

流線を活用した簡易平面二次元 洪水流－河床変動解析法の開発

DEVELOPMENT OF EASY TWO-DIMENSIONAL FLOOD FLOW AND
RIVERBED VARIATION ANALYSIS METHOD USING STREAM LINE

長田健吾¹・清水敦司²・赤松 薫³

Kengo OSADA, Atsushi SHIMIZU and Kaoru AKAMATSU

¹正会員 博士(工学) 国立高専機構阿南高専准教授 創造技術工学科
(〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木265)

²非会員 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所 前調査課長
(〒774-0011 徳島県阿南市領家町室ノ内390)

³非会員 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所 前所長(同上)

To develop an easy-to-use numerical model explaining flood flow, sediment transport and riverbed variation is important for efficient channel design and management. In this study, we developed a new easy two-dimensional method for the flood flow and riverbed variation analysis using stream line. We applied the new model and the conventional model to 2014 flood in the Nakagawa River whose data of water surface profiles were observed in detail. As a result, the authors' model is capable of explaining water surface profile, velocity distribution and riverbed variation in the Nakagawa River.

Key Words : *quasi-2D flow analysis, 2-D riverbed variation analysis, stream line, velocity distribution, sediment transport*

1. はじめに

河川計画・管理策を立案するために必要となる洪水時の流れと土砂動態を把握する手法として準二次元洪水流解析法^{1) 2)}と平面二次元洪水流－河床変動解析法^{3) 4)}が一般に広く用いられている。準二次元解析法は、基本形は一次元解析の枠組みであるため、理解しやすく、河川計画の立案や河川維持管理策の構築に広く活用されている。しかし、基本式が一次元計算であるため、河道線形の縦断変化(蛇行・屈曲)により生じる横断水位差や屈曲部の抵抗による水位上昇などを捉えることができない。また、河床変動計算も一定の条件下で行うことは可能であるが⁵⁾、多くの場合、準二次元解析による検討は難しい。平面二次元解析法は、準二次元解析法に比べ、河道縦・横断形状を取り込むことが可能で、詳細な計算格子を設定することで、平面的な流況・土砂動態などを適切に把握することが可能である。しかし、平面二次元解析の基礎方程式が複雑であることや、計算準備(計算メッシュの作成など)に時間・労力を要すること、計算時間が大幅に増大するなど、準二次元解析に比べると解析を容易に行うことができない。そのため、平面二次元解析を扱

える技術者は多いと言える状況ではなく、特に、河川を管理する国や県の職員は、準二次元解析は扱えるが、平面二次元解析を扱える方は少ないようである。県が管理する中小河川では、ほとんどの場合、詳細な土砂移動状況を把握できない状況で、河川の維持管理計画を立案する状況にある。人員や経費が少ない状況においても、洪水流・土砂移動を適切に把握し、効率的に維持管理を行えることが必要であり、そのためには準二次元解析程度の扱い易さで平面二次元解析に近い情報が得られる解析法の構築が重要となる。

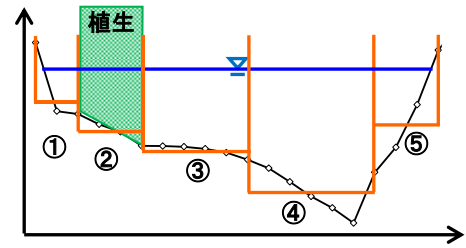
本研究では、縦断的な流線を推定し、非定常準二次元解析法²⁾の枠組みの中で、流線を活用することで平面二次元解析に近い流れと土砂動態の情報を得ることができ、簡易平面二次元洪水流－河床変動解析法を開発する。本解析法と平面二次元解析法を、交互砂州や屈曲部を有する那賀川で、多くの地点で水位観測が行われた洪水データ(平成26年8月既往最大洪水)に適用し、観測結果および平面二次元解析結果と比較することで本解析法の検証を行い、その精度を明らかにする。

