

船体に働く風圧力の推定

正員 藤原 敏文* 正員 上野 道雄*
正員 二村 正*

Estimation of Wind Forces and Moments acting on Ships

by Toshifumi Fujiwara, *Member* Michio Ueno, *Member*
Tadashi Nimura, *Member*

Summary

Various reports have been given on the study of wind forces and moments acting on ships by using wind tunnel experiments over a long time. Utilizing these results, Yamano et al.⁴⁾ and Isherwood⁵⁾ proposed estimation methods of wind force coefficients by linear multiple regression model in the 1970's. After that, many kinds of ships have been built all over the world, for example VLCC, PCC, LNG, and so on. The estimation methods lack reliability when wind forces and moment of such kinds of ships are predicted, since these new types of ships aren't considered in the methods.

Recently Yoneta et al.⁶⁾ proposed a estimation method consisting of several force components, which is called a physical-mathematical model. However, the applicability of this method isn't enough discussed.

In the present paper, we wish to report on a new and simpler method of estimating wind force and moment coefficients acting on ships by using stepwise method which comes under linear multiple regression analysis. This estimation method was obtained after considering various ships more than previous estimation methods and the effect of wind velocity profile that some reports⁷⁾⁸⁾ have already pointed out its importance in the experimental condition. As there is no way to estimate heel moment caused by strong wind, a estimation method of it is also presented in order to make use of strict simulation of maneuverability for the first time.

This method has been found to possess high practical value compared with previous estimation methods.

1. 緒 言

風、波、潮流といった外乱による操縦性能への影響を正確に評価することは、船舶が安全に航行する上で重要な問題である。ここでは外乱の1つである風について取り上げる。

操縦性能における風の影響については、強風下での操縦限界や港湾域で低速に航行する場合など多くの研究がなされてきた。風圧力の影響を求めるには、水面上の船体形状

が複雑なために理論的推定が行えないことから、風洞等での実験データを利用する機会が多い¹⁾²⁾³⁾。実験を行うことなく風圧力を推定する手段としては、実験データの回帰分析による推定法が、山野ら⁴⁾、Isherwood⁵⁾により提案されている。近年においては、水面下の船体に働く流体力を求める数学モデルを元にした風圧力の推定法が、米田ら⁶⁾によって提案されている。この推定法においても、水面上の船体に働く流体力の各成分を実験データの回帰分析から求めている。

近年、タンカーに関しては大型化し、船舶の用途の広がりからPCC、LNG船等の新形式の船が建造されている。しかし、山野、Isherwoodの推定法は、1970年より前に建造された船舶の実験データを使い、それ以後の船舶は対象になっていない。そのような船舶の風圧力の推定を行った場

* 船舶技術研究所運動性能部

合には、信頼性が低いことが考えられる。

また、従来の推定法は実験での風速分布の影響について十分に考慮を行っていない。過去に行われた実験においては、様々な風速分布の状態で計測が行われている。海上風を想定した状態と一様風中の実験とでは、当然結果に違いが見られることから⁷⁸⁾、回帰分析を行う場合には実験データに含まれる風速分布の影響を考慮に入れる必要がある。

一方、旋回時等の横傾斜による操縦運動への影響については、従来から指摘されているが⁹⁾、強風による横傾斜の影響については、ほとんど検討されていないように思われる。従来の風圧力の推定法では、前後力、横力、回頭モーメント係数についてのみ推定式が提案されている。風による傾斜モーメントを推定する手段が無いことから、強風時の横傾斜を推定することができるなら、船体運動をより正確に検討することができる。

本研究においては、精度良く風圧力の推定を行うために、過去に計測された様々な実験データを利用して、回帰分析により新しい風圧力推定式の提案を行った。初めに、できる限り近年就航している船舶の風洞実験データの収集を行い、異なった実験状態で行われているデータについては同一条件で扱うために、実験データに及ぼす風速分布の影響を補正した。次に、船体形状を表現する主要寸法で構成される説明変数を用いて、重回帰分析により推定式の作成を行った。推定精度向上のため従来の推定法では考慮されていない多くの説明変数について取り上げ、それらの項の選択にあたっては統計解析手法により合理的に推定式の作成を行った。前後力、横力、回頭モーメント係数の推定式の提案を行うとともに、今まで推定手法の無かった傾斜モーメント係数の推定式も提案した。

また、本推定法の精度を検証するために Isherwood, 山野, 米田の推定結果との比較を行い、本推定法が実験データに対して他の方法より精度良く推定できることを確認した。

2. 風圧力の実験データ

2.1 収集を行った実験データとその種類

回帰分析により推定式を求めるために、実験を行った模

型船の形状が明確な風圧力データの収集を行った。その結果として、用いた実験データは、著者らの VLCC の実験¹¹⁾¹²⁾、および過去に行われた参考文献 7), 13) ~17) である。前後力、横力、回頭モーメントのそれぞれの風圧係数に関して 68 隻のデータ、傾斜モーメント係数に関して 41 隻のデータを収集することができた。収集した文献の実験データ数、および実験での風速分布の状態を Table 1 に示す。

収集したデータについて、船種ごとに整理し Table 2 に示す。「タンカー (Tanker)」、「貨物船 (Cargo)」、「コンテナ船 (Container)」、「客船 (Passenger)」、「漁船 (Fishing)」の 5 つに分類し、この中に含まれない船舶 (LNG 船 (球形タンク)、調査船、艦艇、高速艇、タグボート) については「その他 (Others)」として 1 つにまとめている。なお、カーフェリー、PCC については、船体形状を考慮し、「客船」に分類した。収集した 68 隻の船舶について Fig. 1 に示す水面上の船体形状を表す主要寸法を求め、それらの最大、最小、平均値を示す。但し、 C , C_{BR} については、船体中心を基準とし、船首方向を正とする。

また、収集したデータについて、横軸に船の全長を、縦軸に代表的な主要寸法の無次元値をとり Fig. 2 に示す。各図中には、山野, Isherwood の推定法に利用されたサンプルの最大値、最小値の範囲も併せて示す。Isherwood のサンプルの最大船長については参考文献の公表年と大型タンカーの建造年表より推測している。Isherwood のサンプルは主要寸法の比で見ると、今回のサンプルと範囲は大きく異なるが、船長が 300 m を越える VLCC をはじめ、大型船の実験データが無い。また、公表年からして大型の PCC, LNG 船等の実験データも含まれていない。今回収集した実験データには、近年建造された船舶についてのデータも多く含まれる上、山野, Isherwood の推定法に用いられたサンプルと比べても広範囲な船型について収集を行っていることがわかる。

収集した実験データの前後力 F_x 、横力 F_y 、回頭モーメント N 、傾斜モーメント K の各風圧力係数、風圧モーメント係数は次式のように整理を行った。

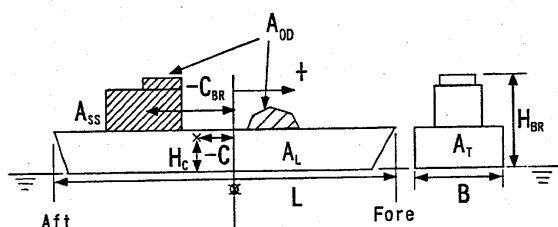
$$C_x = F_x / (qA_r) \quad (1)$$

Table 1 Experimental results used for present estimation method with experimental conditions of the wind velocity profile

Author	Published	Samples	Experimental condition	[A] Thickness of boundary layer (m)	[B] Mean height of the model (m)	R [A]/[B]	q/q _m
B.Wagner	1967	15	uniform	—	0.085	—	1.04
G.Aertssen	1968	1	above sea	0.60	0.217	2.76	1.27
T.Tuji	1970	15	uniform	0.05	0.138	0.36	1.16
C.Aage	1971	9	above sea	0.05	0.043	1.16	1.30
Y.Sezaki	1980	1	—	—	—	—	—
W.Blendermann	1996	25	uniform	0.02	0.125	0.16	—
T.Fujiwara	1997	2	above sea	0.30	0.100	3.00	1.37

