

流域圏統合モデルによる伊勢湾への河川水の影響評価

鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理・本間基寛⁽¹⁾・Sergey M.Varlamov⁽²⁾

(1) 一般財団法人日本気象協会
(2) 独立行政法人海洋研究開発機構

要 旨

河川源流域から沿岸部までの流域圏の水と物質循環を統合的に評価する流域圏統合モデルの開発を行った。本モデルは、分布型流出モデル・河口部の不定流モデル・海洋循環モデル・物質の移流拡散モデルの4つのモデルから構成される。木曾三川流域から流出する河川水が伊勢湾に及ぼす影響を評価するために、2003年4月の大雨事例の計算を行った。移流拡散モデルによる計算結果によると、浮遊土砂は伊勢湾内西岸を南下しながら拡散し、MODIS衛星観測による濁度の拡がりをよく再現していることがわかった。

キーワード: 流域圏統合モデル, 伊勢湾, 土砂流出, Hydro-BEAM, RIAMOM

1. はじめに

地球温暖化は自然災害のみならず、河川環境および沿岸環境へ様々な影響を及ぼすことが懸念されている。豪雨頻度の増加による流出土砂の増加、融雪の早期化による農業等の水利用への影響、気温上昇による都市熱環境の悪化、河川・湖沼の水温上昇、海面上昇による海岸侵食など、その影響は多岐にわたると考えられている。

防災的な側面と総合的な環境管理の両面から、河川源流域から沿岸部までの流域圏の水と物質循環を統合的に評価するツールとして、流域圏統合モデルの開発を進めている。鈴木ら(2010)は東京湾への河川水の影響について検討した。本研究では、木曾三川流域から伊勢湾へ流出する河川水による伊勢湾の水文環境への影響評価を検討するため、伊勢湾を対象としたモデルを構築した。

2. 流域圏統合モデルの概要

本研究で用いる流域圏統合モデルは次の4つのモデルで構成される。

- ① 分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM)
- ② 不定流モデル
- ③ 3次元海洋循環モデル(RIAMOM)
- ④ 移流拡散モデル

Fig.1 に流域圏統合モデルの全体概要を示す。河川部分は分布型流出モデルと不定流モデルの2つのモデルから構成され、海洋部分は海洋循環モデルとその海流の計算結果を入力とする移流拡散モデルの2つのモデルから構成される。感潮区間より上流を分布型流出モデル Hydro-BEAM で計算し、堰などの下流から河口までの感潮区間を不定流モデルで計算する。不定流モデルの境界条件として、上流の流量変化と下流の水位変化を与える。不定流モデルには河口堰などの堰操作がモデル化されて組み込まれている。海洋循環モデルは九大応力研が開発したモデル RIAMOM を用いる。RIAMOM は九大応力研で日本海の時況予報モデルとして日々運用され、予報結果が水産関係者などに利用されている。移流拡散モデルは、ある物質について、RIAMOM によって計算された海流ベクトルによる移流と、渦拡散による拡散効果を計算するものである。拡散係数は調整パラメータとなっている。

Table 1 に分布型流出モデル Hydro-BEAM の概要を示す。Hhydro-BEAM は Kojiri (2006) によって開発されたセル集中型の分布型流出モデルである。Fig.2 に示すように、各セルは1本の河道網とそれに接続する2つの斜面の集合体として表される。セル毎に降水・蒸発散・融雪・流出・浸透の水文過程が計算される。降水は一旦そのすべてが斜面に供給され、蒸発散により大気中に戻った残りが地表流 (A layer)

