成分分離モデルに基づく船体に作用する風圧力の新推定方法

輸送高度化研究領域 *藤原 敏文、上野 道雄、二村 正

1. はじめに

港湾域で低速航行する船の安全を確保するため に風による操縦運動への影響を正確に推定するこ とは非常に重要である。

ここでは広範な船に対して精度良く風圧力を推 定する方法の提案を目的とし、推定式を構成する 要素の物理的意味合いが明確であり、構成要素の 検討を個別に行うことが可能な成分分離型モデル により新しい風圧力推定式の提案を行う。船体に 作用する風圧力はクロスフロー抗力、縦粘性抗力、 揚力、誘導抗力により構成されると仮定し、各要 素は、過去の風洞実験データを使用することによ り、多変量回帰分析により決定する。

本推定法を用いることにより船体外観形状のみから風圧力の計算が可能である。

2. 風圧力係数の定義及び使用実験データ

図-1に示す座標系で風による縦力X、横力 Y、回頭モーメントNを定義する。風速U、風 向角 Ψ での縦、横風圧力係数 C_x 、 C_y 及び回頭モ ーメント係数 C_N は、次式のように定義される。

$C_{X} = X / (qA_{F})$	
$C_Y = Y / (qA_L)$	(1)
$C_N = N / (qA_L L)$	

$$q = \frac{1}{2}\rho U^2 \tag{2}$$

ただし、 ρ は空気密度、Lは全長、 A_F は船体の 水面上正面投影面積、 A_L は側面投影面積である。

過去に計測された様々な船の風洞実験データを 利用して風圧力推定法の検討を行う。今回使用し た実験データの引用元論文の著者、公表年、デー タの船種ごとの数*n*sを一覧にし表-1に示す(引



図-1 風圧力係数の座標系

表-1 解析に使用した風洞実験データ

		Sample n _s							
Author	Published	Tanker	Bulk/Cargo	LNG/LPG	Container	Passenger / Ro-Ro	Fishing	Other	Total
Wagner B	1967	4	5	0	0	2	2	2	15
Aertssen G et al.	1968	0	0	0	0	1	0	0	1
Aage C	1971	1	5	0	0	2	1	0	9
Sezaki Y	1980	0	0	0	0	1	0	0	1
Blendermann W	1996	2	0	2	7	8	0	11	30
Nonaka K et al.	1999	4	0	4	0	0	0	0	8
NMRI	Not yet	0	3	0	2	1	0	1	7
m - 1			10		0	16	2	1.4	



図-2 船体形状を表現するパラメータ

用元は参考文献 1)、2) を参照のこと)。サンプル の船から図-2に示す船体外観の特徴を表現する 8つのパラメータ、L;全長、B;船幅、A_F、A_L、 A_{oD};デッキ上構造物の側面投影面積、C;船体 中心から側面積中心までの縦方向座標(船首方向 を正)、 H_c ; 喫水から側面積中心までの高さ、 H_{BR} ; 喫水からブリッジ等主要構造物の最高位までの高さを得た。これらのパラメータを使って風 圧力の推定式を表現した。

3. 成分分離型風圧力推定式

初めに縦、横風圧力係数の推定式について述べる。回頭モーメント係数は、横風圧力係数に風圧 力てこを乗じることにより求める。

3.1 縦·横風圧力係数

縦風圧力係数が縦粘性抗力、揚力、誘導抗力、 横風圧力係数がクロスフロー抗力、揚力、誘導抗 力により構成されるとする。縦粘性抗力は正面風 $\Psi = 0^{\circ}$ 、背面風 $\Psi = 180^{\circ}$ であるときの風圧力係数 C_{vD} を使って $C_{vD}\cos\Psi$ として表す。クロスフロー 抗力は横風時の風圧力が相当すると仮定し、 $\Psi = 90^{\circ}$ での横風圧力係数 C_{CR} から $C_{CR}\sin^{2}\Psi$ で 表現する。

風に対して鉛直方向に作用する揚力及び風向に 作用する誘導抗力の各無次元係数 C_L、C_Dを小縦 横比翼揚力理論及び米田らの失速モデル³⁾を参考 にし、次式のように表わす。

$$C_{L} = C_{LI} \sin \psi \cos \psi$$

$$C_{D} = \frac{1}{2} C_{LI} \sin^{2} \psi \cos^{2} \psi$$
(3)

