

# 次世代の河川ニーズに対応するiRICエンジンの共同開発

## Corporative Development of iRIC Simulation Engines for Various River Problems in Next Generation

木村 一郎<sup>1</sup>・竹林 洋史<sup>2</sup>・安田 浩保<sup>3</sup>・川村 里実<sup>4</sup>

Ichiro KIMURA, Hiroshi TAKEBAYASHI, Hiroyasu YASUDA and Satomi KAWAMURA

<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> 新潟大学 災害復興科学研究所 准教授

<sup>4</sup> 北海道大学 工学研究院 特任准教授

### 要 旨

次世代の河川ニーズの多様化に対応する河川シミュレーションツール群を昨年度から継続して共同開発する。開発するエンジン群は、優れた汎用プラットフォームとして国際的にも認識されつつあるiRIC上で稼働する形式とし、さらにマニュアルや事例集を整備することにより、河川工学者、研究者などの専門家でなくともこれらのエンジンを用いた河川シミュレーションが容易に行えることを目指す。多様化する河川ニーズに対応するには単一のエンジンでは不可能であり、複数のエンジン群として開発し、これらがプレ・ポスト機能やファイル形式などで共通する特性を有することが望まれ、iRICはまさにこれらの要件を満たすプラットフォームといえる。エンジン群は、二次元モデル、氾濫モデル、鉛直二次元モデル、三次元モデルの4つの異なるスケールと次元を有するものとする。本研究で開発したエンジンのうち、三次元モデル、洪水氾濫モデルについては、2011年12月にiRIC ver.2.0試用版の公開に合わせて日本国内に限定してリリースした。他のモデルについてもほぼ公開できるまでの完成度に到達した。

《キーワード：iRIC；数値シミュレーション；フリーソフトウェア》

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災とそれに伴う想像を絶する巨大津波の発生は、自然災害の破壊エネルギーの恐ろしさと、それに対する人々の無力さを改めて認識させるにあまりある出来事であった。我が国では高度成長期を中心に集中的に治水事業が推進され、河川の安全度は飛躍的に向上した。しかし、それはあくまでも数十年単位の発生規模の災害に対してであり、今回の津波のように、500年～1000年単位の発生頻度の災害については、まったく無防備であることを改めて思い知らされた。この津波に限らず、昨今、「観測史上最大」という降雨の発生が全国規模で目立ち始めている。この背景には地球温暖化による世界的な気象変化があることはほぼ間違いなく、昨今の巨大災害の頻発が決して一時的な地球の気まぐれではなく、将来にわたって継続的なものであると考えざるを得ない。これに加え、河川に対する人々のニーズは、ますます厳しく、かつ多様になることが予想される。これには、流域の特性、さらには我々の社会が一つの曲がり角に来ていることを十分認識する必要がある。すなわち、流域の人口集中と都市化、山間部を中心とした人口減少と過疎化、高齢化の急速な進行など、河川をとりまく情勢は急激に変化しつつある。これに加え、環境問題に対する要求の高まりも忘れてはならない。これらの変化に対応すべく、河川技術者には、異なる現象スケールにまたがる複合的な目的を同時に達成するという新たな技術が求められる。このような多様な目的にかなう河川整備計画を効率的かつ経済的に立案することは容易ではないが、近年の電子計算機の発達に後押しされた包括的なマルチスケール河川解析ツールを開発できれば、トレードオフ問題などの高度化する河川問題解決のために強力なツールとなりえることは想像に難くない。

一方で、これまでコンサルタントなどの専門の技術を有する者の排他的なツールであった数値解析手法を、行政担当者や一般市民などの専門技術を有しない者が自ら取り行い、条件設定から計算結果の可視化までを実行することの必要性が指摘されている。このような目的にかなうためのプラットフォームも国内外で整備されつつある。日米共同で開発を行っている河川汎用解析ソフトウェアiRICプロジェクトもその一つである。このiRICプロジェクトによるソフトウェアは、その国際性、エンジン選択の自由度、ユーザインターフェースの洗練度において、他の追従を許さないアドバンテージを有しており、国際的にもその存在が徐々に、しかし確実に認識されつつある。

本研究では日米共同で開発が進行している河川汎用解析プラットフォームiRICの計算エンジンの開発・整備を、4名の研究者が分担して共同開発を実施するものである。多様な目的に対応すべく、二次元モデル、汎濫モデル、鉛直二次元モデル、三次元モデルの4つの異なるスケールのエンジンの開発を実施する。これらのエンジンは独立したものであると同時に、操作性やパラメータにある程度の統一感を持たせ、一連のエンジン群からなるシステムとしての整備を行った。完成したエンジン群はマニュアル及びチュートリアルを整備し、2012年に正式リリースが予定されているiRIC ver.2用エンジンとして無償公開するための準備を整えた。以下、本研究で開発を行ってきた4つのエンジンについて詳述する。なお、各エンジンの開発は、Morpho2D（二次元モデル）を竹林洋史（京都大学）が、Nays2DFlood（一般曲線座標汎濫モデル）を川村里実（北海道大学）が、NaysFLOOD（四分木型汎濫モデル）を安田浩保（新潟大学）が、NaysCUBE（三次元モデル）およびNaysCLIP（鉛直二次元モデル）を木村一郎（北海道大学）がそれぞれ担当した。

## 2. Morpho2Dのマニュアル・事例集の開発及びチャトムック地区の河床変動解析への応用

### 2.1 Morpho2Dのマニュアル

図-2.1に、iRIC ver2のプレバージョン用に開発したMorpho2Dのマニュアルを一部抜粋したものを示す。マニュアルは、Nays2D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。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。

### 2.2 Morpho2Dのチュートリアル

図-2.2に、iRIC ver2のプレバージョン用に開発したMorpho2Dの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、Nays2D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、石狩川の湾曲を含む領域であり、これまで、Nays2Dで解析を行っていた領域である。

### 2.3 カンボジア国・チャトムック地区の概要と解析条件

図-2.3に対象とした解析領域を示す。対象とした領域は、メコン河、トンレサップ川、バサック川の3川が分合流するチャトムック地区であり、カンボジア国・プノンペン市に位置する。トンレサップ川の水は、10月から5月までは、トンレサップ湖からメコン河へ流れるが、6月から9月は、メコン河からトンレサップ湖へ流れる。そのため、チャトムックでは、季節により流れのパターンや河床変動が大きく異なっている。

表-2.1に解析に用いた水理条件を示す。Case 1と4では、トンレサップ川の流量は $8,000\text{m}^3/\text{s}$ である。これは、トンレサップ川としては最大流量であり、乾期に観測される。Case 2では、トンレサップ川の流量はゼロであり、ちょうど雨期と乾期の間中期である。Case 3とでは、トンレサップ川の流量は $-8,000\text{m}^3/\text{s}$ である。これは、逆流としては最大値であり、雨期に発生する。図-2.4に解析に用いた土砂の初期粒度分布を示す。これらの粒度分布は、現地調査データに基づいて決定している。図-2.4より、メコン河の土砂が粗く、トンレサップ川の土砂が細かいことがわかる。Case 4では、河床材料の粒度の平面分布が河床変動特性に与える影響を明らかにするため、河床材料は一様砂として扱われている。

### 2.4 結果および考察

図-2.5に河床変動量の平面分布を示す。最大の土砂の堆積は、乾期に発生している（図-2.5(a)）。土砂は、バサック川の入口付近と分合流域で広く堆積している。トンレサップ川の流量は $8,000\text{m}^3/\text{s}$ であり、トンレサップ川としては最大流量となっているが、メコン河の最大流量である $36,000\text{m}^3/\text{s}$ と比べると非常に小さい。しかし、トンレサップ川の河床材料がメコン河に比べて非常に小さいため、乾期において、多くの土砂が分合流域に流れ込む結果となっている。粒度分布の変化もこのような土砂の堆積に対応して変化している。図-2.6(c)に示すように、土砂の堆積領域ではトンレサップ川の細かい土砂によって、河床材料が細かくなっている。この結果は、現地調査結果とも一致している。トンレサップ川の流量がゼロの時は（図-2.5(b)）、メコン河の上下流に及ぶ広い領域とバサック川で河床が低下している。特に、メコン河の上流域とバサック川の外岸部での浸食が大きい。そのため、図-2.6(b)に示すように、河床材料は広い領域で粗粒化している。雨期では（図-2.5(c)）、流量がゼロの中間期よりもさらに河床低下傾向が強められている。さらに、トンレサップ川の上流域も河床低下している。図-2.6(c)に示すように、河床材料の粒径は、河床低下領域の多くで粗粒化している。このように、チャトムック地区においては、流れ、河床変動及び粒度等の特性が1年の間に大きく変化していることがわかる。平面二次元解析を用い

れば、このような有用な情報が得られることとなる。

図-2.7は、Case 4における河床変動傾向を示す。本解析では、河床材料は一様砂として扱われている。この結果をCase 1と比較すると、河床変動特性の平面分布が、河床材料の粒度の取り扱いの違いで大きく異なることがわかる。図-2.7より、河床材料を一様砂として扱くと、分合流点付近のトンレサップ川内で大きく河床低下する一方で、合流域での土砂の堆積領域が非常に狭くなっていることがわかる。このように、河床材料の粒度の取り扱いによって河床変動特性は大きく異なることがわかる。特に、河川合流点は異なる二つの河川が合流する領域であり、両河川の河床材料の粒度は一般的に異なるため、混合粒径としての河床材料の取り扱いが重要となる。

## 2.5 本章のまとめ

Morpho2D用の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、Morpho2Dをメコン河・トンレサップ川・バサック川が合流するカンボジア国・チャトムック地区に適用し、流量の異なる3つの条件での河川分合流部の解析を行った。河川分合流部では、河床材料の粒度特性の異なる河川が合流するため、河床材料の粒度特性を考慮した解析の有用性を示した。





図-2.1 iRIC ver2のプレバージョン用に開発したMorpho2Dのマニュアルの一部抜粋



図-2.2 iRIC ver2のプレバージョン用に開発したMorpho2Dのチュートリアルの一部抜粋

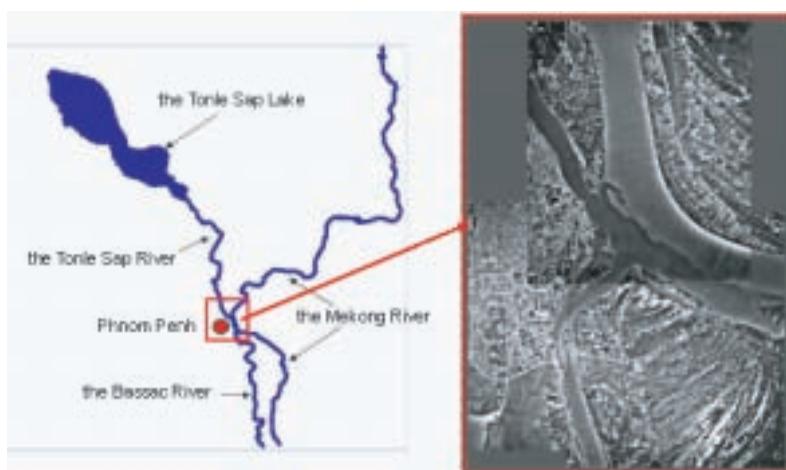


図-2.3 カンボジア国・チャトムック地区

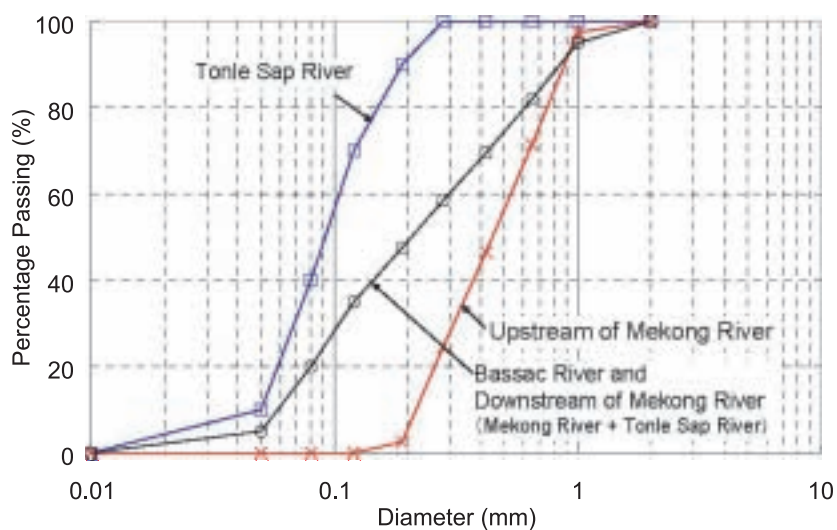
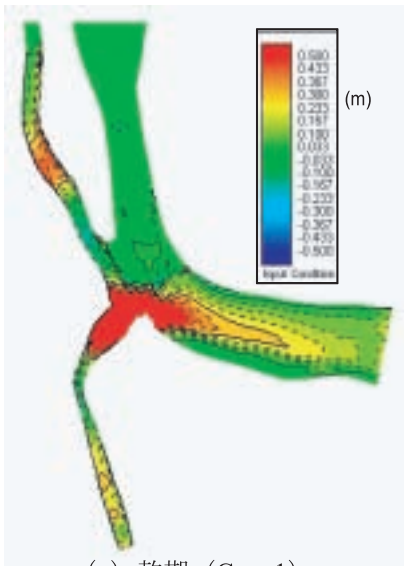


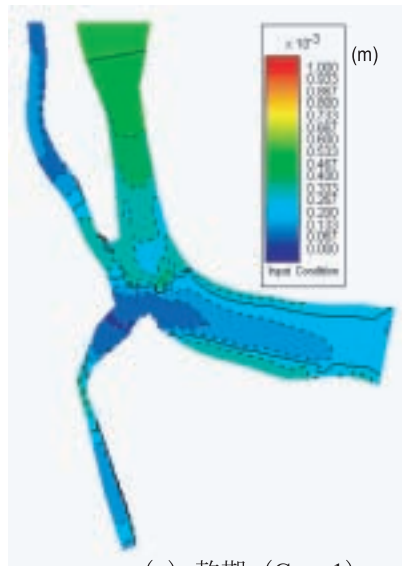
図-2.4 粒度分布

表-2.1 解析に用いた水理条件

	メコン河上流の流量 (m <sup>3</sup> /s)	トンレサップ川の流量 (m <sup>3</sup> /s)	河床材料
Case 1	6000	8000	混合砂
Case 2	20000	0	混合砂
Case 3	36000	-8000	混合砂
Case 4	6000	8000	一様砂



(a) 乾期 (Case 1)



(a) 乾期 (Case 1)

