



気象・海象を考慮した数値ナビゲーションシステムの基礎的研究

曾田, 泰介
塩谷, 茂明
笹, 健児

(Citation)

日本船舶海洋工学会論文集, 16:155-164

(Issue Date)

2012-12-01

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 日本船舶海洋工学会. 本文データは学協会の許諾に基づきJ-stageから複製したものである

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90002900>



気象・海象を考慮した数値 ナビゲーションシステムの基礎的研究

学生会員 曾 田 泰 介* 正会員 塩 谷 茂 明**
正会員 笹 健 児*

Basic Study on Numerical Navigation System with Numerical Weather and Ocean

by Taisuke Soda, *Student Member*, Shigeaki Shiotani, *Member*
Kenji Sasa, *Member*

Summary

It is considered that the weather and ocean such as the wind, the tidal current and the wave are the most important factors to a sailing ship. In this paper, the numerical calculation methods of the tidal current, the wind and the wave are proposed in the coastal sea area. In second, the numerical navigation system is investigated by the simulation. The purpose of this paper is to propose the numerical estimation methods of weather and ocean, and to discuss about the simulation of numerical navigation for a sailing ship under effects of numerical weather and ocean. The simulation of numerical navigation to a sailing ship is carried out under the effects of numerical weather and ocean. The proposed numerical navigation is very effective for the estimation of the ship position for a sailing ship. It was found that the numerical navigation system is possible to introduce to the weather routing system in the coastal sea region in future.

1. 結 言

海上輸送を担う航海中の船舶は、常時気象・海象の影響下にあり、実海域の船舶操縦性能、推進性能等が変化する。特に、荒天時には、Rolling, Pitching 等の船体動揺、船首冠水、船底集中衝撃及び転覆等の危険に絶えず遭遇する。さらに、波浪中の抵抗増加に伴う速力低下、横流れによる計画航路からの偏位等も生じ、また燃料消費量増加による経済的運航にも影響する。静穏な海域中の航海においても、海流や潮流の影響により計画航路からの偏位により、状況次第では漂流、座礁、衝突等の危険性に遭遇することもある。

特に、航海では、航路からの偏位や速力低下の把握は、省エネ運航及び最適航法の面から重要である。また、気象・海象の影響の効率的な利用により、燃料費節減も可能であるた

め、航行海域周辺及びこれから航海しようとする海域の気象・海象の的確な把握は、極めて重要である。さらに、これらの影響下の航行船舶の船位を、逐次正確に予測可能なシステムの構築は、ウェザルーチングにとって重要である。

これまでウェザルーチングに関する研究は、大洋航海中の船舶に対し、James を始め多数実施されている¹⁾。この場合、気象・海象のデータは気象庁や NOAA などから提供された既存データを利用している。しかし、沿岸海域航行船舶の場合、地形が複雑であり、水深の変化が著しい湾内や沿岸海域では、気象・海象が地形の影響等により、複雑に変化する。そのため、気象・海象の予測に、規定の格子間隔と計算時間間隔で提供される既存データの利用では、状況次第では不十分と思われる。海域及び気象・海象条件に即した計算結果を得るためには、詳細な数値計算の実行が要求される。これを克服するには、独自に気象・海象の予測が可能な数値計算モデルが必要である。本研究では世界的に利用され、定評のあるモデルを利用して、気象・海象の計算を実行した。そして、数値計算により得られた詳細な気象・海象データを用いて、航行船舶の船位を時々刻々、詳細に予測するシステムを構築した。これにより、沿岸域での高度な船位推定が可能となり、海難防止及び高度な沿岸域のウェザルーチングのシステムが可能になる。

* 神戸大学大学院海事科学研究科 1

** 神戸大学自然科学系先端融合研究環 2

本研究では、気象・海象の中で、特に航行船舶の航海に影響を与える、潮流、海上風及び波浪の詳細な数値予報を行う手法を確立した。さらに、これらの影響下における航行船舶の船位を精度良く予測可能なシステムを構築した。今後、沿岸域における高度なウェザルーチングシステムを確立する上の、基礎的研究となる航海シミュレーションの基礎を確立した。

2. 気象・海象の数値計算法

2.1 海上風の数値計算

海上風の数値計算は、WRF (Weather Research & Forecasting) モデルで行った。WRF は米国環境予測センター (NCEP: National Centers for Environmental Prediction) や米国大気研究センター (NCAR: National Center for Atmospheric Research) などにより開発された完全圧縮性・非静力学モデルである。WRF は NCAR の管理する WRF-ARW (The NCAR Advanced Research WRF) モデルと NCEP の管理する WRF-NMM (Mesoscale and Microscale Earth-System) モデルがあるが、以降、WRF は WRF-ARW モデルを指すものとする。

WRF は完全圧縮性・非静力学モデルである。WRF は雲物理モデル、放射モデル、乱流モデル、地表面モデルを組み合わせたものである。さらに、最新の物理モデル、データ同化システム、ネスティングが装備されており、計算スキームとしては 3 次精度のルンゲ・クッタスキームや、5 次精度の風上差分など高精度な計算スキームを採用している。これにより、局地的な気象に対して精度の高い計算が期待できる²⁾。

鉛直 σ' 座標系は気圧の観点から以下のように定義される。

$$\sigma' = \frac{P - P_t}{P_s - P_t} \quad (1)$$

ここに、 P は気圧、 P_s は地表面気圧、 P_t は計算領域上端の気圧である。

WRF の基礎方程式は次のように与えられる。

(2)式に気圧方程式、(3)、(4)、(5)式に、水平及び垂直運動量方程式を示す。

$$\frac{\partial p'}{\partial t} - \rho_0 g w + \mathcal{P} \nabla \cdot V = -V \cdot \nabla p' + \frac{\mathcal{P}}{T} \left(\frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\sigma'}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'} \right) = -V \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) \\ - e w \cos \alpha - \frac{u w}{r_{earth}} + D_u \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma'}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'} \right) = -V \cdot \nabla v - u \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) \\ - e w \sin \alpha - \frac{v w}{r_{earth}} + D_v \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、(2)式の P' は摂動圧力 [Pa]、 ρ_0 は基準密度 [kgm^{-3}]、 g は重力加速度、 w は鉛直方向の速度成分、 γ は比熱率、 V は水平方向の風のベクトル、 T は温度 [K]、 Q は非断熱加熱率 [$\text{Jkg}^{-1}\text{s}^{-1}$]、 C_p は湿潤空気に対する定圧比熱、 T_0 は基準温度 [K]、 θ_0 は基準温位、 D_θ は温位の拡散項である。

