

船型要目最適化プログラム HOPE Light

一ノ瀬康雄*, 久米 健一*

A Program named “HOPE Light” for Optimizing Hull-Form Dimensions

by

Yasuo ICHINOSE and Kenichi KUME

Abstract

A program called HOPE Light for optimizing hull-form dimensions of a merchant ship has been developed at the National Maritime Research Institute (NMRI), Japan. The program gives not only propulsion power of the ship which has good performance but also maneuverability, sea keeping and cavitation-performance related to hull vibration. It shows main engines which are suitable for the ship and fuel consumption of each engine. It also gives rudder form, propeller design, speed in waves and approximate estimation of EEDI (Energy Efficiency Design Index) which is applied to vessels working for international voyage and having more than 400 gross tonnage from January 2013.

In this paper, the estimation methods for the ship performance in HOPE Light are briefly presented, and two examples of the results using HOPE Light are described. One is the effect of deadweight due to fullness of ship on EEDI under the condition of same dimension. The other is the relationship between diameter of propeller and fuel consumption of ship at the same speed.

* EEDI プロジェクトチーム

原稿受付 平成28年1月21日

審査日 平成28年2月29日

目 次

1. まえがき	15
2. HOPE Light の概要	16
2.1 船型パラメータの標準設計ルーチン	16
2.1.1 必須入力データ	16
2.1.2 詳細入力データ	16
2.1.3 船型パラメータの標準値	17
2.2 性能推定ルーチン	18
2.2.1 船体抵抗・推進性能の推定	18
2.2.2 プロペラ設計	20
2.2.3 パワーカーブ推定	20
2.2.4 主機の選定・燃費の推定	20
2.2.5 舵設計・舵トルク及び操縦性の推定	21
2.2.6 波浪中抵抗増加と船速低下の推定	21
2.2.7 エネルギー指標 EEDI 値の略算	22
2.3 カスタマイズ機能	22
3. HOPE Light の活用例	22
3.1 同一寸法で船を肥大化させた時の EEDI 略算値の変化	22
3.2 プロペラ直径を変化させた時の主機燃費の変化	24
4. おわりに	24
参考文献	24

記 号

L_{PP} : 垂線間長 [m]
L_{WL} : 水線長 [m]
B : 船幅 [m]
D : 型深さ [m]
d : 計画満載喫水 [m]
Δ : 排水量 [ton]
∇ : 排水量 [m^3]
LW : 軽荷重量 [ton]
DW : 載貨重量 [ton]
V_s : 設計船速 [knot]
V : 船速 [m/s]
LCB : 浮心前後位置 [% L_{PP}]
F_r : フルード数 [-]
D_P : プロペラ直径 [m]
C_B : 方形係数 [-]
C_M : 中央横断面係数 [-]
C_P : 柱形係数 [-]
C_{PF} : 船体前半部柱形係数 [-]
C_{PA} : 船体後半部柱形係数 [-]
S_W : 水面下の船体表面積 [m^2]
R : 船体抵抗 [kN]

C_T : 全抵抗係数 [-]
 R_W : 造波抵抗 [kN]
 C_W : 造波抵抗係数 [-]
 K : 形状影響係数 [-]
 η : 推進効率 [-]
 P : 制動馬力 [kW]
 ρ : 海水密度 [kg/m^3]
 g : 重力加速度 [m/s^2]
 ζ_a : 入射波の振幅 [m]
 V_w : 相対風速 [m/s]
 ρ_a : 空気密度 [kg/m^3]
 $EEDI^*$: エネルギー効率設計指標 (EEDI) を簡易算定した略算値 [g/ton · nm]

1. まえがき

船舶設計の最上流では、就航する予定の航路や港湾設備の仕様等の物理的制約や、船速や燃料消費量等の船主要求及び建造コスト等を意識しながら、船の長さや幅、深さ、排水量等の主要目の決定を行う。主要目が決まると、その船が達成しうる推進性能の上限は大方押さえられてしまうため、主要目は入念に検討される。

主要目が推進性能に与える影響は、古くから主要目や船型を系統的に変化させた模型船の水槽試験により研究されており、Tylor 図表¹⁾や山縣の図表²⁾等、図表形式でまとめられている。海上技術安全研究所(以下、海技研)でも、前身である運輸技術研究所、船舶技術研究所の時代から、1955年から1964年の約10年の歳月をかけまとめられた肥大船型に対する系統模型試験結果³⁾をはじめ、内航船に関する系統的模型試験結果⁴⁾等、長年にわたり研究が積み重ねられている。

これらの系統的な模型試験結果は、船型学をめざましく発展させた。その成果の一つが、良好に設計された肥大船型では船首 Entrance 曲線部が造波抵抗を、船尾 Run 曲線部が形状抵抗および自航要素を主に支配するとした船型可分原理⁵⁾の発見である。船型可分原理により、従来船長船幅比や肥大度のみで構成されていた図表は、船長方向の断面積分布である C_p カーブ形状を考慮した船型パラメータに基づく図表に高度化された。さらに1990年代後半になると、ニューラルネットワーク等コンピュータサイエンスを応用した性能データベースの解析手法が研究⁶⁾され、時代と共に高性能化する最新の性能データに更新され続けている。これら船型学の研究は、推進性能を支配する不変な船型パラメータの発見及びその定式化と、時代と共に高性能化する性能データの解析により発展し、船舶の高性能化に貢献している。

