

流れ解析支援のフリーソフト : RIC-Naysの開発

DEVELOPMENT OF RIC-NAYS:
A FREE SOFTWARE FOR SUPPORTING NUMERICAL SIMULATION OF
FLOW, BED DEFORMATION AND BANK EROSION MODEL

宮武治郎¹・清水康行²・江崎國夫³・吉田義一³

Jiro MIYATAKE, Yasuyuki SHIMIZU, Kunio EZAKI and Yoshikazu YOSHIDA

¹正会員 (財) 北海道河川防災研究センター (〒060-0807 北海道札幌市北7条西4丁目5-1伊藤110ビル)

²正会員 工博 北海道大学教授 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-0808 札幌市北区北13条西8丁目)

³非会員 (財) 北海道河川防災研究センター (〒060-0807 北海道札幌市北7条西4丁目5-1伊藤110ビル)

Recently, the hydrology and the hydraulics simulation is required the quality assurance, the accountability and the expansions of use, so there have been many approach to integrate numerical models and common graphical user interface, such as OpenMI in EU, CommonMP in Japan.

However, these approaches are mainly targeting for the hydrological simulation like OHyMoS at Kyoto University in Japan, there are few approaches for the hydraulics simulation.

In this paper, we show our approach to integrate basic function for hydraulics simulation, the RIC-Nays system. The RIC-Nays system is free software which contains three software for supporting pre/post process of the flow simulation, one fortran90 library for applying I/O subroutines to the flow simulation program and one executable program of two-dimensional flow and bed deformation model.

Key Words : numerical model, bed deformation, bank erosion, Nays

1. はじめに

近年, 水理・水工学分野における計算機シミュレーションソフトウェアについて, 品質保証や説明責任の確保, 利用性の拡大などの観点から, 相互利用やグラフィカルユーザーインターフェース実装の取り組みがなされており, 日本ではCommonMP¹⁾, EUではOpenMI²⁾といった統合基盤の開発が推進されている。

しかし, 現状では水文系についてはOHyMoS³⁾などのオープンな取り組みが成されているが, 水理シミュレーションの統合基盤についてはオープンな実装は少ない。

先例としては, デンマークDHI Water & Environment社(デンマーク水理・環境研究所)が開発したMIKE21などの商用ソフトはあるが, 高価であることや, 一般座標系や非構造格子と呼ばれる格子点番号を機械的・規則的に与えることが困難な格子に平面2次元モデルが対応していないこと, また, 統合環境であるOpenMIはデータ交換のためのフレームワークであり, 新たな見地から平面2次元モデルを開発しても, その実装が困難と考えられる現状がある⁴⁾。

本報告では, 水理シミュレーションにおける統合基盤

構築の試みとして開発した, 流れ解析の支援フリーソフトであるRIC-Naysシステムについて報告する。

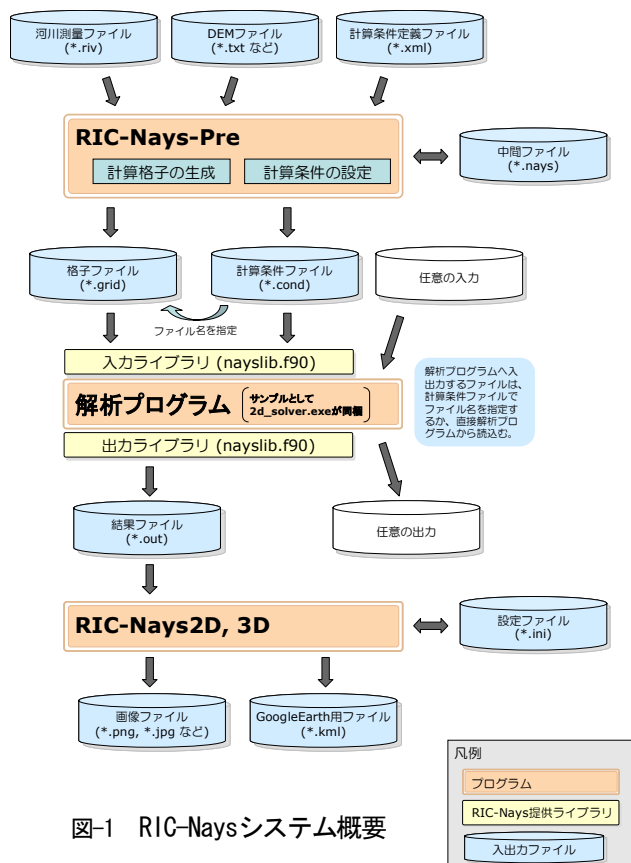
本システムは, 解析プログラムの前処理と後処理をデータの入出力と計算条件設定のGUI化を汎用化させることで支援するソフトウェアおよび2次元平面河床変動プログラムからなり, 無償で教育や研究に自由に利用できるシステムである。