2. 簡易平面二次元洪水流—河床変動解析法

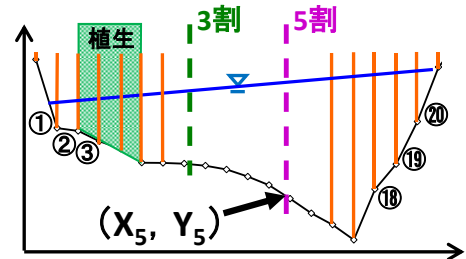
2.1 本解析法の計算格子の考え方と流れ場の計算方法

はじめに、本解析法の計算格子の考え方について説明する。準二次元解析法では、図-1(a)に示すように、各断面の低水路、高水敷、植生領域などを考慮し、横断方向の平均的な流れの相違を捉えられるように分割断面が決定される。そのため、分割数は各断面で異なることが多く、また、平均的な流れを得ることが目的であるため、最低限の分割数に抑えられる。本解析法では、平面二次元解析法に近づけるために横断流速分布の情報量を増やすこと、また河床変動解析も一体として扱えるようにすることを考え、図-1(b)に示すように概略の横断面形状が捉えられるように横断面を均一幅で数十個の分割断面に分ける。また、横断測線の左右岸杭座標を用い、分割断面の平面位置も計算に取り込むことで、本解析法の平面的な計算格子は図-2(b)のようになる。平面二次元解析の格子(図-2(a))との違いは、平面二次元解析では横断測線間の縦断的な分割を行うことが主流であるが、本解析法ではそれを行わず、横断面形状と平面形状が最低限表現できる計算格子を用いる。

次に流れ場の計算方法について説明する。基礎方程式の基本的な構造は、非定常準二次元解析法²⁾とほぼ同じである。まず、本解析法の流れ場計算の概要を、図-3を用いて説明する。作成した各分割断面(図-1(b))において、横断流速分布を後述する流線の曲がりによる抵抗や横断水位差を考慮した力の釣り合い式により算定する。ここで算出される流速値の方向は準二次元解析と同様、

