

河川流出が東京湾の水域環境に及ぼす影響について

鈴木靖・佐藤嘉展・道広有理

要 旨

河川源流域から沿岸部までの流域圏全体の水循環と物質循環を統合的に評価するツールとして、流域圏（河川・沿岸）統合モデルの開発を進めている。本モデルは、分布型流域環境評価モデル（Hydro-BEAM）と、3次元海洋循環モデル（RIAMOM）から構成され、両者を河口部で結合することにより、流域圏全体のシミュレーションを可能としている。東京湾を対象としたモデル構築を行い、河口部の河川流量を接続することにより東京湾内に流出した河川水の水循環を計算し、観測データとの比較検証を行った。計算事例では T8610 号に比べて降雨量が少なかったため、湾内の循環は河口部で限定されているものの、河川流出の大まかな傾向が再現できた。

キーワード：流域圏統合モデル, Hydro-BEAM, 海洋循環モデル, RIAMOM

1. はじめに

温室効果ガスの排出による地球温暖化は地球環境全体に様々な影響を及ぼすことが懸念されている。その影響は海面上昇などの観測事実として、既に表れ始めている。IPCC 第 4 次報告書によると、1993 年から 2003 年までの 10 年間で観測された海面上昇量 $1.8 \pm 0.5 \text{ mm/year}$ のうち、約 6 割の $1.1 \pm 0.5 \text{ mm/year}$ が熱膨張や氷床融解などの気候変化の影響と見積もられている。我が国は、洪水時の河川水位より標高が低い土地（全国土の約 10%）に、約 50% の人口と、約 75% の資産が集中している。IPCC が予測する平均海面の 59 cm の上昇により、三大湾（東京湾、伊勢湾、大阪湾）のゼロメートル地帯の面積と人口は約 5 割増加すると見積もられており、地球温暖化は河川下流域から沿岸部により大きな影響を及ぼすことになる。特に、人間生活に欠かせない水資源への影響を様々な観点から研究し、その影響を定量的に評価することが、温暖化に対する緩和策を検討する上でも重要となる。

Fig. 1 は地球温暖化が水資源に与える影響を国交省水資源部（2009）がとりまとめたものである。このうち、濁水の発生、水質悪化、地下水塩水化、河川取水障害などは、河川だけの問題ではなく、沿岸部の海洋循環を含めた水域環境全体の問題である。

河川から流出した土砂は海浜の形成維持に重要な役割を果たしており、各地で問題となっている海岸

侵食の対策を図る上でも、その供給量と沿岸部における土砂の循環を把握することが必要である。河川からは土砂のみならず、農地への施肥や生活排水にともなう栄養塩が流出し沿岸域へ供給されることにより、湾内の水質や漁業へ影響を及ぼすことが考えられる。湾内では潮汐・風・日射・水温・塩分濃度などの影響により、土砂や栄養塩は複雑な循環をしており、その挙動を把握するためには海洋の循環をモデリングする必要がある。

また、地球温暖化による集中豪雨の増加や台風の巨大化により、将来は洪水と高潮が同時に生起する可能性も指摘されている。防災的な側面からそのリスクを評価し、十分な適応策を実施する必要がある。

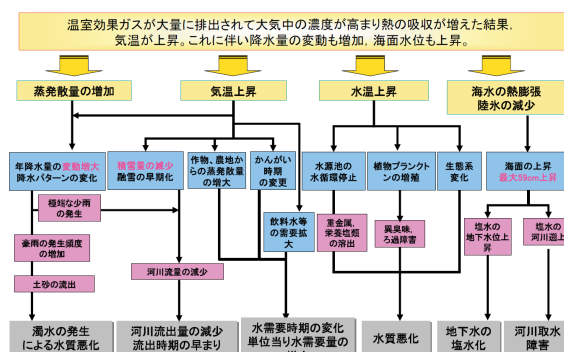


Fig. 1 Effects of global warming on water resources
(quoted from Water resources in Japan, 2009)

