

沿岸域の水環境管理の支援を目的とした 流れの数値予報手法の構築

FORECASTING OF TIDAL CURRENT
FOR THE ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AT COASTAL AREA

野口正人¹・西田渉²
Masato NOGUCHI and Wataru NISHIDA

¹フェロー 工博 長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521長崎県長崎市文教町1-14)

²正会員 博(工) 長崎大学講師 工学部社会開発工学科 (同上)

The environmental management after human action is significant to eliminate and minimize the negative impacts on environment at developing area. In this study, the information distribution system of tidal current is proposed in order to support the environmental management in real time. Firstly, the numerical simulation model was developed to predict the temporal changes of tidal current and water stage at Isahaya Bay and Shimabara Bay, and the accuracy of predicted results was discussed in compared with the observed results. Following, the information system was built using free software. The predicted results of current by numerical simulation were distributed from this system by means of the internet in real time. This kind of system is likely to become very useful tool not only for the water environmental management but also for the prevention of natural disasters around the coastal area.

Key Words : coastal area, numerical simulation, information distribution system, internet

1. 序論

水域での社会基盤整備を持続可能な開発として進めるためには、開発行為が環境に与える影響を高い確度をもって、事前に予測・評価することが重要であり、ミチゲーションの立場から、環境影響の回避や軽減に向けた環境管理のための諸施策が展開されねばならない。その一方で、事前予測に必要とされる長期的な気象条件、生態系の遷移を含めた影響の発現の速さなどの評価は困難な場合が多い。そのため、環境影響の軽減には、環境モニタリングなどによって得られる最新の環境情報を考慮した環境管理もまた必要とされている。

現在、長崎県東部の諫早湾では、諫早湾干拓事業が進められてきているが、関連行政機関においては、当該地域での環境質に関する定期的なモニタリングの実施、流域からの汚濁負荷流出の制御などをとおして、諫早湾ならびにその周辺水域での水環境の保全に取り組んできている。しかしその一方で、潮止工事の実施以降、締切堤の内外の水域では、水質や生息生物がしだいに変化してきており、将来、より良い水環境を実現させるための管理手法を早急に確

立することが望まれている。著者らは、これまでに諫早湾干拓事業が周辺水域に与える影響を、水量と水質の両側面から検討してきたが¹⁻³⁾、諫早湾では、締切堤が建設されたことで、湾内の流れと島原湾から輸送される物質量が変化したものと推察される。そのため、諫早湾地域での水質管理を進めるにあたっては、島原湾も含めた広域的な水環境の変化を考慮する必要がある、比較的長期的な観点から水管理手法を構築することが必要と考えられる。

以上のことから、本研究では、数値モデルによって求められる流れの予測結果は、短・長期的な水環境管理をより適切に進めるための一助になり得るものと考え、これらの予測結果の有効利用手法について検討することにした。そこで、まず、従来構築してきた数値モデルについて、諫早湾と島原湾での流況の再現性の向上を試みるとともに、計算結果と既存の観測値との比較を行うことで、モデルの現地への適用性について検討した。つぎに、インターネットを経由して水環境に関する情報を広域的に配信するシステムを構築することで、数値予測結果の有効利用を図ることとした。

2. 数値モデルとその現地への適用性

島原湾については、漁場環境の調査、開発事業の計画策定・環境影響評価の際に、流動現象の把握を目的とした水理模型実験⁴⁾、数値解析が行われている。数値解析を用いた流動シミュレーションでは、島原湾の流れが湾軸方向に一次的に解析される例もあるが、最近では流れの空間分布を明らかにする必要性から、湾の一部または全水域を対象に二次元、三次元解析されることが多い⁵⁻⁸⁾。当水域については、沿岸干潟での流れの評価が数値解析上の課題の一つであるが、この問題に関しては、干潟に移動境界^{6,9)}や仮想的な堰を設けて解析する方法¹⁰⁾、流れを越流状態と見なして解析する方法⁷⁾が提案されている。

著者らは、諫早湾での物質流送を評価するために、諫早湾と島原湾とを一体的に取り扱った解析を進めてきたが、とくに諫早湾の湾口付近については、島原湾からの水塊の流出入が精度良く再現されておかなければならないといえる。ここでは、海域に対して、3次元レベルモデルを適用して流れの再現性の向上を目指すことにした。計算に用いた基礎方程式は、流れの連続方程式、運動方程式、塩分ならびに浮流砂の収支式、堆積土粒子の収支式であり、流体の密度は、塩分と浮流砂の濃度に応じて変化するものとした。基礎方程式はつぎのとおりであり、各方程式は、陽形式のドナーセル法を適用して離散化されている。

