

船体に働く風圧力の一推定法

正会員 山野 惟夫 , 正会員 斎藤 泰夫

**An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships**

*By Tadao YAMANO (Member) and Yasuo SAITO (Member)*

関西造船協会誌 第228号 平成9年9月 別刷



# 船体に働く風圧力の一推定法 \*1

正会員 山野 惟夫 \*2, 正会員 斎藤 泰夫 \*2

## An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships

By Tadao YAMANO (*Member*) and Yasuo SAITO (*Member*)

Estimation of wind forces has become to be often required in ship design, for example, to check manoeuvrability in strong wind on ships with large above-water surfaces such as PCC and LNGC, to conduct wind correction to speed trial results, and to estimate sea margin.

The authors have tried to develop a practical estimation method of wind forces by which wind force coefficients can be estimated more accurately than ever in a short time using a small number of data which properly represents above-water ship form characteristics and are easily available on any ship.

This paper describes the development.

**Keywords :** *Wind Forces, Practical Estimation Method, Above-Water Ship Form Characteristics, Wind Force Data base, Fourier Series, Regression Analysis*

### 1. 緒言

自動車専用運搬船・LNG船・コンテナ船などの大きな風圧面を持つ船では、強風下の操縦性能が重要となる。たとえば川崎重工が我国で最初に建造した外航自動車専用運搬船「第10とよ丸」の設計では、模型船により風圧力を計測して、その結果を基に強風下の操縦性能を検討してはじめて、あの従来になく大きな上構を持つ船を、舵面積を適当に選ぶことにより実現できるという自信を得た。

風圧力の推定は、このような操縦性能の検討に限らず、試運転結果に対する風の修正・シーマージンの推定等にも必要であり、ますます頻繁に行なわれるようになって来ている。

一方で、このような目的に使える実用的な風圧力の推定式と呼べるものは、著者の知る限り、まだない。

従来、実務で採って来た推定法は、初期設計の段階では通常は風圧力計測実験を行う余裕はないので、類似船の実験結果を流用するというものである。多くの場合、同船種の水線上船体形状・載荷状態が近い船の資料を流用する。しかし、このような指標と風圧力との相関を明確に把握した上でこのような方法を採用している

訳ではないし、またこれらの指標の近い船がない場合もある。すなわち、このような方法では常に精度の高い推定ができるとは限らない。

そこで、本論文では、多様な形状を持つ船の風圧力計測実験結果<sup>1)2)3)4)5)6)</sup>を基にして、まず水線上船体形状の特徴を適切に表示できる指標を明確にするとともにそれらと風圧力との相関を定量的に明確にする。つぎに、それらを基にして、任意の形状の船の風圧力を短時間にかつ精度良く推定できる実用的な推定式を、導くことを試みる。

### 2. 基礎となる風圧力計測実験結果

Table 1 に、本研究の基礎となる風圧力計測実験結果の夫々について、船種・載荷状態・水線上船体形状を表わすパラメータを示す。Fig.1-(1/3),(2/3),(3/3) に側面形状を示す。

ここに

$L$  : 垂線間長 (m)

$B$  : 型幅 (m)

$A_x$  : 水線上正面投影面積 ( $m^2$ )

$A_y$  : 水線上側面投影面積 ( $m^2$ )

$H_x = A_x/B$  : 水線上正面平均高さ (m)

$H_y = A_y/L$  : 水線上側面平均高さ (m)

$X_g = A_y$  の図心位置の F.P. からの距離 (m)

各船の風圧力係数の実験値を、Table 2 および Fig.2 に示す。船種をライナ型・タンカ型・客船型に分類し

\*1 昭和46年5月15日 関西造船協会春季講演会において講演, 原稿受付 平成9年3月18日

\*2 川崎重工業株式会社

Table 1 Particulars of sample data

S.M.O.	Ship kind & condition	L/B	Ay/Ax	Ax/BL	Ax/B <sup>2</sup>	Ay/BL	Ay/L <sup>2</sup>	Hy/Hx	Xg/L
L-01	CONTAINER .....FULL	6.993	4.426	0.119	0.834	0.528	0.075	0.633	0.541
L-02	CONTAINER .....BALLAST	6.993	6.993	0.139	0.973	0.527	0.075	0.641	0.521
L-03	CARGO .....FULL	8.029	3.953	0.113	0.906	0.446	0.065	0.492	0.481
L-04	CARGO .....BALLAST	8.029	4.487	0.133	1.070	0.598	0.075	0.559	0.465
L-05	CARGO .....FULL	8.029	3.916	0.116	0.930	0.454	0.057	0.438	0.591
L-06	CARGO .....BALLAST	8.029	4.429	0.137	1.098	0.606	0.075	0.552	0.562
L-07	CARGO .....FULL	8.029	4.495	0.094	0.755	0.423	0.053	0.560	0.521
L-08	CARGO .....FULL	7.893	4.207	0.099	0.778	0.415	0.053	0.533	0.502
L-09	CARGO .....BALLAST	7.893	4.760	0.121	0.957	0.577	0.073	0.603	0.475
L-10	CARGO .....FULL	7.893	4.301	0.097	0.762	0.415	0.053	0.545	0.522
L-11	CARGO .....BALLAST	7.893	4.846	0.119	0.940	0.475	0.073	0.614	0.481
L-12	CARGO .....FULL	8.117	4.316	0.102	0.830	0.441	0.054	0.532	0.500
L-13	CARGO .....FULL	7.895	3.503	0.118	0.932	0.413	0.052	0.444	0.479
L-14	CARGO .....BALLAST	7.895	4.058	0.152	1.200	0.617	0.078	0.514	0.463
T-01	TANKER.....FULL	7.240	3.972	0.069	0.497	0.273	0.039	0.549	0.536
T-02	TANKER.....BALLAST	7.240	4.641	0.088	0.637	0.408	0.056	0.641	0.506
T-03	TANKER.....FULL	7.240	3.374	0.081	0.585	0.273	0.038	0.466	0.542
T-04	TANKER.....BALLAST	7.240	4.063	0.101	0.729	0.409	0.057	0.561	0.512
T-05	TANKER.....FULL	7.661	3.839	0.081	0.617	0.309	0.040	0.501	0.587
T-06	TANKER.....BALLAST	7.661	4.552	0.102	0.781	0.464	0.061	0.594	0.533
T-07	TANKER.....FULL	7.930	4.839	0.102	0.805	0.491	0.062	0.610	0.498
T-08	TANKER.....FULL	6.105	3.118	0.075	0.455	0.233	0.038	0.511	0.560
T-09	TANKER.....FULL	6.920	4.316	0.065	0.446	0.278	0.040	0.624	0.534
T-10	TANKER.....FULL	6.920	4.162	0.074	0.515	0.310	0.045	0.601	0.561
T-11	TANKER.....BALLAST	6.105	3.903	0.093	0.568	0.363	0.060	0.639	0.532
T-12	TANKER.....BALLAST	6.920	4.600	0.102	0.707	0.470	0.068	0.665	0.533
T-13	TANKER.....BALLAST	6.920	4.810	0.091	0.629	0.437	0.063	0.695	0.521
P-01	PASSENGER *	7.698	5.762	0.135	1.042	0.780	0.101	0.749	0.451
P-02	PASSENGER *	7.698	5.696	0.128	0.982	0.726	0.094	0.740	0.475
P-03	PASSENGER *	8.263	5.328	0.134	1.108	0.715	0.087	0.645	0.490
P-04	PASSENGER *	9.028	7.409	0.098	0.884	0.725	0.080	0.821	0.501
P-05	CAR CARRIER.FULL	6.410	5.258	0.127	0.817	0.670	0.105	0.820	0.497
P-06	CAR CARRIER.BALLAST	6.410	5.186	0.142	0.912	0.738	0.115	0.809	0.510
P-07	CAR CARRIER.BALLAST	6.410	5.066	0.141	0.902	0.713	0.111	0.790	0.513
P-08	CAR CARRIER.BALLAST	6.410	5.311	0.168	1.080	0.894	0.140	0.829	0.510
P-09	FERRY BOAT *	7.697	5.768	0.124	0.952	0.714	0.093	0.749	0.506
P-10	FERRY BOAT *	7.142	5.012	0.146	1.042	0.731	0.102	0.702	0.486
P-11	FERRY BOAT *	7.142	4.166	0.133	0.948	0.553	0.077	0.583	0.480

