した運航シミュレータを構築することでメンテナンスルール提供に伴う経済的価値の変化を定量化する。

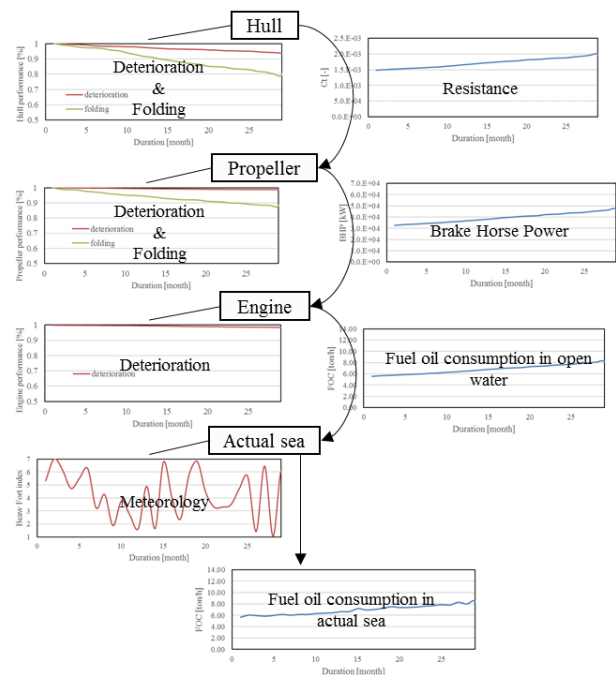


図1：船舶性能モニタリング技術により実現が期待される燃料消費量変化要因の分析例

2 提案手法

2.1 概要

本研究では技術導入が船舶運航に与える経済的効果を定量化するために、船舶性能、海運市場、気海象、運航状況をモデル化した運航シミュレータを構築する。その際、船舶性能モニタリング技術導入によるメンテナンスルール変更の影響を考慮するために、船舶性能モデルのモジュール化を行う。

船舶性能モニタリングに伴うメンテナンスルールの提供に関しては、モニタリング部の性能変化に加えて海運市場、季節による気海象影響を考慮しながら、メンテナンスのダウンタイムコストの回収期間が最小になる時期を選択する手法を提案する。

2.2 船舶運航のモデル化

2.2.1 船舶性能モデル

船舶性能モデルとして船速[knot]と燃料消費量[ton/h]の関係を定義する。本研究ではシミュレーションの際にメンテナンス効果を考慮した意思決定を行うため、先行研究[2]の船舶性能モデルを拡張して、船舶性能を船体・プロペラ・エンジンの各部にモジュール化して経年劣化率・生物汚損率を定義する。

船舶性能モデルのモジュール化の概要図を図2に示す。一般に、船舶は運航において船体・プロペラ・エンジンの経年劣化と生物汚損が要因となって推進性能が低下する[1]。先行研究[3]においても、船舶の性能変化を経年劣化と生物汚損に分けて定義することで表現している。なお、経年劣化はメンテナンスによって修復不可能で、生物汚損はメンテナンスによって修復可能とする。本研究では、船体とプロペラの経年劣化・生物汚損をそれぞれ摩擦抵抗増加とプロペラ単独効率低下で表現し、エンジンの経年劣化を燃料消費率増加で表現する（式(1)～式(3)）。

$$Cf_{actual} = Cf_{design} / (1 - \eta_{dH})(1 - \eta_{fH}) \quad (1)$$

$$\eta_{0_{actual}} = \eta_{0_{design}} * (1 - \eta_{dP})(1 - \eta_{fP}) \quad (2)$$

$$SFOC_{actual} = SFOC_{actual} / (1 - \eta_{dE}) \quad (3)$$

Cf : 船体抵抗係数, η_0 : プロペラ単独効率,
 $SFOC$: 燃料消費量[g/kWh], η_{dH} : 船体経年劣化率,
 η_{fH} : 船体生物汚損率, η_{dP} : プロペラ経年劣化率,
 η_{fP} : プロペラ生物汚損率, η_{dE} : エンジン経年劣化率