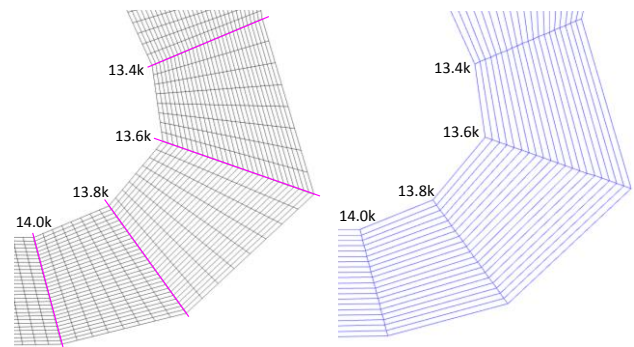


(a) 準二次元解析法



(b) 簡易平面二次元解析法

図-1 準二次元解析法と本解析法の横断面分割の違い



(a) 平面二次元解析法

(b) 簡易平面二次元解析法

図-2 平面二次元解析法と本解析法の計算格子の違い

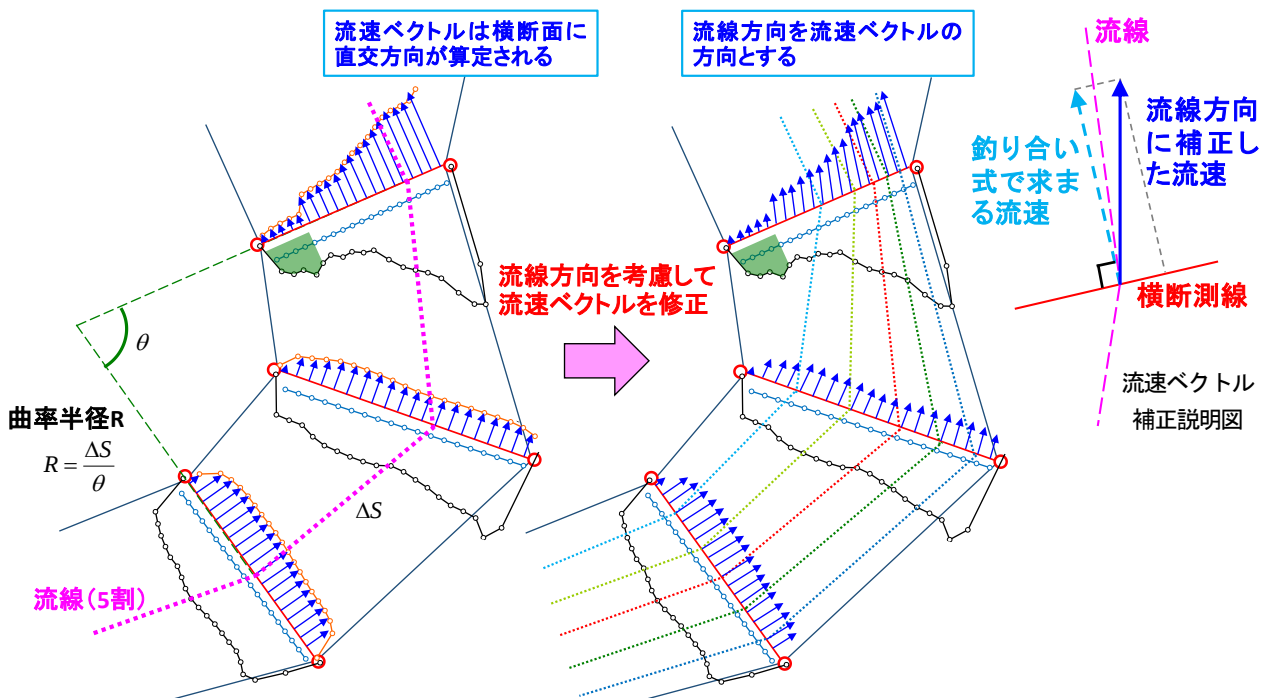


図-3 本解析法の流速分布の計算方法

横断面に直交方向となる。この流速方向を、流線を用いて補正し、平面二次元解析のように平面的な流れの方向を得られるようにする。すなわち、図-3右上に示すように流線の上下流方向の平均値を流速ベクトルの方向として補正することで、平面的な流速ベクトルを算定する。この流速ベクトル等の算定に必要な流線の求め方は、横断面のある点から左側を流れる流量と全流量との比（流量割合 P_Q ）を用い、例えば図-1(b)に示すように P_Q が5割の流量に対応する座標値を各断面で縦断的に算定し、上下流断面の同じ割合の座標点を結ぶことで、流線が得られる。得られた流線をもとに図-3左に示すように曲率半径 R を求め、横断水位差を以下の式⁹⁾で算定する。

$$\Delta h = \frac{B\bar{U}^2}{gR_c} \frac{1}{1 - B^2/4R_c^2} \quad (1)$$

ここに、 B ：水面幅、 $\bar{U}$ ：断面平均流速、 R_c ：各断面の代表曲率半径で、 P_Q が5割の流線を用いて算定した。上式により算定された横断水位差と、下記の連続式より求まる流積を用い、両者を満たすように断面水位を求める。図-4に示すように、水位は横断面内で直線的に変化すると仮定し、求められた各分割断面の水位から水深を算定する。

本解析法に用いる流れ場の連続式および運動方程式を以下に示す。運動方程式には、流線の曲がりによる抵抗項を付加し、蛇行部や屈曲部の抵抗による水位上昇を算定できるようにした。また、植生の取り扱い、準二次元解析では死水域とされてきたが、平面二次元解析と同様に透過するものとして形状抵抗を付加した。

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}Q}{\partial x} = & -gA \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^M (\tau_{bj} s_j) - \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^M \left(\frac{F_{nj}}{\Delta x} \right) \\ & + \sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial u_{sj} u_j h_j}{\partial x} \Delta y \right) + \frac{1}{\rho} \sum_{j=1}^M \left(\frac{\partial \tau_{yxj}}{\partial y} \Delta y \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 A ：流積、 Q ：流量、 H ：断面平均水位、 u_j ：各分割断面の流速、 h_j ：各分割断面の水深、 τ_{bj} ：底面せん断応力、 s_j ：潤辺、 F_{nj} ：植生などの形状抵抗力、 u_{sj} ：曲がりによる流速変化量、 τ_{yxj} ：横断流速差によるせん断応力、 Δx ：縦断方向格子長さ、 Δy ：分割断面幅である。底面せん断応力は、清水⁴⁾の考えと同様に二次流による河床近傍の流速成分の補正（図-5）を考慮して、以下の式で算定する。

$$\tau_{bj} = \rho g \frac{n^2}{h_j^{1/3}} \left\{ u_j^2 + \left(v_j - N_* \frac{u_j h_j}{R} \right)^2 \right\} \quad (4)$$