開発段階では, 岩田ら⁵⁾, 橋本ら⁶⁾, 田中ら⁷⁾による氾濫解析や河床変動計算を踏まえた研究で格子生成や計算結果の可視化に利用されていることが報告されている。

2. RIC-Naysシステムの概要

本システム開発にあたり, その目的を以下に定めた。

1. 研究者の解析プログラムの開発における労力の軽減.
2. 将来の水理シミュレーションの統合基盤の推進に向けて, GUIや入出力から解析プログラムを分離.
3. 高価な商用ソフトを利用できない地域の手助けとなるように, フリーソフトとしての提供及び, 日本語以外の言語の実装.



RIC-Naysシステムの概要を図-1に示す。

システムの構成は、流れ解析の前処理（構造格子の生成、計算条件設定のGUI化）を支援するRIC-NaysPre、後処理（解析結果の可視化、可視化内容のデータ書出し）を支援するRIC-Nays2d, 3dとそれらを利用するためのライブラリ（nayslib.f90）、二次元河床変動解析プログラムの実行ファイル（2d_solver.exe）およびサンプルデータ、説明書類からなり、RIC-Naysシステムをインストールすると、即時に教育・研究用に解析が実行できるような構成となっている。

メニューやダイアログ表示については、海外での利用を考慮して日本語、英語、タイ語で実装しており、説明書としては日本語および英語版を提供している。

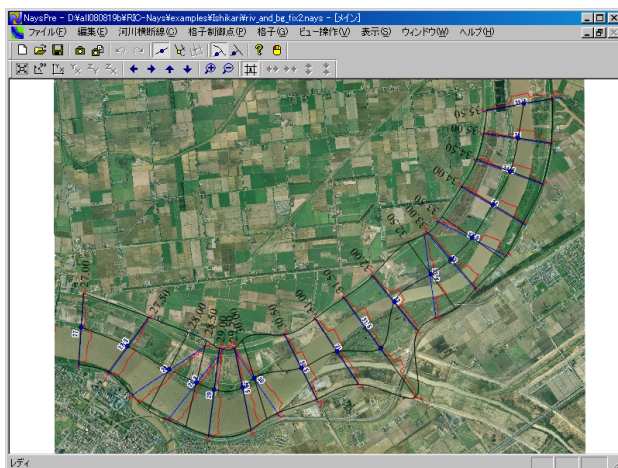


図-2 河川測量データの読み込み・編集画面

稼働環境は、Microsoft Windows2000, XP（32bit版）、およびVista（32bit版）であり、フリーソフトとして以下のURLより自由にダウンロード可能としている。

(<http://i-ric.org/nays/ja/index.html>)

また、RIC-Naysシステムと連携するためのライブラリはFortran90で作成しているため、解析プログラムは同言語で記述する必要がある。

3. 前処理支援（RIC-NaysPreの機能）

解析の前処理支援として、格子の生成を視覚的に確認しながら行えるような格子の生成支援機能及び、解析プログラムの利用拡大を目的とした計算条件設定のGUI化機能を実装した。

