

MM5 による冬季季節風時の沿岸域海上風場の再現性について

山下隆男*・加藤 茂**・大澤輝夫***
筆保弘徳****・西口英利*****

冬季季節風時の日本海沿岸では、吹送流による沿岸方向の物質輸送や漂砂が海岸環境の主外力となっている。本研究は沿岸域での吹送流場を再現するための、海上風場の解析における非静力学メソ気象モデル MM5 の適用性を検討したものである。沿岸域陸上地形の影響を考慮した海上風解析を、季節風卓越時および発達しながら移動する温帯低気圧の二通りについて、MM5 の計算結果と海上風の観測結果とを比較して、数値シミュレーションの再現性を検討した。その結果、季節風卓越時の計算では静力学モデルの客観解析データに比べて再現性が極めて向上していること、温帯低気圧の場合には低気圧通過直後の急激な風の変化も再現できることが確認された。

1. 緒 言

沿岸域の物質輸送は、風による流れ（吹送流）を無視して解析することはできない。海岸工学の分野においても、周辺陸上地形、地質の影響を受ける沿岸海上風特性をどのようにして、どの程度の精度まで解析するべきかを検討する必要がある。特に、冬季日本海の沿岸では、吹送流による沿岸漂砂が長期海浜変形に大きな影響を及ぼしている可能性が高く（山下ら, 2000）、季節風時の沿岸風域場の解析研究は必要である。冬季日本海沿岸の海上風には、北西の季節風が卓越する西高東低型気圧配置と、移動性の温帯低気圧が急激に発達しながら北海道東岸へと移動する「台湾坊主」との 2 ケースが代表的である。

本研究では、PSU/NCAR のメソスケール気象モデル MM5 により、沿岸域での風域場の再現性の精度がどの程度向上するのかを検討する。MM5 は非静力学運動方程式系に基づいたモデルで、季節風や、台風などの災害外力となる気象場の再現への適用性が期待される（大澤ら, 2001）。ここでは、2002 年冬季に日本海中部の新潟県の上越・大潟海岸に位置する京都大学防災研究所大潟波浪観測所の観測桟橋（以下 OWO-TOP と表示）先端部において観測された、①季節風、②温帯低気圧の 2 ケースの海上風について、NCEP/NCAR の客観解析データ、これをバックグラウンドデータ（初期値、境界値）として与えた MM5 によるシミュレーション結果とを比較することで、MM5 の海上風推算への適用性を検討した。特に、沿岸域での流れの変動は、海上風の時空間的な変動に強く応答していることが観測されているので、空間スケールでは 1 km、時間スケールでは 0.5 hr のオーダーでの再現性の検討が必要であると考えた。このスケール

の風域場の変化が吹送流場、広域海浜流場にどの程度の応答特性をもって数値的に再現されるのかという問題を検討することも重要であるが、本研究は風域場の再現性についてのみ検討した。

2. 海上風の観測データ

海上風観測は、図-1 に示す上越・大潟海岸の中央部に位置する OWO-TOP の先端部において 3 成分超音波風速計、およびペーン式風向風速計により実施された。いずれも平均海面上 10 m 高度の風ベクトルデータで、周辺地物の影響の少ない良質な海上風データである。上越・大潟海岸には、OWO-TOP 以外にも多くの風速計が設置されているが、それらの特性を調査した後、この海岸の西端部に位置する直江津港湾湾事務所の風速計データ（15 m 高度）が比較的良好なデータと考えられたので、これも同時に収集し、両者の比較を行った。直江津港湾湾事務所の計測値は、強風時には風向、風速とも、OWO-TOP のものと変化のトレンドは一致しているが、全般的に風速が弱く計測されていたので、数値モデルの再現性

