

荒天下での水面上巨大構造船の定常航行性能

—その2 風浪下での抵抗増加特性及び運航航路最適化—

正員 藤原 敏文* 正員 上野 道雄*
正員 池田 良穂**

Cruising performance of ships with large superstructures in heavy sea
— 2nd report: Added resistance induced by wind and waves, and optimum ship routing —

by Toshifumi Fujiwara, *Member* Michio Ueno, *Member*
Yoshiho Ikeda, *Member*

Summary

The steady-state cruising performance of a large passenger ship and a PCC under heavy wind and waves are presented in this paper. These kinds of ships have specifications with very large hull and superstructures above sea level. Strong wind causes large drift, heel and rudder angles to ships and exerts great influence on the ships' cruising performance. From safety and economical aspects the assessment of added resistance under such wind and wave loadings is very important for those ships. Formulation of the steady-state equations is based on the MMG model for a ship manoeuvring simulation to obtain the steady ship condition. The wind and wave loads on the ships are calculated using the latest methods proposed by the authors. From this analysis, the special specifications of the steady condition for the large passenger ship and the PCC are clearly understood. Moreover, speed loss and DHP increase of those ships in the sea around Japan are revealed in this paper. It is cleared in the calculated results that wind effect has a very important role for the ships with large superstructures. Finally using the results of steady-state cruising performances, the optimum ship routing in wind and waves is presented by the dynamic programming method in order to find the route for reducing the navigating time of the ships.

1. 緒 言

近年、超大型タンカーと同程度で全長が 340m を超え、水面上高さが約 60m というような大型クルーズ客船が建造される状況にある¹⁾。また、PCC では 6000 台以上を搭載するまでに巨大化し、コンテナ船についても約 10000TEU クラスで全長が 300m を超える船が就航している²⁾。これらの船舶は、水面上構造物が非常に大きいため、風から大きな影響を受けることが予測される。

前報³⁾において著者らは、大型客船、PCC を対象として強風下で定常航行する船の偏角、横傾斜角、舵角を明らかにした。また、それぞれの船の風による抵抗増加量を示した。その結果、強風下においては広い範囲の風向で風により抵抗が増加する現象を明らかにし、また、斜め追い風状態での抵抗

増加は、回頭モーメントを打ち消すための当て舵が主な原因であることを示した。

本論文では、外乱として風のみを対象にしていた前報の検討に波の影響も加え、風浪下における船の定常航行性能を明らかにする（一般的に風浪とは風により誘起される波を意味するが、ここでは風と波の両者として用いる。）。風浪中抵抗増加に関する研究については、主として波による抵抗増加の影響が顕著なタンカーに代表される肥大船を対象として研究が行われてきた。門松ら⁴⁾は、ばら積み船を対象として、荒天中の斜航状態及び必要主機出力について調査した。同様に内藤ら⁵⁾は、大型タンカーを対象とし、風浪下での運航性能について検討を行っている。ただし、これらの船では風により誘起される偏角、傾斜角、舵角の影響はそれほど大きいものではない。

風圧側面積の大きい PCC やコンテナ船については、正面風浪下での抵抗増加について門松ら⁷⁾が検討を行っている。正面風浪下では波の影響が非常に大きく、ビューフォースケール 8（平均風速約 19m/s）以上の海象では、抵抗成分の 8 割以上が波浪影響となることを指摘している。しかし、水

* (独) 海上技術安全研究所

** 大阪府立大学

原稿受理 平成 18 年 2 月 27 日

面上構造物が大きい風の影響が顕著な船は、強風下での斜航、当て舵による推進性能への影響が非常に大きい。数少ない例として湯浅ら⁸⁾は、PCCの実船実験から船速低下量は風向による傾向の差が大きいことを報告している。今回対象とした大型客船、PCCは前報にて風の影響を大きく受けることが明らかになっており、それらの水面上巨大構造物に対して全風向、波向きを対象とした評価を行う必要があるものの、その影響は十分検討されていない状況にある。実海域での斜航、傾斜、当て舵を有する運航状態を想定し、波の影響による運航特性の変動量を明らかにすることが本研究の目的である。

風浪中の船体運動については前報⁴⁾と同様に、前後、左右、回頭、横傾斜の4自由度のMMGモデルを使って定常航行状態を求めた。外乱として、風及び波を想定し、風に関しては、実海域で遭遇するであろう鉛直方向に風速差のある定常風により計算した。風圧力は著者ら⁹⁾が提案している新しい推定法により推定した。さらに、波浪外力は、船体の反射による定常波力を前後、左右、回頭の3成分について著者の一人が提案している方法¹⁰⁾で求めた。船体動揺に起因する抵抗増加は丸尾の方法¹¹⁾¹²⁾により計算し、船体の前後力に加えた。

本検討により、風及び波を想定した荒天中の大型客船、PCCの航行船速、偏角、傾斜角、当て舵量が示された。風波並存時の運航特性においても、正面風浪のみでなく広範な風向角に対して、斜航及び当て舵による抵抗増加を含めた評価の必要性が示された。特に、荒天下における斜め後方からの風波では、運航性能に風が波よりも大きな影響を及ぼす場合があることを明らかにした。また、風波影響による航行状態の変動量、機関出力増加量が明らかになった。

さらに、風浪の抵抗への寄与を減少させ、燃料消費削減を可能とする方策として、動的計画法¹³⁾により運航時間最小を評価量として最適航路の探索を行った。計算結果から、海象条件ごとに異なる最適航路を明らかにすると共に航海時間短縮量を示した。

