

長水槽での大型コンテナ船の風・波併存下自由航走模型試験

正員 藤原 敏文* 正員 二村 正*
 正員 南 佳成* 正員 佐々木 紀幸*
 正員 高木 健**

Free running model test on a large container ship under wind and waves at towing tank

by Toshifumi Fujiwara, *Member* Tadashi Nimura, *Member*
 Yoshimasa Minami, *Member* Noriyuki Sasaki, *Member*
 Ken Takagi, *Member*

Summary

A ship navigating at sea is always suffered from wind and waves. The assessment of the ship speed and thrust under external forces as the wind and waves is important from economical viewpoints. Although the estimation methods for ship performance at sea were already presented, the confirmation of the methods has not been enough using experiments due to the difficulty of the experimental setup with wind and waves. In this time, free running model test on a large container ship under heavy wind and waves was carried out at the 400m towing tank in National Maritime Research Institute, Japan. Averaged navigating conditions and time fluctuations of the ship speed, drift, rudder angle, ship motions and thrust etc. were clearly understood from the experiments. Moreover, the assessment of the ship performance is conducted using a computational calculation method. The steady-state equations are formulated based on the MMG model for ship manoeuvring simulation to obtain the steady ship conditions. As a result, some important thrust related characteristics and efficiency of the calculated method in steady running condition in heavy wind and waves for the ship are clearly revealed from the experiments.

1. 結 言

地球温暖化に伴う環境保護や原油高に起因した運航経済性の観点から、近年の海運を取り巻く状況は、従来と比べてより精密な船の運航評価を必要としている。したがって、船の推進性能について、平水中性能が重要であることにかかわらず、風、波環境下での抵抗増加量、燃料消費の増加量をより正確に把握したいとのニーズが存在する。

過去より実海域での運航評価に関して、実験による検討は行われてきたが、風、または波の単独外乱下での航行特性の把握に留まっている。例えば、操縦性能の観点から、平野¹⁾は曳航水槽及び当所の旧角水槽にて、自由航走模型船により実験を行った。3基のファンを船上に装着し、風外力を模擬することで、風圧下の操縦性について検討を行っている。

また、芳村²⁾はPCCを対象として耐航性水槽で同様に自由航走試験により風圧下での航行状態の把握を行った。波浪中の推進性能の観点から、菅井³⁾、竹沢⁴⁾、平山⁵⁾は角水槽や曳航水槽にて波浪中での自由航走模型試験を実施し、船速低下や航行状態の変化について調査を行った。ただし、試験設備の制約上等の点から風と波が併存する状態での航行状態の把握、評価法の検証は必ずしも十分ではない。

世界的な製造物輸送の流れは拡大状況にあり、コンテナ船やPCCは大型化の一途をたどっている。これらの船舶は、水面上構造が非常に大きいため風の影響で斜航し、進行方位を保つために当て舵を取ることになる⁶⁾。斜航や当て舵が推進力に与える影響を十分把握する必要があると考えられる。

そこで今回、満載状態の大型コンテナ船を対象として、曳航水槽にて風・波併存下での自由航走模型試験を実施し、外乱下にある船の航行状態を把握した。実験結果から外乱影響による船速低下、斜航・当舵、スラスト増加量等が明らかとなった。さらに、船速低下に及ぼす抵抗成分の分離から、限られた条件下ではあるが外乱と船のバランス状態が明らかとなった。最後に実験結果と既存の推定計算結果を比較する

* (独) 海上技術安全研究所

** 大阪大学大学院

ことで計算法の有効性を確認した。

2. 自由航走模型試験

2.1 供試模型

試験を行ったコンテナ船の主要目を Table.1 に、側面外観及び正面線図を Fig.1 に示す。垂線間長 L_{PP} が 300m の 6500TEU 型コンテナ船を想定し、1/48 スケールの 6.3m 模型を使用した。主船体上にコンテナを模擬した上部構造を製作、搭載している。表中の記号はそれぞれ、 l_{CB} ; 浮心位置 (船首側正)、 D_P ; プロペラ直径、 P ; プロペラピッチ、 H_R ; 舵高さ、 Λ ; 舵アスペクト比である。なお、垂線間長 L_{PP} については以後 L と表記する。

2.2 試験状態

試験は当所の 400m 水槽 (400×18×8m) で実施した。実験状態の座標系を Fig.2 に示す。また、実験状況の写真を Fig.3 に示す。模型船は水槽固定座標系の X 軸上で静止した状態からスタートする。一様風を起す送風機を水槽の曳引台車下に設置し、外力の風を発生させる。送風機の横幅は 5m、高さは 0.58m で、直径約 0.5m の 10 機のファンを横に並べた構成である。風向は、船がある程度斜航、横傾斜する船首から 60 度とした。

