

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

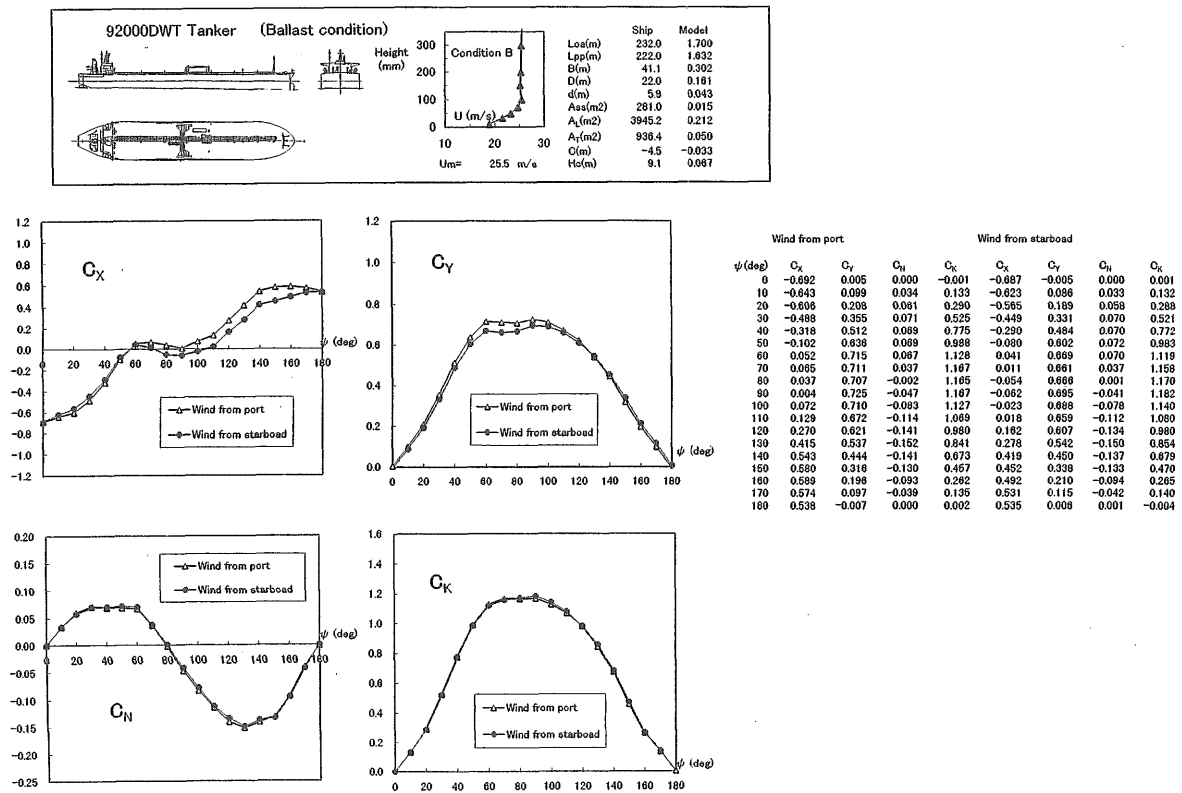


図3-26 92,000DWTタンカーの風圧力 (軽荷状態、Condition B)

