

大型フェリーの荒天時避泊に関する模型実験

運輸省港湾技術研究所 正会員 高山知司
 同上 正会員 平石哲也
 同上 本城 智

1. まえがき

沖縄県においては、生活物資の多くが直接日本本土より海上輸送されており、定期航路の果たす役割は重要である。一方、沖縄県地方は、台風の来襲する頻度が高く、台風来襲時には、定期航路を走る大型フェリーは、鹿児島方面へ避難し、長期にわたって欠航する場合がある。

そこで、運航の定期性を確保するためには、沖縄県内の港湾において、フェリーを避泊する必要がある。台風来襲時のような荒天時において大型船を港内に避泊する手法としては、岸壁による係留、タワーなどの海洋構造物による係留、避泊ブイによる係留（ブイ泊）および船舶が所有する錨による錨泊が考えられる。このうち、タワー等の構造物による係留は、施設の建設費用が非常に大きくなる。また、大型船を岸壁係留するためには、係留張力が一般にブイ泊より大きくなるため、現有のウィンチ、ボラード等の設備では耐えられず、大幅に改良する必要がある。したがって、大型フェリーの港内避泊方法としては、ブイ泊あるいは錨泊を検討しなければならない。

本研究は、模型実験によって、ブイ泊および錨泊時において、波と風が作用するときの最大作用張力等を求めて、避泊方法に対して技術的検討を加えたものである。また、避泊した船舶の数値計算に不可欠な、フェリーの風圧力係数について検討した。

2. 実験の内容

(1) 模型船と係留条件

本実験では、実際に現在沖縄定期航路に就航しているフェリー（R）および（P）を対象とした。フェリー（R）は沖縄県と阪神、フェリー（P）は沖縄県と鹿児島県の間を就航している。図-1 (1)および(2)はそれぞれフェリー（R）および（P）の外観を示した図である。（R）は、自動車航送船のようなずんぐりした船形をもっている。これに対して、（P）は、客船に似たスマートな船形を持っている。両船とも、右舷側に車両昇降デッキを有しており、タンカーや貨物船のように船軸を中心として左右対称となる船形にはなっていない。

表-1は、避泊時における両フェリーの諸元を示したものである。本実験では、水槽諸施設の能力および実験精度を考慮して、1/50の縮尺で模型船を製作した。模型船をベニヤ合板で船体を製作した後、表-1に示した吃水、船体重量、重心水平位置、重心高さおよび慣性モーメントと一致するように、1~2kgの重錘を積んで模型船を調整した。

図-2は、係留方式の模式図である。図-2において、錨泊はフェリー所有のチェーンで直接海底から係留する方式で、1本のチェーンで係留する単錨泊と、右舷および左舷側の2本のチェーンで係留する双錨泊を検討した。錨泊用のチェーンは、5000トンクラスのフェリーが通常所有する呼径 56mm の鉄鋼製アンカーチェーンで、チェーン長は単錨泊および双錨泊ともに 275m とした。

ブイ泊は、避泊ブイを用いて、ナイロン製ホーサーによって船首を単点係留する方式で、避泊ブイはアンカーチェーンで海底に係留する。避泊ブイは、香港ビクトリア港の避泊ブイを参考にして、直径 3.6m、高さ 1.8m、吃水 1.4m の円筒型とし、アンカーチェーンは呼径 76mm、長さ 25m の鉄鋼製とした。ホーサーは直径 135mm、長さ 80m のナイロンロープを2本使用するものとした。

図-3は、ナイロン製ホーサーを2本使ったときの全体としての伸び特性を示したもので、実験では、伸びの無い釣糸に伸び率の異なるコイルバネを3本繋いだホーサー模型を製作して、伸び率を相似させた。図-3の破線で示した折れ線が模