波は正面向い波である。このとき、船は風により斜航することから、船首方位 ψ_r だけ斜めから波が入射することになる。

自由航走のための実験装置の構成を Fig.4 に示す。模型船はプロペラ回転数 (n) 一定の 9rps で航行させた。このときの初期船速 (平水時) は、フルード数 (F_r) で 0.18 である。船体上部構造に付けられた 2 つのターゲットマーカーを曳引台車上部に取り付けられた CCD カメラで捕らえ、トラック装置により曳引台車と船体の相対位置を検出し、水槽固定 X 軸方向速度 U_m に応じて曳引台車の速度制御を行う。すなわち、Fig.2 に示すような位置関係で送風機と曳引台車は船と同じ速度 U_m で進行する。このことにより、船と送風機の位置関係を一定に保つことが出来る。

また、トラック装置により検出された船の左右位置 Y_r は、Fig.5 に示された舵制御のフィードバック系の入力情報として使用される。このとき、曳航水槽での実験を可能とするため、位置 Y_r 及び方位 ψ_r をフィードバックし、幅方向水槽中心を航行するよう舵角を決定する。制御方式は PID 制御であり、変形 Z 試験 ($\delta=5, 10$ 度等) やステップ応答試験 ($\psi_r=0, 3, 0$ 度) により安定な解となる制御定数を決定した。結果として、実船でのオートパイロットで使用される制御定数に近いものとなった。

Table.1 Principal particulars of 6500TEU container ship.

		Ship	Model
L_{OA}	m	318.0	6.678
L_{PP}	m	300.0	6.300
B	m	40.0	0.840
d	m	14.0	0.294
C_B	—	0.650	
W	t	111930	1.010
l_{CB}	m	-1.77	-0.037
\overline{GM}	m	1.22	0.026
\overline{KG}	m	16.5	0.345
D_P	m	9.57	0.201
P	—	0.997	
H_R	m	11.7	0.246
Λ	—	1.467	

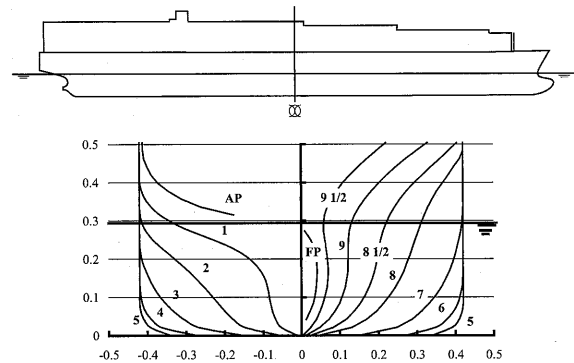


Fig.1 Side view and body plan of the model ship.

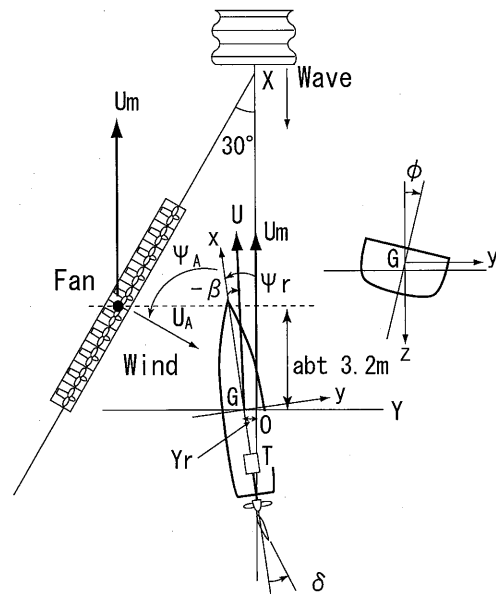


Fig.2 Coordinate system of experimental condition in the 400m towing tank.

実験開始時、模型船はワイヤークランプを通じて曳引台車に固定されている。台車と模型船を加速させ、定速になった後、台車の追尾及び送風を開始する。送風当初、模型船は左前方からの強風 U_A により横流れするが、舵の制御により進行方向に対してある一定の偏角 β 、横傾斜角 ϕ 、舵角 δ を有したまま一定の船速 U に落ち着く。波浪中においても定

常に至る時間は長くなるものの同じ現象であった。このときの航行状態を船内の光ファイバージャイロ (OFG) により計測した。また、推進器であるモータのスラスト T 、トルク Q 、舵に関して舵力 (直圧力成分を含む3分力) を計測した。これらの計測情報は、出力コードによる船の運航への影響を出来るだけ小さくするために船内テレメータから送信し、曳引台車上で受信、レコーダへの記録を行った。なお、モータや各種計器への AC 電源と操舵信号は、ケーブルで船内に供給した (計2本)。

2.3 風の状態・波の条件

Fig.6、7 に風の状況を示す。模型船を除き曳引台車を実験時と同じ 1.46m/s で進行させ、実験時に船が定常で留まった場所での風向・風速を別途計測した。Fig.6 の横軸は風速であり、船が存在した地点での前方 (正)・後方に各 2m の地点及び船体中心付近での鉛直風速分布を表す (最終的な定常状態では Fig.2 に示す原点 O と船体重心 G はほぼ一致している。X-Y 座標系における 0, ±2m 地点で計測)。なお、高さ 0.2m より下は 1/7 乗則に従い近似曲線を求め、図示している。上方では台車の床面が存在しているため風速の変化が見られる。