Table 2 Data on samples of ships used in present estimation method

	Tanker	Cargo	Container	Passenger	Fishing	Others
Profiles (example)						
Samples	16	8	13	14	7	10
L (m) max	351.40	160.88	216.40	195.00	75.17	274.00
L (m) min	50.00	141.10	118.67	84.74	25.05	33.92
L (m) mean	273.07	154.87	184.33	156.86	39.66	114.89
B (m) max	58.00	21.34	32.20	32.20	11.04	47.20
B (m) min	8.36	18.50	18.13	13.30	5.80	8.31
B (m) mean	41.02	19.81	25.79	22.55	6.90	18.96
A _T (m ²) max	1803.93	440.53	857.06	898.21	108.75	1827.12
A _T (m ²) min	60.02	302.08	385.87	155.56	24.10	53.49
A _T (m ²) mean	965.85	375.15	654.19	528.11	43.03	472.61
A _L (m ²) max	8055.11	1951.56	3773.51	4693.94	446.96	8313.74
A _L (m ²) min	178.25	1192.46	1455.37	764.54	72.20	141.76
A _L (m ²) mean	3940.26	1553.85	2705.12	2962.82	149.34	2059.25
A _{OD} (m ²) max	807.71	534.38	2505.00	2679.00	147.59	3417.00
A _{OD} (m ²) min	40.00	271.00	333.00	271.00	15.00	63.94
A _{OD} (m ²) mean	566.22	401.68	1009.55	1483.37	38.35	895.04
C (m) max	6.60	0.55	-0.86	6.78	1.20	7.95
C (m) min	-27.90	-14.72	-13.10	-8.98	-2.77	-3.99
C (m) mean	-13.54	-5.67	-6.39	-1.90	-0.24	2.23
C _{BR} (m) max	-17.40	-0.19	-40.40	10.97	8.60	14.40
C _{BR} (m) min	-139.70	-61.56	-68.70	-12.20	-5.80	-91.40
C _{BR} (m) mean	-100.71	-34.50	-46.86	-3.03	0.85	-11.98
H _{BR} (m) max	38.00	25.00	30.50	30.70	11.03	45.80
H _{BR} (m) min	9.85	14.20	19.80	12.40	4.60	8.40
H _{BR} (m) mean	27.37	19.44	25.64	22.72	6.29	18.89
H _c (m) max	15.24	8.04	11.07	14.85	3.78	17.07
H _c (m) min	3.03	5.35	7.11	4.91	1.65	3.07
H _c (m) mean	8.18	6.62	8.71	9.80	2.12	7.05



- L : Length over all (m)
- B : Breadth (m)
- A_T : Transverse projected area (m²)
- A_L : Lateral projected area (m²)
- A_{OD} : Lateral projected area of superstructure (Ass) and LNG tanks, containers etc. on the deck (m²)
- C : Distance from midship section to center of lateral projected area (m)
- C_{BR} : Distance from midship section to center of the Ass (m)
- H_{BR} : Height to top of superstructure (Bridge) (m)
- H_c : Height to center of lateral projected area (m)

Fig. 1 Definitions of a characteristic parameter which expresses form of a ship

$$C_Y = F_Y / (qA_L) \quad (2)$$

$$C_N = N / (qLA_L) \quad (3)$$

$$C_K = K / (qA_L H_L) \quad (4)$$

但し,

$$q = (1/2)\rho U^2, \quad H_L = A_L / L$$

ここで, U は代表風速, ρ は空気密度である。実験データの座標系を Fig. 3 に示す。回頭モーメントは船体中心回りのモーメントで, 傾斜モーメントは, 喫水を基準としている。

2.2 風速分布の影響に対する修正

収集した実験データはそれぞれ風速分布の状態が異なることから, データを統計処理する場合, その影響について補正する必要がある。一例として Fig. 4 に, 著者らが行った VLCC 風洞実験¹¹⁾ の各風圧係数の計測結果を示す。図中に示す, 2 種類の異なる風速分布で実験を行った。どちらの実験状態も風速分布に境界層の存在する場合であるが, 境界層外の一様流中での風速 $U=25.4$ m/s で実験値の整理を行った。風速分布の形状が異なるため Condition A と B では, 2 割程度も差があり, 風速分布の違いが実験値に大きな影響を与えていることがわかる。境界層の無い一様風中での実験結果と Condition A を比べた場合には, さらに計測結果の差が大きくなることが予測できる。しかし, Fig. 4 から風速分布の形状の違いは実験値の定性的傾向には大きな影響を与えないことがわかる。このことは Aertssen らによっても報告されており⁷⁾, 実験データを統一的に扱

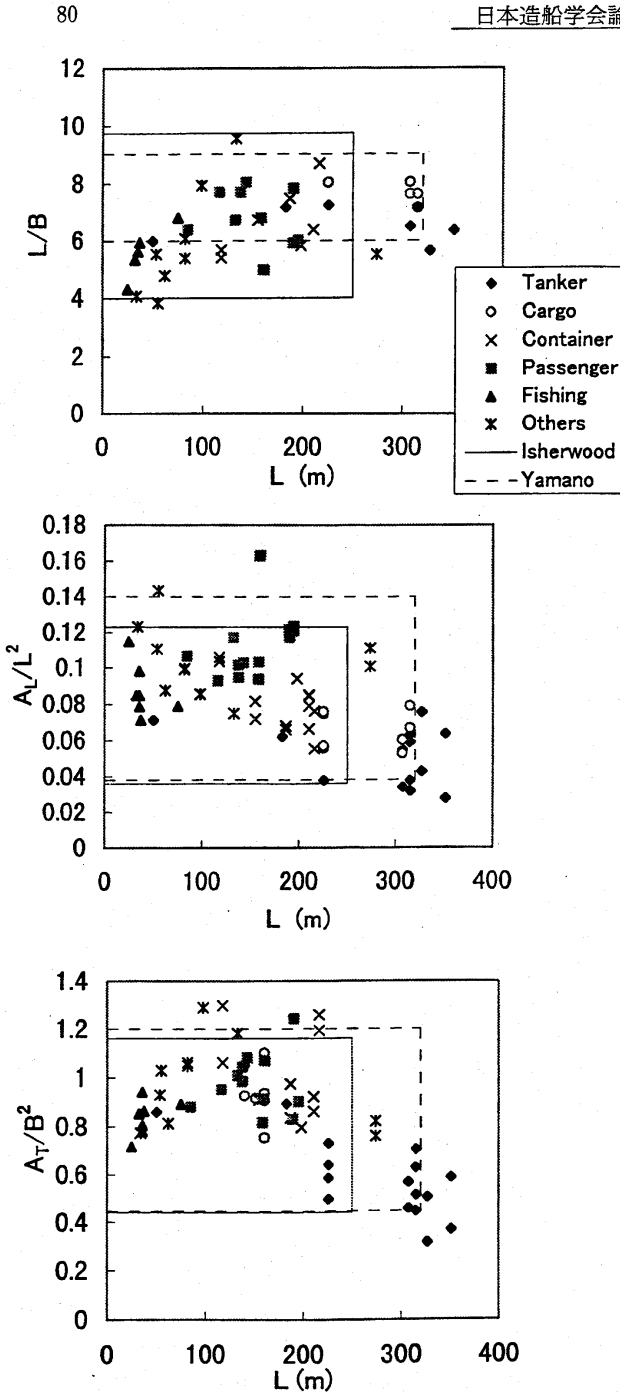


Fig. 2 Distribution of independent variables versus ship length

うためには風速分布の影響を補正する比例定数を求めればよいこととなる。

今回収集した実験データに関する風速分布の状態を Table 1 に示す。表中には、実験データの公表年、実験データ数、風速分布の状態、実験時の境界層厚さ [A], 各船の H_L の平均 [B], 境界層厚さに対する船舶の平均高さの比 R, および一様流速と H_L までの平均風速の動圧比 q/q_m を

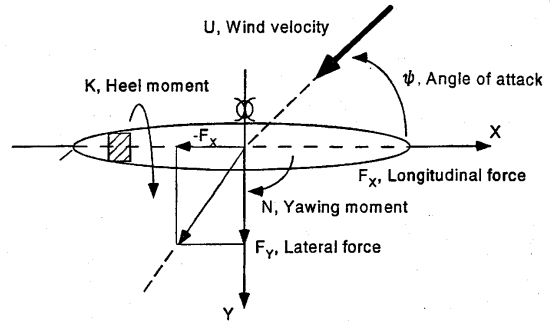


Fig. 3 Coordinate system

平均値で示す。

実験状態については、境界層の薄い一様風中で行った実験が 3 通り、海上風を想定し境界層の発達した状態で行った実験も 3 通りである。実験データ数に関しては、一様風中で計測した場合が多い。個々の実験について見てみると、Wagner の実験は $q/q_m=1.04$ であることから、境界層厚さが非常に薄い状態で実験が行われていることがわかる。辻の実験に関しては、R 値、 q/q_m から、Wagner や Blendermann の実験に比べて境界層の発達した状態で実験を行っていることがわかる。瀬崎による実験は、詳細な記述が無いため実験状態について不明であるが、一様風中での実験として取り扱うこととする。

実験状態の風速分布の影響に対する補正法としては W. Blendermann の方法を挙げるができる⁹⁾。海上風を想定して実験を行った結果と、一様風中での実験結果とを同一条件で扱うために、約 30 隻の実験結果から有効動圧を次式のように定義している。

Wind forces and moments	Dynamic pressure
F_x	$q = q_{HL}$ (5)
F_y, N, K	$q = k_q \cdot q_m + (1 - k_q) \cdot q_{HL}$ (6)