ここに、 v_j ：図-5に示す横断側線方向の流速（流線方向に流速ベクトル補正する際に算出）、 N_* ：定数で $N_*=7$ とした。

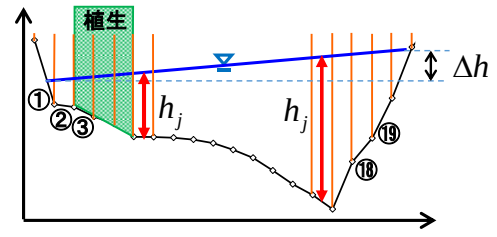


図-4 横断水位差を考慮した各分割断面の水深の算定

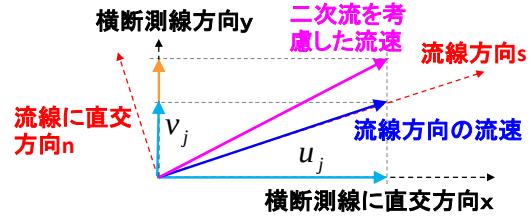


図-5 各流速成分の概要

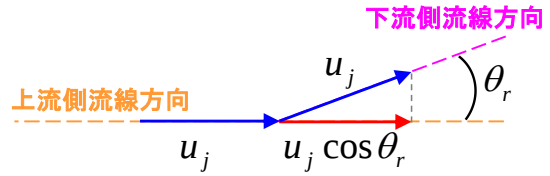


図-6 流線方向の変化を考慮した流速変化量の算定

植生などによる形状抵抗力は、抗力係数 C_D を用い、以下の式で算定する。

$$F_{nj} = \frac{1}{2} \rho C_D A_{nj} u_j^2 \quad (5)$$

式(3)の右辺第4項の流線の曲がりによる抵抗項に含まれる流速変化量 u_{sj} は、図-6に示すように、計算点の上流側流線方向と下流側流線方向のなす角度 θ_r を用いて、以下の式で算定する。

$$u_{sj} = u_j \cos \theta_r - u_j \quad (6)$$

上下流の流線方向に変化がない場合はゼロとなるように考慮した式である。

式(3)の右辺第5項の横断流速差によるせん断応力項は、従来の準二次元解析法では境界混合係数により評価されるが、本解析法では平面二次元解析で一般に用いられる渦動粘性係数を用い、以下で算定する。

$$\tau_{yxj} = \rho \nu_t \frac{\partial u_j h_j}{\partial y}, \quad \nu_t = \frac{\kappa}{6} u_{*j} h_j \quad (7)$$

各断面の横断流速分布は、準二次元解析法と同様に、定常流を仮定した力の釣り合い式を用いて求める。

$$\rho g A I = \tau_{bj} s_j + \frac{F_{nj}}{\Delta x} - \rho \frac{\partial u_{sj} u_j h_j}{\partial x} \Delta y - \frac{\partial \tau_{yxj}}{\partial y} \Delta y \quad (8)$$

上式より各分割断面の流速 u_j を求め、流線を用いて流速ベクトルを補正し、平面的な流速分布を算定する。

2.2 土砂移動量，河床変動量の計算方法

土砂移動量および河床変動量の算定に関しては，以下の方法で評価する．まず，図-5に示す流線方向Sの粒径別単位幅流砂量 q_{BSk} は芦田・道上式⁷⁾に流線方向の勾配を取り入れた次式⁸⁾で算定する．

$$\frac{q_{BSk}}{P_k u_* d_k} = \frac{\alpha}{\eta_c \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right)} \tau_{*k} \left(1 - \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right) \right) \times \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right)} \right) \quad (9)$$

ここに， α ：流速係数， η_c ：クーロン動摩擦係数（ $=\tan\phi$ ）， τ_{*ck} ：粒径kの無次元限界掃流力であり，修正Egiazaroff式⁷⁾を用いて評価する．次に，流線に直交する方向Nの流砂量 q_{BNk} は，以下の長谷川の式⁹⁾を用いて算定する．

$$q_{BNk} = q_{BSk} \left(-N_* \frac{h}{R} - \sqrt{\frac{1}{\mu_d \mu_f} \cdot \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \frac{\partial Z_b}{\partial n}} \right) \quad (10)$$

式(9)，(10)で求められた流砂量から，横断測線に直交する方向Xと横断測線方向Yの流砂量を求める．

$$\begin{aligned} q_{BXk} &= q_{BSk} \cos \alpha - q_{BNk} \sin \alpha \\ q_{BYk} &= q_{BSk} \sin \alpha + q_{BNk} \cos \alpha \end{aligned} \quad (11)$$