Fig.7 は近似曲線を頼りに高さ方向の風速分布から計算した鉛直平均風速及び風向 (高さ 0.45m) を場所ごとに示している。停止状態では、直近、約 10m/s で送風が可能であるが曳引台車に連なって走行するため、結果的に模型船に作用する風は弱められた状態となった。さらに模型船後方では送風機の設置場所が船体から離れているためかなり風速が遅くなっている。後述する航行状態の計算には、抵抗としての影響が大きい船首側 $X=2.0m$ 地点の風速 4.0m を代表風速として取り扱った (相対風速 28m/s 相当)。

風向については、船と送風機が同じ速度で前進しているため、相対風速は送風機の取付角とほぼ等しい約 60 度となっている。先と同様に代表風向角を 56 度とする。

波は、規則波で波高は 12cm (1/52.5 L、実船 5.7m 相当) とし、波長船長比 λ/L を 0.5 から 2.0 まで変化させた。

3. 試験結果と考察

3.1 推進性能

船速とスラストとの関係を平水中抵抗と比較し Fig.8 に示す。図表の記号は風・波の無い平水中を航行した場合「Calm」、風だけの状態「Wind」、波だけの状態「Waves」、風・波下の状態「A&W」である。また、 R 、 t はそれぞれ平水中抵抗、推力減少係数の試験値である。回転数一定としているため船速が低下すると共に、スラストの増加している状況が把

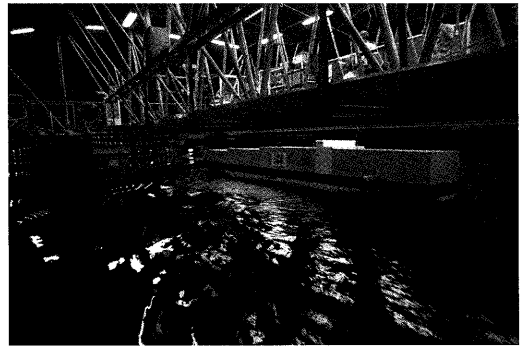


Fig.3 Photo of free-running model experiment of the container ship (from behind the ship).

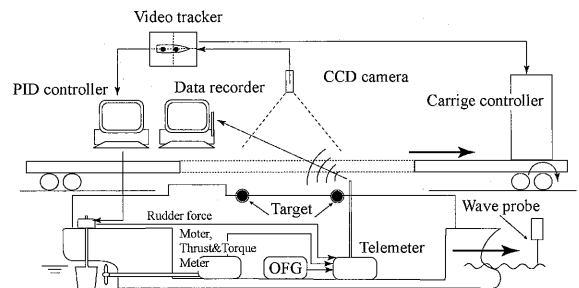


Fig.4 Measurement system and towing carriage control in the experiment.

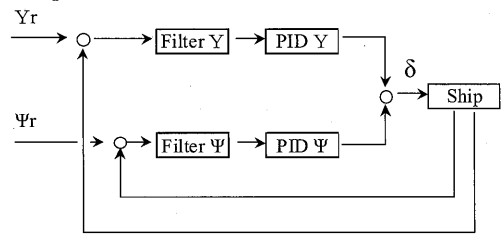


Fig.5 Feedback control diagram for ship rudder angle.

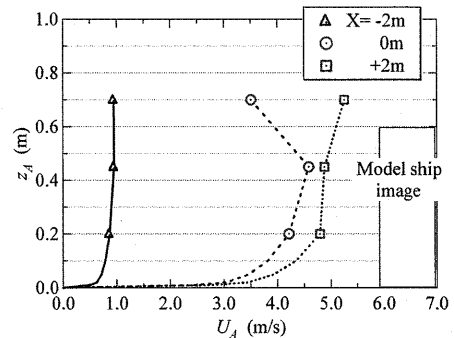


Fig.6 Wind velocity profiles at the three longitudinal positions ($U_m=1.46m/s$).

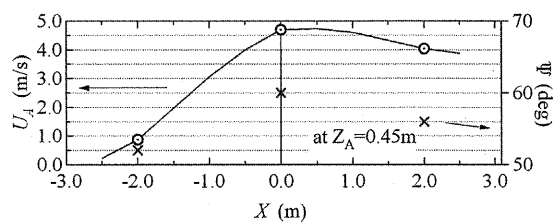


Fig.7 Averaged wind velocity on the longitudinal positions ($U_m=1.46m/s$, $\psi = \psi_A + \psi_r$).

