

## 実海域実船性能評価指標 -ライフサイクル主機燃費-

黒田麻利子\*, 杉本 義彦\*\*

### **Index for Ship Performance in Actual Seas - Life Cycle Fuel Consumption of a Main Engine-**

by

KURODA Mariko and SUGIMOTO Yoshihiko

#### Abstract

The Index for ship performance in actual seas - Life cycle fuel consumption of a ship's main engine - was developed by the working group for the sub-theme 3 (S3-WG) in OCTARVIA Project. The Index represents ship performance in actual seas as a fuel consumption of a main engine. In the working group, the list for factors to be considered in the evaluation of a ship in operation was made, and the standard calculation condition for each factor was investigated. Among factors to be considered, there are weather conditions of shipping routes, fouling and aging effects, external forces depending on hull forms, ship's arrangement and loading condition, a condition of a main engine operation such as speed, revolution and output. These factors are given as the integrated package of the standard operational condition. Fuel consumption calculated under the standard operational condition is named as the life cycle fuel consumption of a main engine. The estimation method developed by the working group for sub-theme 2 (S2-WG) is applied for the calculation method. The developed evaluation method of the index has been packaged as the web application software.

---

\* 流体設計系, \*\*商船三井

原稿受付 令和 3年7月21日

審査日 令和 3年8月23日

## 目 次

1. はじめに	40
2. 実海域実船性能評価指標	40
2.1 実海域実船性能評価指標の概要	40
2.2 標準運航モデル	41
2.3 計算手法	42
3. パッケージプログラムの紹介と指標計算例	43
3.1 入力例	44
3.2 出力例	46
3.3 指標の活用例	48
4. まとめ	48
References	48

## 1. はじめに

海事クラスタ共同研究「実海域実船性能評価（OCTARVIA）プロジェクト」では、実船モニタリングデータによる実船性能計測・解析・評価方法の開発（S1-WG）、及び、設計段階の実海域性能推定手法の開発（S2-WG）が行われた。また、プロジェクトでは、精度の良い手法を開発するだけでなく、実船性能評価への実用化の重要性も確認され、これを実現するために指標の開発を行ってきた。指標の開発は、プロジェクトのS3-WGにて実施された。S3-WGでは、評価運航条件について検討を行い、この条件のもとで実海域性能計算を行った結果が指標とされた。

船舶の運航条件は、個船ごとに、船型や季節、就航からの年数や経済的な要素、社会環境による需要の変化等様々な要因により異なる。これらの要素を一つ一つそろえて、単独の条件で評価をすることは、船によっては実際の運航条件と乖離する土台で評価することとなり、実際の評価につながらない。しかし、実海域性能への影響が大きい要素を考慮しなければいけない要素として定め、それぞれについて、ある程度の任意性を持った枠組みを設けて標準的条件下で評価を行うことは、実海域性能がよい船や運航計画を見極める上で意義のあることと考えた。

ここでは、実海域実船性能評価指標、及び、指標を評価するために準備したパッケージプログラムの紹介を行う。

## 2. 実海域実船性能評価指標

## 2.1 実海域実船性能評価指標の概要

実海域実船性能評価指標を、船が一生のうちに消費する主機燃料消費量とし、「ライフサイクル主機燃費」と呼ぶこととした。ライフサイクル主機燃費の評価イメージを図1に示す<sup>1)</sup>。実海域性能計算では、海象下で船舶に働く外力を算定し、平水中抵抗と足し合わせた全抵抗と、別途定める自航要素・プロペラ特性から算出する推進効率から、実海域中でのパワーカーブである船速と回転数と出力の関係を推定する。この実海域性能推定には、S2-WGで開発された手法を用いる。主機作動条件（回転数一定、主機出力一定、船速一定、ヒューエルインデックス制御などのモードとその指令値）と燃料消費率SFCを与えれば、推定したパワーカーブ上の釣り合い点を求め、主機作動条件に対応する船速、主機出力、燃料消費量が求められる<sup>2)</sup>。実海域性能計算は任意の海象条件で行うことができるが、指標の計算においては、標準運航モデルとして与えられる計算条件下で行う。計算結果から、主機出力を算定し、それに燃料消費率SFCをかけて燃料消費量を求める。ここで、燃料消費率SFCについて

は、主機出力に直接かけられる入力値で燃料消費量への影響が大きい要素であるが、推進性能に関する以外の環境的な要素により変化しやすいパラメータであることから標準的な値を設定することが難しい。そこで、標準運航モデルで定めるものでなく任意に設定する値とした。つまり、ライフサイクル主機燃費は、実海域中を航行する船が必要とする主機出力をベースとした指標となる。

