

水工学シリーズ 14-A-5

フリーソフトiRICを用いた河川の流れ，  
河床変動，河岸浸食予測の実践

北海道大学 教授

清水康行

北海道大学 学術研究員

久加朋子

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

# フリーソフトiRICを用いた河川の流れ，河床変動，河岸浸食予測の実践

## Practice of numerical calculation of the flow, sediment transportation and bed validation using the free iRIC software

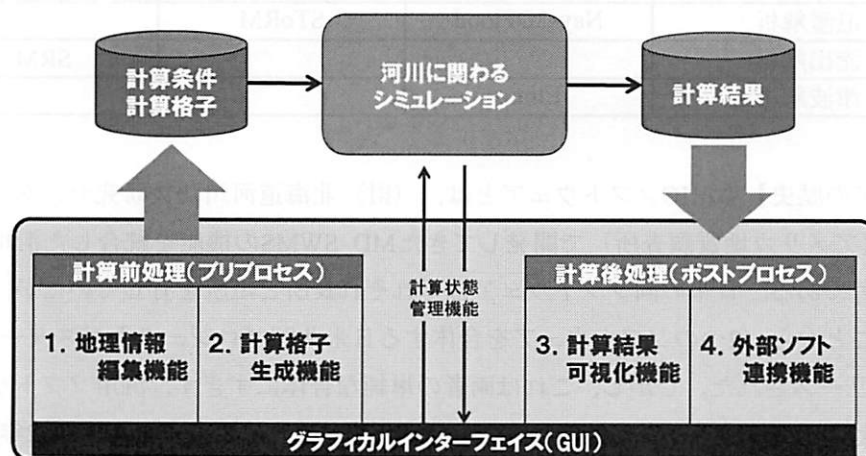
清水 康行, 久加 朋子  
Yasuyuki SHIMIZU, Tomoko KYUKA

### 1. はじめに

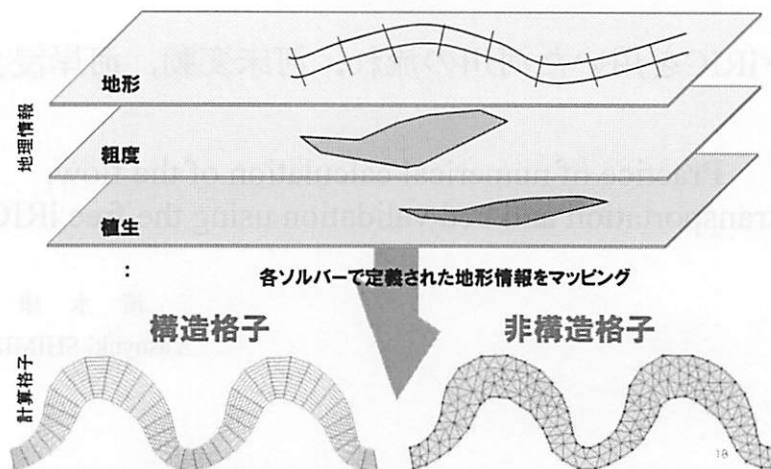
iRIC (International River Interface Cooperative) とは，世界中の研究者や技術者，行政担当者，市民らの「河川にかかわる技術や事業，考え方」に対する相互理解促進を目的とする，数値シミュレーション技術を軸とする国際的な共同体である。iRICでは，ユーザーインターフェースを備えた数値解析ソルバー（iRICソフトウェア）を無償提供すると共に，開発者とユーザーが情報交換する場を提供している。

iRICソフトウェアが備える主な機能は，図—1に示す通りである。iRICソフトウェアは，計算前処理部分（プリプロセス），河川解析プログラム（ソルバー），計算後処理部分（ポストプロセス）の三つの要素が，GUIにより結合された構成となっている。プリプロセスでは，地理情報編集機能と計算格子生成機能が搭載されている（図—1）。地理情報として読み込めるデータの種類には，河川測量データと座標点標高データがある。その他にも背景画像を読み込み，その情報を参考にGUI上でポリゴンを作成することで，粗度係数の値や高水敷と低水敷，複雑な形状の植生域や構造物の位置などを指定することができる。一方，計算格子生成機能では，図—2に示す構造格子や非構造格子，その他にも直線水路，蛇行水路（サインジェネレイティッドカーブ，木下カーブ），ジグザグ型の水路形状など，「多機能格子生成ツール」によって規則的な形状を有する水路の計算格子を作成することができる。その後，図—2のように，各計算格子に上述した地理情報の属性をマッピングして与えることができる。

一方，ポストプロセスでは，計算結果を可視化することができる（図—1）。可視化のためのウインドウは，二次元可視化ウインドウと三次元可視化ウインドウ，一次元グラフの3つが用意されている。これらの主な可視化機能は，計算結果（水深や河床高などのスカラー値）のカラーコンター表示，流速ベクトルの表示，流線表示，アニメーション機能によるコンター図の動画やパーティクルトレースの表示等である。さらに，iRICソフトウェアでは，計算結果を他のソフトウェアに対応したフォーマットでエクスポートし，その他の商用ソフトやフリーソフトを用いて計算結果を可視化することも可能である（外部ソフト連携機能）。



図—1 iRICソフトウェアの基本構成 (<http://i-ric.or.jp/>)



図—2 計算格子生成機能と地理情報マッピングのイメージ

## 2. iRIC の平面二次元ソルバーNays2DH

### 2.1. Nays2DH の概要

iRIC Ver.2.2に搭載されているソルバーの一覧を表—1に示す。Nays2DHは、河川における流れ、河床変動、河岸侵食の計算を行うため、2014年6月からiRIC Ver.2.2 に搭載された新しい平面二次元ソルバーである。従来のiRIC (Ver.2.1以下) には、平面二次元ソルバーとしてNays2D, Morpho2D, FaSTMECH 等が搭載されていた。Nays2DHとは、複数のソルバーによる混乱を避けるため、既存ソルバーのNays2D (北海道大学の清水康行により開発された平面二次元の河床変動ソルバー) とMorpho2D (京都大学の竹林洋史により開発された平面二次元ソルバー) を統合し、より多機能でユーザー要望に幅広く対応できるように開発されたものである。

表—1 iRIC に搭載されるソルバーの一覧

| 計算条件        | 構造格子                 | 非構造格子             | 格子なし |
|-------------|----------------------|-------------------|------|
| 1次元流れ       | CERI 1D              |                   |      |
| 2次元流れ, 河床変動 | Nays2DH              | Mflow_02          |      |
|             | FaSTMECH             | SToRM             |      |
|             | Delft flow<br>(流れのみ) | River2D<br>(流れのみ) |      |
|             | NaysEddy             |                   |      |
| 3次元流れ, 河床変動 | NaysCUBE             |                   |      |
| 氾濫解析        | Nays2DFlood          | SToRM             |      |
| 流出解析        |                      |                   | SRM  |
| 津波解析        | Elimo                |                   |      |

【iRICソフトウェアの歴史】 iRICソフトウェアとは、(財)北海道河川防災研究センターで開発してきたRIC-NaysとUSGS (アメリカ地質調査所) で開発してきたMD\_SWMSの機能を統合した河川の流れ・河床変動解析ソフトウェアである。日米の両ソフトウェアはそれぞれ長所と短所を有していたが、目指すところはほぼ同じであったことから、2つのソフトウェアを合体する日米共同プロジェクトがスタートし、2010年4月にiRIC Ver.1.0がリリースされた。しかし、これは両者の単純な合体にすぎず、汎用ソフトウェアとしての完成度は高いとはいえず、使い勝手や安定性においても課題が残されていた。そこで、2012年5月、iRIC Ver.2.0が満を持してリリースされた。iRIC Ver.2.0は、iRIC Ver.1.0とは全く異なるGUIを備え、使い勝手や安定性な



どが大幅に強化されている。同時に、搭載されるソルバー数も飛躍的に増えている。

Nays2DHは、Nays2Dの特徴である合流点モデルや河岸侵食モデルなどと、Morpho2Dの特徴である掃流砂・浮遊砂混在場の混合粒径モデルや上流端の土砂供給量の変化、掃流砂層モデル、固定床モデルなどを結合させた適用範囲の広いソルバーである。Nays2DHには、【スタンダード版】と【アドバンスド版】の2つのソルバー・タイプが搭載されている。入門編であるスタンダード版は、一般的な河川区間の流況解析と河床変動解析計算を行うことができる。一方、アドバンスド版では、混合粒径多層モデルや河川合流点モデル、ホットスタート機能といった、より複雑な境界条件や初期条件に対応するための多様な機能を選択することが可能である。なお、Nays2DHのバージョン1.0には両ソルバーの機能の一部（浸透流の解析など）が組み込まれていないなどの改良点が残されている。これらの点は今後随時更新していく予定である。

