

水工学シリーズ 12-A-3

iRIC による河川シミュレーション(1) － iRIC 基本コンセプトと三次元ソルバー－

北海道大学 大学院 工学研究院

木村 一郎

土木学会
水工学委員会・海岸工学委員会

2012 年 8 月

iRIC による河川シミュレーション (1) iRIC 基本コンセプトと三次元ソルバー

Simulations on Flows and Morphodynamics in Rivers with iRIC

(1) Basic Concept of iRIC and 3D Solver: “Nays CUBE”

木 村 一 郎

Ichiro KIMURA

1. はじめに

河川流域における人口や資産のさらなる集中，地球温暖化などを原因とする気候変化に伴う降雨の集中化とゲリラ豪雨の頻発，河川環境に対する要求の高度化など，河川をとりまく情勢は大きく変化しつつあり，そのスピードは思いのほか速い。また，昨年の東日本大震災とそれに伴う大津波は，500 年～1000 年という低頻度大規模災害に対する国土の脆弱性を露呈した。このことが河川にも当てはまることは容易に想像でき，巨大災害に対する河川防災・減災も，早急に取り組まなければならない課題である。このような，河川に対する要求の多様化，高度化の中で，治水・利水・河川環境の健全な維持管理を進めて行くことは容易ではないが，そのためにまず必要となるのが現象を解明，予測する技術の構築である。そして，河川現象の物理的側面，すなわち，河川流の挙動，土砂の挙動，さらにこれらに伴う河川地形の変化等を解明，予測する上で強力なツールの一つが数値シミュレーションであることに疑いの余地は無い。

河川における数値シミュレーションは，従来，水理学のみならず数値解析手法やプログラミングに関する専門知識を必要とするものであったため，一部の専門家の手によるものと考えられてきた。このため，専門家によってなされた数値解析結果の本質とそれを利用する河川管理者との間には理解の乖離があり，この埋め難い溝の存在が河川技術の発展の一つの足かせとなってきたといったら言いすぎであろうか。最近，この溝を埋めるべく，主に GUI 環境のもとで，プログラミング等の特別な技術を用いずとも比較的簡単なマウスとキー操作で河川シミュレーションを実行できる商用，あるいはフリーの汎用パッケージソフトウェアが登場，普及しつつある。このうち，商用ソフトウェアとしては DHI の MIKE などが，また，フリー（無料）のものとしては，我が国では CommonMP や iRIC などがその代表的なものといえる。これらのうち，後者のフリーソフトの登場は比較的最近であり，数値解析の裾野を広げる上で一つの鍵を握る動きともいえる。ところで，CommonMP と iRIC はいずれも我が国に発する河川フリーソフトという共通点を有しながらも，そのコンセプトには大きな相違がある。本報の一つ目の目的は，iRIC プロジェクトの特徴と基本的コンセプトを明らかにすることに他ならない。

ところで，河川の流れや河床変動の予測を行う上で，対象とする現象の空間卓越次元に留意する必要がある。基本的に物理空間は三次元であるが，河川は一般に流れ方向の空間スケールが極端に大きいため，卓越次元を主流方向一次元と考えて断面内平均物理量を解く一次元モデルとの相性が良い。さらに，川は水深に比べて横断方向の空間スケールが 1 オーダー以上大きいことを考慮して横断方向の物理量の変化も考慮した平面二次元モデル，さらには水深方向も含めて 3 つの空間方向全てを考慮した三次元モデルなどが用いられる。ここで，河床変動をも含めたモデルを考える場合，三次元モデルという呼称には注意が必要である。すなわち，河床地形を表す河床高という情報は平面二次元的情報であり，河床高の変化に関与の大きい掃流砂運動は平面二次元的挙動であるから，三次元的に流れを解く場合でも，流砂・河床変動モデルは平面二次元的なモデル化がなされる場合がほとんどを占める。本報でも，このような組み合わせからなるモデルを単に「三次元モデル」と呼ぶことにする。

ところで，汎用ソフトウェアによる河川の三次元計算は，一次元，あるいは二次元計算に比べてまだ一般

には普及しているとはいえない。また、三次元モデルを備えた汎用ソフトウェアの数そのものも限られている。この背景としては次のような事情が考えられる。

- ① ユーザー側で河川の三次元解析を必要とする場面が限られていたこと。
- ② 三次元計算に耐えうる性能の計算機が高価であったこと。
- ③ 三次元モデルを汎用ソフトウェア化する上で独自の技術的困難を伴うこと。

まず①について、三次元モデルは河川の広いリーチの検討よりは構造物周辺や曲がり部などの局所的現象に適用される場面が多い。今後、河川管理により緻密さが要求される場面が増えるであろうから三次元モデルの重要性は増していく。また、昨今の計算機の進歩と低価格化は目覚ましく、②はすでに過去の問題である。従って残る問題は③のみとなる。iRIC の特徴の一つは三次元ソルバー（Nays CUBE）を装備している点である。Nays CUBE は③に対して種々の新たな工夫を試み、克服を試みたソルバーである。本報の第二の目的は、iRIC の三次元ソルバーNays CUBE の特徴を、汎用化に向けての工夫を中心に示すことに他ならない。

2. iRIC の概要

2. 1 iRIC プロジェクトの概要

2. 1. 1 基本コンセプトと沿革

iRIC とは無料（パブリックドメイン）で配布される河川の流れ、流砂、河床変動、さらには生態系の挙動をも計算するためのユーザインターフェース、およびこれに関連するオープンソースのプログラム群からなる。iRIC の開発は主に大学や研究機関の研究者によってなされている。しかしながら、オープンソースによるアイデアのオープン化、パブリックドメインによる平等なアクセス権モデルやインターフェースの開発は「研究」の範疇ではない。しかしながら、研究の成果に多くの公衆がアクセス出来るようにすることは研究者の社会に対する責任であるという使命感のもと、思いを共にする研究者らが自主的に集い、推し進めてきたプロジェクトが iRIC である。

iRIC のもう一つの特徴は、国際的な開発組織、特に日本と米国との強固な協力関係のもとでプロジェクトが進められている点である。日本では、2000 年代中ごろから北海道大学の清水や土木学会水工学委員会基礎水理部会のメンバーが中心となって、北海道河川財団の援助のもと、RIC-Nays という河川汎用ソフトウェアの開発を進めてきた。RIC-Nays はそのシンプルで使い勝手の良いインターフェースと安定なソルバーとにより、国内だけでなく海外でも一定数のユーザーを確保するに至った。ほぼ同時期に、米国の USGS においても、河川シミュレーションモデルの研究成果を実務に用いたいという需要を背景に、MD_SWMS という汎用インターフェースの開発を進めてきた。これらの 2 つの動きは、両国の河川分野の研究者や実務従事者に大きな刺激を与えるものであった。

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から、2009 年、2 つのソフトウェアを合体し、両者の長所を生かした新たな単一のソフトウェアとして開発を進めていくことで合意し、以降、日米共同のプロジェクトとして再スタートが切られた。この新たなプロジェクトの名称は”International River Interface Cooperative”から”iRIC”と名付けた。2010 年 4 月、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、また、使い勝手や安定性においても課題が残されていた。2012 年 5 月 25 日、iRIC Ver.2.0 が満を持してリリースされ、土木学会本部講堂において盛会のもとに発表会が行われた。iRIC Ver.2.0 は、Ver.1.0 とは全く異なる新しい GUI を備えたものであり、使い勝手や安定性などが大幅に強化されている。同梱されるソルバーの数も飛躍的に増えた。なお、日米二国に加え、Ver.2.0 ではオランダの Deltares の研究者が加わり、世界的に著名な商用河川シミュレーションソフトであった Delft 3D（現在は一部を除きフリーソフトとなっている）を iRIC ソルバーの一つとして提供している。なお、この Ver.2.0 の正式リリースに先立って、2011 年 12 月 24 日に iRIC Ver.2.0 試用版（クリスマスバージョン）が日本国内に限ってリリースされている。

2. 1. 2 iRIC ソフトウェアの目的

iRIC ソフトウェアの備えるべき主な目標は次の通りである。

- ・研究分野から実務分野への迅速な技術移転を促すツールであること。
 - ・異なるモデル、あるいは異なるモデル適用方法による結果の相違を共通の土俵で比較できること。
 - ・様々な時空間スケールの問題に対応できるよう、複数のモデルを包括したソフトウェア群とすること。
 - ・共通ツールを使つての意見交換や技術交流を可能にすることで迅速な研究・技術開発を促進すること。
 - ・既存のモデルを第三者が改良できたり、サブモデルを開発したりすることが可能なシステムとすること。
(たとえば、流れのモデルをもとにした、生態系モデル、植生モデル、地球化学モデルなどへの応用)
- さらに、iRIC 備えるべき具体的な機能としては、次のような要件を掲げている。
- ・格子作成などの前処理、計算、結果の可視化などの後処理がシームレスな環境の下で実行できること。
 - ・前処理で最も経験と時間を要する格子作成作業を容易に行うことができること。
 - ・後処理では、計算結果をさまざまな角度から検討でき、かつ非定常問題、三次元表示などにも対応できるグラフィック機能を装備すること。
 - ・前処理、計算実行、後処理が一つの共通するプラットフォームのもとで比較的簡単な操作でシームレスに実行できること。また、この一連の操作はソルバーによらず基本的に共通であること。
 - ・多言語化が容易であること。
 - ・開発用のツールも含めたオープン化を行い、誰でもソルバーの開発追加が可能であること。
 - ・iRIC ソフトウェア全体、および各ソルバーの日本語および英語のマニュアル、事例集を用意すること。

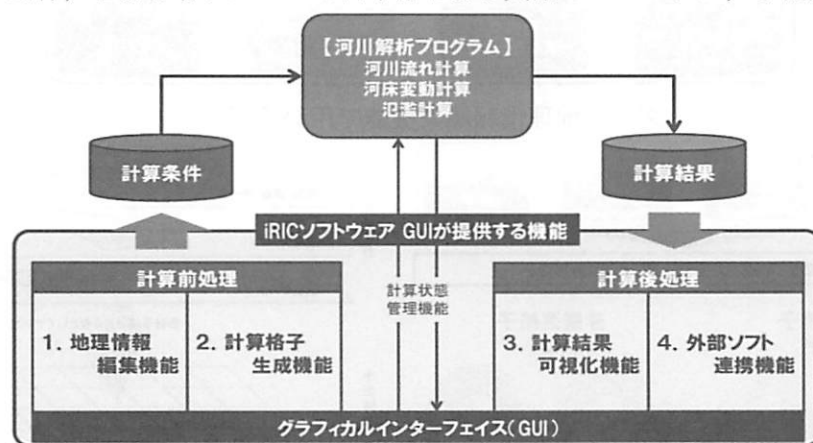


図-1 iRIC ソフトウェアの基本構成 (<http://i-ric.org/ja/>)