2. 定常航行運動数学モデル

船体動揺による影響が小さいと仮定し、前後、左右、回頭、横傾斜の4自由度MMGモデル¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾により風浪下での定常航行状態を求める。

2.1 船体運動基礎式

横傾斜しながら船速 U 、偏角 β で航行する船の船体運動方程式はFig. 1の座標系に基づき表現する。 u 、 v 、 r 、 ϕ は船体重心を基準とした船速の x 、 y 軸方向成分、 z 軸周

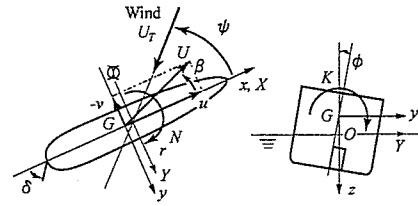


Fig. 1 Coordinate systems and definitions of force/moment sign convention for ship hull loading

りの旋回角速度、 x 軸周りの横揺れ角を示す。風は船首を基準とし真風速 U_T 、真風向角 ψ を定義する。主波向きと風向きは等しいと仮定する。後で海象条件として利用する日本近海の統計データからもこの仮定はほぼ妥当であると言える¹⁷⁾。

今、船体が風及び波を受けながら時間的変動を無視した定常状態で直進している場合を想定し、船体運動方程式を次式のように表わす⁴⁾。

$$\begin{aligned} X &= 0, \quad Y = 0, \quad N = 0 \\ K - W \cdot \overline{GM} \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

波浪中で直進する場合、周期的運動を伴うため慣性力と流体力の総和が0とならず、状態によっては(1)式の仮定から外れることが考えられるが、最も大きな影響が予想される前後力についても後述のように(第2.2.2項)その影響は小さいと想定され、ここでは前報⁴⁾と同じく外力の定常釣り合い状態を求めることにより検討を行う。

外力は、船体中央及び平均喫水位置を基準とした各軸方向外力 X 、 Y 、 N 、 K を使用する。(1)式を様々な U_T 、 ψ について解く。

2.2 船体に作用する流体力

(1)式の船体に作用する流体力は、次式のように分離して取り扱う。

$$\begin{aligned} X &= X_{H0} + X_H + X_P + X_R + X_A + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_A + Y_W \\ N &= N_H + N_R + N_A + N_W \\ K &= K_H + K_R + K_A \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、添え字の H 、 P 、 R 、 A 、 W を付した流体力はそれぞれ船体、プロペラ、舵に作用する水流体力、水面上船体に作用する風圧力及び船体に作用する波浪外力を示す。

X_{H0} は平水の中での直進時船体抵抗を表し、 X_H は偏角、横傾斜角がある時の水流体力の変化量である。船体、プロペラ、舵に作用する水流体力は、前報⁴⁾と同様に実験値、実績値、推定値を利用する。

2.2.1 風圧力

風圧力の計算方法も前報と同じであるが、再度整理し以下に示す。

風圧力の各成分 X_A 、 Y_A 、 N_A 、 K_A は相対風向角 ψ_A に依存した風圧力係数 C_{AX} 、 C_{AY} 、風圧モーメント係数 C_{AN} 、 C_{AK} を使って次式から求める。

$$\begin{aligned} X_A &= C_{AX} q_A A_F \\ Y_A &= C_H C_{AY} q_A A_L \\ N_A &= C_H C_{AN} q_A A_L L_{OA} \\ K_A &= C_H C_{AK} q_A A_L H_L \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 q_A は相対風速による風の動圧、 A_F は水面上正面投影面積、 A_L は水面上側面投影面積、 L_{OA} は全長、 H_L は平均高さ (A_L/L_{OA}) である。風圧力、風圧モーメント係数は著者ら⁹⁾の提案している方法により求める。

C_H は過去の実験結果¹⁸⁾¹⁹⁾から求めた船体が横傾斜した際の風圧力補正係数であり、次式のように定義する。

$$C_H = 0.355\phi + 1.0 \quad (4)$$

ただし、 ϕ の単位はラジアンである。

次に動圧 q_A を求める。無風時に船が航行することにより遭遇する相対風は鉛直方向に一様な風である。このときの船体に作用する動圧を q_S とする。さらに鉛直風速分布の影響を考慮し、静止した船体に作用する動圧を q_T とすると、両者の重ね合わせにより、一定風速下で船体に作用する q_A は、以下ようになる。

$$q_A = q_S + q_T + 2\sqrt{q_S \cdot q_T} \cos(\psi + \beta) \quad (5)$$

ただし、

$$\begin{aligned} q_S &= \frac{1}{2} \rho_A U^2 \\ q_T &= q_{HL} \quad \text{for } X_A \\ q_T &= k_q \cdot q_M + (1 - k_q) q_{HL} \quad \text{for } Y_A, N_A, K_A \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 ρ_A は空気密度である。

q_{HL} 、 q_M 及び k_q は次式で示される。

$$\begin{aligned} q_{HL} &= \frac{\rho_A U_T^2}{2} \Big|_{H_L} \\ q_M &= \frac{1}{H_L} \int_{H_L} \frac{\rho_A U_T^2(z_A)}{2} dz_A \\ k_q &= 2.162 \left(\frac{q_M}{q_{HL}} \right)^2 - 2.422 \left(\frac{q_M}{q_{HL}} \right) + 1.260 \\ &\quad \text{in } 0.50 \leq q_M / q_{HL} \leq 1.00 \end{aligned} \quad (7)$$

