

気象予報情報の潮流予測への 適用に関する研究

STUDY ON NUMERICAL PREDICTION OF TIDAL CURRENT USING FORECASTED WEATHER DATA

西田 渉¹・野口 正人²・Dimitri P. Solomatine³
Wataru NISHIDA, Masato NOGUCHI and Dimitri P. SOLOMATINE

¹正会員 博 (工) 長崎大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521長崎県長崎市文教町1-14)

²フェロー 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (同上)

³Ph. D, Associate Professor, UNESCO-IHE Institute for Water Education, Department of Hydroinformatics and Knowledge Management (P.O.Box 3015, 2601 DA, Delft, The Netherlands)

The environmental impact assessment is becoming very important with increased public awareness to the environmental issues. In many cases, future conditions of water environment are evaluated referring to the results obtained from numerical simulations that are carried out based on the possible scenario. However, it is quite difficult to set some computational conditions in detail. In this study, to predict the tidal currents at coastal area, firstly, the numerical simulation model has been developed. This model was calibrated using global optimization technique named ACCO. Its accuracy of predicted result related to the tidal motion in Shimabara Bay was shown. Following, the tidal current simulation was carried out using weather data forecasted by mesoscale model, MSM. The calculated results show that the tidal motion of this bay is changed strongly affected by the wind blowing on the water surface, and temporal and spatial variation of meteorological condition should be adequately taken into account for the precise prediction of material transportation. Furthermore, from the results obtained by simulations regarding the uncertainty of forecasted weather data, it seems that uncertainty analysis will be required to evaluate the accuracy of predicted results.

Key Words : numerical simulation, tidal current, forecasted weather data

1. はじめに

沿岸域の環境開発を実施する上で、環境影響に関わる事前評価が大切であることは言うまでもない。また、環境に対する社会的な関心が高まっている昨今では、開発行為に伴う影響を軽減させるための事後の管理も重要になっている。一般に、事後の環境の状態は、環境影響評価の中で、数値シミュレーション等によって、予測・評価されているわけである。一方で、事前予測に関連しては、その実施に必要な、気象条件や、あるインパクトに対する環境影響の発現の速さといった事柄に関して、データの蓄積と解析によって多くの科学的知見が得られてきているとはいえ、それらの中長期的な変動を正確に見積もることは簡単なことではない。著者らは、沿岸域における事後の環境管理をより適切に行うには、当該水域周辺における流れの状態を、逐次的に考慮した管理が

必要であると考え、これまでに、数値シミュレーションモデルを用いた潮流の実時間的な予測手法の構築を試みてきている^{1,2)}。ここで、実時間的な予測に限ったことではないが、潮流の数値シミュレーションの際には、開境界での潮位や海面上を吹く風の時空間分布等が計算条件に適切に反映されておかなければならない。さらに、潮流の実時間的、短時間的な予測にあつては、上述の条件をどのように見積もっておくかが問題となる。

ところで、日本周辺における気象の実況は、現在、地上・海上気象観測や気象レーダ観測等による計測結果に基づいて把握され、それと併せて、気象庁においては、数値予報モデルを用いて気象現象に関する予測シミュレーションを行っている^{3,4,5)}。後述されるように、この予測データの一部は、オンラインで入手可能であり、海域上での気象要素の予報値もデータに含まれていることから、潮流の予測に有用な情報資源になるものと思われる。本研究では、上述の特徴をもつ気象予報データの

活用を図ることとし、このデータの潮流のシミュレーションへの適用を試みる。また、予測計算の実施にあたって生じる問題点について検討することとした。

2. 潮流の数値モデルの概要と検定

(1) 数値モデルの概要

潮流の予測モデルは、これまで著者らによって開発されてきた三次元レベルモデルである。ここで、流れの基礎方程式としては、以下に記される連続方程式と運動方程式とが取り上げられている。また、流体の密度は、水温、塩化物イオン濃度によって変化するものとされており、各物理量に関する収支式も基礎式に含められている。