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。本論文では関東平野から東京湾を対象エリアとして流域圏統合モデルを構築し、計算結果を検証した成果をとりまとめる。

2. 1986年台風10号による土砂の流出

河川から流出する土砂を例にして、流域圏を統合的に取り扱う必要性を考察する。

1986年の台風10号は関東・東北地方に記録的な大雨を降らせ、多くの浸水災害を東日本にもたらした。茨城県では桜川、小貝川、那珂川など出水、氾濫し、小貝川上流では380mmもの総降雨量を記録している。栃木県の茂木町、福島県の阿武隈川沿いの浸水被害や、宮城県仙台市の工業団地や周辺の穀倉地帯の冠水など、各地で大きな被害が出た。被害地域は1都15県に及んでいる。この時に記録した仙台市の総降雨量402mmは二十数年経てもなお、観測史上第1位の記録となっている。東日本の太平洋側各地の総降雨量は400mmを超える記録的な雨量となり（Fig. 2）、水戸、福島、宇都宮などでも24時間雨量の記録はいまだに破られていない。

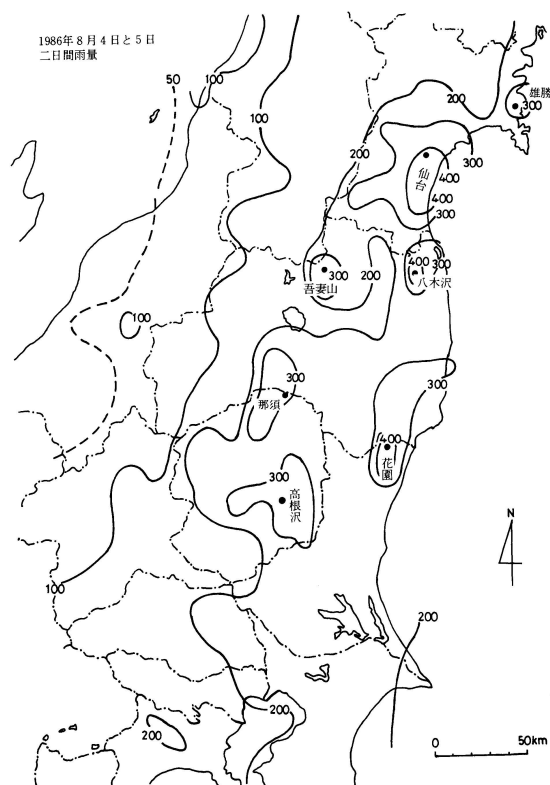


Fig. 2 Total rainfall amount during T8610 (quoted from Disaster survey report on T8610, 1987)

Photo 1は台風10号通過直後の8月6日にLANDSAT5衛星が撮影した東京湾北部の画像である。荒川や多摩川から東京湾に流れ込む濁水が鮮明に写し出されている。河川流出水の速度が東京湾の表層水よりも速いためにシアー不安定が発生し、河川水と海洋水の境目に波状の渦列が形成されている。この濁水は河川から流出した土砂によるものと考えられる。同じ日に茨城県那珂川河口周辺を撮影した画像をPhoto 2に示す（科学技術庁国防災科学技術センター，1987）。画像中央を東に向かって流れる那珂川と、その北部を流れる久慈川の河口から、土砂を含む濁水が海岸部から沖合へと拡散している様子が分かる。その広がりは一様ではなく、北から南へ向かう沿岸流により、南向きに偏っていることが特徴的である。那珂川河口から流れ出た土砂が鹿島灘に供給され、海岸部の砂浜の維持に寄与しているものと考えられる。海が河川に及ぼす影響として、那珂川では満潮と重なったため、河川水が逆流し、4,244戸が浸水する過去最悪の被害となった。



Photo 1 LANDSAT 5 image of Tokyo Bay after T8610 passage (1986/8/6 JAXA/RESTEC)