Table 2 Typical examples of sampled wind force coefficient

(Cx=Rx/½ ρ AxW²)

θ	L-01	L-02	T-03	T-04	T-08	T-11	P-05	P-06	P-07	P-08
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10.0	0.1600	0.2000	0.2020	0.2660	0.1000	0.0600	0.3500	0.3650	0.3750	0.4000
20.0	0.3200	0.4000	0.3380	0.4030	0.1100	0.1400	0.7330	0.7100	0.6400	0.8100
30.0	0.3000	0.4400	0.2570	0.4440	0.1400	0.2700	1.0750	1.0200	1.1650	1.1500
40.0	0.3400	0.3900	0.1650	0.3880	0.0600	0.3300	1.4250	1.2150	1.4200	1.5700
50.0	0.3700	0.3800	0.0070	0.3000	0.0700	0.3900	1.5100	1.4100	1.4450	1.3900
60.0	0.2700	0.3500	-0.1300	0.2040	-0.0500	0.3100	1.2250	1.1750	1.2800	1.1150
70.0	0.1100	0.2500	-0.1700	0.1500	-0.2300	0.1600	0.9700	0.9200	1.0300	0.8550
80.0	-0.1900	0.0500	-0.2230	0.1160	-0.4200	0.0100	0.5900	0.6200	0.7400	0.5650
90.0	-0.4400	-0.1600	-0.3650	-0.2080	-0.2300	-0.2500	0.3400	0.3000	0.4000	0.3250
100.0	-0.7700	-0.4500	-0.4860	-0.4790	-0.7100	-0.4200	0.0300	0.0600	0.0600	-0.0750
110.0	-0.8600	-0.6800	-0.6510	-0.7270	-0.8500	-0.4600	-0.3700	-0.3400	-0.3700	-0.3750
120.0	-1.0900	-1.0300	-1.000	-0.9450	-0.9300	-0.6800	-0.6700	-0.7200	-0.6750	-0.6400
130.0	-1.3400	-1.3100	-1.1150	-0.9940	-1.100	-0.7300	-0.9700	-0.9850	-0.8400	-0.9400
140.0	-1.2800	-1.3200	-1.0890	-1.0160	-0.9200	-0.6400	-0.9100	-0.9700	-0.8650	-0.9400
150.0	-0.0700	-1.1200	-0.9440	-0.9390	-0.6500	-0.0900	-0.7650	-0.7700	-0.6730	-0.8200
160.0	-0.8000	-0.8400	-0.6660	-0.6600	-0.5400	-0.2800	-0.4000	-0.6300	-0.5500	-0.6150
170.0	-0.4500	-0.4600	-0.3310	-0.3300	-0.2100	-0.1100	-0.2150	-0.3400	-0.3050	-0.3800
180.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

(Cm=10m/0.5 ρ AyLW²)

θ	L-01	L-02	T-03	T-04	T-08	T-11	P-05	P-06	P-07	P-08
0.0	0.8100	0.7780	1.0380	0.8280	1.0600	0.8150	0.9400	0.6850	0.7000	0.6300
10.0	0.8050	0.6815	0.8160	0.6190	1.0706	0.7971	0.9500	0.7370	0.8680	0.7500
20.0	0.8959	0.8846	0.9050	0.7170	1.0123	0.7792	1.0110	0.7670	0.8150	0.8660
30.0	0.9202	0.9017	0.8400	0.6500	0.9773	0.8556	0.8760	0.7900	0.8100	0.8400
40.0	0.8392	0.8293	0.6780	0.6590	0.8883	0.8020	0.9050	0.6210	0.6370	0.6820
50.0	0.6990	0.6333	0.7190	0.5210	0.8300	0.7205	0.7500	0.6810	0.6860	0.6520
60.0	0.6367	0.5547	0.5050	0.3560	0.6477	0.4600	0.6500	0.6370	0.6190	0.6450
70.0	0.4269	0.5345	0.1340	0.1340	0.4240	0.4148	0.5770	0.4700	0.4570	0.4210
80.0	0.4131	0.4193	0.1010	0.0270	0.1357	0.1565	0.4390	0.4000	0.3970	0.3890
90.0	0.2414	0.2474	0.0820	0.2160	0.0933	-0.0080	0.3500	0.3430	0.3350	0.3460
100.0	0.0300	0.1050	0.0160	0.1440	-0.1470	-0.0400	0.1750	0.2710	0.1300	0.1370
110.0	-0.2580	-0.3090	-0.2020	-0.0530	-0.6000	-0.1740	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
120.0	-0.4870	-0.3430	-0.3650	-0.3070	-0.6590	-0.3910	-0.1850	-0.1880	-0.1870	-0.2020
130.0	-0.7080	-0.3900	-0.5400	-0.4940	-0.9770	-0.5050	-0.3940	-0.3060	-0.2990	-0.3690
140.0	-0.8410	-0.6730	-0.7650	-0.5050	-1.1150	-0.5810	-0.5790	-0.5400	-0.5230	-0.6270
150.0	-0.8660	-0.7970	-0.8390	-0.6140	-1.3250	-0.6900	-0.7300	-0.7210	-0.7440	-0.7130
160.0	-0.9660	-0.8090	-0.8860	-0.6460	-1.2910	-0.8360	-0.7390	-0.8140	-0.7710	-0.8640
170.0	-0.8560	-0.7470	-0.9290	-0.6550	-1.1080	-0.6700	-0.8520	-0.7900	-0.8690	-0.9390
180.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

(Cy=ry/0.5 ρ AyLW²)

θ	L-01	L-02	T-03	T-04	T-08	T-11	P-05	P-06	P-07	P-08
0.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
10.0	0.1400	0.1450	0.1390	0.1280	0.0600	0.0390	0.1730	0.1630	0.1420	0.1740
20.0	0.3220	0.3310	0.2230	0.2670	0.1400	0.1130	0.3910	0.3750	0.3500	0.3940
30.0	0.5340	0.5400	0.3890	0.3530	0.2500	0.2510	0.6460	0.6160	0.5950	0.6380
40.0	0.7380	0.7390	0.5080	0.5320	0.3660	0.4410	0.9260	0.8300	0.7940	0.8600
50.0	0.9490	0.8910	0.6280	0.6300	0.5360	0.5990	0.9770	0.8360	0.8630	0.9930
60.0	1.0520	0.9660	0.7230	0.7100	0.6760	0.7480	1.1510	1.0750	1.0720	1.0550
70.0	1.0670	1.0490	0.7660	0.7440	0.8420	0.4750	1.2570	1.1540	1.1470	1.1330
80.0	1.1480	1.0990	0.7830	0.7630	0.9250	0.9360	1.1910	1.2010	1.2100	1.2710
90.0	1.1750	1.0950	0.7710	0.8000	0.9630	0.9980	1.3410	1.2650	1.2630	1.2430
100.0	1.1270	1.0530	0.7730	0.7940	0.8560	0.9330	1.2310	1.2000	1.2990	1.2590
110.0	1.0370	1.0020	0.7760	0.7620	0.8300	0.8490	1.0820	1.1240	1.1330	1.1360
120.0	0.9170	0.9700	0.7940	0.7130	0.7320	0.6780	1.0050	1.0420	1.0580	1.0870
130.0	0.8430	0.8860	0.7330	0.6370	0.5900	0.5500	0.8930	0.9690	0.9540	0.9940
140.0	0.7150	0.7580	0.6080	0.5380	0.4390	0.3930	0.7170	0.7960	0.8000	0.8400
150.0	0.5480	0.6230	0.4450	0.4220	0.3100	0.2450	0.5800	0.6120	0.6120	0.6710
160.0	0.3740	0.4340	0.2600	0.2530	0.1730	0.1230	0.3960	0.4000	0.3860	0.4350
170.0	0.1740	0.2050	0.0790	0.0830	0.0670	0.0340	0.1240	0.1240	0.1540	0.2180
180.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

