波浪中抵抗増加の簡易推定法について

正員 新 谷 厚*

A Simple Estimating Method for Resistance Increase of Ships in Head Seas

by Atsushi Shintani, Member

Summary

In this paper, the resistance increases of the ship in irregular waves are dealt with.

The resistance increases of the merchant type hulls in irregular waves are obtained by the theoretical calculation.

According to the studies on these results, it is shown that the resistance increase coefficient is a function of the Froude's number, the non-dimensional mean wave period and the hull characteristics. If the Froude's number and the non-dimensional mean wave period are constant, the resistance increase coefficients of a hull are expressed by the maximum value of them, and the rate to the maximum value. Using these results, the simple estimating formulae for the resistance increase of the ship in irregular waves are obtained by the statistical analysis.

1 緒 言

船舶の初期計画時などに、不規則波中抵抗増加の値を簡便な方法で求めることができれば都合の良い場合がある。このようなことを取扱ったもので既に発表された文献がいくつかある^{1)~3)}。また推力増加の最大値を推定するもの⁴⁾もある。著者らも第 1 回運動性能研究委員会シンポジウムにおいて推定図表を表わしている⁵⁾。しかしこれらはあまり簡便とはいえないし、最大値を探すのに結構面倒なものが多く、船型要素の広い変化に対応できない。

ここではこのようなことを考慮して、正面不規則波中抵抗増加を理論計算より求め、この結果を考慮して、抵抗増加係数の一般的性質を示し、これを利用する推定法を提案し、さらに一つの船型についての簡便な推定式の例を得るを試みた。

2 記 号

B : 船の幅 (m)
 CAW : 不規則波中有効馬力増加係数 ($=PAW/V_s'^2 \cdot \Delta^{1/3} \cdot H_{1/3}^2$)
 $CAWX$: CAW の最大値
 C_b : 方形係数
 C_p : 柱形係数
 C_{pa} : 船体後半部の柱形係数

C_{pf} : 船体前半部の柱形係数
 C_w : 水線面積係数
 C_{wa} : 船体後半部の水線面積係数
 C_{wf} : 船体前半部の水線面積係数
 C_D : 排水量係数 ($F/L^3 \times 1000$)
 C_x : 最大横断面積係数
 d : 船の喫水 (m)
 F_n : フルード数 ($=V/\sqrt{gL}$)
 g : 重力の加速度 (m/s^2)
 $H_{1/3}$: 1/3 有義波高 (m)
 K_D : 変動係数 ($=\sigma/\bar{X}$)
 L : 船長 (m)
 PAW : 不規則波中有効馬力増加 ($=RAW \cdot V/75$) (PS)
 RAW : 規則波中抵抗増加 (kgf)
 RAW : 不規則波中抵抗増加 (kgf)
 T : 平均波周期 (s)
 T' : 無次元平均波周期 ($=T\sqrt{g/L}$)
 T'_x : CAW が最大となる T' の値
 V : 船の速度 (m/s)
 V_s' : 船の速度 (ノット)
 $\bar{X}$: 平均値
 β_3 : 歪み
 β_4 : 尖り
 Δ : 船の排水量 (T_f)
 σ : 標準偏差

* 防衛庁技術研究本部第 1 研究所

ω : 波の円振動数 (1/s)

∇ : 船の排水容積 (m³)

3 入力データの作成法

まず種々の船型について、規則的向い波中抵抗増加を知る必要がある。これは実験値でも計算値でも良いが、実験値は数が少ないので、種々の船型要素の変化による抵抗増加の変化を知るためには、やや不十分であり、また実験を行うのには多大の日時費用を要する。この点理論計算は種々の船型要素の変化に対して抵抗増加の変化を容易に求めることができる。そこでここでは比較の実験値と傾向が一致すること、実験値との対応がある程度とれていることなどを考慮して、理論計算により入力データを作成することとした。なおここでは、抵抗増加は波振幅の2乗に比例するという仮定をしている。

理論計算の方法は種々あるが、その中で比較的良く知られている次の方法によった。規則波中抵抗増加は丸尾の基礎式⁶⁾を用い、特異点分布は藤井・高橋の方法⁷⁾による。ここで船体運動が必要であるが、それはストリップ法のうち N. S. M.⁸⁾ によって求めた。船首部の反射波に基づく抵抗成分は藤井・高橋法⁹⁾ により求め、前者と合計して規則波中抵抗増加とした。