これらの機能によって、格子生成の試行にかかる労力や解析プログラム利用者の学習コストを軽減することが可能となると考えられる。

(1) 格子の生成支援機能

河川測量データの読み込み・編集および、格子データの生成・編集機能が可能であり、また、背景画像を読み込むことで、航空写真などと比較しながらの格子の生成作業ができる。（図-2、図-3参照）

生成する格子データは、シングルブロックの境界適合格子であり、x, y, z座標値とセルフラグとして1つの整数値を持つ。また、DEMデータを用いた格子データの標高修正が可能である。

(2) 計算条件の設定支援機能

計算条件の定義をXML言語で作成し、RIC-NaysPreで読み込むことで、GUIを用いた計算条件の設定（ファイルの指定、定数の設定など）を可能とした。

例として、表-1の計算条件定義ファイルをRIC-NaysPreに読み込ませることで図-4に示すようなGUI表示が可能となる。

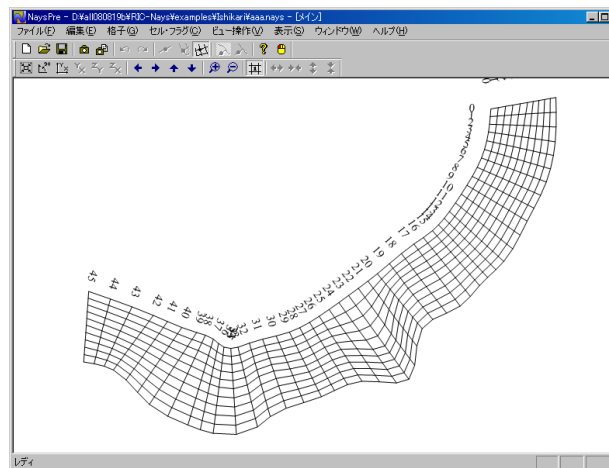


図-3 格子データの生成・編集画面

表-1 計算条件定義ファイル例

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>

<Nays:CalculationConditions
  xmlns:Nays="http://xml.ac.jp"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://xml.ac.jp nays.xsd">