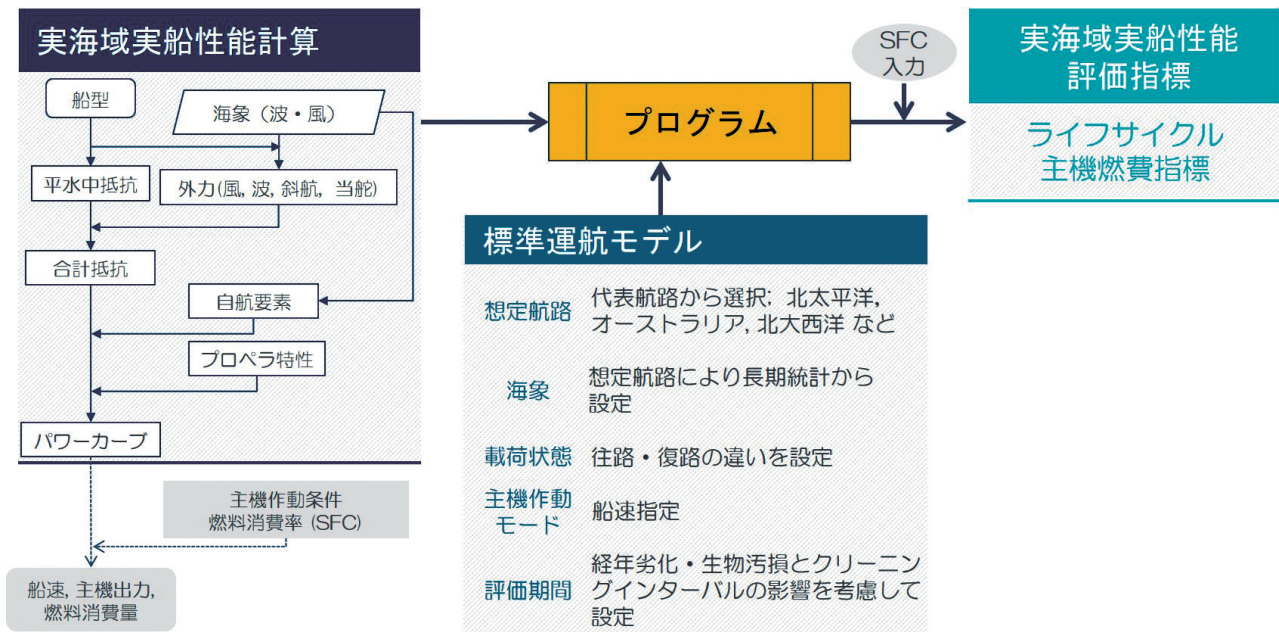


図1 ライフサイクル主機燃費の評価イメージ

## 2.2 標準運航モデル

実海域性能を評価する上で考慮すべき要素として、図1の標準運航モデルに示す5つの項目を設定した。

### (1) 想定航路

代表航路から選択するものとする。代表航路には、北太平洋航路、太平洋西側南北航路、アジアヨーロッパ航路（スエズ経由）、アジアヨーロッパ航路（ケープ経由）、北大西洋航路、中東航路、ワールドワイド航路の7つを用意する。ワールドワイド航路は、一般的に想定される航路のうち最も厳しいと考えられる IACS Rec.34<sup>3)</sup> に示す北大西洋の波浪発現確率を表すものとする。

### (2) 海象

基準となる波（有義波高  $H$ ・平均波周期  $T$ ）と風（平均風速  $V_w$ ）の組み合わせをベースとした頻度分布として与える。基準となる波風の組み合わせ（EC: Evaluation Condition）を表1に示す<sup>4)</sup>。頻度分布は、当所のHPで公開している全球の波と風データベース GLOBUS（ホームページ版）<sup>5)</sup> から得た値を採用する。波向と風向については、GLOBUS に合わせて30度刻みで設定する。GLOBUS（ホームページ版）は、2006年から10年間の気象庁の波浪推算データ（0時間先予測値）を当所で統計解析し、緯度経度10度間隔の海域で気象要素（平均風速、平均風向、有義波高、ピーク波周期、主波向）の発現確率として作成されている。想定航路ごとの対応する海域を図2に示す。

### (3) 载荷状態

往路・復路で想定する载荷状態が異なる場合は、各状態での平水中性能をベースとし、それぞれの状態での静止水面下の船型情報、上部構造物のパラメータを外力評価に用いる。

### (4) 主機作動モード

指令船速による船速一定モードとする。実海域性能の差を評価する上で、船速をそろえた場合の出力差を評価することが理解しやすいため、船速一定とした。载荷状態に合わせ、往路・復路それぞれについて設定する。

