

## 気象予報情報に基づく湾内の潮流予測に関する研究

西田 渉\*・野口 正人\*  
永田 久夫\*\*Numerical Prediction of Tidal Current in Short-term  
using Forecasted Weather Data

by

Wataru NISHIDA\*, Masato NOGUCHI\*  
and Hisao NAGATA\*\*

The environmental impact assessment is becoming very important with increased public awareness to the environmental issues, and the influences resulted from human impacts should be predicted as accurate as possible. 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, such as long-term meteorological changes, in detail. In this study, to predict the tidal currents at coastal area in short-term, firstly, the numerical simulation model has been developed, and its applicability to real sea was shown. Following, a system to simulate the tidal current using weather forecasting data was proposed.

## 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間違いない。それと共に、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管理も重要になっている。一般に、事後の環境管理は、環境影響評価と環境モニタリング等から得られる最新の情報とに基づいて実施されているわけであるが、その一方で、事前予測に関連して言えば、その実施に必要な、例えば、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評価することは、技術的に難しいのが現状である。

本研究では、事後の環境管理をより適切に進めてい

くには、最新の環境情報を可能な限り考慮したアクティブな環境管理が必要であると考え、その実施に必要な情報の提供を試みようとするものである。具体的には、近年、有償/無償で入手できる各種の環境情報を積極的に活用することに配慮しつつ、気象予報データを用いた沿岸海域における潮流の短期的な予測を試みることにした。

## 2. 潮流の数値モデル

潮流の予測に用いたモデルは、これまで著者らによって開発されてきたものであり、本モデルでは、海域に対して、三次元レベルモデルが適用されている<sup>1,2)</sup>。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、浮遊懸

平成16年4月16日受理

\*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

\*\*大学院生産科学研究科博士前期課程環境システム工学専攻  
(Graduate School of Science and Technology)

濁物質濃度によって変化するものとされており、上述の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

$$\frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} + w_{i-1} - w_i = 0 \quad (1)$$

運動方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial uh}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(u \cdot vh)}{\partial y} + uw|_{i-1} - uw|_i \\ = fvh - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x h \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y h \frac{\partial u}{\partial y} \right) \\ + \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{i-1} - \epsilon_z \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_i \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial vh}{\partial t} + \frac{\partial(v \cdot uh)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot vh)}{\partial y} + vw|_{i-1} - vw|_i \\ = -fuh - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \epsilon_x h \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \epsilon_y h \frac{\partial v}{\partial y} \right) \\ + \epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_{i-1} - \epsilon_z \frac{\partial v}{\partial z} \Big|_i \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 $u, v, w$  :  $x, y, z$  軸方向の流速、 $h$  : 層厚、 $f$  : ( $=2\omega \cdot \sin \varphi$ ) コリオリの係数 ( $\omega$  : 地球の自転の角速度、 $\varphi$  : 緯度)、 $\rho$  : 流体の密度、 $\rho_0$  : 流体の基準密度 (水温20℃における水の密度とされた)、 $g$  : 重力加速度、 $P$  : 流体の圧力、 $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$  :  $x, y, z$  軸方向の渦動粘性係数、である。

水平方向の渦動粘性係数、乱流拡散係数は、それぞれ Prandtl の混合距離第二仮説、Richardson の4/3乗則によって計算がされている。鉛直方向 ( $z$  軸方向) については、Richardson 数の関数として以下のように評価されている<sup>3)</sup>。

$$\epsilon_z = \epsilon_0 \cdot (1.0 + 5.2 Ri)^{-2} \quad (4)$$

$$K_z = (1.0 + 10/3 Ri)^{3/2} / (1.0 + 10 Ri)^{1/2} \quad (5)$$

ここに、 $\epsilon_0$  : 中立状態での渦動粘性係数、 $Ri$  : Richardson 数、である。水底面での摩擦応力については、Manning 則が適用されている。また、水面上を吹く風が流れに及ぼす影響については、風速を用いて次式のとおり評価された。

$$(\tau_{sx}, \tau_{sy}) = \gamma_a^2 \rho_a (W_x^2 + W_y^2)^{0.5} \cdot (W_x, W_y) \quad (6)$$

