

外乱力と漂流運動についての基礎的研究

野中 晃二*、二村 正*、上野 道雄*、
藤原 敏文**、宮崎 英樹*、原口 富博*

Basic Study on External Forces and a Drifting Motion of a Ship

by

Koji NONAKA, Tadashi NIMURA, Michio UENO, Toshifumi FUJIWARA,
Hideki MIYAZAKI and Tomihiro HARAGUCHI

Abstract

The purpose of this study is to get basic information about a drifting motion of a ship under external forces and information about wind and wave forces as typical external forces at sea.

Results found by this study are as follows.

Concerning wave forces, we examined wave drift forces and moment acting on a ship in waves by numerical calculation. And we grasped several characteristics such that wave drift forces become large when wave length becomes smaller than a ship length and change of wave drift moment due to change of wave direction becomes complex as wave length becomes short.

Concerning wind forces, we measured wind forces acting on 4 recent ship forms by wind tunnel tests, and we examined effect of wind velocity distribution and effect of ship equipment on wind forces.

As to treatment of wind tunnel tests results obtained under different wind velocity distributions one another, we showed a simple method that transforms wind forces obtained under some wind velocity distribution into wind forces under other wind velocity distribution, but the accuracy of the method seems not necessary enough. We think that a more sophisticated method is necessary to make use of results of various wind tunnel tests executed under different wind velocity distributions.

Besides wind force measurements, we grasped rough structure of wind flow field around a ship structure above water surface by flow visualization.

As to a drifting motion of a ship, we discussed a steady drifting motion under regular waves. We showed possibility of several drifting motions under same wave condition, and the possibility of several drifting motions must be paid attention to when we estimate a drifting motion.

* 運動性能部

* * 海上技術安全局安全基準課
原稿受付 平成11年4月30日
審査済 平成11年9月8日

目 次

1. 緒論
2. 波による漂流運動の研究
 - 2.1 緒言
 - 2.2 大偏角斜航運動時の流体力計測
 - 2.3 波漂流力の推定計算
 - 2.4 波の力による定常漂流運動
 - 2.4.1 定常漂流を表す釣り合い方程式
 - 2.4.2 定常漂流状態の計算例
 - 2.5 結言
 - 2章の参考文献
3. 船体に働く風圧力に関する研究
 - 3.1 緒言
 - 3.2 風圧力に関する過去の主な研究
 - 3.2.1 過去の風圧力計測の概要
 - 3.2.2 過去の風圧力計測方法とその問題点
 - 3.2.3 過去の風圧力推定法に関する研究
 - 3.2.4 操縦運動に及ぼす風圧力の影響に関する研究
 - 3.3 風圧力の計測
 - 3.3.1 風圧力計測の実験状態
 - 3.3.2 風圧力計測の風速分布
 - 3.3.3 風圧力の無次元化の定義
 - 3.3.4 風圧力計測値へのレイノルズ数影響
 - 3.3.5 風速分布の違いによる風圧力への影響
 - 3.3.6 模型船の製作状態の違いによる風圧力への影響
 - 3.3.7 満載及び軽荷状態の風圧力
 - 3.4 船体まわりの流れの可視化
 - 3.4.1 可視化手法及び可視化状態
 - 3.4.2 VLCC船型まわりの流れ
 - 3.5 結言
 - 3章の参考文献
4. 結論

1. 緒 論

本報告は、平成8年度に実施した重点基礎研究「船舶の漂流運動に関する基礎的研究」と、平成9年度に実施した重点基礎研究「停泊時の船体に働く風の力に関する基礎的研究」の研究成果をまとめたものである。

船舶は、機関故障や衝突により操船不能となり、風・波・潮流等の外乱により流される、あるいは、強い外乱そのものにより操船不能となり流される場合があるし、停泊時においては強い外乱により走錨を起こす場合もある。特に大型船においては、流されたり走錨したりすると、座礁し油流出等による重大事故につながる危険性が高い。

外乱による操船不能状況や走錨の発生予測には、

外乱の正しい推定が必要になるし、操船不能になった場合は、外乱により流されていく船舶の運動を早急に推定し事故防止の対策を立てることが必要になる。外乱下で操船困難となった船舶の事故防止・安全性向上を図るには、流されていく船舶に働く流体力と外乱力、及びその船体運動特性に与える影響についての基礎研究の実施が必要である。

本研究では我々は、代表的な外乱として風と波を取り上げ、船舶に働く外乱力としての風と波の力、及び外乱下の漂流運動について基礎的研究を行った。

漂流運動の検討には、風及び波による外乱力に加えて、船体がまわりの水から受ける流体力を知る必要がある。船舶が操船不能となり風や波等の外乱により流されていく場合、船体の運動変数であるスウェイ、ヨー、サージは、大きな斜航角の横流れ等により、変針や旋回などの通常の操船運動の範囲を大きく超えて変化する。このような運動状態における船体に働く流体力を調べるため、模型船による大偏角斜航試験を行った。

船体の漂流運動については、研究の第1段階として非定常状態は省き、定常外乱下の定常漂流運動を扱うこととした。外乱力の漂流運動方程式への取り込み方は風も波も全く同様であり、波の力の方が風の力よりも複雑に変化するため、具体的な検討は波による漂流運動に対してのみ行った。

船体に働く波の力については、船舶の漂流運動や操船運動に大きく影響すると考えられる短波長域の波を主な対象に、波漂流力に関する基礎理論の再検討を行った。

船体に働く風の力については、既存の風圧力に関する資料について、船体運動推定への適用の面からの検討を行い、タンカー等の4船型について行った風洞試験結果による最近の船型に対する風圧力資料の検証のもとに、従来の推定法に比べてより信頼性ある風圧力推定法の構築について検討を行った。なお船体に働く風の力の正しい推定には、流体現象としての船体まわりの風の流場を把握することが基本となると考え、風洞試験で流れの可視化により船体まわりの風の流場の把握を試みた。

以上により、外乱下での漂流運動及び風と波の力について、今後研究を進展させるに当たっての基礎的資料及び知見を得ることができた。

2. 波による漂流運動の研究

2.1 緒 言

波による漂流運動を考える場合は、前後力と横力、回頭モーメントの定常成分である波漂流力の推定と漂流運動によって船が水から受ける流体力を推定する必要があり、さらに漂流運動の時刻歴を推定するためにはその運動方程式の構成を適切なものとする必要があ

る。

まず、波漂流力に関しては、前進速度のない場合には、丸尾¹⁾の理論やNewman²⁾の理論に基づく計算法が確立されていると言ってよいと考えられる。また、前進速度がある場合を含む問題については、Faltinsen³⁾らによる船体表面での圧力積分による方法なども含めて、従来耐航性の分野で抵抗増加の要因として研究がなされてきた。特に、柏木⁴⁾によって横力と回頭モーメントを含む定常波力を計算する理論が示され、この理論による数値計算も報告⁵⁾されている。ただし、この理論は直進状態にある船を対象としたものである。一方、漂流中の船を考えた場合、その横流れ角は180度までを含む大きな斜航運動となる可能性があり、また、旋回についてもその場回頭運動に近い運動状態が現れる可能性がある。このような状態を厳密に考慮した理論は現在のところ報告されていない。従って、漂流運動中の波漂流力を一般的に厳密に求める理論的方法は今のところないことになる。

次に、水平面内の運動によって船が水から受ける流体力については、斜航角や無次元回頭角速度が小さい通常の操縦流体力については細長体理論⁷⁾やいわゆるCFD⁸⁾を用いた計算法が実用の域に達している。しかし、漂流運動のように斜航角や無次元回頭角速度が非常に大きくなる可能性のある場合については、船体まわりの流れは大きな死水領域を伴うことになるため厳密な意味での理論的推定は現状では非常に困難である。このような理由から、漂流運動によって船が水から受ける力は主に実験によることになると考えられる。しかし、横運動と回頭運動が前進運動と同程度になる場合の流体力を計測するための実験は状態数も多くデータの解析方法も確立されているとは言えない。また、実験データ自体も報告例が少なく、これまで報告されているデータから任意の船の流体力について定量的な推定をすることも現状では困難と思われる。このような状況から、この種の流体力の推定をするためには、個々の船型について模型実験によって対象とする運動の範囲についての流体力を計測するか、あるいは公表されている限られたデータから大まかな推定をすることになると考えられる。

さらに、漂流運動の時刻歴を推定するための運動方程式として従来の操縦運動方程式⁹⁾をそのまま用いることは適当でない。それは、従来の操縦運動方程式が横流れ速度や旋回角速度に比べて前進速度が支配的な運動を対象としているのに対し、漂流運動では上述のように斜航角や無次元回頭角速度が前進速度に比べて非常に大きくなる場合があると考えられるからである。この問題は主として流体力の表現方法の問題に帰着され、そのモデルがいくつか提案¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾されている。しかし、実用化を目的としたモデルの検証等は現在に至るまで必ずしも十分とは言えない。また、これまでの流

体力の表現については定常状態の流体力のみが主に対象とされているが、今考えている運動状態においては運動の時刻歴自体が流体力に影響を及ぼすことも考えられる¹³⁾ため、厳密に考えようとする場合、問題はさらに複雑となる。

上述のように、漂流運動を考える場合には前進と横、回頭の3種類の平面運動が同程度の大きさになる可能性があるため、従来から積み重ねられてきた通常の操船運動に対する理論等がそのままでは適用できない。しかし、船の漂流運動を考えた場合、その漂流速度は一般に小さいと考えられるから、波漂流力の推定に前進速度のない場合の理論や計算法を用いても大きな間違いはないと考えられる。実際、漂流運動よりは前進速度の大きいと考えられる一般的な航走状態にある船の波浪中操縦運動の推定に前進速度がない場合の定常波力のデータを用いて推定した場合でもほぼ妥当な推定となることが報告¹⁴⁾されている。また、港湾内の操船運動のように低速時の操縦運動一般を取り扱うのではなく、漂流運動のみを対象とすると考えれば、実際上重要なのはどちらの方角へどの程度の速度で流されるかということであって、細かな時刻歴は必ずしも必要ではないと考えられる。このことは漂流時の定常状態がどのようなものであるかがわかればよいことを意味する。この場合、波に対して定常状態すなわち回頭運動はしていない状態を考えることになるので、対象とする運動が限定され、取り扱いが容易になると考えられる。

以上より、本研究では、外力として波のみを考えたときの漂流運動の特性をその定常状態を求めることによって表現することとした。定常状態は運動方程式の回頭運動に依存する項をゼロとした上で釣り合い状態を計算することで求めた。その際、波漂流力は前進速度がない場合の理論計算による値を用い、水平面内の漂流運動による流体力については大偏角斜航時の流体力を計測した模型実験データを用いた。その結果、同じ入射波の状態であっても漂流の釣り合い状態が複数存在することがわかった。ただし、見つかった漂流状態が安定であるかどうかの判定には回頭運動に関する流体力特性を必要とするため、そのような情報が欠いている本報告ではその判定はできていない。

2.2 大偏角斜航運動時の流体力計測

漂流運動のような、斜航角や無次元回頭角速度が非常に大きな運動状態の流体力の理論的な推定は現状では困難である。そこで、斜航角が非常に大きな運動状態(大偏角斜航)での流体力を模型試験により計測した。計測に使用した船型は、実船でLpp=105mの練習船である。模型船の主要目を表2-1に示す。

流体力の計測は、中水槽と海洋構造物試験水槽(以

表2-1 供試模型船、青雲丸の主要目

Model Ship Seibun Maru(75%Full)		Scale:4.29/105
Location of Exp.	Towing Tank	Ocean Eng. Basin
Lpp (m)	4.29	
Breadth(m)	0.7313	
Draft(m)	0.2435	
Center of buoyancy (m)	0.091806(aft from midship)	
Displacement (kg)	386.9	387.5
GM (m)	0.06145	0.06243
Prop. dia. (m)	0.1859	
Prop. blade numb.	4	
Rudder Area(m ²)	0.0227026	

下、海洋水槽)で行った。中水槽では船体単独の状態と、舵(舵角0度固定)、プロペラ(固定)付きの2状態で計測したが、中水槽の水槽幅は7.5mで、船長 $L_{pp}=4.29m$ に比べ十分な幅がなく、大偏角の場合に側壁影響が懸念される。そこで、十分な広さを持つ海洋水槽で、側壁影響の大きさを確認するため、舵、プロペラ付きの状態で計測を行った。

流体力計測の座標系を図2-1に示す。いずれの試験でも、Trim Angle(縦傾斜角)、Heel Angle(横傾斜角)、Sinkage(船体沈下)を自由とし、重心高さで曳航し、船体前後方向の流体力 X 、横力 Y 、船体中心まわりの回頭モーメント N 及び、Trim Angle、Heel Angle、Sinkageを計測した。図2-2と図2-3に示すように、前後力と横力は $1/2 \rho L d U^2$ 、回頭モーメントは $1/2 \rho L^2 d U^2$ でそれぞれ除して無次元化して X' 、 Y' 、 N' として整理した。ここで、 ρ は水の密度、 L は船の長さ、 d は喫水、 U は船速である。また、横力 Y と回頭モーメント N か

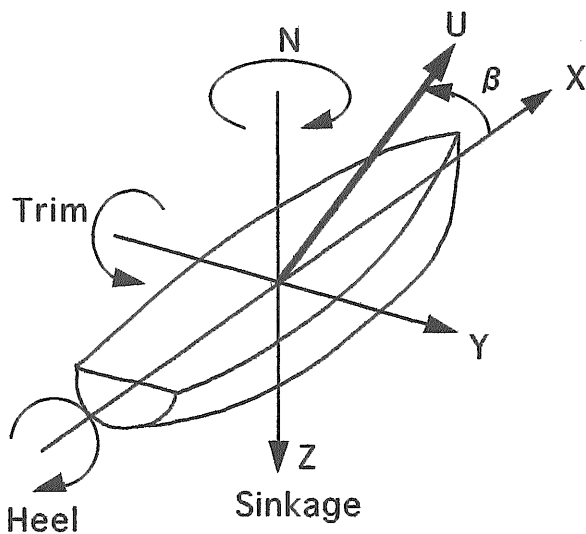


図2-1 大偏角斜航試験の座標系

ら横力の圧力中心位置 N'/Y' を求めた。なお、Trim Angleは船尾沈をプラス、Heel Angleは右舷沈をプラス、Sinkageは船体沈をプラスとした。曳航速度は $U=0.312m/s$ (3kt相当、 $Fn=0.048$)である。

図2-2に、舵、プロペラ付きの大偏角斜航試験(中水槽、海洋水槽)の結果を示す。また、図2-3に、舵、プロペラ付きの大偏角斜航試験(中水槽)と、船体単独の大偏角斜航試験(中水槽)の結果を示す。

まず、図2-2の、舵、プロペラ付きの状態の大偏角斜航試験結果から、流体力の前後力、横力、回頭モーメント、横力の圧力中心位置については中水槽の結果と海洋水槽の結果は良く一致しているため、中水槽での大偏角斜航試験においても側壁影響は小さく、信頼できるデータが計測できていると言える。なお、船体の姿勢については明らかな差が見られるが、Trim Angleでは0.1deg程度の差、Heel Angleでは0.2から0.3deg程度の差、Sinkageでは1mm程度の差であり、水槽が異なることやレールの精度等を考慮すれば計測誤差の範囲内と思われる。

図2-3の、舵、プロペラ付き状態と、船体単独状態を比較して見ると、前後力に顕著な差が見られる。この差は主にプロペラがあることによる抵抗増加成分であると思われるが、前後方向の流体力は横力に比べ1/20程度の大きさであり、この差が漂流運動にどの程度影響を及ぼすかについては今後の検討課題である。この他、回頭モーメントと横力の圧力中心位置にわずかな差が見られる。舵は0度固定の状態であるため、舵角を取った状態ではこの差が変化する可能性もある。船体の姿勢については、Heel AngleとSinkageは同じ姿勢であるが、Trim Angleについては船体単独時の結果がかなりばらついている。この原因については不明である。

2.3 波漂流力の推定計算

波漂流力は丸尾¹⁾とNewman²⁾の方法をもとに前進速度のない場合について計算した。必要となるKochin関数の計算には3次元パネル法¹⁵⁾を用いた。対象とした船型は大偏角斜航時の流体力を計測した船型で、パネル数は片舷側で772である。計算に際し船の運動は自由とし、重心位置など必要な変数は排水量計算や実船データ等を参考にして求めた。横揺れ運動については固有周期を10.2秒、横揺れ減衰に係る減減係数¹⁶⁾については、 $\kappa_r=0.2398$ 、 $\beta=0$ とした。また、波振幅(ζ)は1mで波長によらず一定として計算した。

まず、波周期の運動計算結果を船との出会い角(χ)150度と60度を例にとって、図2-4と図2-5にそれぞれ示し、その妥当性について検討する。図中の x_n 等はそれぞれの波周期の運動振幅を表し、無次元化は波振幅と波数(k)を用いて行った。ここで、波との出会い角0度は船尾方向から、90度は真横右舷方向から、180

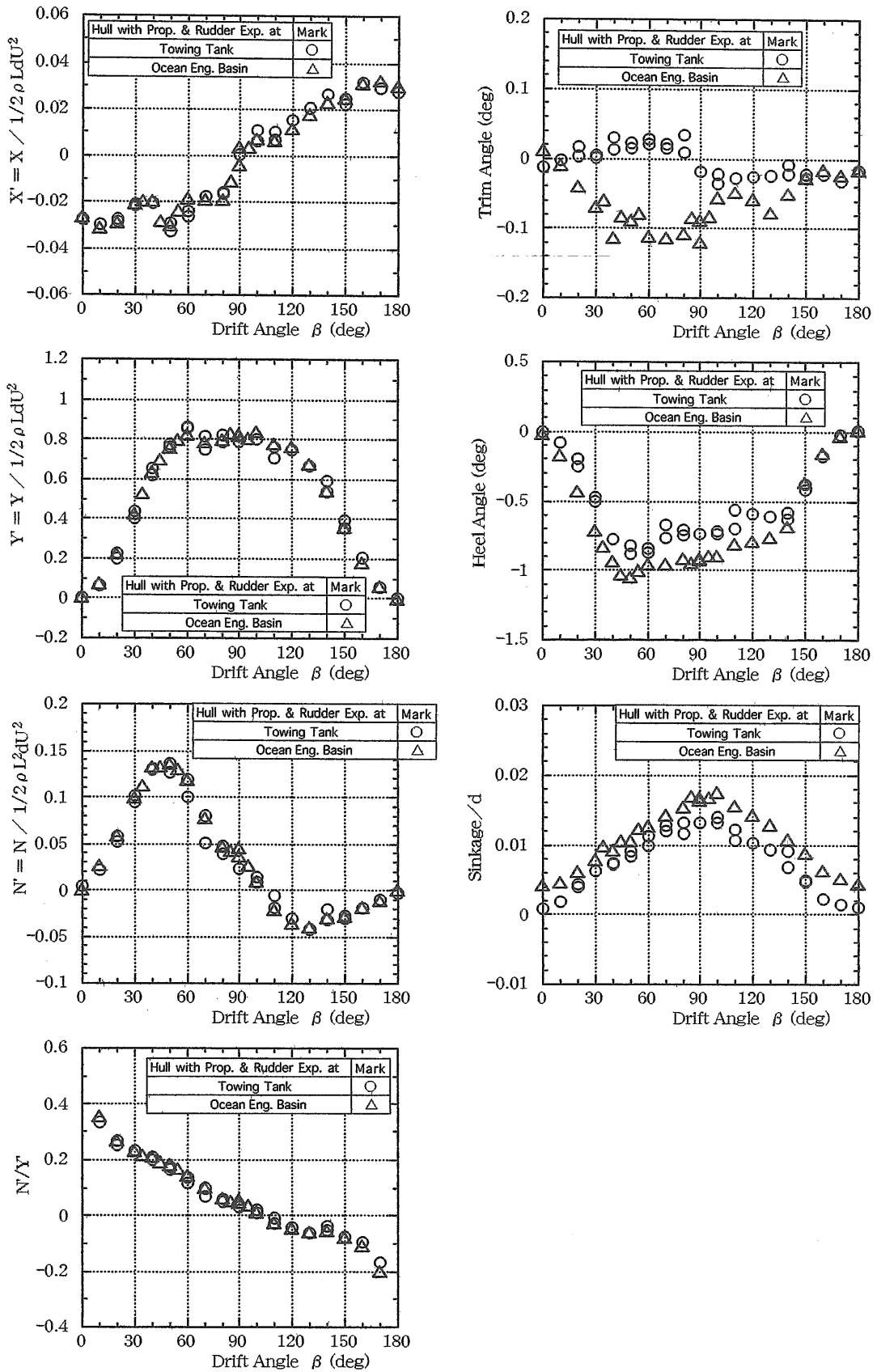


図2-2 中水槽と海洋構造物試験水槽における、舵、プロペラ付き状態の大偏角斜航試験結果

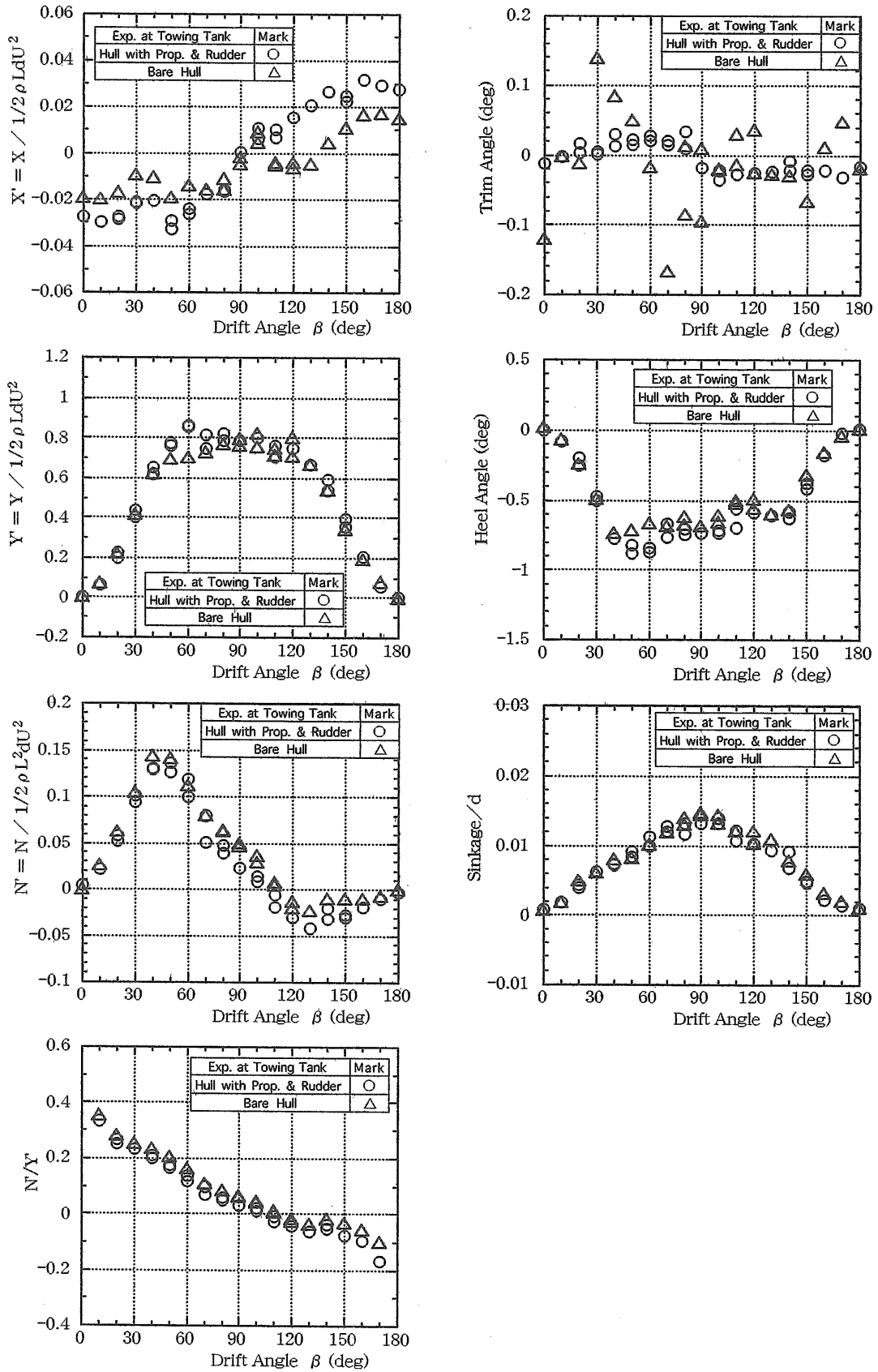


図2-3 船体単独の大偏角斜航試験と、舵、プロペラ付き状態の大偏角斜航試験結果（中水槽）

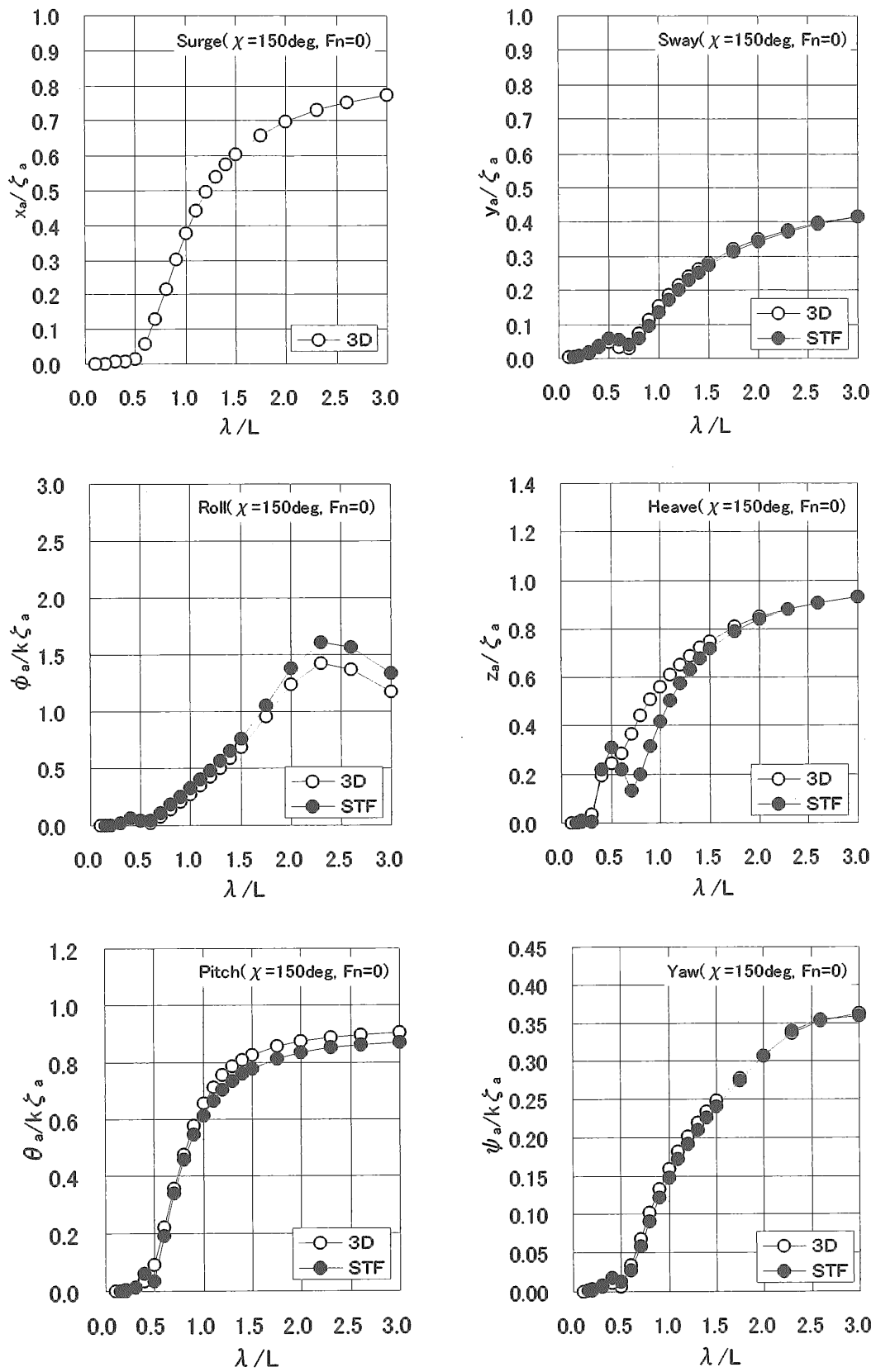


図2-4 波周期の運動振幅 ($\chi = 150^\circ, F_n = 0, \zeta_a = 1\text{m}$)

