

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—

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
— 1st report: Added resistance induced by wind —

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

Summary

From economical and safety aspects the assessment of steady-state cruising performance of ships under heavy wind loading is very important. A large passenger ship and a PCC with a very large hull and superstructures above sea level, which are greatly affected by wind, are treated in this paper. The assessment of the ship performance is conducted using a computational calculation method. The steady-state equations are formulated based on the MMG model for ship manoeuvring simulation to obtain the steady ship conditions like drift, heel and rudder angles. The wind loads on those ships used in the calculation, including the effect of boundary layer profiles of wind and the heel effect of the ships, are estimated by the method that the authors proposed. As a result, some important characteristics of the resistance increase in steady running condition in heavy wind for the ships are clearly revealed.

1. 緒 言

実海域では風、波、潮流といった外乱が存在し、船は目標針路を保持するために当舵をとりながら斜航状態で航走している。一般的に斜航状態の船は船体抵抗が増加するために、海象条件によっては大幅に船速が低下する。運航の定時性及び安全上の観点から設計上はシーマージンが確保されているが、遭遇海象下での航行状態の把握は、運航管理及び設計段階での性能予測を行う上で非常に重要である。近頃では船の進行状態がGPSにより正確に計測され、田中¹⁾は風の影響によるPCCの斜航量が非常に大きくなっている実態について報告している。ここでは、水面上船体が大きく風外乱下で斜航し、横傾斜状態にある船の航行性能評価を行う。

過去の研究でタンカー、ばら積み船を対象として横傾斜の無い前後、左右、回頭の3自由度船体運動により、強風下の保針性能、操縦性能を採り上げた例は多い²⁾³⁾⁴⁾等。また、横傾斜影響も含めた操縦運動の検討としてはPCCやRo-Ro船

も含め様々な船を対象とした平野ら⁵⁾⁶⁾の検討、コンテナ船を対象とした貴島ら⁷⁾の検討が挙げられる。ただし、無外乱下での検討であり、外乱影響による抵抗増加を対象としていない。数少ない例として平野ら⁸⁾は模擬風発生装置を模型船上に設置し、実験で風圧下でのLNG船の保針性能を調査すると共に、4自由度操縦運動計算手法の有効性について確認している。

一方、近年では船長が300mを超える大型のクルーズ客船が建造される状況にある。水面上船体の容積は、水面下船体に比べ非常に大きく、風の影響により大きく斜航、横流れすることが考えられる。しかしながら、現状において風の影響を受けやすい大型客船を対象とした強風下での航行状態、推進性能への影響は、十分検討されていない状況にある。

そこで本論文では、大型クルーズ客船(以下、大型客船)及びPCCを対象として強風下での定常航行状態の推定を行い、風による抵抗増加特性について調査することを目的とする。強風下での船の航行性能評価を行うためには、(i)遭遇する外乱としての海象条件の適切な設定、正確な(ii)船体に作用する風圧力の推定と(iii)強風下での操縦運動推定を行う必要がある。従来の方法とは異なり(i)に関して、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を想定し、計算を行った。(ii)では、従来の方法に比べて推定精度の良い著

* (独) 海上技術安全研究所

** 大阪府立大学大学院工学研究科

原稿受理 平成17年10月14日

者らが提案している新しい風圧力推定法⁹⁾を利用する。このとき、船体の横傾斜による風圧力への影響も加味した。(iii)では、前後、左右、回頭、横傾斜の4自由度のMMGモデル¹⁰⁾を使用することにより、傾斜状態にある船に対してより実態に近い解を得ることとした。

本検討により、強風下での大型客船、PCCの風圧下での定常航行状態、すなわち、船速低下量、偏角、横傾斜角、当舵量が示された。その中で、斜め追い風状態を含む広い風向角において抵抗が増加し、極端な場合は直進航行不能な状況に陥ることを明らかにした。また、今回対象とした大型客船は、限られた風速・風向下ではあるものの抵抗増加が一時的に減少する結果が示された。これらの結論は、船の運航経済性のみならず安全性にも係わる重要な点であると考えられる。従来方法では採り上げられることの無かった境界層効果を考慮するため鉛直方向に風速差のある定常風を採用する等、実海域での運航性能を精度良く求める上で必要な要件を加えており、今後同種船の実海域性能を評価する場合に本論文で得られた知見は有用と思われる。

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状況を仮定し、前後、左右、回頭、横傾斜の4自由度MMGモデル¹⁰⁾により定常航行状態を求める。ここで言う定常航行とは船が針路安定状態で進行することを意味し、一つの航行状態が定まることを意味する。風外乱下で針路不安定な船が操舵を繰り返すことにより運航する場合も考えられるが、ここでは対象としない。

計算は基本的に著者らが行った方法¹¹⁾を踏襲し、プロペラ回転数を一定として未知数である船速 U 、偏角 β 、横傾斜角 ϕ 、舵角 δ を求める。

2.1 船体運動基礎式

船体運動方程式は Fig. 1 の座標系に基づき表現すると次式のようになる。

$$\begin{aligned} m\dot{u} - mvr &= X \\ m\dot{v} + mur &= Y \\ I_z \dot{r} &= N \\ I_{xx} \ddot{\phi} &= K - W \cdot \overline{GM} \sin \phi \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 m 、 I_z 、 I_{xx} は船の質量、回頭軸及び横揺れ軸回りの慣性モーメントである。また、 u 、 v 、 r 、 ϕ は船体重心を基準とした前後速度、左右速度、回頭角速度、横傾斜角を示す。 X 、 Y 、 N 、 K は水面上及び水面下の船体に作用する流体力である。 W 、 \overline{GM} は排水量、メタセンタ高

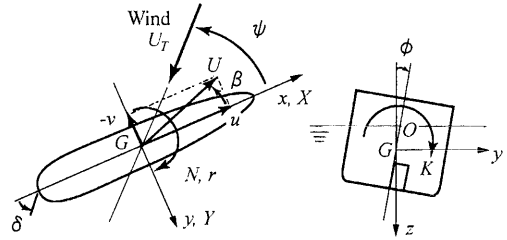


Fig. 1 Coordinate systems and definitions of force/moment sign convention for ship hull loading

さである。前後方向速度 u と船速 U の間には $u = U \cos \beta$ の関係がある。

今、船体が船首を基準とした真風向角 ψ から真風速 U_T の風を受けながら定常状態で直進している場合を想定すると(1)式左辺が0となる。すなわち、次式のように表される。

$$\begin{aligned} X &= 0, \quad Y = 0, \quad N = 0 \\ K - W \cdot \overline{GM} \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

様々な U_T 、 ψ について(2)式を解くことにする。

2.2 外力

(1)式右辺の外力は次式のように分離して取り扱う。

$$\begin{aligned} X &= X_{H0} + X_H + X_P + X_R + X_A \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_A \\ N &= N_H + N_R + N_A \\ K &= K_H + K_R + K_A \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、添え字の H 、 P 、 R 、 A 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を示す。 X_{H0} は平水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。(2)式が成立することにより、各外力の成分には前後方向に関して船体中心、高さ方向に関して平均喫水位置に作用する流体力を使用する。

2.2.1 主船体に作用する流体力

舵、プロペラの無い主船体に作用する流体力は、芳村ら¹²⁾の表現方法を参考にし、偏角 β 及び横傾斜角 ϕ に依存した次式で表現する。

$$\begin{aligned} X'_H &= X_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} dU^2 \\ &= X'_{H0} + X'_{\beta\beta} \beta^2 + X'_{\beta\phi} \beta \phi + X'_{\phi\phi} \phi^2 + X'_{\beta\beta\beta} \beta^3 \\ Y'_H &= Y_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} dU^2 \\ &= Y'_{\beta} \beta + Y'_{\phi} \phi + Y'_{\beta\beta} \beta^2 + Y'_{\beta\phi} \beta^2 \phi + Y'_{\phi\phi} \phi^2 + Y'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 N'_H &= N_H / \frac{\rho}{2} L_{PP}^2 d U^2 \\
 &= N'_{\beta} \beta + N'_{\phi} \phi + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + N'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + N'_{\phi\phi\phi} \phi^3 \\
 K'_H &= K_H / \frac{\rho}{2} L_{PP} d^2 U^2 \\
 &= K'_{\beta} \beta + K'_{\phi} \phi + K'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + K'_{\beta\beta\phi} \beta^2 \phi + K'_{\beta\phi\phi} \beta \phi^2 + K'_{\phi\phi\phi} \phi^3
 \end{aligned} \tag{4}$$