2. 2 iRIC の主な機能

2. 2. 1 iRIC ソフトウェアの構成と前処理・後処理機能の概要

iRIC ソフトウェアの全体構成を図-1 に示す。計算前処理部分、河川解析プログラム（ソルバー）、計算後処理部分の三つの要素が、GUIにより結合された構成となっている。計算前処理としては、地理情報編集機能（河床高、植生、粗度、構造物位置などを設定・編集する機能）、及び計算格子生成機能からなっている。このうちの地理情報編集機能で用いるデータ構成を図-2 に示す。河川地形のデータとしては、河川測量データ（riv 形式ファイル）と座標点標高等データ（DEM データ、XYZ 形式）とを読み込むことが可能であり、画像データは、格子作成や地理情報の設定を行いやすくしたり、計算結果の背景画像とすることで可視化効果を高めたりするために用いるが、必須では無い。一方、ポリゴンデータは、ユーザーが GUI 上で設定する多角形状データであり、複雑な形状の植生域や構造物の位置、粗度の範囲などを指定できる。

一方、計算格子生成機能については、図-3 の左図に示すように、地理情報編集機能で作成したデータをもとに、構造格子、あるいは非構造格子を作成する。これらの格子はただ単に平面的な格子分割を示すのみで

なく、河床高、植生、粗度、構造物などの属性が格子点、あるいは格子セルに割り当てられた（マッピングされた）格子データとなっており、この様子を図-3の右図に示している。ところで、我々が河川流のシミュレーションを行うのは、必ずしも実河川の地形を対象としなければならないという訳ではない。室内水理模型実験結果の再現を行う場合もあろうし、単純化された仮想の水路を対象に数値実験を行うという場合も想定できる。これらの目的のために、iRICでは、外部の地形データを用いず、iRIC内部で単純な形状の水路を対象とした計算格子を作成する「多機能格子生成ツール」を装備している。このツールでは、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）、ジグザグ型などの規則的な形状を有する水路の計算格子を、周期、川幅、勾配、複断面か単断面か、などを指定して簡単に生成するツールであり、室内実験結果の再現や、仮想水路における数値実験などに便利に用いることができる。図-4に「多機能格子生成ツール」を用いて作成される格子の例を示す。

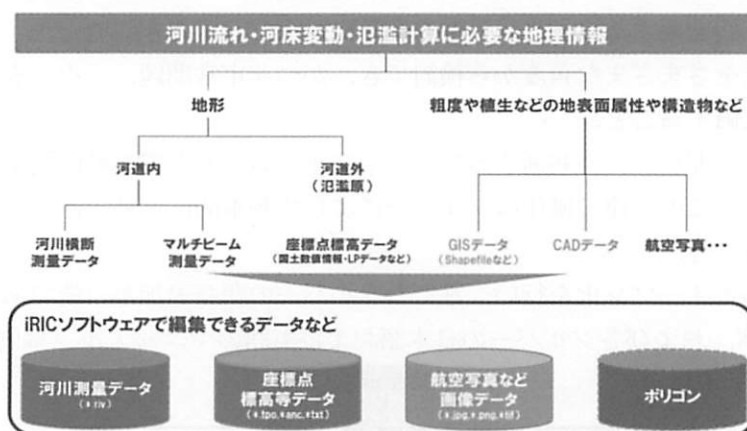


図-2 地理情報編集機能で用いるデータ

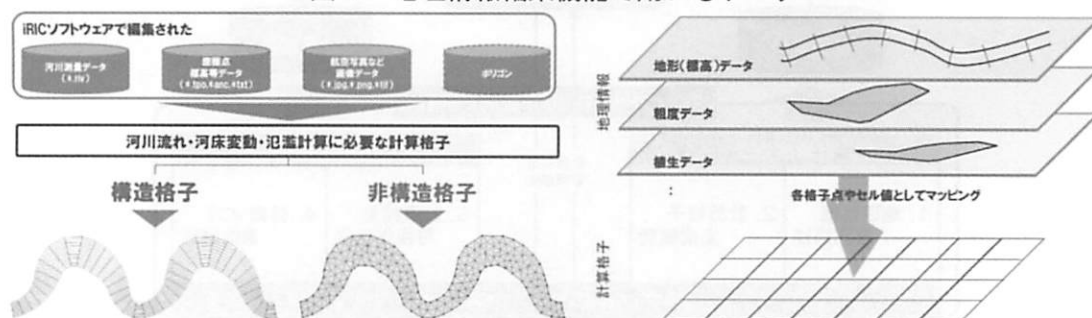


図-3 計算格子作成機能とマッピングの概要

一方、後処理機能のうち重要な部分は計算結果可視化機能である。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の2つが用意されており、それぞれのウインドウにおいて種々の可視化手法が用意されており各ソルバー共通で使用できる。主な可視化機能は次の通りである。

- ・カラーコンターライン、カラーコンター面塗り、カラーフリンジ
- ・流線表示
- ・パーティクルトレース
- ・ベクトル表示

これに加え、三次元可視化ウインドウでは等値面描画機能が備えられている。図-5に二次元、および三次元可視化機能を用いた可視化の事例を示す。この例にあるように、出力結果はGoogle Earth上に貼り付けて表示することも可能であり、リアリティの高い可視化が可能となっている。

一方、外部ソフト連携機能については、計算結果を必要に応じて他のソフトウェアに対応したフォーマットで出力できる機能であり、その概要を図-6に示している。iRIC本体はすでに多彩な可視化機能を有してい

るが、商用ソフト（Excel, Tecplot など）や他のフリーソフト（paraview, VisIt など）を用いて可視化を試みたい場合、あるいは統計処理などの計算結果の加工等を行いたい場合には、目的に適したファイル形式を選択し、外部ファイルを出力することが可能である。

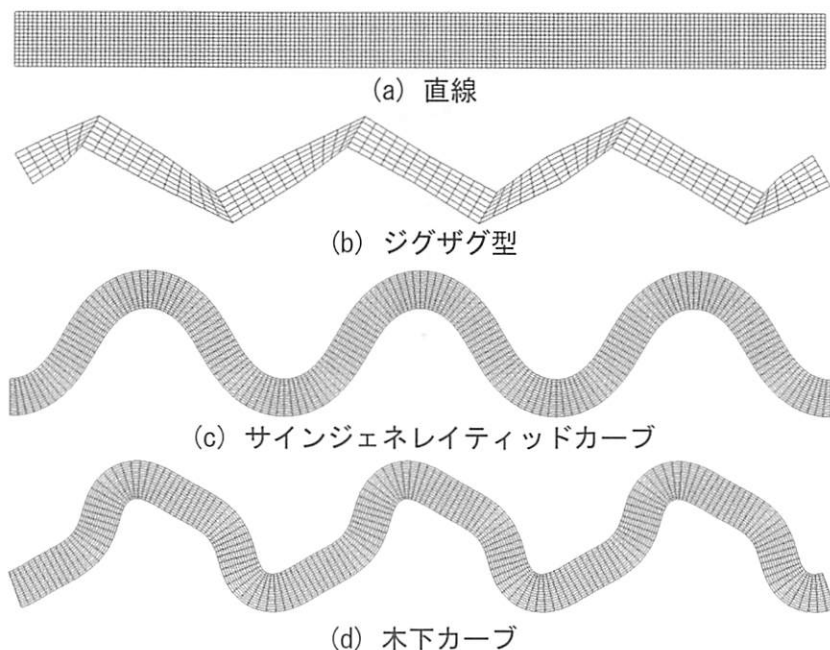


図-4 「多機能格子生成ツール」で作成できる格子の種類（それぞれ単断面・複断面が設定可能）

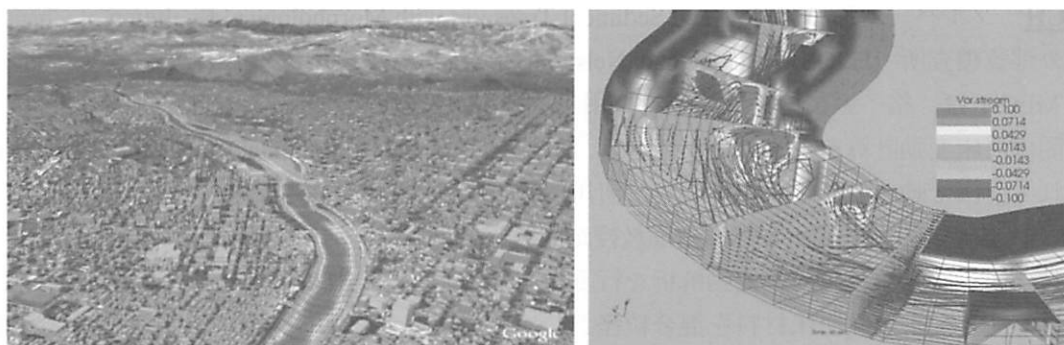


図-5 可視化の例（左：二次元計算結果を google earth 上で表示，右：河川湾曲部の三次元計算例）

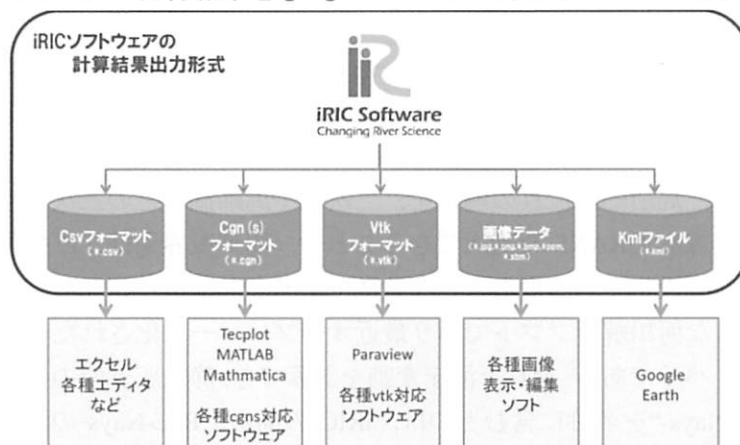


図-6 外部ソフト連携機能の概要

2. 2. 2 iRIC の備えるソルバーとその概要

現在, iRIC Ver.2.0 の備えているソルバー一覧を表-1 に示す. 現在 8 種類のソルバーが備えられており, そ

のうち6つが平面二次元ソルバー、2つが三次元ソルバーである。それぞれのソルバーの概要を次に示す。

表-1 iRIC Ver. 2.0 が装備しているソルバー群

Nays2d	平面2次元	構造格子
Nays2d Flood	平面2次元	構造格子
FaSTMECH	平面2次元	構造格子
Morpho2D	平面2次元	構造格子
River2D	平面2次元	非構造格子
SToRM	平面2次元	非構造格子
NaysCUBE	3次元	構造格子
Delft3D	3次元	構造格子

