

資料

## 表計算ソフトによる河川中における汚染物質の流下時間及び濃度予測システムの開発

砂田 和博, 井澤 博文\*, 岡本 拓, 橋本 敏子\*, 日浦 盛夫, 山本 竜治, 大原 俊彦

### Development of Forecasting System of Flow Time and Concentration of Pollutants in the River using Spreadsheet Software

KAZUHIRO SUNADA, HIROFUMI IZAWA\*, TAKU OKAMOTO, TOSHIKO HASHIMOTO\*, MORIO HIURA,

RYUJI YAMAMOTO and TOSHIHIKO OOHARA

(Received September 30, 2011)

河川における水質事故が発生した際に、汚染物質の流下時間及び濃度予測を短時間かつ簡易に行えるシステムを開発した。開発したシステムは一般的に用いられている表計算ソフト上で実行できるため、システム専用機器が不要であり、あらかじめ川幅や水量等のデータを組み込んでおくことで、現場で容易に操作・計算することができる。このシステムを活用することにより汚染事故現場で汚染範囲を即座に判断し、水道取水を含めた迅速な対応が可能となる。

Key words : 河川, 水質予測, 移流拡散, マニング式

#### はじめに

広島県の河川における水質事故の発生件数は年間200件程度で推移しており [1], その原因は油汚染が最も多く次いで化学物質等その他となっている。河川の水質汚染事故内容によっては魚類の斃死だけでなく上水の取水停止も必要となるなど、早急な原因究明と対応が必要となる。特に、上水処理施設においては汚染物質の到達時間や、平常濃度復帰時間の把握は重要な点である。河川における物質の流下過程を予測する試みは流出解析において多くの研究がされており、洪水予測や河川計画等での試み [2-6] が多い。このような中、化学物質等の河川動態評価に関する報告 [7-10] もみられ、石川らはPRTRデータを用いて国内の水系に及ぼす影響について1 km メッシュ河川モデルによる化学物質暴露モデル [11] を開発している。これらの流出解析は空間スケールが大きいものや時間スケールが長いものが多く、限定的に起きる小河川の水質汚染事故の際の流下時間予測には向いていない。また、GIS等を用いた予測モデルも検討されている [12-14] がメッシュ規模が大きく、いずれも国内の小河川に適用できる実用的なモデルは少ない。小河川の水質汚染事故に関係する報告は玉川ら [15] や宇佐美 [16] によって検討され、移流拡散方程

式を用いた汚染物質の影響範囲の予測を試みているが、専用ソフトや高度な解析技術を要するなど現場レベルで簡易に予測するには難点があり、また、緊急性の面でも実用上課題が残っている。

ここでは、県内小河川の流下解析評価に使えるよう従来に比べて細かいメッシュに基づいた汚染物質の流下影響予測を試みるとともに現場担当レベルで使えるようパソコンの表計算ソフトで実行可能なモデル開発を試みた。開発にあたっては地図情報を用い視認性を高めながら入出力表示も対応できるよう検討を行った。

#### 調査および方法

##### 1 予測モデルの構築

河川水中の汚濁物質がある地点間を流下する時間は流速を把握することで求められる。流速の把握は実測により部分的に求めることもできるが、現実には河川形状や位置、流量、水位によって大きく変動するなど全ての河川行程についてあらかじめ把握することは困難である。Millerら [17] は等価速度や地形勾配を考慮した試みを報告している。しかし、国内の流下時間の短い小河川等で汚染物質等の流下プロセスを吟味するには現実的ではない。ここでは水理学分野で用いられている地形に応じた勾配と水深、流水抵抗を加味したマニング式を運動方

\* 退職 : Retired

程式として用い、流速 ( $v$ : m/s) の把握を試みた。

$$v = (1/n)R^{2/3}I^{1/2} \quad (1)$$

マンニングの粗度係数 ( $n$ ) は Arora ら [18] の数値を参照し 0.035、径深 ( $R$ : m) は河川断面積を潤辺長で除したものであり、潤辺の長さは河川流速調査を基に検討した。水面勾配 ( $I$ ) は標高差から求めた。

河川に流入した汚染物質がどのような濃度変化をたどりながら流下していくかを推定するためには、河川流量と汚染物質濃度の推移を予測する必要がある。ここでは降雨流出解析等で汎用されているグリッド型のモデルを採用した。広島県内でこれまでに起きた水質汚染事故が主に小川であることから、その影響を速やかに予測するためにはそれに見合った河道グリッドが必要となる。これまで報告されている予測モデルは 1 km ~ 10 km メッシュに基づくものが多く [11, 14, 19] 県内小川の水質事故への応用には適さないため、ここでは河川流域を 100 m メッシュに区画して検討した。運動方程式には、河道内で水の地下浸透、蒸発等がないものとして次のような線形モデルを用い、メッシュ内の物質質量 ( $S$ ) の推移はメッシュ  $n$  内の物質質量 ( $S_n$ ) と上流メッシュ  $n-1$  からの流入量 ( $S_{n-1}$ ) 及び下流メッシュ  $n+1$  への流出量 ( $S_{n+1}$ ) から求められるものとした。

