

## 1. Morpho2Dの英語マニュアル及びチュートリアルの開発と定常流を対象としたMorpho1Dの開発 (担当：竹林洋史)

### (1) はじめに

Morpho2Dは、平面二次元の河床変動解析を行うための解析プログラムである。平成24年度は、iRIC ver.2.0に対して、英語のマニュアルとチュートリアルを開発するとともに、条件設定のためのxmlファイルの見直し、さらには日本語・英語互換ファイルの整備を行った。さらに、現場からの要請（特に行政担当者からの要請）に応えるため、定常一次元モデルであるMorpho1Dを新規に開発するとともに、これをメコン河・タンチャウ地区に適用し、テスト解析を行った。これらをふまえ、本章では次の3つの点に着目して報告する。

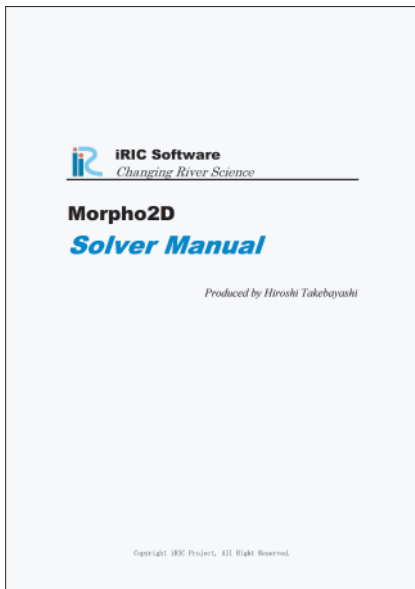
- ① Morpho2Dの英語のマニュアルとチュートリアルについて
- ② Morpho1Dの基礎方程式について
- ③ Morpho1Dをベトナム国・タンチャウ地区の解析へ適用

### (2) Morpho2Dの英語マニュアル

図-1.1に、iRIC ver2用に開発したMorpho2Dの英語マニュアルを一部抜粋したものを示す。マニュアルは、NaysCUBE等と同一フォーマットとなっており、概要、使用されている基礎方程式、xmlファイルによる条件設定用ダイアログ、入力データフォーマットの説明の順に記載されている。Morpho2Dの特徴としては、混合砂の取り扱い、植生の密生度及び高さ情報を考慮した植生抗力の評価、岩露出域や河川構造物上の流砂量の算定などである。これらについては、基礎方程式で記述するとともに、入力データフォーマットの部分で必要な入力データ形式を詳述している。

### (3) Morpho2Dの英語チュートリアル

図-1.2に、iRIC ver2用に開発したMorpho2Dの英語チュートリアルを一部抜粋したものを示す。チュートリアルは、NaysCUBE等と同一フォーマットとなっている。チュートリアルで対象とした河川は、メコン河のタンチャウ地区周辺であり、メコン河の中でも最も河床変動が激しい領域である。



**Contents**

I. OUTLINE ..... 1

1 MORPHO2D ..... 1

1.1 CHARACTERISTICS OF FLOW MODEL ..... 1

1.2 CHARACTERISTICS OF SEDIMENT TRANSPORT MODEL AND BED DEFORMATION MODEL ..... 2

1.4 ELSE ..... 2

II GOVERNING EQUATIONS ..... 5

E1 GOVERNING EQUATION OF FLOW ..... 5

E2 CALCULATION METHOD OF TRANSPORT FLOW ..... 6

E3 CALCULATION OF BED DEFORMATION ..... 6

E4 CALCULATION OF FLOW PROFILE OF VEGETATION ..... 6

E5 GOVERNING EQUATION OF THE SEDIMENT TRANSPORT ..... 8

E6 TRANSPORT OF SEDIMENT DEBRIS ..... 10

E7 BANK EROSION MODEL ..... 14

<REFERENCES> ..... 14

III CALCULATION CONSTRAINT ..... 16

B1 BOUNDARY CONDITION ..... 16

B2 SETTING OF CALCULATION PARAMETERS ..... 17

B3 SETTING OF SEDIMENT TRANSPORT CONDITION ..... 19

B4 SETTING OF FLOW INITIAL CONDITION ..... 21

B5 SETTING OF VEGETATION CONDITION ..... 23

B6 SETTING OF INITIAL CONDITION ..... 24

B7 SETTING OF FLOW PROFILE FUNCTION ..... 25

IV INPUT AND OUTPUT FILES ..... 26

F1 INPUT FILE FOR THE MODEL AND DOWNSTREAM WATER SURFACE LEVEL ..... 26

F2 FILE STRUCTURE OF THE MATERIAL IN THE FLOW AND DEFORMATION LAYER ..... 27

F3 VEGETATION DENSITY AND VEGETATION HEIGHT ..... 28

F4 FILE FOR REDUCTION ..... 29

V ELSE ..... 30

**I. Outline**

**1.1 Morpho2D**

Morpho2D is the two-dimensional bed deformation analysis solver which is developed by Hiroshi Takebayashi, Kyoto University. The governing equations are written in boundary layer general coordinate system. In 2009, the solver was modified BIC-Neo Version 1.0 which is the free software developed by iRIC.

Some functions are added to the original version and the improved version is installed into iRIC Version 2.0 on March 2011.

Morpho2D can treat the non-uniform sediment and can reproduce the horizontal distribution of bed material. In addition, generation, development and migration process of bars can be reproduced. Morpho2D is often applied to natural rivers. Effect of vegetation on bed deformation can be considered in the model and sediment transport process on the bed (see next) can be reproduced.

**1.2 Characteristics of flow model**

- Coordinate system in the general coordinate system. Complex boundary shape can be considered.
- TVB-MacCormack scheme (if and when necessary) is used for the correction term in the momentum equations on the difference method.
- 8 equation model is used for the calculation of turbulence diffusion terms.
- Spatial boundary conditions are the water depth at the downstream end and the water discharge at the upstream end.
- Longitudinal averaged normal depth is used for the initial water depth. Longitudinal averaged bed slope is used to calculate the normal depth. When the initial water level at the inner numerical grid is lower than the initial water level at the downstream end, initial water level at the downstream end is used for the initial water depth at the inner numerical grid.
- Manning's law is used to estimate the bed shear stress. Manning's coefficient can be distributed laterally.
- Obstacles in the calculation domain can be considered by use of the height data of the non-uniform area. By use of the data, the plans of bridges and so on can be considered in the calculation.
- Vegetation can be considered as a drag force acting on the flow. The cover rate and the height of vegetation can be considered to estimate the drag force by introduction of the vegetation cover rate file and the vegetation height file.