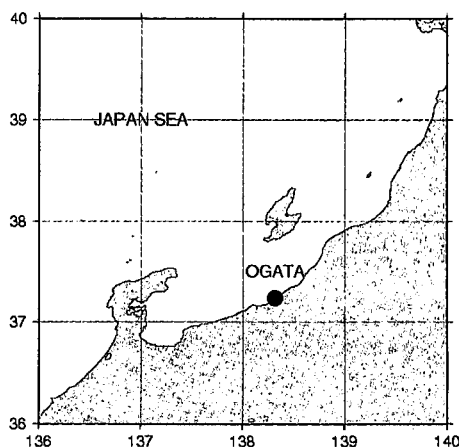


図-1 海上風の観測点（大潟波浪観測所）の位置と計算領域（図-2 のドメイン 2：計算中領域）

* 正会員 博(工) 京都大学助教授 防災研究所
** 正会員 博(工) 京都大学助手 防災研究所
*** 正会員 博(理) 岐阜大学助手 大学院環境エネルギーシステム専攻
**** 修(理) 京都大学大学院理学研究科地球惑星化学専攻
***** 学生会員 京都大学大学院工学研究科土木工学専攻

の検討には、OWO-TOP の観測データから 10 分間平均の風向・風速を 60 分ごとに出力して用いた。

3. メソ気象モデル MM5

このモデルは、鉛直座標系には、 p - σ 系の等圧面座標を用いた非圧縮流体の非静力学モデルである。数値モデルには、積雲パラメータ、地表面境界スキームの物理過程に多くのオプションが設定してあり、解析する対象とコストパフォーマンスによって、選択的な解析手段を設計できる。また、複数の計算領域をマザードメイン上で同時に計算することができるネスティングや、解析値、バックグラウンドデータの四次元同化が可能である (Grell ら, 1994)。

本研究では、表-1 のような条件設定で、①北西の季節風が卓越している場合 (2002 年 1 月 8 日～12 日)、および②温帯低気圧が発達する場合 (2002 年 1 月 25 日～30 日) の風域場の再現計算を行った。初期条件、境界条件には静力学モデル計算の NCEP/NCAR の客観解析データを用い、6 時間ごとに客観解析データの四次元同化をおこなった。図-2 は、そのときの計算領域である。

(1) モデルの概要

モデルの対象となっている物理系は、非静力学の十分に圧縮性のある系なので、そこでは音波が発生する。音波は伝播速度が早く、計算安定上短い時間ステップを必要とするため、非静力学の方程式系の数値計算では、短い時間ステップが要求され、非効率的となる。そのため、基礎方程式を、直接音波に伴う項と比較的ゆっくり変動する項 (S 項) とに分離して、時間分割計算を行っている。分離された方程式は運動量と気圧の間の相互作用しか含まず、次のように書かれる (ρ : 密度, p : 気圧の平均値からのずれ, p^* : モデル下端と上端の圧力差, m : 地図のゆがみ)。

水平運動量:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left[\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] = S_u \quad \text{.....(1)}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{m}{\rho} \left[\frac{\partial p'}{\partial y} - \frac{\sigma}{p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} \right] = S_v \quad \text{.....(2)}$$

鉛直運動量:

$$\frac{\partial w}{\partial t} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^*} \frac{\partial p'}{\partial \sigma} + \frac{g}{\gamma} \frac{p'}{p} = S_w \quad \text{.....(3)}$$

気圧:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p'}{\partial t} + m^2 \gamma p \left[\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\sigma}{m p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right. \\ \left. + \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{\sigma}{m p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right] \\ - \frac{\rho_0 g \gamma p}{p^*} \frac{\partial w}{\partial \sigma} - \rho_0 g w = S_p \quad \text{.....(4)} \end{aligned}$$

