実海域性能を考慮した内航船用船速計画システムの開発

正員 辻 本 勝^{*1}
村 山 貴 彦^{*2}

正員 南 佳 成^{*1}
高 井 博 司^{*2}

Development of a Weather Adaptive Navigation System for Coastal Shipping

by Masaru Tsujimoto, *Member* Yoshimasa Minami, *Member*
Takahiko Murayama, Hiroshi Takai

Summary

We propose a new navigation system for coastal shipping to decrease fuel consumption and CO₂ emission. The navigation system, called WAN-CS, optimizes engine revolutions with constraint of the voyage schedule.

For coastal shipping precise forecast system is expected because time of the voyage is short and geographical features of the route must be considered. Thus a new weather forecast system was also developed. The system forecasts four times a day though conventional system provides two times a day. The interval of spatial grid is selected in 2 minutes and the time interval is selected in 1 hour. Ship responses were estimated by solving equilibrium equations of longitudinal force, lateral force and yaw moment considering the engine characteristics.

In this paper for reducing fuel consumption a simulation of a coastal cement carrier, which navigated the Ube-Nagoya route using WAN-CS was carried out. It is found that the fuel reduction by WAN-CS achieved 33% from the result of the simulation.

1. 緒 言

2002 年 6 月に日本政府は気候変動枠組条約京都議定書を批准し、地球温暖化ガスを 2008～2012 年の間に 1990 年レベルに対して 6%低減する義務を負うこととなった。船舶からの CO₂ 排出量は、LCA 解析により、運航中の燃料消費によるものが 8 割以上を占めること¹⁾が示されている。また、2000 年以降燃料価格が高水準で推移していることもあり、燃料消費削減の対策が望まれている。

船舶からの CO₂ 排出量、燃料消費量削減に対して、運航面からの対策を提案するのが本論文の目的である。

外航船に対しては、航路と主機回転数の最適化による海象適応航法(WAN: Weather Adaptive Navigation)の有効性が示されており²⁾、今回は内航船を対象に、燃料消費量を削減する船速計画システムの開発を行った。

一般に内航船は、外航船に比べて、1 航海の航行距離が短いこと、航路や航行区域の関係で航路選定の自由度が低いこと、また、夜間入港制限により夜間沖待ちが生じ、その時間の全航海時間に対する比率は無視し得ないという特徴がある。また、減速航行により燃料消費量 (CO₂ 排出量) 削減効

果が高いこと³⁾が示されているが、その場合、運航回数の減少による経済的損失も考慮する必要があるとされている。

燃料消費量は船速のおよそ 2 乗に比例することから、船速を変数として燃料消費量を削減するのが今回の船速計画システムであり、内航船用海象適応航法(WAN-CS: Weather Adaptive Navigation for Coastal Shipping)と呼ぶ。これは、外航船で行われているウェザールーティング等の航路選定システムとは異なり、航路選定は行わず、夜間沖待ち時間を航行時間に充て、その分低速で運航させるものである。また、夜間沖待ち時間を利用するため、運航回数の減少による経済的損失は生じない。

WAN-CS に必要な気象海象情報を詳細に予測するため、気象庁メソ数値予報を用い、1 日 4 回、1 時間間隔、緯度経度 2 分間隔の気象海象予測情報を配信するシステムを開発した。この予測情報を基に、WAN-CS により内航セメント運搬船の宇部一名古屋航路を対象に、実海域での船速、燃料消費量の短期応答と組み合わせて、燃料消費量を削減する船速配分を求めた結果について報告する。

2. 気象海象データ

2.1 対象船、対象航路

対象とする船舶は、Fig.1 に示す内航セメント運搬船新栄

*1 海上技術安全研究所

*2 日本気象協会

原稿受理 平成 18 年 2 月 28 日

丸（宇部興産海運（株））であり、主機はガバナー装備のディーゼル機関である。主要目を Table 1 に示す。

Fig.1 Perspective of Shin-ei Maru.

Table 1 Principal dimensions of Shin-ei Maru.