また各劣化度 η は先行研究[3]に倣って、以下単位

時間当たり一定で劣化するモデルを設定する。

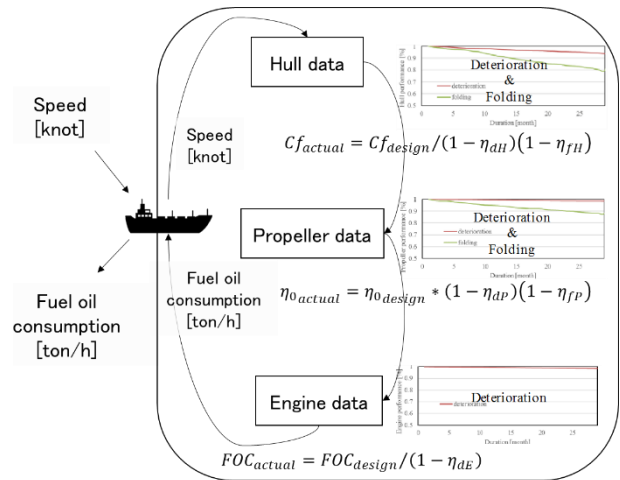


図2：船舶性能モデルのモジュール化

2.2.2 運航プロファイル

船舶の燃料消費量は一般に船速の3乗に比例するとされている一方で、船舶の運航コストは燃料費が大部分を占めており、船速設定が船舶の経済価値に与える影響は大きい。近年、原油価格上昇に伴う燃料費の増加やリーマンショックや中国経済低迷に伴う荷動きの鈍化を背景として、大手船会社は燃料コスト削減を目的に減速航行を実施している。船舶の運航プロファイル（船速・喫水）の推移は海運市場によって変動すると考えられる。

本研究では船舶の運航船速を以下のルールに従って3つの船速（設計船速，中速，低速）を設定する。

- 設計船速…好況時
- 中速…不況かつ燃料低価格時
- 低速…不況かつ燃料高価格時

なお、好不況・燃料価格高低の定義は2.2.3で述べる海運市場を基にケーススタディにおいて設定する。

2.2.3 海運市場

2.2.2で述べたように、海運市場によって船舶運航による収益やコストといった経済価値は変動する。本研究では、燃料価格、運賃、積載量の3つの要素をモデル化する。市場変動のモデル化に関する先行研究は多々あるが、今回は一般的なモデルである一般化 Wiener 過程を用いて海運市場シナリオを作成する。なお、運賃と積載量には相関関係 ($r=0.5$) を定義する。過去データのボラティリティを反映させて、燃料価格と市況（荷動き量、運賃）のシナリオをそれぞれ作成する。

2.2.4 気海象影響

船速一定で運航を行う場合、気海象の影響で燃料消費量は変動する[1]。気海象の程度は、ビューフォート風力階級を用いて表現し、先行研究[2]を改良し、季節ごとにビューフォート風力階級の発現確率をベータ分布で定義する。図3に太平洋の気海象を想定して定義した確率密度関数を示す。一般的に太平洋の気候は夏季穏やかで冬季は穏やかであることが知られている。季節影響を含めることで、2.3で述べるメンテナンスルール設定の際に気海象影響を考慮することが可能になる。

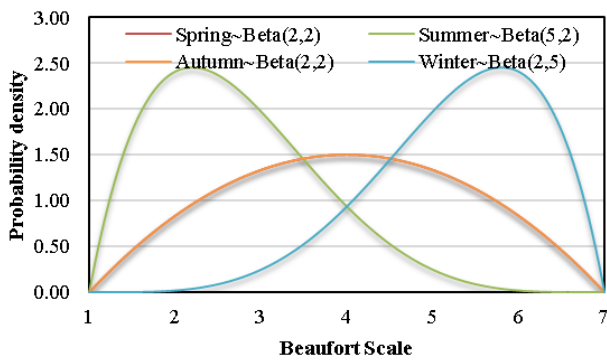


図3：定義した太平洋の気海象発現確率密度関数

気海象が燃料消費量に与える影響は、気海象による速度変化に関する先行研究[4]を参考に、図4のように船舶性能モデルから気海象と燃料消費量の関係を算出する。また、数値計算を容易にするためにビューフォート風力階級と燃料消費量変化は連続値で定義する。

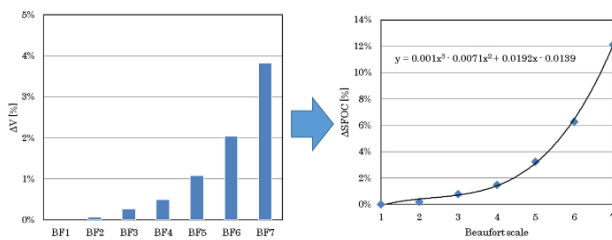


図4：“ビューフォート風力階級－速度変化”から“ビューフォート風力階級－燃料消費変化”の導出

2.3 運航シミュレーション

作成した船舶運航モデルを基にシミュレーションを実行することで船舶の経済価値を定量化する。図5に運航シミュレーションの手順を示す。図中の青色で示した箇所は2.2.3, 2.2.4で定義した不確実要素であり、黄色で示した箇所が本研究の評価対象である。