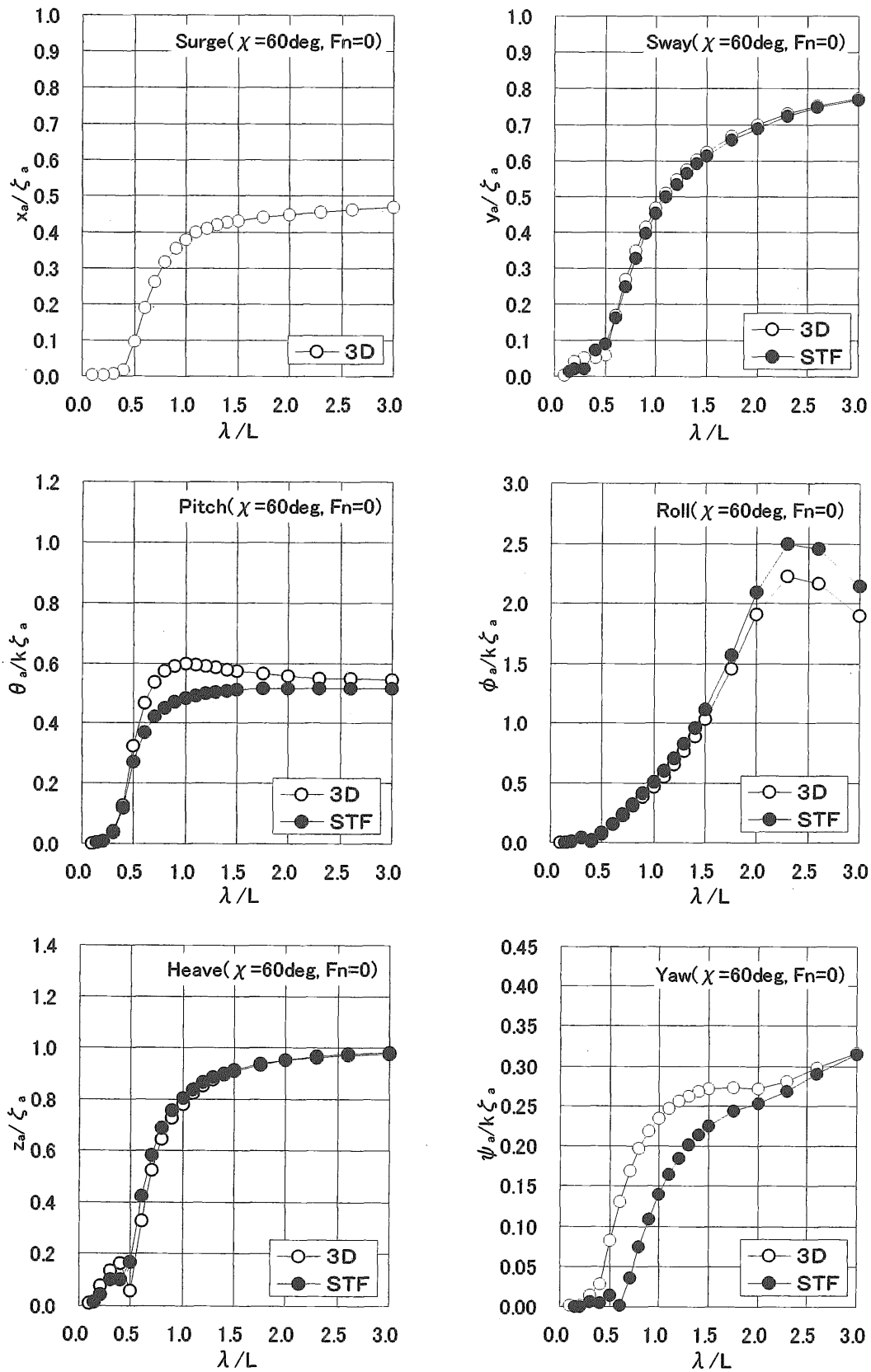


図2-5 波周期の運動振幅 ($\chi=60\text{deg}, Fn=0, \zeta_a=1\text{m}$)

度は船首方向からの波の入射を表す。前後揺れ以外は比較のためストリップ法(STF法)による計算結果もあわせて示した。図中「3D」が3次元パネル法による計算結果、「STF」がSalvesen、Tuck、Faltinsenの方法に基づくストリップ法による計算結果を表す。これらの図に示すように、運動の計算結果はストリップ法の計算結果と大きな違いはなく、ほぼ妥当な計算結果となっているものと考えられる。

次に、波漂流力の計算結果を出会い角30度毎に波長船長比を横軸にとって図2-6に示す。計算結果は前後力と横力、回頭モーメントをそれぞれ X_d 、 Y_d 、 N_d と表し、 $1/2\rho g L \zeta_a^2$ または $1/2\rho g L^2 \zeta_a^2$ で無次元化した。ここで、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 L は船の長さをそれぞれ表す。力の方向の定義は前節の大偏角斜航時の流体力と同じである。ただし、 N_d に関しては重心まわりのモーメントとして定義した。全般的に短波長になるに

従って波漂流力が大きくなる傾向が見られる。波周期の運動が大きくなる波長船長比1程度より長い波よりもむしろ短波長の波が波漂流力にとっては重要であることがわかる。ただし、もちろん有次元の波漂流力を考える場合は入射波振幅を考慮しなくてはならない。計算結果の中で波長船長比(λ/L)が0.4よりも短い領域では特に N_d の計算結果について変動する傾向が見られる。図2-7は同じ計算結果を波長船長比0.2、0.4、0.6、1.0について波との出会い角を横軸にとって示したものであるが、短波長になるにつれて出会い角に対して激しく振動している。 X_d や Y_d は出会い角に対して比較的安定した定性的変化を見せているが、 N_d に見られる前述の傾向は、短波長波が漂流運動に及ぼす影響を考えると、出会い角によって指向性が大きく変化する事を意味しており、漂流運動を推定する上で重要であると考えられる。

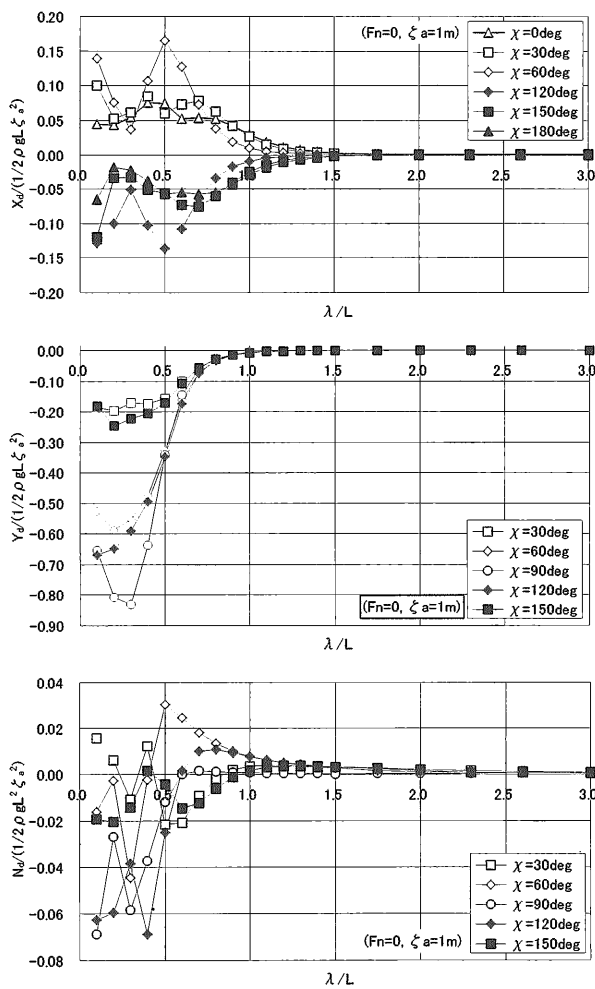


図2-6 波漂流力と波長の関係 (Fn = 0, $\zeta_a = 1\text{m}$)

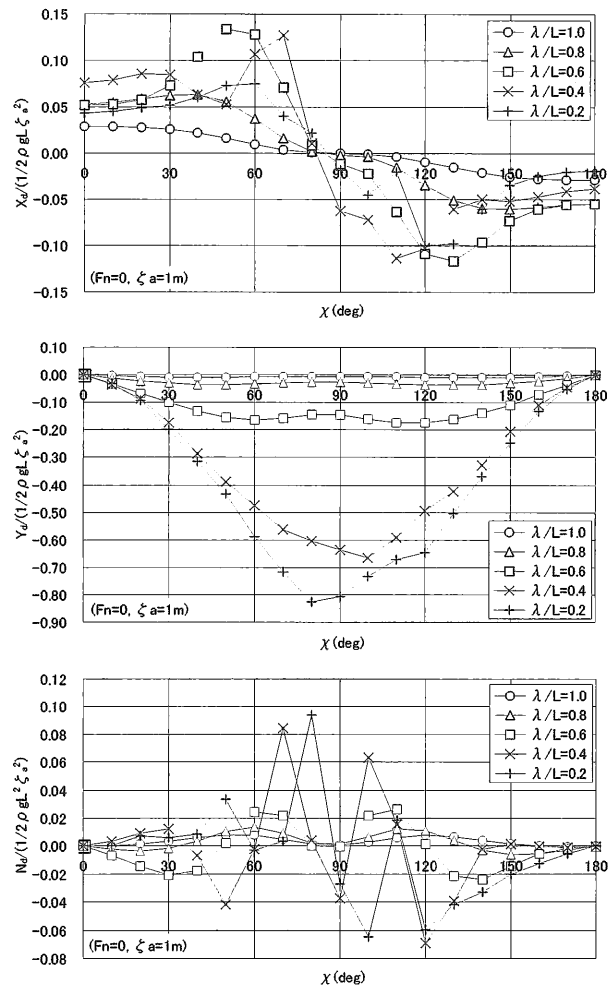


図2-7 波漂流力と波長の関係 (Fn = 0, $\zeta_a = 1\text{m}$)

2.4 波の力による定常漂流運動

2.4.1 定常漂流を表す釣り合い方程式

波浪中の船の運動は、野中¹⁷⁾によると波との出会い周期の高周波数成分とそれ以外の低周波数成分との重ね合わせで近似できることが示されている。野中の理論は通常の操縦運動すなわち前進運動が横運動や回頭運動に比べて支配的であるとの仮定に基づいており、今考えている漂流運動にそのまま適用することはできない。しかし、前進速度のない場合については Triantafyllou¹⁸⁾、Ogilvie¹⁹⁾が同様の近似が可能であることを示しており、通常の航行状態よりも速度の遅い漂流状態を考える場合についてこの近似を適用しても大きな間違いではないと考えられる。そこで、本研究では、波浪中の船の漂流運動を波との出会い周期の高周波数成分とそれ以外の低周波数成分との重ね合わせで近似できると仮定することとする。

以上の仮定を考慮すれば、漂流中にある船の低周波数域の運動を記述する平面運動方程式は一般に次のように表されると考えられる。

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X_0 + X_d \\ m(\dot{v} + nr) = Y_0 + Y_d \\ I_z \dot{r} = N_0 + N_d \end{cases} \quad (2-1)$$

ただし、ここで、 m は船の質量、 I_z は回頭運動に関する慣性モーメントを表す。 u と v 、 r はそれぞれ前進速度と横方向速度(右舷側を正)、回頭角速度(右回頭を正)を表し、 \dot{u} 等は前進速度等の時間微分を表す。また、 X_0 と Y_0 、 N_0 はそれぞれ外乱がない状態での船の平面運動に基づく前後力(前方向を正)と横力(右舷方向を正)、回頭モーメント(右回頭方向を正)の各流体力を表す。 X_d と Y_d 、 N_d は波漂流力の同じく前後力と横力、回頭モーメントの各流体力を表す。なお、これらの速度や力はいずれも波との出会い周期の高周波数の運動に基づく成分を含まない低周波数成分を表し、回頭に関する変数はすべて重心まわりで定義することとする。後出の変数も含めて座標系を図2-8に示す。

X_0 と Y_0 、 N_0 は一般に、

$$\begin{cases} X_0 = X_0(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r) \\ Y_0 = Y_0(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r) \\ N_0 = N_0(\dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, u, v, r) \end{cases} \quad (2-2)$$

と表されると考えられる。また、長波頂規則波を仮定すると、波漂流力 X_d と Y_d 、 N_d は、

$$\begin{cases} X_d = X_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ Y_d = Y_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ N_d = N_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \end{cases} \quad (2-3)$$

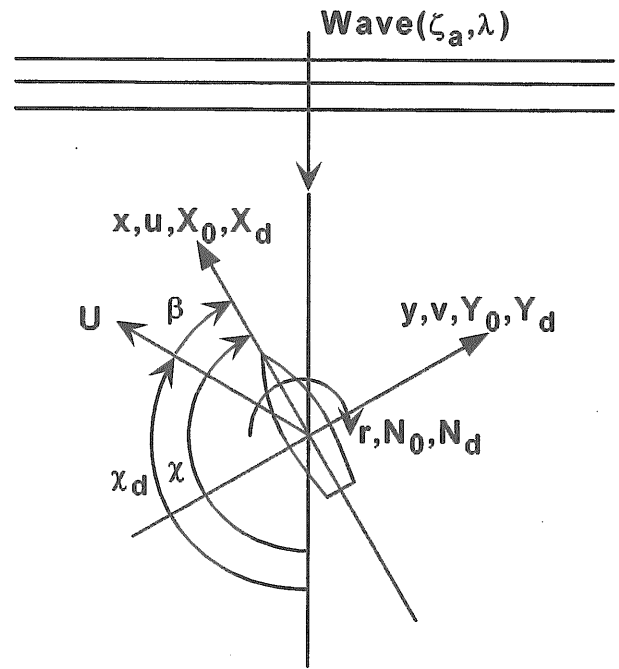


図2-8 座標系

と表されると考えられる。ここで、 ζ_a は入射波振幅 λ 、 λ は入射波の波長、 χ は船と波との出会い角を表す。さて、漂流の定常状態を考えると、

$$\dot{u} = \dot{v} = \dot{r} = 0, r = 0 \quad (2-4)$$

が成り立つ。さらに、漂流中の船速はそれほど大きいとは考えられないから、波漂流力を、

$$\begin{cases} X_d = X_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \cong X_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ Y_d = Y_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \cong Y_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ N_d = N_d(u, v, r, \zeta_a, \lambda, \chi) \cong N_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \end{cases} \quad (2-5)$$

と近似できると仮定する。このように考えると、定常漂流状態を表す運動方程式は、

$$\begin{cases} 0 = X_d(0, 0, 0, u, v, 0) + X_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ 0 = Y_d(0, 0, 0, u, v, 0) + Y_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \\ 0 = N_d(0, 0, 0, u, v, 0) + N_d(0, 0, 0, \zeta_a, \lambda, \chi) \end{cases} \quad (2-6)$$

となる。この式は ζ_a と λ で定義される入射波を考えたときの定常漂流状態の釣り合い方程式となっており、これを解いて未知数である u と v 、 χ を求めることにより、波に対してどちらの方向にどのような姿勢でどれだけの速度で漂流していくかを求めることができる。

この方法では、回頭運動に関する流体力の情報が(2-6)式の中には入っていないので、時間シミュレーションの方法と比べて漂流運動の推定が大幅に簡略化され

ることになる。ただし、得られた解が物理的に安定であるかどうかを判定するためには、やはり回頭運動に関する流体力の情報が必要となることに注意する必要がある。

2.4.2 定常漂流状態の計算例

実際に(2-6)式を解いて定常漂流状態を求めた。(2-6)式中の X_0 と Y_0 、 N_0 については2.2節で述べた大偏角斜航時の実験結果を用い、 X_d と Y_d 、 N_d については2.3節で述べた前進速度なしの場合の推定計算結果を用いることとする。大偏角斜航運動中の実験結果としては中水槽で実施した舵、プロペラ付きの状態のデータを、同一斜航角で計測点が複数ある場合は平均値をとり、 N_0 については実験結果を重心まわりに変換して用いた。入射波の条件は $\zeta_0 = 1m$ 、 $\lambda/L = 0.7$ 、とした。ここで、 L は船の長さである。

大偏角斜航運動中の実験結果あるいは波漂流力の計算結果を用いるに当たっては、これらを船の左右対象性を考慮した周期関数と見なした上で3次スプライン関数で表現して計算に用いた。それぞれの関数を図2-9と図2-10に示す。ただし、 X_0 と Y_0 、 N_0 に関しては図2-9に示すように、 u と v ではなく形式的に、船速 U と斜航角 β の関数として表現している。これらは、

$$\begin{cases} U = \sqrt{u^2 + v^2} \\ \beta = \tan^{-1}(-v/u) \end{cases} \quad (2-7)$$

の関係で結ばれている。

(2-7)式を考慮した上で、(2-6)式を U と β 、 χ を未知数と見なし、多変数のNewton-Raphson法を用いてこれを解いた。初期値を変化させて得られた解を表2-2に示す。ここで、 χ_d は、

$$\chi_d = \chi - \beta \quad (2-8)$$

で定義され、図2-8に示すように、船が流される方向を表す。

解は全部で8つあるが、対象性を考えれば本質的には5つである。これらの解を、漂流速度を \rightarrow の長さで表して図2-11に示す。No.4は正面から波を受け船が真後ろに流されていく状態を表し、No.5は反対に真後ろから波を受け船がまっすぐ前進している状態を表している。これらの状態は進行方向に対する抵抗が小さくなるため、漂流速度はそれぞれ約3.5kt前後と比較的大きくなっている。また、No.3とNo.6はほぼ真横から波を受け、波下側から約15度ずれた方向に流されていく状態を表している。この場合は、進行方向に対する抵抗が大きくなるため漂流速度は約0.7ktと小さい。以上の解は直感的にも理解しやすいが、No.1と8あるいはNo.2と7の解はこれらと異なり、ほぼ真横あるいは真

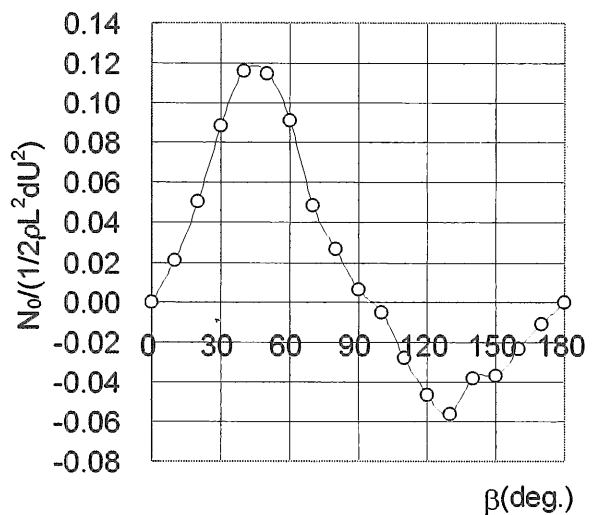
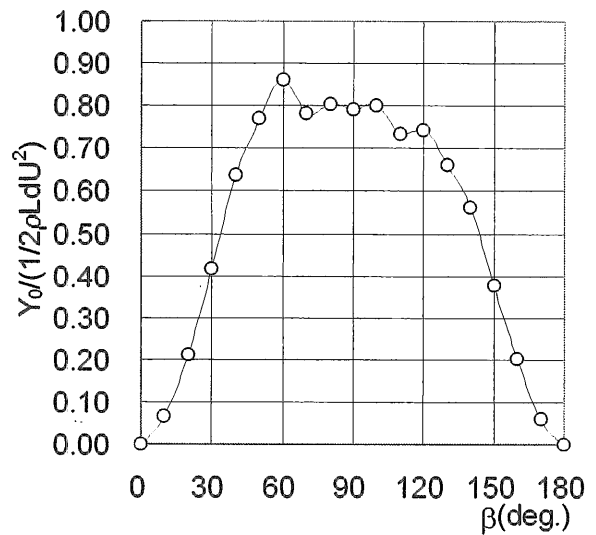
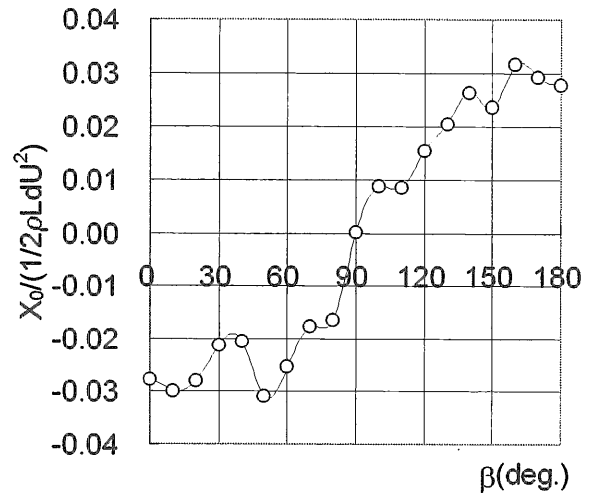


図2-9 斜航流体力の実験結果とそのcubic spline補間

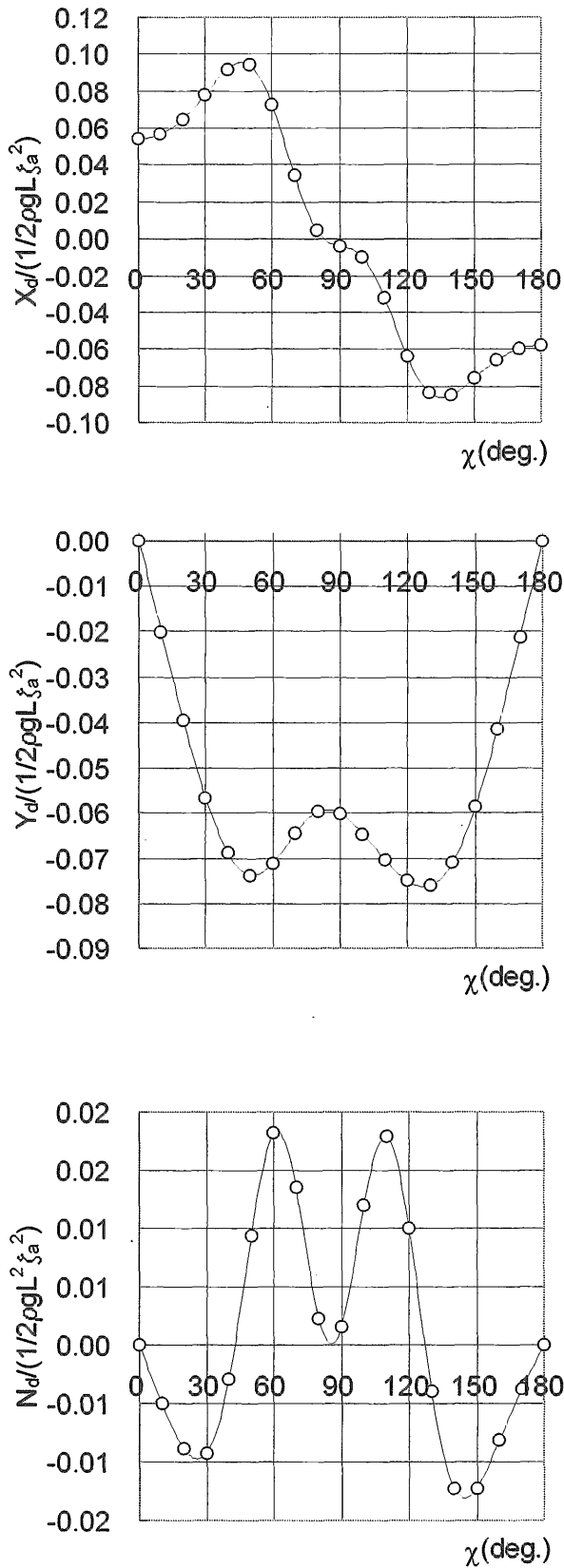


図2-10 波漂流力の計算結果とそのcubic spline 補間 ($\lambda/L=0.7, \zeta_a=1m$)

表2-2 定常漂流状態の解

Sol. No.	U(kt)	β (deg.)	χ (deg.)	χ_d (deg.)
1	1.15	154.6	95.6	-59.0
2	3.21	171.7	114.8	-57.0
3	0.68	99.1	83.9	-15.2
4	3.60	180.0	180.0	0.0
5	3.48	0.0	0.0	0.0
6	0.68	-99.1	-83.9	15.2
7	3.21	-171.7	-114.8	57.0
8	1.15	-154.6	-95.6	59.0

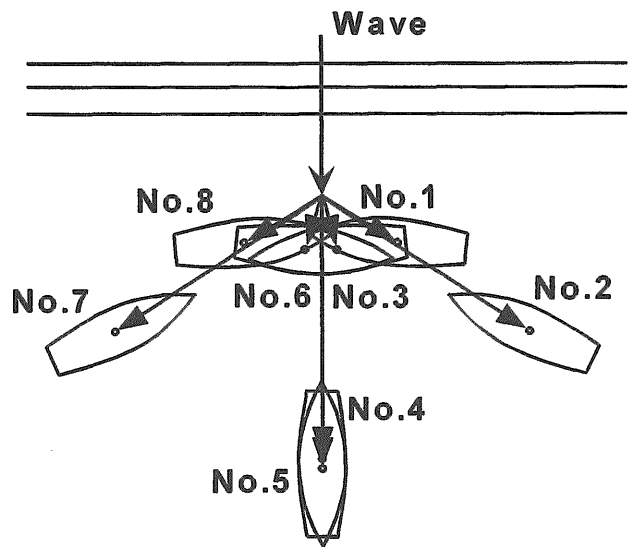


図2-11 定常漂流状態の解 (矢印は漂流の方向と速度の大きさを表わす)

横よりやや前方から波を受け真後ろから反対舷側約25度あるいは約8度方向に流されていく状態を表している。注目すべきは漂流方向が波下側から60度近くもずれていることと、漂流速度が比較的速い速度となる場合を含んでいることである。特に、No.2と7では約3.2ktの漂流速度となっており、これはNo.4あるいはNo.5の場合と同程度の速い速度である。