## 2.2. 流れ場の計算モデルの特徴

Nays2DHの流れの計算モデルの特徴を表—2に示す。

表—2 Nays2DHの流れの計算モデルの特徴

| 計算条件       | 特徴                                                            |
|------------|---------------------------------------------------------------|
| 座標系        | 一般曲線座標系を採用しており、複雑な境界や河床地形を考慮可能                                |
| 合流点の計算     | 本川と支川の合流計算に対応                                                 |
| 乱流場の計算方法   | 渦動粘性係数一定、ゼロ方程式モデル、k-εモデルから選択可能                                |
| 移流項の差分法    | 風上差分法(1次精度)とCIP法 <sup>※1)</sup> から選択可能                        |
| 上下流端の境界条件  | 周期境界条件、下流端水位の設定、上流端流速など、さまざまな設定が可能。これにより、限られた観測資料から境界条件を設定できる |
| 初期水面形      | 一定勾配、折れ線、等流計算、不等流計算から選択可能                                     |
| 底面の摩擦の評価方法 | マンニングの粗度係数を用いて設定                                              |
| 計算領域中の障害物  | 計算セル単位で考慮可能。これにより、橋脚など河川構造物を簡単に計算に取り入れることができる                 |
| 植生の流れへの影響  | 抗力という形で考慮可能。植生の密生度と植生高は、任意の実数値でセル単位ごとに指定することができる              |

## 2.3. 流砂と河床変動の計算モデルの特徴

Nays2DHの流砂と河床変動の計算モデルの特徴を表—3に示す。

表—3 Nays2DHの流砂と河床変動の計算モデルの特徴

| 計算条件    | 特徴                                                                           |
|---------|------------------------------------------------------------------------------|
| 河床変動計算  | 流況計算と合せて河床変動計を行うかどうかを選択可能                                                    |
| 流砂の種類   | 掃流砂のみと掃流砂+浮遊砂から選択可能                                                          |
| 河床材料    | 均一粒径と混合粒径の2種類から選択可能。混合粒径を選択した場合、粒度分布の変化を深さ方向に多層で記憶させることができる                  |
| 固定床     | 固定床上の流砂移動と河床変動を考慮した計算を行うことができる。また、河床高とは別に、固定床面の高さを設定することも可能。                 |
| 掃流砂量式   | Meyer-Peter and Muller式および芦田・道上式から選択可能。また、掃流砂ベクトルの計算は、渡邊の式および芦田・江頭・劉の式から選択可能 |
| 浮遊砂浮上量式 | Lane-Kalinske式と板倉・岸式から選択可能                                                   |
| 斜面崩落    | 河床の角度がある限界角度を超えたとき、斜面崩落が生じるモデルを導入している                                        |

<sup>※1)</sup>高次精度差分法の一つ。3次多項式を補間関数として使用することで、数値拡散を抑え、局所的な高精度補間ができる。

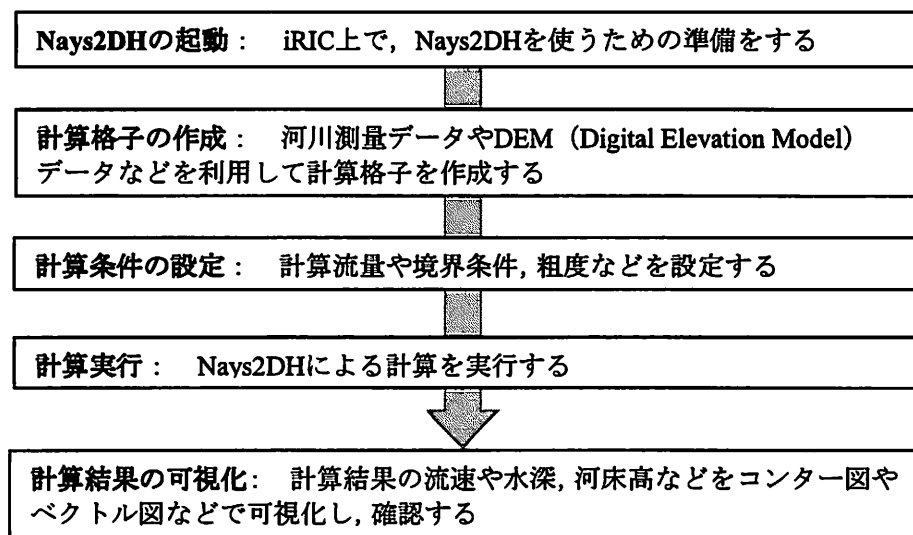
|      |                                                                                              |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 河岸浸食 | 河岸浸食を考慮可能（河岸移動量は河岸からの流砂量と河床変動量に応じたものになる）。また、河岸浸食に伴い河道幅が変化した場合、それにあわせて計算格子が自動的に移動するように設定されている |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------|

## 2.4. その他の特徴

Nays2DHの上述以外の機能には、ホットスタート（前回の計算結果の途中の状態から、継続して計算を行うことに対応）やOpenMPによる並列化機能（一つの計算に対して複数のCPUを使って計算を行うことができ、計算時間の短縮が見込まれる）がある。

## 3. iRIC ソフトウェアの Nays2DH ソルバーを使った河川の流れ、河床変動、河岸浸食予測の実践

ここでは、河川横断測量データから計算格子を作成する方法を習得すると共に、実河川における流れと河床変動の解析手順を理解し、計算結果の可視化方法までを確認する。iRIC上で、Nays2DHを使って解析する手順は図—3の通りである。



図—3 Nays2DHの計算手順

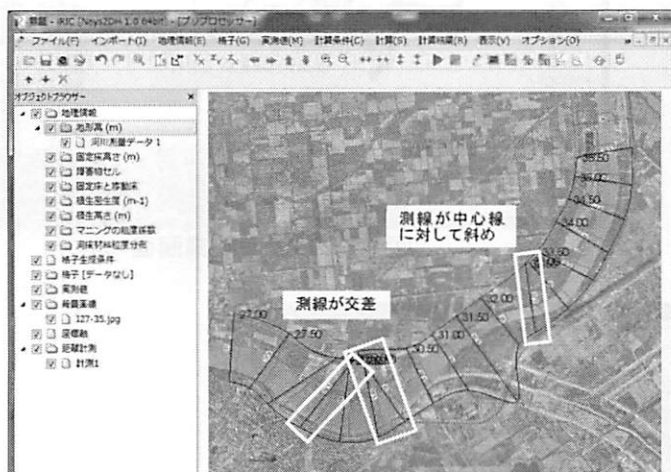
### 3.1. 計算格子の作成

河川横断測量データを利用して計算格子を作成する。手順は次の通りである。

- 1) メニューバーの「インポート」|「地理情報」|「地形高」を選択し、【27-35.riv】を読み込む。次に、河川中心点の定義を【左岸と右岸の midpoint】に設定する。これより、横断測量データが描画される。
- 2) オブジェクトブラウザーの「背景画像」を右クリックし、「画像の選択」を選び、【I27-35.jpg】を読み込む。その後、背景画像の移動・拡大・縮小を行い、背景画像と横断測量データの位置を合わせる（図—4のように）。背景画像の操作は、左クリック押すことで平行移動、右クリック押すことで回転、中央ボタンを押すことで拡大・縮小できる。また、オブジェクトブラウザーの「背景画像」を右クリックしてプロパティを選ぶことで、画像の倍率を変更できる。
- 3) 図—4では、いくつかの横断測線が水路中心線に対して斜めであったり、重なったりしている。このような場合、そのまま格子を生成すると格子が変形し、計算精度が著しく低下する。そこで、図—4のコメント

トを参考に測線を【回転】させ、測量線の重なりを修正する。

- 4) 次に、同じく図—5のコメントを参考に、測線を修正することによって横断線が左右岸の堤防を越えてしまった部分の測線を【伸縮】させ、修正する。

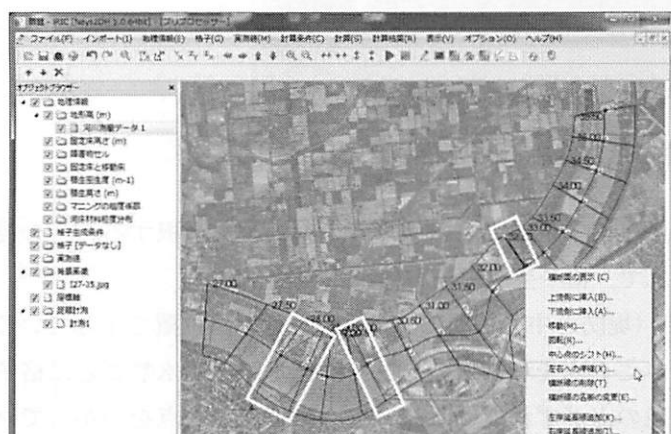


図—4 横断測線の回転による調整

・オブジェクトブラウザーの | 地理情報 | 地形高(m) | 河川測量データ1 | を ☒ 状態 (アクティブな状態) にする。

・測線を回転させる場合：

修正したい測線の中心線にある青丸をクリックする。すると、左岸・右岸にそれぞれ赤丸・緑丸が現れるので、これをクリックする。次に、下のマークが現れたらマウス操作で測線を回転させる。