(3)、(4)式の、 u は東西方向の風速成分 [m/s]、 v は南北方向の風速成分 [m/s]、 ρ は空気の密度 [kg/m^3]、 m はマップファクター、 $P^* = P_s - P_t$ 、 f は (鉛直) コリオリ係数、 e は水平コリオリ係数 [1/s]、 α はグリッドの軸と実際の北との角度差、 D_u 、 D_v は x 、 y 方向の水平拡散項、 r_{earth} は地球半径である。

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma'} + \frac{g p'}{\mathcal{P}} = -V \cdot \nabla w + g \frac{P_0}{p} \frac{T'}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} \\ + e(u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、(5)式の P_0 は基準圧力、 T' は摂動温度 [K]、 R_d は乾燥大気の気体定数、 D_w は鉛直拡散項である。

温度方程式は(6)式で表される。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{\partial p'}{\partial t} + V \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{Q}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \quad (6)$$

以上の基礎方程式を差分法の陽解法で解く。

2.2 潮流の数値計算

潮流の数値計算は POM (Princeton Ocean Model) モデルで行った。POM は米国のプリンストン大学によって開発された海洋循環モデルであり、広域な海洋循環や、沖合の沿岸域の海流及び潮流の計算等に適している。近年、そのモデルが一般公開されたことから、多くの研究者によって使用されている³⁾。

POM では、一般に z 軸方向の座標は σ'' 座標を採用しているため、次式で与えられる。

$$\sigma'' = \frac{z - \eta}{H + \eta}, \quad D \equiv H + \eta \quad (7)$$

ここに、 H は平均水面からの水深、 η は潮汐による潮位である。 D は海底から水面までの距離である。

σ'' 座標を用いた潮流シミュレーションの基礎方程式は、連続の式と運動方程式 (Navie-Stokes 方程式) であり、次式で表される。

$$\frac{\partial DU}{\partial x} + \frac{\partial DV}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial \sigma''} + \frac{\partial \eta}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma''} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma''}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma''} \right] d\sigma'' = \frac{\partial}{\partial \sigma''} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma''} \right] + F_x \quad (9)$$

$$\frac{\partial UD}{\partial t} + \frac{\partial U^2 D}{\partial x} + \frac{\partial UVD}{\partial y} + \frac{\partial U\omega}{\partial \sigma''} - fVD + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gD^2}{\rho_0} \int_{\sigma}^0 \left[\frac{\partial \rho'}{\partial x} - \frac{\sigma''}{D} \frac{\partial D}{\partial x} \frac{\partial \rho'}{\partial \sigma''} \right] d\sigma'' = \frac{\partial}{\partial \sigma''} \left[\frac{K_M}{D} \frac{\partial U}{\partial \sigma''} \right] + F_x \quad (10)$$

ここに、 (U, V) は潮流の水平速度成分、 ω は σ 面上の法線方向の速度成分である。 D は(7)式で表される潮位を考慮した水深、 f はコリオリ係数、 g は重力の加速度、 F_x 、 F_y は水平方向の粘性拡散係数、 K_M は海底の摩擦係数である。

POM では潮流の基礎方程式には(8)～(10)式の他にも、熱、塩分および乱流運動エネルギー量などの計算が可能な基礎方程式が含まれているので、より一層複雑な自然現象に即した数値計算が可能である。しかし、本研究では航行船舶の航海シミュレーションが目的の計算のため、潮流の速度成分のみを計算している。

潮流の数値シミュレーションの基礎方程式(7)～(10)式は比較的安定した計算結果が得られるリープ・フロッグ法の差分法で行った。

2.3 波浪の数値計算

波浪の数値計算の代表的なモデルとして、WAM (WAve Modeling group), SWAN (Simulating WAves Nearshore)等がある。SWAN はオランダのデルフト工科大学で開発され、WAM は深海域を対象とした波浪推算モデルである。SWAN は WAM の改良版であり、浅海域を含む海域での波浪推算が可能である。WAM で考慮されていた風から波へのエネルギー輸送、4波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送、白波砕波によるエネルギー散逸、底面摩擦によるエネルギー散逸に、SWAN では浅水砕波によるエネルギー散逸、極浅海域で顕著となる3波共鳴非線形相互作用による成分波間でのエネルギー輸送など、浅水域での波浪伝搬を加えている⁴⁾。本計算は沿岸域を対象とするため、SWANで行った。SWAN は風波の方向スペクトル形状の相似性の過程をしないで、波浪方向スペクトル成分波間の非線形相互作用を評価した第3世代波浪推算モデルである。これによって、方向スペクトルの時空間変化まで再現できるので、浅海域で発生する複雑な波浪変形の推定も可能である。

各計算格子上での波浪方向スペクトル $E(\sigma, \theta)$ を変数としているが、モデル内では、2次元の波浪作用密度スペクトル $N(\sigma, \theta)$ を用いている。ここに、 σ 、 θ はそれぞれ流れがある場合において、流れと共に移動する座標系から見た各周

波数、方向角である。両者には、次式の関係がある。

$$N(\sigma, \theta) = \frac{E(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (11)$$

これは、流れが存在する場合には、波浪方向スペクトルは保存されないが、波浪の作用スペクトルは保存量であるから、後者を使用する。

2次元の波浪作用密度スペクトル $N(\sigma, \theta)$ に関する平衡方程式は、直交2次元(x, y)空間上では、次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} (c_x N) + \frac{\partial}{\partial y} (c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} (c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta} (c_\theta N) = \frac{S(\sigma, \theta)}{\sigma} \quad (12)$$

ここに、 c_x 、 c_y 、 c_σ 、 c_θ はそれぞれ実空間 x 、 y 及びスペクトル空間 σ 、 θ 上での伝搬速度である。各成分波の位相速度 c と群速度 c_g 、定常流流速ベクトル $U=(U, V)$ 、波数ベクトル $\kappa=(k_x, k_y)$ を用いて、次式で表される。

$$\begin{aligned} c_x &= c_g \cos \theta + U, & c_y &= c_g \sin \theta + V, \\ c_\sigma &= \frac{\partial}{\partial t} \left(\sqrt{gk \tanh(kh)} - \kappa \cdot U \right), \\ c_\theta &= \frac{c_g}{c} \left(\sin \theta \frac{\partial c}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial c}{\partial y} \right) - \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial}{\partial y} \right) \left(\frac{\kappa}{k} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