3次元解析の基礎方程式 [中間第1層]

連続方程式

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

運動方程式 (x軸方向のみを記す)

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

塩分の収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (Sh)}{\partial t} + \frac{\partial (SM)}{\partial x} + \frac{\partial (SN)}{\partial y} + Sw|_{l-1} - Sw|_l \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial S}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_{l-1} - K_z \frac{\partial S}{\partial z} \Big|_l \end{aligned} \quad (3)$$

浮遊懸濁物質の収支式

$$\begin{aligned} \frac{\partial (SSH)}{\partial t} + \frac{\partial (SSM)}{\partial x} + \frac{\partial (SSN)}{\partial y} + SSw|_{l-1} - SSw|_l \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial SS}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial SS}{\partial y} \right) + K_z \frac{\partial SS}{\partial z} \Big|_{l-1} - K_z \frac{\partial SS}{\partial z} \Big|_l \\ + F_d|_{l-1} - F_d|_l \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 M, N : x, y 軸方向の流束、 u, v, w : x, y, z 軸方向の流速、 h : 層厚、 f : コリオリの係数、 ρ_0 : 流体の基準密度、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$: x, y, z 軸方向の渦動粘性係数、 τ_{bx} : 水底面での x 軸方向のせん断摩擦応力、 K_x, K_y, K_z : x, y, z 軸方向の乱流拡散係数、である。なお、 z 軸方向の渦動粘性係数、乱流拡散係数はRichardson数 (Ri) の関

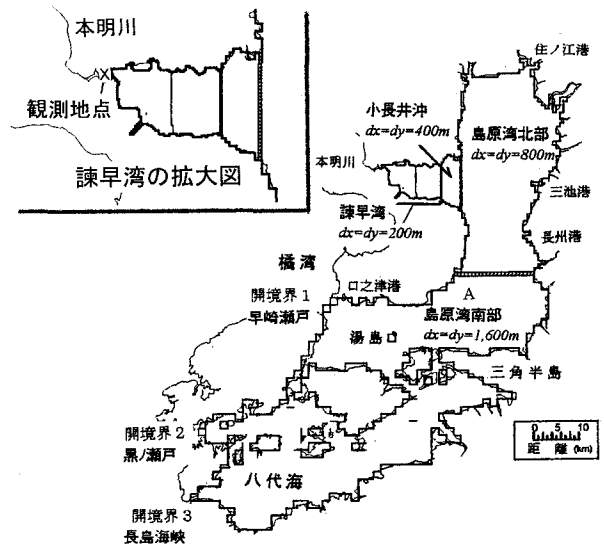


図-1 計算対象領域

数として以下のとおりに評価された¹¹⁾。

$$\varepsilon_z = \varepsilon_0 \cdot (1 + 5.2 Ri) \quad (5)$$

$$K_z = \varepsilon_z \frac{(1 + 10/3 Ri)^{-3/2}}{(1 + 10 Ri)^{-1/2}} \quad (6)$$

流体の密度は、塩分と懸濁物質の濃度に応じて変化するものとして取り扱われた。なお、干潟では、干出域と水域との境界の流れは、境界格子の水深に応じて、越流公式、移流、コリオリ、拡散の各項を省いた運動方程式を使って評価されており、表層に対して定式化された流れの運動方程式が直接解かれるのは、この境界格子の水深が0.01mを超える状態の時である。

計算対象領域は、図-1に示される諫早湾と島原湾、八代海であり、開境界は早崎瀬戸、黒ノ瀬戸、長島海峡としている。計算領域の空間差分間隔は、同時型の粗細格子法を適用して、諫早湾で差分間隔が密になるよう水平方向に200, 400, 800, 1600mの格子で覆った。鉛直方向については、T.P. -5.0m以浅を表層としたうえで層厚10mで分割しており、計算領域の最深部における層数は11層となっている。時間差分間隔は1.0secである。以下の計算では、水平方向の渦動粘性係数は、空間差分間隔に応じた取り扱いが必要であるが、モデルの妥当性検討の第一段階として、流れの大局的な把握を目指すこととし、後述される文献と観測結果との比較をもとに、全ての計算領域で250.0m²/secとし、鉛直方向については ε_z の値を0.001 m²/secとしている。また、Manningの粗度係数は、計算領域に対して一様に0.018sec/m^{1/3}とされた。計算では、開境界条件として、M2分潮ならびに推算天文潮位が与えられ、計算結果の妥当性について検討された。

