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

海上安全研究領域　＊辻本　勝
輸送高度化研究領域　上野　道雄
株式会社ＭＴＩ　藤田　裕、廣岡　秀昭

１．はじめに

風という自然エネルギーをより効率的に利用しようとする次世代型帆装船の技術開発において高揚力の帆の開発と並んで重要なのが帆装船に適したウェザールーティング(以下 WR)システムの開発である。従来の船舶に対する WR システムが航行の障害となる波や風の強い海域を避けるように航路選定するのに対して、帆装船の場合は風のエネルギーを効率的に利用できる海域を航行するための航法であるべき点が異なる。

以下、次世代型帆装船を対象にして気象・海象データに基づき風を最大限に利用して航海するための WR システムの開発について述べる。

２．気象・海象データ

（１）対象航路

検討を行う航路は東京－サンフランシスコとし、載貨状態は東航、西航とも満載とする。

なお、WR の計算は犬吠埼沖（35°40′N, 141°E）からサンフランシスコ沖（38°N, 123°20′W）の間を対象とする。気象・海象データの検討範囲とその大圏航路を図－１に示す。

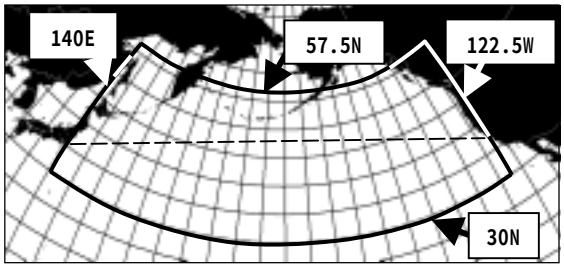
（２）風と波データ

風と波のデータは気象庁 GPV（格子点値：Grid Point Value）を使用する。風は GSM 全球モデル、波は全球波浪モデルを使用する。計算格子間隔は緯度、経度とも 1.25°である。

データの期間は 2002 年 3 月から 2003 年 2 月までの 1 年間であり、6 時間毎の推算値を連続的に用いてデータベースを構築する。

（３）海流データ

海流はパイロットチャートから流速、流向を読み取り電子化したものを使用する。格子間隔は緯度 2.5°、経度 5°とする。また、月別チャートの



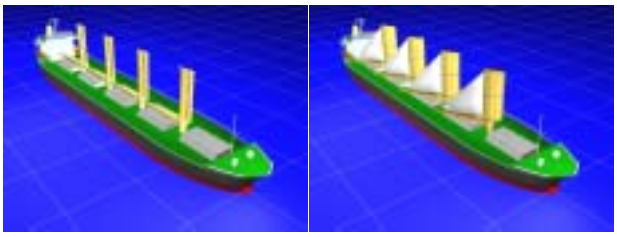
図－１　対象航路とデータ領域

うち 4 月、7 月、10 月、1 月のものを、それぞれ春季、夏季、秋季、冬季の代表値として使用する。

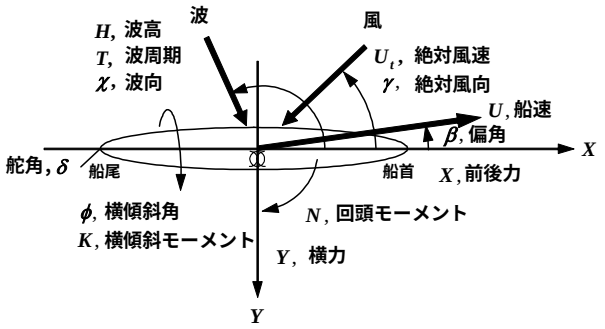
３．船体応答

船体応答計算を行う船型は 43,200[DWT]型バルクキャリア（以下 BC）で、垂線間長 L_{pp}=180.0[m]、船幅 B =32.26[m]、喫水 d =10.7[m]、計画船速 14.5[knot]であり、従来型 BC と次世代型帆装 BC では帆装装置部のみ異なる。また、帆装による船速調整に対応するため、主機には比較的低負荷の運転が可能なコモンレール方式のディーゼル機関を搭載する。なお、次世代型帆装 BC では相対風速 22[m/s]以上、または、相対風向 30[deg]以下（向風）で縮帆する。この縮帆と展帆の状態を図－２に示す。