**1.3 Characteristics of sediment transport model and bed deformation model**

- Users can choose the calculation of water flow only or bed deformation analysis.
- Users can choose the calculation of bed load only or bed load + suspended load.
- Both uniform sediment and non-uniform sediment can be treated. When uses those non-uniform sediment, size distribution of sediment can be calculated.
- Bank erosion can be calculated by considering the angle of repose of the sediment. When the bed load slope larger than the angle of repose, the sediment at the higher numerical grid is moved to the lower numerical grid to keep the bed load slope smaller than angle of repose.

**1.4 Else**

- This start function can be used. Users can start the calculation from the final condition of the previous calculation.

**II. Governing equations**

**II.1 Governing equations of flow**

**II.1.1 Governing equation in Cartesian coordinate**

First, governing equations in Cartesian coordinate  $(x, y)$  which will be transformed to general coordinate system is introduced.

(Continuum equation)

$$\Delta \left( \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) = 0 \quad (1)$$

(Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \rho h \tau_x \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho h \tau_y \right) - \frac{\partial}{\partial x} (\rho h \tau_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho h \tau_y) = 0 \quad (2)$$

$$-\rho h \frac{\partial}{\partial x} (h - z_b) - \frac{\tau_x}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (\rho h \tau_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho h \tau_y) = 0 \quad (3)$$

$$-\rho h \frac{\partial}{\partial y} (h - z_b) - \frac{\tau_y}{\rho} - \frac{\partial}{\partial x} (\rho h \tau_x) - \frac{\partial}{\partial y} (\rho h \tau_y) = 0 \quad (4)$$

where,

$$\tau_x = \frac{\rho h}{\sqrt{h^2 + \lambda^2}} \tau, \quad \tau_y = \frac{\rho h}{\sqrt{h^2 + \lambda^2}} \tau, \quad \tau_z = \rho h^2 \quad (5)$$

$$\tau_x = -\frac{\partial \tau}{\partial x}, \quad \tau_y = -\frac{\partial \tau}{\partial y}, \quad \tau_z = \tau \left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (6)$$

$$F_x = F_x \frac{h}{\sqrt{h^2 + \lambda^2}}, \quad F_y = F_y \frac{h}{\sqrt{h^2 + \lambda^2}}, \quad F_z = \frac{1}{2} \rho C_d \lambda^2 (u^2 + v^2) \quad (7)$$

where,  $x$  is the x-axis and  $y$  is the coordinate along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $h$  is the coordinate along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $\tau_x$  and  $\tau_y$  are the shear stress along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $\tau_z$  is the coefficient of the eddy viscosity.  $\tau$  is the eddy viscosity.  $\tau_x$  and  $\tau_y$  represent velocity over the bed surface along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $F_x$  and  $F_y$  are the drag force due to vegetation along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $C_d$  is the coefficient of drag along  $x$  and  $y$  is the vegetation density.  $\lambda$  is the water depth at vegetation. When vegetation height is higher than

water depth,  $\lambda$  is equal to water depth. When vegetation height is lower than water depth,  $\lambda$  is equal to vegetation height.  $\lambda$  is a parameter related to the porosity in the soil, whereas  $\lambda = 1$  at  $\sigma = 0$ , and  $\lambda = 2$  at  $\sigma = 0.5$ , where  $\sigma$  is the bed load and  $\lambda$  is the porosity in the soil. Seepage flow is assumed in horizontal two-dimensional flow.

**II.1.2 Transformation to general coordinate system**

Next, governing equations of horizontal two-dimensional flow in Cartesian coordinate system are transformed into flow in general coordinate system  $(\xi, \eta)$  by use of the general coordinate system, complex numerical grid can be used. Relationship between Cartesian coordinate system and General coordinate system is as follows.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \quad (9)$$

or,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} & \frac{\partial \eta}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (10)$$

where,

$$\xi = \frac{\partial \xi}{\partial x} \xi + \frac{\partial \xi}{\partial y} \eta, \quad \eta = \frac{\partial \eta}{\partial x} \xi + \frac{\partial \eta}{\partial y} \eta \quad (11)$$

correspondingly,

$$\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial y} \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial y} \quad (13)$$

or,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \quad (14)$$

where,

$$x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad x_\eta = \frac{\partial x}{\partial \eta}, \quad y_\xi = \frac{\partial y}{\partial \xi}, \quad y_\eta = \frac{\partial y}{\partial \eta} \quad (15)$$

where,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{\partial \eta}{\partial x} & -\frac{\partial \eta}{\partial y} \\ -\frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (16)$$

where, by use of the relationship  $J = \Delta \xi_\eta - \Delta \eta_\xi$ ,

$$\frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} \frac{\partial \eta}{\partial x} & -\frac{\partial \eta}{\partial y} \\ -\frac{\partial \xi}{\partial x} & \frac{\partial \xi}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (17)$$

or,

$$x_\xi = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad x_\eta = -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial \eta}{\partial y}, \quad y_\xi = -\frac{1}{\Delta} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad y_\eta = \frac{1}{\Delta} \frac{\partial \xi}{\partial y} \quad (18)$$

$$J = \Delta \xi_\eta - \Delta \eta_\xi = \Delta^2 (x_\eta y_\xi - x_\xi y_\eta) \quad (19)$$

where,

$$J = \frac{1}{\Delta^2} \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial \xi}{\partial y} - \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad (20)$$

(2, 3) components of velocity are expressed as  $(u', v')$ ,

$$u' = u_\xi x_\xi + u_\eta x_\eta \quad (21)$$

$$v' = v_\xi x_\xi + v_\eta x_\eta \quad (22)$$

or,

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_\xi & u_\eta \\ v_\xi & v_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\xi \\ x_\eta \end{pmatrix} \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} u_\xi & u_\eta \\ v_\xi & v_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial \eta}{\partial x} \\ -\frac{\partial \eta}{\partial y} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \quad (24)$$

**II.1.3 Governing equations in general coordinate system**

Governing equations in general coordinate system which are transformed from Cartesian coordinate system  $(x, y)$  are as follows.

