

## iRICユーザ層拡大に向けてのエンジン及び周辺ツールの整備

北海道大学大学院 工学研究院	木 村 一 郎
京都大学 防災研究所	竹 林 洋 史
北海道大学大学院 工学研究院	岩 崎 理 樹

# iRICユーザー層拡大に向けてのエンジン及び周辺ツールの整備

Development of simulation engines and related tools to extend users of iRIC.

木村 一郎<sup>1</sup>・竹林 洋史<sup>2</sup>・岩崎 理樹<sup>3</sup>

Ichiro KIMURA, Hiroshi TAKEBAYASHI and Toshiki IWASAKI

<sup>1</sup>北海道大学 工学研究院 准教授

<sup>2</sup>京都大学 防災研究所 准教授

<sup>3</sup>北海道大学 工学研究院 博士研究員

## 要 旨

国際的な河川数値解析共通プラットフォームとして認知されつつあるiRICについて、更なるユーザー層の拡大を目指し、エンジン群、およびその周辺ツールの開発・整備を実施した。研究は3名の研究者によって共同研究として実施した。

まず、竹林は、Morpho1DとMorpho2D for Kidsの開発を担当した。Morpho1Dは、一次元の河床変動解析を行うための解析プログラムであり、新たに非定常流の計算コードを導入し、非定常・定常のどちらでも解析ができるように改良を行った。また、iRIC ver.2に対して、Morpho1Dの日本語及び英語のマニュアルを開発するとともに、条件設定のためのxmlファイルの見直しを行った。さらに、小学校高学年以上の児童・生徒が河川の水や土砂の流れについて学ぶためのMorpho2D for Kids作成のための問題点の検討を行うとともに、簡素化した条件設定のためのxmlファイルの新規開発、簡素化した条件設定に対応したソルバーの開発を行った。

一方、岩崎は、二次元ソルバーであるNays2Dについて、さらなる機能の充実を実施した。Nays2DはiRIC-Nays時代からのソルバーで、歴史も古く成熟したソルバーと考えられるが、その分利用ユーザーも多く、その要望は多様化しつつある。これに応えるため、次のような3点について機能の強化を実施している。

- ・混合粒径浮遊砂モデルの導入
- ・二次流の発達・減衰を考慮した二次流モデルの導入
- ・プログラムの並列化による計算効率の向上

最後に、木村は、三次元ソルバーであるNaysCUBEについて、機能向上と改良を実施している。NaysCUBEは、静水圧近似を用いない純然たる3次元モデルという意味ではiRICで唯一のものであり、また、このような三次元ソルバーを有するフリーソフトウェア自体が少ないことから、その使命は大きい。今回の機能強化のポイントは次の4点である。

- ・流木モデルの導入
- ・QUICKスキームの導入
- ・非洗掘セル設定機能の追加
- ・アンダーパス設定機能の追加

《キーワード：iRIC；数値解析；フリーソフトウェア；河川学習ソフトウェア；  
流砂；河床変動；河川乱流》

## 目次

1. 非定常流れの解析を対象としたMorpho1Dの開発とMorpho2D for Kids作成の試み（担当：竹林洋史）
  - (1) Morpho1Dの非定常流れの基礎方程式と解析例
    - a) Morpho1Dの非定常流れの基礎方程式
    - b) Morpho1Dの非定常流れの解析例
  - (2) Morpho1Dの日本語・英語マニュアルの開発
  - (3) Morpho2D for Kids
  - (4) 本章のまとめ
2. 平面二次元ソルバー Nays2Dの機能強化（担当：岩崎理樹）
  - (1) はじめに
  - (2) 混合粒径浮遊砂モデルの導入
    - a) 土砂連続式
    - b) 掃流砂の計算
    - c) 浮遊砂の計算
  - (3) 二次流の発達・減衰を考慮した二次流モデルの導入
    - a) 計算モデル
    - b) 計算条件と計算ケース
    - c) 計算結果
    - d) 計算結果と線形安定解析の比較による数値計算モデルの評価
    - e) まとめ
  - (4) プログラムの並列化による計算効率の向上
    - a) 検討条件
    - b) 結果と考察
    - c) まとめ
  - (5) 本章のまとめ
3. 三次元モデルの機能向上（担当：木村一郎）
  - (1) 概要
  - (2) 流木モデルの追加
    - a) 概要
    - b) モデルの基本コンセプト
    - c) 一般曲線座標における球体群の並行移動，回転移動関係式の誘導と流木移動の計算手順
    - d) NaysCUBEへのモデルの組み込み
    - e) 計算事例
  - (3) その他の機能向上
    - a) QCUIKスキームの追加
    - b) 河床が掘れないセルの設定
    - c) アンダーパスの設定

# 1. 非定常流れの解析を対象としたMorpho1Dの開発とMorpho2D for Kids作成の試み (担当：竹林洋史)

## (1) Morpho1Dの非定常流れの基礎方程式と解析例

### a) Morpho1Dの非定常流れの基礎方程式

前年度（平成24年度）は、定常流れの解析用にMorpho1Dを開発した。そこで、本年度（平成25年度）は非定常流れの解析も可能となるように、Morpho1Dのソースコードを修正した。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。

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。

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

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、 $Q_r$ は本川から氾濫原への横流出流量、 $B_r$ は氾濫原から本川への氾濫流の流入幅、 $g$ は重力加速度、 $I_e$ は本川のエネルギー勾配であり、以下のように Manning 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 Manning の粗度係数、 $R_w (=A/S_w)$ 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 ( $B_w$ ) と潤辺 ( $S_w$ ) は図1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>。

