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

夏 海波*・塩谷 茂明**・

大澤 輝夫***・小林 英一***

Numerical Prediction of Ocean Surface Wind and Navigational Simulation under the Effects of Wind

Haibo XIA, Shigeaki SHIOTANI,

Teruo OHSAWA and Eiichi KOBAYASHI

Abstract

This paper predicted the ocean surface wind in Osaka Bay over 36 hours, from 03:00, May 18, 2005 to 15:00, May 19, 2005, by using the meso-scale meteorological model MM5. A mother domain with 3 km spatial resolution and an inner domain with 1km spatial resolution were built and used for the simulation with the method of 2-way nesting in MM5. Compared the calculated data with the observed one obtained from Japan Meteorological Agency, it is shown that ocean surface wind in Osaka Bay has been well estimated. And the navigational simulations under the effects of wind were conducted using the simulated data of ocean surface wind. It proved that the effects of wind in coastal waters could be estimated correctly in the simulation, which makes a satisfactory contribution to the development of numerical navigation simulation system.

Keywords : *ocean surface wind ,meteorological model, navigational simulation*

キーワード: 海上風, 気象モデル, 航海シミュレーション

1. はじめに

本研究の最終目的は沿岸航行の船舶に対して、安全性と経済的効果の高い最適航法のシステムを確立することである。そのため、出航前から事前に航海中に遭遇するであろう気象・海象の数値予測及びその予測データに基づいた航海シミュレーションが必要である。前回は、潮流の数値予測を行い、潮流の船舶運動への影響を調べた⁽¹⁾。今回は、それに引き続き、沿岸海域における海上風の数値シミュレーションによる予測及び船舶操縦運動シミュレーションによる風圧影響の考察を行った。

海上風は船舶の安全・効率的な運航に関わる重要な気象情報の一つである。海上風を精度良く推定することは、最適航路選定及び航海計画立案に大きく

影響する。従来ウェザー・ルーティングでは解像度 10km 以上の領域スケールあるいは数 10km 以上の全球スケールでの風の予測を行っていた。大洋航海の場合はこの程度の解像度で対応できる。しかし、数 km～数百 km の限られた沿岸航海領域（大阪湾の場合は 120km 程度）を対象とする場合、風の予測データの精度を高めるためには十分密な格子間隔が必要であり、高解像度の数値予報モデルを用いた海上風の予測が要求される。

今回、筆者らは沿岸海域を対象にメソ気象モデル MM5⁽²⁾ (the 5th generation Meso-scale Model) を用いて大阪湾における海上風を予測し、その予測データに基づいた船舶運動への風圧影響を数値シミュレーションによって調査した。その結果、有益な情報を

* 学生会員 神戸大学大学院自然科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1) xiahaibo@msn.com

** 正会員 神戸大学自然科学系先端融合研究環 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

*** 正会員 神戸大学大学院海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

得たので報告する。

2. 海上風の数値予測

2.1 メソ気象モデルMM5

MM5 はペンシルバニア州立大学 (PSU) と米国大気科学センター (NCAR) により開発された非静力学のメソスケールモデルで、現在世界で最もよく使われているメソ気象モデルの1つであり、本研究ではこの計算方法を用いた。MM5 では鉛直座標系に σ 座標系を使用しており、特に計算領域内に大きな山岳が存在する場合に有効である。

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。

そのほか、MM5 の特徴として、積雲パラメタリゼーションや地表面境界スキーム等の物理過程のオプションが多く用意されており、様々な条件で解析を行うことができる。また、親領域 (mother domain) 内であれば、各小領域 (inner domain) を同時に計算することができる 2-way ネスティングが可能であり、また、入力に用いられる解析値を計算に取り込むことができる四次元データ同化機能も備えている。

MM5 の基礎方程式は次のように与えられる。

気圧方程式：

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

ここに、 P' は摂動圧力 [Pa]、 ρ_0 は基準密度 [kg m^{-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 [$\text{J kg}^{-1} \text{s}^{-1}$]、 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。

水平運動量方程式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left(\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right) \\ = -V \cdot \nabla u + v \left(f + u \frac{\partial m}{\partial y} - v \frac{\partial m}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$-ew \cos \alpha - \frac{uw}{r_{\text{earth}}} + D_u \quad (3)$$