(1) M2分潮による流れ

表-1には、島原湾の主な港湾における潮差と潮時差の計算結果が示されている。同表には、潮位表¹²⁾から求められた各値も併記されている。島原湾の潮位変化は、主にM2分潮によって引き起こされ、その潮差は湾奥に近づくにつれてだいに大きくなる。このような潮差の空間分布の特徴は、計算結果にも現れており、島原湾の最も湾奥に位置する住之江港では、湾口の潮差の約

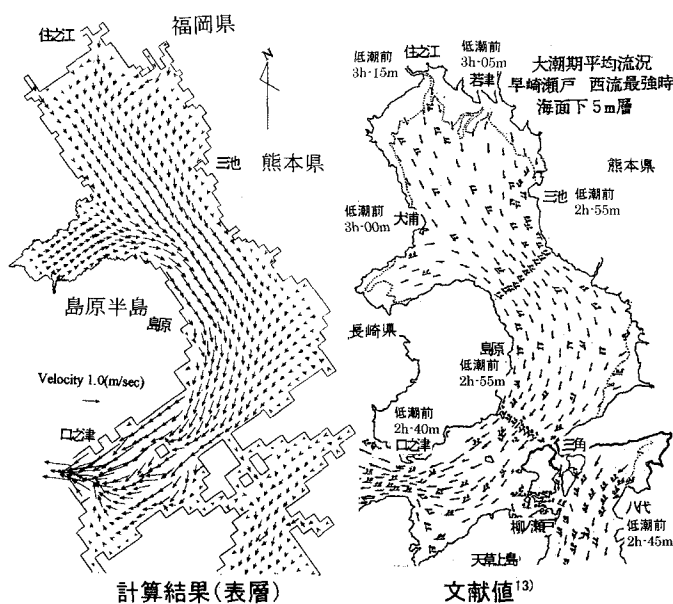


図-2 早崎瀬戸で下げ潮最大時の流速ベクトルの分布

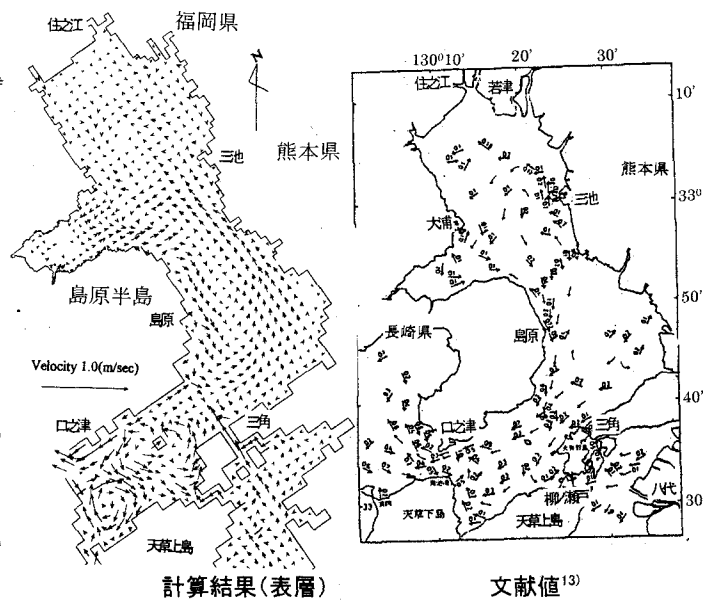


図-4 島原湾での恒流

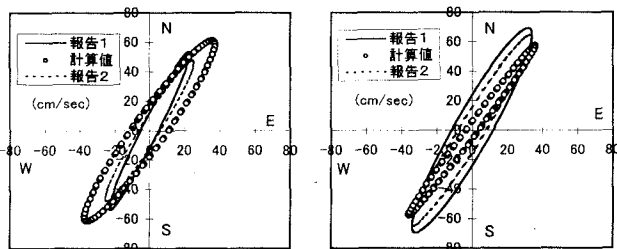


図-3 島原湾での潮流楕円 (報告1: '93.4.28~5.28, 報告2: '94.4.25~5.26, の結果'を参照)