ここで、 q_{HL} は側面平均高さでの動圧を示す。 k_q は実験により求められたパラメータであり、参考文献 8) を引用して Fig. 5 に示す。横軸は風速分布形状と船体の平均高さから決定されるパラメータ q_m/q_{HL} である。各実験に用いられた風速分布形状から各模型船に対する q_{HL} , q_m , k_q を求め、(5), (6) 式に従い実験状態の動圧を決定する。この動圧の補正法は、著者らの実験により既に有効であることを確認した¹¹⁾。

このことから、境界層の発達した風速分布を使って行った実験データについては、(5), (6) 式を用いて補正を行った。Wagner, Blendermann の実験に関しては境界層が薄いことから一様風中での実験と見なし、実験データの補正は行っていない。

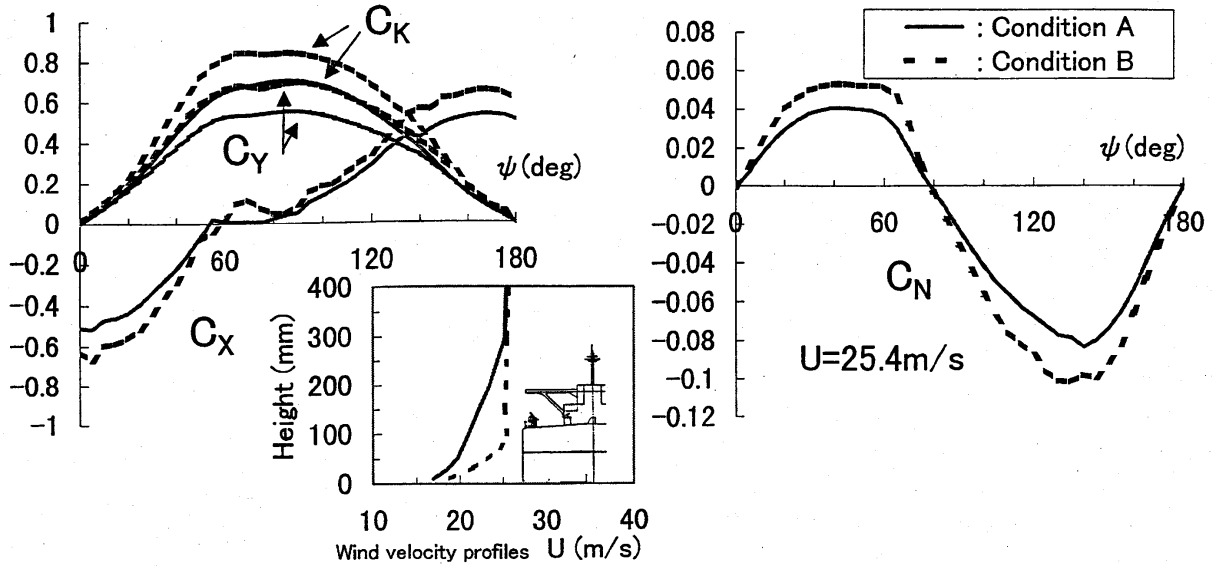


Fig. 4 Experimental results on wind force coefficients of VLCC (Ballast condition)

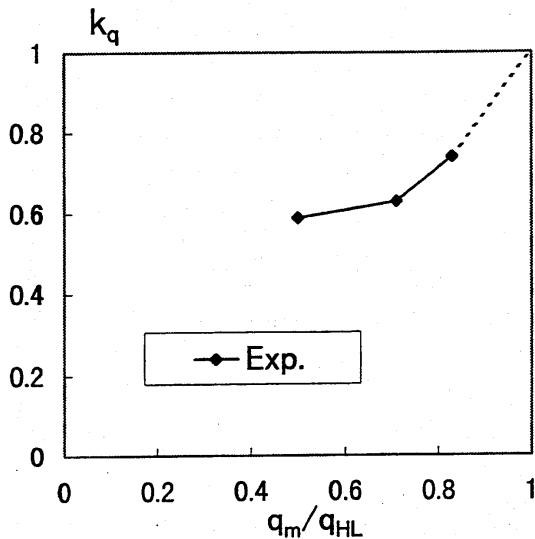


Fig. 5 Factor k_q by Blendermann's experiments⁸⁾

3. 風圧力推定式

前章での風速分布の影響を補正した実験データを用いて、次の手順で風圧力推定式を求めることにする。初めに、実験データに対して風向角をパラメータとした級数展開で表現し、簡略化のために実験データの分布形状を表現するために有意な項のみを選択する。次に、その有意と判断された項の各係数に対して、主要寸法の無次元値を説明変数にした重回帰式で表現する。各係数を表現するための最適な説明変数の組み合わせについては回帰分析の一方法である逐次法¹⁸⁾を用いて求めることにする。

3.1 風圧力データの数式表現

3.1.1 有意な項の選択

まず、各実験データをそれぞれの風圧係数の物理的性質を考慮し、風向角 ψ を変数として次式で表現する。各係数については最小2乗法により求める。

$$C_x = \sum_{i=0}^5 X_i \cos i\psi \quad (7)$$

$$C_y = \sum_{i=1}^5 Y_i \sin i\psi \quad (8)$$

$$C_N = \sum_{i=1}^5 N_i \sin i\psi \quad (9)$$

$$C_K = \sum_{i=1}^5 K_i \sin i\psi \quad (10)$$

風圧係数の分布形状をできるだけ反映させるために、5次の項まで取ることにした。但し、5次までの級数展開で実験データを表現すれば、十分な精度で表せることを別途確認している。

ただ、このままでは機械的に5次の項まで取ったにすぎず、実験データを表現するにあたって無意味な項を加えている可能性がある。その上、項の係数をさらにいくつかの説明変数を用いて表すことから係数の数が多くなり、利用する場合に手間を要する。そのために、できるだけ少ない項で精度を落とすことなく簡潔に表現するため、以下の手順に従い(7)~(10)式において実験データを表すための有意な項を選択する。

回帰モデルの予測値を次式のように表現する。

$$C_j = b_0 + \sum_{i=1}^p b_i x_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

$$x_{ij} = \begin{cases} \cos i\psi_j & (C_x) \\ \sin i\psi_j & (C_y, C_N, C_K) \end{cases} \quad (12)$$

ここで b_i は回帰係数, x_{ij} は説明変数, p は説明変数の数, n はデータ数を示す。但し, ここでは $p=5$ であり, 各船舶の実験データは, 風圧係数ごとに $0 \sim 180^\circ$ までの 10° ごとのデータ 19 点で与えられている。項の有意性に関しては t 検定で判断する¹⁸⁾¹⁹⁾。自由度 $n-p-1$ の t 分布における信頼区間 $100\alpha\%$ の限界値を $t_\alpha(n-p-1)$ とすると,

$$Pr(b_i/\sqrt{V_i} \geq t_\alpha(n-p-1)) = \alpha \quad (13)$$

が成立する。 $\sqrt{V_i}$ は b_i の標準偏差を表し, 統計的に標本から計算される値である。ここでは 95% 信頼区間である $\alpha=0.05$ とした。 $b_i/\sqrt{V_i}$ が t_α より大きい, すなわち t 分布における確率が 0.05 よりも小さい場合には, 有意であると判断する。各実験データごとの $b_i/\sqrt{V_i}$ を計算し, 68 隻分の有意確率の平均 α' を求め, $\alpha=0.05$ との比較を行い Fig. 6 に示す。横軸は項の番号 i を示す。図中の $\alpha' \leq 0.05$ を満たす, (7)~(10)式の有意であると判定された項を示すと以下のようになる。

$$C_x = X_0 + X_1 \cos \phi + X_3 \cos 3\phi + X_5 \cos 5\phi \quad (14)$$

$$C_y = Y_1 \sin \phi + Y_3 \sin 3\phi + Y_5 \sin 5\phi \quad (15)$$

$$C_N = N_1 \sin \phi + N_2 \sin 2\phi + N_3 \sin 3\phi \quad (16)$$

$$C_K = K_1 \sin \phi + K_2 \sin 2\phi + K_3 \sin 3\phi + K_5 \sin 5\phi \quad (17)$$

3.1.2 項の選択による推定精度への影響

ここでは, 簡略化を行った(14)~(17)式の有効性について確認を行った。全ての項を含んだ(7)~(10)式, および(14)~(17)式で実験データを表現した場合の標準誤差を求め, 風圧係数の絶対値が最大である実験値 ($|C|_{\max}$) に対する割合を計算した。なお, これ以降本報告では推定値と計測値(目標値)の差の2乗和を標本数で除した値の平方根を標準誤差と呼ぶことにする。結果を Fig. 7 に示し, 横軸