Photo 2 LANDSAT 5 image of Nakagawa river and Kujigawa river after T8610 passage (1986/8/6 JAXA/RESTEC)

3. 流域圏統合モデル

流域圏（河川・沿岸）統合モデルで対象とする流域圏は、Fig. 3 に示すように河川源流域から河口沿岸部までとする。地球温暖化により、流域圏では豪雨頻度の増加による流出土砂の増加、河川・湖沼の水温上昇、海面上昇による海岸侵食や地下水の塩水化など、その影響は多岐にわたると考えられる。

本研究で開発する流域圏統合モデルは、河川水文分野で用いられている分布型流域環境評価モデル(Hydro-BEAM)、および海洋分野の3次元海洋循環モデル(RIAMOM)の2つから構成される。

3.1 Hydro-BEAM

Hydro-BEAM は Kojiri (2006)によって開発された分布型流域環境評価モデルである。河川流域は河道網とそれに接続する斜面の集合体として表される。流域は各セルに分割され、セル毎に降水、蒸発散、融雪、流出、浸透の水文過程を計算する。各セルはFig. 4 のようにセルの中心をとる1本の河道と、それに接続する2つの斜面からなるセル集中型モデルで表現されている。流域内の降水は、一旦そのすべてが斜面に供給される。蒸発散により大気中に戻った残りが地表流とさらに下層の地下水流出成分に分離され、それぞれがキネマティックウェーブモデルおよび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、河道網によって上流から下流へと接続される。河道網は、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したがって下流まで接続されている。

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、土壤間隙率等）は、土地利用区分ごとに設定されている。本モデルでは、森林・草地・水田・都市・水域の5つの土地利用区分に対してパラメータを設定した。

過去の河川流出再現計算には、アメダス及び気象官署の地上気象観測データを用いる。アメダスの1時間毎の降水量と気温を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、Hydro-BEAM で計算される1km メッシュ上に、距離の2乗の重みを利用して内装補間した後に入力される。気温は高度補正も考慮する。

現段階ではまだ考慮されていないが、土砂の生成・混合などのプロセスを組み込むことにより、河川による土砂の輸送量を推定するモデルへと発展させることが可能である。



Fig. 3 Subject area of the integrated model of river basin and coastal area

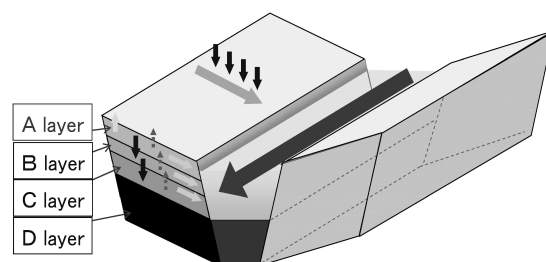


Fig. 4 Subject area of the integrated model of river basin and coastal area (Sato et al., 2009)

3.2 RIAMOM

3次元海洋循環モデル(RIAMOM)はプリミティブ方程式を数値計算するモデルで、九州大学応用力学研究所が開発したモデルである (Lee and Yoon, 1994)。日本海の高気圧予報モデルとして、1997年に島根県沖で発生したナホトカ号重油流出事故の解析や、水産関係者への日々の海況予報の提供などの実用化が図られている。

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。非線形項の差分に Arakawa スキームを用いることにより、運動エネルギーとポテンシャル エンストロフィを同時に保存させ、低周波から高周波への疑似的なエネルギー輸送を防止している (Mesinger and Arakawa, 1976)。また海底地形に沿った斜め移流により、急勾配な海底斜面での水平運動量の鉛直移流の計算精度を向上させている (Ishizaki and Motoi, 1999)。トレーサー方程式の移流項では MSQUICK スキームと呼ばれる高次移流スキームによる高精度化が図られてい

る。

本モデルは自由表面を持つが、それは外部重力波の扱いを伴うことになり、きわめて小さなタイムステップが必要となる。この問題を避けるために、支配方程式を、外部（順圧）モードと内部（傾圧）モードに分割し、2つの異なるタイムステップを用いている。