Item	Dimension	
Length perpendiculars (L_{pp})	152.50	[m]
Breadth (B)	24.20	[m]
Draft (d)	9.00	[m]
Block coefficient (C_B)	0.8140	[-]
Designed speed (U_d)	13.0	[knot]
Transverse projected area (A_T)	355.21	[m ²]
Lateral projected area (A_L)	984.12	[m ²]
Rudder area (A_R)	19.5	[m ²]
Aspect ratio of rudder (Λ_R)	1.282	[-]
Propeller diameter (D_p)	4.50	[m]
Main engine output (NOR)	4,605	[kW]
Main engine speed at NOR	162	[rpm]
Date of delivery	June, 1991	

本船の主要航路の1つである宇部一名古屋航路では、船速と航海距離との関係で夜間沖待ちを生じることが多いことから、本航路を対象航路とする。宇部一名古屋航路を Fig.2 に示す。なお、WAN-CS による計算は巡航状態となる周防灘－伊勢湾を満載状態で航行するとして行う。

Fig.2 Selected route.

2.2 気象海象データ

WAN-CS システムの開発にあたっては、内航船の航海時間がたかだか2日程度と短いことから、予測時間間隔が従来

Fig.3 Forecast area of MSM and RSM.

Table 2 Weather forecast system.

Item	MSM	RSM
Spatial resolution	10 [km]	20 [km]
Frequency of delivery	6 [hr]	12 [hr]
Forecast interval of time	1 [hr]	6 [hr]
Maximum forecast time	18 [hr]	51 [hr]

より詳細な気象海象情報システムが必要となる。

そこで、現在入手可能な空間分解能及び予測時間間隔が最も細かい気象庁メソ数値予報モデル(MSM: Mesoscale Spectral Model) による風の予測情報を用いることとし、第三世代波浪モデルによる既存の波浪推算プログラム(JWA3GS) と組合せ、1時間間隔、緯度経度2分間隔の気象海象予測を提供する気象海象情報システムを開発した。

MSM は1日4回予測が行われ、水平解像度約10kmと、現状では最も詳細な気象予測データである。しかし、MSM は18時間先予測値までしか利用できないため、それ以降は気象庁領域モデル(RSM: Regional Spectral Model)による風の予測情報を用いて JWA3GS により波浪推算し、結果を1時間間隔に内挿して出力するとともに、MSM による結果と滑らかに接続する処理を行っている。

MSM と RSM のデータ範囲を Fig.3 に、配信内容を Table 2 に示す。また、MSM による出力例として、台風襲来時である2004年7月30日09JSTでの6時間先予測値の平均風速と有義波高を Fig.4 に示す。この計算結果と Fig.5 に示す気象庁地上天気図⁴⁾の比較から、予測結果は台風襲来による気象擾乱を詳細に表現していることが分かる。

次に、MSM に基づく波浪の予測精度とその効果を検証するため、高知沖、室津沖、潮岬沖の3地点で、MSM に基づく波浪の予測値、従来の RSM に基づく波浪の予測値、及び実測値との比較を行った。その結果を Fig.6 に示す。この図から、各地点とも従来の RSM に基づく予測値と比べ、MSM による予測値の方が実測値の変化傾向を良く再現している

Fig.4 Weather map (upper; mean wind speed, lower; significant wave height).

Fig.5 Weather chart at 9:00AM, 30, July, 2004.

ことがわかる。なお、ここで使用した実測値は、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)の高知(水深: 24.1m)、室津(水深: 26.8m)、潮岬(水深: 54.7m)地点での値である。予測された波は浅海変形効果は考慮されていないので、この実測値を沖波に換算して、それぞれの予測値と比較している。その結果、従来の予測手法と比較して時系列変化を良く表現していることが分かり、内航船のような短期間で局所的な航路では有効であることが確認できた。

なお今回の WAN-CS の計算では、気象海象情報システムにより事前に推算した気象海象データを用い、これらから6時間毎に0~5時間先予測値を抽出して気象海象データセットを作成し、それを用いた。

Fig.6 Tendency of forecast significant wave height.

3. 船体応答データ

3.1 応答モデル

船速応答モデルは、波、風はあるが、その状態は安定し、時間が経過しても統計的性質が変化しない中を船舶が航行している定常状態を考える。Fig.7 に示す座標系において前後方向、横方向、回頭方向について平衡方程式をたて、船速、偏角、舵角を未知数に数値的に解く。力の推定結果は、船速ベースに関数近似を行い、燃料消費量は主機出力と燃料消費率から求める⁵⁾。

Fig.7 Coordinate system.