$$\frac{dS}{dt} = S_n + S_{n-1} - S_{n+1} \quad (2)$$

すなわち、メッシュ  $n$  において差分タイムステップ  $\Delta t$  経過後の物質質量  $S_n(t + \Delta t)$  は次式で表されるものとした。

$$S_n(t + \Delta t) = S_n(t) + (S_{n-1} - S_{n+1}) \Delta t \quad (3)$$

メッシュ内では河道断面積が一定であるとする河道容積 ( $V$ ) は断面積 ( $A$ ) とメッシュ間距離 ( $l$ ) の積により求められる。従って、河道内の物質濃度  $C$  は、

$$C = S/V = (S_n + S_{n-1} - S_{n+1}) / (A \cdot l) \quad (4)$$

となる。  $\Delta t$  時間に上流メッシュから流入してくる量  $S_{n-1}$ 、及び下流メッシュへ流出する量  $S_{n+1}$  は (1)、

(4) 式からそれぞれ、

$$S_{n-1}(t + \Delta t) = A_{n-1} \cdot v_{n-1} \cdot C_{n-1}(t) \cdot \Delta t \quad (5)$$

$$S_{n+1}(t + \Delta t) = A_{n+1} \cdot v_{n+1} \cdot C_{n+1}(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

と表され  $t$  時間の値から  $\Delta t$  時間後の値を得る流下ルーチンを基本として検討を行った。

## 2 河川調査と検証

予測モデルは広島県二級河川である黒瀬川を対象にして検証し、それに必要な河川調査を 3 回 (2008 年 2 月 23 日、3 月 4 日及び 6 月 17 日) 実施した。黒瀬川は、東広島市、黒瀬町、呉市を経て瀬戸内海に流れる全長 50.6 km、流域面積 238.8 km<sup>2</sup> の二級河川でその概要を図 1 に示す。

調査は降雨の影響の少ない平水時に行い、流速、流

量、水深、河川幅等の河川構造調査と一定区間を定めた流下時間測定調査を行った。流下時間測定調査は複数の水充填ピンポン玉を流す浮子法と食塩水を流し電気伝導度 (EC) の変化を測定する方法により、黒瀬川本流及び支流で調査を行った。EC による方法は平均流速を求めるために使われることが多く [20, 21] 浮子法との比較を行った。本流の調査地点は黒瀬川と中川が合流する地点から下流 180 m 及び 340 m の区間で、また、支流の調査地点は深堂川の下田橋から下流 175 m までの区間及び下田橋から下流 381 m (磯松橋) までの区間で流下時間測定調査を行った。本流での調査は石礫、水草等の障害物が多いため EC 法のみで行い、深堂川での調査は浮子法と EC 法の 2 法で調査を行った。

予測モデル構築にあたって、河川軌跡を横切る 100 m メッシュ内に河川の座標データ、河川幅、標高、上流端からの距離、流量の他、流下時間予測に用いるマンニング式に必要なデータを入力した。河川幅、標高、距離は Google earth、地図等による目視読み取り及び現地での距離計 (ニコン社 レーザ 350 G) による計測を併用して求めた。このうち河川幅は河川堤防間の距離に対して調査時の河川水面幅の比を入力し実河川幅とした。また、流量は黒瀬川に設置されている 7 つの観測所のデータ及び公共用水域水質常時監視データも併せて利用し、区間に応じて補間値を入力した。図 2 に作成した黒瀬川水系のメッシュ図と調査地点を示す。

また、各セルの水位、流量は広島県防災情報防災 Web (<http://www.bousai.pref.hiroshima.jp/hdis/index.jsp>) の御菌宇観測所の情報を指標にしてリアルタイムでの補正を行い、低水位から高水位まで様々な水位に対応できる流下時間予測モデルの検討を行った。なお、黒瀬川は下流部に二級ダム (総貯水量 129.5 万 m<sup>3</sup>) があり流下時間予測に際して不連続点として支障を来たすため、主に当該ダム上流部を対象にして調査及び検討を行った。

## 結果及び考察

### 1 河川調査

川幅は最上流の並滝寺池流出部で 2 ~ 3 m、中流部で 50 ~ 70 m そして下流部では 100 ~ 150 m 以上となっていた。黒瀬川の河道構造は 2 面または 3 面コンクリート部分が多く、自然河川部分は少ない状況であり、流水面である実河川幅は調査時において 50 % 前後であった。標高は最上流部で 400 m 余りであり、この地点から 1 ~ 2 km 間で 300 m 以下まで流れ下った後は、三永貯水池までの上流部で 200 ~ 250 m、三永貯水池から二級ダム貯水池までの中流部が 150 ~ 180 m の範囲であった。また、河床勾配は上流部、中流部とも 1/300 ~ 1/800 の範囲で