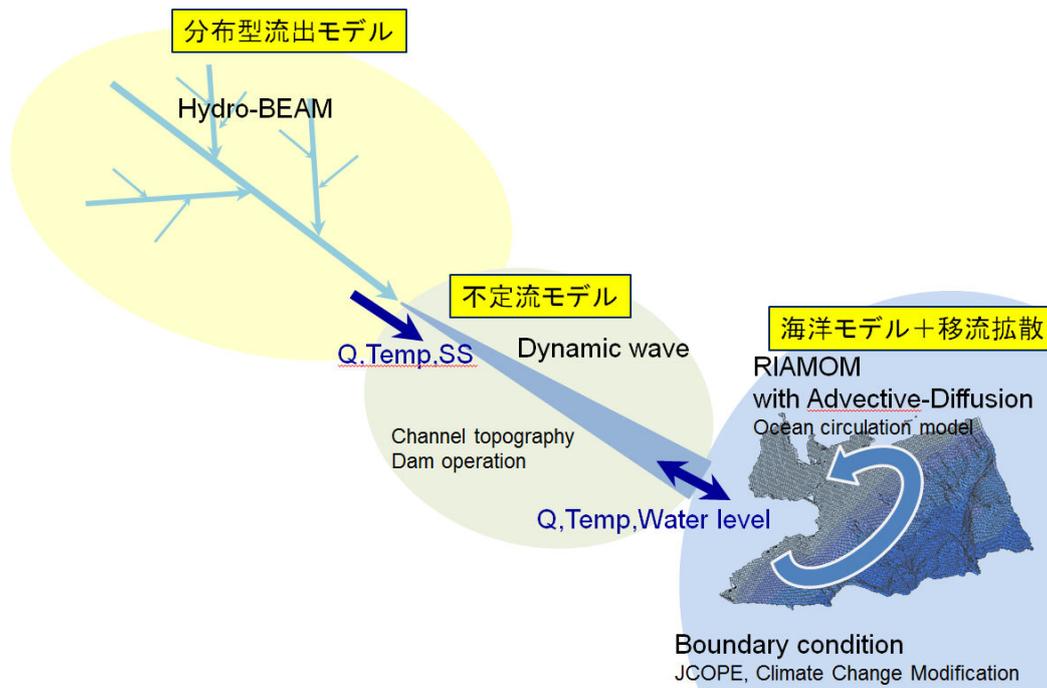


Fig.1 Components of integrated water environment model

と、さらに下層 (B,C,D layer) の地下水浸透成分に分離される。地表流は kinematic wave モデル, 地下水は貯留関数モデルにより計算される。

各セルの河道からの流出は、国土地理院の 50m メッシュ標高データから作成した落水線と河道勾配に基づく河道網に沿って計算される。各セルにおける水文過程を計算するためのパラメータ (粗度・アルベド・含水率・透水性・土壌間隙率等) は、5 つの土地利用区分 (森林・草地・水田・都市・水域) ごとに設定されている。

入力気象データは、アメダスの1時間毎の降水量と気温データを用いるとともに、熱収支モデルによる積雪・融雪・蒸発散計算を行うために、気象官署の風速・気圧・水蒸気圧・日照時間を用いる。気象観測データは、1 kmメッシュ上に、距離の2乗の重みを利用して内挿補間するとともに、気温の高度補正も考慮する。出力されるデータは、河川流量・水温および土砂等のトレーサ濃度の1時間ごとの計算値である。

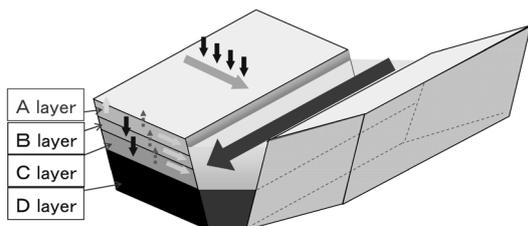


Fig.2 Concept of runoff from two hill slopes and one river channel

Table 1 Description of distributed hydrological model Hydro-BEAM

項目	内容
メッシュ	水平：1km 鉛直：4層
水文過程	降水・蒸発散・融雪・流出・浸透
流出過程	表層水：kinematic wave モデル 地下水：貯留関数モデル
河道網	国土地理院 50m 標高データから作成
土地利用	森林・草地・水田・都市・水域
水文パラメータ	粗度・アルベド・含水率・透水性・土壌間隙率
気象データ	降水量・気温・風速・気圧・水蒸気圧・日照時間
トレーサ	土砂・栄養塩ほか
出力データ	河川流量・水温・トレーサ濃度