図—5 横断測線の左右への伸縮による調整

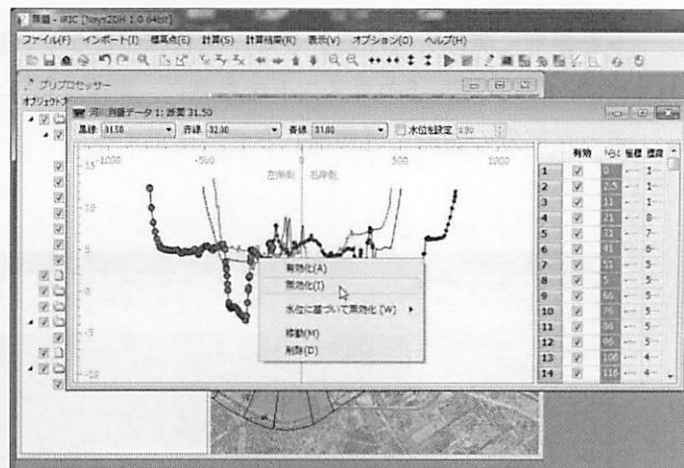
・測線を伸縮させる場合：

修正したい測線の上で右クリックし、【左右への伸縮】を選択する。伸縮率を【0.9】に設定し、測線が堤防内に収まるように修正する。

- 5) 次に、図—6のように横断測線が一つだけ左岸に大きく張り出しているのを修正する。まず、修正したい測線の上をダブルクリックし、図—7に示す横断面編集画面を表示させる。図—7を参考に、左岸側の不必要な部分をマウスで囲んで選択し、右クリックした後、【無効】を選択する。これより、測線の横断面形状を調節する。
- 6) 次に、このままでは水路中心線（青い点で表示）が低水路中央線からずれているので調整する。修正したい測線をクリックして選択し、Shiftキーを押しながら、水路中心点の青丸に近づけると、マウスで中心点（青い点）を動かすことができる。これより、図—8のように水路中心点と低水路中心線を合わせる。



図—6 左岸に張り出した横断測線

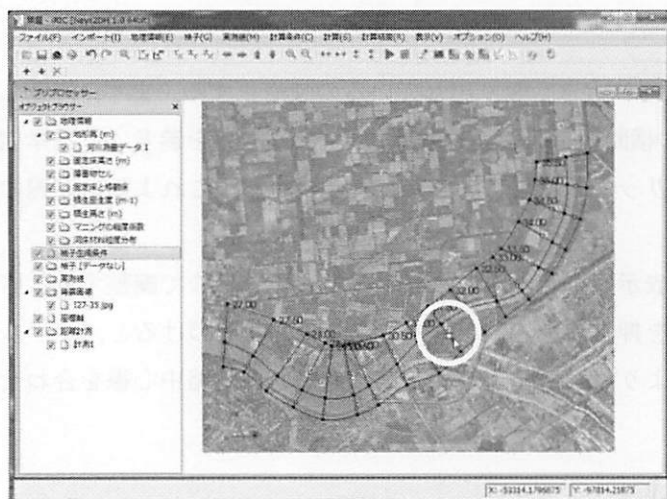


図—7 横断面編集画面



図—8 水路中心線と低水路中心線を合わせた状態

- 7) 計算格子を作成する。メニューバーの「格子」格子生成アルゴリズムの選択」を選択する。その後、「河川測量データから生成」を選択する。これで、格子生成モードになる（図—9）。
- 8) 図—9の画面上において表示される黄色い点（堤防と中心線間にある）は、低水路位置を示している（これは、rivファイルであらかじめ指定する）。この点を利用することで、低水路と高水敷ごとに格子が生成できる。また、低水路と高水敷を示す黄色の点がずれている部分は、修正したい点をつかんでマウス操作により修正する。



図—9 低水路位置（黄色い点で表示）の修正

・オブジェクトブラウザーの「地理情報」格子生成条件」を☑状態（アクティブな状態）にする。

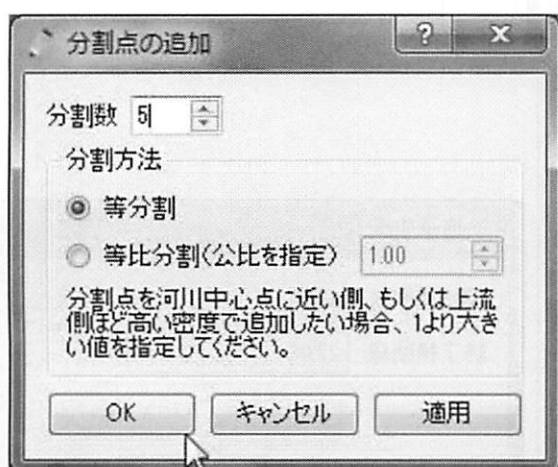
・修正したい点をつかんでマウス操作により修正する。



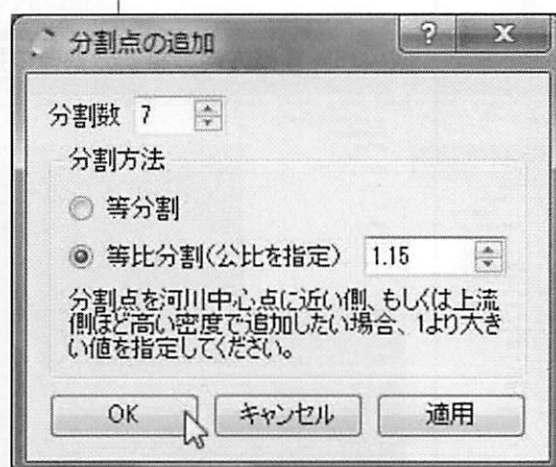
図—10 格子分割数の設定

・横断線をマウスでクリックして、青い線が出てきている状態にする。

・右クリックし、【分割点の追加】をクリックする。



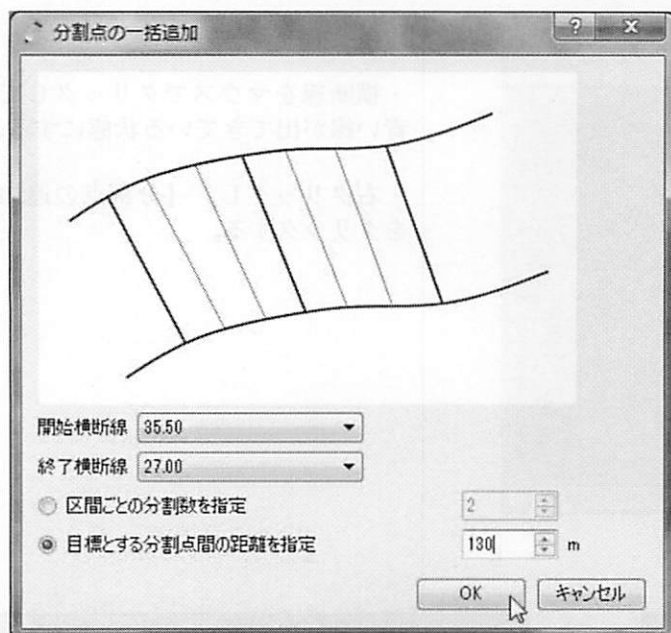
図—11 低水路の格子分割点の追加



図—12 高水敷の格子分割点の追加

- 9) 格子分割数を設定する。まず、図—10に示すように横断線をクリックし、青い線が表示された状態にする。次いで、青い線を右クリックし、分割点の追加を選択する。これより、図—11に示すダイアログが表示される。図—11～図—12を参考に、低水路の左右岸、および高水敷の左右岸の格子分割数を指定する。なお、等比分割を行う際の公比は、0.8～1.2の範囲内に留める方が良い。これは、隣り合う格子幅が急激に変化すると数値的な不安定を引き起こし、数値解の精度が低下しやすくなるためである。これは、他の作業でも同様である。
- 10) 9)の作業にて横断方向の格子分割数が指定されたので、次に縦断方向を指定する。メニューバーにて、| 格子 | 格子生成条件 | 分割点の一括追加 | を選択する。図—13を参考に、ダイアログ画面にて各横断測線間の縦断方向の格子分割数を一括指定する。これより、図—14のように黄色い点（格子の分割点）が各横断測線上に表示された状態になる。
- 11) 次に、分割点を基に計算格子を生成する。メニューバーにて | 格子 | 格子生成 | を選択すると、格子生成ダイアログが立ち上がるので、図—15を参考に値を設定し、【OK】を選択する。これより、図—16に示す計算格子が生成される。