3 元連立平衡方程式（定常時）は、未知数を船速 U 、偏角 β 、舵角 δ として、(1)~(3)式で表される。

$$X_0'(U)\cos^2\beta + X_P'(U;N_p) + X_A'(U;V_w,\gamma) + X_{AW}'(U;H,T,\chi) + X_R'(\delta,\beta) = 0 \quad (1)$$

$$Y_A'(U;V_w,\gamma) + Y_\beta'\beta + Y_{\beta\beta}'\beta|\beta| + Y_R'(\delta,\beta) = 0 \quad (2)$$

$$N_A'(U;V_w,\gamma) + N_\beta'\beta + N_{\beta\beta}'\beta|\beta| + N_R'(\delta,\beta) = 0 \quad (3)$$

ここで、

X_0 : 平水中抵抗、 X_P : プロペラ推力、 X_{AW} : 波浪中抵抗増加量、 X_A : 風圧抵抗、 Y_A : 風圧横力、 N_A : 風圧回頭モーメント、 X_R : 当舵抵抗、 Y_R : 舵による横力、 N_R : 舵による回頭モーメント、 $Y_\beta, Y_{\beta\beta}$: 操縦性流体力係数（横力）、 $N_\beta, N_{\beta\beta}$: 操縦性流体力係数（回頭モーメント）、 H : 有義波高、 T : 有義波周期、 χ : 船首方位を基準とした卓越波向、 V_w : 平均風速、 γ : 船首方位を基準とした平均風向、 N_p : プロペラ回転数を表し、上付き添え字'は無次元値であることを表す。

無次元化は、 ρ を海水密度として、

$$X' = \frac{X}{0.5\rho L_{pp}dU^2}, \quad Y' = \frac{Y}{0.5\rho L_{pp}dU^2}, \quad N' = \frac{N}{0.5\rho L_{pp}^2dU^2}$$

で行う。

応答計算では主機作動特性を考慮し、主機がトルクリッチ状態となった場合は、安全になるまで主機回転数 N_p を下げ、そのときの応答を出力する。なお、今回の場合、波による定常横力、定常回頭モーメントが船速、燃料消費量の推定に及ぼす影響は比較的小さいと考え考慮していない。

3.2 力の推定

(1) 平水中抵抗、馬力

平水中抵抗は 3 次元外挿法により推定し、船速 U を用いて 3 次式で関数近似する。この結果を用いて行った平水中馬力推定結果を Fig.8 に示す。海上公試の値との比較から良く推定されていることが分かる。なお、 BHP は制動馬力であり、燃料消費量の推定に必要な主機燃料消費率 λ_c を Fig.9 に示す。

また、WAN-CS による船速計画は 2004 年 4 月時点で実施するため、対象船は竣工後約 13 年となる。このため、経年劣化による抵抗増加影響を加味する必要がある。経年劣化影響は外板粗度の増加で代表させ、外板粗度による抵抗増加量

を δR_{fa} とする。浸水面積 S を用いて無次元化を行った粗度

修正係数を $\delta\Delta C_{fa} = \frac{\delta R_{fa}}{0.5\rho S U^2}$ とし、 t_a [year] を竣工後の年数として(4)式で表す。

$$\delta\Delta C_{fa} = 0.025 \times 10^{-3} t_a \quad (4)$$

このときの馬力推定結果を Fig.8 に点線で示す。なお、生物汚損影響は小さく判然としないことから今回は考慮していない。

Fig.8 Power curves.

Fig.9 Specific fuel consumption.

(2) プロペラ推力

プロペラ推力 X_P は、プロペラ単独状態での推力係数 K_T 、推力減少係数 $(1-t)$ を用い、(5)式で推定する。

$$X_P = (1-t)\rho N_p^2 D_p^4 K_T(J) \quad (5)$$

ここで、前進係数 $J = \frac{(1-w)U}{N_p D_p}$ 、有効伴流係数 $(1-w)$ である。

Fig.10 Coefficients of added resistance in short crested irregular waves ($F_n = 0.173$).