規則波中抵抗増加より不規則波中抵抗増加を求めるために波スペクトルが必要であるが、ここでは 1964 年 ISSC 波スペクトルを用いた¹⁰⁾。すなわち

$$S'(\omega) = 0.11 H_{1/3}^2 \left(\frac{T}{2\pi} \right) \left(\frac{T\omega}{2\pi} \right)^{-5} \times \exp \left\{ -0.44 \left(\frac{T\omega}{2\pi} \right)^{-4} \right\} \quad (1)$$

書き直して

$$S' \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) = \frac{\omega_0 S'(\omega)}{H_{1/3}^2} \quad (2)$$

ただし $\omega_0 = 2\pi/T$

(2) 式の右辺は有義波高の関数にならず、平均波周期の関数となるのが特徴である。

不規則波中抵抗増加は次式により求めた。

$$\frac{RAW}{H_{1/3}^2} = 2 \int_0^\infty S'' \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \left(\frac{RAW}{\zeta_a^2} \right) d \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (3)$$

ここで規則波中抵抗増加応答関数 ($RAW/\rho g \zeta_a^2 [L]$) は、一つの船型についてフルード数が定まれば一つに定まってしまう。ただし $[L]$ は長さの次元を表わす。一方波スペクトルは平均波周期が定まれば一定の形になるから、規則波中抵抗増加応答関数と波スペクトルの関係が、船長に無関係に一定となるためには、フルード数と無次元平均波周期が一定となれば良い。ここでは有効馬力増加係数として、 CAW を用いているが、これを变形すると

$$CAW = \frac{RAW}{H_{1/3}^2 L} \cdot \frac{L}{\Delta^{1/3}} \cdot \frac{V}{75 V_s'} \quad (4)$$

となる。したがって CAW は抵抗増加係数の一種と考えて良い。これらより次式が成り立つ。

$$CAW = f(F_n, T', X_i \dots) \quad (5)$$

ここで X_i は船型要素により定まる変数である。

このことより、フルード数と無次元平均波周期の組み合わせについて、種々の船型に関する CAW の値を入力データとすることができる。

ここでは、 $F_n = 0.25, 0.20, 0.15, 0.10$ の4種類、 $T' = 3.099, 2.656, 2.214, 1.992, 1.772, 1.328$ の6種類、計 24 種類について計算することとした。

4 船型

船型は Series-60 の母型¹¹⁾ 3 隻を標準とし、これの主要目、ファインネス係数を広い範囲に変えて、97 隻の船型を作った。これらの船型の主要目の性質、範囲を Table 1 に示す。このうち 57 隻のデータは、第 1 回運動性能研究委員会シンポジウム「波浪中推進性能と波浪荷重」⁵⁾ において取扱ったものと同じである。

5 推定式の組み立て方と結果

先に抵抗増加係数 (CAW) は、フルード数と無次元平均波周期の関数であることを示した。ここで Fig. 1 にフルード数一定で、 T' をベースに CAW の値を表わした例を示す。この図を見て分かることは、一つの船型について山のような形をしていることである。そこでこの山の頂上の値 ($CAWX$) およびその T' の値 (T'_x)

Table 1 Characteristics of principal particulars

	$\bar{X}$	σ	β_1	β_2	Kv	Xmax	Xmin
Cv	5.7320	2.3740	0.0716	1.9767	0.4142	10.0000	2.0000
B/L×10	1.5675	0.3873	0.0309	2.3646	0.2471	2.4500	0.8018
d/L×10	0.5012	0.1203	0.0659	2.1419	0.2399	0.7698	0.2760
B/d	3.2320	0.9016	1.0352	3.8891	0.2790	6.0000	2.2500
Cb	0.7103	0.1099	-0.4463	1.9431	0.1547	0.8500	0.5000
Cp	0.7194	0.1057	-0.4574	1.9757	0.1470	0.8540	0.5155
Cx	0.9362	0.0086	-0.5283	1.8302	0.0087	0.9950	0.9700
Cw	0.7984	0.0876	-0.3505	1.7567	0.1097	0.9107	0.6402
Cpf	0.7288	0.1535	-0.4760	2.0456	0.2106	0.9260	0.4287
Cpa	0.7095	0.0628	-0.2666	1.6642	0.0885	0.8045	0.6033
Cwf	0.7639	0.1300	-0.3473	1.6568	0.1702	0.9220	0.5970
Cwa	0.8329	0.0494	-0.2424	1.8218	0.0593	0.8993	0.7433

Fig.1 Some examples of effective horse power increase coefficients in irregular waves

Fig.2 Some examples of maximum effective horse power increase coefficients in irregular waves

Fig.4 Some examples of effective horse power increase coefficients after normalizing