ここに、 $\gamma_a^2$  : 定数、 $\rho_a$  : 空気密度、 $W_x, W_y$  : 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、差分格子にスタッガード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、空間差分にはドナーセル法が、時間軸の差分には Leap-Frog 法が適用されている。

### 3. 入力データ

#### 3.1 地形データ (J-EGG500)

本研究では、計算の対象領域として、島原湾並びに八代海の全海域を取り上げる。同領域については、海図から直接読み取り、電子化したファイルを既に所有しているが、今回は、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取り上げており、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 : J-EGG500) を海底地形のデータとして利用することにした<sup>4)</sup>。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統合・エラー修正したものを、水平方向に500m間隔のメッシュ情報としたデータセットである。このデータでは、該当地点の水深が緯度・経度をベースに整理されており、ASCII形式ファイルとして提供される。ここでは、このデータを今後、容易に活用していくことに配慮し、シミュレーションモデル用の入力ファイルへの変換処理をVBAでプログラムしたExcelで行った。緯度・経度系から直線直交座標系への変換は、WGS-84測地系を基本とするガウ

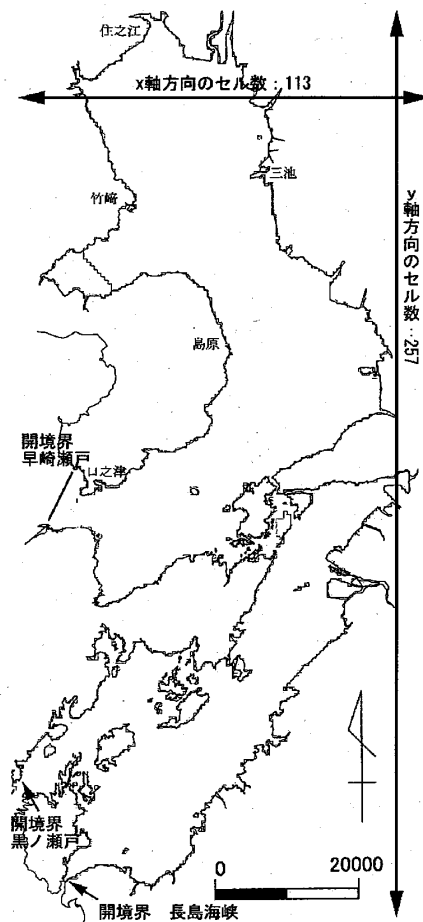


図-1 計算領域の概要

ス・クリューゲル図法によることとした。なお、J-EGG500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情報(経度、緯度)を取得している。更に、J-EGG500では、水深の最小単位が1mであることから、干潟付近での地形が十分には表現されていない。そのために、同領域については、海図を参考にしながら補間・修正処理を行った。

計算領域の概要は図-1に示されるとおりである。J-EGG500を利用していることで、潮流の予測計算の空間方向の差分間隔は、水平方向に  $dx = dy = 500m$  となっている。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、 $dt = 2.0sec$  である。水底の摩擦応力は、Manningの粗度係数によって評価し、全計算領域体に一定値 ( $n = 0.015sec/m^{1/3}$ ) が与えられている。開境界は、早崎瀬戸、長島海峡、黒ノ瀬戸の3ヶ所であり、これらの地点に相等する格子で潮位変化を与えた。

3.2 気象予報データ(MSM データ)

潮流の短時間予測に利用する気象予報データは、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である。このデータには、予報の範囲、目的、最大予報時間に応じて数種類の子報モデルによって算出された予報結果があるが、ここでは、それらのデータの中で空間方向のデータ間隔が最小であるメソ数値予報モデル