連続方程式

$$\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} + w_{l-1} - w_l = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(u \cdot v)}{\partial y} + uw|_{l-1} - uw|_l \\ = fh - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ + \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{l-1} - \varepsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_l \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot u)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot v)}{\partial y} + vw|_{l-1} - vw|_l \\ = -fuh - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon_x h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon_y h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{l-1} - \varepsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_l \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 u, v, w : x, y, z 軸方向の流速、 h : 層厚、 f : ($=2\omega \sin\phi$) コリオリの係数 (ω : 地球の自転の角速度、 ϕ : 緯度)、 ρ : 流体の密度、 ρ_0 : 流体の基準密度 (水温 20°C における水の密度)、 g : 重力加速度、 P : 流体の圧力、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: x, y, z 軸方向の渦動粘性係数、である。

水平方向の渦動粘性係数はPrandtlの混合距離モデルの形で評価し、乱流拡散係数はRichardsonの4/3乗則によって与えることにした。鉛直 (z 軸) 方向については、Munk and Anderson 型のRichardson数の関数として評価されている⁶⁾。水底面での摩擦応力については、Manning則が適用している。また、水面上の気流が流れに及ぼす影響は風速を用いて次式のとおりに評価された。

$$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \gamma_a^2 \rho_a (W_x^2 + W_y^2)^{0.5} \cdot (W_x, W_y) \quad (4)$$

ここに、 γ_a : 自由水面上での抵抗係数、 ρ_a : 空気の密度、 W_x, W_y : 水表面上を吹く風の x, y 軸方向の風速、である。各基礎方程式の離散化にあたっては、差分格子にStaggered 格子系を採用した上で、陽形式の有限差分法によって離散化されており、空間差分にはDoner Cell法が、時間軸の差分にはLeap-Frog法が適用されている。

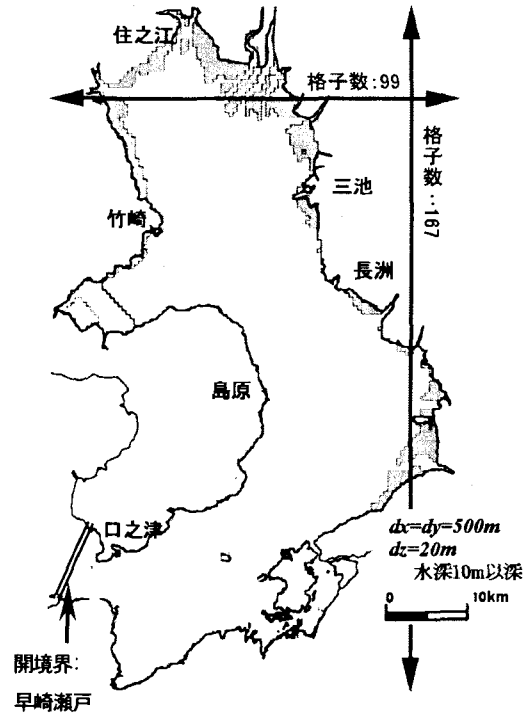


図-1 計算領域の概要図

(2) 計算領域

本研究では、計算の対象領域として、島原湾を取り上げている。本領域の地形データについては、今回、一般に公開されているデータを有効活用する体制を整えることも研究の目的の一つに考えており、海上保安庁海洋情報部から配信されている500mのメッシュ水深データ (JODC-Expert Grid data for Geography 500m 以降、J-EGG500と記す) を海底地形のデータとして利用することにした⁷⁾。J-EGG500は、各種の海洋調査機関によって計測された水深測量データを、水平方向に約500m間隔のメッシュ情報としたデータセットである。このデータは、該地点の水深が緯度・経度をベースに整理されているので、緯度・経度系から潮流の計算に採用されている直線直交座標系への変換をWGS-84測地系でガウス・クリューゲル図法によって行うことにした。なお、J-EGG500のデータのみでは、海域と陸域との境界を特定できないために、別途、市販の電子地図帳から境界座標の情報 (経度、緯度) を取得することで、計算に必要な地形情報を補完している。また、J-EGG500では、水深の最小単位が1mであることから、島原湾沿岸の干潟のような、比較的平坦な地形については、地盤高の緩やかな変化が十分には表現されていない。そのため、このような領域については、海図を参考に地形情報の補間・修正処理が行われた。