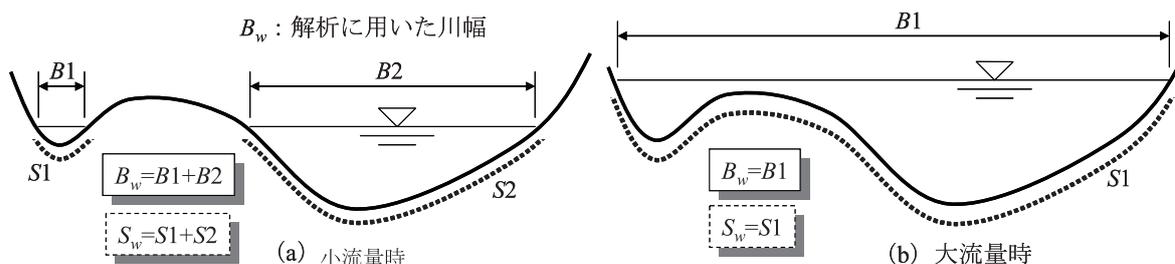


図1 解析に用いた川幅 ( $B_w$ ) と潤辺 ( $S_w$ )

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

$f_{bk}$ と $r_b$ については後述する． $s$ は土砂の水中比重， $\tau_{*k}$ は $k$ 粒径階に対する無次元掃流力である． $\tau_{*ek}$ は $k$ 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>． $\tau_{*cm}$ 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>3)</sup>により算定した． $\tau_{*ek}$ は $k$ 粒径階に対する有効無次元掃流力である<sup>2)</sup>． $u_{*em}$ は有効摩擦速度， $\tau_{*m}$ 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． $K_c$ 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．

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

ここに， $\mu_c$ は静止摩擦係数， $\rho$ は水の比重， $\theta_x$ は流下方向の河床勾配である．本解析は河道横断面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． $f_{bk}$ 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．

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

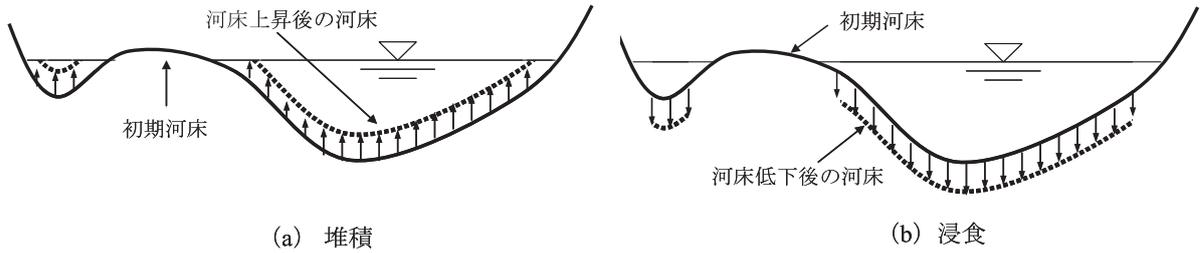


図2 河床変動による河床横断面形状の変化

ここに， $\lambda$ は河床土砂の空隙率， $z_b$ は河床位， $f_{dak}$ は掃流砂層直下の堆積層（遷移層<sup>4)</sup>）における $k$ 粒径階の土砂の存在率， $E_{sd}$ は流砂を全て河床に静止させたときの粘性土層上の非粘性土の厚さ， $E_b$ は掃流砂層の厚さである． $E_{da}$ 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 $m$ 番目の堆積層における $k$ 粒径階の存在率である $f_{dmk}$ は，河床が浸食され，遷移層に変化した後に，式(7)の関係で変化する． $c_b$ は鉛直平均の掃流砂の濃度， $E_{be}$ は平衡掃流砂層厚さである<sup>9)</sup>． $\phi$ は安息角である． $r_b$ は粘性土層上の非粘性土の量に関するパラメータである．浮遊砂の沈降速度( $w_k$ )は，Rubeyの式より求めた<sup>7)</sup>． $\nu$ は動粘性係数， $c_{sbk}$ は $k$ 粒径階の浮遊砂の基準点濃度である． $c_{sbe}$ は基準点高さにおける $k$ 粒径階の平衡浮遊砂濃度である<sup>8)</sup>．