一方、主要目は推進性能の観点だけでなく、操縦性、耐航性、復原性、一般配置、構造強度、建造コスト、生産設備などあらゆる観点から決定される。近年では、地球温暖化ガス(GHG: Green House Gas)の削減スキームとして2013年1月1日に発効したEEDI(Energy Efficiency Design Index)規制も要目の決定に影響を与えている。海技研では、このように複雑化する主要目の決定に関して国内造船所の優位性をより高めるため、船型要目最適化プログラムHOPE(Hull Optimization Program for Economy)の開発を2006年度から開始した。そして2007年度からは、HOPEを一般の造船所、船会社、プロペラメーカー等の一般の使用に供し、2010年度からはExcelベースのユーザーインターフェースを備えたHOPE Light(図1)に開発資源を集中しバージョンアップを続けている。

HOPE Lightは船長、船幅、計画満載喫水、排水量等の数種類の入力項目から、推進性能に加え簡易的な波浪中性能、操縦性能、軽荷重量、主機燃費を推定し、EEDIを略算することが出来るプログラムである。また、船長、プロペラ直径等の主要目をパラメータとしたパラメータスタディ機能を搭載しており、性能の概略把握及び要目の感度解析が簡易に出来る。これらは、熟練設計技術者の暗黙知の可視化に相当し、若手技術者育成講座でHOPE Lightを教材として使用する例もある。

本稿でははじめにHOPE Lightの概要を紹介し、続いてHOPE Lightを用いて行ったプロペラや主機に関する検討を行い、同プログラムの有用性を示す。

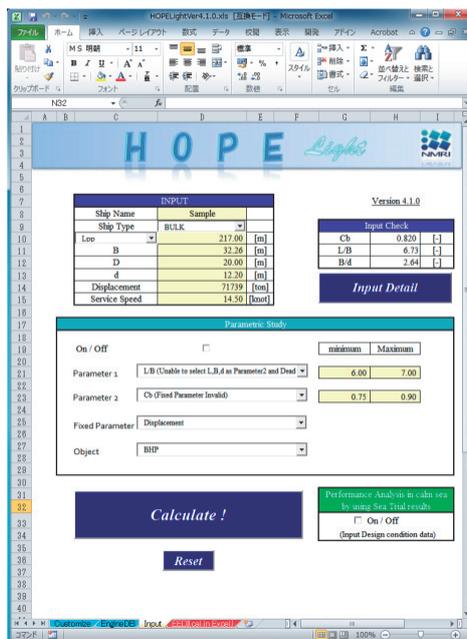


図1 HOPE Light のトップ画面

2. HOPE Light の概要

HOPE Light は①入力要目から詳細な船型パラメータを標準設計する標準設計ルーチンと②船型パラメータから性能を推定する推定ルーチンの2つから成る。単なる類似船からの類推ではなく、精度を確保しつつ、それまでの実績にない要目の組み合わせを持つ船型についても高い精度で性能推定を行うため、造波抵抗、自航要素等それぞれの性能要素に、支配的な影響を持つ詳細な船型パラメータを採用した。また、要目最適化プログラムとしての利便性を確保するため、船型パラメータを標準設計するルーチンを作成し、プログラムの実行に必須の入力パラメータを可能な限り少なくした。勿論、詳細な船型要素を入力し、性能推定の精度を高める詳細入力機能もある。

HOPE Light の標準値は、海技研の所有するデータベースから算定される。そのため、時代及び造船所各社の独自設計により変わるデータに対応するカスタマイズ機能を備えている。カスタマイズを伴わない HOPE Light の標準値は、個船の性能に対する絶対値ではなく、船の主要目と性能の相対比較、または要目の詳細が不明な船舶の概略性能の推定に利用される。

本章では、HOPE Light の標準設計ルーチンとカスタマイズ機能を含む性能推定ルーチンについて、その概要を紹介する。ただし、ここに記載しない機能があるほか、随時機能を追加していることを付記する。

2.1 船型パラメータの標準設計ルーチン

2.1.1 必須入力データ

船種は Tanker, Bulk Carrier, Container Ship, PCC, Domestic Tanker, Domestic Cargo の6種類から選択可能で、最低限必要な入力データは主要目 L_{PP} , B , D , d , Δ 設計船速 V_S の6データのみである。船種情報は、主に船種により標準値が異なる船型パラメータの推定に使用する。 D は船の型深さで軽荷重量 LW を推定するために用いられる。

2.1.2 詳細入力データ

前記の必須入力データの他に、任意で詳細データの入力が可能である。詳細入力データには、浸水表面積、浮心前後位置、プロペラ直径、舵のタイプ、水面上側面積、中央横断面積係数、主機メーカー、主機の NOx 規制等が含まれる。詳細データを入力することにより、高精度の推定が可能となる。また、詳細入力値をパラメータとした性能に対する感度解析も出来る。

2.1.3 船型パラメータの標準値

本稿では、船型パラメータの標準値の内、特に推進性能への影響が大きい浮心前後位置、プロペラ直径及び浸水表面積の標準推定式について紹介する。

浮心前後位置 LCB は船の肥大度 C_B 、船速(フルード数 F_r)から(2.1)式で推定する。ここで、(2.1)式中の lcb_C_B 、 lcb_C_0 、 lcb_F_r 、 lcb_Bd 、並びに(2.2)式中の $F_{rSTD_C_B}$ 、 $F_{rSTD_C_0}$ は、一意に決定する係数である。これらの係数は、船種に依存しない。HOPE Lightでは、これらの係数を事前にデータベースから求め性能推定を行っている。一部の係数はユーザーによるカスタマイズが可能である。また本稿では以後、これらの決定係数は、*を任意の文字列として lcb_* のように表現し、参照する。

$$LCB = lcb_C_B \times C_B + lcb_C_0 + lcb_F_r \times (F_r - F_{rSTD}) + lcb_Bd \times B/d \quad (2.1)$$