(3) 波浪中抵抗増加量

波浪中抵抗増加量 X_{AW} は、短波頂不規則波中における平均抵抗増加量により評価することとし、規則波中での平均抵抗増加量と方向波スペクトラムの線形重ね合わせにより求める。規則波中平均抵抗増加量のうち、船体運動による平均抵抗増加量は、ストリップ法により求まる上下揺と縦揺の周波数応答関数を用いて丸尾法⁶⁾により求め、反射波による平均抵抗増加量は Faltinsen 法⁷⁾により求める。なお、丸尾法の計算は吹き出し分布を藤井・高橋の方法⁸⁾で与え、周波数スペクトラムは、ISSC (1964 年) スペクトラム、方向分布関数はコサイン 2 乗型を用いる。

また、 X_{AW} は船速 U の関数として使用するため、(6)式に示す関数近似を行う。

$$X_{AW}(U) = 8\rho g \frac{B^2}{L_{pp}} H^2 \left\{ a_0(T, \chi) + a_1(T, \chi) \left(\frac{U}{U_d} \right) + a_2(T, \chi) \left(\frac{U}{U_d} \right)^2 + a_3(T, \chi) \left(\frac{U}{U_d} \right)^3 \right\} \quad (6)$$

ここで、 g は重力加速度であり、 a_0, a_1, a_2, a_3 は T, χ により定まる定数である。フルード数 $F_n = 0.173$ のときのこれらの値を Fig.10 に示す。

Fig.11 Wind forces and moment.

(4) 風圧力・モーメント

風圧力・モーメントの推定は山野・齋藤法⁹⁾により行った。フルード数 $F_n = 0.173$ のときの結果を Fig.11 に示す。

(5) 舵力・モーメント、操縦性流体力

舵力・モーメントの推定は(7)～(10)式により行った。

$$X_R' = -(1 - t_R) C_\delta \delta^2 \quad (7)$$

$$Y_R' = -(1 + a_H) C_\delta \left(\delta - \gamma_R \frac{\beta}{1 - w_{R0} e^{-4.0\beta^2}} \right) \quad (8)$$

$$N_\delta' = -(x_R' + a_H x_H') C_\delta \left(\delta - \gamma_R \frac{\beta}{1 - w_{R0} e^{-4.0\beta^2}} \right) \quad (9)$$

$$C_\delta = \frac{A_R}{L_{pp} d} \frac{6.13 \Lambda_R}{2.25 + \Lambda_R} \left(1 - w_{R0} e^{-4.0\beta^2} \right)^2 \quad (10)$$

ここで

($1 - t_R$) : 前後力修正係数、($1 - w_{R0}$) : 直進時の舵位置における有効伴流係数、 a_H : 船体に作用する舵の干渉係数、 γ_R : 整流係数、 x_H' : 舵直圧力点と重心位置との無次元前後方向距離、 x_R' : 重心と舵重心との無次元前後方向距離

である。

操縦性流体力 $Y_{\beta}, Y_{\beta\beta}, N_{\beta}, N_{\beta\beta}$ 及び $(1-t_R), (1-w_{R0}), \gamma_R$ の推定は貴島法¹⁰⁾により行い、干渉係数 a_H, x_H' の推定は貴島らのチャート¹¹⁾により行った。なお、 $(1-w_{R0})$ は、船速に対し1次関数で近似し、船速に対する変化率(1次項の係数)が $(1-w)$ のものと同じとして推定した。

Fig.12 Response in winds (left; ship speed, right; fuel consumption per hour).

Fig.13 Response in waves (left; ship speed, right; fuel consumption per hour).

Fig.14 Response in actual seas (left; ship speed, right; fuel consumption per hour).