図—13 縦断方向の格子分割数の指定

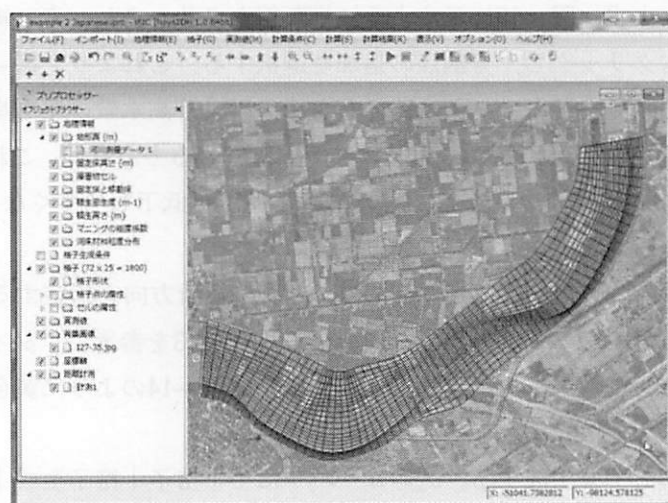
- ・ 目標とする分割点間の距離：  
【130 m】に設定する。



図—14 格子分割点の設定（黄色い点で表示）



図—15 分割点を基に計算格子を生成

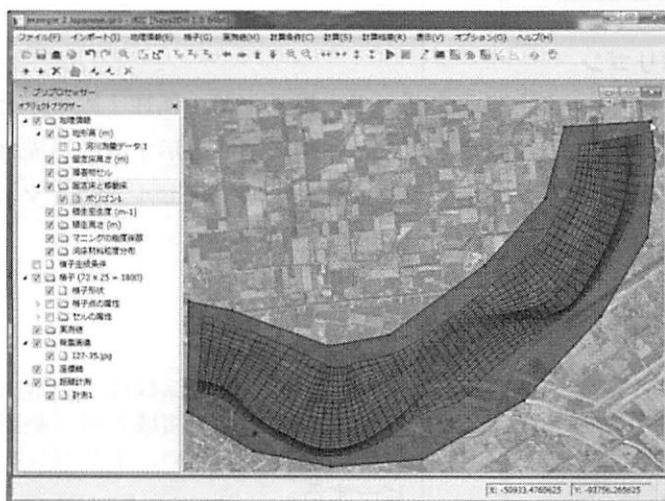


図—16 計算格子が生成された状態

### 3.2. セル属性の設定

セルの属性として、低水路を移動床、高水敷を固定床とし、それぞれに別々の粗度係数を設定する。手順は次の通りである。

- 1) オブジェクトブラウザーの | 地理情報 | 固定床と移動床 | を右クリックし、【追加】→【ポリゴン】を選択する。
- 2) 図—17のコメントを参考に、マウスで計算領域全体を囲むようにポリゴンを作成する。ポリゴン作成後、セル属性を指定するダイアログが立ち上がるので、セル属性を高水敷として【固定床】に指定する。
- 3) 同様の操作で、図—18を参考に低水敷のポリゴンを作成し、セル属性を低水敷として【移動床】に指定する。これより、図—19に示すような高水敷と低水敷を分けたポリゴンが作成される。
- 4) 次に、高水敷と低水敷のポリゴンにマンシングの粗度係数を設定する。オブジェクトブラウザーの | 地理情報 | 固定床と移動床 | ポリゴン1 | を右クリックし、【コピー】を選択する（図—20）。すると、図—21に示すダイアログが立ち上がるので、【マンシングの粗度係数】の情報をを選択する（ここでは、マンシングの粗度係数を設定したい場所が固定床と移動床のポリゴン領域と同じなので、ポリゴンをコピーする）。
- 5) 同様に、オブジェクトブラウザーの | 地理情報 | 固定床と移動床 | ポリゴン2 | をコピーする。
- 6) 次に、オブジェクトブラウザーの | 地理情報 | マンシングの粗度係数 | ポリゴン1 | を選び、図—22を参考に高水敷のマンシングの粗度係数を【0.04】に設定する。同様に、ポリゴン2には低水敷のマンシングの粗度係数として【0.02】を設定する。
- 7) この段階では、まだ計算格子にセル属性は反映されない。そこで、計算格子にセル属性をマッピングするために、メニューバーの | 格子 | 属性のマッピング | 実行 | を選択する（図—23）。



図—17 ポリゴンによる高水敷領域の指定

- ・左クリックでポリゴンの点を順に指定し、計算領域全体を囲む。

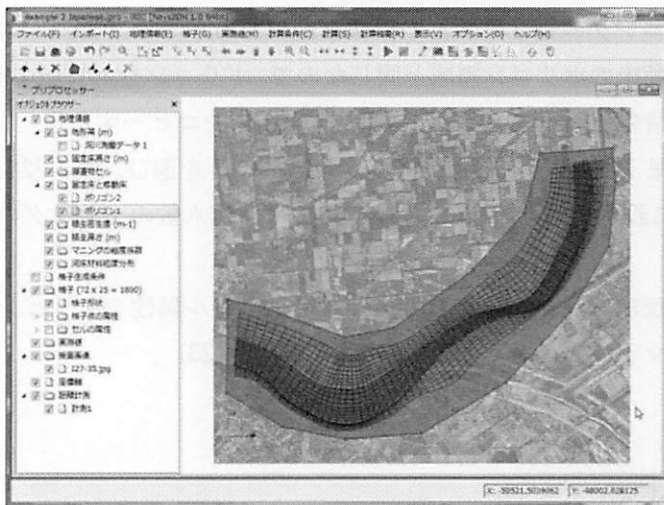
- ・範囲の指定を終了するときは、Enterキーを押す。

- ・セル属性を高水敷として【固定床】に設定する。



図—18 ポリゴンによる低水数領域の指定

・ポリゴン作成後、セル属性を低水数として【移動床】に設定する。

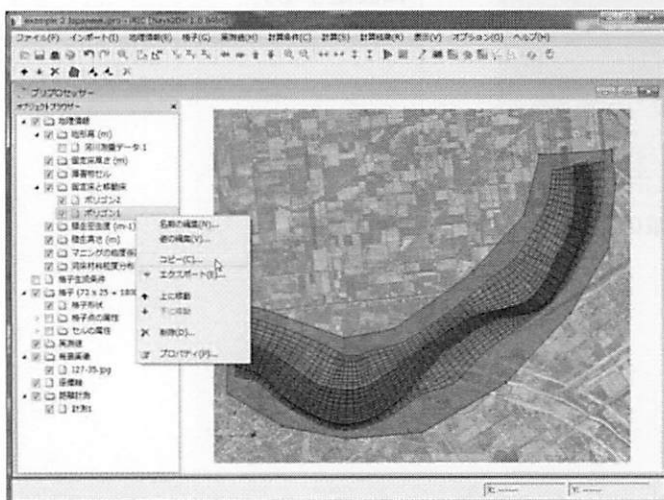


図—19 高水数と低水数を分けたポリゴン

・セル属性は、オブジェクトブラウザーの中で順序が上にあるポリゴンほど優先される。

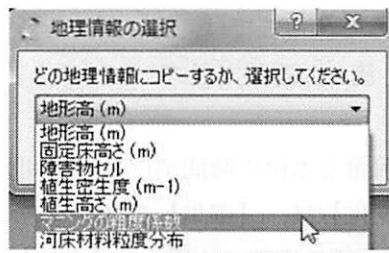
・このため、計算領域全体を指定したポリゴン1の上に、低水路を指定するポリゴン2を作ることによって、低水路と高水数を分けて設定することができる。

- 8) マッピングが成功したかを確認するには、オブジェクトブラウザーの | 格子 | セル属性 | 固定床と移動床 | を図の状態にする。これより、図—24に示すような固定床領域と移動床領域を示す画像が描画される。同様に、マンニングの粗度係数についても、オブジェクトブラウザーの | 格子 | セル属性 | マンニングの粗度係数 | を図の状態にすることで確認できる。

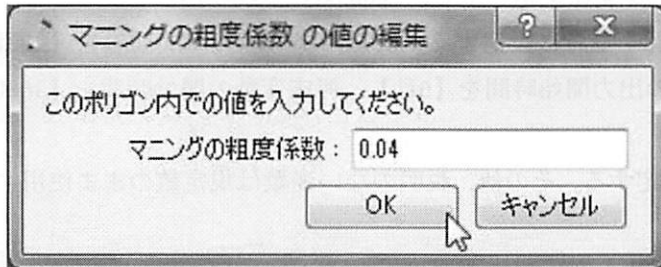


図—20 ポリゴンによる高水数領域の指定

・マンニングの粗度係数は、固定床と移動床のポリゴン領域と同じ範囲を対象に指定するため、ポリゴンをコピーする。



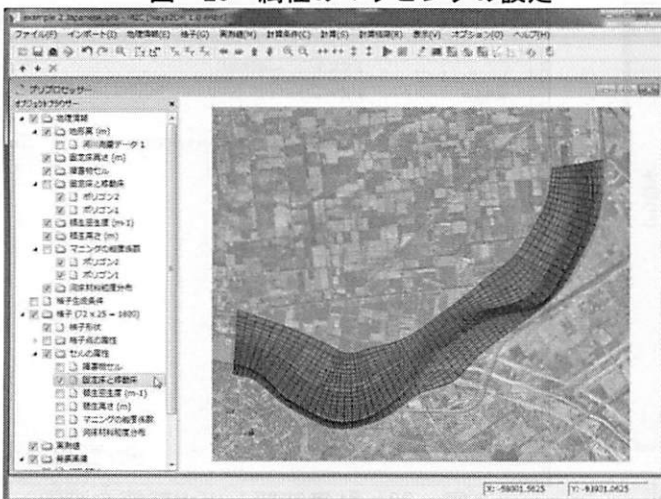
図—21 高水敷の格子分割数



図—22 マンニングの粗度係数の設定



図—23 属性のマッピングの設定



図—24 計算セルに反映されたセル属性の確認

・ポリゴンをコピーする場所を選択する。

・マンニングの粗度係数を設定する。

・低水路を指定したポリゴン:【0.022】に設定する。

・高水敷を指定したポリゴン:【0.04】に設定する。

・メニューバーの | 格子 | 属性の マッピング | 実行 | を選択する。これより、高水敷と低水敷、およびマンニングの粗度係数の設定が計算領域の計算セルに反映される。