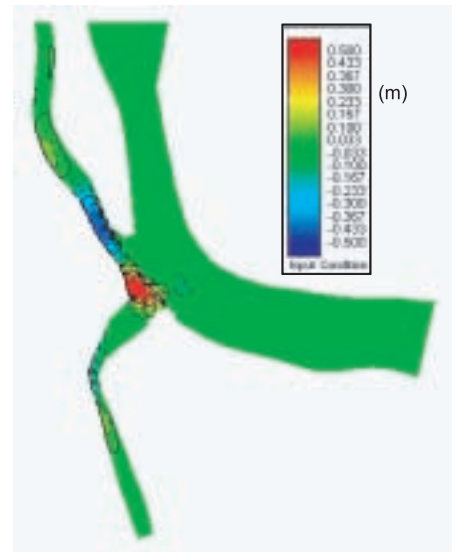
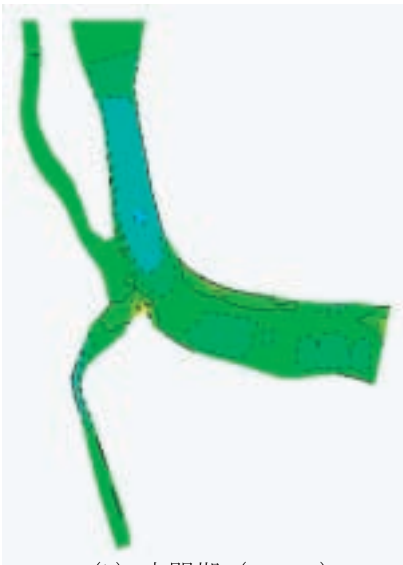


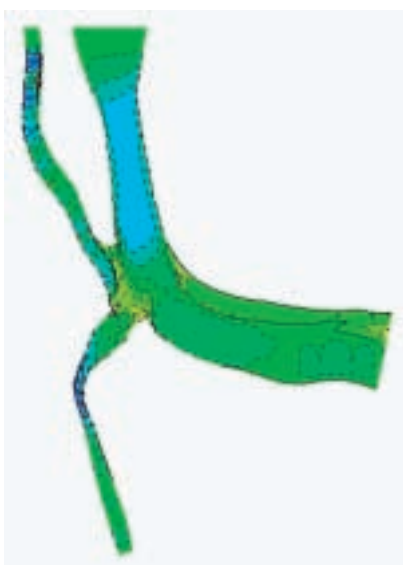
図-2.7 河床変動量の平面分布  
(Case4, 乾期)



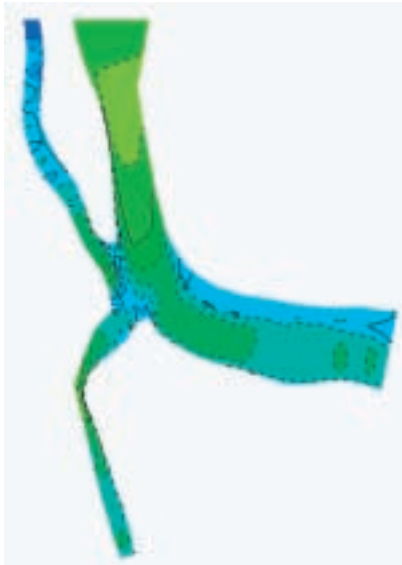
(b) 中間期 (Case 2)



(b) 中間期 (Case 2)



(c) 洪水期 (Case 3)



(c) 洪水期 (Case 3)

図-2.5 河床変動量の平面分布

図-2.6 河床粒径の平面分布

### 3. 平面二次元氾濫流解析モデル (Nays2D-Flood)

#### 3.1 はじめに

近年、計算機の発展と数値解析の技術の向上によって氾濫流の数値的解析が比較的容易に行われるようになってきた。その成果はハザードマップに利用されるなど、社会的にも幅広く活用されている。これらの氾濫流解析モデルに関する研究においては、レーザープロファイラによる氾濫原の地形データと厳密な河道内データを基により精度を高めるための解析手法の追及が盛んに行われている。その一方で、氾濫解析結果だけでなく氾濫解析手法をより広く普及することの重要性も高まりつつある。例えば、発展途上国では、経済発展や人口増加が著しいのに対して治水対策が追い付かず洪水氾濫が経済発展を阻害するケースも少なくないため、氾濫解析結果の提供だけでなく解析技術の普及という観点からの技術協力が望まれている。また、わが国内においても、河道データが精度良く整備されているのは主要な河川のみであり、氾濫想定区域に関して解析が行われているのもこれらの主要な河川のみである。近年、地球温暖化に伴い洪水外力の増加や集中豪雨がより頻発することが予想される中、特に中小河川に対する危険性が懸念されているにも関わらず、膨大な数の中小河川を前に予算的および時間的な制約から測量や氾濫解析が追い付かないでいるのが現状である。そこで本研究では、簡便な氾濫流解析モデルの普及を目的としてシンプルな操作性を重要視した平面二次元氾濫解析モデル (Nays2D-Flood) の構築を行うとともにこのNays2D-FloodをiRICソフトウェアへ搭載した。

#### 3.2 Nays2D-Floodの概要

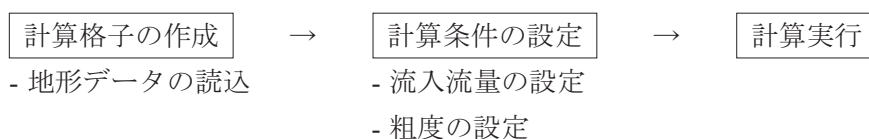
##### (1) Nays2D Floodとは

Nays2d Floodは一般曲線座標で境界適合座標を用いた非定常平面2次元流計算による氾濫流解析用ソルバである。本解析ソルバは北海道大学の清水康行によって開発されたNays2Dソルバ内の平面二次元流計算を氾濫流解析に適用したものである。

上流端および左右側方の任意の複数の箇所からの非定常流量の流入条件を容易に設定でき、中小河川流域における氾濫流解析に適用される。また、河道データを必要としないため、原始河川や発展途上国における氾濫形態の解明などにも適用することが容易となる。

##### (2) 計算モデルの特徴

Nays2d Floodで氾濫流計算を行うために必要なデータは、地形データ、各河川または各流入箇所からの流入流量データおよび粗度データである。氾濫流計算を開始するまでの基本的な手順は以下のとおりとなっている。



また、本モデルでは必要に応じて以下のような点に考慮または設定することが可能である。

- ①座標系は一般曲線座標系を採用しており、複雑な境界や地形を考慮できる。
- ②運動方程式の移流項の差分法は、風上差分法 (1次精度) とCIP法から選択可能である。
- ③上下流端の境界条件については、下流端水位の設定、上流端流速の設定など、さまざまな設定が可能である。
- ④左右の側方境界条件については、流出と流入を選択することができる。流入を選択することにより、複数河川から越水する場合など、複雑な氾濫形態を表現することが可能である。

- ⑤初期水面形は、水深ゼロ、一定勾配から選択可能である。
- ⑥底面の摩擦の評価方法は、マンニングの粗度係数を用いて設定する。マンニングの粗度係数は、計算セル単位で考慮できる。
- ⑦計算領域中の障害物については、計算セル単位で考慮できる。計算セルごとにフラグを設定し、障害物を定義する。これにより、必要に応じて道路・堤防・盛土などの構造物を簡単に計算に取り入れることができる。

### 3.3 基礎式

#### (1) 流れの基礎方程式

##### a) 直交座標系における基礎式

はじめに、一般曲線座標系に変換（写像）する前の直交座標系（ $x, y$ ）における基礎式を以下に示す。

[連続式]

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (1)$$

[運動方程式]

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

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

ただし、

$$\frac{\tau_x}{\rho} = C_f u \sqrt{u^2 + v^2} \quad \frac{\tau_y}{\rho} = C_f v \sqrt{u^2 + v^2} \dots\dots\dots (4)$$

$$D^x = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(uh)}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (5)$$

$$D^y = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \nu_t \frac{\partial(vh)}{\partial y} \right] \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $h$ は水深、 $t$ は時間、 $u$ は $x$ 方向の流速、 $v$ は $y$ 方向の流速、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $\tau_x$ は $x$ 方向の河床せん断力、 $\tau_y$ は $y$ 方向の河床せん断力、 $C_f$ は河床せん断係数、 $\nu_t$ は渦動粘性係数、 $\rho$ は水の密度である。

##### b) 一般曲線座標系への変換

次に、直交座標における平面2次元流れの基礎式を一般座標（ $\xi, \eta$ ）に変換します。一般座標に変換することにより、任意形状（境界条件に沿って）に計算メッシュを設定することが可能である。以下に直交座標系から一般曲線座標系への変換方法を示す。



$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial}{\partial \eta} \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial}{\partial \eta} \dots\dots\dots (8)$$

または,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x & \eta_x \\ \xi_y & \eta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

ただし,

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots\dots\dots (10)$$

同様に,

$$\frac{\partial}{\partial \xi} = \frac{\partial x}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \xi} \frac{\partial}{\partial y} \dots\dots\dots (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial \eta} = \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial \eta} \frac{\partial}{\partial y} \dots\dots\dots (12)$$

または,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

ただし,

$$x_\xi = \frac{\partial x}{\partial \xi}, \quad x_\eta = \frac{\partial x}{\partial \eta}, \quad y_\xi = \frac{\partial y}{\partial \xi}, \quad y_\eta = \frac{\partial y}{\partial \eta} \dots\dots\dots (14)$$

従って,

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial \xi} \\ \frac{\partial}{\partial \eta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x} \begin{pmatrix} \eta_y & -\eta_x \\ -\xi_y & \xi_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (15)$$

ここで,  $J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x$  とすると,

$$\frac{1}{J} \begin{pmatrix} \eta_y & -\eta_x \\ -\xi_y & \xi_x \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_\xi & y_\xi \\ x_\eta & y_\eta \end{pmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

なので,

$$x_\xi = \frac{1}{J} \eta_y, \quad y_\xi = -\frac{1}{J} \eta_x, \quad x_\eta = -\frac{1}{J} \xi_y, \quad y_\eta = \frac{1}{J} \xi_x \quad \dots \quad (17)$$

または,

$$\eta_y = Jx_\xi, \quad \eta_x = -Jy_\xi, \quad \xi_y = -Jx_\eta, \quad \xi_x = Jy_\eta \quad \dots \quad (18)$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = J^2 (x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi) \quad \dots \quad (19)$$

より,

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad \dots \quad (20)$$

流速の  $(\xi, \eta)$  成分を  $(u^\xi, u^\eta)$  とすると,

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v \quad \dots \quad (21)$$

$$u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad \dots \quad (22)$$

または,

$$\begin{pmatrix} u^\xi \\ u^\eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \xi_x & \xi_y \\ \eta_x & \eta_y \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad \dots \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} \eta_y & -\xi_y \\ -\eta_x & \xi_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u^\xi \\ u^\eta \end{pmatrix} \quad \dots \quad (24)$$

### c) 一般曲線座標系における基礎式

直交座標系  $(x, y)$  における基礎式を一般座標系に変換した基礎式を以下に示す.

[連続式]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad \dots \quad (25)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ -g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - C_f \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \\ \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \end{aligned} \quad \dots \quad (26)$$

$$\begin{aligned}
& -g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\
& -C_f \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \dots\dots\dots (27)
\end{aligned}$$

ただし、

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left( \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \dots\dots\dots (28)$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left( \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \dots\dots\dots (29)$$

$$D^\xi = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] \dots\dots\dots (30)$$

$$D^\eta = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] \dots\dots\dots (31)$$

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \dots\dots\dots (32)$$

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \dots\dots\dots (33)$$

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \dots\dots\dots (34)$$

また、一般座標の運動方程式中の拡散項 $D^\xi$ 、 $D^\eta$ については展開すると項の数が膨大になるので、以下のような条件を仮定して簡略化を行う。

- ①メトリック係数の2階微分を局所的にゼロとする。
- ②局所的に擬似直交座標として扱う。

この結果、拡散項は近似的に以下のように表せる。

$$D^\xi \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( v_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( v_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \dots\dots\dots (35)$$

$$D^\eta \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( v_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( v_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \dots\dots\dots (36)$$

ここで、 $\xi_r$ 、 $\eta_r$ は一般座標上の局所的な格子サイズと、実距離の比率を表す係数で、次式で定義される。

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta \tilde{\xi}} = \xi_r, \quad \frac{\Delta \eta}{\Delta \tilde{\eta}} = \eta_r \dots\dots\dots (37)$$

なお、上記 $D^{\xi}$ 、 $D^{\eta}$ の近似式の誘導には局所的な直交関係の仮定より、以下の関係が用いられている。

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = \xi_r^2 (\tilde{\xi}_x^2 + \tilde{\xi}_y^2) = \xi_r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \xi_r^2 \quad \dots\dots\dots (38)$$

$$\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y = \xi_r \eta_r (\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_x + \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_y) = \xi_r \eta_r (-\cos \theta \sin \theta + \cos \theta \sin \theta) = 0 \quad \dots\dots\dots (39)$$

$$\eta_x^2 + \eta_y^2 = \eta_r^2 (\tilde{\eta}_x^2 + \tilde{\eta}_y^2) = \eta_r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \eta_r^2 \quad \dots\dots\dots (40)$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = \xi_r \eta_r (\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_y - \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_x) = \xi_r \eta_r (\sin^2 \theta + \cos \theta \sin \theta) = \xi_r \eta_r \quad \dots\dots\dots (41)$$

ただし、 $\theta$ は $x$ 軸と $\xi$ 軸（または、 $y$ 軸と $\eta$ 軸）のなす角度である。

### (2) 乱流場の計算方法

乱流とは大小さまざまな渦を伴う不規則な流れのことである。Nays2D Floodでは、乱流場の計算方法として、「ゼロ方程式モデル」を採用している。

#### a) ゼロ方程式モデル

渦動粘性係数 $\nu_t$ は、一般的に乱流の代表流速 $v$ と代表長さ $l$ の積で表される。

$$\nu_t = vl \quad \dots\dots\dots (42)$$

水深と粗度が横断方向に緩やかに変化する流れ場においては、水平方向の渦動粘性係数と鉛直方向の渦動粘性係数は同じオーダーであると仮定し、主として底面摩擦速度と水深が運動量輸送を規定すると考え、渦動粘性係数 $\nu_t$ を以下の式で表す。

$$\nu_t = au_*h \quad \dots\dots\dots (43)$$

ここに、 $a$ は比例定数である。

Fisher<sup>1)</sup>やWebel・Schatzmann<sup>2)</sup>の実験によれば、鉛直方向の運動量輸送に関わる $a$ 値が0.07程度であるため、カルマン係数 $\kappa$ (=0.4)を用いて、渦動粘性係数 $\nu_t$ を以下の式で表す。

$$\nu_t = \frac{\kappa}{6} u_* h \quad \dots\dots\dots (44)$$

このモデリングは乱流統計量についての輸送方程式を必要としないのでゼロ方程式モデルと呼ばれている。

### (3) 底面摩擦の計算方法

Nays-2Dでは、底面の摩擦はマンニングの粗度係数を用いて設定する。

(4)式では、河床せん断力 $\tau_x$ 、 $\tau_y$ は河床せん断係数 $C_f$ を用いて示されている。河床せん断係数 $C_f$ とマンニングの粗度係数 $n_m$ は以下の関係にある。

$$C_f = \frac{gn_m^2}{h^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (45)$$