以上の手続きで得られた計算領域の概要は、図-1に示されるとおりである。早崎瀬戸に相当する開境界には、潮位変化が計算条件として与えられ、島原湾南部の八代海につながる瀬戸には弱い反射波の条件が与えられた。空間方向の差分間隔は、水平方向に $dx=dy=500\text{m}$ とされ

ている。鉛直方向については、島原湾湾奥で潮差が大きいことを考慮して、T.P.-10.0m以浅を表層とし、それ以深を一様の層厚($dz=20.0m$)に分割している。時間差分間隔は、 $dt=2.0sec$ とされた。

(3) モデルの検定

数値モデルの現地への適用に先立って、本モデルに含まれるモデルパラメータの同定を行った。対象としたモデルパラメータは、水平方向並びに鉛直方向の混合距離モデルにある混合長に相当する係数(l_h, l_v)とManningの粗度係数(n)である。なお、粗度係数は、全計算領域体に一定値を与えている。検定は、開境界にM2潮に相当する潮位を与えた計算から求められた島原湾の主要港湾における潮差と潮時差に基づいて行われた。検定手法としては、Solomatineによって提案された大域的最適化手法の一つであるAdaptive Cluster Covering Method が適用されている⁹⁾。著者らは、これまでも他の最適化手法を用いた数値モデルの自動検定を試みているが、本手法を採用したのは、最適解付近への収束が比較的早く、今回の様に、一回のシミュレーションに要する時間が比較的長い場合には、検定時間を短縮させる点から有利であると判断した理由によっている⁹⁾。なお、この検定では、試行点並びにクラスターの数を36点、3個としている。結果の適合性については、基本的に、計算値と参考値¹⁰⁾との差の二乗値の総和で評価されているが、ここでは、更に、潮差と潮時差の空間的な再現性を評価結果に反映させるための重み関数が導入されている。潮差と潮時差は、潮流のシミュレーションを開始してから4潮汐以降の結果を調和解析して求められている。

モデルの検定の結果を示すと表-1のとおりである。三つのモデルパラメータは、 $n=0.017ec^{1/3}$ 、 $l_h=35.53m$ 、 $l_v=3.71m$ の様に探索された。検定は島原、三池、竹崎、住之江の各港湾でのデータについて行われた。同表には、検証用のデータとして長洲港での結果も記されている。参考値と比べると、潮時差が全体的に10分程度遅れているものの、島原湾での潮差は湾口から湾奥にかけて次第に大きくなり、住之江港付近で最大となることが本モデルによって表現されていることが分かる。計算値と参考値との差については、開境界の設定位置や、住之江港付近にあっては流入河川との水収支のモデル化がなされていない、等に起因しているとも考えられる。なお、潮流流の時空間分布については、十分な数のデータを準備で

表-1 潮差と潮時差

	島原	三池	竹崎	住之江	長洲
潮差 (m)	2.64	2.98	3.01	3.22	2.78
	2.69	3.13	3.13	3.44	2.93
潮時差 (分)	18.8	23.8	24.0	51.5	20.3
	10	15	15	30	15

※計算値：上段、参考値：下段(潮位表改正数から算出)

きなかったために検定対象の項目に上げておらず、再現性の定量的な評価は行っていない。これらについては、再現性向上のための課題となっていることを記しておく。

3. 気象予報データを用いた潮流解析

(1) 気象予報データの概要

本研究で利用する気象予報データは、気象庁新数値解析予報システムによって解析された結果であり、気象業務法に基づいて、気象庁から気象業務支援センターを経由して配信される数値予報データである^{4), 11)}。