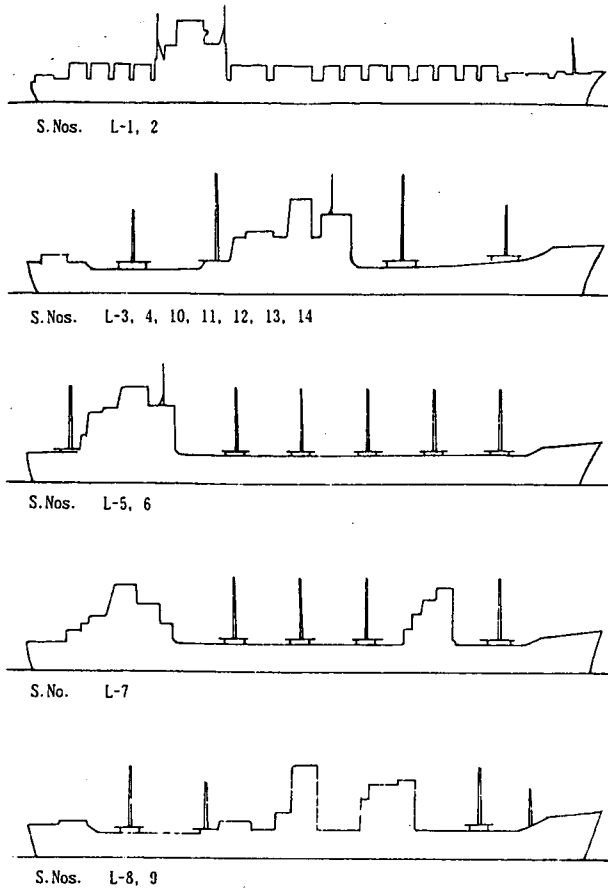


Fig.1-(1/3) Ship profile (liner)

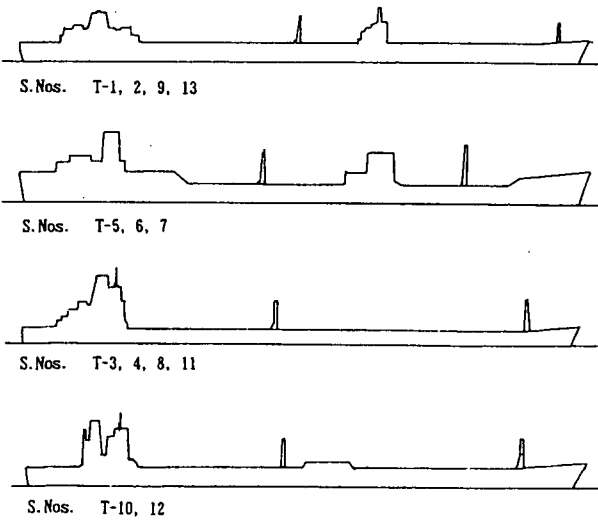


Fig.1-(2/3) Ship profile (tanker)

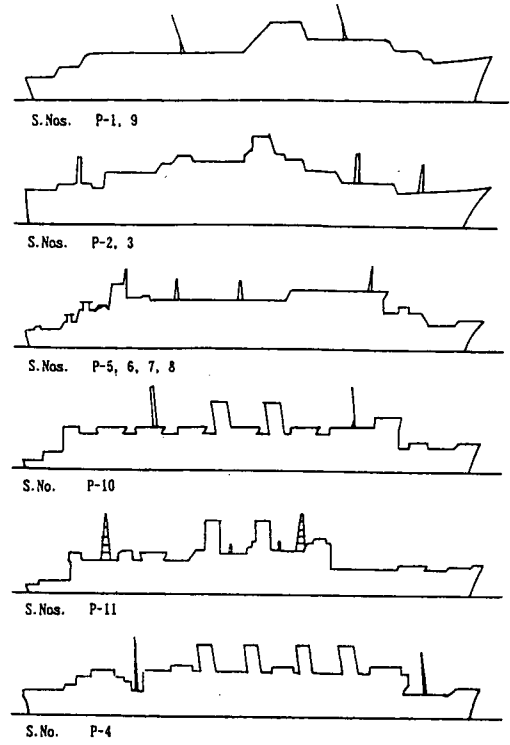


Fig.1-(3/3) Ship profile (passenger)

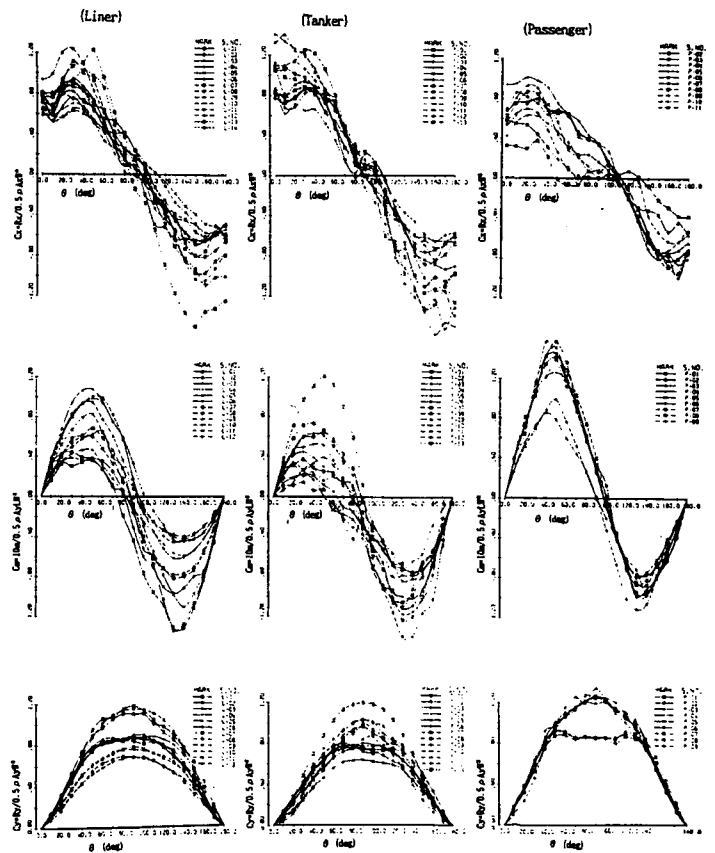


Fig.2 Sampled wind force coefficients

て、正面風圧抵抗係数  $C_x$ 、側面風圧抵抗係数  $C_y$  および船体中心まわりの風圧モーメント係数  $C_m$  の形で相対風向毎に示す。

なお、各係数の定義は下記の通りである。

$$C_x = R_x / 0.5 \rho A_x W^2$$

$$C_y = R_y / 0.5 \rho A_y W^2$$

$$C_m = 10m / 0.5 \rho A_y L W^2$$

$R_x$  : 正面風圧抵抗 ( $Kg$ )