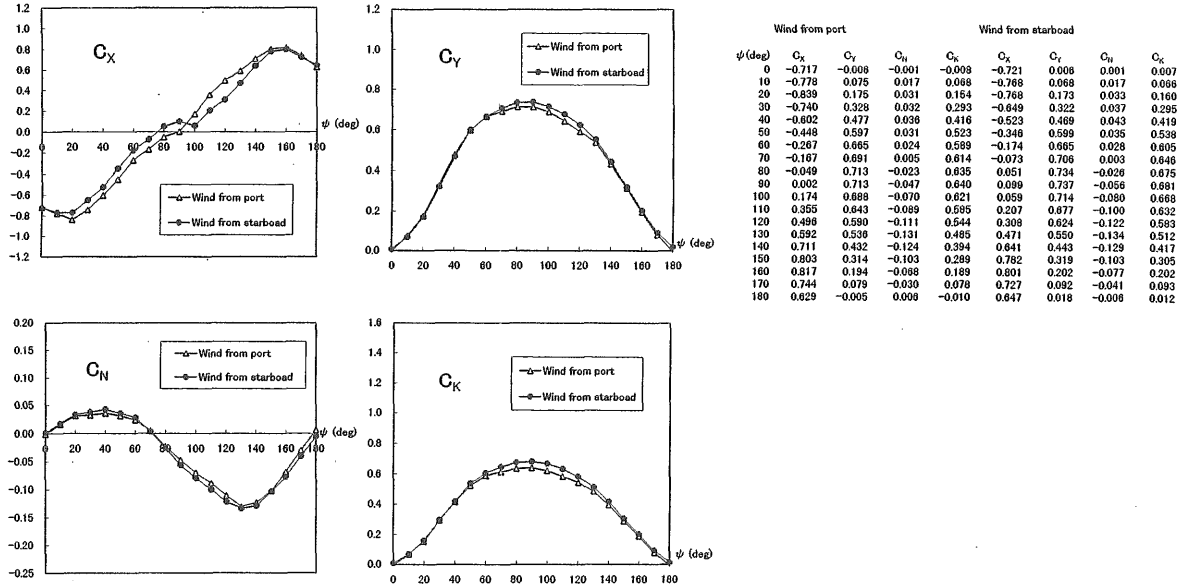
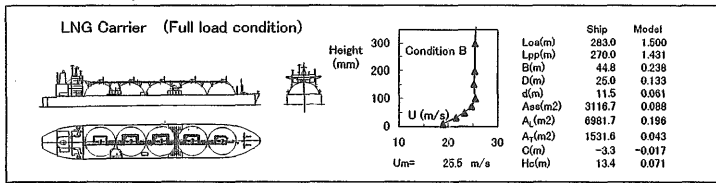


図3-27 LNG船の風圧力（満載状態、Condition B）

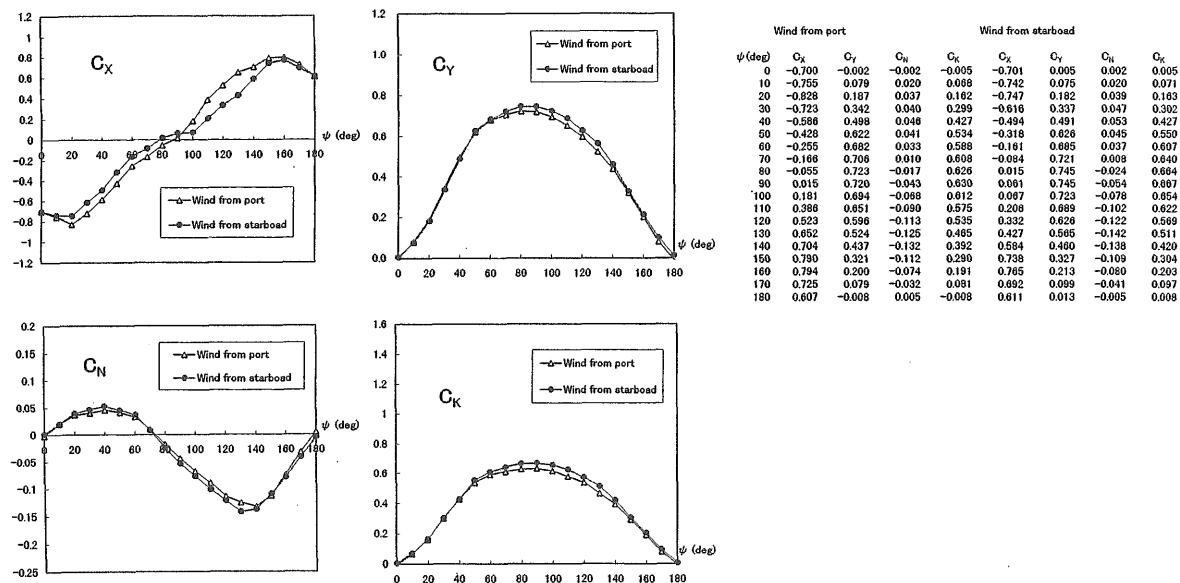
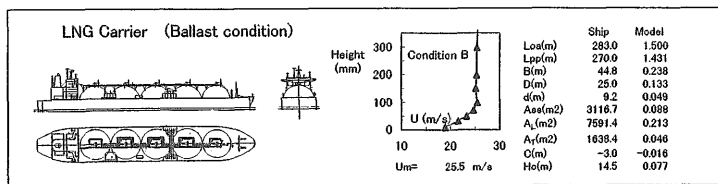


