

船舶のプロペラレーシングに関する研究

正員 新 開 明 二* 学生員 万 順 濤**
正員 小 西 陽 一***

Propeller Racing of Ocean-going Ships

by Akiji Shinkai, *Member* Shuntao Wan, *Student Member*
Youichi Konishi, *Member*

Summary

This paper deals with a new statistical prediction method for the propeller racing of ships sailing in rough seas. The propeller racing is one of the most important sea keeping quality in relation to the safety of main engine and shafting system. The trend of the racing has been investigated mainly in order to estimate allowable maximum propeller diameter, operability of ocean-going ships etc.. In those studies, the propeller racing generally and mainly means the situation (propeller exposed) in which the relative motion amplitude between ship hull and wave surface would exceed a depth of point in rotary disk propeller. Therefore, it seems that the magnitude of the amplitude and its exceeding frequency have been examined as a principal subject of study as usual. However, the time during which the amplitude exceeds a depth of point, that is, the propeller exposes in the air over sea surface, must be also one of most important factor affecting the trend of propeller racing. Then, this paper proposes a new practical method for estimating the time lasting of exposed propeller related to propeller racing in rough confused seas on the basis of the statistics.

1. 緒 言

荒海を進航する船舶が船体運動の激化に伴いプロペラの
一部あるいは全部を波面より露出させプロペラ空転を引き
起す現象は、プロペラレーシング (Propeller racing) と称
される¹⁾。この現象は、空中に露出することによりプロペラ
が異常回転を起こし、トルク、推力等に著しい変動を生じ
主機および軸系に悪影響を与えるために、船の運航性能と
安全性を左右する重要な耐航性能因子とみなされている^{2),3)}。船舶設計の立場からのプロペラレーシングの推定
は、「最大プロペラ直径の検討」、「運航限界の検討」、「プロ
ペラレーシング上問題のない喫水の検討」、等に関連して、
ばら積貨物船、コンテナ船、PCC、フェリー等について実

施されている^{4),5)}。船の乗組員の立場からは、「荒天中におけ
る推進器系を起振源とする船体振動」の感知をもってプロ
ペラレーシングと理解されているようである⁶⁾が、一般に、
判定の明確さから、プロペラ露出⁶⁾⁻¹¹⁾、軸回転数変動^{12),10)}、
トルク変動¹³⁾等の推定に基づいてプロペラレーシングの
発生とみなすことが多く、この中では、計算の容易さから
プロペラ露出をもってプロペラレーシングの発生を判定す
る例が最も多いものと思われる⁵⁾。

本研究では、プロペラ露出の推定に基づくプロペラレー
シングの発生判定法について、確率・統計学の立場から新
しい判定支援のアルゴリズムの提示を行うことを目的とし
ている。

プロペラ露出として、先端露出^{8),10),11)}、1/3直径露
出^{6),7),12)}、軸露出⁹⁾等があり定義が異なっているが、いづれ
もその露出の定義に基づく露出頻度等を計算しある基準を
設けてそれぞれの基準に応じた許容値が付与されている。
基準としては、露出頻度 (具体的に、ある一定時間あたりの
露出回数^{7),11)}、ある船体動揺回数あたりの露出回数^{8),9)}、露
出発生確率^{6),10)}等)と露出発生時間割合⁷⁾が採用されるが、

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院

*** 日立造船(株)有明工場 (研究当時九州大学大学院)

原稿受理 平成9年7月10日

秋季講演会において講演 平成9年11月14,15日

両者の中では露出頻度の利用が多い⁵⁾。しかしながら波浪中の船速低下^{14),15)}の問題を取り扱う場合には露出発生時間割合が露出頻度と同等あるいはそれ以上に重要な影響を与えられ、確かに、先駆的研究⁷⁾において両者は同等に評価されている。それにもかかわらず同研究以後に露出発生時間割合に言及した検討例は少ない。その理由として、次のものがあげられる。

まず、主機のディーゼルではプロペラ回転数が急上昇し危険回転数に接近すると、ガバナーが作動し燃料噴射を一時遮断することになる。従ってプロペラの平均回転数の大きさもプロペラレーシングの発生に影響を及ぼすことになり、プロペラレーシングの限界発生確率を求めるにあたりガバナー作動を誘起する限界値との対応から計算上都合がよいプロペラ露出発生確率の推定が行われる¹⁰⁾傾向にあるためであると考え。また、プロペラレーシングの耐航性能因子としての性格上「運航限界の検討」即ち荒天中の限界速度に関連して検討されることが多く言葉を変えたとプロペラレーシングの常在下において船が同じ状態で航海を長時間継続することは稀であることから、現象の発生限界のみに主として関心が集まり運動学的に理解し易いプロペラ露出の限界値を露出頻度に基づいて推定することが行われ、その傾向は、「船体応答の統計的予測」に関する教本的文献¹⁶⁾において、露出頻度についての記述はなされているが露出発生時間割合についての解説が省略されたことにより、より強まったものと推測される。

波浪中のプロペラ単独性能の変化^{17),18),3)}についてプロペラ露出時の特性を含め少なからず明らかにされており、現象の発生の結果として引き起される負荷変動は時刻歴的变化でありその不規則非線形現象に対するスペクトル解析の理論的取り扱いの提案³⁾もなされているが、その解析が煩雑であることからより簡易な解析のアルゴリズムの開発が要請されている。また、プロペラ露出時の特性をより有効に利用する環境を整える意味からも、統計的予測の原点に戻って、プロペラレーシング発生の判定法について、現象の時刻歴の持続時間^{19)~21)}の確率特性に支配される、プロペラ露出発生時間割合の推定のアルゴリズムの再構成を計ることは重要であり意義あるものと考え。

先駆的研究⁷⁾におけるプロペラ露出発生時間割合の推定の方法は適用範囲が限定されたものとなっているので、本研究では、万ら^{22)~24)}が提案している「甲板冠水持続時間推定アルゴリズム」を援用してプロペラ露出発生時間割合推定アルゴリズムを新たに構築し、万らの持続時間の確率密度の考え方²⁵⁾を取り入れてアルゴリズムの精密化を計る。さらに、Roll on/off コンテナ船数隻^{26),27)}を適用船型として採用し、シリーズ計算を実施して、プロペラレーシングの特性について、「運航限界の検討」、「プロペラレーシング上問題のない喫水の検討」等の立場から明らかにするとともに、本研究提示のアルゴリズムの有効性について検討し