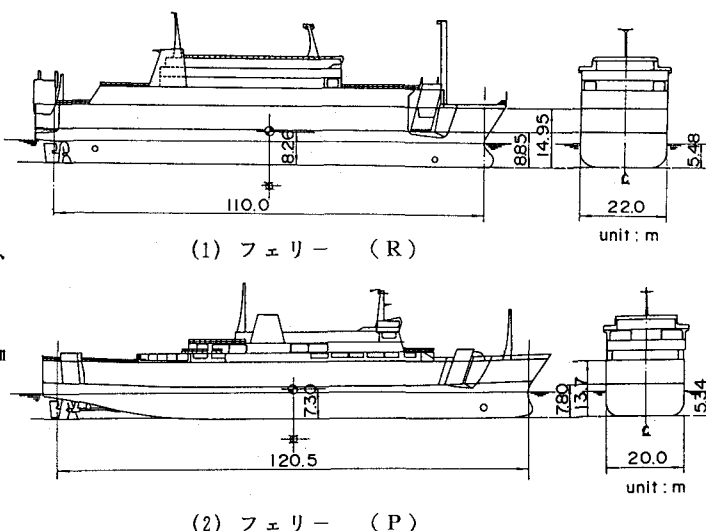


図-1 実験の対象としたフェリーの外観

表-1 フェリーの諸元

主要諸元		実 船		模 型 船	
R	垂空重	110.0	m	220.0	cm
	線間	5.48	m	10.96	cm
	縦吃重	7107.0	t	54.76	kg
	短軸回りの慣性モーメント	5895038	m ⁴	16.95	cm ⁴
	空中側面投影面積	2101.0	m ²	8445.6	cm ²
P	垂空重	120.5	m	241.0	cm
	線間	5.34	m	10.68	cm
	縦吃重	6264.0	t	49.61	kg
	短軸回りの慣性モーメント	6148547	m ⁴	12.51	cm ⁴
	空中側面投影面積	1672.0	m ²	6735.3	cm ²

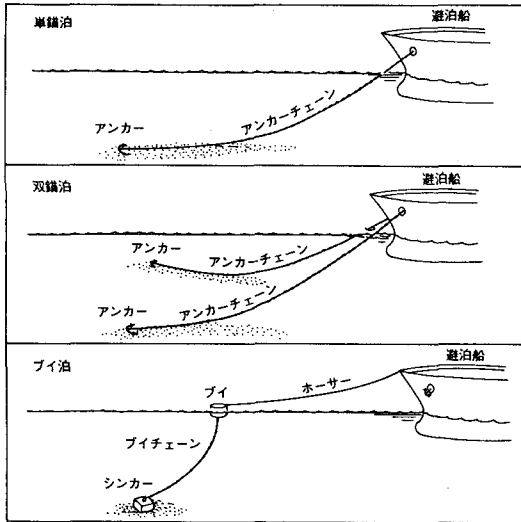


図-2 係留方式の模式図

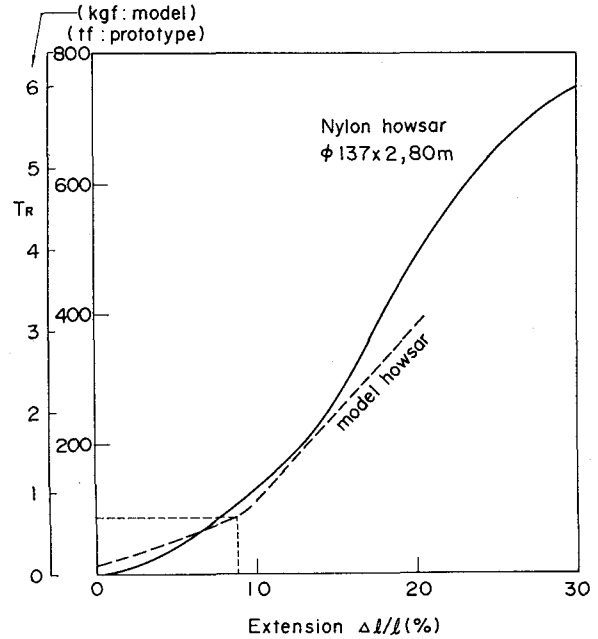


図-3 ホーサーの伸び特性

型ホーサーの伸び特性で、伸び率が20%を越えると相似性が悪くなるが、200tf程度の荷重が作用した場合には、模型ホーサーの伸び率は、実機によく一致する。

避泊地の水深は15mで一定とした。

(2) 波と風の条件と実験手法

模型実験は、幅35m、長さ27mの平面水槽で行った。平面水槽の一側壁に沿って幅28mの多方向不規則波造波装置¹⁾が設置されており、他の3側壁は消波工で覆われている。水槽内には、幅8mのファン式送風機が設置されており、天井走行クレーンによって、位置を変えることが可能である。