握出来る。

偏角と伴流係数 w の関係を Fig.9 に示す。伴流係数は計測されたスラスト係数 K_T から逆算し、次式から得る。

$$1-w = J n D_p / U \tag{1}$$

$$J = f(K_T)$$

図中、「Cal.」は、操縦性能推定時に利用されることの多い次式から得た値である⁷⁾。

$$w = w_0 \exp(-4.0\beta^2) \tag{2}$$

ただし、 w_0 は自航試験から得られた直進時のプロペラ位置の伴流係数である。

風のみで斜航する場合、 $(1-w)$ は僅かに増加するのみである。このとき、推定値との一致も良い。しかし、波の中で船体が大きく動揺する場合 ($\lambda/L = \text{約} 0.9$) においては、 $(1-w)$ が変化する。その際、斜航を伴う場合と斜航がない場合で傾向が異なる。斜航のない波浪中直進時の伴流係数の減少は、造渦や摩擦抵抗の変動により生じたものと考えられる。逆に風・波併存下、船速が低下し、大きな斜航を余儀なくされた場合、 $(1-w)$ が増加している。波が存在する場合、(2)式伴流係数推定式の条件外ではあるが、船体運動が非常に大きい場合、やや実験値から外れる傾向にある。

さらに、実験時のプロペラ効率 η_B と推力係数 C_T の関係を Fig.10 に示す。なお、 η_B と C_T は実験値を用いて次式から得た。

$$\eta_B = TU(1-w)/(2\pi Qn) \tag{3}$$

$$C_T = T/(0.5\rho U(1-w)\pi D_p^2/4)$$

ここで、 T 、 Q は計測されたスラストとトルクである。

外乱の影響により船速が低下し、プロペラ効率も減少する。波のみの場合、平均的に単独プロペラ特性から得られる $\eta_0 \cdot \eta_R$ の値より小さくなっている。ただし、風・波併存下における斜航状態では僅かにプロペラ効率が改善されている。実海域でのプロペラ効率を評価する上で、およそ船速低下に起因した荷重度の変化と捕らえることが出来る。

3.2 航行状態

波長船長比を変化させた場合の船速 U 、偏角 β 、横傾斜角 ϕ 、舵角 δ を Fig.11 示す。

風・波の影響を受けて、平水中から航行状態が大きく変化していることがわかる。船速低下について見てみると、風の場合と波のみの場合を重ね合わせるにより、およそ風・波併存下での状況が説明出来る。

次に偏角について、波の影響で急激に船速が遅くなる

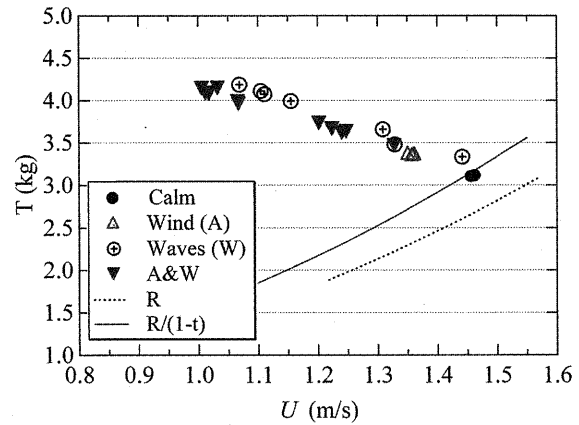


Fig.8 Thrust of the model ship in wind and waves.

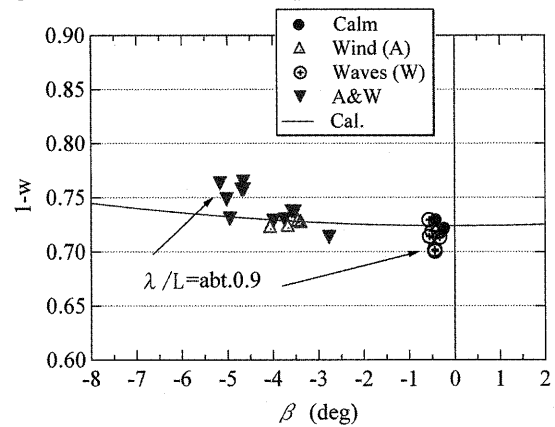


Fig.9 Propeller wake of the model ship in wind and waves for drift angle.

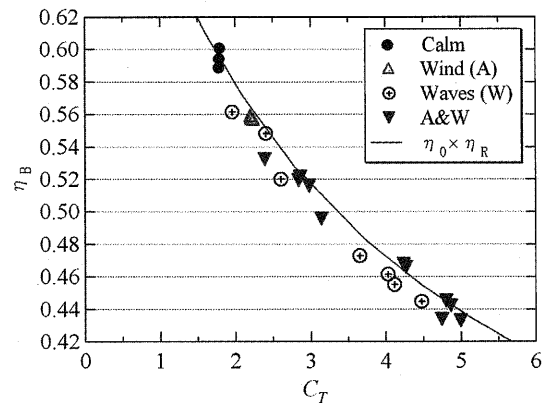


Fig.10 Relationship between thrust and propeller efficiency.