海表面を通した境界条件として必要なのは、海表面水温と気象要素（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データを与えた。熱輸送を計算するとき大気の大安定性と海洋表層のスキムレイヤーおよび日射による日々の表層昇温層の形成を考慮している。海底の下部境界では海底摩擦を与える。側面の境界条件として、外洋では潮汐変化（国立天文台の潮汐モデル）と全球海洋モデルの境界値を与える。ここでは全球海洋モデルとして、JAMSTECのJCOPEモデルによる緯度経度1/10度間隔の計算結果を用いた。東京湾と相模湾を含む3段階の領域をネスティングにより接続し、最も細かな東京湾内のモデルは水平解像度が約280mで、鉛直66層である（Fig. 5）。

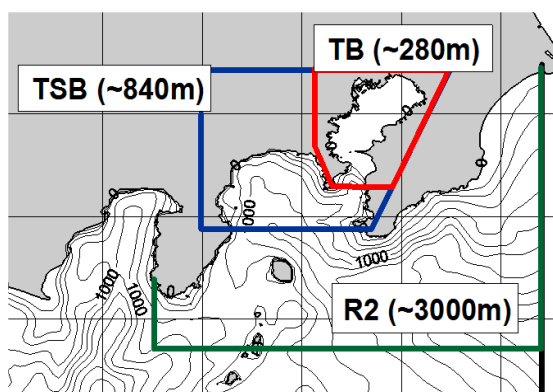


Fig. 5 3 steps nested calculation area for Tokyo Bay

3.3 河口部における結合

Hydro-BEAMと東京湾RIAMOMとは、河口を表現するメッシュを設定することにより結合する。モデルでは東京湾に注ぐ荒川、江戸川、多摩川、相模湾に注ぐ相模川からの淡水流入を仮定している。河口メッシュでは河川からの流入方向をパラメータとして与え、予報変数をHydro-BEAMによる計算値で置き換える。RIAMOMの流速ベクトルはHydro-BEAMによる河川流量により置き換える。水温はHydro-BEAMによる計算を行っていないため、海洋モデルの直近の格子で置き換え、塩分は淡水として零とする。現段階では、河川から海洋への1方向接続であり、河川と海洋との水位差は計算できず、河川への海水遡上は考慮されていない。

4. 事例計算結果

Hydro-BEAMによる計算は、利根川・荒川・江戸川・多摩川・相模川を対象とした実施した。Fig. 6には利根川・荒川・多摩川についての、1996年から1998年までの日流量の計算値と観測値の比較を示す。本計算では標準的なパラメータを用いており、パラメータ調整を行っていないにもかかわらず、概ね変化傾向はよく捉えられている。ただし、全般的に計算値は観測値よりも大きめで、ピーク流量の差異が特に顕著である。モデルはパラメータ調整が必要であることと、さらにはダム等の貯水池における操作をモデル化する必要があると考えられる。