河川下流の感潮区間では、河口の潮汐変化の影響を受けるため、流量と水位の時間変化を求めるためには、河川水位の勾配から流速を計算する必要がある。予報変数として、流速と水位の2つの変数を設定し、基本方程式として運動方程式と連続の式の2つを解くことにより、流速と水位の時間変化を求めることができる。ただし、河道断面の形状、粗度をパラメータとして河道の一定間隔ごとに設定する必要がある。木曾川については、河口から40 km地点の笠松地点までを計算対象区間とし、境界条件として、上流側からの流量と、河口側からの潮位変化を与えることによって、感潮区間内の流量と水位を計算する。

海洋循環モデル RIAMOM は流体力学のプリミティブ方程式を数値計算するモデルである (Lee and

Yoon, 1994)。その概要を Table 2 に示す。基本方程式は、運動方程式・連続の式・静水圧近似式・トレーサーの移流方程式からなり、予報変数は流速 3 成分・圧力（海面高度）・水温・塩分である。モデルは、静水圧平衡のもとでのブシネスク近似を仮定し、3 次元、非線形、自由水面のプリミティブな Navier-Stokes 方程式を解くものである。高次移流スキームや海底地形に沿った斜め移流の導入などにより、高精度化が図られている。また、鉛直座標系として z 座標系を採用することにより、沿岸域の海底勾配が急峻な海域においても計算安定性の高いモデルとなっている。

海表面を通じた境界条件として必要なのは、海面水温と気象要素（海面気温・風・気圧・湿度・総雲量及び低層雲量・太陽放射熱）であり、気象庁GPV データを与える。側面の境界条件として、外洋では潮汐変化と広域海洋モデルの境界値を与える。ここでは JCOPE2 モデル (Miyazawa et al., 2009) による再解析データを用いた。伊勢湾内は、水平 1/72 度（約 1.4 km）、鉛直 60 層で分割している。

河口からの境界条件として、河川流量と水温の 1 時間ごとの変化を与えることができる。出力データは、3次元の各メッシュにおける流速3成分・水温・塩分と海面高度である。

海洋循環モデルで計算された流速を用いて、移流拡散モデルの計算を行う。ここでは、浮遊土砂を対象とした。計算に際し、水平拡散係数は $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 、鉛直拡散係数は $0.0001 \text{ m}^2/\text{s}$ とした。浮遊土砂の沈降速度は Rubey の式により求める。本来は、現地観測にもとづく粒径分布から求める必要があるが、ここではシルトと粘土の境界として粒径 0.0005 cm を仮定し、沈降速度を 0.002 cm/s と設定し、海底から再浮遊する土砂については考慮していない。

Table 2 Description of ocean circulation model RIAMOM

項目	内容
基本方程式	運動方程式・連続の式・静水圧近似式・トレーサーの移流方程式
予報変数	流速 u, v, w ・圧力（海面高度）・水温・塩分
座標系	Z 座標（伊勢湾では鉛直 60 層）
水平格子	緯度経度座標（伊勢湾では 1/72 度）
外洋境界条件	JCOPE2 再解析データ（水平 1/12 度） 流速・水温・塩分
潮汐データ	国立天文台 NAO モデル
気象データ	風向風速・気温・海面気圧・湿度・雲量・降水量
河口境界データ	河川流量・河川水温（1 時間毎）
出力データ	流速 u, v, w ・水温・塩分・海面高度（1 時間毎）