これらの解が物理的に安定な解であるかどうかは自明ではないが、No.2と7あるいはNo.1と8のいずれかが安定な解であるとする、漂流方向が左右対称な状態で120度近く離れていることになるため、漂流船舶がどこへ流れ着くかが釣り合い状態によって大きく変わってくる可能性がある。特に、No.2と7の解は漂流速度も速く、漂流予測の実際上重要な問題と考えられる。

2.5 結言

船の漂流運動を考えるに当たって、最も重要なのはどちらの方向への程度の速さで流されるかを知ることであると考え、外力として波のみを考えたときの定

常漂流状態を求めた。斜航運動による流体力は斜航角が180度までを含む大偏角の斜航試験を行って求めた。また、波漂流力に関しては漂流運動の速度が小さいと仮定して、前進速度なしの場合の計算結果を用いた。この方法では定常状態のみを問題とするため、回頭運動に関する流体力特性が釣り合い方程式を解く段階においては必要ではなくなるという特徴がある。

波長船長比0.7、波振幅1mの条件で釣り合い方程式を解いた例では、解は8つあることがわかった。このような複数解の存在は他の入射波条件においても一般的に予想される。

得られた解が物理的に安定な漂流状態を表しているかどうかを判定するためには、一般に回頭運動に関する流体力特性がわからなくてはならないと考えられるため、それが不明な現時点では安定不安定を判定することができない。しかし、得られた釣り合い点を調べると、波下側からかなり左右にずれた方向にしかもかなり速い速度で流されるという状態を示している点が含まれており、これらの釣り合い点が物理的に安定な漂流状態を意味するとすれば、漂流運動の推定にとっては非常に重要な問題になると考えられる。最終的にここで得られた解がどのような意味を持つかは、回頭運動による流体力特性を考慮してより詳細に検討を行う必要があると考えられる。

本報告で用いた定常漂流状態を求める方法による計算例が示すように、ある海象における漂流状態は複数存在する可能性がある。これは時間シミュレーションの方法では初期値の取り方によって漂流経路等が異なってくることに対応すると考えられる。本方法によれば漂流予測は複数の可能性を示すことになると考えられ、時間シミュレーションによる漂流予測とは異なる、複数の可能性を示す漂流予測の方法のあり方も検討されるべきと思われる。

2章の参考文献

- 1) Maruo, H.: The drift of a body floating on waves, *Journal of Ship Research*, Vol. 4, No. 3, 1960, pp. 1-10
- 2) Newman, J. N.: The drift force and moment on ship in waves, *Journal of Ship Research*, Vol. 11, No. 1, 1967, pp. 51-60
- 3) Faltinsen, O.M., Minsaas, K.J., Liapis, N., Skjördal, S.O.: Prediction of resistance and propulsion of a ship in a seaway, 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, 1980, pp.505-529
- 4) Kashiwagi, M.: Calculation formulas for the wave-induced steady horizontal force and yaw moment on a ship with forward speed, *Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ.*, Vol. 37, No. 107, 1991, pp. 187-205
- 5) 岩下英嗣, 伊藤章雄, 岡田哲男, 大楠丹, 高木幹雄, 溝口純敏: 斜波中を航走する肥大船に働く波力について, *日本造船学会論文集*, 第171号, 1992, pp. 109-123
- 6) 柏木正, 大楠丹: 波浪による定常流体力に関する研究, *日本造船学会論文集*, 第173号, 1993, pp. 185-194
- 7) 野中晃二, 原口富博, 二村正, 上野道雄, 藤原敏文, 牧野雅彦, 児玉良明, 吉野良枝: 操縦運動時の船体まわりの流場に関する研究, *船舶技術研究所報告*, 第34巻, 第5号, 1997, pp. 1-68
- 8) 宮崎英樹, 野中晃二, 日野孝則, 児玉良: 明CFDによる操縦流体力の推定について, *船舶技術研究所研究発表会講演集*, 第72回, 1998, pp. 191-196
- 9) 芳村康男: 浅水域の操縦運動数学モデルの検討(第2報) - 低速操船時、主船体に働く流体力について -, *関西造船協会誌*, 第210号, 1988, pp. 77-84
- 10) 小瀬邦治, 湯室彰規, 芳村康男: 操縦運動の数学モデルの具体化 - 船体・プロペラ・舵の相互干渉とその表現 -, 第3回操縦性シンポジウム, *日本造船学会*, 1981, pp. 27-80
- 11) 小瀬邦治, 日當博喜, 橋詰泰久, 二川栄二郎: 低速で航行する船の操縦運動モデルについて, *日本造船学会論文集*, 第155号, 1984, pp. 132-138
- 12) 高品純志: タグによる操縦運動とその計算法について, *日本造船学会論文集*, 第160号, 1986, pp. 93-102
- 13) 小瀬邦治, 深沢塔一, 末光啓二, 佐伯敏郎, 湯室彰規, 山上順雄: - MMS報告IV - 低速時の操縦運動モデルの実用化, *日本造船学会誌*, 第721号, 1989, pp. 403-411
- 14) Hirano, M., Takashina, J., Takaishi, Y., Saruta, T.: Ship turning trajectory in regular waves, *Transaction of the West-Japan Society of Naval Architects*, No. 60, 1980, pp. 17-31
- 15) 原口富博, 二村正: 曳船およびバージの波漂流力計測, *船舶技術研究所報告*, 第31巻, 第3号, 1994, pp. 19-39
- 16) 高石敬史, 猿田俊彦, 吉野良枝: 船体に働く横揺れ減衰力について(第1報) - 自由横揺れ試験結果 -, *船舶技術研究所報告*, 第16巻, 第5号, 1979, pp. 13-28
- 17) 野中晃二: 波浪中の操船運動について, *西部造船学会報*, 第80号, 1990, pp.73-86
- 18) Triantafyllou, M. S.: A constant hydrodynamic theory for moored and positioned vessels, *Journal of Ship Research*, Vol. 26, No. 2, 1982, pp.97-105
- 19) Ogilvie, T.F.: Second order hydrodynamic effects on ocean platforms, *International Workshop on Ship and Platform Motions*, 1983

3. 船体に働く風圧力に関する研究

3.1 緒言

操縦性能における風圧力に関する研究については、強風下の港湾域における低速航行での操縦限界、停泊時の振れ回りなど多くの研究がなされてきた。しかしながら水面上の船体形状が複雑なために理論的推定が困難なことから、風洞等で直接風圧力を計測する場合が多く、風圧力の精度良い推定法の確立が望まれている。

そこで、本章においては、風圧力の精度良い推定法の確立と風圧力計測を行う上での問題点を明らかにすることを目的に研究動向の調査を行った。その結果、近年就航している船型の風圧力データが少ないことや、過去の実験においては様々な状態で風圧力計測が行われており、風速分布の違いによる影響の把握とその修正法開発の必要性、風洞模型の艤装品が風圧力に及ぼす影響の把握の必要性等が明らかとなった。

この研究動向調査結果を踏まえ、近年建造されたVLCC、及び92,000DWTタンカー、LNG船、LPG船の4隻の船舶について満載状態及び軽荷状態での風圧力計測を行い、それぞれの船型の風圧力データを得た。また、風速分布の違いや模型船の艤装状態の違いによる風圧力への影響を調査した。さらに、船体まわりの風の流れの様子を把握することを目的に行ったVLCC船型まわりの可視化実験の結果について報告する。

3.2 風圧力に関する過去の主な研究

船体に働く風圧力の精度良い推定法の確立と、風圧力計測の問題点等を明らかにすることを目的とし、過去に行われた風圧力に関する研究動向の調査を行った。以下にその概要を述べる。

3.2.1 過去の風圧力計測の概要

古くは1948年に荒木ら¹⁾が、2隻の青函連絡船の鏡像模型を用いた風洞実験を行った。木下ら²⁾は、鮪鯉漁船の操縦性に及ぼす風の影響について検討を行うため風洞実験を行った。岡田³⁾は、小型船舶の風による傾斜モーメントの調査を行うために3種類の風洞模型（客船及び漁船）について風洞実験を行った。1960年にK.D.A.Shearerら⁴⁾は、4隻11種類の船型について風洞実験を行い、風速分布及び模型船の尺度影響の検討を行った。B.Wagner⁵⁾は、16隻25種類の船型について風洞実験を行った。1968年にG.Aertssenら⁶⁾は、カーフェリーの風洞実験を行い、風速分布に境界層がある場合とない場合を比較し、風圧力の差が非常に大きいことを指摘した。辻ら⁷⁾は、7隻、18種類の様々な船舶に関しての風圧力を計測した。1隻の漁船については風洞で鏡像模型を用いて行い、タンカー、その他の船型

については曳航水槽に模型船を浮かべ、送風機を用いて実験を行った。C. Aage⁸⁾は、7隻9種類の模型船について風圧力の計測を行った。田宮ら⁹⁾は、箱形部材を積み重ねたモデルの風圧力を計測し、船体中心から風圧中心までの距離の近似式を実験結果により求めた。平岩ら¹⁰⁾は、鏡像模型の風圧力を計測し、漂流方向及び漂流力の推定を行い、実船試験結果との比較を行った。W.Berlekomら¹¹⁾は、7隻の大型タンカーについて実験を行い、操縦性に及ぼす影響を検討した。岩井ら¹²⁾は、ブロックの積み重ねにより船体形状を模擬したモデルの風圧力を計測し、アスペクト比と風圧力係数との関連について検討した。1977年にはOil Companies International Marine ForumからVLCCの風洞実験結果が報告され¹³⁾、満載及び軽荷状態、船首形状の違いによる影響が示された。烏野ら¹⁴⁾は、漁船の喫水を変えた風圧力の計測を行った。鏡像模型を用いて実験を行っている。W. Blendermannは、20隻39種類の様々な船舶について風洞実験を行い、風圧力係数間の相関、実験状態での風速分布の影響についての検討を行った^{15) 16) 17)}。

3.2.2 過去の風圧力計測方法とその問題点

過去に行われた風圧力計測方法について調べると、実験設備の制約や研究方針により様々な手法がとられている。これらの実験状態について整理し表3-1に示す。ただし、文献の中で内容の不明なものについては記述していない。今回調査を行った風圧力計測においては、一例を除いてすべて風洞で実験を行っており、模型については水線面よりも上の船体のみを製作し、検力計に取り付ける場合が多い（表中では「水線面上再現」）。これらの風洞実験に関する文献調査の結果、主に以下の点が明らかとなった。

(1) レイノルズ数の影響

模型による風洞実験のレイノルズ数(Rn)と10⁶程度の実船のレイノルズ数とを一致させることは不可能であるため、レイノルズ数に依存せず抗力が一定と見なせる臨界レイノルズ数を超える条件で実験を行う必要がある。このことから多くの文献において、実験の風速を決定するためにレイノルズ数の影響をはじめに調べ、風圧力が一定となる領域で実験を行っている。表3-1に示すとおりレイノルズ数が10⁵レベルで行われている場合もあるが、多くの実験は10⁶レベルであることがわかる。

レイノルズ数の影響を調べたB.Wagnerによる実験結果⁵⁾、辻らによる調査結果⁷⁾を一例として図3-1に示す。これらの結果からRn ≥ 10⁶であれば、風圧力がほぼ一定であることがわかる。また、荒木ら¹⁾によれば、1.1mの模型を用いた実験で風速7～40m/s間で変化したのが、抗力係数への影響は観察されなかった。この結果は、Rn=5.5 × 10⁵～3.1 × 10⁶間で変化したことに

相当する。模型船の製作状態もそれぞれの実験で異なることから単純に比較することができないが、これらの結果からおよそ $Re \geq 10^6$ であることが実験を行う上で一つの目安となることがわかる。

(2) 風速分布および代表風速

表3-1に示すように、実験状態の風速分布については大きく2通りに考えることができる。1つは、境界層の発達した海上風を再現したもの^(例えば⁶⁾)、他方は境界層のない一様風の中で実験を行ったものである。風洞模型が鏡像模型の場合には境界層が存在しない実験状態となる。海上風を再現する場合には、風洞の床面に模型を設置し、境界層を上流でブロック等の粗度要素によ

り調整する方法がとられている。また、模型船を床面に設置した場合でも、境界層が非常に薄く一様流に近い状態で実験を行った場合もある¹⁵⁾。

無次元化を行う際の代表風速の定義については、海上風を想定した場合においても境界層を除いた一様流の風速(表中では「境界層無平均」)を用いる場合が多い。境界層の風速を含んだ平均高さまでの平均風速(表中では「境界層含平均」)で整理を行っている場合もある。代表風速の取り方が同じであっても船が境界層の中に存在する場合と一様風を受ける場合においては、同じ船舶であっても当然結果が異なる。

以上のことから、過去のデータを利用した風圧力推

表3-1 過去に行われた主な風圧力計測及びその実験状態

著者	発表年	対象船舶	実験施設	模型の種類	模型の大きさ	風速分布	代表風速	風速	Re数
荒木 他	1948	鉄道連絡船2隻	風洞	鏡像	Lpp=1.13m	一様流	平均風速	約30m/s	2.14×10^6
木下 他	1949	鱈鯨漁船2隻	風洞	鏡像	Loa=1m	一様流	平均風速	29.3m/s	1.9×10^6
岡田	1952	小型船舶3隻	風洞	傾斜モーメント用全体模型	Loa=約1.0m	海上風	境界層無平均	約20m/s	1.4×10^6
K.Shearer 他	1960	4隻11種	風洞	水線面上(一部鏡像)	Loa=2.5~3.8m	海上風	境界層無平均	18.6m/s	4.9×10^6
B.Wagner	1967	16隻25種	風洞	水線面上再現	Loa=0.85~1.3m	一様流	平均風速	20~29m/s	$1.2 \sim 2.7 \times 10^6$
G.Aertssen 他	1968	カーフェリー	風洞	水線面上再現	Loa=2.34m	海上風	—	30m/s	4.8×10^6
辻 他	1970	7隻18種	水槽(一部風洞)	全体、鏡像(風洞用)	Lpp=1~2m	一様流	平均風速	最大18m/s	$1.24 \sim 1.3 \times 10^6$
C.Aage	1971	7隻9種	風洞	水線面上再現	Loa=0.5m	海上風	境界層無平均	60m/s	1.7×10^6
田宮 他	1971	箱形部材7種	風洞	水線面上再現	Lpp=1.14m	一様流	平均風速	10m/s	0.8×10^5
平岩 他	1972	北大線習船	風洞	鏡像	Lpp=0.30m	一様流	平均風速	約20m/s	$4.21 \sim 4.39 \times 10^5$
W.Berlekom 他	1974	VLCC1隻7種	風洞	水線面上再現	Loa=2.2m	海上風	—	20m/s	3.0×10^6
岩井 他	1976	箱形部材30種	風洞	水線面上再現	Loa=1.3m	海上風	境界層含平均	3.5,8m/s	$2.08 \sim 7.11 \times 10^5$
OCIMF	1977	VLCC5隻	風洞	水線面上再現	Loa=0.93~1.2m	海上風	境界層無平均	32.4m/s	$2.1 \sim 2.7 \times 10^6$
瀬崎	1980	PCC1隻2種	風洞	—	—	—	—	—	—
平野 他	1984	LNG1隻1種	風洞	—	Lpp=0.9m	—	—	—	—
鳥野 他	1989	漁船1隻7種	風洞	鏡像	Loa=0.31m	一様流	平均風速	約26m	$5.01 \sim 5.18 \times 10^5$
W.Blendermann	1996	20隻39種	風洞	水線面上再現	Loa=約1m	一様流	平均風速	最大35m/s	$2 \sim 3 \times 10^6$

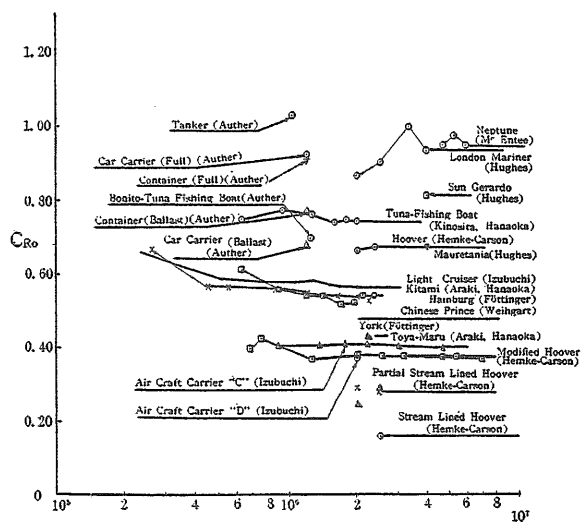
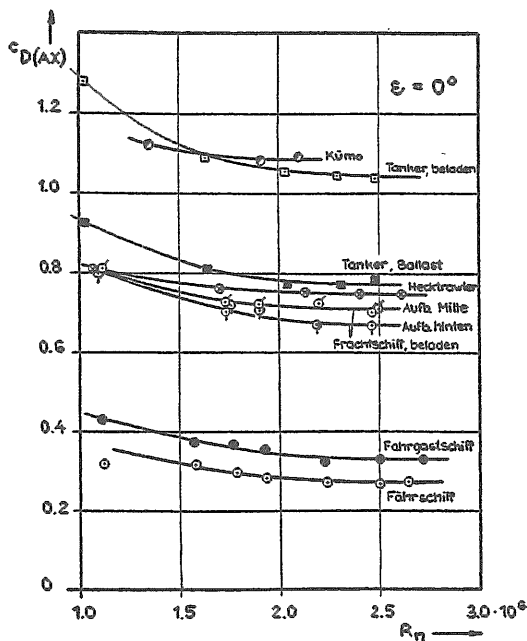


図3-1 風圧力に及ぼすレイノルズ数の影響^{5) 7)}

定法を考えた場合には、風速分布や代表風速の違いを考慮して取り扱えるような修正方法が必要である。

(3) 風洞模型の艤装品が風圧力に及ぼす影響

模型の製作に当たっては、細部にわたって忠実に再現するのが望ましいが、費用や制作時間の観点から細かい艤装品については省略されることが多い。

荒木ら¹⁾は索具類と前後部の手すりを省略し実験を行っている。K.D.A.Sheareaら⁴⁾は、ウインチ、ウインドラス等の省略を文献の中で述べている。また、模型船の尺度影響の検討も行っているが、その影響は小さいことを報告している。また、G.Aertssenら⁶⁾は、ウインドラス、ボラード、フェアリーダの省略を行っている。

このように、多くの実験において艤装品の省略についての記述が見られるが、その影響についての考察を行った実験例は非常に少なく、艤装品の影響の大きさについてデータの収集を行う必要性がある。

3.2.3 過去の風圧力推定法に関する研究

1971年に山野ら¹⁸⁾は、Wagner⁹⁾、辻ら⁷⁾等の38隻(ライナー型14隻、タンカー型13隻、客船型11隻)の実験データから、5つのパラメータを用いて風圧力推定のための近似式を提案した。R.M.Isherwood¹⁹⁾は、B.Wagner⁹⁾、Mutimer等の49種類の実験データを用いて、回帰分析による風圧力推定法を提案した。米田ら²⁰⁾²¹⁾は、物理成分モデルを用いた風圧力推定法を提案し、漁船の風洞実験結果と比較を行った。また、構成成分の各パラメータを風洞実験データの回帰分析から求めることによる風圧力推定法を提案した。

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、R.M.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用した推定法であり、最近の大型タンカーや新形式船の風圧力の推定を行った場合には、信頼性の低いことが考えられる。このため、最近の大型タンカーやPCC、LNG船等の風圧力データの収集が必要である。また、現在のところ風圧力推定法としては、実験データの回帰分析による推定法にならざるを得ないと考えているが、3.2.2項で述べたように風速分布の実験値への影響も考慮した推定法を検討する必要がある。

3.2.4 操縦運動に及ぼす風圧力の影響に関する研究

操縦運動に及ぼす風圧力の影響を検討した過去の研究例について、特に風圧力係数の取り扱いに着目し示す。

H.Eda²²⁾は、風圧力の計測を行い、各風圧力係数を三角関数に置き換え、操縦運動の推定を行った。小川²³⁾は、辻ら⁷⁾の風圧力データを用い、操縦運動の方程式をできる限り省略しない形で計算を行った。井上ら^{24)~27)}は、辻ら⁷⁾、C.Aage⁸⁾の風圧力のデータ、

R.M.Isherwood¹⁹⁾の推定値を用い、操縦性に及ぼす風の影響を考察した。E.W.Welnicki²⁸⁾は、鏡像模型で風圧力計測を行い、強風下での進路安定性について推定を行った。桑島ら²⁹⁾³⁰⁾は、辻ら⁷⁾のデータを用い、変動風下での操縦運動の推定を行った。田中ら³¹⁾は、辻ら⁷⁾のデータを用い、操船上の限界風速を求めるモデルの改良を行った。横町³²⁾は、R.M.Isherwoodの推定式¹⁹⁾を用い、定点保持のためのサイドスラスタ馬力を推定した。平野ら³³⁾は、自由航走模型船上に取り付けた3機の送風機により、風を模擬し、操縦運動の計測を行い、風の中での操縦運動シミュレーションプログラムの検証を行った。芳村ら³⁴⁾は、模型船追尾型の送風機により、船の定常風による旋回性能に及ぼす影響を調べ、実験結果とシミュレーション結果との比較を行い、風によるYaw dampingの影響は小さく、操縦運動を推定する上で考慮に入れる必要のないことを指摘した。また、模型を停止させた状態での風圧力の計測を行い、風洞での実験結果とかなり異なる結果を得ている。瀬崎³⁵⁾は、自動車運搬船の船速に対する風の影響について風洞実験を行った上で、馬力や操縦性能への影響を検討した。

以上のように、操縦運動に及ぼす風圧力の影響を検討した研究例としては、計測あるいは推定した風圧力を用いた強風下での操縦限界や定点保持、速度低下などの研究と、風の影響を考慮した操縦運動シミュレーションプログラム検証の研究がなされている。将来、風圧力推定法を開発した場合にも、何らかの方法により外乱を考慮した操縦運動推定計算法全体の検証が必要であろう。

3.3 風圧力の計測

前節の研究動向調査で明らかとなったように、これまで多くの船型について風圧力の計測が行われているが、公表されてから20年以上経過している結果が多く、現在運航している船舶の風圧力計測が望まれる。また、過去の風圧力計測データを利用する上で、風速分布の違いや模型の艤装品の影響についても検討を行う必要がある。そこで、近年建造された4隻の船舶について風圧力の計測を行った。

供試模型船には、大型タンカーを代表してVLCC、及び92,000DWTタンカー(AFRAMAX型)を、また、過去に公表された計測データの少ないLNG船、LPG船とし、それぞれの船の満載状態及び軽荷状態での風圧力の計測を行った。さらに、風速分布の違いによる実験結果への影響を調べるために、2種類の異なる風速分布で実験を行った。また、VLCCについては模型船の艤装状態を変えて、模型製作状態の違いによる風圧力への影響を調査した。

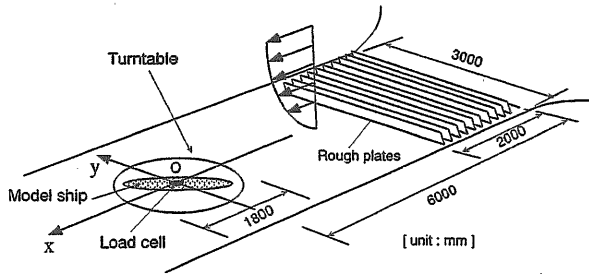


図3-2 風洞実験の概観

表3-2 供試模型船の主要目

	VLCC		92000DWT Tanker		LNG Carrier		LPG Carrier	
	Ship	Model	Ship	Model	Ship	Model	Ship	Model
Loa(m)	327.0	1.700	232.0	1.700	283.0	1.500	224.0	1.500
Lpp(m)	314.0	1.632	222.0	1.632	270.0	1.431	212.0	1.431
B(m)	58.0	0.302	41.1	0.302	44.8	0.238	35.5	0.238
D(m)	31.0	0.161	22.0	0.161	25.0	0.133	19.8	0.133
Ass(m ²)	587.4	0.016	281.0	0.015	3116.7	0.088	368.3	0.017
Full								
d(m)	21.0	0.109	14.9	0.109	11.5	0.081	9.1	0.081
AL(m ²)	4544.6	0.123	2167.8	0.116	6981.7	0.196	2899.1	0.130
AT(m ²)	1056.2	0.029	615.4	0.033	1531.6	0.043	642.3	0.038
C(m)	-11.4	-0.059	-11.7	-0.088	-3.3	-0.017	-10.6	-0.071
Hc(m)	7.4	0.038	5.3	0.039	13.4	0.071	7.8	0.052
Ballast								
d(m)	8.4	0.043	5.9	0.043	9.2	0.049	7.3	0.049
AL(m ²)	8055.1	0.218	3945.2	0.212	7591.4	0.213	3281.1	0.147
AT(m ²)	1696.9	0.046	936.4	0.050	1638.4	0.046	909.2	0.041
C(m)	-2.8	-0.015	-4.5	-0.033	-3.0	-0.016	-9.4	-0.063
Hc(m)	12.1	0.063	9.1	0.067	14.5	0.077	8.5	0.057

3.3.1 風圧力計測の実験状態

実験は当所の変動風水洞で行った。実験状態の概観図を図3-2に示す。風洞断面の大きさは3×2m、最大風速は30m/sである。風洞計測部の中央には模型に偏角を与えるための直径1.8mのターンテーブルを設置した。また、境界層を調整するために模型の上流に粗面板を設置した。

供試模型船の主要目及び形状を表3-2、図3-3に示す。表3-2においては、それぞれ、Ass；船体を除く上部構造物の側面投影面積、*d*；喫水、*A_L*；側面投影面積、*A_T*；正面投影面積、*C*；船体中央を原点とした側面積中心の位置(船首方向を正とする。)、*H_c*；喫水から側面積中心までの高さを示す。VLCCと92,000DWTタンカー、及びLNG船とLPG船は、主要目比に大きな差異が見られないことから、ブリッジ及び艀装品を除いた船体部分は、同じ物を用いて計測を行った。

模型船の設置状態の断面図を図3-4に示す。模型船は船体中央部で、ターンテーブルに埋め込まれた6分力計によって支持されており、船体底面は地面板に接触していない。また、風が模型の下面を通り抜けないように模型と地面板の間は凸凹した構造になっており、隙間も1mm程度となるよう設置した。