図3-28 LNG船の風圧力（軽荷状態、Condition B）

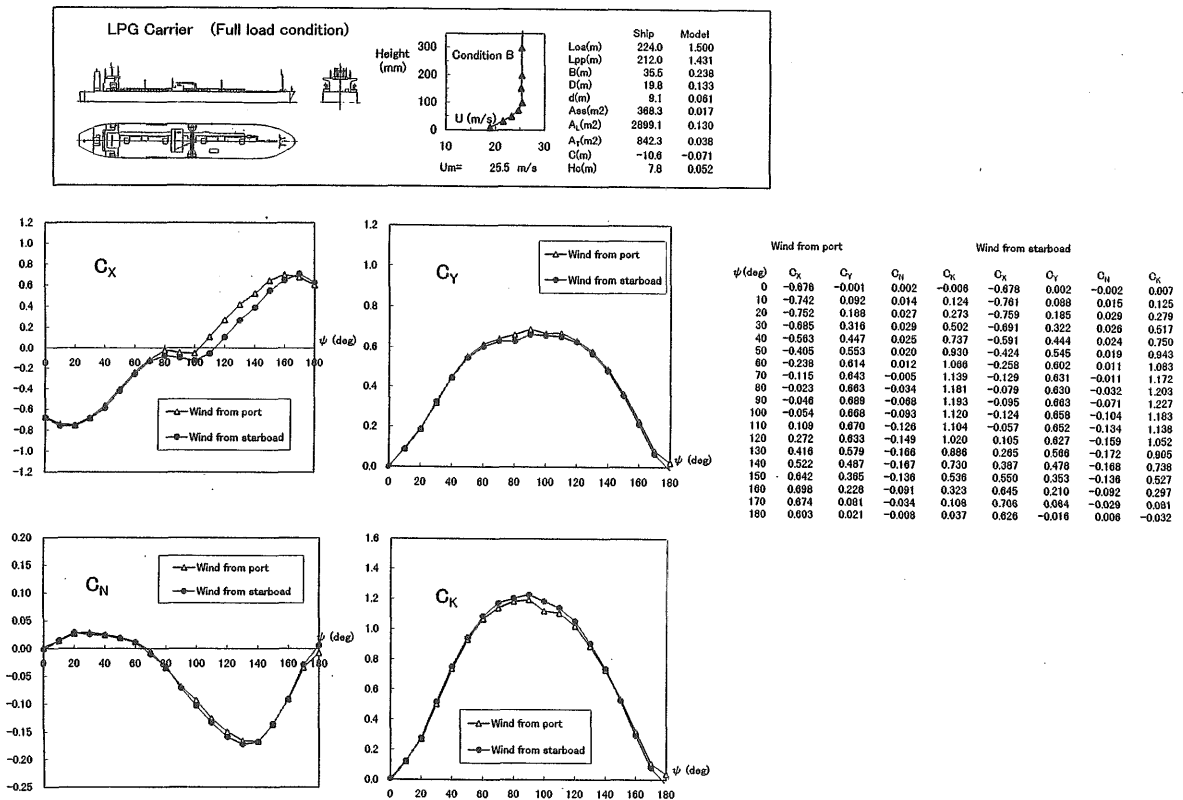


図3-29 LPG船の風圧力 (満載状態、Condition B)