1.7倍に達している。潮位表の値と比較すると、潮差については、三角港、島原港で両者の違いが大きい、それ以外の港湾では、 $0.1 \pm 0.05\text{m}$ 程度であり、相対的な差は10%未満である。潮時差については、計算から求められた値は、潮位表に比べて全体的に10分ほど遅れるが、島原湾の中央部の港湾で潮位変化がほぼ同時に起こること、また、住ノ江港での変化は他の港湾より遅れて生じること、などが表現されている。

表-1 潮差と潮時差(上段:計算値, 下段:潮位表)

	三角港	島原港	三池港	長州港	竹崎港	住ノ江港
潮 差 (m)	2.60	2.93	3.25	3.05	3.26	3.38
	2.42	2.71	3.11	2.95	3.16	3.44
潮時差 (min)	15	25	25	20	25	40
	4	13	16	16	18	34

図-2には、計算から求められた表層(T.P.-5.0m以浅)での流速ベクトルの空間分布と海上保安庁によって示された潮流の分布図¹³⁾とが示されており、いずれも早崎瀬戸で下げ潮最大となった時に相当する。計算条件と潮流の分布図とは、潮汐の状態が異なるが、島原湾では潮汐に対してM2分潮の影響の強いことから、流れの分布についておおよその検討は可能であると考えた。

まず、計算結果についてみると、諫早湾からの流れと

島原湾の北部海域からの流れとが、長州港の沖合で合流した後、島原半島寄り南下しており、島原湾の南部沿岸では、一様に早崎瀬戸へと向かう流れとなっている。ただ、島原湾の北部海域から南部海域へ向かう流れのうち、一部は湯島の南方に回り込むようにして早崎瀬戸へと流れる。島原湾では、一部で八代海との海水の交換によって生じた流れも現れるが、そのほとんどは、早崎瀬戸での潮位変化に伴った流れである。ここでは、上げ潮時の流速ベクトルの空間分布は示されないが、早崎瀬戸からの水塊の流入に伴って、島原半島沿いを湾奥へと向かう流れが生じており、諫早湾では、主に湾口の南部から水塊が流入する結果となった。また、干潮時、満潮時における流向の変化は、水深-15m以上の深層において表層よりも時間的に早く始まっており、島原港の沖合では、その時間差は1時間程度になっている。一潮汐期間中の最大流速は、早崎瀬戸付近で1m/sec以上となり、島原湾沿岸で速い傾向にある。島原湾の水深は、北部海域ならびに熊本県沿岸では10mに満たないが、湾口の早崎瀬戸をはじめとした島原半島に近い海域では比較的深く、場所によっては100m以上に達しており、こうした海底地形の空間分布が湾内の流れに影響を及ぼしていると考えられる。さて、島原湾の流れについて、計算結果と文献値とを比較すれば、湾内の水は湾口へ向かって流動しており、その流速は、島原湾の南部海域で速く、北部海域に近づくにつれて遅くなること、諫早湾では湾口の南側から水塊が流出すること、といった点で両者は一致している。ただし、早崎瀬戸付近で最大流速が現れる場所や、湯島の西方海域での流向について違いが見られる。島原湾のA地点における潮流楕円を示すと図-3のとおりである。西ノ首らの報告値⁷⁾は、いずれも水深-5m、-20mで計測されたものであるが、計算結果については、表層(-5m以浅)と第3層(-15~-25m層)の値が描かれている。両者を比較すれば、計算結果の潮流楕円の長軸は報告値よりも表層では大きく、

第3層では小さくなっているが、楕円の傾きは概ね一致しているようである。

つぎに、恒流の空間分布を示すと、図-4のとおりである。なお、計算結果は表層での結果である。計算結果の流速は、全体的に文献値よりも遅いが、島原湾の北部海域での反時計回りの環流、島原半島の東岸の速い南下流、熊本県の沿岸を北上する流れ、などで文献と一致している。また、諫早湾の湾口部については、水塊が北部から流入し、南部から流出することが計算で再現されている。このような流れは、著者らが行った接続型の2次元平面モデルによる解析では現れなかった。島原半島東方の比較的深い海域では、深層を湾奥に向かう流れによって熊本県沿岸を北上する流れが生じる傾向にあり、この流れによる水塊の移動を補償する形で島原半島近くを南下する流れが生じるようである。そのため、島原湾については3次的に複雑な流れを評価できる解析手法が必要と考えられる。一方、計算結果は、島原湾の南部水域で文献値との相違があるものの、文献に示される諫早湾と島原湾の北部での流れをほぼ再現していると考えられる。ここでは、既存の報告をもとにモデルの妥当性が検討されたが、島原湾では、海底の地形に強く影響を受けた流れが現れるようであり、流れの水平分布とともに鉛直方向の流動の予測精度については、引き続き詳細な検討が必要と考えている。