風洞断面に対する模型の最大閉塞率(LNGの軽荷状態、風向角90度の場合)は、3.3%であり、閉鎖型風洞にて実験を行う上で十分小さい³⁹⁾。

3.3.2 風圧力計測の風速分布

風は海面の影響を受け、高度によって風速が異なる。風速の鉛直分布を表すモデルとして、ここでは耐風設

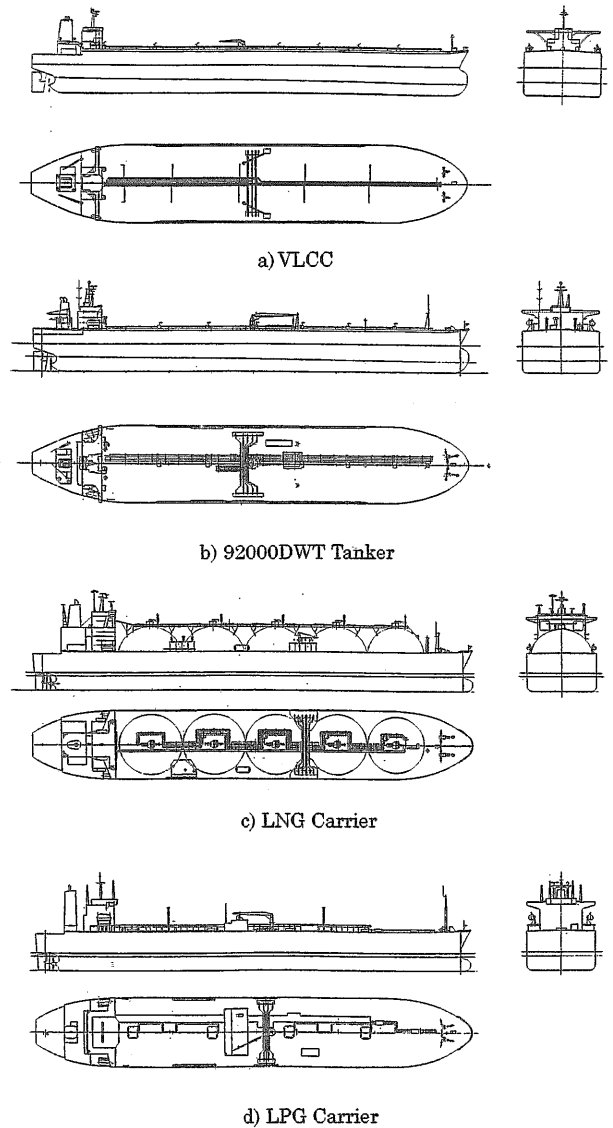


図3-3 供試風洞模型

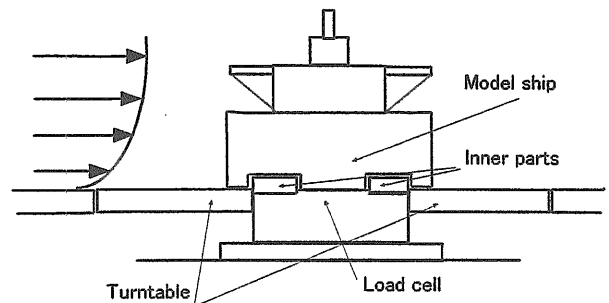


図3-4 風洞模型の設置状態

計においてよく用いられる「べき法則」を用い、次式に示す。

$$U_z = U_{z_1} (z/z_1)^{\alpha} \quad (3-1)$$

U_z は高さ z での風速、 z_1 は基準高さ(10m)を示す。べ

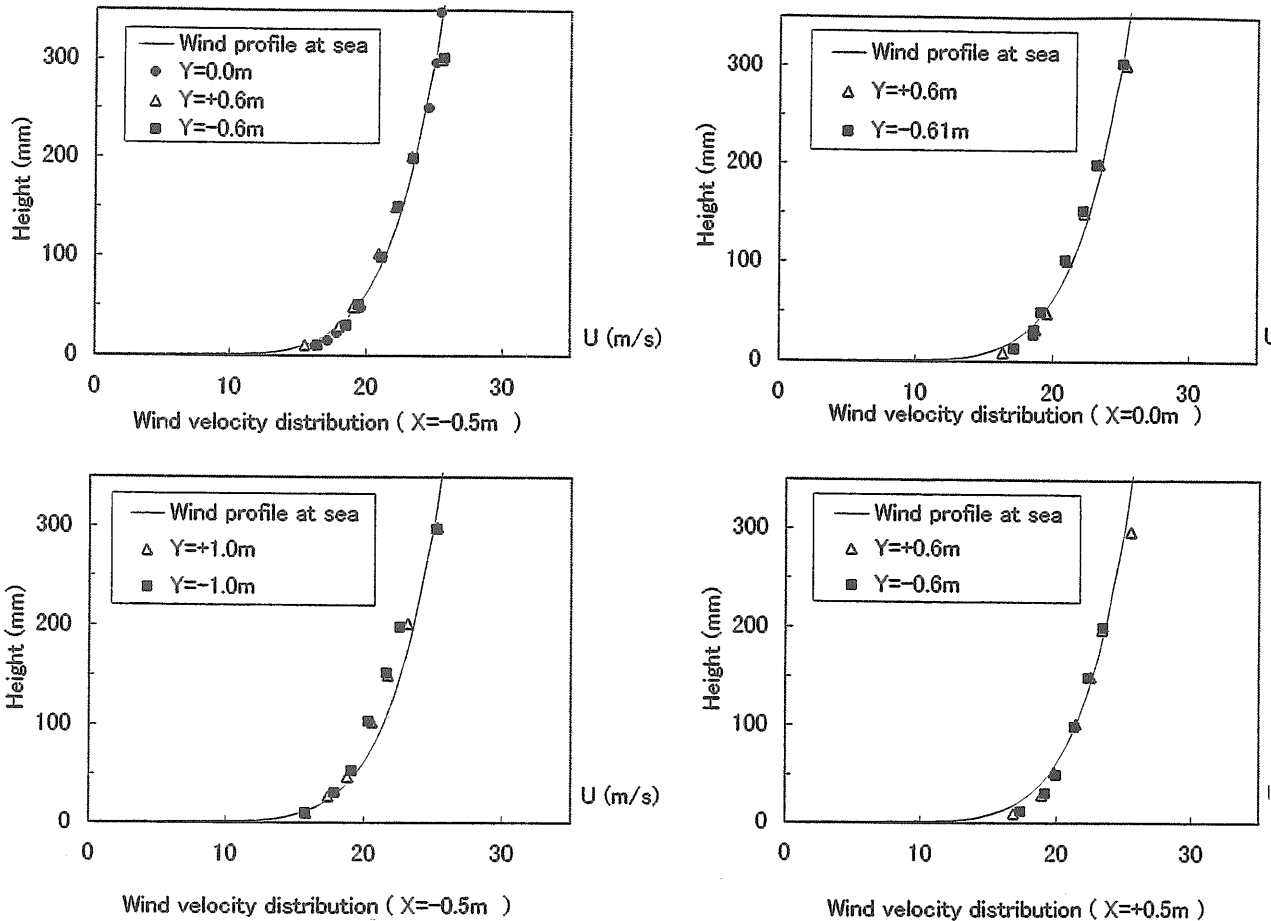


図3-5 ターンテーブル周辺の風速分布（海上風を想定した分布）

き指数 α は、地表面の粗度の影響により様々な値をとりうるが、今回の実験においては強風時の海上を想定して $\alpha = 1/7$ とした⁹³⁷⁾。このようにべき法則に従った風速分布を用い、基準高さを一つに設定することにより実船に対する縮尺が異なった風洞模型についても同一条件下での状態を想定することができる。

実験における風速の計測は、熱線風速計を用いた。模型を設置していない場合のターンテーブル周辺の風速分布の計測結果を図3-5に示す。計測地点の座標 (X,Y) は、図3-2に示す座標系に従う。境界層の厚さは0.3mであり、模型船はこの境界層の中に存在する。実線は $\alpha = 1/7$ に従う風速分布である。境界層を含まない0.3mより上方の平均風速は、25.4m/sであった。図3-5の結果から模型船の周辺における速度分布は、ほぼ等しいと考えることができる。風速を3～30m/sまで変化させた場合の境界層形状の変化を調べた結果を図3-6に示す。計測は、風洞断面の中央部で行った。風速を変化させても0.3m高さまでの境界層形状は、実線に示す1/7乗則に一致していることがわかる。

風速分布の違いによる実験結果への影響を調べるために、前述の風速分布に加え、粗面板を取り除き境界

層の修正を行っていない風洞固有の風速分布での実験も行った。風速分布の計測結果を図3-7に示す。この状態での境界層厚さは0.1mである。

以後、図3-7に示すように、海上風を想定し1/7乗則に従った風速分布をCondition A、粗面板により境界層を修正していない風洞固有の風速分布をCondition Bとする。

3.3.3 風圧力の無次元化の定義

計測した力及びモーメントは、船体中心を原点とした図3-8に示す座標系で定義する。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 の無次元化は、次式のように定義した。

$$C_x = F_x / (qA_T) \quad , \quad C_y = F_y / (qA_T) \quad (3-2)$$

$$C_N = N / (qA_T L_{oa}) \quad , \quad C_K = K / (qA_T H_L) \quad (3-3)$$

ただし

$$q = (1/2) \rho U^2 \quad (3-4)$$

ここで、 $H_L = A_T / L_{oa}$ 、 ρ は空気密度、 U は風速である。回頭モーメントは船体中心まわりのモーメントであり、傾斜モーメントは喫水位置まわりのヒールモーメント

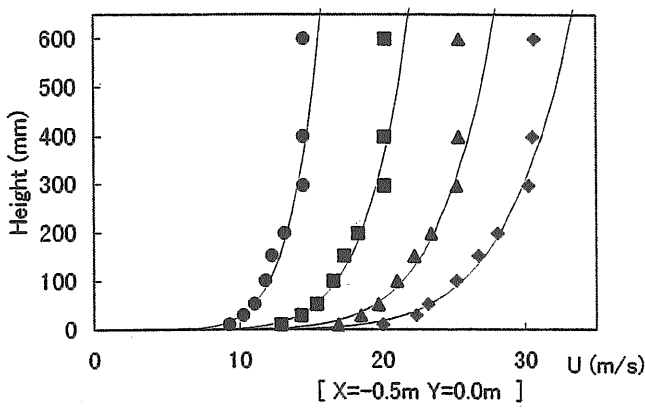


図3-6 風速を変化させた場合の風速分布 (海上風を想定した風速分布)

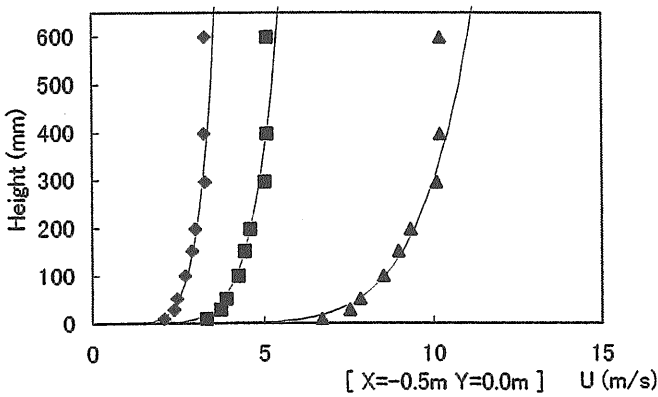
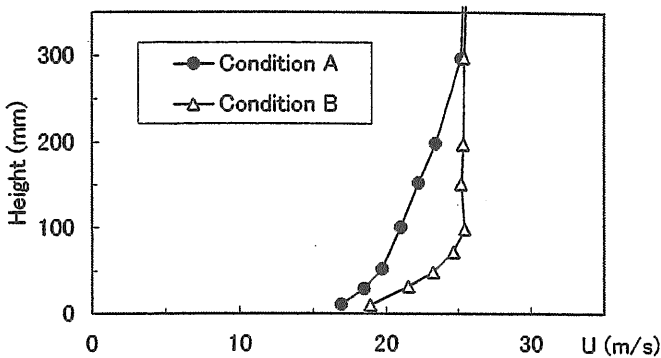


図3-7 実験に用いた2種類の風速分布 (Condition A; 海上風を想定した風速分布、Condition B; 風洞固有の風速分布)



である。

また、抗力係数を次式で定義する。

$$C_D = C_L \sin \phi - C_X \cos \phi \quad (3-5)$$

3.3.4 風圧力計測値へのレイノルズ数影響

レイノルズ数の影響を調べるために、4隻の船につ

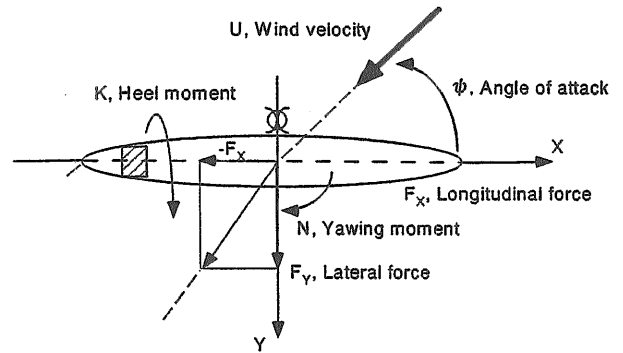


図3-8 風圧力計測の座標系

いて風速を変化させ、風向角ごとの抗力係数を計測した。計測を行った風速分布は海上風を想定したCondition Aの状態である。各々境界層上方の一樣風速を10~25m/s(VLCCのみ10~28m/s)まで変化させた計測結果を図3-9に示す。縦軸は抗力係数 C_D 、横軸は船の長さ(Loa)を代表長さとし上方の一樣風速から求めたレイノルズ数である。どの模型船においても抗力係数がほぼ一定値であることが確認できる。この結果は、前節での $Rn \geq 10^6$ であれば抗力係数が一定となる結果と一致する。風速が25m/s ($Rn \approx 3 \times 10^6$)であれば実験を行うに当たって十分な風速であることがわかる。

3.3.5 風速分布の違いによる風圧力への影響

3.2節で述べたが、過去の風圧力計測は様々な風速分布の中で行われており、過去のデータを利用した風圧力推定法を考える場合には、風速分布や代表風速の違いを考慮して取り扱えるような修正方法が必要である。この修正方法の検討用資料として、図3-7に示すような海上風を想定した風速分布Condition Aと風洞固有の風速分布Condition Bの状態、4隻の船舶の満載状態及び軽荷状態の風圧力計測を行った。詳細な計測データについては後述するが、ここではVLCCとLNG船型の軽荷状態について紹介する。

図3-10に、VLCC、軽荷状態でのCondition AとBの前後力 C_X 、横力 C_Y 、回頭モーメント C_N 、傾斜モーメント C_K の計測結果を、また、図3-11に、LNG、軽荷状態での計測結果を示す。無次元化における代表長さや面積等は表3-2に従い、代表風速は下記に示す2種類の風速により無次元化を行った。

無次元化1：実船の10m高さでの風速で無次元化

無次元化2：ブリッジ上端までの平均風速で無次元化

図3-10 (VLCC)、図3-11 (LNG) のどちらにおいても、無次元化1の場合には、Condition AとBとでは、風圧力の無次元値に定量的な差が見られるが、定性的な傾向に大きな差はない。このことは、風圧力を無次元化する時に用いる代表風速に、風速の鉛直分布形状

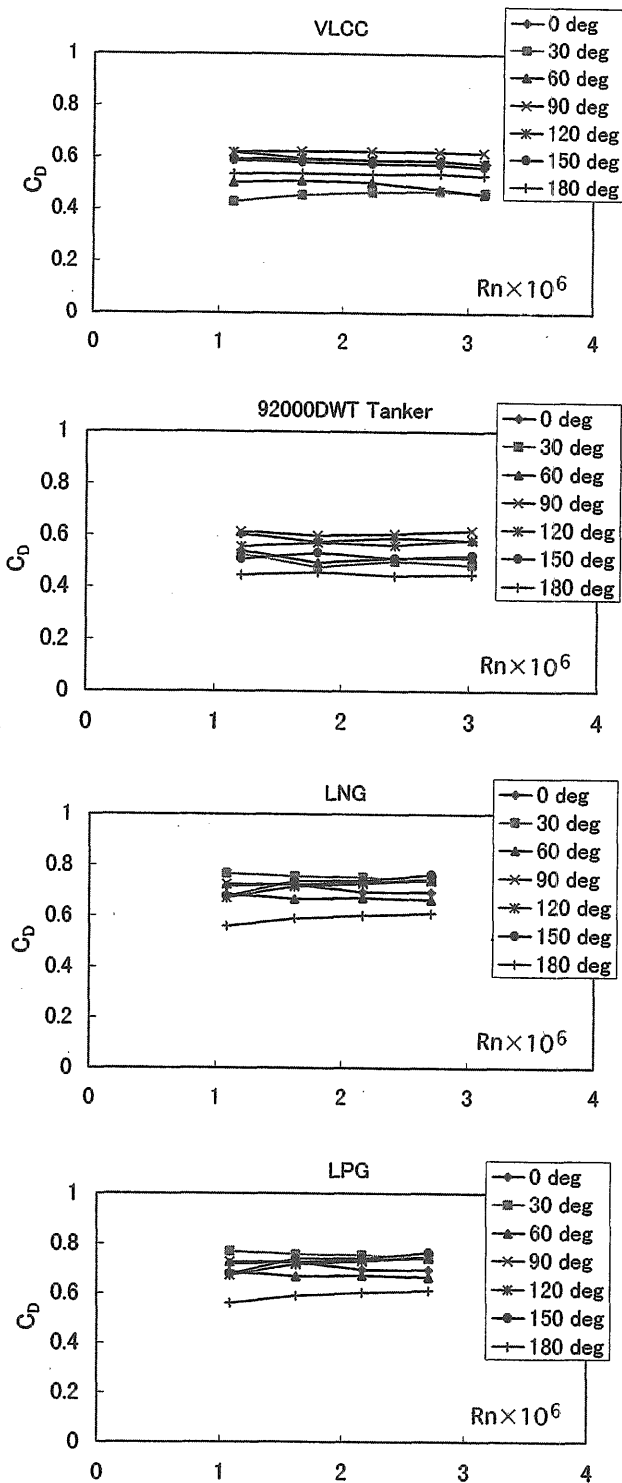


図3-9 抗力係数に及ぼすレイノルズ数の影響

を考慮した値を用いることにより、異なった風速分布の実験結果を同一条件下に換算できる可能性を示すものと考えられる。そこで、一例として代表風速にブリッジ上端までの平均風速を用いた無次元化2を行った。無次元化2では、Condition AとBの差が小さくなって

いる。特に図3-11のLNG船では、Condition AとBの差がほとんどない。このように、異なる風速分布で行った実験データを、ブリッジ上端までの平均風速で無次元化することにより、ある程度の修正が行えたことがわかる。しかしながら今回の検討は一例にすぎず、今後他の船型も含めて検討し、風速分布の影響を考慮した風圧力データの修正方法を開発する必要がある。

3.3.6 模型船の製作状態の違いによる風圧力への影響

風洞実験を行う上で実船と模型船の幾何学的条件を一致させる必要があるが、1.5m程度の小さな風洞模型を細部にわたって再現することは困難である。過去の風圧力計測ではクレーンやマスト等以外の、手すりやウインドラスのような比較的小さい艀装品は省略されることが多い。しかしながら、それぞれの艀装品が実験値に及ぼす影響は不明確であり、このような艀装品の省略による実験値への影響を調べた例も少ない。そこで、VLCC模型について手すりやタラップ等の細かな艀装品まで製作し、デッキ上の艀装品を順次取り去った4種類の実験を行った。計測を行った4種類の模型の外観図を図3-12に示す。また、それぞれの実験状態を以下に示す。なお、4)についてはブリッジの影響の大きさを明らかにするために計測を行った。

- 1) Standard : 製作した艀装品をすべてつけた状態
- 2) without rails : 船体のデッキ上すべてを取り囲んだ手すり(高さ7mm)とタラップを取り外した場合
- 3) without pipelines : 2)からさらにパイプライン、ク

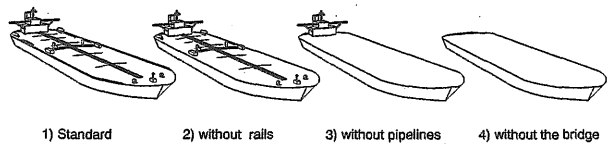
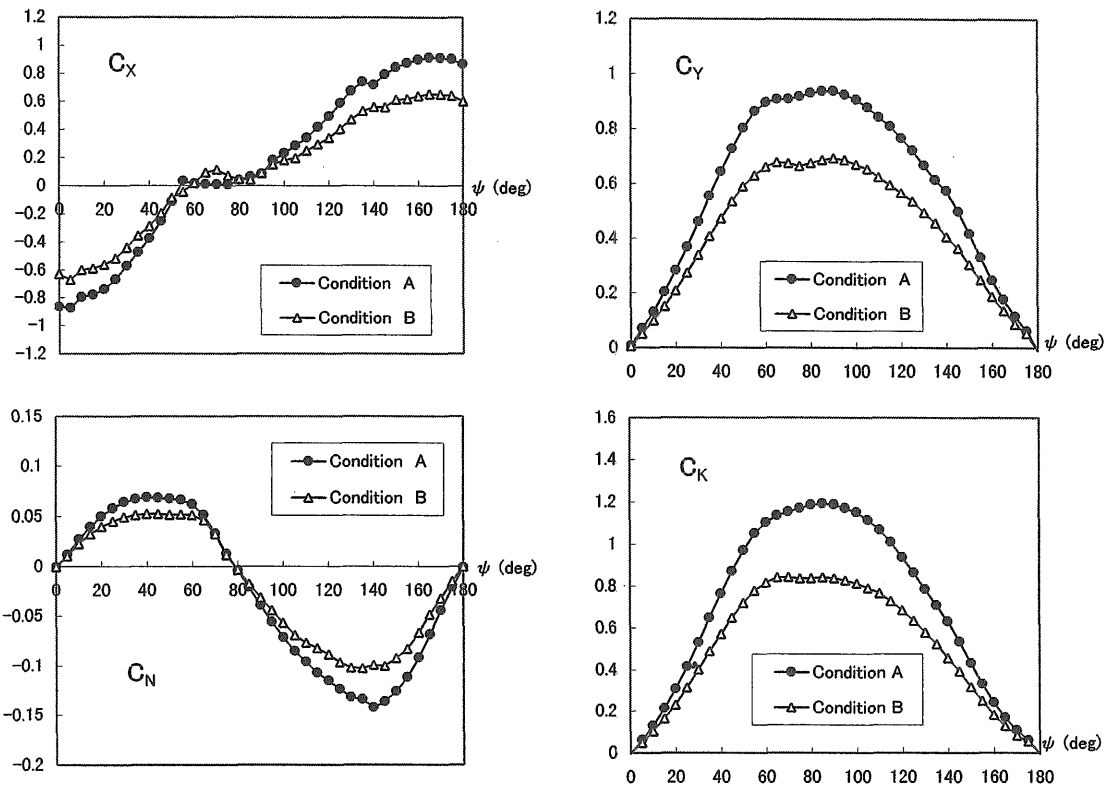


図3-12 デッキ上艀装品の再現状態 (VLCC)

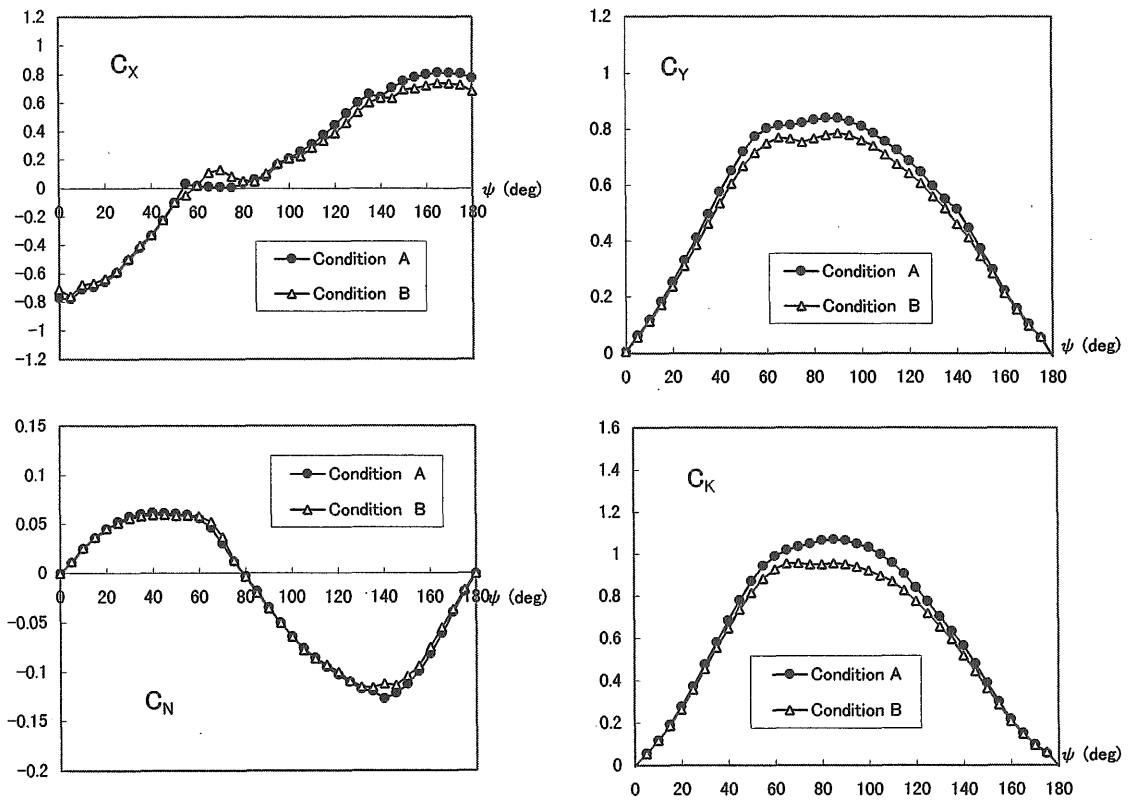
レーン等を外し、デッキ上にはブリッジのみの場合で、側面投影面積は満載状態でStandardの92%、軽荷状態では96%

- 4) without the bridge : 3)からさらにブリッジを除いた場合で、側面投影面積は、満載状態でStandardの79%、軽荷状態では88%

実験は図3-7に示すCondition A, Bの2種類の風速分布で行った。満載状態での前後力 C_x 、横力 C_y 、回頭モーメント C_m 、および傾斜モーメント C_k の計測結果を図3-13に、また、軽荷状態での計測結果を図3-14に示す。

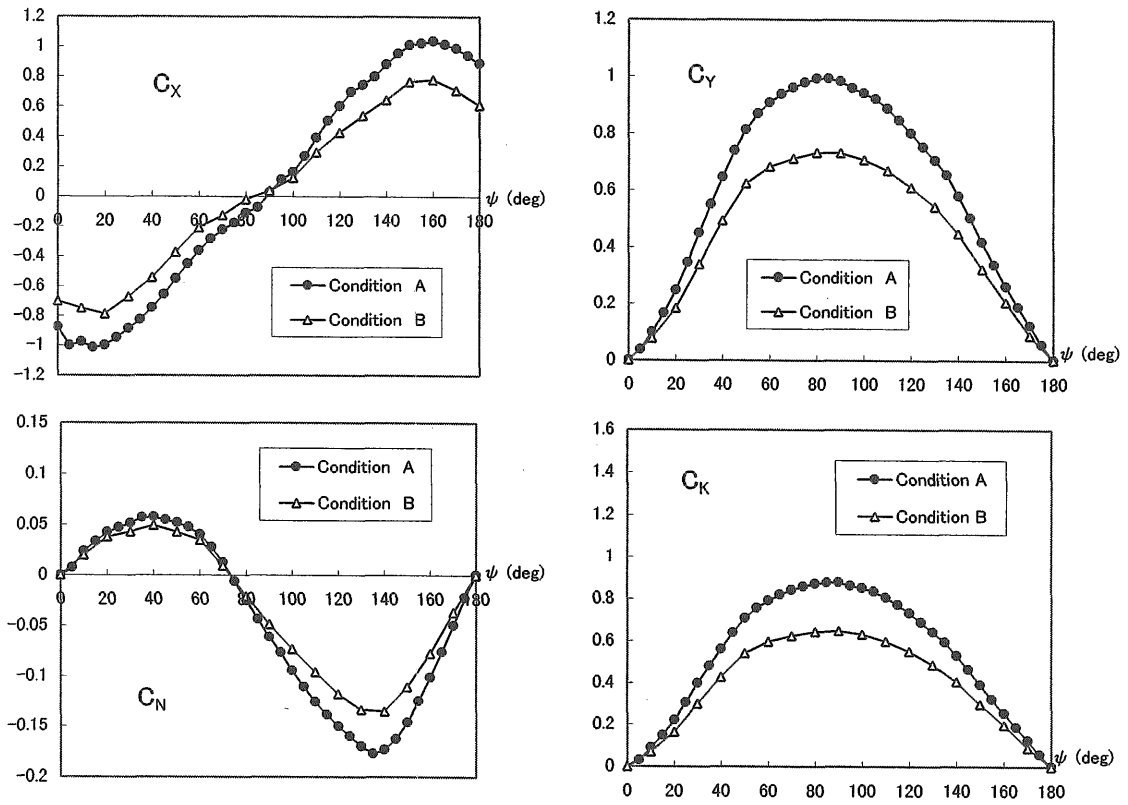


無次元化1: 10m高さの風速で無次元化 (Condition A, $U=19.5\text{m/s}$: Condition B, $U=25.4\text{m/s}$)