  <group name = "見出し 1">
    <string_parameter name = "計算条件 1a">
      <abstract>string (文字列) ; ファイル名を想定</abstract>
      <file>true</file>
      <default>デフォルト値</default>
    </string_parameter >
    <string_parameter name = "計算条件 1b">
      <abstract>string (文字列) ; ファイル名以外</abstract>
      <file>false</file>
      <default>計算条件定義のサンプル</default>
    </string_parameter >
    <integer_parameter name = "計算条件 2">
      <abstract>integer (整数) </abstract>
      <default>365</default>
      <min>1</min>
      <max>365</max>
    </integer_parameter >
    <real_parameter name = "計算条件 3">
      <abstract>real (実数) </abstract>
      <default>3.1415926</default>
      <min>3.1</min>
      <max>3.2</max>
    </real_parameter >
  </group>
</Nays:CalculationConditions>
```

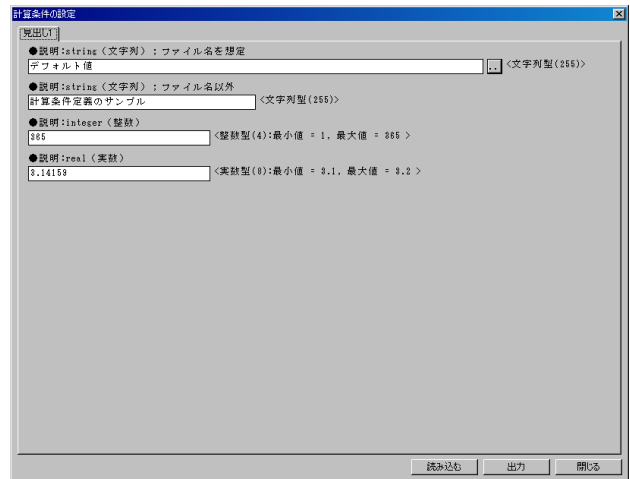


図-4 計算条件定義ファイル例（表-1）のGUI表示

前処理と後処理の支援機能を組み合わせることによって、解析プログラムの検証にあたっての計算結果の検討が迅速に行え、効率的なモデルの開発が行えると考えられる。

(1) 可視化の支援

計算結果について、スカラー量はコンター・面塗りコンター・カラーフリンジ表示（図-5）、ベクトル量はベクトル・流線・パーティクル表示（図-6）が可能である。また、縦断面図、横断面図や特定セルにおけるスカラー量の時間変化も表示できる。図中には示していないが、RIC-NaysPreと同様に背景画像の重ね合わせも可能である。

RIC-Nays2dは二次元平面上での時間変化の可視化に対応し、RIC-Nays3dは三次元平面上での時間変化の可視化に対応する。

4. 後処理支援（RIC-Nays2d, 3dの機能）

解析の後処理支援として、計算結果の諸量を様々な方法で迅速に確認できるような可視化機能及び、それらの可視化結果を論文やプレゼンテーションの素材として利用できるように可視化内容の書き出し機能を実装した。

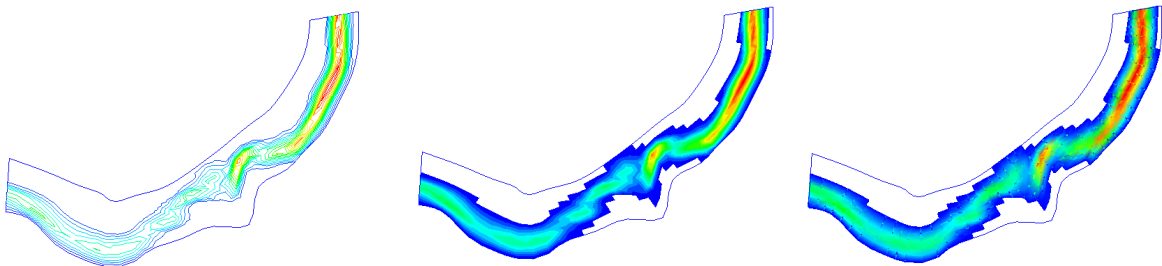


図-5 スカラー量（水深）の可視化表示例：コンター，面塗りコンター，カラーフリンジ

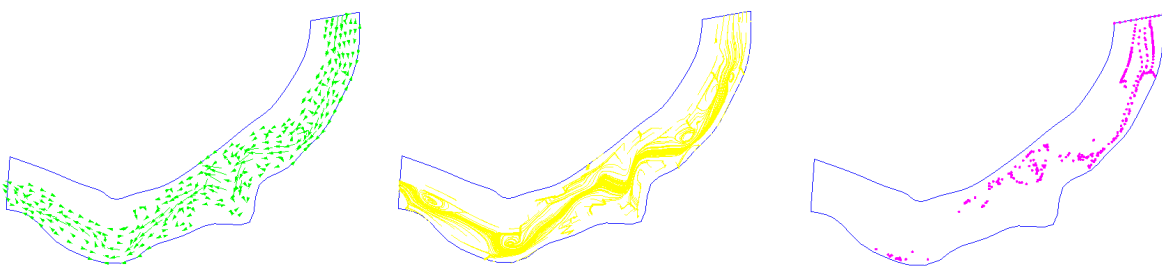


図-6 ベクトル量（速度ベクトル）の可視化表示例：ベクトル，流線，パーティクル

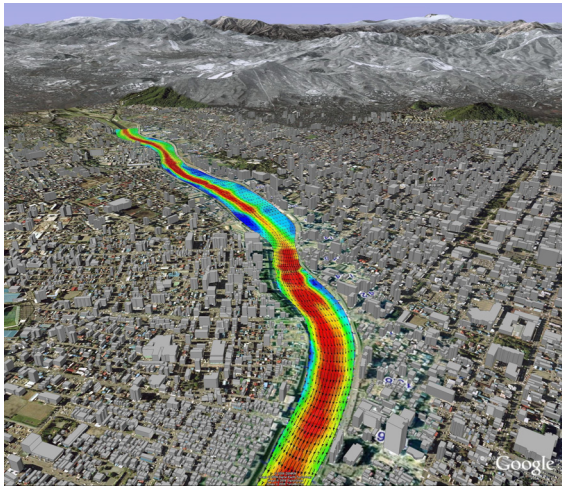


図-7 グーグルアースでの流速表示例

(2) 可視化内容の書き出し

前節の可視化内容を、静止画像 (jpg, png, wmfなど) および連続した計算ステップの画像ファイルとして出力できる。また、画像の連続出力時には、図-7に示すようにGoogleEarthのKMLファイルとして書き出すことが可能である。

KMLファイルは<TimeStamp>タグ機能⁸⁾を用いて書き出すことで、GoogleEarth上での画像のアニメーション表示を可能とした。

5. 連携ライブラリ (nayslib.f90)

数値解析プログラムをRIC-Naysシステムと連携させるために、各種入出力の手続き群 (サブルーチン及び関数) からなるライブラリ (nayslib.f90) を同梱している。