(2) 塩化物イオンと懸濁物質の時間変化の再現性

各開境界に推算天文潮位を与えて計算を行い、諫早湾の湾奥(本明川河口)での潮位変化と塩化物イオン、懸濁物質の変化について再現性を検討した。計算は、1996年12月5日から同月10日までの期間を対象に行われた。同時期には、締切堤の建設も進んでいることから、締切堤の計算条件として、潮止め予定区間を除く区間では、天端 T.P.+3.0m までが建設されたものとした。図-5には、著者らが観測を実施した1996年12月9日の結果が示されている。なお、図に示された水位は、河川情報センターによって計測された値である。

本明川の河口付近では、諫早湾の潮汐に応じた水量・水質変化が観測されており、満潮時と干潮時の水位差は3.5m以上に達し、干潮時には、上流から流出してきた河川水の影響を受けて、塩化物イオンは極めて低い濃度になることがわかる。こうした観測結果と計算結果とを比較すると、計算から求められた水位は、観測値よりも若干早めに変化しているが、その違いを考慮すれば、本モデルは、当日の水位の時間変化を、ほぼ表現しており、塩化物イオンについても、諫早湾と本明川との水塊の流入による変化を良好な精度で予測しているようである。懸濁物質については、観測結果と同様に、水位の下降時と上昇時に濃度が高くなることが示されている。開境界で与えた水位変化を考慮すれば、潮差がしだいに大きくなることで、諫早湾から本明川への流送量が増加することがわかる。ただし、計算結果では、水位の下降時に懸濁物質の濃度が高い時間が長く、最大値は水位が上昇する時に現れる、といった点で両者に相違が見られ、予測精度の向上にあたっては、観測手法とともに、土粒子の初期堆積量とその空間分布に係る条件を

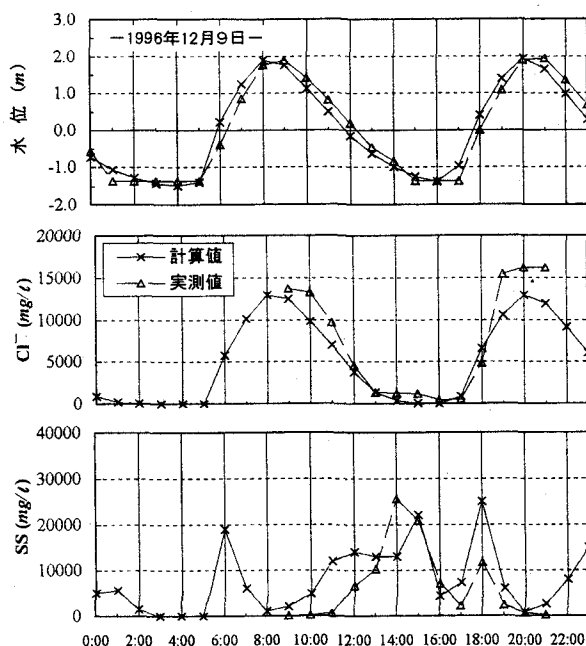


図-5 計算結果と観測結果との比較

さらに検討せねばならないといえる。

3. 予測結果の有効利用に向けた試み

冒頭でも述べられたように、水域での「持続可能な開発」を行うには、環境影響に関する事前評価ならびに事後の環境管理が重要である。とくに、水環境に関する最新の情報を広く提供するシステムを構築することは、長期的な環境管理に有効と考えられる。同時に、国民が環境の現状を正しく理解する機会を増やし、結果として水環境の整備を総合的に推進する手助けになることも期待される。