このデータには、予報結果の利用目的に応じて、予報範囲や最大予報時間の異なる数種類の予報モデルによって算出された予報値があるが、ここでは、それらの中で、空間方向の予報データの間隔が最小であるメソ数値予報モデル(Mesoscale Model 以降、MSMと記す)の予報値が用いられた。MSMによる気象現象に関する予測計算は、東経：120°～150°、北緯：22.4°～47.6°の領域を対象に、緯度・経度の格子系に基づいて実施されている。予報計算は、00, 06, 12, 18UTC(協定世界時)を初期時刻として、一日あたり4回行われている。予報データの間隔は1時間であり、18時間後までの気象変化が予測されている。予報される気象変数要素は、地上物理量として、海面更正気圧、風、気温、相対湿度、時間降雨量、雲量であり、これらの結果が、指定の資料通報式に変換されている。なお、定時に行われる4回の計算では、四次元変分法による初期値のデータ同化がなされており、予報精度の向上が図られている。MSM予報値の潮流計算への利用にあたっては、MSMの格子間隔が経度方向に0.125度、緯度方向に0.10度(地上間隔とすると約10km)であり、J-EGG500に基づく空間解像度との間に20倍程度の差があることから、双一次内挿によって計算格子点での値が求められた。

(2) 開境界条件の評価

図-1に示される海域を対象にした潮流の計算では、開境界である早崎瀬戸で潮位変化が与えられる。計算領域での気象変化を考慮した潮流解析では、潮位条件に気象状態の変化による偏差成分も考慮されねばならない。本研究では、口之津港で観測された潮位偏差をニューラルネットワークを使って解析し、後述される潮流のシミュレーションの境界条件に反映させることとした。

ここで、解析に用いた潮位偏差の実測資料は、気象庁から報告されている2004年5月7日9:00から6月26日12:00までの1時間間隔のデータである¹²⁾。ニューラルネットワークは、中間層を1層とする3層階層型とされ、中間層には、8個のユニットが配されている。バックプロパゲーションについては、慣性項を導入することで、学習効率の高速化が図られている。入力データについて

は、当初、大気圧、緯度・経度方向の風速、時間降雨量、過去6日の日降雨量、として解析を行っていたが、潮位偏差の実測値には、M2潮に連動するような変動成分が存在し、上記の諸量だけでは十分に評価できなかったため、更に潮位と天文推算潮位から算出した潮位の時間変化率を入力データに加えて解析されている。