るメンテナンスルールである。シミュレーションの入力として船舶性能と航路の他に、メンテナンス時間と費用、運航期間、割引率、運航時の間接費・固定費、荷役時間、好不況・燃料価格高低の閾値を設定する。設定された運航期間中、一か月単位で燃料価格と一航海（往復）の収入を海運市場モデルから取得し、2.2.2で示したルールの下で船速を決定する。その後、船舶性能モデルと設定値から単位時間当たりの燃料コストと収入を計算する。

メンテナンスルールに基づいてメンテナンス実行の有無を決定し、実行する場合は船舶性能モデルの生物汚損率を0に更新して、メンテナンス時間とメンテナンス費用を加算した上で一ヶ月当たりの収入と費用を算出する。最終的に運航期間における定期メンテナンス時とモニタリング技術を用いたメンテナンスルール導入時の利益の差分を算出することで、モニタリング技術導入の経済価値を定量化する。

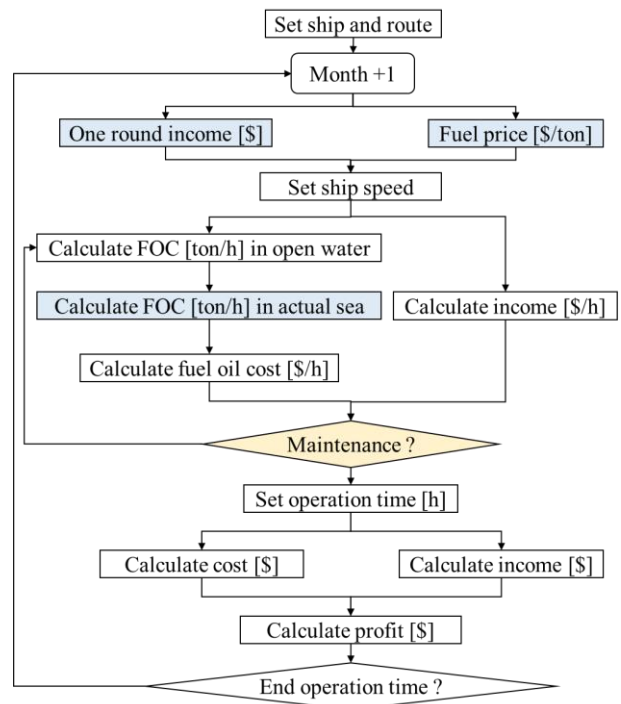


図5：運航シミュレーションの流れ

2.4 モニタリング技術を活用したメンテナンスルールの設定

運航船舶の従来のメンテナンスルールは2.5年に一度の定期メンテナンスであるが、船舶性能モニタリング技術導入によって運航中の性能変化を鑑みたメンテナンス時期の柔軟な設定が可能になると考えられる。特に経済性の観点から、メンテナンスによ

る推進性能回復の経済効果を推定した適切なタイミングでのメンテナンス時期の設定が想定される。本研究では、モニタリング技術の経済価値をこのメンテナンスルールの変更によって定量化する。

メンテナンスルールの設定に関しては、定期メンテナンスは 2.5 年ごとにメンテナンスを実施するものとする。モニタリング技術を用いたメンテナンスルール設定は、前回メンテナンスから 2 年後の時期からメンテナンスの有無による将来利益の差を予測し、メンテナンスコストとダウンタイム損失との回収期間が 1 年以内ならばメンテナンスを実施するものとした。具体的なメンテナンスの判断は、前回メンテナンスから 2 年が経過した期間において以下の式(4)、式(5)で $\pi_{mainte} > Loss_{mainte}$ となった場合にメンテナンスを実施する。なお、一航海収入と燃料価格はメンテナンス判断時の値で一定とし、気象影響は季節毎の発現確率の平均値を用いる。

$$\pi_{mainte} = \sum_{t=1}^{12} P_{fuel} * T_{ope_t} * (FOC_{do_t} - FOC_{0_t}) \quad (4)$$

$$Loss_{mainte} = Income_{t=1} * T_{mainte} + Cost_{mainte} \quad (5)$$

P_{fuel} : 燃料価格[USD/ton], T_{ope} : 運航時間[h/month],
 FOC_{do} : メンテナンス実行時の燃料消費量[ton/h],
 FOC_0 : メンテナンス未実行時の燃料消費量[ton/h],
 $Income$: 単位時間当たり収入[USD/h], T_{mainte} : メンテナンス時間[h], $Cost_{mainte}$: メンテナンス費用[USD]