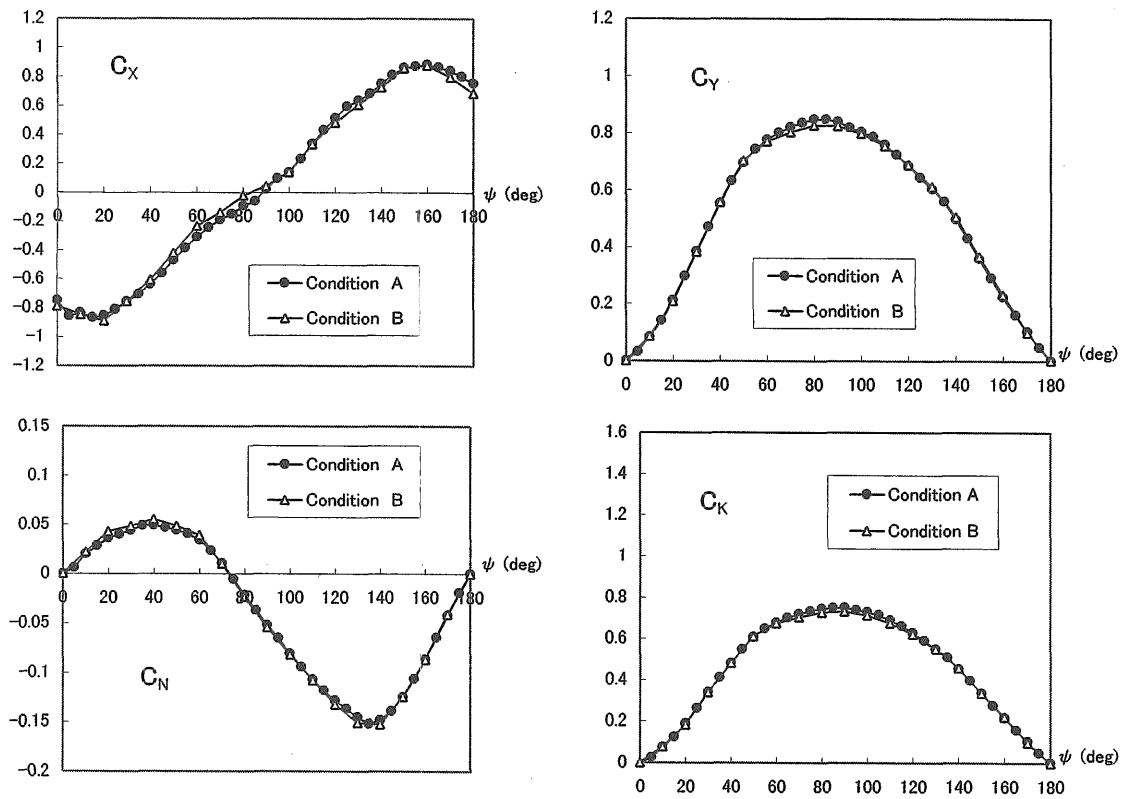


無次元化2: ブリッジ上端までの平均風速で無次元化 (Condition A, $U=20.6\text{m/s}$: Condition B, $U=23.9\text{m/s}$)

図3-10 無次元化を行う代表風速の違いによる風圧力の比較 (VLCC、軽荷状態)

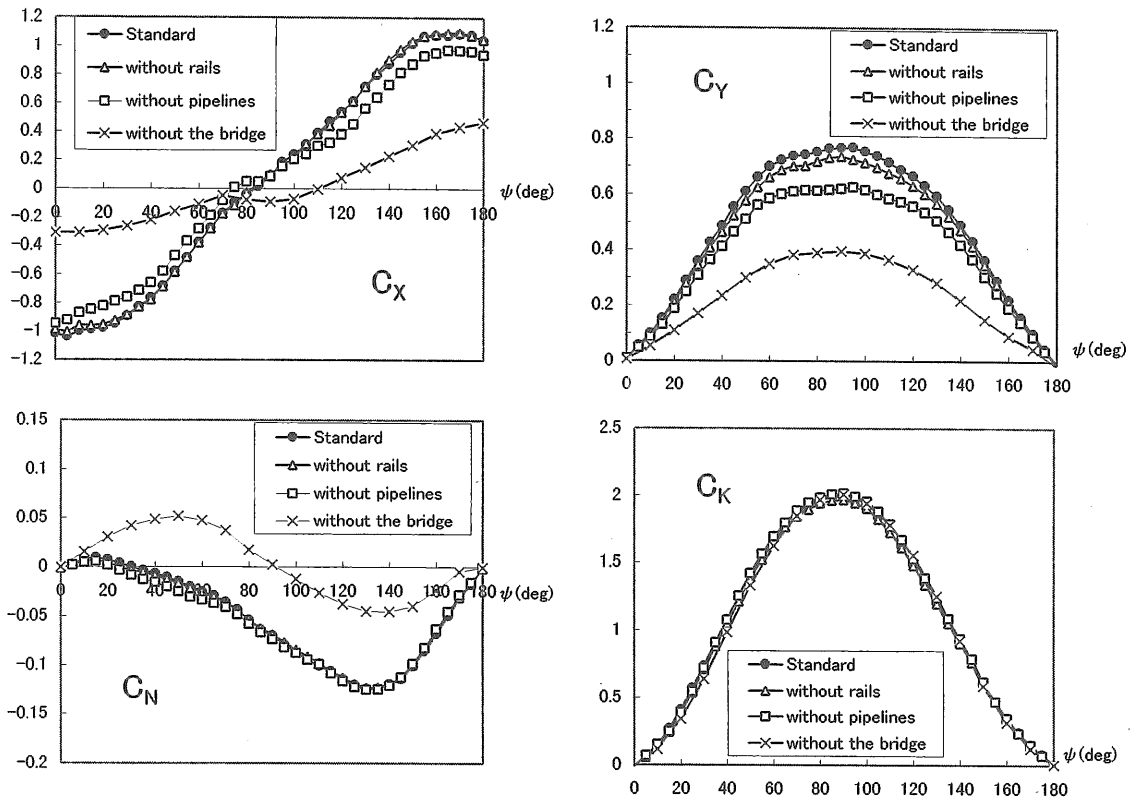


無次元化1: 10m高さの風速で無次元化 (Condition A, $U=20.1\text{m/s}$: Condition B, $U=25.5\text{m/s}$)

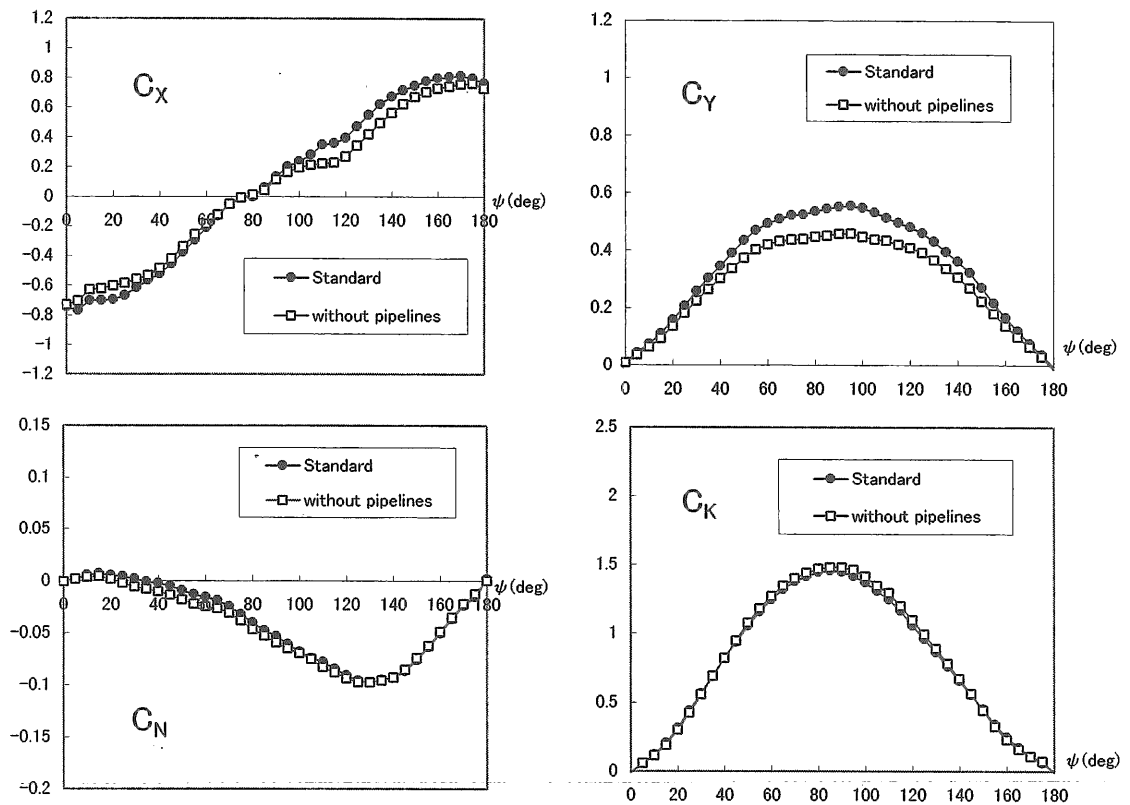


無次元化2: ブリッジ上端までの平均風速で無次元化 (Condition A, $U=21.7\text{m/s}$: Condition B, $U=24.0\text{m/s}$)

図3-11 無次元化を行う代表風速の違いによる風圧力の比較 (LNG、軽荷状態)

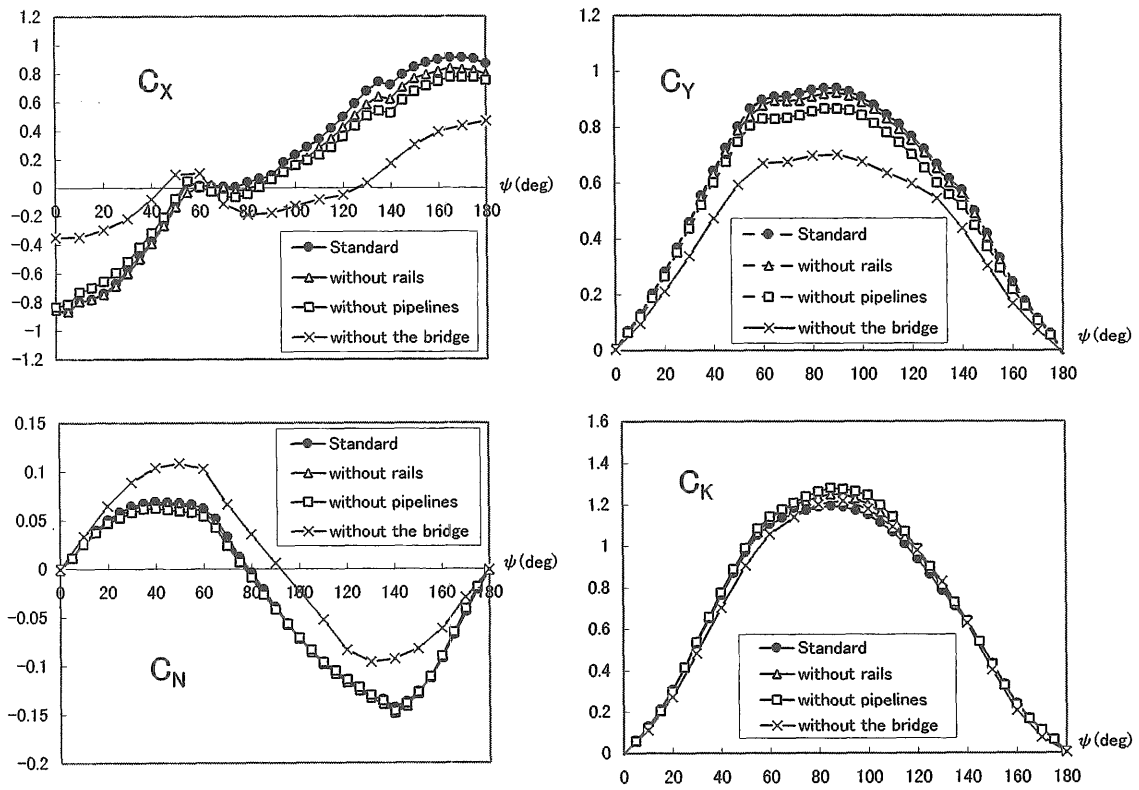


VLCC Full load condition (Wind profile : Condition A, $U=19.5\text{m/s}$)

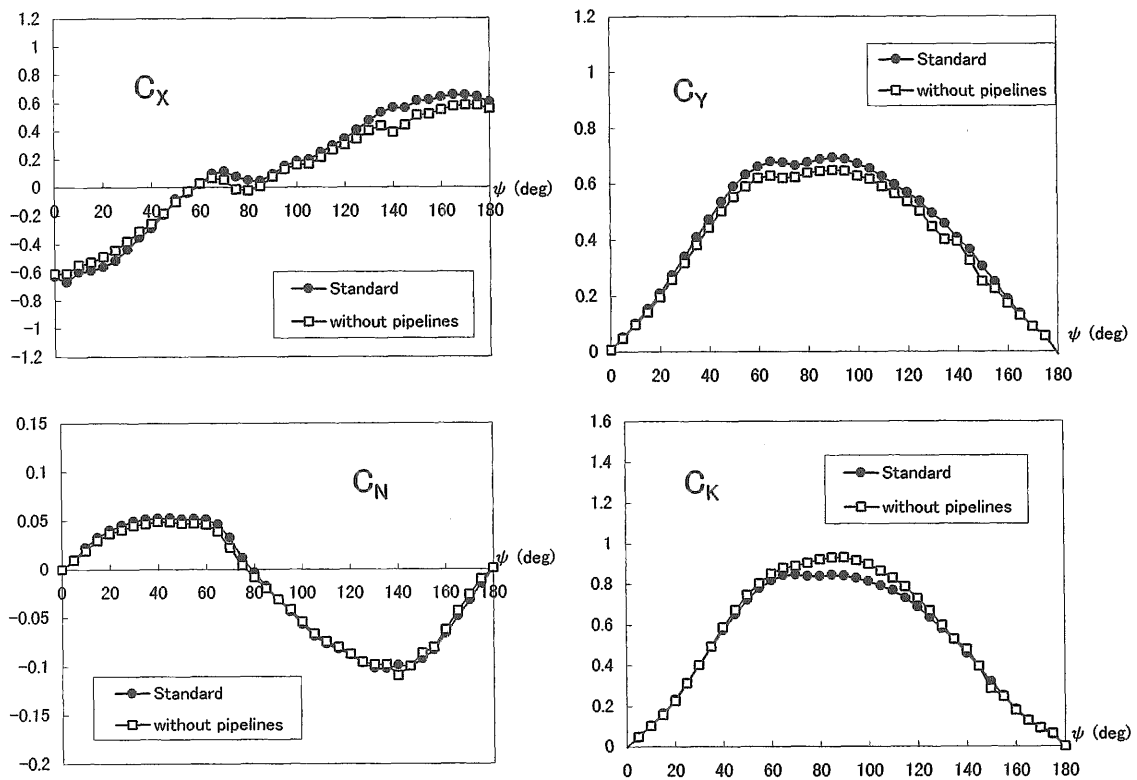


VLCC Full load condition (Wind profile : Condition B, $U=25.4\text{m/s}$)

図3-13 艙装品の違いが風圧力に及ぼす影響 (VLCC、満載状態の場合)



VLCC Ballast condition (Wind profile : Condition A, $U=19.5\text{m/s}$)



VLCC Ballast condition (Wind profile : Condition B, $U=25.4\text{m/s}$)

図3-14 艀装品の違いが風圧力に及ぼす影響 (VLCC、軽荷状態の場合)

なお、比較のため各風圧力はすべて、2)の状態の投影面積と実船の10m高さでの風速を用いて無次元化している。

図3-13、図3-14上に示す1)から4)までのすべての状態について計測を行ったCondition Aの前後力、横力、回頭モーメントについて比較して見る。

ここで顕著な差が見られるのは4)のブリッジを除いた状態である。例えば、満載状態の横力では、側面投影面積に占めるブリッジの割合は30%程度であるが、横力は50%程度の減少が見られる。また、前後力では70%も減少し、回頭モーメントは傾向も異なっており、ブリッジの風圧力に及ぼす影響は非常に大きいと言える。

1)から3)までの変化の傾向を見ると、船体を厳密に再現するにつれ、風圧力がある値に収束することが推測できる。1)と3)を比較すると、実験値に定性的な差はないが、定量的には前後力、横力に10~20%程度の差が見られ、パイプラインやクレーン等の比較的大きな艙装品については、その影響を無視することができない。しかし、1)と2)を比較するとその差は最大でも5%未満であり、全長に対して高さが約1/300程度の手すりのような小さな艙装品は、風圧力に及ぼす影響は小さいことがわかる。過去の実験においては、手すりやウインドラス等の比較的小さな艙装品は省略されることが多く、模型の製作状態の差による実験値への影響が明確ではなかったが、今回の実験結果からそれらの省略による実験値への影響は小さいと考えられる。

一方、傾斜モーメント C_k に関しては、艙装品を取り除いても定量的にも余り変化がなく、他の力とは異なる傾向であるが艙装品を取り外した場合の実験値の方が大きくなっている場合もある。この原因についてはデッキ上の剥離状態等に起因するものであると思われるが、更なる検討が必要である。

3.3.7 満載及び軽荷状態の風圧力

これまで多くの船型について風圧力の計測が行われているが、公表されている結果はかなり古いものも多く、現在運航しているできるだけ多くの船舶の風圧力計測が望まれる。

そこで、図3-3に示す近年建造されたVLCC、92,000DWTタンカー（AFRAMAX型）、LNG船、LPG船の4隻の船舶について、満載状態と軽荷状態の風圧力の計測を行った。実験は、図3-7に示すCondition A、Bの2種類の風速分布で行った。無次元化を行う場合の A_T 、 A_L 、 H_L には満載、軽荷のそれぞれの状態での値を用いている。また、代表風速には実船における10m高さでの風速（各図面上に記載）を用いている。VLCCを除く92,000DWTタンカー、LNG、LPGについては、センターパイプラインの位置、形状、及びデッキ上の構造物が左右非対称であることから360度の風向につ

いて実験を行った。

風速分布がCondition Aの状態での4隻の船舶についての満載及び軽荷状態の前後力 C_x 、横力 C_y 、回頭モーメント C_N 、傾斜モーメント C_k の計測結果を図3-15から図3-22に示す。

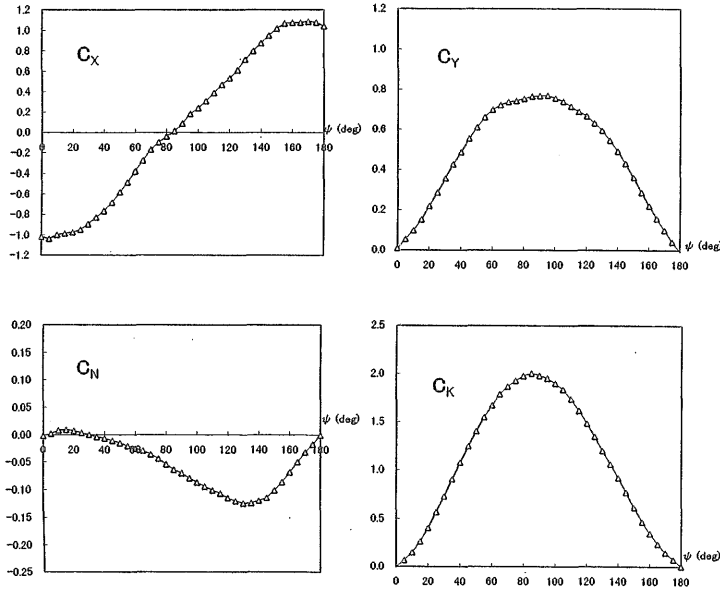
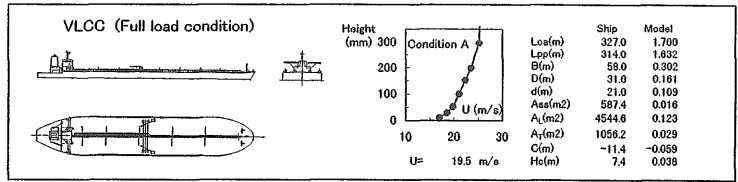
まず、船型の違いによる風圧力への影響について見る。風速分布がCondition Aで満載状態の4隻の計測結果である図3-15、図3-17、図3-19、図3-21について比較すると、船型の相違が回頭モーメントに顕著に見られ、VLCCでは相対風向角 $\psi = 30^\circ$ まで非常に小さなプラス側の回頭モーメントであるが、92,000DWTタンカーでは $\psi = 40^\circ$ 、LNG、LPGは $\psi = 70^\circ$ 程度までプラスの回頭モーメントであり、その大きさもVLCCに比べかなり大きくなっている。また、LNGの横力は他の3船型と定量的な差がある。傾斜モーメントについても4船型に大きな差が見られる。また、軽荷状態の図3-16、図3-18、図3-20、図3-22について比較すると、顕著な差が見られるのはLNGの C_x で、定量的にはどの分力にもそれぞれ船型の違いが見られる。

載荷状態の違いによる風圧力について見る。風速分布がCondition Aで4隻それぞれの満載状態と軽荷状態の図3-15、図3-16(VLCC)を、図3-17、図3-18(92,000DWTタンカー)を、図3-19、図3-20(LNG)を、図3-21、図3-22(LPG)を比較する。LNG、LPGは図上の船体形状からもわかるように喫水線位置の変化が小さいため、載荷状態の違いによる風圧力の変化も少ない。しかし、VLCC、92,000DWTタンカーについては、満載と軽荷状態では喫水線位置が大きく異なるため、実験結果の差が大きい。特に前後力と回頭モーメントの傾向が異なっている。

艙装品配置の左右非対称による風圧力について見る。風速分布がCondition AでVLCCを除いた他の船型（図3-17から図3-22）の左舷側から風を受けた状態と右舷側から受けた状態を比較する。センターパイプライン、デッキハウス等の左右非対称な配置により前後力にその影響が顕著に見られる。特に92,000DWTタンカー、LPGについては船首が風下に向けた場合にその影響が大きく現れている。

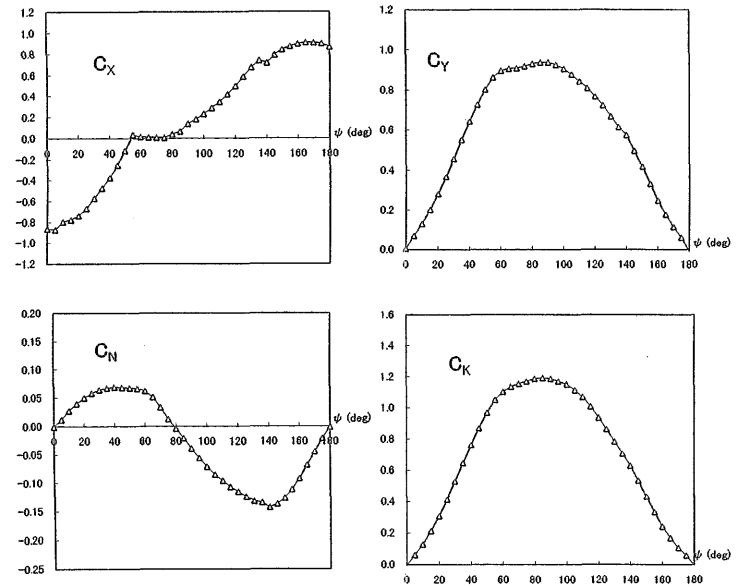
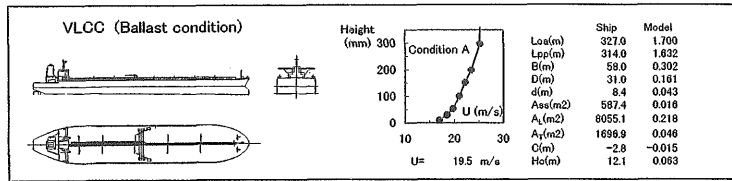
風速分布がCondition Bの状態での風圧力を図3-23から図3-30に示す。Condition Bの風圧力データは、風速分布の違いを考慮した精度の良い風圧力データ修正法を検討するためにも貴重な資料であると考え、Condition Aと同様にすべての船について計測を行い、本稿に掲載した。Condition Bの状態の風圧力は、3.3.5項で述べたように、定性的にはCondition Aの状態と同じであり、船型や載荷状態の違い、左右非対称による風圧力への影響はCondition Aと同じことが言える。

以上、近年建造された4隻の船舶について、2種類の風速分布と2種類の載荷状態で風圧力計測を行い、貴



ψ (deg)	C_x	C_y	C_N	C_K
0	-1.018	0.008	-0.002	-0.006
5	-1.038	0.055	0.002	0.088
10	-0.998	0.099	0.008	0.150
15	-0.968	0.152	0.009	0.268
20	-0.975	0.220	0.007	0.408
25	-0.948	0.289	0.003	0.569
30	-0.895	0.358	0.000	0.733
35	-0.829	0.428	-0.004	0.907
40	-0.768	0.487	-0.007	1.079
45	-0.684	0.555	-0.011	1.250
50	-0.581	0.610	-0.015	1.404
55	-0.465	0.661	-0.020	1.550
60	-0.378	0.699	-0.025	1.674
65	-0.276	0.723	-0.029	1.790
70	-0.171	0.737	-0.038	1.871
75	-0.087	0.742	-0.044	1.931
80	-0.040	0.753	-0.054	1.978
85	0.013	0.765	-0.064	2.005
90	0.088	0.768	-0.070	1.984
95	0.181	0.770	-0.079	1.958
100	0.238	0.755	-0.087	1.902
105	0.308	0.739	-0.094	1.838
110	0.389	0.715	-0.101	1.740
115	0.470	0.688	-0.108	1.618
120	0.538	0.660	-0.114	1.488
125	0.613	0.632	-0.120	1.350
130	0.717	0.595	-0.124	1.202
135	0.799	0.548	-0.124	1.082
140	0.876	0.491	-0.119	0.921
145	0.953	0.432	-0.114	0.774
150	1.018	0.363	-0.101	0.619
155	1.089	0.290	-0.086	0.470
160	1.078	0.221	-0.088	0.350
165	1.077	0.158	-0.050	0.241
170	1.087	0.100	-0.032	0.160
175	1.078	0.043	-0.018	0.078
180	1.044	-0.007	-0.001	0.003