(Continuum equation)

$$\Delta \left( \frac{\partial^2 h}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial \eta^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial h}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial h}{\partial \eta} \right) = 0 \quad (25)$$

(Momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \rho h \tau_\xi \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \rho h \tau_\eta \right) - \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho h \tau_\xi) - \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho h \tau_\eta) = 0 \quad (26)$$

$$-\rho h \frac{\partial}{\partial \xi} (h - z_b) - \frac{\tau_\xi}{\rho} - \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho h \tau_\xi) - \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho h \tau_\eta) = 0 \quad (27)$$

$$-\rho h \frac{\partial}{\partial \eta} (h - z_b) - \frac{\tau_\eta}{\rho} - \frac{\partial}{\partial \xi} (\rho h \tau_\xi) - \frac{\partial}{\partial \eta} (\rho h \tau_\eta) = 0 \quad (28)$$

where,  $\xi$  and  $\eta$  represent the coordinate along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $h$  is the coordinate along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $\tau_\xi$  and  $\tau_\eta$  are the shear stress along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $\tau_z$  is the coefficient of the eddy viscosity.  $\tau$  is the eddy viscosity.  $\tau_\xi$  and  $\tau_\eta$  represent velocity over the bed surface along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $F_\xi$  and  $F_\eta$  are the drag force due to vegetation along the longitudinal and the transverse direction, respectively.  $C_d$  is the coefficient of drag along  $\xi$  and  $\eta$  is the vegetation density.  $\lambda$  is the water depth at vegetation. When vegetation height is higher than

$\tau_\xi$  and  $\tau_\eta$  represent the contraction shear stress along  $\xi$  and  $\eta$  coordinate, respectively. These shear stresses are defined as

$$\tau_\xi = \frac{\rho h}{\Delta} \frac{\partial \tau}{\partial \xi}, \quad \tau_\eta = \frac{\rho h}{\Delta} \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \quad (29)$$

Manning's law is used to calculate the friction velocity ( $\tau_0$ ) as follows,

$$\tau_0 = \frac{\rho h}{\Delta} (h^2 + \lambda^2) \quad (30)$$

where,  $n$  is the Manning's roughness coefficient,  $h$  is the hydraulic radius,  $\lambda$  is the roughness height, and  $\tau_0$  represent velocity over the bed surface along  $\xi$  and  $\eta$  coordinate, respectively.  $F_\xi$  and  $F_\eta$  are the contraction drag force due to vegetation along  $\xi$  and  $\eta$  coordinate, respectively. These drag forces are defined as

$$F_\xi = \frac{\rho h}{\Delta} F_x + \frac{\rho h}{\Delta} F_y, \quad F_\eta = \frac{\rho h}{\Delta} F_x - \frac{\rho h}{\Delta} F_y \quad (31)$$

$$F_\xi = -\frac{\rho h}{\Delta} \left( \frac{\partial \tau}{\partial \xi} \frac{\partial \eta}{\partial \xi} - \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \xi} \right), \quad F_\eta = -\frac{\rho h}{\Delta} \left( \frac{\partial \tau}{\partial \xi} \frac{\partial \eta}{\partial \eta} - \frac{\partial \tau}{\partial \eta} \frac{\partial \eta}{\partial \eta} \right) \quad (32)$$

where,  $A_\xi$  and  $A_\eta$  are the coefficient of permeability along the longitudinal and the transverse direction, respectively.

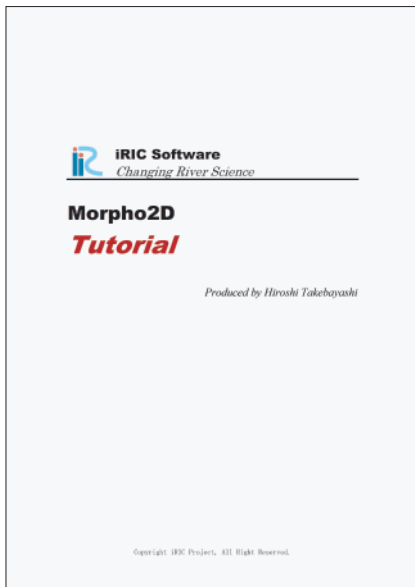
$$A_\xi = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad A_\eta = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (33)$$

$\xi_\xi$  and  $\xi_\eta$  represent the contraction depth averaged seepage flow velocity along  $\xi$  and  $\eta$  coordinate, respectively. These velocities are defined as

$$\xi_\xi = \frac{\partial \xi}{\partial x} u_\xi + \frac{\partial \xi}{\partial y} u_\eta, \quad \xi_\eta = \frac{\partial \xi}{\partial x} v_\xi + \frac{\partial \xi}{\partial y} v_\eta \quad (34)$$

図-1.1 iRIC ver2用に開発したMorpho2Dの英語マニュアルの一部抜粋(1)





### Contents

1. OUTLINE	1
1.1 MORPHO2D	1
1.2 MORPHO2D TUTORIAL	2
1.3 OPEN MORPHO2D	2
II. BED DEFORMATION ANALYSIS ON BED COMPOSED OF NON-UNIFORM SEDIMENT (MEKONG RIVER)	3
II.1 GRID GENERATION FROM BED ELEVATION DATA	4
II.2 SETTINGS OF CALCULATION CONDITIONS	13
II.3 RUN THE CALCULATION	22
II.4 VISUALIZATION OF CALCULATION RESULTS	24

### I. Outline

#### 1.1 Morpho2D

Morpho2D is the annually horizontal two-dimensional bed deformation analysis software which is developed by Hiroshi Takebayashi, Kyoto University. The governing equations are written in boundary (Grid) general coordinate system. In 2009, the solver was modified iRIC-Non Version 1.0 which is the free software developed by iRIC.

Some functions are added to the original version and the improved version is installed into iRIC Version 2.0 on March 2011.

Morpho2D can read the non-uniform sediment and can reproduce the horizontal distribution of bed material. In addition, generation, development and migration process of bars can be reproduced. Morpho2D is often applied to natural rivers. Effect of vegetation on bed deformation can be considered in the model and sediment transport process on rigid bed (e.g. rock) can be reproduced.

#### 1.2 Morpho2D Tutorial

The purpose of the manual is to show the detailed procedure of the analysis from the beginning to the end. Tutorial has enough explanations to perform analysis. However, if you cannot understand the tutorial, please refer iRIC user manual and Morpho2D manual.