$\lambda/L = 0.9$ 付近では相対的に風圧力が強くなり、大きな斜航を余儀なくされる。横傾斜角は、偏角の増大に伴い、風の相対流入角が減少し、 $\lambda/L = 0.9$ 付近で風だけの状態よりも概ね小さな値となっている。また、舵角は、斜航流体力と風圧力・舵力がバランスしている関係で、実験全般に渡って右舵となっている。

計算結果も併せて Fig.11 に示す。計算は参考文献 8)9) に示された方法で行った。すなわち、MMG モデル⁷⁾に基づく次

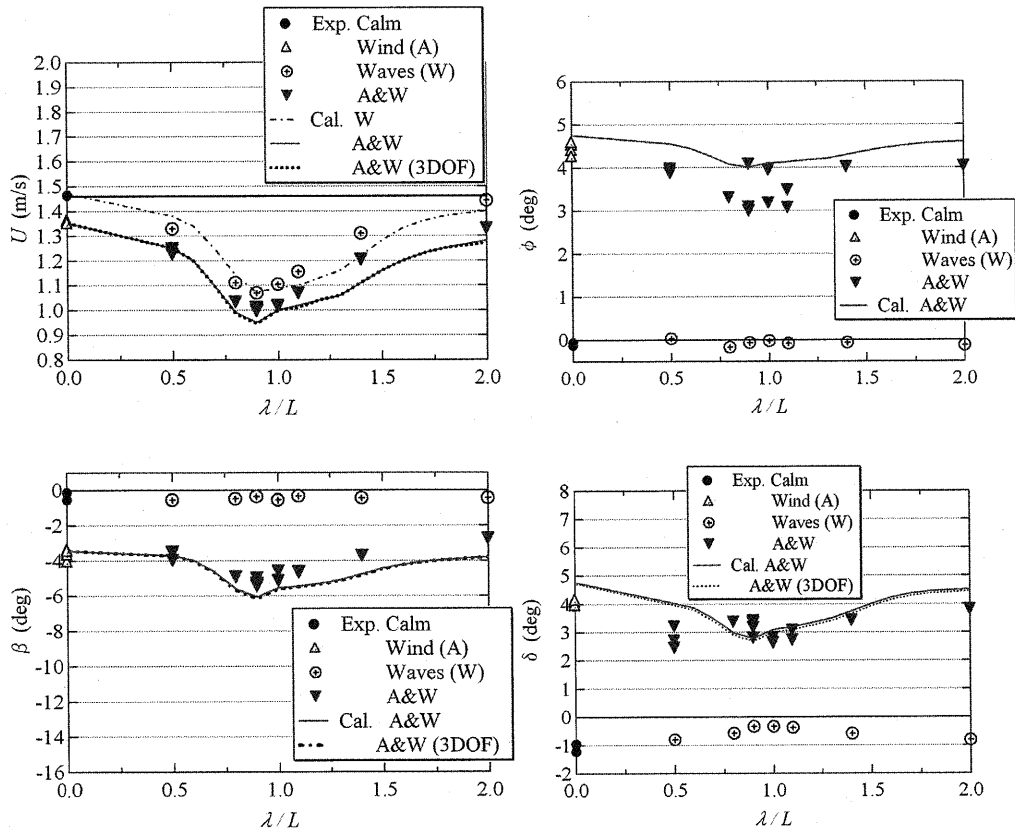


Fig.11 Experimental and calculated results of ship speed loss, drift, heel and rudder angles for the model ship in wind and waves.

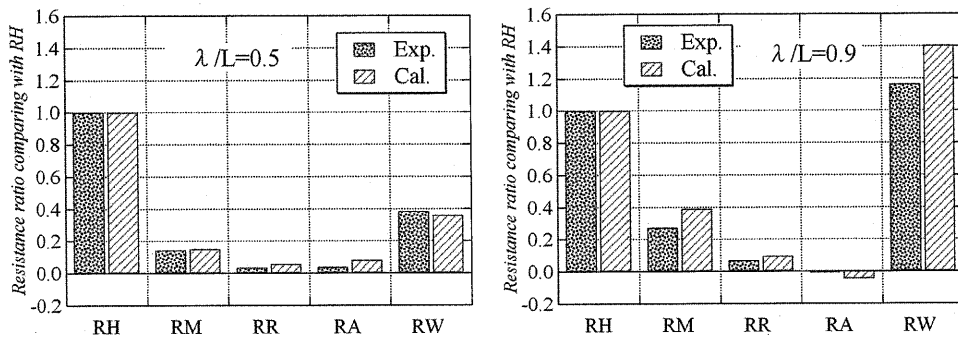


Fig.12 Resistance ratio comparing with hull resistance on each drag for the model ship in wind and waves.

式の釣り合いから航行状態の推定を行った(各項の詳細は付属書に示す。)

$$\begin{aligned}
 X_{H0} + X_H + X_P + X_R + X_A + X_W &= 0 \\
 Y_H + Y_R + Y_A + Y_W &= 0 \\
 N_H + N_R + N_A + N_W &= 0 \\
 K_H + K_R + K_A - W \cdot \overline{GM} \sin \phi &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

添え字 A 項であるところの風圧力計算時の抗力係数は推定計算¹⁰⁾により得た。平水中抵抗 (X_{H0})、自航要素、斜航流体力、舵プロペラ干渉係数、波浪中抵抗増加値 (W 項) は実験から得た¹¹⁾。このとき、横傾斜時の斜航流体力は、実験データが不足していたため、同種の瘦せ型船型の結果と

して参考文献 8)の実験値を流用した。斜波中における波浪中抵抗増加の前後成分 (X_W) は、斜波中での影響を計算で評価し、大きな影響がなかったことを踏まえ、正面規則波中の実験値 (模型波高 6cm, $H_w/L=1/105$, 実船相当波高 3m) をそのまま使用した。