$k$ 粒径階の断面平均浮遊砂濃度( $c_{sk}$ )は，以下の関係より求める．

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

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。

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

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）

表1 解析条件

	流れの基礎式	堰越流状態
Case1	定常流	完全越流
Case2	定常流	潜り越流
Case3	非定常流	完全越流
Case4	非定常流	潜り越流

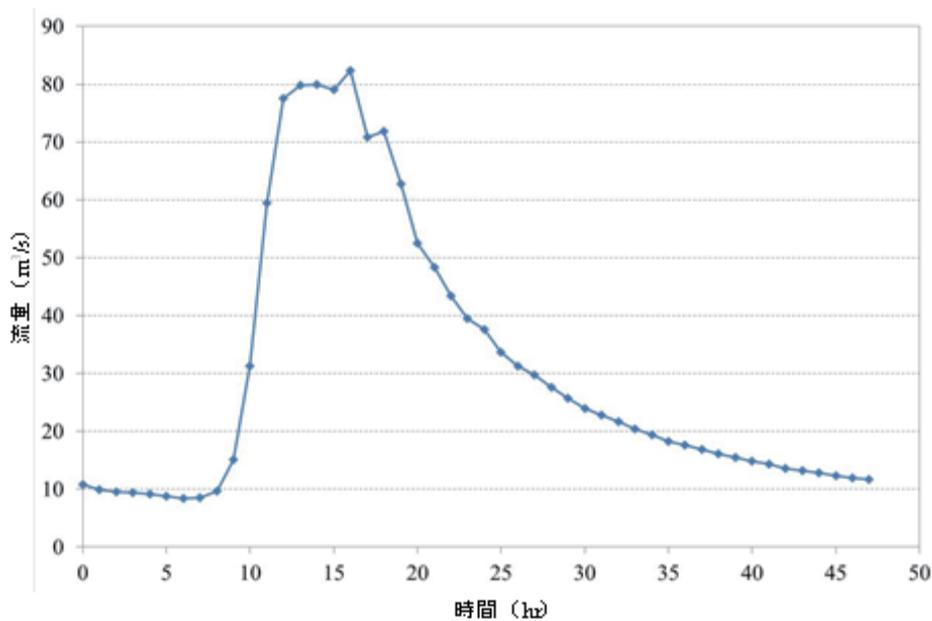


図3 給水流量の時間変化

#### b) Morpho1Dの非定常流れの解析例

##### ・解析条件

解析の対象とした河川は堰を有する河道である。堰付近については、堰の直上流域（1m上流）にも堰と同じ平面形状で解析格子を設定した。

解析条件を表1に示す。Case 1は、流れの基礎方程式として非定常項を無視した定常場の基礎方程式を用いている。下流端水位条件及び上流端供給流量条件は、図3と図4に示している。非定常項を無視しても、各計算時刻において解析区間全体の流量を変化させるため、流量の時間的な変化を考慮した解析も可能である。Case 2は、下流端の境界条件以外はCase 1と同様である。Case 2では、下流端水位として162.5mの一定値を与えており、堰地点における河床高さである161.4mよりも高く設定し、堰地点において潜り越流が形成される条件となっている。Case 3は、Case 1と同一の条件であり、流れの基礎方程式として非定常場の基礎方程式を用いている。Case 4は、Case 2と同一の条件であり、流れの基礎方程式とし

て非定常場の基礎方程式を用いている。

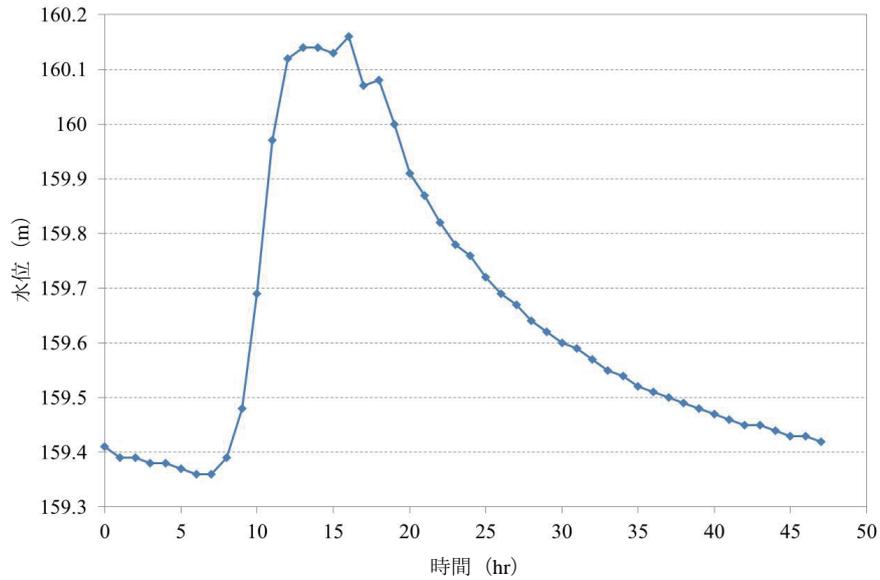


図4 下流端水位の時間変化 (Case 1, Case 3)

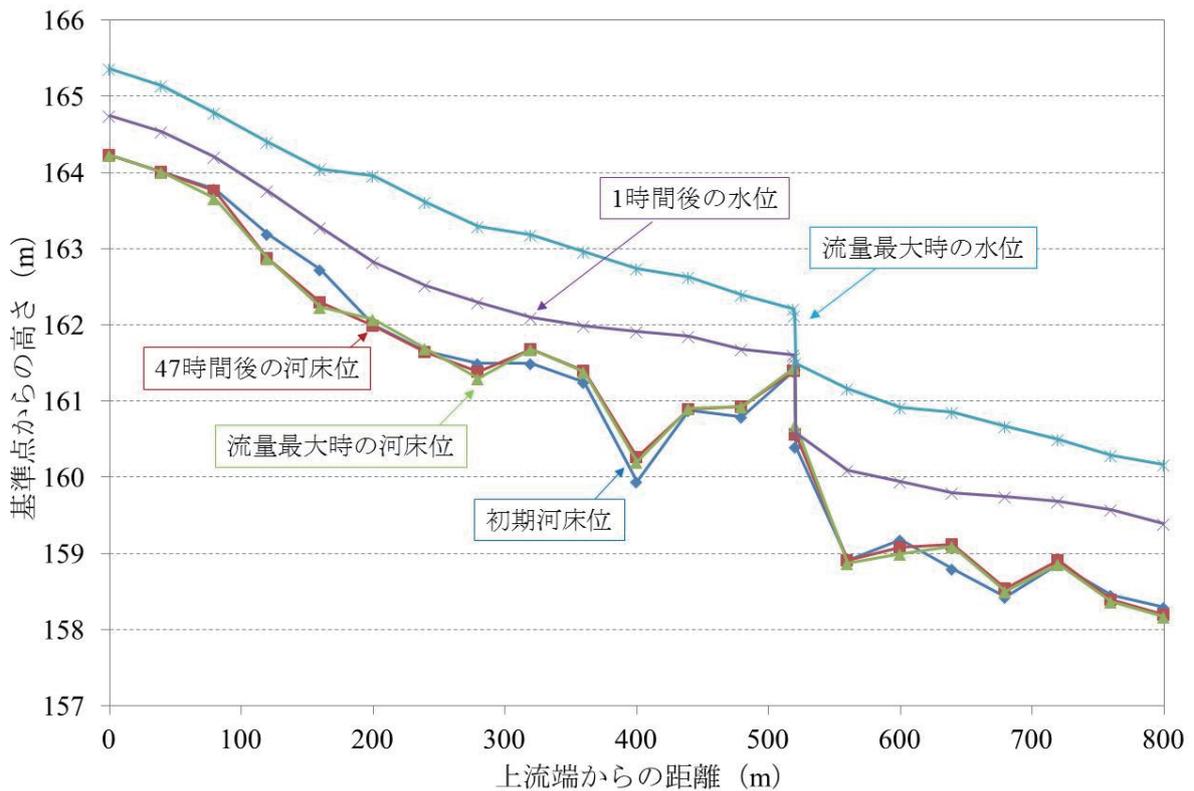


図5 最深河床位と水位の縦断分布 (Case 1)