(12)式の左辺第1項は、作用密度 N の時間変化、第2、3項は、 x 方向および y 方向の伝搬による空間変化、第4項は、水深と流れの時間変化による相対的な各周波数の変化、第5項は水深や流速の空間分布による波の屈折を意味する。右辺の $S(\sigma, \theta)$ はこのシステムのエネルギーの入出を表すエネルギーのソース関数を示し、次式で表される。

$$S(\sigma, \theta) = S_{in} + S_{ds} + S_{br} + S_{bf} + S_{nl} + S_{tri} \quad (14)$$

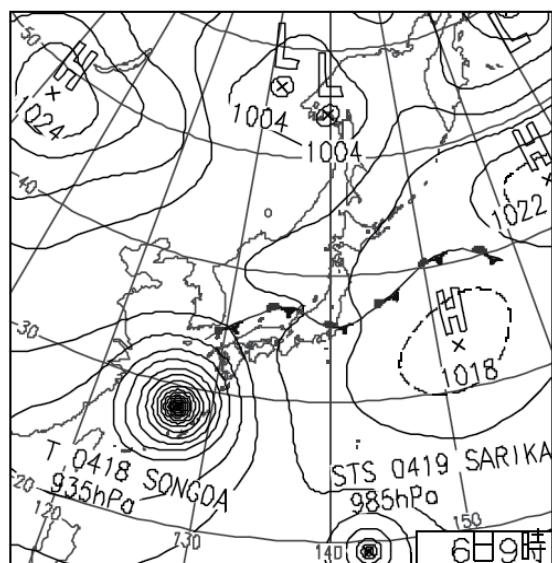
ここに、 S_{in} 、 S_{ds} 、 S_{br} 、 S_{bf} 、 S_{nl} 、 S_{tri} はそれぞれ、風から波へのエネルギー輸送、白波砕波によるエネルギー散逸、浅水砕波によるエネルギー散逸、海底摩擦によるエネルギー消散、4波波浪成分間での非線形相互作用によるエネルギー輸送、3波波浪成分間での非線形相互作用によるエネルギー輸送である。

SWAN の数値解法は、差分法で陽解的に、時間進行で解く。

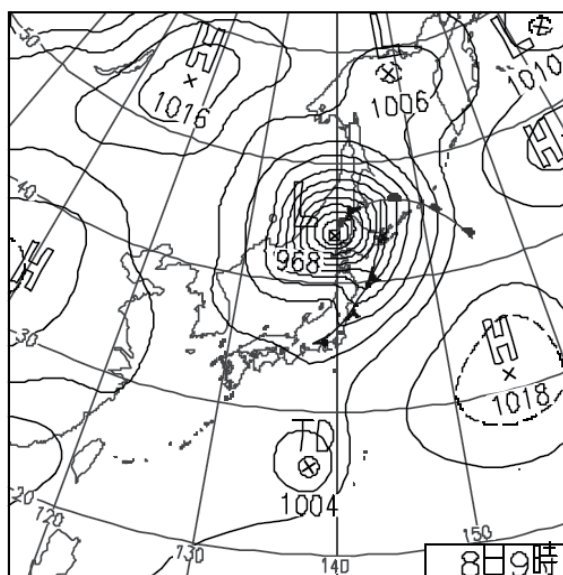
3. 数値計算結果

3.1 計算条件

Fig.1 に2004年9月6日に発達した強い台風18号が九州に接近して、7日に九州北部に上陸し、日本海を通過後、温帯低気圧に変化した時の天気図を示す。天気図から大阪湾には九州上陸時に東よりの風、大阪湾に最接近する日本海通過



(a) 09:00, Sept. 6, 2004



(b) 09:00, Sept. 8, 2004

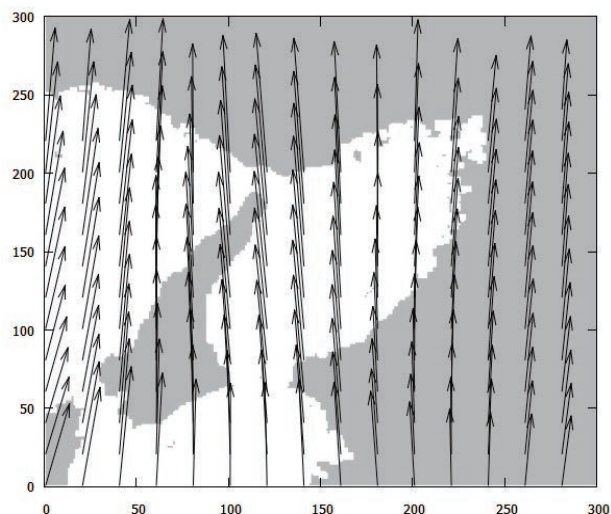
Fig.1 Weather chart

時に南寄りの強風、通過後西寄りの風が吹き、その後温帯低気圧に変化後に、弱い北東寄りの風に変化した。風の時間変化に従い、波浪も変化する。

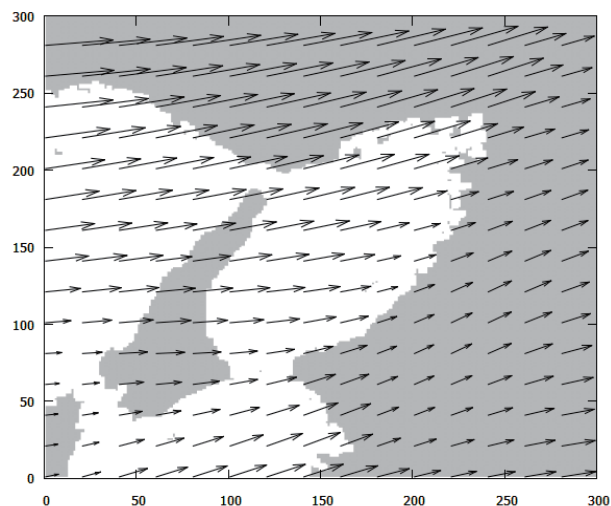
潮流は、海洋風の影響による吹送流を考慮した計算を行った。

3.2 海上風の計算結果

Fig.2に大阪湾における海上風のWRFによる数値計算結果を示す。(a)図に台風が日本海を東北東に通過時、(b)図に日本海を通過後の大阪湾の海上風を示す。日本海通過時に大