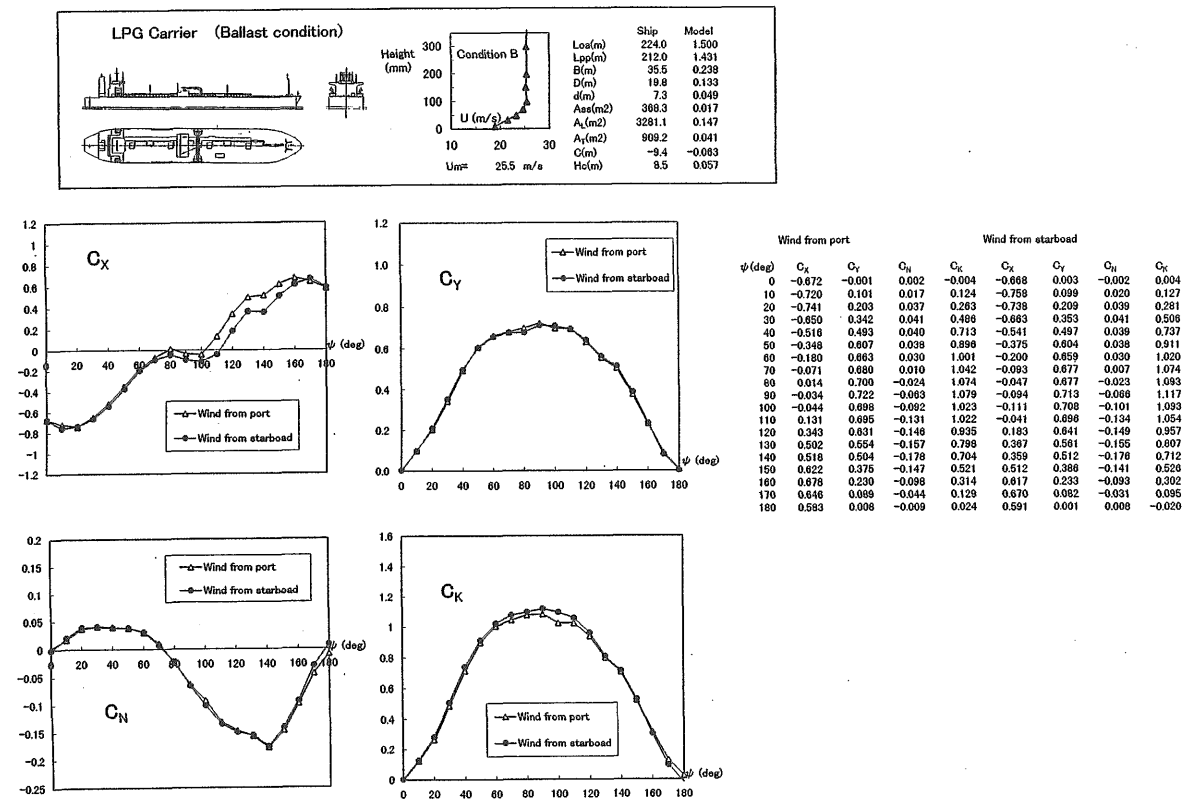


図3-30 LPG船の風圧力 (軽荷状態、Condition B)

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

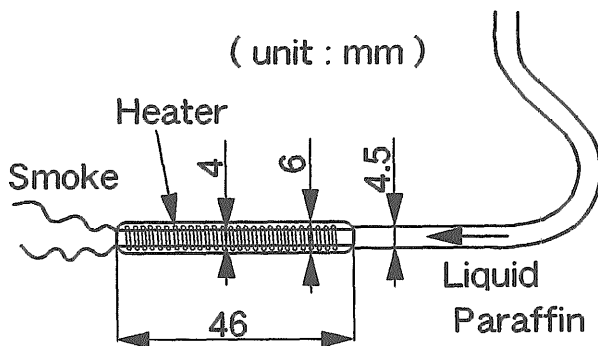


図3-31 スモーク発生装置

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

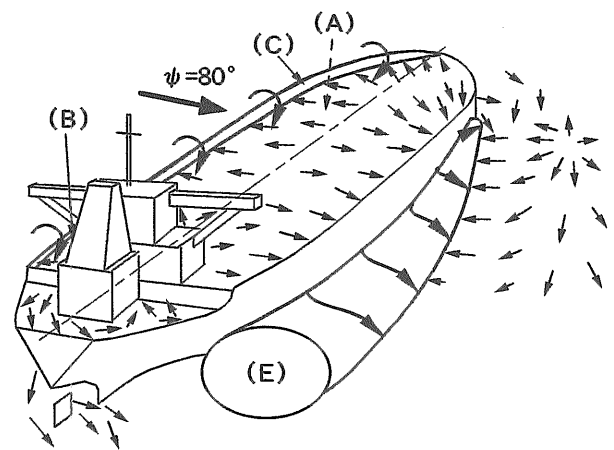


図3-34 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 80^\circ$)

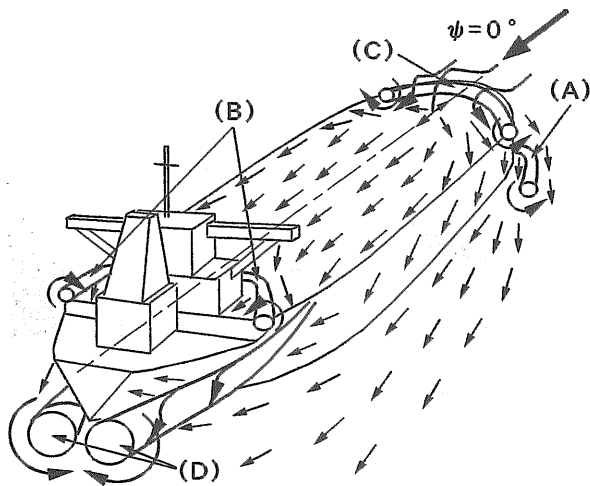


図3-32 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 0^\circ$)

