実小型船舶を用いた風圧力による横流れ の計測実験とシミュレーションについて

夏 海波*・塩谷 茂明**・小林 英一**・若林 伸和**

Field Experiment and Simulation of Drift Angle by Wind Effects Using an Actual Small Ship

Haibo XIA、 Shigeaki SHIOTANI、

Eiichi KOBAYASHI and Nobukazu WAKABAYASHI

Abstract

The final objects of this research are the construction of the weather routing system for a relatively small ship sailing in the coastal sea area and the assessment of this system for effects of safety and economic navigation.

At the first step of these objects, this paper deals with the estimation method of the ship position considering the ship maneuverability. The simulation results of a sailing ship in the wind were compared with the field's experimental results using an actual small ship. Comparing the simulated rhumb lines of a ship with the experimental ones, Both results showed reasonably good agreement.

Keywords : *Weather Routing、 Coastal Navigation、 Small Vessel、 Ship Maneuverability*

キーワード : ウエザー・ルーティング、沿岸航海、小型船舶、船舶操縦性能

1. はじめに

著者らは、湾内や沿岸域が航行海域である比較的小型の船舶に対し、出航前に航海中遭遇するであろう気象・海象の数値予測を行い、さらに航海中に様々な航海情報を逐次取得し、これらのデータに基づいた安全性と経済的効果の高い最適航法システムの構築を目指している。本研究では、このような数値予測に基づいた最適航海を数値ナビゲーションと称す。

これまでに基礎的研究として、航行海域である湾内の潮流の数値シミュレーションを行い、時々刻々と変化する数値計算流場上に模擬船舶を航行させ、潮流が航海時間および航程に与える影響を航海シミュレーションから調査した⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。さらに、実船を用い航海シミュレーションの検証を行い、シミュレ

ーション結果と実験結果が概ね一致することが解った。これらのシミュレーションでは、潮流の影響を考慮した船位の決定法は、船舶の速度と潮流の速度ベクトルの単純な合成、いわゆる流潮航法に基づくものである。しかし、今後、船舶幅員の高い海域および狭水域を含む沿岸海域の航行、正確な航路選定、設定航路に沿う操船等を含む高度な最適航法システムの確立のため、気象・海象下の航行船舶の潮流、風圧力および波浪力等の外力を考慮した高精度な船位予測法が要求される。そこで、高度な船位予測法として、船舶操縦性能理論を導入した航海シミュレーションの確立を目指した。船舶操縦性能運動を取り込んだ潮流場での船位確定法の検証のため、シミュレーション結果と実船実験との比較検討を行った

* 学生会員 神戸大学自然科学研究科海事科学専攻 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

021d983n@yo4.kobe-u.ac.jp

** 正会員 神戸大学自然科学研究科海事科学専攻

shiotani@maritime.kobe-u.ac.jp

結果、本手法が概ね有効的であることがわかった⁽⁴⁾。

今回の研究の目的は、気象・海象の中で、常時航海に与える影響が顕著な風圧影響について、実小型船舶を用いた調査を行うことである。特に、ウェザー・ルーチングに関連し、設定航路からの偏位量および航程の増減量を供試船の針路に対する相対風向毎に計測した。既に、実船の風圧影響実験は行ったが、今回は計測結果と数値シミュレーションとの比較検討から、本手法による風圧下の船位予測法の評価を行った。調査の結果、いくつかの知見を得たのでここに報告する。

2. 風圧影響実験

風圧影響下の航行船舶の推測船位の精度を評価するため、小型実船による風圧力の影響実験を行った。供試船は神戸大学海事科学部附属練習船「深江丸」である。Table 1 に深江丸の主要項目、Fig.1 に供試船の一般配置図を示す。供試船は主に瀬戸内海及び西日本周辺海域を航行区域とし、数日程度の実習及び研究航海に利用されている。

Table 1 Principal properties of the small ship.