k_q は平均高さ H_L までの平均動圧 q_M と H_L での動圧 q_{HL} の比に依存した実験定数である²⁰⁾。ここでは実験結果を2次式で近似した。 U_T' は、基準高さ z_1 を 10m とした場合の水面上高さ z_A での風速であり、次式のべき分布で表現する²¹⁾。

$$U_T' = U_T \left(\frac{z_A}{z_1} \right)^\alpha \quad (8)$$

べき指数 α は海面の状態に依存したパラメータで、風速を変数とした次の1次式で表現する⁴⁾²¹⁾。

$$\alpha = 1 / (-0.20U_T + 12.0) \quad (9)$$

高さにより異なる風速と船が航行することにより遭遇する一様風との合成であることから、厳密には相対風向角についても高さごとに異なる値となる。本稿において風圧力係数を求める際の相対風向角 ψ_A は H_L での真風速 $U_T'(H_L)$ 及び船速 U を用いて求められた値を用いる。

2.2.2 波浪外力

波により船体に作用する流体力は、短波頂不規則波中の時間平均的な定常力を想定し、次式のように表現する。

$$\begin{aligned} X_W &= X_{W0} + X_{W1} \\ Y_W &= Y_{W1} \\ N_W &= N_{W1} \end{aligned} \quad (10)$$

X_{W0} は船体動揺に起因した波浪中抵抗増加成分で、丸尾の方法¹¹⁾を細長体の仮定により定式化した藤井らの方法¹²⁾により求めた。このとき必要な波浪中での上下揺れ、縦揺れの船体応答は、NSM(New Strip Method)²²⁾により計算した。上下揺れと縦揺れのための想定であるが、縦運動と横運動による抵抗増加は独立であり、個別に計算できる上に、横運動に起因した抵抗増加は非常に小さいことが指摘されている²³⁾²⁴⁾。したがって、前後力のみで船体動揺に起因した抵抗増加成分を付加したが、本仮定においても大きな問題は生じないと考えられる。

添え字 $W1$ 成分は波が船体表面で反射することにより生じる定常波力を表す。この定常波力は波漂流力とも称される成分であり、斜航状態での流体力を計算することが可能な著者の一人による方法¹⁰⁾を使って求めた。

定常波力の各成分は次式で定義する。

$$\begin{aligned} X_{W0} &= C'_{WX0} q_W L_{PP} \\ X_{W1} &= C'_{WX1} q_W L_{PP} \\ Y_{W1} &= C'_{WY1} q_W L_{PP} \\ N_{W1} &= C'_{WN1} q_W L_{PP}^2 \\ q_W &= \frac{1}{2} \rho g S^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Table 1 Principal ship particulars for large passenger ship (LPS) and pure car carrier (PCC)

	LPS	PCC		LPS	PCC
L_{OA} (m)	275.7	190.0	C_B	0.710	0.540
L_{PP} (m)	242.2	180.0	A_F (m ²)	1600.7	885.0
B (m)	36.0	32.2	A_L (m ²)	10189.4	4391.5
d (m)	8.40	8.20	H_L (m)	37.0	23.1
W (ton)	52001	25665	D_P (m)	5.50	5.47
GM (m)	1.78	1.70	A_R (m ²)	32.1	37.7

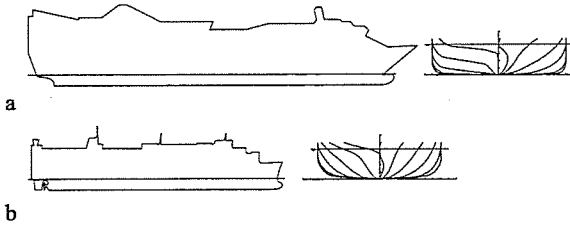


Fig. 2 Side profiles and body plans of (a) LPS and (b) PCC

ここで、 ρ 、 L_{PP} 、 ζ は水の密度、船の垂線間長、不規則波の代表波振幅である。 C'_{WX0} 、 C'_{WXI} 等の係数は、規則波中での抵抗増加係数 C_{WX0} 、波漂流力係数 C_{WXI} 等、不規則波スペクトル $S(\omega)$ 、方向分布関数 $G_W(\mu)$ を使って計算する。 C'_{WX0} の場合を例にとり次式に示す。

$$C'_{WX0} = \frac{1}{m_0} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} C_{WX0} S(\omega) G_W(\mu) d\omega d\mu \quad (12)$$

ここで、

$$m_n = \int_0^{\infty} S(\omega) \omega^n d\omega \quad (n=0,1) \quad (13)$$

不規則波スペクトル $S(\omega)$ には次式で表される ITTC スペクトル²⁹⁾を用いる。

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega^5} \exp\left(\frac{-B}{\omega^4}\right) \quad (14)$$

$$A = \frac{173 H_{1/3}^2}{T_{01}^4}, B = \frac{691}{T_{01}^4}$$

ここで、 $H_{1/3}$ は有義波高、 T_{01} は目視観測波周期に相当し $2\pi m_0/m_1$ である。また、 ω は波の円周波数である。

短波頂不規則波の方向分布関数 $G_W(\mu)$ は、波の主方向を μ として次式を用いる。

$$G_W(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \mu \quad \left(-\frac{\pi}{2} \leq \mu \leq \frac{\pi}{2}\right) \quad (15)$$