(Contents of Tutorial)

- Chapter 1 Bed deformation analysis on bed composed of non-uniform sediment (Mekong River)

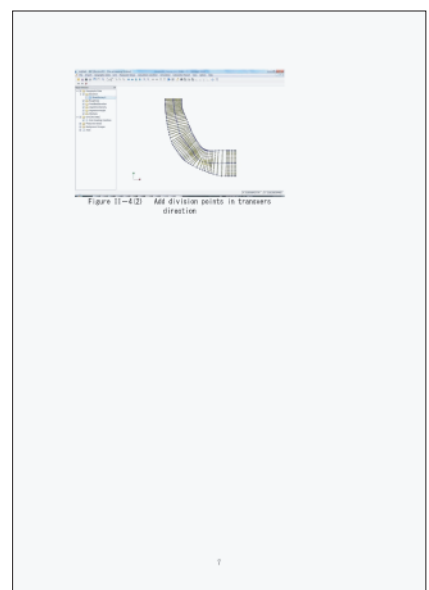
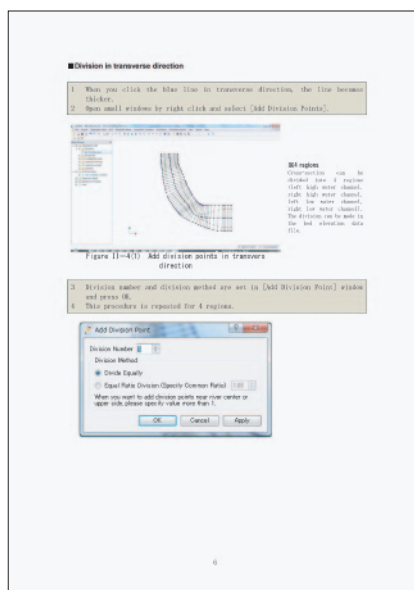
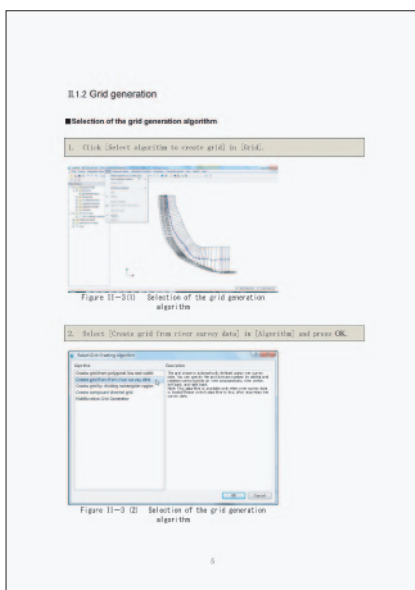
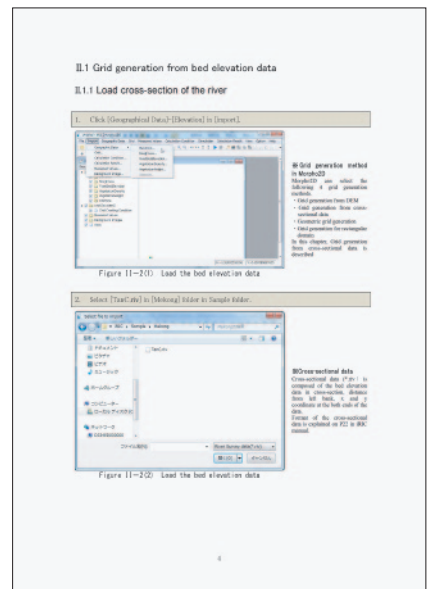
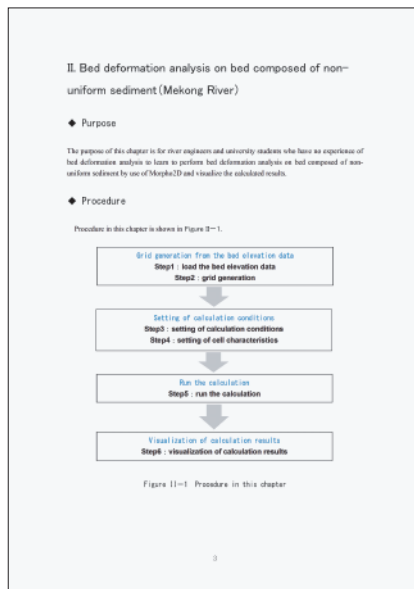
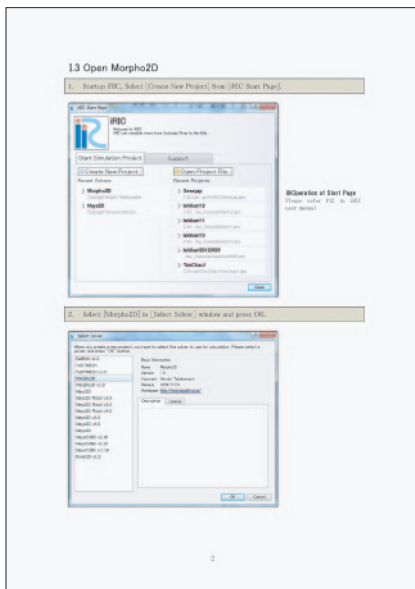


図-1.2 iRIC ver2用に開発したMorpho2Dの英語チュートリアルの一部抜粋(1)