$n_m$ をセル属性を用いて計算セルごとに与えることができる。

### 3.4 計算条件

この章では、Nays-2D Floodソルバーの計算条件について、iRICの計算条件の設定ダイアログを示しながら説明する。

#### (1) 境界条件の名称の説明

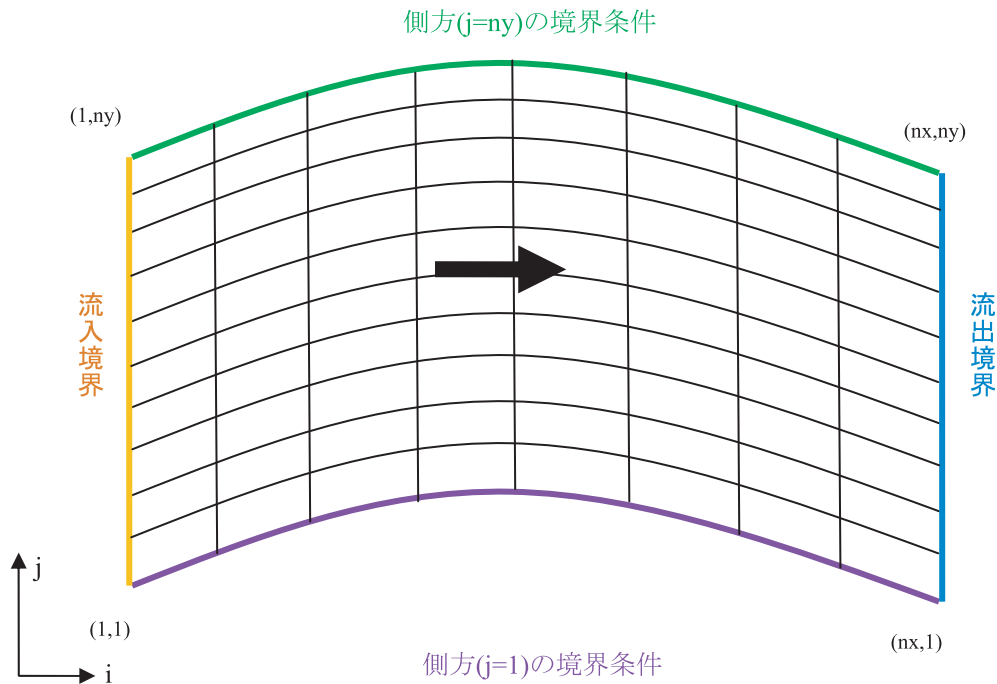


図-3.1 計算格子の模式図

境界条件の設定は、計算格子の4辺それぞれで行う必要がある。

- ・ 流入境界条件とは、計算格子における $(1,1) \sim (1, ny)$ の辺の境界条件のことを表す。  
 $(1,1) \sim (1, ny)$ の辺は必ず流入する地点とする。ここでは、計算に必要な流量を与える。
- ・ 側方 $(j=1)$ の境界条件とは、計算格子における $(1,1) \sim (nx,1)$ の辺の境界条件のことを表す。  
 $(1,1) \sim (nx, 1)$ の辺は、流出または流入を選択することができる。
- ・ 側方 $(j=ny)$ の境界条件とは、計算格子における $(1, ny) \sim (nx, ny)$ の辺の境界条件のことを示す。  
 $(1, ny) \sim (nx, ny)$ の辺は、流出または流入を選択することができる。
- ・ 流出境界条件とは、計算格子における $(nx,1) \sim (nx, ny)$ の辺の境界条件のことを表す。  
 $(nx,1) \sim (nx, ny)$ の辺は必ず流出する地点とする。ここでは、計算に必要な水位を与える。



(2) 流入境界条件の設定

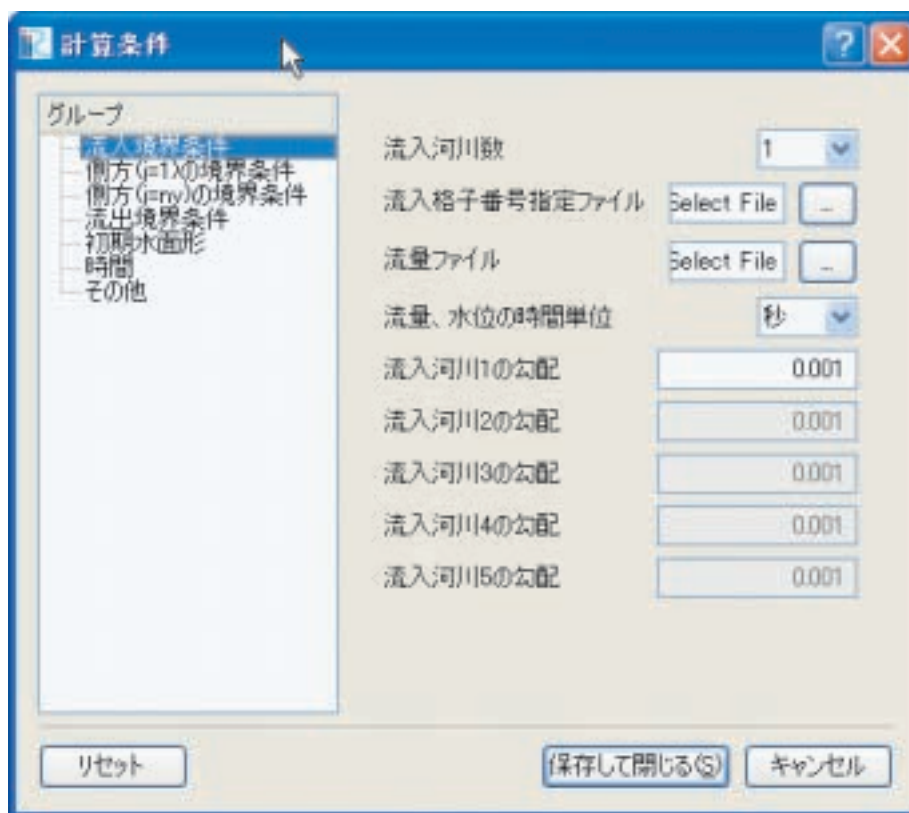


図-3.2 流入境界条件の設定画面

表-3.1 流入境界条件の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	流入河川数	計算格子の(1,1)～(1,ny)の辺に流入する河川の数（もしくは破堤地点の数）を指定します。	最大5河川まで指定できます。
2	流入格子番号指定ファイル	流入地点（もしくは破堤地点の数）の計算格子番号が書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
3	流量ファイル	流入する河川の流量（もしくは破堤流量）の書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
4	流量、水位の時間単位	流量の時間変化、下流端水位の時間変化の時間単位を設定します。「秒」「時間」から選択可能です。	側方の流入量、下流端水位も、ここで設定した時間単位となります。
5	流入河川1～5の勾配	流入する河川1～5の勾配を指定します。	

※流入格子に指定した格子以外は、壁の条件になる。

※壁とは、境界条件から流出入をさせない状態を示す。

(3) 側方 (j=1) の境界条件の設定



図-3.3 側方 (j=1) の境界条件の設定画面

表-3.2 側方 (j=1) の境界条件の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	流入・流出	「壁」・「自由流出」・「流入」から選択します。	
2	流入河川数	「流入」を選択した場合に入力可能です。(1,1)~(nx,1)に流入する河川の数(もしくは破堤地点の数)を指定します。	最大5河川まで指定できます。
3	流入格子番号指定ファイル	流入地点(もしくは破堤地点の数)の計算格子番号が書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
4	流量ファイル	流入する河川の流量(もしくは破堤流量)の書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
5	流入河川1~5の勾配	流入する河川1~5の勾配を指定します。	

※流入格子を選択した場合、流入格子に指定した格子以外は、壁の条件になる。

※壁とは、境界条件から流出入をさせない状態を示す。

(4) 側方 (j=ny) の境界条件の設定

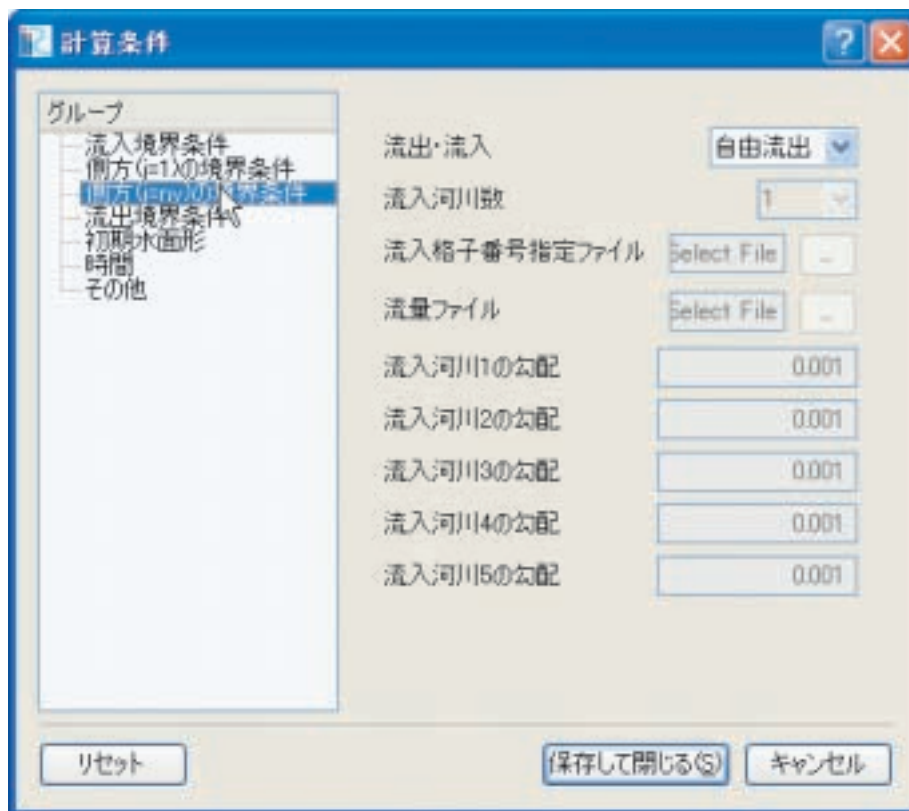


図-3.4 側方 (j=ny) の境界条件の設定画面

表-3.3 側方 (j=ny) の境界条件の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	流入・流出	「壁」・「自由流出」・「流入」から選択します。	
2	流入河川数	「流入」を選択した場合に入力可能です。(1,ny)~(nx,ny)に流入する河川の数(もしくは破堤地点の数)を指定します。	最大5河川まで指定できます。
3	流入格子番号指定ファイル	流入地点(もしくは破堤地点の数)の計算格子番号が書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
4	流量ファイル	流入する河川の流量(もしくは破堤流量)の書かれたファイルを指定します。	データフォーマットは、「IV章 入出力ファイル」に記載します。
5	流入河川1~5の勾配	流入する河川1~5の勾配を指定します。	

※流入格子を選択した場合、流入格子に指定した格子以外は、壁の条件になる。

※壁とは、境界条件から流出入をさせない状態を示す。

(5) 流出境界条件の設定

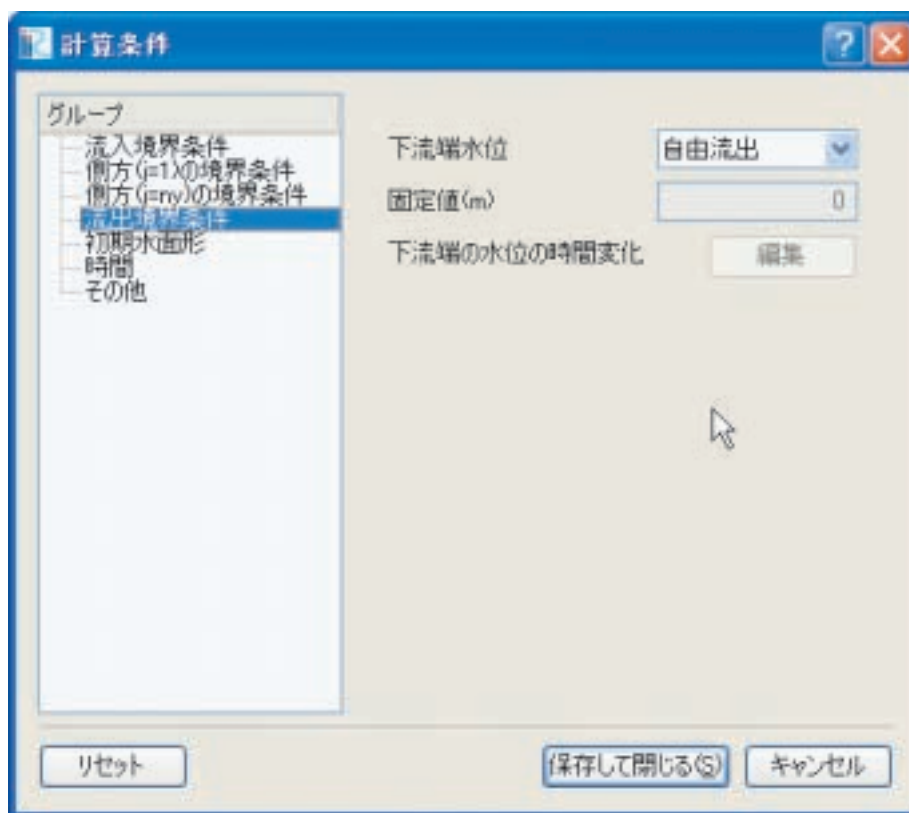


図-3.5 流出境界条件の設定画面

表-3.4 流出境界条件の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	下流端水位	下流端水位を設定します。「固定値」、「ファイルから読む」、「自由流出」から選択可能です。	
2	固定値 (m)	下流端水位において「固定値」を選択した場合に、入力します。	
3	下流端水位の時間変化	下流端水位において「ファイルから読む」を選択した場合に入力します。	「水位」の列に水位 (m) を入力します。 「時間」の列は、流量ファイルの時間の列と一致するようにします。