・オブジェクトブラウザーの | 格子 | セル属性 | 固定床と移動床 | を 図 の状態にする。これより、セル属性の設定が計算セルに反映されたことを確認できる。

### 3.3. 計算条件の設定

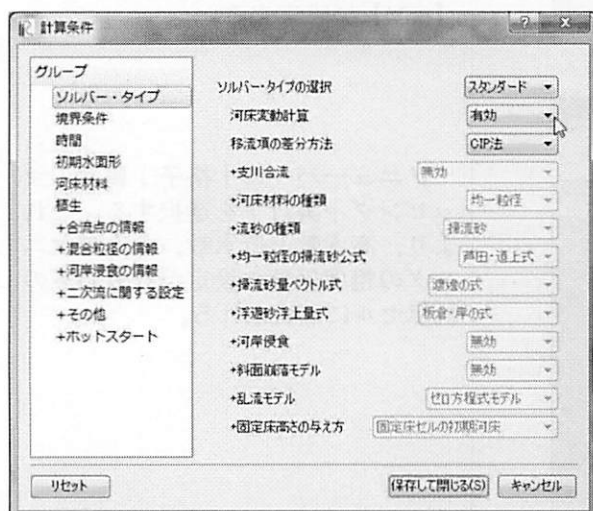
Nays2DH の計算に必要な条件は、メニューバーの | 計算条件 | 設定 | にて設定する。

1) Nays2DHでは、ソルバー・タイプを【スタンダード】と【アドバンスド】から選択できる。アドバンス

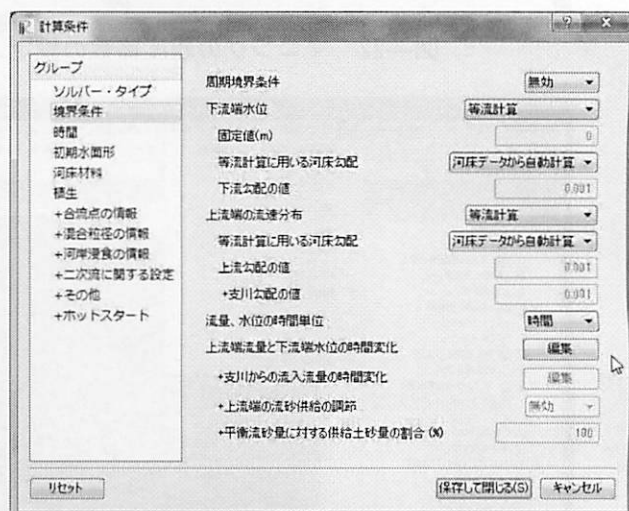


ドでは、図—25に示す【+】のある項目の選択が可能となる。ここでは、図—25を参考に、ソルバー・タイプを【スタンダード】に、河床変動計算を【有効】に、流れの運動方程式の移流項の差分方法を【CIP法】に設定する。

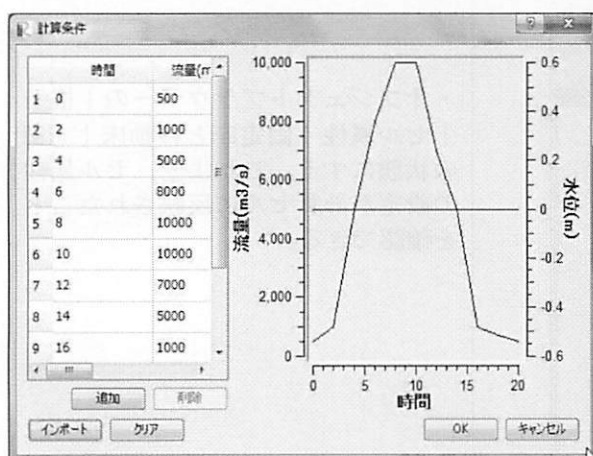
- 2) 境界条件は、図—26を参考に設定する。図—26では、流量と水位の時間単位を【時間】で与えている点に注意する。次に、【上流端流量と下流端水位の時間変化】は、【編集】をクリックし、図—27に示すダイアログ画面にて与える。上流端流量は、ダイアログ画面の下部に位置する【追加】か【インポート】で与えることができる。ここでは、流量データをインポートし、【qh.txt】を読み込む。
- 3) 計算時間と出力時間に関する設定は、図—28を参考に設定する。計算結果の出力時間間隔を【200秒】、計算タイムステップを【0.5秒】、計算結果の出力開始時間を【0秒】、河床変動の開始時間を【3600秒】とする。
- 4) 河床材料は、平均粒径 (mm) を【0.4】に設定する。その他、説明のない変数は規定値のまま使用する。



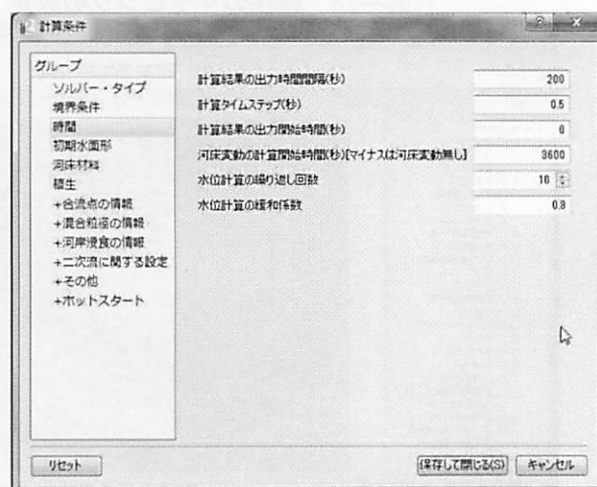
図—25 ソルバー・タイプの選択



図—26 境界条件の選択



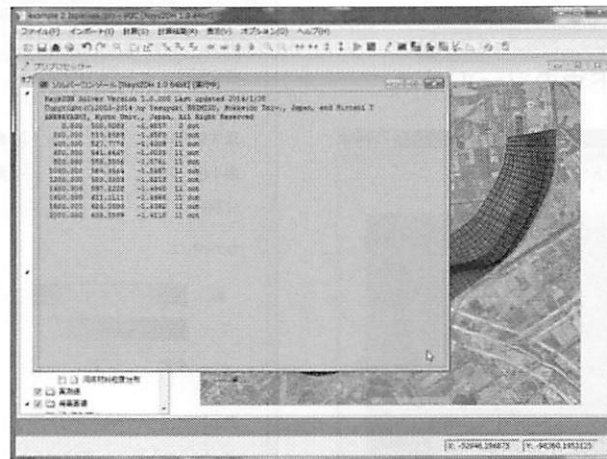
図—27 上流端流量の設定



図—28 計算時間と出力時間の設定

### 3.4. 計算の実行

計算は、メニューバーの | 計算 | 実行 |, もしくはツールバーの ► をクリックすることで実行される。計算開始後は、ソルバーコンソール (図—29) が立ち上がるので、計算状況を確認する。ソルバーコンソールに示される値は、左から順に【時間 (秒)】、【流量 (m³/s)】、【下流端水位 (m)】である。また、一番右に表示される【out】とは、計算結果を記録したことを示すものである。