$$F_{rSTD} = F_{rSTD_C_B} \times C_B + F_{rSTD_C_0} \quad (2.2)$$

プロペラ直径 D_p は、船尾プロファイルに対して可能な限り大直径のプロペラを搭載していると仮定し、建造実績より Scantling 状態の喫水 d_{scant} から(2.3)式で推定する。ここで、 Dp_* は船種で変わる係数であり、 d_{scant} が詳細入力で与えられていない場合は、 $d_{scant} = d$ とする。

$$D_p = (Dp_D \times d_{scant} + Dp_C) \times d_{scant} \quad (2.3)$$

船体の浸水表面積の推定は、Dennyの式を基本とし、(2.8)式に示す船尾フレームラインのU型、V型傾向をパラメータ化したフレームラインファクターの標準値からの変化率を考慮し、(2.4)式で推定する。さらに、付加物として、舵の面積とビルジキールの面積を(2.6)、(2.7)式で推定する。ここで、舵面積は後述する操縦性能推定において基準を満たさない場合、基準をクリアする舵面積に増加させる。ビルジキールの面積は、船長の25%の長さ、ライズオブフロアがない場合のビルジサークルを仮定し、45度の角度で船側と船底が仮想交差する点までの幅から算定している。(2.9)式は対象船型に対するフレームラインファクターの計算式、(2.10)式は標準フレームラインファクターの計算式である。また、係数 Swh_* 及び Pct_FLF_* は其々船種に依存しない。

$$S_W = S_{WHull} + S_{WRudder} + S_{WBK} \quad (2.4)$$

$$S_{WHull} = (Swh_D \times d + Swh_CbB \times C_B \times B) \times L_{WL} \times (1.0 + Pct/100.0) \quad (2.5)$$

$$S_{WRudder} = (Swr_C0 \times \frac{C_B}{L_{PP}/B} \times L_{PP} \times d) \times 2.0 \quad (2.6)$$

$$S_{WBK} = (0.25 \times L_{WL}) \times \{(\sqrt{2} - 1) \times \sqrt{B \times d \times \frac{1.0 - C_M}{2.0 - \pi/2.0}}\} \quad (2.7)$$

$$Pct = Pct1 - Pct2 \quad (2.8)$$

$$Pct1 = Pct_FLF3 \times FLF^3 + Pct_FLF2 \times FLF^2 + Pct_FLF1 \times FLF + Pct_FLF0 \quad (2.9)$$

$$Pct2 = Pct_FLF3 \times FLFini^3 + Pct_FLF2 \times FLFini^2 + Pct_FLF1 \times FLFini + Pct_FLF0 \quad (2.10)$$

標準フレームラインファクター $FLFini$ は1軸船の場合、船尾肥大度係数 p から(2.11)式で算定される。また、(2.14)式に示すフレームラインファクター FLF は形状影響係数を含む(2.14)式で定義する。ここで、船尾肥大度 γ_A は船尾部の C_p カーブの勾配を表すパラメータであり、船尾肥大度係数 p はこれに C_M の影響を考慮したパラメータである。形状船尾フレームラインファクター FLF は、詳細入力で調整可能なパラメータである。ここで、係数 $FLFini_*$ は船種に依存しない。

$$FLFini = FLFini_P2 \times p^2 + FLFini_P1 \times p + FLFini_P0 \quad (2.11)$$

$$p = \frac{C_M}{L_{PP}/B \times \sqrt{B/d} \times C_B} \times \gamma_A \quad (2.12)$$

$$\gamma_A = \frac{B/L_{pp}}{1 - C_{PA}} \quad (2.13)$$

$$FLF = \frac{K - 2.25 \times p}{0.2} \quad (2.14)$$

2.2 性能推定ルーチン

2.2.1 船体抵抗・推進性能の推定

3次元外挿法では船体抵抗 R を(2.15)式, 推進効率 η を(2.16)式で定義したとき, 船舶の推進に必要な動力(制動馬力) P は(2.17)式で表される.

$$R = \frac{1}{2} \rho V^2 S_W \times [(1 + K)C_{F0} + C_W + \Delta C_F] \quad (2.15)$$

$$\eta = \frac{1 - t}{1 - w_S} \eta_O \eta_R \eta_T \quad (2.16)$$

$$P = \frac{R \times V}{\eta} \quad (2.17)$$

これらのうち, 海水の密度 ρ は既知であり, 船速 V は設計条件として与えられる. 平板摩擦抵抗係数 C_{F0} には, いくつかの実験式があり, HOPE Light は国内で主に採用されている Schoenherr の式を標準とする. 粗度修正係数 ΔC_F 及び伝達効率 η_T は, 実船との相関係数で経験値として決まるものである. これらは指定値を入力可能であるが, 標準 ΔC_F は ITTC1978 の式($K_s = 100 \mu\text{m}$), 標準 η_T は 0.98 である.

HOPE Light は, 抵抗要素の形状影響係数 K と造波抵抗係数 C_W および自航要素の推力減少係数 $1 - t$, 伴流係数 $1 - w_S$, 推進器効率比 η_R のそれぞれを, 入力された主要目から過去の実績に基づくデータにより推定する. 原則として, 船種により性能推定式の係数は使い分けしない. HOPE Light では 2 軸船の性能推定も可能であるが, 本稿では 1 軸船の推定法について説明する.