以上の条件によって、求められた潮位偏差の計算結果

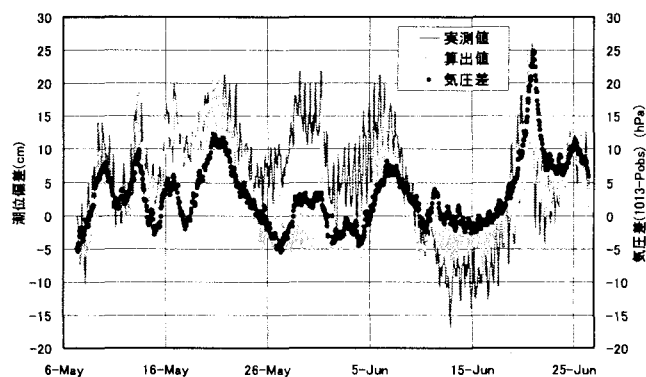


図-2 口之津港における潮位偏差の実測値とニューラルネットワークによる評価結果

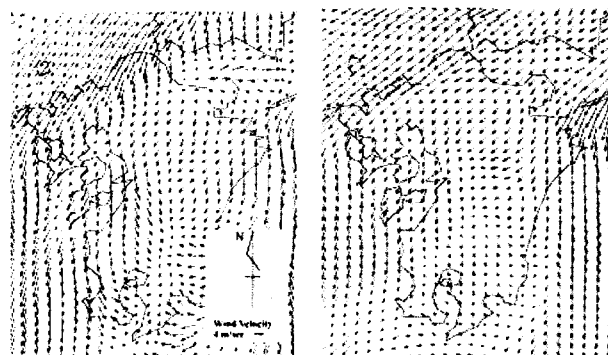
を示すと図-2のとおりである。同図には、基準大気圧を1013hPaとした時の実測値との差(1013-P_{obs}) 気圧偏差が併記されている。ニューラルネットワークの学習回数は10万回である。この結果によれば、5月26日から6月4日までの潮位偏差の再現性が乏しい。この期間については、気圧差の結果からも分かる様に、当該地域の気象変化が然程大きくなかったにも拘らず、15~20cmの潮位偏差を生じており、上記のデータ以外にも考慮されるべき要因があることを示唆しているものと思われる。一方で、この期間を除けば、5月末までの変化や6月20日から22日にかけて九州の東方海上を通過した台風6号に影響された潮位の上昇、細かい変動等を良く評価していることが分かる。次節に示される潮流のシミュレーションでは、気象・潮位に関する計算条件から生じる開境界での潮位偏差を、このニューラルネットワークを用いて評価することにした。

(3) 潮流計算の結果と考察

潮流のシミュレーションの計算条件に用いられた予報値は、2004年6月13日00UTCを初期時刻として予報された1時間毎の物理量である。図-3には、MSMで予報された九州周辺での風速ベクトルの空間分布が示されている。これに基づいて島原湾付近の予報結果を記すと、湾の北部海域では概ね北東からの風が、南部海域では北寄りの風が吹くとされている。また、大気圧は約1013hPaであり、島原湾とその周辺地域に降雨はないものと予報されている。

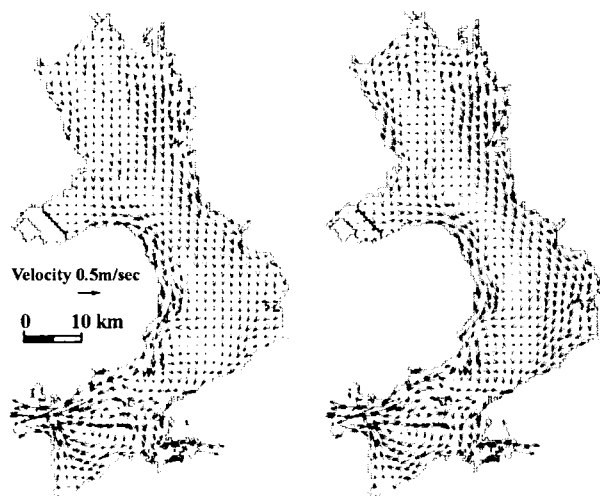
ここで、まず、気象条件の導入に伴って生じる島原湾内の基本的な流況の変化を明らかにするために、先述の気象条件(条件①)と、大気圧を時空間的に一様(1013

hPa) 且つ無風状態とした条件(条件②)の下で計算を行い、結果の比較を行った。これら二種類の計算条件から得られた流速ベクトルの空間分布を示すと、図-4のとおりである。なお、二つの結果は、湾奥部での潮汐がほぼ満潮になった時点に相当している。これらの図から、与えられた気象条件の変化を受けて、条件①では、島原湾の東部並びに湾奥部において、沿岸に沿って流れる傾向が強くなっていることが分かる。また、この時、諫早湾では、締切堤の周辺を含めた、全域で流速が速くなるようである。ここで、島原湾における潮位の時間変化を