上式の右辺の S がゆっくり変動する項 (移流, 拡散, 浮力, コリオリ) であり, 左辺がいわゆる音波の項である。この方程式の数値解法としては, S 項はリーブフロッグ法を用いた長周期の計算結果を用いて既知の項として扱う。時間 τ で既知の u, v, w, p から始めて, まず 2 つの水平運動量の式を 1 ステップ進め $u^{\tau+1}$ と $v^{\tau+1}$ を得る (時間中央・陽解法)。そしてこれを気圧の式に用いて, 水平方向に伝播する音波の時間中心差分を得る。音波の鉛直伝播は, 鉛直の式と気圧の式を連立させて, w と p をそれぞれ時間平均値に依存させることによって, 陰解法で解く。

$$\bar{p}^{\tau} = \frac{1}{2}(1+\beta)p^{\tau+1} + \frac{1}{2}(1-\beta)p^{\tau} \quad \text{.....(5)}$$

$$\bar{w}^{\tau} = \frac{1}{2}(1+\gamma)w^{\tau+1} + \frac{1}{2}(1-\gamma)w^{\tau} \quad \text{.....(6)}$$

上式のような近似により, パラメータの時間的重みである β, γ を決定し, もし $\beta, \gamma=0$ なら中心での時間の平均値を与え, 正の値なら未来の時間ステップへの重みを与え, 音波の減衰に使うことができる。実際は $\beta, \gamma=0.2 \sim 0.4$ の値が使われる。

次に, 鉛直空間の二階の導関数を用いて, 鉛直の式と気圧の式の差分方程式を組み合わせ p を消去することで w だけにに関する差分方程式となり, 陰解法のトーマス・アルゴリズムで三次の対角行列上で直接再帰することにより解が求まる。

(2) 移流項の差分スキームの検討

MM5 では移流項の計算に中央差分が用いられ, これから発生する振動を抑制するために空間的な平滑化が行われている。移流項の影響が大きな現象の再現計算には, この項の計算スキームの改良が必要であろう。ここでは, 式 (7) の ϕ という物理量の二次元の移流問題を解くことで, MM5 に用いられている移流項の差分スキームの特性を調べるとともに, 計算精度を向上させるため差分法を検討した。

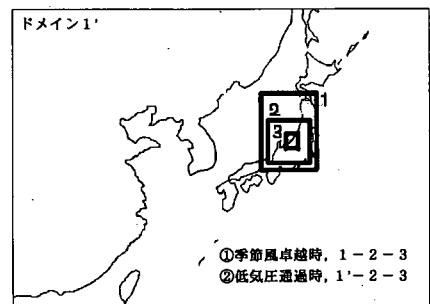


図-2 MM5 の計算領域 ドメイン1'は移動性の温帯低気圧の最大計算領域, ドメイン2は中領域, ドメイン3は上越・大潟海岸の計算領域

表-1 MM5の計算条件

	ケース① 北西の季節風卓越の場合	ケース② 温帯低気圧が発達する場合
期間	2002年1月8日～12日 1時間ごとにデータ出力	2002年1月25日～30日 10分ごとにデータ出力
格子幅	8.1 km, 2.7 km, 0.9 km	27 km, 9 km, 3 km
積雲対流スチーム	なし	Grell (上昇・下降気流), Grell, なし
接地境界層	MRF PBL (高分解に適合している)	MRF PBL
雲物理	混合相 (あられや霜はない)	Simple Ice (氷晶過程を考慮)
放射冷却過程	単純冷却	単純冷却, なし, なし
地表面温度	Multi-Layer Soil Diffusion (複数の地表面条件)	5層土壌 (日周期温度変動を考慮)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = -u \frac{\partial \phi}{\partial x} - v \frac{\partial \phi}{\partial y} \dots\dots\dots (7)$$

この問題に対するMM5の移流項の差分スキームは、式(8)、(9)より式(10)のようになっている。 $\bar{\phi}^{xy}$ のような多重に平均された項は、上付き文字の順序に関係なく、連続的に平均された項として定義される。

$$\phi_x = (\phi_{i,j+1/2} - \phi_{i,j-1/2}) / \Delta x \dots\dots\dots (8)$$

$$\bar{\phi}^x = \frac{1}{2} (\phi_{i,j+1/2} + \phi_{i,j-1/2}) \dots\dots\dots (9)$$

$$u(\bar{\phi}^{xy})_x + v(\bar{\phi}^{xy})_y \\ = u \left(\frac{\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j-1} + 2\phi_{i,j}}{8\Delta x} \right) \\ + v \left(\frac{\phi_{i+1,j} - \phi_{i-1,j} + 2\phi_{i,j}}{8\Delta y} \right) \dots\dots\dots (10)$$