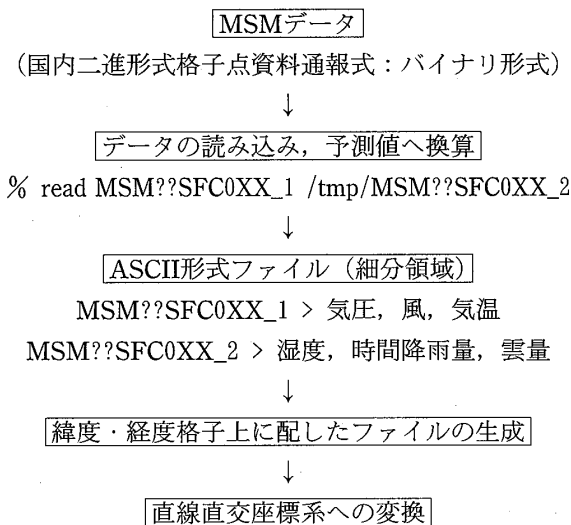
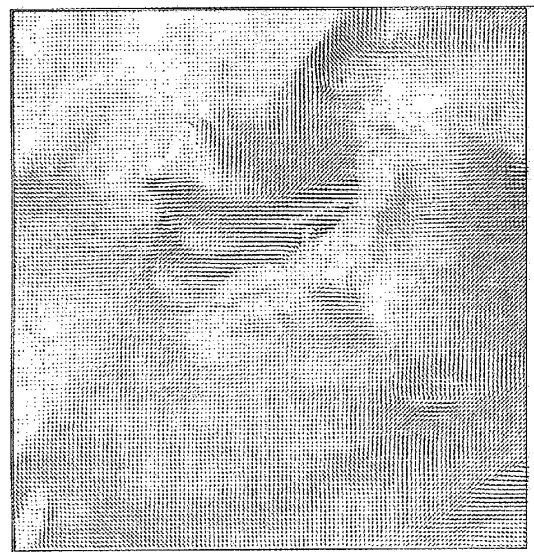


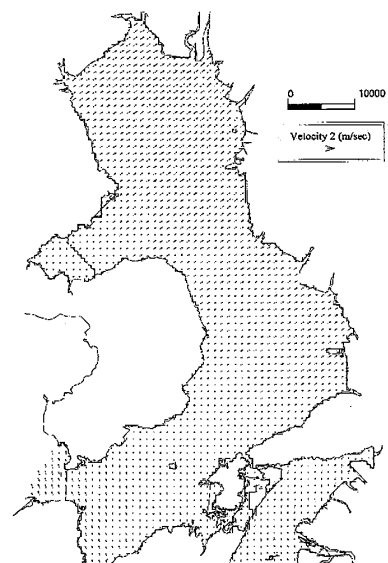
図-2 MSMデータの読み込み・変換の手続き

(MSM) による結果を用いることにした<sup>5,6)</sup>。

MSMによる予報データ(以後、MSMデータと記す)は、基本的に緯度・経度の格子系に基づいたメッシュデータとされ、 $(120^{\circ}E, 20^{\circ}N) - (150^{\circ}E, 50^{\circ}N)$ の領域を対象にしている。このデータの最長予報間隔は18時間であり、この間の1時間毎の気象予報結果が1つのファイルに記録されている。予報情報として取得できる要素は、海面更正気圧、風向・風速、気温、雲量、など多岐にわたっており、水工学の分野を始めとして、広い領域での情報の活用が期待されている。予報データはバイナリ形式のファイルであり、6時間間隔で提供される。データファイルは、0時、6時、



(a)風の分布  
 $((120^{\circ}E, 20^{\circ}N) - (150^{\circ}E, 50^{\circ}N))$



(b)内挿後の風の分布  
 $(N32.07, E 130.09) - (N33.2, E 130.67)$

図-3 MSMデータの処理結果例

12時, 18時 (いずれも UTC である) に更新される. このデータの格子間隔は, 経度方向に0.125度, 緯度方向に0.10度であり, J-EGG500の空間解像度と2倍程度の違いがある. そのため, 前節に記した地形データと併用して計算を行うには, 内挿補間等の処理が必要とされる. ここでは, 図-2に記された手続きで, データファイルのASCII形式への変換を行った後で, 計算格子点のデータを双一次内挿によって内挿することとした<sup>7)</sup>. 以上の処理によって作成されたデータを用いて表示された風の分布は図-3のとおりである.