た二、三の考察の結果を報告する。

2. プロペラ露出の運動学

2.1 規則波中の応答

波の平均進行方向に対し一定の出会い角 χ と一定の船速 V を保ち、船体運動(上下揺 ζ 、縦揺 θ 、左右揺 η 、船首揺 ψ および横揺 ϕ)を行いながら航走する船を想定する。Fig. 1 に示すように、空間固定座標系 $O-XYZ$ (OX : 船の進行方向) および $O-X_1Y_1Z_1$ (OX_1 : 波の進行方向) を定める。そのとき、線形ストリップ法を適用すれば、船体運動連成微分方程式を誘導することができ、それらを解くことにより、上下揺、縦揺、左右揺、船首揺および横揺の解が求まる。これらの船体運動の解を用いて、前後方向位置 x_G にある船の重心より船首方向へ $(x-x_G)$ の距離の位置 x 、船側幅方向 y で特定される船内の任意の位置の波の表面隆起量 h に対する垂直方向相対運動(変位)は次のように与えられる。

$$Z_r = \zeta + y\phi - (x - x_G)\theta - h \quad (1)$$

ただし、

$$h = h_0 \cos(kx \cos \chi - ky \sin \chi - \omega_e t) \quad (2)$$

ここに、 h_0 は波面隆起量の振幅、 k は波数($=\omega^2/g$, ω : 波の円周波数、 g : 重力加速度)、 ω_e は波との出会い円周波数($=\omega - kV \cos \chi$)を意味する。

プロペラレーシングの発生をプロペラ露出をもって判定するとき、これまでの研究では、先端露出^{8),10),11)}、1/3 直径露出^{6),7),12)}、軸露出⁹⁾等の定義が採用されている。船体・プロペラと表面波との相対位置関係の概念図を Fig. 2 に示す。各露出の定義を数式で明示するために諸量を Fig. 3 のように定める。プロペラ直径を D (プロペラ半径 $R \times 2$)、静止水面よりプロペラ軸中心までの没水深度を I 、プロペラ先端までの没水深度を d_{pt} とすれば、静止水面よりプロペラ直径の 1/3 の位置までの没水深度は、 $d_{pr} = d_{pt} + D/3 = d_{pt} + 2R/3$ で与えられる。これより、先端露出に基づくプロペラレーシングとは、垂直方向相対変位 Z_r の大

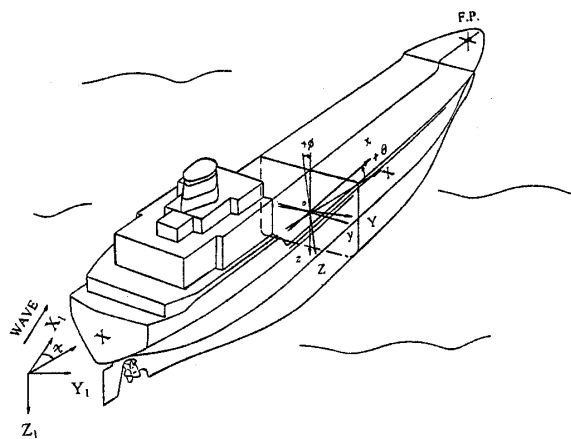


Fig. 1 Co-ordinate system in regular wave

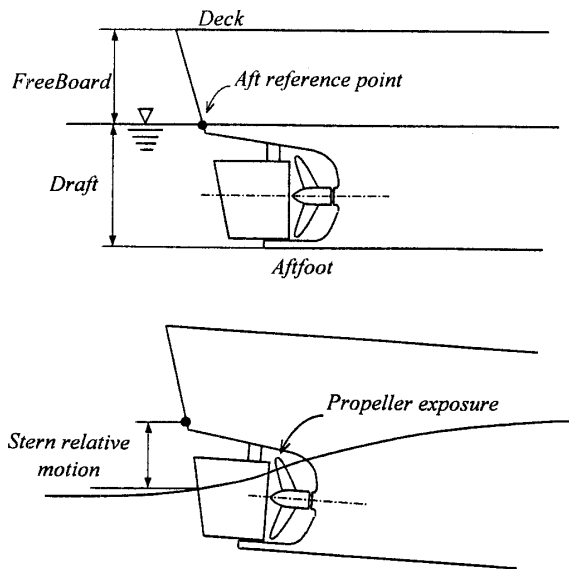


Fig. 2 Sketch showing typical propeller exposure by vertical relative motion at stern

きさが d_{pt} を超過する状態 ($Z_r > d_{pt}$) をもって判定し、また、1/3 プロペラ直径露出に基づくプロペラレーシングとは、 Z_r の大きさが d_{pr} を超過する状態 ($Z_r > d_{pr}$) をもって判定する。軸露出に基づくプロペラレーシングとは、垂直方向相対変位 Z_r の大きさが I を超過する状態 ($Z_r > I$) をもって判定することを意味する。

次節以降で、プロペラ露出の確率・統計的特性を記述する際の諸式を簡単化するために、垂直方向相対変位 Z_r を $r(t)$ あるいは単に r と表示することにする。即ち、

$$r = r(t) = Z_r(t) \quad (3)$$

また、その時間に関する一階微分を、

$$\dot{r} = \frac{dr(t)}{dt} = \frac{dZ_r(t)}{dt} = \dot{Z}_r(t) \quad (4)$$

と表示する。

2.2 短期不規則波中のスペクトル計算

短期不規則波中の船体応答、例えば、垂直方向相対変位 r 、その一階微分の応答 \dot{r} 等の分散 σ^2 は、線形重ね合わせの理論¹⁸⁾ に基づくスペクトル計算によって次式で求められる。

$$\sigma^2 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} [f(\omega)]^2 [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (5)$$

ただし、

σ : standard deviation of a ship response in short crested irregular waves from the direction of δ (for example, σ_r or $\sigma_{\dot{r}}$)

$[A(\omega, \delta - \gamma)]$: response amplitude of a ship in regular waves from the direction of $(\delta - \gamma)$

δ : average heading angle against the

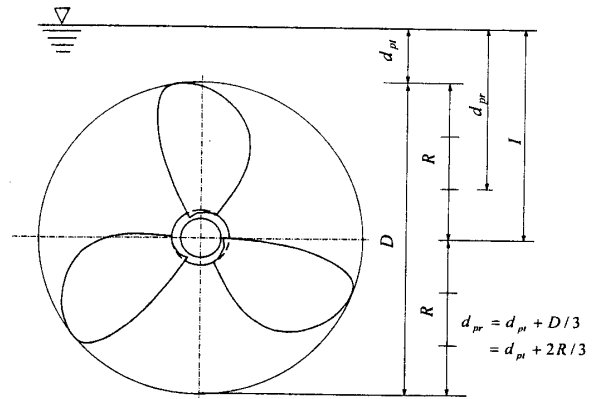


Fig. 3 Dimension of propeller exposure calculation

average wave direction

γ : angle between the average wave direction and a component wave direction

ここに、海面の波スペクトルとして ISSC スペクトルを、方向性分布は波の平均進行方向に対して $\pm 90^\circ$ の範囲に余弦関数の二乗分布をするものと仮定する。即ち、次式のように表わせる。

$$[f(\omega, \gamma)]^2 = \begin{cases} (2/\pi)[f(\omega)]^2 \cos^2 \gamma & -\pi/2 < \gamma < \pi/2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、

$$[f(\omega)]^2 = 0.11 H^2 \omega_T^{-1} (\omega/\omega_T)^{-5} \exp[-0.44(\omega/\omega_T)^{-4}] \quad (7)$$