河床変動量は，平面二次元解析のように流下方向に細かい計算格子を設けていないことから，従来の計算格子の土砂収支を考える河床変動式を用いると，図-7に示すように流線と計算格子の向きが大きく異なる場合，河床変動を捉えることができない．本研究では，流下方向の土砂移動は流線に沿うと考え，流線を用いて河床変動計算を行う．図-7に示すように計算点Jの河床変動を考える場合，流線の情報から上流側断面のどの範囲から流下してくるか推測し，上流からの流砂量 $q_{BXk \text{ Jup}}$ を求める．河床変動は，以下の式により算定する．

$$\frac{\Delta Z_j}{\Delta t} = \frac{-1}{1-\lambda} \left\{ \frac{\sum_{k=1}^N (q_{BXk \text{ j}} - q_{BXk \text{ Jup}})}{\Delta x} + \frac{\sum_{k=1}^N (q_{BYk \text{ j+1}} - q_{BYk \text{ j}})}{\Delta y} \right\} \quad (12)$$

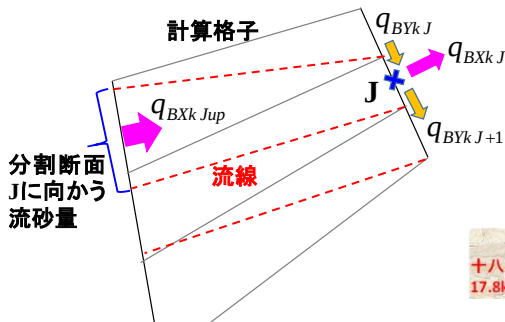


図-7 河床変動の考え方

粒度分布の時間変化に関しては，平野の式¹⁰⁾を用いて算定する．

3. 那賀川H26年8月洪水データへの適用と解析精度の検証

3.1 解析対象区間の概要と解析条件

徳島県那賀川では，平成26年8月に来襲した台風11号がもたらした豪雨により，計画流量を上回るピーク流量約9500m³/sに達する既往最大洪水が発生した．構築した簡易平面二次元解析法と一般座標系平面二次元洪水流・河床変動解析法を，本洪水データに適用し，本解析法の結果と実測値および平面二次元解析による結果を比較し，その精度検証を行う．解析対象区間は，那賀川の3k～18kとする．本洪水では，図-8に示すように，水位観測所5か所，簡易水位計4箇所の計9か所で水位時系列データが観測されている．解析では，上流端境界条件に十八女橋の水位観測値を，下流端境界条件にJR鉄橋上流の水位観測値をそれぞれ与えた．河床材料は，洪水後におおよそ1km間隔で測定されているデータがあり，解析には，150mm，60mm，20mm，7mm，2mm，0.2mmの6粒径を用いて，各地点の粒度分布を再現したものを与えた．

3.2 解析結果とその考察

図-9に，簡易平面二次元解析法による水面形の時間変化の解析結果と観測値との比較を示す．図には，計画高水位と痕跡水位も併せて示す．痕跡水位と傾向が合わない箇所が上下流で見られる．上流側は，水位計の観測値が痕跡水位に比べ全体に低い傾向となり，計算は水位観測値を境界条件としているため，痕跡水位と差が出たと考えられる．下流側は，左岸側に吹き寄せる暴風により左岸痕跡水位が縦断的に高い傾向となり，解析では風の影響を考えていないため再現できていない．水位計観測値との比較では，全体的には解析結果は観測値を再現することが出来ている．しかし，13.6k屈曲部の洪水ピーク時を見ると，外岸の熊谷川樋門の解析水位は観測値に比べ0.3m程度低い値となり，逆に内岸は観測水位に比べ0.4m程度高い状況となった．曲がりによる抵抗を取り込