C_Uはアスペクト比に依存した係数である。

また、 C_x の場合、 ψ が 10~20°と 160~170° 付近で縦力が風下方向に増加する傾向がある。こ の影響を表現するために、 $C_{ADV} \sin \psi \cos^3 \psi$ で増 減する縦粘性抗力の補正項をさらに足し合わせる ことにする。ただし、 C_{ADV} は補正項係数である。

図-1で示した座標系での縦、横方向にそれぞ れの成分を換算すると、最終的に縦、横風圧力係 数はΨを変数として次式のように表される。

$$C_{X}(\psi) = C_{VD} \cos \psi$$

+ $C_{AVD} \sin \psi \cos^{3} \psi$
+ $C_{XLI} (\sin \psi - \frac{1}{2} \sin \psi \cos^{2} \psi) \cdot \sin \psi \cos \psi$ (4)

$$C_{Y}(\psi) = C_{CR} \sin^{2} \psi$$
$$+ C_{YLI}(\cos \psi + \frac{1}{2} \sin^{2} \psi \cos \psi) \cdot \sin \psi \cos \psi \quad (5)$$

ここで(4)式第1項は縦粘性抗力、第2項は縦粘性 抗力補正項、(5)式第1項はクロスフロー抗力、(4) 式第3項及び(5)式第2項は揚力と誘導抗力を示す。 $\Psi = 0^{\circ}$ 及び $\Psi = 180^{\circ}$ の C_x 実験値から C_{VD} 、 $\Psi = 90^{\circ}$ の C_Y 実験値から C_{CR} を初めに決定し、全風圧力か らそれぞれの成分を除く。残りの成分から C_X の 場合は最小自乗法により C_{AVD} 、 C_U を求める。 C_Y の場合は Ψ が 10°から 30°での平均値を使って解 析的に C_U を求める。このとき、 $C_X \ge C_Y$ の揚 力・誘導抗力成分が必ずしも一致しないことから、 係数 C_U は $C_X \ge C_Y$ のそれぞれで求める。また、 船の形状が前後で異なることから、前方、後方か らの風による影響を表現するために 0~90°、90 ~180°の範囲に分けて各項の係数を求める。

3.2 回帰分析による各係数の決定方法

(4)及び(5)式におけるそれぞれの項の係数を求める。方法としては、船体形状を表す8つのパラメータからその組み合わせによる無次元パラメータを使って次式のように線形重回帰式で対象風圧力係数ŷを求める。

$$\hat{y} = a_0 + a_1 P_1 + a_2 P_2 + \dots + a_n P_n \tag{6}$$

ここで P_i (*i*=1,2···*n*) は選択された独立変数 であるところの無次元パラメータ、 a_j (*j*=0,1,···*n*) はその係数である。項の構成につい ては回帰分析の1手法である逐次法により決定す る。

表-2 推定式中の係数値

j	0	1	2
a b c d	0.404 -0.922 0.116 0.458	0.368 0.507 3.345 3.245	0.902 1.162 -2.313
e	-0.585	-0.906	3.239

船体形状を表現する図-2で示された8つのパ ラメータの組み合わせとして、例えば長さ関係と してB/L, H_{BR}/L , H_C/L , C/L のような無次元パ ラメータを計 18 種用意する。変数の有意性を判 別し、項の増減を決定するためにF 値検定を利用 する。判定の基準値 F_R は一般的によく用いられ る 2.0 とする。また、推定誤差の減少度が単回帰 での誤差の 3%よりも小さくなった際には計算を 終了する。

 $\Psi = 90^{\circ} O C_Y$ 実験値を使い、クロスフロー抗力 C_{CR} を求めると次式になる。

$$C_{CR} = a_0 + a_1 \frac{A_F}{BH_{BR}} + a_2 \frac{H_{BR}}{L}$$
(7)

各項の係数を以後の係数も含め表-2に示す。さらに、 $\Psi = 0^{\circ}$ での C_{VD} を求めると次式になる。

$$C_{VD} = b_0 + b_1 \frac{A_L}{LB} + b_2 \frac{C}{L}$$
(8)