### (5) 評価期間

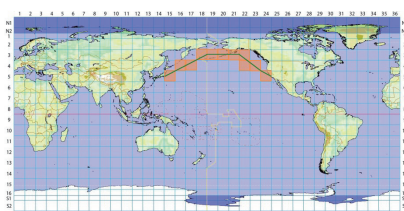
国内船社が船の生涯期間として一般的に想定する15年を評価期間とする。時間による性能悪化影響として、主に海生生物の付着による影響の生物汚損と、それ以外の経年劣化を考慮する。経年劣化として、船体抵抗増加、

燃料消費率 SFC の悪化を考慮する。生物汚損として、船体抵抗増加, プロペラ単独効率の低下を考慮する。クリーニングインターバルとして、2年3年を交互に繰り返すパターンと、2.5年または5年の一定間隔から選択する。クリーニング後は生物汚損による影響がリセットされるものとする。また、1年間あたりの運航日数を表す年間稼働率を設定する。

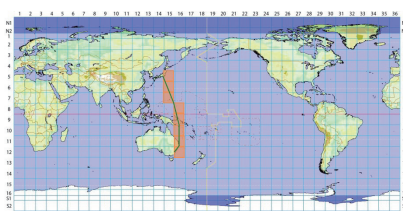
以上をまとめ、表2に示す。

表1 基準海象条件

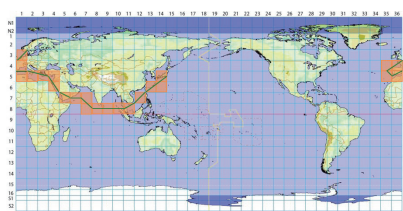
EC	$V_w$ [m/s]	$H$ [m]	$T$ [s]
1	4.4	1.25	4.3
2	6.9	2	5.5
3	9.8	3	6.7
4	12.6	4	7.7
5	15.7	5.5	9.1
6	19.0	7	10.2



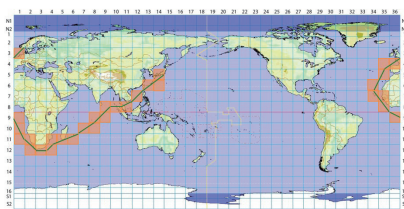
(a) 北太平洋航路



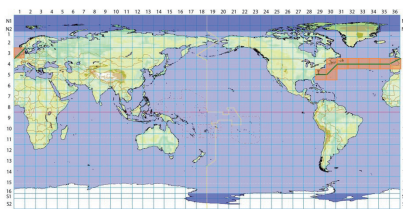
(b) 太平洋西側南北航路



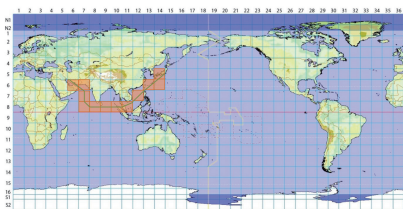
(c) アジア-ヨーロッパ航路  
(スエズ経由)



(d) アジア-ヨーロッパ航路  
(ケープ経由)



(e) 北大西洋航路



(f) 中東航路

図2 想定航路と対応海域

### 2.3 計算手法

OCTARVIA プロジェクトの S2-WG で開発した方法により実海域性能計算を行い、表1に示す基準海象下のパワーカーブ、標準運航モデルで与えた船速における主機出力及び主機燃料消費量を推定する。基準海象ごとの主機燃料消費量を、標準運航モデルで与えられる海象の頻度分布と掛け合わせて長期予測を行い、期待値を算出する。これを一定期間ごとに行い、主機燃料消費量の期待値の経時変化を得て、評価期間(15年)で積分することによりライフサイクル主機燃料消費量を求める<sup>6)</sup>。

表2 標準運航モデル

項目	設定方法
想定航路	以下の代表航路から選択 北大西洋航路, 太平洋西側南北航路, アジア-ヨーロッパ航路（スエズ経由）, アジア-ヨーロッパ航路（ケープ経由）, 北大西洋航路, 中東航路, ワールドワイド航路
海象	長期統計データに基づき, 航路に応じた頻度分布として与えられる
載荷状態	往路・復路それぞれで設定する
主機作動モード	船速一定モードとする
評価期間	評価期間は15年とする. 経年劣化について, 船体抵抗増加と燃料消費率 SFC の悪化を考慮する. 生物汚損について, 船体抵抗増加とプロペラ効率の悪化を考慮する. クリーニングインターバルは, 2年3年を交互に繰り返すパターンと, 2.5年または5年の一定間隔から選択する. 年間稼働率を考慮する.