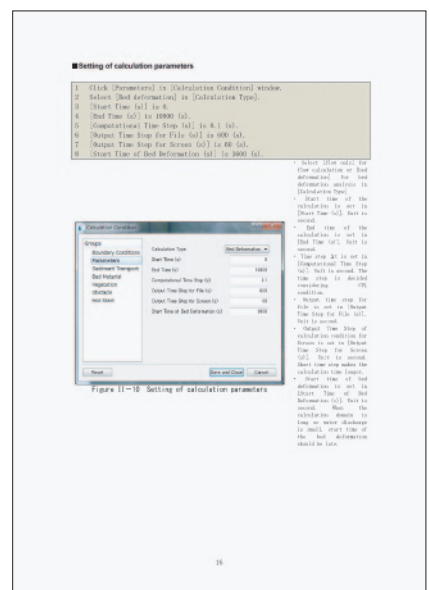
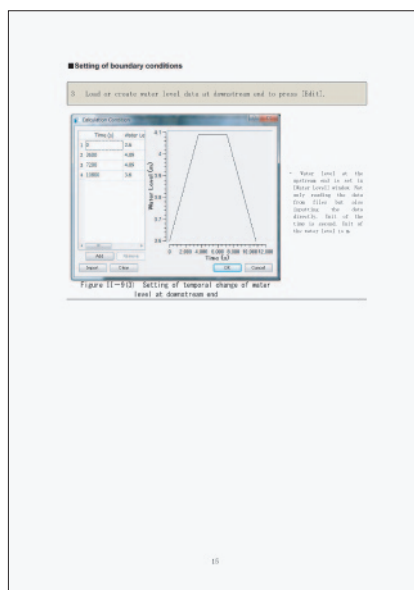
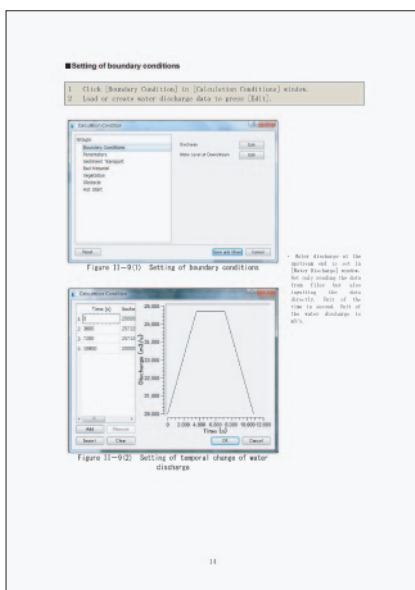
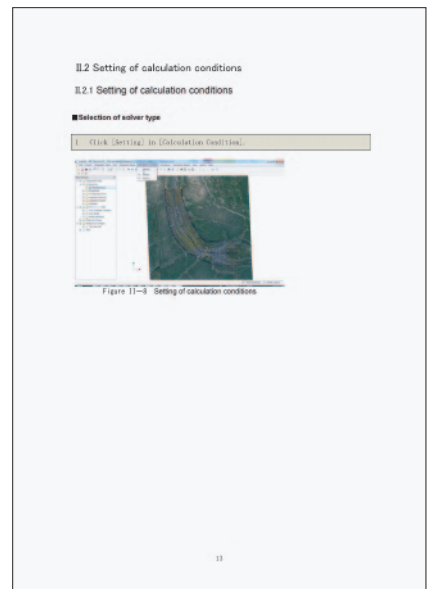
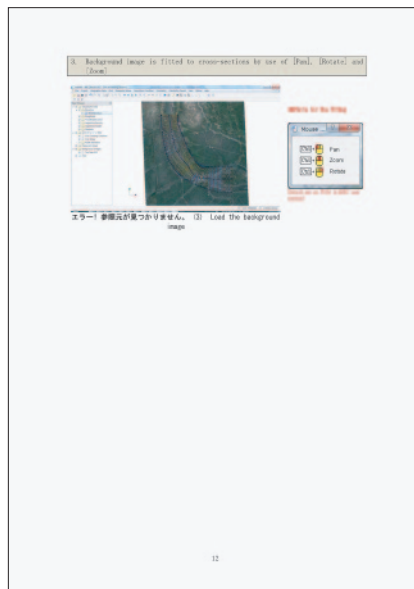
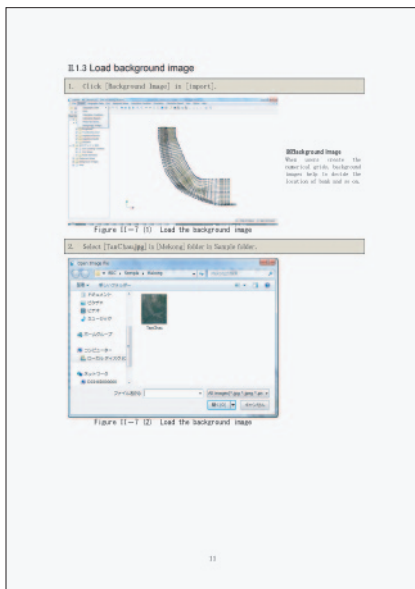
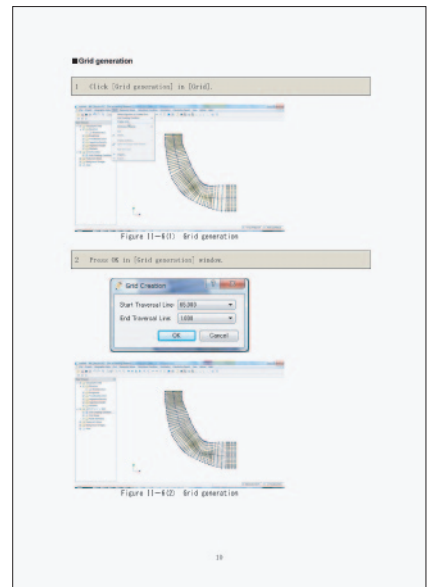
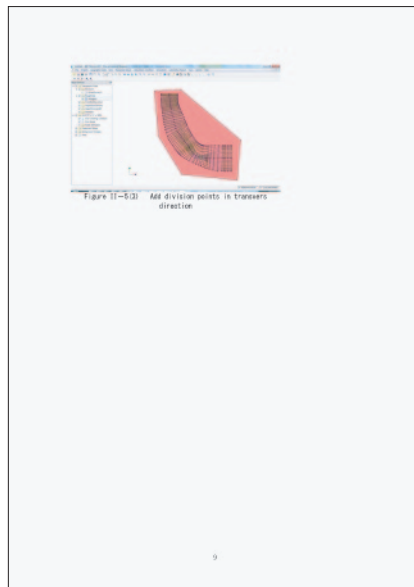
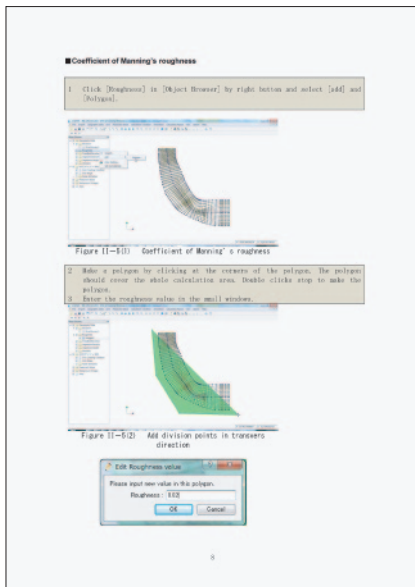


図-1.2 iRIC ver2用に開発したMorpho2Dの英語チュートリアルの一部抜粋(2)

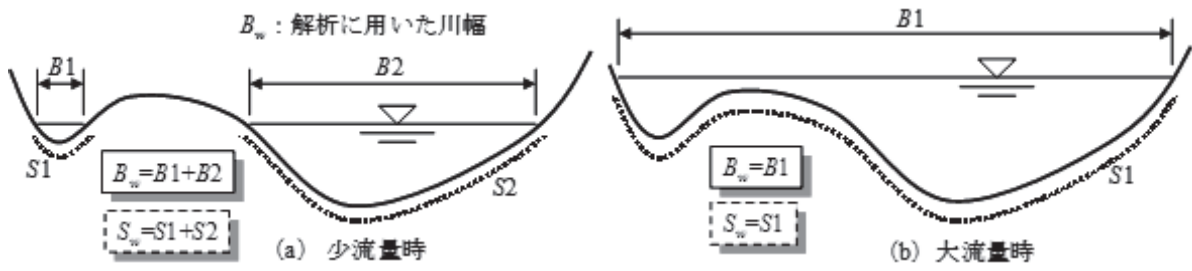


図-1.3 解析に用いた川幅(Bw)と潤辺(Sw)