※自由流出とは、境界条件の1つ内側の計算格子における計算結果を、境界条件として与えることを示す。

(6) 初期水面形の設定

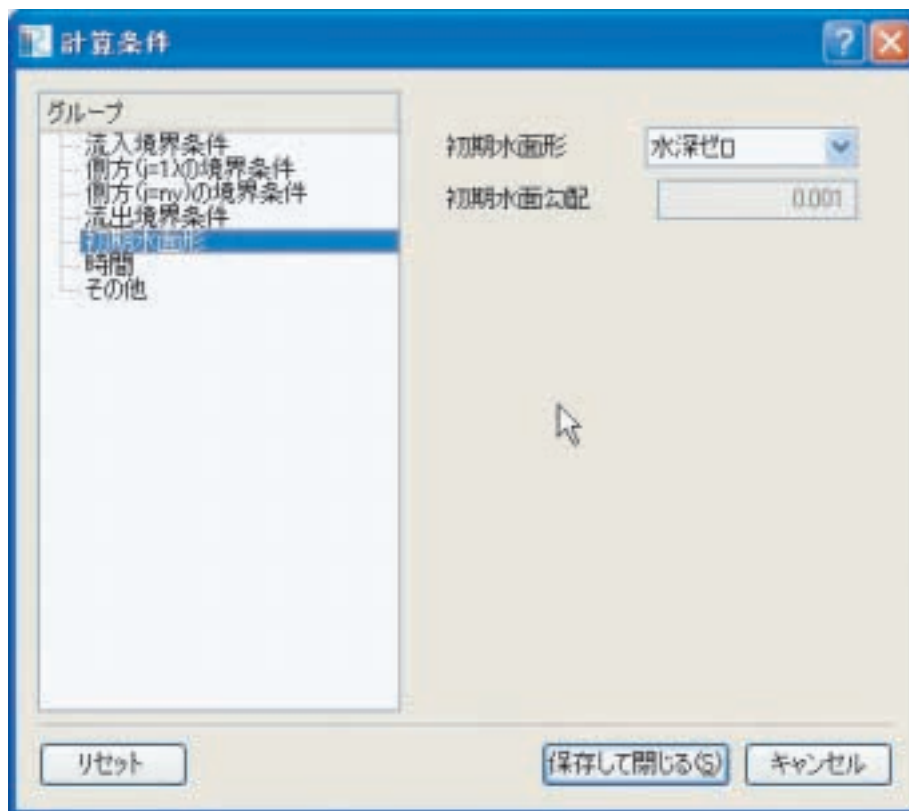


図-3.6 初期水面形の設定画面

表-3.5 初期水面形の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	初期水面形	初期水面形の設定方法を選択します。 「一定勾配（直線）」「水深ゼロ」から選択可能です。	
2	初期水面勾配	初期水面形において「一定勾配（直線）」を選択した場合に入力可能です。 水面は、下流端水位を起点に一定勾配で設定されます。	勾配をゼロとすることで、水平面の設定も可能です。 地盤高が設定した初期水面形より高い地点は、水深ゼロとなります。



### (7) 時間に関する条件の設定

時間に関する各種条件を設定する。

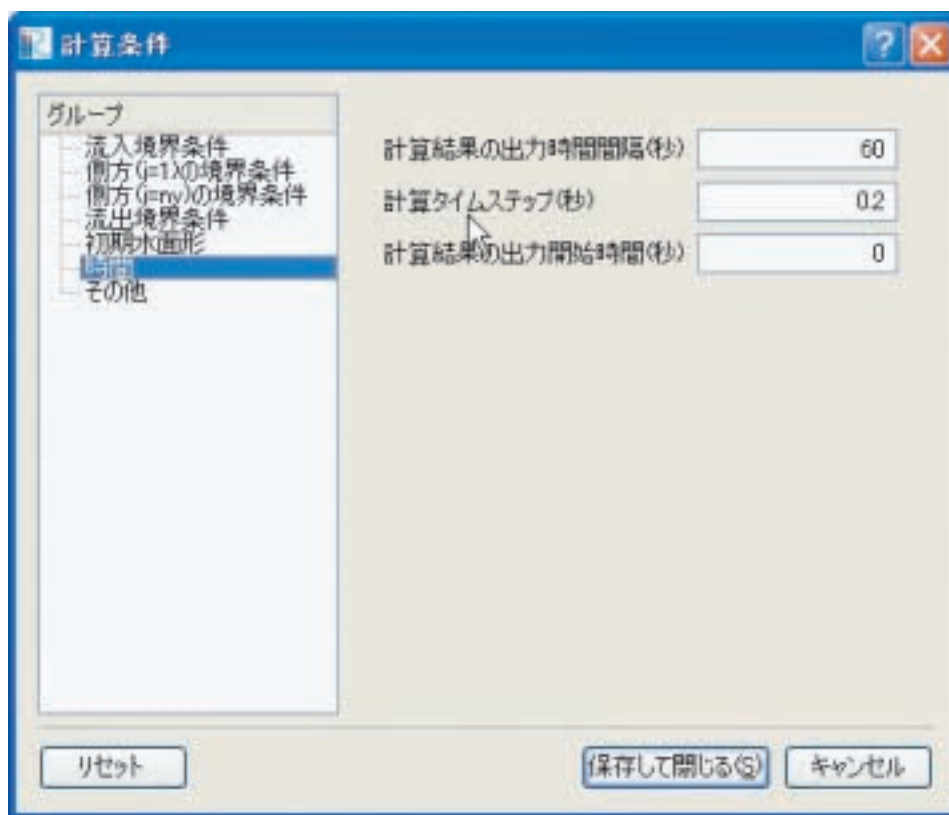


図-3.7 時間の設定画面

表-3.6 時間の設定の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	計算結果の出力時間間隔 (秒)	計算結果を出力する時間間隔を設定します。	
2	計算タイムステップ (秒)	計算ステップの時間間隔を設定します。	計算の効率と安定性を決定づける重要なパラメータです。
3	計算結果の出力開始時間 (秒)	計算結果の出力を開始する時間を設定します。	

(8) その他の設定



図-3.8 その他の情報の設定画面

表-3.7 その他の情報の説明

#	項目	設定方法	注意事項
1	移流項の差分方法	移流項の差分方法を設定します。「風上差分法」「CIP法」 <sup>3)</sup> から選択可能です	

### (9) 粗度係数の設定

粗度係数は、計算セルごとに設定する。計算格子を作成した後、オブジェクトブラウザの「セルの属性」から「粗度」をチェックする。

計算セルを選択し、右クリックから「粗度 編集ダイアログ」を立ち上げ、設定したい粗度係数を入力する。

デフォルト値は0.03（マニングの粗度係数）となっています。はん濫原の土地利用状況に合せ、粗度を設定する。

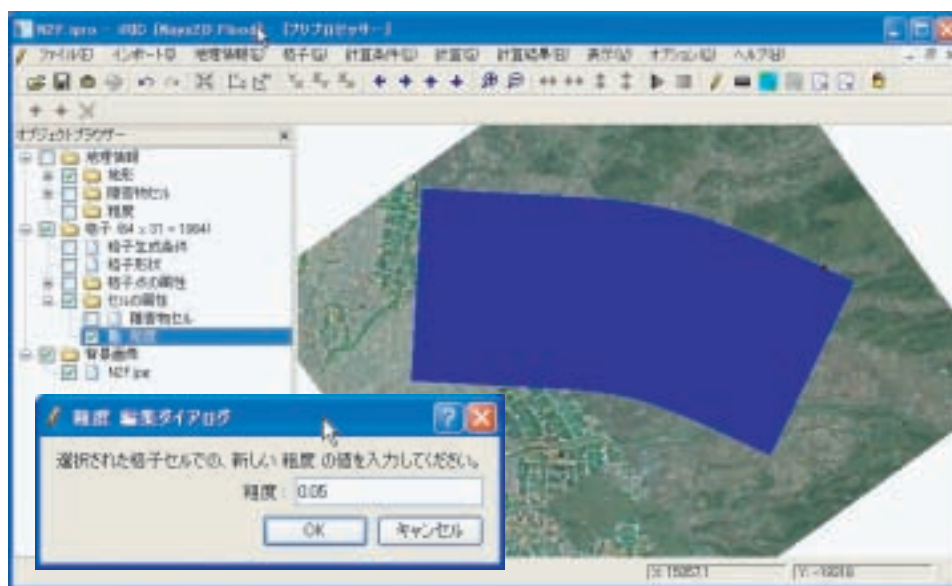


図-3.9 粗度係数の設定画面

### (10) 障害物の設定

必要に応じて、道路・堤防・盛土などを障害物として設定することができる。計算格子を作成した後、オブジェクトブラウザの「セルの属性」から「障害物セル」をチェックする。

計算セルを選択し、右クリックから「障害物セル 編集ダイアログ」を立ち上げ、「障害物セル」を入力する。

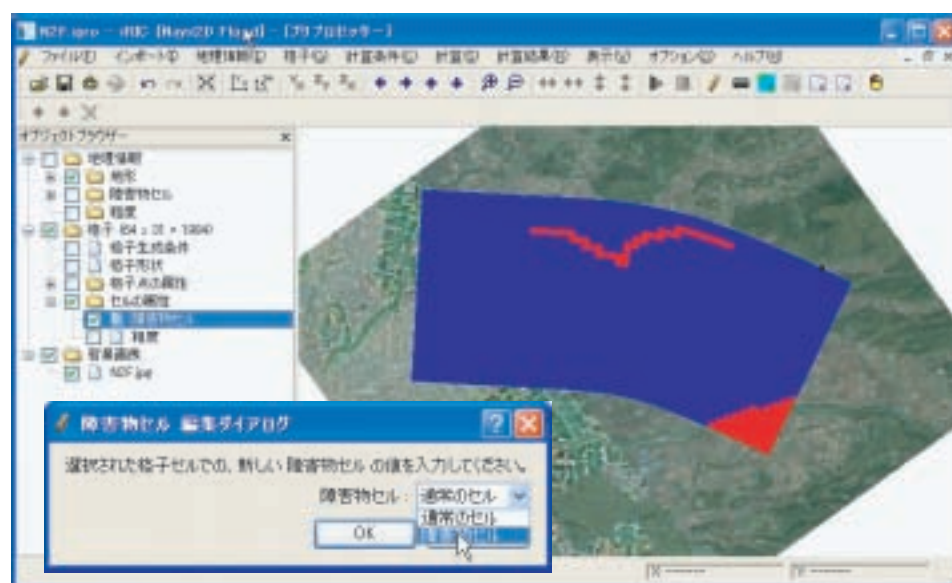


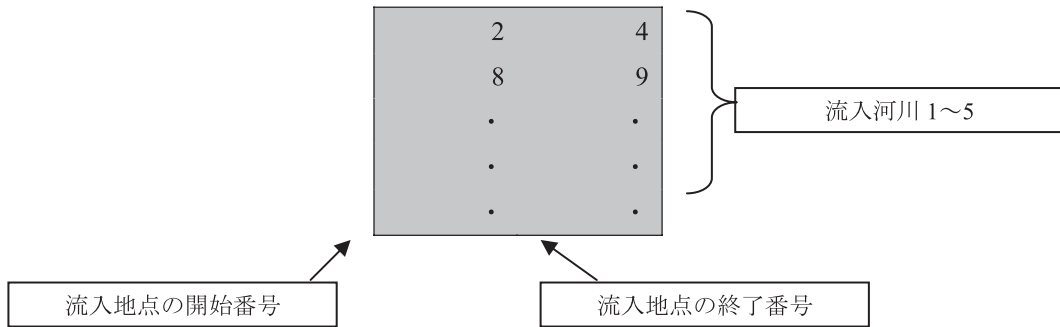
図-3.10 障害物の設定画面

### 3.5 入出力ファイル

#### (1) 流入格子番号指定ファイル

流入地点（もしくは破堤地点の数）の計算格子番号を指定する．数値はタブ，カンマ，スペース区切り，どれでも対応している．

境界条件以外に，側方の境界条件を流入とする場合は，格子番号指定ファイルをそれぞれ作成する必要があります．ファイルフォーマットを以下に示す．



- ※流入境界条件の場合は，計算格子(1,?)の?の番号を入力する．
- ※側方(j=1)の境界条件の場合は，計算格子(?,1)の?の番号を入力する．
- ※側方(j=ny)の境界条件の場合は，計算格子(?,ny)の?の番号を入力する．

図-3.11 流入格子番号指定ファイル例

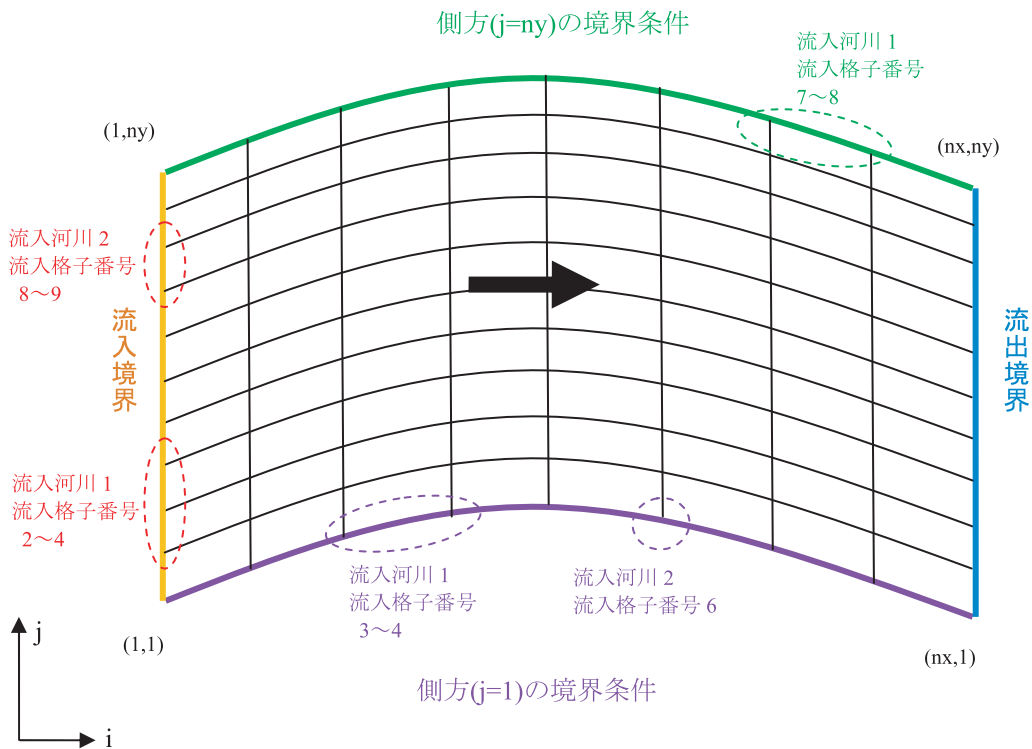


図-3.12 流入格子番号指定ファイルについて





## 4. 三次元ソルバー NaysCUBEおよび鉛直二次元ソルバー NaysCLIPの開発

### 4.1 概要

河川の局所的な現象を検討する場合、流れの三次元性を無視できない場合が多い。平面二次元モデルにおいてもある程度三次元性を積分して取り込むモデル化は可能であるが、複雑な三次元性については当然考慮できない。そこで三次元流れの基礎式を用いるモデルが必要となる。昨年度までに「Nays 3D」として、三次元エンジンの開発をほぼ完了しており、本年度はモデルの改良と、マニュアル・チュートリアルを作成を実施した。また、三次元ソルバー NaysCUBEからの派生ソルバーとして、鉛直二次元ソルバー NaysCLIPを新たに開発し、ダム堆砂問題への適用性を示した。