ここで、 ρ 、 L_{PP} 、 d は水の密度、船の垂線間長、喫水である。

X_{H0} は、計算対象とする限られた速度域でフルード数 F_r を変数とした次の4次式で表現する。

$$\begin{aligned}
 X'_{H0} &= X_{H0} / \frac{\rho}{2} L_{PP} d U^2 \\
 &= R_0 + R_1 F_r + R_2 F_r^2 + R_3 F_r^3 + R_4 F_r^4
 \end{aligned} \tag{5}$$

2.2.2 プロペラ推力

プロペラ推力 X_p は次式で表現する。

$$X_p = (1-t_p) n^2 D_p^4 K_T (J) \tag{6}$$

ここで、 t_p 、 n 、 D_p はそれぞれ直進時の推力減少係数、プロペラ回転数、プロペラ直径である。プロペラ推力係数 K_T は、次式に示すプロペラ前進常数 J の関数としてプロペラ特性曲線より求める。

$$J = u(1-w_p) / (nD_p) \tag{7}$$

(7)式中のプロペラ位置での有効伴流係数 w_p は、直進時の有効伴流係数 w_{p0} を使って斜航試験結果¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾を元に作成された次式を用いる。

$$w_p = w_{p0} \exp(-4.0\beta^2) \tag{8}$$

2.2.3 舵力

舵に作用する流体力は、貴島ら¹⁶⁾を参考にして次式で表現する。

$$\begin{aligned}
 X_R &= -(1-t_R) F_N \sin \delta \\
 Y_R &= -(1+a_H) F_N \cos \delta \\
 N_R &= -(x'_R + a_H x'_H) (1+l_{CB} / L_{PP}) F_N \cos \delta \\
 K_R &= (1+a_H) z'_R F_N \cos \delta
 \end{aligned} \tag{9}$$

なお、(9)式は舵力に対しての貴島らの重心周りに関する表現を本論文の船体中央周りの定義にそのまま適用できるように記述している。

操舵による抵抗増加の補正量 $(1-t_R)$ は、方形係数 C_B に依存した次式¹⁶⁾を用いる。

$$(1-t_R) = 0.28C_B + 0.55 \tag{10}$$

船体重心から船体に作用する舵干渉力作用位置までの距離の無次元値 $x'_H (= x_H / L_{PP})$ 及び操舵による船体左右力の付加率 a_H についても C_B の関数として推定する¹⁶⁾。また、 $x'_R (= x_R / L_{PP})$ は、船体中心から舵中心までの前後位置、 l_{CB} は、船体重心から船体中心までの前後方向位置であり、船首側を正とする。 $z'_R (= z_R / L_{PP})$ は、喫水から舵直圧力中心までの高さ方向距離の無次元値である。

舵の直圧力 F_N は、藤井ら¹⁷⁾の直圧力係数 f_A を使って次式で表す。

$$\begin{aligned}
 F_N &= \frac{1}{2} \rho f_A A_R U_R^2 \sin \alpha_R \\
 f_A &= 6.13 \Lambda / (2.25 + \Lambda)
 \end{aligned} \tag{11}$$

A_R は舵面積、 Λ は舵アスペクト比であり、舵高さを h とすると h^2 / A_R の関係がある。

舵への有効流入速度 U_R は次式のように提案されている¹⁶⁾¹⁸⁾¹⁹⁾。

$$U_R^2 = (1-w_R)^2 [1 + \eta_p k \{2 - (2-k)s\} s / (1-s)^2] \cdot U^2 \tag{12}$$

それぞれの係数は以下の通りである。

$$\begin{aligned}
 w_R &= w_{R0} w_p / w_{p0} \equiv w_{R0} \exp(-4.0\beta^2) \\
 w_{R0} &= -7.44dC_B / L_{PP} - 2.39C_B B / L_{PP} \cdot \sigma_A + 0.851 \\
 \sigma_A &= (1-C_{WA}) / (1-C_{PA}) \\
 \eta_p &= D_p / h, \quad k = 0.6(1-w_p) / (1-w_R) \\
 s &= 1 - u(1-w_p) / nP \equiv 1 - JD_p / P
 \end{aligned} \tag{13}$$

ここで、 w_R は舵位置での有効伴流係数であり、直進時の値 w_{R0} を使って計算する。また、 C_{WA} は船体後半部水線面積係数、 C_{PA} は船体後半部柱形係数、 P はプロペラピッチを示す。さらに舵への有効流入角 α_R は、次式のように表現する。

$$\alpha_R = \delta - \gamma_E \beta \tag{14}$$

整流係数 γ_E は次式に示す載荷状態の影響が考慮された貴島ら¹⁹⁾の方法により求める。

Table 1 Principal ship particulars for large passenger ship (LPS) and PCC, and scaled models

| | LPS | | PCC | |
|----------------------------|------------|--------|------------|--------|
| | Full Scale | Model | Full Scale | Model |
| L_{OA} (m) | 275.7 | 2.200 | 190.0 | 1.580 |
| L_{PP} (m) | 242.2 | 1.933 | 180.0 | 1.497 |
| B (m) | 36.0 | 0.287 | 32.2 | 0.268 |
| d (m) | 8.40 | 0.067 | 8.20 | 0.068 |
| W (ton) | 52001 | 0.026 | 25665 | 0.015 |
| GM (m) | 1.78 | 0.014 | 1.70 | 0.014 |
| KG (m) | 17.8 | 0.142 | 13.2 | 0.110 |
| l_{CB} (m) | 3.55 | 0.028 | 1.35 | 0.011 |
| C_B | 0.710 | | 0.540 | |
| C_p | 0.730 | | 0.600 | |
| C_{PA} | 0.800 | | 0.640 | |
| C_{WA} | 0.980 | | 0.800 | |
| A_F (m ²) | 1600.7 | 0.102 | 885.0 | 0.061 |
| A_L (m ²) | 10189.4 | 0.649 | 4391.5 | 0.304 |
| A_{OD} (m ²) | 4419.3 | 0.281 | 2341.4 | 0.162 |
| C (m) | -6.87 | -0.055 | -6.00 | -0.050 |
| H_{BR} (m) | 40.5 | 0.323 | 28.1 | 0.234 |
| H_C (m) | 19.5 | 0.155 | 12.1 | 0.101 |
| H_L (m) | 37.0 | 0.295 | 23.1 | 0.192 |

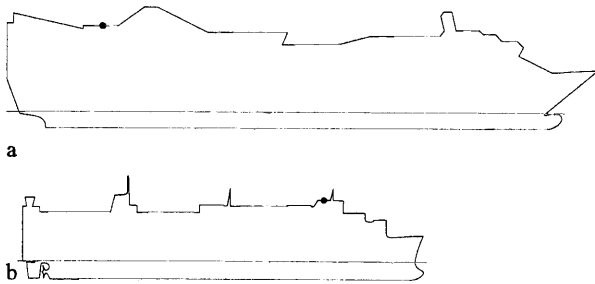


Fig. 2 Side profiles of (a) large passenger ship, (b) PCC models with the measured point of H_{BR} (Black circle mark)

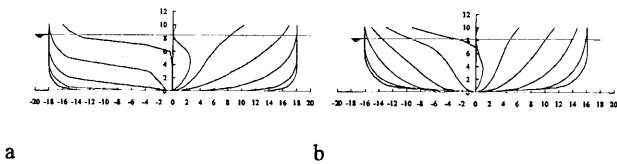


Fig. 3 Body plans of (a) large passenger ship, (b) PCC (unit; m)

$$\gamma_E = 4.02d(1 - C_B)/B + 1.98 \left[\frac{d(1 - C_B)}{B} \cdot e'_A \right]^2 - 1.54 \left[\frac{d(1 - C_B)}{B} \cdot e'_A \right] + 0.22 \quad (15)$$