初期計算条件として波向きは風向きに等しいと仮定して、波の主方向を風向きに一致させる。このとき、相対波向き、出会い波周期は、別途求めるため波向きについてみれば相対

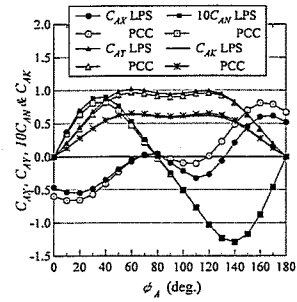


Fig. 3 Wind force and moment coefficients of LPS and PCC

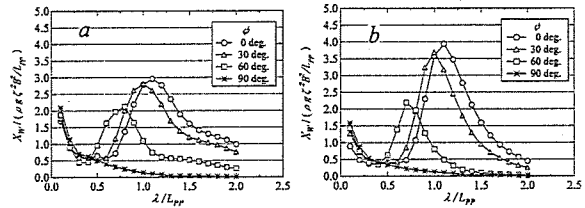


Fig. 4 Longitudinal wave force coefficient of (a)LPS and (b) PCC in different wave directions

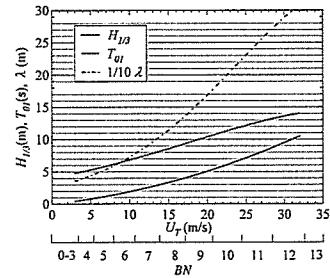


Fig. 5 Weather condition for significant wave height $H_{1/3}$, wave period T_{01} and length λ for steady wind velocity U_T with Beaufort number (BN)

風向とは必ずしも一致していない。

以上により、(2)式の各項が求まり、種々の風速及び風向角で船速 U 、偏角 β 、横傾斜角 ϕ 、舵角 δ を未知数として多元 Newton-Raphson 法により収束解を得る。

3. 計算対象船舶及び計算条件

対象船である大型客船(図中、LPS)と PCC の主要目を Table 1 に示す。また、船の側面外観、正面線図を Fig. 2 に示す。 C_B は方形係数、 D_P はプロペラ直径、 A_R は舵面積である。大型客船は2軸、2舵船を、PCCは1軸、1舵船想定している。Table 1の舵面積は1舵相当の値である。両船ともトリムの無い等喫水を想定している。計算で使用した主船体に働く流体力、プロペラ・舵要目、流体力係数は前報⁴⁾と同じであるため省略する。

次に外力を決定する風及び波の流体力係数を示す。風圧力係数は著者らの方法⁹⁾によって求め、得られた前後・横風圧

4. 計算結果と考察

4.1 定常航行性能

Fig. 6, Fig. 7に大型客船とPCCのプロペラ回転数を一定とした場合の風浪中定常航行状態の計算結果を示す。このとき、比較のために波の無い風のみの場合を黒印「A」として、風浪時を白印「A+W」として示す。波の主方向と等しい風向角 ψ は10deg刻みで0degから180degまで計算した。風速 U_T は10m/s刻みで10m/sから30m/sまで計算した。設定船速を大型客船は22knot、PCCは20knotとし、無風時でその速度を維持できるプロペラ回転数に固定して、計算した(大型客船は119rpm、PCCは125rpm)。舵角は限界角度を ± 40 degとした。

計算結果から明らかになったことを以下に示す。

- Fig. 6の大型客船の場合、風外力のみの場合では風速25m/s以上、斜め追い風状態(風向角140deg付近)で定常航行不能に至る状況が見られたが⁴⁾、波の影響により船速が低下し、相対的にプロペラ出力が増加するため、風速30m/s以下であれば収束解が得られる結果となった。一方、Fig. 7のPCCの場合は、 U_T が30m/sの状況において、 ψ が10deg付近の向かい風状態で定常航行不能となる。風浪の影響により船速低下、偏角の増加が著しく、釣り合い状態を保つことが困難となる。因みにPCCの ψ が0degの場合は、偏角、横傾斜とも無い状態であり、船速 U が約2knotとなる解が得られる。PCCは大型客船よりも水面下/水面上体積比が大きいため荒天時に波の影響を大きく受けることがわかる。
- Fig. 6, Fig. 7の船速の結果から風外力のみの場合と同様に風浪が強くなるにつれて船速低下となる風向角の領域が拡大、船速低下量も増加する。風のみで追い風状態では船速が増加したが、風浪時では追い風であっても抵抗増加により船速が低下する。
- 風向角 ψ が0degから90degの範囲では波による船速低下が大きい。特にPCCの場合は「A」と「A+W」で航行状態もかなり異なる結果となっている。しかし、計算条件の仮定によるところも大きい。が、 ψ が90degから180degの範囲では波の影響がそれほど小さく、船速低下を初めとする航行状態に対して風の影響が支配的であることがわかる。
- PCCの舵角 δ で U_T が30m/sの強風下では、 ψ が30deg付近まで風条件だけの場合と風浪時における結果とでは傾向が異なり、舵向きが逆転するという変化が見られる。このとき、偏角 β が極度に大きいため船体座標系に対する負の値となっているが、実質的には水の流入方向

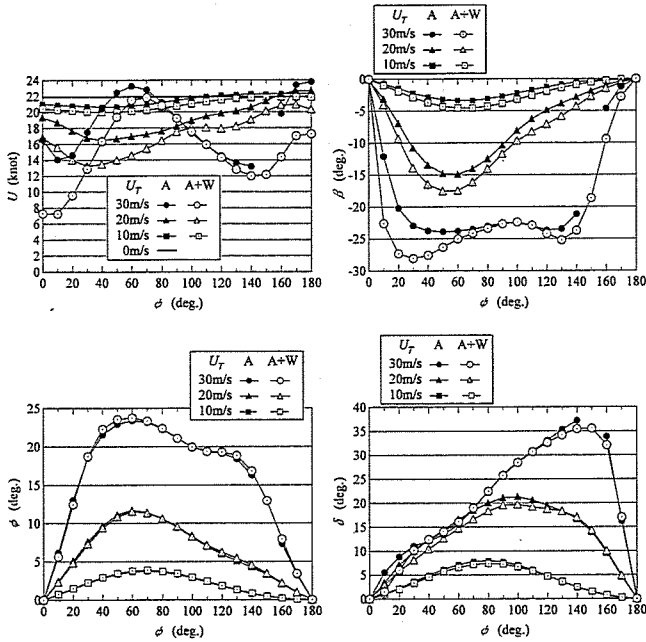


Fig. 6 Calculated results of ship speed loss, drift, heel and rudder angles for LPS in wind and waves