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

ここに、 u は東方向の風速成分 [ms^{-1}]、 v は北方向の風速成分 [ms^{-1}]、 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 [s^{-1}]、 α はグリッドの軸と実際の北との角度差、 D_u 、 D_v は水平拡散項、 r_{earth} は地球半径である。鉛直運動量方程式は

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

ここに、 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：

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

また、(2)、(3) 及び (6) 式の中の移流項は次式のように展開できる。

$$V \cdot \nabla A \equiv mu \frac{\partial A}{\partial x} + mv \frac{\partial A}{\partial y} + \sigma \frac{\partial A}{\partial \sigma} \quad (7)$$

ここに、

$$\dot{\sigma} = -\frac{\rho_0 g}{p^*} w - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial x} u - \frac{m \sigma}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial y} v \quad (8)$$

さらに、(2) 式の発散項は次式のように展開できる。

$$\nabla \cdot V = m^2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} + m^2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) - \frac{m\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} - \frac{\rho_0 g}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} \quad (9)$$

ここに、 A は任意のスカラー量、 $\dot{\sigma}$ は σ 座標下の鉛直速度である。

2. 2 計算条件

今回用いた計算領域を Fig.1 に示す。西日本全域を覆う親領域 D01 とその内部の大阪湾を含む小領域 D02 の二つの計算領域を設定した。親領域 D01 は水平解像度 $3\text{km} \times 3\text{km}$ で 198×198 の格子数、小領域

D02 は水平解像度 $1\text{km} \times 1\text{km}$ で 120×120 の格子数である。鉛直方向は 23 層を設定した。計算は 2way ネスティングの方法により、D01 の計算結果をタイムステップ 9 秒で D02 に与えて、また逆に D02 でタイムステップ 3 秒で計算した結果を D01 にフィードバックしている。

計算期間については、船舶への風圧影響が表れるような比較的風の強い状況を調べるために、気象庁のデータベースにより、発達した低気圧が日本海を通過する場合を調べ、2005 年 5 月 18 日 03:00 から 5 月 19 日 15:00 までの 36 時間とした。計算期間の天気図を Fig.2 に示す。5 月 18 日には日本海に発達した低気圧があつて、(a)図の西日本には南寄りの風が強吹した。(b)図の日本海を低気圧が通過後の 5 月 19 日には北寄りの風が吹いた。

Fig.1 Calculation domains of MM5

Fig.2 Weather chart on May 18-19, 2005

本研究で使用した各領域の計算設定条件を Table 1 に示す。計算の物理オプションとして、雲物理過程には両領域とも Mix Phase scheme⁽³⁾、積雲パラメタリゼーションは D01 のみに Grell scheme⁽⁴⁾を用い、境界層スキームには両領域とも Eta scheme⁽⁵⁾、放射スキームには両領域とも Cloud-radiation scheme⁽⁶⁾、地表面過程には 5-layer soil model⁽⁷⁾を使用した。

親領域 D01 の初期・境界条件として、大気データは気象庁発行のメソ客観解析データ (MANAL、6 時間間隔、10km 格子、20 層)、海水温度は米国国立環境予報センターの全球客観解析データ (NCEP、 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 、1 日 4 回、00Z、06Z、12Z、18Z) を用いた。地表面の標高データは米国地質調査所 USGS が提供するデータを用いた。

Table 1 Calculation conditions of MM5

Item	D01	D02
Calculation Period	2005-5-18 03:00~ 2005-5-19 15:00	
Horizontal Resolution	3km	1km
Horizontal Grid	198×198	120×120
Vertical Grid	23	
Time Step	9sec	3sec
Explicit Moisture Scheme	Mix Phase	
Cumulus Scheme	Grell	None
Planetary Boundary Layer Scheme	Eta	
Atmospheric Radiation Scheme	Cloud-radiation	
Multi-Layer Soil Temperature Model	5-layer soil model	
Objective Analysis Data	MANAL	
Topographic Data	USGS	

2.3 計算結果

Fig.3 には MM5 により計算された D02 における海上風の分布例を示す。(a)図は Fig.2(a)の天気図に

(a) At 16:00, May 18, 2005

(b) At 09:00, May 19, 2005

Fig.3 Simulated ocean surface wind in Osaka Bay

Fig.4 Observation point in Osaka Bay

相当した気象状況で、計算開始から13時間後の2005年5月18日16時の海上風の様子である。日本海を発達した低気圧が通過し、温暖前線と寒冷前線の間に位置する大阪湾では、強い南風が吹いている。予測された平均風速は21.3knで、平均風向は 189° である。