H : significant wave height

$\omega_T = 2\pi/T$

T : mean wave period

また、船体応答スペクトルの原点まわりの 1 次モーメントに相当する量 m_1 を次式のように定義する。

$$m_1 = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_0^{\infty} \omega [f(\omega)]^2 [A(\omega, \delta - \gamma)]^2 \cos^2 \gamma d\omega d\gamma \quad (8)$$

ただし、(8)式では、次式を定義している。

$$[A(\omega, \delta - \gamma)] = [\{\text{Amplitude of } r(t)\}/h_0] \quad (9)$$

3. プロペラ露出の確率特性

3.1 プロペラ露出の発生持続時間

プロペラレーシングの発生持続時間を、前述のごとくプロペラ直径上の任意の位置が露出している時間をもって定義するならば、垂直方向相対変位 r がプロペラ直径上任意の位置、例えば、 d_{pr} を持続的に超えている時間を指す。この現象を垂直方向相対変位 r の時刻歴表示で概念図を示せば Fig. 4 のようである。図では r が時刻 t_1 において d_{pr} を超過し時刻 t_2 までその超過を持続し t_2 の時刻以後 d_{pr} を下まわることを表わしている。 $t_1 \leq t < t_2$ の時間間隔を超過持続時間 (lasting time) と呼称する。プロペラ露出の確

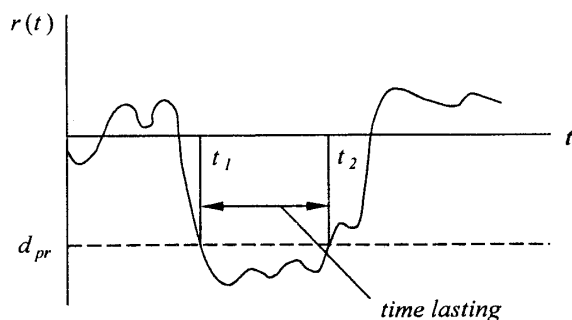


Fig. 4 The behavior of exceeding time lasting for relative motion to exceeding d_{pr}

率統計的特性を記述するために必要な定常不規則関数 r および \dot{r} についての諸式は以下の通りである^{22)~24)}。

観測期間 \mathcal{D} 内において、レベル r の超過回数の期待値は、 r と \dot{r} の結合確率密度関数 $p(r, \dot{r}|t)$ あるいは $p(r, \dot{r})$ を用いて、次のような式で与えられる。

$$\begin{aligned}\bar{n}_r &= E[N_r] = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n f_+(r|t_j) dt_j \\ &= \int_0^{\mathcal{D}} \int_0^{\infty} p(r, \dot{r}|t) \dot{r} d\dot{r} dt = \mathcal{D} \int_0^{\infty} p(r, \dot{r}) \dot{r} d\dot{r}\end{aligned}\quad (10)$$

ただし、

$f_+(r|t_j) dt_j$: probability for exceeding a level r during dt_j

$$\mathcal{D} = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{j=1}^n dt_j = \int_0^{\mathcal{D}} dt$$

観測期間 \mathcal{D} 内においてレベル r より超越する側の平均合計超過持続時間は、 r の確率密度関数 $p(r|t)$ あるいは $p(r)$ を用いて、次式で求められる。

$$\bar{t}_r = \int_0^{\mathcal{D}} \int_0^{\infty} p(r|t) dr dt = \mathcal{D} \int_0^{\infty} p(r) dr \quad (11)$$

また、観測期間 \mathcal{D} 内における平均単位(超過回数1回あたり)の超過持続時間は(10)と(11)を用いて次式で推定される。

$$\bar{\tau}_r = \frac{\bar{t}_r}{\bar{n}_r} = \frac{\int_0^{\infty} p(r) dr}{\int_0^{\infty} p(r, \dot{r}) \dot{r} d\dot{r}} \quad (12)$$

ここに、定常不規則関数 r および \dot{r} については、一般に正規性を付与することができるので、それぞれの確率密度関数、結合確率密度関数等を(12)へ代入することにより次式を得る。

$$\bar{\tau}_r = \pi \frac{\sigma_r}{\sigma_{\dot{r}}} \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\sigma_{\dot{r}}^2} \right\} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma_r} \right) \right] \quad (13)$$

ただし、 $\operatorname{erf}(a)$ は次の意味をもつ。

$$\operatorname{erf}(a) \equiv \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a \exp(-x^2) dx \quad (14)$$

したがって、プロペラ露出の発生持続時間率(発生割合) \overline{rc} は[観測期間 \mathcal{D}]に対する[超過回数の期待値 $\bar{n}_r \times$ 発生持続時間の代表値 t^*]の割合として、次式で求められる。

$$\begin{aligned}\overline{rc} &= \bar{n}_r \times \left(\frac{t^*}{\mathcal{D}} \right) \times 100(\%) \\ &= t^* \frac{\sigma_r}{2\pi\sigma_{\dot{r}}} \exp \left\{ -\frac{f^2}{2\sigma_{\dot{r}}^2} \right\} \times 100(\%) \quad (15)\end{aligned}$$

ここに、(15)の中の1回あたりのプロペラ露出の発生持続時間の代表値 t^* について、 $t^* = \bar{r}|_{r=d_{pr} \text{ or } d_{pr}}$ を採用することとし、船と波の出会い角 δ 、平均波周期 T 、有義波高 H 等によって変化するものとして取り扱う。

なお、 r がレベル r_0 を超える超過確率は次式で与えられる。

$$q(r > r_0|H, T) = \frac{(\bar{n}_r)|_{r=r_0}}{(\bar{n}_r)|_{r=0}} = \exp \left\{ -\frac{r_0^2}{2\sigma_r^2} \right\} \quad (16)$$

ただし、

$q(r > r_0|H, T)$: exceeding probability for a level r_0 of a ship response in a short-term sea state H and T

3.2 超過持続時間の確率密度関数

船体垂直方向相対変位 r が、あるレベル例えば d_{pr} を持続的に超過している時間、即ち超過持続時間(*lasting time*)は、確率変数であり、確率密度関数を有している。万ら²⁵⁾は、この確率密度関数の近似解を Sveshinikov の方法²⁰⁾を拡張適用して導いており、ここではその結果を利用する。文献によれば、レベルが非零である場合の超過持続時間 τ の確率密度関数の近似解は次のように与えられる。

$$f(\tau) = \frac{\pi}{\tau^2} C(r, \dot{r}) \frac{\Delta^2}{2 \left[\left\{ \frac{\pi}{\tau} C(r, \dot{r}) - \omega_1 \right\}^2 + \Delta^2 \right]^{3/2}} \quad (17)$$