揚力・誘導抗力成分に関して、線形翼理論では 揚力係数はアスペクト比に比例増加する。そこで、 アスペクト比に相当する $\pi A_L / L^2$ を使って $0^{\circ} \leq \psi \leq 90^{\circ}$ でのY方向揚力・誘導抗力係数 $C_{\gamma L I}$ を次式のように求める。

$$C_{YLI} = \pi \frac{A_L}{L^2} + \left(c_0 + c_1 \frac{A_F}{LB}\right) \tag{9}$$

右辺第1項は線形揚力項、第2項は船型影響を表 す補正項である。

X方向揚力・誘導抗力係数 C_{XII} は C_{YII} と傾向







図-3 Ro-Ro 客船の風圧力係数実験値と推定 値の比較

がやや異なるため直接逐次法により求めることに した。 $0^{\circ} \le \psi \le 90^{\circ}$ で C_{XLI} は次式になる。

$$C_{XLI} = d_0 + d_1 \frac{A_L}{LH_{BR}} + d_2 \frac{A_F}{BH_{BR}}$$
(10)

さらに縦粘性抗力補正項の C_{AVD} を $0^{\circ} \leq \psi \leq 90^{\circ}$ で求め次式に示す。

$$C_{AVD} = e_0 + e_1 \frac{A_{OD}}{A_L} + e_2 \frac{B}{L}$$
(11)

90°≤ψ≤180°についても同様に解析を行い、推 定式を求めることとするが、ここでは省略する。

3.3 回頭モーメント係数

回頭モーメント係数 C_N は、横風圧力係数に風 圧力てこを乗じることにより求めることにする。 実験結果から風圧力てこを直線近似すると次式の ように求まる。

$$C_{N}(\psi) = C_{Y}(\psi) \cdot \left[0.927 \cdot \frac{C}{L} - 0.149 \cdot (\psi - \frac{\pi}{2}) \right]$$
(12)

4. 推定精度の評価

本推定法及び既に提案されている著者¹⁾らの方法(後の図中 'Present' と 'Previous')、米田ら³⁾、Isherwood⁴⁾、山野ら⁵⁾の方法により計算された結果と実験値との比較を行い、推定精度について検証した。

Ro-Ro 客船を例にとり推定結果を実験結果と比較して図-3に示す。概ね本推定法による結果は、 著者らの前方法と同程度に実験結果と一致していることがわかる。

解析に使用した全 71 隻を対象として各風圧 カ係数の実験結果と推定結果との差を標準誤差 で図-4に示す。標準誤差 \overline{SE}_{EST} は、 C_X の場合 を例にとり次式で計算する。

$$\overline{SE}_{EST} = \sqrt{\frac{1}{n_s} \frac{1}{n_{\psi}} \sum_{j=1}^{n_s} \sum_{i=1}^{n_{\psi}} (C_{XEij} - C_{XCij})^2}$$
(13)

ただし、 n_s ; 隻数 71、 n_{ψ} ; 風向角数 19、 C_{XE} ; 実験値、 C_{XC} ; 計算値である。



図-4 71 隻を対象とした場合の風圧力係数の 推定誤差

 C_x 、 C_r に関して本推定法の精度は、誤差が最 も小さいレベルにあることがわかる。サンプルに ついても多くの船型を利用した上で得た結果であ り、様々な船に対して本推定法は有効であると言 える。

5. おわりに

新しい風圧力推定法として、成分分離型モデル を使った方法の検討を行った。級数表現による著 者らの前推定法¹⁾では 9 船型パラメータ、一風圧 力係数あたり約 20 項の式構成により推定を行っ た。本推定法では 8 船型パラメータ、全風向角分 として約 10 項のみで同程度の推定精度を保証し た風圧力係数を求めることが可能である。本推定 式は物理現象と関連づけた上で効率の良い式構成 となっていることがわかる。

参考文献

- 藤原敏文、上野道雄、二村正:船体に働く風
 圧力の推定、日本造船学会論文集 813 号、
 1998、pp77-90
- 野中晃二他:外乱力と漂流運動についての基礎的研究、船研報告第36巻第5号、1999
- 米田国三郎、蛇沼俊二、烏野慶一:船風圧力 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、pp169-177
- Isherwood RM: Wind Resistance of Merchant Ships, RINA Vol.115, 1972, pp327-338
- 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(1971に講 演)、pp91-100