図1 黒瀬川水系の概要

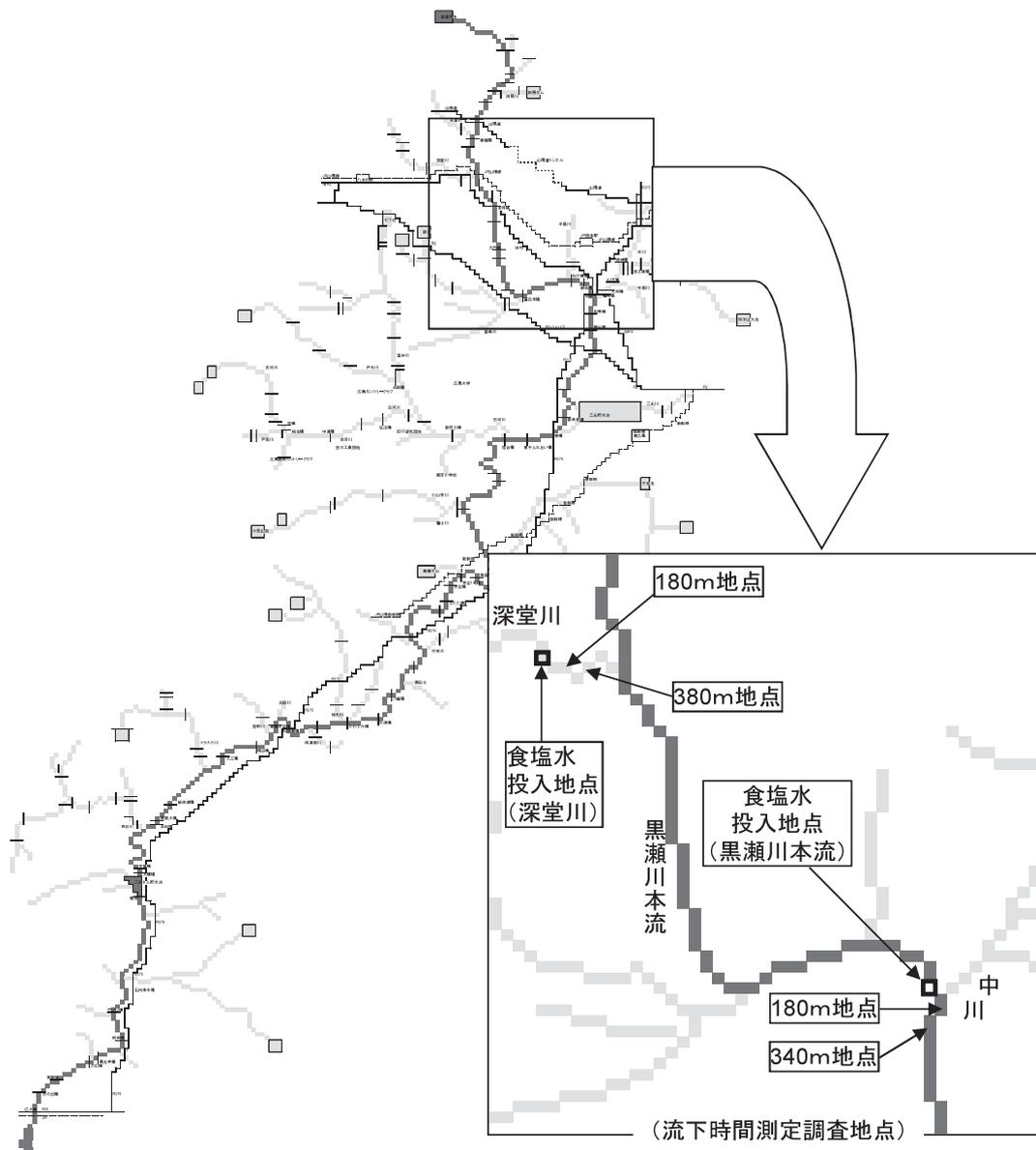


図2 黒瀬川河道メッシュ及び流下時間測定調査地点

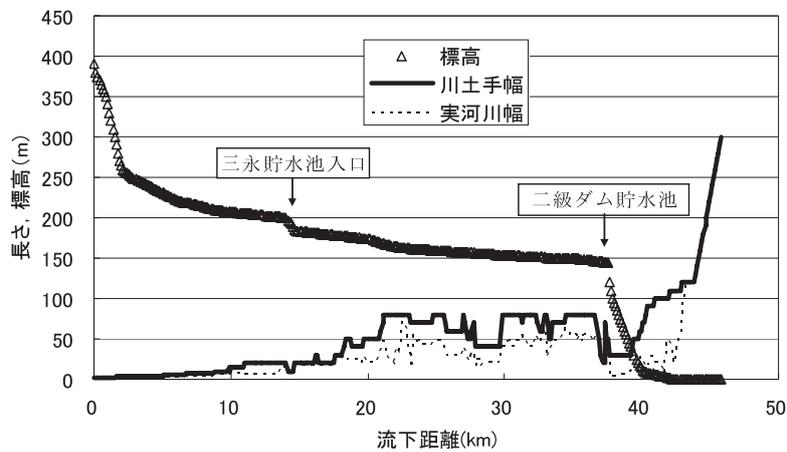


図3 黒瀬川の河川幅と標高

緩やかであった。図3に現場調査等から得られた河川幅、標高の状況を示す。これらの値は各河道メッシュデータとして入力した。川幅は堤防間と実際の流水面幅である実河川幅とで異なっている箇所が多く、ここではGoogle earth等で確認しやすい堤防間の距離を基本にして、河川流水面の幅との比から実河川幅を求めた。