ただし、

$$\begin{aligned}C(r, \dot{r}) &= \frac{m_1}{\sigma_r \sigma_{\dot{r}}} \exp \left\{ -\frac{r^2}{2\sigma_r^2} \right\} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{r}{\sqrt{2}\sigma_r} \right) \right] \\ \Delta^2 &= \sigma_{\dot{r}}^2 - m_1^2\end{aligned}$$

なお、レベルが零である場合の超過持続時間 τ の確率密度関数の近似解は、(17)式において r を零に漸近させることによって、導出される。

4. プロペラ露出の長期予測

船がある海域を長期間にわたって常に一定の速度を保ちかつ波の平均進行方向に対して常に一定の出会い角を保って航海していると仮定すれば、その海域の長期波浪発現確率 $p(H, T) dH dT$ を利用するとともに、プロペラ露出の短期発生割合 \overline{rc} に基づき、プロペラ露出の長期発生割合(平均持続時間の割合: プロペラレーシング発生率)は次式によって求められる。

$$\overline{RC} \equiv \overline{RC}(H) = \int_{T=0}^{\infty} \overline{rc}(T) p(T|H) dT \quad (18)$$

ただし、

$p(T|H)$: conditional probability density function of wave period given the wave height H

また、プロペラ露出の長期累積発生割合は次式で与えられる。

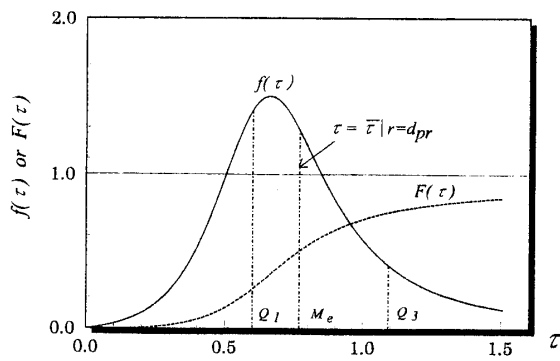


Fig. 5 Probability density distribution (envelope) of time-lasting of propeller racing

$$Q_{RC} = \int_{H=0}^{\infty} \overline{RC}(H) p(H) dH \quad (19)$$

ただし、

$p(H)$: marginal probability density function of wave height

次に、超過持続時間の確率分布の影響をプロペラ露出の長期予測に取り込むための、追加アルゴリズムは以下のようである。即ち、(18)の中のプロペラ露出の短期発生割合 \overline{rc} の代わりに、(17)に示した超過持続時間の確率密度関数の近似解に基づいて求められる超過持続時間の第1四分位数 \overline{rc}_{Q1} 、メディアン \overline{rc}_{Me} および第3四分位数 \overline{rc}_{Q3} のそれぞれを適用することにする。したがて、文献²⁵⁾における甲板冠水の場合と同様に、プロペラ露出の長期発生割合と長期累積発生割合の式は(18)と(19)と同様の形式で構成できる。追加アルゴリズムの概念図を Fig. 5 に示しておく。

5. 計算例と考察

5.1 適用船型と計算条件

船長 $L=150$ m の4隻の Roll on/off コンテナ船を計算対象として、プロペラ露出の長期発生時間割合、長期累積発生時間割合等の計算を実施した。各適用船型の主要目を Table 1 に示す。また、各船型はいずれも一軸であり、装備されるプロペラに関する諸寸法を Table 2 に示す。これらの船型は、文献^{26),27)}において採用された船型群の中より4隻 (R 009, R 013, R 014 および R 016) を抽出したもので、4隻中3隻 (R 009, R 013 および R 014) については65% バラスト状態についての要目も示している。船型 R 009 は通常の一軸コンテナ船の船型であり、この船型より幅/喫水比を同じくして幅広船にしたものが船型 R 013、船型 R 009 より船幅を小さくしたものが船型 R 014、船型 R 014 と船長、幅を同じにして、幅/喫水比を大に浅喫水かつ方形係数を少し大きく ($C_b=0.6995$) したものが船型 R 016 である。なお、諸要目、諸寸法等の各数値は文献の中のデータを参考に本報告の目的に合うように適宜設定したもので、その数値とそれから得られる結論の責任の所在はすべて著者ら

Table 1 Principal particulars

Ship No.	R 009	R 013	R 014	R 016
L_{pp} (m)	150.000	150.000	150.000	150.000
B (m)	28.570	33.333	25.000	25.000
d (m)	8.400	9.800	7.530	6.667
∇ (m^3)	19885.00	26950.00	15169.00	17485.88
L_{pp}/B	5.2503	4.5000	6.0000	6.0000
B/d	3.4012	3.4013	3.3201	3.7498
$l_{cb}(\%L_{pp})$	-1.5715	-1.9404	-1.6494	-2.3320
C_b	0.5523	0.5497	0.5499	0.6995
C_p	0.5692	0.5667	0.5671	0.7139
65% Ballast condition				
d (m)	5.870	6.850	5.133	—
∇ (m^3)	12925.00	17520.00	9864.00	—
trim (m)	1.500	1.500	1.500	—
$l_{cb}(\%L_{pp})$	-2.1601	-2.0228	-2.2736	—

Table 2 Propeller condition

Unit: m				
Ship No.	R009	R013	R014	R016
Full load condition				
I	5.2760	6.1600	4.7263	4.1670
R	2.5000	2.5000	2.5000	2.3500
d_{pt}	2.7760	3.6600	2.2263	1.8170
d_{pr}	4.4427	5.3267	3.8929	3.3837
65% Ballast condition				
I	3.4660	3.9600	3.0793	—
R	2.5000	2.5000	2.5000	—
d_{pt}	0.9660	1.4600	0.5793	—
d_{pr}	2.6327	3.1267	2.2459	—

にある。

プロペラの船体に対する位置関係はプロペラ露出の特性に微妙に影響を及ぼすものと考えるが、ここでは簡易化のために、船尾垂線 (A. P.) の位置でプロペラ露出の検討を行った。

計算条件として、波の平均進行方向に対する船の出会い角、 $\delta=0, 22.5, 45, 67.5, 90, 112.5, 135, 157.5, 180$ ($\delta=0^\circ$: 追波状態) およびすべての出会い角を考慮した場合 (All headings) の10ケース、また、船速はフルード数、 $F_n=0.094, 0.134, 0.161, 0.174, 0.188, 0.194, 0.201, 0.228, 0.255, 0.281$ の10ケースである。

長期予測計算に用いる長期の波浪統計データとしては、復元修正^{29)~31)}を施した目視観測通報データ (GWS: Global wave statistics)³²⁾の通年、全波向のデータを利用した。本報で主として紹介する計算結果は、北太平洋海域における、航路1 (N. Pacific 1) [GWSの小海域 No. 29, 30,

