

## 簡易Lagrange型解法を用いた掃流砂モデルによる富田川河床変動シミュレーション

### Numerical Simulation of Riverbed Variation in Tonda River Using Simplified Lagrangian Model of Bedload Transport

水谷英朗・武藤裕則<sup>(1)</sup>

Hideaki MIZUTANI and Yasunori MUTO<sup>(1)</sup>

(1) 徳島大学大学院理工学研究部社会基盤デザイン系 教授

(1) Institute of Technology and Science, Tokushima University

#### Synopsis

This paper presents numerical simulation of riverbed variation using two-dimensional depth-averaged flow model with a simplified Lagrangian bedload model and its application to actual river. The scheme of Lagrangian-type bedload model resembles the actual phenomenon of sediment movement in comparison with the model of Euler type and it is useful when the change of sediment movement direction is extreme on a small scale. The Lagrangian-type model can simulate a change in the direction of moving sediment considering the local flow and bed slope along the moving paths regardless the computational grid structure. However, the heavy computation load is a significant bottleneck for a simulation in many cases. In this study, we introduced the simplified Lagrangian bedload model to a two-dimensional depth-averaged flow model and applied the model to an actual river.

**キーワード:** 流砂, 簡易Lagrange型掃流砂モデル, 富田川

**Keywords:** sediment transport, simplified Lagrangian bedload model, Tonda River

#### 1. はじめに

洪水時の河道内の土砂輸送過程を明らかにし、適切に土砂輸送現象をモデル化して高精度に河床地形変化を予測することは、極端気象現象の激甚化が懸念されているなか、河道管理や治水面において大変重要である。これまで多くの河床変動解析モデルが開発され、世界中の河川へ適用されているが、どんな状況下のシミュレーションにおいても土砂輸送モデルが十分な精度を有しているとは未だ言い難い状況である。それらは土砂輸送モデルに精度の全責任があるわけではないが、土砂輸送過程のモデル化に未だ改善の余地が多分にあると筆者は考えている。

これまで開発された土砂輸送モデルを大別すると、比較的モデル化が容易な流砂量式を用いた従来のEuler型解法で解くモデルと、砂粒を離散体としてLagrange型解法で解くモデルの2つに分けることが出来る。砂一粒一粒の運動の複雑さから考えると正確に砂粒運動を捉えるためにはLagrange型の数値モデルが有効であることは明瞭ではあるが、対象場全ての砂粒子を解析する必要があり、現状では計算負荷の面から解析できる範囲が限られていることは否めない。

実河川の河床変動現象を数値シミュレーションするにあたって、着目範囲の上流側から供給される土砂をどのように評価するかが重要であり、土砂移動

の連続性を考えると再現精度の確保や長期的な河床変動特性を把握するためには解析範囲を上流側へも長く延伸せざるを得ない。そんな状況の中、対象場全ての砂粒子を解析するようなLagrange型の掃流砂モデルで長距離区間の解を得ることは現実的に難しく、Euler型モデルより再現性が高く計算負荷を軽減した簡易Lagrange型掃流砂モデルの開発と技術進展が望まれている。そして、長田ら(2001)の研究で、その簡易化したLagrange型掃流砂モデルの濫觴と言えるような提案がなされ、今日も研究が進められている。

著者らは上述した背景の下、数値解析モデルの実用性に重きを置き、水深積分型の流れ解析モデルに簡易Lagrange型掃流砂モデルを導入した河床変動解析モデルの開発を進めている。本稿では、2015年に実施したFig. 1に示す和歌山県2級河川富田川の市ノ瀬地区(Fig. 2)を対象にした河川地形計測について言及し、その計測結果を用いて洪水イベント前後の富田川の短期的な砂州地形変化について示す。そして、その洪水イベントを対象に、本研究で構築した簡易Lagrange型掃流砂モデルと従来のEuler型掃流砂モデルの解析結果を比較し考察を行った。

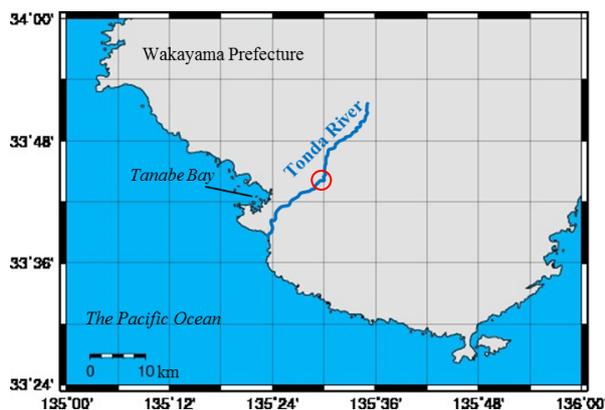


Fig. 1 Location of Tonda River in Kii Peninsula.



Fig. 2 Google Earth satellite image of research site.

## 2. 富田川砂州地形のGPS歩行計測

本研究では、富田川の河口から12km~15kmの約3kmの範囲について砂州地形について高精度GPSを用いて計測を実施した。この範囲内の12.8kmの右岸側には市ノ瀬水位観測所が存在し、2011年の紀伊半島大水害によって上流側では斜面災害が発生し、富田川に多くの土砂が供給されている。市ノ瀬地区の滯筋はFig. 2やPhoto 1から確認できるように大きく蛇行し、その砂州地形は紀伊半島大水害以降大きく変化したと言われている。水位観測所上流および下流で護岸が被災している箇所があり、当該区間の今後の河床変動特性を把握する必要があり、本研究の対象領域と選定した。



Photo 1 Aerial picture of the research site.