## 2 流下時間測定調査

黒瀬川本流部及び深堂川調査における流下時間測定調査結果を図4, 5に示す。本流部は水量が多く電気伝導度の変化が少ないものの180m地点、340m地点で、それぞれ77分、120分後に僅かながら流下水塊の到達ピークが観測された。これは180m区間が3.9cm/s、その下流が6.2cm/sの平均流速となる。

深堂川は比較的水量が少なかったことから明瞭な電気伝導度変化が確認され、175m地点、381m地点でそれぞれ、40分後、105分後に水塊の流下ピークが確認された。しかし、浮子はこれより早くそれぞれ20分後、70分後に到達が確認され到達時間が異なっていた。すなわち電気伝導度変化プロファイルの立ち上がり時刻が浮子到達時間に相当していることが確認され、水塊の先端に浮子が位置しながら流下していることを示している。これは河川水の流速分布が表面で速く、下層に向かって遅くなるという河川調査報告に沿うものであり[6, 22, 23]、浮子による流速測定の限界となっている。河川水質事故を想定した場合、下流への到達時間を予測するためには最も流下の早い表面流速を予測することが重要となる。

平均流速と浮子流速との関係は浮子更正係数による補正で実用上推定できることが国土調査法等[22, 24]にも示されていることから、予測計算にあたって表面浮子速度に対して実用更正係数0.85を適用した。すなわち、河川流速の鉛直分布は最も早い表面流速部分とその85%の流速に相当する平均流速部分の二層に分け、メッシュ内流量が河道内を85%満たした時点で下流メッシュに流出するものとしてモデル構築を行った。

## 3 予測モデルの構造

流下時間測定調査結果は水質事故等によって河川に負荷された物質が時間的、空間的広がりを持つ濃度分布を示しながら河道を流下することを示しており、この濃度分布及び流下時間を予測するため、(4)、(5)、(6)式及び(1)式を基に検討した。

$$C_n(t+\Delta t) = (C_n(t) \cdot V + S_{n-1} - S_{n+1}) / (A \cdot l) \quad (7)$$

すなわち、 $\Delta t$ 時間後のメッシュnの物質濃度 $C_n(t+\Delta t)$ は差分時間前の時刻tの濃度 $C_n(t)$ から得られるような連続式を用いることとした。式の基本となるメッシュ構造は図6に示す概念を基に計算した。

式中の流入物質質量 $S_{n-1}$ と流出物質質量 $S_{n+1}$ には河川断面面積やマニングの流速式を含んでいる。石川らは河川断面形状を120°の仰角を持つ逆二等辺三角形としてモデル構築を行っているが、黒瀬川水系は勾配が少なく浅い水深で流下していることから現場の河川調査を踏まえ水深dは実河幅wの5%となる逆二等辺三角形(仰角 $\theta = 約168^\circ$ )と仮定した。この水深は現場の水位をリアルタイムで反映できるよう御園宇観測所の水位を入力することで河川全体の水位が比例増減するものとした。観測所の平均水位 $D_{ave}$ は平成20年度平均水位0.36mを使用し、計算対象となる任意の時刻における観測水位 $D_{obs}$ との比を基に導かれるものとした。

$$A = (w \cdot d) / 2$$

$$d = (D_{obs} / D_{ave}) \cdot w \cdot 0.05$$

流路長lはメッシュ長の100mとした。計算に当たっては、水質汚染事故を想定して(7)式の $C_n$ に事故発生メッシュに濃度の初期値 $C_0$ を入力することで流下ルーチンプログラムが動くようにした。

マニング式で用いる径深Rに必要な潤辺長Lを求めるにあたり、河川水が河床と接する潤辺長が河川幅に比例するものとした。

$$R = A / L$$

$$L = w / \sin \theta \approx k \cdot w$$

水位と流量、流速との関係は必ずしも一定の比例関係にあるとは限らず、増水時と減水時で異なることが知られているが[4-6]、ここでは水質汚染事故を想定した流下時間把握であることを踏まえ、平水時または年間平均水位以下の水位変動範囲であれば両者が比例関係にあるものとして取り扱った。

## 4 予測モデルの検証

流下時間測定調査結果から汚染物質の流下過程を再現するには水塊先端部の到達時間を予測することが重要であることから、この水塊先端部を予測できるよう潤辺係数kを決定することとした。すなわち、浮子の到達時間と電気伝導度の立ち上がり時間が水塊先端部と仮定し、これを再現できるよう繰り返し計算を行った。図7にEC法により調査を行った本流の結果及び浮子法とEC法によって調査を行った深堂川の結果と、それぞれの調査地点におけるシミュレーション結果を示す。

これによると潤辺係数kは本流、深堂川とも2.5前後において実測と合うことが示された。潤辺係数はマニング式において抵抗成分として位置づけられるものであり、その値が2.5ということは河川断面において河床と接する逆二等辺三角形の斜辺が直線で表される長さより2.5倍程度長いことを示しており、実際の河床面が石礫、砂、草等で覆われている現状を反映していると考えられる。