・結果と考察

図5～図9にCase 1～Case 4の1時間，16時間（ピーク流量時），47時間後の水位と最深河床位の縦断分布を示す。図に示すように，全ての計算条件において，安定した流れ及び河床変動の解析結果が得られていることがわかる。また，Case 1の定常場の基礎方程式による解析結果とCase 3の非定常場の基礎方程

式による解析結果を比較すると、水面形状の大まかな分布特性は両者で大きな違いは無いが、水面形状がCase 3の非定常場の基礎方程式による解析結果の方が滑らかになっていることが分かる。これは、Case 3では、流量の空間的な変化によるスムージング効果などが原因と考えられる。また、河床位の計算結果を見ると、両者の違いは非常に小さいことが分かる。これは、河床変動の時間スケールは、流れの変動時間スケールに比べて非常に長いため、洪水流の伝播（流れの非定常性）の影響が河床の変化に現れにくいためである。また、図6及び図8に示すように、完全越流だけでなく潜り越流の場合の流れ及び河床変動の解析も可能である。これらの結果から、非定常の基礎方程式による解析は、流れの状態をより詳しく知りたい場合、計算区間が長く、上流端と下流端で流量が大きく異なる場合、津波遡上や天然ダムの決壊などの非定常性が非常に大きな場での解析での利用が有効と考えられる。

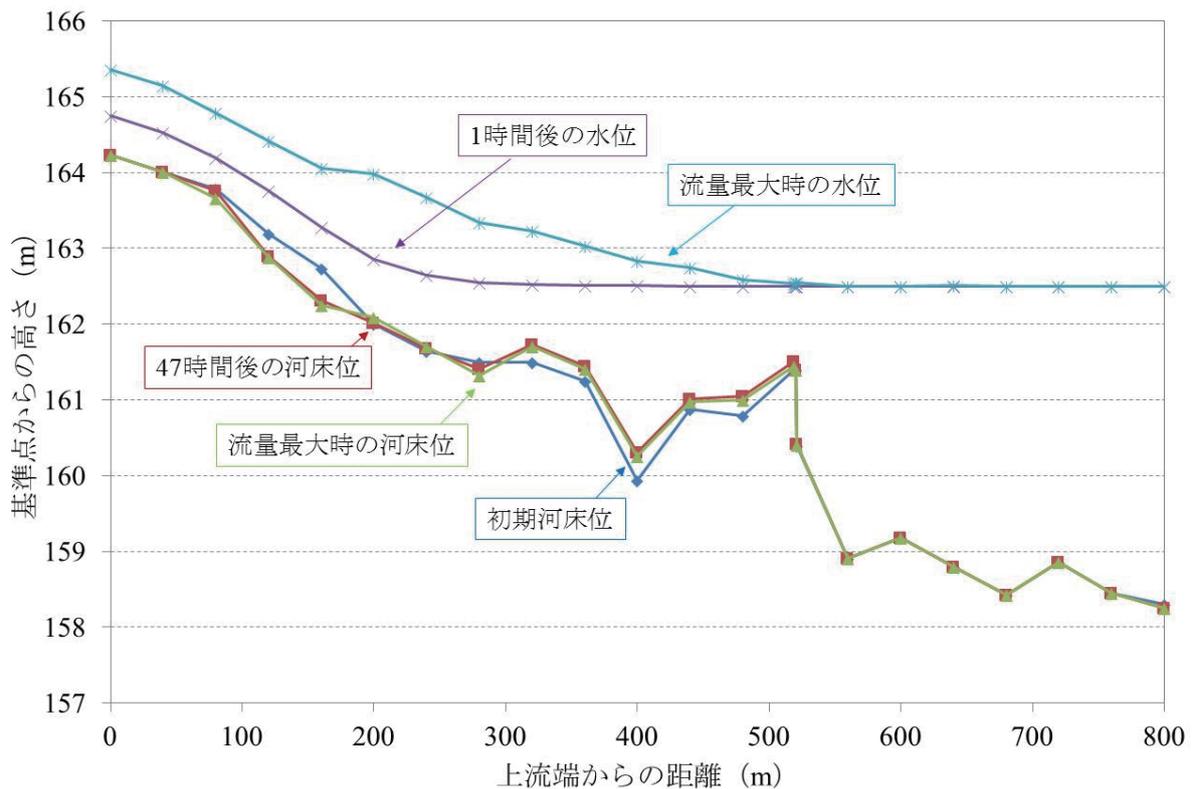


図6 最深河床位と水位の縦断分布 (Case 3)

図9にCase 4の上流端から360mの断面の河床横断形状の時間的な変化を示す。図に示すように、本解析では一般断面形状を対象とした解析を行うとともに、横断方向の格子間隔が不等間隔でも対応可能である。図に示すように、上流端から360mの断面では、時間とともに河道中央部の河床のみが上昇し、河道横断形状が時間的に変化していることが分かる。これは、本解析では、実現象に即して、流水域のみで河床変動を許しているためである。