造波抵抗係数 C_W は造波抵抗 R_W を(2.18)式で無次元化した係数であり, 主に船首部の船長方向の断面積分布である C_p カーブ形状の影響を受ける. 肥大船の場合, 船体前半部柱形係数 C_{PF} が決まると, 設計できる C_p カーブ形状の自由度は小さく, 良好に設計された肥大船を仮定すると, データのまとまりは比較的良い. 一方, 瘦形船型の場合は, C_p カーブ形状の設計の自由度が大きいため, データのまとまりが比較的悪い. このため HOPE Light では, 船種により(2.19)式に示す肥大船用 rwB と瘦形船用 rwL に分類し, 整理した実験データベースを補間することで推定を行う.

$$C_W = \frac{R_W}{1/2 \rho V^2 S_W} \quad (2.18)$$

$$rwB = \frac{R_W}{1/2 \rho V^2 B^2}, \quad rwL = \frac{R_W}{\rho V^2 \nabla^{2/3}} \quad (2.19)$$

rwB は, 船幅 B ベースのフルード数 $F_{rB} = V/\sqrt{gB}$ および(2.20)式で定義する船首 C_p カーブの平均的な勾配 He と中央横断面係数 C_M の影響を表す船首肥大度パラメータ $C_M He/B$ を採用し, これらの係数で整理されたデータベースをスプライン補間して推定する.

$$C_M He/B = \frac{L_{PP} C_M (1 - C_{PF})}{B \cdot 2} \quad (2.20)$$

rwL は, フルード数 $F_r = V/\sqrt{gL_{WL}}$ に対して 3 次, (2.21)式で定義する船首 C_p カーブの平均的な勾配を表す船首肥大度 γ_E に対して 1 次の多項式で推定する.

$$\gamma_E = \frac{B/L_{pp}}{1 - C_{PF}} \tag{2.21}$$

形状影響係数 K は、物体曲面の影響による摩擦抵抗増加と粘性による圧力抵抗に分けられる。このうち粘性による圧力抵抗は、肥大船型の船尾に形成される縦渦等の複雑な流場現象の影響を受ける。この複雑な流場現象を解明するため、これまで様々な理論的、実験的、数値的検討が加えられ、笹島・田中の推定式等いくつかの推定式及び船型パラメータが提案されている。HOPE Light では、船尾フレームラインが形状影響係数 K に与える影響に特に着目し、標準フレームラインファクター FLF_{ini} と船尾肥大度係数 p より(2.22)式で形状影響係数 K を推定する。ここで、詳細入力で FLF が与えられた場合、 FLF_{ini} に代わり FLF を使用する。

$$K = 2.25 \times p + 0.2 \times FLF_{ini} \tag{2.22}$$

図2に標準フレームラインファクター FLF_{ini} ($FLF_{ini_P2}, FLF_{ini_P1}, FLF_{ini_P0}$) = (-20.0, 0.0, 9.0) と形状影響係数の関係を示す。

推力減少係数 $1 - t$ は、プロペラの作動による船体抵抗の増加の割合として定義される。そのため、プロペラの推力が強いプロペラの70%半径位置と船体との船長方向の距離が、推力減少係数 $1 - t$ に主たる影響を与えられている。HOPE Light では、プロペラ(70%半径位置)と船体の船長方向距離の周方向平均値を無次元化した値 S_x をパラメータとして、舵による影響係数 $(1 - t)_{Rudder}$ を加えた(2.26)式で、推力減少係数 $1 - t$ を推定する。係数 $OmTm_X$ は、船種に依存しない。 S_x の概念図を図3に示す。

$$1 - t = 1.0 - \left\{ OmTm_C1 \times \tan^{-1} \left(\frac{OmTm_C2}{S_x + OmTm_C2} \right)^{OmTm_C3} + OmTm_C4 \right\} + (1 - t)_{Rudder} \tag{2.23}$$

$$(1 - t)_{Rudder} = OmTm_R1 \times \frac{RudderLength \times D_p}{L_{pp}d} + OmTm_R0 \tag{2.24}$$

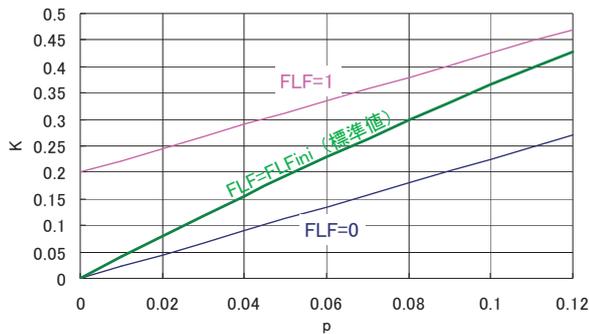


図2 FLF と K の関係図

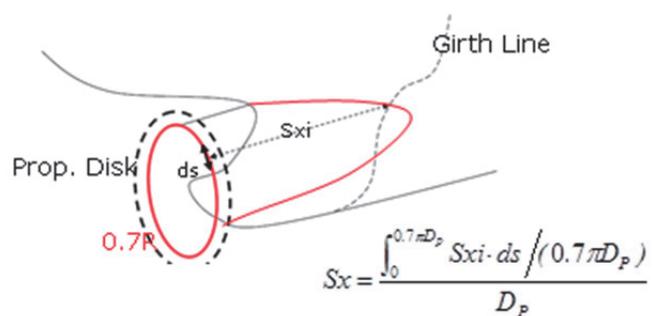


図3 S_x の概念図

HOPE Light では無次元値 S_x を船尾肥大度係数 p から近似推定する。係数 $S_{x_}$ は、船種に依存しない。

$$S_x = \frac{S_{x_C1}}{(p + S_{x_C2})^{S_{x_C3}}} + S_{x_C4} \tag{2.25}$$

伴流係数 $1 - w_s$ は、模型レイノルズ数での伴流係数 $1 - w_M$ を推定した後、矢崎のチャート为基础としたレイノルズ数修正を行い推定する。伴流係数 $1 - w_M$ は、船尾に形成される縦渦等の複雑な流場現象の影響を受け、形状影響係数 K との間に相関が見られる。また、船速に対するプロペラ面内の平均流速の比として定義されるため、プロペラ直径の影響を受ける。このため HOPE Light では、標準的な形状影響係数からの差 dK と標準プロペラ直