港内避泊の場合、防波堤によって波高は港外よりも小さくなるが、風速は変化しない。本実験では、波としては、有義波高1.5m、有義波周期10および12sのプレートシュナイダー光易型の周波数スペクトルを持つ一方向不規則波および有義波高1.5m、有義波周期12sで、方向集中度パラメータ $S_{max}=25$ 程度で表わされる方向分布関数を持つ多方向不規則波を作用させた。

風は、フェリーの係留地点で所定の風速が得られるようにファンの回転数を調整して、定常風（一様風）および変動風を作用させた。定常風速は、30、40および50m/sとして変化させた。変動風は、平均風速40m/sで、日野あるいはダーベンポート型の周波数スペクトル²⁾を持つものとした。

図-4は実験の模式図および角度の定義を示したものである。ブイ泊および単錨泊の場合には、アンカー点を原点として、水平面内に、風向をX軸の正方向とするX-Y座標系を定義した。X軸と船軸方向および波の進行方向の成す角は、それぞれ ϕ および β で表わした。双錨泊の場合には、2つのアンカー点の中点を座標系の原点として、2本のチェーンが伸びきったときになす角（開き角）を2等分する方向をX軸とした。このときは、風向とX軸とが一致しないので、風向きを α とした。実験では、アンカーチェーンおよび係留ホーサーに小型張力計を取り付けて、作用張力を調べた。測定は波群等を変えてそれぞれのケースについて2回行い、それらの最大値の平均を最大張力としている。

船舶を船首単点係留した場合には、風の影響を受けて係留船舶は、“振れ回り運動”と呼ばれる長周期の周期運動をする。³⁾ 振れ回り運動の範囲は、避泊面積を推定するために重要である。そこで、天井から船体の運動をビデオカメラで撮影して、水平運動の様子を調べた。測定時間は、波および

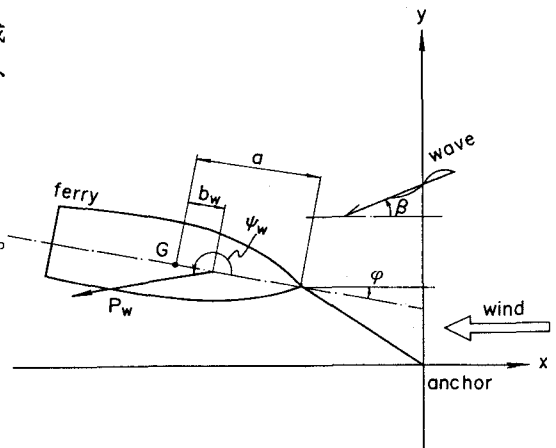


図-4 実験における角度の定義

風を作用させて船の運動が安定してから6分間として、アナログデータレコーダーに記録した。その後、0.1s間隔でデジタルデータに変換して解析を行った。

3. 最大作用張力の特徴

(1) 係留方式の影響

定常風を作用させた場合、ホーサーおよびアンカーチェーンに作用する張力は振れ回り運動のために周期的に変動する。係留システムの設計においては、最大作用張力が最も重要になるので、ここでは変動張力の最大値をまとめた。

図-5は、定常風を作用させた場合の最大作用張力を各係留方式について比較したものである。ブイ泊の場合は、アンカーチェーンとホーサーに作用する張力は大きく違わなかったため、ホーサー張力のみを示した。図-5に示すように、風速が増大するとそれに比例して最大張力も増加する。U = 50m/s の場合、フェリー (R) に作用する最大張力は、ブイ泊、単錨泊および双錨泊それぞれの場合 114、126 および 122 tf であり係留方式によって大きな差は生じていない。

錨泊時のアンカー把駐力について検討すると、7ton 程度のアンカーの砂地盤における把駐力は、せいぜい 20~40tf 程度と考えられる⁴⁾。図-5に示されるように、U = 30m/s のとき、最大張力は 40tf 以上になるので、錨泊をした場合には、走錨の危険性がある。走錨すると、船体が防波堤や岸壁に衝突し破壊する事故が起こる可能性がある。そのため、走錨を許さないとすればブイ泊しかない。