(a) At 08:00, Sept. 7, 2004

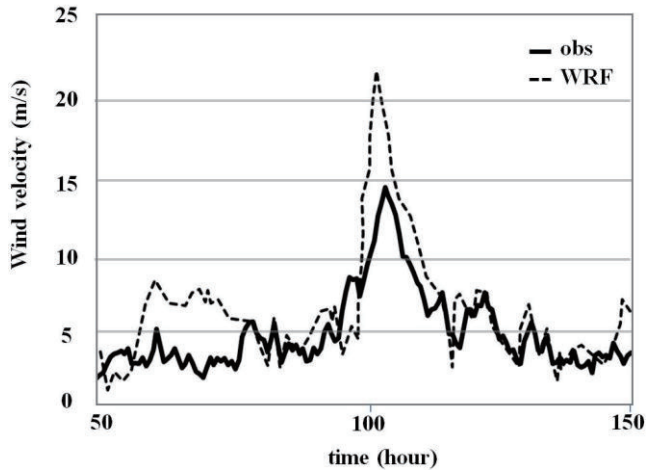


(b) At 20:00, Sept. 7, 2004

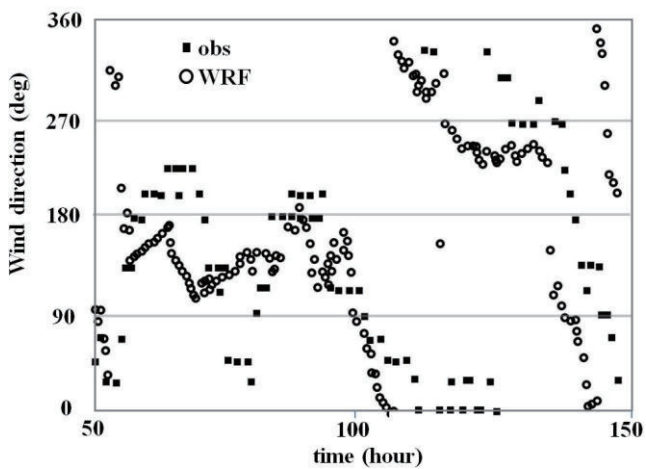
Fig.2 Numerical wind in Osaka Bay in the typhoon by WRF

阪湾に強い南風が吹き、通過後は南西から西寄りの風と変化し、風速が弱くなった。

海上風の数値計算結果の検証のため、Fig.3に神戸の観測地における実測データと数値計算結果との比較を示す。(a)図に風速、(b)図に風向の時系列を示す。横軸は時間、縦軸は風速及び風向を示す。(a)図の風速の比較では、台風が最接近した頃の風速が最大となる時刻で、両者に差が見られる。数値計算結果が大きいのは、埋め立て等による海岸線の変化に比べ、計算格子間隔が大きいこと、観測風は神戸市背後の六甲山等の複雑な地形の影響を受け、地上摩擦による風速の減衰等に起因すると思われる。それ以外の風速の弱い時刻では、概ね両者は一致している。(b)図の風向の比較では、両者はよく一致している。



(a) Wind velocity



(b) Wind direction

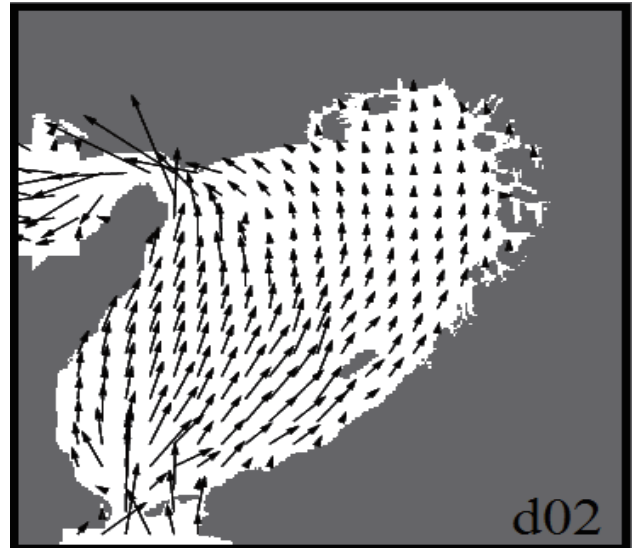
Fig.3 Comparison of observed and calculated time series of wind in Kobe

以上より、部分的に両者に僅かな差が見みられるが、台風通過時の風向、風速の時系列の比較から、WRFによる数値シミュレーションで、概ね海上風の数値計算が可能であることが分かった。

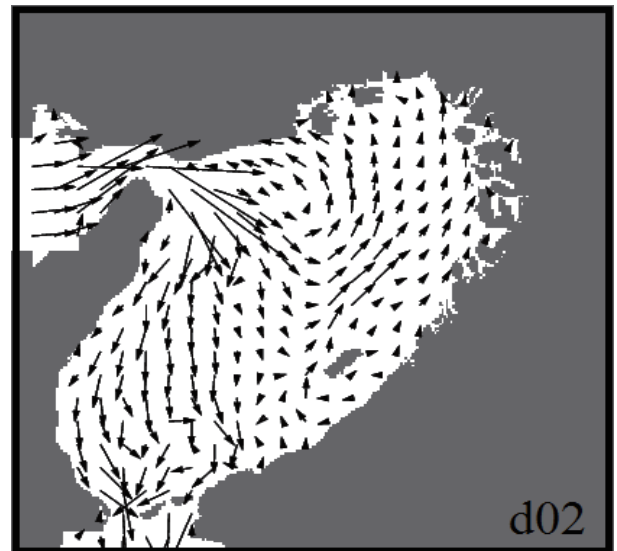
3.3 潮流の計算結果

本研究では、風の影響を考慮した潮流の数値シミュレーションを行った。3.2で記述のWRFにより数値計算した海上風の結果を、POMに逐次入力し、潮流の数値シミュレーションを行った。潮流に海上風による海面付近の吹送流が加わるため、より一層現実的な潮流の再現が可能である。

計算領域は海上風と同じ大阪湾である。潮流の数値計算に必要な初期計算データとして、大阪湾の水深は、海上保安庁水路部発刊のデータを用いた。計算格子間隔は東西、南北水平方向に450m×450mであり、格子数は340×220である。Z方向の格子数は5層で、 σ 座標を使用のため水面付近の最