19, 20, 14 および 13 に跨って構成される]に基づくもので、北米西岸航路の北方航路を想定して設定された海域に相当する。また、航路別の長期予測³³⁾におけるような海域の重み係数も考慮されている。

5.2 数値計算例

前節の計算条件のもとに 3. および 4. で示した計算法に

よってシリーズ計算を実施したが、その主要な数値計算例を Fig. 6~11 に示す。

Fig. 6 には、船型 R 009 についてプロペラ先端露出の長期発生割合とプロペラ 1/3 露出の長期発生割合の計算例を示している。図には、海域 1 における、船速 ($F_n=0.255$) の同船型について満載状態 (Full Load) と 65% バラスト

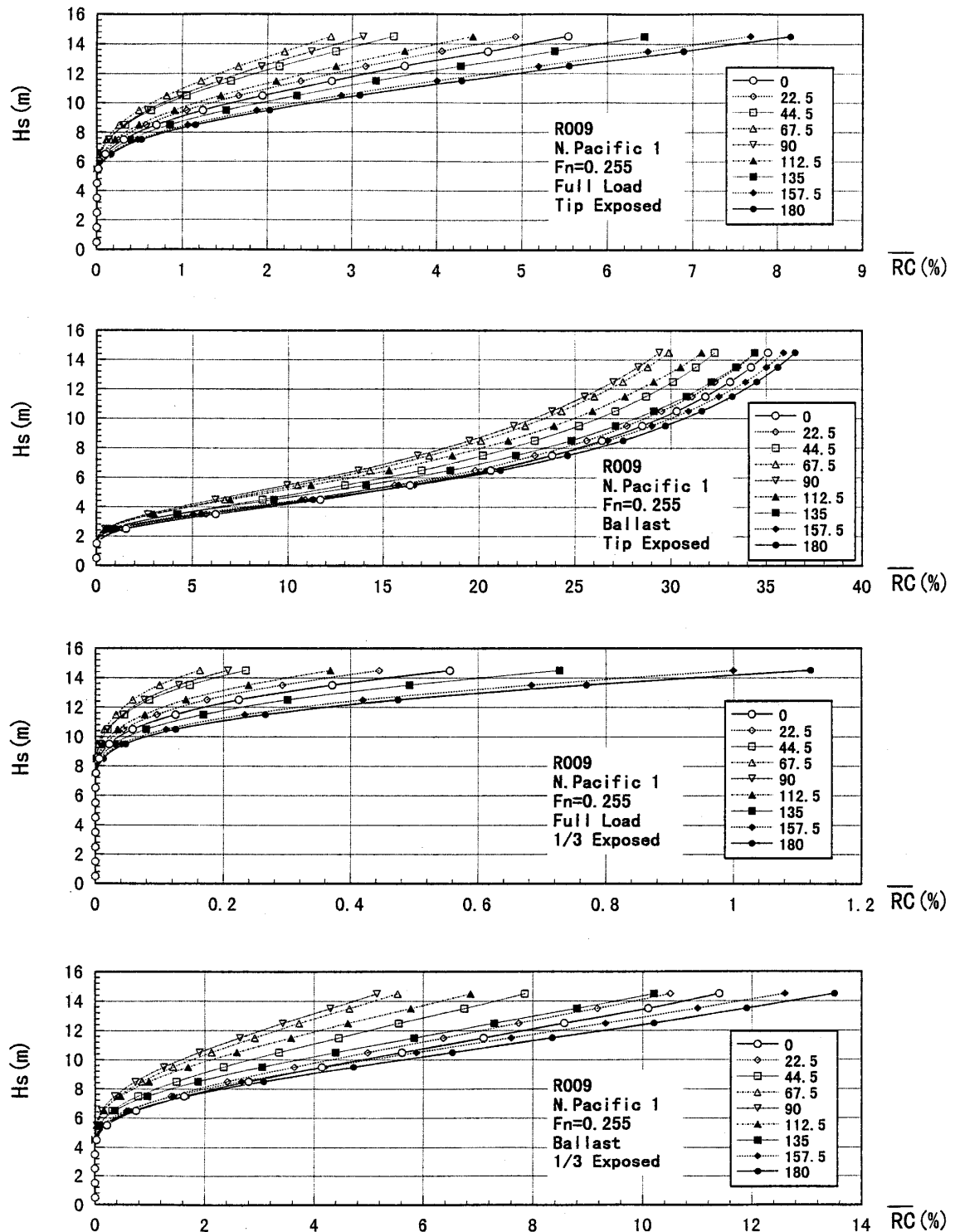


Fig. 6 Long-term exceeding lasting rate of propeller racing (R 009)