船形による相違を調べると、錨泊の場合は (R) の方が作用張力が大きくなる。ブイ泊の場合には、(P) の方が大きく、その差は、U = 50 m/s の場合、10tf である。(P) および (R) の側面投影面積がそれぞれ約 1700 および 2100 m² で (R) の方が大きいけれども、ブイ泊時に (P) の最大作用張力が大きくなることから、最大作用張力は側面投影面積だけから推定できず、振れ回り運動時の船の風向に対する傾きなども考慮する必要があると思われる。

最大作用張力は変動性が高いので、張力の代表値として有義張力を考える。有義張力は、全データを大きい順に並べたときの、大きい方から全データ数の 1/3 番目までの値の平均値である。

図-6は、最大張力と有義張力の比を示した図である。図-6に示されるように、単錨泊および双錨泊の場合には、最大張力と有義張力の比 $T_{Rmax}/T_{R1/3}$ は、ほとんど全ケースで 1.5 より大きい。ブイ泊の場合ブイを係留しているアンカーチェーンでは、その比は 1.5 以上になるけれども、ホーサーの場合には、1.5 以下である。すなわちチェーンのような弾性の無いもので係留すると、波によって作用張力は大きく変動し、衝撃的な力が作用しやすい。これに対して、ホーサーは弾性があるので、波が作用しても張力は大きく変動せず、衝撃的な力が働きにくい。

図-7は、双錨泊の場合に風向 α および開き角 θ の影響を調べた図である。模型船は、(P) を使用し、開き角 θ を 30、45 および 90° に変化させ、また開き角 θ を 30° に固定して、風向 α を 0~90° に変化させた。図に示されるように、 $\alpha = 0^\circ$ の場合には開き角 θ を 45° にすると最大作用張力は小さくなり、30° の場合の約 1/2 にすることができる。風向 α が変化すると、 $\alpha = 0, 30, 45, 90^\circ$ の場合には、張力は大きく変化せず、100tf 程度である。しかし、 $\alpha = 15^\circ$ のとき、 T_{Rmax} は 230tf となり、 α