### 3. パッケージプログラムの紹介と指標計算例

実海域性能指標を計算するためのツールを海技研クラウド上で動作する OCTARVIA-web として整備した。プログラムトップ画面を図3に示す。

OctraviaWeb

**OCTARVIA** Index

**PROGRAM MODE**

OCTARVIA - Index  
 OCTARVIA - Prediction  
 Simulation for fouling and aging effect

**CALCULATION ITEMS**

(1) Evaluation of external forces

(1-1) Added resistance in short crested irregular waves

(1A) Added resistance in regular waves

(1B) Linear superposition for added resistance in short crested irregular

(1-2) Wind force and moment coefficients

(1-3) Hydrodynamic coefficients

(2) Evaluation of ship performance in actual seas and its changes

(3) Lifecycle fuel consumption

Data Input Calculation Save Load Clear

Import from SALVIA-OCT.

Import from EAGLE-OCT.

© 2021 - OctraviaWeb - Privacy

図3 OCTARVIA-web トップ画面



### 3.1 入力例

表2に示した実海域性能を評価する上で考慮する必要がある要素を入力する。入力画面の一部の例として航路・海象の確率分布の入力例と、経年劣化及び生物汚損に関するパラメータの入力例を図4,5に示す。海象の確率分布は、想定航路を選択すると自動的に設定される。図4(a)は航路選択画面、図4(b)は航路ごとの頻度分布 ( $p_{EC}$ : 海象の大きさに関する確率,  $p_{dvoy1/2}$ : 海象の向きに関する確率) である。

#### OCTARVIA\_INPUT

##### Weather

###### Route

Item	Value	Unit	Remarks
Route type	Single	-	Supposed route type - Single: Single route for year around - Combination(route): combination of multiple routes - Combination(route-season): combination of multiple routes per season - Other: Not supposition for a route (direct input of weather condition)

###### Single route

Item	Value	Unit
Route	North Pacific	-
$L_{route}$	4900	NM

###### Remarks

Item	Unit	Remarks
Route	-	Supposed route from the representative routes - Select from [North Pacific, West Pacific, Asia-Europe via Suez, Asia-Europe via Cape, North Atlantic, Asia-Middle East, World-wide].
$L_{route}$	NM	Length of the supposed route (one way) (automatically calculated when Route type is Single or Combination.)
Rate for routes and seasons	%	Contribution rate for routes and seasons per year.
$r_{route}$	%	Contribution rate for routes per year (automatically calculated) (Total rates should be 100 %.)