諫早湾周辺においては、調整池からの排水が湾内の水質に与える影響が懸念されているが、排水門操作による影響を評価・軽減するためには、諫早湾内の流れを実時間的に把握しておくことも必要と考えられる。ここでは、本研究で準備、取得された情報を利用して、諫早湾と島原湾の水環境に関する情報を作成し、これらの情報をインターネットを利用して提供する手法について検討した。本システムの開発環境の概要は、図-6に示されるとおりであり、情報提供の内容は、基本的な情報と、流れの予測結果の提供部分とで構成されている。

ここでは、諫早湾と島原湾の基本情報として、地形データから海底地形の水平面図、横・縦断面図が作成され、流れの計算結果を用いて潮流の時空間分布に関する静止画、動画が準備された。各画像ファイルは、WWW サーバから利用者へと配信されるが、このサーバから送られる各ドキュメントファイルは、端末でのデータの選択や表示が容易になされるよう、HTML 言語と JavaScript 言語とを用いて記述されており、取得情報が短い説明文とともに表示される。水質に関する情報については、実測結果は重要かつ貴重な情報であり、過去の結果も必要に応じて検索されることから、実測値を

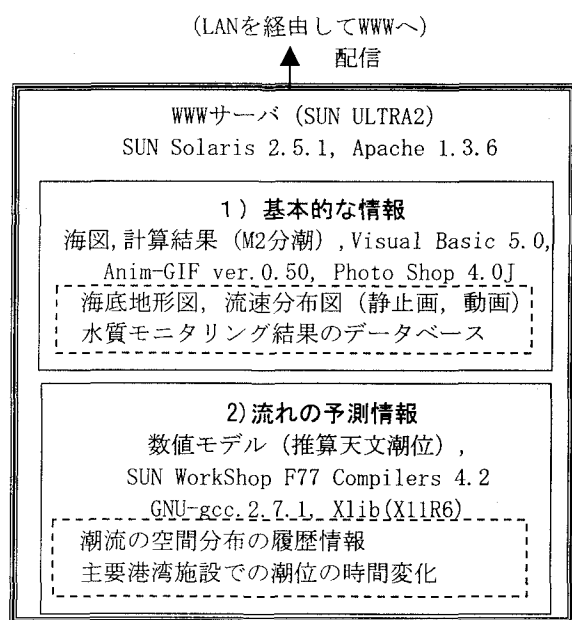


図-6 システムの構成図

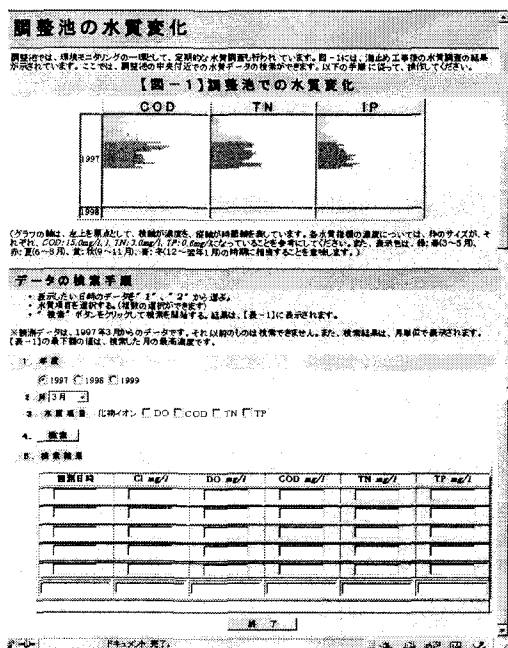


図-7 水質データベースの検索画面

データベースとして提供することにした。このデータベースは JavaScript 言語で記述されている。データ検索は、観測年、月、水質指標といったキーワードによって行われ、指定された結果は、提供情報の2次利用が容易なように数値として表示される。このような水質に関するデータベースが構築されたことで、データが比較的短時間のうちに取得されるようになり、その利用効率が格段に高められている。構築された水質データベースの検索画面は、図-7に示すとおりである。

流れの予測結果の提供については、本研究で構築された数値モデルを使って、諫早湾ならびに島原湾での流況を推算天文潮位から予測計算し、その結果を実時的に提供するシステムとして構築された。情報提供までの一連の処理手続きは図-8に示されており、まず、開境界に推算天文潮位を与えて流れや物質輸送の計