径と実際のプロペラ直径との差が伴流係数に与える影響 e_{Dp} を考慮し、(2.29)式で伴流係数 $1 - w_M$ を推定する。ここで、係数 $OmWm_*$ 、 Eff_* 、 wK 、 k_D は、船種に依存せず、 D_p はプロペラ直径、 D_{pSTD} は(2.3)式で求める標準プロペラ直径である。

$$1 - w_M = (OmWm_{P3} \times p^3 + OmWm_{P3} \times p^2 + OmWm_{P3} \times p + OmWm_{P0} - wK \times dK) \times e_{Dp} \quad (2.26)$$

$$dK = K - (2.25 \times p + 0.2 \times FLFin_i) \quad (2.27)$$

$$e_{Dp} = Eff_{D1} + Eff_{D2} \times (D_p - D_{pSTD}) / (k_D \times \sqrt{Bd}) \quad (2.28)$$

推進器効率比 η_R は、船後流場で作動するプロペラトルクに対する一様流中を単独で作動するプロペラトルクの比として定義されるが、影響因子の解明が未だ十分でない。HOPE Light では、推進器効率比 η_R を船尾肥大度係数 p の3次式で推定する。ここで、係数 $EtaR_*$ は、船種に依存しない。

$$\eta_R = EtaR_{P3} \times p^3 + EtaR_{P2} \times p^2 + EtaR_{P1} \times p + EtaR_{P0} \quad (2.29)$$

2.2.2 プロペラ設計

HOPE Light は独自のプロペラ性能チャートを内部に持ち、チャートベースで最適プロペラピッチを決定し、キャビテーションのチェックも行つてプロペラ面積を決定する。その上で、性能データベースから単独プロペラ性能 η_0 を推定している。設計したプロペラは、その単独効率が上記所要馬力の推定に使われるだけでなく、図4に示すようにプロペラ翼断面形状、翼輪郭、側面形状などが表示される。また、日本海事協会(NK)ルールの概略強度検討を行えるシステムになっており、翼厚の簡易検討が可能である。

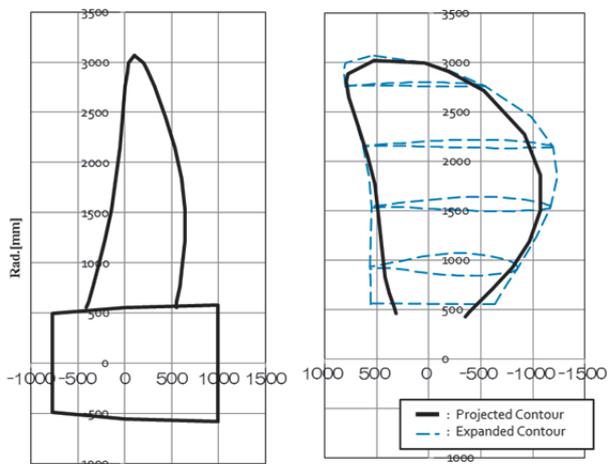


図4 プロペラ側面図と断面・輪郭図

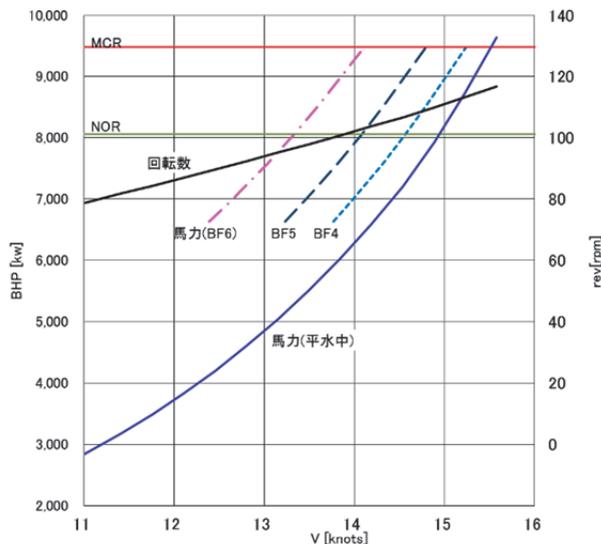


図5 パワーカーブ

2.2.3 パワーカーブ推定

以上により、設計船速 V_d における所要馬力が推定できるが、さらに船速を変えて船体抵抗を推定し、プロペラ設計で得られたプロペラ単独性能曲線を使うことで、図5に示す船速と所要馬力の関係（パワーカーブ）を得ることができる。船速とプロペラ回転数の関係も合わせて示される。

2.2.4 主機の選定・燃費の推定

HOPE Light には大型船舶に使用される代表的な主機 1,400 種の主要寸法と derating 範囲及び燃料消費率（燃費率）データを含む。また、適宜データの更新を行っており、ユーザーによるデータ更新も可能である。このデータを用いることで、上記プロペラ回転数と所要馬力に適した主機を選定し、その最大出力 MCR 及び任意の出力における燃費率を推定することができる。

2.2.5 舵設計・舵トルク及び操縦性の推定

不安定ループ幅は、船尾肥大度 γ_A と形状影響係数 K の関数で推定する⁹⁾。 γ_A が大きくなればループ幅は増加し、 K が大きくなれば左右揺れの着地点の位置が後方へ移動することで安定化し、ループ幅は減少する関係となる。HOPE Light では推定されたループ幅が許容値を超える場合に、超過角度に対応する分だけ舵面積を増加させる。また、ラダーホーンを含む舵の側面形状及び翼形状を表示し、舵を駆動するために必要な操舵機のトルクの推定も行う。さらに、IMOにより勧告されている船舶の操縦性基準である旋回径、ジグザグ操舵時におけるオーバーシュート角を推定することができる。