### 4.2 三次元エンジンの改良

本年度行ったエンジンの改良点は、(1) 解析パフォーマンス（精度や速度など）向上、(2) 機能の追加、(3) 操作性の向上、(4) バグフィックスやその他の修正、(5) 出力項目の多様化の5点に分類される。それぞれについて、改良点をまとめると、次のようになる。

#### (1) 解析パフォーマンス向上に関わる機能

- ①流水中の物体周辺の動水圧の扱いを、物理現象をより反映させた扱いに修正した。これにより、馬蹄渦などの形状を良好に再現できるようになった。
- ②極端に不連続な河床形態を平滑化する機能を追加した。三次元ソルバーの場合、二次元ソルバーよりも河床の凹凸に起因する不安定が生じやすい。特に、本ソルバーで用いる反変成分表記の基礎式に基づくソルバーでは、隣接格子幅が3倍を超えると数学的に不安定となることが指摘されている。この点を避けるため、初期の河床形態について、この条件を逸脱する格子を抽出し、局所的な平滑化を施すサブルーチンを追加した。
- ③プログラムを全体的に見直し、変数の整理、アルゴリズムの整理を行うことにより、計算速度の向上を図った。
- ④底面粗度と物体壁面の粗度を個別に与えられるように修正した。

#### (2) 機能の追加

- ①初期流量擦り付け機能を追加した。これにより、特に計算の不安定が生じやすい初期条件からの計算の開始過程を安定化することが可能となった。(図-4.1：流れに関する条件設定ダイアログ参照)
- ②マニング粗度係数を局所的に変化させる機能を追加した。(図-4.2：粗度の設定ダイアログ参照)
- ③水没、非水没の植生を考慮する機能を追加した。(図-4.3：植生条件設定ダイアログを参照) 植生密度の設定方法として2つの方法（植生面積、植生本数、平均直径の組み合わせで与える方法と、直接植生密度を与える方法）から選択可能とした。
- ④境界条件の設定を多様化させた。主流方向は通常境界条件、周期境界条件、反転周期境界条件、横断方向は通常境界条件、周期境界条件、対称条件から選択可能となった。また、境界条件設定ダイアログを新たに設けた。(図-4.4：境界条件設定ダイアログ参照)
- ⑤下流端水深を等流条件で与える機能を追加した。
- ⑥商用可視化ソフトウェアTecplot形式のファイル出力機能を追加した。
- ⑦「河床変動係数」を指定し、河床変動計算速度を向上させる機能を追加した。

### (3) 操作性の向上

- ①障害物描画機能を追加した。(等値面として描画する)。また、非越流型構造物の場合に水面において構造物の面が描画されない点を修正した。
- ②計算条件設定ダイアログの構成全体を見直し、より直観的に、かつ分かりやすい手順で条件設定が可能となるよう工夫を施した。

### (4) バグフィックスその他

- ①ソルバー名称をNays3DからNaysCUBEに変更した。これは、Nays2Dとの混同を避けるためと、より親しみやすい名称が望ましいと判断したためである。
- ②掃流砂量の計算が流れの非定常性に追従しないバグを修正した。
- ③下流端に水路幅にわたる構造物が存在する場合のバグを修正した。
- ④移流項の計算に関するバグを修正した。

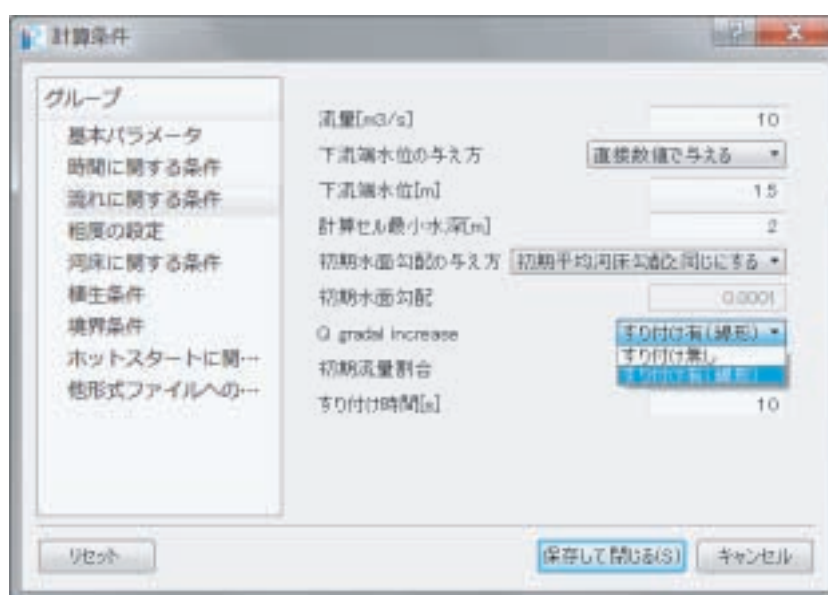


図-4.1 流れに関する条件設定ダイアログ（流量のすり付け機能の追加）

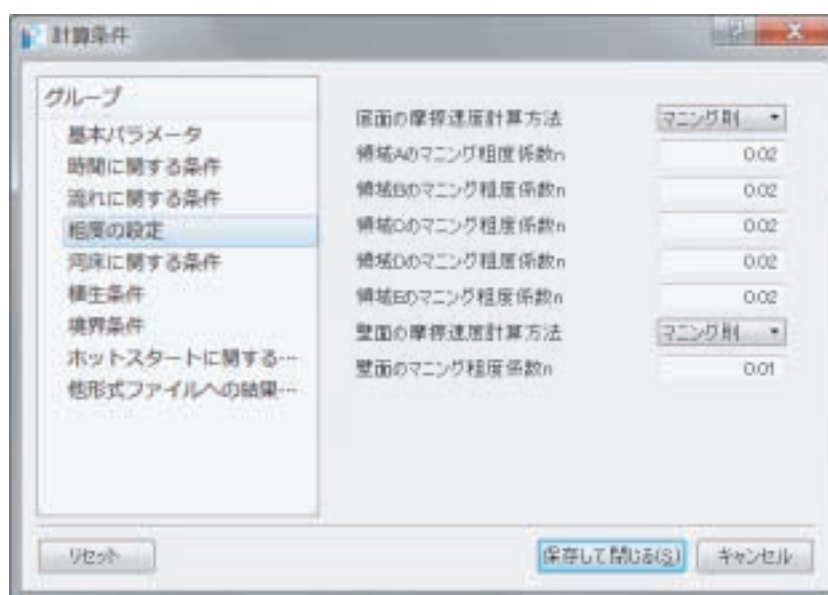


図-4.2 粗度の設定ダイアログ（マンニングの粗度係数を局所的に変化させる機能の追加）

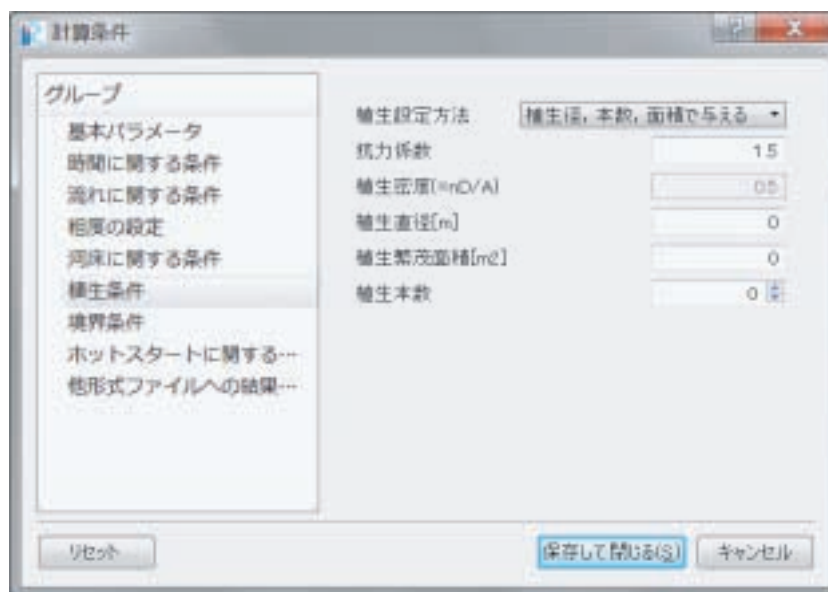


図-4.3 植生設定ダイアログ（水没型，非水没型植生を設定できる。）

### (5) 出力項目の多様化

- ①河床に関する出力項目を表-4.1に示す。
- ②乱流に関する出力項目を表-4.2に示す。
- ③渦と組織構造に関する出力項目を表-4.3に示す。

表-4.1 河床に関する出力項目

#	項目	意味	説明
1	Bed height	河床高(m)	基準面からの河床の標高を表します。 二次元変数であることに注意。
2	Bed deviation	河床変動量 (m)	初期河床高からの河床変動量を表します。 二次元変数であることに注意。
3	Bed shear	底面せん断応力 (Pa)	底面せん断応力（掃流力）の値を表します。 二次元変数であることに注意。

表-4.2 乱流に関する出力項目

#	項目	意味	説明
1	Turb_k	乱れエネルギー(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	乱れエネルギー (k)を表します。
2	Eddy vis.	渦動粘性係数	渦動粘性係数 $\nu_t$ の値を出力します。
3	uu	$-\overline{u'u'}$	レイノルズ応力 $-\overline{u'u'}$ を出力します。
4	vv	$-\overline{v'v'}$	レイノルズ応力 $-\overline{v'v'}$ を出力します。
5	ww	$-\overline{w'w'}$	レイノルズ応力 $-\overline{w'w'}$ を出力します。
6	uv	$-\overline{u'v'}$	レイノルズ応力 $-\overline{u'v'}$ を出力します。
7	vw	$-\overline{v'w'}$	レイノルズ応力 $-\overline{v'w'}$ を出力します。
8	wu	$-\overline{w'u'}$	レイノルズ応力 $-\overline{w'u'}$ を出力します。

表-4.3 渦と組織構造に関する出力項

#	項目	意味	説明
1	Vor. stream	主流方向渦度	主流方向の軸を持つ渦度の値を出力します。縦渦構造などを明確に見ることができます。
2	Vor. lateral	横断方向渦度	横断方向の軸を持つ渦度の値を出力します。
3	Vor. vertical	鉛直方向渦度	鉛直方向の軸を持つ渦度の値を出力します。平面渦の可視化に適します。
4	Vorticity all	渦度の絶対値	渦度の絶対値を出力します。渦構造全般をみるのに適します。
5	Weiss F	ワイス関数	ワイス関数の値を出力します。乱流組織構造の可視化に適しています。 注 1)

注 1) ワイス関数は次の式の  $Q$  で定義される無次元スカラー量である。

$$Q = \frac{1}{4} \left( \frac{\varepsilon}{k} \right)^2 (\Omega^2 - S^2)$$

ここに、 $Q$ : ワイス関数、 $\Omega$ : ローテーションパラメータ、 $S$ : ストレインパラメータ、 $k$ : 乱れエネルギー、 $\varepsilon$ : 乱れエネルギー散逸率をそれぞれ表す。

#### 4.3 マニュアル・チュートリアル作成

##### (1) 日本語版・英語版ソルバーマニュアル作成

日本語版および英語版のソルバーマニュアルの作成を実施した。日本語版ソルバーマニュアルの目次を図-4.4に、英語版ソルバーマニュアルの目次を図-4.5にそれぞれ示した。本マニュアルの特徴は、詳細な基礎式等、理解に専門知識を有する項目をマニュアルの後半に配置し、初心者が取り掛かりやすい構成としている点である。また、本ソルバーの大きな特徴である境界条件の多様性については、多くの図を用いてわかりやすい記述に努めた。一方、厳密な基礎式についてもマニュアルの後半にできるだけ詳しく記述しており、専門家やより深く学びたいと考える読者にも配慮した。日本語マニュアルの末尾には索引を配置し、利用者の便に配慮した。

図-4.6には英語版ソルバーマニュアルの内容抜粋を示す。図や表を多様し、かつカラー刷りの非常に見やすい構成となっていることがわかる。

I. 概要	1
I.1 Nays CUBEとは	1
I.2 Nays CUBEにおける流れ場の計算モデルの特徴	2
I.3 流砂と河床変動の計算モデルの特徴	3
I.4 その他の特徴	4
II. 基礎方程式	5
II.1 流れの基礎方程式	5
II.2 乱流モデル	5
II.3 流砂と河床変動のモデル	5
II.3.1 流砂量の基礎式	5
II.3.2 河床の連続式	5
II.4 計算スキーム	6
III. 計算条件	7
III.1 基本パラメータ群の設定	7
III.2 時間に関する条件の設定	8
III.3 流れに関する条件の設定	9
III.4 粗度の設定	11
III.5 河床に関する条件の設定	12
III.6 植生条件の設定	13
III.7 境界条件の設定	14
III.8 ホットスタートに関する条件の設定	18
III.9 他形式ファイルへの計算結果出力に関する設定	19
IV. 入出力ファイル	21
IV.1 Nays CUBEの入力ファイル	21
IV.2 Nays CUBEの外部出力ファイル	21
IV.2.1 ホットスタート用ファイル	21
IV.2.2 VTKファイル	21
IV.2.3 Micro AVS用ファイル	22
IV.2.4 Tecplot用ファイル	22
IV.2.5 外部出力ファイルの保存先	23
V. 注意事項	24
V.1 計算格子について	24
V.2 障害物セルについて	24
V.3 植生セルについて	26
V.4 粗度の設定について	27
VI. 計算結果の可視化	29
VI.1 平均流, 水深, 水位, 圧力に関する出力項目	29
VI.2 植生と障害物に関する出力項目	30
VI.3 河床に関する出力項目	30
VI.4 乱流に関する出力項目	30
VI.5 渦と組織構造に関する出力項目	31
VII. 基礎方程式の具体的表記	32
VII.1 流れの基礎方程式の具体形	32
VII.1.1 デカルト座標系での基礎方程式の表記	32
VII.1.2 静止一般曲線座標系での基礎方程式の表記	33
VII.1.2 移動一般曲線座標系での基礎方程式の表記	34
VII.2 乱流モデルの構成則	34
VII.2.1 標準型(線形) $k-\varepsilon$ モデル	34
VII.2.2 二次非線形 $k-\varepsilon$ モデル	35
VII.3 流砂と河床変動の基礎式の具体的表記	36
VII.3.1 流砂量の基礎式	36
VII.3.2 河床の連続式	37
VII.4 境界条件と計算手法	38
VII.4.1 境界条件及び水面の取り扱い	38
VII.4.2 数値解析法の概要	39
おわりに	41
索引	42