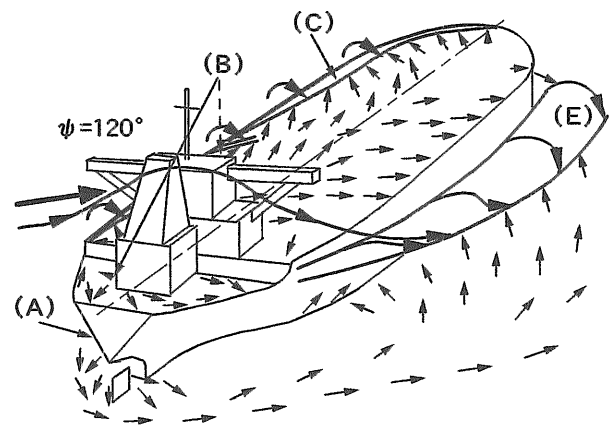


図3-35 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 120^\circ$)

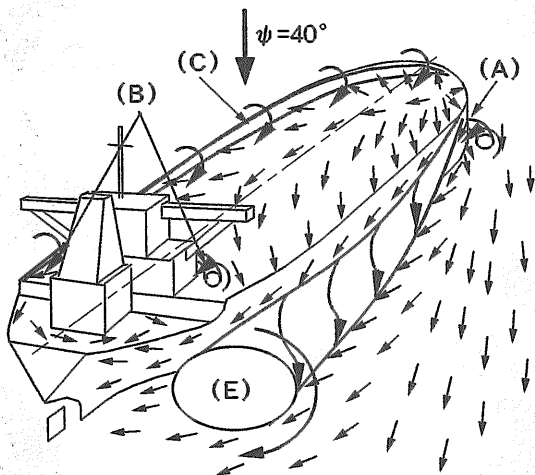


図3-33 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 40^\circ$)

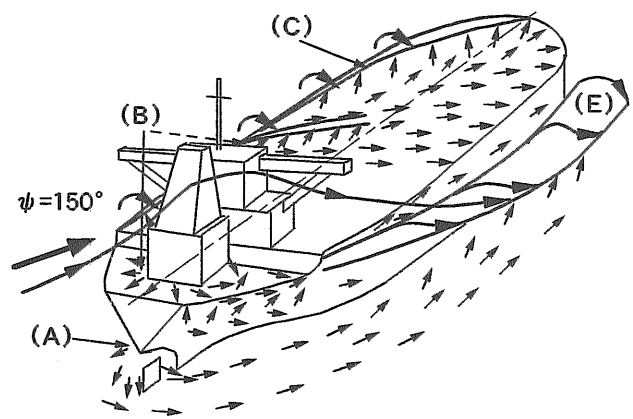


図3-36 VLCC 船型まわりの流れのスケッチ ($\psi = 150^\circ$)

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。 $\psi = 0^\circ$ で観察された一対の剥離渦 (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 ↓ $\psi = 0^\circ$

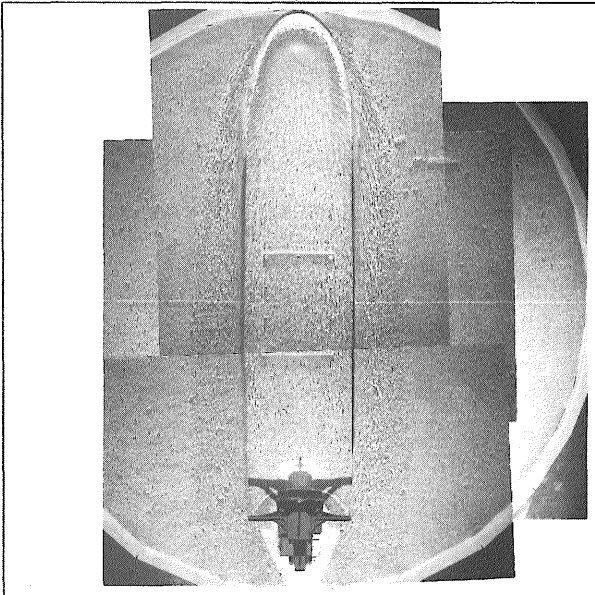


図3-37 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)