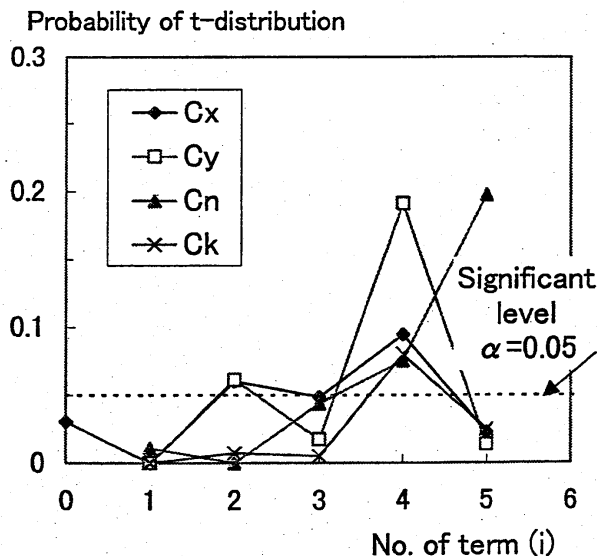


Fig. 6 Significance tests on linear multiple regression model of experimental results

にはそれぞれの風圧係数について級数展開するために用いた項数を, 縦軸の標準誤差の割合については, 68 隻分の平均を示している。 C_y, C_N, C_K については(7)~(10)式のように5項全てを使って実験データを表現した場合と, (14)~(17)式のように統計的に有意な項を選択した場合とでは1%程度の違いであり, 両者の間にはほとんど差が見られないことがわかる。 C_x についても3%異なるだけであった。 C_x が他の風圧係数と比べて差が大きい原因としては, 90° 付近の複雑な形状に対応できていないことが挙げられる。しかしながら, 前後力において 90° 付近の風圧係数は比較的小さく, 操縦性能への影響も小さいと考えられる。

以上, 実験データに対して(7)~(10)式と(14)~(17)式を用いた場合の差が小さいことを確認したので, 推定式を求めるために(14)~(17)式を用いることにした。

3.2 主要寸法を説明変数に用いた重回帰分析

3.2.1 説明変数

船型の特徴により実験結果が大きく異なることから, 船の主要寸法, および形状から推定式を求めるために, 適切なパラメータを説明変数として用いる必要がある。

収集したデータの中で代表的な船型について風圧係数の一例を Fig. 8 に示す。 C_x について見てみると客船の分布傾向に他船とは異なる特徴が見られる。客船は C_y に関しても 90° 付近で2つの山形になる特徴が見られ, これらの風圧係数の分布形状は直方体における縦横比が大きい場合の傾向と類似している¹⁷⁾。回頭モーメントに関しては大型タンカーの満載状態に特徴が見られ, 船尾に配置されたブリッジの影響によって, どの風向角に対しても負のモーメントが作用している。LNG 船, コンテナ船の満載状態での C_x の場合, 側面形状については箱型であることから, 実験結果の傾向が客船の結果に類似しているものと思われるが, その傾向はタンカー船型に近い。また, コンテナ船については, コンテナの積み具合による実験データの分布形

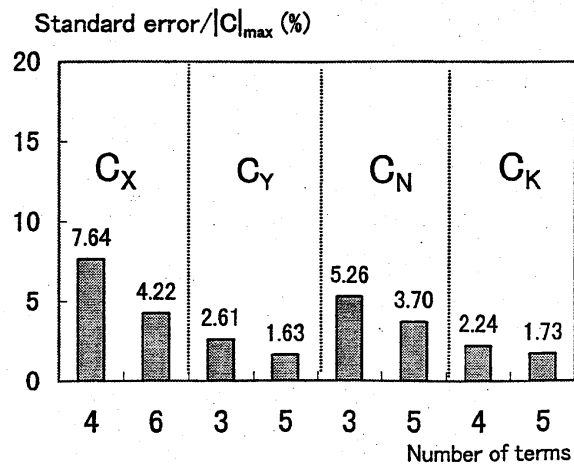


Fig. 7 Applicability on a trigonometrical series for wind force coefficients

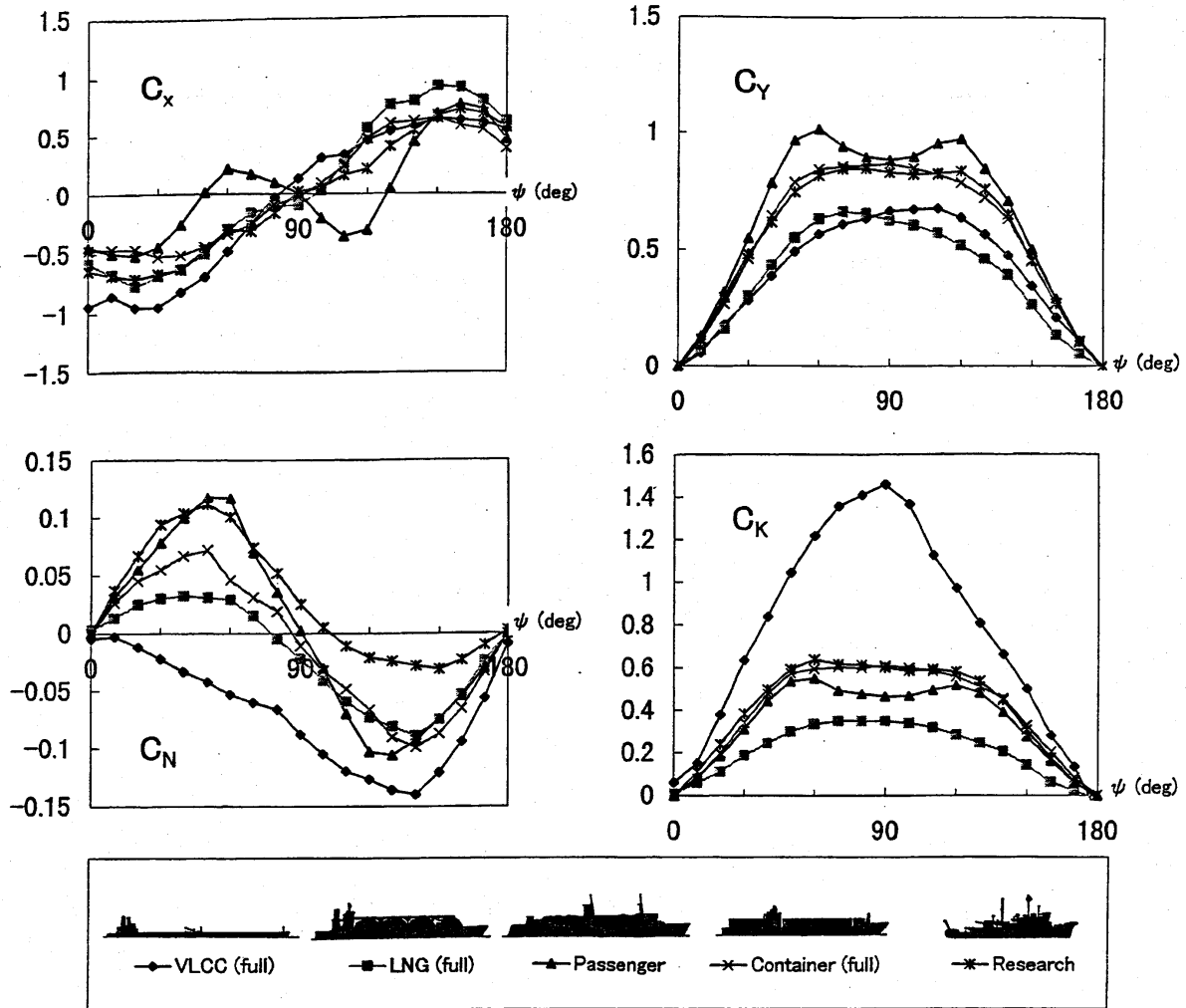


Fig. 8 Experimental results on wind force coefficients for some kinds of ships

状に与える影響は小さいことが計測されており¹⁷⁾,ブリッジの位置が1つの重要なパラメータになると考えられる。

Fig. 1には,説明変数に用いた,船の形状から決定できる主要寸法の一覧を示している。Fig. 8において示されたような船型ごとの特徴が反映されるように, C_{BR} というパラメータを用い,ある程度船種を判別できるようにしている。Isherwood は喫水上の側面の周辺長さ,マストやキングポストの数を説明変数に用いているが,これらのパラメータは利用者によって様々な値を取る可能性のある不安定な係数である。このような係数を用いないことにより,風圧力推定時の不確かさが減少するものと思われる。

Fig. 1 に示す主要寸法で構成される無次元値の組み合わせ19種,およびその逆数15種(C, C_{BR} が分母になる場合の組み合わせについては除く。)の総数34種の説明変数を用いることにした。参考までに逆数を除く19種の説明変数についての相関をTable 3に示す。