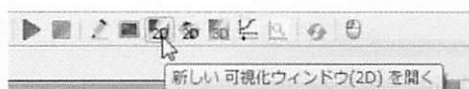


図—29 ソルバーコンソール

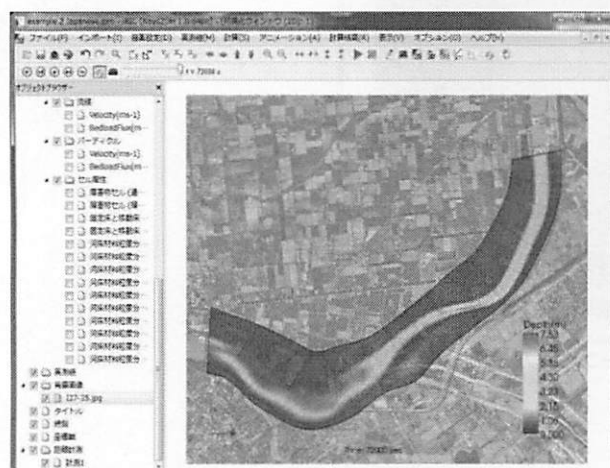
### 3.5. 計算結果の可視化—1（水位コンター図の描画）

計算終了後、出力された計算結果を可視化することで計算結果の確認を行う。

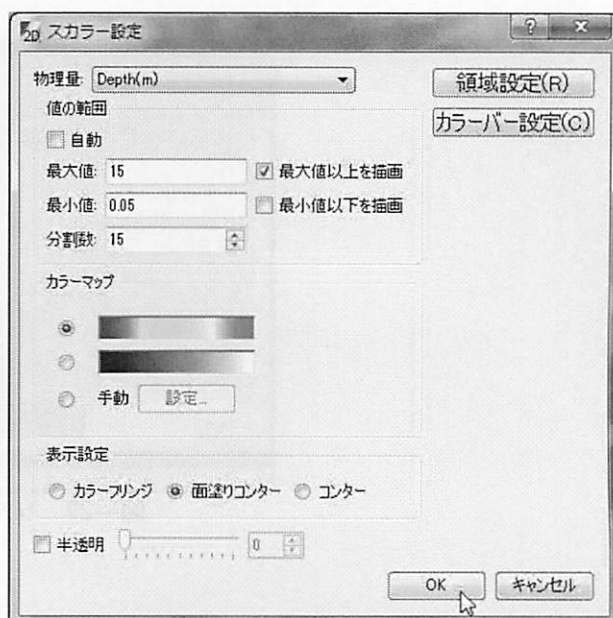
- 1) 計算結果の可視化を開始するには、メニューバーの | 計算結果 | 新しい可視化ウィンドウ(2D)を開く | を選択するか、図—30に示すツールバーの【新しい可視化ウィンドウ (2D)】アイコンをクリックする。図—30に示すアイコンは、左から順に【2Dウィンドウ (平面的な可視化用)】，【鳥瞰図ウィンドウ (立体的な可視化用)】，【一次元グラフ (一次元的な可視化用)】である。
- 2) 【新しい可視化ウィンドウ (2D)】を選択すると、可視化用の画面が立ち上がる。ここでは、オブジェクトブラウザーに表示される要素を描画画面に反映させることができる。たとえば、| iRICZone | スカラー | Depth | と、| iRICZone | 背景画像 | の2つを ☒ の状態にすることで、図—31に示す画像が可視化される。
- 3) 次に、コンター図のカラーレンジを固定して、小さい水深を可視化しないように設定する。オブジェクトブラウザーの | iRICZone | スカラー | を右クリックし、【プロパティ】を選択する。プロパティを選択すると、図—32に示すスカラー設定画面が表示される。次に、コンター図のカラーバーの最大値や最小値、分割数など変更する。図—32を参考に、【自動】のチェックを外し、凡例の最大値を【15m】，最小値を【0.05m】，【最小値以下の描画】のチェックを外す。コンターの表示設定は【面塗りコンター】を指定し、【半透明】のチェックを外す（コンターの表示設定はカラーフリンジ標準になっているが、面塗りコンターの方が明瞭な色を表示できる。ただしその分、描画にかかる負荷は大きくなる）。



図—30 可視化ウィンドウのツールバー



図—31 水位コンター図と背景画像の可視化

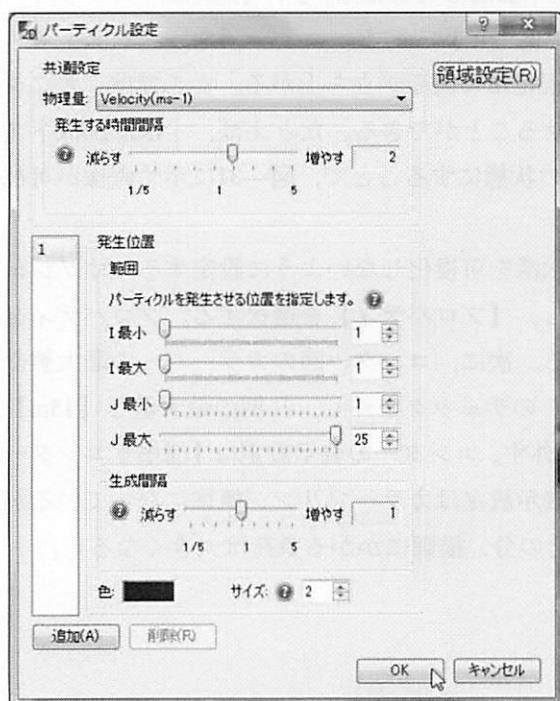


図—32 スカラー設定画面

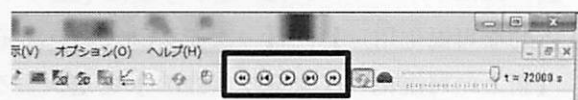
### 3.6. 計算結果の可視化—2（パーティクルの描画と画像のアウトプット）

ここでは、上流端からパーティクルを流して流れを可視化する。

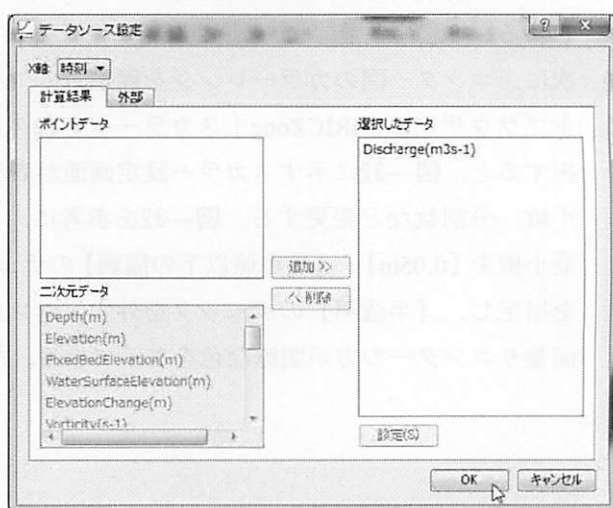
- 1) オブジェクトブラウザーの | iRICZone | パーティクル | を右クリックし、 | プロパティ | を選択する。



図—33 パーティクルの設定



図—34 アニメーション（動画）用のツールバー

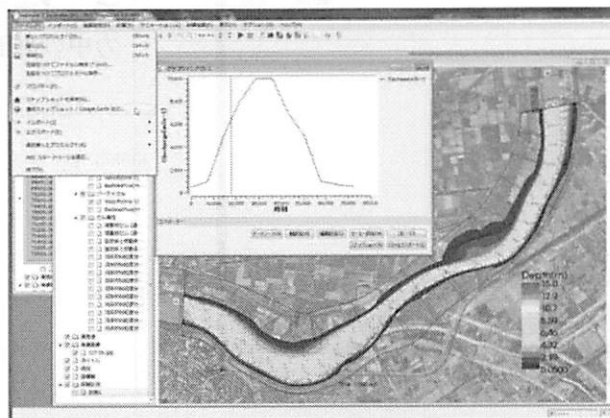


図—35 データソースの選択

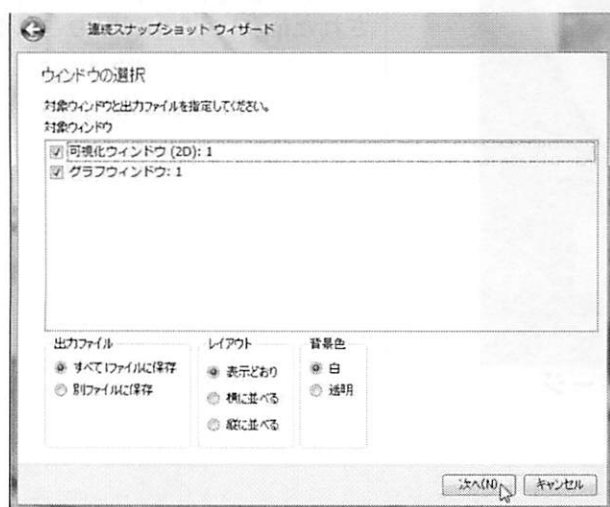
- 2) 図—33を参考に、パーティクルの設定ダイアログにて値を指定する。ここでは、発生する時間間隔を【2】に設定する。なお、発生させるパーティクル数の値を大きくするほど、描画の処理時間が必要となる。
- 3) 図—34に示すアニメーションツールバーを使って結果を確認する。ここでは、描画の表示間隔を設定することも可能である。
- 4) さらに、設定したハイドログラフも同時に描画する。メニューバーにて、 | 計算結果 | 新しいグラフウィンドウを開く | を選択する。図—35を参考に、X軸に【時刻】を指定し、ポイントデータにある

【Discharge(m3-1)】を選択して、【追加】を選択する。これより、図—36に示す画像が可視化される。

- 5) 最後に、可視化された画像をファイルとして出力する。メニューバーの | ファイル | 連続スナップショット/Google earth出力 | を選択する。図—37～図—40を参考に、画像を出力する。