図-3はこの、平滑化付き中央差分スキームのテスト計算結果である。 $T=0$ で上図の状態にある物質が矢印の方向に移動する計算において、 $T=100$ sでは中央の図のように大きく振動する。この問題に対して、越塚(1997)を参考にして、TVDスキームによる移流計算を行った結果、最下図のように極めて良好な輸送計算ができることがわかった。この差分スキームを移流項に適用するよう検討中であるが、本計算ではTVDスキームを適用したMM5のテスト計算は行っていない。

4. MM5による沿岸域の風域場の再現性

(1) 海上風の観測データとの比較

MM5では、細かいグリッドでより短い時間ステップの風を計算できるため、計算負荷は高いが、バックグラウンドデータであるNCEP/NCARの客観解析データよりも精度は向上する。

図-4の左図に、①季節風が卓越している場合の、および②温帯低気圧発達時の、OWO-TOPにおける観測データとMM5による計算結果、および客観解析データの風向、風速の比較を示す。①の結果からわかるように、MM5で計算を行うと、沿岸域の海上風場の再現性が向上する。②の計算結果には大気圧の変化を破線で示した。

気圧が最も低くなる1月27日10時頃に低気圧がOWO-TOPを通過しているが、MM5のシミュレーション結果は通過直後の急激な風の変化をよく再現している。ただし、低気圧通過前の風速にはややばらつきが見られる。

総合的には、NCEP/NCARの客観解析データは、観測機橋における海上風観測データの傾向は再現しているが、観測値と比べて風速の変化が緩やかで、強風時の風速は観測値よりも小さく、弱風時には大きくなっている。風向は、低風速時には観測値と顕著な相違が見られ、観測値との平均誤差風速は2.36 m/sであった。MM5の導

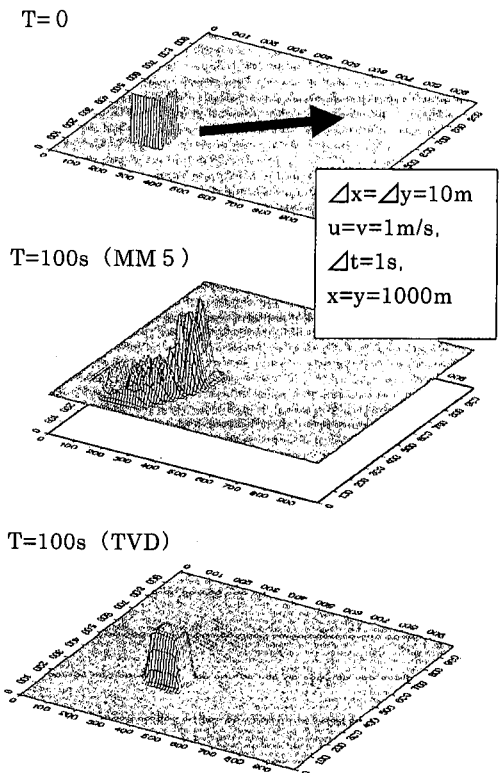
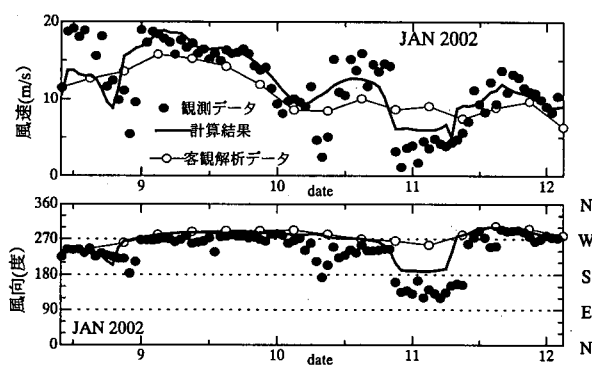
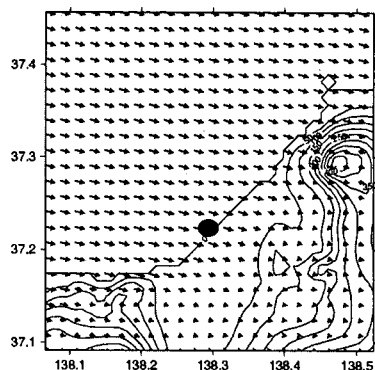