図3-15 VLCCの風圧力 (満載状態、Condition A)



ψ (deg)	C_x	C_y	C_N	C_K
0	-0.885	0.008	-0.001	-0.004
5	-0.873	0.070	0.012	0.062
10	-0.788	0.131	0.027	0.130
15	-0.779	0.203	0.040	0.213
20	-0.739	0.282	0.050	0.307
25	-0.669	0.369	0.058	0.414
30	-0.570	0.459	0.064	0.530
35	-0.474	0.554	0.067	0.648
40	-0.375	0.643	0.069	0.763
45	-0.254	0.728	0.068	0.870
50	-0.115	0.802	0.068	0.969
55	0.033	0.865	0.066	1.052
60	0.014	0.897	0.062	1.103
65	0.010	0.908	0.051	1.138
70	0.008	0.909	0.033	1.154
75	0.008	0.919	0.013	1.170
80	0.036	0.931	-0.004	1.187
85	0.004	0.938	-0.021	1.192
90	0.138	0.937	-0.039	1.188
95	0.160	0.925	-0.058	1.170
100	0.229	0.907	-0.072	1.151
105	0.285	0.879	-0.085	1.114
110	0.342	0.844	-0.096	1.068
115	0.417	0.810	-0.107	1.008
120	0.498	0.766	-0.115	0.937
125	0.588	0.722	-0.124	0.864
130	0.674	0.667	-0.132	0.784
135	0.740	0.615	-0.134	0.708
140	0.717	0.575	-0.143	0.630
145	0.791	0.499	-0.137	0.535
150	0.842	0.418	-0.126	0.432
155	0.874	0.332	-0.112	0.332
160	0.898	0.247	-0.092	0.241
165	0.909	0.177	-0.088	0.169
170	0.908	0.115	-0.044	0.108
175	0.900	0.060	-0.021	0.080
180	0.866	-0.009	-0.001	-0.002

図3-16 VLCCの風圧力 (軽荷状態、Condition A)

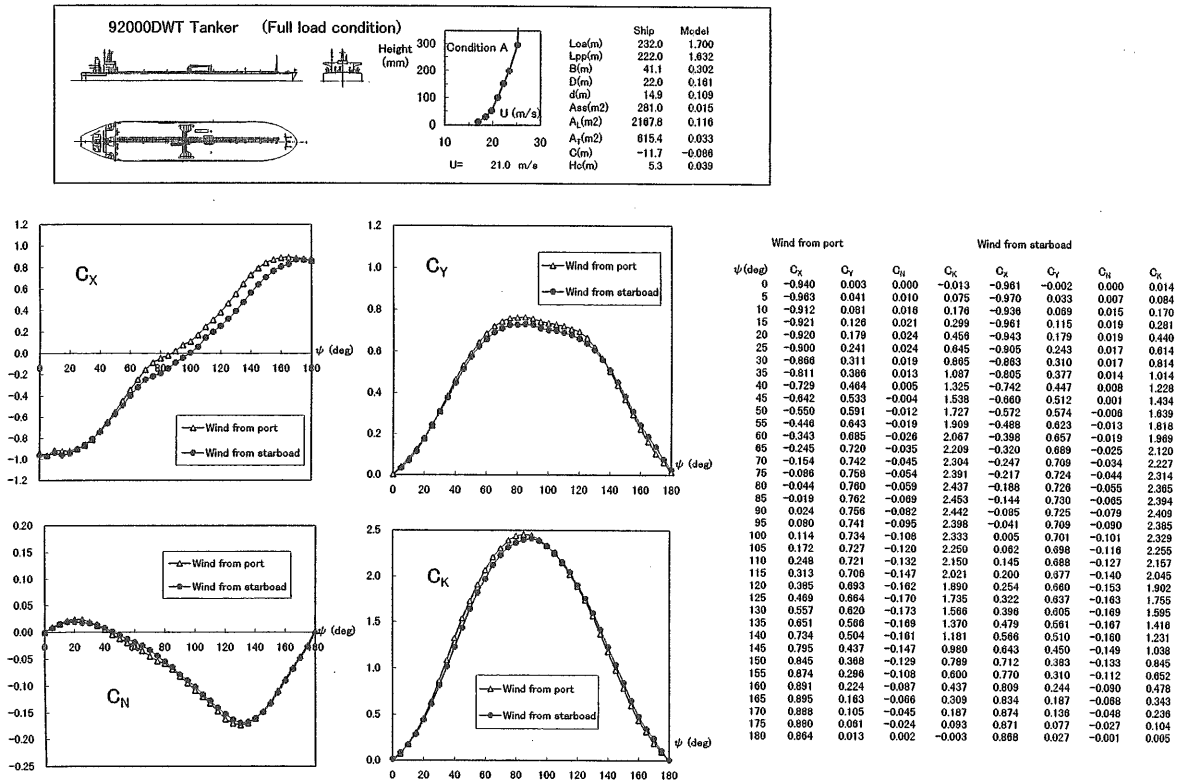


図3-17 92,000DWTタンカーの風圧力 (満載状態、Condition A)

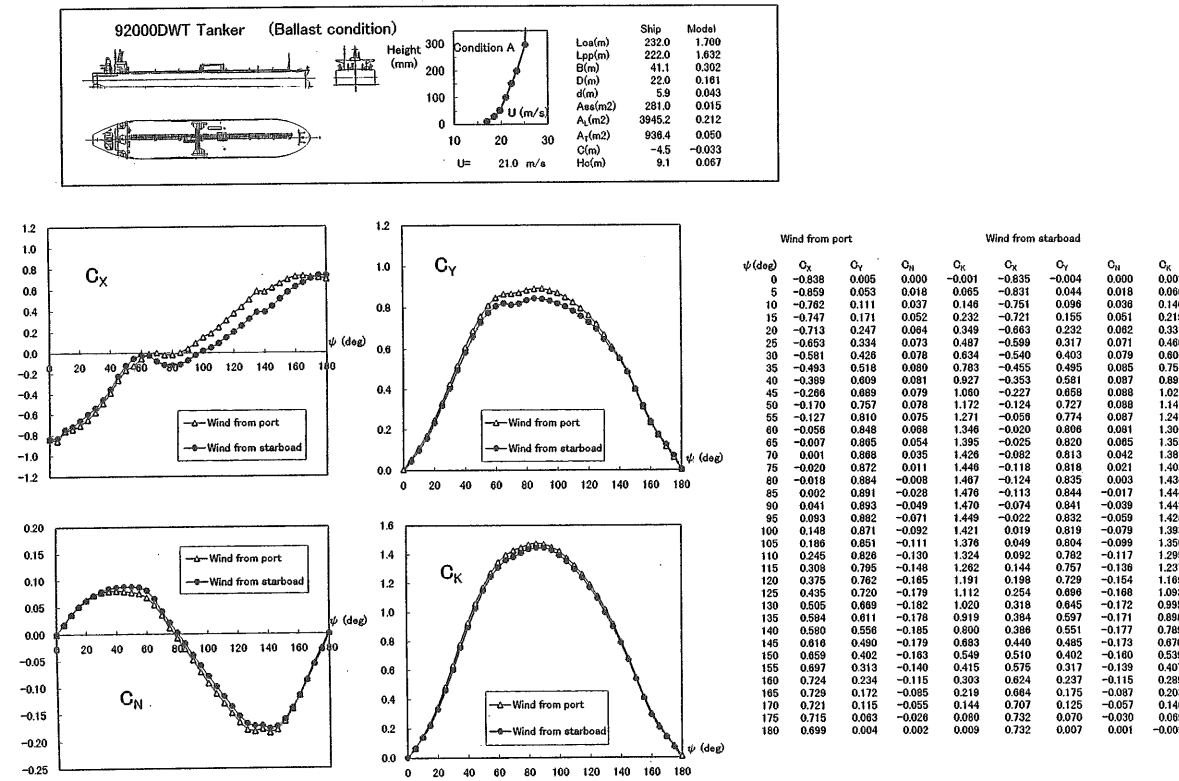


図3-18 92,000DWTタンカーの風圧力 (軽荷状態、Condition A)

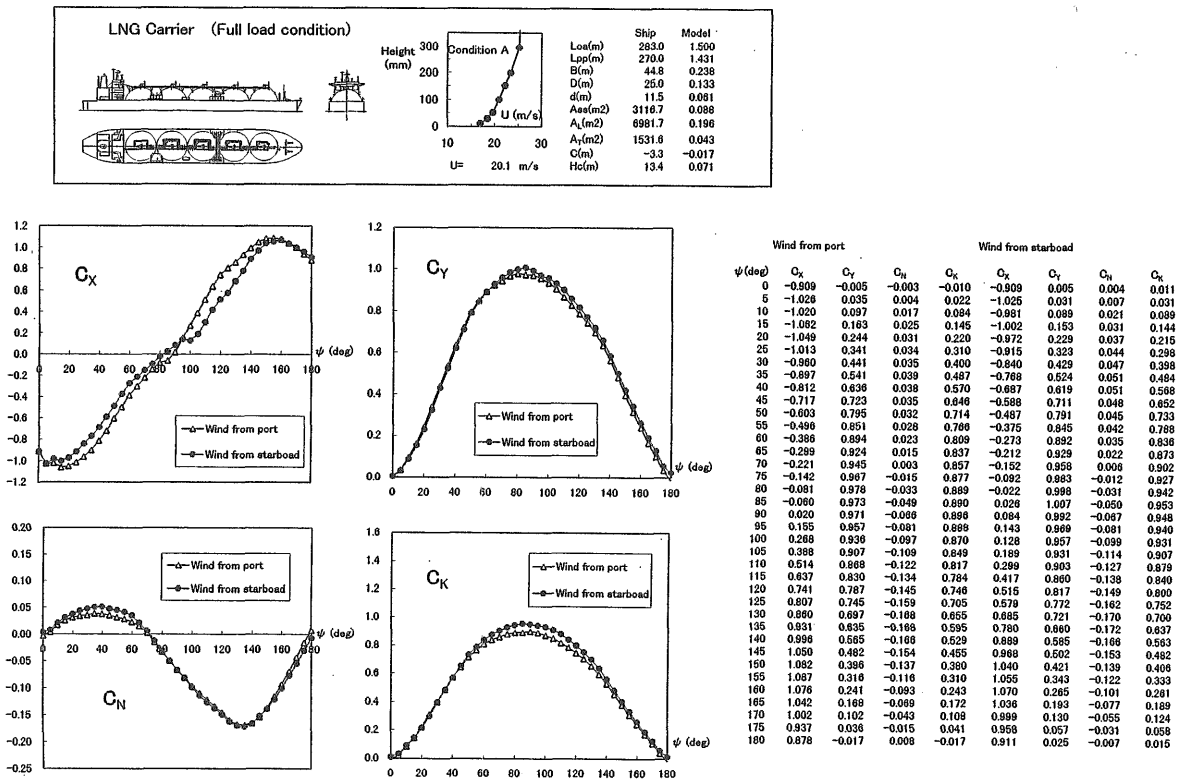


図3-19 LNG船の風圧力 (満載状態、Condition A)

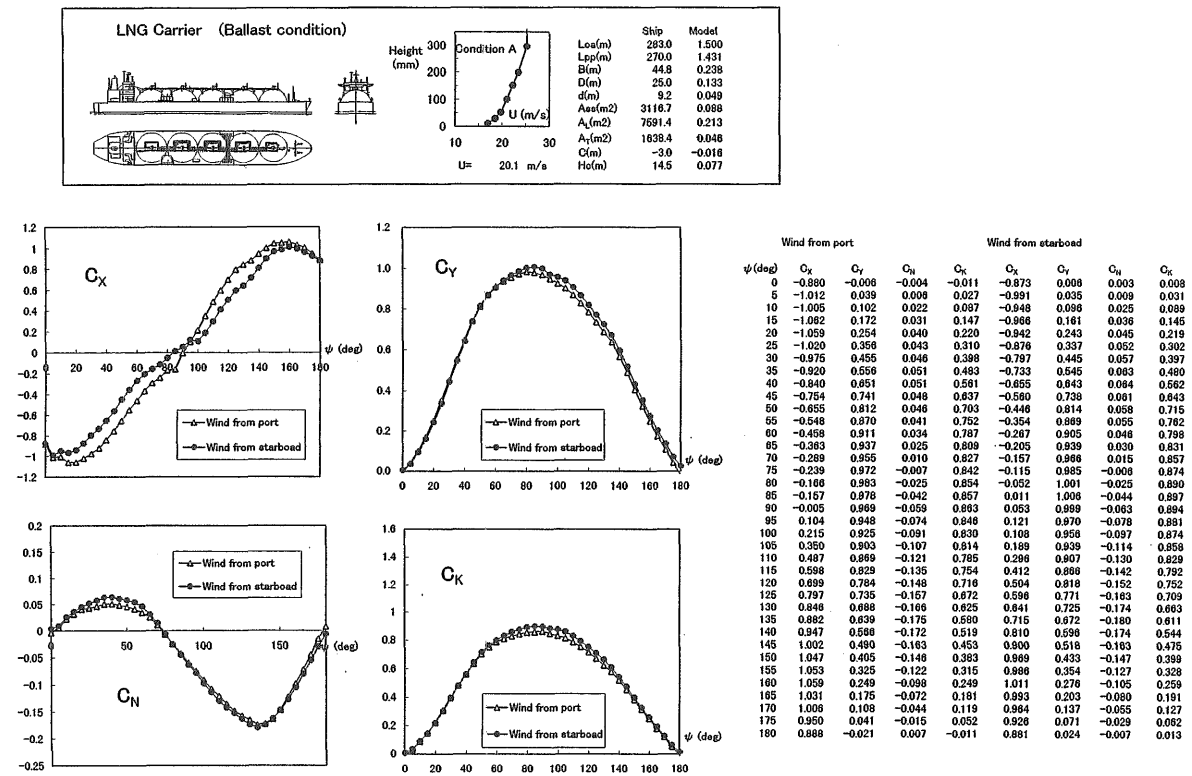


図3-20 LNG船の風圧力 (軽荷状態、Condition A)

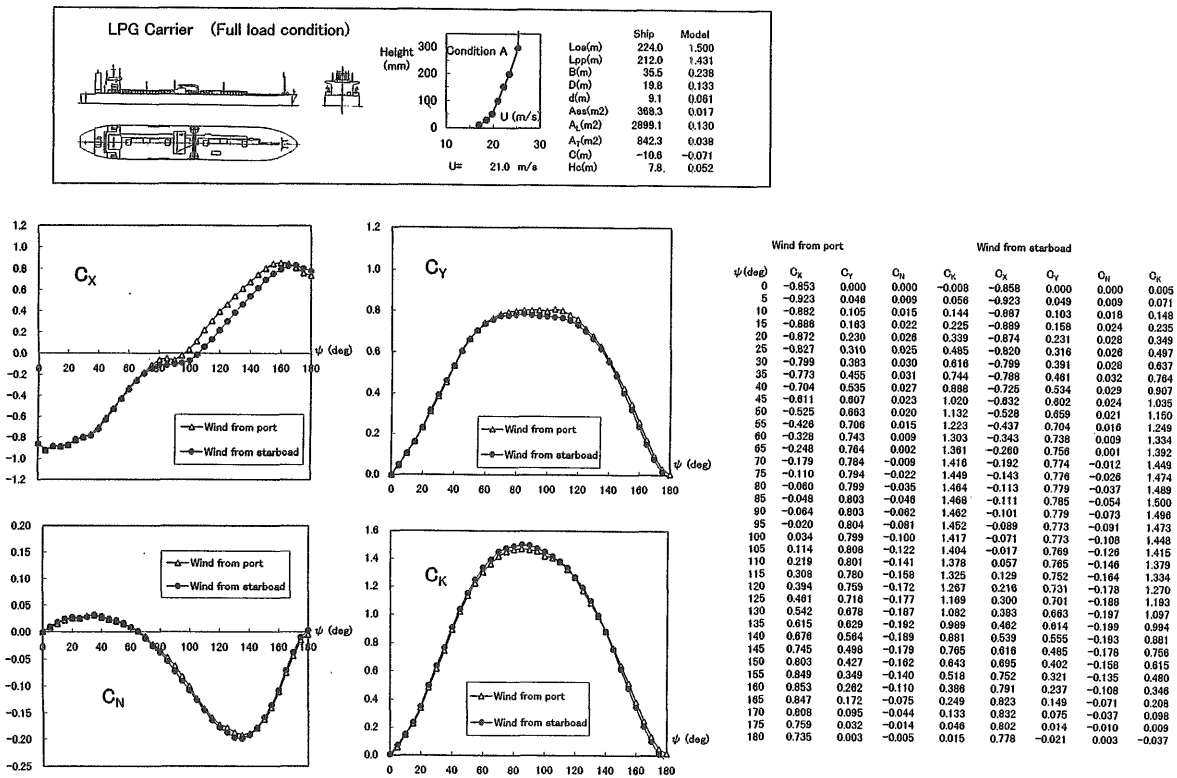


図3-21 LPG船の風圧力 (満載状態、Condition A)

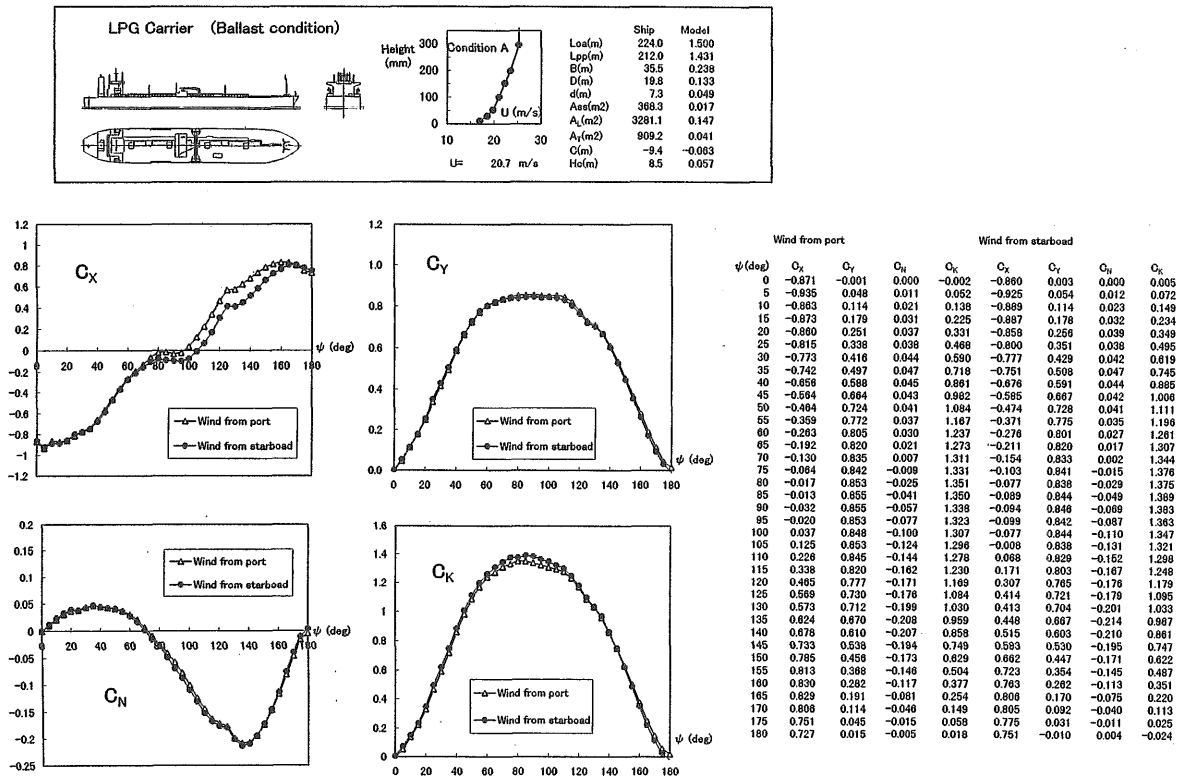


図3-22 LPG船の風圧力 (軽荷状態、Condition A)

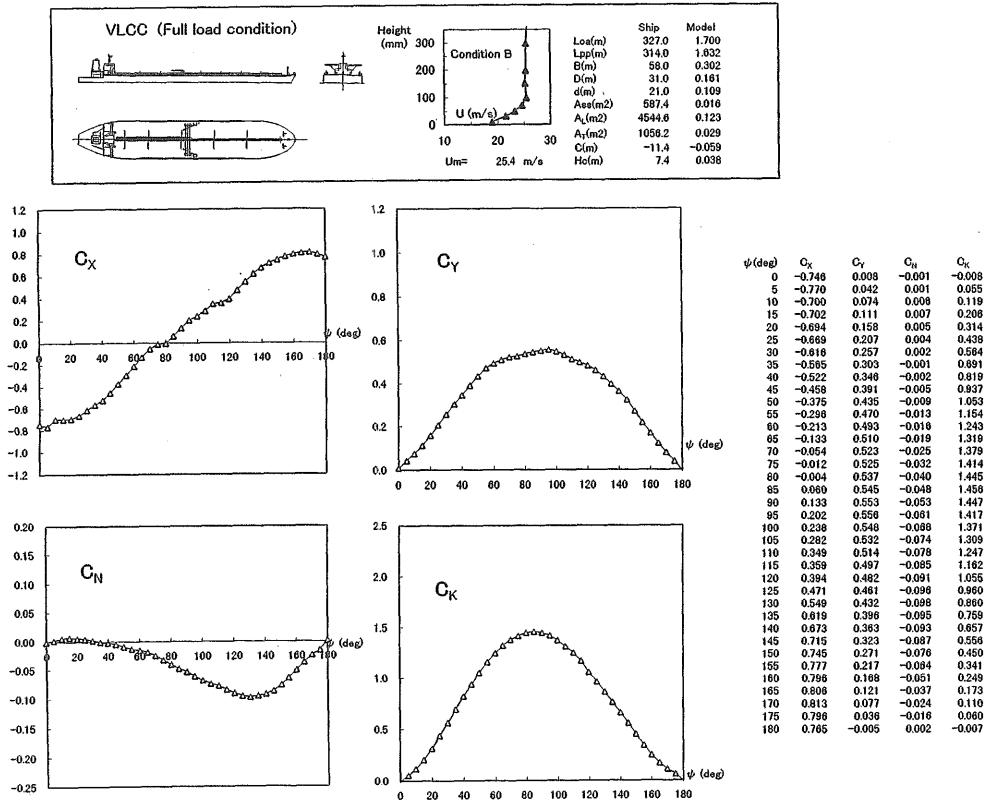


図3-23 VLCCの風圧力 (満載状態、Condition B)

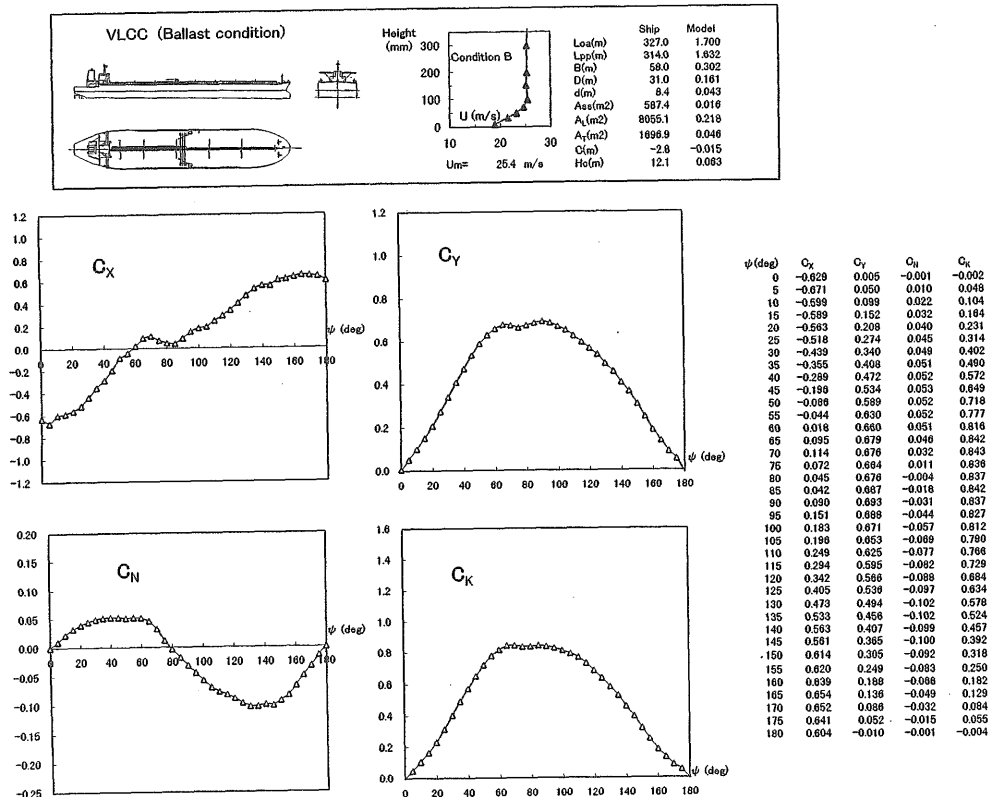


図3-24 VLCCの風圧力 (軽荷状態、Condition B)

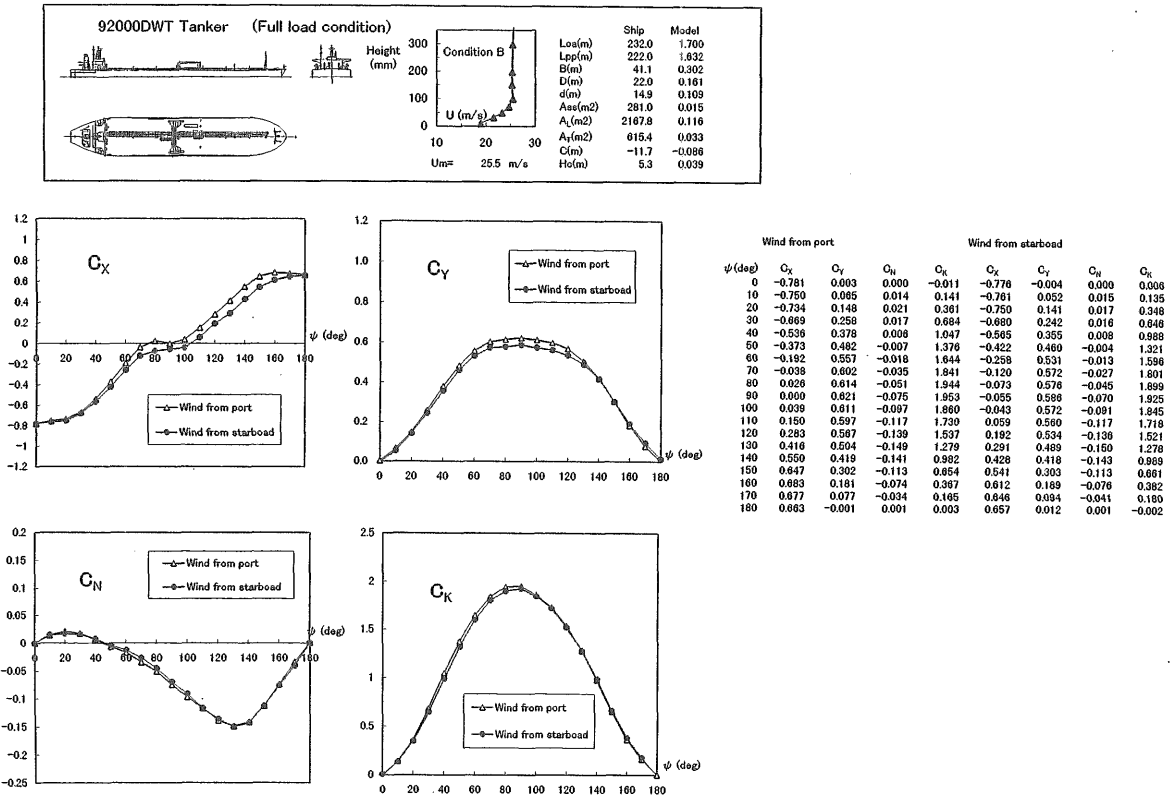


図3-25 92,000DWTタンカーの風圧力 (満載状態、Condition B)