(a) 00 UTC (b) 6時間予測値

図-3 風速ベクトルの空間分布



(a) 条件① (b) 条件②

図-4 流速ベクトルの空間分布

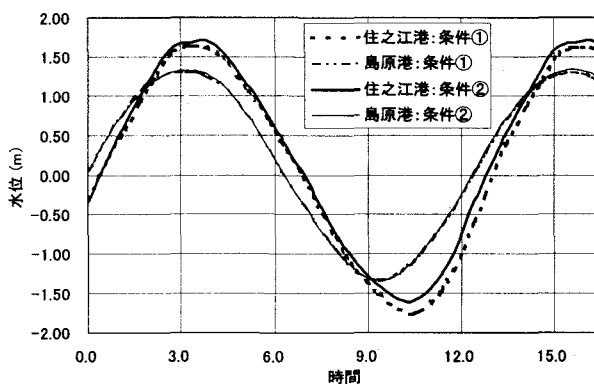
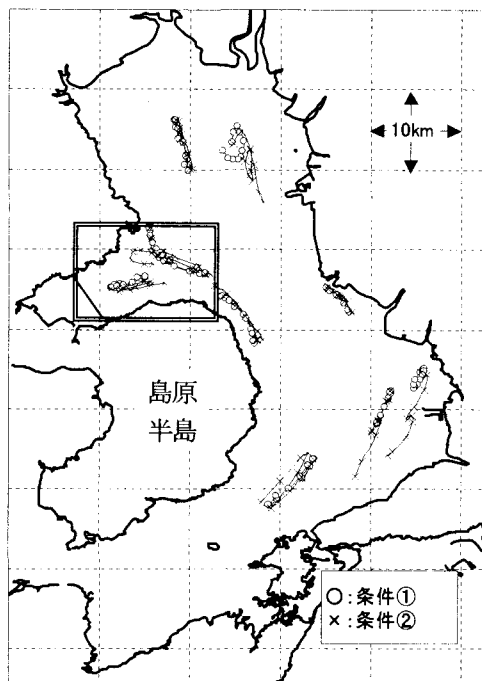


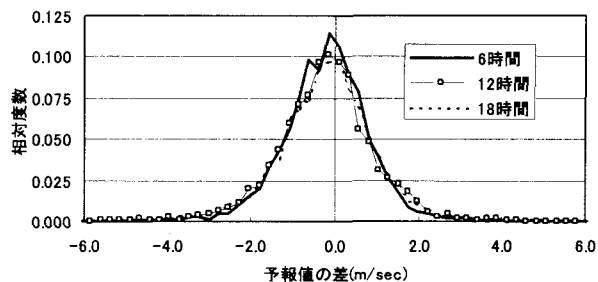
図-5 潮位の時間変化



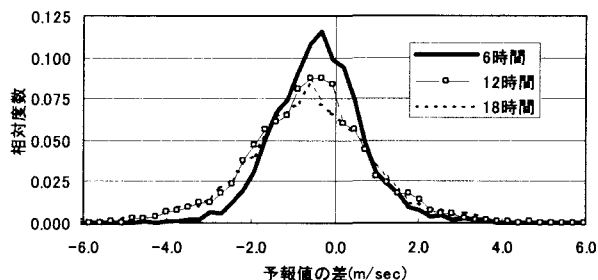
図－6 水粒子の移動軌跡

(図中の二重枠線は、図－8の参照位置を表す)
 示すと図－5のとおりである。図に示されるように、湾内の潮位変化の違いは住之江港において顕著であり、条件①の満潮時と干潮時の潮位は、条件②に比べて、それぞれ9cm、15cm低下している。また、条件①に用いたMSMの予報結果では、風が島原湾の海面上を、概ね北から吹くものとされていたこともあり、この風に対して逆向きの潮流が発生する上げ潮時に潮位の変化が遅れ、下げ潮時には変化が早まることも示されている。住之江港での潮位の変化は、当該地点の風と共に、湾内の潮汐の全体的な傾向が反映した結果であると推察される。気象条件を反映した潮流の変化は、図－6に示されるように、湾内における物質の空間的な移動軌跡に大きな違いを生じさせている。図示された移動軌跡は、水粒子を表層(5m)に設置した時の結果であり、マーカーは1時間2分毎の水粒子の位置を表している。すなわち、水粒子は、風に関する計算条件に影響を受けて、初期に設定された位置から次第に南下しつつある。この傾向は、流向と流速に大きな変化が現れた島原湾の東部沿岸や諫早湾湾口部において顕著であり、予測位置は最大10km程度離れている。以上の計算結果から、島原湾の潮流は、早崎瀬戸を通じた外海との水交換によって主に発生していると考えられるが、一部の海域では、海面上を吹く風によって物質の流送過程が変化することが予想されるから、島原湾での潮流や物質の流送状態を精度良く評価するためには、やはり海上の気流の時空間変化を適切に把握し、計算条件に取り入れておくことが重要であるといえる。