Reflect Reflect the routes to the weather condition

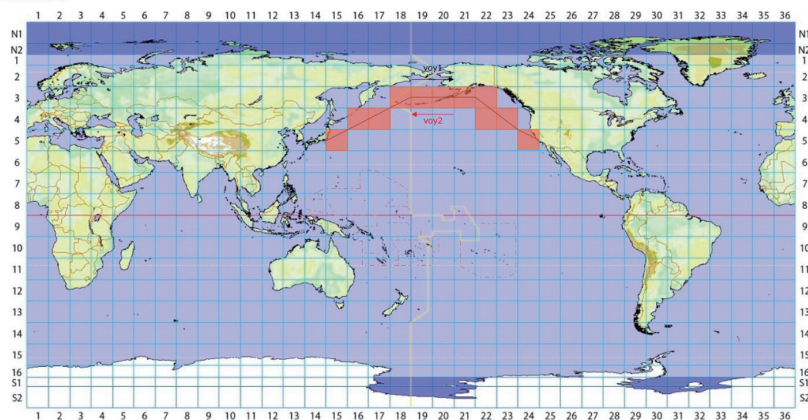


図4(a) 航路・海象の頻度分布の入力（航路選択画面）

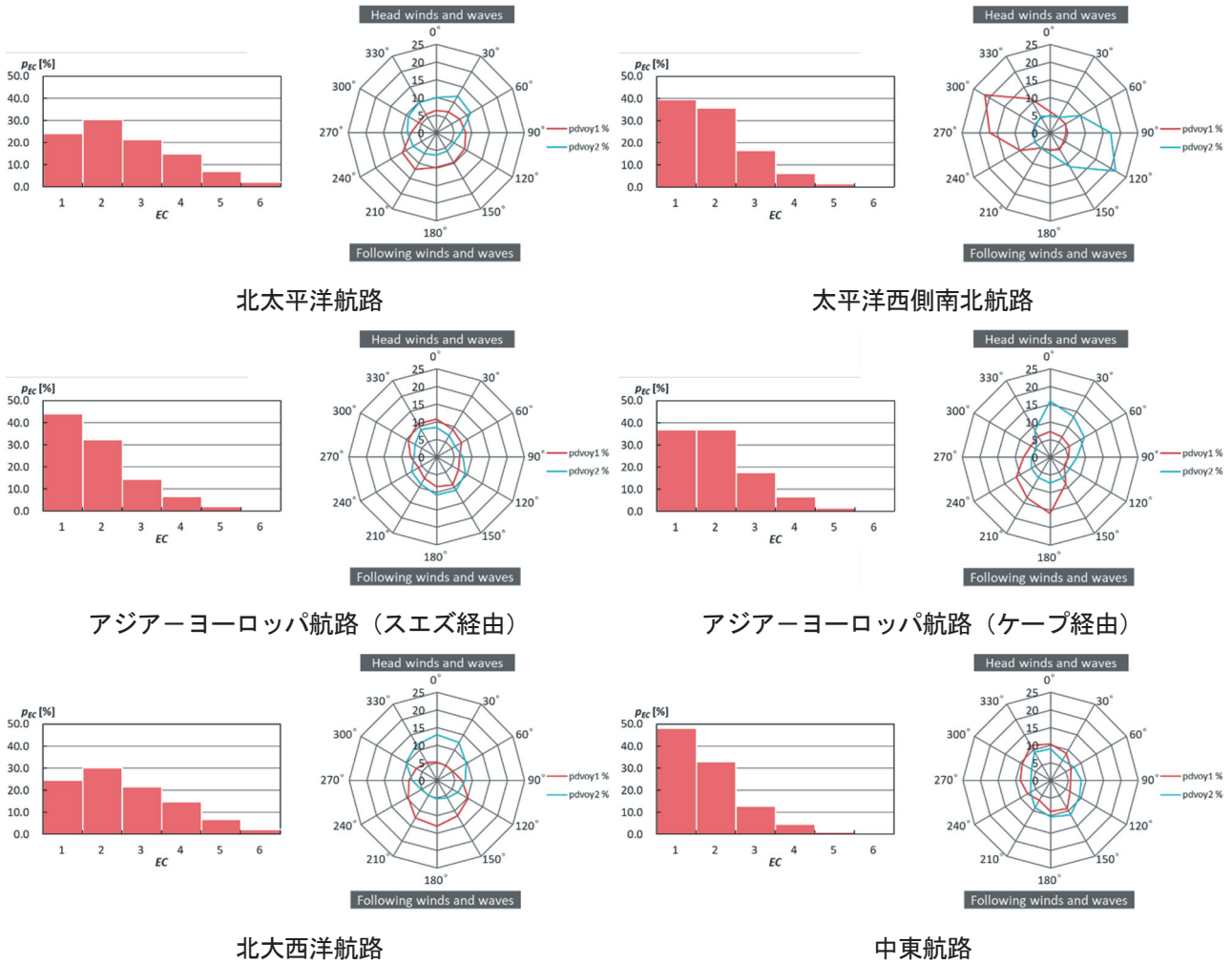


図 4 (b) 航路・海象の頻度分布の入力（航路ごとの海象の頻度分布）

経年劣化及び生物汚損に関するパラメータとして、経年劣化による船体抵抗増加及び SFC の悪化、生物汚損による船体抵抗増加とプロペラ効率の悪化を、それぞれ年間の率で入力するほか、船体・プロペラのクリーニングによる生物汚損影響の回復率を入力する。入力したパラメータに応じて、船体抵抗・プロペラ単独効率・燃料消費率 SFC の計算時間ごとの変化率が設定される。図 5(a)は経年劣化及び生物汚損に関するパラメータ入力画面、図 5(b)は船体抵抗の変化 ( $\Delta R$ : 経年劣化及び生物汚損による船体抵抗変化率,  $\Delta R_0$ : 経年劣化による船体抵抗変化率)・プロペラ単独効率の変化 ( $\Delta \eta_0$ )・燃料消費率 SFC の変化 ( $\Delta SFC$ ) である。経年劣化及び生物汚損に関するパラメータは任意に入力するが、実船モニタリングデータをもとに設定することが考えられる。S1-WG で開発された実船モニタリングデータ解析法で、航海ごとのパワーカーブを評価し、そこから同一載荷状態での同一船速での主機出力の 1 年あたりの変化率を調べて、その値を船体抵抗の年間増加率に用いることできる。船体・プロペラ両方のクリーニング前後のデータや船体・プロペラのどちらかのみクリーニングした結果があれば、経年劣化と生物汚損の影響を分離した入力や、船体抵抗成分とプロペラ単独効率成分を分離した入力も可能となる。