Fig.3 Some examples of maximum effective horse power increase coefficients in irregular waves

Table 2 Regression variables

i	$T'x, CAWX, T'x/T'=0.7, 0.8, 0.9, 1.2, 1.4$	$T'x/T'=1.6, 1.8$
1	C_v	C_v
2	$B/L \times 10$	$B/L \times 10$
3	$d/L \times 10$	$d/L \times 10$
4	B/d	B/d
5	C_b	C_b
6	$B/L \times C_b \times 10$	$B/L \times C_b \times 10$
7	C_x	C_x
8	C_w	C_w
9	C_{pf}	$C_{pf} \times C_v \times B/d$
10	$C_{pa}/C_{pf} \times \sqrt{C_b}$	$C_{pa}/C_{pf} \times \sqrt{C_b}$
11	C_{wf}	C_{wf}
12	C_{wa}	C_{wa}

$x_j = x_i'$ ($j=i+12, i=1 \sim 12$)
 $x_j = 1/x_i$ ($j=i+24, i=1 \sim 12$)
 $x_j = 1/x_i'$ ($j=i+36, i=1 \sim 12$)
 $x_{..} = 1.0$

Table 3.1 Partial regression coefficients (T_x')

1	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
FN= C.25	1	0.32538E-01	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.35510E+00	0.0	0.0	-0.56631E-02
	4	0.38531E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	-0.3319E-01	0.0	0.0
	7	0.0	-0.29510E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.44664E+01	0.0	0.45886E+01	-0.78867E+00
	10	-0.17395E-02	0.0	-0.3728E-02	0.10536E+02
	11	0.23629E+02	-0.13187E+02	0.30325E+01	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.14812E+02	0.0	0.0	0.0
FN= C.20	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.13985E-02	0.0	0.0
	2	0.55072E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.39629E+00	0.0	-0.86600E-01	0.0
	4	0.47181E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	-0.10560E+00	0.0	0.0
	7	0.0	-0.29846E+03	0.55452E+03	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	-0.12680E+01
	9	0.0	0.20087E+01	0.0	0.0
	10	-0.81315E+01	0.0	-0.81914E+02	0.53802E+01
	11	0.0	0.39568E+01	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.14275E+01
	49	-0.82743E+03	0.0	0.0	0.0
FN= C.15	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.13035E+00	0.0
	2	0.0	0.11233E-01	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.28800E-02	0.0	0.44184E+00	0.0
	5	0.0	0.0	0.30609E+01	0.0
	6	0.36284E+00	-0.16013E+00	0.0	0.0
	7	0.16680E+04	0.0	0.16221E+04	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	-0.10537E+01
	9	0.0	0.0	0.0	0.27600E+00
	10	-0.36305E+00	0.0	0.0	0.20782E+00
	11	0.0	-0.35098E+01	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.12884E+01
	49	-0.32825E+04	0.0	0.0	0.0
FN= C.10	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.72288E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.31100E+00	0.0	0.0	0.0
	4	0.25836E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	-0.51818E+01	0.0	0.48476E-01
	7	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.15157E+01	0.0	0.0
	11	-0.29763E+02	-0.16183E+02	0.0	0.12479E+01
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	-0.16632E+02	0.0	0.0	0.0

Table 3.2 Partial regression coefficients ($CAWX$)

1	2	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
FN= C.25	1	0.0	0.0	-0.68769E+00	0.0
	2	0.0	-0.11691E+00	-0.09246E+00	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.97589E-02
	4	0.45327E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.23447E+00	0.0	0.0
	7	0.0	-0.19814E+02	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.22342E+01	0.0	0.0	0.0
	10	0.23004E+02	0.0	-0.51038E+02	0.4524E+02
	11	0.0	0.0	0.0	-0.14612E+00
	12	0.0	-0.13311E+01	0.0	-0.10324E+01
	49	-0.38817E+02	0.0	0.0	0.0
FN= C.20	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	-0.96713E-01	-0.14906E+01	0.58426E+00
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	-0.33859E-01	0.96047E-02	0.0	0.0
	5	0.0	-0.24908E+01	0.0	0.0
	6	0.0	0.16320E+00	0.0	0.0
	7	0.0	-0.27143E+03	-0.49581E+03	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.16414E+01	0.0	0.0
	10	-0.22312E+01	0.0	0.0	-0.69492E+00
	11	0.23678E+01	0.0	0.0	0.30726E+00
	12	0.0	0.19014E+01	0.0	0.0
	49	0.76755E+03	0.0	0.0	0.0
FN= C.15	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	-0.17446E+00
	2	0.0	-0.11971E+00	0.0	0.25193E+00
	3	0.38355E+00	0.0	0.0	0.0
	4	0.10472E+00	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.56063E+00	0.58877E-01	-0.16618E+00	0.0
	7	0.0	-0.86181E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	-0.13870E+01	0.0	0.0
	10	0.16224E+02	0.0	0.35826E+02	-0.10149E+02
	11	-0.18001E+01	0.0	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.33346E+02	0.0	0.0	0.0
FN= C.10	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	-0.52147E+00	0.0
	2	0.0	-0.94670E-01	0.0	0.25921E+00
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.07272E+00	0.0	0.0	-0.83004E+00
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.13265E+00	0.0	0.0
	7	0.0	-0.81760E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	-0.47353E+00	0.0
	9	0.0	-0.12420E+01	0.0	0.0
	10	-0.25782E+02	0.11478E+02	0.0	-0.18821E+01
	11	-0.15137E+01	0.0	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.24619E+02	0.0	0.0	0.0