$R_y$  : 側面風圧抵抗 ( $Kg$ )

$m$  : 船体中心まわり風圧モーメント ( $Kg \cdot m$ )

$W$  : 相対風速 ( $m/sec$ )

$\rho$  : 空気密度 ( $Kg \cdot sec^2/m^4$ )

これらの資料は、船研の風洞水槽における実験の結果<sup>1)</sup>およびハンブルグ大学における von B. Wagner による風洞実験の結果<sup>2)</sup>を中心として、これらにその他の研究結果<sup>3)4)5)6)</sup>を加えたものから成っており、サンプルの大きさは、ライナ型 14、タンカ型 13、客船型 11 の計 38 である。

実験時のレイノズル数は  $2 \times 10^6$  前後である。レイノズル数の差の影響はないとする。また、実験の方法は実験施設毎に異なるが、その差の影響は無視し得るものとする。

### 3. 風圧力係数の表示法

正面風圧抵抗係数  $C_x$ 、側面風圧抵抗係数  $C_y$ 、船体中心まわりの風圧モーメント係数  $C_m$  は、いずれも、まず相対風向  $\theta$  の関数である。それらの関数の形と、水面上船体形状との相関を明かにすることが今回の研究の主課題である。

Fig.2 から分かる様に、それらの関数を表示するには、 $\theta$  の三角級数が適している。そこで、各係数  $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_m$  を次式で表示することにする。

$$\left. \begin{aligned} C_x &= \sum_{i=0}^5 C_{xi} \cos(i\theta) \\ C_y &= \sum_{i=1}^3 C_{yi} \sin(i\theta) \\ C_m &= \sum_{i=1}^3 C_{mi} \sin(i\theta) \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

$C_y$ 、 $C_m$  については、相対風向  $\theta$  に対する変化が比較的単純であるために、 $3\theta$  の頂までで十分精度良く近似できる。 $C_x$  については、 $\theta$  が 0 度および 180 度の付近において複雑な変化をするために、精度良く近似するためには、 $5\theta$  の頃まで必要である。

### 4. 水線上船体形状の表示法

水線上船体形状と風圧力係数との相関を明確にするために、まず水線上船体形状を定量的に表示する必要

がある。このために Table 1 に示す無次元のパラメータを導入する。

これらのパラメータのみで水線上船体形状の特徴を十分に表現できるとは必ずしも言えないが、全船にて共通に入手可能な資料の中から、Table 1 に示すパラメータを選ぶ。また、これらのパラメータの全てを解析に使用する必要はなく、これらの中でたがいに独立なもののみを使えば良い。

Table 3 および Fig.3 に各パラメータ間の相関を示す。この中でたがいに強い相関のみられるパラメータの集合としては、 $(A_y/A_x, H_y/H_x)$  と  $(A_y/L^2, A_y/B \cdot L, A_x/B^2, A_x/B \cdot L)$  とがある。

したがって、たがいに独立なパラメータは、上記 2 種の集合の中からの各 1 個と、 $L/B$  および  $X_g/L$  の計 4 個となる。

一方、定量的な取り扱いが困難と思われた船種については、Fig.3 における  $A_y/L^2$  の分布状態と船種との関係を見ればわかる様に、 $A_y/L^2$  の値で区分することができる。

### 5. 三角級数係数の回帰式による表示

式 (3.1) の三角級数の各係数  $C_{xi}$  ( $i=0 \sim 5$ )、 $C_{yi}$ 、 $C_{mi}$  ( $i=1 \sim 3$ ) を、前記の 4 個の水線上船体形状を表すパラメータを説明変数として、線型回帰式で表示する。

各パラメータとこれらの係数との単相関および各パラメータの分布状態を Table 3 および Fig.4 に示す。Table 3 に、平均値・標準偏差・相関係数を示す。Fig.4 に、三角級数の主要な各係数と特に関係が強いパラメータとの相関を示す。

今回の回帰式では、説明変数として、 $L/B$ 、 $X_g/L$ 、 $A_y/A_x$ 、 $A_y/L^2$  を使用する。この場合、 $(A_y/A_x, H_y/H_x)$  の集合の中のいずれを用いても結果に大差がなく、また  $(A_y/L^2, A_y/B \cdot L, A_x/B^2, A_x/B \cdot L)$  の集合においても同様である。後者の集合の中では、 $A_y/L^2$  が有限幅翼のアスペクト比に相当している事を考慮して、このパラメータを用いる。

また、各係数の説明変数として前記の 4 個のパラメータを全て使用する必要はないので、重要度の低いものは回帰式から除去する。

回帰式作成の一例として、 $C_x$  の主要成分の係数  $C_{x1}$  について以下に示す。その説明変数として、 $L/B$ 、 $A_y/L^2$  および  $A_y/A_x$  が考えられる。これらによる回帰式は、その項数を順次増加して行くと次の様に変化する。なお、\*印は推定値である事を示す。

#### (1) 単項の場合

$$C_{x1}^* = 1.82 - 0.128 (L/B)$$

$$C_{x1}^* = 1.221 - 5.032 (A_y/L^2)$$

Table 3 Correlation coefficient, mean value and deviation

	MEAN	DEV.	L/B	Ay/Ax	Ax/BL	Ax/B <sup>2</sup>	Ay/BL	Ay/L <sup>2</sup>	Hy/Hx	Xg/L
L/B	7.410	0.690	*	0.300	0.329	0.418	0.129	-0.176	-0.262	-0.265
Ay/Ax	4.615	0.799	0.329	*	0.437	0.511	0.791	0.667	0.820	-0.535
Ax/BL	0.109	0.024	0.010	0.437	*	0.909	0.890	0.889	0.493	-0.443
Ax/B <sup>2</sup>	0.808	0.188	0.418	0.511	0.909	*	0.849	0.718	0.318	-0.514
Ay/BL	0.512	0.168	0.129	0.791	0.890	0.849	*	0.950	0.763	-0.564
Ay/L <sup>2</sup>	0.069	0.024	-0.176	0.667	0.889	0.718	0.950	*	0.826	-0.466
Hy/Hx	0.625	0.105	-0.262	0.820	0.493	0.318	0.763	0.826	*	-0.403
Xg/L	0.517	0.032	-0.265	-0.535	-0.443	-0.514	-0.564	-0.466	-0.403	*
Cx <sub>0</sub>	0.055	0.059	-0.031	0.265	0.251	0.174	0.313	0.356	0.321	0.124
Cx <sub>1</sub>	0.871	0.259	-0.333	-0.445	-0.490	-0.575	-0.580	-0.475	-0.259	0.375
Cx <sub>2</sub>	-0.054	0.064	0.458	-0.117	-0.422	-0.187	-0.360	-0.508	-0.403	0.329
Cx <sub>3</sub>	-0.025	0.081	-0.053	0.633	0.162	0.119	0.473	0.450	0.631	-0.323
Cx <sub>4</sub>	-0.007	0.042	-0.307	0.285	-0.120	-0.232	0.076	0.140	0.418	0.187
Cx <sub>5</sub>	-0.070	0.044	-0.286	0.058	0.102	-0.012	0.126	0.205	0.235	0.239
Cy <sub>1</sub>	0.948	0.184	-0.116	0.540	0.605	0.484	0.677	0.709	0.638	-0.270
Cy <sub>2</sub>	-0.002	0.022	0.047	0.203	0.311	0.296	0.296	0.292	0.213	-0.225
Cy <sub>3</sub>	-0.009	0.052	0.428	0.332	0.460	0.586	0.477	0.351	0.115	-0.372
Cm <sub>1</sub>	-0.064	0.308	0.268	0.641	0.590	0.626	0.720	0.650	0.540	-0.778
Cm <sub>2</sub>	0.799	0.210	-0.024	0.676	0.671	0.579	0.788	0.794	0.733	-0.440
Cm <sub>3</sub>	-0.024	0.067	0.323	0.509	0.269	0.375	0.450	0.347	0.348	-0.737