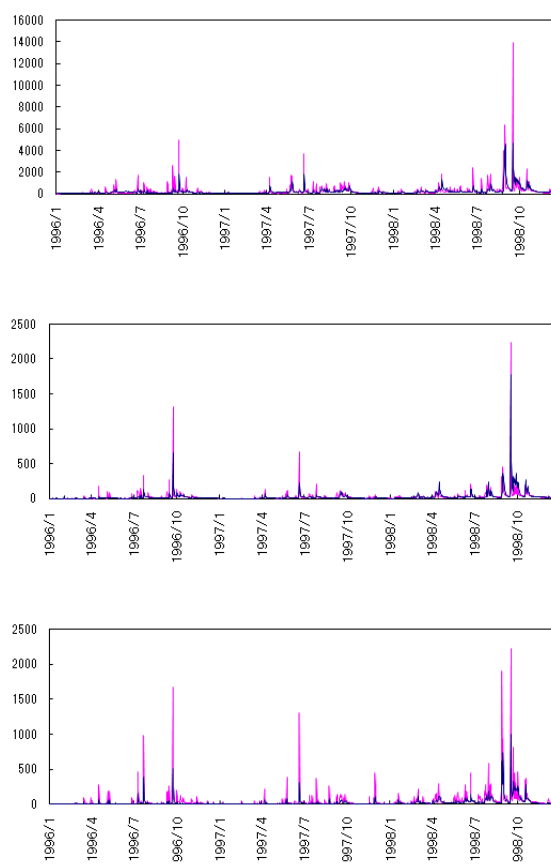


Fig.6 River discharge of Tonegawa (top), Arakawa (middle) and Tamagawa (bottom) rivers (blue: observation, red: calculation)

4.1 2006年9月26日の事例

Hydro-BEAMの基本的な性能を確認したのち、2006年9月26日を対象として、流域圏統合モデルの事例計算を行った。本事例は、東京海洋大学の「海鷹丸」により房総半島から伊豆半島までの水温・塩分・流速の断面観測が実施された日である。

Fig. 7にはメッシュサイズが RIAMOM の計算結果に及ぼす影響を示す。東京湾の循環を調べるためには、少なくとも数百 m 以下のメッシュサイズで計算

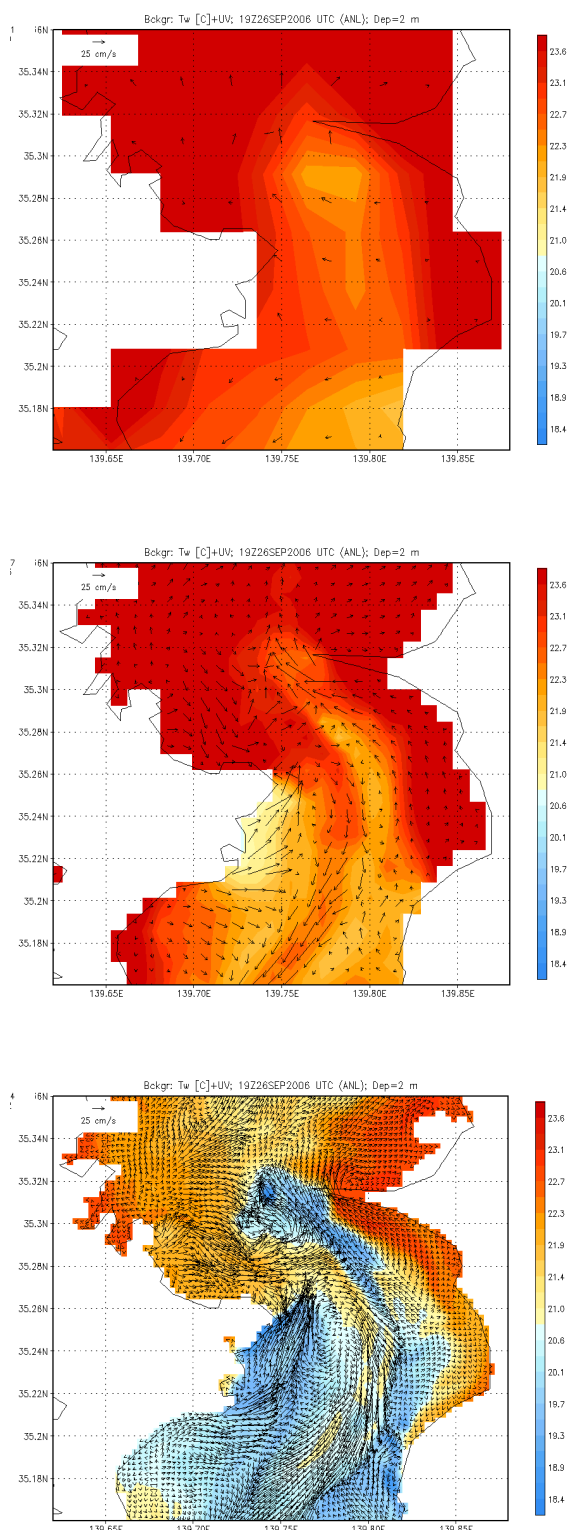


Fig. 7 Surface current and temperature at 19UTC on 26/Sep/2006 in relation to mesh size (3000m: top, 840m: middle, 280m: bottom)