3.2.2 逐次法による重回帰分析

前節で取り上げた34種の説明変数を用いて(14)~(17)式の各係数を次の重回帰式で表す。

$$X_i = x_{i0} + \sum_{m=1}^{m_x} x_{im} P_{x_{im}} \quad (18)$$

$$Y_i = y_{i0} + \sum_{m=1}^{m_y} y_{im} P_{y_{im}} \quad (19)$$

$$N_i = n_{i0} + \sum_{m=1}^{m_n} n_{im} P_{n_{im}} \quad (20)$$

$$K_i = k_{i0} + \sum_{m=1}^{m_k} k_{im} P_{k_{im}} \quad (21)$$

但し, x_{im} 等は回帰係数, $P_{x_{im}}$ 等は説明変数である。 x_{im} 等表現するための最適な説明変数の数,および組み合わせを重回帰分析の一方法である逐次法を使って求める。この方法で説明変数の組み合わせを考えることにより,多重共線性を除くことができる。

重回帰式を求める際,その中の項が有意であるかどうかは

Table 3 Correlation table of non-dimensional independent variables

	A_T/L^2	A_L/L^2	A_{OD}/L^2	B/L	H_{BR}/L	H_C/L	C/L	C_{BR}/L	A_L/A_T	A_{OD}/A_L	A_T/B^2	A_T/LB	A_L/LB	H_{BR}/B	C/H_C	LH_C/A_L	$H_{BR}C/A_L$	LH_{BR}/A_L	BH_{BR}/A_T
A_T/L^2	1.00																		
A_L/L^2	0.73	1.00																	
A_{OD}/L^2	0.41	0.81	1.00																
B/L	0.78	0.38	0.10	1.00															
H_{BR}/L	0.88	0.75	0.45	0.56	1.00														
H_C/L	0.86	0.93	0.71	0.50	0.88	1.00													
C/L	0.41	0.36	0.19	0.29	0.42	0.41	1.00												
C_{BR}/L	0.52	0.56	0.40	0.25	0.54	0.58	0.77	1.00											
A_L/A_T	-0.37	0.32	0.49	-0.56	-0.21	0.08	0.05	0.09	1.00										
A_{OD}/A_L	0.16	0.53	0.90	-0.12	0.22	0.47	0.09	0.27	0.49	1.00									
A_T/B^2	0.33	0.57	0.49	-0.31	0.53	0.57	0.23	0.43	0.32	0.43	1.00								
A_T/LB	0.88	0.82	0.54	0.41	0.91	0.90	0.39	0.59	-0.12	0.32	0.73	1.00							
A_L/LB	0.32	0.84	0.79	-0.18	0.48	0.70	0.27	0.48	0.70	0.63	0.79	0.62	1.00						
H_{BR}/B	0.32	0.54	0.44	-0.26	0.65	0.57	0.25	0.41	0.29	0.37	0.92	0.68	0.73	1.00					
C/H_C	0.50	0.58	0.35	0.24	0.57	0.59	0.90	0.74	0.18	0.22	0.47	0.58	0.51	0.48	1.00				
LH_C/A_L	0.10	-0.35	-0.31	0.15	0.10	-0.01	-0.08	-0.09	-0.59	-0.12	-0.11	0.00	-0.45	-0.04	-0.19	1.00			
$H_{BR}C/A_L$	0.45	0.45	0.27	0.31	0.46	0.48	0.98	0.75	0.10	0.14	0.27	0.45	0.35	0.27	0.95	-0.17	1.00		
LH_{BR}/A_L	-0.26	-0.75	-0.69	-0.01	-0.21	-0.56	-0.26	-0.35	-0.67	-0.54	-0.41	-0.40	-0.79	-0.25	-0.49	0.62	-0.39	1.00	
BH_{BR}/A_T	-0.26	-0.40	-0.37	0.24	-0.15	-0.37	-0.10	-0.31	-0.20	-0.38	-0.70	-0.53	-0.54	-0.39	-0.29	0.12	-0.18	0.55	1.00

次に示す F 値がある値より大きいかどうかで判断することにする。以後、(18)式の場合を例に取ると、

$$F = x_{tm}^2 / V_{x_{tm}} \quad (22)$$

ここで $V_{x_{tm}}$ は x_{tm} の分散で、標本データから統計的に算出される値である。サンプル数が n の時、この F 値は自由度 $n - m_x - 1$ の F 分布に従うことが知られている。

まず初めに、目的変数 X_i に対して1つずつ説明変数 $P_{x_{tm}}$ を採用し、 F 値が最大(単相関の最大)である $P_{x_{tm}}$ を選択する。次に既に入っている変数に加えて、残りの変数を順番に選択し、 F 値の大きいものを採用する。それぞれの F 値を求め F 値の限界値 F_R との比較を行う。 F 値が F_R よりも大きい、すなわち回帰係数が0であるという仮説が棄却されるならば、その変数を加える。 F_R よりも小さい場合には、その変数を取り入れない。さらに残りの変数に対しても同様の作業を続け、 F_R を基準に取り入れる変数がなくなるまで変数の選択を行う。変数の相互関係により項の選択を行うたびに、全ての変数の F 値が変化することから、既に採用された説明変数が F_R に満たなく棄却されたり、再び採用されたりということも起こり得る。

変数の増減にあたっての限界値 F_R をここでは一般的によく用いられる $F_R = 2.0$ とする¹⁸⁾。収束するまで、項の選択を行い、最終的に有意であると判別された各係数は以下のようなになる。但し、定数項を除いて有意な項から順番に表記している。

C_X については、

$$X_0 = x_{00} + x_{01} \frac{BH_{BR}}{A_T} + x_{02} \frac{C}{H_C} + x_{03} \frac{A_{OD}}{L^2} \quad (23)$$

$$X_1 = x_{10} + x_{11} \frac{A_L}{LB} + x_{12} \frac{LH_C}{A_L} + x_{13} \frac{LH_{BR}}{A_L} + x_{14} \frac{A_{OD}}{A_L} + x_{15} \frac{A_T}{LB} + x_{16} \left(\frac{A_T}{L^2} \right)^{-1} + x_{17} \left(\frac{H_C}{L} \right)^{-1} \quad (24)$$

$$X_3 = x_{30} + x_{31} \left(\frac{LH_{BR}}{A_L} \right)^{-1} + x_{32} \frac{A_L}{A_T} + x_{33} \frac{LH_C}{A_L} + x_{34} \frac{A_{OD}}{A_L}$$

$$+ x_{35} \frac{A_{OD}}{L^2} + x_{36} \frac{C}{H_C} + x_{37} \frac{C_{BR}}{L} \quad (25)$$

$$X_5 = x_{50} + x_{51} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + x_{52} \frac{C_{BR}}{L} + x_{53} \frac{A_L}{LB} \quad (26)$$

C_Y については、

$$Y_1 = y_{10} + y_{11} \frac{C_{BR}}{L} + y_{12} \frac{C}{L} + y_{13} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + y_{14} \frac{C}{H_C} + y_{15} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} \quad (27)$$

$$Y_3 = y_{30} + y_{31} \frac{A_L}{LB} + y_{32} \frac{LH_C}{A_L} + y_{33} \frac{C_{BR}}{L} + y_{34} \left(\frac{H_{BR}}{B} \right)^{-1} + y_{35} \frac{A_{OD}}{A_L} + y_{36} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} \quad (28)$$

$$Y_5 = y_{50} + y_{51} \frac{A_L}{LB} + y_{52} \left(\frac{H_{BR}}{L} \right)^{-1} + y_{53} \frac{C_{BR}}{L} + y_{54} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1} + y_{55} \frac{C}{L} + y_{56} \frac{LH_C}{A_L} \quad (29)$$

C_N については、

$$N_1 = n_{10} + n_{11} \frac{C}{L} + n_{12} \frac{LH_C}{A_L} + n_{13} \left(\frac{A_L}{A_T} \right)^{-1} + n_{14} \frac{C}{H_C} + n_{15} \frac{A_L}{LB} + n_{16} \frac{A_T}{L^2} + n_{17} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1} + n_{18} \frac{C_{BR}}{L} \quad (30)$$

$$N_2 = n_{20} + n_{21} \frac{C_{BR}}{L} + n_{22} \frac{C}{L} + n_{23} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + n_{24} \frac{A_T}{B^2} + n_{25} \left(\frac{H_{BR}}{L} \right)^{-1} + n_{26} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} + n_{27} \frac{A_L}{LB} + n_{28} \frac{A_L}{L^2} \quad (31)$$

$$N_3 = n_{30} + n_{31} \frac{C_{BR}}{L} + n_{32} \left(\frac{BH_{BR}}{A_T} \right)^{-1} + n_{33} \frac{A_L}{A_T} \quad (32)$$