2.2.6 波浪中抵抗増加と船速低下の推定

a) 波による抵抗増加

HOPE Light では、大型船の場合に海洋波のスペクトラムの主要な波長が短波長域であることを前提に、規則波中抵抗増加量を短波長域の値で代表させて不規則波中抵抗増加量を簡易推定する¹⁰⁾。規則波中抵抗増加量は、 C_p カーブを台形近似し算定したルイスフォーム断面に対してストリップ法を適用して求められる運動成分と、短波長域での計算精度を向上させるために藤井・高橋により導入された反射波成分 R_{AWR} を簡略化した(2.33)式との和で算定する。ここで B_{fcp} は台形近似された C_p カーブから求める簡易ブラントネス係数である。また、 ζ_a は入射波の振幅、 C_1, C_2 はそれぞれ修正された喫水影響係数、速度影響係数である。

$$R_{AWR} = C_1 \times \frac{1}{2} \rho g (1 + C_2 \times F_{nB}^{0.7}) \times \zeta_a^2 B \times B_{fcp}^2 \tag{2.30}$$

$$B_{fcp} = \frac{1}{1 + \{2(1 - C_{pf}) \times L_{pp}/B\}^2} \tag{2.31}$$

b) 風による抵抗増加

風圧抵抗 R_{AA} は次式で定義され、水線上正面投影面積 A_F 及び相対風向 β に対する船長方向の風圧抵抗係数 $C_X(\beta)$ は、実績データの統計式から求める藤原らの手法¹¹⁾により算定する。ここで、 V_w は相対風速である。水線上正面投影面積 A_F 及び風圧抵抗係数 $C_X(\beta)$ は船種と全長 Loa 、船幅 B から推定する。

$$R_{AA} = C_X(\beta) \times \frac{1}{2} \rho_a V_w^2 A_F \tag{2.32}$$

以上の簡略化した手法により波浪中の抵抗増加量を算定し、波浪による抵抗増加に伴う船速低下を推定する。結果は、図6のように海象と船速の関係で図示される。なお、図中凡例のB.F.は海象の厳しさを表すビューフォースケールを意味し、数字が大きいほど波と風の海象が厳しい。

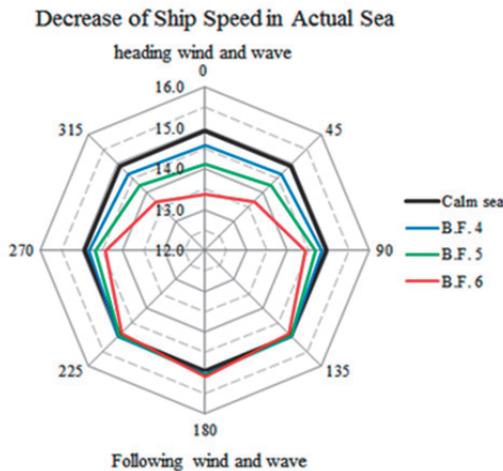


図6 波浪中の船速低下表示例 (単位: knot)

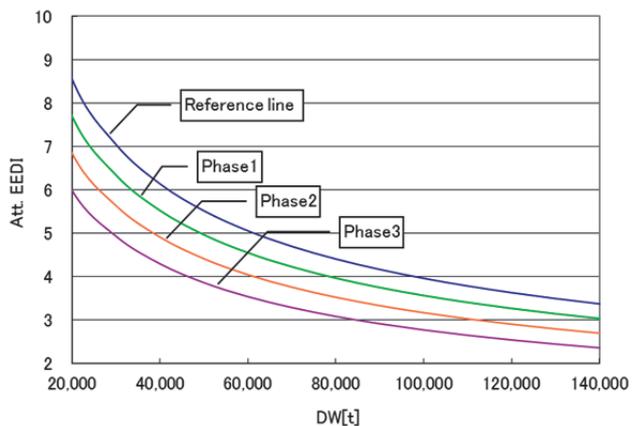


図7 バルクキャリアのEEDI規制値

2.2.7 エネルギー指標 EEDI 値の略算

前述のように IMO により海洋汚染防止条約 (MARPOL 条約) 附属書 VI の改正案が採択され、2013 年 1 月に EEDI 規制が発効した。これ以降に建造契約を結ぶ新造船のうち国際航海に従事する 400 総トン以上の全ての船舶は、船種や載貨重量 DW 等により算出される EEDI 規制値を満足することが要求される。EEDI は 1 トンの貨物を 1 マイル輸送する際に排出される CO₂ 排出量を意味する。一例としてバルクキャリアの EEDI 規制値を図 7 に示す。現段階では基準値である Reference line から 10%減の Phase 1 の line 以下となることが要求されているが、2020 年、2025 年と段階を経て、Phase 1 から Phase 3 の line 以下となるよう規制が厳しくなる予定である。

HOPE Light では船速と馬力の推定だけでなく、軽荷重量 LW 推定値から(2.33)式で算定する載貨重量 DW 及び選定主機の燃費率の情報も利用し、EEDI を簡易算定した略算値 $EEDI^*$ を計算する。

$$LW = \Delta - DW \quad (2.33)$$

2.3 カスタマイズ機能

HOPE Light では海技研が蓄積してきた各種データベースから算定される係数を標準的に使用するが、ここでは、ユーザーが所有するデータで HOPE Light をカスタマイズする機能を紹介する。

a) 類似船水槽試験結果に基づく推定値の修正機能

一般的に、類似船の水槽試験結果がある場合は、そのデータを基準にすれば精度の高い性能予測が可能となる。この機能により、要目の変化に対する性能変化の傾向は海技研のデータに従いつつ、絶対値の推定精度を向上させることができる。

b) ユーザー所有データベースによる推定式の係数の修正機能

2.1 節及び 2.2 節で紹介した推定式の係数は、ユーザーが適宜修正し推定精度を向上させることが出来る。この機能の使用には、データの解析に相応のコストが発生するが、推定精度を向上させるのに極めて有用な機能である。