プロジェクトの S1-WG では、モニタリングデータの解析を行いパワーカーブを推定するプログラム SALVIA-OCT.および外力計算に必要な船型パラメータを簡易推定するプログラム EAGLE-OCT.が開発された<sup>7)</sup>。OCTARVIA の入力となる平水中性能や船型情報については、これらのプログラム出力をインポートデータとして取り込むことが可能である。

## Parameters For Life-cycle Fuel Consumption Section

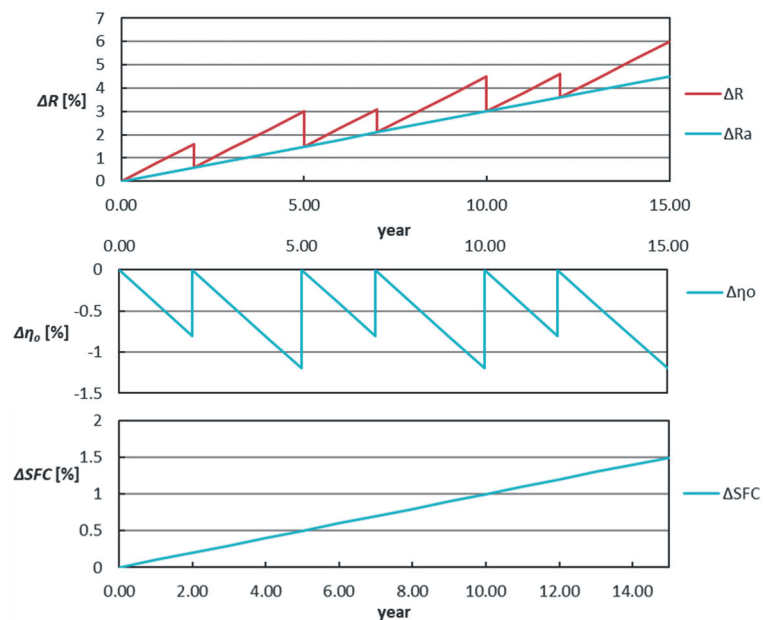
Mode

Item	Value	Unit	Remarks
ModelAF	Linear model	-	Mode for the evaluation of aging and fouling - Linear model: Linear formulae are applied. (input of specific parameters) - Input: An arbitrary pattern for aging and fouling is used. (direct input of time and parameters in the right table.)

Specific parameters

Item	Value	Unit	Remarks
$p_{as}(R)$	0.3	%/year	Aging deterioration for hull (increase ratio due to aging of hull resistance)
$p_{ag}(SFC)$	0.1	%/year	Aging deterioration for engine governor (increase ratio of SFC)
$p_{fs}(R)$	0.5	%/year	Fouling deterioration for hull (increase ratio due to fouling of hull resistance)
$p_{fp}(\eta)$	0.4	%/year	Fouling deterioration for propeller (deterioration ratio of propeller efficiency in open water)
$r_{pas}$	0	%	Retrieval percentage on aging deterioration for a hull per cleaning interval
$r_{pfs}$	100	%	Retrieval percentage on fouling deterioration for a hull per cleaning interval
$r_{pfp}$	100	%	Retrieval percentage on fouling deterioration for a propeller per cleaning interval
$T_{ch}$	Combi. 2 and 3	year	Cleaning interval for hull (combination of 2 and 3 years or an arbitrary interval) ( $\Delta T_{ch}$ must be a multiple number of $\Delta T_E$ )
$T_{cp}$	Combi. 2 and 3	year	Cleaning interval for propeller (combination of 2 and 3 years or an arbitrary interval) ( $\Delta T_{cp}$ must be a multiple number of $\Delta T_E$ )
$T_E$	15	year	Evaluation period ( $1 \leq T_E \leq 25$ )
$\Delta T_E$	1	year	Evaluation period ( $0.25 \leq \Delta T_E \leq T_E$ ) Select from the dropdown list. ( $\Delta T_E$ must divide $\Delta T_{ch}$ and $\Delta T_{cp}$ , and must be smaller than them.)