・ **Nays2D** : 北海道大学の清水康行教授が開発した河川の流れ・河床変動解析ソルバーであり、河川の非定常平面二次元流れと河床変動・河岸侵食の計算を行うことができる。格子系には一般座標系を採用し、単一の河川のみではなく合流点を含む計算を行うことも可能である。土砂輸送は掃流砂・浮遊砂混在を扱うことができ、均一粒径と混合粒径の計算を行うことができる。また、流れの計算は二次流を考慮した準三次元モデルとすることも可能になっている。

・ **Nays2D Flood** : Nays2D を氾濫解析用に特化して修正されたソルバーである。河川は標高で認識し、設定された氾濫地点での氾濫流量が地形の高低差で流れ、広がる現象を計算できる。河床変動は計算できない。

・ **FaSTMECH** : ソルバー名称は、Flow and Sediment Transport with Morphological Evolution of Channels を意味し、アメリカ地質調査所 (USGS) の Jonathan Nelson 博士が開発した河川の流れ・河床変動解析ソルバーである。FaSTMECH は、格子系に円筒座標系を採用し、準定常近似の下で流れ・河床変動の計算を行うため、非常に長期間の河床変動計算を行うことができる。また FaSTMECH には Habitat Calculator が実装されており、得られた流れ・河床変動の計算結果を用いて、河川環境を評価することができる。

・ **Morph2D** : 京都大学防災研究所竹林洋史准教授が開発した河川流・河床変動解析ソルバー。一般座標系における非定常平面二次元流れ・河床変動解析を行うことが可能で、流れの計算には、浸透流や植生の影響を考慮することができる。また、河床材料を混合粒径として扱うことができる。固定床や岩盤上での掃流砂運動を扱えることができるため、岩盤露出部分や床止めを含んだ河道全体の河床変動解析を行うこともできる。

・ **SToRM** : System for Transport and River Modeling を意味し、アメリカ地質調査所で開発された平面二次元流れ解析ソルバーである。SToRM は格子系に非構造格子を採用しているため、複雑な境界条件下でもそれに適合した流れの解析を行うことができる。同時に常・射流混在流れや水際境界を扱うことが可能となっている。

・ **Nays CUBE** : 北海道大学の木村一郎により開発された三次元流れ・河床変動ソルバーである。構造物周りや湾曲部の深掘れ箇所など、局所的な流れの解析を、二次流や馬蹄渦などの三次元性を考慮して解析可能である。乱流モデルとして非線形 URANS を選択できることや、周期境界条件、反転周期境界条件、対称境界条件などの種々の境界条件を設定できる点も大きな特徴である。

・ **Delft 3D** : 世界的にも著名な河川解析ソフトであり最近オープンソース化された Delft 3D (オランダ Deltares による開発) の iRIC 版ソルバーである。流れと河床変動を計算でき、静水圧近似の三次元計算が可能である。

以上のソルバーのうち”Nays-“を名称に含むものは、iRIC の前身、RIC-Nays の流れを汲むソフトウェア群であり、”Nays ファミリー”とも呼ばれる。これらは北海道大学の研究者を中心に開発が進められている。

3. iRIC 三次元ソルバー Nays CUBE

本章では、iRIC に搭載されている三次元ソルバー Nays CUBE について述べるが、Nays CUBE のマニユア

ル、あるいはチュートリアル的な内容とすることが趣旨ではない。三次元モデルを汎用ソフトウェア化する意義、汎用三次元モデルの要件、三次元モデルを汎用モデル化する上での遭遇した困難な点、工夫点などを中心に記述していきたい。なお、Nays CUBE のソルバーマニュアル、事例集等については既に Web 上で公開されているので (<http://i-ric.org/ja/>) そちらを参照されたい。

3. 1 iRIC における三次元ソルバー

iRIC Ver.2.0 では、Delft 3D と Nays CUBE の二つの三次元ソルバーを備えている。このうち、静水圧を仮定しない純粋な意味での三次元ソルバーは Nays CUBE のみである。汎用河川ソフトウェアで三次元ソルバーを備えたものは少ない。この原因の一つが、三次元モデルが本質的に有する汎用化に向けての技術的困難な要因にあることは「1. はじめに」でも既に述べた通りである。この技術的要因とし、具体的には次のような点が挙げられる。

- ① 三次元計算格子の作成に経験と手間が必要であること。
- ② 自由水面、上下流端、構造物、植生周辺などの境界条件の取り扱いの複雑であること。
- ③ 乱流モデルの重要性が相対的に大きいこと。
- ④ 計算時間が二次元計算に比べて1オーダー大きく実用的範囲に時間を抑えることため工夫が必要であること。
- ⑤ 底面地形や流入部の地形が複雑な場合に計算の安定性を確保することが難しいこと。
- ⑥ 計算結果の三次元的可視化に困難を伴うこと。

以上の問題点のうち、⑥は純然たる GUI の問題であり、この点については、iRIC の有する優れた三次元可視化機能と、外部ソフト連携機能によって克服されている。一方、①～⑤については、ソルバー内部の問題、あるいは、ソルバーと GUI のカップリングの問題を含んでいる。これらの①～⑤の課題の克服のために、Nays CUBE は独自の工夫を行っている。これらについて、次に詳述していきたい。

3. 2 Nays CUBE の特徴と汎用化へ向けての工夫

3. 2. 1 Nays CUBE の物理空間座標と計算格子

河川流のモデル化において、まず決定すべきこととして、用いる計算格子のタイプがある。数値解析における計算格子は用いる物理空間座標と密接に関係する。計算格子は、まず、構造格子と非構造格子に区別される。非構造格子は格子サイズの局所的変化や複雑境界に対する適合性が良い反面、格子生成に技術が必要であり、また、計算時間も一般に大きいとわれており、現在のところ三次元の汎用ソルバーとしては適当とはいえない。一方、構造格子については、デカルト座標を用いる場合と、境界適合座標を用いる場合がある。デカルト座標を用いる場合は、河川形状を直方体型の格子で近似的に表すか、IBM 法 (Immersed Boundary Method) などを用いてスムーズに表現するか、いずれかの方法をとる。最近には IBM 法にマルチレベル格子を組み合わせた方法なども試みられているがまだ一般的とはいえない¹⁾。これに対して境界適合座標を用いる場合は、一般曲線座標系変換により底面や側岸、水面などに沿った曲線座標系で物理空間を表現する。

Nays CUBE の用いる計算格子は水平面内を一般曲線座標系、鉛直方向を移動シグマ座標系(上下方向の軸が鉛直となる座標系)としている。この方法は、ただ単に水深方向が水平スケールに比べて小さく、境界の移動が水面と底面の上下方向の移動に特化しているという河川地形へのフィット性を考慮してのことであるが、同時に、前述の①の格子の生成の容易さにもつながっている。すなわち、シグマ座標系の採用により、ユーザーが作成すべき計算格子は二次元平面内の格子のみであり、鉛直方向はソルバー内で容易に自動化できる。また、水明面内の格子生成については、iRIC が有する他の二次元ソルバー向きの洗練された格子生成ツールがそのまま利用できる。これによって、一般に困難といわれている境界適合型三次元格子の生成が、極めて容易となっている。

ところで、本ソルバーは複雑な河川の三次元形状を移動一般曲線座標変換により直交座標からなる計算空間に変換して計算を進める。この際、計算空間では反変成分の基礎式を採用しており、計算空間の座標はデカルト座標系となる。このため、元の複雑な河川の計算格子(物理空間)は一辺の長さが1の立方体(CUBE)