船体応答の計算は、実海域中での力学的平衡方程式を解くことにより求める。座標系を図－３とし、前後力 X、横力 Y、回頭モーメント N、傾斜モーメント K に対する 4 元連立非線形平衡方程式を芳村ら [1] に倣い、プロペラ推力 X_P、波浪中抵抗



図－２ 次世代型帆装 BC の縮帆と展帆状態



図－３　座標系

増加 X_{AW} を加え、(1)～(4)式の通り作成する。なお、帆の空力特性は風圧抵抗係数として考慮する。

$$X_0'(U)+X_P'(U;N_P)+X_A'(U;U_t,\gamma)+X_{AW}'(U;H,T,\chi)+X_{\delta\delta}'\delta^2=0 \quad (1)$$

$$Y_A'(U;U_t,\gamma)+\left(Y_\beta'-Y_\delta'\frac{\gamma_R}{1-w_R}\right)\beta+Y_\phi'\phi+Y_{\beta\beta\beta}'\beta^3+Y_{\beta\beta\phi}'\beta^2\phi+Y_{\beta\phi\phi}'\beta\phi^2+Y_{\phi\phi\phi}'\phi^3+Y_\delta'\delta=0 \quad (2)$$

$$N_A'(U;U_t,\gamma)+\left(N_\beta'-N_\delta'\frac{\gamma_R}{1-w_R}\right)\beta+N_\phi'\phi+N_{\beta\beta\beta}'\beta^3+N_{\beta\beta\phi}'\beta^2\phi+N_{\beta\phi\phi}'\beta\phi^2+N_{\phi\phi\phi}'\phi^3+N_\delta'\delta=0 \quad (3)$$

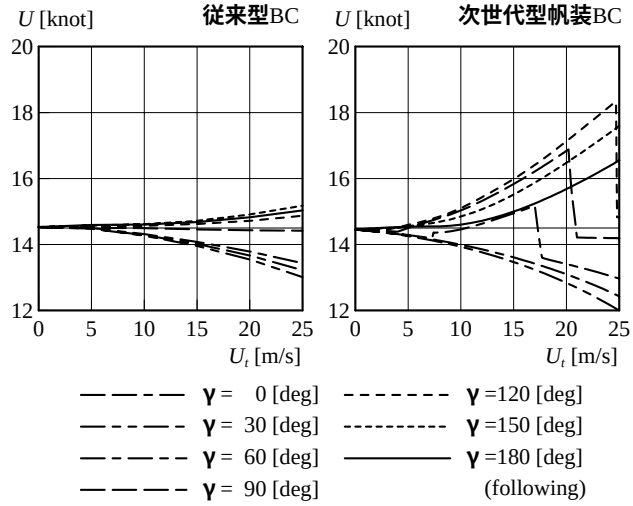
$$K_A'(U;U_t,\gamma)+K_\delta'\left(\delta-\frac{\gamma_R}{1-w_R}\beta\right)-2C_B\frac{B}{d}\frac{\overline{GM}g}{U^2}\sin\phi=0 \quad (4)$$

U: 船速、β: 偏角、ϕ: 横傾斜角、δ: 舵角、
N_P: プロペラ回転数、U_t: 絶対風速、γ: 絶対風向、
H: 波高、T: 波周期、χ: 波向、g: 重力加速度、
$(1-w_R)$: 舵伴流係数、γ_R: 整流係数、C_B: 方形係数、
B: 船幅、d: 喫水、$\overline{GM}$: 横メタセンター高さ、
ρ: 海水密度、X_0': 平水中抵抗係数、
X_A', Y_A', N_A', K_A': 風圧抵抗・モーメント係数、
$X_{\delta\delta}', Y_\delta', N_\delta', K_\delta'$: 舵力・モーメント係数、
下付添字β,ϕに関係する係数：操縦流体力係数、
上付添字　′　は無次元値を表す。