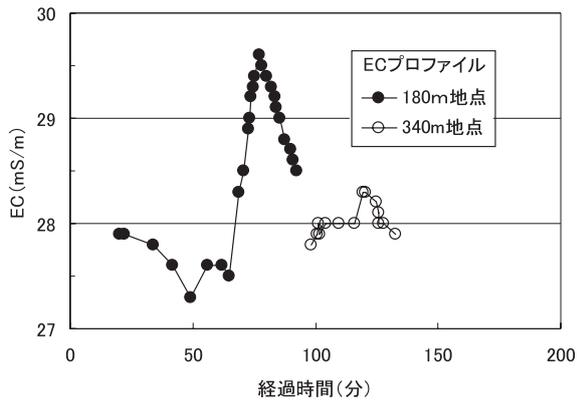


図4 黒瀬川本流調査における中川合流点から下流180m及び340m地点における電気伝導度プロファイル

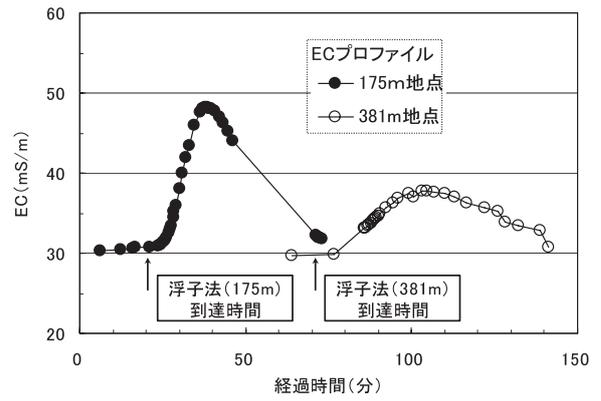


図5 黒瀬川支流(深堂川)における流下時間測定調査結果(173m区間:下田橋-下流175m, 381m区間:下田橋-磯松橋)