### 2.1 砂州地形の計測方法

砂州地形については、本研究では国土地理院1級GNSS測量機に登録されている高精度GPS(Nikon-Trimble R4 GPS)を用いて計測を実施している。具体的には、既知の地点から補正観測情報を携帯電話等を介して移動局に送信し、移動局の位置を測定するRTK法(リアルタイムキネマティック:Real Time Kinematic)を用いた計測を実施している。Nikon Trimble R4のアンテナをアルミニウム製の背負子に取り付け、GPS端末および携帯を携行し、GPSが傾かないよう気を付けながら砂州上や水深の小さな河床上を歩行することによって計測を実現している(Photo. 2)。対象区間の川幅200m程度で縦断方向に10m~20m程度の横断測量線を描くように歩行計測を実施することで砂州地形全貌を捉え、局部的に地形が変化している微地形については追加して地形コンターを描くように歩行することで詳細地形も計測している。本研究では50cmの歩行移動間隔毎に緯度、経度、標高値を記録しており、計測の際は砂州の計測範囲を広めるために低流量時を狙い、ウェダーを着用することで水深の浅い水際範囲も計測している。水深が大きく流れが速い箇所についてはGPSによる歩行計測は難しく、残念ながら今回はデータが

欠測となっている．また，1日1回約3時間程度の歩行計測を3日間かけて富田川の約3km範囲の砂州地形を計測することができた．



Photo 2 Walking terrain measurement on land/extremely shallow regions using RTK-GPS survey system.

## 2.2 2015年台風11号出水による地形変化

Fig. 3に示すように2015年7月16日前後に台風11号が日本に來襲した．市ノ瀬観測地点の流量データ (Fig. 4) に示されるように，富田川では台風11号來襲時に平均年最大流量相当の流量が観測される出水が発生している．本研究では，その出水前6月と出水後9月の砂州地形を先述した高精度GPSを利用した手法で計測することが出来た．それぞれ3日間かけて計測した結果をFig. 5(a), (b)に示す．Fig. 6には，Fig. 5の6月と9月の計測結果において2つの計測領域が重なっている領域の河床変動量を示している．

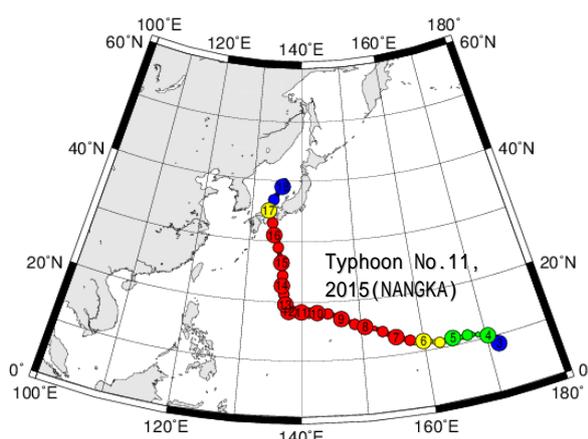


Fig. 3 Best track data issued by JMA in 2015  
(Digital Typhoon:  
<http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/index.html.ja>)

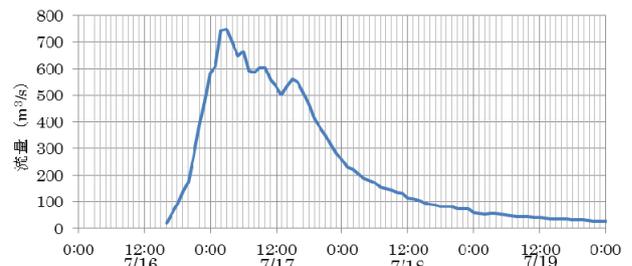
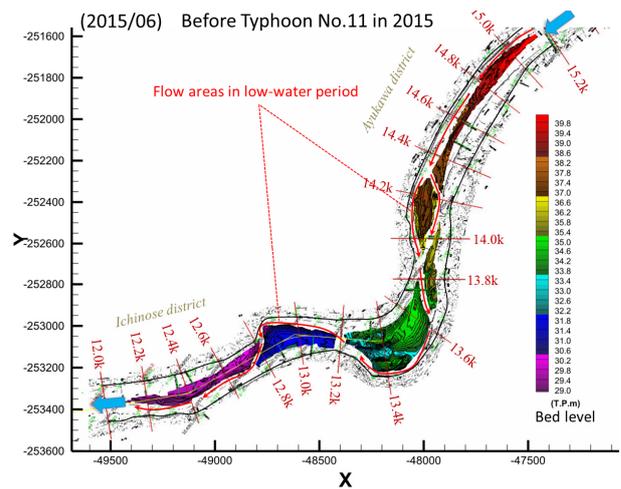
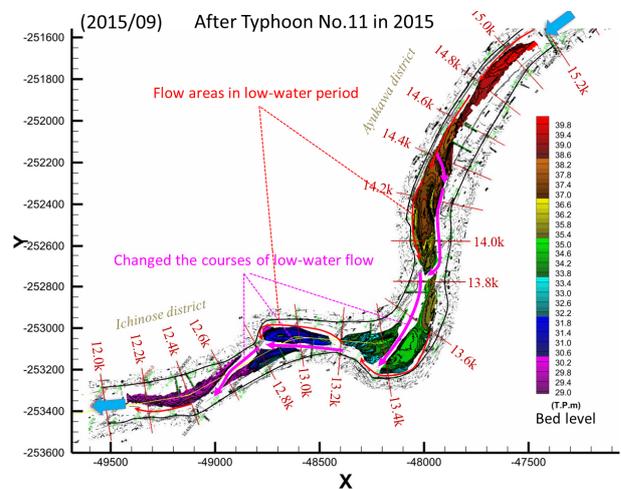