Table 3.3 Partial regression coefficients ($T_x'/T_x=0.7$)

1	3	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
FN= C.25	1	-0.62498E+02	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	-0.12168E+01	0.0	0.78049E-01	0.0
	4	0.14071E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.23286E-01	0.0	0.0
	7	0.0	-0.22477E+02	0.0	-0.18021E+02
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.21205E+00	0.0	0.0	0.0
	11	-0.1694E+00	0.0	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.39991E+02	0.0	0.0	0.0
FN= C.20	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.27627E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	-0.97668E-01	0.32538E-01	0.0	0.0
	7	0.19111E+03	-0.98168E+02	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.12128E+00	0.0	0.0	0.0
	11	-0.58359E+00	0.0	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	-0.91495E+02	0.0	0.0	0.0
FN= C.15	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	-0.72171E+03	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.13709E+00	-0.13578E+00	-0.99236E-02
	4	-0.26125E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	-0.33659E+00	0.0	0.0
	6	0.0	0.39435E-01	-0.81747E-01	-0.8455E-01
	7	0.0	-0.29209E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	-0.15367E+00	0.0	0.0
	10	0.84158E+00	0.0	0.5060E+00	0.0
	11	0.0	0.61166E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	-0.15239E+00
	49	0.25291E+01	0.0	0.0	0.0
FN= C.10	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.19238E+00
	2	0.0	0.54547E-02	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.83031E-01	-0.65968E-02
	4	-0.14227E+01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	-0.43108E+00	0.0	0.0
	6	0.0	0.11701E-01	0.0	-0.9972E-02
	7	0.0	-0.21798E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.12852E+00	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.51698E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	-0.12096E+00
	49	0.25951E+01	0.0	0.0	0.0

Table 3.4 Partial regression coefficients ($T_x'/T_x=0.8$)

1	4				
FN= C.25	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.0	0.15594E-02	0.0	-0.57266E-01
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	-0.87666E+00	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.50174E-01	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.13975E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.15169E+01			

FN= C.20	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.45598E-03	0.0	0.0
	2	0.17567E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.19860E+01	0.88949E+00	-0.47236E+00	-0.49033E-01
	4	0.0	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	-0.12689E+00	0.0	0.0
	6	0.0	0.19976E-01	0.0	0.0
	7	0.0	-0.11712E+01	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	-0.59227E+00	0.35991E+00	0.0	0.0
	11	0.0	0.20256E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	-0.61052E-01
	49	0.65847E+00			

FN= C.15	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.17530E+00
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.0	0.16507E-02	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	-0.30132E-01	0.0
	7	0.0	-0.98287E+00	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.22148E+00	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.16281E+00	0.0	0.50753E-01
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.14189E+01			

FN= C.10	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.16188E+00
	2	0.28462E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.21436E-01	0.0
	4	0.0	-0.42450E-03	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	-0.84007E+00	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.67383E-01	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.16514E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.13678E+01			

Table 3.5 Partial regression coefficients ($T_x'/T_x=0.9$)

1-5					
FN=0.25	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.0	0.76336E-03	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	-0.92825E+03
	7	0.0	-0.33153E+00	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.17844E-01	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.46470E+01	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.12170E+01			

FN=0.20					
	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.0
	2	0.0	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.0	0.77941E-03	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.0	0.0	0.0	0.0
	11	-0.17144E+00	0.13464E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.98924E+00			