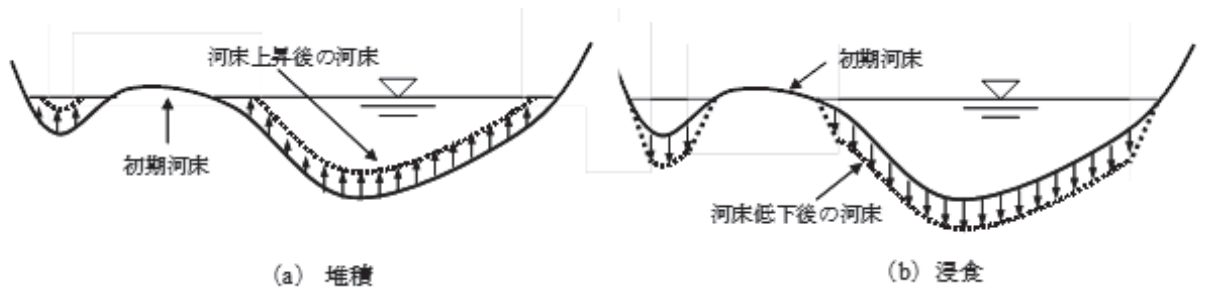


図-1.4 河床変動による河床横断面形状の変化

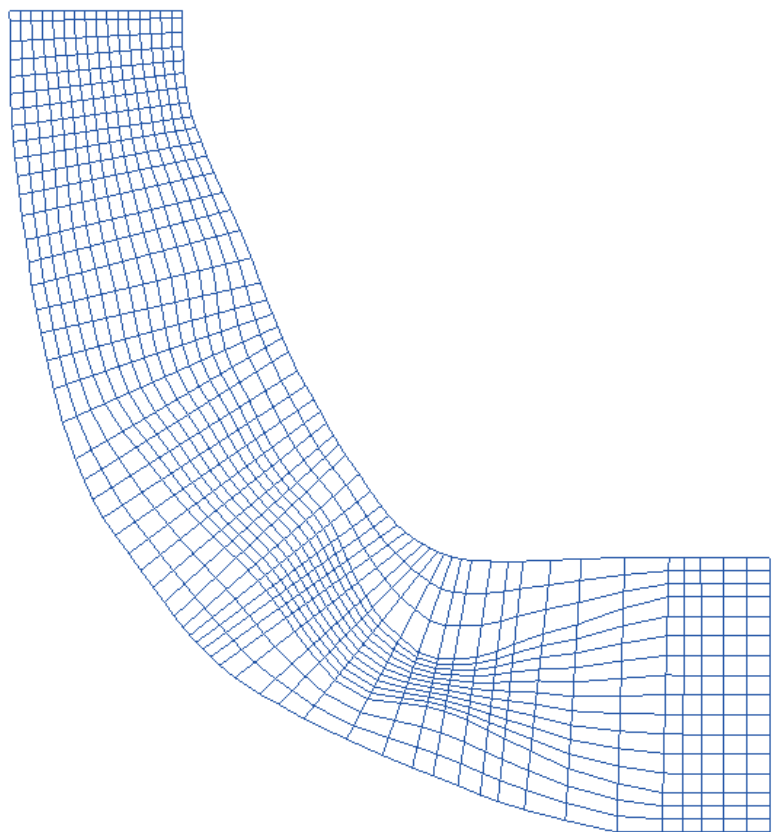


図-1.5 タンチャウ地区の解析メッシュ

(4) 定常流を対象としたMorpho1Dの基礎方程式<sup>1)</sup>

Morpho1Dは、定常流を対象とした解析と非定常流を対象とした解析の両方を可能とすることが最終目

標である。平成24年度は、これらの内、定常場を対象とした解析モデルをiRICに導入した。以下、基礎方程式を示すが、Morpho2Dと同一の部分は割愛させて頂く。

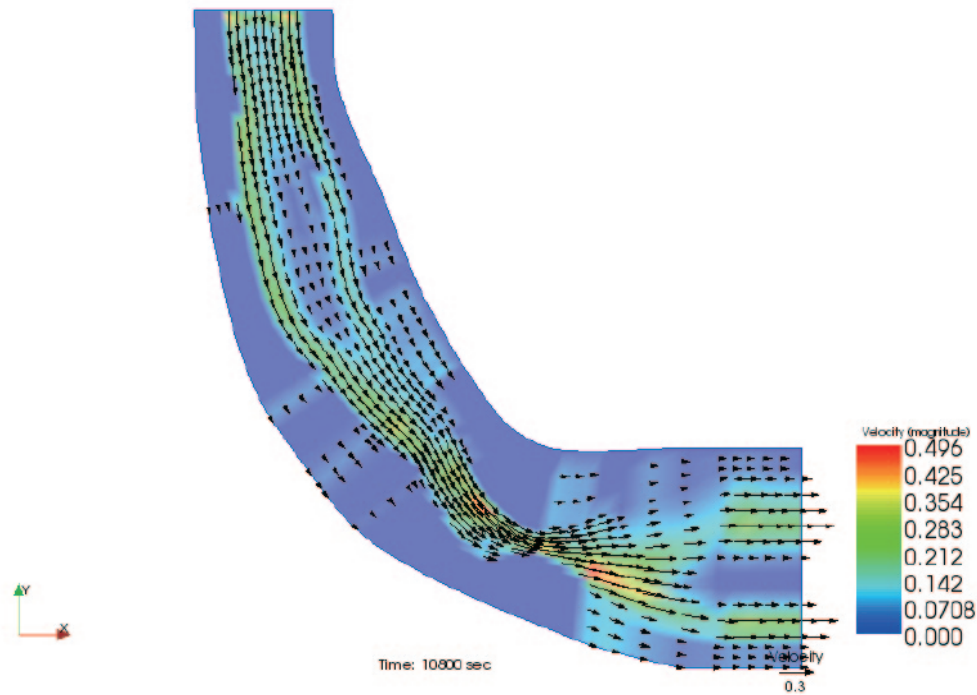


図-1.6 流速の平面分布

流れの質量保存則および運動方程式は、以下のようである。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) = -gA \frac{\partial z}{\partial x} - gAI_e + \frac{\partial}{\partial x} (A\sigma_{xx}) \quad (1)$$