3. HOPE Light の活用例

HOPE Light を用いて、主要目の変更範囲を指定し図 8 のような所要馬力や EEDI 略算値 ($EEDI^*$) の等高線図を表示できる。本章では HOPE Light を使った 2 つの検討例を示す。検討例 1 は、船舶の経済性に直結する排水量を同一寸法 (L_{pp}, B, D, d) のまま変化させた時の $EEDI^*$ の変化を検討した結果である。検討例 2 は、プロペラ直径を変化させた時の燃料消費量の変化を推定した例である。船舶設計において主機は最大出力だけでなく、寸法や重量等、他の仕様との関係を考慮し決定される。特にプロペラとの関係は回転数やトルクとのマッチングが重要であり、その選択を誤ると運航に支障が生じる。また、建造契約に関する商談においては一般的に燃料消費量が最重要事項であり、燃費率の良否も検討項目の一つとなる。

3.1 同一寸法で船を肥大化させた時の EEDI 略算値の変化

EEDI を改善する方法は、①新技術を投入し必要馬力を下げる方法、②運航計画を変え、設計船速を下げる方法、③載貨重量 DW を大きくとり輸送効率を改善する方法がある。③の方法は、港湾条件等から決まる主要寸法 (L_{pp}, B, D, d) を変えずに肥大度 C_B を大きくすることで DW を大きく出来るため、比較的簡易に採用できる。しかし、EEDI 規制値は DW による輸送効率の改善に対応し、図 7 に示したように載貨重量 DW が大きい船ほど規制が厳しくなる。

本稿では、 DW が 8 万トンクラスの船について、主要寸法 (L_{pp}, B, D, d) は変えずに船の前後を肥大化させることで排水量と DW を大きくすることが、EEDI 規制の面から有利か不利かを検討した。図 9 に DW を約 79,000t から 82,500t 程度まで変化させた時の $EEDI^*$ 推定結果を示す。 DW を大きく取るほど、推定された $EEDI^*$ 値が増加し、規制の面では不利となることが分かる。 $EEDI^*$ 値の増加の要因を HOPE Light の算定する各性能要素から分析

すると、その主要因が造波抵抗の増加にあることが分かる。これは、現在のパナマ運河に対応した船幅を確保したこのクラスの船型が、肥大度の点で造波抵抗の急激な増加が避けられない領域の近くで設計されていることを示している。よって、8万トンクラスの船は、方法□、□または主要寸法の変更を含む検討を実施する必要があることが分かる。

このように HOPE-Light を使えば、船型計画の戦略的検討が容易に行える。

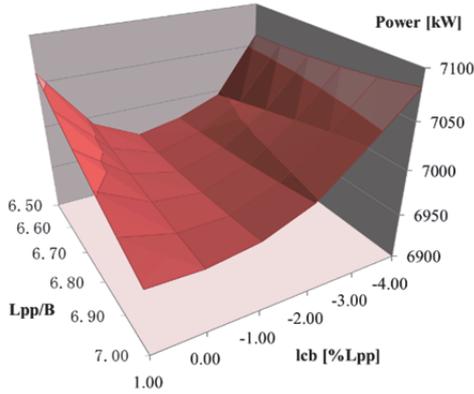


図8 Lpp/Bと浮心位置lcb
に対する所要馬力の等高線図

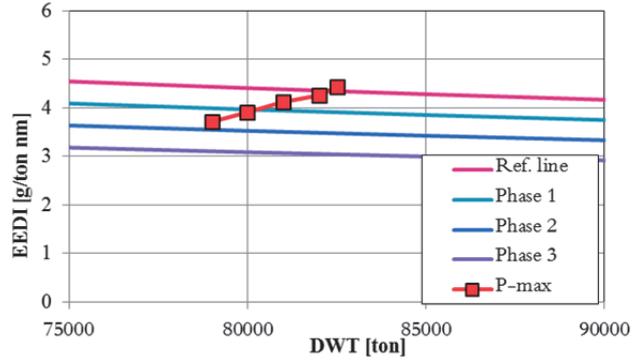


図9 EEDI 規制値と載貨重量
を変化させた場合のEEDI 略算値

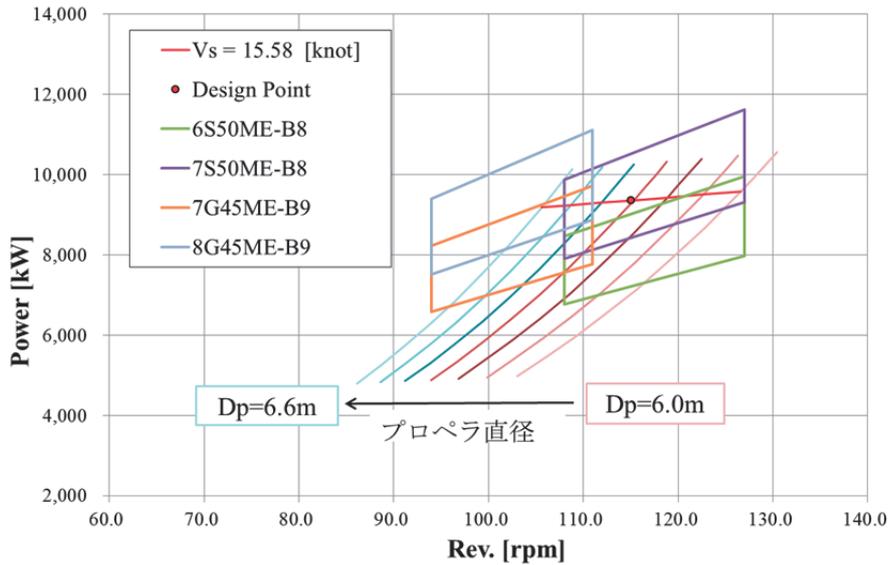


図10 プロペラ直径と最適回転数

表1 主機毎の燃費率最小点での燃料消費量の比較

Engine	FOCR [g/kWh]	FOC [t/day]	Rev. [rpm]
6S50ME-B8	166.0	28.3	121.0
7S50ME-B8	164.2	27.3	108.0
7G45ME-B9	165.9	27.4	105.6
8G45ME-B9	163.4	27.0	105.6