の集まり（計算空間）に変換さる．（図-7 参照）．基礎式の詳細は末尾の Appendix を参照されたい．

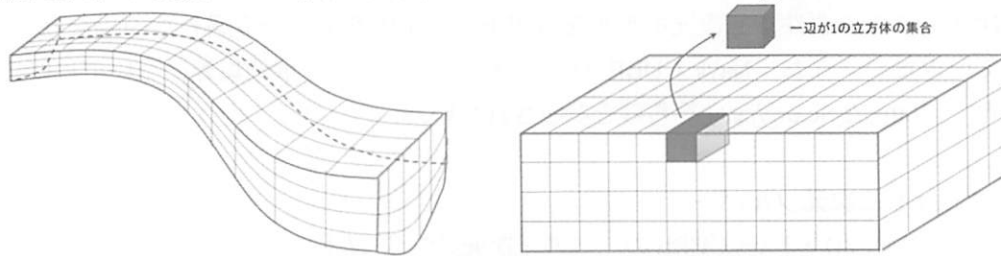


図-7 Nays CUBE の物理空間（左）と計算空間（右）

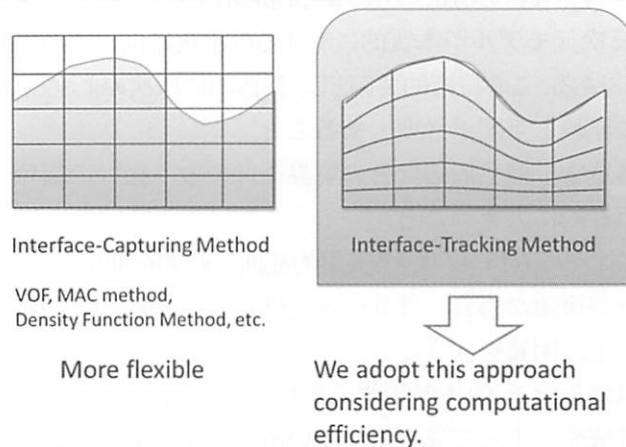


図-8 水面の移動に追従する境界適合型移動一般格子の採用

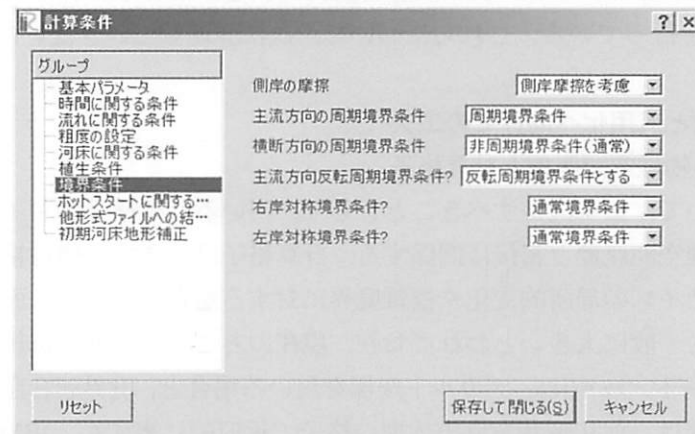


図-9 Nays CUBE 境界条件設定ダイアログ（画面）

3. 2. 2 境界条件

（1）自由水面移動の計算方法

自由水面の境界条件としては、①rigid lid 近似を用いる方法、②境界適合法、③境界補足法などの適用が考えられる．このうち、②と③の方法の概要を図-8 に示した．局所的な水面変動を計算するには①は誤差が大きくなりすぎる危険性がある．一方、③は水面の大きな変動を追跡できるが、水面位置を追跡する輸送方程式が必要となり、一般にアルゴリズムが複雑となり、計算時間も大きい．②では、図-8 の右図に示すように、格子が水面にフィットするように上下方向に移動させる方法であり、移動一般曲線座標を鉛直方向のみ移動座標形に変換することで比較的容易にモデル化が可能である．ただし、水面形が複雑になりすぎると格子の歪が大きくなりすぎて計算が発散するという問題点が生じるが、通常の河川の現象においては十分適用可能である．また、シグマ座標系との相性も良く、河床変動もほぼ同様な扱いが可能であることから、本ソルバーの水面形解析法として採用した．

表-2 境界条件設定画面の説明 (Nays CUBE ソルバーマニュアルより)

#	項目	設定方法	注意事項
1	側岸の摩擦	側壁の摩擦を考慮するか否かを指定します。考慮しない場合はスリップ条件となります。	通常は摩擦を考慮します
2	主流方向の周期境界条件	主流方向の上下流端を周期境界条件にするか通常境界条件（非周期境界条件）とするかを指定します。	通常は非周期境界条件
3	横断方向の周期境界条件	横断方向の左右側岸を周期境界条件にするか通常境界条件（非周期境界条件）とするかを指定します。	通常は非周期境界条件
4	主流方向反転周期境界条件	主流方向を反転周期境界条件とするかどうかを指定します。	#2 で周期境界条件を選んだ場合のみ選択可能
5	右岸対称境界条件?	右岸を対称周期境界条件とするかどうかを指定します。	対称周期境界条件とは、境界に対して線対称の流れ場を仮定する境界条件です
6	左岸対称境界条件?	左岸を対称周期境界条件とするかどうかを指定します。	

Only 1 period is considered into the computational domain.

▪ Meandered channel

▪ Periodic dune

▪ Spur dikes in series

▪ Alternate bar

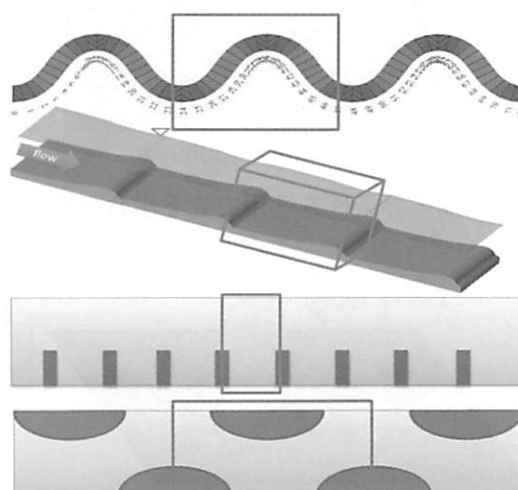


図-10 主流方向に周期境界条件を適用できる場合の例

▪ Meandered channel

▪ Alternate bar

▪ Fishway

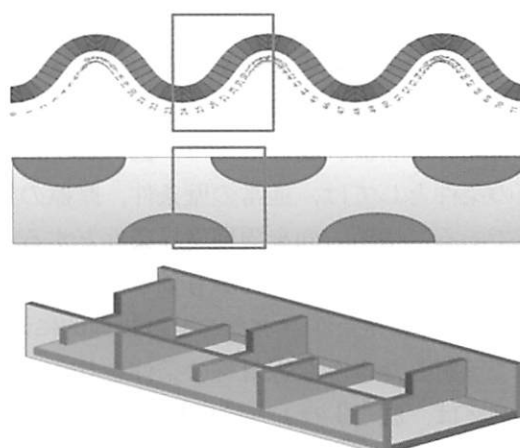


図-11 主流方向に反転周期境界条件を適用できる場合の例

(2) 上下流端と側岸の境界条件

Nays CUBE の大きな特徴の一つは境界条件設定の自由度が高い点にあり、周期境界条件、反転周期境界条件、対称境界条件などに対応している。これらの境界条件を適切に用いることにより、計算機負荷が一般的に大きいとされる三次元計算を非常に効率的に進めることが可能となり、3. 1で述べた問題点④の軽減に大きく貢献している。

図-9 は、Nays CUBE の境界条件設定ダイアログを示している。境界条件はここからマウス操作で簡単に設定できる。それぞれの操作項目の内容については、表-2 に示す通りである。境界条件の選択肢が多いため、ユーザーは

適切な条件を吟味して用いる必要であり、これらについてはソルバーマニュアルに詳述して徹底を図っている。

周期境界条件は、一方の境界の条件を対となる他方の境界と全く同一に設定するものであり、NaysCUBEでは、主流方向、横断方向のいずれにもこの設定が可能である。主流方向を周期境界条件とすると、周期性のある現象について、一周分だけの領域のみを計算領域として設定することにより、非常に効率的に再現できる。主流方向の周期境界条件が有効となる流れ場としては、図-10のようなものが考えられる。なお、周期境界条件を設定すると、初期の計算領域内の水の体積が保存される。

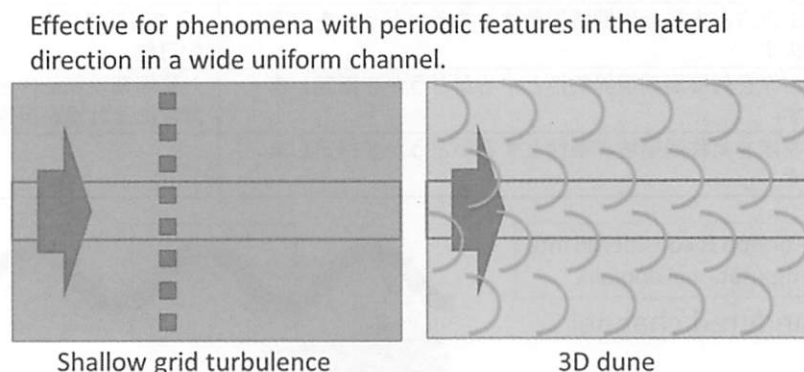


図-12 横断方向に周期境界条件を適用できる場合の例(横断方向が幅広で、周期性のある現象の再現に有効)

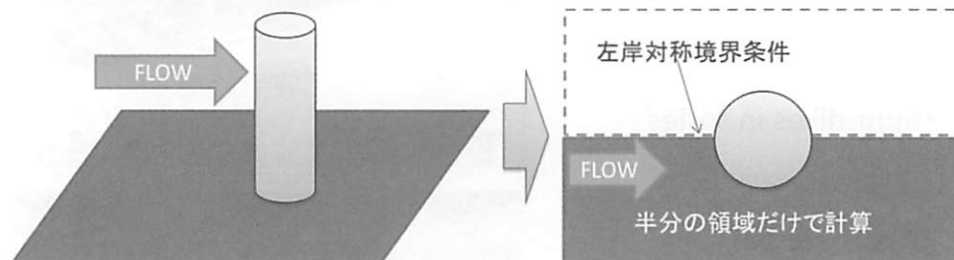


図-13 側壁対称境界条件を適用できる例(中央に橋脚がある例。但しカルマン渦のような非対称現象は再現不可)

一方、主流方向を反転周期境界条件とすると、半波長で鏡に映したように現象が反転する周期性を有する現象を、半波長分の領域のみを計算領域として考慮することで、非常に効率的に再現できる。主流方向の反転周期境界条件が有効となる流れ場としては、図-11のようなものが考えられる。

横断方向を側壁の条件としては、通常の壁条件、摩擦の無い壁条件、周期境界条件、対称境界条件から選択することが可能である。横断方向を周期境界条件とすると、横断方向に周期性のある現象を非常に効率的に再現できる。横断方向の周期境界条件が有効となる流れ場としては、図-12のようなものが考えられる。なお、横断方向を反転周期境界条件とすることは物理的に矛盾が生じるので採用しない。対称境界条件とは、境界面に対して鏡で反射したような線対称の条件を与えるものである。横断方向に対称境界条件を設定するケースとしては、例えば、図-13のように円柱周辺の左右対称な流れ場を、片側だけの領域で効率的に再現したい場合などに適する。ただし、計算領域が対称であっても流れ場が対称となるとは限らない。例えば図-13の例では、円柱の下流側にカルマン渦と呼ばれる周期的な非対称な渦運動発生するため、流れ場は非対称となる。このような場合に対称境界条件を適用すると、カルマン渦の影響を無視した結果となることに留意が必要である。

境界条件を巧みに設定すると、大幅な計算時間短縮につながる場合がある。このような例の一つを図-14に示す。この例では、均一の密度を有する植生密集域の流れ場(左上、円一つ一つが植生の幹に対応)に対して、植生の十分内部の平衡状態の流れや河床変動を計算するため、右下のような小さい領域のみを計算対象領域として設定し、上下流端を反転周期境界条件、両岸を対称境界条件とした例である。多数の植生を考