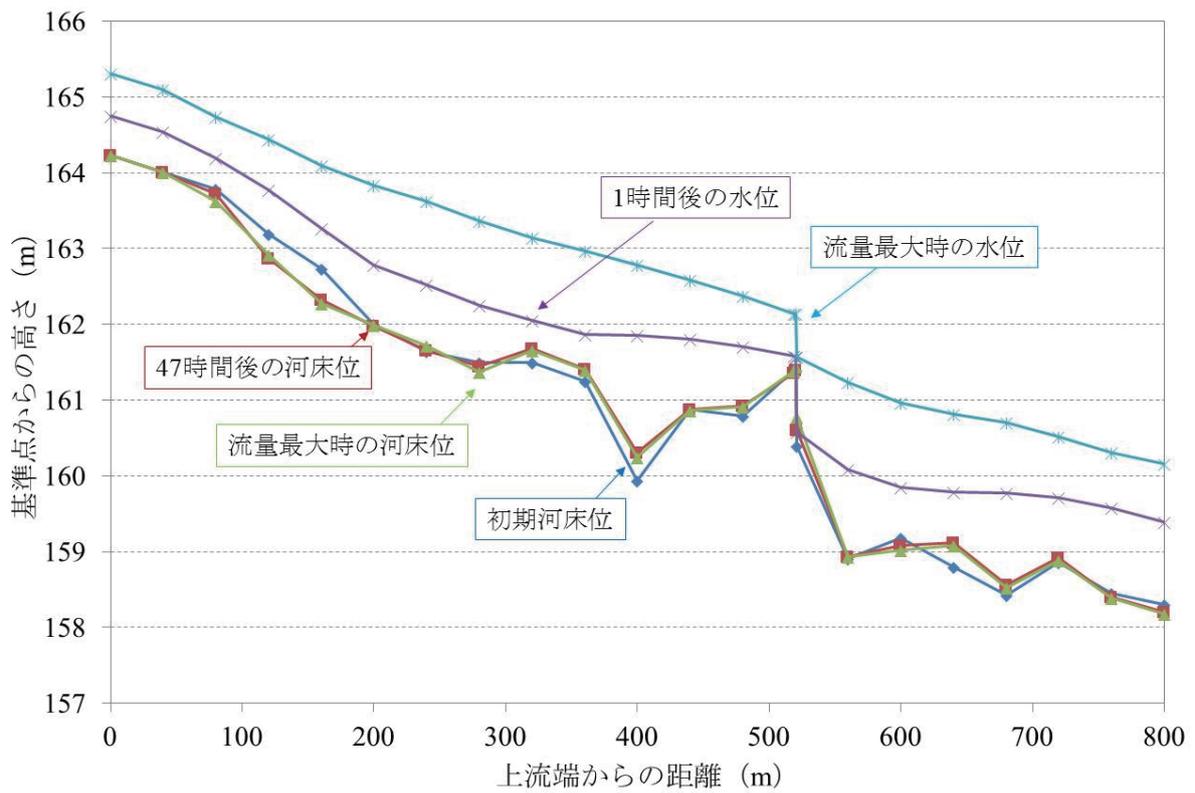


図7 最深河床位と水位の縦断分布 (Case 3)

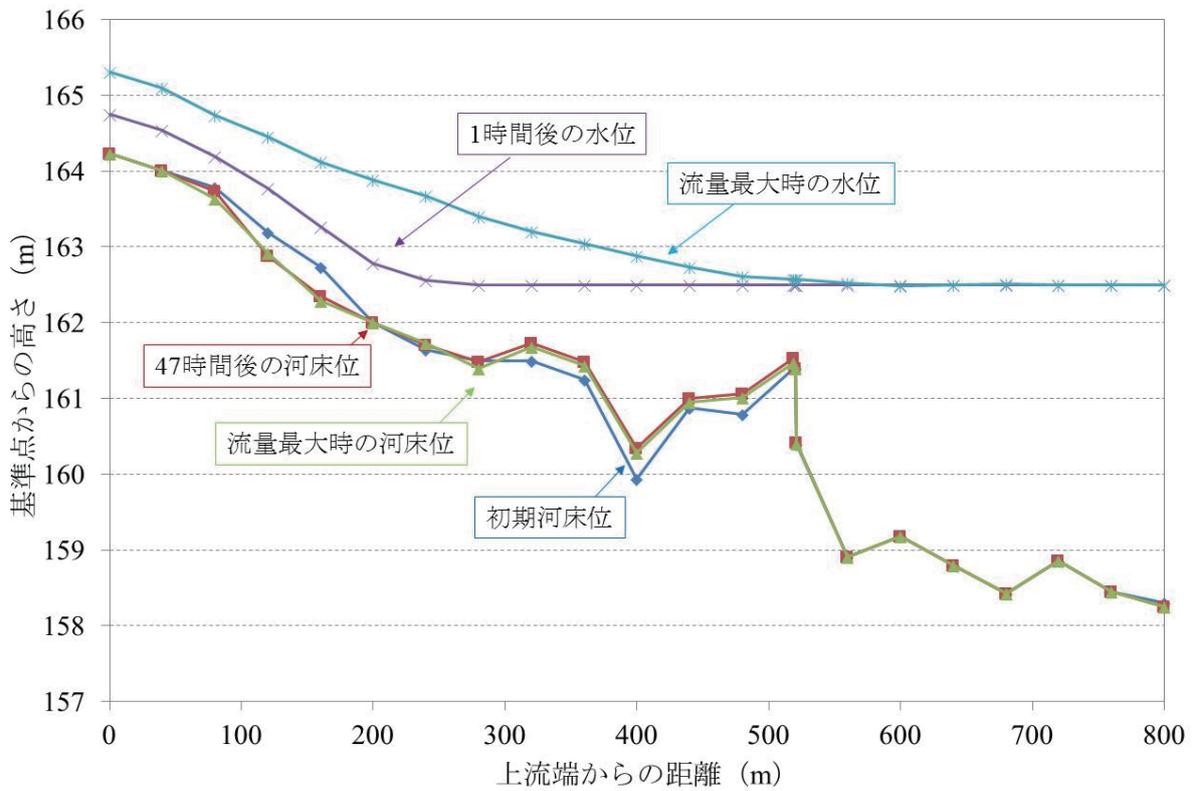


図8 最深河床位と水位の縦断分布 (Case 4)