ここで、

$$e'_A = \frac{e_A}{\sqrt{1/4 + 1/(B/d)^2}} \quad (16)$$

$$e_A = \frac{L_{PP}}{B} (1 - C_{PA})$$

2.2.4 風圧力

風圧力の各成分 X_A 、 Y_A 、 N_A 、 K_A は相対風向角に依存し

Table 2 Thrust characteristics, propeller and rudder together with hydrodynamic derivatives of large passenger ship (LPS) and PCC

| LPS | | | | PCC | | | |
|-------------------------|-----------|-------------------|------------|-------------------------|-----------|-------------------|------------|
| Calm water resistance | | Hydro. derivative | | Calm water resistance | | Hydro. derivative | |
| R_0 | -2.33E-02 | X'_{10} | -1.354E-01 | R_0 | -1.86E-02 | X'_{10} | -7.681E-02 |
| R_1 | 3.98E-01 | $X'_{1\beta}$ | -7.225E-03 | R_1 | 2.55E-01 | $X'_{1\beta}$ | -5.184E-02 |
| R_2 | -3.67E+00 | $X'_{1\phi}$ | -3.135E-02 | R_2 | -1.93E+00 | $X'_{1\phi}$ | -6.031E-03 |
| R_3 | 1.48E+01 | $X'_{1\psi}$ | 1.184E+00 | R_3 | 6.54E+00 | $X'_{1\psi}$ | 8.990E-01 |
| R_4 | -2.18E+01 | Y'_{10} | 1.996E-01 | R_4 | -8.52E+00 | Y'_{10} | 1.937E-01 |
| Propeller | | Y'_e | 4.051E-03 | Propeller | | Y'_e | -2.643E-04 |
| D_p (m) | 5.50 | Y'_{10p} | 1.284E+00 | D_p (m) | 5.47 | Y'_{10p} | 1.820E+00 |
| $1-\lambda_p$ | 0.795 | $Y'_{1\beta p}$ | 8.141E-01 | $1-\lambda_p$ | 0.880 | $Y'_{1\beta p}$ | -3.847E-01 |
| $1-w_{p0}$ | 0.707 | $Y'_{1\phi p}$ | -1.755E-01 | $1-w_{p0}$ | 0.835 | $Y'_{1\phi p}$ | -8.713E-02 |
| P (m) | 5.49 | $Y'_{1\psi p}$ | 1.105E-03 | P (m) | 5.45 | $Y'_{1\psi p}$ | 3.399E-02 |
| Rudder | | N'_{10} | 7.960E-02 | Rudder | | N'_{10} | 9.949E-02 |
| A_R (m ²) | 32.1 | $N'_{1\beta}$ | -4.513E-03 | A_R (m ²) | 37.7 | $N'_{1\beta}$ | -4.300E-03 |
| Δ | 1.43 | $N'_{1\phi}$ | 3.940E-01 | Δ | 1.16 | $N'_{1\phi}$ | 5.851E-02 |
| h (m) | 6.77 | $N'_{1\psi}$ | -4.593E-02 | h (m) | 6.61 | $N'_{1\psi}$ | 1.354E-01 |
| $1-\lambda_R$ | 0.701 | $N'_{1\psi p}$ | -5.933E-01 | $1-\lambda_R$ | 0.701 | $N'_{1\psi p}$ | -3.922E-01 |
| α_{R1} | 0.214 | $N'_{1\psi p}$ | 1.036E-02 | α_{R1} | 0.214 | $N'_{1\psi p}$ | 4.317E-02 |
| x'_{R1} | -1.646 | K'_{10} | -1.385E-01 | x'_{R1} | -1.646 | K'_{10} | 6.212E-02 |
| x'_{R2} | -0.471 | $K'_{1\beta}$ | 8.327E-02 | x'_{R2} | -0.485 | $K'_{1\beta}$ | 6.939E-02 |
| z'_{R1} | 0.560 | $K'_{1\phi}$ | -1.525E+00 | z'_{R1} | 0.560 | $K'_{1\phi}$ | 5.494E-01 |
| | | $K'_{1\psi}$ | 1.091E+00 | | | $K'_{1\psi}$ | -3.498E-01 |
| | | $K'_{1\psi p}$ | 4.824E+00 | | | $K'_{1\psi p}$ | 1.698E+00 |
| | | $K'_{1\psi p}$ | -9.241E-02 | | | $K'_{1\psi p}$ | 3.124E-01 |

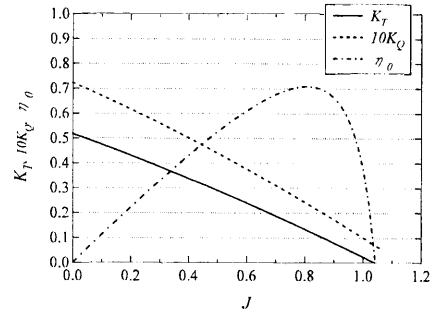


Fig. 4 Propeller characteristics used in the calculation

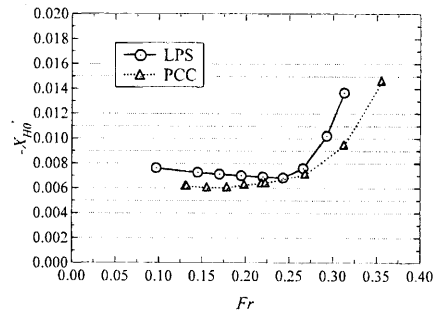


Fig. 5 Resistance coefficient X'_{10} of large passenger ship (LPS) and PCC in calm water at $\beta, \phi = 0$ deg.

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。

$$\begin{aligned} X_A &= C_{AX} q_A A_F \\ Y_A &= C_H C_{AY} q_A A_L \\ N_A &= C_H C_{AN} q_A A_L L_{OA} \\ K_A &= C_H C_{AK} q_A A_L H_L \end{aligned} \quad (17)$$

ただし、

$$q_A = \frac{1}{2} \rho_A U_A^2 \quad (18)$$

$$H_L = A_L / L_{OA}$$

ここで、 ρ_A ；空気密度、 U_A ；相対風速、 A_F ；水面上船体正面投影面積、同様に A_L ；側面投影面積、 L_{OA} ；全長である。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を使って求める。

C_H は過去の実験結果²⁰²¹⁾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、 $C_H = (0.355\phi + 1.0)$ とする(ただし、 ϕ の単位はラジアン)。

2.3 定常航行時の平衡方程式

(3)式から(18)式で得られた各項、係数を(2)式に代入し、 $\sin \delta \sin \alpha_R \approx \delta^2$ 、 $\cos \delta \sin \alpha_R \approx \alpha_R$ と簡略化すると、次式を得る。

$$\begin{aligned} X'_{H0} + X'_{\beta\beta}\beta^2 + X'_{\beta\phi}\beta\phi + X'_{\phi\phi}\phi^2 + X'_{\beta\beta\beta}\beta^3 \\ + C_{PR}K_T/U^2 + C_{RU1}\delta^2 + C_{WT1}(U_A/U)^2 = 0 \\ (Y'_\beta - \gamma_R)\beta + Y'_\phi\phi + Y'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + Y'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + Y'_{\beta\phi\phi}\beta\phi^2 + Y'_{\phi\phi\phi}\phi^3 \\ + C_{RU2}\delta + C_{WT2}(U_A/U)^2 = 0 \\ (N'_\beta - \gamma_R)\beta + N'_\phi\phi + N'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + N'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + N'_{\beta\phi\phi}\beta\phi^2 + N'_{\phi\phi\phi}\phi^3 \\ + C_{RU3}\delta + C_{WT3}(U_A/U)^2 = 0 \\ (K'_\beta - \gamma_R)\beta + K'_\phi\phi + K'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + K'_{\beta\beta\phi}\beta^2\phi + K'_{\beta\phi\phi}\beta\phi^2 + K'_{\phi\phi\phi}\phi^3 \\ + C_{RU4}\delta + C_{WT4}(U_A/U)^2 - 2B \cdot C_B \cdot g \cdot GM \sin \phi / (d \cdot U^2) = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