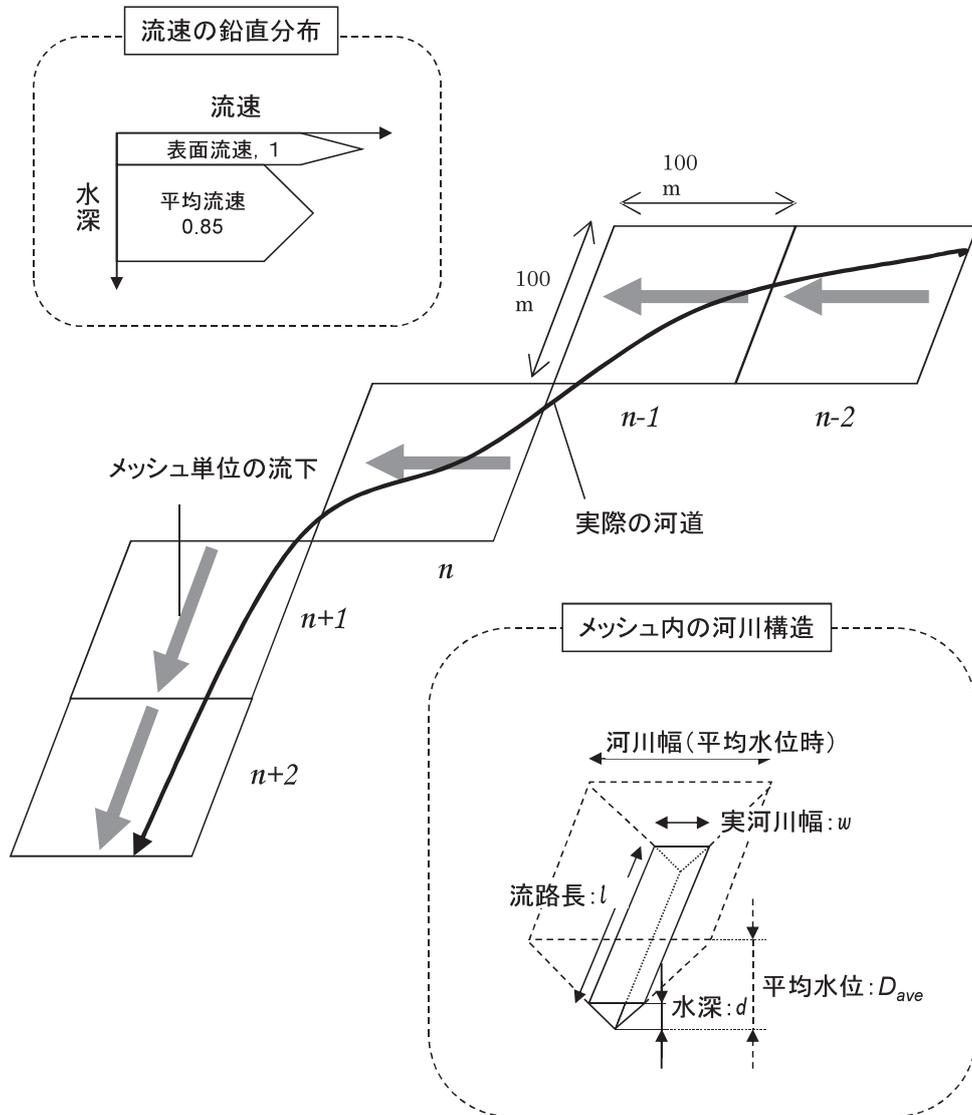


図6 河道と河川メッシュの割付とモデルの構造

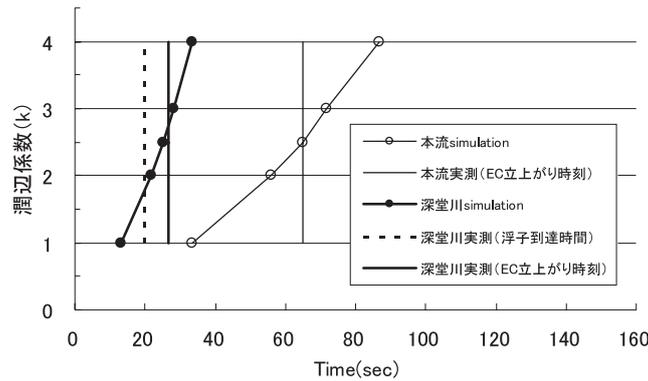


図7 深堂川における浮子法, EC法による流下時間測定結果と潤辺係数kを変えたシミュレーション結果との比較 (細線: 上流部180m, 太線: 下流部381m)

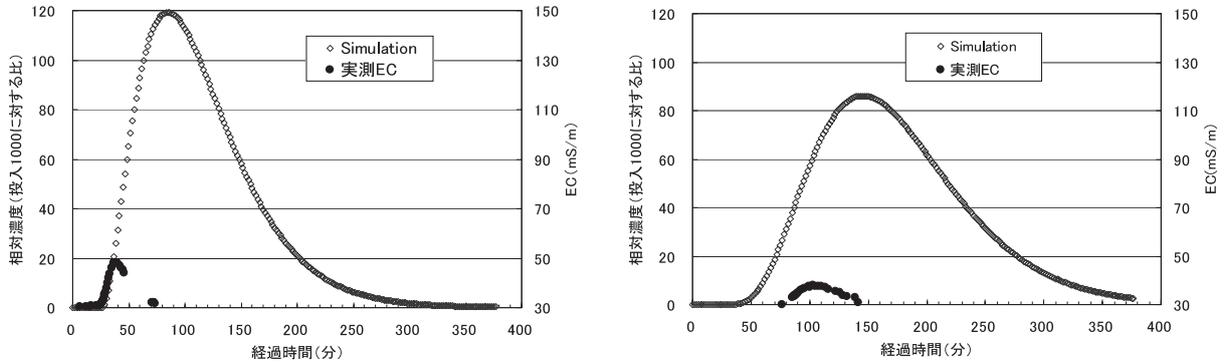


図8 深堂川の175m地点, 380m地点における流下時間予測と実測(浮子法及びEC法)との比較

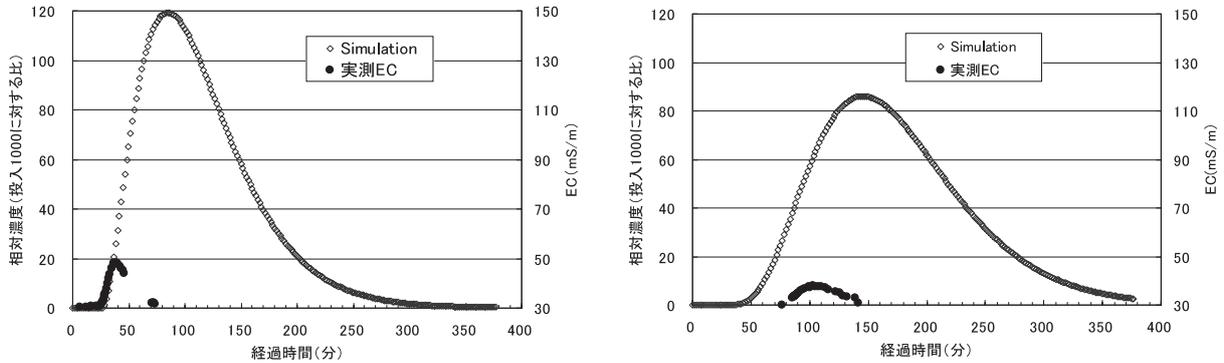


図9 黒瀬川本流における流下時間予測と実測(EC法)との比較 (濃度は仮想投入濃度1000に対する相対濃度)

潤辺係数  $k$  を2.5とした場合の深堂川流下時間測定結果との比較を図8に示す。

計算は現地の下田橋を含むメッシュを汚染物質が負荷された点とし, 下流175m地点を2メッシュ離れた到達地点として濃度変化を表示した。また, 下流381m地点は4メッシュ離れた地点として計算した。原点メッシュの汚染物質濃度初期値は仮想値として1,000mg/lを入力した。浮子到達時間, 電気伝導度立ち上がり時間との追従性が示されている。なお, シミュレーションの推移

と EC 法の推移及びピーク位置が異なっている点については, 実測の場合食塩水の投入が一瞬であることに比べ, シミュレーションの場合は100mのメッシュ内の河道容積を初期値濃度で満たされているものとしているため, 物質の流出に時間を要し到達時間も後ろにずれる結果となっている。