FN=0.15					
	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	-0.27987E+03	0.0	-0.41278E+01
	2	0.17869E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.82094E-01	0.43098E+01	0.42163E-02
	4	0.0	-0.59569E-03	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.95439E-02	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.14434E+01	0.0
	10	0.16089E-01	0.0	0.0	0.2651E-01
	11	-0.14159E-01	0.24564E+00	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.16925E+01			

FN=0.10					
	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.0	0.0	0.68862E-01
	2	0.11338E-01	0.0	0.0	0.0
	3	0.0	0.0	0.81274E-02	0.0
	4	0.0	-0.18324E-03	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.60876E+00	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.0	0.0
	10	0.20908E-01	0.0	0.0	0.0
	11	0.0	0.60026E-01	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	0.0
	49	0.24455E+00			

Table 3.7 Partial regression coefficients ($T_x'/T_x=1.4$)

1-7	FN= 0.25	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
1	0.0	0.72909E+03	0.0	0.78731E+00	0.0
2	0.0	0.0	0.0	-0.86519E-01	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.66620E-01	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.93155E-01	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	-0.72485E+01	0.0	-0.18933E+02	0.57185E+01	0.0
11	-0.23122E+02	0.11728E+02	-0.7546E+01	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.36312E+02	0.0	0.0	0.0	0.0

1-8	FN= 0.20	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
1	0.22870E+01	0.0	0.0	0.13030E+00	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.17075E+01	0.84607E+00	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.11291E+00	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	-0.74836E+01	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	-0.84471E+01	0.0	-0.19845E+02	0.57199E+01	0.0
11	-0.23617E+01	0.26517E+01	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.31050E+02	0.0	0.0	0.0	0.0

1-9	FN= 0.15	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
1	0.22032E+01	0.0	0.27363E+00	0.0	0.0
2	0.0	-0.13809E-01	0.0	0.0	0.0
3	-0.04885E+00	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.10611E-01	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.42677E-01	0.0	-0.22334E-01	0.0
7	0.0	-0.20843E+02	0.0	0.0	0.0
8	0.43063E+02	-0.22623E+02	0.0	0.26428E+01	0.0
9	0.0	-0.11916E+01	0.0	0.0	0.0
10	-0.13649E+02	0.0	-0.30310E+02	0.87159E+01	0.0
11	0.0	0.40946E+01	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	-0.13703E+01	0.0
49	0.52224E+02	0.0	0.0	0.0	0.0

1-10	FN= 0.10	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
1	0.0	0.16199E+02	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	-0.67341E+00	0.0	0.0	0.0	0.42112E-02
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.93652E+01
8	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.62024E+00
9	0.0	-0.98427E+00	0.0	0.0	0.0
10	0.74692E+00	0.0	0.0	0.0	0.27574E+00
11	-0.50902E+01	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	-0.66479E+01	0.0	0.0	0.0	0.0

Table 3.6 Partial regression coefficients ($T_x'/T_x=1.2$)

1-6					
FN= 0.25	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.45923E+03	0.0	-0.25006E+00
	2	0.0	0.0	0.0	-0.27835E-01
	3	-0.83346E-01	0.0	0.0	0.0
	4	0.18669E-01	0.0	0.0	0.0
	5	0.0	0.0	0.0	0.0
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.32169E+01
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	-0.30210E+00	0.0	0.0
	10	0.56768E+00	0.0	0.0	0.20531E+00
	11	-0.64209E+00	0.10631E+01	0.0	0.0
	12	0.0	0.0	0.0	-0.17689E+00
	49	-0.30076E+01	0.0	0.0	0.0

FN= 0.20					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.45432E+03	0.23759E+00	0.0	
2	-0.37812E-01	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.68280E-02	
4	0.75047E-01	-0.39508E-02	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.12775E+00	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	0.59496E+00	0.0	0.0	0.24235E+00	
11	-0.52860E+00	0.31278E+01	0.0	0.24801E+00	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	-0.23864E+01	0.0	0.0	0.0	

FN= 0.15					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.49024E+03	0.0	0.38498E-01	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	-0.27181E+00	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.10453E+01	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.32473E+01	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	0.56183E+01	-0.23698E+01	0.0	0.26202E+00	
11	0.0	0.45129E+00	0.0	0.0	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	-0.63017E+01	0.0	0.0	0.0	

FN= 0.10					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.55921E+03	0.52855E-01	0.0	
2	0.0	0.0	0.0	0.0	
3	-0.24481E+00	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	0.0	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	-0.28182E+01	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.0	0.0	0.0	0.0	
10	0.11971E+00	0.0	0.0	0.0	
11	0.0	0.36780E+00	0.0	0.0	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	0.33789E+01	0.0	0.0	0.0	