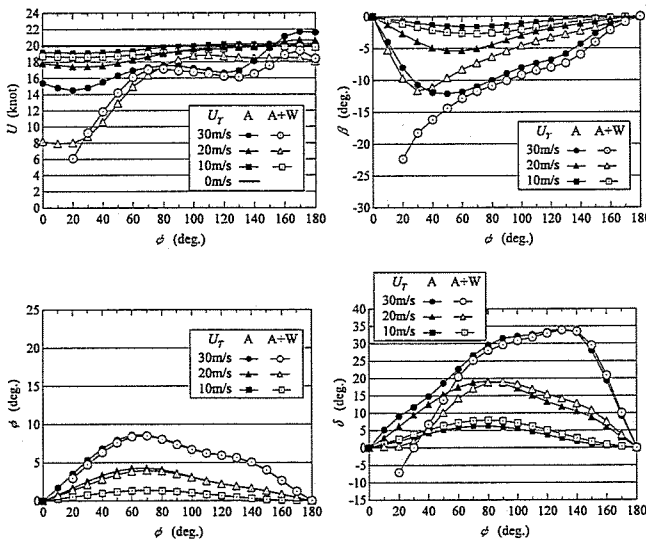


Fig. 7 Calculated results of ship speed loss, drift, heel and rudder angles for PCC in wind and waves

力係数 C_{AX} 、 C_{AY} 、回頭・横傾斜風圧モーメント係数 C_{AN} 、 C_{AK} をFig. 3に示す。波に関しては、藤井らの方法¹²⁾、著者の一人によって提案された方法¹⁰⁾を用い、求められた抵抗増加係数、波漂流力係数を足しあわせ、1例として前後波力係数のみをFig. 4に示す。

海象条件については日本近海の通年データ¹⁷⁾を参照し、風速により波高、波長が発達するFig. 5の状況下で計算を行った。それぞれ、 λ ；波長、 BN ；平均風速 U_T を区分したビュフォートナンバーである。

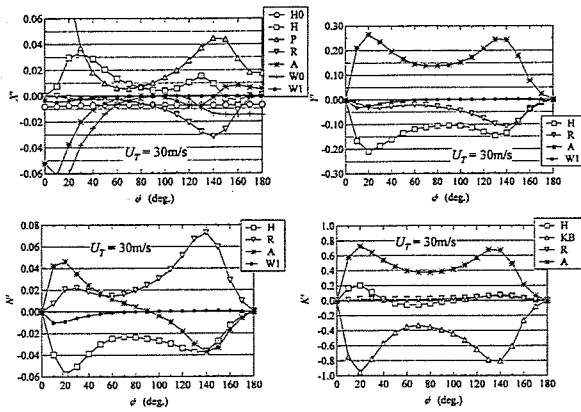


Fig. 8 Separated components of non-dimensional force induced by wind and waves on LPS in $U_T=30\text{m/s}$ (H0; Hull resistance, H; Drift and heel effect on hull resistance, P; Propeller thrust, R; Rudder and A; Wind forces, W0; Resistance increase caused by ship motion, W1; Wave drift force, KB; Buoyancy)

に対して右舵となっている。

- 波の条件が加わった際も強風下において大型客船では風向角 50deg.から 80deg.付近で船速低下量が非常に小さくなる。ただし、風条件のみの場合と異なり、初期設定速度よりも増速するには至っていない。PCC の場合は 80deg.を越える風向角のほぼ全域で急激に船速低下量が小さくなる。
- Fig. 6中の大型客船の船速結果から風浪中による抵抗は、正面風とは異なる風向角で最大となることがわかる。また、船速の変化傾向が風速により大きく異なる。風速が 20m/s の場合は、風向角 30deg.付近に船速低下の極大点が、それより強風時では、10deg.と 150deg.付近に極大点が存在する。

以上の結果から、風波下においても水面上構造物の大きな船舶に対して風速、風向角の影響は大きく、運航性能を評価する場合は、様々な海象条件を対象として検討する必要があることが示された。一方で、この結果は後に示す海象に応じた航路選択の有効性を示唆するものと言える。

Fig. 8に U_T が 30m/s での大型客船の船体に働く前後・横力、回頭・横傾斜モーメントの流体力成分を示す。各成分は(2)式で示された分力の無次元値を表し、一例として主船体に作用する流体力 (H) の場合を示すと次式から求める。

$$\begin{aligned} X'_H &= X_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} d U^2 \\ Y'_H &= Y_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} d U^2 \\ N'_H &= N_H / \frac{\rho}{2} L_{PP}^2 d U^2 \\ K'_H &= K_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} d^2 U^2 \end{aligned} \tag{16}$$