C_K については、

$$K_1 = k_{10} + k_{11} \frac{H_{BR}}{L} + k_{12} \frac{A_T}{LB} + k_{13} \frac{LH_C}{A_L} + k_{14} \frac{C}{L} + k_{15} \frac{C_{BR}}{L} + k_{16} \left(\frac{H_{BR}}{B} \right)^{-1} + k_{17} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1} + k_{18} \left(\frac{B}{L} \right)^{-1} \quad (33)$$

$$K_2 = k_{20} + k_{21} \left(\frac{H_{BR}}{B} \right)^{-1} + k_{22} \frac{A_T}{B^2} + k_{23} \left(\frac{LH_C}{A_L} \right)^{-1} + k_{24} \frac{C_{BR}}{L} + k_{25} \frac{H_{BR}C}{A_L} + k_{26} \left(\frac{B}{L} \right)^{-1} + k_{27} \left(\frac{A_L}{L^2} \right)^{-1} \quad (34)$$

$$K_3 = k_{30} + k_{31} \left(\frac{A_T}{B^2} \right)^{-1} + k_{32} \frac{C_{BR}}{L} + k_{33} \frac{H_C}{L} + k_{34} \frac{A_T}{LB} + k_{35} \left(\frac{A_L}{LB} \right)^{-1} + k_{36} \frac{A_{OD}}{L^2} \quad (35)$$

$$K_5 = k_{50} + k_{51} \left(\frac{LH_C}{A_L} \right)^{-1} + k_{52} \left(\frac{A_{OD}}{A_L} \right)^{-1} + k_{53} \left(\frac{A_L}{A_T} \right)^{-1} + k_{54} \left(\frac{B}{L} \right)^{-1} + k_{55} \frac{A_L}{LB} \quad (36)$$

各項の係数を Table 4 に示す。採用する項数が少なくな

るように、 $F_r=4.0$ とし同様の検討を行ったが、必要とする項数は 96 から 50 と減少するものの、推定精度が標準誤差で約 27% 大きくなる結果を得た。

他の推定式では、縦横比に相当する A_L/L^2 が揚力を表す説明変数としてよく用いられているが、今回の結果からは全風圧係数において A_L/L^2 が取り入れられた項数は、逆数も含めて 2 項のみである。Table 3 に示すように A_L/L^2 は $A_{OD}/L^2, H_C/L, A_T/LB, A_L/LB$ 等との相関が強い。他の説明変数との関係から、有意であると判断されることが少なかったことがわかる。

C_x の第 2 項 X_1 については、縦横比を表現する説明変数が多く選択されている。 Y_1 に関して見てみると側面積形状

Table 4 Each coefficient of independent variables

m=		0	1	2	3	4	5	6	7	8
C_x	x_{0m}	-0.330	0.293	0.0193	0.682					
	x_{1m}	-1.353	1.700	2.87	-0.463	-0.570	-6.640	-0.0123	0.0202	
	x_{3m}	0.830	-0.413	-0.0827	-0.563	0.804	-5.67	0.0401	-0.132	
	x_{5m}	0.0372	-0.0075	-0.103	0.0921					
C_y	y_{1m}	0.684	0.717	-3.22	0.0281	0.0661	0.298			
	y_{3m}	-0.400	0.282	0.307	0.0519	0.0526	-0.0814	0.0582		
	y_{5m}	0.122	-0.166	-0.0054	-0.0481	-0.0136	0.0864	-0.0297		
C_N	n_{1m}	0.299	1.71	0.183	-1.09	-0.0442	-0.289	4.24	-0.0646	0.0306
	n_{2m}	0.117	0.123	-0.323	0.0041	-0.166	-0.0109	0.174	0.214	-1.06
	n_{3m}	0.0230	0.0385	-0.0339	0.0023					
C_K	k_{1m}	3.63	-30.7	16.8	3.270	-3.03	0.552	-3.03	1.82	-0.224
	k_{2m}	-0.480	0.166	0.318	0.132	-0.148	0.408	-0.0394	0.0041	
	k_{3m}	0.164	-0.170	0.0803	4.92	-1.780	0.0404	-0.739		
	k_{5m}	0.449	-0.148	-0.0049	-0.396	-0.0109	-0.0726			

Table 5 Characteristic of estimation methods for wind force coefficients

	Present method	Isherwood	Yamano	Yoneta
Parameters	9	8	5	6
Total number of coefficients on C_x, C_y, C_N	66 96 (on C_x, C_y, C_N, C_K)	219	36	21
Number of samples	68	49	38	68
Samples of experimental results	Tanker Cargo Ship Container Ship Passenger Ship Fishing Boat Research Vessel Tug Boat LNG Carrier PCC Naval Vessel Speed Boat	Tanker Cargo Ship Passenger Ship Fishing Boat Research Vessel Tug Boat Hydrofoil etc.	Tanker Cargo Ship Container Ship Passenger Ship	Tanker Cargo Ship Container Ship Passenger Ship Fishing Boat etc.

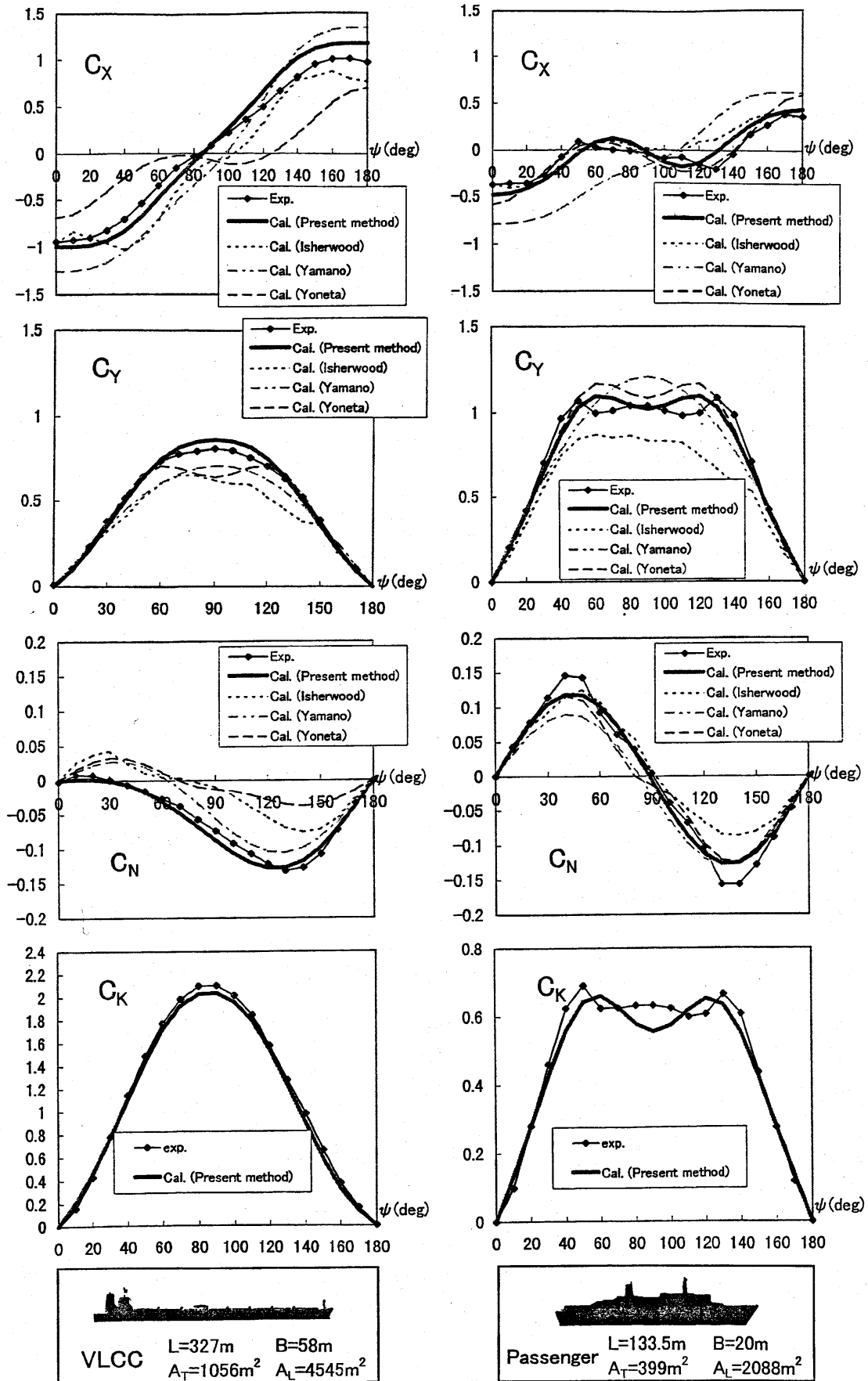


Fig. 9 Comparison of measured wind force coefficients with predicted results

を表現する係数が非常に多い。回頭モーメントの主要項である N_2 に関しては、 C_{BR}/L が一番有意な項である。この説明変数は他の推定式にて考慮されていないが、回頭モーメントを求める場合に重要なパラメータであることがわかる。