item	
L O. A. (m)	49.95
L P. P. (m)	45
B. Mid. (m)	10
Draft (m)	3.2
Gross T. (ton)	449
Max. Speed (kt)	14.28
Steering Eng. (kW)	3.7
Bow Thruster (kW)	79
Stern Thruster (kW)	70
Main Eng. Output (kW)	1100
Revolution (rpm)	720
Reduct. Ratio	1/2.208
Propeller (C.P.P. Blades)	4
P. Dia. (m)	2.1
P. Pitch at 21.21° (m)	1.792

実験海域は瀬戸内海小豆島東方の播磨灘西部および備讃瀬戸東部の津田湾である。実験は九州西岸に大型で強い台風第16号の接近時および通過後に実施したので、比較的強い風速を示した。また、できる限り潮流の影響が少ない時間帯を選んだ。

供試船舶の針路に対する相対風向を 30° 毎変え船速 9.0kt で航走し、船位を逐次計測した。同時に、風向、風速、潮流の流速、流向、針路、船速等の動的航海情報を計測した。これらの計測データを著者らが開発した船内 LAN を介し収集・処理を行う航海情報収集システムで、サンプリング間隔 0.5s 毎に保存した。風は船舶搭載の通常の風車型自記風向風速計で、潮流は船舶搭載用のドップラー流速計で船底

から深さ 2m における流速と流向を、船位は DGPS で計測した。実験海域は瀬戸内海の要衝にあつて、船舶の輻輳度が高いため、安全性の確保から、一計測時間を 5~15 分程度とした。相対風向の設定は風向の変動から必ずしも規定通りでない。

Fig.1 General arrangement plan of an actual ship used in the experiments.

3. 船舶操縦運動のシミュレーション

出航後に遭遇する時々刻々と変化する気象・海象を事前に予報できれば、それらの変化に対応した船体に働く流体力の予測ができ、高精度な推測船位の決定や航路上に沿った正確な操船が可能となる。さらに、数値航海シミュレーションから、最適な航路選定が可能となり、高度なウェザー・ルーチングが実現できる。

著者らの従来の研究では、風潮流下の船位予測は単純な流潮航法で行った。今回は、流れや風による船舶への流体力を予測し、船舶の予測船位が的確に把握できるような操縦運動シミュレーションを適応した。シミュレーションのモデルは現在広く一般的に使用されている通常の操縦運動数学モデル(MMG)である⁽⁵⁾⁽⁶⁾。なお船体に働く流体力及び外力の推定法などは一部簡略化している。さらに、船舶操縦運動は平水中における船体の前進、横流れ、回頭の運動を考え、その他の方向との連成は考えない。

Fig.2 は操縦運動モデルに用いた座標系を示す。

空間固定座標系 $0-x_0, y_0$ で定義された物理量を船の重心 G の加速度 $\ddot{x}_0, \ddot{y}_0$ および旋回運動の角加速度 $\ddot{\psi}$ 、 x_0, y_0 方向の力 X_0, Y_0 および重心周りの回頭モーメント N_0 とする。

Fig. 2 Coordinate system of ship maneuvering simulation.

ント N とする。船の操縦性能を論ずる場合、船体と共に移動する船体固定座標系 $G-x, y$ での記述が都合であり、それぞれ x, y, ϕ, X, Y, N の記号で表す。

空間固定座標系を船体固定座標系に変換後の船体運動方程式は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x) \ddot{x} - (m + m_y) r v &= X \\ (m + m_y) \ddot{y} + (m + m_x) u r &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz}) \dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 m は船体の質量、 I_{zz} は重心周りの慣性モーメント、 m_x, m_y は x, y 方向の付加質量、 J_{zz} は z 軸回りの付加慣性モーメント、 u, v は x, y 方向の速度成分、 $\dot{\psi} = r$ である。