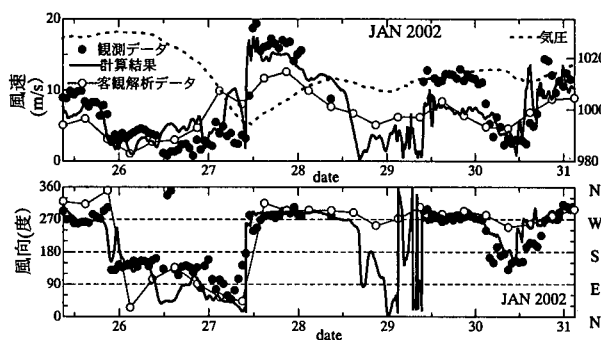
図-3 移流のテスト計算。MM5の中央差分スキームとTVDスキームの比較



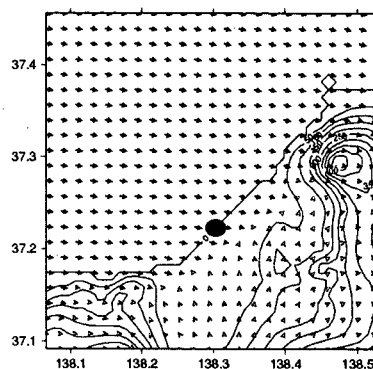
①冬季季節風卓越時



2002 年 1 月 9 日 12 時

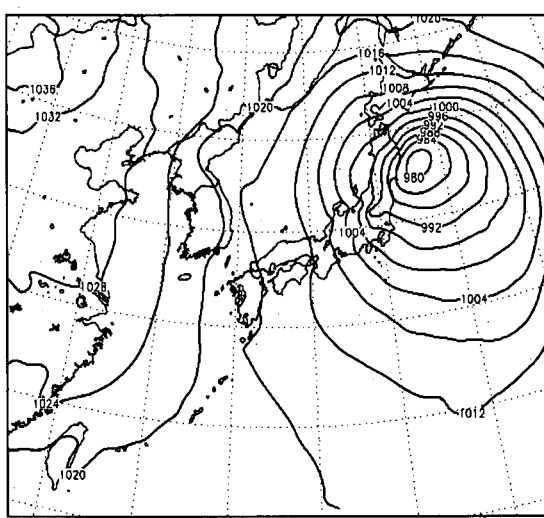
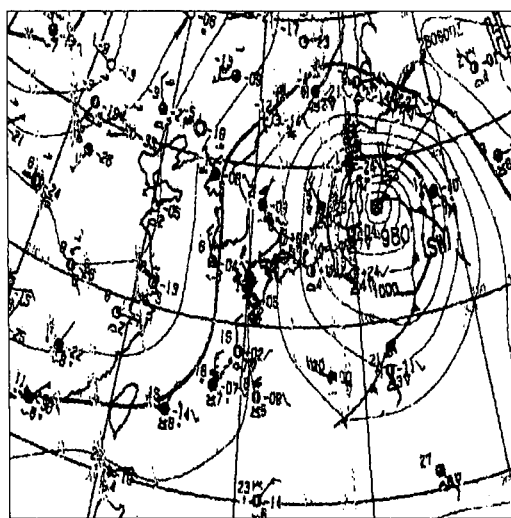