Table 3.8 Partial regression coefficients($T_x'/T_x=1.6$)					
1-6					
FN= 0.25	1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
	1	0.0	0.45923E+03	0.0	0.87678E+00
	2	0.0	0.0	-0.43644E+00	0.0
	3	0.0	0.0	0.0	0.0
	4	0.53221E-01	0.0	0.0	0.0
	5	-0.14127E+02	0.0	-0.23233E+02	0.24640E+01
	6	0.0	0.0	0.0	0.0
	7	0.0	0.0	0.0	0.0
	8	0.0	0.0	0.0	0.0
	9	0.0	0.0	0.21857E+00	0.0
	10	-0.26361E+02	0.0	-0.57622E+02	0.16169E+02
	11	-0.48988E+02	0.25821E+02	0.0	0.20530E+01
	12	0.0	0.0	0.0	0.65943E+00
	49	0.12560E+03	0.0	0.0	0.0

FN= 0.20					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.0	0.22932E+01	0.87678E+00	
2	0.0	0.0	-0.31260E+00	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	0.13203E-01	
4	0.0	0.0	-0.90052E+00	0.14175E+01	
5	0.0	0.0	0.0	0.33325E+00	
6	0.0	0.0	-0.28534E+00	0.0	
7	0.0	-0.19365E+03	-0.37941E+03	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.16434E+01	-0.18173E+03	0.0	0.0	
10	-0.21489E+02	0.0	-0.47964E+02	0.13558E+02	
11	-0.25000E+02	0.14620E+02	0.0	0.10243E+01	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	0.64110E+03	0.0	0.0	0.0	

FN= 0.15					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.11335E+02	0.0	0.95814E+00	
2	-0.11909E+00	0.0	0.0	0.0	
3	0.0	0.0	0.0	-0.20540E-01	
4	0.0	0.0	-0.38217E+01	0.37055E+01	
5	0.0	0.0	0.61103E+00	0.0	
6	0.0	-0.15100E+00	0.0	-0.29580E-01	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.0	
9	0.15528E-01	0.0	0.0	0.0	
10	0.32257E+02	-0.13683E+02	0.0	0.25361E+01	
11	-0.18054E+02	0.10789E+02	0.0	0.79036E+00	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	-0.11613E+02	0.0	0.0	0.0	

FN= 0.10					
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)	
1	0.0	0.0	0.0	0.83220E+00	
2	0.0	0.0	0.0	-0.66107E-01	
3	0.0	0.0	0.0	0.0	
4	0.0	0.0	-0.51293E+00	0.0	
5	0.0	0.0	0.0	0.0	
6	0.0	0.0	0.0	0.0	
7	0.0	0.0	0.0	0.0	
8	0.0	0.0	0.0	0.66841E+00	
9	0.0	0.69635E+04	0.0	0.0	
10	0.54665E+01	0.0	0.0	0.42756E+00	
11	-0.19972E+02	0.11623E+02	0.0	0.97598E+00	
12	0.0	0.0	0.0	0.0	
49	0.77224E+01	0.0	0.0	0.0	

Table 3.9 Partial regression coefficients
($T_x'/T_x=1.8$)

Fn= 0.25				
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
2	0.24977E-01	0.0	0.0	0.0
3	0.0	-0.39683E-01	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.13+24E+00	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.7264E+00	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.22833E-01	0.18120E-03	0.0	0.0
10	-0.14637E+02	0.0	-0.35345E+02	0.10287E+02
11	-0.32775E+02	0.16599E+02	-0.52909E+01	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.60907E+02	0.0	0.0	0.0

Fn= 0.20				
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
2	0.0	0.14900E-02	0.0	0.31822E+00
3	0.0	0.0	-0.50086E+00	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	-0.25009E+01	0.25789E+01
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	-0.32695E+01	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.19310E+01	-0.17738E+01
10	-0.10463E+02	0.0	-0.74492E+02	0.74602E+02
11	-0.16915E+02	0.10407E+02	0.0	-0.65186E+00
12	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.40560E+02	0.0	0.0	0.0

Fn= 0.15				
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
2	0.0	-0.40119E-01	0.0	0.69733E+00
3	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.37822E-01	0.0	0.0	0.0
5	-0.34564E+01	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	-0.20018E+02	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	-0.18019E+01
9	-0.21813E-01	-0.15064E-03	0.0	-0.38473E+00
10	0.52523E+02	-0.23054E+02	0.0	0.38218E+01
11	0.51757E+01	0.0	0.0	-0.74218E+00
12	0.0	0.0	0.0	0.0
49	-0.13535E+02	0.0	0.0	0.0