(1) 式の右辺の船に働く力およびモーメントを船体に働く力、プロペラ、舵、スラスタが発生する力、風波、その他の外力による力に分けると次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_P + X_R + X_T + X_A + X_W + X_E \\ Y &= Y_H + Y_P + Y_R + Y_T + Y_A + Y_W + Y_E \\ N &= N_H + N_P + N_R + N_T + N_A + N_W + N_E \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 H, P, R, T, A, W, E は船体(Hull)、プロペラ(Propeller)、舵(Rudder)、スラスタ(Thruster)、風(Air)、波(Wave)、外力(External force)を示し、小瀬らは H, P, R, T, W の各項について詳細に記述し、ここではおよそこれらの関係式を利用した⁽⁶⁾。

本研究に関係する潮流の影響は潮流と共に移動する座標系として考え、船体に働く流体力は次式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} X_H &= 1/2 \rho L d U^2 (X'_{vv} v'^2 + X'_{rr} r'^2 \\ &\quad + X'_{vvv} v'^3 + X'_{rrr} r'^3) - R \\ Y_H &= 1/2 \rho L d U^2 (Y'_{vv} v'^2 + Y'_{rr} r'^2 + Y'_{vvv} v'^3 \\ &\quad + Y'_{vvv} v'^2 r' + Y'_{vrr} v' r'^2 + Y'_{rrr} r'^3) \\ N_H &= 1/2 \rho L d U^2 (N'_{vv} v'^2 + N'_{rr} r'^2 + N'_{vvv} v'^3 \\ &\quad + N'_{vvv} v'^2 r' + N'_{vrr} v' r'^2 + N'_{rrr} r'^3) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 ρ は海水密度、 L は船長、 d は喫水、 U は船速、 $v' = v/U, r' = rL/U, R$ は船体抵抗、 $Y'_{vv}, \dots$ 等は各種流体微係数である。

また、風圧力は次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} X_A &= 1/2 \rho_A V_A^2 A_T C_{XA}(\theta_A) \\ Y_A &= 1/2 \rho_A V_A^2 A_L C_{YA}(\theta_A) \\ N_A &= 1/2 \rho_A V_A^2 L A_L C_{NA}(\theta_A) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 ρ_A は空気の密度、 θ_A は相対風向、 V_A は相対風速、 A_T, A_L は船体水線上正面投影面積、船体水線上側面投影面積、 C_{XA}, C_{YA}, C_{NA} は風圧力係数である。ここで、各種投影面積は供試船の線図から読み取り、風圧力係数は、供試船の正確なデータがないので、藤原らによる数多くの風洞実験から得られた風圧力計測実験データを回帰分析で求めた同型船の推定式に基づいて求めた⁽⁷⁾。

4. 実船実験とシミュレーション結果

実海域での実船実験に基づいた、操縦性能シミュレーションから、風圧影響による船位の偏位量の予測を行った。実験は船舶を針路に対し相対風向を一定に航走させ、潮流及び風のない場合の推測航跡と実航跡との偏位量を計測した。

Fig.3 は一定時間航走中の風速及び風向の計測例を示す。台風接近に伴い強風が一定の強さで吹き、風速の変動量は少ない。また、風向もおよそ一定である。このことから、実験中の風速および風向は一定であると考えてよい。

Fig.4 は一定時間航走中の潮流の速さ及び流向の計測例を示す。潮流の強さは不規則に微小変動するが概ね一定、また流向の変動量も小さく、潮流は一定方向にほとんど一様に流れているのがわかる。

このように、計測中の風及び潮流はおよそ一定であると仮定できるので、それぞれの平均値を求め、船舶操縦性能シミュレーションの外力データとして入力した。

また、強風下の船舶には風に伴う風浪の影響も流体力に含まれる。しかし、実験中、台風接近時で比較的強風であったが、実験海域が瀬戸内の諸島に囲まれ、大きな風浪は見られなかった。したがって、風浪による船舶操縦性能の予測法の影響を今回は考慮していない。

Fig.3 Time series of measured wind.

Fig.4 Time series of measured wind.