②温帯低気圧発達時



2002 年 1 月 10 日 0 時

図一4 上越・大潟海岸での海上風の観測データと MM 5 の計算値、客観解析データとの比較 (左) および MM 5 で計算された①季節風卓越時の風速ベクトル (右) (●は観測点 OWO-TOP の位置を示す)



図一5 ②温帯低気圧が発達しながら移動している場合の、1 月 27 日 6 時 UTC の実際の天気図(左)と MM 5 の計算結果による気圧配置 (右) の比較

入により、NCEP/NCARの客観解析データをそのまま用いる場合に比べて、約15 m/sの平均風速場で誤差平均値が2.36 m/sから0.38 m/sに改善される。

(2) 風域場の空間的变化特性

図-4の右図に示すように、上越・大潟海岸の地形的な特性としては、北東端(米山崎)と南西端(郷津岬)にヘッドランド(岬)があり、その背後は、それぞれ600 m, 300 m高度の山岳地形となっている。図-4には、MM5の計算による季節風時の地上風の計算結果の一例を風速ベクトルで示してある。風域場の空間的变化特性としては、海上では風速はほぼ一定で、海からの風は陸上の山で弱められ、北東端でその影響が顕著にあらわれている。日変化では、海陸風が再現されており、季節風の弱い日(1月10日0時頃)には海岸線を超える陸風が再現されている。

図-5に、温帯低気圧が発達しながら移動している場合の、1月27日6時UTCの地上天気図とMM5による気圧配置の計算結果との比較を示す。気圧分布は地上天気図とよく一致しており、発達しながら移動する温帯低気圧の場合にもメソスケールでの気象の計算が可能で、地上風の時空間分布も広域海浜流計算に適用できるオーダーで再現が可能となると結論付けられる。

5. 結 語

以上、冬季季節風時の日本海沿岸域の風域場を再現するため、NCEP/NCAR客観解析データの再現性、さらにメソスケール気象モデルMM5による沿岸海上風域場の再現性について検討を行った。得られた主な成果は以下のようである。

(1) NCEP/NCARの客観解析データは、海上風観測データの傾向は再現しているが、観測値と比べて風速の変化が緩やかで、強風時の風速は観測値よりも小さく、

弱風時には大きくなっている。

(2) MM5の計算をすることによって沿岸部の海上、陸上風場の再現精度を極めて効果的に向上させることがわかった。NCEP/NCARの客観解析データをそのまま用いる場合に比べて、約15 m/sの平均風速場で誤差平均値が2.36 m/sから0.38 m/sに改善された。

(3) MM5の移流項の差分スキームは平滑化を入れた中央差分で、移流特性の再現性に問題がある。TVDスキームに改良することで改善されることを示した。MM5の計算負荷は大きく、波浪場や広域海浜流場の数値モデルとの相互作用を入れたモデル化のため、並列計算による計算効率の向上を検討する必要があるが、現在の段階では、MM5の並列計算効率はよくない。並列化による大気・海洋の相互作用モデルの構築が今後の課題である。また、バックグラウンドデータとして、NCEP/NCARの客観解析データ以外にもECMWFや気象庁のGPVを用いた場合の検討も必要である。さらに、リアルタイム予測への対応等、今後検討すべき問題も多い。なお、本研究は、科学研究費(基盤研究(B)(2), 14350266)の研究成果の一部である。

参 考 文 献

- 大澤輝夫・竹山剛生・安田孝志(2001): メソ気象モデルと台風ボーガスを用いた伊勢湾台風時の風の場のシミュレーション, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 281-285.
- 越塚誠一(1997): 数値流体力学, 培風館, pp. 24-51.
- 山下隆男・路明・榊原 弘(2000): 砕波による海面せん断応力を導入した吹送流の数値解析モデル, 海岸工学論文集, 第47巻, pp. 121-125.
- Grell, G. A., J. Dudhia, and D. R. Stauffer (1994): A description of the 5th generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5), NCAR Tech. Note, NCAR/TN-398+STR, pp. 122.