Fig. 4 Discharge during typhoon attack at Ichinose station in Tonda River.



(a) July 2015



(b) September 2015

Fig. 5 Riverbed Topography measured with RTK-GPS system in Tonda River; (a) July 2015(before Typhoon), (b) September 2015 (after Typhoon).

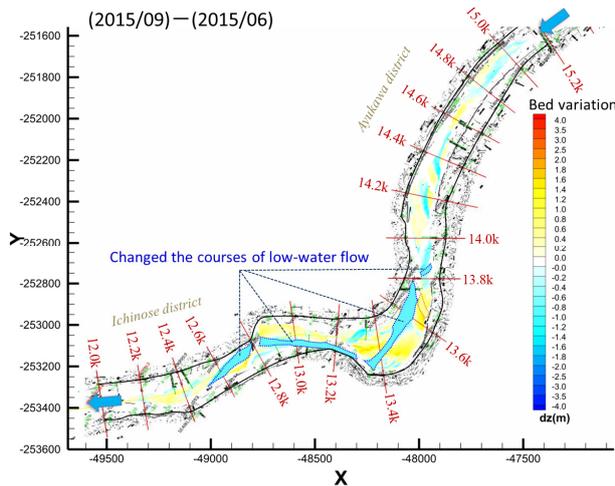


Fig. 6 Morphological Changes in Tonda River; (b)-(a).

Fig. 5から確認できるように、14.2k ~ 14.4kにおいて、上流側からの土砂供給で河床上昇領域が確認できる。これは台風11号の出水によって、2011年斜面災害時に供給された上流域の土砂が当該区間まで到達してきている可能性があることを示し、今後、この鮎川地区から下流域の河床変化の動向を定期的に調査する必要があると考えている。また、平水時に水が流れる市ノ瀬地区の澗筋が、出水によって大きく変化していることがFig. 5より容易に確認できる。出水前に澗筋が大きく蛇行していた湾曲部が、出水の影響により澗筋がショートカットするように砂州地形を分断し、新たな澗筋が形成されている。Photo 3には12.8kの上空から上流方向へ撮影した写真を示しているが、13.2kから下流に進むにつれて左岸側から右岸側へと大きく蛇行していた澗筋が直線化している様子が確認できる。今回の澗筋の直線化で、澗筋内において下流側へ土砂を輸送しやすくなったと考えられるが、水衝部護岸の損傷や、澗筋によって分断されて砂州地形の固定化については、今後注視する必要があると考えられる。



Photo 3 Aerial picture of changed water route due to flood of Typhoon No.11, 2015.

### 3. 簡易Lagrange型掃流砂モデルによる富田川河床変動シミュレーション

著者は、これまで水制構造物周辺の局所洗掘等の河床変動に関する実験や数値シミュレーションモデルの開発に取り組んできた(例えば、水谷ら, 2010; Mizutani et al., 2012)。その数値解析モデル内の掃流砂解析部分では、多くの部分を長田ら(2001)が提案してきた簡易Lagrange型の掃流砂モデルの考えに倣ってモデル開発をしている。その数値モデルでは、掃流砂による土砂輸送過程を代表砂粒の移動をLagrange型解法で解くことで実現する代表砂粒モデルを導入しており、本研究では、その掃流砂のLagrange型解法の一つである代表砂粒モデルを簡易化し実河川へ適用することを試みた。次節に解析モデルの詳細を記述する。

#### 3.1 流れ解析手法

流れ計算には、水深方向に積分した平面2次元浅水方程式を用いる。方程式内では水位と水深平均流速が未知数となり、以下に示す $x, y$ 方向の運動方程式および連続式から求められる。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_{bx}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xx}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_{by}}{\rho h} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_{xy}}{\rho} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_{yy}}{\rho} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial (uh)}{\partial x} + \frac{\partial (vh)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $u, v$ は $x, y$ 方向の水深平均流速、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $h$ は水深、 $\rho$ は水の密度である。また、 $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{xy}$ は乱れによるせん断力で次式より求められる。

$$\frac{\tau_{xx}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \frac{\tau_{yy}}{\rho} = 2\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\tau_{xy}}{\rho} = \varepsilon \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (4)$$

$\varepsilon$ は渦動粘性係数で、 $\varepsilon = \kappa u_* h / 6$ で与え、 $\kappa$ はカルマン定数(=0.4)で $u_*$ は摩擦速度である。また、底面のせん断力は次式で評価した。

$$\tau_{bx} = \rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (5)$$

$$\tau_{by} = \rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2} / h^{1/3} \quad (6)$$