Fig.5 は供試船の実験とシミュレーションによる航跡の比較を示す。座標軸は緯度と経度である。航行中の風と潮流の流向を太い実線と点線で示し、平均値を併記した。図中、細い実線の **Course line** は潮流と風がない場合の推測、太い実線の **Ship position** は実測、**Simulation** はシミュレーション結果で、破線の **w+c** は風と潮流、一点鎖線の **w** は風のみを考慮した航跡を示す。相対風向は針路に対しそれぞれ斜め前方、横方向および斜め後方である。強風下であるが、風のみ考慮した計算航跡の偏位

Fig.5 Comparison of measured and simulated tracks of a ship.

Fig.6 Simulated drift angle by wind effect.

量は小さい。比較的潮流が弱い時間帯に実施の実験にもかかわらず、大きな変位量を示した潮流と風の両者を考慮したシミュレーション結果は、実測値と良く一致している。また、前報で潮流のみ考慮した計算結果が概ね実験結果と一致したこと等から推定すると⁽⁴⁾、風のみによるシミュレーション結果は船位の偏位量を十分精度よく示すことがわかった。Fig.6 は相対風向に対するシミュレーションの横流れ量を示す。横軸は船首方向に対する相対風向、縦軸は横流れ量を角度で示している。本研究で横流れ量とは潮流及び風のない状態での推測航路と実験あるいはシミュレーションの航跡との交角を絶対値で定義した。分布が散布しているのは、全実験中の平均風速は 18.8kt であるが、各計測時の平均風速にバラツキが見られたので、それが計算結果に反映したものと思われる。相対風向が船首尾方向では横流

Fig.7 Comparison of experimental and simulated drift angle by wind and tidal current.

れ量は微小であるが、船体横方向では増加し、最大 1.5° 程度になる。

Fig.7 は潮流と風圧影響下の横流れ量の計測実験結果と潮流および風圧影響を考慮したシミュレーション結果の比較を示す。風圧より潮流の影響が大きいことから、横軸は潮流の相対流向で示した。データの散布が大きいが、船首尾方向で横流れ量が小さく、船体横方向では増加する。実験時の潮流と風向の相対流向が供試船の針路を変えた時、複雑に変化するため、実験結果とシミュレーション結果の単純な比較はできないが、両者は定性的に似た傾向を示す。Fig.6 の風圧影響の結果と比較すると、実験中の潮流が弱いにもかかわらず、潮流影響による最大横流れ量は風圧影響のおよそ 4 倍程度になる。

Fig.8 は風圧影響による航走距離の変化のシミュレーション結果を示す。航走距離は風及び潮流のない状況での推測距離で無次元化している。図中の縦座標の数値 1 は風がない場合の航走距離である。船首方向からの向かい風の場合、航走距離が最大 10% 程度減少している。追い風の場合はごく僅かだけ航走距離が増加するが、増加の最大量は小さい。これより、船首方向からの風の場合、航程の損失が顕著

になることがわかる。

Fig.8 Comparison of experimental and simulated run by wind effect.

Fig.9 は潮流及び風圧影響に起因した航走距離の変化の実験とシミュレーション結果の比較を示す。Fig.7 と同様に、潮流の影響が大きいため、横軸は潮流の相対流向を示す。潮流の相対流向が船首方向の場合、最大 20% 程度の航走距離の減衰が見られる。船尾方向では 15% 程度増加している。これらのことから、風速の大きさにも依存するが、風圧より潮流

の影響が最適航法において、より重要であることがわかる。実験結果とシミュレーション結果は概ね一致している。

以上の結果、著者らの以前の研究では風速が 8~14k/t の弱い風の場合、横流れ量及び航程に対する風圧力はほとんど影響しなかったが⁽⁴⁾、今回の実験のように平均風速が 18.8k/t の強い風速の場合、最適航海において風圧力の考慮が必要であると思われる。

Fig.9 Comparison of experimental and simulated run by wind and tidal effects.