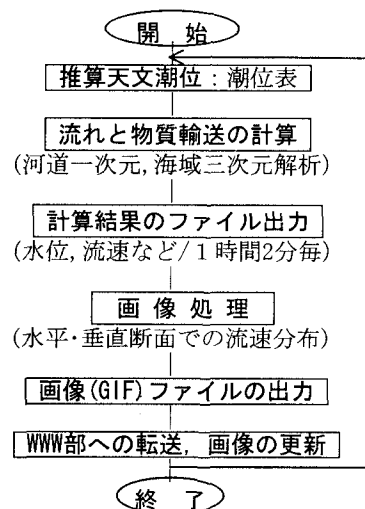


図-8 流れの予測計算から結果配信のフローチャート

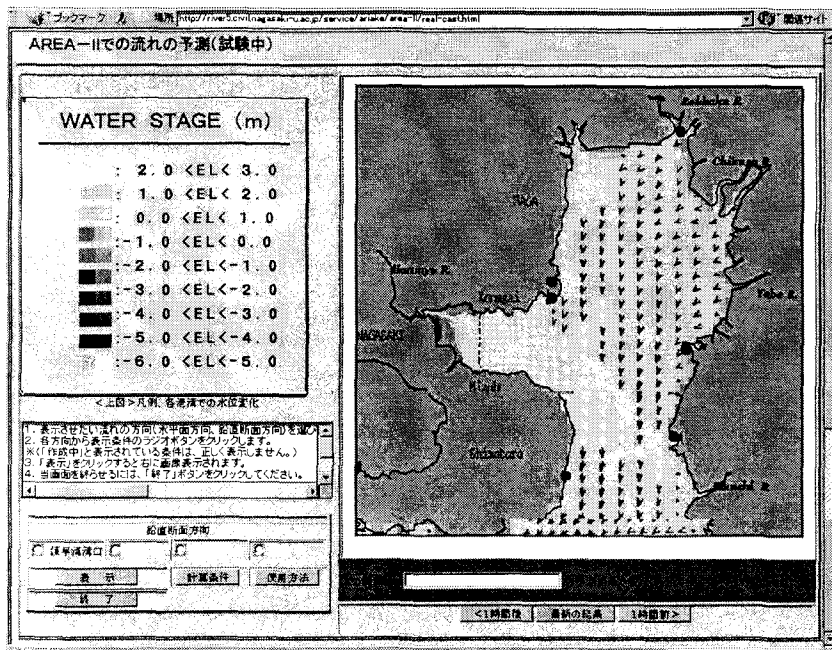
算を行い、一定時間間隔で計算値をファイル出力させている。つづいて、出力された計算結果をもとに、諫早湾と島原湾での流況ならびに水位の予測図が X-Window の作業環境のもとで画像ファイルを自動生成され、WWW の表示内容に反映されている。このシステムは、作業環境の整備が経済的に済まされるように、gcc-C 言語コンパイラや Xlib 画像ライブラリといった各種のフリーウェアを主に利用して構築可能なものとなっており、本システムの構築、運営上の特徴となっている。なお、上述の各処理は、WWW サーバが運用されているワークステーションで、同時に行われている。

図-9には、流れの予測に関する情報提供の画面の一例が示されている。この情報提供の画面では、諫早湾と島原湾における流速ベクトルの水平面分布と鉛直断面分布とが過去12時間内の履歴情報として準備されるとともに、島原湾の主だった港湾施設での潮位の時間変化、計算条件の説明などが提供されている。このようにして、実時間的に水域の水工学的な情報を作成し、短時間のうちに提供できる体制を整えておくことは、水質管理のためだけではなく、洪水や渇水、あるいは汚染物質の流出など、気象変化や突発的な水質事故が環境へ及ぼす影響の予測や、その緊急的な対策を講じる際に十分活用できるものと考えられる。

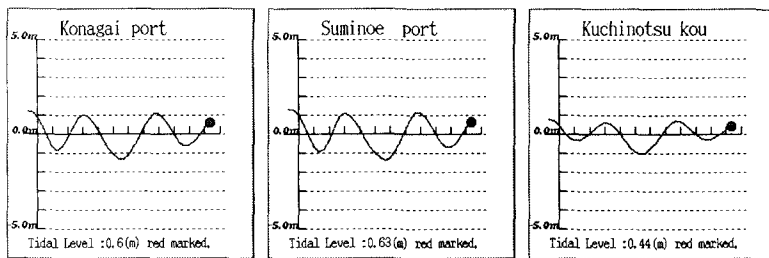
目下のところ、流れの予測結果については、画像情報として提供されているが、情報の2次活用の観点からいえば、数値情報として提供することも必要と考えている。また、数値モデルの流れの再現性については、2.で示されたとおりであるが、予測精度の向上は、先に述べられた課題とともに今後も引き続き検討されねばならない。とくに、流れの計算条件として河川流量や風向・風速などの時空間変化が考慮されておらず、実時間的なデータの取得手法を含めて、今後の課題として残されている。