する必要のあることが分かる。Fig. 7 下図には、外洋から侵入した水温の低い海水が、湾内をくさび状に北上する様子が計算されている。

4.2 河川水の湾内への広がり

Fig. 8には東京湾 RIAMOM の計算結果から、河川水の影響を見るために、表層水の第一層について、東京湾北部を拡大した分布図を示す。塩分濃度をカラーバーで示し、青色から赤色になるに従って淡水から塩水へと濃度が高くなっている。また、流速分布を矢印で示し、その長さは流速に比例している。河川水は淡水として与えているため、塩分濃度の変化で河川水の広がり把握することができる。多摩川・荒川・江戸川から東京湾へと流入した河川水は東京湾北部に循環するが、その影響は河口部周辺に限られることがわかる。

Photo 1 の台風 8610 号通過後の河川水の広がりと比較すると、湾内への広がりはいさ。計算対象日の 2006 年 9 月 26 日の東京（大手町）での日降水量は 69mm と比較的まとまった降雨が見られているが、荒川流域全体でまとまった降雨とはなっていない。それに対して、台風 8610 号の際の東京における日降水量は 185mm にも達し、荒川上流域では 200mm を超える降雨が広範囲で見られている。その結果、河川からの流出量のはるかに大きくなり、河川流量の差異が東京湾内における河川水の広がり違いをもたらしているものと考えられる。

5. おわりに

河川源流域から沿岸部までの流域圏全体の水循環と物質循環を統合的に評価するツールとして、流域圏（河川・沿岸）統合モデルの開発を進め、東京湾を対象とした事例計算を実施した。Hydro-BEAMと RIAMOMを河口部において接続することにより、河川水が東京湾に流出し、循環する様子を概ね把握することができた。

しかしながら、その定量的な検証はまだ不十分であり、台風8610号などの大雨事例による大規模な濁水の流出を再現することが今後の目標である。そのためには、土砂の生成、混合、流出などの新たなプロセスをモデル化することが必要である。