Fn= 0.10				
1	C(1)	C(1+12)	C(1+24)	C(1+36)
2	0.0	0.13780E-02	0.0	0.73745E+00
3	0.0	-0.48948E-01	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	-0.17739E-01
5	0.17006E+00	-0.65932E-02	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.26023E+00	0.0	0.0	0.0
11	-0.42925E+01	-0.40000E+01	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.21539E+03	0.0	0.0	0.0

を読みとる。CAWX を船型要素で表わした例を Fig. 2, 3 に示す。さらにこれらを T_x'/T' をベースとして CAW/CAWX の値を描くと Fig. 4 のようになる。ここではこれを正規化すると称する。この図を見ると、 T_x'/T' が 1.0 より小さい範囲では、船型による差は、ほとんど見られず、 T_x'/T' が 1.0 より大きい範囲では、かなりの広がりがある。これを詳細に検討すると、方形係数の小さいものほど下にあり、また B/d の大きいものほど上にある。すなわち、この広がり船型要素によって定まることが分かる。したがってここでは CAW の最大値 CAWX と、そのところの T' の値 (T_x')、および T_x'/T' の値が 0.7, 0.8, 0.9, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 のところの CAW/CAWX の値について統計解析することとした。ただし入力データからこれらの値を作成するには、部分的に 3 次式近似により補間した。

統計解析を行うにあたっては Table 2 に示す 12 個の変数、およびこれの 2 乗、逆数、逆数の 2 乗の合計 48 個の変数と定数項を用いた。変数選択には増減法¹²⁾を用い、選択基準としては F 値で 4.0 とした。計算は既存のプログラム¹³⁾によった。得られた偏回帰係数の値を Table 3.1~3.9 に示す。

これらより推定値 (y_i) を求めるのは次式による。

Table 4 Percentages of error (after normalizing) unit=%

Fn		0.25	0.20	0.15	0.10	MEAN	
CAWX	RMS	2.97	3.25	3.67	3.80	3.42	
	MAX	9.55	10.74	8.84	9.83		
T'x	RMS	0.50	0.44	0.39	0.54	0.46	
	MAX	1.70	1.51	1.31	2.77		
CAW	T'x/T' =0.7	RMS	0.81	0.49	0.33	0.35	0.50
		MAX	4.13	1.28	1.01	1.78	
	0.8	RMS	0.46	0.27	0.46	0.32	0.38
		MAX	1.35	0.77	1.28	1.51	
	0.9	RMS	0.29	0.27	0.15	0.15	0.22
		MAX	0.98	0.61	0.58	0.65	
	1.2	RMS	0.49	0.46	0.50	0.53	0.50
		MAX	2.29	2.23	1.75	2.22	
	1.4	RMS	1.42	1.25	0.83	1.10	1.15
		MAX	6.29	5.31	4.24	3.03	
	1.6	RMS	1.05	1.04	1.27	1.83	1.30
		MAX	4.15	3.36	3.85	5.15	
	1.8	RMS	1.61	1.51	1.50	1.74	1.59
		MAX	4.64	4.38	4.37	5.84	
MEAN		RMS	0.88	0.76	0.72	0.86	0.81

Table 5 Percentages of error (for input data) unit=%

Fn			0.25	0.20	0.15	0.10	MEAN
CAV	T' =	RMS	1.87	1.99	2.28	2.45	2.15
	3.099	MAX	5.06	5.67	5.70	6.73	
	2.656	RMS	2.47	2.53	2.76	2.85	2.65
		MAX	7.42	8.81	6.50	8.73	
	2.214	RMS	3.01	3.25	3.51	3.66	3.36
		MAX	10.19	11.24	8.43	10.46	
	1.992	RMS	3.07	3.51	3.73	3.84	3.56
		MAX	11.84	13.11	10.10	10.95	
	1.771	RMS	2.75	3.21	3.58	3.72	3.32
		MAX	9.30	12.13	10.28	10.85	
	1.328	RMS	1.56	1.72	2.05	2.73	2.02
		MAX	4.44	5.06	7.04	8.78	
MEAN		RMS	2.47	2.70	2.99	3.21	2.84

$$y_i = A_{49} + \sum_{i=1}^{48} A_i \cdot X_{ij} \quad (6)$$

ここで A_i は偏回帰係数、 X_{ij} はそれぞれの船型についての Table 2 に示す変数である。

得られた推定値の、正規化後の誤差率を Table 4 に示す。また入力データに対する誤差率を Table 5 に示す。ただし入力データの T' の値に対応する CAW の値を求めるために補間をしているので、この分も含まれている。Table 4, 5 中 RMS は 2 乗平均値を、MAX は最大値を示している。