図-4.4 日本語版ソルバーマニュアルの目次構成

I. Outline	1
I.1 What is Nays CUBE?	1
I.2 Features of the Nays CUBE flow field calculation model	2
I.3 Features of sediment transport and bed deformation computation models	4
I.4 Other features	5
II. Basic equations	6
II.1 Basic flow equations	6
II.2 Turbulence model	6
II.3 Models for sediment transport and bed deformation	6
II.3.1 Basic equations of sediment transport	6
II.3.2 Equation of continuity of bed sediment	7
II.4 Computational scheme	7
III. Computational conditions	8
III.1 Settings for "Basic Parameters"	8
III.2 Settings for "Time Conditions"	9
III.3 Settings for "Flow Conditions"	10
III.4 Settings for "Roughness Conditions"	12
III.5 Settings for "Bed Conditions"	13
III.6 Settings for "Vegetation Conditions"	15
III.7 Settings for boundary conditions	16
III.8 Settings for "Hot start conditions"	20
III.9 Settings for "Additional output files"	21
IV. Input/output file format	23
IV.1 Input file format for Nays CUBE	23
IV.2 Output file format of Nays CUBE	23
IV.2.1 Hot start file	23
IV.2.2 VTK file format	24
IV.2.3 Micro AVS file format	24
IV.2.4 Tecplot file format	24
IV.2.5 Output file storage	25
V. Important information	26
V.1 Calculation grids	26
V.2 Obstacle cells	26
V.3 Vegetation cells	29
V.4 Setting of roughness	30
VI. Visualization of computational results	32
VI.1 Output parameters of mean flow, water depth, water level and water pressure	33
VI.2 Output parameters of vegetation/obstacles	33
VI.3 Output parameters of riverbed	33
VI.4 Output parameters of turbulent flow	34
VI.5 Output parameters of eddy and turbulent coherent structure	34
VII. Notation of basic equations	36
VII.1 Basic equations of flow	36
VII.1.1 Notation of basic equations on the Cartesian coordinate System	36
VII.1.2 Basic equations on the static generalized curvilinear coordinate system	37
VII.1.3 Basic equations on the generalized curvilinear movable coordinate system	38
VII.2 Constitutive law of turbulent model	39
VII.2.1 Standard (linear) k- $\epsilon$ model	39
VII.2.2 Non-linear two-dimensional k- $\epsilon$ model	40
VII.3 Notations for the basic equations of sediment transport/bed deformation	42
VII.3.1 Basic equations of sediment transport	42
VII.3.2 Continuous equation of bed deformation	43
VII.4 Boundary conditions and computation methods	44
VII.4.1 Boundary conditions and water surface	44
VII.4.2 Outline of numerical analysis	45
<References>	46
7. Conclusion	47
In using Nays CUBE....	48

図-4.5 英語版ソルバーマニュアルの目次構成





図-4.6 英語版ソルバーマニュアルの内容抜粋

## (2) チュートリアル（事例集）の作成

NaysCUBEは実河川の計算だけでなく、より単純な水理模型実験や、水理学の学習にも用いられることを想定して作成されたソルバーである。このことを考慮して、チュートリアルは、実河川の計算を想定した「実河川編」と、水理模型実験や水理学学習を想定した「基礎水理編」の二冊として、個別に開発を行った。なお、実河川編については（株）ドーコンから、基礎水理編については（株）建設技術研究所から、それぞれ絶大なご協力をいただき、実際の事例選定や執筆等はこれらの協力企業の技術者があつた。これにより、研究者やソルバー開発者としての立場ではなく、実際にソルバーを用いるユーザーの立場からの記述がなされ、現場の問題に即した事例集とするうえで大きなアドバンテージとなったと考えられる。

なお、チュートリアルについては本年度は日本語版のみの作成を行ったが、今後これらの英語化の作業を早急に進めていく予定である。

図-4.7にチュートリアル基礎水理編の内容の抜粋を、図-4.8にチュートリアル実河川編の内容の抜粋をそれぞれ示す。

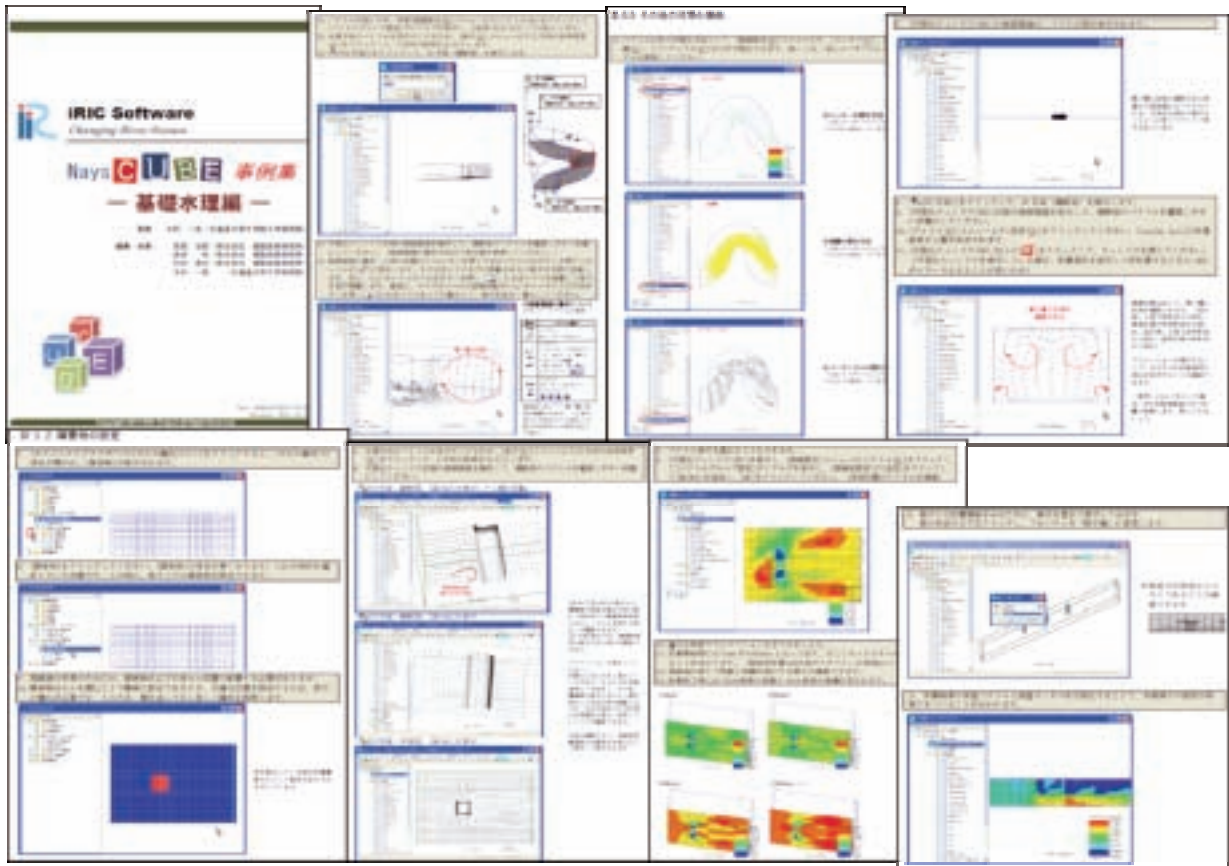


図-4.7 チュートリアル「基礎水理編」の内容抜粋

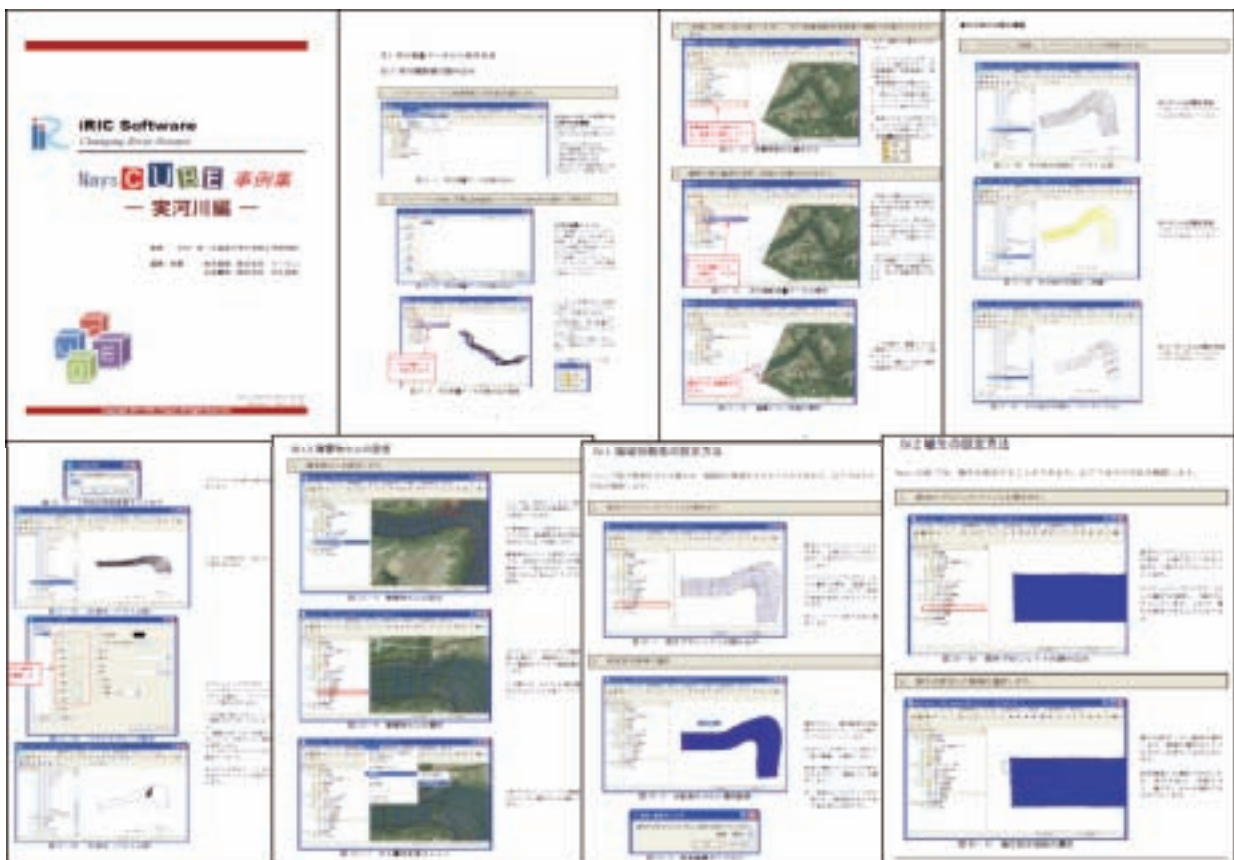


図-4.8 チュートリアル「実河川編」の内容抜粋



#### 4.4 鉛直二次元ソルバー Nays CLIPの開発

##### (1) Nays CLIPの概要

貯水池，深い湖や河川など，水平方向のスケールに比べて鉛直方向のスケールが比較的大きく，かつ鉛直方向の混合現象が卓越する場合には，鉛直二次元モデルによる計算が効率的である．三次元ソルバー Nays CUBEはもちろんこのような鉛直方向の混合現象に対しても適用可能であるが，三次元モデルであるがゆえに計算機負荷が大きいのが難点である．そこで，鉛直二次元計算を軽快に実行できるソルバーとしてNays CLIPを新たに開発した．開発したソルバーは貯水池の堆砂現象に適用し，その有用性を示した．

##### (2) Nays CLIPの基礎式

Nays CLIPの基礎式はNays CUBEとほぼ同様であり，反変成分の物理量を基本変数とするURANS型モデルを採用し，乱流モデルとしては線形，および非線形k- $\epsilon$ モデルを採用している．

河床変動モデルについては掃流砂分についてはNays CUBEとほぼ同様であるが，貯水池の堆砂現象にいち早く対応するため，Nays CUBEでは現在導入されていない浮遊砂のモデルを先行導入した点に特徴がある．

##### (3) 貯水池の堆砂現象への適用例

貯水池の堆砂現象は，ダムを引き起こす多くの課題のうちでも非常に緊急性の高いものの一つである．ダムの形状や流入土砂の特性は多種多様であり，これらの多様な条件に対応するには，汎用性のある数値シミュレーションモデルによることが望ましい．今回は，Nays CLIPの適用性の検証を目的に，実際の貯水池の形状ではなく，単純化した形状の領域について，貯水池内の流動特性，浮遊砂の堆積とクレストゲートからの排砂過程についてシミュレーションを試みたものである．

図-4.9に今回のシミュレーションで対象とした貯水池の縦断面図と，計算格子を示す．図のように，主流方向はダム堤体近傍に向かって格子幅が縮小するストレッチング格子を採用している．また，鉛直二次元モデルであるため，横断方向は一定幅とする必要がある．