(a) Flood 2004-09-07 04:00 UTC



(b) Ebb 2004-09-07 11:00 UTC

Fig.4 Vector distribution of tidal current considering wind on the sea in Osaka Bay

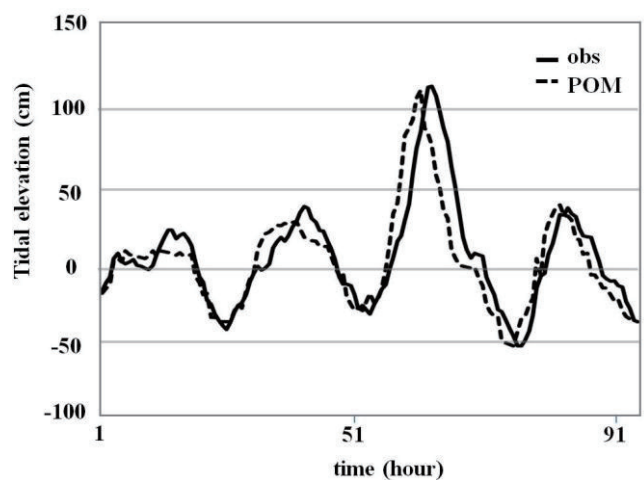


Fig.5 Comparison of Time series of observed and simulated tidal elevations

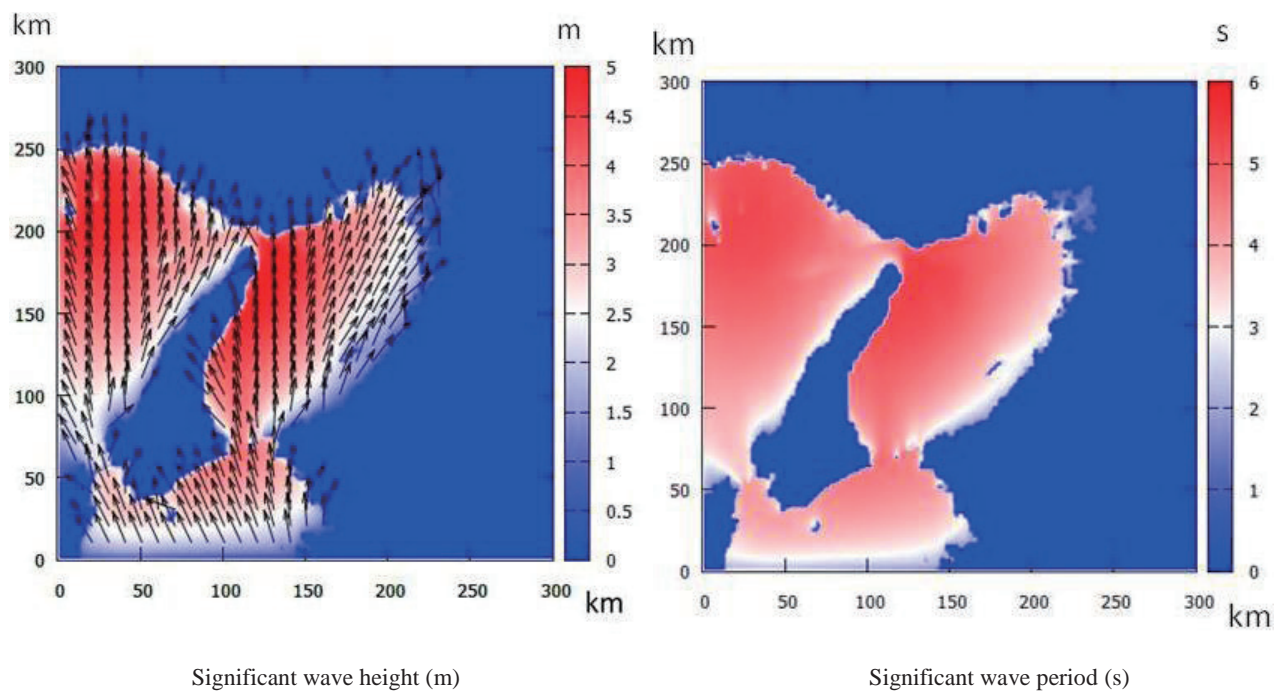
上層の格子間隔は浅瀬を考慮し、5mとした。計算領域における境界条件には、瀬戸内海側の高松及び太平洋側の小松の観測で得られた潮位データと、台風接近時のWRFで得られた海上風の数値計算データを課し、2004年9月4日00時から2004年9月9日00時までの120時間を計算した。計算の初期条件は計算領域内の潮位及び潮流の流速成分を静止状態に設定した。

Fig.4に上げ潮(a)及び下げ潮(b)時の大阪湾の潮流の速度ベ

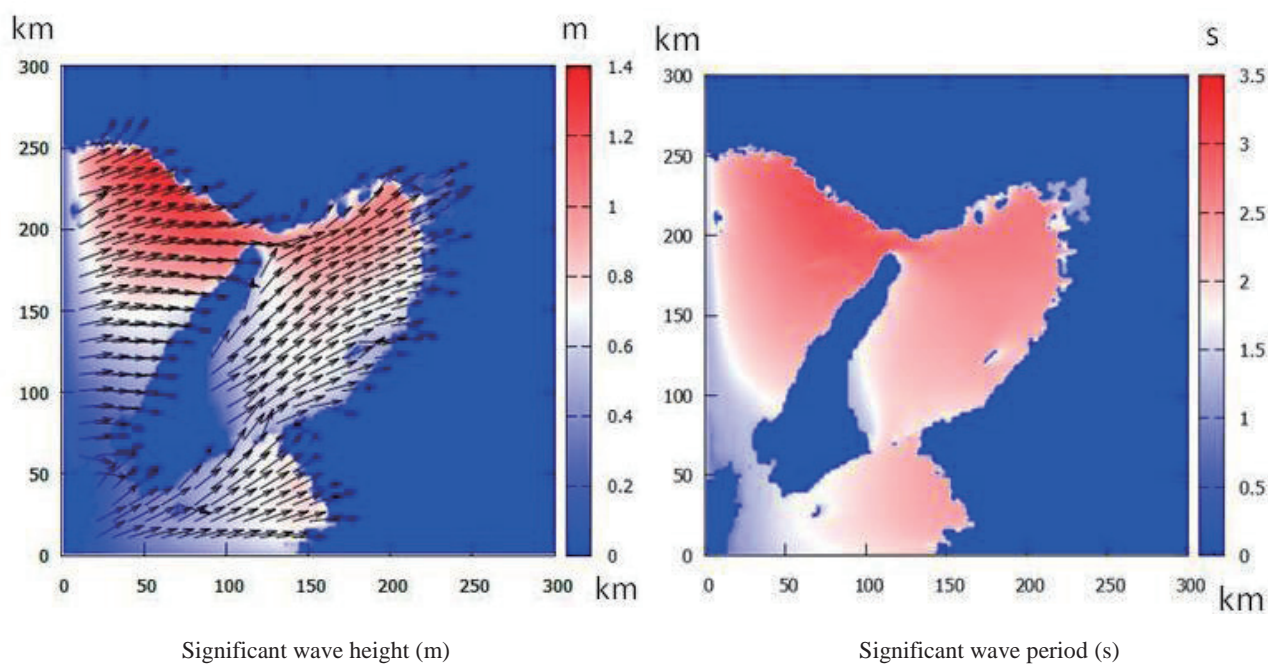
クトル分布を示す。明石海峡、鳴門海峡及び友ヶ島水道の狭隘部で潮流が強くなっている。