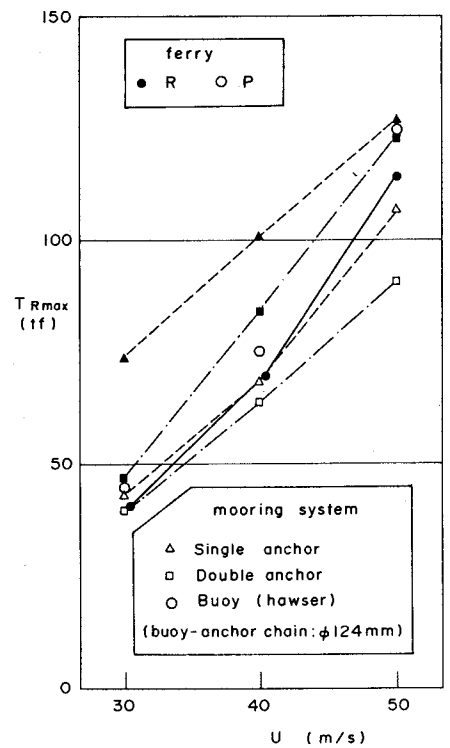


図-5 係留方式による最大作用張力の相違

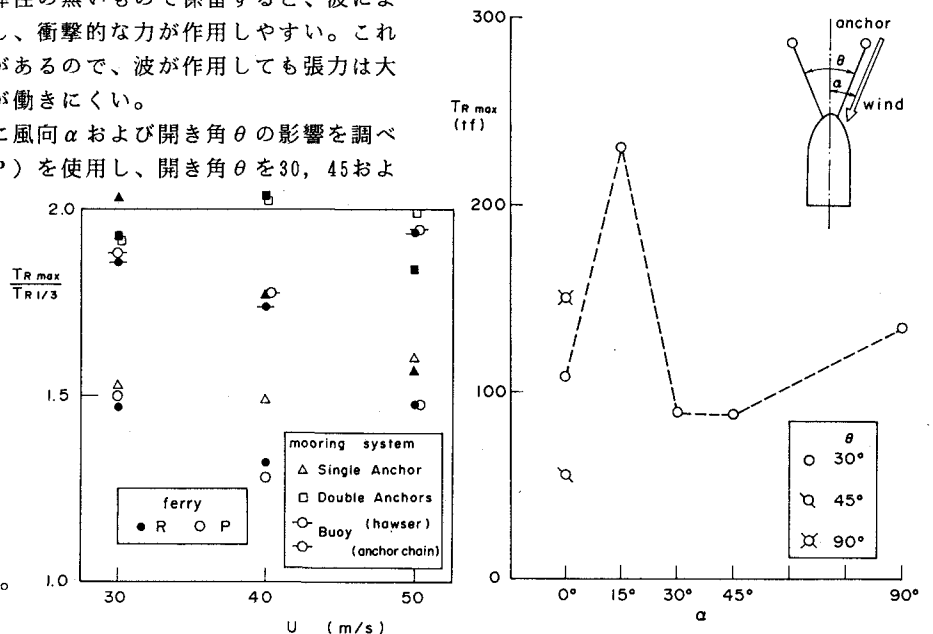


図-6 最大張力と有義張力の比較

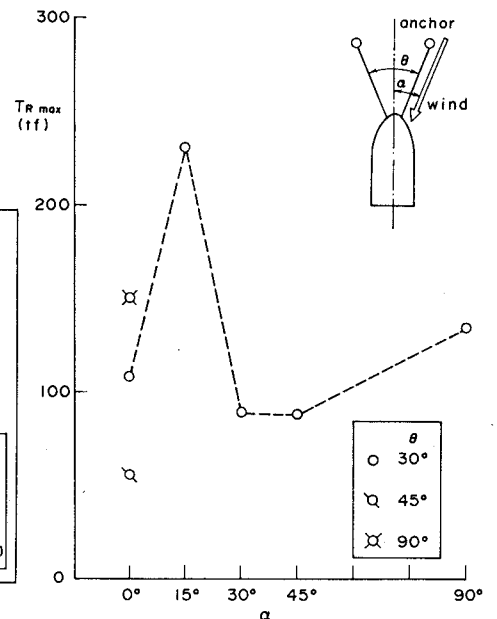


図-7 風向と開き角の影響

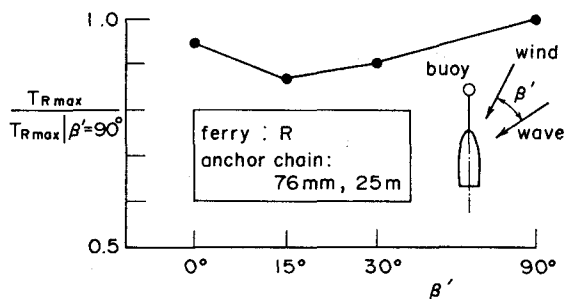


図-8 最大張力に対する波向の影響

$= 0^\circ$ の場合の2倍以上になる。このとき、風向と係留ラインの方向が一致している。したがって、風向と片方の係留チェーンの張っている方向が一致するときに、双錨泊にとって最も厳しい条件になる可能性がある。

(2) 波および変動風の影響

図-8は、波向の影響をブイ泊について調べた図である。風は定常風、波は単一方向波とした。図では、波向が 90° のときの最大張力を1として、張力の比を示している。波向 β が、 $0, 15$ および 30° の場合には張力比は1より小さく、 β が 90° の場合が最も厳しい条件となると思われる。そこで本研究では、波と風を同時に作用させるときには、波向を 90° として実験することにした。

図-9は、 β を 90° として、波の影響を調べた図である。図では、定常風のみが作用したときの最大張力を1として、最大張力の比を示した。図の中で、wave1 および 2 が単一方向波、wave3 が多方向不規則波である。双錨泊の場合には wave2 のとき 1.42、wave3 のとき 1.34 で、波が作用することにより、最大作用張力は 1.3 倍以上大きくなる。単錨泊の場合には、wave1、2 および 3 のときそれぞれ 1.19、1.06 および 1.29 となり wave2 の場合を除くと 1.2 倍程度になる。ブイ泊の場合には、ホーサーおよびアンカーチェーンの両方について、張力比は 1.1 倍以下になり、錨泊の場合に比べると波による影響が小さい。したがって、波のある状態で係留する場合には、ブイ泊にした方が係留張力を小さくすることができる。