「H0」は偏角、横傾斜角の無い場合の直進時船体抵抗成

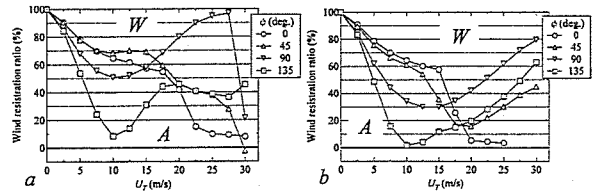


Fig. 9 Resistance ratios of longitudinal force component induced by wind (A) and waves (W) for (a) LPS and (b) PCC

分、「H」は偏角、横傾斜角による船体抵抗増加成分等、凡例中の記号は(2)式中の各成分を示す。

Fig. 8の前後力 X' の結果から風向角が小さい場合には、風及び船体動揺を引き起こす波による抵抗増加成分が大きく、 ψ が 90deg.以上の風向角においては、風や波の直接外力に代わって間接的に影響している舵による抵抗増加成分が大きくなっていることがわかる。また、回頭モーメント N' の結果からは舵力のみにより船体に作用する力「H」と風圧力「A」とを釣り合わせている状況がわかる。

次に推進方向を基準として抵抗増加成分中の風及び波の寄与分を明らかにする。風外力に起因した抵抗成分を全体抵抗に占める割合として大型客船の場合を Fig. 9(a)に、PCC の場合を Fig. 9(b)に示す。風の抵抗への寄与分(図中、線の下で示される「A」領域)以外は、波の成分(図中、線の上で示される「W」領域)である。横軸は風速 U_T とした。抵抗成分に着目するために風が推進力として作用している追い風状態は採り上げず、風向き ψ は代表風向角として 0deg.から 135deg.までの 45deg.刻みで示している。

計算では、船体の斜航、横傾斜及び当て舵による抵抗成分は、Fig. 6、Fig. 7を参照し、波の定常航行状態への影響は風浪時の結果「A+W」から風のみ結果「A」を差し引いた量であると仮定し、その割合に応じて抵抗成分を振り分けた。偏角、横傾斜角の変動は平均し、「H」への影響割合を計算した。

2つの図から風速・風向角による違いが非常に大きいことがわかる。0deg. $\leq \psi \leq 45$ deg.付近の前方からの風に対して、大型客船では風速 20m/s 以下、PCC では風速 15m/s 以下の状況であれば風の影響が波の影響よりも大きい。波が風により発達していない状況下であり、水面上構造物が大きいため風の影響が支配的になる。

一方、それよりも速い風速域では波の影響が顕著になり、PCC の場合、 ψ が 0deg.の向風では大半が波による抵抗であることがわかる。門松ら⁷⁾は平均風速約 19m/s 以上の海象では、抵抗成分の 8 割以上が波浪影響となることを指摘しているが、同様の傾向を示していると考えられる。

しかし、 ψ が 90deg.や 135deg.の結果では風速 10m/s 付近で波の影響が大きくなる傾向があるものの風速の増加に伴

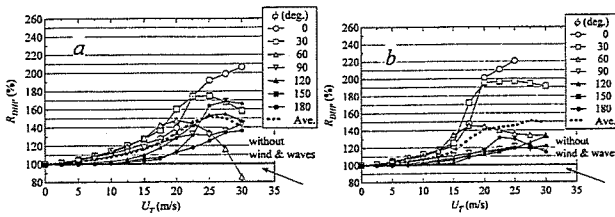


Fig. 10 Differential delivered horse power (DHP) compared with those in no external forces for (a) LPS and (b) PCC in wind and waves

い風の影響割合が大きくなる。PCC と比較して大型客船では、より風の影響が顕著である。

因みに風速 U_T が 0m/s で抵抗の全てが風の成分となっているが、これは無風時に波が存在しないと想定しており、船の進行による相対風のみを外乱抵抗として計算しているためである。

4.2 機関出力増加量

荒天中での機関出力増加比を伝達馬力 DHP により求めた。プロペラ回転数 n 及びプロペラトルク係数 K_Q から DHP 増加比 (%) を R_{DHP} として次式で計算する。

$$R_{DHP} = \frac{DHP}{DHP_{mw}} \times 100 \tag{17}$$

$$DHP = 2\pi K_Q (J) \rho n^3 D_p^5 / 735.5$$

ここで K_Q は、プロペラ前進係数 J の関数であり、データとして与える⁴⁾。 D_p はプロペラ直径である。 DHP_{mw} は無外乱時に設定速度で航行するための伝達馬力である。

大型客船の場合を Fig. 10(a)に、PCC の場合を Fig. 10(b)に示す。先と同様に横軸は風速 U_T である。

一部例外を除き風浪により馬力増加となる様子がわかる。 Fig. 6、Fig. 7 の結果からもわかるように追い風状態であっても馬力増加となっている。 PCC の場合、風速 20m/s ともなれば正面向い風で 200%を越える状況となる。実際の運航では機関出力に制限があり、また、通常 15%程度のシーマージンを確保しているにすぎないため、伝達馬力が 200%となることはあり得ない。本計算では回転数を一定とし、船速低下によりプロペラトルクが大幅に増加するために得られた値であると言える。大型客船の場合、船速低下の小さかった ψ が 60deg.付近では風速の増加に伴い風速 20m/s を境として馬力の増加が減少に転ずる。風速 30m/s の場合にはトルク減少に伴い唯一馬力減少との結果を得た。