海上風を考慮することにより、台風通過時に強い南風が大坂湾に連吹したことから、海面近傍の潮流による表層流に吹送流が加わり、流れが僅かだけ強まり、風が起因の北向きの流れが表れている。

Fig.5にPOMによる潮流の数値計算の検証に、潮位の観測データと数値計算結果を示す。観測地は神戸である。Fig.4



(a) At 08:00, Sept. 7, 2004



(b) At 20:00, Sept. 7, 2004

Fig.6 Simulated ocean waves in Osaka Bay

に示す潮流の湾全体の比較は、観測データがなく実施できない。定性及び定量的に、両者のほとんどが一致している。潮流の場合、広範囲の流れの観測が少なく、潮位の比較から、通常潮流の数値シミュレーションの検定を行っている。

以上の結果から、航海シミュレーションが目的の場合、海上を航海する船舶に影響を与えるのは主に表面流が重要であり、POM による潮流の予測は概ね良好であることが分かった。

3.4 波浪の計算結果

大阪湾を対象に SWAN を用いた波浪予報の数値シミュレーションを行った。計算海域内の格子は、一定格子間隔で $\Delta x = \Delta y = 500\text{m}$ 、格子数 164×144 で行った。台風通過時の風による波浪計算であるため、入力データは 3.2 に示した、WRF による数値計算結果を用いた。風浪のスペクトルは ITTC、うねりは JONSWAP スペクトルを用いた。

Fig.6 に WRF モデルによる風の数値シミュレーションから得られた、大阪湾の海上風に基づいた波浪の数値シミュレーション結果を示す。(a)図は Fig.2(a)、(b)図は Fig.2(b)で示す風場の、大阪湾での波の計算結果である。左図は有義波高、右図は有義波周期を示す。(a)図では、矢印は波向を示し、大阪湾海上の強い南風により、湾奥に向かって次第に波浪が発達している。(b)図では、風速が弱まった西寄りの風により、吹送距離が長い大阪湾の湾奥部に高波域が見られる。有義波周期は高波高域で長くなる。

Fig.7 に台風接近時における、神戸港の波高の観測と数値計算結果との比較を示す。横軸が時刻、縦軸が有義波高である。両者はおよそ一致している。

以上から、SWAN による波浪の数値シミュレーションは概ね、大阪湾内の波浪の数値予報に十分対応できることが、

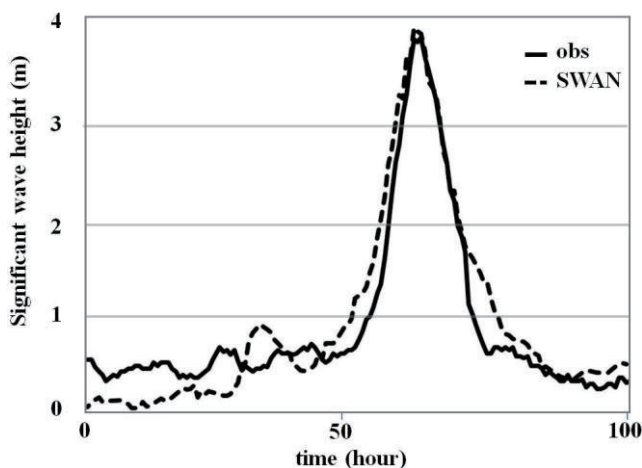


Fig.7 Comparison of Time series of observed and simulated ocean waves in Osaka Bay

わかった。

4. 数値ナビゲーションのシミュレーション

航行船舶は絶えず気象・海象の影響下にあり、設定航路からの偏位や速力の増減が生じる。気象・海象の影響を考慮した正確な船位予測は、通常の航海やウエザールーティングシステムの構築に極めて重要である。もし、正確な船位予測が可能になれば、狭水道などの狭隘な海域内で、横流れ量が最小になるように、正確に航路上に沿った操船も可能である。

本研究では、3.に示した気象・海象の数値シミュレーション下における、航行船舶の正確な船位予測には、気象・海象の急激な変化がないことを仮定し、通常利用されている操縦運動数学モデル(MMG)を適用した⁵⁾。

波浪中の船体に加わる波浪定常力(抵抗増加、定常横力、定常回頭モーメント)の計算は RIOS により行った⁶⁾。RIOS とは実海域船舶性能研究イニシアティブ(The Research Initiative on Oceangoing Ships)の略称であり、大阪大学大学院工学研究科地球総合工学専攻船舶海洋工学コースに設置された実海域での船舶性能の向上と、船舶性能の評価手法に関する研究開発拠点である。船舶が実海域を航行するときの船舶性能の向上と、船舶性能の評価手法を確立することにより、世界の船舶の性能評価法を一新することを目的としている。対象船舶の船体主要目、船図データ、船体断面形状データを入力し、船速、波向、 $1/L$ (波長/船長)、波スペクトルを計算条件で指定して周波数応答関数の計算を行い、波浪定常力(抵抗増加、定常横力、定常回頭モーメント)を得る。そして周波数応答関数から実海域における、波浪スペクトル、海象条件(有義波高、平均波周期、相対波向)を入力して短期予測計算を行い、波浪定常力の平均値を求める。