この結果を踏まえ, 黒瀬川本流への適用性について流下シミュレーションを行った結果を図9に示す。

計算は深堂川と同様に行い, 中川合流点を含むメッシ

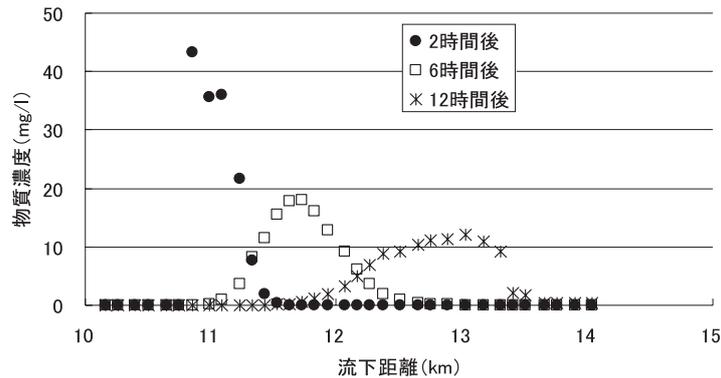


図10 河川流下過程における汚染物質の経過時間ごとの流下予測(水位0.04m)

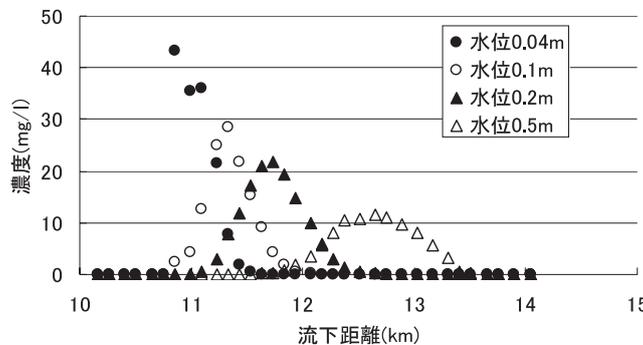


図11 水位の変化による流下過程への影響 (2時間後の汚染物質濃度分布)

ユを原点の汚染物質負荷地点とし、下流180m 地点を2メッシュ分離した点として電気伝導度変化を予測し実測値と比較した。また、下流340m 地点の測定結果との比較は3及び4メッシュ分離した点として比較した。いずれの地点でも電気伝導度変化の立ち上がり時間が一致しており、水塊の流下予測モデルによる汚染物質の到達時間予測値と実測値との整合がみられた。

### 5 流下時間予測への応用と課題

本報告で試みた流下時間予測は水質汚染事故を想定した汚染物質流下をシミュレートするプロトタイプモデル構築であり、その特徴は市販の表計算ファイルを用いた簡易かつ迅速性を備えた現場で使用できるモデルを目指した。従来の河川流出モデルは降雨量を基に流出率、河川流量、流下予測等を行うものが多く、佐合 [25] は結果的に誤差要因が増えることを指摘している。ここでは水質汚染事故時の下流への影響を想定していることから、降雨増水時よりもむしろ平水時の影響を再現することに重点をおき、できるだけ誤差要因を少なくすることとした。

下流への影響を見るにあたって、上流のある地点で流出した有害物質が下流の例えば上水取水施設にいつ頃到達し、どのような濃度分布で流出していくかを把握するには図8, 9のような下流の任意の地点の濃度分布を表示させることで対応できる。ほかにも、このモデルを使うことで図10に示すように河川全体を俯瞰しながら有害物質の流下を任意の時間で表示させることも可能となっている。

また、水位が変化した場合にも対応可能であり、河川水質事故発生時の御園宇観測所の水位データを適宜入力することでリアルタイムによる流下予測ができる。図11に水位が変化した場合の汚染物質の流下予測の例を示した。水位による影響は各メッシュ地点における時間変化も図8, 9と同様に表示可能であり、多様な表示出力結果を得ることができる。また、河川メッシュ地図への出力も可能であり、カラー表示による流下過程の表示にも対応できるようにした。

一方、本報告においては流下時間の簡易予測モデルのプロトタイプとしての試みを検討した段階であり、水位ごとの精度、他地点での調査、他の河川への適用性、支

流とのデータ連続性等については更に調査検討を要する。また、パソコンの表計算ソフトを使用し、誰でも使える簡易モデルを基本としたため、表計算ソフトの仕様の面で繰返し計算能力に制限が生じており、今後の改良、改善が必要である。

このような中、パソコンレベルで小河川の流下予測ができる見通しができたという面においては一定の成果が得られたものと考えている。今後、より詳細な GIS データ（国土交通省国土地理院地理情報システム、<http://www.gsi.go.jp/gis.html>）の活用も想定できるなど更に空間精度や計算精度を高めることで実用性が向上すると考えられる。

## ま と め

河川において水質汚染事故が発生した場合、早急に下流への影響時間を予測し、取水制限等の対応に迫られる。黒瀬川を対象河川として、物質の流下時間を予測するとともに、流下過程における物質濃度の変化を逐次追跡予測できる簡易な予測モデルの開発を検討した。予測モデル構築に当たり、現場担当レベルにおいて簡易かつ迅速に使えるようパソコンの表計算ソフトで計算、表示できるものを目指して検討した。その結果、100m メッシュによる予測モデルの汚染地点に初期濃度を入力することで任意の下流地点において流下物質の濃度変化を予測するとともに、河川水系全体について汚染物質の流下プロセスを濃度表示できる機能を持たせることが可能となった。