本結果から概ね計算値は実験値を表していることがわかる。ただし、他船の実験値を使って計算した横傾斜については、過大評価する結果となった。また、他の要素についても全般的にやや過大評価する傾向がある。

通常、横傾斜時の斜航流体力係数の入手が困難である上、推定する手段も存在しない状況である。このことから、船体傾斜の計算値への影響について調査することとした。Fig.11 には横傾斜のない 3 自由度運動方程式による結果も併せて

示す(図中の3DOF)。今回の条件程度では4自由度と3自由度計算との差は、ほとんど見られない。

実験状態での抵抗成分の各流体力を計算値と比較することにより Fig.12 に示す。代表として、 $\lambda/L=0.5, 0.9$ の場合を示す。それぞれ、「RH」；平水中抵抗(無風時の風抵抗込)、「RM」；斜航による主船体抵抗、「RR」；舵抵抗、「RA」；風抵抗(無風時からの増分)、「RW」；波抵抗を表す。平水中抵抗を基準の1としている。また、船の進行方向(U方向、実験ではX軸方向)を基準とした流体力に換算している。実験での抵抗成分の分離は、直進抵抗・斜航試験での平水試験値から風・波抵抗を逆算している。

今回の実験の場合、実船換算で波高は6mに相当し、現実的な海象条件からするとかなり高い波高と言える。このために風よりも波による抵抗増加が非常に大きくなっている。 $\lambda/L=0.5$ では、実験結果と計算結果はほぼ一致している。このことは Fig.11 での両者の一致度が良いことにも反映されている。 $\lambda/L=0.9$ の場合は、計算値において波浪外力を過大に評価していることがわかる。斜波に対する評価や波の非線形性の影響等僅かな差が過大評価に繋がっていると考えられる。船の進行方向を基準とした場合、斜航抵抗が波抵抗に次いで大きい。これは主として、横風により誘起される成分である。今回、風圧力を推定するにあたり、実験状態の風の場所による不均一さは考慮していない。このため、計算は、やや過大評価する結果となっている。実状況と比較する場合には、この差が小さくなる方向であり、航行状態の推定法としては有効性が確認出来たとと言える。

このことを詳細に調べるために $\lambda/L=0.9$ の状況をベクトルのイメージで Fig.13 に示す。記号は(4)式中の表記と同じにしている。Fig.12 の $\lambda/L=0.9$ で前後方向の風圧力が0に近い状況となっていた。横方向成分が進行方向を基準とした場合、推進力として作用し、抵抗として作用している前後力を打ち消していることが分かる。このとき、風の横力とバランスしている成分が大きな斜航流体力の横方向成分であり、前後成分と比較してもかなり大きな値となっていることが分かる。

大きな斜航を余儀なくされている状況下では、全体の釣り合い状態を精度良く推定するため、前後方向以外の風圧力、斜航流体力の推定も重要な要素となっている。

4. 結 言

実海域での運航性能把握の一助とするためのコンテナ船による風・波併存下自由航走模型試験と航行状態の推定計算を実施した。限られた条件下ではあるが、風・波中でのコンテナ船の航行状態が明らかになった。得られた知見をまとめ

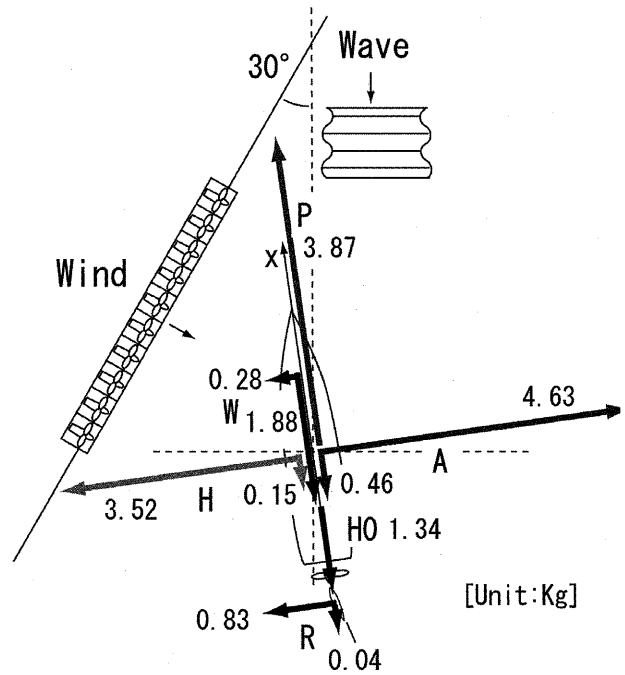


Fig.13 Force balances acting on the ship for external forces. ($U_A=abt. 4m/s, \lambda/L=0.9, H_w=0.12m$)