出典：国土地理院地図

図-8 計算区間の概要と水位計設置位置

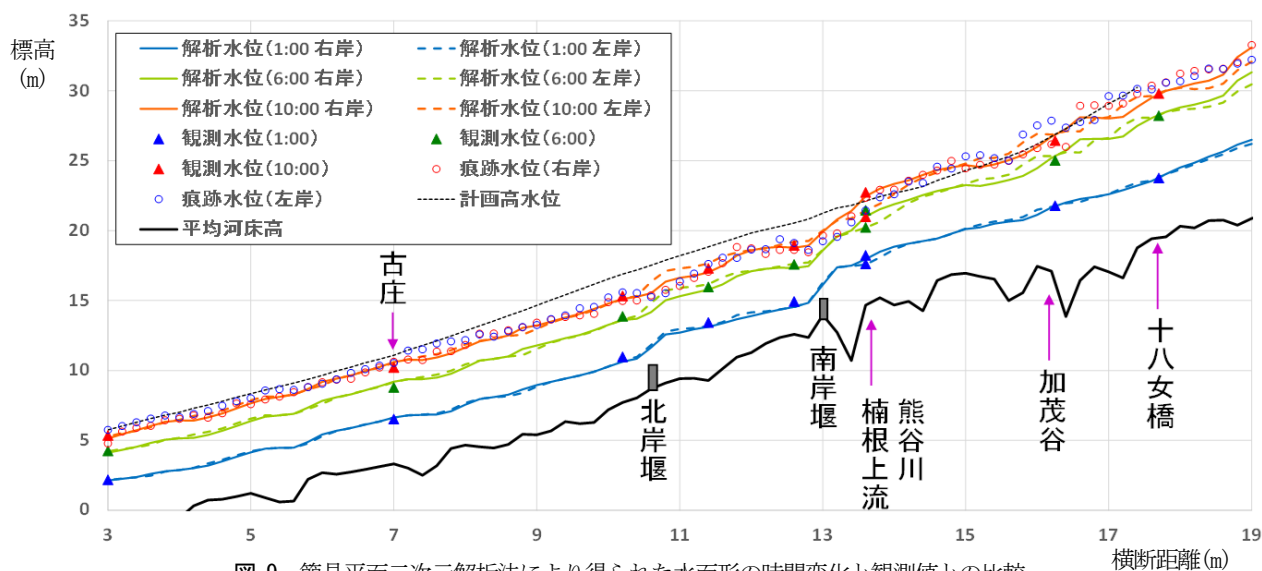


図-9 簡易平面二次元解析法により得られた水面形の時間変化と観測値との比較

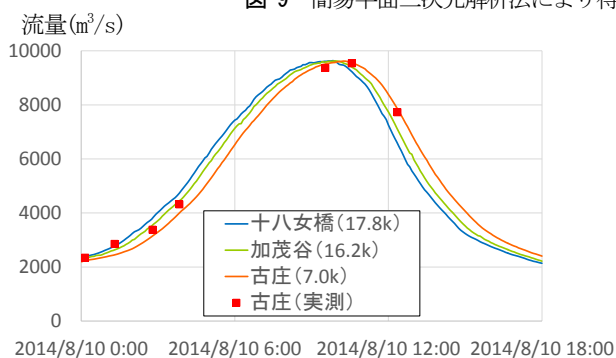


図-10 観測流量（古庄）と解析ハイドログラフの比較

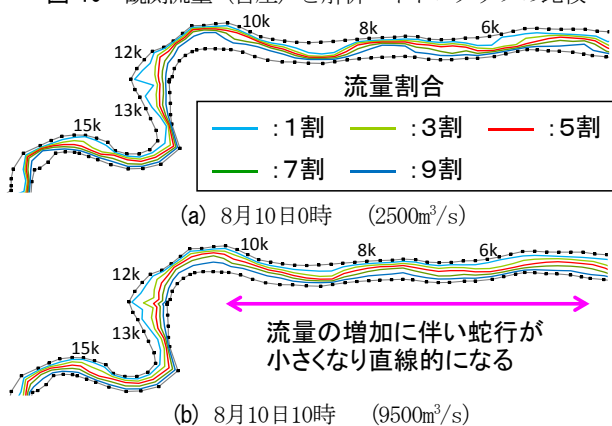


図-11 計算された各流量規模の流線

むことで、平均的な水位はある程度再現できているが、屈曲部のような急激な曲がりによる横断水位差の再現が十分でないことが分かった。図-10に流量ハイドログラフの観測値と解析結果の比較を示す。洪水の上昇期の解析結果は、観測結果に比べ若干低い状況となったが、洪水ピーク付近の解析結果は観測値を表現できている。