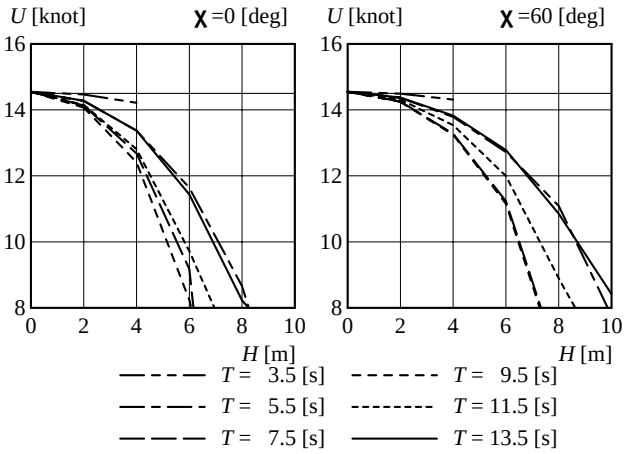
無次元化は，$X'=\dfrac{X}{0.5\rho L_{pp}dU^2}$，$Y'=\dfrac{Y}{0.5\rho L_{pp}dU^2}$，

$N'=\dfrac{N}{0.5\rho L_{pp}{}^2dU^2}$，　$K'=\dfrac{K}{0.5\rho L_{pp}d^2U^2}$ とする。

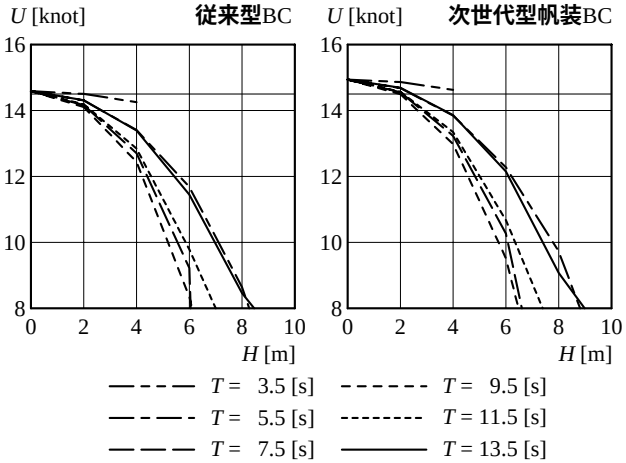
波パラメータ H, T, χ、風パラメータ U_t, γ、主機回転数 N_Pを意味する船速設定値 U_0をパラメトリックに変化させて(1)～(4)式を U，β，δ，φについて解き、応答データベースを構築する。このうち、船速設定値 U_0が 14.5[knot]のときの風による船速応答を図－４に、波による船速応答を図－５に示す。また、実海域中船速応答のうち、絶対風速 15[m/s]、斜追風(150[deg])、向波(0[deg])時のものを図－６に示す。



図－４　風による船速応答（U_0 =14.5[knot]）



図－５　波による船速応答（U_0 =14.5[knot]）



図－６　実海域中船速応答（U_0 =14.5[knot]）
U_t =15[m/s], γ =150[deg], χ =0[deg]

４．ウェザールーティングシステム

現状の WR では等時間曲線法を基に推奨航路の選定が行われている。この等時間曲線法は到着時間が最短となる航路選定アルゴリズムであり、必ずしも CO_2 排出量が最小となる航路が選定されるわけではない。また、従来の WR システムには明確な形で風の影響は含まれておらず、次世代型帆装船の WR を行う場合、風の影響を適切に考慮したものとする必要がある。また、燃料消費量最小を目的とした手法の開発[2),3),4)]も行われているが、以下で示す船速調整機能の視点が明確でない。

今回の WR システムでは、等時間曲線法に比べ、目的関数、制約条件を容易に導入できる非線形計画法による最適化手法[5)]を用い、目的関数を CO_2 排出量最小として開発を行った。