Wind ↓ $\psi = 40^\circ$

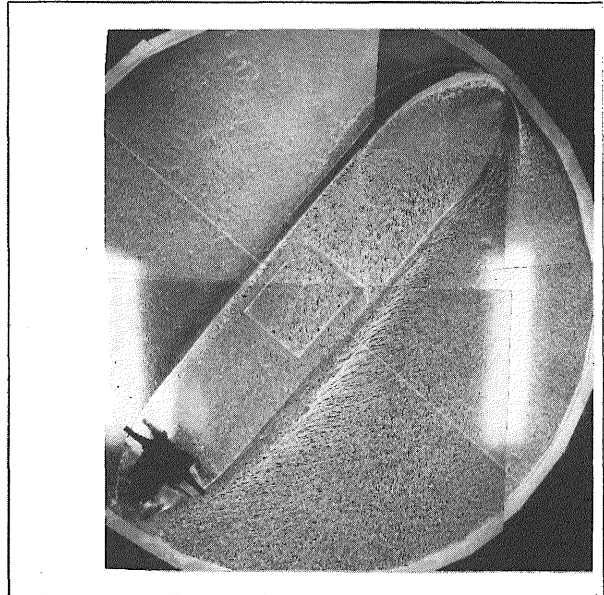


図3-39 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 40^\circ$)

Wind ↓ $\psi = 20^\circ$

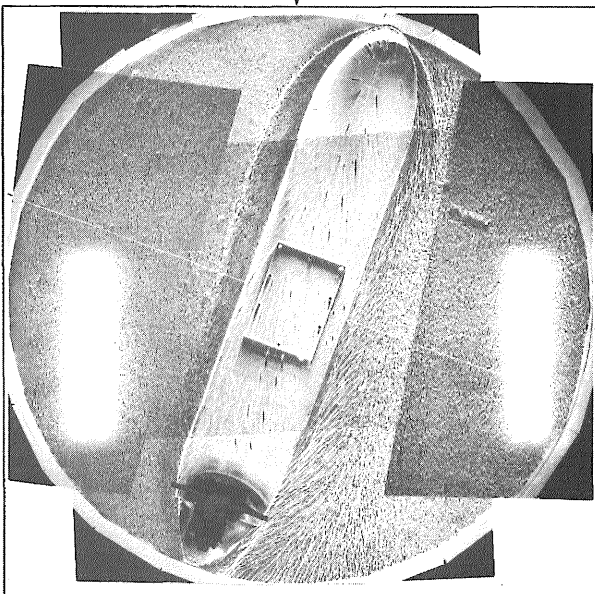


図3-38 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 20^\circ$)
(216)

Wind ↓ $\psi = 60^\circ$

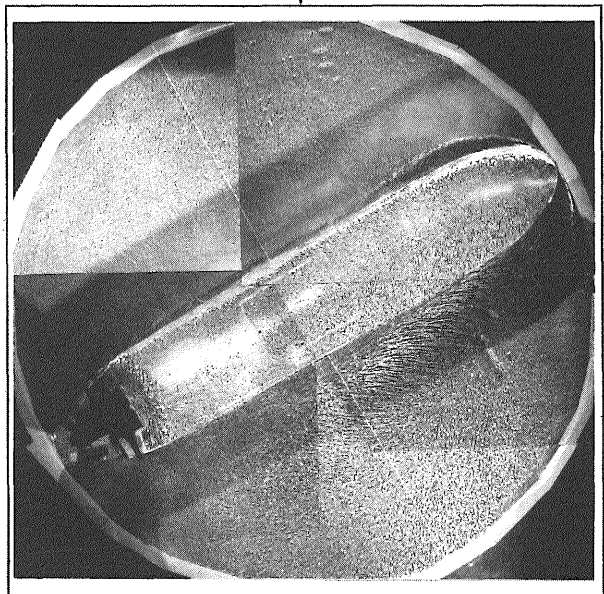


図3-40 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 60^\circ$)

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

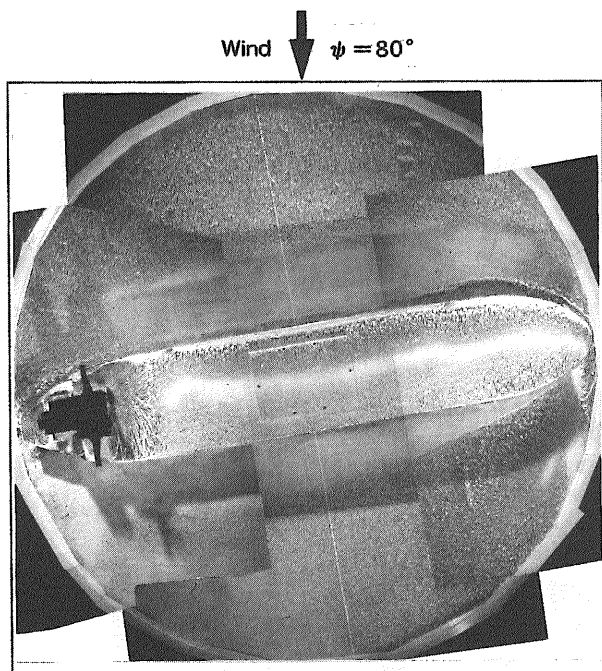


図3-41 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 80^\circ$)