3. 伊勢湾の計算

河川水の内湾への影響を評価するために、木曾三川（木曾川・長良川・揖斐川）と伊勢湾を対象領域とした。木曾三川の流域面積は $13,411 \text{ km}^2$ であり、各河川からの年平均流量は木曾川 $345 \text{ m}^3/\text{s}$ 、長良川 $136 \text{ m}^3/\text{s}$ 、揖斐川 $124 \text{ m}^3/\text{s}$ である。この河川水が流入する伊勢湾は、面積 $1,738 \text{ km}^2$ 、平均水深 19.5 m 、容積 33.9 km^3 である。伊勢湾の容積は河川流入量の約 1.9 年分であり、東京湾の約 7 年、大阪湾の約 5 年と比べて河川水の湾内への影響が最も大きいと言える。ここでは 2003 年 4 月の大雨事例を対象として、伊勢湾の流動場、水温、浮遊土砂の拡散計算を行い、流域圏統合モデルの基本的な特性を把握した。

3.1 2003 年 4 月の大雨事例

2003 年 4 月 23 日から 29 日の事例を計算対象とした。Fig.3 の天気図に示すように、本州南部に停滞した前線を、低気圧が東進して降雨が長期間継続する事例であり、西日本において大雨となった。また、南方から熱帯低気圧が北上しており、熱帯低気圧が運んでくる豊富な水蒸気が前線の活動を活発化させ、大雨を降らせる典型的な気圧配置となった。2000 年 9 月の東海豪雨や、2011 年 9 月の台風 15 号による東海地方の大雨も同様な気圧配置であった。

Fig.4 に示すように、期間中の名古屋の総降水量は 62 mm にすぎないが、木曾川上流域では 200 mm を超える降水量であり、上流で大雨となっている。期間中の木曾三川の最大流量は、木曾川（起）が約 $4500 \text{ m}^3/\text{s}$ 、長良川（墨俣）が約 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ 、揖斐川（万石）が約 $500 \text{ m}^3/\text{s}$ である (Fig.5)。洪水波形と降水量の時間差から、木曾川については降水のピークから約 1 日程度遅れて、下流部において流量が最大となっている。移流拡散モデルの河口部の境界条件として与えた水温と浮遊土砂の変化を Fig.6 と Fig.7 に示す。

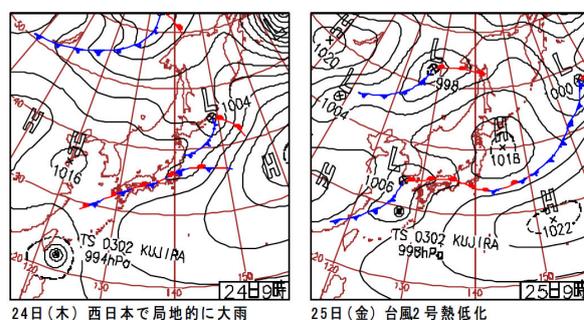


Fig.3 Weather maps from 24/Apr/2003 to 25/Apr/2003 (Japan Meteorological Agency)

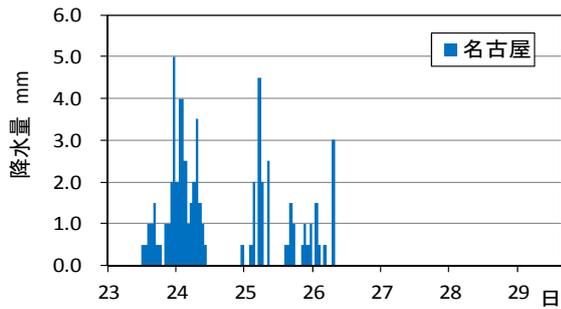


Fig.4 Rainfall amount at Nagoya from 23/Apr/2003 to 29/Apr/2003

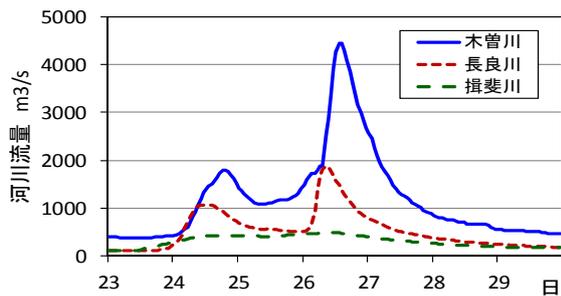


Fig.5 River discharge of Kiso, Nagara and Ibi rivers from 23/Apr/2003 to 29/Apr/2003