図 6 に定期メンテナンスとモニタリング技術を用いたメンテナンスルール下での船舶性能劣化の推移例を示す。船舶性能が回復している箇所がメンテナンス実行と対応している。定期メンテナンスの下では 2.5 年毎にメンテナンスが実行されているが、モニタリング技術導入時のメンテナンスルールの下では、メンテナンス時期が前後していることが分かる。

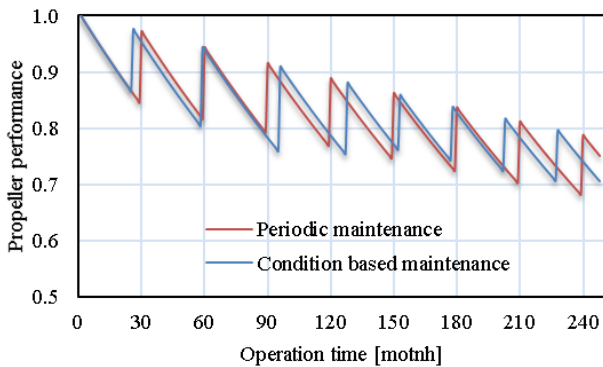


図 6 : 定期メンテナンスとモニタリング技術導入時のメンテナンスルール下のプロペラ性能推移

3 ケーススタディ

3.1 ケーススタディの対象

ケーススタディでは、東京ーロサンゼルス間 (8,843km) を往復運航する仮想のコンテナ船へのメンテナンスルール導入を対象とする。コンテナ船の最大積載量は 6600TEU とし、船舶性能モデルは模型船水槽試験データを用い、運航期間を 20 年とする。

3.2 設定

2.2.1 で述べた経年劣化率・生物汚損率については、船体・プロペラ・エンジンの経年劣化率は全て 0.1 [%/month] とし、船体生物汚損率は 1.0 [%/month], プロペラ生物汚損率は 0.5 [%/month] と設定した。メンテナンスに掛かる時間と費用はそれぞれ 72 [hour], 0.1 [million USD] とし、荷役時間を 24 [hour], 運航間接費を運航収入の 20%, 固定費を 0.5 [million USD/month] とした。また、好不況と燃料価格高低の閾値はそれぞれ、一航海収入 20 [million USD] と燃料価格 380 [USD/ton] とした。

ケーススタディでは海運市場シナリオを、(1)好況・低燃料価格、(2)不況・高燃料価格、(3)安定市場の 3 種類に分けてそれぞれ 100 パターン作成し、各シナリオにおけるメンテナンスルールの効果を検証する。図 7、図 8、図 9 に海運市場モデルから作成した各シナリオでの一航海収入と燃料価格をそれぞれ 10 パターン示した。これらの組み合わせにより 100 パターンの(1)~(3)のシナリオを作成する。

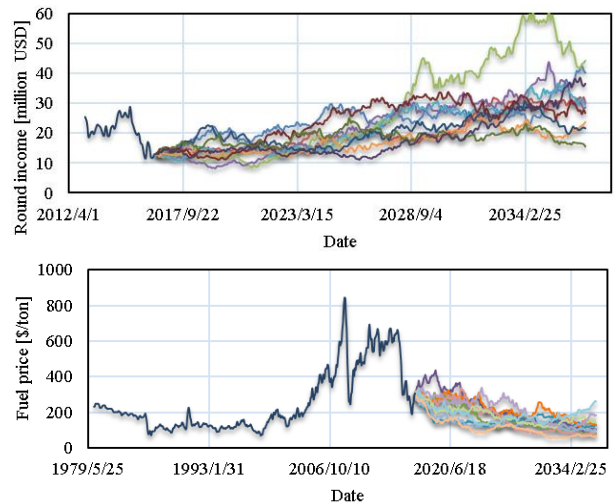


図 7 : 好況・低燃料価格シナリオ下での一航海収入のシナリオ (上図) と燃料価格のシナリオ (下図)