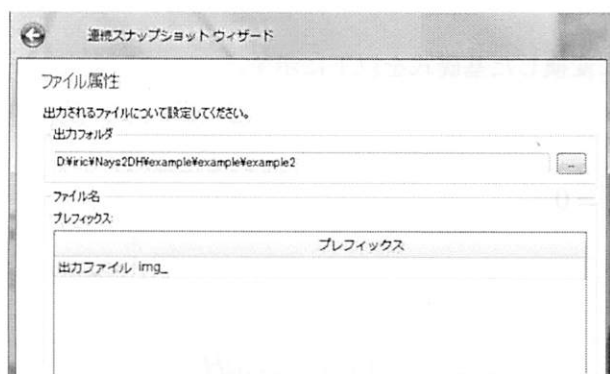


図—36 水位のコンター図とハイドログラフが可視化された状態



図—37 連続スナップショットと動画のエクスポート

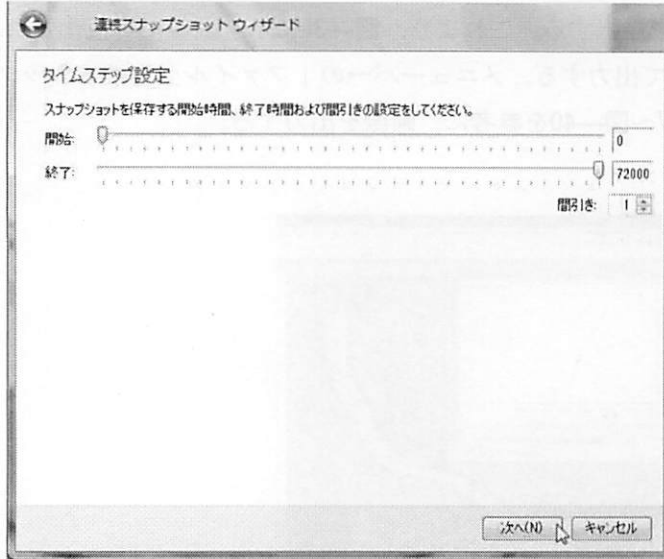
- ・対象ウィンドウ：  
【両方】を選択する。
- ・出力ファイル：  
【すべて1ファイルに保存する】  
を選択する。
- ・レイアウト：  
【表示どおり】を選択する。



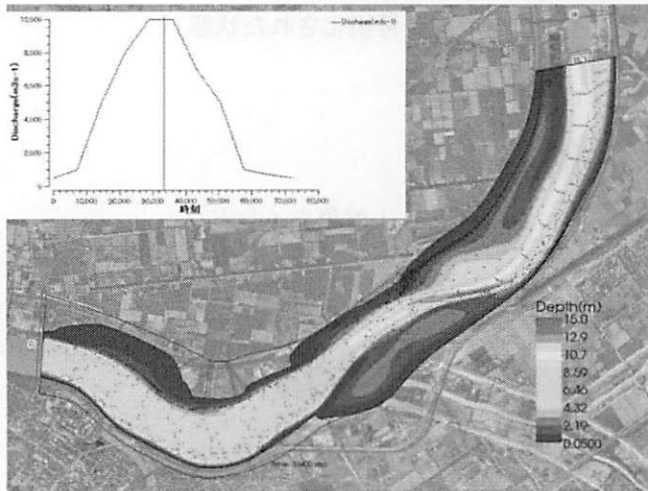
図—38 属性のマッピングの設定

- ・出力フォルダを指定する。
- ・ファイルフォーマット：【jpg】





図—39 属性のマッピングの設定



図—40 出力されるjpgファイルのイメージ

・ 出力する開始時刻と終了時刻を指定する。

・ 設定を終了すると確認画面が出るので、【完了】を選択する。すると、出力中の画面が表示される。

・ 以上の操作により、左に示す水位のコンター図と、ハイドログラフが表示されたjpgファイルが出力される。

#### 4. Nays2DH の基礎方程式と計算手法

##### 4.1. 一般曲線座標系における流れの基礎式

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]

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

[運動方程式]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = -g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = -g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ - \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (3)$$

ただし,

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_2 = 2 \left( \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (4)$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2}, \quad \alpha_5 = 2 \left( \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right), \quad \alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \quad (5)$$

$$D^\xi = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \right] \quad (6)$$

$$D^\eta = \left( \xi_x \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] + \left( \xi_y \frac{\partial}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial}{\partial \eta} \right) \left[ v_i \left( \xi_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \right] \quad (7)$$

$$\xi_x = \frac{\partial \xi}{\partial x}, \quad \xi_y = \frac{\partial \xi}{\partial y}, \quad \eta_x = \frac{\partial \eta}{\partial x}, \quad \eta_y = \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (8)$$

$$u^\xi = \xi_x u + \xi_y v, \quad u^\eta = \eta_x u + \eta_y v \quad (9)$$

$$J = \frac{1}{x_\xi y_\eta - x_\eta y_\xi} \quad (10)$$

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様な条件を仮定して簡略化している。

1. メトリック係数の2階微分量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される。

$$D^\xi \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( v_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( v_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \quad (11)$$

$$D^\eta \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( v_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( v_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \quad (12)$$

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。

$$\frac{\Delta \xi}{\Delta \tilde{\xi}} = \xi_r, \quad \frac{\Delta \eta}{\Delta \tilde{\eta}} = \eta_r \quad (13)$$

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。

$$\xi_x^2 + \xi_y^2 = \xi_r^2 (\tilde{\xi}_x^2 + \tilde{\xi}_y^2) = \xi_r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \xi_r^2 \quad (14)$$

$$\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y = \xi_r \eta_r (\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_x + \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_y) = \xi_r \eta_r (-\cos \theta \sin \theta + \cos \theta \sin \theta) = 0 \quad (15)$$

$$\eta_x^2 + \eta_y^2 = \eta_r^2 (\tilde{\eta}_x^2 + \tilde{\eta}_y^2) = \eta_r^2 (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \eta_r^2 \quad (16)$$

$$J = \xi_x \eta_y - \xi_y \eta_x = \xi_r \eta_r (\tilde{\xi}_x \tilde{\eta}_y - \tilde{\xi}_y \tilde{\eta}_x) = \xi_r \eta_r (\sin^2 \theta + \cos^2 \theta) = \xi_r \eta_r \quad (17)$$

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。

## 4.2. 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。Nays2DHでは、乱流場の計算方法として、「渦動粘性係数一定」、「ゼロ方程式モデル」、「 $k-\varepsilon$ モデル」を選択できる。

## 4.3. 底面摩擦の計算方法

Nays2DH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。平均流速公式にマンニング則を適用した場合、(2)～(3)式の河床摩擦係数 $C_f$ は次式で表される。

$$C_f = \frac{g n_m^2}{h^{1/3}} \quad (18)$$

## 4.4. 植生による抵抗の計算方法

Nays2DHでは、植生の抵抗は、植生の抗力係数 $C_D$ と単位体積に占める植生の遮断面積 $a_s$ 、植生高さを用いて設定する。単位体積に占める植生の遮断面積 $a_s$ は清水ら<sup>1)</sup>が提案した以下の式を用いて算出される。

$$a_s = \frac{n_s D_s}{S_s^2} \quad (19)$$

ここで、 $n_s$ は植生本数、 $D_s$ は植生の平均幹径、 $S_s$ はサンプリング格子幅である。

## 4.5. 流砂の基礎方程式

Nays2DHでは、河床変動計算を行う場合、流砂の種類を「掃流砂のみ」と「掃流砂+浮遊砂」の2種類から選択する。また、河床材料については「均一粒径」と「混合粒径」の2種類から選択する。以下では均一粒径の河床変動モデルについて説明する。なお、詳細な説明はNays2DHのソルバーマニュアル<sup>※2</sup>を参照されたい。

### 4.5.1. 無次元河床せん断力

計算終了後、出力された計算結果を可視化することで計算結果の確認を行う。

河床に作用する無次元全せん断力 $\tau_*$ は次式のように表される。

$$\tau_* = \frac{h I_e}{s_g d} \quad (20)$$

ここに、 $h$ は水深、 $I_e$ はエネルギー勾配、 $s_g$ は水中比重、 $d$ は河床材料の粒径である。 $I_e$ にマンニング則を適用すると、 $\tau_*$ は次式のように表される。

$$\tau_* = \frac{C_f V^2}{s_g g d} = \frac{n_m^2 V^2}{s_g d h^{1/3}} \quad (21)$$

ここに、 $V$  ( $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ ) は合成流速である。

#### 4.5.2. 掃流砂量

均一粒径モデルを選択した場合は、水深平均流速の方向( $V$ の方向)の全掃流砂量 $q_b$ はMeyer-Peter and Muller式<sup>2)</sup>と河床勾配の影響を考慮した芦田・道上・劉の式<sup>3-5)</sup>から求めることができる。

・ Meyer-Peter and Muller式

$$q_b = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{s_g g d^3} r_b \quad (22)$$

・ 芦田・道上・劉の式

$$q_b = 17\tau_{*e}^{1.5} \left(1 - K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \left(1 - \sqrt{K_c \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}}\right) \sqrt{s_g g d^3} r_b \quad (23)$$

ここに、有効掃流力 $\tau_{*e}$ は以下のように算出する。

$$u_{*e}^2 = \frac{V^2}{\left(6 + 2.5 \ln \frac{h}{d(1 + 2\tau_*)}\right)^2}, \quad \tau_{*e} = \frac{u_{*e}^2}{sgd} \quad (24)$$