図 5 (a) 経年劣化及び生物汚損に関するパラメータの入力 (入力画面)

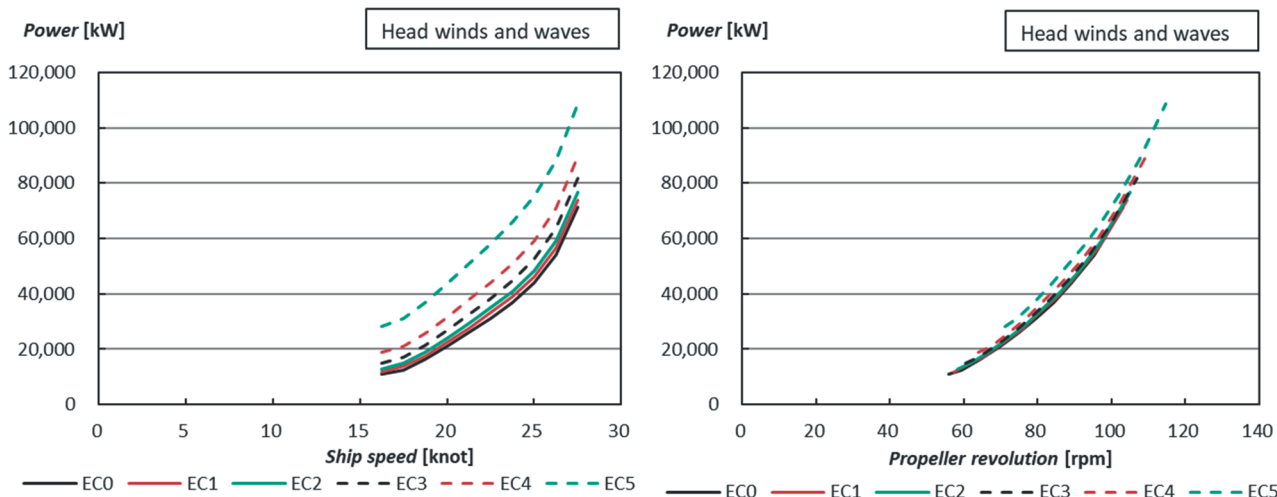
図 5 (b) 経年劣化及び生物汚損に関するパラメータの入力  
(船体抵抗・プロペラ単独効率・燃料消費率 SFC の変化)

## 3.2 出力例

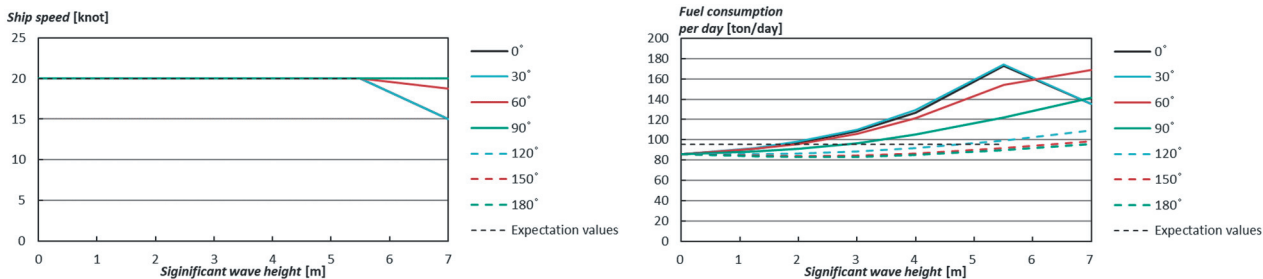
出力例を図 6 に示す。図 6(a)は実海域中のパワーカーブである。プログラム内では、表 1 に示した EC 1~6 の 6 つの条件とベースになる平水条件 (EC0), また、主波向, 風向について 30 度刻みで向波向風から追波追風までの海象条件で実海域性能計算を行う。図 6(a)は出力されるパワーカーブの一部 (向波向風の場合) を示している。



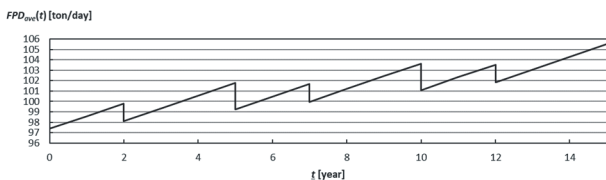
図6(b)は、基準海象下の船速・主機燃料消費量の結果である。例では指定船速を20knotとしているが、海象の向きが向や斜向の状態では、有義波高が高くなると主機トルクリミットとの関係から回転数が低下し、船速が落ちる。その結果、主機燃料消費量についても低下している。図6(c)に、基準海象下の短期予測結果と海象の頻度分布を掛け合わせた長期予測結果の経時変化を示す。経年劣化及び生物汚損の影響により、一定船速での主機燃料消費量が当初の値である約97.4ton/dayから、15年後には約105.5ton/dayとなっており、約8%悪化していることがわかる。図6(d)に、経時変化を積分した結果として算出される、船が一生のうちに消費する主機燃料消費量「ライフサイクル主機燃費」を示す。感覚的に理解しやすくするため、トータルの主機燃料消費量を平均して1日当たりの燃費に換算して示している。