ここで、 $n$ はマンシング粗度係数である。本稿では、マンシングの粗度係数は河床の粒径から推定するManning-Stricklerの $n$ の推定式 $n=0.0131d^{1/6}$ により求め

ている。

そして、上述した式を離散化し、圧力-速度の連成解析法でSIMPLE法の収束性を改善したSIMPLER法 (Patankar,1980)を用いて解いている。

### 3.2 河床変動解析手法

次に河床変動解析手法について言及する。先述したように、代表砂粒の移動を Lagrange 型解法で解くことで実現する代表砂粒モデルを導入しており、その砂粒の運動方程式にはこれまでと同様に滑動形式で簡略化し、堆積過程を確率モデルによって砂粒移動経路上に土砂を堆積させている。

#### (1) 運動方程式を用いた代表砂粒の移動経路計算

代表離脱砂粒の移動経路を、次に示す砂粒の滑動形式の運動方程式を用いて計算する。河床平面を表すために  $x-z$  平面,  $y-z$  平面内の河床平面と平行な単位ベクトルを、それぞれ  $\mathbf{p}_{b1}, \mathbf{p}_{b2}$  とし、砂粒に作用する力として、抗力、摩擦力、重力、浮力、揚力を考えると、 $\mathbf{p}_{bj}$  ( $j=1,2$ ) 方向の砂粒の運動方程式は以下ようになる。

$$m_{sed} \frac{du_{sedj}}{dt} = D_j + W_j - F_j \quad (j=1,2) \quad (7)$$

ここで、 $m_{sed}$  は砂粒の仮想質量であり、付加質量係数  $C_m (=0.5)$  を用いて、次式で表せる。

$$m_{sed(k)} = \rho(\sigma/\rho + C_m) A_3 d^3 \quad (8)$$

$D_j, F_j, W_j$  は、砂粒に作用する抗力、摩擦力の  $\mathbf{p}_{bj}$  方向成分、水中重力であり、粒径  $d$  の砂粒に作用するそれぞれの大きさを  $D, F, W$  とすれば、次のように表せる。

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho (u_{bi} - u_{sedi})^2 c_e A_2 d^2 \quad (9)$$

$$F = \mu_k \left( W \frac{\cos \theta_{bx} \cos \theta_{by}}{\sin \theta_p} - k_L D \right) \quad (10)$$

$$W = (\sigma - \rho) g A_3 d^3 \quad (11)$$

ここで、 $u_{sedj}$  は砂粒移動速度の  $\mathbf{p}_{bj}$  方向成分、 $u_{bj}$  は底面近傍の流速  $\mathbf{p}_{bj}$  方向成分、 $C_D$  は抗力係数 ( $=0.4$ )、 $c_e$  は砂粒に作用する抗力の有効断面積に関する係数、 $\mu_k$  は砂粒の動摩擦係数 ( $=0.35$ )、 $\theta_{bx}, \theta_{by}$  は  $x, y$  方向の河床勾配角、 $\theta_p$  は  $\mathbf{p}_{b1}$  と  $\mathbf{p}_{b2}$  のなす角度である。 $c_e$  は遮蔽係数に相当するもので、ここでは簡単のため、静止砂粒に対しては  $0.4$ 、移動中の砂粒に対しては  $1.0$  を用いた。

#### (2) 砂粒移動経路上の堆積計算

運動方程式より計算される砂粒の移動地点にお

ける土砂堆積量を step length の確率密度関数を用いて求める。計算メッシュ  $i$  から出発した砂粒の移動経路において、離脱から  $n$  ステップ後の位置における単位時間あたりの堆積量  $V_{d(n)}$  は次式で計算される。

$$V_{d(n)} = V_p f_s(s_{(n)}) \Delta s \quad (12)$$

ここで、 $V_p$  は離脱地点の離脱土砂量、 $f_s$  は step length の確率密度関数を表し、 $s_{(n)}$  は離脱した砂粒の移動距離、 $\Delta s$  は 1 ステップの砂粒移動距離である。本研究では、堤防法面ではほとんど堆積が生じないことから  $s_{(n)}$  は移動限界以下となった地点からの移動距離とした。step length の確率密度関数は、次式のような指数関数を用いる。

$$f_s(s_{(n)}) = \frac{1}{\lambda} \exp\left(-\frac{s_{(n)}}{\lambda}\right) \quad (13)$$

ここで、 $\lambda$  は砂粒の平均 step length である。平均 step length については Sekine and Kikkawa (1992) が提案した局所的な掃流力の影響を考慮した次の近似式を用いた。

$$\lambda = \alpha_2 \left( \frac{u_*}{w_0} \right)^{3/2} \cdot \left[ 1 - \frac{(u_{*c}/w_0)}{u_*/w_0} \right] \quad (14)$$

ここで、 $\alpha_2 = 3.0 \times 10^3$ 、 $w_0$  は砂粒の沈降速度を示す。

上述したように確率モデルによって代表砂粒の移動ステップ各地点の堆積量を求め、次にその移動地点の点情報から計算格子へ堆積土砂量を配分することを考える。本研究ではここで新たな提案として、代表砂粒の移動を離脱格子に存在する砂粒群の移動と捉え、Fig. 7 に示す概念図のように、砂粒の離脱格子の形状を代表砂粒の移動経路に沿って移動させ、あたかも格子内の離脱した砂粒群が格子形状内の初期配置を維持しながら移動するようモデル化している。その移動格子と固定格子の重なり合う面積割合で堆積土砂量を隣接格子へと配分するような、従来型 Euler 解法に比べ砂粒運動の実現象により近い土砂輸送のモデル化を新たに導入している。