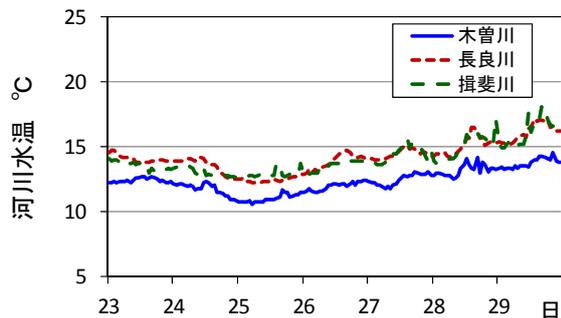


Fig.6 Water temperature of Kiso, Nagara and Ibi rivers from 23/Apr/2003 to 29/Apr/2003

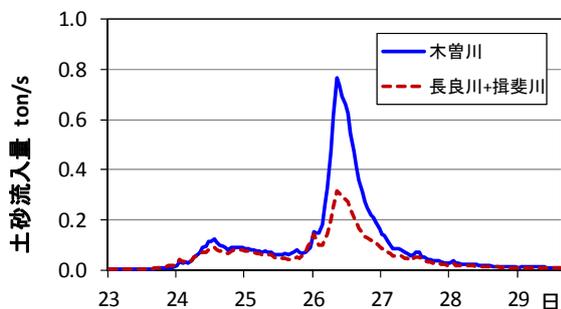


Fig.7 Amount of suspended sediment of Kiso and Nagara-Ibi rivers estimated from river discharge from 23/Apr/2003 to 29/Apr/2003

水温は木曾川（弥富），長良川（揖斐長良大橋），揖斐川（城南）の観測値である。水温10℃から15℃の融雪による冷たい水が河口から流出している。浮遊土砂の変化は，揖斐長良大橋における濁度と流量の観測値から，河川流量との関係求めて推定した値である。

3.2 計算結果

前節に示す境界条件を設定して，海洋循環モデルを計算し，浮遊土砂と水温の移流拡散計算をした結果を以下に示す。海洋循環モデルの計算は，あらかじめスピニングを十分行った後に，4月23日から4月29日までを対象として計算を行った。

Fig.8は海面の塩分濃度の分布を示す。河川水の塩分濃度は河口において零と設定されているので，塩分濃度の拡がりによって河川水の影響範囲を知ることができる。図によれば，青色の低塩分の水域は4月25日には河口部付近にとどまっていたが，26日から27日にかけて河川流量が最大となるに従い，伊勢湾内を南下している。29日には伊勢湾西岸を南下し，湾内中央部付近まで達していることがわかる。なお，三河湾の豊川と矢作川については，年平均の河川流量として一定値を与えているため，顕著な時間変化は見られない。

浮遊土砂の拡散計算結果をFig.9に示す。4月25日から29日までの浮遊土砂の分布を濃淡で示し，流速場をベクトルで示す。木曾川・長良川・揖斐川の河口から，揖斐長良大橋の浮遊土砂量の時間変化を与えた計算結果である。伊勢湾内に流入する他の河川については，浮遊土砂は流れ込まないものとして考慮していない。

Fig.9とFig.10の流速場は潮汐変化を含む瞬間値であり，湾内と外洋の海水交換をしながら変動する。4月27日から29日にかけては湾口において，湾外にむかう流速が強くなっている。これは，木曾三川からの河川流量が増大し，湾内の海水量が増加したためであると考えられる。河口付近での浮遊土砂の濃度は4月27日頃が最大となり，29日には減少している。木曾三川の河口から流出した浮遊土砂は，主に流速場の方向へと移流しながら，周囲に拡散していく様子がわかる。湾内に均等に拡がるのではなく，河口から湾内西岸に沿って南下していくことが計算されている。これはFig.8に示された塩分濃度による河川水の拡がりやと整合する結果である。