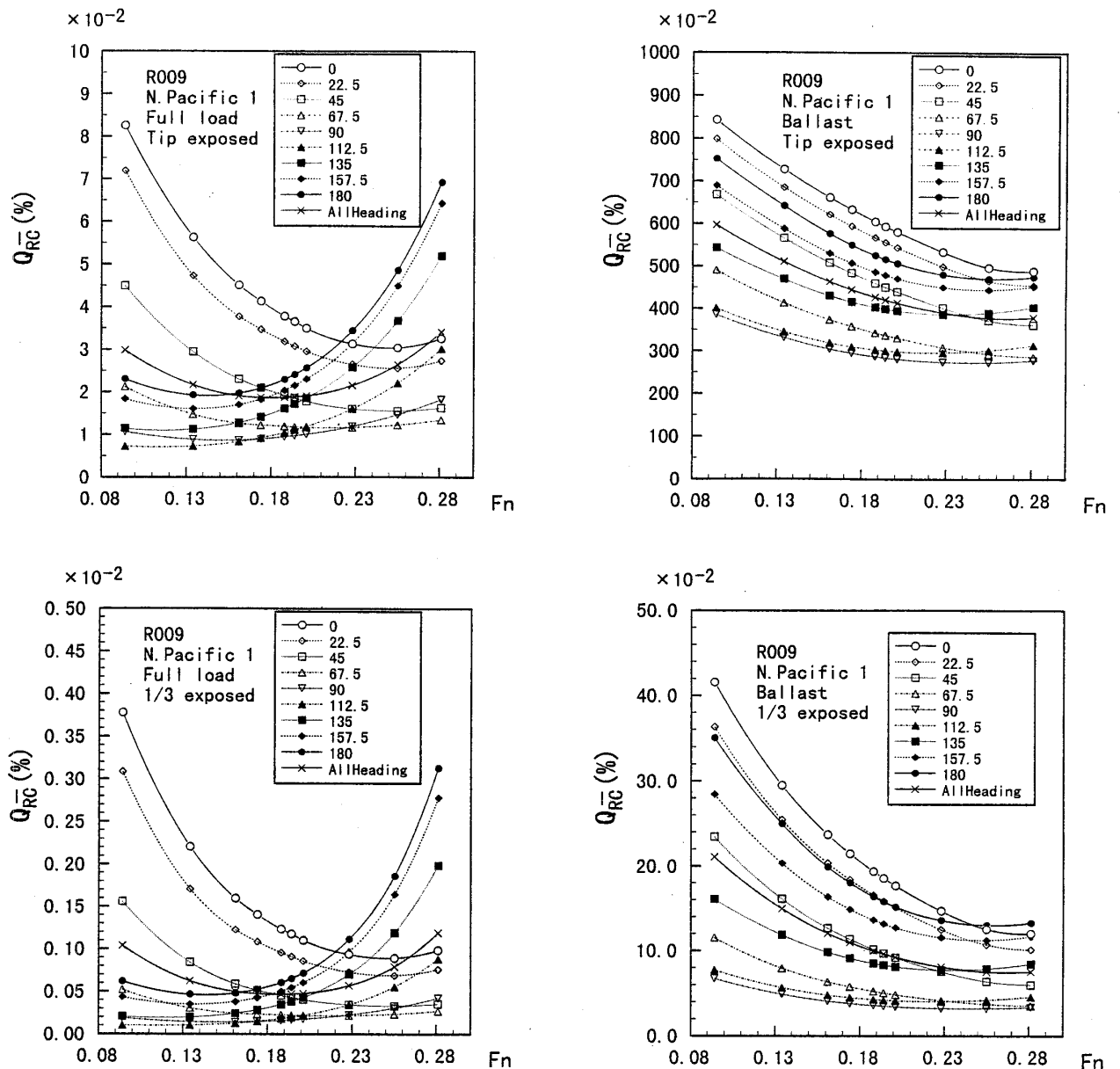


Fig. 7 Long-term accumulate time rate of propeller racing (R 009)

状態のそれぞれのプロペラ露出の長期発生割合 \overline{RC} (%) を有義波高 H の関数として波との出会角をパラメータにとり表示している。以上の図では、有義波高 H が高くなるにつれて露出の長期発生割合が大きくなる様子が示されており、プロペラ露出の発生割合が有意な値(零で無いある値)を示すようになる有義波高の限界の大きさが、プロペラ先端露出であるかあるいは1/3露出であるかにより、また載貨状態(満載状態であるか65%バラストであるか)の違い等によって異なり、その限界の値の大小関係が2.で説明したプロペラ露出の運動学から類推して合理的な傾向を与えていることがわかる。

Fig. 7 には、船型 R 009 についてプロペラ先端露出の長期累積発生割合とプロペラ 1/3 露出の長期累積発生割合の

計算例を示している。図には、海域 1 における、同船型について満載状態 (Full Load) と 65%バラスト状態のそれぞれのプロペラ露出の長期累積発生割合 Q_{RC} (%) を波との出会角をパラメータとして船速 (F_n) の関数として示している。図中に、すべての出会角 (All Headings) を考慮した場合の結果も付記している。図より次の特性がわかる。即ち、一般に、プロペラ露出の長期累積発生割合は、迎波および斜迎波状態と斜追波および追波状態において大きな値を示し、横波状態では小さな値を示す。迎波状態の値はフルード数が約 0.22 より大きい範囲で追波状態の値より大となるがその船速より低い船速範囲で逆に小さい。満載状態でのプロペラ露出長期累積発生時間割合は、迎波および斜迎波状態において低い船速の範囲を除き船速が増大す

るにつれてその大きさが増し、斜追波および追波状態においてフルード数が約0.25より高速な範囲を除き船速が増大（低下）するにつれて逆にその大きさが減小（増大）する。横波状態においては船速の変化による影響はあまり大きくない。次に、バラスト状態でのプロペラ露出長期累積発生時間割合は、迎波、斜迎波、横波、斜追波、追波状態のいずれも船速が増大するにつれてその大きさが減小する。追波状態の値は船速の大部分の範囲で迎波状態の値より大きく、これは満載状態の場合と異なっている。

Fig. 8～10には、船型 R 013, R 014 および R 016 についてプロペラ 1/3 露出の長期累積発生割合の計算例を示して

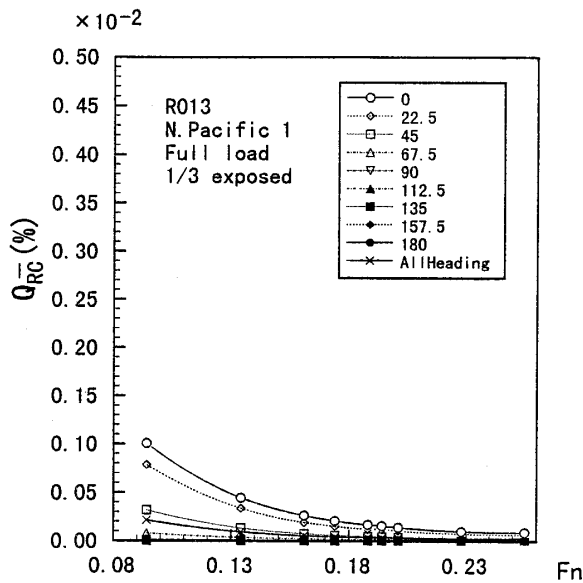


Fig. 8 Long-term accumulate time rate of propeller racing (R 013)

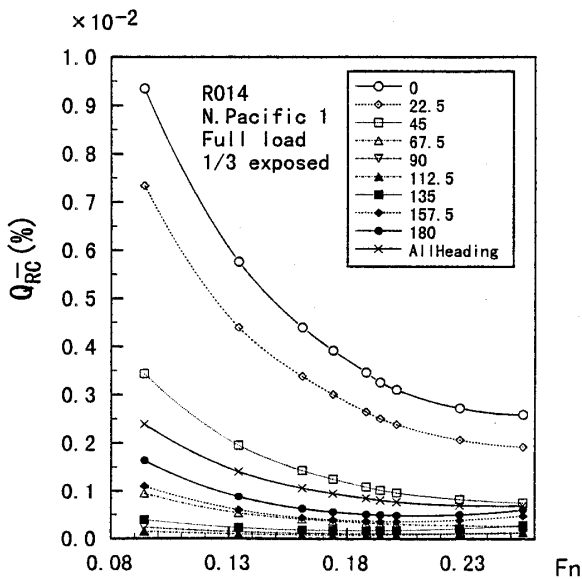


Fig. 9 Long-term accumulate time rate of propeller racing (R 014)

いる。図には、海域 1 における、各船型について満載状態 (Full Load) のプロペラ露出の長期累積発生割合 $Q_{RC}(\%)$ を波との出会角をパラメータとして船速 (F_n) の関数として示している。図中に、すべての出会角 (All Headings) を考慮した場合の結果も付記している。船型 R 013 および R 014 の露出長期累積発生割合への船速、波との出会角等の影響は船型 R 009 の 65% バラスト状態の傾向と類似している。船型 R 016 の露出長期累積発生割合の傾向は他の 3 船型 (R 009, R 013, R 014) の傾向と異っており、船速が低い ($F_r=0.08$ 近傍) 範囲と高い範囲 ($F_r=0.28$ 近傍) の発生割合の値が大きく、中間の速度の範囲 ($F_r=0.18$ 近傍) の発生割合の値が小さい。