6 考 察

船型要素の広い範囲について、抵抗増加を求められる簡易な推定式を作成したことは、船舶の基本計画などに極めて有用と思われる。また波浪中抵抗増加の最大値を求められることは、与えられた有義波高の範囲内で、波周期に無関係に、ある航海速力を維持しなければならない船舶の主機定格を推定する場合などに便利である。

ここでは Series-60 という一つの船型について、船型要素を種々に変えて計算したのにすぎないから、他の船型の性能をこれより推定するのは多少の問題があらうかと思われる。しかし、従来の経験から多少の船型の違いは波浪中抵抗増加にはあまり大きな影響を与えないように思われるし、また、初期計画時には船型の細かい変

化を数値で表わしにくいこともある。ただし船型が大きく異なる場合、あるいはここで取り上げなかった変数、たとえば最大横断面積係数などが異なる場合には、偏回帰係数の値は適用できないであろう。しかし、推定式を作る方法は適用できる。

なお、ここでは入力データ作成に理論計算値を用いたので、著者らが示した実験値との比較係数⁹⁾を併用するのが実用的と思われる。すなわち

$$R' = \frac{0.44 - 0.51 C_b}{(\lambda_0/L)^{1.5}} - 0.68 C_b + 1.27 \quad (7)$$

ここで

$$\lambda_0/L = \frac{T'^2}{2\pi} \quad (8)$$

したがって

$$CAW = CAW_0 \cdot R' \quad (9)$$

ここで CAW_0 は前章までに示した推定値である。

7 結 論

船型要素の広い範囲について、一般商船船型の不規則向かい波中抵抗増加を理論計算より求め、これを考察することにより次の結論を得た。

(1) 不規則波中抵抗増加係数は、フルード数、波スペクトルの無次元平均波周期、および船型要素の関数で表わせる。

(2) 不規則波中抵抗増加係数は、一つの船型についてフルード数一定の場合、平均波周期を変数とすると最大値を有する。

(3) 不規則波中抵抗増加係数は、平均波周期を変数とした最大値、および最大値との比によって表わせる。

(4) 上記最大値、最大値との比、最大値になる無次元波周期について統計解析を行い、船型要素によって表わせる変数を用いた重回帰式の例を得た。

(5) 上記重回帰式を用いると、不規則波中抵抗増加係数を容易に、かつ精度良く求めることができる。

参 考 文 献

- 1) Moor, D. I. and Murdey, D. C.: "Motions and Propulsion of Single Screw Models in Head Seas", TRINA, Vol. 110 (1968) p. 403.
- 2) Moor, D. I. and Murdey, D. C.: "Motions and Propulsion of Single Screw Models in Head Seas, Part II", TRINA, Vol. 112 (1970) p. 121.
- 3) Loukakis, T. A. and Chrysosostomidis, C.: "Seakeeping Standard Series for Cruiser-Stern Ships", TSNAME Vol. 83 (1975) p. 67.
- 4) 宮本雅史: "正面不規則波中における推力増加の近似について", 関西造船協会誌, 第145号(1972) p. 65.
- 5) 新谷 厚, 井上隆一: "船型要素と波浪中推進性能", 運動性能研究委員会第1回シンポジウム, 波浪中推進性能と波浪荷重, 日本造船学会 (1984), p. 61.
- 6) 丸尾 孟: "波浪中の船体抵抗増加に関する研究 (第2報)", 造船協会論文集, 第108号 (1960) p. 5.
- 7) 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, 第4巻, 第6号 (1967) p. 86.
- 8) 高石敏史, 黒井昌明: "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) p. 109.
- 9) 藤井 齊, 高橋 雄: "肥大船の波浪中抵抗増加推定法に関する実験的研究", 日本造船学会論文集, 第137号 (1975) p. 132.
- 10) 山内保文: "海洋波中の応答", 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, p. 53.
- 11) Todd, F. H.: "Series 60-methodical Experiments with Models of Single-Screw Merchant Ships", David Taylor Model Basin, Research and Development Report, No. 1712 July, 1963, p. 1.
- 12) 芳賀敏郎, 橋本茂司: "回帰分析と主成分分析", 日科技連出版社, 第5刷 (1984) p. 72.
- 13) 数値計算副プログラムライブラリ MSL II, 統計計算, 日立製作所 (1985).