表2 主機毎の燃料消費量最小点での比較

Engine	FOCR [g/kWh]	FOC [t/day]	Rev. [rpm]	Dp [m]
6S50ME-B8	165.0	28.5	127.0	6.00
7S50ME-B8	161.1	27.8	127.0	6.00
7G45ME-B9	165.1	27.6	111.0	6.43
8G45ME-B9	162.7	27.2	111.0	6.43

3.2 プロペラ直径を変化させた時の主機燃費の変化

載貨重量 $DW6$ 万 5 千トンクラスのバルクキャリアについて、HOPE Light のプロペラ直径変更機能を用いて、プロペラ直径と最適回転数の関係を示したものを図 10 に示す。HOPE Light では図 10 のグラフを短時間（数秒程度）で半自動的に作成できる。図中の太実線は等船速曲線であり、台形はこの船が選択可能な主機が、定格出力よりも低めの出力で運転することで燃料消費率を低減する derating が可能な範囲である。ここでは、一例として主機メーカを MAN B&W に限定し、4 つの主機について示している。

HOPE Light では主機毎に出力と燃費率のデータベースを有し、補間により任意の出力での燃費率を計算し表示する。derating ポイントとして最も燃費率が低くなる回転数を採用した時の 75%MCR における燃料消費量の比較を表 1 に示す。図 10 より回転数を 111rpm に取った時のプロペラ直径 D_p は 6.43m、127rpm に取った時の D_p は 6.00m である。回転数を 111rpm まで落とすことで型式に「G」の文字を含む省エネ型の”Green” Ultra long stroke の主機が選択可能となり、7 気筒から 8 気筒の主機に変更すれば 1 日あたりの燃料消費量をさらに 0.4 トン少なくできることが分かる。結果的に、8G45ME-B9 では 6S50ME-B8 に比べ 1 日あたり 1.3 トンの燃料節約が可能である。表 2 には主機毎の燃料消費量の最小点での比較を示す。等船速曲線と主機毎の等燃費率曲線の関係から、最小燃費率の設計点は表 1 の通り derating 範囲の右端になるが、低い回転数ほどプロペラ直径が大きく、プロペラ効率が向上して所要馬力が低くなるため、燃料消費量は各主機とも derating 範囲の左端点が最小となる。この場合、船尾配置やバラスト航海時の喫水等によるプロペラ直径の制約が主な設計制約条件となり、船型設計を含めたインタラクティブな最適化が必要となる。

このように HOPE Light を用いて、船型性能と主機性能を同時に考慮した主機選定を行うことで、運航採算を含めた主機の検討が可能となる。

4. おわりに

本稿では、船舶性能の大勢を決定づける主要目の決定のため、船速と馬力の関係だけでなく、適切な主機の選定、EEDI 略算値、波・風を伴う実海域中での船速低下量や操縦性等の幅広い設計情報を技術者に提供する船型要目最適化プログラム HOPE Light の概要と使用例を紹介した。

船の船型は、原油価格や世界の荷動きによる大型化あるいは低速化等に対応し、時代毎に最適な形状に変遷している。近年の例を挙げると、パナマ運河の拡張などがそれにあたる。また今日では、さらに EEDI、EEOI 等の環境規制が始まり、最低出力規制、騒音規制等を含めた規制に対応した最適船型の開発が求められる。

このように、船舶の設計がより複雑化する状況において、主要目の検討はより一層重要性を増している。また加えて熟練技術者からの技能伝承の問題から、暗黙知の見える化にも取り組む必要もある。船型要目最適化プログラム HOPE Light はこの問題に対応し、より一層の船舶の高効率化に資することを目指して開発している。

参考文献

- 1) M. Gertler : A Reanalysis of the Original Test Data for the Taylor Standard Series, TMB Report 806
- 2) 山縣 昌夫 : 船型学, 天然社.
- 3) 土井 陽, 横尾 幸一, 矢崎 敦生, 森山 茂男, 大橋 誠三 : 普通型船首を有する大型肥大船型に関する系統的模型試験, 船舶技術研究所報告, 第 1 巻, 第 6 号 (1964)
- 4) 斉藤 勇, 松田 登 : 内航船に関する系統的模型試験, 船舶技術研究所報告別冊 (1980)
- 5) 谷口 中, 渡辺 恭二, 田村 欣也 : 船型可分原理による肥大船型の新設計法, 造船協会論文集, 第 120 号 (1966)
- 6) 松村 竹実 : ニューラルネットワークを利用した中高速艇の速力性能初期推定ツールの構築, 日本造船学会論文集, 第 181 号 (1997)

- 7) 金井 健:ニューラルネットワークによる船舶の推進性能推定とその船型最適化への応用, 西部造船会会報, 第99号(2000)
- 8) 関西造船協会編:造船設計便覧, 海文堂出版
- 9) 佐々木紀幸:船型計画手法の新展開, 日本造船学会試験水槽委員会シンポジウム「船型設計と流力最適化問題」(1999), pp. 31-49.
- 10) 佐々木紀幸, 大松重雄, 他:シーマージンの簡易計算法 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第8号, (2009), pp. 399-402.
- 11) 藤原敏文, 上野道雄, 他:成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法 日本船舶海洋工学会論文集, 第2号(2005), pp. 243-255.