計算期間中の4月27日には，NASAのAqua衛星に搭載されたMODISセンサーによる可視画像が取得されている。その画像をFig.11に示す。MODISの可視画像は，衛星直下で500 mの解像度を有しており，伊勢湾内の濁りの分布がきれいに撮影されている。衛星

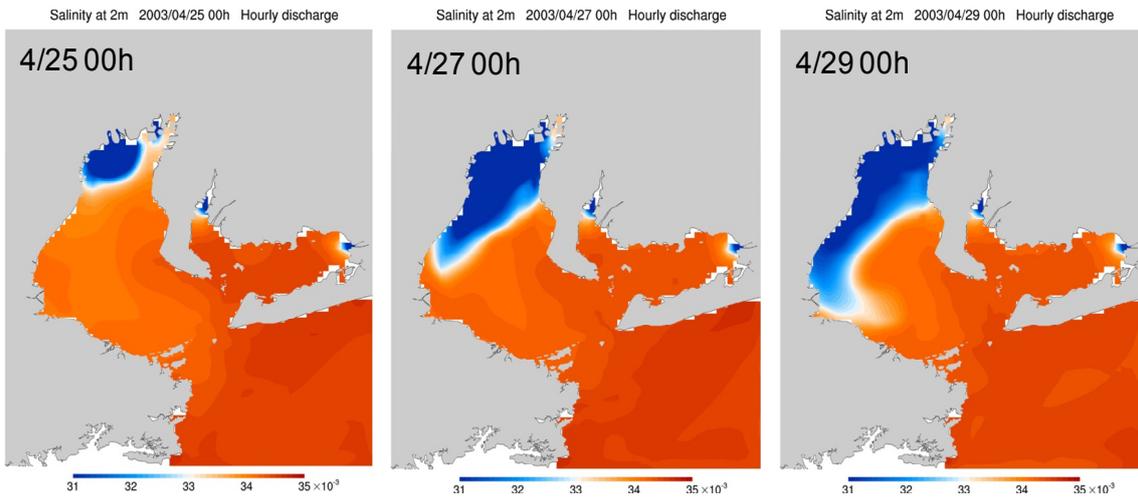


Fig.8 Distribution of sea surface salinity (25, 27 and 29/Apr/2003)

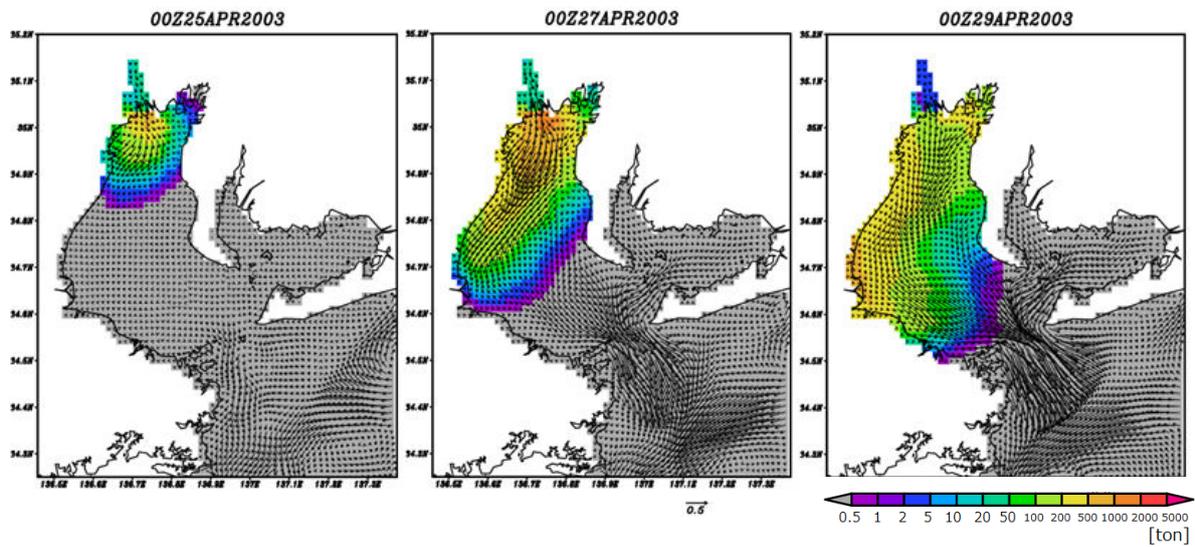


Fig.9 Distribution of suspended sediment amount and sea surface current vector (25, 27 and 29/Apr/2003)