RIC-Naysシステムの利用にあたっては、ライブラリに記載されている手続きを解析プログラムに記述し、ライブラリとリンクさせてコンパイルすることで可能となる。

例えば、表-2に示す格子ファイル読み込みに使用するサブルーチンの利用例を解析プログラムに記述することで、その機能を使用することができる。

ライブラリはFortran90で作成しているため、解析プログラムは同言語で記述する必要がある。

6. 2次元河床変動解析プログラム (2d_solver.exe)

RIC-Naysシステムでは、解析の前処理、後処理支援に加えて、研究や教育目的に利用できるように、著者らによる既往の研究⁹⁾などを基に開発した2次元河床変動解析プログラム (2d_solver.exe) を提供することとした。

この2次元河床変動解析プログラムは、(1)流れ場の計算、(2)流砂量と河床変動の計算、(3)河岸侵食の計算からなり、流れ場のみの計算を行うことも可能である。

各計算段階における特徴と基礎式を示す。

(1) 流れ場の計算の特徴と基礎式

- ・2次元非定常の一般座標で表された浅水流方程式を境界適合型の構造格子上で有限差分法を用いて計算する。
- ・流れは基本的に常流を想定。境界条件として上流端で流量を、下流端で水位を与える。
- ・移流項の計算は、①風上差分、②CIP¹⁰⁾法から選択。
- ・水位の計算は連続式と運動方程式を同時に満たすような陰解法を使用。
- ・乱流モデルは、①渦動粘性係数を一定、②ゼロ方程式モデル、③ $k-\epsilon$ モデルから選択。
- ・河床抵抗(底面摩擦)はManning-Stricklerの抵抗則を使用。
- ・セルフラグを使用することで、固定床や移動床、河床材料や樹木などの様々な状態に対応可能。

表-2 ライブラリのサブルーチンの例 (格子ファイル読み込みに使用するサブルーチン)

サブルーチン名	nayslib_input_grid
機能	格子ファイルを読み込む
利用例	use nayslib call nayslib_input_grid(gridfile, nx, ny, xx, yy, el, hh, iobst, obst, hmin)

変数名	I/O	内容
gridfile	character(*)	読み込む格子ファイル名 (*_grid)
nx	integer(4)	x方向格子点数
ny	integer(4)	y方向格子点数
xx	real(8), dimension(:,:), pointer	格子点のx座標値
yy	real(8), dimension(:,:), pointer	格子点のy座標値
el	real(8), dimension(:,:), pointer	格子点における河床高
hh	real(8), dimension(:,:), pointer	格子点における水位
iobst	integer(4)	障害物セル存在フラグ (=0:無, =1:有)
obst	integer(4), dimension(:,:), pointer	セルフラグ: 2次元配列 (=0:流体, =1:障害物, その他:任意)
hmin	real(8)	最低水深

連続式：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

x, y 方向の運動方程式：

$$\frac{\partial(uh)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho} + D_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(vh)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -hg \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho} + D_y \quad (3)$$