(b)図は Fig.2(b)の天気図に相当し、計算開始から30時間後の2005年5月19日9時の海上風の様子である。寒冷前線通過後の北西風が吹き、予測された平均風速は7.9knで、平均風向は 314° である。

数値計算の検証を行うため、計算領域内の複数地点の観測地における MM5 による計算結果と気象庁の観測データとの比較を行った。Fig.4 は比較を行った3カ所の観測地を示す。それぞれ洲本(SUMOTO)、友ヶ島(TOMOGASIMA)及び関空島(KANKUJIMA)である。

Fig.5 は3 地点における観測データと MM5 により計算された結果の比較を示す。左図が風速、右図は風向の時系列を示す。風向に関しては、観測データと計算結果に顕著な差異は現れず、よく一致している。(c) 図の30時頃の風向に差が見られるのは、縦軸の風向を $0\sim 360^\circ$ 表記にしたことによる。風速に関しては、観測データと計算結果を比較すると時刻によって、多少の差が見られる。MM5 による計算では海面上10mの風を計算しているが、必ずしも各観測地の風速計の高さとは一致していない。また、観測地周辺の複雑な地形の影響をシミュレーションでは十分にとらえることができない。低気圧や前線など気象現象の再現精度の問題だけではなく、こうした観測値に関わる要因も計算誤差の一因として考えることができる。

Fig.5 Comparison of simulated data and observed one

ただし関空島のように周りが開けている場所では計算期間を通じて MM5 の計算値は比較的良くあっていることがわかる。すなわち海上風に関しては、概ねその風速風向の時空間変化を良く再現できていることが示唆される。航海シミュレーションに必要な風の変化を考慮すると、MM5 により算出される海上風は十分に利用できると思われる

3. 航海シミュレーション

海上風の風圧影響による船舶操縦運動を調査するため、MM5 によるシミュレーションによって得られた海上風の計算データを船舶操縦運動モデル MMG に入力して、航海シミュレーションを行った。

航海シミュレーションに用いた供試船は神戸大学附属練習船「深江丸」である。供試船に深江丸を用いたのは、今後風圧影響の実証実験を行う予定であることによる。計算領域 D02 の大阪湾は MM5 によ

り計算された 1km 間隔の格子のデータをさらに 462 m の等間隔の 292×220 個の格子点上に線形内挿して、格子点上の海上風を求めた。これは、今後海洋モデル POM による潮流シミュレーション結果と MM5 による風の結果を総合させたモデルを構築し、風及び潮流の影響を考慮した航海シミュレーションを行うためである。

大阪湾は比較的狭い閉鎖海域であり、深江丸が通常の航海速力で直線航路を航行すると、航海時間は 1、2 時間程度にすぎない。できる限り長時間航走して顕著な風圧影響が現れるように、通常では設定しない特殊な航路として A、B、C、D の 4 ケースを設定した。これらの模擬的な直線航路を Fig.6 に示す。Case A は友ヶ島水道を北航する場合 ($Co.=33.9^\circ$)、Case B は同じ航路を南航する場合 ($Co.=213.9^\circ$)、Case C は明石海峡を東航する場合 ($Co.=91.0^\circ$) 及び Case D は西航する場合 ($Co.=269.0^\circ$) である。

Fig.6 Navigation simulation

Table 2 Drift angles and difference of distance under the effects of wind

Case	Relative Wind Direction [deg]	Run Time [h]	Drift Angle [deg]	Difference of Distance [km]
A	146.1	5	-0.60	0.4834
B	33.9	5	1.80	-3.7637
C	89.0	4	-2.20	-0.9558
D	89.0	4	1.94	-0.7528

実験中オートパイロットを使用して、ハーフ・アヘッド・エンジンの速力 9kn で航行させた。供試船のオートパイロットは省エネルギー性を実現したアダプティブオートパイロットである。その中に、ON-OFF 制御、比例制御のアクチュエータを利用している。設定条件は舵角リミットの設定は 5° 、針路偏差警報のリミット角の設定は 10° である。

各ケースの推測船位と風圧影響を受けたシミュレーション船位を Fig.6 に示している。実線は風の影響のない設定航路、破線は航海シミュレーションによる航跡を示す。Case A から D では Fig.3(a) で示す南寄りの風が吹く時間帯を航行するため、南風による風圧影響により船位が偏位していることが分かる。