4.3 風浪下での運航航路最適化

大型客船と PCC を対象として、想定海象下でプロペラ回

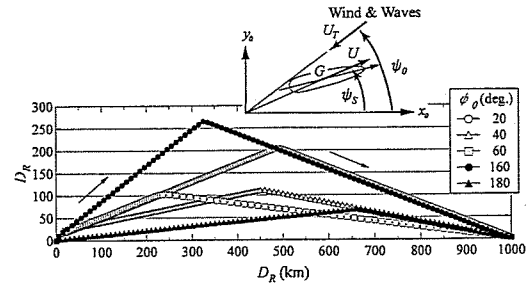


Fig. 11 Best route on minimum navigating time for LPS in $U_T=30m/s$

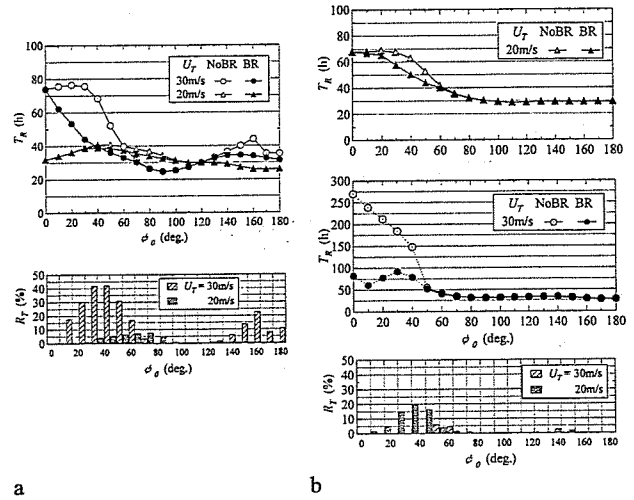


Fig. 12 Navigating time and time reduction ratio when selecting the best route on minimum navigating time, BR, at 1000km distance on (a) LPS and (b) PCC, comparing with straight going, NoBR

転数一定とした場合の船速等の運航状態は、それぞれ Fig. 6、Fig. 7 として求まっている。その中から船速と偏角の計算結果を使って、風浪下での運航航路最適化による運航時間短縮航路、時間短縮量について検討する。前項でも示されたが、船速が低下することによりプロペラトルクが上昇し、機関出力が増加する。機関出力の増加は、燃料消費の増加につながるため、単純ではないが船速低下を防ぎ、出力馬力を抑えることによる運航時間の短縮は燃料消費の削減にもつながることになる。

運航海域として東西 1000km×南北 600km の範囲を想定する。船が西端から出発し、東端の南北方向同地点に到達するという条件の下、動的計画法¹³⁾により最短運航時間を評価量とする航路の探索を行う。このとき、想定海域を東西 200、南北 600 に分割し、計算を行った。海象条件としては、風速を 0m/s から 30m/s まで 10m/s 刻みで、絶対風向角 ψ_0 を 0deg. から 180deg. まで 10deg. ごとに変化させて、計算を行った。このとき、想定海域内では同一海象である。

大型客船で U_T が 30m/s の海象下、最短運航時間となる選択航路の計算結果を Fig. 11 に示す。時間短縮量が比較的大きかった風向角の結果のみを示している。グラフの上側を北

とし、西端である左端の座標 (0,0) から出発する。東航を基準とした場合の船の針路 ψ_S は -60deg. から $+60\text{deg.}$ の範囲を 5deg. 刻みで探索した。ただし、Fig. 11 では、結果的に運航を行った横 1000km \times 縦 300km の範囲のみ図示する。Fig. 6 の航行状態の結果からわかるように、 U_T が 30m/s で ψ が 10deg. から 20deg. 及び 140deg. から 160deg. の状況下では、大幅な船速低下を引き起こすことから、これらの状態を避けて迂回し、東端の目標地点に達していることがわかる。

さらに風向角ごとの運航時間について最適航路選択を実施した場合 (BR) と単純に直進して 1000km 航行した場合 (NoBR) とを比較し、大型客船の場合を Fig. 12(a)、PCC の場合を Fig. 12(b) に示す。同図中下部には「NoBR」の結果に対する「BR」の運航時間減少割合 (R_T) を示す。NoBR の直進時においても風浪の影響により、船は斜航、横傾斜、さらに当て舵状態にある。PCC の場合は Fig. 7 の ψ が 10deg. で有効な解が得られなかったが、計算上の打ち切り値である U が 3.5m/s 、 β が -28.6deg. を暫定値として利用し、連続した航行状態として取り扱った。Fig. 12(b) に示す点線上の結果は、有効な収束解が得られなかった状態を使った上での値である。

大型客船、PCC とも風速が 10m/s の場合は、東に単純に直進する場合よりも運航時間短縮を計れる他の航路は存在しなかった。

大型客船では、風速 U_T が 20m/s 、風向角 ψ_0 が 80deg. で約 8% 、 U_T が 30m/s 、 ψ_0 が 40deg. で約 42% もの運航時間を減少させることができる。

PCC の場合は、航行状態の解が得られなかった ψ_0 が 10deg. までの状態を除き、 U_T が 30m/s の際は有効な解が得られなかった。 U_T が 20m/s 、 ψ_0 が 40deg. であれば、約 20% 運航時間を減少させることができる。なお、 U_T が 30m/s で、 ψ_0 が 0deg. から 50deg. まで「BR」は、 β が極度に大きくなる 10deg. を避けるように航行した結果であり、僅かに針路を変更することで大幅な運航時間短縮が可能となることを示している。

風速が 20m/s から 30m/s という強風下、また、限られた風向であるが、水面上巨大構造船を対象として運航時間を短縮することが可能な航路の存在及び運航時間短縮量が明らかになった。