ここで、 x, y ：直交座標、 u, v ：それぞれ x, y 方向の水深平均流速(m/sec)、 t ：時間(sec)、 h ：水深(m)、 H ：水位(m)、 g ：重力加速度(m/sec²)、 ρ ：水の密度(kg/m³)である。 τ_x, τ_y は、それぞれ x, y 方向の河床せん断力(kg/m/sec²)であり、Manningの粗度係数 n を用いて下式で示される。

$$\tau_x = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3}, \quad \tau_y = \frac{\rho g n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^3} \quad (4)$$

また、 D_x, D_y は拡散項を表し、水深平均に関する渦動粘性係数 ν_t (m²/s)を用いて下式で示される。

$$D_x = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \quad (5)$$

$$D_y = \frac{\partial}{\partial x} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \quad (6)$$

上記(1)～(6)式は直交座標で表示しているが、実際の流れ計算には、これを一般座標に変換した式を用いている。

(2) 流砂量計算および河床変動計算の特徴と基礎式

- ・掃流砂のみ、または、掃流砂と浮遊砂の計算を選択。
- ・掃流砂の計算：流線方向は芦田・道上の式¹¹⁾、流線の直交方向は、Engelund¹²⁾による2次流の影響と横断方向の斜面(重力)効果を考慮した長谷川の式¹³⁾を使用。2次流の強度は水深平均流の流線の曲率¹⁴⁾を考慮。
- ・浮遊砂の浮上量は板倉・岸の式¹⁵⁾、浮遊砂の沈降量はRubeyの式を使用。
- ・浮遊砂濃度は鉛直方向に指数分布を仮定。平面分布は浮遊砂に関する平面2次元の移流・拡散方程式を使用

全流砂の連続式：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} + q_{su} - w_f c_b \right) = \frac{q_B}{1-\lambda} \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\mu_s \mu_k \tau_*}} \left(\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} \right) \quad (7)$$

ここで、 z ：河床高(m)、 λ ：空隙率、 q_{su} ：河床からの土砂浮上量(m/s)、 w_f ：土砂の沈降速度(m/s)、 c_b ：基準点浮遊砂濃度、 q_B ：流線方向の掃流砂量(m²/s)、 μ_s ：静止摩

擦係数、 μ_k ：動摩擦係数、 τ_{*c} ：無次元限界掃流力、 τ_* ：無次元掃流力である。 q_{bx}, q_{by} はそれぞれ x, y 方向の単位幅流砂量(m²/s)であり、次式で表される。

$$q_{bx} = q_B \frac{u}{\sqrt{u^2 + v^2}}, \quad q_{by} = q_B \frac{v}{\sqrt{u^2 + v^2}} \quad (8)$$

流線方向の掃流砂量の算出には、芦田・道上の式¹¹⁾を用いる。

$$q_B = 17 \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*} \right) \left(1 - \sqrt{\frac{\tau_{*c}}{\tau_*}} \right) \sqrt{s g d^3} \quad (9)$$

ここで、 s ：砂粒子の水中比重、 g ：重力加速度(cm/sec²)、 d ：砂粒子の粒径(cm)

また、基準点浮遊砂濃度は次式によって求める。

$$c_b = \frac{< c > \beta}{[1 - \exp(-\beta)]} \quad (10)$$

ここで、 $< c >$ ：水深方向平均浮遊砂濃度、 β ： $w_f h / \varepsilon$ 、 ε ： $\kappa u h / 6$ 、 κ ：カルマン定数である。 $< c >$ は次式より算出する。