潮流の影響は潮流と共に移動する座標系として考え、船体に働く流体力を計算した⁷⁾。本研究では対象船舶の風圧力係数の推定に藤原の式を用いた⁸⁾。

著者らは気象・海象を数値予測し、その中で航行する船舶の船位も数値的に予測し、航海の全てを数値計算で予測する手法を、数値ナビゲーションシステムと称した。

風、波浪及び潮流は基礎方程式を差分法で時間進行型に解いている。また MMG も運動方程式を時間進行型で解く。しかし、これらの計算時間間隔が僅かに異なる。一般に、気象・海象は統計的に約 30 分間、大きな変化がなく定常であると言われている。著者らの計算では、5 分間の気象・海象の計算結果の平均値を求め、それぞれの平均値を MMG に入力して計算した。MMG の入力データの時間間隔の 5 分は任意に変更可能である。

Table 1 Principal properties of Fukaemaru

Item	Fukaemaru
L.O.A. (m)	49.95
L.P.P. (m)	45
B.Mld. (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

本研究では、供試船として、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」を用いた。Table1 に深江丸の主要項目、Fig.8 に供試船の一般配置図を示す。深江丸は主に大阪湾、瀬戸内海及び周辺沿岸海域を航行海域とし、1 日～1 週間程度の学生実習及び研究航海に利用されている。

著者らは、これまでの研究において、およそ一定流速の潮流のみの影響において、流向が船首尾線と相対的に変化するように針路を 30° 毎に変えて、航走した場合の、船速変化と船舶横流れ量について、深江丸を用いた実海域での調査実験を行った^{9),10),11)}。その結果、潮流の影響による船速及び横流れ量の数値シミュレーション結果と、実験結果を比較し、MMG による航行船舶による船位の予測が概ね良好であることを示した。

また、風の影響による船速変化と船舶横流れ量について、潮流の影響実験と同様の方法で、深江丸を用いた実海域での調査実験を行った^{12),13),14)}。その結果、風圧影響による船速及び横流れ量の数値シミュレーション結果と、実験結果を比較し、MMG による航行船舶による船位の予測が概ね良好であることを示した。

なお、波浪の影響による船速変化と船舶横流れ量についての実船実験に関しては、現在研究中であり、完了次第報告の予定である。

本研究では、大阪湾において、数値予測された気象・海象（風、潮流及び波浪）中を、供試船「深江丸」が模擬航海する航海シミュレーションにより、供試船の航路からの横流れ量、船速の変化を調査した。

Fig.9 に強い台風の接近を避け、日本海を通過後(Fig.1(b)) 風が弱くなった時間帯に、供試船深江丸が航海する仮想航路を示す。深江丸が 2004 年 09 月 08 日、05:00:00 UTC に緯度 $N34.5^\circ$ 、東経 $E135^\circ$ を起点に、針路 050° で出航する。船速は 9kn(平水時機関回転数 500rpm に固定)、航海時間は約 1 時間

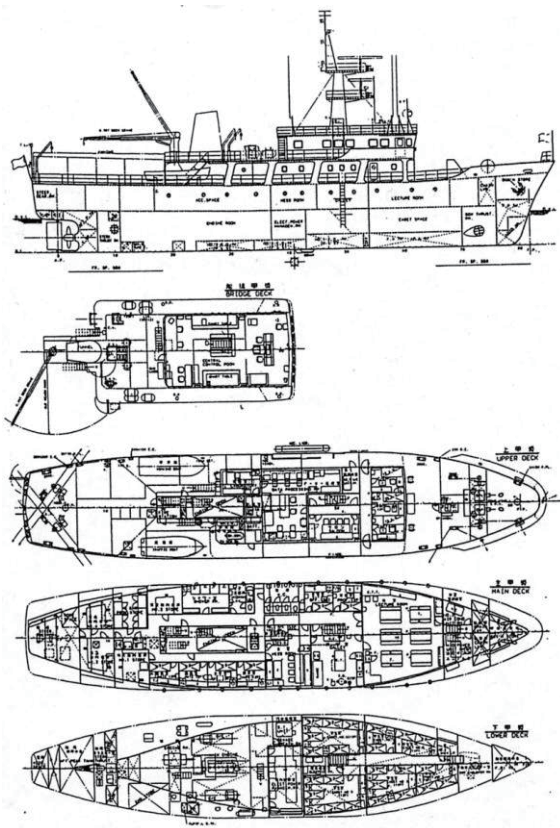


Fig.8 General arrangement plan of an actual ship used in the experiments

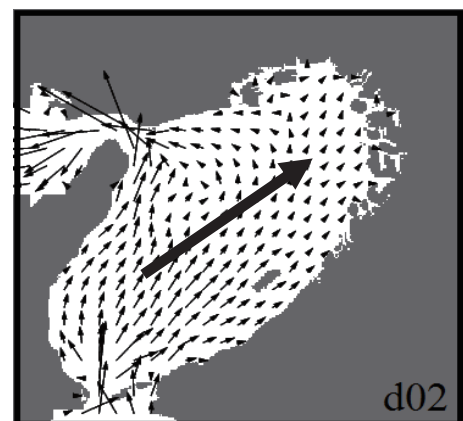
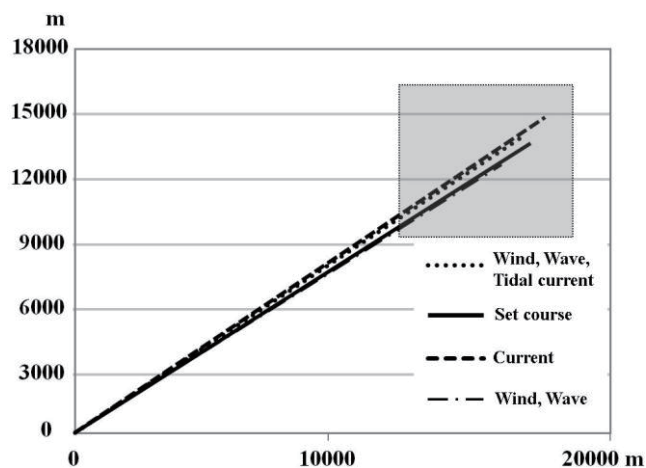