3.3 船速、燃料消費量の推定

船体応答データは、主機回転数及び気象海象の各要素に対し、主機の作動特性を考慮して船速 U 、1時間あたりの燃料消費量 Λ_T を求め、予めデータベース化する。このデータベースから応答値を補間し、利用する。

風による U, Λ_T の応答で主機回転数設定値 $N_{p0} = 162 \text{rpm}$ のものを Fig.12 に、波による U, Λ_T の応答のうち、 $N_{p0} = 162 \text{rpm}, \chi = 0^\circ$ (向波) のものを Fig.13 に、実海域中の U, Λ_T 応答のうち、 $N_{p0} = 162 \text{rpm}, V_w = 10 \text{m/s}, \gamma = 0^\circ$ (向風)、 $\chi = 30^\circ$ (斜め向波) としたものを Fig.14 にそれぞれ示す。

応答計算では主機作動特性を考慮している。このため、有義波高 H が大きくなると主機のトルクリッチ状態を避けるため、主機回転数 N_p を設定値 N_{p0} から下げることとなる。このことにより、Fig.13, 14 に示す Λ_T の応答では、例えば $T = 7.5 \text{s}$ のとき、 $H = 4 \text{m}$ の Λ_T より $H = 6 \text{m}$ の Λ_T が小さくなっている。また、船速低下量は $T = 7.5 \text{s}$ で $H = 6 \text{m}$ のときに大きく分かっている。

4. 内航船用海象適応航法

WAN-CS システムは、別途実施される MSM データに基づく気象海象推算値を受信し、これに予め計算された船体応答データベースを組み合わせることにより、船速、燃料消費量を求め、到着時間を守ることを制約条件に、燃料消費量が最小となる船速配分を決定するものである。また、運用にあたっては約1時間毎に再計算を行うことにより、計画からのずれを補正し、最終的に到着時間を確保する。なお、各区間の航行距離は漸長緯度航法により求め、最適化は拡張ラグランジュ乗数法¹²⁾により行った。

(1) 目的関数：最小燃料消費量(最小 CO_2 排出量)とする。

(2) 設計変数：設計変数は、主機回転数設定値とする。

対象航路を40区間に分割する(設計変数の数は40)。

(3) 制約条件

① 境界条件

主機回転数設定値は、軸発電の運転可能範囲の下限である主機回転数 140rpm から、通常運転上限の 162rpm の範囲とする。

② 航海時間

設定スケジュールは、夜間沖待ち時間を航海時間に充て、設定する。なお、到着時刻の許容範囲は ± 15 分とする。

5. シミュレーション計算と燃料消費量削減効果

5.1 航海実績

対象船は2004年4月21日～23日にかけて宇部一名古屋

Fig.15 Ship speed and weather encountered (voyage simulation).

間を航海しており、その時の航海実績を入手することができた。航海実績の分析から、軸発電による分を除いた燃料消費量が 22.2t、巡航時間が 31 時間 23 分、夜間沖待ち時間が 8 時間 10 分であった。

5.2 シミュレーションによる評価

航海実績と同じ条件で実航海シミュレーションを行った。船速及び遭遇海象を Fig.15 に示す。今回の航海では有義波高が 1m 程度で海象が穏やかであり、船速は殆ど低下していないことが分かる。このときの燃料消費量等の推定結果を Table 3 に示す。航海実績と比べ燃料消費量 0.3t、時間約 40 分の差があるが、その差は全体の 1~2%と小さい。実航海シミュレーションでは海潮流や輻輳海域での操船の影響を考慮していないこと、また、気象海象予測、応答推定の精度が原因に挙げられる。

次に、WAN-CS による船速計画を実施した。運航スケジュールは 2004 年 4 月 21 日 14:30 に周防灘燈標 No.1 西部を出発するものとし、航海時間は、航海実績の巡航時間に夜間沖待ち時間を加えたもの（39 時間 33 分）から 1%（23 分）の時間余裕を引き 39 時間 10 分（2004 年 4 月 23 日 05:40 に伊勢湾燈標 No.4 に到着）と設定した。このスケジュールは、夜間沖待ち時間を利用するものであり、現状と同等の運航サービスを保つことが可能である。WAN-CS による船速及び遭遇海象を Fig.16 に示す。Fig.16 より、WAN-CS では追波追風状態で主機回転数を上げ、その他では最低回転数とし、到着時刻を確保しつつ、燃料消費量を削減していることが分かる。このときの燃料消費量等の推定結果を Table 3 に示す。これから、WAN-CS による燃料消費量削減率は、今回の場

Fig.16 Ship speed and weather encountered (WAN-CS).

Table 3 Fuel consumption and its reduction rate.