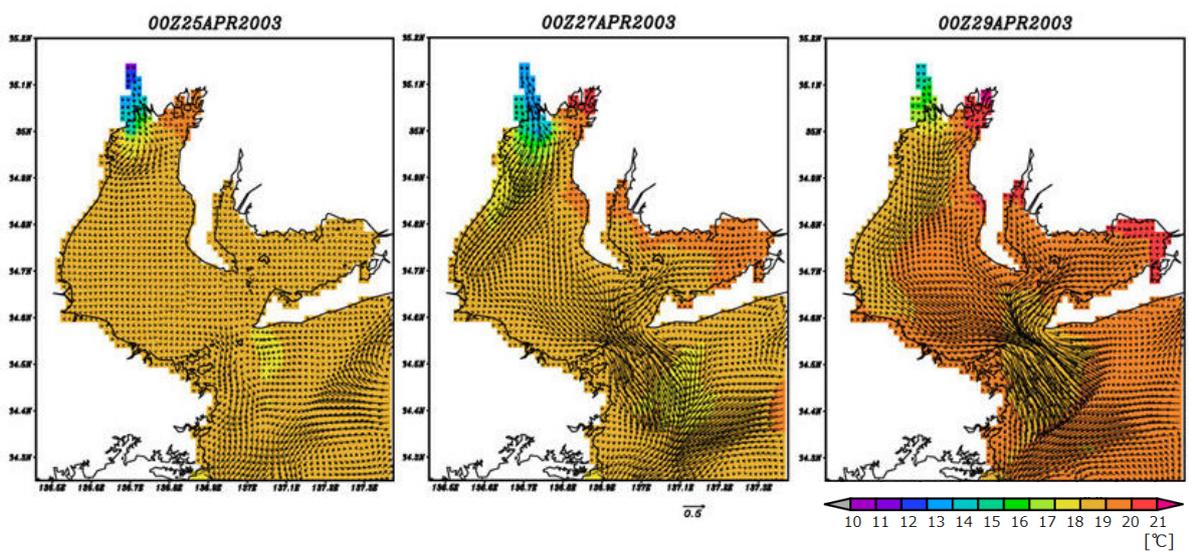


Fig.10 Distribution of sea surface temperature and sea surface current vector (25, 27 and 29/Apr/2003)

画像とFig.9中央の4月27日の計算結果を比較すると、木曾三川の河口部の濁りが濃く、湾中央部では濁りが薄くなるのが計算されている。また、衛星画像ではかなり薄くなっているが、湾内西岸を濁りが南下していく様子が示されている。浮遊土砂の拡散計算結果は、定性的な拡がりをよく再現できていると言える。

Fig.10には4月25日から29日までの水温の分布を濃淡で示し、流速場をベクトルで示す。木曾三川河口から流れ出る河川水の水温は、雪解け水を含んで約13℃程度と冷たいが、河口から10メッシュ程度で湾内の平均水温に近づいている。浮遊土砂の拡がりよりも水温の拡がりの範囲が小さいことが特徴的である。湾内の平均水温は、4月25日には約18℃であったものが、29日には20度前後に上昇している。これは27日以降天候が回復し、日射により海面が暖められたことが影響しているものと考えられる。