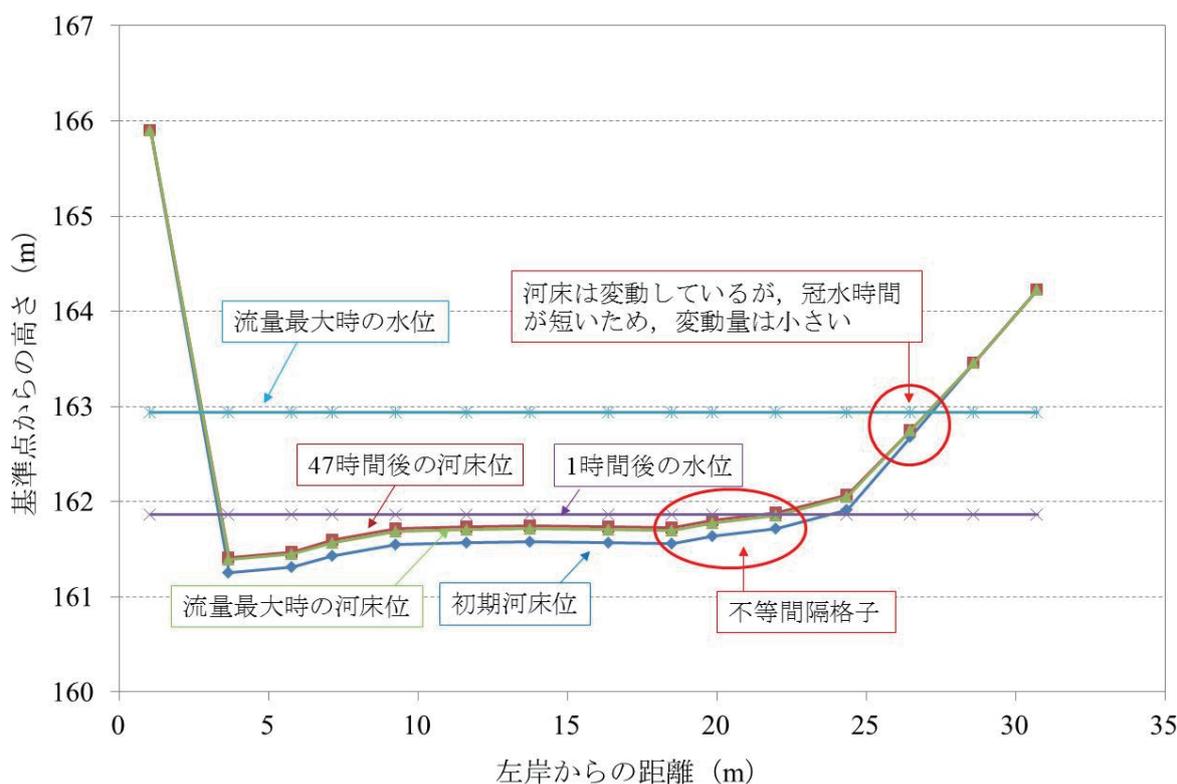


図9 河床横断形状の時間的な変化 (Case 4, 上流から360m断面)

### (2) Morpho1Dの日本語・英語マニュアルの開発

図10に、iRIC ver2用に開発したMorpho1Dの日本語マニュアルを一部抜粋したものを示す。マニュアルは、Morpho2D及び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で記載されている。Morpho1Dの特徴としては、横断形状として一般断面形状の利用が可能、混合砂の取り扱い、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 for Kids

防災・減災対策において、インフラ整備と同様に重要となるのが防災教育である。災害は老若男女等しく襲ってくるものであるから、防災教育についても、なるべく低年齢から施していくことが望ましいといえる。子供たちに対する防災教育としては、書物やビデオ教材等が考えられるが、これらはインタラクティブ性を有しない受動的教材である。一方、小学生高学年以上に対しては、これらの受動的教材に加えて、インタラクティブ性のある教材を与え、自ら手を動かしながら学ぶことが望まれる。河川防災教育についてもこの例にもれず、洪水、土石流、豪雨等について、自ら条件を設定し、その結果を能動的に理解する教材の登場が待たれる。iRICは、これまで専門家の手のものであった河川の数値解析技術の裾野を広げることにある程度成功したが、用語等の制約から、その対象は高校生程度以上と考えるのが適当である。したがって、さらに低年齢の子供たちに対してインタラクティブな教材を提供するには、既往のiRICを低年齢向きに改良した別バージョンで対応せざるを得ないと考えられる。このような目的のための最初の試みとして、Morpho2Dをベースに、Morpho2D for kidsの開発を実施した。

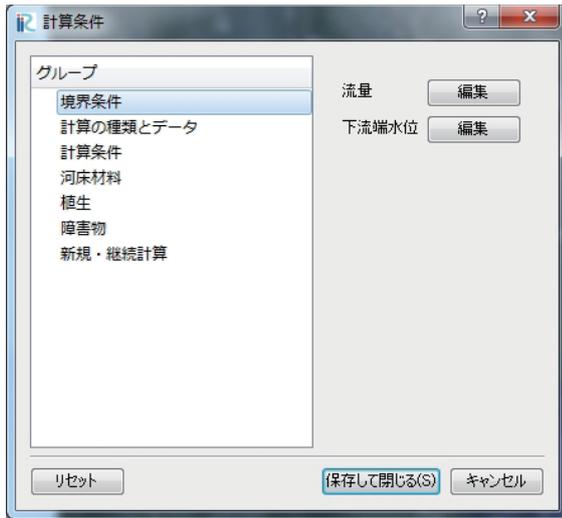
図11に、iRIC ver2用に開発したMorpho2D for Kidsの条件設定画面と通常のMorpho2Dの条件設定画面の比較を示す。従来のMorpho2D条件設定画面と比べて、Morpho2D for Kidsの条件設定画面の大きな違い