Item	Voyage data	Voyage simulation	WAN-CS
Fuel consumption	22.2 [t]	21.9 [t]	14.6 [t]
CO ₂ emission	69.3 [t]	68.2 [t]	45.6 [t]
Passage time	31:23	30:40	39:05
Reduction rate	-	-	33%

合、実航海シミュレーションに対し 33%であること、航海時間も設定時間に対して 5 分前の到着であり、到着許容範囲の±15 分以内であることが分かる。

以上から、WAN-CS による燃料消費量削減効果が高いことが分かる。

今後は、WAN-CS システムを実船に搭載するため、WAN-CS と気象海象情報システムに船陸間通信インターフェース、主機制御系を加え、これら一連の処理の自動化を行う。そして、実船試験により本システムの効果の検証を行う予定である。

6. 結 言

内航船を対象とした燃料消費量（CO₂ 排出量）を削減するために、気象庁メソ数値予報モデル(MSM)を使用した気象海象予測システム、内航船用海象適応航法(WAN-CS)システムの開発を行い、以下の結果を示した。

MSM に基づく気象海象予測システムにより、1 時間間隔の予測情報が得られる。また、この予測情報は 1 日 4 回の配信となるため気象擾乱の急変に伴って細かな予測修正が可能である。これらから、台風のような風場が急変するよう

な気象擾乱の波浪予測精度の向上を示した。

宇部一名古屋航路の内航セメント運搬船に対して、夜間沖待ち時間を巡航時間に充てた WAN-CS による船速計画を行った。その結果、一例ではあるが、実航海シミュレーション結果に対し燃料消費量削減率が 33%と高く、運航スケジュールも確保していることから、本システムの有効性を確認した。

今後は、WAN-CS システムを実船に搭載し、実船試験により効果の検証を行い、その結果を報告する予定である。

謝 辞

本研究は、競艇交付金により日本財団の援助を受けて、海洋政策研究財団が行う技術開発基金による補助金により横河電子機器(株)が実施した「内航船の航行支援システムの高度化に関する研究」の一部として実施したものであり、関係各位及びご協力いただいた宇部興産海運(株)各位にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 木原 洗: 船舶への LCA 適用に関する研究, 平成 13 年度(第 1 回)海上技術安全研究所講演会講演集, 2001, pp.3-18.
- 2) 辻本 勝, 谷澤 克治: 実海域性能を考慮した航海計画システムの開発—気象海象の予測精度が航海計画に与える影響—, 日本船舶海洋工学会論文集, 第 2 号, 2006, pp.75-83.
- 3) 平成 12 年度船舶からの温室効果ガス(CO₂ 等)の排出削減に関する調査研究報告書, 財団法人シップ・アンド・オーシャン財団, 2001.
- 4) <http://www.data.kishou.go.jp/yohou/kaisetu/hibiten/>
- 5) 辻本 勝, 上野 道雄, 藤田 裕, 廣岡 秀昭: 次世代型帆装船用ウェザールーティングシステムの開発とその評価, 関西造船協会論文集, 第 242 号, 2004, pp.25-36.
- 6) Hajime Maruo: RESISTANCE IN WAVES, RESEARCHES ON SEAKEEPING QUALITIES OF SHIPS IN JAPAN, The Society of Naval Architects of Japan, Vol.8, 1963, pp.67-102.
- 7) Faltinsen, O. M., Minsaas, K. J., Liapis, N. and Skjoldal, S. O.: Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway, Proceedings of 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1980.10, pp.505-529.
- 8) 藤井 齊, 高橋 雄: 正面規則波中における抵抗増加, 三菱重工技報, Vol.4, No.6, 1967, pp.644-650.
- 9) 山野 惟夫, 斎藤 泰夫: 船体に働く風圧力の一推定法, 関西造船協会誌第 228 号, 1997.9, pp.91-100.
- 10) 貴島 勝郎, 名切 恭昭: 船尾形状を考慮した操縦流体力の近似的表現, 西部造船会々報第 98 号, 1999.8, pp.67-77.
- 11) Katsuro Kijima, Toshiyuki Katsuno, Yasuaki Nakiri and Yoshitaka Furukawa: On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol.168, 1990.12, pp.141-148.
- 12) ASNOP 研究会編: パソコン FORTRAN 版非線形最適化プログラミング, 日刊工業新聞社, 1991.