ここで、 C_{PR} のような添え字付き係数は、前項にて決定される定数である。

種々の風速及び風向角で U 、 β 、 δ 、 ϕ を関数として多元Newton-Raphson法により収束解を得る。このとき、 K_T 、 C_{RU} は U と β の関数であるが、繰り返し計算を行う上で得られる値を利用することとし定数的に扱う。

3. 計算条件

計算に使用した船の主要目、流体力係数、海象条件を以下に示す。

3.1 主要目

対象船である大型客船とPCCの主要目をTable 1に示す。また、船の外観、線図をFig. 2、Fig. 3に示す。両船ともトリムの無い等喫水を想定している。

ここで、 A_{od} ；デッキ上構造物の側面投影面積、 C ；船体中心から側面積中心までの前後方向座標(船首方向を正)、

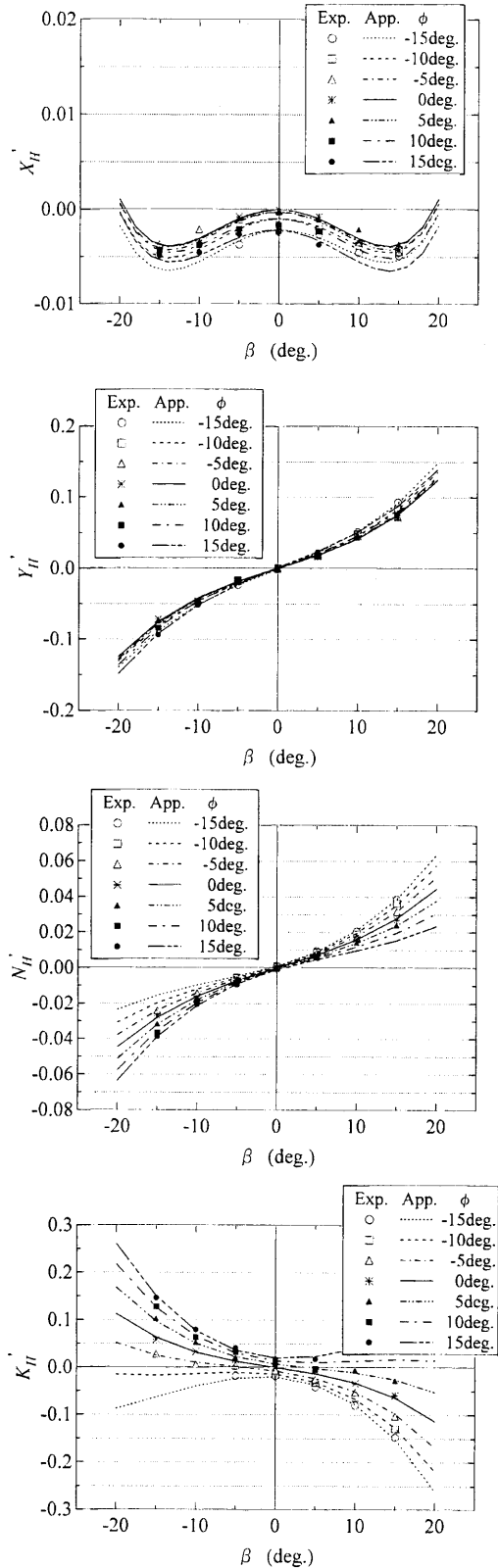


Fig. 6 Experimental hydrodynamic force and moment coefficients and approximated lines of underwater hull for large passenger ship

H_{BR} ; 喫水からブリッジ等主要構造物の最高位までの高さ、
 H_C ; 喫水から側面積中心までの高さを示す。なお、計算を行う上で H_{BR} は Fig. 2 中の黒丸印までの高さとしている。

3.2 流体力係数

計算で使用したプロペラ・舵要目、流体力係数をそれぞれ Table 2 に示す。大型客船は 2 軸、2 舵船を想定している。ただし、表中では 1 プロペラ、1 舵の要目を示している。自航要素の推力減少係数 t_p 及び有効伴流係数 w_p は過去の船の実績値から求めた²²⁾²³⁾²⁴⁾。すなわち、大型客船の場合は 2 軸、2 舵船の実績値を利用した。プロペラ単独性能は PCC やコンテナ船の実績データを参考にし、Fig. 4 に示すスラスト係数 K_T 、トルク係数 K_Q を両船に用いる。 η_0 は単独プロペラ効率 $JK_T / (2\pi K_Q)$ である。

(5)式中の直進時船体抵抗 X'_{H0} の各係数、及び(4)式中の偏角及び横傾斜角に依存した流体力微係数は大阪府立大学の曳航水槽(長さ 70m、幅 3m、深さ 1.6m)で実施した実験結果を利用する。模型実験により得られた抵抗値は 3 次元外挿法により実船の抵抗値に換算する。計算に使用した実船の抵抗曲線を Fig. 5 に示す。また、実験結果から最小自乗法により得られた流体力微係数を Table 2 に示す。実験結果と流体力微係数から得られる近似曲線を比較し Fig. 6 及び Fig. 7 に示す。前後方向は船体中央、高さ方向は喫水線とした時の流体力である。 β 、 ϕ とも 5 度刻みで変化させ実験を実施した。

Y'_H は横傾斜角による差が小さい。その他の流体力では成分により差があるものの横傾斜角の違いが流体力の差として現れている。PCC の X'_H では、例えば β が負で ϕ が 10 度以上の場合は前向きに力が作用する。水面下主船体の左右面で流体速度差が生じることにより、流れに対して直角方向に揚力が発生するためと考えられる。

著者らの方法⁹⁾によって求めた風圧力係数を Fig. 8 に示す。 C_{AY} 、 C_{AN} 、 C_{AK} は、大型客船と PCC の差は小さい。 C_{AX} は横風から追い風にかけて両者で差が見られる。Fig. 2 で示すように大型客船は PCC に比べて船体後半部の側面投影面積が大きい特徴を有している。後方からの風に対して水面上船体構造物に作用する揚力成分が船体抵抗として作用することから、横風から追い風にかけての C_{AX} が負側に大きくなっていると言える。

3.3 風の条件

3.3.1 風速の境界層影響

従来、船の航行を考える際の外乱としての風は、暗黙の内に鉛直方向に一様な風速を仮定していたと考えられる。しかし、実際には海面粗度の影響により大気境界層が存在し、高さにより風速差を持つ流れである。実海域での海象を可能な