（１）最適化手法

最適化計算には、非線形計画法のうち、拡張ラグランジュ乗数法を用いる。

拡張ラグランジュ乗数法はペナルティ法の１つであり、収束に時間がかかるものの、解の探索が比較的安定しているという特徴がある。

（２）目的関数

最適化手法により最小化を行う目的関数は、CO_2 排出量とする。CO_2 排出量 C は CO_2 排出量係数を 3.21 とし、(5)式の通り区間毎の和として求まる。

$$C=3.21\sum_i(\lambda_i \cdot BHP_i \cdot t_i) \qquad (5)$$

ここで、λ_i :主機燃料消費率、BHP_i :制動馬力、t_i :航行時間であり、t_i を求めるために使用する区間距離は、地球上の 2 点間の最短距離とする。

（３）設計変数

設計変数は、船位の外、船速調整機能を付加するため船速設定値とする。船位は指定した経度上での緯度を変数とする。

今回の計算では、経度の分割を 7.5°間隔、ただし中央部のみ 10°とする。このとき、航路は 12 区間で表現され、設計変数は 23 となる。

（４）制約条件

① 境界条件（設計変数の上限、下限を制約）

緯度変数は 30°N～57.5°N の範囲とする。

船速設定値 U_0 は、コモンレール方式主機の出力下限である主機負荷 30%MCR に相当する 10.65 [knot]から計画船速の 14.5[knot]を範囲とする。

② 緯度変数の移動幅

経度間隔、航路を考慮して、緯度は直前の通過緯度から±3°以内の範囲とする。ただし、出発点、到着点を含む区間では±5°と緩和する。

③ 運航限界

船速応答の計算から、船速 U が 8.0[knot]以下となる場合には力の釣合いを保つことが困難であったため、この状態を意識的操船を行う状況と想定し、実海域での船速が 8.0[knot]以下となる海域は航行しないとする。

④ 航海時間

航海時間にスケジュールを設定する。

設定スケジュール S は、平均船速にチャーターベースの船速を用いて(6)式となる。

$$S=\frac{(\text{大圏航路長})}{(\text{平均船速})}=\frac{4{,}333[\mathrm{NM}]}{13.8[\mathrm{knot}]}=314[\mathrm{hr}] \qquad (6)$$

５．計算例と考察

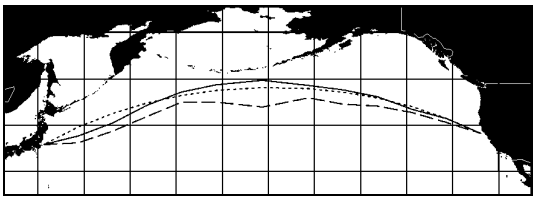
CO_2 削減効果を調べるため、大圏航路上を従来型 BC と次世代型帆装 BC が同時に航走を始めた場合と、今回開発した次世代型帆装船用 WR システムを従来型 BC と次世代型帆装 BC に対し適用した場合の効果を調べ、両者を比較する。

計算は季節毎、東航と西航で行い、航海開始時刻は東航、西航とも、春季 4 月 4 日 12UTC、夏季 7 月 4 日 12UTC、秋季 10 月 4 日 12UTC、冬季 1 月 4 日 12UTC とした。これらから、1 航海平均 CO_2 排出量を求め、表－１に示す。

一例として春季東航時の選定航路を図－７に、そのときの船速、船速設定値、遭遇海象を図－８に示す。これらの結果から、航路選定機能の他、平均的に船速を低減させる船速調整機能、帆の推力により増速する帆装効果が分かる。