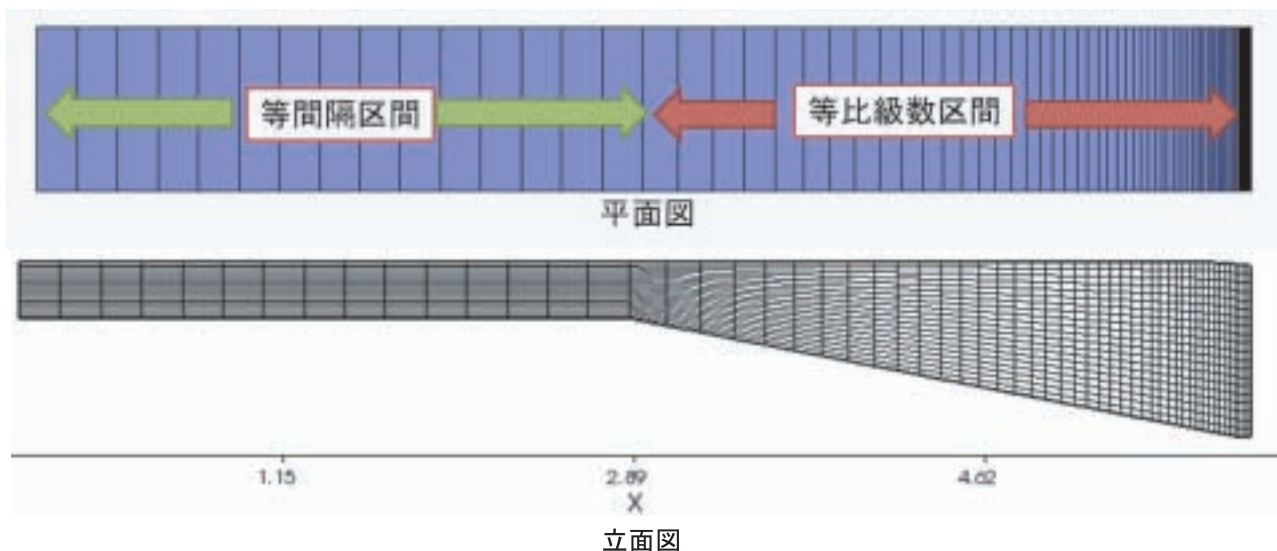


図-4.9 鉛直二次元モデルNays CLIPの検証に用いるモデル貯水池の縦断面形状と計算格子

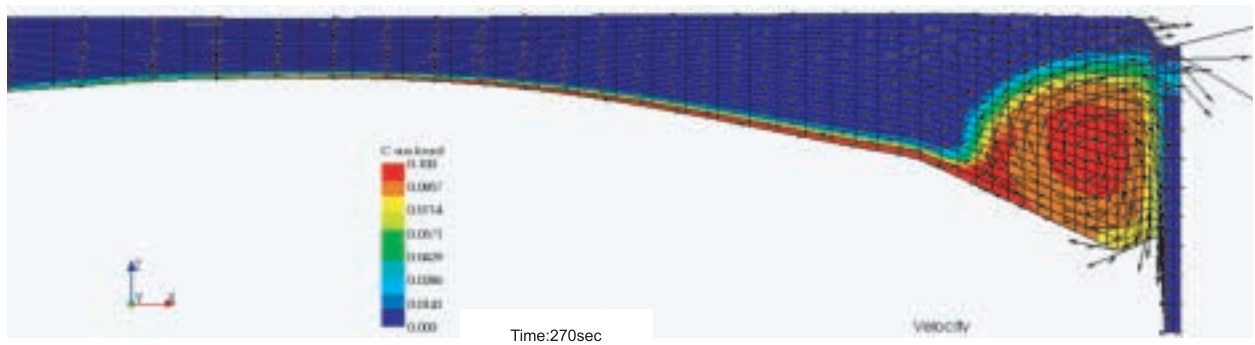


図-4.10 鉛直二次元モデルNays CLIPの検証に用いるモデル貯水池の縦断形状と計算格子

図-4.10はある瞬間 ( $t=270\text{sec}$ ) における河床形態，浮遊砂濃度および流速ベクトルを示したものである。河床高が初期形状より上昇しており，堆砂が進行していることがわかる。一方，ダム堤体付近には反時計回りの渦が形成され，この渦の内部での浮遊砂濃度が大きいこと，また，この渦に取り込まれた浮遊砂の一部はクレストゲートから排砂されることがわかる。これは，渦が浮遊砂を巻き上げ，流れに取り込む効果を有するためと考えられる。最終的にはこの渦による排砂作用と上流からの堆砂作用とが均衡し，平衡状態に達すること，堤体近傍の河床高さはこのためクレストゲート高には達せず，ある程度の水深が確保されることが予想される結果となった。

以上の結果より，鉛直二次元ソルバー Nays CLIPは貯水池内の流動や堆砂現象，浮遊砂輸送現象などの解析に有効なツールであることが示された。

#### (4) Nays CLIPの今後の展開

Nays CLIPとNays CUBE（三次元ソルバー）は，基礎式がほぼ同一であること，ユーザー変数についても共通点が多いことなどから，姉妹関係にあるソルバーといえる。したがって，これらは今後とも並行して開発を進めていくことが効率的である。今後，ソルバーマニュアル，チュートリアルを整備し，2012年度中にリリースを行う予定である。

## 5. 河道と氾濫原の一体型氾濫解析モデル

### 5.1 はじめに

平面2次元解析に基づく氾濫解析は、直交座標系の格子構成を出発点とし、その後、予測精度の向上のために解析対象の地形形状を適切に取り込む必要性から一般座標や非構造格子を導入した手法が開発されてきた。これらの氾濫解析の技術は、破堤点から堤内地へ拡散する氾濫水の挙動の解析を実現し、一般的な洪水ハザードマップの作成を強力に支援している。しかし、2011年3月に発生した大津波の遡上に伴う氾濫、同年7月の新潟福島豪雨における超過洪水で見られた外水と内水の複合的な氾濫、同年秋からの長期にわたるタイ国の洪水氾濫などを通し、既存の氾濫解析技術が緊急性の極めて高い社会的要請に速やかに応じられるだけの技術的水準に達していないことが浮き彫りになってきた。列挙した3つの現象には、河道から氾濫原への流量の供給が複数点ないしは河道に沿って連続的に発生するという共通点があり、従来までの一点だけから氾濫原に対して氾濫流量が供給される現象とは根本的に異なる。氾濫要因となる河道や水路網とその受け皿となる氾濫原の一体的な解析が簡便な格子構成のもとで実現されれば一挙に解決が可能な問題であるにもかかわらず、現状では解決の目処は示されていない。

河道と氾濫原の一体的解析のための格子構成を一般座標や非構造格子により実現しようとする、格子構成の時間的なコストとして演算時間の10倍から100倍程度が要求されるだけでなく、格子構成の最終処理は経験を必要とする手動処理に頼らざるを得ない。つまり、格子構成が容易に更新できない問題や、格子構成がなされてない領域に速やかに対処することができない問題などを生じ、社会的要請と技術環境にそぐわない重大な欠点となっている。他方、自動処理に適したデカルト座標を用いて地形形状の記述の自由度を確保するためには領域の全体で細分格子を導入せざるを得ず、演算速度が著しく犠牲にされることになり、現実的な選択肢とは言えない。

現在、浸水域の予測技術を取り巻く環境は、レーザープロファイラにより取得された高解像度の地形情報が広範囲にわたり整備されるとともに、演算速度を向上させた電子計算機が次々と開発される極めて豊穡な状態にあると言える。従って、浸水現象を規定ないしは影響を及ぼす地形形状や道路網や水路網をできるだけ忠実に計算モデルに組込むべきとの要求は、いずれの観点からも自然発生的なものである。しかし、計算機の演算能力が向上したとはいえ、高解像度の地形情報を直接的に利用した際の演算時間はいまだに再現時間の数倍から数十倍を要し、このような技術環境を有効かつ効率的に活用する視点から浸水域の予測技術の高度化は行われてないのが実情である。そのうえ、解析手法の精度や演算速度と同格の重要課題として扱わなければならない格子構成に要する時間的なコストの削減についてこれまでほとんど議論されてこなかった点も大きな見過ごしと言えよう。

前述までの技術的かつ社会的な背景を踏まえて抽出された氾濫解析の課題は、昨年度に実施した河道と氾濫原をそれぞれの水理モデルで記述するハイブリッド型、あるいは様々な浸水外力を分け隔てすることなくすべての水理要素を2次元解析により一体的に解析する手法のいずれかが考えられる。本章では、まず、前年までに開発を行ってきたハイブリッド型の適用限界について考察を行い、引き続き、柔軟性に富み効率的な格子構成を簡便に実現できる四分木構造格子を導入した氾濫解析の手法について述べる。

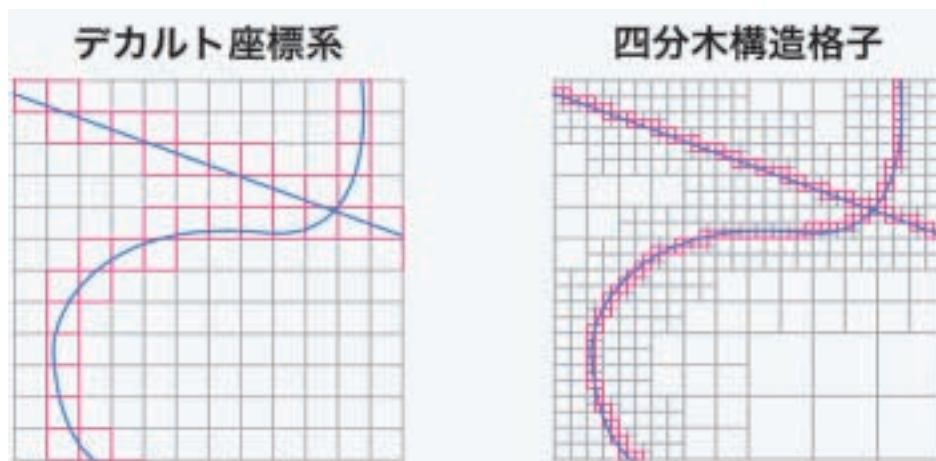


図-5.1 四分木構造格子による線状物の表現  
(局所的な解像度を増減することができるため、領域全体では格子数を大幅に削減できる)

## 5.2 ハイブリッドモデルの適用限界

ハイブリッドモデルでは、河道に1次元モデル、氾濫原に2次元モデルを採用し、両者は越流公式により結合される。従って、解析の主対象となる氾濫現象の拡散速度や氾濫水の体積の精度は、越流公式にかなりの部分が支配されることになる。具体的には、河道内の水位が時間的に大きく変化する場合などでは、越流公式における越流係数を自由流出ともぐり流出の二つのみで切り替える形式に着目すれば、越流公式は早々に適用限界を迎えることが容易に推測できる。

もう一点、ハイブリッドモデルでは、1次元モデルと2次元モデルの幾何学的な結合を行うために連結情報が不可欠となる。この問題を解消することを目的に前年までに自動的な連結情報の生成法の開発を行ってきた。その後、この生成法の適用限界のテストを繰り返した結果、曲率の大きな蛇行部が連続する場合などでは、その幾何学的な特徴から例外処理を回避することが非常に難しいことが判明した。その上、河道が複数存在する場合については、連結情報の生成アルゴリズムと水理モデルの両者の拡張が極めて煩雑となることが明らかとなってきた。

上記の越流公式と連結情報の生成における幾何学的問題のいずれとも煩雑な手続きを経由することで解決できる見込みはある。しかし、氾濫解析の汎用モデルの開発が主目的としている本研究においては異なるアプローチにより当初の目的と達成することが得策であると考えられる。

## 5.3 四分木構造格子を導入した河道と氾濫原を一体に扱う氾濫解析モデル

本章以降では、四分木構造格子と呼ばれる格子構成法を導入し、様々な浸水外力を分け隔てすることなくすべての水理要素を2次元解析により一体的に解析する手法について述べていく。四分木構造格子を導入することで、従来までも注目されてきた解析精度と演算時間の両立だけでなく、前述までに指摘した効率性の高い格子構成の時間的コストの削減が見込まれる。

### (1) 四分木構造格子による幾何形状の表現法

四分木構造とは2次元空間を再帰的に4つに分割した構造を指し、空間情報の観点では局所的に解像度を増減させることが可能な柔軟かつ効率的なデータ構造である。換言すると、構造的な分割規則に基づき格子面積が規定された多層の格子層により構成され、同じ層内の格子同士には兄弟関係、異なる層間では親子関係を有する格子の多層的な重ね合わせ構造と言える。

図-5.1に四分木格子を用いて赤線で示された幾何形状を高解像度に表現した一例を示した。この図の



例では、最も格子面積が大きいものを基準として、格子面積を $1/4$ ,  $1/4^2$ , と順に小さくした合計で3種類の大きさの格子を用いて幾何形状を表現している。この表記に従うと格子面積が最大のものは $1/4^0$ と書ける。以降、本文ではべき乗の値を $L$ として、各格子面積レベルをレベル0などと表記する。

各レベルでの格子数はこの例の場合では、すべてレベル2の格子で表現した場合の格子数は、レベル0から2の格子を組み合わせた格子構成時の格子総数は10%以下にまで縮減される。この格子数の縮減の傾向は計算対象領域が広がるほどに一層顕著となる。

同図に示したように、一見すると四分木構造格子を用いた幾何形状の表現方法は複雑に思えるが、隣接する格子面積レベルは同一か±1の大きさの3パターンしか存在せず、格子構成は非常に規則的である。この規則性の高さから四分木構造を導入した格子生成は容易であり、本研究では格子生成の自動化手法を確立した。また、規則性が高いにも関わらず、格子構成は柔軟かつ効率的に行え、複雑な形状をした計算領域の境界適合、線状の内部境界などの表現、局所的な解像度の向上などが可能である。

## (2) 支配方程式

各面積レベルの格子層の座標系は直交座標系で記述される。それぞれの層内における $x, y$ 方向の流量フラックス、水位は以下の式(1)から(3)の浅水流方程式により計算される。また、式(2), (3)で用いる抵抗係数は、式(4), (5)により算出した。

$$\frac{\partial h_k}{\partial t} + \frac{\partial M_k}{\partial x_k} + \frac{\partial N_k}{\partial y_k} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial M_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{M_k^2}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \frac{M_k N_k}{h_k} \right) + g h_k \frac{\partial H_k}{\partial x_k} = - \frac{\tau_{xb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu_t \frac{\partial M_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \nu_t \frac{\partial M_k}{\partial y_k} \right) \quad \dots (2)$$

$$\frac{\partial N_k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \frac{M_k N_k}{h_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \frac{N_k^2}{h_k} \right) + g h_k \frac{\partial H_k}{\partial y_k} = - \frac{\tau_{yb}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left( \nu_t \frac{\partial N_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial y_k} \left( \nu_t \frac{\partial N_k}{\partial y_k} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\tau_{xb} = \frac{\rho g n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{1}{3}}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

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

ここで、 $M, N$ は $x, y$ 方向の流量フラックス、 $t$ は時間座標、 $x, y$ は平面座標、 $h$ は水深、 $g$ は重力加速度、 $H$ は水位、 $\tau_{xb}, \tau_{yb}$ は $x, y$ 方向の底面せん断応力、 $u, v$ は $x, y$ 方向の流速、 $\rho$ は水の密度、 $n$ は渦動粘性係数、それぞれの変数に下添えされた $k$ は格子面積レベルである。

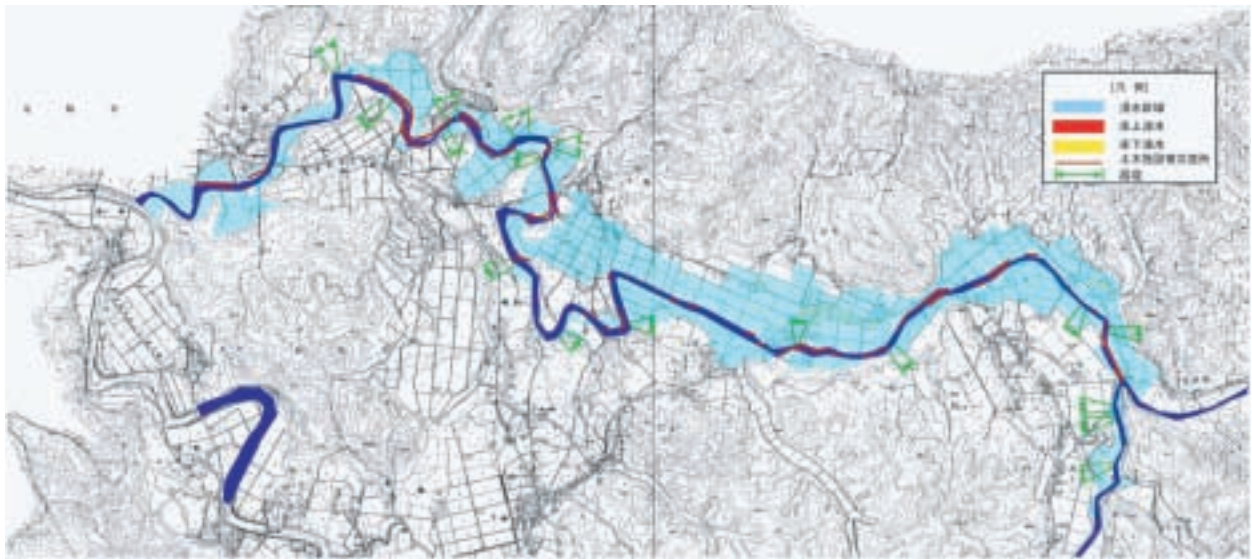


図-5.2 2011年7月豪雨時の塩谷川の浸水実績図

四分木構造格子における計算は式(1)から(3)で示されているように、一般座標の計算を行う場合とは異なり、座標変換に伴う付加項が不要となる。このため、座標変換時に不可避の打ち切り誤差から解放され、より物理的に忠実かつ格子構成に依存しない解析が保証されるようになる。