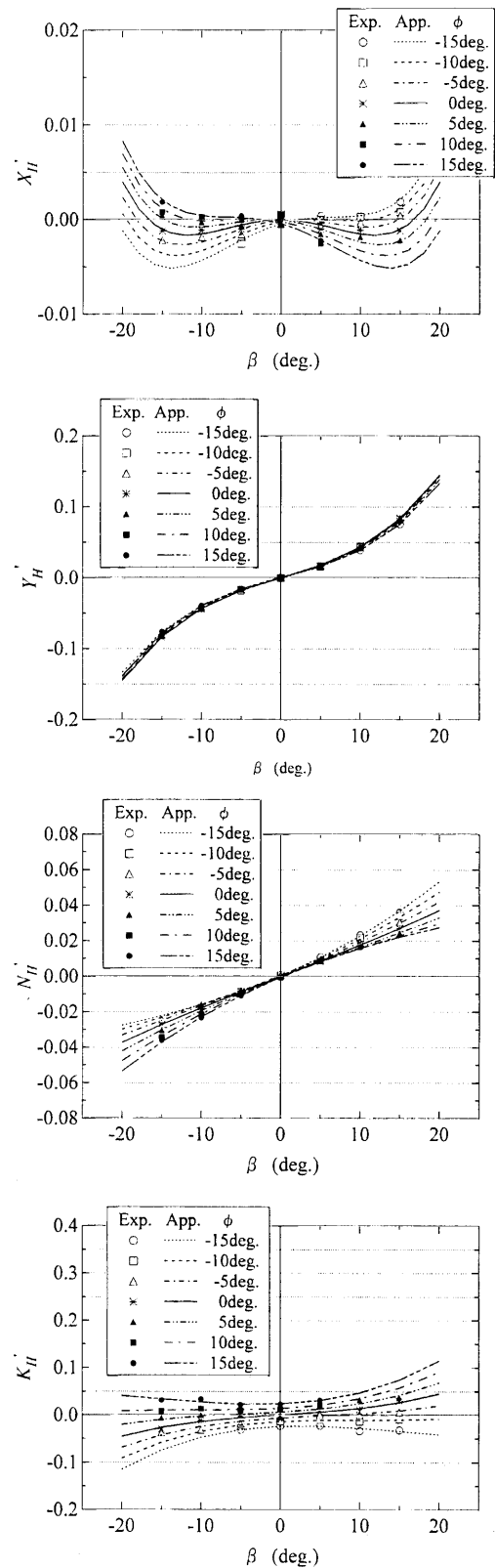


Fig. 7 Experimental hydrodynamic force and moment coefficients and approximated lines of underwater hull for PCC

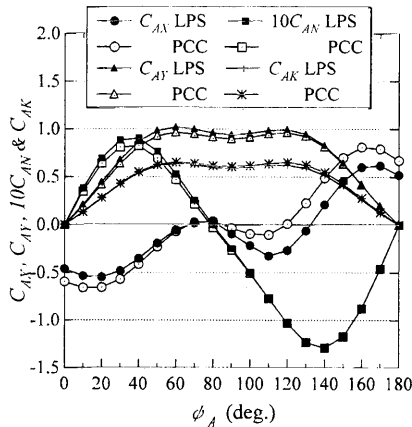


Fig. 8 Wind force and moment coefficients of large passenger ship (LPS) and PCC

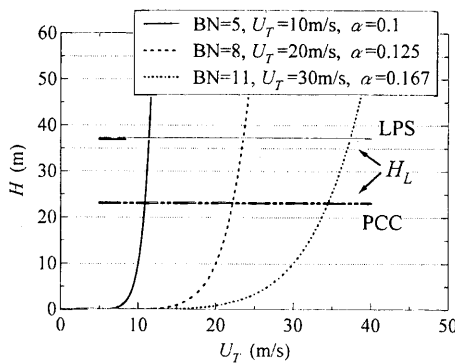


Fig. 9 Wind velocity profiles with Beaufort number (BN) and power law parameter α , compared with the averaged height H_L of large passenger ship (LPS) and PCC

限り再現するため、ここでは鉛直風速分布の影響を計算に反映させる。

真風速 U_T の鉛直分布は一般的に用いられる高さ z に依存した次式のべき分布で表現する。

$$U_T^z = U_T \left(\frac{z}{z_1} \right)^\alpha \quad (20)$$

U_T は基準高さ z_1 での風速であり、一般的に利用される $z_1=10\text{m}$ とする²⁵⁾。べき指数 α は海面の状態に依存したパラメータである。穏やかな海象で風速 10m/s 時の α を 0.10 、台風等で風速 30m/s 時の α を 0.167 と仮定し²⁵⁾、 α は風速を変数とした次の 1 次式で表現する。

$$\alpha = 1/(-0.20U_T + 12.0) \quad (21)$$

風速と α の関係から決定される風の鉛直分布を大型客船

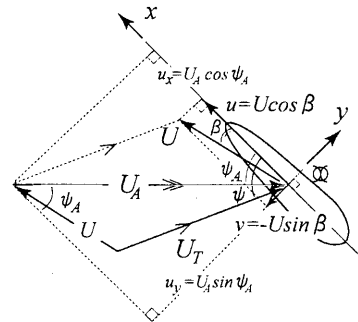


Fig. 10 Relative wind velocity for steady cruising ship

と PCC の平均船体高さ H_L と比較し Fig. 9 に示す。代表値として U_T が風速 $10, 20, 30\text{m/s}$ 時の風の鉛直分布を図示する。「BN」は Beaufort 風力階級である。 10m 高さを基準としているためそれよりも高い船体は風速 U_T より速い風に遭遇する。

風速、風向角の変動については、平均風を中心とした正規分布をあてはめることができる²⁵⁾²⁶⁾。また、変動の度合いに関して桑島ら²⁶⁾により 1 観測地点における風速約 10m/s までの風速と風向角の標準偏差が示されている。その結果では平均風速の増加に伴い相対的に風速変動の割合が急激に小さくなる(参考までに外挿により計算を行うと平均風速 20m/s で風速の標準偏差は約 1.5m/s 、風向角の場合は 3.3 度)。平均的な風による影響を考えた場合、変動影響を考慮した風速・風向角の補正分は小さいと言え、ここでは風の変動が無い定常風を想定する。

3.3.2 代表風速の設定

Fig. 10 の座標系により絶対座標系での真風速 U_T が、速度 U 、偏角 β で航行中の船体に対して角度 ψ で入射するとき、船の前後方向、横方向の相対風速 u_x, u_y は次式となる。

$$\begin{aligned} u_x &= U_T \cos \psi + U \cos \beta \\ u_y &= U_T \sin \psi - U \sin \beta \end{aligned} \quad (22)$$

したがって、相対風速 U_A 及び相対風向角 ψ_A は、次式により求まる。

$$\begin{aligned} U_A^2 &= u_x^2 + u_y^2 = U_T^2 + U^2 + 2U_T U \cos(\psi + \beta) \\ \psi_A &= \tan^{-1} \frac{u_x}{u_y} = \tan^{-1} \frac{U_T \cos \psi + U \cos \beta}{U_T \sin \psi - U \sin \beta} \end{aligned} \quad (23)$$

一方、Blendermann²⁷⁾は鉛直風速分布形状に依存した動圧 q_T の補正式を次式のように提案している。

$$\begin{aligned} q_T &= q_{HL} && \text{for } X_A \\ q_T &= k_q \cdot q_M + (1 - k_q)q_{HL} && \text{for } Y_A, N_A, K_A \end{aligned} \quad (24)$$

ここで、 q_{HL} 、 q_M 及び k_q は次式で示される。

$$\begin{aligned} q_{HL} &= \frac{\rho_A U_T^2}{2} \Big|_{H_L} \\ q_M &= \frac{1}{H_L} \int_{H_L} \frac{\rho_A U_T^2(z) dz}{2} \\ k_q &= 2.162 \left(\frac{q_M}{q_{HL}} \right)^2 - 2.422 \left(\frac{q_M}{q_{HL}} \right) + 1.260 \\ &\quad \text{in } 0.50 \leq q_M / q_{HL} \leq 1.00 \end{aligned} \quad (25)$$

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²⁷⁾。ここでは実験結果を2次式で近似した。

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樣な風である。そのときの動圧を q_S とすると、最終的に鉛直風速分布の影響を考慮し、一定風速下で船体に作用する動圧 q_A は(23)式を書き換え、以下ようになる。

$$q_A = q_T + q_S + 2\sqrt{q_T \cdot q_S} \cos(\psi + \beta) \quad (26)$$

ただし、

$$q_S = \frac{1}{2} \rho_A U^2 \quad (27)$$

代表相対風向角 ψ_A は高さ H_L での真風速 $U_T(H_L)$ 及び船速 U を用いて求めた値を計算に用いる。

本方法は、大気境界層を模擬した上下速度差のある風は等価な一樣風に変換した上、船が航行することのより生ずる風との足し合わせを行っている。実際の海域で理想的な状態を考えた場合、追い風から横風の状況下において上側と下側で風速が逆になる場合や風向が高さによって異なるねじれ現象が想定される。本研究では海上における風の境界層の実態が必ずしも明らかでないことからこのような現象がおよぼす影響を詳細には検討していない。しかし、風速の違い場合は、境界層による上下風速差が小さく、強風下では相対的に船速の影響が小さくなるため、結果として、最も影響が大きいと考えられる傾斜モーメントについてもその影響は顕著ではないと思われる。