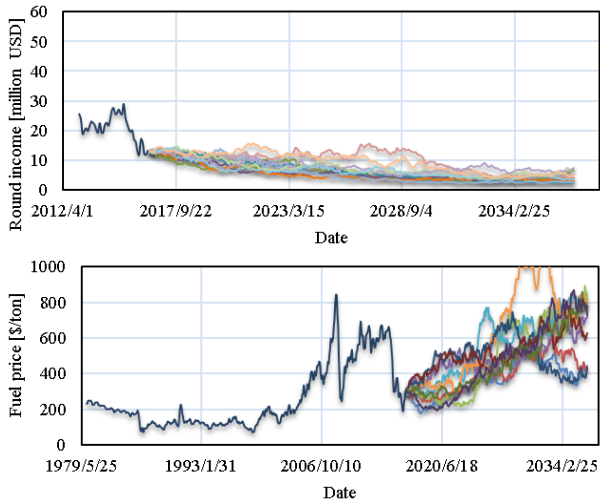


図 8：不況・高燃料価格シナリオ下での一航海収入のシナリオ（上図）と燃料価格のシナリオ（下図）

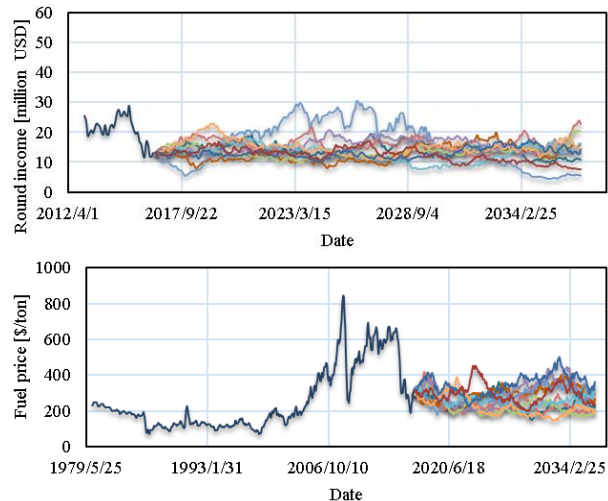


図 9：安定市場シナリオ下での一航海収入のシナリオ（上図）と燃料価格のシナリオ（下図）

3.3 結果

定期メンテナンスの下での一ヶ月ごとの運航利益とモニタリング技術導入後のメンテナンスルールの下での一ヶ月ごとの運航利益のシミュレーション結果の平均値を図 10 に示す。全てのシナリオでモニタリング技術導入後の利益が平均的に上昇することが分かった。利益増分は運航期間によって異なるが、シナリオ 1 は-50 万～150 万 USD、シナリオ 2 は 0～1600 万 USD、シナリオ 3 は 0～350 万 USD 程度の増分であった。また、定期メンテナンスではメンテナンス時期である 2.5 年ごとに利益が低減するが、モニタリング技術導入によって平均利益を増加させながら 2.5 年ごとの利益低減を抑えることができたと言える。

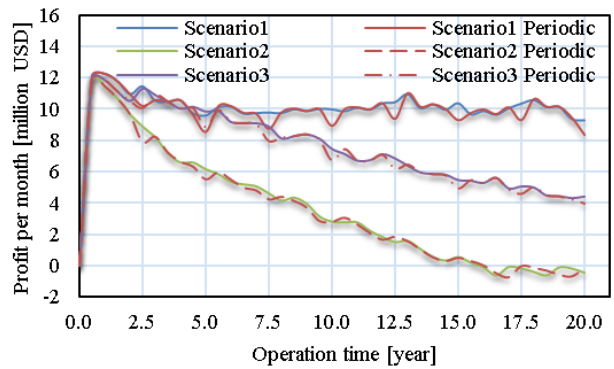


図 10：シナリオごとのモニタリング技術導入前後の一ヶ月あたり利益の比較

また、モニタリング技術導入後のメンテナンス判断をメンテナンス損失の回収期間が 1 年以内と設定したが、この閾値によるシミュレーション結果の比較を図 11 に示す。メンテナンス回数と利益変化は運航期間 20 年が終了した時点での値を用いた。シナリオ 2（不況・高燃料価格）では閾値による変化は見られないが、シナリオ 1（好況・低燃料価格）、シナリオ 3（安定市場）では閾値が有意に結果に影響を与えることが分かる。特に閾値が 1 年（12 ヶ月）以上では利益変化量は少なくなり、メンテナンス回数のみ増加する結果となった。