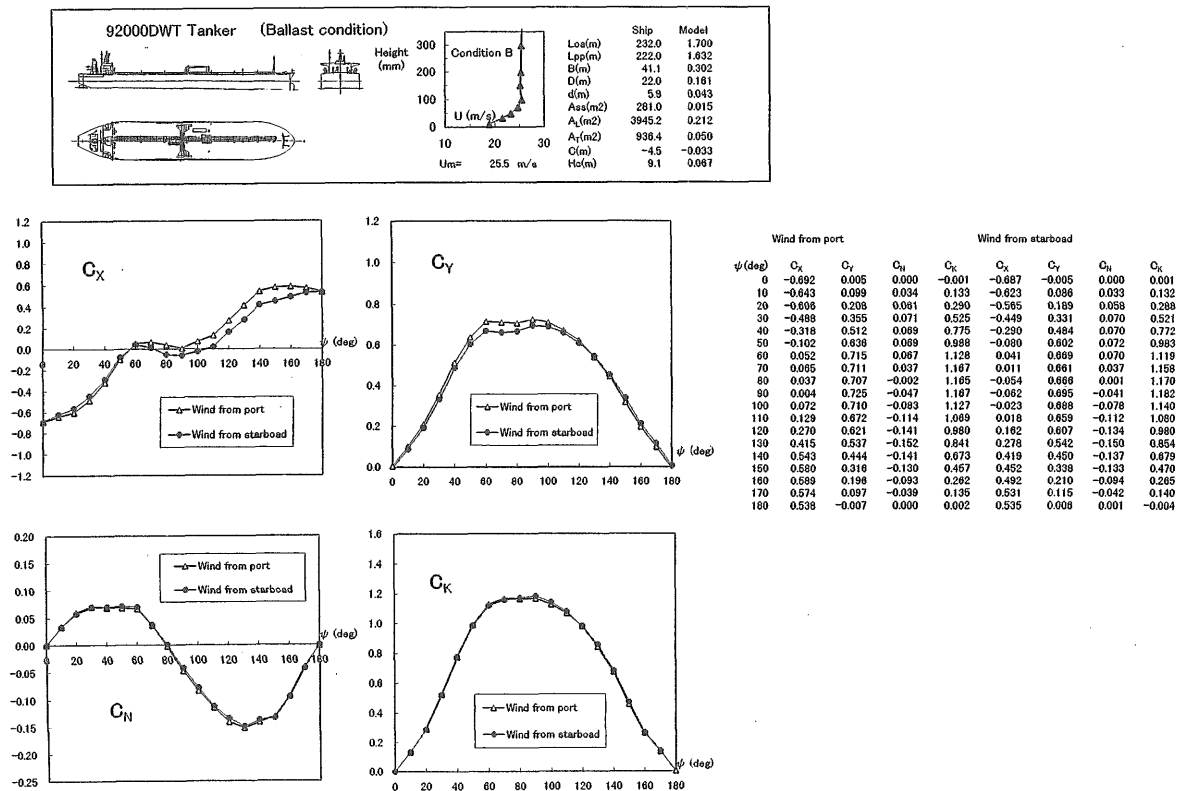


図3-26 92,000DWTタンカーの風圧力 (軽荷状態、Condition B)

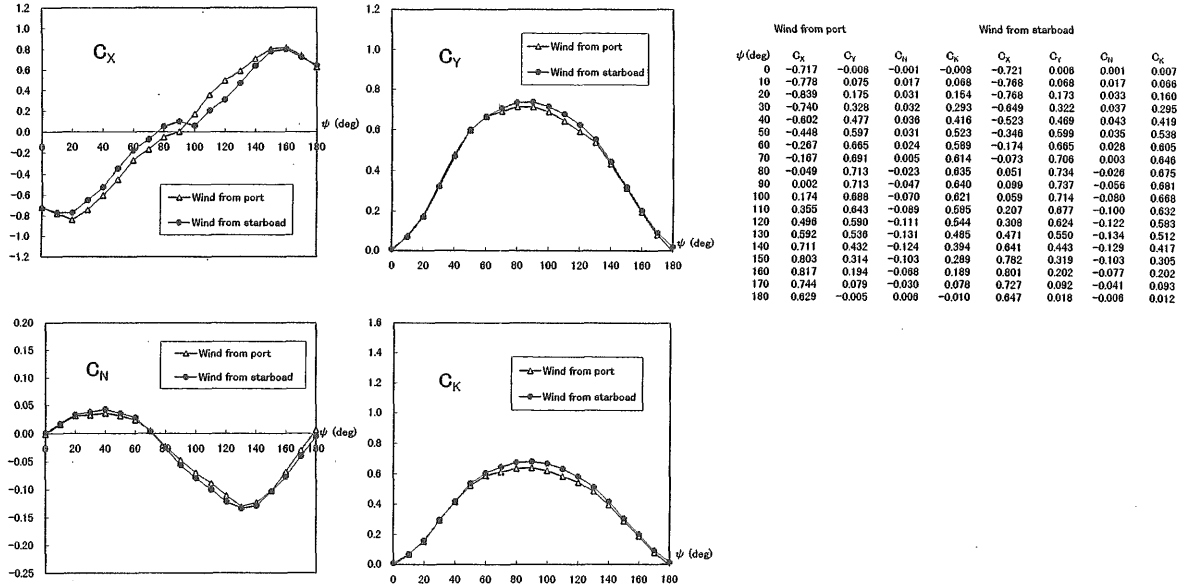
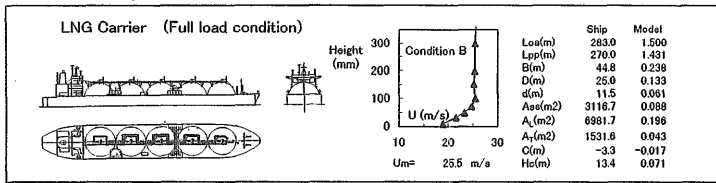


図3-27 LNG船の風圧力（満載状態、Condition B）

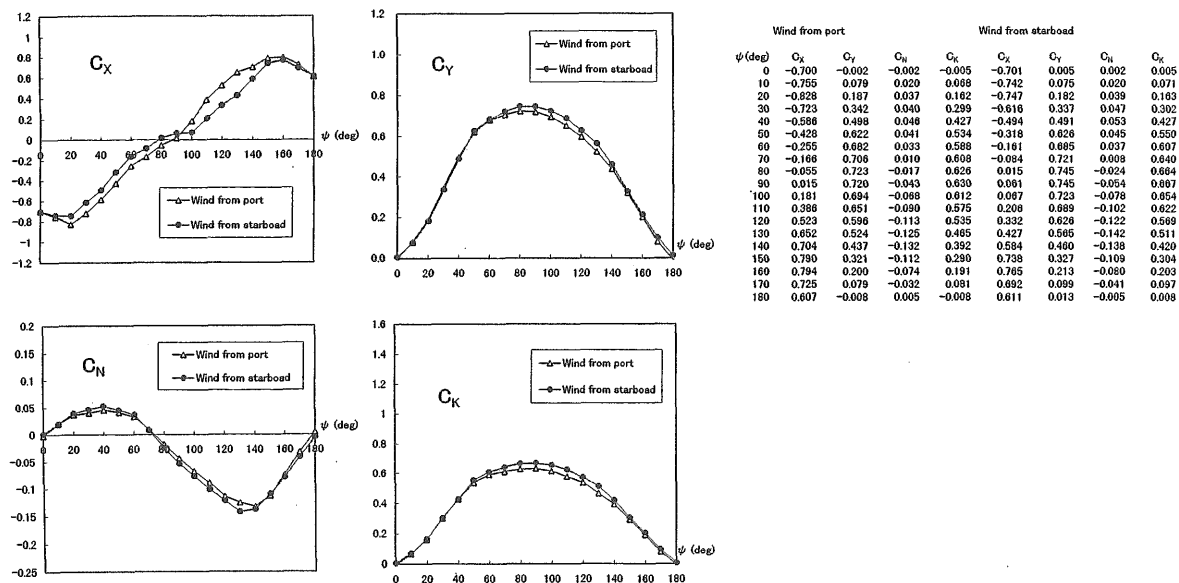
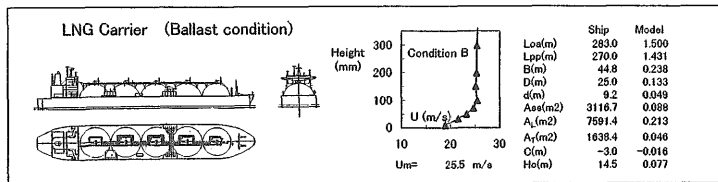


図3-28 LNG船の風圧力（軽荷状態、Condition B）

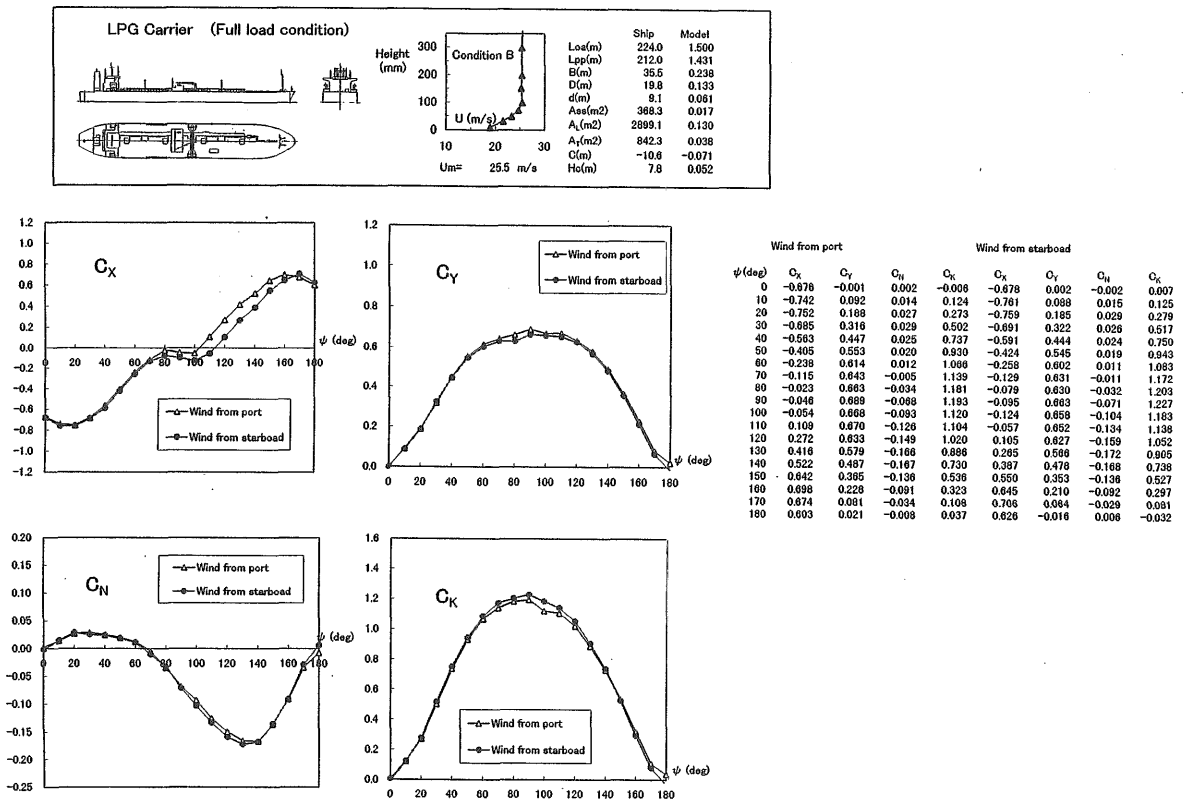


図3-29 LPG船の風圧力 (満載状態、Condition B)

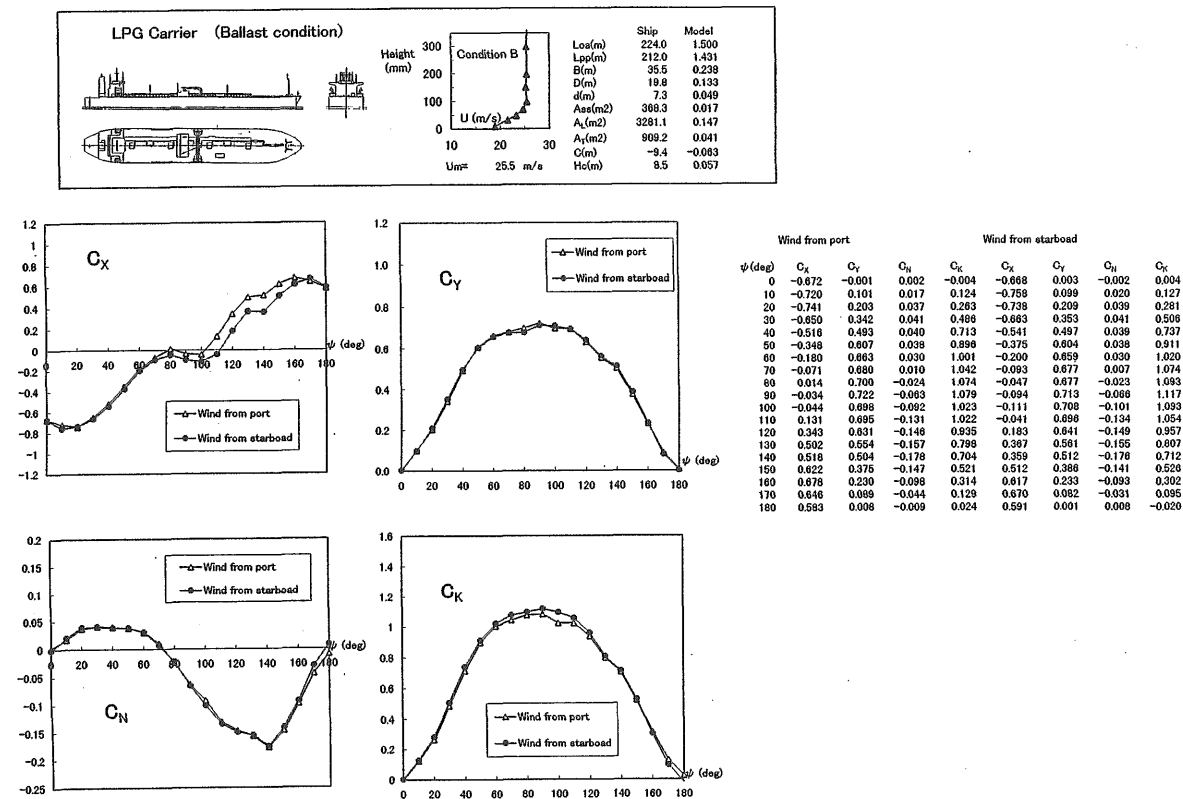


図3-30 LPG船の風圧力 (軽荷状態、Condition B)

重なる風圧力データが得られ、載荷状態の違いや艤装品配置の左右非対称性による風圧力への影響が明らかとなった。

3.4 船体まわりの流れの可視化

これまで多くの風圧力計測が行われているが、船体まわりの風の流れの様子についての報告は非常に少ない。そこでVLCC船型について、油膜法、スモーク法、スモークワイヤー法により流れの様子を把握を試みた。可視化実験から得られた主要な剥離渦や剥離位置などの流れの様子について報告する。

3.4.1 可視化手法及び可視化状態

可視化実験は風圧力計測と同じ変動風水洞で行った。

可視化実験を行った船型は、表3-2、図3-3に示すVLCC船型とLNG船型であるが、LNG船型は形状が複雑で概略の流れの様子を把握することさえ困難であったため、ここではVLCC船型の結果についてのみ報告する。

VLCC船型まわりの流れをスモーク法、スモークワイヤー法、油膜法により観察を行った。VLCC船型においてはブリッジ以外の艤装品を除いても風圧力計測結果の傾向には大きな差がなかったこと、艤装品のために油膜法の可視化実験が行い難いことから、可視化実験は図3-12、3) without pipelinesの状態で行った。また、風速分布は海上風を想定したCondition Aの状態では境界層内の風の乱れが大きく、煙を使用した可視化法での観察が困難であったため、すべてCondition Bの状態で行った。

スモーク法は図3-31に示す装置により流動パラフィンが発煙（ミスト状態の可能性もある。）させた。これを手動により移動させ剥離渦等の観察を行った。風速は $U=2\text{m/s}$ ($Re=0.2 \times 10^6$) 程度である。

スモークワイヤー法は、模型が大きいことや目視による観察を主体としたため、なるべく多量の煙を数秒程度発生させるように、0.45mmのニクロム線3本をよ

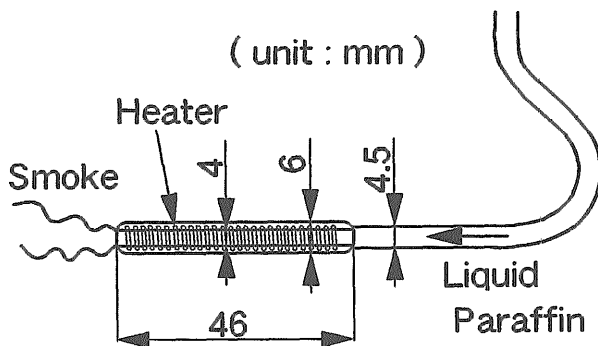


図3-31 スモーク発生装置

り合わせた発煙線に、アルミニウム粉を混合させた流動パラフィン塗布し発煙させた。このため通常のスモークワイヤー法に比べ発煙量が多く発煙時間も長くなったが、きれいな流脈線を得ることはできなかった。風速は $U=2\text{m/s}$ ($Re=0.2 \times 10^6$) 程度である。

油膜法は、模型船が黒色のため、顔料に白色の二酸化チタン (TiO_2) を用い、流動パラフィン、オレイン酸と混合して船体表面及び回転盤にローラーで塗布した。風速は $U=25\text{m/s}$ ($Re=2.8 \times 10^6$) で、油膜パターンが十分に発達したところで送風を停止し観察、写真撮影を行った。

3.4.2 VLCC船型まわりの流れ

3種類の可視化実験で得られたVLCC船型まわりの流れの様子をスケッチを図3-32から図3-36に示す。なお、記入したベクトルは油膜の方向を示すものであり、流速とは対応していない。また、図3-37から図3-43に油膜法の結果を示す。この写真は風洞天井の観測窓から撮影した数枚の写真を張り合わせたものであり、照明による船体の影や写真の張り合わせによる境界線が入っているため、剥離線の観察には注意を要する。図3-44から図3-47にはスモーク法による可視化写真を、図3-48にスモークワイヤー法による可視化写真を示す。以下では、図3-32から図3-36のスケッチに沿って、油膜法やスモーク法の写真を紹介しながらVLCC船型まわりの流れの様子について報告する。

図3-32の $\psi = 0^\circ$ (向風)の状態では、船首前方のターンテーブル上 (A) と船尾ブリッジ前のデッキ上の位置 (B) に馬蹄渦が見られる。図3-44が (A) のスモーク法による可視化写真であるが、このように (A)、(B) の渦はスモーク法によりはっきりとした渦核が確認できるが、船側あるいはブリッジ横に回り込んだところで拡散して後方の渦は確認できなくなる。図3-37の油膜法の写真ではブリッジの前に (B) の渦の剥離線が円弧状に観察できる。(B) 以外にデッキ上で観察できる渦は、船首デッキ上の渦 (C) がある。この渦は船体前方からの流れが船首で剥離したもので、図3-45のスモーク法の写真のように、渦に煙を注入すると直ちに拡散しデッキ面に煙が広がる。図3-37の油膜法の写真を見ると、船首部に放物線状の白い顔料が残っているが、この境界が剥離線である。また、その後ろに小さな卵形の白く顔料が残った点が見られるが、良く観察するとこの点を頂点とする放物線状の付着線が観察できる。この他の確認できる渦としては、船尾でデッキ上の流れが船側に流れ、剥離した一対の剥離渦 (D) がある。この剥離渦は船尾まで船側の煙を巻き込みながら流れる。この他、 $\psi = 0^\circ$ 以外の状態でも同様であるが、ブリッジや煙突などの風下は複雑な流れで、可視化による現象の把握はできなかった。

図3-33の $\psi = 40^\circ$ の状態では、図では船体の影にな

るが、船首から左舷側船体中央付近までのターンテーブル上に渦 (A) が見られる。この渦は図3-32の馬蹄渦 (A) がさらに強くなったもので、図3-46のスモーク法の写真のようにはっきりとした渦核が確認できる。図3-39の油膜法の写真では、ターンテーブル上の左舷側船体中央付近までと右舷側は船首を少し回ったところまでこの渦に対応する明瞭な剥離線が観察できる。 $\psi = 0^\circ$ で見られたブリッジ前のデッキ上の馬蹄渦 (B) も $\psi = 40^\circ$ で観察できる。図3-39では照明の反射でわからないが、図3-38 ($\psi = 20^\circ$)、図3-40 ($\psi = 60^\circ$) の油膜法の写真では、渦 (B) に対応する剥離線が観察できる。 $\psi = 0^\circ$ のデッキ上の渦 (C) は $\psi = 40^\circ$ になると図3-39の油膜法の写真のように船首から左舷の後半部まで剥離線が伸び、船首デッキ上に煙を注入すると船体後半部までのデッキ上に煙が広がる。この他の特徴的な剥離渦として、船首船側から発生し、船体後方

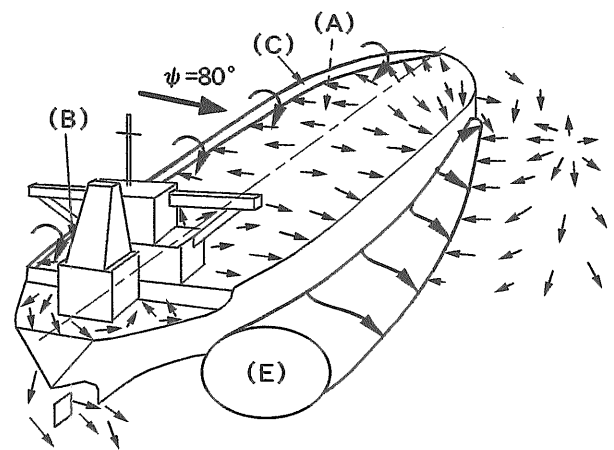


図3-34 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 80^\circ$)

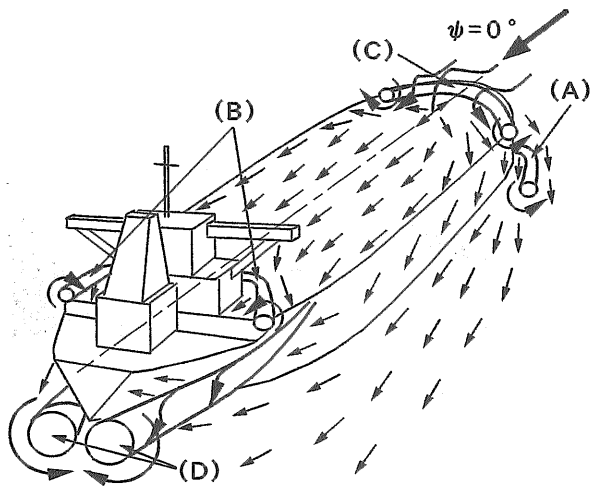


図3-32 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 0^\circ$)

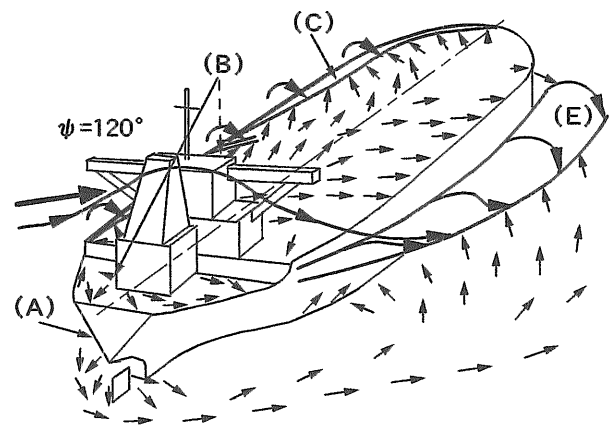


図3-35 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 120^\circ$)

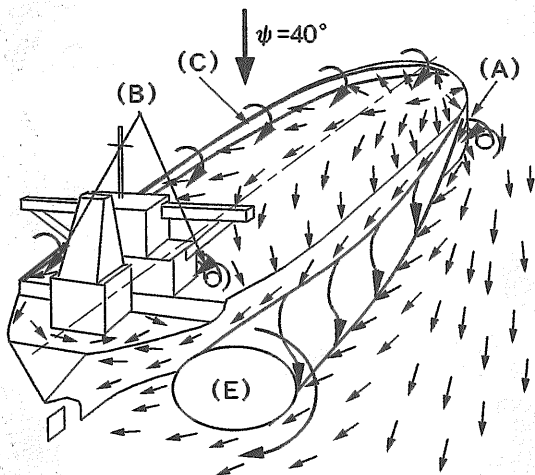


図3-33 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 40^\circ$)

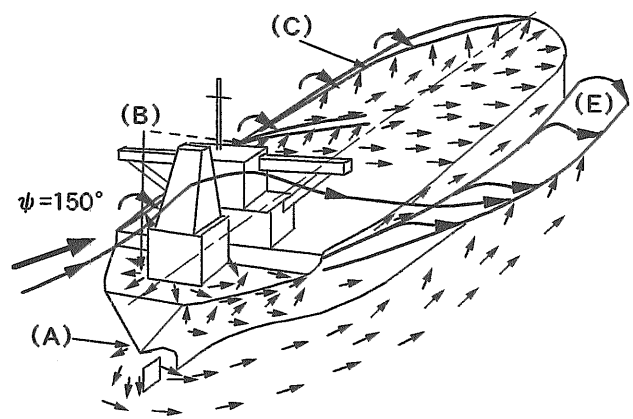


図3-36 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 150^\circ$)

までデッキ上や海面上の煙を巻き込みながら徐々に大きくなる剥離渦 (E) がある。図3-47が剥離渦 (E) のスモーク法による可視化である。図3-39の油膜法の写真では、右舷側の船体から少し離れたターンテーブル上に顔料が寄せ集められたように見える剥離線が観察できる。なお、この剥離渦は $\psi = 10^\circ$ 程度でも観察される。 $\psi = 0^\circ$ で観察された一对の剥離渦 (D) について見てみると、 $\psi = 20^\circ$ 程度で左舷側の渦がなくなり、