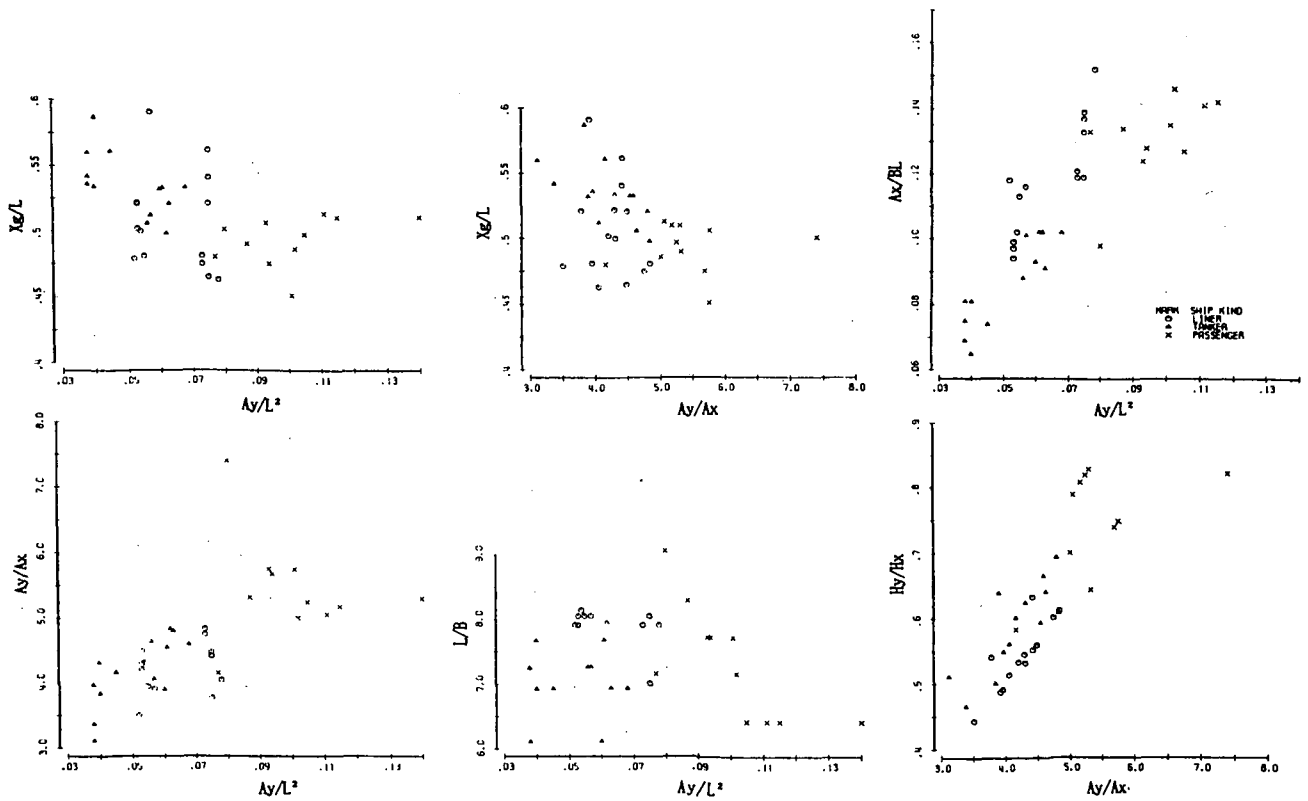


Fig.3 Correlation between above-water ship form parameters

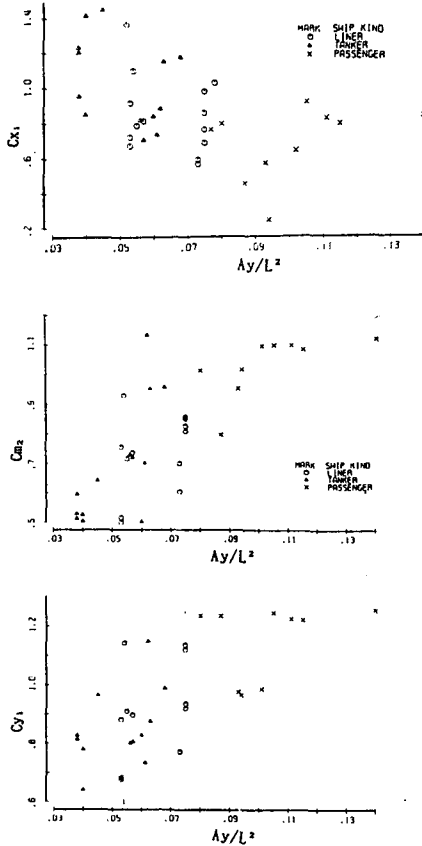


Fig.4 Correlation between  $C_{x1}$ ,  $C_{m2}$ ,  $C_{y1}$  and above-water ship form parameter

$$C_{x1}^* = 1.548 - 0.149 (A_y/A_x)$$

(2) 2項の場合

$$C_{x1}^* = 2.58 - 6.087 (A_y/L^2) - 0.174 (L/B)$$

$$C_{x1}^* = 2.12 - 0.089 (L/B) - 0.129 (A_y/A_x)$$

$$C_{x1}^* = 1.49 - 0.087 (A_y/A_x) - 3.236 (A_y/L^2)$$

(3) 3項の場合

$$C_{x1}^* = 2.593 - 0.183 (L/B) - 6.55 (A_y/L^2) + 0.0194 (A_y/A_x)$$

これらの結果から、 $A_y/A_x$ の重要性は、その係数の値から判断して、低いと考えられるので、これを回帰式からはずす。

その結果、 $C_{x1}$ の説明変数としては、 $L/B$ 、 $A_y/L^2$ のみを用いる。他の係数についても、同様の手順によりその回帰式の形を決める。

以下に、このようにして求めた各係数の回帰式を示す。

(1)  $C_x$ の3角級数係数

$$\left. \begin{aligned} C_{x0}^* &= -0.0358 + 0.925 A_y/L^2 + 0.0521 X_g/L \\ C_{x1}^* &= 2.58 - 6.087 A_y/L^2 - 0.1735 L/B \\ C_{x2}^* &= -0.97 + 0.978 X_g/L + 0.0556 L/B \\ C_{x3}^* &= -0.146 + 0.0728 A_y/A_x - 0.0283 L/B \\ C_{x4}^* &= 0.0851 + 0.0212 A_y/A_x - 0.0254 L/B \\ C_{x5}^* &= 0.0318 + 0.287 A_y/L^2 - 0.0164 L/B \end{aligned} \right\} (5.1)$$

(2)  $C_y$ の3角級数係数

$$\left. \begin{aligned} C_{y1}^* &= 0.509 + 4.904 A_y/L^2 + 0.022 A_y/A_x \\ C_{y2}^* &= 0.0208 + 0.230 A_y/L^2 - 0.075 X_g/L \\ C_{y3}^* &= -0.357 + 0.943 A_y/L^2 + 0.0381 L/B \end{aligned} \right\} (5.2)$$