慮するには非常に多くの計算格子が必要であるが、現実的には不可能であるが、このような条件設定により比較的短時間で計算が可能である。ただし、この場合も非定常渦の発生などについては無視した結果となることに注意せねばならない。

なお、周期境界条件あるいは反転周期境界条件を設定する場合、計算格子に制約がある。すなわち、周期境界条件では、対称となる2つの境界の横断方向の格子配置が空間的に全く同一でなければならないし、反転周期境界条件の場合は、片側の境界の格子を反転させたものが一方の計算格子配置と同一とならなければならない。これらのチェックは計算初期においてソルバー内で実行し、上記の条件を満たさない場合は警告を発して計算を終了するようプログラミングされている。

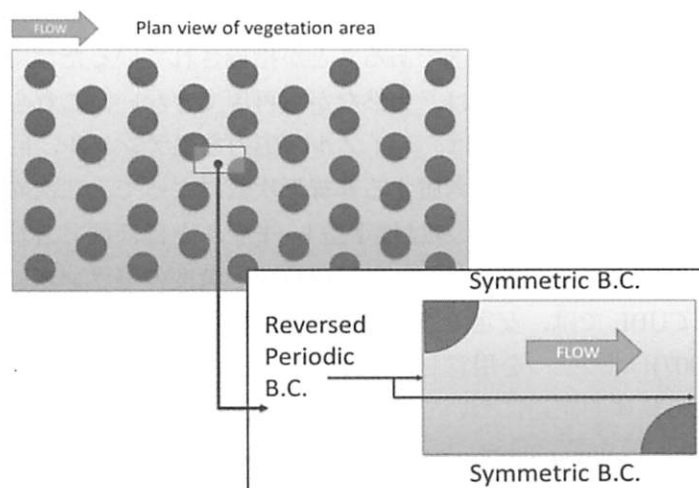


図-14 植生密生域の平衡状態の流れ場を、反転周期境界条件と対称境界条件で表現した例

3. 2. 3 Nays CUBE の乱流モデル

三次元モデルの場合、乱流モデルの重要性が一次元モデル、二次元モデルに比べて大きくなる。これは、単に流れ場の自由度が増すという理由だけでなく、水深積分を含まないため、水深方向の流速分布の再現が水平方向以上に乱流モデルに依存するためである。ところが、河川流の再現において、計算機負荷と精度のバランスを考えた場合の乱流モデルの決定版が無いことから、3. 1の③で述べたように、乱流モデルの選択が汎用化に向けての困難な点の一つとなっている。

さて、乱流モデルはおおまかに、DNS (Direct Navier Stokes Equation), LES (Large Eddy Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes Equation) の3つに分類される。このうち、DNSはモデル化を行わず全てのスケールの乱れを解像するものであり、河川流の一般的なレイノルズ数(数万以上)を考慮すると途方も無い数の計算格子点が必要となるため、全く実用にならない。従って、残る選択肢はLESかRANSということになる。LESは計算格子より大きいスケールの渦はすべて計算するが、格子スケールより小さい渦はモデル化して計算する。すなわち、ある種の空間平均に基づく手法である。RANSよりもモデル化が単純であり、小さい渦は流れ場による影響をあまり受けないため、計算格子を十分に小さくすれば高い精度の結果を得ることができ、RANSよりもモデルとしての普遍性は高い。ただし、計算格子を小さく設定する必要があるため、計算時間はRANSに比べて大きい。また、定常解を直接得ることはできず、実河川のように側壁や底面が粗面となる場合には、境界条件に留意が必要である。LESは現在の研究レベルの乱流解析の主流ともいってよく、LESを組み込んだパッケージソフトウェアも登場している。一方、RANSはレイノルズ平均に基づくモデルである。もともとレイノルズ平均とは乱流成分を全てを平均化することが意図されたため、時間平均と等価であると考えられてきた。しかし、非定常現象をRANSモデルで解析することも一般化しつつあり(このようなアプローチをURANS (Unsteady RANS)と呼ぶ)、この場合、周期性を有する現象ではアンサン

ブル平均と解釈され、周期性をもたない現象については短波長成分のみの平均化（短い時間についての時間平均）と解釈される。このように、レイノルズ平均の解釈は RANS モデルの種類によって異なる。RANS は一般に LES に比べて粗い計算格子が使用でき、このため計算機負荷が小さい。

Nays CUBE においては、汎用化において三次元モデルの計算時間を極力抑えるという観点から、RANS 型の乱流モデルを採用している。また、洪水流などの非定常流や構造物周辺の剥離渦、カルマン渦生成などにも対応すべきと考え、URANS 的計算に対応できるモデルを採用することとした。ところで、RANS 型乱流モデルのなかで最も一般的で広く用いられているものは、標準型 $k-\epsilon$ モデルである。これは、レイノルズ応力を歪テンソルに比例するとしてモデル化された線形モデルである。非常に安定なモデルであり、幅広い現象に対しする適用性が検証されているだけでなく、市販ソフトやフリーソフトへの搭載例も数多い。しかしながら、標準型モデルは URANS 計算には不適であることが指摘されているだけでなく、乱流の非線形に起因する現象（例えば第二種二次流）については、当然ながら再現できない。これらに対応できるモデルとしては、非線形 $k-\epsilon$ モデルが考えられる。これは、レイノルズ応力を歪テンソル、回転テンソルの二次以上の項を含む構成式でモデル化したものであり、考慮する非線形次数によって、二次非線形モデル、三次非線形モデルなどが提案されている。非線形 $k-\epsilon$ モデルは標準型 $k-\epsilon$ モデルとほぼ同じ計算機負荷で、非定常現象や乱流の非等方性に起因する現象を再現できるため、計算機負荷と精度のバランスに優れるモデルと考えることができる。よって、Nays CUBE では、安定で適用実績の多い標準型 $k-\epsilon$ モデルと、二次の非線形 $k-\epsilon$ モデル (Ali, Hosoda & Kimura (2007))²⁾ の二つを用意し、GUI からユーザーがいずれかを選択できるものとした。なお、乱流モデルの構成則の具体的記述については、末尾の Appendix を参照されたい。

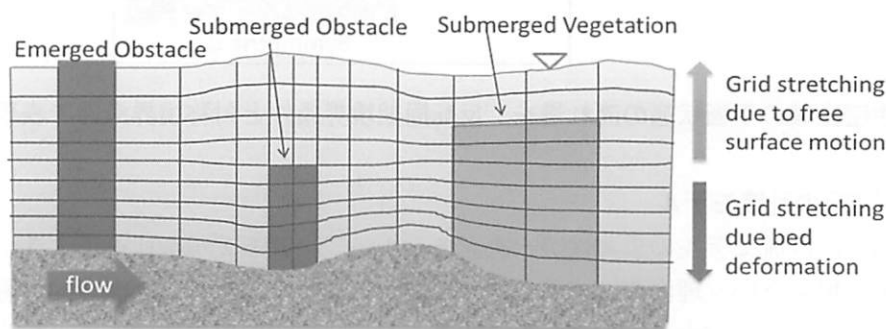


図-15 構造物と植生の設定

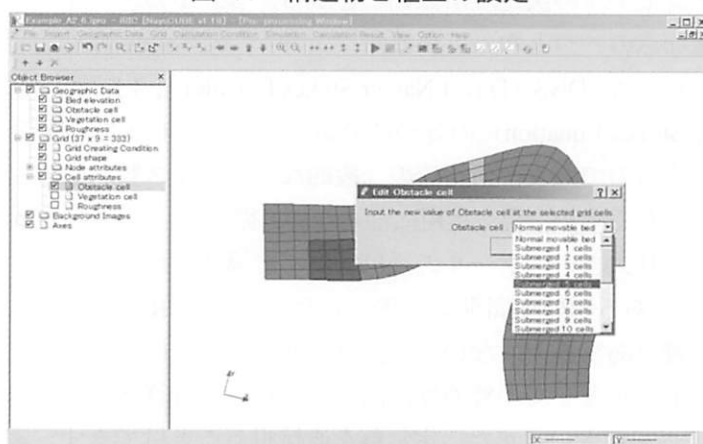


図-16 構造物設定の様子

3. 2. 4 構造物と植生の取り扱い

三次元ソルバーでは、局所的な流れを取り扱うことが多いであろうから、構造物の設定が容易にできることはソルバーの重要な要件である。Nays CUBE のソルバー内部では、構造物の存在をセル単位で自由に設定

できる。これは、各セルが構造物か水かを判断するフラグを持っており、この値が0なら水、1なら構造物として扱い、構造物周辺ではセルの各面について摩擦力が考慮されるようプログラミングされているためである。しかし、別の問題として GUI で三次元的な構造物の直感的設定は困難であるという点である。これを容易に行うため、iRIC では三次元構造物設定の特別な機能を設けず、前処理段階に設定するセル属性の一つとして、底面からの構造物高さをセル数として設定することとした。この作業の様子を図-16 に示す。