#### 4. MSM データに基づく潮流計算

##### 4.1 シミュレーションモデルの妥当性の検討

島原湾での潮流をシミュレーションするには, この海域の最大の特長ともいえる干潟での流れの解析条件を整えておく必要がある. 本解析では, 水の移動限界の水深 ( $h_0$ ) を0.0001mとした上で, 隣り合う2つのセルの水深に応じて, 簡略化した運動方程式, 堰の公式, を流況に応じて適用している. ただし, 遡上境界での流れについては, 1回の計算ステップの間に, ①左右の水深が逆転するような水量の移動を許さず, また, ②流出側のセルにある水量を超えない, 条件(式(7), (8))を課している.

$$M \leq \beta \frac{1}{2} \frac{dx}{dt} (H_1 - H_2) \quad (7)$$

$$M \leq (h - h_0) \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

ここに,  $\beta$  : ( $0 \leq \beta \leq 1$ )定数,  $h_0$  : 水の移動限界水深, である.

この他, 流れのモデルについては, 水平方向並びに鉛直方向の渦粘性係数や, 海底面での摩擦係数の設定を行わねばならないが, これらの係数を決定するにあたって, 幾つかの条件下で試行計算を行い, 既存の報告<sup>8)</sup>との適合性を考慮しながら決定することにした. 試行計算の条件は表-1のとおりである. 各計算から求められた島原湾内の主要港湾での潮位変化並びに口之津港を基準としたときの潮時差を示すと, 表-2のとおりである. 島原湾内の潮汐は, 主として早崎瀬戸を経由した海水の流出入によって生じ, 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報告されている. こうした湾内の潮位の時空間変化は, 全ての計算結果に現れており, いずれの条件を適用しても島原湾の潮位変化は大まかに表現されるようである. ここで各計算結果の詳細を比較すると, 条件④において, 潮差が最も大きく, 潮時差も短いことがわかる. これは, 底面の粗度係数の値が

表-1 粗度係数等に関する計算条件

| 条件番号   |    | ①     | ②     | ③     | ④        |
|--------|----|-------|-------|-------|----------|
| 粗度係数   |    | 0.018 | 0.018 | 0.015 | 0.015    |
| 渦動粘性係数 | 鉛直 | 0.03  | 0.01  | 0.03  | 0.02(定数) |
|        | 水平 | 0.075 | 0.005 | 0.03  | 0.03(定数) |

表-2 潮差と潮時差

|     | 条件 | 島原   | 三池   | 竹崎   | 住之江  |
|-----|----|------|------|------|------|
| 潮差  | ①  | 2.68 | 2.79 | 3.00 | 3.12 |
|     | ②  | 2.88 | 2.98 | 3.20 | 3.46 |
|     | ③  | 2.82 | 2.95 | 3.16 | 3.40 |
|     | ④  | 3.05 | 3.19 | 3.50 | 4.03 |
|     | 文献 | 2.71 | 3.11 | 3.16 | 3.44 |
| 潮時差 | ①  | 26   | 29   | 31   | 78   |
|     | ②  | 15   | 16   | 18   | 45   |
|     | ③  | 19   | 21   | 21   | 62   |
|     | ④  | 6    | 6    | 10   | 35   |
|     | 文献 | 13   | 16   | 18   | 34   |

※単位: 潮差(m), 潮時差(min)

小さかったことによるものと思われるが, 条件③の粗度の条件も同値であったことを考えれば, 底面粗度の効果と併せて, 流体に設定した渦動粘性係数の流体運動に与える効果も弱かったためと考えられる. 予測モデルの現地への適用性を向上させようとする, 条件②, ③を参照しながら, 詳細に計算条件を検討する必要があるが, 表-2に記された計算結果と文献値とを比較し, 潮時差について, 両者の差の小さい条件③を以降の計算条件として採用することにした.