4. 結論

水辺における環境整備をより適切に進めていくためには、事前評価とともに事後の環境管理もまた重要である。



推算天文潮位を用いた流れの予測結果の提供



各港湾施設における潮位変化の提供例(左から、小長井港、住之江港、口之津港)

図-9 WWWサーバからの情報の提供画面

本研究では、諫早湾とその周辺水域を対象にして、将来の水環境管理に数値モデルによって求められた実時間的な流れの予測結果を活用することを考えた。そこで、まず、流れの予測に用いる数値モデルの現地への適用性を、既存の文献値と著者らが行った観測値を用いて検討した。計算精度に関しては検討されるべき課題が残されているものの、島原湾を対象にした流動解析では、湾内の流れをほぼ再現できることが示された。また、検討結果からは、島原湾での流れ場の把握には3次元的な流動を評価できる手法が必要とされるようである。つぎに、数値モデルによる予測結果の有効利用手法について検討した。本手法ではシステムの環境を容易に構築されるよう、主としてフリーソフトを用いたことが特徴である。こうした情報の提供は、沿岸域での環境管理ならびに各種の防災対策に有効な手段になり得ると考えている。今後は、数値モデルの流れの予測精度の向上を目指すとともに、提供される情報の質的・量的充実を図っていきたいと考えている。

謝辞：日頃から研究面で有益なご助言を頂戴している井上和也教授（京都大学防災研究所）に深甚なる謝意を表します。また、中村武弘教授（長崎大学環境科学部）からは島原湾の流動観測に関する資料をご提供いただいております。記して深く感謝申し上げます。本研究の一部は、平成10、11年度の文部省科学研究費奨励研究(A)（代表者：西田渉、No. 10750391）からの助成を受けて行われたことを記し、関係各位に心から感謝致します。

参考文献

- 1) 西田渉,野口正人,柳本諭:締切堤の建設が河口部や沿岸域の干潟に及ぼす影響の予測,水工学論文集,第43巻,pp.821-826,1999.
- 2) 仁木将人,西田渉,野口正人,橋本篤史:調整池の水質変化の予測とその評価に関する研究,水工学論文集,第43巻,pp.1007-1012,1999.
- 3) M.Noguchi,W.Nishida and W.B.Park: Pollutant Runoff and Its Effect on the Newly Constructed Regulatory Pond in a Bay, Proc.8th ICUSD,Vol.4,pp.1631-1638, 1999.
- 4) 農林省熊本農地事務局:模型実験による有明海の潮せきに関する研究(第1報),研究時報,第12巻,第5号,pp.261-295,1959.
- 5) 大西亮一,白石英彦:有明海の潮流解析について,第26回海岸工学講演会論文集,pp.527-531,1979.
- 6) 経塚雄策,川浪健治:干潟を考慮した有明海の潮流解析,西部造船会会報,第86号,pp.131-146,1993.
- 7) 有明海漁場環境調査協議会:雲仙普賢岳火山活動の水産業に及ぼす影響調査事業報告書,p.496,1996.
- 8) 福岡県有明水産試験場他:赤潮対策技術開発試験報告書,p.340,1991.
- 9) 加藤一正,田中則男,灘岡和夫:干潟上の潮流計算および干潟変形予測の手法,港湾技術研究所報告,第18巻,第4号,pp.3-76,1979.
- 10) 滝川清,山田文彦,原田浩幸,北園芳人,中島和弘:有明海沿岸域における干潟の浄化機能と環境特性に関する研究,海岸工学論文集,第45巻,pp.991-995,1998.
- 11) 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.
- 12) 海上保安庁:平成8年潮汐表,第1巻,書誌第781号,1996.
- 13) 井上尚文:有明海の物理環境,沿岸海洋研究ノート,第17巻,第2号,pp.151-165,1980.
- 14) 田辺茂也,各務辰哉 訳:JavaScriptハンドブック,オーム社,1996.

(1999. 9. 30受付)