ところで、気象予報値は、数値モデルによって解析された結果であり、予報間隔が長期になると、ある程度の予報誤差が生じるものと考えられる。ここで、2004年6



(a) 経度方向の風速



(b) 緯度方向の風速

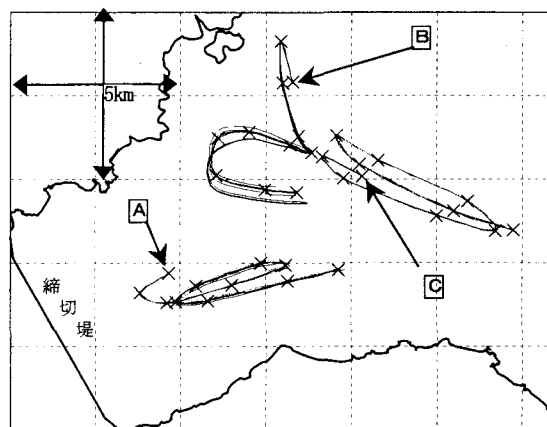
図－7 予報誤差の頻度分布

(2004年6月1日00UTC～26日18UTCの結果に基づいて算出)

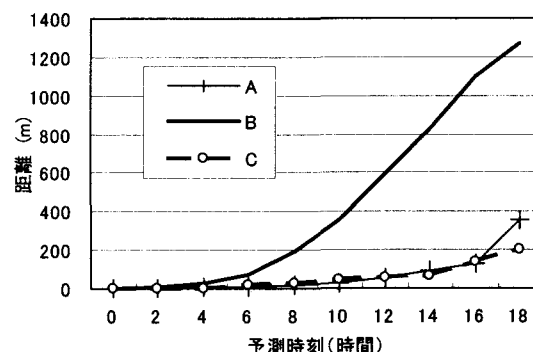
表－2 計算条件

条件	①	②	③	④	⑤	⑥
緯線方向成分	+2	-2	+2	0	-2	0
経線方向成分	+2	-2	0	+2	0	-2

※各成分の予報値に加えられた変化量(単位:m/sec)



図－8 諫早湾周辺の水粒子の移動軌跡



図－9 マーカー(×)からの距離の時間変化

(A, B, C は図－8の各地点に設定された水粒子に相当する)

月1日から26日に取得した島原湾周辺の予報データから求めた6時間、12時間、18時間先の予報結果の誤差を示すと図-7のとおりである。誤差の算出にあたっては、一日に4回行われる予測計算の初期値を参照している。

この図によると、風速の予報値には、約 $\pm 2.0\text{m/sec}$ の範囲の差を生じることが多く、緯度方向の風速については、経度方向のそれよりも予報時間の長期化するにつれて、誤差が大きくなっている。MSMには、気象予報業務に必要な総観スケールの気象変化を把握することも目的の一つとされるだろうから、限られた特定のGrid Pointでの結果のみを比較して予報精度を議論することはしないが、気象予報値の活用にあたっては、こうした予報誤差に対して相応の注意が必要となる。以下では、とくに風の予報値に含まれる予報誤差が潮流シミュレーション結果の影響に与える影響について検討した。この計算にあたっては、図-7の結果を参考にして、MSMによる緯線・経線方向の風の予報値に、 $\pm 2.0\text{m/sec}$ の変化を与えた表-2に示される6種類の条件で行われた。