5. 結 言

実海域での船の運航性能評価を行う目的から、風の影響を受けやすい大型客船、PCC を対象として、プロペラ回転数一定条件の下、前進、横流れ、旋回、横傾斜の 4 自由度 MMG モデルを使い、船の定常航行に及ぼす風浪影響を推定計算し

た。得られた結果を以下のようにまとめることができる。

- ・ 風浪下における大型客船及び PCC を対象として、定常航行時の船速、船体の偏角、横傾斜角、当て舵量を計算すると共に、風及び波による抵抗増加の寄与を明らかにした。
- ・ 強風に伴う荒天下における抵抗増加は、正面風浪だけでなくほぼ全ての風浪角に対して生じ、また、正面風浪時以外で抵抗増加が極大となる場合が存在する。船体に働く直接的な風、波の影響だけでなく、風速や風向角に依存した船体の斜航・横傾斜、当て舵の影響を含めた上で、運航性能を評価する必要がある。
- ・ 今回対象とした水面上構造物が大きな船では、斜め後方からの風浪に遭遇した場合、波浪外力よりも風圧力が船速低下や偏角、横傾斜角といった航行状態に対して大きな影響を及ぼす。大型客船は PCC よりも水面上/水面上下構造物比が大きいため風浪の影響が顕著である。
- ・ 大型客船のように風圧面積の大きい船で、荒天下、斜航状態にある場合、風浪の向きによっては抵抗増加が一時的に減少する可能性がある。
- ・ 荒天下、斜め前方、斜め後方からの風浪に対して運航時間の短縮が可能な航路の存在が明らかになった。また、その航路選択による運航時間短縮量が明らかになった。 1000km 運航する大型客船の場合、風速が 30m/s 、風向が 40deg. の場合で運航時間を約 42% 減少させることができる。

参 考 文 献

- 1) 府川義辰:クイーンメリー2、船と海のサイエンス Vol.3、2003、pp2-8
- 2) 船と海のサイエンス新造船写真集 (14)、海上技術安全研究所、2005-2号
- 3) 超大型コンテナ船シンポジウム講演集、関西造船協会、2001
- 4) 藤原敏文、上野道雄、池田良穂:荒天下での水面上巨大構造船の定常航行性能—その 1 風による抵抗増加特性—、日本船舶海洋工学会論文集第 2 号、2006、pp257-269
- 5) 門松浩司、井上義行、寶田直之助:荒天時操船を考慮した大型肥大船の搭載主機出力について、日本造船学会論文集第 168 号、1990、pp171-182
- 6) 内藤林、高岸憲聖:実海域を航行する大型船の推進性能に関する研究—時間平均的な挙動について—、関西造船協会誌第 229 号、1998、pp57-68

- 7) 門松浩司、井上義行、寶田直之助：風浪中における船速低下に関する船型要素の影響、日本造船学会論文集第164号、1988、pp111-119
- 8) 湯浅通史、鈴木康平、多田羅豊：実船の就航時の船体応答について（第1報 自動車運搬船の船体応答）、日本造船学会論文集第159号、1986、pp217-228
- 9) 藤原敏文、上野道雄、池田良穂：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、2006、pp243-255
- 10) 上野道雄、二村正、宮崎英樹、野中晃二：短波長中を操縦運動する船に働く定常波力について、日本造船学会論文集第188号、2000、pp163-172
- 11) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第2報 抵抗増加の本質について）、造船協会論文集108号、1960、pp5-13
- 12) 藤井斉、高橋雄：正面規則波中における抵抗増加、三菱重工技法 Vol.4, No.6, pp644-650
- 13) ウェザー・ルーティング研究グループ：ウェザー・ルーティング 一気象情報に基づく最適航法一、成山堂、1992
- 14) 小瀬邦治、湯室彰規、芳村康男：第三章 操縦運動の数学モデルの具体化、第3回操縦性シンポジウム、日本造船学会、1981、pp.27-80
- 15) Kijima K, Katsuno T, Nakiri Y, Furukawa Y: 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, pp141-148
- 16) Fujiwara T, Hearn G.E, Kitamura F, Ueno M and Minami Y: Steady sailing performance of a hybrid-sail assisted bulk carrier, Journal of Marine Science and Technology Vol.10 No.3, 2005, pp131-146
- 17) Tsujimoto M and Ishida S : Statistical Characteristics of Winds and Waves around Japan, Proceedings of The Fifteenth International Offshore and Polar Engineering Conference(ISOPE2005), 2005, pp108-115
- 18) 岡田正次郎：小型船舶に対する風圧に因る傾斜モーメントについて、造船協会論文集第92号、1952、pp75-81
- 19) Henschke W et al.: Seitliche Luft- und Wasserkräfte bei Schräganströmung von Fahrgastschiffen und Fischereifahrzeugen, Schiffbauforschung 4, 1965, pp97-125
- 20) Blendermann W : Estimation of wind loads on ships in wind with a strong gradient, Proceedings of 14th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering(OMAE1995) Vol.I-A, 1995, pp271-277
- 21) 塩谷正雄：強風の性質—構造物の耐風設計に関連して一、開発社、1979
- 22) 高石敬史、黒井昌明：第2章 波浪中船体運動の実用計算法、第2回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1977、pp109-133
- 23) 細田龍介：斜波中における船体抵抗増加に関する研究、日本造船学会論文集第133号、1973、pp7-22
- 24) 丸尾孟、岩瀬和夫：斜波における抵抗増加の計算、日本造船学会論文集第147号、1980、pp79-84
- 25) 山内保文監修：船舶・海洋技術者のための不規則現象論、海文堂、1986