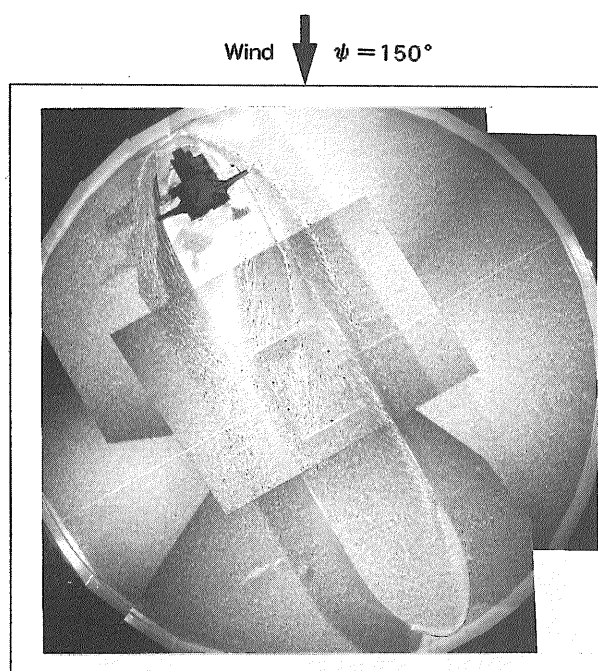


図3-43 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 150^\circ$)

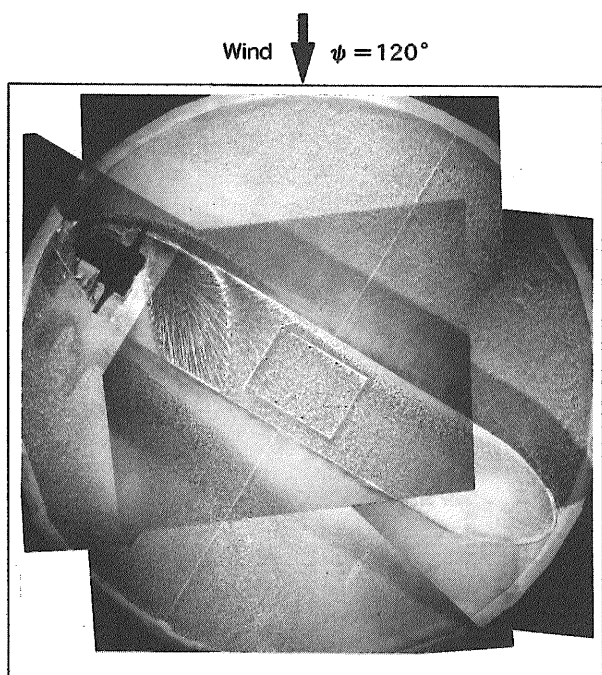


図3-42 油膜法による限界流線の可視化写真 ($\psi = 120^\circ$)

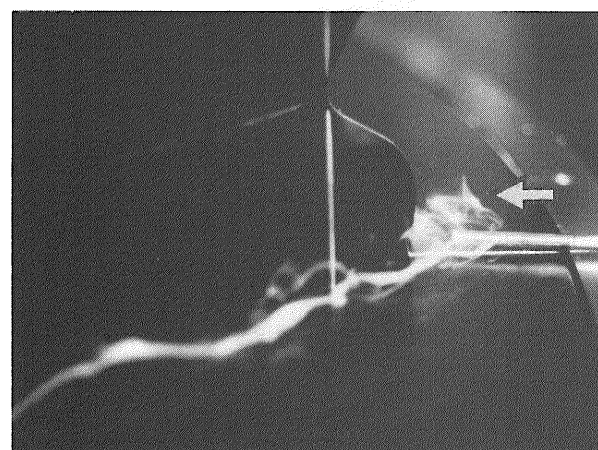


図3-44 スモーク法による馬蹄渦(A)の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)