一樣風と風の鉛直分布を考慮した場合の代表風速、相対風向角の差違については付属書に示すが、風が強くなればなるほどその影響は顕著になる。

4. 計算結果と考察

Fig. 11、Fig. 12 に大型客船と PCC の定常航行状態の計算結果を示す。図面中、 U ; 船速、 β ; 偏角、 ϕ ; 横傾斜角、 δ ; 舵角を示す。風向角 ψ は 10 度刻みで 0 度から 180 度まで計算した。風速 U_T は 5m/s 刻みで 0m/s から 30m/s まで計算した。ただし、風速 0m/s の結果は U の場合のみについて図示している。

設定船速を大型客船は 22knot、PCC は 20knot とした。このとき、プロペラ回転数 n は、無風時で設定速度を維持できる値に固定し、計算した(大型客船で 119rpm、PCC で 125rpm)。実際の船の運航時を想定すると、主機馬力の上限、下限が存在するが、風の影響と船体に働く流体力の関係を明確にするために敢えて主機制約条件を外して計算を行った。

舵角は限界角度を ± 40 度としている。計算では、可能性のある様々な初期条件の組み合わせで定常解を求めたが、Fig. 11、Fig. 12 で示された以外の解は存在しなかった。また、大型客船では風速 U_T が 25m/s 以上、風向角 ψ が 140 度付近で釣り合い状態が得られなくなる。

Fig. 13、Fig. 14 に U_T が 30m/s での両船の船体に働く前後方向力、左右力、回頭モーメント、横傾斜モーメントの各構成成分を示す。「H0」は偏角、横傾斜角の無い場合の直進時船体抵抗成分、「H」は偏角、横傾斜角による船体抵抗増加成分等、凡例中の各記号は(3)式での成分を示す。

以上の定常航行状態の計算結果から明らかになったことを下記に示す。

- Fig. 11、Fig. 12 の U 図から風が強くなるにしたがって船速低下となる風向角の領域が拡大している。大型客船では U が 20m/s 以上で、 ψ が 160 度を越えて初めて船速が設定船速よりも速くなり、風が推進力に寄与していることがわかる。PCC の場合も同様に Fig. 12 から風により大きく推進利得を得るのは、 ψ が 150 度よりも大きい場合である。一般に斜め後方から追い風に掛けて、風は推進力として作用すると思われているが、今回の結果から風の推進利得は非常に限られた風向角のみで発生することがわかる。強風下においては広範な風向角で抵抗が増加している。
- Fig. 11、Fig. 12 の U 図から風による抵抗は、正面風とは異なる風向角で最大となることがわかる。特に強風下では ψ が 20 度から 40 度付近、120 度から 140 度付近で船速が低下し、抵抗が増加していることがわかる。運航性能を評価する場合には、全風向を対象として検討する必要がある。

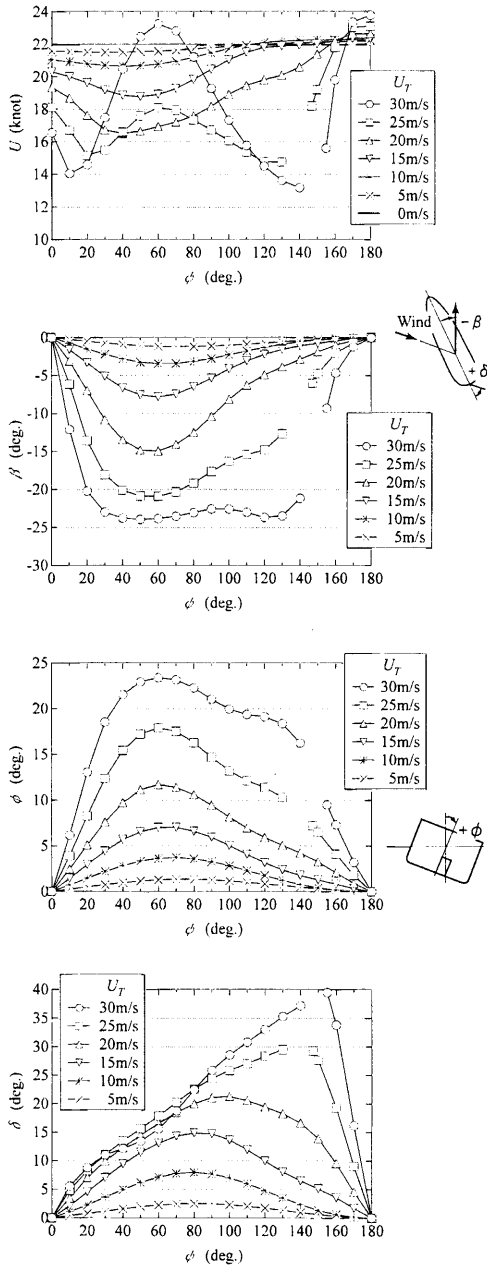


Fig. 11 Calculated results of ship speed loss, drift, heel and rudder angles for large passenger ship in steady winds

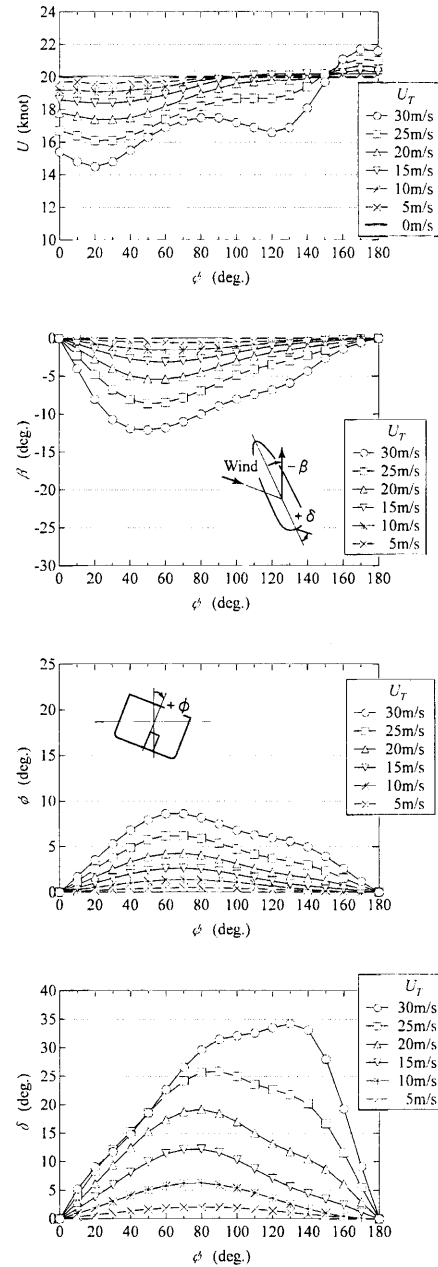


Fig. 12 Calculated results of ship speed loss, drift, heel and rudder angles for PCC in steady winds

- 大型客船を例に見ると Fig. 13 の X' 図から風向角が小さい場合には、風による抵抗増加成分が大きく、 $\psi = 90^\circ$ 以上の風向角においては、風圧力に代わって舵よる抵抗増加成分が大きくなっていることがわかる。
- Fig. 11 から大型客船で U_T が 30m/s、 ψ が 60 度付近で船速が一時的に回復傾向にあることがわかる。これは Fig. 13 の X' 図に示すように風による抵抗増加量が減少しているためである。Fig. 8 に示されているように抵抗として作用する風圧力 C_x が正面風等に比べ非常に小

さくなっている。さらに Fig. 11 の結果から β 、 ϕ も非常に大きくなる状況であり、Fig. 6 及び Fig. 13 の X' 図から偏角と横傾斜に起因した主船体前後力 H が大きな推進力を発生させていることがわかる。これは、水面上及び水面下の両船体に作用する揚力が原因であると言える。Fig. 6 から明らかなように使用した流体力係数 X'_H は、計測結果を外挿した値であることから、やや精度的に問題があると思われるが、強風下において偏角、横傾斜角が大きくなることにより風による抵抗増加量