単一方向波と多方向不規則波を比べると、単錨泊の場合を除き、多方向不規則波が作用した方が張力は小さくなる。これは、いろいろな方向から波が来襲しているために船舶にかかる波力も分散されるためである。したがって、単一方向波のみを用いて係留システムを設計した場合には、作用張力を大きく見積もりすぎる可能性がある。

図-10は、ブイ泊の場合に変動風の影響を調べたものである。図では、変動風を作用させたときの最大張力を、定常風のみが作用した場合の最大張力との比として示している。図において、wind D はダーベンポート型のスペクトルをもった変動風、wind H は、日野型のスペクトルを持った変動風を作用させたケースを示し、wind H + wave は日野型のスペクトルを持った変動風と同時に、多方向不規則波を風向に対して直角方向から作用させたケースを示す。wind D の場合、張力比は 0.8 になり、定常風を作用させた場合より張力は小さくなる。wind H の場合には 1.0 で定常風の場合と同じである。wind H + wave のケースでは、張力比は 0.95 となる。ダーベンポート型のスペクトルを持つ変動風が作用した場合に作用張力が小さくなるのは、変動成分の全エネルギーが日野型の方が大きいためと思われる。

したがって、wind H を作用させた場合でも、張力は定常風の場合とほぼ同じである。また波が作用しても、定常風のみの場合より張力が大きくなることはない。以上のことから、変動風が作用しても張力は定常風の場合より大きくなることはないので、定常風のみを考えて設計しても安全である。

4. 振れ回り運動の特性

図-11は、フェリー(R)の船首および重心の水平運動の軌跡を示した図である。図-11に示されるように大型フェリーを係留した場合には、タンカーおよび貨物船と同様に、船首単点係留された場合には、振れ回り

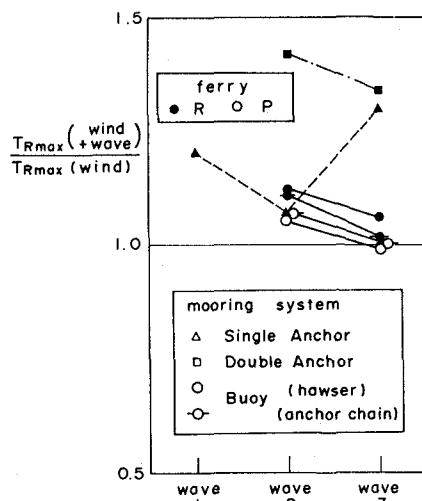


図-9 最大張力に対する波の影響

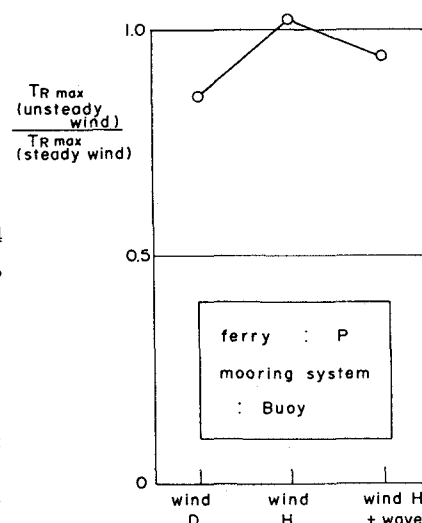


図-10 変動風の影響

図-12は、最大振れ回り幅の変化を示したものである。図に示されるように、ブイ泊の場合には、風速が増大しても、 X_B はほとんど変化せず、また、 X_B の値は、(P)の場合約110m、(R)の場合約100mである。錨泊の場合には、(P)については、 X_B は風速が増大するとともに若干増加する傾向にあり、(R)の場合は、ほとんど変化しない。