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。

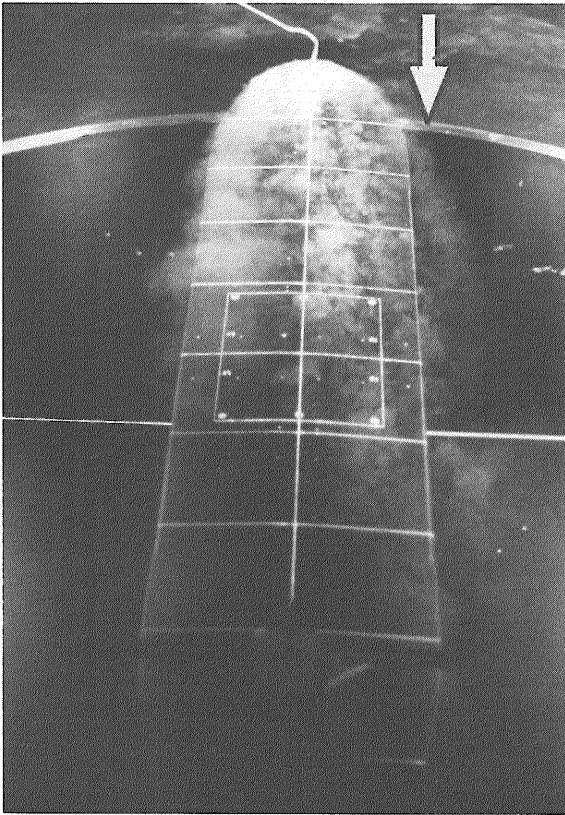


図3-45 スモーク法による剥離渦 (C) の可視化写真 ($\psi = 0^\circ$)



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

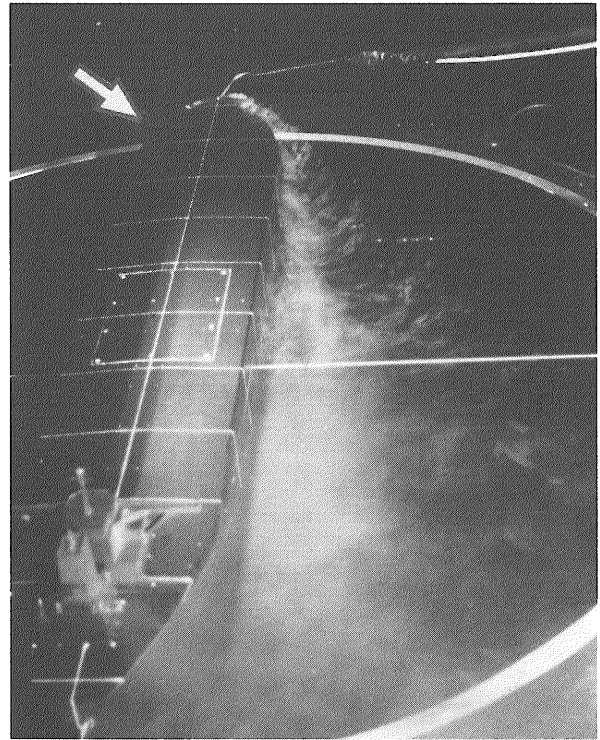


図3-47 スモーク法による剥離渦 (E) の可視化写真 ($\psi = 40^\circ$)

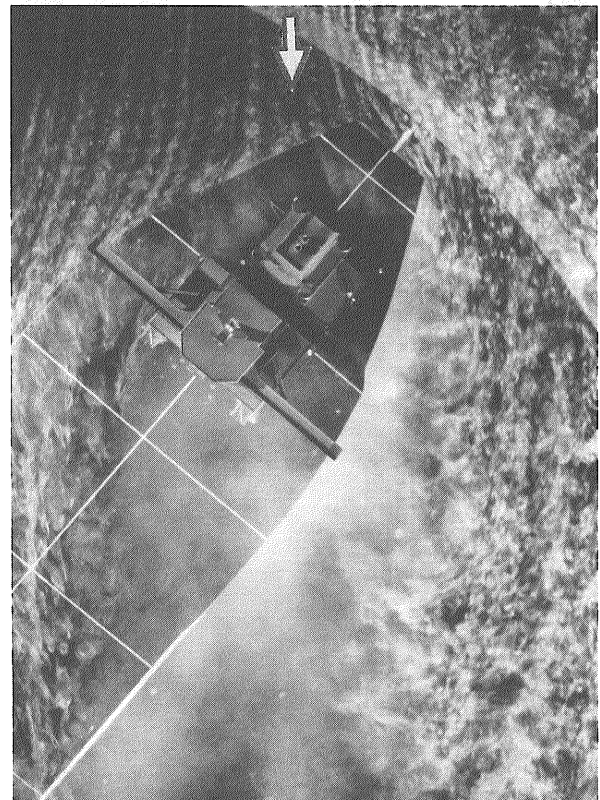


図3-48 スモークワイヤー法による船尾付近の可視化写真 (E) ($\psi = -140^\circ$)

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。