(3)  $C_m$ の3角級数係数

$$\left. \begin{aligned} C_{m1}^* &= 2.65 + 4.634 A_y/L^2 - 5.876 X_g/L \\ C_{m2}^* &= 0.105 + 5.306 A_y/L^2 + 0.0704 A_y/A_x \\ C_{m3}^* &= 0.616 - 1.474 X_g/L + 0.0161 L/B \end{aligned} \right\} (5.3)$$

上記の回帰式による三角級数係数の推定値と、実験結果を近似した三角級数係数との比較を、Table 4-(1/2),(2/2)に示す。

表中のRMSEは、各係数における平均2乗誤差の平方根であり、夫々回帰式による推定の精度および3角級数による近似の精度を示す。

この結果から、正面風圧抵抗については $C_{x1}$ 、側面風圧抵抗については $C_{y1}$ 、また風圧モーメントについては $C_{m2}$ が主要な3角級数係数であり、各風圧力係数をこの3角級数係数の成分だけで表示しても良いほどであることが分かる。この主要成分について見ると、回帰式による推定精度は約20%と言える。

Fig.5-(1/4), (2/4), (3/4), (4/4)に、回帰式による風圧力係数の推定の例を示す。コンテナ船・貨物船・タンカ・カーキャリアについて、夫々Full, Ballast状態での実験結果・実験結果の三角級数近似・回帰式による推定結果を比較して示す。



Table 4-(1/2) Coefficients in Fourier series for  $C_x$

S.No.	$C_{x_0}$	$C_{x_0}^*$	$C_{x_1}$	$C_{x_1}^*$	$C_{x_2}$	$C_{x_2}^*$	$C_{x_3}$	$C_{x_3}^*$	$C_{x_4}$	$C_{x_4}^*$	$C_{x_5}$	$C_{x_5}^*$
L-01	0.046	0.062	0.986	0.911	-0.108	-0.051	-0.088	-0.021	0.059	0.001	-0.069	-0.062
L-02	0.104	0.061	0.862	0.911	-0.111	-0.071	-0.059	-0.068	0.021	-0.012	-0.052	-0.062
L-03	0.064	0.040	0.789	0.853	0.050	-0.053	-0.091	-0.085	-0.088	-0.035	-0.103	-0.084
L-04	0.031	0.058	0.691	0.731	-0.014	-0.068	-0.041	-0.046	-0.015	-0.024	-0.079	-0.079
L-05	0.037	0.048	0.815	0.840	0.072	0.055	-0.158	-0.088	-0.027	-0.036	-0.061	-0.084
L-06	0.034	0.063	0.767	0.731	0.019	0.027	-0.111	-0.051	-0.014	-0.025	-0.073	-0.079
L-07	0.115	0.040	0.918	0.865	0.011	-0.013	-0.121	-0.046	-0.048	-0.024	-0.143	-0.085
L-08	0.111	0.039	0.723	0.888	-0.040	-0.040	-0.025	-0.063	-0.011	-0.026	-0.044	-0.083
L-09	0.093	0.056	0.595	0.767	-0.073	-0.066	0.030	-0.023	-0.012	-0.015	-0.054	-0.077
L-10	0.065	0.040	0.674	0.888	-0.007	-0.020	-0.046	-0.056	-0.024	-0.024	-0.025	-0.083
L-11	0.135	0.057	0.571	0.767	-0.086	-0.060	0.002	-0.016	-0.041	-0.013	-0.021	-0.077
L-12	0.115	0.040	1.102	0.843	-0.057	-0.029	-0.004	-0.061	-0.008	-0.030	-0.162	-0.086
L-13	-0.106	0.037	1.369	0.894	-0.135	-0.062	-0.271	-0.114	-0.063	-0.041	-0.108	-0.083
L-14	-0.052	0.060	1.038	0.736	-0.168	-0.078	-0.126	-0.074	-0.088	-0.030	-0.067	-0.075
T-01	0.089	0.027	1.205	1.093	-0.027	-0.043	-0.074	-0.062	-0.080	-0.015	-0.129	-0.076
T-02	0.061	0.042	0.821	0.983	-0.019	-0.072	-0.013	-0.013	-0.017	-0.001	-0.167	-0.071
T-03	0.044	0.028	0.955	1.093	-0.035	-0.037	0.014	-0.105	-0.025	-0.027	-0.083	-0.076
T-04	0.042	0.044	0.708	0.977	-0.037	-0.066	0.027	-0.055	0.035	-0.013	-0.098	-0.071
T-05	0.072	0.032	0.852	1.008	0.012	0.031	-0.119	-0.083	-0.043	-0.028	-0.021	-0.083
T-06	0.126	0.048	0.738	0.880	-0.057	-0.022	-0.037	-0.031	-0.021	-0.013	-0.052	-0.076
T-07	0.043	0.047	0.886	0.827	-0.044	-0.041	-0.015	-0.018	0.026	-0.014	-0.109	-0.081
T-08	-0.063	0.029	1.233	1.290	-0.038	-0.082	-0.095	-0.092	0.064	-0.004	-0.069	-0.058
T-09	-0.065	0.029	1.420	1.136	-0.084	-0.062	-0.002	-0.027	0.091	0.001	-0.048	-0.070
T-10	-0.060	0.035	1.455	1.106	-0.031	-0.036	0.010	-0.039	-0.015	-0.003	-0.003	-0.069
T-11	0.072	0.047	0.842	1.156	-0.002	-0.110	-0.051	-0.034	-0.028	0.013	-0.067	-0.051
T-12	0.018	0.055	1.183	0.966	-0.028	-0.063	-0.038	-0.007	-0.009	0.007	0.008	-0.062
T-13	-0.003	0.050	1.155	0.996	-0.131	-0.075	-0.040	0.009	0.075	0.011	-0.042	-0.064
P-02	0.019	0.076	0.244	0.673	-0.005	-0.077	0.148	0.051	-0.021	0.010	-0.025	-0.068
P-03	0.008	0.070	0.455	0.617	0.020	-0.031	0.114	0.008	0.019	-0.012	-0.040	-0.079
P-04	0.064	0.064	0.801	0.527	-0.040	0.023	0.055	0.138	0.050	0.013	-0.116	-0.093
P-05	0.187	0.087	0.922	0.829	-0.124	-0.127	0.012	0.056	0.013	0.034	-0.039	-0.043
P-06	0.134	0.097	0.798	0.768	-0.183	-0.114	0.008	0.050	0.016	0.032	-0.044	-0.040
P-07	0.119	0.094	0.830	0.793	-0.173	-0.111	0.038	0.042	0.002	0.030	-0.004	-0.042
P-08	0.110	0.120	0.842	0.616	-0.175	-0.114	0.013	0.060	0.004	0.035	-0.049	-0.033
P-09	0.021	0.077	0.575	0.679	0.018	-0.047	0.143	0.056	-0.016	0.012	-0.073	-0.068
P-10	0.028	0.084	0.646	0.720	-0.096	-0.097	0.023	0.019	0.015	0.010	-0.128	-0.056
P-11	0.021	0.060	0.768	0.873	-0.079	-0.103	0.052	-0.045	-0.042	0.008	-0.133	-0.063
RMSE		0.055		0.199		0.048		0.060		0.036		0.041