##### 4.2 風の効果を考慮した潮流解析の結果

ここで, 潮流の予測モデルの水表面でのせん断応力式に, MSM データから出された風向・風速の時空間分布を入力して求められた結果を示すと, 図-4のとおりである. なお, 同図には, 表層での流速の空間分布が示されている. また, 潮汐の状態は, 早崎瀬戸付近での潮位が低潮位となった時点のものである. 同図には, 比較のために, 風の影響が考慮されていない条件での計算結果も示されている. この計算に用いた MSM データについては, 2004年1月13日に取得された MSM00SFC である. これによれば, 計算領域とその周辺では, 南西からの風が概ね一様に吹くものと予報されている. 図に示された時刻の風速は, 経度方向と緯度方向ともに 4 m/sec 程度である.

これらの結果を比較すると, 諫早湾調整池での流れを始めとして, 島原半島の東方沿岸や三角半島の北岸付近での流れに差異が現れている. 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

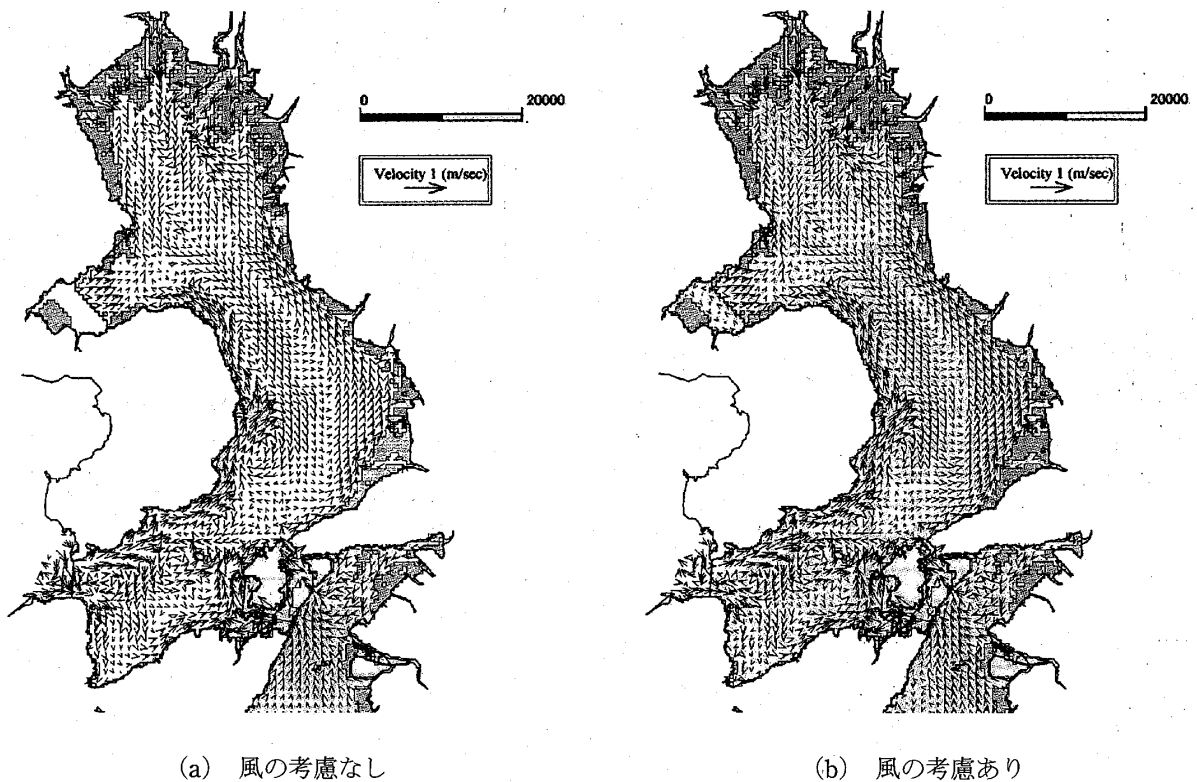


図-4 島原湾での潮流の予測結果  
(MSM データ : 13/01/04 MSM00SFC018\_1)