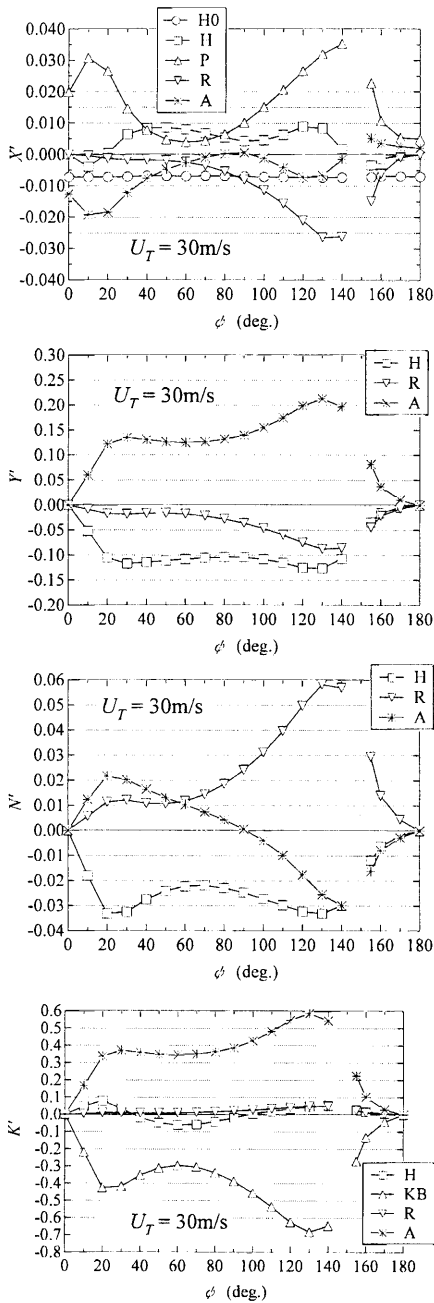


Fig. 13 Separated components of non-dimensional force induced by wind on large passenger ship in $U_T=30\text{m/s}$ (H0; Hull resistance, H; Drift and heel effect on hull resistance, KB; Buoyancy, R; Rudder, A; Wind)

が減少する風向角の存在が明らかとなった。

- Fig. 11 の大型客船で U_T が 25m/s 以上の場合、 ψ が 140 度から 150 度付近の斜め後方からの風に対して収束解が得られなかった。Fig.8 に示すように風向角 140 度付近では、風による回頭モーメントが非常に大きくなっている。このとき、釣り合い状態を得るために舵角を大きく切る必要があるが、Fig.13 から舵力は前後力、横力、回頭モーメントの 3 成分に関して非常に大きな影響を

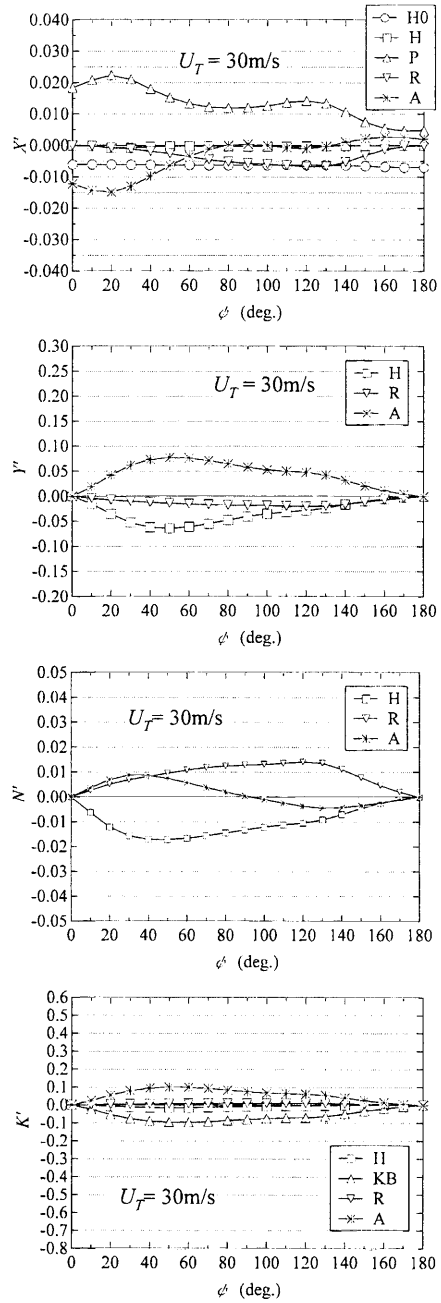


Fig. 14 Separated components of non-dimensional force induced by wind on PCC in $U_T=30\text{m/s}$ (H0; Hull resistance, H; Drift and heel effect on hull resistance, KB; Buoyancy, R; Rudder, A; Wind)

及ぼしている。前後力に関して、大きく舵を切るとは船速低下を引き起こし、舵力を減少させる。さらに速度低下、舵力の減少は、横力、回頭モーメントにも影響を及ぼしているため、大舵角としても釣り合い点が得られない状況にあると考えられる。

- Table 1 及び Fig. 2 からわかるように水面上風圧側面積と水面下側面積の比として $A_L / (L_{pp}d)$ を両船で比較すると大型客船はPCCの1.68倍である。このため、Fig. 11、

Fig. 12 に見られるように、同じ風速であっても大型客船の偏角、横傾斜角は PCC に比べて非常に大きくなる。ただし、舵角は大型客船が 2 舵船であることから、結果として PCC と同程度となっている。

- Fig. 11 から大型客船では U_T が 30m/s で最大横傾斜角が約 23 度に達することがわかる。また、Fig. 12 から PCC の場合は約 9 度である。 U_T が 20m/s の場合でもそれぞれ 12 度、4 度となっており、風の影響により船が大きく横傾斜する。

5. 結 言

実海域における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、前後、左右、回頭、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の影響について調べた。その結果は以下のようにまとめることができる。

- 大型客船、PCC の設定風速で定常航行するための船体の偏角、横傾斜角、舵角が明らかになった。また、それぞれの船の風による抵抗増加量が明らかになった。水面上風圧側面積が PCC よりも大きい大型客船は運航状態に及ぼす風の影響が顕著である。
- 抵抗増加のような運航性能を考える場合、正面風のみでは不十分であり、斜航、当て舵等の影響を含めた上で、様々な風向角に対して評価する必要がある。
- 今回対象とした水面上大型構造物船の場合、風による推進利得が大きく得られるのは、およそ風速 20m/s 以上で、かつ風向角 160 度以上の条件下のみであり、他の風向角では風により抵抗が増加する。その原因としては、回頭モーメントを打ち消すための当て舵による抵抗増加が挙げられる。
- 今回対象とした大型客船の場合、強風下、斜め追い風状態（風向角 140 度付近）で解が得られず、定常航行不能であることが明らかになった。
- 大型客船のように風圧面積の大きい船で、強風下、斜航状態にある場合、風向角によっては風による抵抗増加が一時的に減少する可能性があることを示した。