ると以下の通り。

- ・ 風・波併存下における自由航走模型試験から船の航行時の釣り合い状態が実験的に明らかとなった。航行状態計算の妥当性を検討する上で有益な情報となる。
- ・ 短波長域で船体運動が大きくない場合に従来から提案されている伴流係数推定法は、有効である。ただし、運動が大きい場合には伴流が変化し、推定値からやや外れる傾向にある。
- ・ 風・波下での船速低下時のプロペラ効率は、およそ船速低下に起因した荷重度の変化と捕らえることが出来る。
- ・ 航行状態の推定に関して、 $\lambda/L=0.8$ 以上の船速低下の大きな状況でやや過大評価する結果となったが、遭遇頻度の高い短波長域(ここでは、 $\lambda/L=0.5$)で十分な精度を有する等、実用的には問題がない程度であると言える。
- ・ 試験結果から抵抗成分を分離した場合、斜航抵抗は無視し得ない。この斜航が生じる状況下において、横風の影響が大きいため、斜航流体力の推定に加え、風圧力各成分の推定精度も重要である。
- ・ 本実験を行った状況下においては、4自由度方程式による計算値は、3自由度の結果と比較して、大きな差異が見られない。今回の想定海象よりも穏やかな条件下において、船速低下や斜航、当舵状態を求める上で、3自由度計算でも有効である。

謝 辞

工学会春季講演会論文集第6号, 2008, pp13-14

本研究は、(財)日本海事協会の委託を受け(財)日本船舶技術研究協会が実施した「コンテナ船の環境性能技術鑑定サービス業務の開発」の研究の一部で実施された。関係者各位にお礼申し上げます。

また、本実験を遂行するに辺り、当所の沢田博史主任研究員、塚田吉昭主任研究員、深澤良平研究員の協力を得た。感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 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, 日本造船学会論文集第155号, 1984, pp122-131
- 2) 芳村康男, 永島実郎: 風圧下の操縦運動の推定について, 日本造船学会論文集第158号, 1985, pp12-134
- 3) 菅井和夫, 郷田国夫, 北川弘光他: 斜め波中の船体に働く波浪変動水圧に関する模型実験, 日本造船学会論文集第133号, 1973, pp101-117
- 4) 竹沢誠二, 平山次清, 金世殷, スザノ・アルベルト: 方向スペクトル波中の船速低下に関する自航模型実験, 日本造船学会論文集第172号, 1992, pp47-56
- 5) 平山次清, 金世殷: 肥大船の操縦性能に及ぼす短波長方向スペクトル波の影響の一検討, 日本造船学会論文集第176号, 1994, pp129-136
- 6) 田中良和: 第2章「船の経済運航とライフサイクルバリュー」, 日本造船学会試験水槽委員会「実海域における船舶性能に関するシンポジウム」, 2003, pp10-19
- 7) 平野雅祥, 高井忠夫, 松本憲洋: 第V章造船設計への操縦運動モデルの応用II-実船の操縦性能推定-, 第3回操縦性シンポジウム, 1981, pp101-136
- 8) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂: 荒天下での水面上巨大構造船の定常航行性能-その1 風による抵抗増加特性-, 日本船舶海洋工学会論文集第2号, 2005, pp257-269
- 9) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂: 荒天下での水面上巨大構造船の定常航行性能-その2 風浪下での抵抗増加特性及び運航航路最適化-, 日本船舶海洋工学会論文集第3号, 2006, pp147-155
- 10) 藤原敏文, 上野道雄, 池田良穂: 成分分離型モデルを利用した新しい風圧力推定法, 日本船舶海洋工学会論文集第2号, 2005, pp243-255
- 11) 南佳成, 二村正, 上野道雄, 佐々木紀幸, 深澤良平: コンテナ船の斜航抵抗に関する一考察, 日本船舶海洋

Appendix

定常航行状態推定法

定常状態で船が直進している場合を想定し、船体運動方程式を次式のように表わす。

$$\begin{aligned} X &= 0, \quad Y = 0, \quad N = 0 \\ K - W \cdot \overline{GM} \sin \phi &= 0 \end{aligned} \quad (A1)$$

(A1)式はそれぞれ船速 U 、偏角 β 、横傾斜角 ϕ 、舵角 δ の関数である。

(A1)式の船体に作用する流体力は、MMG モデルに基づき次式のように分離して取り扱う。

$$\begin{aligned} X &= X_{H0} + X_H + X_P + X_R + X_A + X_W \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_A + Y_W \\ N &= N_H + N_R + N_A + N_W \\ K &= K_H + K_R + K_A \end{aligned} \quad (A2)$$

各項の流体力は次に示す(A3)~(A8)式から求める。また、各係数の値を Table.A1 に示す。

$$\begin{aligned} X'_{H0} &= X_{H0} / \frac{\rho}{2} L d U^2 \\ &= R_0 + R_1 U + R_2 U^2 + R_3 U^3 + R_4 U^4 \end{aligned} \quad (A3)$$

$$\begin{aligned} X'_H &= X_H / \frac{\rho}{2} L d U^2 = X'_{\beta\beta} \beta^2 \\ Y'_H &= Y_H / \frac{\rho}{2} L d U^2 = Y'_\beta \beta + Y'_\phi \phi \\ N'_H &= N_H / \frac{\rho}{2} L^2 d U^2 = N'_\beta \beta + N'_\phi \phi \\ K'_H &= K_H / \frac{\rho}{2} L d^2 U^2 = K'_\beta \beta + K'_\phi \phi \end{aligned} \quad (A4)$$

$$\begin{aligned} X_P &= (1-t)n^2 D_P^4 K_T(J) \\ 1-t &= a_T F_r + b_T \\ J &= u(1-w)/(nD_P), \quad u = U \cos \beta \\ w &= w_0 \exp(-4.0 \beta^2), \quad w_0 = a_W F_r + b_W \\ K_T(J) &= a_{KT} J^2 + b_{KT} J + c_{KT} \end{aligned} \quad (A5)$$