次に、開発システムの効果の評価を行う。

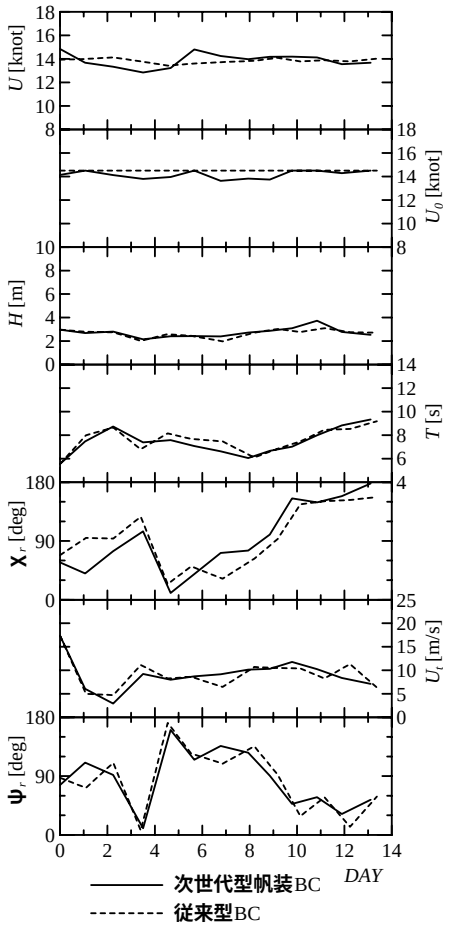
次世代型帆装船用 WR システムの効果の評価は従来型 BC が、大圏航路を航行した場合と次世代型帆装船用 WR システムを使用した場合の CO_2 排出量により行う。その結果、次世代型帆装船用 WR システムの効果は、表－１の値を用いて 6.5%となる。ただし、大圏航路を航行した場合の航海時間は設定スケジュール通りにはならず、比較する両者で航海時間が異なるため、航海時間の違いが CO_2 削



------- 大圏航路　——— 選定航路（次世代型帆装 BC）

－－－－ 選定航路（従来型 BC）

図－７　選定航路（春季東航）



図－８　船速設定値と船速、遭遇海象（春季東航）

減に与える影響は別途検討する必要がある。

次に、高揚力複合帆の効果の評価は、次世代型帆装船用 WR システムを使用した従来型 BC と次世代型帆装 BC の CO_2 排出量により行う。その結果、高揚力複合帆の効果は 11.7%になる。

以上から、次世代型帆装船用 WR システムと高揚力複合帆との総合効果は、上記 11.7%と 6.5%を組み合わせて 17.4%となる（表－２）。ただし、この場合も、航海時間の違いが CO_2 削減に与える影響を別途検討する必要がある。

表－１　１航海平均 CO_2 排出量

航路	CO_2 排出量（航海時間）	
	従来型 BC	次世代型帆装 BC
大圏航路（船速設定値 14.5[knot]）	1045.4[t]（308.4[hr]）	1008.7[t]（301.8[hr]）
選定航路	977.9[t]（314.4[hr]）	863.1[t]（314.4[hr]）

表－２　研究開発要素の CO_2 削減効果

項目	CO_2 削減効果
高揚力複合帆の効果	$1-S_s/S_0$=11.7%
次世代型帆装船用 WR システムの効果*	$1-C_s/C_0$=6.5%
総合効果*	$1-S_s/C_0$=17.4%

*航海時間の違いが CO_2 削減に及ぼす影響は別途検討を要す。

６．まとめ

航路選定機能、船速調整機能を有する次世代型帆装船用 WR システムの開発を行い、その CO_2 削減効果を定量的に示した。

本結果から、次世代型帆装船用 WR システムの CO_2 削減効果は高く、さらに高揚力複合帆を組み合わせることで CO_2 削減効果は 17.4%となり、地球温暖化ガス排出削減の有効な手段である。

謝辞

本研究は(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構の助成を受けた(社)日本造船研究協会「次世代型帆装船の研究開発委員会」の研究の一環として実施したものであり、委員各位にお礼申し上げます。

参考文献

1) 芳村康男他: 大型練習帆船の帆走性能の推定, 日本航海学会論文集,第 84 号, 1990.
2) 村山雄二郎他: 海上輸送における風力エネルギー利用の研究（その 1, 帆装船の性質および航路の最適化の研究）,船舶技術研究所報告, 第 23 巻第 6 号, 1986.
3) 萩原秀樹: 帆装商船のウェザールーティング, 日本航海学会誌航海, 第 93 号, 1987.
4) J. A. Spaans, et al.: NEW DEVELOPMENTS IN SHIP WEATHER ROUTING, IAIN'94, 1994.
5) 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.