図-11に各流量規模において算定された流線を示す。下流の交互砂州区間に着目すると、流量の低い段階では砂州の影響により蛇行流れとなっているが、流量の増加とともに流線の蛇行が小さくなり砂州を乗り越え直線的になることが表現できている。12k～13k区間には大きな中州が存在し（図-8参照），中州により流路が二分され

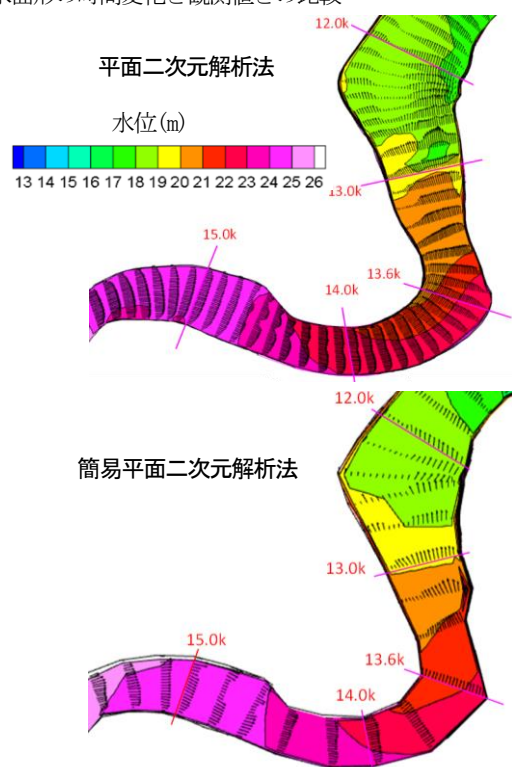


図-12 平面二次元解析法と本解析法の結果比較
(流速分布，水位：8月10日10時)

ることなどが要因となり流線の計算が不安定になり、この区間では流線の計算に乱れが生じる結果となった。この流線を用いて算定された流速ベクトルを図-12下に示す。図-12には、水位分布を示すとともに、平面二次元解析の結果も併せて示す。本解析法により算定された流速ベクトルは、傾向が合わない箇所も見られるが、平面二次元解析に近い状況で再現されていることが分かる。また、各時刻の水位分布も平面二次元解析と大きく変わらない結果が得られた。