#### 5.4 実流域への適用

2011年7月末に発生した新潟福島豪雨は、総降雨量が1,000mmに迫り、新潟県内をはじめとする各地に様々な形の水害をもたらした。信濃川の流域全体としてみると、上流域の谷底低地を流れる河川では大規模な流下型の氾濫が生じ、中流域の五十嵐川や刈谷田川、そしてこれらが合流する信濃川本川ではいずれにおいても氾濫危険水位や避難判断水位を超える洪水となった。

本章では、流下型氾濫となって河道に沿って甚大な被害が生じた塩谷川（刈谷田川支川）の洪水氾濫の被害の再現計算を上記までに提案した四分木構造格子を導入した解析法により実施する。

##### (1) 計算格子

塩谷川の氾濫現象を解析するにあたり、氾濫原の格子長を40m、河道とその周辺の格子長を20mとした四分木構造格子を構成することにした。領域内の河道の平均的な堤防間距離は85m程度あり、河道内の地形は矩形格子ながら横断方向に4個程度の格子によって適当に解像されていると判断される。格子数は主に氾濫原を表現する40m格子が8,756個、主に河道を表現する20m格子が5,956個である。領域全体を20m格子で表現した場合では約32,580個となり、格子数を半減させることに成功している。これに加え、計算格子数を削減するために標高が100m以上となる山地部については除外した格子構成を行った。

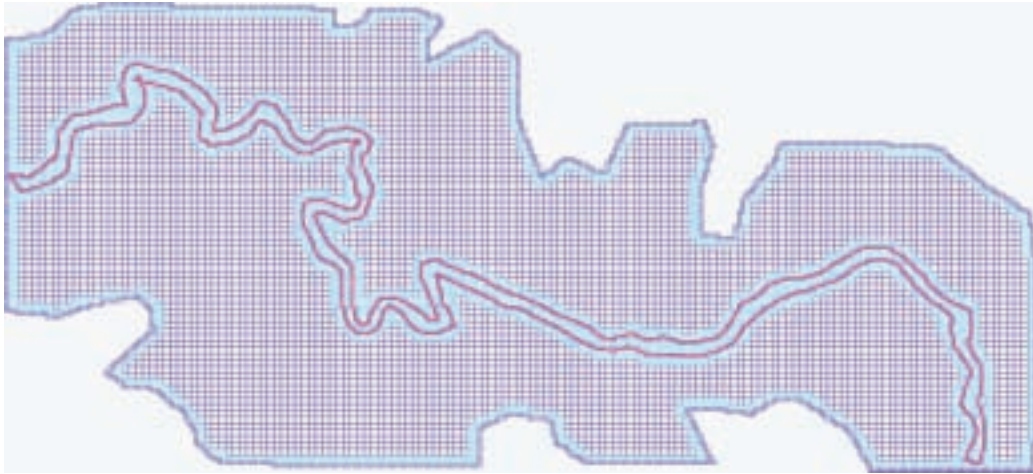


図-5.3 四分木構造格子による塩谷川とその周辺の格子構成図

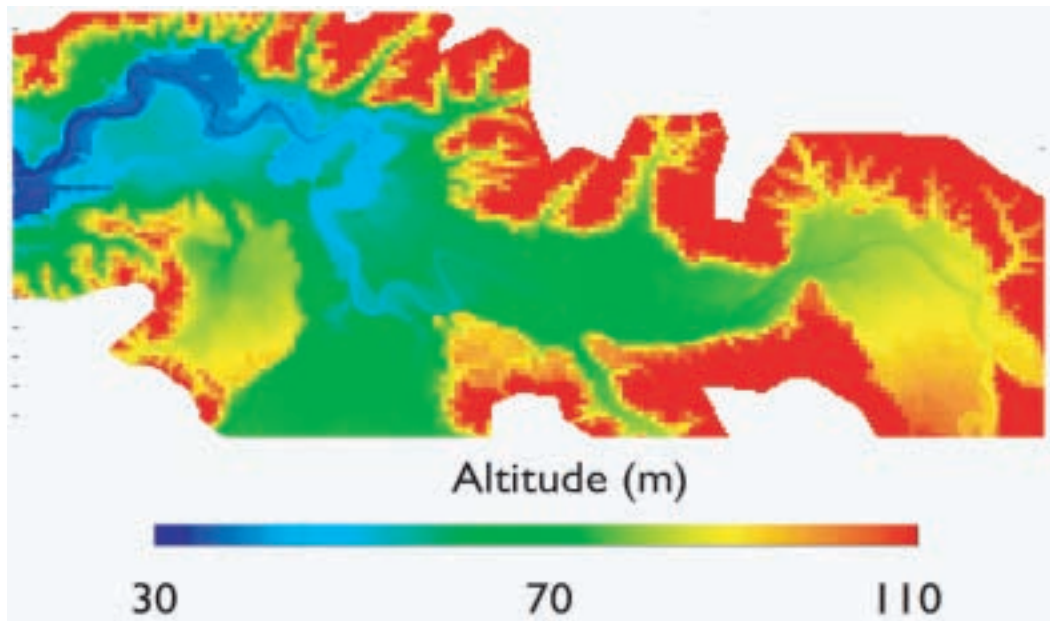


図-5.4 塩谷川流域の標高図

各格子に与える標高は氾濫原についてはレーザープロファイラにより取得された5m間隔のDEMより生成した標高値を与えた。ただし、河道内についてはレーザープロファイラにより取得された標高には水面以下の標高値が含まれていない。このため、水面以下の標高値を補うために200m間隔で取得された横断測量の成果から平面展開することで生成された標高値を与えた。

## (2) 初期条件・境界条件

初期条件としては、解析領域の全体で水深が0mになるように設定を行った。

境界条件としては、河道の上流端で流出解析により求められた洪水継続時間を12時間とする $20\text{m}^3/\text{s}$ から最大流量が $600\text{m}^3/\text{s}$ となる洪水ハイドログラフを与え、下流端では上流から流下してきた水を領域外へ排出する特性曲線法に基づく自由透過境界を設定した。



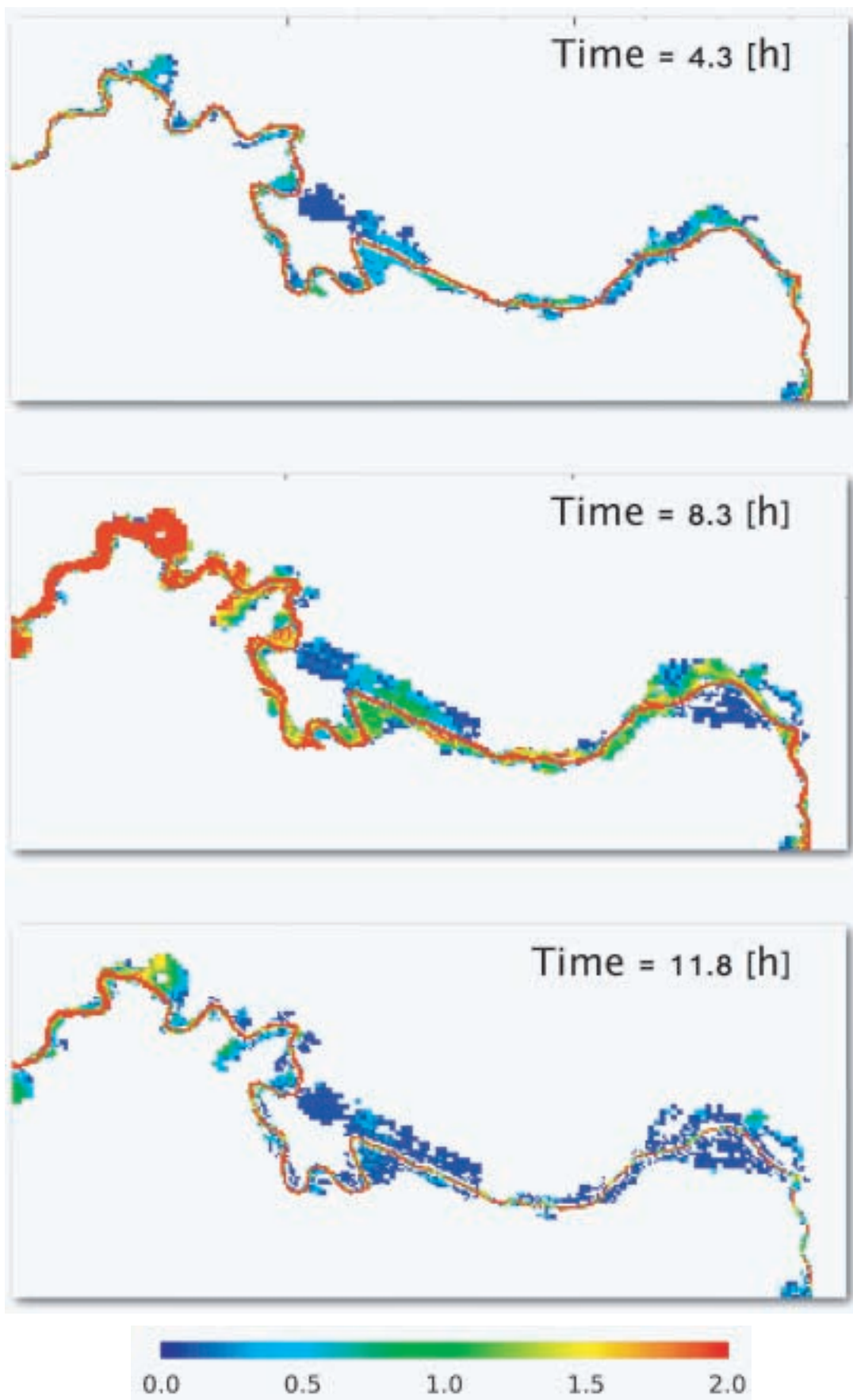


図-5.5 再現計算の結果（浸水深による表示，単位はm）

### (3) 計算結果

図-5.5に再現計算の結果を示した。図中の上段は上流端から洪水流入が開始してから4.3時間後の氾濫現象を表している。この時刻における上流端ではおよそ $180\text{m}^3/\text{s}$ が供給されている状態で、領域全体で徐々に氾濫が開始されていることがわかる。図内の中央の鋭く河道が湾曲する箇所からは河道を短絡するように氾濫水が下流に向かって流下を開始していることがわかる。図中の中段は洪水流入開始から8.3時間後の様子を表し、このとき最大流量の $600\text{m}^3/\text{s}$ を過ぎてこれをわずかに下回る $550\text{m}^3/\text{s}$ が上流端から供給され、区間全体の氾濫面積が最大となる時刻である。中央の鋭い湾曲部からの氾濫はさらに増加する傾向を示すとともに河道内の洪水流の流下がこの蛇行のために阻害されて氾濫原へ流れが拡散していく様子が捉えられている。下段は河道内の流量は $10\text{m}^3/\text{s}$ にまで低下した時刻のもので、氾濫水が河道に戻る挙動が捉えられている。

図-5.3に示した実績の浸水域図と比べると、解析領域の中間区間の右岸側の浸水面積の再現が良好でないことを除くと、全体的に良好な再現性を示していることがわかる。実績値で見られた中間区間の浸水域は塩谷川から供給された氾濫水に加えて山地部からの流出水によるものであることが推察される。

## 5.5 本章のまとめ

本章において示した解析手法の技術的基盤は、四分木構造格子である。図-5.1に示したように、四分木構造格子は、局所的に解像度を増減して異なる格子解像度を共存させることができる格子構成法である。

浸水外力の同次元一体解析法に対して四分木構造格子を導入することで、a. 格子構成の幾何学的な課題と時間コストの解決、b. レーザープロファイラデータの有効活用、c. 河道と氾濫原の同次元解析による水理的厳密性の飛躍的向上、d. 演算時間の大幅な縮減、e. 既存水理モデルの簡便移植性のメリットを享受することができるようになる。これらのメリットは、氾濫要因となる河道や水路ネットワークと氾濫原の一体的な格子構成に加え、氾濫水の拡散に大きな影響を及ぼす高規格道路などの線状構造物をレーザープロファイラデータを有効活用して柔軟かつ忠実に反映した格子構成の実現という形で具現化される。

四分木構造格子に基づく格子構成は外水、内水、津波の遡上に伴う氾濫のいずれに対しても有効に機能することが期待されるとともに、すべての水理現象を同次元解析できるように水理的な厳密性が保持される。そのうえ、解析精度を犠牲にすることのない効率的な格子構成が行われるために演算速度の面でも優位性を持つようになり、解析領域全体を河道が解像できるだけの細分格子で覆った場合に比べて10倍程度の高速演算を達成できることが試算から明らかになっている。

## 6. 結論

本研究は、将来にわたって変化し続ける河川情勢に対応できる次世代型河川シミュレーションエンジンを、優れた共有プラットフォーム「iRIC」のもとで共同開発したものである。スケールや目的に応じて適用可能な4つの異なるエンジンを、4名の研究者が分担して開発を行った。これらは、独立したエンジンであると同時に、インターフェースの統一によりシステムとして有機的、相補的に機能し、次世代の多様化する河川のニーズに応える解析モデルとしての基盤がほぼ形成されたものと考えられる。各ソルバーには未完成な部分、改良すべき点が多くのごさされており、また、さらに高い機能を期待できる部分も多い。これらについては、来年度以降に継続して研究を進めていき、世界に向けてより完成度の高い解析システムの提供していきたい。

## 参考文献

- 1) Fisher, H.B.: Longitudinal Dispersion and Turbulent Mixing in Open-Channel Flow, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 5, pp.59-78, 1973.
- 2) Webel, G., Schatzmann, M.: Transverse Mixing in Open Channel Flow, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 4, pp. 423-435, 1984.
- 3) 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.