with \* : by regression analysis      without \* : from measured result

Table 4-(2/2) Coefficients in Fourier series for  $C_y$  and  $C_m$

S.No.	$C_{y_1}$	$C_{y_1}^*$	$C_{y_2}$	$C_{y_2}^*$	$C_{y_3}$	$C_{y_3}^*$	$C_{m_1}$	$C_{m_1}^*$	$C_{m_2}$	$C_{m_2}^*$	$C_{m_3}$	$C_{m_3}^*$
L-01	1.137	0.974	0.024	-0.002	-0.022	-0.019	-0.538	-0.181	0.829	0.814	-0.104	-0.069
L-02	1.121	0.960	-0.016	-0.001	0.018	-0.019	-0.376	-0.063	0.854	0.769	-0.194	-0.039
L-03	0.910	0.865	0.029	-0.003	0.015	0.001	0.345	0.079	0.716	0.675	0.024	0.036
L-04	0.937	0.975	-0.015	0.003	0.046	0.020	0.256	0.266	0.860	0.819	0.061	0.060
L-05	0.897	0.874	0.013	-0.010	0.019	0.003	-0.382	-0.558	0.737	0.683	-0.099	-0.126
L-06	0.921	0.974	0.020	-0.004	0.024	0.020	-0.158	-0.304	0.811	0.815	-0.075	-0.083
L-07	0.881	0.867	0.030	-0.006	0.011	-0.001	-0.114	-0.165	0.756	0.703	-0.015	-0.023
L-08	0.683	0.861	0.009	-0.005	-0.021	-0.006	0.071	-0.054	0.500	0.682	0.055	0.003
L-09	0.774	0.971	-0.006	0.002	0.004	0.013	0.222	0.198	0.701	0.827	0.085	0.043
L-10	0.677	0.863	-0.008	-0.006	-0.004	-0.006	-0.098	-0.171	0.516	0.689	0.002	-0.026
L-11	0.773	0.973	-0.003	0.002	0.003	0.013	0.159	0.162	0.605	0.833	0.089	0.034
L-12	1.143	0.868	-0.028	-0.004	-0.040	0.004	0.144	-0.037	0.931	0.695	-0.007	0.010
T-01	0.814	0.782	0.014	-0.011	0.032	-0.045	-0.216	-0.323	0.529	0.586	-0.062	-0.058
T-02	0.801	0.885	0.016	-0.004	0.017	-0.028	-0.060	-0.063	0.729	0.729	-0.036	-0.013
T-03	0.827	0.769	-0.037	-0.011	0.012	-0.045	-0.526	-0.358	0.595	0.544	-0.111	-0.066
T-04	0.806	0.877	-0.004	-0.004	0.005	-0.027	-0.336	-0.094	0.721	0.693	-0.091	-0.022
T-05	0.641	0.789	-0.030	-0.014	-0.012	-0.027	-0.373	-0.613	0.503	0.587	-0.103	-0.126
T-06	0.735	0.908	-0.007	-0.005	-0.015	-0.007	-0.048	-0.199	0.702	0.749	-0.043	-0.046
T-07	1.149	0.919	0.000	-0.002	-0.078	0.004	0.064	0.012	1.137	0.775	0.051	0.010
T-08	0.812	0.763	-0.021	-0.012	-0.138	-0.088	-0.556	-0.464	0.512	0.526	-0.048	-0.111
T-09	0.779	0.800	-0.031	-0.010	-0.061	-0.055	-0.331	-0.302	0.525	0.621	-0.060	-0.060
T-10	0.965	0.821	-0.039	-0.011	-0.048	-0.050	-0.595	-0.437	0.642	0.637	-0.082	-0.100
T-11	0.828	0.889	0.019	-0.005	-0.160	-0.067	-0.214	-0.198	0.502	0.698	-0.014	-0.070
T-12	0.990	0.943	-0.029	-0.003	-0.027	-0.029	-0.472	-0.166	0.961	0.790	-0.127	-0.058
T-13	0.876	0.923	-0.031	-0.004	-0.063	-0.033	-0.269	0.119	0.955	0.778	-0.127	-0.041
P-01	0.989	1.131	0.004	0.010	0.093	0.032	0.359	0.468	1.100	1.046	0.064	0.075
P-02	0.968	1.095	0.007	0.007	0.092	0.025	0.328	0.295	1.020	1.005	0.073	0.040
P-03	1.236	1.052	-0.001	0.004	-0.007	0.040	0.011	0.174	0.799	0.942	-0.027	0.027
P-04	1.235	1.064	0.001	0.002	-0.029	0.063	0.299	0.077	1.017	1.051	0.041	0.023
P-05	1.248	1.139	0.062	0.008	-0.020	-0.013	0.348	0.217	1.103	1.032	0.014	-0.013
P-06	1.225	1.187	0.005	0.009	-0.011	-0.004	0.280	0.187	1.091	1.080	-0.044	-0.033
P-07	1.228	1.164	-0.005	0.008	-0.021	-0.008	0.376	0.150	1.104	1.051	0.002	-0.037
P-08	1.253	1.312	-0.006	0.015	0.016	0.020	0.297	0.302	1.130	1.222	0.032	-0.033
P-09	0.978	1.091	-0.001	0.004	0.076	0.024	-0.073	0.108	0.956	1.004	-0.025	-0.006
RMSE		0.133		0.021		0.041		0.166		0.122		0.043

with \* : by regression analysis      without \* : from measured result

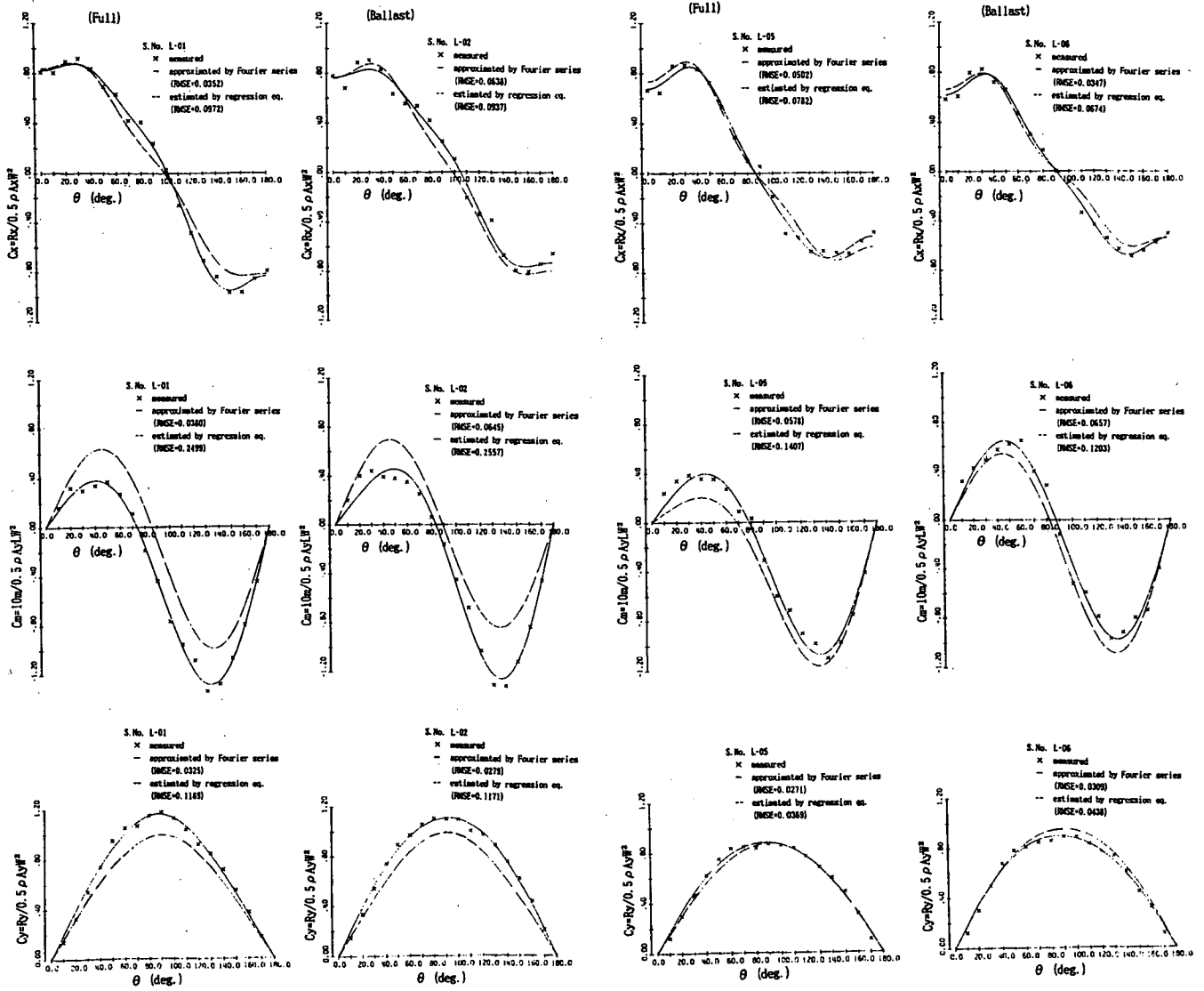


Fig.5-(1/4) Comparison between estimation and measurement (container ship)