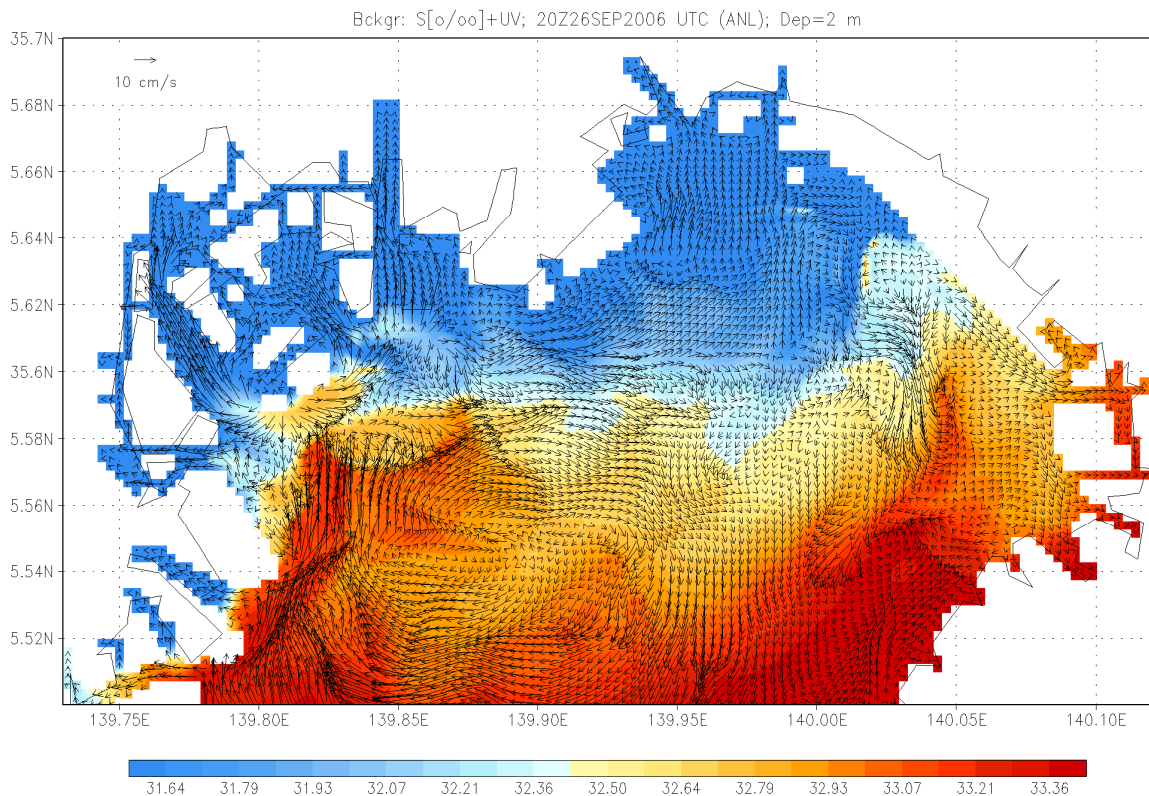


Fig. 8 Surface salinity (blue: fresh water, red: salt water) and current distribution (arrows) at 20UTC on 26/Sep/2006

謝 辞

東京湾のRIAMOMによるモデル化とその成果は、日本気象協会による平成18年度日本財団助成事業「総合的な海況情報に関する研究」の成果を利用させていただいた。モデル開発にあたりご指導いただいた九州大学応用力学研究所の尹教授およびセルゲイ博士ならびに、ご協力いただいた日本気象協会の方々に感謝する。

参考文献

科学技術庁国立防災科学技術センター (1987) : 1986年8月5日台風10号の豪雨による関東・東北地方の水害調査報告, 主要災害調査第27号, 155 p.
国土交通省土地・水資源局水資源部 (2009) : 平成21年版日本の水資源, 279 p.
日本気象協会 (2007) : 総合的な海況情報に関する研究報告書, 104 p.

Ishizaki, H., and T. Motoi (1999): Reevaluation of the Takano-Oonishi scheme for momentum advection of bottom relief in ocean models, *J. of Atmos. and Ocean. Tech.*, **16**, pp. 1994-2010.

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.

Mesinger, F., and A. Arakawa (1976): Numerical methods used in atmospheric models, *Global Atmospheric Research Program Publication Series*, **1**, 62 p.

Sato, Y., K. Tanaka, T. Hamaguchi, E. Nakakita and T. Kojiri (2009): Practice for impact assessment by a distributed hydrological model using GCM data, *Proc. of 19th IHP Training Course in 2009*, pp. 179-190.

Impact of River Outflow on Water Environment of Tokyo Bay

Yasushi SUZUKI, Yoshinobu SATO and Yuuri MICHIIRO

Synopsis

A coupled river discharge and ocean circulation model was developed, in order to study the impact of river outflow on water environment of Tokyo Bay. A distributed Hydrological River Basin Environment Assessment Model (Hydro-BEAM) and RIAM ocean circulation model (RIAMOM) are connected at the river mouth as boundary conditions of river outflow. River outflow from Arakawa, Edogawa, Tamagawa and Sagami-gawa are concerned. Case studies for typhoon are simulated and the model results are verified with the observation of river current, ocean current, sea surface temperature and salinity. A result from case study simulation shows that fresh waters from river outflow are distributed in the north-west part of Tokyo Bay.

Keywords: integration of river basin and coastal area, Hydro-BEAM, ocean circulation model, RIAMOM