各ケースのシミュレーションの設定条件及び風圧影響下の横流れ量と航程の差を Table 2 に示す。相対風向は船首方位に対する風向の絶対値で、 $0\sim 180^\circ$ で定義した。航走時間はシミュレーションで航海した時間である。横流れ量は船首方向と風の影響を受けて航走した実際の航跡との角度であり、右舷側が正、左舷側を負で表示した。航程の差はシミュレーションでの航走距離と推算距離の差であり、推算距離より大きい場合は正、小さい場合は負となる。

表 2 に示したように、Case C、D では供試船の船首方向に対し、相対風向がほぼ正横になっているため、横流れ量がより大きく、約 2° になる。Case A、B では相対風向が船首尾に沿うため、横流れ量は多少小さく、航程の差は特に B において風圧影響が顕著に表れている。

4. 結論

沿岸域における航行船舶を対象とした最適航法システムの構築のための基礎的研究として、航海中に遭遇するであろうと予報される海上風を事前に予測し、それに基づいた航海シミュレーションを行い、航海中の船舶に対する風圧の影響を調査した。主に以下の結論を得た。

(1) MM5 による海上風のシミュレーションと観測値との比較から、沿岸海域の海上風の風向及び風速が概ね十分な精度で予測できることが明らかになった。

(2) 航海への風圧影響の調査を行った結果、風による船舶の航程及び横流れ量の変化が十分把握できた。今後航海計画を立てる際の有意義な情報を得た。

今後の課題として、実船による航海シミュレーションとの検証を行う。また、風の数値予測と潮流の数値予測との組み合わせ、さらに、風・潮流・波浪を組み合わせた総合的な数値シミュレーションを行う所存である。

本研究は、日本学術振興会平成 18 年度—20 年度科学研究費補助金(基盤研究 B(課題番号 18310115))の一環として行われたことを付記する。

参考文献

- (1) 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、pp61-67, 2006
- (2) MM5: トップページ,
<http://www.mmm.ucar.edu/mm5/mm5-home.html>
- (3) Reisner, J., Rasmussen, R.M., Bruintjes, R.T.: Explicit Forecasting of Supercooled Liquid Water in Winter Storms Using the MM5 Mesoscale Model, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, Vol.124B, pp.1071-1107, 1998
- (4) Grell, G. A.: Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterization, Mon. Wea. Rev., Vol.121, pp.764-787, 1993
- (5) Janjic, Z. I.: the Step-mountain Coordinate Model: Physical Package, Mon. Wea. Rev., Vol.118, pp.1429-1443, 1990
- (6) Dudhia, J.: Numerical Study of Convection Observed During the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-dimensional Model, J. Atmos. Sci., Vol.46, pp.3077-3107, 1989

- (7) Dudhia, J. : a Multi-layer Soil Temperature Model for MM5, Sixth Annual PSU/NCAR Mesoscale Model User's Workshop, Boulder, Co., pp.49-50, 1996

質疑応答

林美鶴 (神戸大学) :

航海シミュレーションでは何と何を比較したのでしょうか? 両者の差には風に対する船体の応答に関する計算誤差は含まれないのでしょうか?

夏海波 :

ご質問ありがとうございました。本研究では航行船舶の風圧影響についての調査のため、航海シミュレーションでは、風の影響のない状況で航走したときの推測船位と風の影響を受けたシミュレーション船位との比較を行いました。船体の応答に関する計算誤差は MMG の計算時に考慮されますが、大きな問題はないと考えています。

石田廣史 (神戸大学) :

用いた数値モデル (MM5) の最下層グリッド高はいくらか説明ください。その高度と計算に用いた高度における風速推定はどのように調整したのか説明ください。また、今後の研究において、風圧影響が大きく問題となる PCC 船などを対象とした研究を期待します。

夏海波 :

ご質問ありがとうございました。本研究では船の操縦性運動への風圧影響を対象とするため、海面上 10m の風のデータが必要です。今回の設定では MM5 の最下層グリッドの高さは 40m ですが、モデルの中ではモニン・オブコフの相似則を踏まえた鉛直プロファイルを用いて診断的に 10m 高度の風速を計算しておりますので、今回はそのデータを使用しました。PCC 船については、実証実験のため現段階では深江丸を供試船として利用していますが、今後 PCC 船のように風圧影響が大きなさまざまな船舶のシミュレーションを実施したいと思っています。