4. 風圧力推定法の精度

本推定法、および風圧力推定のために既に提案されている Isherwood, 山野, 米田の方法と実験データとの比較を行い、推定精度について検討を行った。

4.1 比較に用いた各推定法の概要

本推定法、および Isherwood, 山野, 米田のそれぞれの推定法についての概要を Table 5 に示す。表中には、説明変数に使った主要寸法の数、推定式に使用する係数の数、回帰分析に用いたサンプル数、サンプルの代表的な船種を示す。どの推定法も説明変数に使った主要寸法の数についてはそれほど大きな差が無い。回帰式に用いる係数の数について見てみると、Isherwood の方法は風向角ごとに回帰係数を決定しているため、その数が他の推定法と比べ非常に多い。本推定法においては、他の推定法と比べ実験デー

タのサンプル数も多く、様々な実験データについて収集していることがわかる。

4.2 推定法の標準誤差

本推定法を用いて、一例として船型の特徴が大きく異なる VLCC, および客船の2隻について風圧係数の推定を行った結果を Fig. 9 に示す。上から前後力, 横力, 回頭モーメント, 傾斜モーメントの各風圧係数を示し, Isherwood, 山野, 米田の方法による結果も併せて示す。但し, 米田の方法を用いる場合にトリムは全て0として推定を行っている。Isherwood の推定値に関しては 10° ごとに直線で結んでいる。

C_x について見てみると, Fig. 8 で示した場合と同様に VLCC, および客船の風圧係数の傾向はかなり異なっているが, 山野, 米田による推定値は, その形状の特徴を表現していないことがわかる。この傾向については他の船舶についての比較を行った場合も同様の結果であった。今回提案した推定法の結果は, 複雑な分布形状についても良く一致していることがわかる。また, VLCC の C_N については, 他の推定法の精度が良くないが, 本推定法は非常に良く実験値と一致しており, 有効であることがわかる。

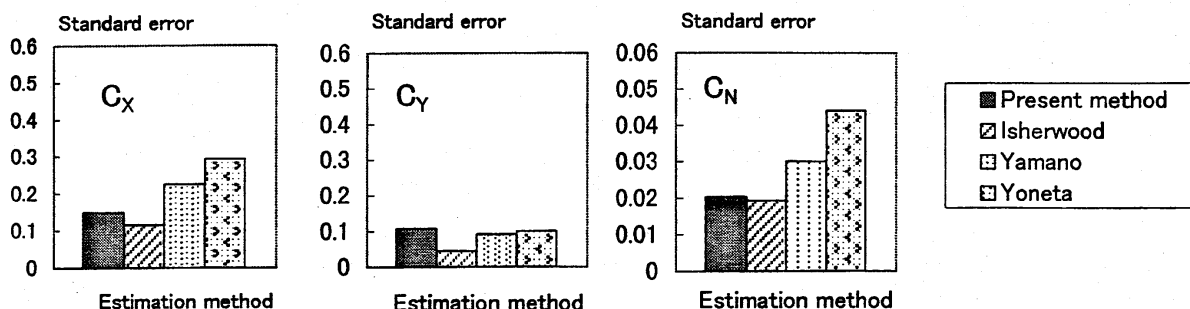


Fig. 10 Standard error of wind force coefficients for each estimation method (Wagner's experiments)

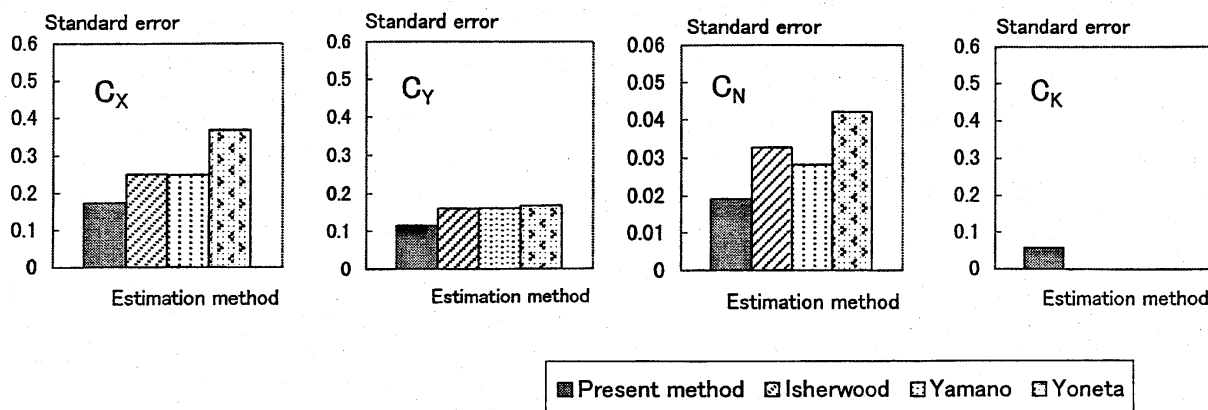


Fig. 11 Standard error of wind force coefficients for each estimation method (All samples)

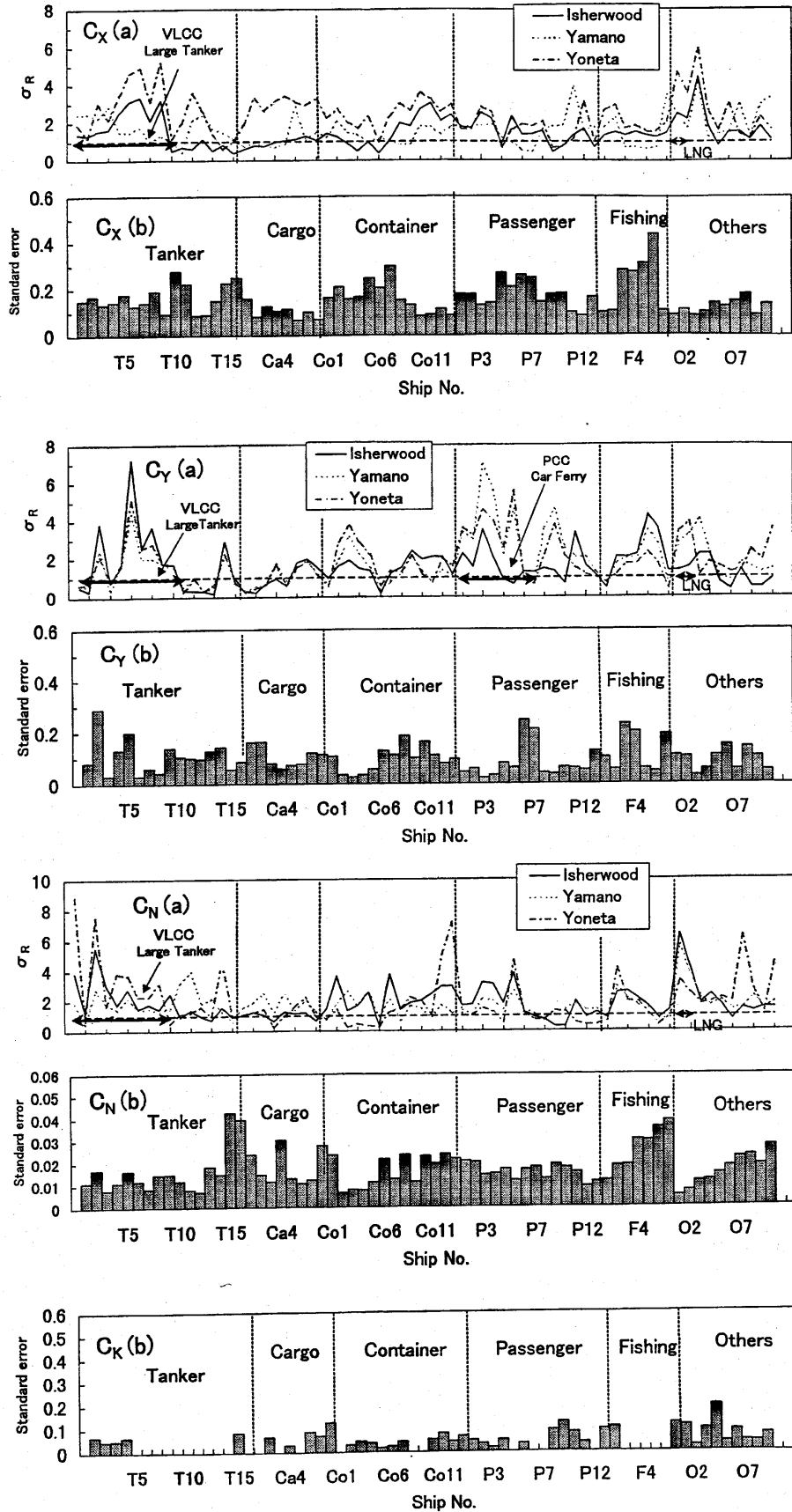


Fig. 12 Standard error of wind force coefficients for each ship and relative magnification compared of wind force coefficients by present method with by the other estimation