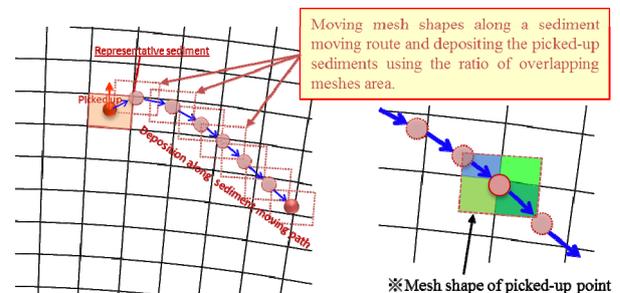


Fig. 7 Conceptual diagram of sediment moving and deposition modeling of simplified Lagrangian bedload model.

### (3) 簡略化・計算負荷軽減の方法

上述した簡易Lagrange型土砂輸送モデルによって、混合粒径の解析で縦断方向に長距離の実河川シミュレーションを実現するためには、さらなる計算負荷軽減と簡略化が必要となった。そこで本研究では、代表砂粒の移動経路については上述した通り解くが、砂粒の移動と流れの時間をリンクしない方法で代表砂粒の移動経路の計算頻度を減らし、計算負荷の軽減を図ることとした。具体的には、Fig. 8の計算フローに示すように、砂粒の移動を流れとリンクして毎ステップ計算するのではなく、流れの計算ステップより大きなある一定間隔毎に砂粒移動経路計算を行うこととし、砂粒移動経路計算では流れ場を固定し、流れの時間発展ステップに関係なく代表砂粒を移動し、全ての離脱土砂量が堆積するまで砂粒移動させ、砂粒の移動経路から算定される堆積先格子情報と離脱土砂量に対するその格子への堆積量割合を各計算格子および粒径階毎に記憶することとした。そして、それらの情報を用いて時間発展の毎ステップで計算される離脱土砂量を記憶した堆積先格子へと配分することを行っている。砂粒の移動経路計算のタイミングで、砂粒の堆積格子及び堆積割合情報が更新されるため、その更新時間間隔は今後十分に検討する必要があり検討課題として残されるが、本研究では10秒の一定間隔で更新、すなわち10秒毎に各格子の代表砂粒の移動経路を計算し、各格子の各粒径別堆積先格子と、各粒径別の離脱土砂量に対するその格子への堆積割合を更新する。更新されるまでの間は、離脱土砂量は毎ステップ計算され変化するが、堆積先格子と離脱土砂量に対する堆積格子毎の割合は変化しない。

以上のように、砂粒の移動と流れの時間をリンクしないことにより、砂粒の移動経路計算を実施する回数が減少させ計算負荷を大きく軽減し、実河川の長距離の数値シミュレーションを実現させた。

### 3.3 2015年台風11号来襲時の富田川河床変動シミュレーション

先述した2015年台風11号来襲前後の市ノ瀬地区GPS計測結果を検証材料に、本研究で構築した簡易Lagrange型掃流砂モデルの検証計算を実施した。本稿では、比較のため平衡流砂量式を用いたEuler型流砂モデルを用いた数値シミュレーションを合わせて実施し、構築した簡易Lagrange型掃流砂モデルで求められる結果の特徴について考察する。

#### (1) 計算条件

簡易的なLagrange型土砂輸送モデルと格子間移動

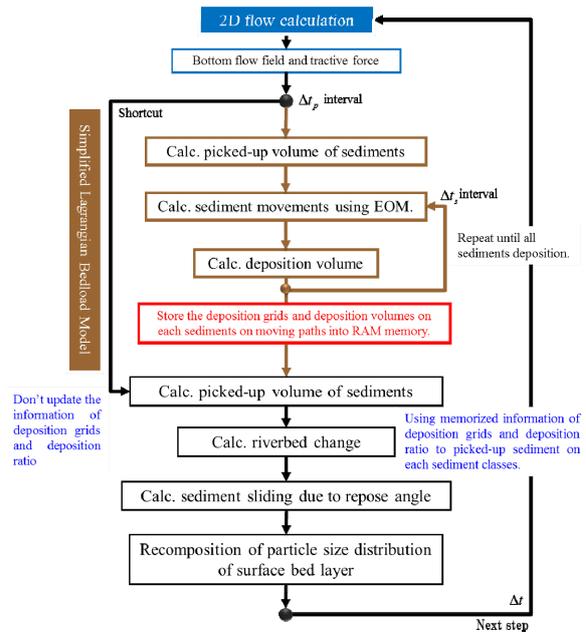


Fig. 8 Schematic computational flow chart of Simplified Lagrangian bedload transport model.