$$\frac{\partial(< c > h)}{\partial t} + \frac{\partial(u < c > h)}{\partial t} + \frac{\partial(v < c > h)}{\partial t} = q_{su} - w_f c_b \quad (11)$$

また、河床からの土砂浮上量 q_{su} には、次式の板倉・岸の式¹⁵⁾を用いる。

$$q_{su} = K \left(\alpha_* \frac{s g d}{u_*} \Omega - w_f \right) \quad (12)$$

ここで、 K ：0.008、 α_* ：0.14 である¹⁵⁾。 Ω は次式より算出する。

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \frac{\int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_{a'}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_0} - 1 \quad (13)$$

ここで、 B_* ：0.143、 a' ： $B_*/\tau_* - 1/\eta_0$ 、 η_0 ：0.5である¹⁵⁾。なお、土砂の沈降速度 w_f は、以下のRubeyの式によって算出する。

$$w_f = \sqrt{\frac{2}{3} s g d + \left(\frac{6v}{d} \right)^2} - \frac{6v}{d} \quad (14)$$

ここで、 v ：水の動粘性係数(cm²/sec)である。

(3) 河岸侵食の計算の特徴

- ・非粘着性の河岸を対象とし、河岸の斜面角度が水中安息角以上になった場合、その部分が崩落して河岸侵食が進行するとした。
- ・侵食により不規則になった河岸の線形を平滑化できる。
- ・内岸（近傍）の河床の堆積量に応じて、陸地化したと判断して内岸を狭めるかどうかを選択可能とした。
- ・計算においては、著者らの既往研究⁹⁾や関根の手法¹⁶⁾を参考に、土砂の連続性が満たされるような扱いをしている。

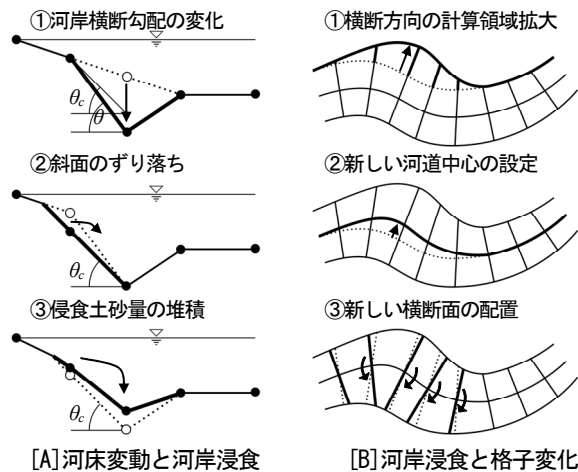


図-8 河岸浸食の模式図

具体的な河岸浸食の計算手順は、図-8[A]に示す通り①河床変動計算の結果、河岸法面の横断勾配 θ が水中安息角 θ_c より急になった場合、②水中安息角を超える部分の土砂が瞬間的に水中安息角まで浸食すると考え、③浸食量に等しい土砂量が法尻に堆積することとする。

法面の浸食が法肩まで達する場合は、図-9[B]に示す通り①河道横断線方向に計算領域を拡大させ、②新しい河岸線の中心を通る新しい河道中心線を設定して、③河道中心線に直交する新しい横断面を配置した後、各横断面をメッシュ分割する。

7. おわりに

(1) まとめ

本報告では、著者らが開発を行っている流れ解析の支援システムRIC-Naysの機能の紹介を行った。

本システムを利用することで、流れ解析プログラムの作成者にとっては、モデル検証時の入出力や格子生成に要する労力を削減でき、また、システムの学習が容易であることから解析プログラムを公開する場合にもその利用拡大に寄与できると考えられる。

また、フリーソフトとして自由に利用でき、2次元河床変動解析プログラムを同梱していることや、可視化機能が豊富であることから、教育やプレゼンテーション目的としても役立つと考えられる。

(2) 今後の課題

本報告の流れ解析の支援ツールとして、RIC-Naysシステムには一通りの機能が実装できたと考えている。今後は、現在も行っているインターネット掲示板による意見交換を行いつつ修正や機能追加を行うと同時に、不足している説明書類や実際の河川への適用例などの整備を行い利用の拡大を図りたい。

また、RIC-Naysシステムで対応できていなかった、有限要素法などで使用される配列が不規則な格子を用いた

モデルにも適用できるように、GUIや操作を見直した新たな支援システムの開発をアメリカ地質調査所(USGS)のMD_SWMS¹⁸⁾開発者と共同で立ち上げることを予定している。