Fig. 11 には、船型 R 009 についてプロペラ 1/3 露出の長期累積発生割合の迎波、追波およびすべての出会角を考慮した場合の結果を Fig. 7 より抽出し、3.2 および 4. で説明した方法により算定した第 1 四分位数、第 3 四分位数等を適用した結果の例を示している。図より、プロペラ露出の長期累積発生割合の四分位偏差の大きさ、いわゆる信頼度の範囲がわかる。

以上得られたプロペラ露出の特性の一部分、特に、定性的傾向は、露出頻度を基準に採用して検討がなされた従来の研究^{6)~12)}で既に報告されている結果を再確認したに止まるものが多い。しかしながら、従来の研究で提示されているプロペラレーシングの長期の確率は、短期不規則波浪海面において (16) 式に基づいて計算されるプロペラ露出の発生確率がある値 (例えば 1/10) を超えるような航海状態に遭遇する長期の累積確率を意味するものであり、示されている確率の数値は直接的にプロペラの一部が波面より露出する現象の発生時間あるいは確率を示すものではない。

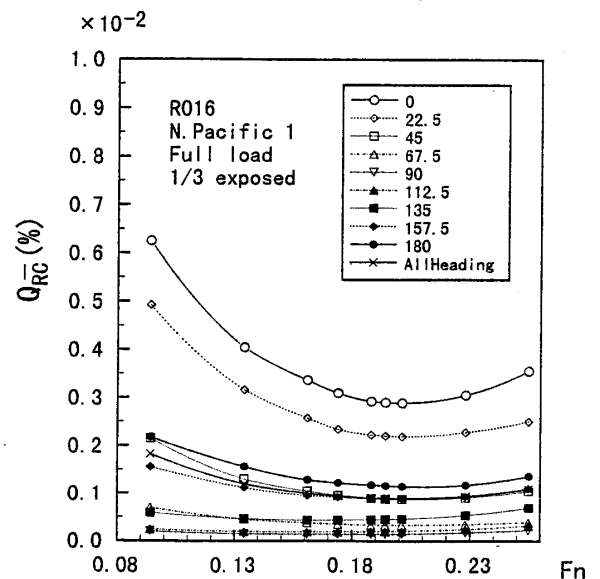


Fig. 10 Long-term accumulate time rate of propeller racing (R 016)

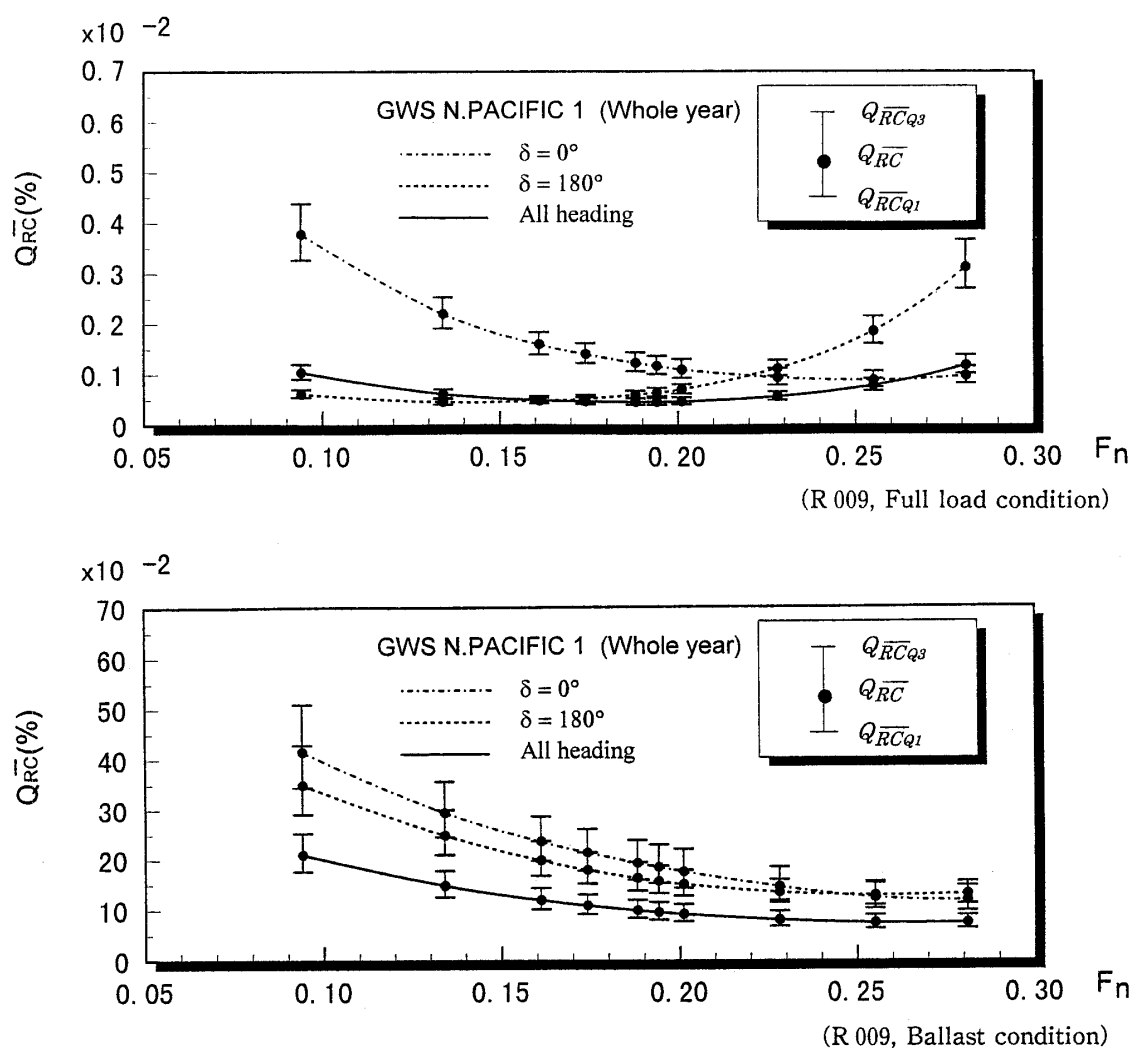


Fig. 11 Margins of estimate error of long-term accumulate time rate of propeller racing in a distribution range between the Q_1 and Q_3