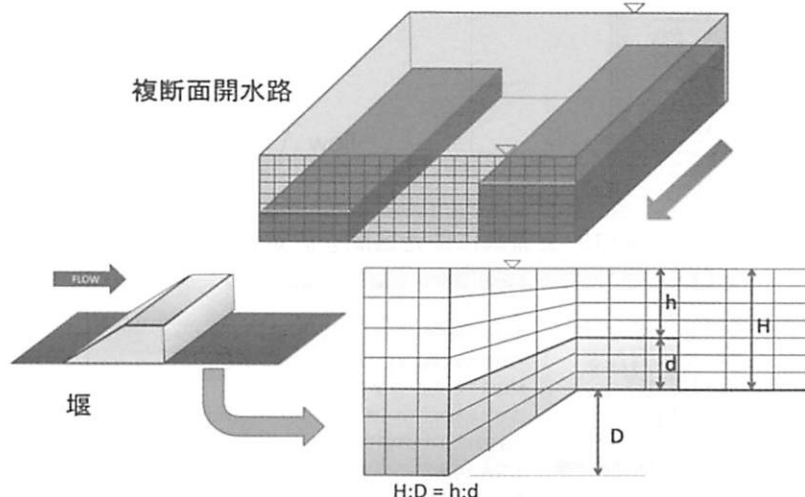


図-17 構造物設定機能による複断面河道や堰を考慮した三次元格子の例

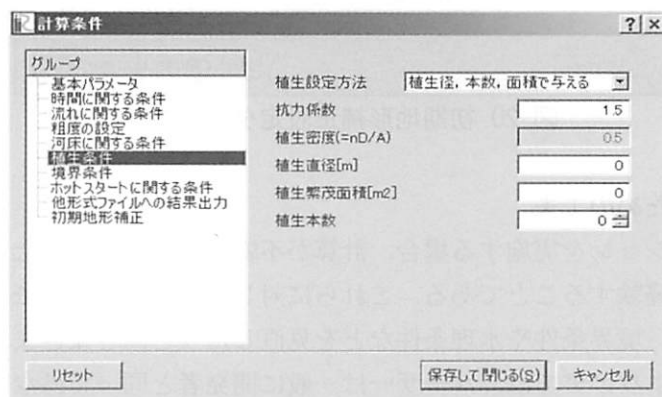


図-18 植生条件設定ダイアログ

前処理のセル属性設定画面は、図-16 のように領域の平面二次元表示のみであり、三次元表示はできない。三次元構造物を設定するには、構造物の存在するセルをマウスで選択し、構造物高さを図のようにポップアップメニューから「河床からのセル数」として設定する。この際、水没型構造物、非越流型構造物のいずれも設定できるが、水中に浮いたような構造物やトンネル型の構造物の設定は、現在のところ不可能である。その分、誰でも理解しやすい構造物設定方法となっている。なお、水没型の構造物を設定した場合、鉛直方向の格子移動は次のように行っている。すなわち、構造物の天端位置の格子点は計算を通して固定点とし、これより上方格子は水面に応じてストレッチし、下方は河床変動に応じてストレッチさせる。これにより、移動境界適合格子を用いながらも構造物高さを固定する計算が可能となる。この構造物設定機能を用いれば、図-17 に示すような複断面水路や堰のようなやや複雑な越流型構造物についても比較的容易に設定できる。

次に植生の設定についてであるが、植生の存在範囲の設定方法は前述の構造物の設定の場合とほぼ同一である。植生の密度については、計算条件の一つとして設定するものとしており、植生密度を直接与えるか、植生繁茂面積、植生の平均直径、植生本数の組み合わせで与えるか、いずれかの方法をユーザーが選択できる。図-18 にこの植生条件設定ダイアログを示した。

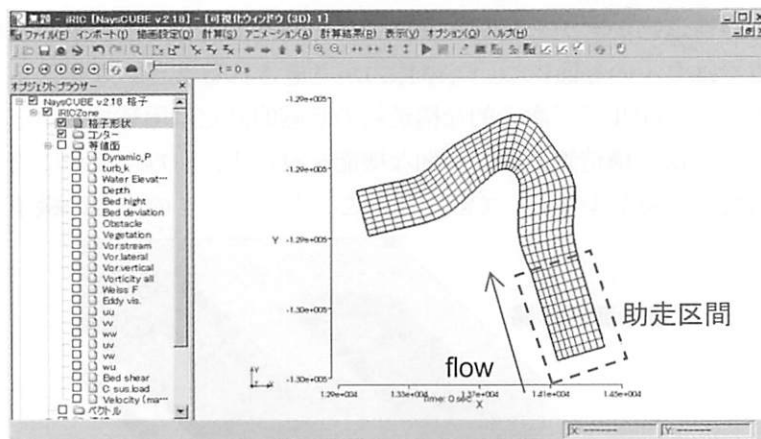


図-19 上流端に助走区間を設定した例

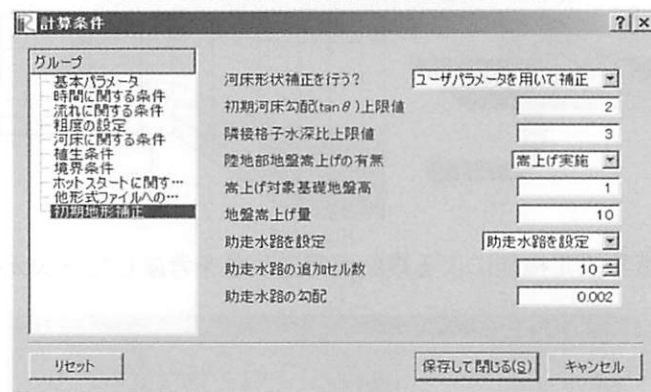


図-20 初期地形補正設定ダイアログ

3. 2. 5 計算安定化のための工夫

河川流の数値シミュレーションを実施する場合、計算が不安定となり発散したり、不合理な計算結果が得られたりすることは誰も経験することである。これらに対して、ユーザー＝モデル開発者ならば、その都度モデルの改良を行ったり、境界条件や水理条件などを見直したりと、さまざまな工夫を行って計算の安定化を図る。一方、汎用ソフトウェアでは、ユーザーは一般に開発者と同じではないから、さまざまな条件のもとで、手を加えずとも安定に計算を進めてくれることがソルバーの非常に重要な要件の一つである。

ところで、計算が不安定化して発散する現象は、二次元モデルよりも三次元モデルの方がより生じやすいといえる。これは、水深の浅さに対して水面の変形や河床の凹凸が大きく、格子の傾斜や隣接格子間の格子幅の差が拡大することなどが原因である。特に、計算領域上流端の流入部付近の地形が複雑な場合、計算が不安定になりやすい。これらの不安定性を避け、安定に計算を進めるため、Nays CUBE は次のような3つの計算安定化のための機能を有している。

(1) 初期地形補正機能

初期河床勾配が局所的に極端に大きい箇所を見つけ出して、平滑化する機能である。平滑化を行う基準となるパラメータは、局所河床勾配と、隣接格子水深比の2つであり、2つのパラメータにそれぞれに閾値を設定し、閾値以上の格子点の河床を基準値内に収まるよう平滑化する。

また、陸地部でありながら、初期の河川地形データの不足から地盤高が実際よりも低く設定されていると、この部分に水が乗り上げて、不安定になる場合がある。地盤高の最低値を設定し、それ以上の格子点の地盤高さを一定量嵩上げすることにより、この不安定を避ける機能が用意されている。

(2) 上流端助走水路の付加機能

上流部流入部の河川平面形状や地形起伏が複雑な場合、流入部に逆流が生じるなどして計算が不安定にな

る場合がままある。これを避けるため、上流部に勾配、川幅、河床形状が一様な直線の助走区間を付加し、上述の不安定を避ける機能を有している。助走区間の長さや格子数はユーザーが GUI 上で設定できる。この機能は主流方向に非周期境界条件を設定した場合のみ有効である。図-19 はこの機能を用いて上流端に 10 格子分の助走区間を設定した例である。

上記 (1), (2) の機能は図-20 に示す初期地形補正ダイアログで一括して設定が可能である。

(3) 初期流量擦り付け機能

計算に用いる流量が大きい場合、初期条件の流速が大きくなり初期条件から流れが落ち着くまでに不安定になりやすい。これを避けるため、想定流量よりも小さい流量から直線的に流量を増加させ、設定流量に擦り付ける機能を用意した。

3. 2. 6 河床モデル等

河床変動としては、掃流砂（均一粒径平衡流砂モデル）と浮遊砂を考慮できる。掃流砂モデルは、芦田・道上モデル、MPM モデル、Kovacs & Parker モデルのいずれかから選択可能である。これらについては、基本的に二次元モデルと同一であり、汎用ソフトウェア化において特筆すべき点はあまり無い。スキーム、外部ファイル、ホットスタート設定などについてもオンラインのソルバーマニュアルを参照されたい。

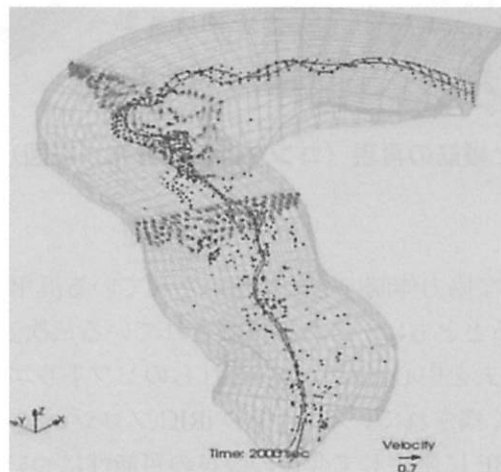


図-21 実河川曲がり部の計算例

3. 3 Nays CUBE の適用例（二次流を例として）

次に、Nays CUBE の適用例として、三次元モデルならではのアドバンテージが生かせる二次流の計算事例を示そう。図-21 は急な曲がりをする河川における流況を再現した事例である。可視化には、パーティクルトレース、流速ベクトル、流線を併用している。河川曲がり部分の断面内には循環流が発生しており、主流を考慮すると、旋回流的な流れ構造となっていることがわかる。この旋回流は遠心力と圧力勾配の不均衡から生じる曲がり部の特徴的な流れであり、第一種二次流と呼ばれる。この第一種二次流は曲がり部の局所洗掘などに密接に関与し、工学的に極めて重要な現象である。第一種二次流の掃流砂に及ぼす影響は、Nays2D などの二次元ソルバーについても、横断方向流砂式（長谷川式など）に考慮されているが、二次流に伴う流況の変化やそれに伴う浮遊砂輸送などを詳細に検討するためには、三次元ソルバーによる必要がある。

一方、図-22 は矩形断面の直線水路における流れと河床変動の再現結果である。図中左上はこの計算に用いた計算格子であり、iRIC の前処理機能の一つである多機能構成生成ツールを用いて生成している。この格子では主流方向の格子数を 3 としていることに注意されたい。これは、水路主流方向の流れの変化は相対的に小さいとして無視し、断面内の流況のみの再現を目指し、主流方向の格子数はソルバーの動作に最低限必要な数に抑え、周期境界条件を上下流端に課したためである。図の横断面図をみると、いくつかの循環流セ