参考文献

- 1) CommonMPウェブサイト: <http://framework.nilim.go.jp/>
- 2) OpenMI Association ウェブサイト: <http://www.openmi.org/>
- 3) 高埴琢馬, 椎葉充晴, 堀 智晴, 立川康人, 市川 温: 流出系の構造的モデル化システムについて, 京都大学防災研究所年報, 第38号, B-2, pp.395-406, 1995.
- 4) 藤田光一, 小路剛志, 吉谷純一: 水理・水文・水質シミュレーションモデル・ソフトウェアの開発戦略に関する調査報告書, 国土技術政策総合研究所資料, 第140号, p.143, 2007.
- 5) 岩田圭佑, 清水康行: 2次元氾濫計算を用いたサモア・アピア市街地の氾濫に関する考察, 水工学論文集, 第52巻, pp.835-840, 2008.
- 6) 橋本尚棋, 安田浩保, 渡邊康玄, 境 茂樹: 米代川における鮎の産卵床となる砂州が融雪出水から受ける影響, 河川技術論文集, 第14巻, o.333/II-99, pp.20-33, 1994.
- 7) 田中林菜, 清水康行: Nays を用いたベトナム紅河の氾濫解析, 土木学会北海道支部 論文報告集, 第64号, 2008.
- 8) KMLホーム: <http://earth.google.co.jp/kml/index.html>
- 9) 清水康行: 河道平面形状の形成における河床・河岸の変動特性の相互関係について, 水工学論文集, 第47巻, pp.643-648, 2003.
- 10) Yabe, T., Ishikawa, T.: A Numerical Cubic-Interpolated Pseudoparticle(CIP) Method without Time Splitting Technique for Hyperbolic Equations, Journal of the Physical Society of Japan, Col.59, No.7, pp.2301-2304, 1990.
- 11) 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, 土木学会論文集, 第206号, pp.59-69, 1972.
- 12) Engelund, F.: Flow and bed topography in channel bends. J. Hyd. Div., ASCE, 100(11), pp.1631-1648., 1974.
- 13) 長谷川和義: 沖積蛇行の平面および河床形状と流れに関する水理学的研究, 北海道大学学位論文, 1983.
- 14) Shimizu, Y. and Itakura, T.: Calculation of flow and bed deformation with a general non-orthogonal coordinate system, Proc. of XXIV IAHR Cong. Madrid, Spain, Vol. C, pp.241-248., 1991.
- 15) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments. Proc. of ASCE, HY8, pp.1325-1343, 1980.
- 16) 関根正人: 側岸浸食機構を考慮した河川の流路変動に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第533号, pp.51-59, 1996.
- 17) 関根正人: 斜面崩落モデルを用いた網状流路の形成過程シミュレーション, 水工学論文集, 第47巻, pp.637-642, 2003.
- 18) Multidimensional Surface-Water Modeling Systemウェブサイト: http://www.brr.cr.usgs.gov/projects/GEOMORPH_Lab/project-MDSWMS.html

(2008. 9. 30受付)