Fig. 9 Distribution of tidal current at 2004-09-08 05:00 UTC and ship course

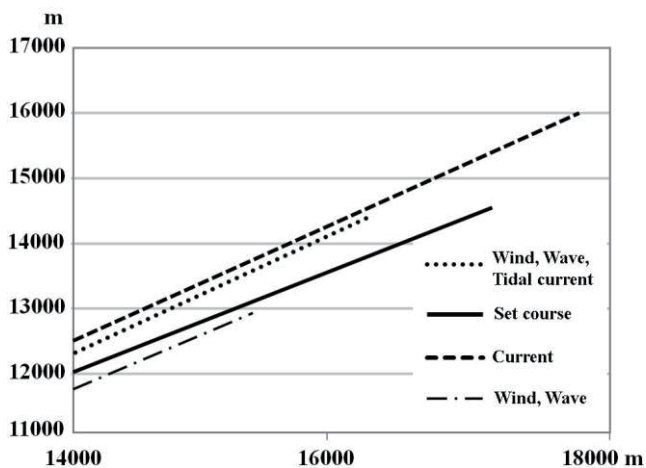
20 分である。航海中の風は Fig.1(b)から、台風が既に日本海を通過し、大阪湾におよそ平均風速 7m/s、風向は西寄り、波浪はおよそ有義波高 0.7m、有義波周期 2.5s、潮流はおよそ上げ潮（北流）時期で 0.5m/s（約 1 ノット）、北東流である。

Fig. 10 に数値計算で得られた気象・海象下、MMG を用いた深江丸の航海シミュレーションを行った結果を示す。(a) 図は航海域全体、(b) 図は(a)図内に示す航海終了時の矩形域内の航跡を示す。短時間の航海により、(a) 図では気象・海象の影響が小さく、判別が見難いため、(b) 図で、拡大表示している。縦軸及び横軸は航海海域内の緯度、経度を m で表示した。実船は設定航路であり、風、潮流、波浪がない平水時の航跡である。破線は風と波浪のみの影響による航跡、点線は潮流のみの影響による航跡、細い点線は風、波浪、潮流の全影響による航跡を示す。

供試船は、およそ左舷正横乃至船首斜め前方の方向から風と波浪を受けている。潮流は右舷斜め後方乃至船尾方向から受けている。その結果、風と波の影響により、僅かだけ右舷



(a) Whole region



(b) Rectangular region

Fig. 10 Comparison of wind, wave, and tidal current effects

側に横流れを起こしている。また、船速は僅かに減速している。潮流の影響では、船舶は左舷側に横流れを起こし、船尾からの流れにより、船速の増加が見られる。風、波浪、潮流の全ての影響は、総合すると、左舷側に横流れ、対地速力の減少から行程は短くなった。

風、波浪、潮流の強さ、流向によりシミュレーション結果は当然異なるが、この気象・海象では潮流の影響が船速、横流れ量に最も影響するものと考えられる。風、波浪及び潮流の全てを考慮した航海への影響は、実海域での船舶実験での検証が必要である。今後の課題である。しかし、本研究で構築した数値ナビゲーションにより、矛盾のない結果が得られることが解った。

5. 結 言

実海域航行船舶の気象・海象の影響下での船位予測を目的に、数値予測した気象・海象を考慮した航行船舶の船位予測を行う数値ナビゲーションシステムを構築した。特に、気象・海象の中で、沿岸海域航行船舶に最も影響を与える風、波浪、潮流による、船舶の横流れ量、船速の変化について調査した。その結果、以下の主要な結論を得た。

- (1) WRF により、沿岸海域における風の数値予測が精度よく可能である。
- (2) SWAN により、沿岸海域における波浪の数値予測が精度よく可能である。
- (3) POM により、沿岸海域における潮流の数値予測が精度よく可能である。
- (4) MMG により、沿岸海域航行船舶の船位の数値予測が精度よく可能である。

(5) 風、波浪、潮流の数値予測下での、航行船舶の船位を数値予測する航海シミュレーションは、航行中の船舶の船位予測に適用可能である。

(6) 気象・海象の状況および船首尾方位と潮流の流向との相対方位に依存するが、本シミュレーション結果では、航行船舶の横流れ量及び船速に潮流が最も大きく影響した。

今後、船舶の载荷状況や喫水なども考慮した航海シミュレーションも行う所存である。さらに、数値シミュレーションの検証を目的に、実船実験を実施の予定である。

謝 辞

本研究の実施に当たり、関連者から貴重な助言を頂いたの、お礼申し上げる。本研究は文部科学省科学研究費(基盤研究(B) 22310100)の補助を受けたことを記し関係各位に謝

意を表す。

参 考 文 献

- 1) Richard W. James: Application of Wave Forecasts to Marine Navigation, Special Publication, U. S. Navy Hydrographic Office, Washington, D. C., P.74, 1957.
- 2) 新谷哲也：気象モデル WRF を用いた湖上風の再現と波浪推算, 水工学論文集, 第 52 巻, pp.1237- 1242, 2008.
- 3) George L. Mellor : Users Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation, Numerical Ocean Model, <http://www.aos.princeton.edu/WWWPUBLIC/htdocs.pom.>, P.56, 2004.
- 4) 小林智尚：波浪推算システムとその応用, 2002 年度(第 38 回)水工学に関する夏期研修講義集, 土木学会 海岸工学委員会・水理委員会, B-7-1 - B-7-20, 2002.
- 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) 実海域船舶性能研究イニシアティブ：RIOS ホームページ, <http://www.rios.eng.osaka-u.ac.jp/>, 2011.
- 7) 小林英一：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—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—, 関西造船協会論文集, 第 243 号, pp.159-166, 2004.
- 8) 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, 813 号, pp77-90, 1998.
- 9) S. 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.
- 10) 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, —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—, 関西造船協会論文集, 第 243 号, pp.159-166, 2005.
- 11) 夏海波, 塩谷茂明, 万田敦昌, 小林英一, 若林伸和：潮流シミュレーションを用いた航海への潮流の影響の調査について, 日本航海学会論文集, 第 116 号, pp.61-67, 2007.
- 12) 夏海波, 塩谷茂明, 小林英一, 若林伸和：実小型船舶を用いた風圧による横流れの計測実験とシミュレーションについて, 日本航海学会論文集, 第 113 号, pp.171-177, 2005.
- 13) H. Xia, S. Shiotani, E. Kobayashi and N. Wakabayashi : Estimation of Ship's Course for Sailing on Route by Navigation Simulation in Coastal Water, The Journal of Japan Institute of Navigation, No.115, pp.51-57, 2006.
- 14) 夏海波, 塩谷茂明, 大澤輝夫, 小林英一：海上風の数値予測と風圧影響下の航海シミュレーション, 日本航海学会論文集, 第 117 号, pp.151-158, 2007.