5. 結論

主に、沿岸域が航行対象の小型船舶の、安全性と経済性を追求した最適航法を行う数値ナビゲーション・システムの構築を最終目的とし、航法の基礎である航行船舶の正確な船位予測の計算手法について論じた。特に、これまでの潮流の影響調査・研究の継続として、本研究では風圧影響について論じた。計算と実船実験との比較から本手法の精度の検定を行った。その結果、以下の主な結論を得た。

1) 相対風向に対する横流れ量の変化は微小であるが、針路に対し船体横方向から風を受ける場合、横流れ量は増加(平均風速 18.8k/t で最大 1.5° 程度)するため、針路設定の際に考慮する必要がある。

2) 風の強さおよび船型にも依存するが、強風域航行中、特に船首方向からの風では速力低下により約 10% 程度の航走距離の減少が見られたので、最短時間航法構築に際し、考慮する必要がある。

3) 弱い潮流場でも、潮流による横流れ量および航走距離の変化は風圧力の影響より数倍顕著である。

4) 船舶操縦運動による船位予測のシミュレーション結果を実験結果と比較すると、概ね良好であることがわかった。

以上の結果、船舶操縦運動による船位予測が概ね可能であることが解ったので、潮流及び風圧力に関して船舶の横流れ量および船速増減の推定が可能となった。これらを考慮すると、もし潮流及び風の情報が事前に既知であれば、設定航路上に沿った針路制御、潮流及び風圧を考慮した最短時間や経済的な最適航法の確立の実現が可能となる。今後の研究として、現在進行中である沿岸域の潮流や海流の高度な数値予報シミュレーションを完成し、これらの流場での最適航法システムを実現する予定である。さらに、航行海域内の風及び波浪の数値予測法を確立し、各要素に関する最適航法システムの構築を行う。最後に、これら三要素を総合した安全且つ経済的効果の高い最適航法システム、いわゆる数値ナビゲーション・システムの研究を発展させる所存である。

謝辞

この研究を進めるに当たり、神戸大学海事科学部附属練習船「深江丸」矢野吉治船長をはじめ乗組員の方々に実験の援助を頂きました。ここに、深くお礼申し上げます。

参考文献

- (1) 塩谷茂明: 小型船の航海のための潮流シミュレーション、日本航海学会論文集、第 98 号、pp.127-140、1998
- (2) 塩谷茂明: 潮流を利用した小型船の最短時間航法の研究、西部造船会会報、第 100 号、pp.73-81、2000
- (3) Shigeaki SHIOTANI: Experimental Verification of Simulation for Navigation Utilizing Current Sailing、関西造船協会論文集、第 238 号、pp.205-214、2002
- (4) 夏海波・塩谷茂明・小林英一・若林伸和: リアルタイム気象海象データを考慮した沿岸海域航行船舶のウエザー・ルーチングに関する研究、一船舶操縦性能を考慮した船位決定の基礎的シミュレーションと実船実験一、関西造船協会論文集、第 243 号、pp.159-166、2005
- (5) 小川陽弘: 操縦運動の数学的モデルの基礎、第 3 回操縦性シンポジウム、pp.9-26、1981
- (6) 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、第 3 回操縦性シンポジウム、pp.28-81、1981
- (7) 藤原敏文・上野道雄・二村正: 船体に働く風圧力の推定、日本造船学会論文集、第 183 号、pp.77-90、1997

質疑応答

世良 亘（神戸大学海事科学部）：

シミュレーションにおいても航跡が直線になっていますが、風や潮流によるモーメントの影響についてはどのように考慮されているのでしょうか。

夏海波：

御討論ありがとうございます。ここで用いたシミュレーションのプログラムでは、回頭試験、Z試験およびオートパイロットのいずれかを指定できるようになっています。シミュレーションではオートパイロットを選択していますので、およそ航跡が直線になります。実験の場合も同じ条件のオートパイロットで航走しました。