は、専門用語をわかりやすい言葉で表現している点と条件設定項目の量が減っている点である。今回は、小学校高学年以上の児童・生徒を対象としているため、簡単な漢字は用いている。小学校低学年も対象とした場合は、全てひらがなでの表記となるが、その場合は小学校高学年・中学生・高校生にとっては読みづらくなると思われ、小学校低学年用のトランスレーションファイルは別途用意する方が良いと思われる。

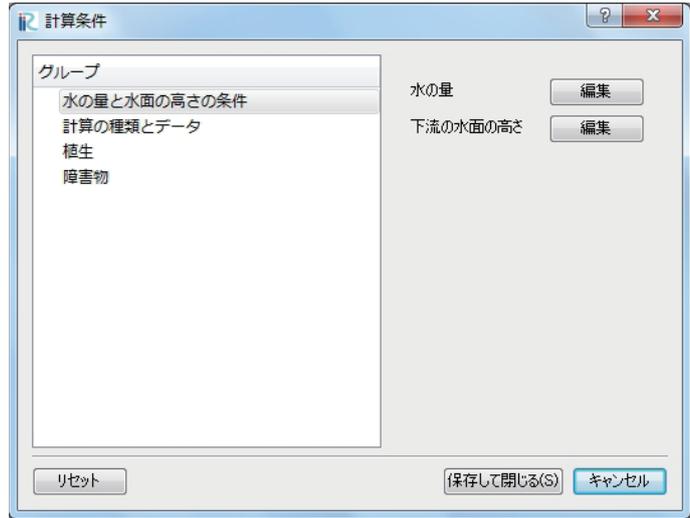
条件設定の簡素化及び基礎的な現象の勉強・理解のため、河床材料は一様粒径のみを対象とした。また、植生や障害物の設定条件は残したが、固定床の設定ウィンドウは削除し、移動床のみの解析を対象とした。さらに、計算途中の状況をコンソールに表示する時間間隔などは、タイムステップの1000倍に固定したり、流れのタイムステップに対する河床変動のタイムステップの比を1で固定したりするなど、容易に条件設定ができ、シンプルな条件で解析ができることを優先した。





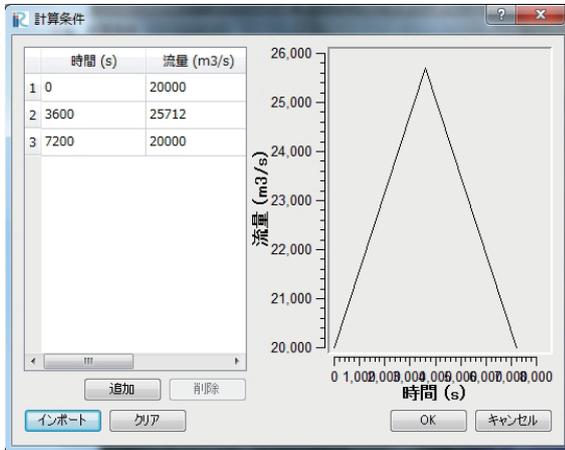


(a-1) Morpho2D

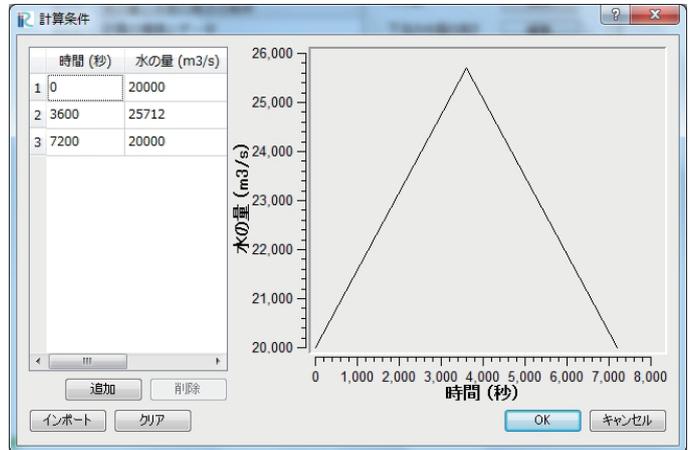


(a-2) Morpho2D for Kids

(a) 境界条件

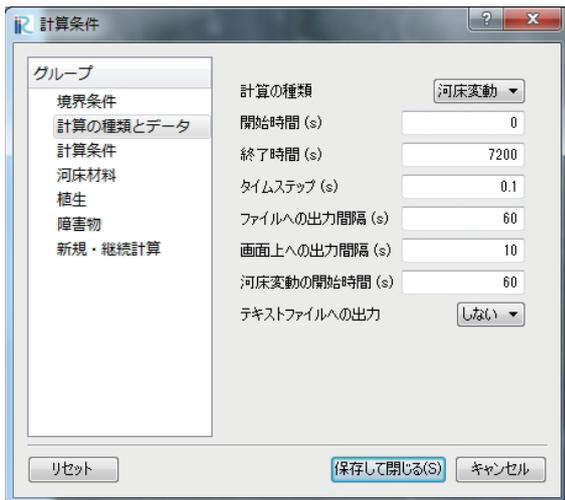


(b-1) Morpho2D

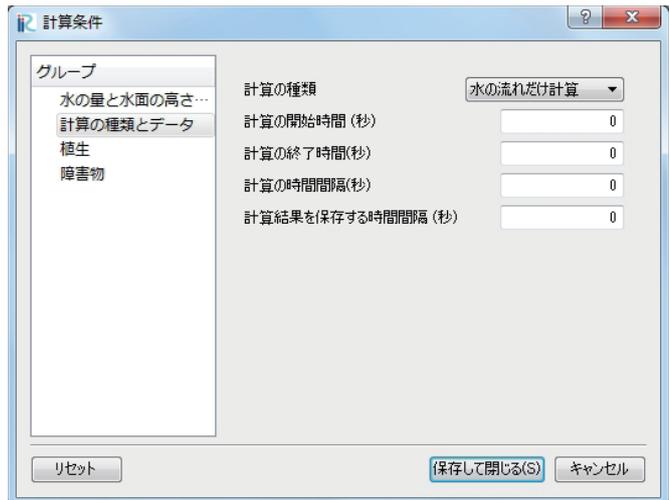


(b-2) Morpho2D for Kids

(b) 流量 (水の量)