ここに、 $\tau_{*c}$ は無次元限界掃流力で岩垣の式<sup>6)</sup>より算出する。また、河床勾配の影響度合いを表す補正係数 $K_c$ は以下のように算出する。

$$K_c = 1 + \frac{1}{\mu_s} \left[ \left( \frac{\rho}{\rho_s - \rho} + 1 \right) \cos \alpha \tan \theta_x + \sin \alpha \tan \theta_y \right] \quad (25)$$

$\alpha$ は以下のように、 $x$  軸からの河床近傍流速の偏差角である。

$$\alpha = \arctan \left( \frac{v_b}{u_b} \right) \quad (26)$$

$\mu_s$ は静止摩擦係数である。 $\theta_x$ と $\theta_y$ は $x$ と $y$ 方向における局所河床勾配であり、以下のように表される。

$$\theta_x = \arctan \left( \frac{\partial \xi}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial x} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right), \quad \theta_y = \arctan \left( \frac{\partial \xi}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \xi} + \frac{\partial \eta}{\partial y} \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \quad (27)$$

$r_b$ は交換層厚さに関する関数であり、以下のように表される。

$$r_b = 1 \quad E_{sd} \geq E_b, \quad (28)$$

$$r_b = \frac{E_m}{E_{be}} \quad E_{sd} \leq E_{be} \quad (29)$$

ここに、 $E_{be}$ は平衡交換層厚であり、ここでは以下の関係より求められる<sup>7)</sup>。

$$\frac{E_{be}}{d_m} = \frac{1}{c_m \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} \tau_{*m} \quad (30)$$

ここに、 $E_{sd}$ は土層厚、 $c_m$ は交換層の土砂濃度、 $\lambda$ は河床材料の空隙率である。 $E_m$ は交換層厚であり、以下のように表される。



$$E_m = E_{be} \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_m}{1-\lambda} \quad (31)$$

$$E_m = E_{sd} \frac{1-\lambda}{c_m} \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_m}{1-\lambda} \quad (32)$$

#### 4.5.3. 掃流砂量ベクトル

以上の式により求められた全流砂量を、流線曲率による二次流と河床勾配の影響を考慮して $\xi, \eta$ 方向に変換する。Nays2DHでは、渡邊の式<sup>8)</sup>と芦田・江頭・劉の式<sup>3-5)</sup>を選択することができる。

#### 4.5.4. 河床近傍流速の算定

水深平均流の流れに沿って、水深平均流速と河床近傍の流速の関係を次のような単純な関係式を仮定する。

$$\tilde{u}_b^s = \beta V \quad (33)$$

ここに、 $\tilde{u}_b^s$ は水深平均流の流線(以下単純に流線と呼ぶ)に沿った河川近傍の流速である。Engelund<sup>9)</sup>によれば、水深方向の流速分布に放物線分布を用いた場合、 $\beta$ は次式となる。

$$\beta = 3 \frac{1-\sigma}{3-\sigma}, \quad \sigma = \frac{3}{\phi_0 \kappa + 1} \quad (34)$$

ここに、 $\phi_0$ は流速係数(= $V/u_*$ )である。一般に、流線が曲っている場合には二次流(螺旋流)が発生する。Nays2DHでは、二次流の評価として、Engelund<sup>9)</sup>モデルと、水深平均渦度方程式を用いた二次流方程式を解く方法<sup>10,11)</sup>のどちらかの方法を選択する。

#### 4.5.5. 流線の曲率

流線の曲率 $1/r_s$ は次式で表される。

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{V^3} \left[ u^2 \left( \xi_x \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) + uv \left( \xi_y \frac{\partial v}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial v}{\partial \eta} \right) - uv \left( \xi_x \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_x \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) - v^2 \left( \xi_y \frac{\partial u}{\partial \xi} + \eta_y \frac{\partial u}{\partial \eta} \right) \right] \quad (35)$$

#### 4.5.6. 浮遊砂の浮上量

Nays2DHでは、浮遊砂の浮上量式として、Itakura and Kishiの式<sup>12)</sup>とLane-Kalinske<sup>13)</sup>の式を選択できる。

・ Itakura and Kishiの式

$$q_{su} = K \left[ a_* \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \cdot \frac{gd}{u_*} \Omega - w_f \right] r_b \quad (36)$$

$$\Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \cdot \frac{\int_a^\infty \xi \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp[-\xi^2] d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp[-\xi^2] d\xi} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_0} - 1 \quad (37)$$

$$a' = \frac{B_*}{\tau_*} - \frac{1}{\eta_0}, \quad \eta_0 = 0.5, \quad a_* = 0.14, \quad K = 0.008 \quad (38)$$

ここに、 $q_{su}$ は浮遊砂の単位面積当たりの河床からの浮上量である。 $w_f$ は浮遊砂の沈降速度で、Rubeyの式<sup>14)</sup>より求める。 $B_*$ は揚力算定の際の速度に摩擦速度を適用するための換算係数であり、均一粒径の場合は $B_*=0.143$ の一定値が用いられる。

・ Lane-Kalinskeの式

$$q_{su} = 5.55 \left[ \frac{1}{2} \frac{u_*}{w_f} \exp \left( -\frac{w_f}{u_*} \right) \right]^{1.61} w_f r_b \quad (39)$$

#### 4.5.7. 浮遊砂濃度連続式

一般曲線座標系における浮遊砂濃度の連続式は以下の式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{ch}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{u^\xi ch}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{u^\eta ch}{J} \right) = \frac{q_{su} - w_f c_b}{J} \quad (40)$$

ここで、 $c$  は水深平均浮遊砂濃度、 $c_b$  は河床近傍の浮遊砂濃度（基準点濃度）である（拡散項については、簡単のため省略して記述している）。また、基準点濃度 $c_b$  は、水深方向の浮遊砂分布に指数分布を仮定して以下のように求める<sup>15)</sup>。

$$c_b = \frac{\beta_c c}{1 - \exp(-\beta_c)} \quad , \quad \beta_c = \frac{6w_f}{\kappa u_*} \quad (41)$$

#### 4.5.8. 流砂連続式

流れの連続式と同様に、一般座標で表された流砂の連続式は以下の通りである。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{c_m E_m}{J} \right) + (1 - \lambda) \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z}{J} \right) + \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_b^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_b^\eta}{J} \right) + \frac{q_{su} - w_f c_b}{J} \right] = 0 \quad \cdots \quad E_{sd} \geq E_{be} \frac{c_m}{1 - \lambda} \quad (42)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z}{J} \right) = 0 \quad \cdots \quad E_{sd} \leq E_{be} \frac{c_m}{1 - \lambda} \quad (43)$$

ここに、 $z$  は河床高、 $q_b^\xi, q_b^\eta$  は $\xi, \eta$  方向の単位幅掃流砂量の反変成分である。なお、Nays2DHの計算条件の河床材料にて「掃流砂のみ」を選択した場合は、浮遊砂浮上量と基準点濃度はゼロとなる（河床変動に浮遊砂は考慮されない）。

#### 参考文献

- 1) 清水義彦・木葉竹重機・新船隆行: 樹林化河道の洪水流況と浮遊砂輸送に関する数値計算, 水工学論文集, 第44巻, pp.819-824, 2000.
- 2) Meyer-Peter, E and Muller, R.: Formulas for bedload transport, *IAHSR, Report on the Second Meeting*, Vol. 3, pp.39-64, 1948.
- 3) 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.
- 4) Kovacs, A. and Parker, G. : A new vectorial bedload formulation and its application to the time evolution of straight river channels, *J. Fluid Mech.* Vol. 267, pp.153-183, 1994.
- 5) Liu, B.Y.: Study on Sediment Transport and Bed Evolution in Compound Channels. Thesis presented to Kyoto University, 1991.
- 6) 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.
- 7) 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.

- 8) 渡邊明英・福岡捷二・安竹悠・川口広司: 河道湾曲部における河床変動を抑制する樹木群水制の配置方法, 河川技術論文集, 第7巻, pp.285-290, 2001.
- 9) Engelund, F.: Flow and Bed Topography in Channel Bend, *Jour. of Hydr. Div., ASCE*, Vol.100. HY11, pp.1631-1648, 1974.
- 10) 細田尚・長田信寿・岩田通明・木村一郎: 一般座標系での主流と二次流の遅れを考慮した平面二次元モデル, 水工学論文集, 第44巻, pp.587-592, 2000.
- 11) Johannesson, H., and Parker, G.: Secondary flow in mildly sinuous channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 115, No. 3, pp.289-308, 1989.
- 12) Itakura, T. and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, *Proc. of ASCE, HY8*, pp.1325-1343, 1980.
- 13) Lane, E. W. and Kalinske, A. A.: Engineering calculation of suspended sediment, *Trans. A.G.U.*, Vol. 22, 1941.
- 14) Rubey, W. W.: Settling velocity of gravel, sand and silt particles. *Amer. Jour. Sci.*, 25, pp.325-338, 1933.
- 15) 清水康行・板倉忠興: 浮遊砂を考慮した河床変動計算手法, 土木試験所月報, No.396, 北海道開発局土木試験所河川研究室, 1986.

※2 : 清水康行・竹林洋史・井上卓也・濱木道大・岩崎理樹: Nays2DH ソルバーマニュアル, <<http://i-ric.org/ja/downloads>>, 2014.