SHIP MOORING		SHIP	
		R	P
Single An.	▲	△	
Double An.	■	□	
Buoy	●	○	

Figure 10 is a line graph showing the relationship between the horizontal distance X_B (m) on the Y-axis and the current velocity U [m/s] on the X-axis. The Y-axis ranges from 0 to 300 m, and the X-axis ranges from 0 to 50 m/s. The graph displays data for different mooring configurations (Single An., Double An., Buoy) and ship types (R, P). The data points are plotted for U values of 30, 40, and 50 m/s. The legend indicates that for Single An., the symbols are ▲ (R) and △ (P); for Double An., the symbols are ■ (R) and □ (P); and for Buoy, the symbols are ● (R) and ○ (P). The graph shows that X_B generally increases with U for the R mooring type, while for the P mooring type, X_B decreases as U increases. The Buoy mooring type shows a relatively constant X_B across the range of U .

5. フェリーの風圧力係数

本実験では、風圧力は次式で表わされるものとした。

$$P_w = 0.5 \rho_s C_w U^2 (A_T \cos^2 \phi + A_L \sin^2 \phi) \quad (1)$$

風圧力を測定する実験では、模型船を船首と船尾をそれぞれ2本の伸びない釣糸で係留した。2本の釣糸は直交し、そのうち一つは、風向と同じ方向に張っている。そして、実験では、船軸と風の成す角を ϕ を変化させて、釣糸に作用する張力を測定し、船体に作用する力の釣合方程式を解いて、風圧力およびその作用方向および作用点を求めた。 ϕ は、船軸方向を 0° として、反時計回りを正として定義した。すなわち風が左舷側から吹いた場合には、 ϕ は正、風が右舷側から吹いた場合には、負となる。

図-13は、風圧力係数 C_w および P_w の作用点の重心からの距離 b_w の測定結果を示したものである。 C_w の測定結果にはばらつきがあるものの、ほぼ $\phi = 0^\circ$ のときに谷になる2山形となっており、鈴木がまとめたタンカーおよび貨物船の風圧力係数の変化とよく似ており、(R)と(P)の船型による差は小さい。 $\phi = -45^\circ$ で、(P)の C_w が 1.5 となり(R)の C_w より 0.4 程度大きくなる原因ははっきりしない。

最小 2 乗法を用いて、実験式を求めると次式のようになる。

$$\begin{aligned} C_w &= 0.881 - 0.070 \cos 2\phi - 0.215 \cos 4\phi - 0.005 \cos 6\phi & (\phi \geq 0^\circ) \\ C_w &= 0.920 - 0.099 \cos 2\phi - 0.306 \cos 4\phi - 0.021 \cos 6\phi & (\phi < 0^\circ) \end{aligned} \quad (2)$$

—65—

$$C_w = 0.5425 + 0.0105\phi \quad (0^\circ \leq \phi < 10^\circ)$$

$$C_w = 0.5425 - 0.00404\phi \quad (-10^\circ < \phi < 0^\circ) \quad (3)$$

図-13の実線は、上記の C_w の実験式を示す。図からわかるように、本実験式は、測定値をよく近似している。

b_w については、 $\phi > 0^\circ$ の範囲では、(P) と (R) の実験値はよく一致しており、直線で近似できる。 $\phi < 0^\circ$ の範囲では、(P) の方が (R) よりも少し大きくなっているが、ほぼ等しいと考えることができる。そこで、 C_w の場合と同様に、 ϕ の範囲を正と負に分けて、それぞれの範囲で実験式を求めた。

最小2乗法で求めた b_w の実験式は次式のようになる。

$$b_w/a = 0.522 - 0.00388|\phi| \quad (\phi \geq 0^\circ)$$

$$b_w/a = 0.522 - 0.00527|\phi| \quad (\phi < 0^\circ) \quad (4)$$

ここに、 a は船首～重心間距離である。

風圧力の作用方向 ϕ_w については、鈴木³⁾ が次式を提案している。

$$\phi_w = \{3 - (1 - \phi/90)^q\} \times 90 \quad (\phi \geq 0^\circ)$$

$$\phi_w = \{1 + (1 - |\phi|/90)^q\} \times 90 \quad (\phi < 0^\circ) \quad (5)$$