本報告の予測モデルは簡易予測のためのプロトタイプであり、今後、更に改良を加えることで精度の向上や他の河川にも適用できる足がかりが得られた。

## 引用文献

- [1] 広島県ホームページ, eco ひろしま. 平成23年度水質汚染事故発生状況. <http://www.pref.hiroshima.lg.jp/eco/e/e4/jico/23kensuu.htm>. (参照2011-09-30).
- [2] 朴珍赫, 小尻利治, 友杉邦雄. 流域環境評価のための GIS ベース分布型流出モデルの展開. 水文・水資源学会誌. 2003;16(5):541-555.
- [3] 片田敏孝, 桑沢敬行. ダム機能を考慮した下流域の洪水氾濫対策のためのシミュレーション・システムの開発. 土木学会論文集 D. 2009;65(3):280-292.
- [4] 中根和郎. 東海豪雨における豪雨と中小河川水位の関係. 主要災害調査. 2002;38(7):17-98.
- [5] 呉修一, 山田正. 既往概念流出モデルの理論的導出. 水文・水資源学会誌. 2009;22(5):386-400.
- [6] 二瓶泰雄, 木水啓. H-ADCP 観測と河川流計算を融合した新しい河川流量モニタリングシステムの構築. 土木学会論文集 B. 2007;63(4):295-310.
- [7] 山本昭子, 西山直宏, 吉田浩介, 山根雅之, 石川百合子, 三浦千明. 直鎖アルキルベンゼンスルホン酸塩 (LAS) の水圏生態リスク評価. 水環境学会誌. 2010;33(1):1-10.
- [8] Padovani L, Capri E, Trevisan M. Landscape-level approach to assess aquatic exposure via spray drift for pesticides: A case study in a Mediterranean area. Environ Sci Technol. 2004;38:3, 239-3,246.
- [9] 鈴木規之, 村澤香織, 松橋啓介, 南斎規介, 桜井健郎, 森口祐一, 田邊潔, 中杉修身, 森田昌敏. 全国河川の河道構造データに基づく化学物質の GIS 河川動態モデル (G-CIEMS) の開発と空間分布評価の試み. 環境化学. 2005;15(2):385-395.
- [10] 石川百合子, 東海明宏, 中西準子. 集水域の特性分類に基づく暴露解析手法の提案 4- ノニルフェノールを例として. 水環境学会誌. 2004;27(6):403-412.
- [11] 石川百合子, 東海明宏. 河川流域における化学物質リスク評価のための産総研-水系暴露解析モデルの開発. 水環境学会誌. 2006;29(12):797-807.
- [12] 河原長美. 流域水環境管理における水質予測モデル. 水環境学会誌. 2003;26(3):135-139.
- [13] 増田貴則. 流域水環境管理における GIS 利用の現状と展望. 水環境学会誌. 2003;26(3):140-145.
- [14] 沖大幹. 日本全域高解像度河川流量・水位リアルタイム予測システムの構築. 財団法人 河川環境管理財団. 2006年度. <http://www.3.kasen.or.jp/docs/2006/01/181111002.pdf>. (参照2011-09-30).
- [15] 玉川尊, 渡邊康玄, 齋藤大作, 佐藤耕治, 甲斐達也. 移流拡散を考慮した汚染物質の一次元予測手法. 土木学会北海道支部論文報告集. 1999;55B:200-205.
- [16] 宇佐美和也, 長岡裕. 江戸川を対象とした水道水源異常水質予測モデルの構築. 第33回土木学会関東支部技術研究発表会. 2006;33:VII-010.
- [17] Miller JR, Russell GL, Caliri G. Continental-scale flow in climate models. J Clim. 1994;7:914-928.
- [18] Arora VK, Boer GJ. A variable velocity flow routing algorithm for GCMs. J Geophys Res. 1999;104:30, 965-30, 979.
- [19] 榎谷敬一, 馬籠純. 最大集水河道追跡法による擬河道網粗視化の河川流量計算への影響. 2008;21(3):242-247.

- [20] 宇佐美和也. 江戸川をモデルとした水道水源異常水質予測システムの検討. 土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集. 平成17年度.  
<http://library.jsce.or.jp/jsce/open/00061/2006/33-07-0010.pdf>. (参照2011-09-30).
- [21] 神尾謙太郎, 玉川尊, 渡邊康玄. 汚染物質の流下に与える堰の影響に関する研究. 土木学会北海道支部論文報告集. 2000:56B:184-189.
- [22] 木下武雄. 浮子更正係数の一考察. 水文・水資源学会2003年研究発表会要旨集. 2003:16:156-157.
- [23] 二瓶泰雄. 超音波ドップラー流速分布計に基づく実河川流速・流量モニタリング. ながれ. 2007:26:1-8.
- [24] 国土調査法, 水位及び流量調査作業規程準則第43条 (1954年10月).
- [25] 佐合純造. 水文量の不確定性の総合評価とその活用策. 水文・水資源学会誌. 2008:21(5):353-360.