右舷側の渦は $\psi = 10^\circ$ でかなり強くなる。しかし、 $\psi = 40^\circ$ では剥離渦 (E) に吸収されてしまうためか確認できなくなる。

図3-34の $\psi = 80^\circ$ の状態では $\psi = 40^\circ$ と同じ種類の渦が観察されるが、顕著な違いは剥離渦 (E) の回転速度や煙の船体前後方向の速度が非常に小さいことである。船首で巻き込まれた煙の大部分は船尾方向または拡散して風下に流されるが、一部の煙は船体前方に廻

Wind ↓ $\psi = 0^\circ$

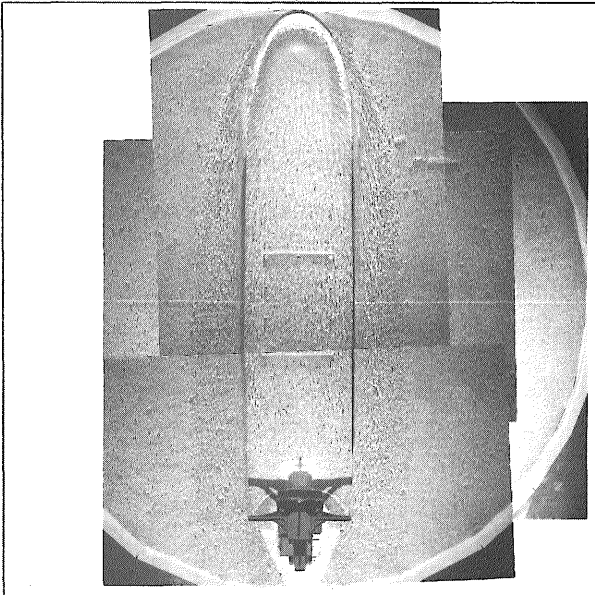


図3-37 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)

Wind ↓ $\psi = 40^\circ$

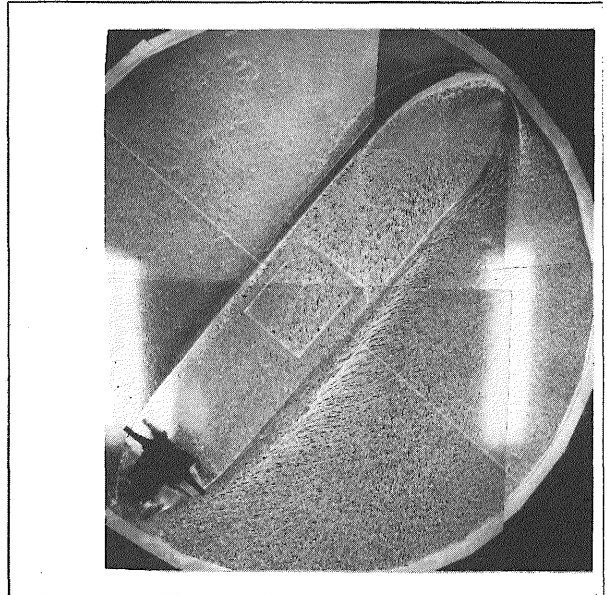


図3-39 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 40^\circ$)

Wind ↓ $\psi = 20^\circ$

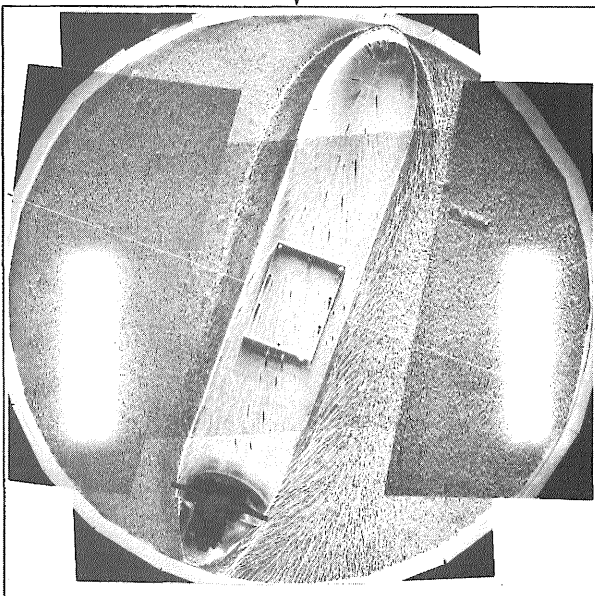


図3-38 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 20^\circ$)
(216)

Wind ↓ $\psi = 60^\circ$

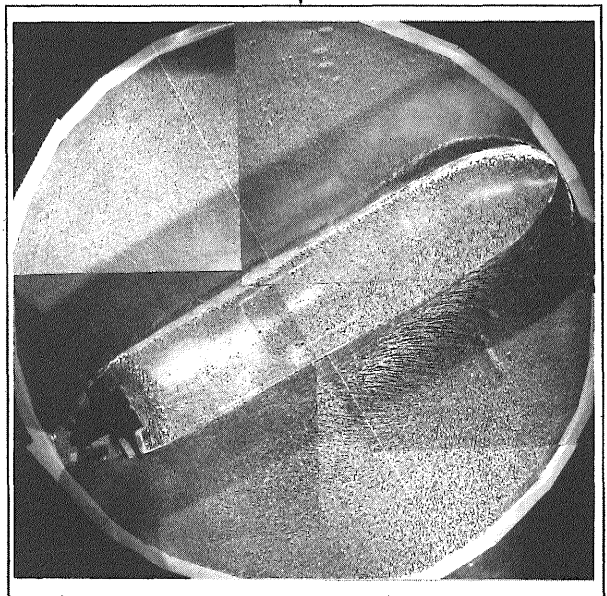


図3-40 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 60^\circ$)

る。図3-41の油膜法の写真は、他の状態に比べ長時間の送風後に撮影したものであるが、ターンテーブル上の船体両側の油膜はほとんど移動していないことが観察される。

図3-35の $\psi = 120^\circ$ 及び図3-36の $\psi = 150^\circ$ の状態では、船尾方向からの流れであるため、基本的には $\psi = 40^\circ$ を逆にした流場であるが、流れの上方にブリッジがあるためにさらに乱れた流れになっている。図3-48は ψ

$= 140^\circ$ の状態、床面5cmの高さに水平に設置したワイヤーからスモークを発生させた状態の写真であるが、ブリッジの風下の煙が攪拌されていることがわかる。また、例えば図3-42($\psi = 120^\circ$)の油膜法のブリッジ付近を見ると、左舷デッキ上に渦(C)の剥離線が見られるが、ブリッジの風上に発生する馬蹄渦(B)等も重なり合っているため複雑な剥離線となっている。この他、油膜法の写真からはターンテーブル上の馬蹄

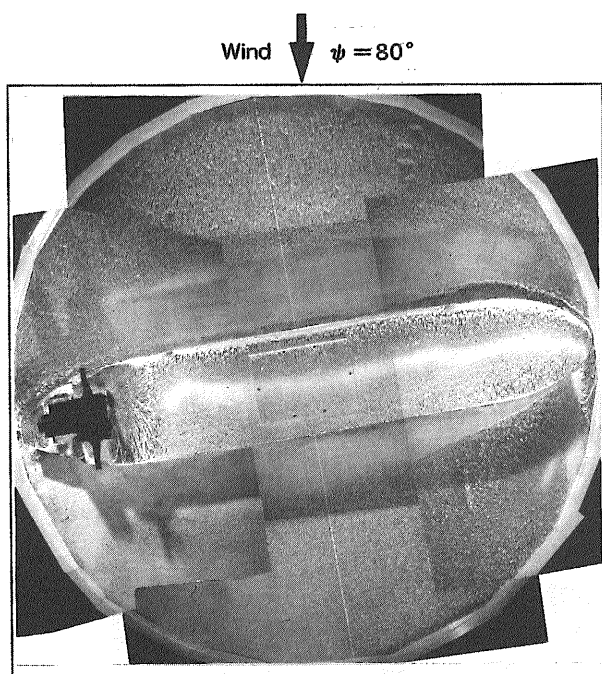


図3-41 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 80^\circ$)

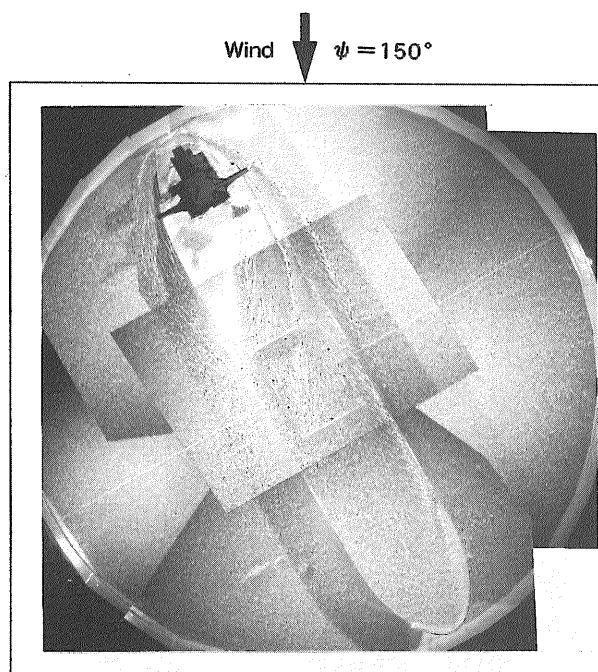


図3-43 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 150^\circ$)

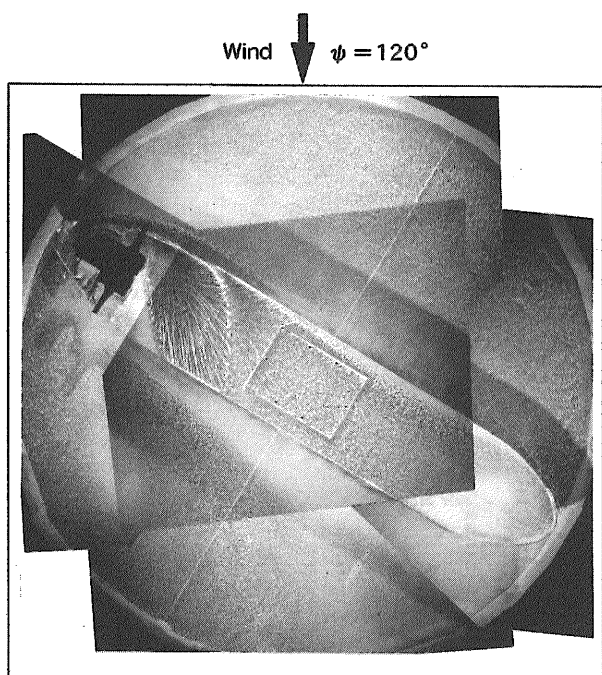


図3-42 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 120^\circ$)

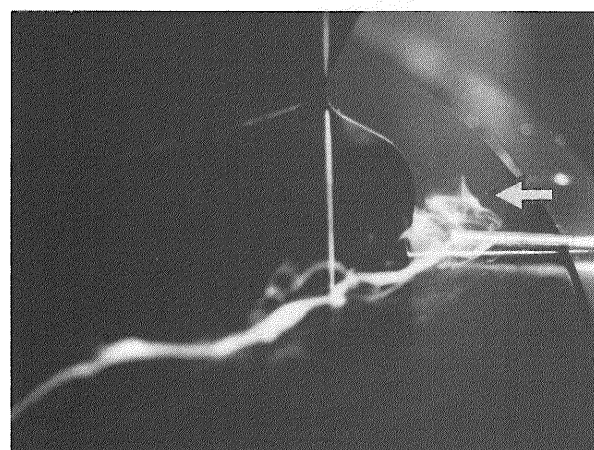


図3-44 スモーク法による馬蹄渦(A)の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)

渦 (A) や剥離渦 (E) の剥離線が観察される。

以上のように、流れの可視化実験により概略ではあるがVLCC船型まわりの流れの様子が把握できた。しかし、観察された流れは複雑で、特にブリッジのまわりの流れを把握することは困難に近い。流体力と流場の関係について検討を行うためには定量的な流場の計測が必要である。

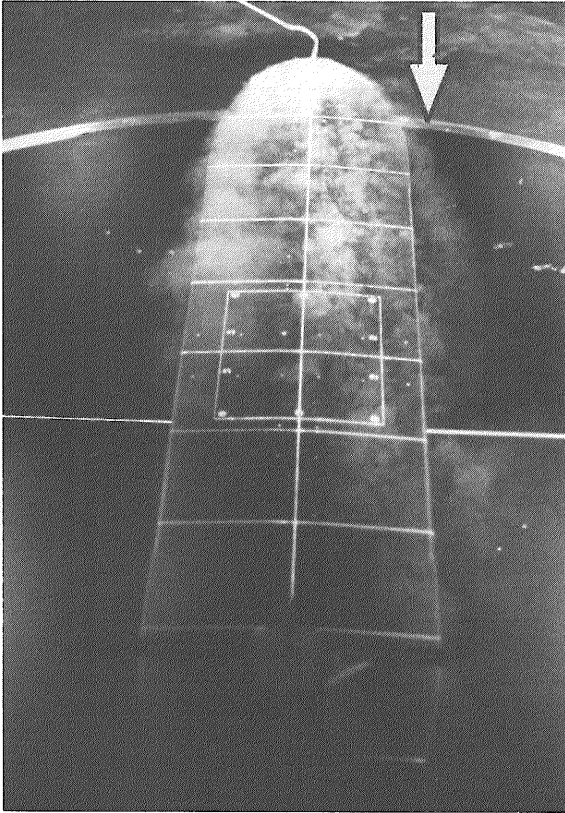


図3-45 スモーク法による剥離渦 (C) の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)



図3-46 スモーク法による馬蹄渦 (A) の可視化写真 ($\psi = 40^\circ$)

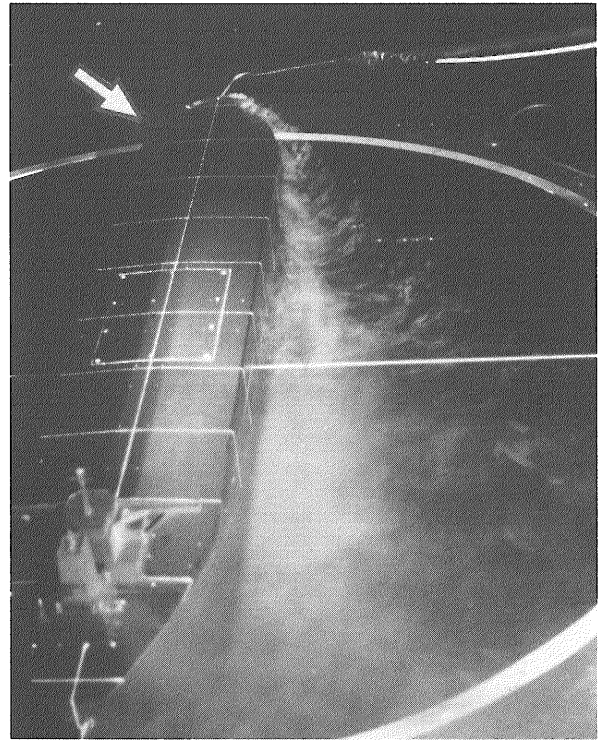


図3-47 スモーク法による剥離渦 (E) の可視化写真 ($\psi = 40^\circ$)

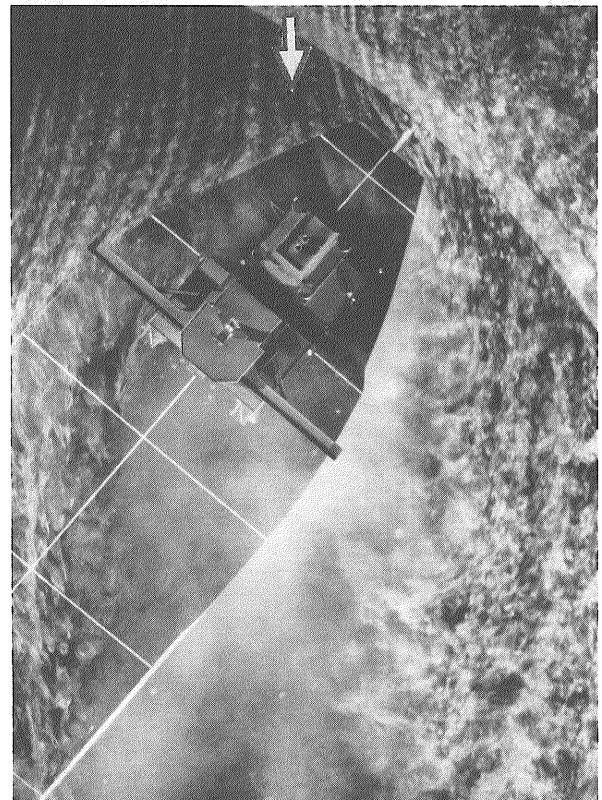


図3-48 スモークワイヤー法による船尾付近の可視化写真 (E) ($\psi = -140^\circ$)

3.5 結言

船体に働く風圧力に関する文献調査を行い研究動向について把握するとともに、近年建造された4隻の船舶について、2種類の風速分布及び2種類の載荷状態で風圧力の計測を行った。また、VLCC模型を用い風洞模型船の艤装状態を変えて模型の製作精度の差による風圧力への影響を調査した。さらに、可視化実験によりVLCC船型まわりの流れの様子の把握を試みた。これらの結果、以下のことが明らかになった。

1. 風圧力に関する文献調査の結果、風速分布の違いによる風圧力への影響の把握とその修正法の必要性、風洞模型の製作状態が風圧力に及ぼす影響の調査の必要性等が明らかになった。

2. 風洞実験を行うにあたっては、臨界レイノルズ数を超える領域で計測する必要がある、本実験から、そのレベルは約 $Rn \geq 10^6$ であることが確認された。

3. 2種類の風速分布で風圧力計測を行った結果、風速分布が異なる状態でも風圧力の定性的な傾向については変化しないことが明らかとなった。このことは、無次元化に用いる代表風速に、風速の鉛直分布形状を考慮した値を用いることにより、異なった風速分布の実験結果を同一条件下に換算できる可能性を示すものと考えられる。一例としてブリッジ上端までの平均風速で無次元化する方法で定量的にも良い一致を示すことを明らかにした。

4. VLCC模型の手すりやパイプライン等の艤装品の有無が、風圧力に及ぼす影響を調べた結果、模型船全長に対して高さが $1/300$ 程度の手すり等の小さな艤装品の影響は前後力、横力、回頭モーメントで5%未満である。しかし、パイプラインやクレーン等の比較的大きな艤装品の影響は前後力、横力で10~20%程度ある。

5. 近年建造された4隻の船舶について満載と軽荷状態の風圧力計測を行い、それぞれの船型に特徴的な風圧力データが得られた。

6. 満載状態と軽荷状態の風圧力計測の結果、VLCC、92,000DWTタンカーについては載荷状態の違いにより、特に前後力、回頭モーメントに大きな差が見られた。

7. デッキ上のパイプラインなどの配置が左右非対称な船舶については、前後力にその影響が顕著に現れる。

8. 流れの可視化実験により、概略ではあるがVLCC船型まわりの流れの様子が把握できた。

3章の参考文献

1) 荒木浩, 花岡達郎: 鉄道連絡船に関する風洞試験, 造船協会論文集第84号, 1948.11, p.61
 2) 木下昌雄, 花岡達郎, 中島康吉: 鮪鯉漁船の操縦性に及ぼす風圧の影響について, 造船協会論文集第86

号, 1949.11, p.317
 3) 岡田正次郎: 小型船舶に対する風圧による傾斜モーメントについて, 造船協会論文集第92号, 1952.11, p.75
 4) K.D.A.Shearer, D.R.T.C., W.M.Lynn: Wind Tunnel Tests on Models of Merchant Ships, North East Coast Institution of Engineers & Shipbuilders Vol.76 Part 5, 1960.3, p.229
 5) B.Wagner: Windkrafte an Uberwasserschiffen, Schiff und Hafen, 1967.12, p.19
 6) G.Aertssen, P.E.Colin: Wind Tunnel Tests on a Model of a Car-ferry, I.S.P. Vol.15 No.163, 1968.3, p.71
 7) 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, 船舶技術研究所報告第7巻第5号, 1970.7, p.13
 8) Christian Aage: Wind Coefficients for Nine Ship Models, Hydro and aerodynamics laboratory Report No.A-3, 1971.5
 9) 田宮真, 前田久明, 江口純弘, 鈴木文博: 船体に働く風圧力中心に関する実験的研究, 生産研究23巻6号, 1971.6, p.233
 10) 平岩節, 稲葉恭人, 坂本有隣: およしろ丸の風圧力に関する風洞実験, 日本航海学会論文集48号, 1972.10, p.43
 11) W.B.van Berlekom et al.: Large Tankers - Wind coefficients and Speed Loss Due to Wind Sea, The Royal Institute of Naval Architects, 1974, p.41
 12) 岩井聡, 藤井照久, 斉藤善昭: 船体風圧力におよぼす風圧面形状の影響について, 日本航海学会論文集55号, 1976.5, p.35
 13) Prediction of Wind and Current Loads on VLCCs, Oil Companies International Marine Forum, England 1977
 14) 鳥野慶一, 米田国三郎: ある漁船の風圧力とその解析モデルについて, 関西造船協会誌第212号, 1989.9, p.133
 15) W.Blendermann: Wind Loading of Ships - Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow, Institut fur Schiffbau der Universitat Hamburg, No.574, 1996
 16) W.Blendermann: Parameter Identification of Wind Load on Ships, J.Wind Eng. Ind. Aerodyn.51, 1994, p.339
 17) W.Blendermann: Estimation of Wind Loads on Ships in Wind with a Strong Gradient, 1995 OMAE, Vol.1-A
 18) 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, p.91
 19) R.M.Isherwood: Wind Resistance of Merchant

Ships, The Royal Institute of Naval Architects
Vol.115(1973), p.327

- 20)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, 日本航海学会論文集第83号, 1990.9, p.185
- 21)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, 1991.9, p.169
- 22)H.Eda: Low-Speed Controllability of Ships in Wind, Journal of ship research, 1968.9, p.181
- 23)小川陽弘: 外力を受ける船の操縦運動の計算(その1), 日本造船学会論文集第126号, 1969.11, p.107
- 24)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44号, 1972, p.111
- 25)井上正祐, 石橋賢論: 操縦性に対する風の影響(Ⅱ), 西部造船会会報第45号, 1972, p.115
- 26)井上正祐, 石橋賢論: 操縦性に対する風の影響(Ⅲ), 西部造船会会報第46号, 1973, p.1
- 27)石橋賢論: 定常風下の進路安定性並びに操船可能な風速の範囲について, 日本造船学会論文集第138号, 1975.11, p.165
- 28)Eng.Wieslaw Welnicki: Method of Estimation of Wind Influence upon the Course Keeping Ability of Ships with Large Superstructures, RINA
- 29)桑島進, 小林弘明: 風の乱れと船の保針-I, 日本航海学会論文集第58号, 1977.12, P.51
- 30)桑島進, 小林弘明: 風の乱れと船の保針-II, 日本航海学会論文集第60号, 1978, P.93
- 31)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, 1980.3, p.1
- 32)横町政芳: 風や潮流を受ける船の Dynamic Positioning について, 西部造船会々報第61号, 1980.11, p.125
- 33)平野雅祥, 高品純志, 森谷周行: 船舶の風圧下操縦性能について(第1報: 模擬風圧力発生装置を用いた模型試験), 日本造船学会論文集第155号, 1984.5, p.122
- 34)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, 1985.11, p.117
- 35)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, 1980.12, p.13
- 36)建築物風洞実験ガイドブック, 日本建築センター, 1994
- 37)海洋工学委員会性能分会編: 超大型浮体構造物, 成山堂書店, 1995

4. 結 論

船舶に働く風の力と波の力、風及び波という外乱による船舶の漂流運動について、今後研究を進めていく際の指針を得るため、基礎的な検討を行った。その検討結果の要約を以下に示す。

船の運動への波の影響は、波との出会い周期で変動する成分と定常あるいは長周期で変動する成分からなり、漂流運動を引き起こす波の力としては波漂流力と呼ばれる後者の定常あるいは長周期の成分を考慮すれば実用上十分であろう。

この波漂流力を数値計算で調べてみると、波長船長比が1より小さい短波長域において波漂流力が大きくなること、出会い角による波漂流力の変化は、横力と前後力は比較的単調に変化するが、回頭モーメントは出会い角に対して複数の山谷が現れ波長が短いほど山谷の数が多くなること、等がわかった。

大偏角斜航試験で得られた流体力と波漂流力の計算値から、波の中での定常漂流運動を推定すると、運動方程式に複数の釣り合い解が存在することがわかった。その中で安定な解が漂流状態として存在することになるが、安定性判別には船体の回頭運動に基づく流体力が必要になる。本研究では回頭運動による流体力の調査は行っておらず、複数解の存在可能性は漂流予測のあり方についてさらなる検討の必要性を示している。

幅の狭い長水槽で大偏角斜航試験を行う際に問題となるのが水槽壁による制限水路影響である。今回、長水槽と広い水面を有する水槽において同一模型船を用いた大偏角斜航試験を行い、流体力の特性に加えて流体力への制限水路影響の有無についても調査した。その結果側壁影響については、細長い水槽においても模型船長の2倍程度の水槽巾と模型船長と同程度の水深があれば、大偏角斜航試験において流体力への側壁影響は実用上無視できることを確認した。

風による漂流運動については、波による漂流運動と同様に風圧力を外力として与えればよく、風圧力は相

対風速・相対風向の関数となることから船体運動とは切り離して独立に扱った。

船体に働く風圧力の精度良い推定法の開発に資するため、既存の文献・資料の調査を行うとともに最近の船型である4隻の模型船について風洞試験を行った。

船体に働く風の力を正しく推定するには、流体現象として船体まわりの風の流場を把握することが基本となると考え風洞試験で流れの可視化を行い、船体まわりの流れの大まかな流場構造を把握したが、流場と流体力の関係を十分検討するには至らなかった。

風圧力計測の風洞試験では、データの少ない最近の船型について風圧力の資料を得るとともに、風速分布及び艤装品の風圧力への影響を調べた。

風洞試験における風圧力データの取り扱いについては、風速分布を変えた風洞試験を行うとともに、既存の風洞試験の資料とあわせて風圧力データの再検討を行い、異なる風速分布での風圧力データを統一的に扱うための簡単な手法を示したが、精度的には必ずしも満足できるものではなくさらに高精度の手法の開発が必要である。

船に働く波の力、船に働く風の力、外乱による船の漂流運動という3分野から、研究の現状把握と問題点の検討を行い、今後の研究のための指針と資料を得ることができた。

なお、漂流運動する船体に働く流体力は、揚力が支配的な小偏角時の流体力から抗力が支配的な大偏角時の流体力まで、定量的にも定性的にも大きく変化する。これらの力は流体の粘性に起因するが、特に抗力はレイノルズ数の影響を強く受けるため、模型スケールでの現象と実船スケールでの現象の関係を示す縮率影響の評価が大きな問題として出てくる。実船試験による流体力測定が非常に困難であるため縮率影響の研究はほとんど進んでおらず、現在のところ模型試験の結果をそのまま用いて運動を推定せざるをえないが、信頼性と推定精度向上のためには実船試験を用いた縮率影響の研究が今後必要であろう。