ここに、 $t$ は時間、 $x$ は流下方向の座標、 $A$ は本川の流水断面積、 $Q$ は本川の流量、 $Q_e$ は本川から氾濫原への横流出流量、 $I_e$ は氾濫原から本川への氾濫流の流入幅、 $g$ は重力加速度、 $\sigma_{xx}$ は本川のエネルギー勾配であり、以下のようにマニング則によって評価している。

$$I_e = \left( \frac{n_m Q}{R_w^{(2/3)} A} \right)^2 \quad (2)$$

ここに、 $n_m$ はマニングの粗度係数、 $R_w$ は径深である。本解析では、雨期と乾期の流れと流砂を評価するため、河道の横断形状を考慮している。そのため、流水川幅 ( $R_w$ ) と潤辺 ( $R_m$ ) は図-1.3に示すように評価している。 $\sigma_{xx}$ は乱流応力であり、以下のように評価している。

$$\sigma_{xx} = 2\varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q}{A} \right) \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad (4)$$

ここに、 $\varepsilon$ は渦動粘性係数、 $\kappa$ はカルマン定数、 $u_*$ は断面平均摩擦速度、 $h$ は断面平均水深である。

急勾配河川でも対応できるように、流砂量は、河床勾配が限界掃流力に与える影響を考慮した芦田・道上式を用いる<sup>2,3,4)</sup>。

$$Q_{bk} = B_w 17 \sqrt{sgd_k^3 \tau_{*ek}^{3/2}} \left( 1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}}} \right) \left( 1 - K_c \frac{\tau_{*ck}}{\tau_{*k}} \right) f_{bk} r_b \quad (5)$$

$z_{zk}$ と $z_{zk}$ については後述する。 $z$ は土砂の水中比重、 $\tau_{*z}$ は $z$ 粒径階に対する無次元掃流力である。 $\tau_{*z}$ は $z$ 粒径階に対する無次元限界掃流力であり、修正Egiazaroff式により算定した<sup>2)</sup>。 $\tau_{*z}$ は掃流層内の土砂の平均粒径に対する無次元限界掃流力であり、岩垣式<sup>5)</sup>により算定した。 $\tau_{*z}$ は $z$ 粒径階に対する有効無次元掃流力である<sup>2)</sup>。 $z_{zz}$ は有効摩擦速度、 $\tau_{*z}$ は掃流砂層内の土砂の平均粒径に対する無次元掃流力である。 $z_{zz}$ は限界掃流力の修正関数<sup>3,4)</sup>であり、一次元場に修正した以下の関係より求める。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_c} \left( \frac{\rho}{s} + 1 \right) \tan \theta_s \quad (6)$$

ここに、 $\mu_c$ は静止摩擦係数、 $\rho$ は水の比重、 $\theta_s$ は流下方向の河床勾配である。本解析は河道横断形状を考慮した一次元河床変動解析であるが、断面流砂量と断面内の流水域の河床材料の粒度は、それぞれ、一つの値としている。 $z_{zz}$ は $k$ 粒径階に対する流水域の掃流砂層の土砂の存在率である。掃流砂層内の土砂の粒度は、以下の土砂の質量保存則により求める。

$$B_w \frac{\partial c_b E_b f_{bk}}{\partial t} + B_w (1 - \lambda) F_{bk} \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} + B_w w_k (c_{sbe} - c_{sbe}) = 0 \quad \begin{cases} F_{bk} = f_{dak}, \partial z_b / \partial t \leq 0 \\ F_{bk} = f_{bk}, \partial z_b / \partial t \geq 0 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 $\lambda$ は河床土砂の空隙率、 $z_{zz}$ は河床位、 $z_{zz}$ は掃流砂層直下の堆積層（遷移層<sup>4)</sup>）における $z$ 粒径階の土砂の存在率、 $z_{zz}$ は流砂を全て河床に静止させたときの粘着性土層上の非粘着性土の厚さ、 $z_{zz}$ は掃流砂層の厚さである。 $z_{zz}$ は掃流砂層直下の堆積層（遷移層）の厚さである。遷移層以下の $z$ 番目の堆積層における $z$ 粒径階の存在率である $z_{zz}$ は、河床が浸食され、遷移層に変化した後に、式(1.7)の関係で変化する。 $z_{zz}$ は鉛直平均の掃流砂の濃度、 $z_{zz}$ は平衡掃流砂層厚さである<sup>6)</sup>。 $\phi$ は安息角である。 $z_{zz}$ は粘着性土層上の非粘着性土の量に関するパラメータである。浮遊砂の沈降速度( $z_{zz}$ )は、Rubeyの式より求めた<sup>7)</sup>。 $\nu$ は動粘性係数、 $z_{zz}$ は $z$ 粒径階の浮遊砂の基準点濃度である。 $z_{zz}$ は基準点高さにおける $z$ 粒径階の平衡浮遊砂濃度である<sup>8)</sup>。

$z$ 粒径階の断面平均浮遊砂濃度( $z_{zz}$ )は、以下の関係より求める。

$$\frac{\partial A c_{sk}}{\partial t} + \frac{\partial Q c_{sk}}{\partial x} = AD \frac{\partial^2 c_{sk}}{\partial x^2} + B_w w_{fk} (c_{sbe} - c_{sbe}) \quad (8)$$

浮遊砂の水深分布は、指数分布を仮定している。

本解析では、一般断面を対象とした解析が可能となっている。そのため、河床は図-2.4に示すように、断面内の流水域のみ変化するとして以下の河床位方程式より求める。

$$B_w \frac{\partial (c_b E_b)}{\partial t} + B_w (1 - \lambda) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial Q_{bk}}{\partial x} + B_w w_k (c_{sbe} - c_{sbe}) \right) = 0 \quad (9)$$

河床勾配が安息角以上となった場合、河床材料が非粘着性材料であれば、局所河床勾配が安息角以下となるように河床位を補正する（永瀬ら，1996）。

#### (5) メコン河タンチャウ地区を対象とした1次元解析

図-1.5に解析格子を示す。本1次元解析は、Morpho2Dのチュートリアル用に準備したサンプルデータを用いて行った。Morpho1Dは、一般断面を対象とした解析が可能である。そのため、入力データについて



ては、二次元解析用に準備したデータをそのまま利用可能である。また、出力の一部も平面二次元的な出力が可能である。さらに、解析条件設定画面も2次元強度の係数を除けば、Morpho2Dと同じである。