(a) 実海域中のパワーカーブ



(b) 基準海象下の短期予測結果（船速、主機燃料消費量）



(c) 長期予測結果の経時変化（主機燃料消費量）

INDEX		
Item	Value	Unit
Lifecycle fuel consumption	101.27	ton/day

Elements		
Item	Value	Unit
Total fuel consumption	5.548E+05	ton
Total amount of cargo	4.285E+07	ton
Total distance for transport work	2.625E+06	mile

Sub-indexes		
Item	Value	Unit
Fuel consumption per ton-mile	0.0049	g/(ton-mile)
Fuel consumption per day per TEU	0.01560	(ton/day)/TEU

(d) ライフサイクル主機燃費

図6 プログラム出力例（6500TEU コンテナ船）

### 3.3 指標活用例

指標の活用例として、塗料が異なる場合の評価を経年劣化及び生物汚損に関するパラメータを変化させて行った。ここで、経済的な塗料を用いた場合、生物汚損による船体抵抗増加を5%/year、高性能塗料を用いた場合1%/yearとし、経年劣化による船体抵抗増加はどちらの場合も1.5%/yearとした。クリーニングインターバルは2年3年を交互に繰り返すパターンとし、年間稼働率は1.0とした。150,000DWTバルカー・ワールドワイド航路を対象に、往路をバラスト喫水状態、復路を計画満載状態で、往路復路ともに指定船速12knotとして評価を行った結果を表3に示す。この場合、塗料による差はライフサイクル主機燃費で約6,300ton、一日平均で約3.6%と算出され、定量的な評価が可能となる。

表3 指標による塗料の評価例

Items		Economical paint	High quality paint
Increase rate of hull resistance	due to fouling	5.0 %/year	1.0 %/year
	due to aging	1.5 %/year	1.5 %/year
Life cycle fuel consumption	total	176,984 ton	170,613 ton
	average	32.3 ton/day	31.2 ton/day

## 4. まとめ

OCTARVIA プロジェクトのS3-WGでは、船が一生のうちに消費する主機燃料消費量を表す指標「ライフサイクル主機燃費」の開発を行った。指標を評価する上で考慮すべき要素について検討を行い、標準運航モデルを作成した。また、指標を計算するためのパッケージプログラムOCTARVIA-webを開発した。本プログラムを用いることにより、実海域中のパワーカーブ、基準海象下の性能、一定期間ごとの燃料消費量の経時変化、ライフサイクルにおける主機燃料消費量を評価することができる。指標を活用することにより、船型の評価、船速・航路の評価、メンテナンスインターバルの最適化が可能となる。

## 謝 辞

本研究は、海事クラスタ共同研究実海域実船性能評価プロジェクト（OCTARVIA プロジェクト）によって実施されました。ワーキンググループ等を通じて議論いただいた各位に深く感謝致します。また、標準運航モデルに関してヒアリングなどご協力いただいた皆様に感謝いたします。

## References

- 1) Y. Sugimoto and M. Kuroda, Construction of the Index for Ship Performance in Actual Seas, Bulletin of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 82, 2019 (in Japanese).
- 2) M. Tsujimoto, M. Kuroda, N. Sogihara, "Development of a Calculation Method for Fuel Consumption of Ships in Actual Seas with Performance Evaluation", Proc. of 32nd OMAE, OMAE2013-11297 pp.1-10, 2013.
- 3) IACS: Standard Wave Data, Recommendation No. 34, Corr. 2001, International Association of Classification Societies.
- 4) M. Kuroda and Y. Sugimoto: Evaluation of Ship Performance in terms of Shipping Route and Weather Condition, Ocean Engineering (under Review).

- 5) M. Tsujimoto, T. Matsuzawa and K. Kume: Statistical Characteristics of Global Winds and Waves, Proc. of the Twenty-eighth International Ocean and Polar Engineering Conference, pp. 379-386, 2018.
- 6) Y. Sugimoto and M. Kuroda, Development of the Evaluation Method for Ship Performance in Actual Seas - Index for the Life Cycle Fuel Consumption of a Main Engine, Conference Proceedings of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 30, pp. 137- 140, 2020.
- 7) N. Sogihara and H. Sato: Establishment of Ship Performance Monitoring Method in Actual Seas, Report of National Maritime Research Institute, Vol. 21-2, 2021 (in Japanese).