本論文において実海域では波だけではなく、風も船の運航に大きな影響を与えることを明らかにした。今後、波の影響も含めた複合外乱下での運航評価を実施する予定である。

謝 辞

大阪府立大学での横傾斜時斜航流体力計測試験では同大学工学部海洋システム工学科片山徹講師、大学院生木本亮氏、金子武史氏に協力頂いた。ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 田中良和：第 2 章「船の経済運航とライフサイクルバリュー」、日本造船学会試験水槽委員会「実海域における船舶性能に関するシンポジウム」、2003、pp10-19
- 2) 井上正祐、石橋賢論：操縦性に対する風の影響（I）～（III）、西部造船会々報第 44 号～第 46 号、1972～1973
- 3) 田中陽、山上順雄、山下保己、三住悦己：強風下の操縦性能について、関西造船協会誌第 176 号、1980、pp1-10
- 4) 芳村康男、永島実郎：風圧下の操縦運動の推定について、日本造船学会論文集第 158 号、1985、pp117-128
- 5) Hirano M, Takashina J : A calculation of ship turning motion taking coupling effect due to heel into consideration, Journal of the West-Japan Society of Naval Architects Vol.59, 1980, pp71-81
- 6) 平野雅祥：初期設計時における船の操縦運動計算法について、日本造船学会論文集第 147 号、1980、pp144-153
- 7) 貴島勝郎、古川芳孝、江島光昭、山本欽司：操縦運動時における横傾斜に関する一考察、西部造船会々報第 93 号、1996、pp35-46
- 8) 平野雅祥、高品純志、森谷周行：船舶の風圧下操縦性能について（第 1 報：模擬風圧力発生装置を用いた模型試験）、日本造船学会論文集第 155 号、1984、pp122-131
- 9) 藤原敏文、上野道雄、池田良穂：成分分離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へ投稿中）
- 10) 小瀬邦治、湯室彰規、芳村康男：第 III 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
- 11) 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
- 12) 芳村康男、田辺穰、大杉勇、雨宮伊作、多々納久義：大型練習船の帆走性能の推定、日本航海学会論文集 84 号、1990、pp.19-27

- 13) 小瀬邦治、佐伯敏朗：操縦運動の新しい数学モデルについて、日本造船学会論文集第146号、1979、pp229-236
- 14) 松本憲洋、末光啓二：拘束模型試験による操縦性の予測、関西造船協会誌第176号、1980、pp11-22
- 15) 湯室彰規：斜航するプロペラの整流効果に関する実験結果について、日本造船学会論文集第145号、1979、pp26-36
- 16) 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
- 17) 藤井斉、津田達雄：自航模型船による舵特性の研究(2)、造船協会論文集第110号、1961、pp31-42
- 18) 平野雅祥：初期設計時における船の操縦運動計算法について、日本造船学会論文集第147号、1980、pp144-153
- 19) 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、pp66-77
- 20) 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
- 21) Henschke W et al.: Seitliche Luft- und Wasserkräfte bei Schräganströmung von Fahrgastschiffen und Fischereifahrzeugen, Schiffbauforschung 4, 1965, pp97-125
- 22) 造船テキスト研究会：商船設計の基礎知識、成山堂書店、2001
- 23) 関西造船協会：造船設計便覧第4版、海文堂、1983
- 24) 笹島秀雄、田中一郎、鈴木敏夫：肥大船の伴流分布、造船協会論文集第120号、1966、pp1-9
- 25) 塩谷正雄：強風の性質—構造物の耐風設計に関連して—、開発社、1979
- 26) 桑島進、小林弘明：風の乱れと船の保針I~II、日本航海学会論文集第58号、60号、1975~76
- 27) 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, Copenhagen (OMAE1995) Vol.I-A, 1995, pp271-277

Appendix

鉛直風速分布の航行性能への影響

従来の風外乱下における船の操縦性能、運航評価では、鉛直方向に一様な定常風を条件として与えている。ただし、実海域では大気境界層の影響下、鉛直方向に速度勾配を持つ風

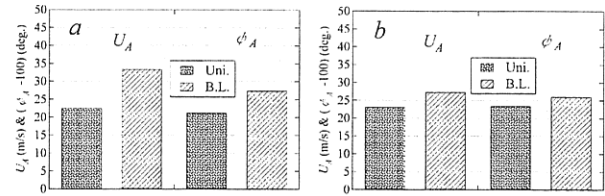


Fig. A-1 Relative wind velocities and directions depended on boundary layer forms of steady wind in $U_T=30\text{m/s}$ and $\psi=140\text{deg.}$ for (a) large passenger ship and (b) PCC cruising with 22knot and 20knot respectively

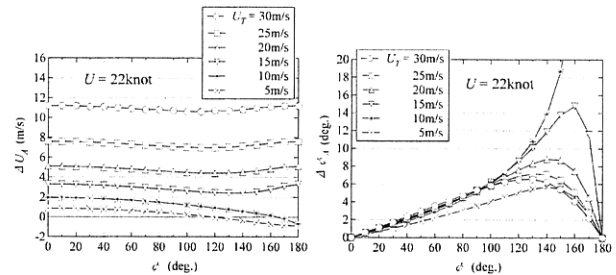


Fig. A-2 Differentials of relative wind velocity and direction depended on boundary layer forms of steady wind for large passenger ship in $U=22\text{knot}$

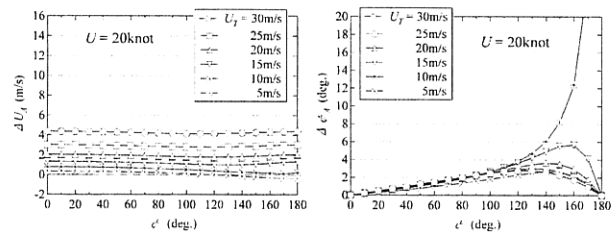


Fig. A-3 Differentials of relative wind velocity and direction depended on boundary layer forms of steady wind for PCC in $U=20\text{knot}$

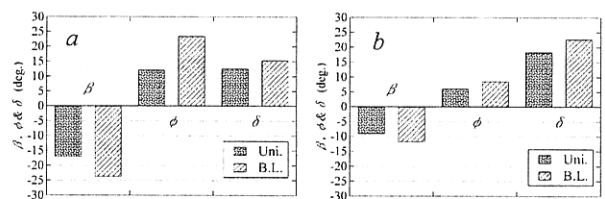


Fig. A-4 Differences of ship steady condition between two kinds of wind velocity profiles for (a) large passenger ship (LPS) and (b) PCC in $U_T=30\text{m/s}$, $\psi=60\text{deg.}$

が吹いている。

鉛直方向に一様な風を想定した場合と3.3節で示した鉛直方向に風速が異なる風を想定した場合の相対風速及び相対風向角を比較した結果を Fig. A-1 に示す。なお、使用した座標系、記号等は全て本文で示した内容に従う。

真風速 U_T は 30m/s、真風向角 ψ は 140 度の場合で、大型

客船は 22knot、PCC は 20knot で航行する場合を想定する。図中、「Uni.」は一様風下での値を、「B.L.」は境界層影響を考慮した場合の値を示す。大型客船の水面上平均高さ H_L は 37.0m、PCC は 23.1m であり、10m 高さを基準とした風速を海象条件として与えた場合、それより高い船体はより速い想定風速に遭遇する。結果として本文中(24)式から求まる「B.L.」の換算代表風速は「Uni.」に比べて大型客船で 48% 増し、PCC では 18% 増しとなる。同様に「B.L.」で相対風向角を求めるとそれぞれ 29%、11% 増しとなる。

同様に「Uni.」と「B.L.」の代表風速差、風向角差を風速ごとに真風向角を変化させ大型客船の場合を Fig. A-2 に、PCC の場合を Fig. A-3 に示す。

PCC では風向角による風速差は小さいが、大型客船の場合は風向角により異なる値を持つ。風向角差については概ね $\psi=140^\circ$ 付近で値が大きくなる。今回の場合では $U_T=10\text{m/s}$ が相当するが、真風速が船速に近い場合、風向角により風向角差が大きくなる。Fig. A-1 から Fig. A-3 の結果、従来の計算で用いられている一様風速と境界層影響を考慮した代表風速との間には大きな差があることがわかる。

次に定常航行状態への影響を調べる。風速 30m/s、風向角 60 度の場合を Fig. A-4 を例示し、「Uni.」と「B.L.」を比較する。Fig. A-2 や Fig. A-3 で示されたように「B.L.」の場合は、「Uni.」に比べて風速が増加していることから定常状態の偏角、横傾斜角、舵角とも増加している。大型客船の場合は結果に大きな差が見られる。気象状況に合わせて、計算条件をより現実に即し設定することにより、正確な航行状態が把握できると考えられる。