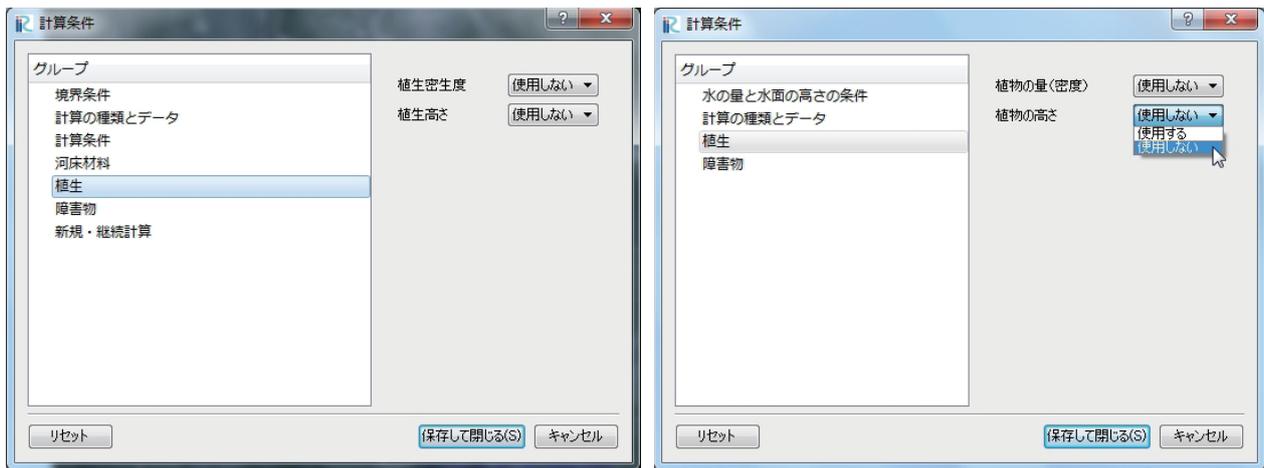
(c-1) Morpho2D



(c-2) Morpho2D for Kids

(c) 計算の種類とデータ

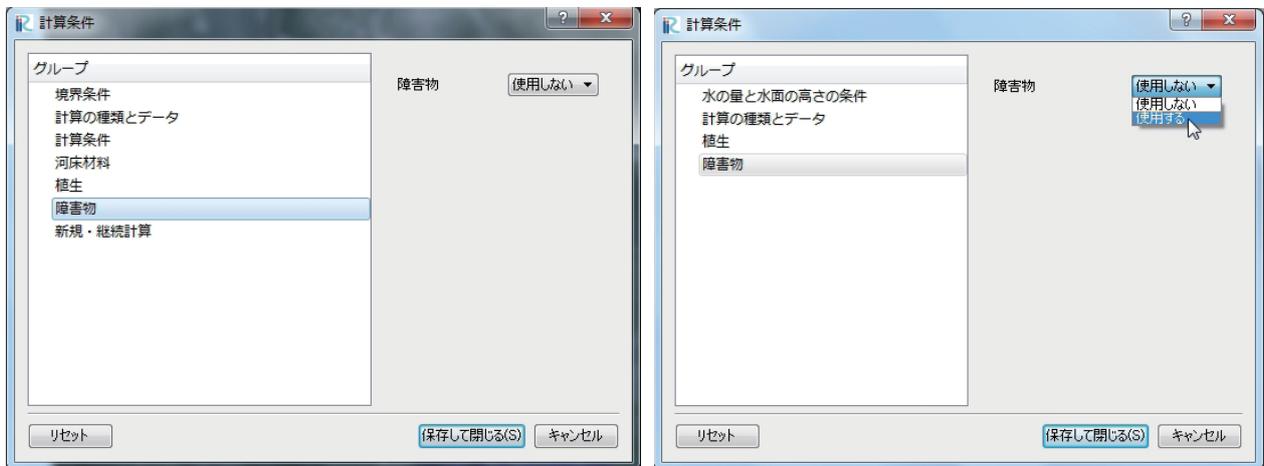
図11 Morpho2D for Kidsの条件設定画面と通常のMorpho2Dの条件設定画面の比較



(d-1) Morpho2D

(d-2) Morpho2D for Kids

(d) 植生



(e-1) Morpho2D

(e-2) Morpho2D for Kids

(e) 障害物

図11 Morpho2D for Kidsの条件設定画面と通常のMorpho2Dの条件設定画面の比較

#### (4) 本章のまとめ

Morpho1Dに非定常流れの計算コードを導入し、非定常・定常のどちらでも解析ができるように改良を行った。また、iRIC ver2に対して、Morpho1Dの日本語及び英語のマニュアルを開発するとともに、条件設定のためのxmlファイルの見直しを行った。さらに、小学校高学年以上の児童・生徒が河川の水や土砂の流れについて学ぶためのMorpho2D for Kids作成のための問題点の検討を行うとともに、簡素化した条件設定のためのxmlファイルの新規開発、簡素化した条件設定に対応したソルバーの開発を行った。

#### 参考文献（第1章分）

- 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, J. Fluid Mech. 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, *Advances in Micromechanics of Granular Materials*, (Edited by H.H.Shen et al.) Elsevier, pp. 391-400, 1992.
- 7) Rubey, W. W.: Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *American J. of Science*, Vol. 25, pp. 325-338, 1933.
- 8) Lane, E. W. and Kalinske, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment,” *Trans. A.G.U.*, 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.