推定式を作成するために使用した実験データの引用文献の中から、共通のサンプルと思われる Wagner による 15 隻分の風洞実験についての推定精度の比較を行った。実験データごとに標準誤差を求め、15 隻分の平均値を Fig. 10 に示す。 C_x , C_N については、本推定法と Isherwood の推定法が山野, 米田の推定法に比べ精度が高い。Isherwood の推定値と比較して本推定法の標準誤差が若干大きい理由については、Table 5 に示したように本推定法では Isherwood の実験データよりもかなり多くのデータを収集しており、ある限られた母集団のサンプルを対象とした場合には、少し精度が落ちることもあると考えられる。

本推定法を求めるために用いた全ての実験結果に対して、それぞれの方法より推定を行い標準誤差の平均値を求め Fig. 11 に示す。各風圧係数において、本推定法が最も精度良く推定できており、特に C_x , C_N に関して他の推定法との差が顕著にみられる。また、 C_x についても標準誤差は非常に小さい。標準誤差の値は、実験データの持つ最大振幅値と比較しても 10% 程度であり、風の影響を検討する上で有効である。

本推定法における標準誤差を Fig. 10, および Fig. 11 で比較してみるとほとんど変化がみられない。このことから推定を行うサンプルの母集団が多少変化しても誤差が大きく変化しない、安定した推定法であるといえる。また、この結果は逐次法により説明変数が適切な組み合わせで推定式の中に取り込まれていることを示す。

本推定法においては、Table 5 に示したように実験データのサンプル数も多く、採用した船舶も多岐にわたっている。Fig. 11 での比較から、近年の建造された船舶も含めて様々な船舶を対象にした風圧力の推定を行う場合、本推定法は有効であることがわかる。

4.3 船種ごとの推定精度

船種ごとの推定精度の検討を行うために個々の船の実験データに対する標準誤差を Fig. 12 に示す。それぞれの風圧係数について、(b)の棒グラフは本推定法における 1 隻ごとの標準誤差を示したもので、(a)の折れ線グラフは本推定法の標準誤差 σ_P に対する他の推定法の標準誤差 σ_E の大きさを示す。すなわち、縦軸は次式の値である。

$$\sigma_R = \sigma_E / \sigma_P \quad (37)$$

横軸には船の種類ごとに、左より船長の長い順に整理している。

本推定法の結果(b)について見てみると、 C_x については漁船の精度が若干落ちてはいるものの、残りの船舶については精度良く推定できており、標準誤差に大きな差が見られない。 C_Y については全体的に精度良く推定できている。また、 C_N については、「漁船」、「その他」に分類されている小型船等一部を除けば、値として 0.01~0.02 に収まり精度良く推定できていることがわかる。個別の船舶においては、VLCC, や LNG 船に対する推定結果も実験データ

と良い一致を示している。本推定法が、従来の推定法のサンプルに無かった多様な船型に対して有効であることを示す。

次に、他の推定法についての標準誤差の大きさを示すグラフである(a)について、その特徴を調べると、T1 から T10 の VLCC, 大型タンカー (L=約 300 m), LNG 船に対する推定精度が、本推定法の精度に比べて悪くなっていることがわかる。 C_Y については、P1 から P6 に示す PCC や大型フェリー (L=約 150~200 m) の推定精度の悪いことがわかる。この原因としては、他の推定法においては VLCC や LNG 船といった大型船のサンプルが欠如していること、また、風速分布の影響、説明変数の選び方等様々な理由が考えられる。漁船に関しては、本推定法も他種の船舶に比べて推定精度が少し落ちていたが、他の推定法についてはさらに誤差が大きい。Table 2 で示した側面形状に見られるように漁船の形状は用途によって様々な船型が存在し、その上今回用いた実験データ数も少ない。船首楼や艀装物の風圧係数に及ぼす影響が大型船に比べ相対的に大きくなり、主要寸法からでは抽出できない特徴が見られるためであると考えられる。大型船に比べ相対的に重量が軽いこともあり、漁船の操船に対し風は大きな影響を与えることから、風圧係数を精度良く推定することは重要であると考えられる。小型船に対する推定精度向上は今後の検討課題であるといえる。

5. 結 言

回帰分析の一方法である逐次法を用いて、船体に働く風圧力の推定法の提案を行った。本研究によって得られた結論をまとめると以下ようになる。

1) 従来提案されている推定法に比べ、近年建造された船舶を対象とした上で、多くの様々な船舶の風洞実験データの収集を行い、回帰分析による新しい風圧力推定式の提案を行った。収集した実験データについては、風速分布の違いによる実験結果への影響を補正した上で統計処理を行った。

2) 本推定法は、船体形状から容易に決定される主要寸法を用い、その組み合わせにおいて、従来の推定法では考慮していない 34 種の説明変数について検討を行った。解析方法には逐次法を用いて統計的に最適な説明変数、および回帰係数の決定を行った。

3) 本推定法は、従来の推定法と比較して実験値に対して精度良く推定することができる。また、他の推定法では精度の悪い VLCC, LNG 等の近年建造された大型船に対しても本推定法は精度良く推定できる。

4) 風の影響による傾斜モーメントの推定式の提案を行った。強風時の横傾斜を考慮に入れた船体運動を容易に検討することができる。

本推定法は、実質的には一様風下での船体に働く風圧係

数の推定を行っていると考えて良い。最終的に実海域での風圧力を推定する場合には、本推定法により求めた風圧係数に対して、対象とする海上での風速分布形状から、Fig. 5の実験値より k_q を求め、(5)、(6)式に従い動圧を求める必要がある。実船に対する風速分布の影響を考慮した風圧係数の推定に関しては、変動風に関する影響も含め今後も検討を要する課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 井上正祐, 石橋賢論: 操縦性に対する風の影響(I), 西部造船会会報, 第45号(1972), pp.111-128
- 2) 田中陽, 山下順雄, 山下保己, 三住悦己: 強風下の操船性能について, 関西造船協会誌, 第176号(1980), pp.1-10
- 3) 芳村康男, 永島実郎: 風力下の操縦運動推定について, 日本造船学会論文集, 第158号(1985), pp.117-128
- 4) 山野惟夫, 斉藤泰夫: 船体に働く風圧力の一推定法, 関西造船協会誌, 第228号(1997), pp.91-100, (1971年に講演)
- 5) R. M. Isherwood: Wind Resistance of Merchant Ships, The Royal Institution of Naval Architects, Vol.115 (1972), pp.327-338
- 6) 米田国三郎, 蛇沼俊二, 烏野慶一: 船舶風圧力データの力学モデルによる解析II, 日本航海学会論文集, 第86号(1992), pp.169-177
- 7) G. Aertssen, P. E. Colin: Wind Tunnel Tests on a Model of a Car-ferry, I. S. P., Vol.15, No. 163 (1968), pp.71-77
- 8) W. Blendermann: Estimation of Wind Loads on Ships in Wind with a Strong Gradient, 1995 OMAE, Vol.1-A, pp.271-277
- 9) 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), pp. 144-153
- 10) 貴島勝郎ほか: 操縦運動時における横傾斜に関する一考察, 西部造船会会報, 第93号(1997), pp.35-46
- 11) 藤原敏文, 二村正, 上野道雄: 船体に働く風圧力に関する研究(超大型タンカーの場合), 第70回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1997, pp.142-147
- 12) 二村正, 藤原敏文, 上野道雄, 野中晃二: タンカーに働く風荷重と流れの可視化, 可視化情報 Vol.17 Suppl. No.2 (1997), pp.217-220
- 13) B. Wagner: Windkräfte an Überwasserschiffen, Schiff und Hafen, 1967, pp.894-900
- 14) 辻豊治ほか: 船体に働く風圧力に関する模型試験, 船舶技術研究所報告, 第7巻第5号(1970), pp.13-37
- 15) C. Aage: Wind Coefficients for Nine Ship Models, Hydro and aerodynamics laboratory, Report No.A-3 (1971)
- 16) 瀬崎良明: 自動車運搬船の船速に対する風の影響について(一計算例), 関西造船協会誌, 第179号(1980), pp.13-17
- 17) W. Blendermann: Wind Loading of Ships Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow, Institut für Schiffbau der Universität Hamburg, No.574 (1996)
- 18) 田中豊ほか: 多変量統計解析法, 現代数学社, 1983
- 19) 杉山高一: 多変量データ解析入門, 朝倉書店, 1983