パラメータ q は、タンカーおよび貨物船の場合3～5の値をとる。

図-14は、本実験で求めたフェリーの風圧力の作用方向である。図には、実験値とともに、式(5)の値を $q = 3$ および5について示した。 $\phi > 0^\circ$ の範囲では、実験値は若干のばらつきを示すものの、 $q = 3$ の直線にはほぼ一致する。 $\phi < 0^\circ$ の範囲では、 $q = 5$ の曲線にはほぼ一致する。したがって、フェリーの数値計算では、風圧力の作用方向を求める実験式は式(5)を用い、 $\phi \geq 0^\circ$ のとき $q = 3$ 、 $\phi < 0^\circ$ のとき $q = 5$ とすればよい。

6. あとがき

本実験で得られた結果および成果をまとめると次のようになる：

- (1) 船種および係留方式が異なっても、係留系に作用する最大張力は大きく変化せず、 $U = 50\text{m/s}$ のとき $100 \sim 120\text{tf}$ 程度になり、錨泊の場合には、走錨する可能性がある。
- (2) 錨泊の場合、風のみが作用する場合に比べて、波が作用すると最大張力は大きくなるが、ブイ泊の場合にはほとんど変化しないので、港内避泊の手法としては、ブイ泊の方が有利である。
- (3) 風荷重に対する風圧力係数、作用点および作用方向を計算できる実験式を提案できたので、フェリーの振れ回り運動の数値計算に用いることができる。

参 考 文 献

- 1) 高山知司・平石哲也：サーペント型造波機による発生波の特性に関する実験、港湾技術研究所報告、Vol. 26, No. 3, 1987, pp. 37-83.
- 2) 清宮 理：海上風の性質とそれによる矩形浮体の動揺解析、港湾技術研究所報告、Vol. 19, No. 2, 1980, pp. 124-140.
- 3) 鈴木康正・諸石一幸：ブイ係留船舶の荒天時の振れ回り運動、港湾技術研究所報告、Vol. 21, No. 2, 1982, pp. 107-150.
- 4) 長崎作治：海洋土木、日刊工業新聞社、1975.

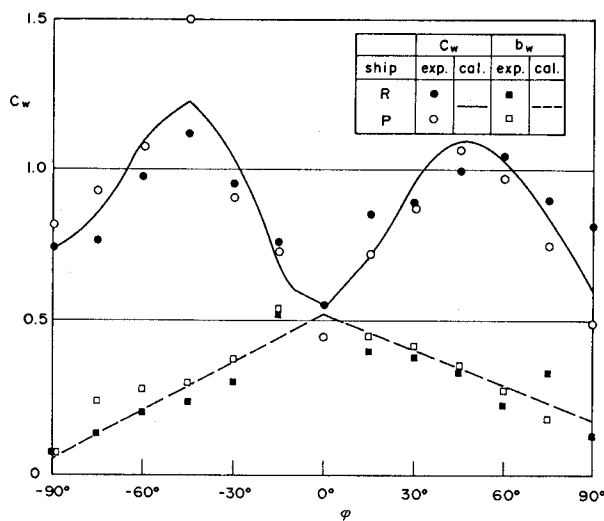


図-13 風圧力係数と風圧力の作用点

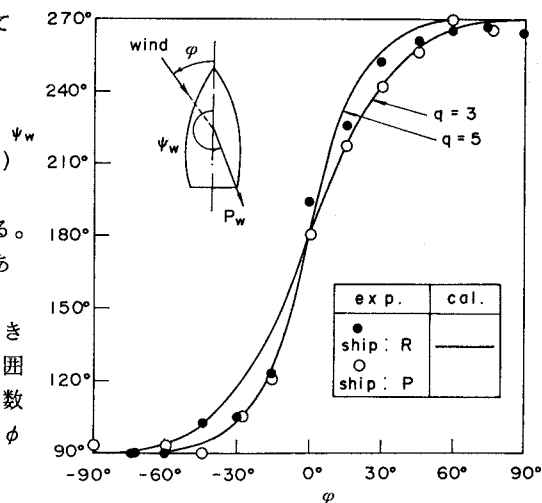


図-14 風圧力の作用方向