ルの存在が認められる。これは、直線水路に発生する第二種二次流と呼ばれる現象である。前述の第一種二次流と同様に横断面内に発生する循環流ではあるが、発生原因が全く異なる。第二種二次流の場合はレイノルズ応力の非等方性に起因する現象であり、遠心力は関係が無い。従って、第一種二次流は線形乱流モデルにおいても再現されるが、第二種二次流については、乱流モデルとして非線形モデルを選ぶ必要があり、線形モデルでは第二種二次流は全く再現されない。図-22 右図では、河床に主流方向の筋状の凹凸の発生が見られる。これは、第二種二次流に起因する河床変動であり、一般に縦筋と呼ばれる。このような断面内の二次流とそれに伴う河床変動を直接再現できるのは、三次元ソルバーの大きなアドバンテージである。

ここでは、紙面の都合上、二次流に関する2つの計算事例のみを示したが、構造物周辺の流れ、植生を含む流れなど、三次元的流れ特性が卓越する現象は数多い。これらの一部はソルバー事例集として Web 上にアップロードされているので参照されたい (<http://i-ric.org/ja/>)。

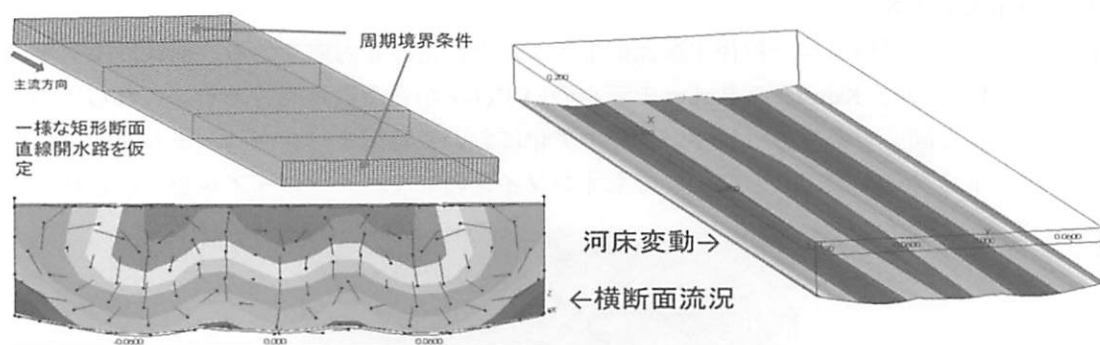


図-22 直線水路の第二種二次流と縦筋の再現（コンタは流速分布（左図）あるいは河床高（右図）を示す）

4. おわりに

本報では、日米を中心に国際的な協力体制のもとで進められている汎用河川シミュレーションプラットフォーム iRIC の概要について述べるとともに、これに搭載されている三次元ソルバー Nays CUBE の特徴について、汎用化へ向けての新たな工夫を中心に示した。これらのソフトウェアは未だ発展途上であり、GUI、ソルバともに、未完成な部分も多く残されている。今後の iRIC プロジェクトの展開については、別報（川村）に譲るとし、ここでは、Nays CUBE に限定して今後の改良の可能性について示すと、次のようになる。

- ・非定常流量のもとでの水際移動の計算
- ・静水圧近似、内部モード外部モード分離等による計算速度改良
- ・非シグマ座標への拡張
- ・VOF、密度関数法等への自由水面計算の取り扱いの拡大

iRIC がさらに世界中にユーザーを広げ、河川工学の発展に貢献することを祈りつつ改良を進めていきたい。

Appendix : Nays CUBE の基礎方程式系と計算手法

A. 1 移動一般曲線座標系での流れの基礎方程式の表記

Nays CUBE の流れの基礎式は、流速ベクトルの反変成分を基本変数とする連続式、運動方程式（3方向）、k-方程式、ε-方程式から構成され、次のように記述される^{3),4)}。

[連続式（移動一般曲線座標系）]

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial V^a \sqrt{g}}{\partial \xi^a} = 0 \quad (1)$$

[運動方程式（移動一般曲線座標系）]

$$\frac{\partial V^i}{\partial t} + \nabla_j [V^j (V^i - W^j)] + V^i \nabla_j W^j + V^j \nabla_j W^i = F^i - \frac{1}{\rho} g^{ij} \nabla_j p + \nabla_j \left[-\overline{v^i v^j} \right] + 2\nabla_j e^{ij} \quad (2)$$

[k-方程式 (移動一般曲線座標系)]

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla_j [k(V^j - W^j)] + k \nabla_j W^j = -g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - \varepsilon + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i k \right\} \quad (3)$$

[ε-方程式 (移動一般曲線座標系)]

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla_j [\varepsilon(V^j - W^j)] + \varepsilon \nabla_j W^j = -C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} g_{ij} \overline{v^i v^j} \nabla_j V^i - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \nabla_j \left\{ \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} + \nu \right) g^{ij} \nabla_i \varepsilon \right\} \quad (4)$$

ここに、 ξ^i = 一般曲線座標、 t = 時間、 V^i = 流速ベクトルの反変成分、 p = 圧力、 ν = 動粘性係数、 ρ = 水の密度、 k = 乱れエネルギー、 ε = 乱れエネルギー散逸率、 ν_t = 渦動粘性係数、 g_{ij} 、 g^{ij} = メトリックテンソルの共変、反変成分、 g = メトリックテンソルの行列式 ($\det(g_{ij})$)、 F^i = 重力加速度の反変成分を、 W^i = 格子移動速度の反変成分、 $\overline{v^i v^j}$: レイノルズ応力テンソルの反変成分をそれぞれ表す。また、 ∇_i は共変微分を表しており、一般的なベクトルの反変成分 A^i に対しては次のように定義される。

$$\nabla_i A^k = \frac{\partial A^k}{\partial \xi^i} + A^j \Gamma_{ij}^k \quad (5)$$

ここに、 Γ_{ij}^k はクリストッフェル記号であり、次のように定義される。

$$\Gamma_{ij}^k = \left\{ \begin{matrix} k \\ i j \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} g^{km} \left(\frac{\partial g_{jm}}{\partial \xi^i} + \frac{\partial g_{im}}{\partial \xi^j} - \frac{\partial g_{ij}}{\partial \xi^m} \right) = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^p} \frac{\partial^2 x^p}{\partial \xi^i \partial \xi^j} \quad (6)$$

座標変換メトリックテンソルについては次のように計算される。

$$g_{ij} = \frac{\partial x^k}{\partial \xi^i} \frac{\partial x^l}{\partial \xi^j} \delta_{kl}, g^{ij} = \frac{\partial \xi^k}{\partial x^i} \frac{\partial \xi^l}{\partial x^j} \delta_{kl}, g_{ij} g^{jk} = \delta_i^k \quad (7)$$

式(3)、(4)における記号、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 、 σ_k 、 σ_ε はモデル定数で、一般に $C_{\varepsilon 1}=1.44$ 、 $C_{\varepsilon 2}=1.92$ 、 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$ を用いる。

流速ベクトル物理デカルト成分 U^i と計算空間反変成分 V^i とは次の Chain rule により機械的に変換される。

$$\begin{bmatrix} U^1 \\ U^2 \\ U^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial \xi^1} & \frac{\partial x^1}{\partial \xi^2} & \frac{\partial x^1}{\partial \xi^3} \\ \frac{\partial x^2}{\partial \xi^1} & \frac{\partial x^2}{\partial \xi^2} & \frac{\partial x^2}{\partial \xi^3} \\ \frac{\partial x^3}{\partial \xi^1} & \frac{\partial x^3}{\partial \xi^2} & \frac{\partial x^3}{\partial \xi^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V^1 \\ V^2 \\ V^3 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} V^1 \\ V^2 \\ V^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \xi^1}{\partial x^1} & \frac{\partial \xi^1}{\partial x^2} & \frac{\partial \xi^1}{\partial x^3} \\ \frac{\partial \xi^2}{\partial x^1} & \frac{\partial \xi^2}{\partial x^2} & \frac{\partial \xi^2}{\partial x^3} \\ \frac{\partial \xi^3}{\partial x^1} & \frac{\partial \xi^3}{\partial x^2} & \frac{\partial \xi^3}{\partial x^3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U^1 \\ U^2 \\ U^3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A. 2 Nays CUBE の乱流モデルの構成則

Nays CUBE では本文中に記載したように、乱流モデルとして標準型線形 k-εモデルと、二次非線形 k-εモデルが用いられている。これらの乱流モデルの構成側の式形を次に示す。

A. 2. 1 標準型線形 k-εモデルの構成則

一般座標系において、標準型 k-εモデルにおけるレイノルズ応力の構成則は次のように表記される。

$$-\overline{v^i v^j} = \nu_t S^{ij} - \frac{2}{3} k \delta_s^i g^{sj}, \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j \quad (9)$$

ここに、 ν_t = 渦動粘性係数、 C_μ = 定数 (=0.09 (=const.)) である。

A. 2. 2 二次非線形 k-εモデルの構成則

二次非線形 k-εモデルの構成方程式の表記にはいくつかの方法があるが、Nays CUBEでは次のような歪みテンソルと回転テンソルを用いた表記を採用する。

$$-\overline{v^i v^j} = \nu_t S^{ij} - \frac{2}{3} k \delta_s^i g^{sj} - \frac{k}{\varepsilon} \nu_t [\alpha_1 Q_1 + \alpha_2 Q_2 + \alpha_3 Q_3], \nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (10)$$

$$Q_1 = S^{ia} g_{ad} \Omega^{dj} + S^{jb} g_{bd} \Omega^{di}, Q_2 = S^{ia} g_{ad} S^{bj} - \frac{1}{3} S^{ka} g_{am} S^{mb} g_{bk} \delta_i^j g^{ij}, Q_3 = \Omega^{ia} g_{ad} \Omega^{dj} - \frac{1}{3} \Omega^{ka} g_{am} \Omega^{mb} g_{bk} \delta_i^j g^{ij} \quad (11)$$

$$S^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i + g^{ia} \nabla_a V^j, \Omega^{ij} = g^{ja} \nabla_a V^i - g^{ia} \nabla_a V^j \quad (12)$$

モデル係数は定数ではなく、ストレインパラメータ S とローテーションパラメータ Ω の関数として与える (Kimura & Hosoda, 2003)⁵⁾。このモデル関数の与え方については、多くの研究があるが、Nays CUBE では河川