のEuler型の掃流砂モデルの違いに着目するため、今回の数値シミュレーションでは、離脱土砂量を両モデル共にEuler型モデルで使用する芦田・道上らが提案した掃流砂量式（芦田・道上，1972）を用いて離脱土砂量に差が生じないように解析を実施している。無次元限界掃流力については、修正Egiazaroff式（Egiazaroff, 1965）および岩垣式（岩垣，1956）を用いて算定している。また、浮遊砂の土砂輸送形態を本研究では考慮していないが、これも両掃流砂モデルの比較を容易にするための配慮であること付け加えておく。

両掃流砂モデルで共通となる計算条件をTable 1に示す。計算領域は、海域区間1kmを含む上流15.4kmの縦断方向約16kmとし、Fig. 9に示すような構造格子で格子数 $1096 \times 39 = 42,744$ となっている。計算で使用する河床のモデル地形については、平成23年度測量結果および本研究で実施したGPS歩行計測の結果を用いた（Fig. 10）。海域の境界条件である出発水位には潮位を与えている。そして、実河川の現象により近づけるため、河床材料の粒度分布については、著者らが実施した粒度分布調査に基づき0.50mm～200.0mmの範囲の粒度を12区分し初期河床粒度の設定を行い、各計算格子12粒径階の代表砂粒を解くことで河床高の変動を実現している。上流端から給砂方法については、Euler型と簡易Lagrange型の両モデルで違いはなく、上流端河床を維持する、いわゆる平衡給砂条件としている。

Table 1 Computational condition.

Calculation area	0.0k; estuary ~ 15.4k
Computational sediments (mm)	0.707, 1.414, 2.83, 4.90, 7.75, 12.25, 17.32, 24.50, 34.64, 44.72, 70.71, 141.42 Total 12 classes
Time step	Flow and bed variation; 2.0 sec Sediments movement; 0.2 sec.
Thickness of riverbed layer	Active and deposited sediment layer: 0.30 m
Porosity for riverbed	40.0%
Mode of sediment transport	Only bed load
Sediments supply from upstream	Bed level of upstream meshes were kept as equilibrium conditions via sediments supply
Manning coefficients for bed roughness	Manning-Strickler Eq. depending on bed surface materials

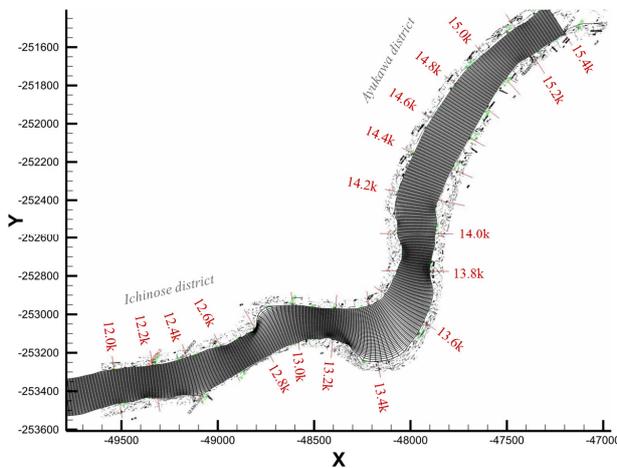


Fig. 9 Computational structured grid of Tonda River.

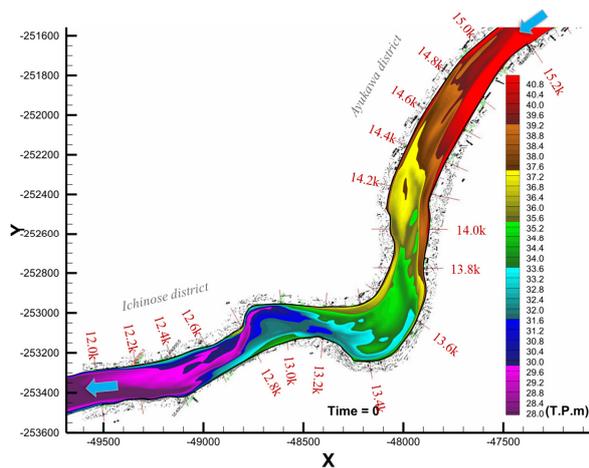


Fig. 10 Initial bed level for simulations.

(2) 計算結果と考察

Fig. 11, Fig. 12には、Fig. 4の流量ハイドロを上流端から与えた計算終了時（63時間後）の河床高及び河床変動量に関する計算結果を示す。

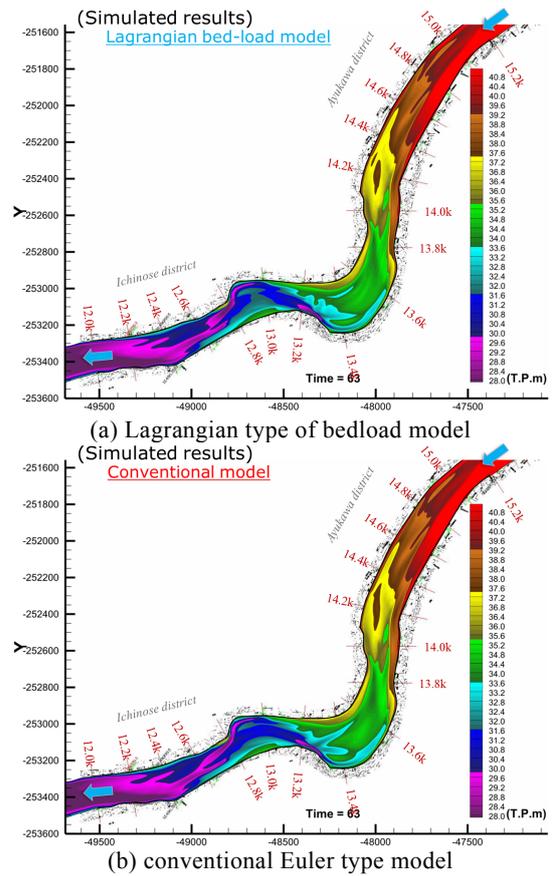


Fig. 11 Simulated Result of Bed Level.