図-8は、計算から求められた諫早湾とその周辺海域における水粒子の移動軌跡である。この図には、比較のために、予報値に変化を与えない場合の2時間毎の位置が、マーカー(×印)で記されている。矢印は、初期の水粒子の位置を指している。図-9には、計算の初期に諫早湾の各地点に配置された水粒子について、各予測時刻における×印からの距離が示されている。これらの図から、水粒子の移動軌跡の形状が計算条件毎に大きく異なることはないものの、それらの予測位置は予報時間の経過とともに変化し、注目する場所に応じて、18時間後の予測結果には数百mから1km程度の違いを生じることが示されている。諫早湾においては、湾口北部に与えた水粒子の移動結果に最も大きな違いが見られる。ここでは、風の予報誤差によって生じる水の滞留時間の変化等については評価してはいないが、湾内の水質の空間分布に少なからず影響を与えることも予想されるため、MSM等による予報値を利用する際には、こうした予報誤差を認識した上で、予測結果を評価する手法の導入が必要になるものと思われる。

4. おわりに

本研究では、内湾を対象にした潮流の数値シミュレーションに、気象予報モデルの一つである、MSMによって求められた気象予報値の適用を試みた。

まず、島原湾を対象に行われた潮流のシミュレーション結果によると、風と大気圧の時空間分布を計算条件に導入したことで、湾内の流向や潮位の時間変化に顕著な違いを生じることが示された。ここでは、限られた予報値による検討に留まったが、データの蓄積とそれに基づく解析を進めて、季節的な特性を明らかにする必要がある。

つぎに、気象予報値に含まれる予報誤差については、水粒子の移動結果に関して少なからず影響を及ぼすことも示された。MSM等による予報値は、今回実施した計算例を始めとして、比較的広い海域を対象にした潮流の短時間的な予測計算に有用な情報資源であると考えられるが、実的な利用にあたっては、この予報誤差によって生じる変化に対して、相応の配慮が必要であると考えられる。ただ、MSMについては、平成16年9月から非静力学モデルの運用が開始されており¹³⁾、こうしたモデルの精密化による予測精度の向上を期待するところである。

今後は、実測値との比較を行うことで、潮流の予測結果の検証を行う必要がある。また、気象予報値等、入力データに含まれる誤差が予測結果に与える影響については、その定量化について検討していきたいと考えている。

謝辞：気象予報値の利用にあたっては、古谷敏之氏をはじめとします気象業務センター配信事業部の方々に適切なアドバイスを賜りました。記して深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 野口正人, 西田渉: 沿岸域の水環境管理の支援を目的とした流れの数値予測手法の構築, 水工学論文集, 第44巻, pp. 1179-1184, 2000.
- 2) Nishida, W., Noguchi, M. and Nagata, H.: Development of the tidal current forecasting system on internet, *Proc. of 6th Int'l Conf. on Hydroinformatics*, pp.1941-1946, 2004.
- 3) 二宮洗三: 数値予報の基礎知識, オーム社, 2004.
- 4) 気象庁: 新数値予報資料等説明会資料, p. 36, 2000.
- 5) 気象庁: 新数値予報資料等説明会資料付録, pp. 4-26, 2000.
- 6) 平野敏行監修: 沿岸の環境圏, フジテクノシステム, pp. 674-680, 1998.
- 7) 日本海洋データセンター: ホームページ 海洋データ情報の閲覧・提供サービス, URL <http://www.jodc.go.jp>, 2003.
- 8) Solomatine, D.P.: Two strategies of adaptive cluster covering with decent and their comparison to other algorithms, *J. of Global Optimization*, Vol.14 (1), pp.55-78, 1999.
- 9) 西田渉, 松下紘資, 野口正人, Solomatine, D.P.: 遺伝的アルゴリズムによる水質モデルの検定とその適用性に関する研究, 水工学論文集, 第48巻(2), pp. 1321-1326, 2004.
- 10) 海上保安庁: 平成8年潮汐表, 第1巻, 書誌第781号, 1996.
- 11) 気象庁予報部: メソ数値予報の実用化に向けて, 数値予報課報告, 別冊第44号, p. 79, 1998.
- 12) 気象庁: ホームページ 海洋の情報資料, URL <http://www.data.kishou.go.jp>, 2004.
- 13) 気象庁予報部: 配信資料に関する技術情報(気象編), 第167号, 2004.

(2004.9.30 受付)