図-1.6に流速ベクトルの平面分布を示す。1次元解析であるため、メッシュ横断方向の流速はゼロとしているため、流速ベクトルの方向もメッシュの流下方向と一致している。しかし、流速の平面分布の概要は図-1.6により確認可能である。

図-1.7に水位の縦断分布を示す。1次元解析であるにも関わらず、河道内に流水の無い場所が発生している。これは、横断方向の他のメッシュで水が流れているためであり、その断面で流量がゼロになっているわけではない。図-1.8に、水位の平面分布を示す。水位については横断分布を考慮していないため、横断方向に一様な値となっている。なお、図中で青で示されている領域は陸域となっている領域である。

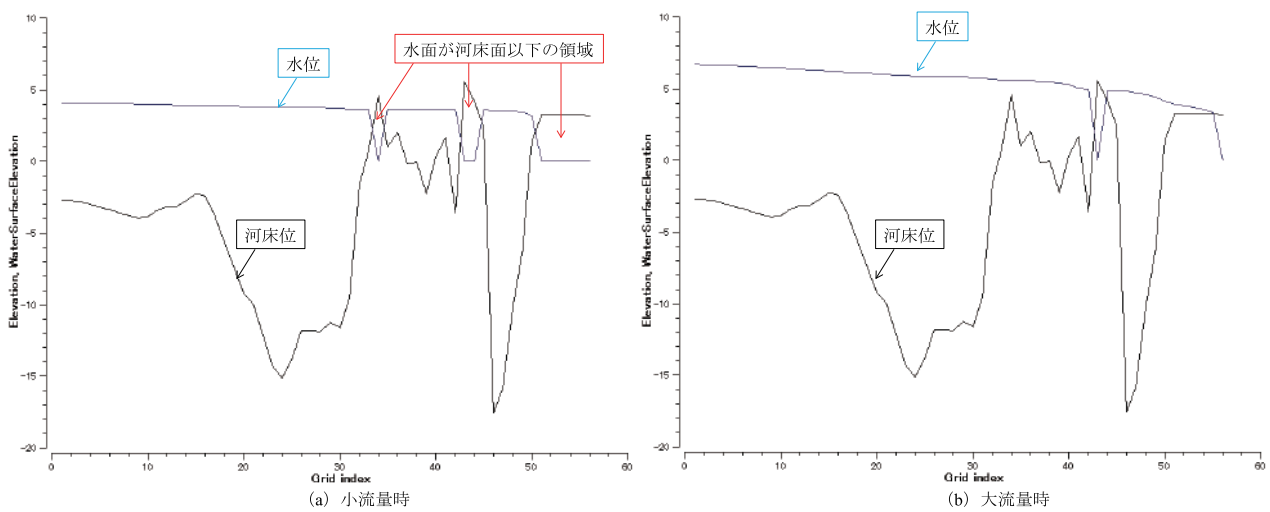


図-1.7 水位及び河床位の縦断分布

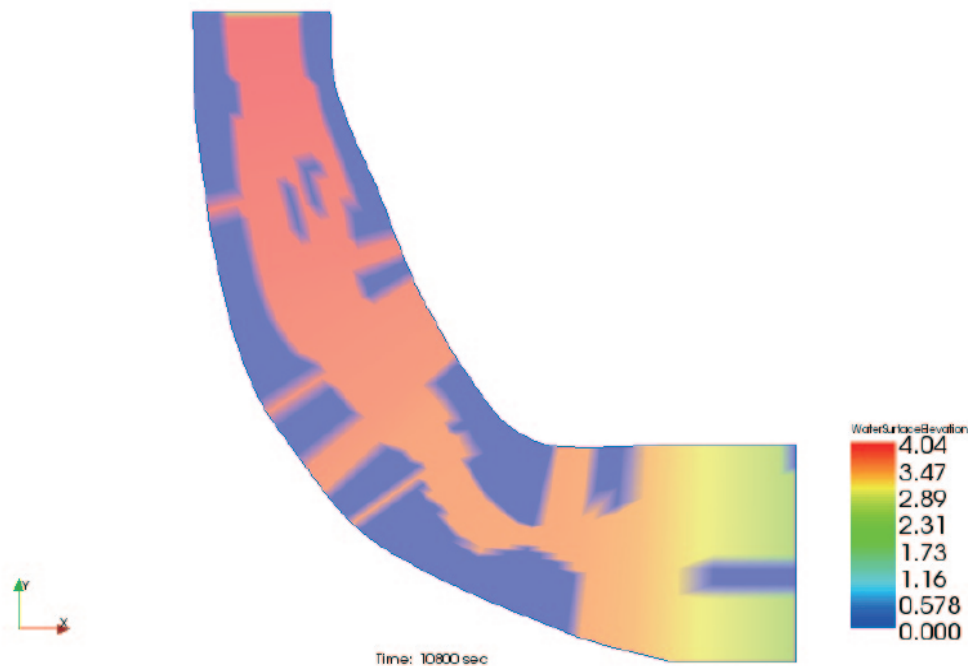


図-1.8 水位の平面分布

## (6) 結論

Morpho2D用の英語マニュアルとチュートリアルの開発について報告するとともに、Morpho1Dの基礎方程式を紹介した。さらに、Morpho1Dをメコン河・タンチャウ地区に適用して解析を行い、iRICの2次元モデルに慣れているユーザーが、比較的容易にMorpho1Dを利用できることと、通常の1次元モデルよりも多くの情報を提供できることを示した。

## 参考文献

- 1) 竹林洋史, 藤田正治: 粘着性・非粘着性土混在場における一般断面による一次元河床変動解析, 砂防学会誌, 第64巻 第2号, pp. 3-14, 2011.
- 2) 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.
- 3) Kovacs, A. and Parker, G. : A new vectorial bed load formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *Journal of Hydraulics and Water Resources*, Vol. 267, pp. 153-183, 1994.
- 4) B. Y. Liu : Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels., 京都大学学位論文, 1991.
- 5) 岩垣雄一: 限界掃流力の流体力学的研究, 土木学会論文集, 第41号, pp.1-21, 1956.
- 6) Egashira, S. and Ashida, K. Unified view of the mechanics of debris flow and bed-load, *Journal of Geotechnical Engineering*, Elsevier, pp. 391-400, 1992.
- 7) Rubey, W. W. : Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *Journal of Geology*, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.
- 8) Lane, E. W. and Kalinske, A. A. : Engineering calculation of suspended sediment, *Journal of Hydraulics*, Vol. 22, 1941.
- 9) 永瀬恭一, 道上正規, 檜谷治: 狭窄部を持つ山地河川の河床変動計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.887-892, 1996.