これに対して、本法で提示したプロペラ露出の長期発生割合、長期累積発生割合等は、プロペラレーシングの主たる原因であるプロペラ露出の現象の平均持続時間（プロペラの一部が波面より露出し空中にある超過持続時間）の割合を意味しており、これらの発生割合に航海時間を乗じれば、その推定値は、直接的に船の1航海の間にプロペラが露出する実時間を与えることになる。従って、「最大プロペラ直径の検討」、「運航限界の検討」、「プロペラレーシング上問題がない喫水の検討」等本来の船舶設計の立場からの検討において、プロペラレーシングの発生の実時間を設定できることになり、現象（プロペラ露出）とその結果（プロペラが異常回転する時間、トルク、推力が著しく変動する時間）を対応させて、直観的にしかも確率・統計学に基づいて現象の把握ができることになる。

6. 結 言

プロペラレーシングについて、その発生持続時間推定の観点から、プロペラ露出統計的予測法のアルゴリズムの再

構成を計った。提案したプロペラ露出の平均発生持続時間推定法によれば、プロペラ露出の長期発生時間割合を推定する際に、プロペラレーシングの短期超過確率をパラメータに含む必要がないために、プロペラ露出従ってプロペラレーシングの発生率の解釈が容易である。また、超過持続時間の確率分布の影響を取りこむための追加アルゴリズムを付加することにより、推定値の信頼度を計る目安が設定でき、より有用なツールを具備できることを確認した。本推定法を「船速低下の問題」に適用することが今後の課題である。

最後に、本研究を遂行するにあたり協力された九州大学大学院工学研究科伊与田博央氏、プログラム開発に熱心に取り組まれた泉 尚吾氏（現在今治造船(株)）に謝意を表す。本研究の一部は文部省科学研究費の援助を受けて実施されたことを付記し関係各位に感謝する。

参考文献

- 1) 中村彰一：耐航性の諸要素，耐航性に関するシンポジウムテキスト，日本造船学会（1969）。
- 2) 細田龍介，国武吉邦，宮本雅史：耐航性能評価と評価基準，船型と耐航性，運動性能研究委員会・第5回シンポジウム，日本造船学会（1988）。
- 3) 内藤林，中村彰一：レーシング時のプロペラ単独特性及び負荷変動について，関西造船協会誌，第172号（1979）。
- 4) 高梨伊三夫：第4章設計への適用，第4.1現状と問題点，第2篇波浪中船体運動および波浪荷重，波浪中推進性能と波浪荷重，運動性能研究委員会・第1回シンポジウム，日本造船学会（1984）。
- 5) 竹川正夫，池淵哲朗，松本光一郎：船舶設計と耐航性研究，耐航性理論の設計への応用，運動性能研究委員会・第11回シンポジウム，日本造船学会（1994）。
- 6) Vassilopoulos, L. A.: The analytical prediction of ship performance in random seas, Including a new correlation of theoretical and experimental model motions in regular waves, MIT, Report No. 64-1 (1964).
- 7) 福田淳一，小野雄二，緒方源信：バルクキャリアの脚荷吃水設定法，西部造船会々報，第33号（1967）。
- 8) Aertssen, G.: Laboring of ships in rough seas, with special emphasis on the fast ship, Commemorative Proc. of the Diamond Jubilee International Meeting, SNAME (1968).
- 9) 日本造船研究協会，第125研究部会：超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書，日本造船研究協会研究資料 No. 211 (1975)。
- 10) 北沢孝宗，黒井昌明，高木又男：コンテナ船の波浪中での限界速度，日本造船学会論文集，第138号（1975）。
- 11) Lloyd, A. R. J. M. and Andrew, R. N.: Criteria for ship speed in rough weather, Proc. 18th ITTC, Seakeeping Committee Report (1977)。
- 12) 小川原陽一，岩田省治，辻田孝，佐々木弘蔵：コンテナ船のような高速船舶用ディーゼル主機の荒天時における調速，三菱重工技報，第8巻，第1号（1971）。
- 13) Aertssen, G.: Service performance and seakeeping trials on M. V. Jordaens, TRINA, Vol. 108 (1966)。
- 14) Fukuda, J. and Shinkai, A.: Speed loss of a container ship on the different routes in the North Pacific Ocean in winter, Int. Symp. on Ship Hydrodynamics and Energy Saving El Pardo P. IV. 2 (1983)。
- 15) 内藤林，菅 信：第5章，船速低下の推定法，第1篇波浪中の推進性能，波浪中推進性能と波浪荷重，運動性能研究委員会・第1回シンポジウム，日本造船学会（1984）。
- 16) 福田淳一：船体応答の統計的予測，耐航性に関するシンポジウムテキスト，日本造船学会（1969）。
- 17) Faltinsen, O. M., Minns, K. J., Liapis, N. and Skjodal, S. O.: Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway, Proc. 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo (1980)。
- 18) 中村彰一，内藤林，井上隆一：波浪中におけるプロペラ単独特性と負荷変動について，関西造船協会誌，第159号（1975）。
- 19) Rice, S. O.: Mathematical analysis of random noise, The Bell System Technical Journal, Vol. 24 (1945)。
- 20) Sveshnikov, A. A.: Applied methods of the theory of random functions, (First English edition), Int. Series of Monographs in Pure and Applied Mathematics, Pergamon Press, London (1966)。
- 21) 高岡宣善：工学のための応用不規則関数論，共立出版株式会社（1975）。
- 22) 万順濤，新開明二：甲板冠水持続時間の推定，西部造船会々報，第92号（1996）。
- 23) Shinkai, A. and Wan, S.: On wet-deck navigation of an ocean-going ship, Proc. of KOJAM 96, Third Korean-Japan Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics, Taejeon, Korea (1996)。
- 24) 万順濤，新開明二：大洋を航行する船舶の甲板冠水の予測，日本造船学会論文集，第180号（1996）。
- 25) 万順濤，新開明二：甲板冠水持続時間の推定に基づく乾舷規則の評価，日本造船学会論文集，第181号（1997）。
- 26) 日本造船研究協会，第200研究部会，第9分科会：幅広船型の開発に関する研究報告書，日本造船研究協会報告95号（1981）。
- 27) (社)日本造船技術センター：船舶の馬力節減を目的とした多軸船に関する研究，報告書（1982）。
- 28) Denis, M. St. and Pierson Jr., W. J.: On the motion of ships in confused seas, Trans. SNAME, Vol. 61 (1953)。
- 29) 新開明二，万順濤：波浪統計データの特性値と船体応答長期予測，西部造船会々報，第89号（1995），pp. 223-231。
- 30) 新開明二，万順濤：北太平洋の波浪統計データの利用と長期予測，西部造船会々報，第90号（1995），pp. 127-136。
- 31) 万順濤，新開明二：海洋の波浪統計データの特性値と船体応答長期予測値の評価，日本造船学会論文集，第178号（1995），pp. 289-296。
- 32) British Maritime Technology (Primary Contributors; Hogben, N., Dacunha, L. F. and Olliver, G. F.): Global wave statistics, Unwin Brothers Limited, London (1986)。
- 33) 塚本修，森俊哲：波浪外力の航路別長期予測について，西部造船会々報，第47号（1973）。