図-13には、河床変動量の実測値、平面二次元解析による結果と本解析法による結果を示す。実測値は、平成23年と平成26年の測量データをもとに作成したものであ

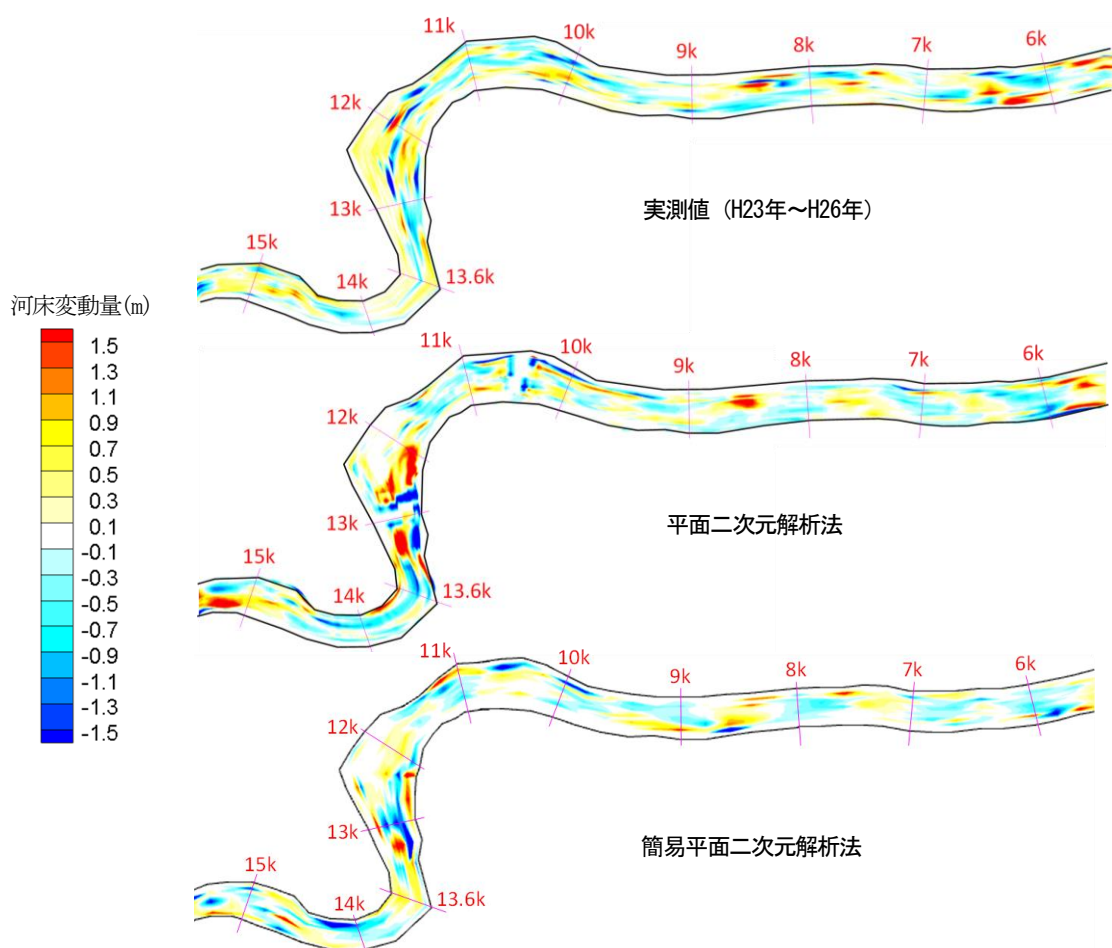


図-13 河床変動量の実測値と解析結果の比較

り、H26年洪水以外の洪水の履歴も含まれる。実測値および平面二次元解析法の結果と比較すると、堰周辺など大きく異なる箇所もあるが、交互砂州区間の洗掘・堆積の傾向などは似ており、従来の準二次元解析法では得られない河床変動量を表現できることが明らかとなった。解析精度に関しては十分でない点も多く、今後、水理模型実験や他河川の洪水データを用いて、精度向上を図ることが必要である。

4. 結論

本研究では、流線を活用した簡易平面二次元洪水流－河床変動解析法を構築した。本解析法を那賀川洪水データに適用し、観測値および平面二次元解析結果との比較から精度検証を行った。その結果、準二次元解析では説明できない曲がりを含む河道における縦断的な水面形状の時間変化および流量ハイドログラフを概ね再現できることが明らかとなった。流線を活用することで、平面二次元解析に近い平面的な流速ベクトルを推算できることも示した。河床変動量に関しては、実測値を十分に再現できるものではないが、洗掘・堆積の傾向は平面二次元解析による結果と近い情報が得られることが明らかとなった。今後、多くの水理実験結果や他河川の洪水データなどに適用し、モデルの改善と精度向上を図ることで、

河川計画・河川維持管理の立案に役立つ洪水流・河床変動モデルとしての確立を目指す。

参考文献

- 1) 福岡捷二：洪水の水理と河道の設計法，森北出版，2005。
- 2) 福岡捷二，佐藤宏明，出口桂輔：洪水流の非定常準二次元解析法の研究，土木学会論文集B，Vol.65 No.2，p.95-105，2009。
- 3) 長田信寿，細田 尚，村本嘉雄：河岸侵食を伴う河床変動の特性とその数値解析法に関する研究，土木学会論文集，No.621，II-47，p.23-39，1999。
- 4) 清水康行：2次元流れと河床変動の計算，水理公式集例題プログラム集，土木学会，2001。
- 5) 関根正人，林 将宏：礫・シルト充填河床モデルを用いた礫河道の準二次元河床変動解析，水工学論文集，第51巻，pp.973-978，2007。
- 6) 水理公式集（平成11年版），土木学会，1999。
- 7) 芦田和男，道上正規：移動床流れの抵抗と掃流砂量に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第206号，pp.59-69，1972。
- 8) 山口里実，清水康行，河床勾配の影響が考慮された平衡流砂量式によるdune河床の再現計算，水工学論文集，第53巻，pp.715-720，2009。
- 9) 長谷川和義：沖積河川における流れと河床移動の予測手法に関する水理学的研究，北海道大学博士論文，1984。
- 10) 平野宗夫：Armoringを伴う河床低下について，土木学会論文報告集，第195号，pp.55-65，1971。

(2016. 4. 4受付)