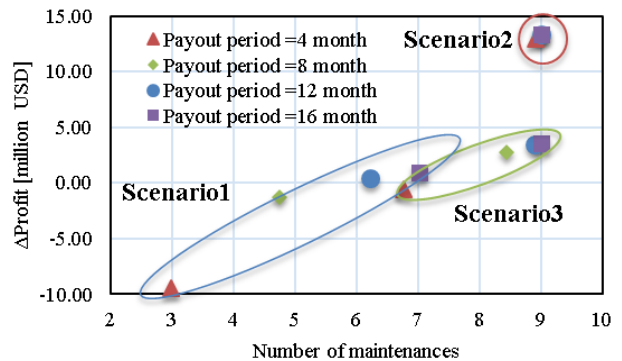


図 11：メンテナンスルールの閾値によるメンテナンス回数と利益変化の比較

4 考察

提案手法において、経年劣化と生物汚損を一定変化するモデルで定義し、船舶性能への影響を式(1)～式(3)のように定式化した。実際の運用において、経年劣化や生物汚損の程度や性能変化への影響は個船、航路、運航状況により異なることが考えられる。この点に関しては、モニタリング技術の本来の機能を用いて個船ごとに得られるデータからチューニング

が可能であると考えられる。気海象の発現確率に関しても、本手法ではベータ分布を用いて簡易的に表現したが、海域毎の過去データから季節ごと、または一ヶ月ごとに発現確率を定義できる。

運航船速が燃料消費量に与える影響は大きく、船速の設定も合理的に決定する必要がある。本手法では従来の設計船速での高速運航と、海運市場の不況を背景とした近年の減速運航をもとにルールを設定した。本手法を用いる際は、実際の船主の運航ルールを反映させて設定するのが適切である。また、今回はメンテナンスに要する時間と費用を一定としたが、実運用でのモニタリング技術評価にあたっては修繕の度合いと時期に応じてこれらを設定し直すことでより信頼性の高い結果を得られると考えられる。

以上のように、実際のデータから各設定値を調整することで、提案手法を用いてメンテナンスルール提供によるモニタリング技術の経済的価値を定量化して効果的な運用方法を検討することができ、技術開発コストや技術導入の意思決定を支援することができる。

5 結言

本研究では、船舶性能モニタリング技術のひとつである船体・プロペラ汚損モニタリング技術導入の経済的価値を、メンテナンスルールの提供を考慮して最大化する手法を提案した。アプローチとして、海運市場、気海象、運航状況を考慮した運航シミュレータを構築することで船舶運航による経済的価値を定量化し、それを用いてメンテナンスによる損失の回収期間を算出してメンテナンス判断を行うルールを提案した。

ケーススタディにおいて、北欧航路を運航する仮想の 6600TEU コンテナ船へのモニタリング技術導入の経済的価値を提案手法によって評価し、海運市場が好景気・不景気・安定景気の 3 パターンにおいて利益が増加することを確認した。提案手法を用いて、メンテナンスルール提供によるモニタリング技術の経済的評価を定量化し、利益を最大化するルール設定を合理的に決定できることを示した。

本研究では、船舶性能モニタリング技術の価値定量化に際して、船舶推進性能変化を考慮したメンテナンス時期の設定を行ったが、今後は構造安全面の異常検知や複数船へのモニタリング技術搭載を想定した評価モデルの構築、モニタリング精度に注目した評価法の提案が期待される。これらによって、モニタリング技術の価値が詳細に定量化され、モニタリング技術開発における意思決定支援が可能になると考えられる。

謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金(基盤(B) 15H04208) の助成を受けて実施したものである。ここに深く謝意を表す。

参考文献

- [1] 宮本雅史: 実海域中推進性能を考慮した船型設計 - 短波長域抵抗増加の近似式と設計への適用-, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 7 号, pp. 107-113, 2008.
- [2] 稗方和夫, 満行泰河, Bryan Moser, 大和裕幸, 齋藤智輝, 和中真之介: リアルオプションを導入した船舶のライフサイクル価値向上に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 23 号, pp.231-237, 2016.
- [3] 杉村泰: シーマージンとプロペラ設計, 日本船用機関学会誌, Vol. 7, No. 9, pp. 643-651, 1972.
- [4] 辻本勝, 佐々木紀幸, 藤原敏文, 上野道雄, 白井謙彰, 加戸正治, 野村大吉, 高木健: 海の 10 モード指標計算法, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 10 号, pp. 97-104, 2009.