Fig.5-(2/4) Comparison between estimation and measurement (cargo ship)

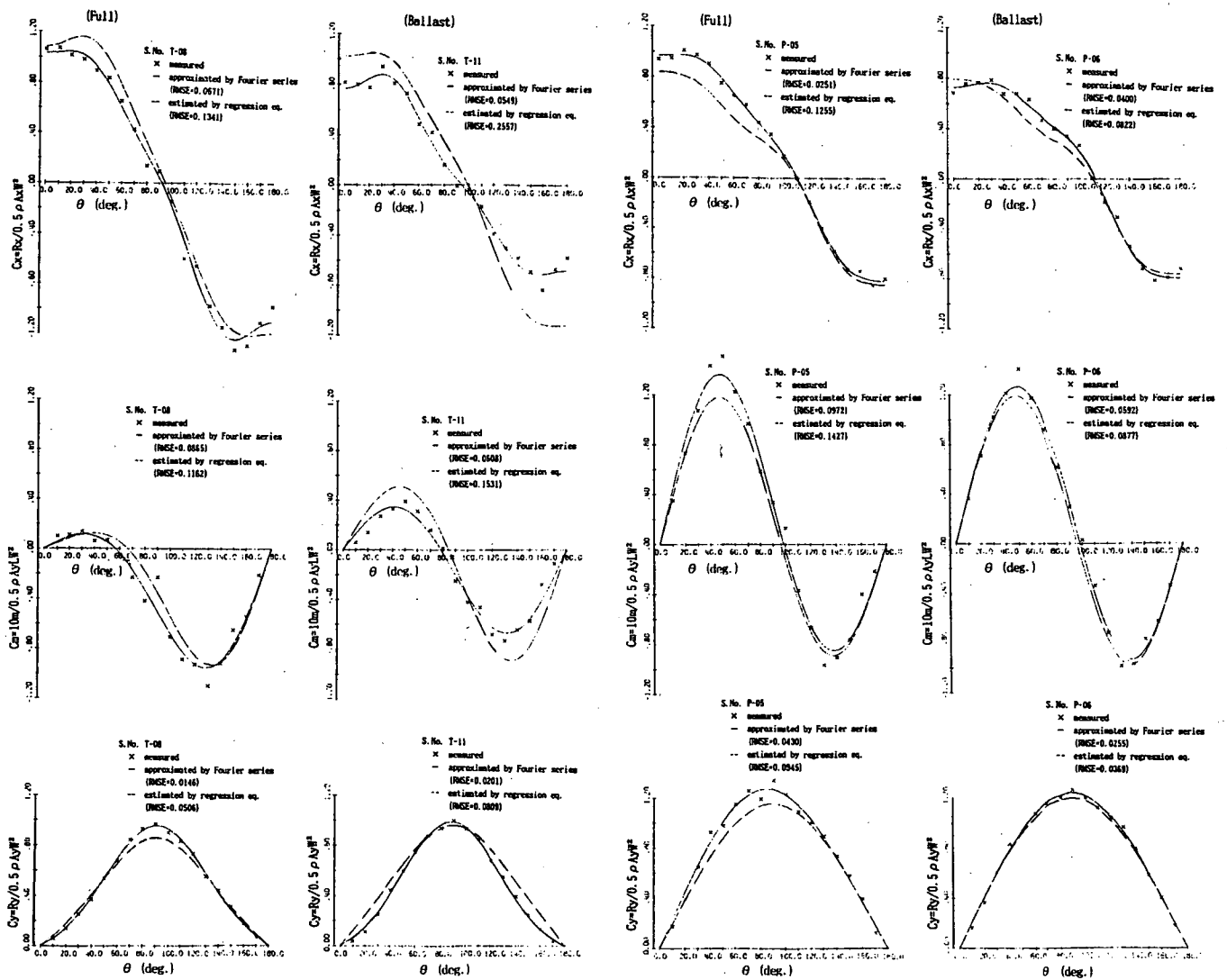


Fig.5-(3/4) Comparison between estimation and measurement (tanker)

Fig.5-(4/4) Comparison between estimation and measurement (car carrier)

## 6. 結言

- (1) 任意の形状の船の風圧力を短時間に精度良く推定する方法として、下記を基本とする風圧力係数の推定式を、多様な形状の船の実験結果を基にして導いた。
  - 風圧力係数を、相対風向を変数とする三角級数で表示する
  - 三角級数の各係数を、水線上船体形状を表わすパラメータ  $A_y/L^2$ ,  $A_y/A_x$ ,  $X_g/L$ ,  $L/B$  の回帰式で表示する
- (2) 上記のパラメータは夫々物理的な意味を持っており、そして上記三角級数の主要な係数である  $C_{x1}$ ,  $C_{y1}$ ,  $C_{m2}$  と上記パラメータとの間には強い相関があることから、(1) の方法は妥当と考えられる。
- (3) (1) の推定式の基になっている 38 の実験結果は多様な形状を持つ船の資料から成り立っているため、本推定式は広範囲の形状の船に適用できる。

## 謝 辞

本論文は、昭和46年の関西造船協会春季講演会において講演されたが、著者の不手際により、関西造船協会誌に掲載されないままになっていた。この間にSR208報告書<sup>7)</sup>(1993)に引用される等使われることが多く、また現在見直しても古いから使えないということはなく、今後もその利用価値があると思われる。そこで、広く使えるようにしておけば、まだ協会誌読者の役に立つに違いないと考えて、協会誌への掲載を関西造船協会にお願いした。その結果、今回掲載が実現することになったものです。

ここに至るまでにお世話になった関西造船協会の関係者一同に厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 辻豊治, 高石敬史, 菅信, 佐藤辰二: “船体に働く風圧力に関する模型試験”, 船研報告第7巻第5号, 1970, P.13
- 2) Wagner, B.: “Windkrafte an Ueberwasserschiffen”, JSTG 61. Band 1967, P.226
- 3) Shearer, K.D.A. and Lynn, W.M.: “Wind Tunnel Tests on Models of Merchant Ships”, ISP Vol.8 No.78, 1961, P.62
- 4) Hughes, G.: “Model Experiments on the Wind Resistance of Ships”, TINA Vol.35, 1930, P.310
- 5) 木下昌雄, 岡田正次郎: “船体上部構造物の空気抵抗”, 船舶 Vol.35.11, 1960, P.101

- 6) 荒木浩, 花岡達郎: “鉄道連絡船に関する風洞試験”, 船論第84号, 1949, P.61
- 7) SR208: “速力試運転時の波浪影響修正法に関する研究”, 成果報告書, 造研資 No.398, 1993