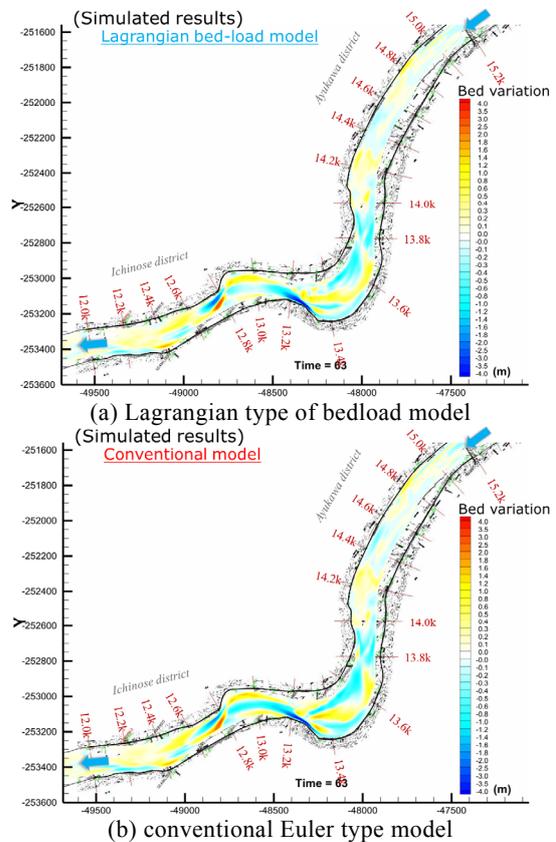
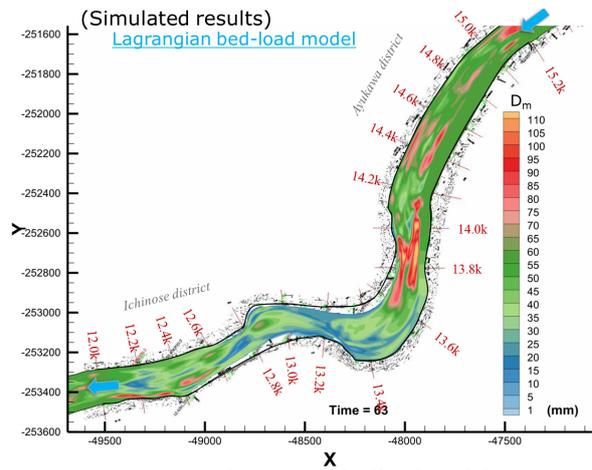


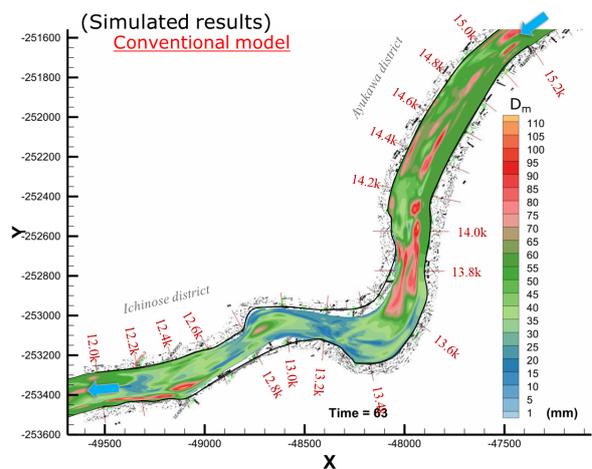
Fig. 12 Simulated Result of Riverbed Variation (dz).

Fig. 11とFig. 5もしくはFig. 12とFig. 6を比較すると、まず両モデル共に概ね良好に2015年7月出水による河床変化を再現していることが確認できる。河道が直線的な上流側範囲の最終河床変動量の比較では、両モデルで大きな差は見受けられないが、河道形状が大きく湾曲している12.8k~13.6kの範囲では洗掘域・堆積域の空間分布が異なる箇所が存在し、洗掘と堆積の程度も違いが見受けられる。これらの違いを生じさせた原因として考えられるのは、ひとつは簡易Lagrange型モデルの方が土砂輸送過程において局所的な河床地形の影響を受けやすいことが考えられる。簡易Lagrange型モデルは、粒径階毎の移動経路を計算するため、局所的に大きな河床勾配の場所では粒径毎に土砂輸送方向が異なる状況、例えば粒径の小さな砂粒は流れに沿って輸送され、粒径が大きい程その自重で河床高が低い方へと輸送されやすい等の現象が再現される。また、湾曲近傍の洗掘が大きな箇所とその下流域に着目すると、Euler型の計算結果の方が洗掘域の形状が縦断方向伸び、その洗掘の影響でその近傍でLagrange型に比べて局所的に堆積量が過大となっている箇所が確認できる。これらも下流への土砂輸送の解析手法が異なることが原因と考えられ、Euler型は格子間の土砂輸送で離脱土砂量が瞬時に隣接格子へと輸送され格子サイズに依存するモデルであり、簡易Lagrange型モデルに比べ土砂輸送速度が大きく評価され洗掘量が多くなっていると考えられる。そして、Euler型の結果において局所的に堆積量が大きくなっている箇所は、土砂輸送速度の違いでEuler型の洗掘量が大きく評価されているが原因の一つと考えられる。また、Euler型の土砂輸送は計算格子の影響を大きく受け、掃流力の小さな計算格子では全く土砂が移動しないため、砂粒運動の慣性で土砂が移動することはなく局所的に堆積量が大きくなったことも一つの原因と考えられる。加えて、砂粒が慣性で輸送されるような現象は、Euler型の格子間土砂輸送モデルの限界と言える。