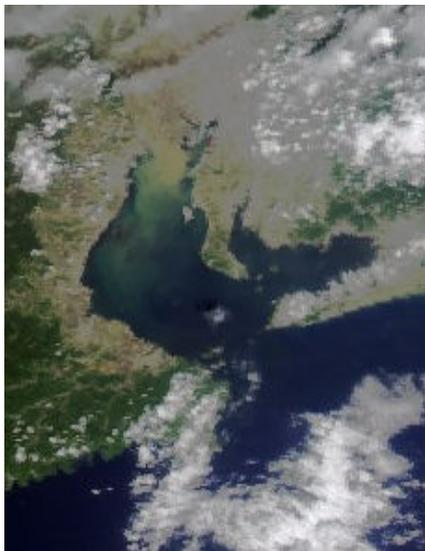


Fig.11 Muddy water distribution from Aqua MODIS satellite image at 13:15 27/Apr/2003

4. おわりに

河川から沿岸部までの流域圏を統合的に環境管理を行うためのツールとして、流域圏統合モデルの開発を行った。本研究では、木曾三川流域から伊勢湾へ流出する河川水による土砂や水温の循環への影響を検討した。

流域圏統合モデルは、①分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM)、②不定流モデル、③3次元海洋循環モデル(RIAMOM)、④移流拡散モデル、の4つのモデルから構成されている。河川部分の感潮区間より上流を分布型流出モデルで、感潮区間より下流を不

定流モデルによって計算し、海洋部分は海洋循環モデルによる海流計算と、海流を用いた移流拡散モデルによって計算する。

2003年4月の大雨の事例計算を行った結果、以下の結論が得られた。

- 木曾三川からの流量の変化に対応して、伊勢湾内への低塩分水(淡水)の拡がりを変化しており、流量最大時には伊勢湾の中央部付近まで河川水の影響が及ぶ。
- 木曾三川の河口から流出した浮遊土砂は、河口付近の濃度が高く、河口から湾内西岸に沿って南下していくことが計算された。この計算結果はMODIS衛星画像による濁りの分布ともよく一致しており、浮遊土砂の拡散計算結果は、定性的な拡がりをよく再現できている。

今後の課題としては、流速や濁りなどの観測資料を収集し計算結果の定量的な検証事例を増やし、拡散係数や土砂沈降速度の最適な設定や堰操作の高度化によりモデル精度の向上をはかることがあげられる。

謝 辞

JCOPE2再解析データの使用に際し、独立行政法人海洋研究開発機構の宮澤泰正博士にご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理(2010): 河川流出が東京湾の水域環境に及ぼす影響について, 京都大学防災研究所年報, 第53号B, pp.743-749.
- Kojiri, T. (2006): Hydrological river basin environment assessment model (Hydro-BEAM). In: *Watershed models* (ed. by V. P. Singh & D. K. Frevent), pp. 613-626, Taylor & Francis, CRC Press, USA.
- Lee, H. C., and J. H. Yoon (1994): On the free surface OGCM. Proc. of fall meeting the Japan Oceanogr. Soc., pp. 225-226.
- Miyazawa, Y., R. Zhang, X. Guo, H. Tamura, D. Ambe, J.-S. Lee, A. Okuno, H. Yoshinari, T. Setou, and K. Komatsu (2009): Water mass variability in the western North Pacific detected in a 15-year eddy resolving ocean reanalysis, *J. Oceanogr.*, Vol.65, pp. 737-756.

(論文受理日: 2012年6月7日)

Impact of River Outflow on Ise Bay by Using the Integrated Water Environment Model

Yasushi SUZUKI, Yoshinobu SATO, Yuri MICHIHIRO, Motohiro HONMA⁽¹⁾ and Sergey M.Varlamov⁽²⁾

(1) Japan Weather Association

(2) Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

Synopsis

Impact assessment of river outflow on Ise Bay was investigated by using the integrated water environment model. The model consists of the distributed Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM), RIAM ocean circulation model (RIAMOM), and the advective diffusion model for Ise Bay. River outflow, water temperature and sediment transport are nested at the river mouse, and JCOPE2 re-analysis data are used as an open sea boundary condition. Simulated sediment transport on 27/Apr/2003 was compared with the satellite image by the Aqua MODIS sensor.

Keywords: integrated water environment model, Ise Bay, sediment transport, Hydro-BEAM, RIAMOM