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。風が吹くことによって、島原湾内の流れや物質の流送過程が、具体的にどう変化するかについては、今回の研究では調査しておらず、詳細な検討をしたいと考えている。また、実測結果と比較することで、風を考慮した時の流れの予測精度についても検討する必要がある。

### 5. おわりに

各種の環境情報について、その重要性を考えると、データの利用のしやすさまでを考慮したデータバンキングが、これからも積極的に進められるべきと考えられる。併せて、沿岸域等の環境管理をより一層支援するためには、データを十分に活用する体制を整え、意思決定支援システム (DSS) として構築しておくことも大切であろう。

本研究では、島原湾ならびに八代海における潮流シミュレーションに関して、各機関から配信されている環境情報を併用した流動の予測を試みた。その結果、公開されているデータについて、海底の地形データは、一部に適切な処理が必要であり、そのままでは計算に使えないといった問題点もあるが、計算対象領域の特

定と基本的な情報を準備する作業量は確実に軽減されている。気象予報データについては、あくまでも気象予報数値モデルによる解析結果であり、実際の運用にあっては相応の注意が必要であることは言うまでもないが、今回実施した例など、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は今後活用されるべき有用な情報資源であると考えられる。島原湾での潮流については、主に外海との水交換によって生じるが、やはり、一部の海域で風の流れに与える影響が無視できないことがわかった。今後は、先述されたように、実測値との比較を行うことで、潮流の予測精度を一層向上させる必要がある。また、予測結果の有効利用手法についても検討していきたいと考えている。

**謝辞** 本研究の一部は、平成15年度日本学術振興会科学研究費若手研究(B) (代表者：西田渉, No.14750432) からの助成を受けて行われたことを記し、関係各位に深謝申し上げます。本研究を遂行するにあたり、データ作成等に協力頂いた岡本恵一氏を始めとする本学河川工学研究室の皆様にご感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 西田渉, 野口正人, 松下紘資, 永田久夫: “諫早湾湾口部における物質の流動予測に関する研究”, 長崎大学工学部研究報告, 第33巻, 第61号, pp. 123-128, 2003.
- 2) 西田渉, 野口正人, 松下紘資, 小薄清貴: “内湾における潮流予測結果の提供手法に関する研究”, 長崎大学工学部研究報告, 第32巻, 第59号, pp. 129-134, 2003.
- 3) 中辻啓二, 許再寧, 室田明: “河川ブルームの広がり特性とその物理機構”, 土木学会論文集, No.434/II-16, pp.29-36, 1991.
- 4) 日本海洋データセンター: “ホームページ”, (<http://www.jodc.go.jp>), 2003.
- 5) 気象庁: “新数値予報資料等説明会” 資料, p.36, 2000.
- 6) 気象庁: “新数値予報資料等説明会” 資料付録, pp.4-26, 2000.
- 7) 村井俊治: “空間情報工学”, 日本測量協会, pp. 24-42, 2003.
- 8) 福岡県有明水産試験場: “平成2年度赤潮対策技術開発試験報告書”, pp.77-78, 1991.
- 9) 西田渉: “河口・沿岸域の水環境管理支援のための実時間的情報提供システムの構築”, 平成15年度科学研究費補助金(若手研究(B))成果報告書, p.74, 2004.
- 10) Nishida, W., Noguchi, M. and Nagata, H.: “Development of the tidal current forecasting system on internet”, Proc. of 6th Int'l Conf. on Hydroinformatics, Hydroinformatics 2004, Vol. 2, pp.1941-1946, 2004.