また、参考のため計算終了時の河床表面層粒度分布結果より求めた平均粒径の計算結果をFig. 13に示す。平均粒径の計算結果において、両モデル間で大きな差は生じていないが、洗掘部粗粒化の程度や空間分布に若干差が生じている。これらは先述したように両モデルの土砂輸送速度や簡易Lagrange型では粒径毎に粒径毎に土砂輸送方向が異なってくるが原因と考えられる。



(a) Lagrangian type of bedload model



(b) conventional Euler type model

Fig. 13 Simulated Result of Mean Diameter ( $D_m$ ) of Bed Surface Layer.

#### 4. 結論

本研究では、和歌山県2級河川富田川の市ノ瀬地区を対象に、高精度GNSSを用いた歩行計測による砂州地形計測を実施した。2015年台風11号来襲前後に地形計測を実施し、出水による砂州地形の変化を現地計測から捉えることができた。また、簡易Lagrange型の掃流砂モデルを構築し、水深積分型の平面2次元流れ解析モデルに導入し、富田川の2015年台風11号出水による河床地形変化の再現計算を実施し、Euler型掃流砂モデルの結果と比較することで、簡易Lagrange型掃流砂モデルの特性について考察を行った。

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- [1] 実務向きのLagrange型掃流砂モデルの構築を目指して、Lagrange型掃流砂モデルの簡易化および計算負荷軽減を図った。
- [2] 和歌山県富田川の市ノ瀬・鮎川地区において高精

度GPSを利用した地形測量を実施し、出水前後の砂州地形および澇筋変化を計測し、洪水時の湾曲部砂州地形変化現象を捉えることができた。

- [3] 富田川の河床地形計測結果を検証材料に、構築した簡易Lagrange型掃流砂モデルの検証計算を実施した。同一の離脱土砂量式を用いて、簡易Lagrange型流砂モデルとEuler型モデルの土砂輸送過程のモデル化の違いがもたらす河床変動特性について示した。
- [4] 両掃流砂モデル共に、概ね良好に河床変化を再現する結果を示し、洗掘及び堆積の河床変動量に関する結果は、直線区間で両モデルの差が小さく、河道湾曲部で若干の差が生じることが示された。これらの原因としては、簡易Lagrange型モデルの方は粒径階毎の代表砂粒の移動経路を計算するため、局所的に河床勾配が大きい場所では粒径毎に土砂輸送方向に差が生じたと考えられ、簡易Lagrange型モデルの方が土砂輸送過程において局所的な河床地形の影響を受けやすいことが考えられる。

#### 謝 辞

本稿は、文部科学省 科学研究費助成事業 基盤研究(C) (課題番号26420498, 代表: 武藤裕則), ならびに若手研究(B) (課題番号26820202, 代表: 水谷英朗) の助成を受けたものである。現地計測については京都大学防災研究所技術室 久保輝広氏および山本善万氏に多大なるご協力を賜りました。また、本研究で使用している和歌山県 2 級河川富田川の貴重な横断測量調査結果及び水位・流量データは、和歌山県 県土整備部 河川・下水道局 河川課よりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 芦田和男・道上正規 (1972) : 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.
- 岩垣雄一 (1956) : 限界掃流力に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21.
- 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・中藤達昭 (2001) : 3次元移動座標系・非平衡流砂モデルによる水制周辺の河床変動解析, 土木学会論文集, No.684, -56, pp.21-34.
- 水谷英朗・中川一・川池健司・馬場康之・張浩 (2010) : 混合砂河床における水制周辺の局所洗掘及び粒度変化に関する研究, 水工学論文集, 第54巻, pp.805-810.
- 水谷英朗・馬場康之・久保輝広 (2015) : 和歌山県富田川河口の地形変化計測, 京都大学防災研究所年報, 第58号B, pp. 321-331.
- Egiazaroff, I. V. (1965): Calculation of Nonuniform Sediment Concentration, Proc. ASCE, Vol.91, HY4, pp.225-247.
- Mizutani, H., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y. and Zhang, H. (2012): Study on local scour and variation of bed composition around non-submerged spur dyke, Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering, JSCE, Vol.30, No.1, pp.29-46.
- Sekine, M. and Kikkawa, H. (1992): Mechanics of saltating grains. , Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.118, No.4, pp.536-558.
- S. V. Patankar (1980): Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere, Washington DC, 197.

(論文受理日: 2016年6月13日)