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x'_R + a_H x'_H) F_N \cos \delta \\ K_R &= (1+a_H) z'_R F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (A6)$$

$$F_N = \frac{1}{2} \rho f_A A_R U_R^2 \sin \alpha_R$$

$$f_A = 6.13 \Lambda / (2.25 + \Lambda), \quad A_R = H_R^2 / \Lambda$$

$$U_R^2 = (1 - w_R)^2 [1 + \eta_p k \{2 - (2 - k)s\} s / (1 - s)^2] \cdot U^2 \quad (A7)$$

$$\eta_p = D_p / H_R, \quad k = 0.6(1 - w) / (1 - w_R)$$

$$s = 1 - u(1 - w) / nP$$

$$\alpha_R = \delta - \gamma_E \beta$$

$$X_A = C_{AX} q_A A_F$$

$$Y_A = C_{AY} q_A A_L$$

$$N_A = C_{AN} q_A A_L L_{OA}$$

$$K_A = C_{AK} q_A A_L H_L \quad (A8)$$

$$q_A = \frac{\rho_A}{2} U_A^2, \quad H_L = A_L / L_{OA}$$

風圧力、風圧モーメント係数 C_{AX} 等は著者ら¹⁰⁾の提案している方法により求め、Fig.A1 の値を使用する。

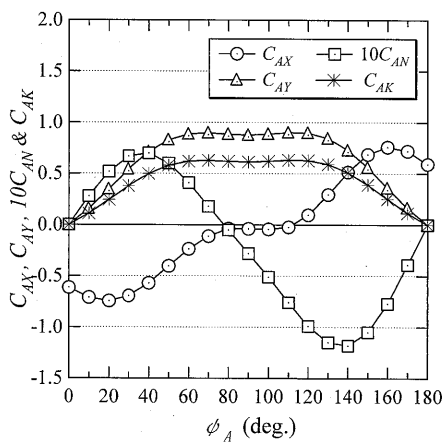


Fig.A1 Wind force and moment coefficients of the container ship.

X_w には Fig.A2 に示す実験値を用いる。ただし、実験値の無い長波長の値については計算値を使用する。なお、計算値は参考文献 A1), A2) に示された方法から求める。

Y_w も斜波中での実験結果を利用する。 N_w は実験で斜航流体力と比べても非常に小さい値であったことから 0 とし取り扱った。

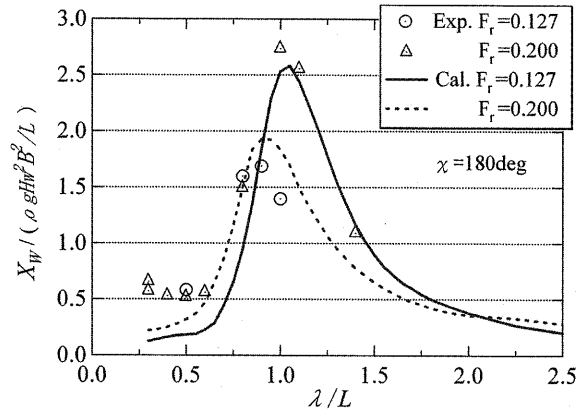


Fig.A2 Added resistance coefficient of the container ship in regular head waves.

Table.A1 Hydrodynamic coefficients on thrust, propeller and rudder of ship.

Calm water resistance			Rudder		
R	R ₀	-1.80E-01	X _R	1-t _R	0.875
	R ₁	4.33E-01	N _R	x' _H	-1.348
	R ₂	-4.20E-01		x' _R	-0.494
	R ₃	-1.80E-01	K _R	z' _R	0.561
	R ₄	-2.89E-02	Common	1-w _R	0.632
Propeller				a _H	0.210
n		9.0 rps		γ _E	0.236
1-t	a _T	0.258	Hydro. derivative		
	b _T	0.796	X _H	X' _{ββ}	-0.1480
1-w	a _w	0.334	Y _H	Y' _β	0.3130
	b _w	0.352		Y' _φ	-0.0003
K _T	a _{KT}	-0.110	N _H	N' _β	0.1090
	b _{KT}	-0.346		N' _φ	-0.0043
	c _{KT}	0.476	K _H	K' _β	0.0620
				K' _φ	0.0694

付属書参考文献

- A1) 丸尾孟：波浪中の船体抵抗増加に関する研究（第2報 抵抗増加の本質について），造船協会論文集 108号，1960，pp5-13
- A2) 藤井齊，高橋雄：正面規則波中における抵抗増加，三菱重工技法 Vol.4 No.6，1967，pp644-650