流への適用事例の豊富な AHK モデル (Ali, Hosoda & Kimura, 2007) ²⁾を採用し、次のように表現する。

$$\alpha_1 = -0.1325f_M, \alpha_2 = 0.0675f_M, \alpha_3 = -0.0675f_M \quad (13)$$

$$f_M = (1 + m_{ds}S^2 + m_{d\Omega}\Omega^2)^{-1}, C_\mu = c_{\mu 0} (1 + c_{mS}S^2 + c_{m\Omega}\Omega^2) / D_\mu \quad (14)$$

$$D_\mu = 1 + c_{ds}S^2 + c_{d\Omega}\Omega^2 + c_{ds\Omega}S\Omega + c_{ds1}S^4 + c_{d\Omega1}\Omega^4 + c_{ds\Omega1}S^2\Omega^2 \quad (15)$$

S, Ω はそれぞれストレインパラメータ, ローテーションパラメータと呼ばれるスカラー無次元量で, 次のように表記される。

$$S = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} S^{ia} g_{aj} S^{jb} g_{bi}}, \quad \Omega = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{\frac{1}{2} \Omega^{ia} g_{aj} \Omega^{jb} g_{bi}} \quad (16)$$

式(14)-(15)には 11 個のモデル定数が含まれており, これらは表-3 に示す値を用いている。これらの値は実現条件や単純せん断乱流場の乱れ強さの分布の実験結果との比較などから同定されている。

表-3 二次非線形モデルのモデル定数 (Ali, Hosoda & Kimura, 2007)

$C_{\mu 0}$	0.09
m_{ds}	0.01
$m_{d\Omega}$	0.003
c_{nS}	0.0028
$c_{n\Omega}$	0.007
c_{dS}	0.0085
$c_{d\Omega}$	0.004
$c_{ds\Omega}$	0.003
c_{ds1}	0.00005
$c_{d\Omega1}$	0.00005
$c_{ds\Omega1}$	0.00025

A. 3 Nays CUBE の流砂と河床変動の基礎式

A. 3. 1 掃流砂量の基礎式

Nays CUBE は, 掃流砂と浮遊砂を考慮できる。掃流砂については, 平衡流砂モデルのみに対応し, 三通りの掃流砂モデル, Meyer-Peter-Muller モデル (MPM モデル) ⁶⁾, 芦田・道上モデル ⁷⁾, Kovacs・Parker 式を単純化した山口・泉モデル(2003)⁸⁾から選択する。モデル式の具体的な式形を示します

・Meyer-Peter-Muller モデル (MPM モデル) :

$$q_{Bs} = 8(\tau^* - \tau_c^*)^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (17)$$

・芦田・道上モデル(1972) :

$$q_{Bs} = K[\tau^* - \tau_c^*] \times [\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2}] \sqrt{sgd^3} \quad (18)$$

・山口・泉モデル(2003) :

$$\frac{q_{Bs}}{\sqrt{sgd^3}} = \frac{K}{\left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right)} \left[\tau^* - \tau_c^* \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right) \right] \times \left[\tau^{*1/2} - \tau_c^{*1/2} \left(1 + \frac{\partial z_b}{\partial s} / \mu_c\right)^{1/2} \right] \quad (19)$$

ここに z_b :河床高, q_{Bs} :流線方向掃流砂量, K :補正関数, s :流線方向座標, μ_c :動摩擦係数, τ^* :無次元掃流力, τ_c^* :無次元限界掃流力, σ :砂の密度 (2650kg/m³), ρ :水の密度 (1000kg/m³), s :砂水中比重(=1.65)を表す。

一方, 横断方向の流砂量については底面勾配を考慮した長谷川式⁹⁾にならない, 次の式により評価する。

$$q_{Bn} = q_{Bs} \left(-\frac{\partial z_b}{\partial n} \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\mu_s \mu_k \tau^*}} \right) \quad (20)$$

ここに, n :横断方向の座標, μ_k :静止摩擦係数をそれぞれ表す。

A. 3. 2 浮遊砂の輸送方程式

浮遊砂輸送方程式は, 次のようなソース項の付加されたスカラー移流拡散方程式である。

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^j} \left[\sqrt{g} c (V^j - W^j - \delta_j^i \frac{w_f}{\sqrt{g_{33}}}) \right] + c \nabla_j W^j = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (D_i \sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) \quad (21)$$

ここに、 c ：浮遊砂濃度（体積濃度）， D_i ：浮遊砂拡散係数， w_f ：浮遊砂沈降速度をそれぞれ表す。右辺は拡散項であり、内部セル（底面セル以外のセル）では次のように分解される。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^j} (D_i \sqrt{g} g^{ij} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^1} (D_i \sqrt{g} g^{i1} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^2} (D_i \sqrt{g} g^{i2} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) + \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^3} (D_i \sqrt{g} g^{i3} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) \quad (22)$$

一方、最下層の底面セルについては、(22)式の右辺第3項は浮遊砂ソース項（浮遊項、シンク項は移流項中に含まれる） q_{su} を考慮して、次のように分解される。

$$\frac{1}{\sqrt{g}} \frac{\partial}{\partial \xi^3} (D_i \sqrt{g} g^{i3} \frac{\partial c}{\partial \xi^i}) \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{1}{\Delta \xi} \left[\left(D_i \sqrt{g} g^{i3} \frac{\partial c}{\partial \xi^i} \right)_{upper} - \left(D_i \sqrt{g} g^{i3} \frac{\partial c}{\partial \xi^i} \right)_{lower} \right] = \frac{1}{\sqrt{g}} \frac{1}{\Delta \xi} \left[\left(D_i \sqrt{g} g^{i3} \frac{\partial c}{\partial \xi^i} \right)_{upper} - 0 \right] + \frac{\sqrt{g^{33}}}{\Delta \xi} q_{su} \quad (23)$$

ここに、添え字 **upper** はセル上面の値，**lower** はセル下面（底面セルの場合河床面）の値を示す。ソース項（浮遊項）は平衡状態を考慮し、基準面濃度 C_a と沈降速度 w_f の積として次のように表す。

$$q_{su} = C_a w_f \quad (24)$$

ここに、基準面濃度は基準面高さ（本モデルでは $z = a = \Delta z |k| = 1/2$ ：最下層の高さの $1/2$ ，とする。）における浮遊砂濃度で、このモデル化においては板倉・岸モデル(1980)¹⁰⁾を用い、次のように表記される。

$$C_a = K \left(\alpha \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} \frac{g d}{u_* w_f} \Omega - 1 \right), \quad \Omega = \frac{\tau_*}{B_*} \frac{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi}{\int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2) d\xi} + \frac{\tau_*}{B_* \eta_0} - 1, \quad a = \frac{B_*}{\tau_*} - \frac{1}{\eta_0} \quad (25)$$

モデル定数はアインシュタイン（1950）にならい $B_* = 0.143$, $\eta_0 = 0.5$, $\alpha = 0.14$, $K = 0.008$ と与える。

砂粒子の沈降速度 w_f については、Rubey の式により、次のように計算する。

$$w_f = \sqrt{\frac{2}{3} S g d} + \frac{36 \nu^2}{d^2} - \frac{6 \nu}{d} \quad (26)$$

ここに、 S ：砂粒子の水中比重（ ≈ 1.65 ）， ν ：水の動粘性係数（ $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ）を表す。

A. 3. 3 河床の連続式

一般座標系における河床の連続式（エクスター方程式）を示す。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left(\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{q_B^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{q_B^\eta}{J} \right) + \frac{1}{J} (q_{su} - w_f c_b) \right) = 0 \quad (27)$$

ここに、 J ：二次元ヤコビアン， q_B^ξ ： ξ 方向の掃流砂量フラックス反変成分， q_B^η ： η 方向の掃流砂量フラックスの反変成分をそれぞれ表す。

A. 4 境界条件とスキーム

A. 4. 1 境界条件、水面の扱い

高レイノルズ数型乱流モデルを採用してため、壁面における k と ε は次のような壁関数法で与える。

$$k = \frac{u_*'^2}{\sqrt{C_{\mu 0}}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*'^3}{\kappa z_0} \quad (28)$$

ここに z_0 ：壁からの距離， $C_{\mu 0}$ ：const. (=0.09) である。底面近傍流速は粗面对数則，側壁面近傍の流速は滑面对数則で評価する。また、上流端の k と ε は、時間ステップ毎に一つ下流側の定義点の値と等しく置き、下流端の k と ε については、勾配ゼロ条件を用いる。水面の ε は杉山ら(1995)¹¹⁾の提案する次式で評価する。

$$\varepsilon_s = \frac{C_{\mu 0}^{3/4} k_s^{1/2}}{0.4 \Delta z_s}, \quad (C_{\mu 0} = 0.09) \quad (29)$$

上式で添字 s は表層の値を， Δz_s は水面からの距離を表す。水面の k は鉛直方向勾配ゼロ条件を課す。水面近

傍鉛直方向乱れの減衰を考慮し、細田(1990)¹²⁾にならい、次の減衰関数を渦動粘性係数に乘じる。

$$f_s = 1 - \exp\left\{-B(h-z)\varepsilon_s/k_s^{3/2}\right\}, (B=10) \quad (30)$$

自由水面変動は反変成分表示の基礎式では単純な次式で計算することができる(Takizawa et al., 1992)¹³⁾。

$$\Delta h = \sqrt{g_{33}} V^3 \Delta t \quad (31)$$

ここに、 Δt : 計算時間間隔、 Δh : Δt 時間の水面変動量、添字の 3 は鉛直方向を表す。

A. 4. 2 数値解析法の概要

数値計算法は有限体積法とし、圧力、 k および ε を直方体格子の中央で、流速ベクトルの成分を側面で定義する完全スタガード格子系を用いる。計量テンソル、クリストッフェル記号等は格子点上で定義し、計算過程で必要となる位置の値はその都度内挿によって求める。計算格子上の水理量の配置を図-23 に示した。

一方、運動方程式、 k 方程式、 ε 方程式の移流項の離散化にはいずれも風上差分スキーム（一次精度）、QUICK スキーム（二次精度）、TVD-MUSCL スキーム（三次精度）の 3 つのうちから一つを選択する。一般に、高次のモデルほど高精度の計算が期待できるが、計算は不安定になりやすくなることに注意する。

運動方程式の移流項に関するクリストッフェル記号を含む付加項についても、Takizawa et al (1992)¹³⁾の研究にならい、コントロール・ボリュームの上流側で評価する。時間積分は完全陽解法で二次精度の Adams Bashforth 法を用いる。圧力には動水圧を考慮し、時間ステップ毎に HSMAC 法を用いて収束計算を行う。

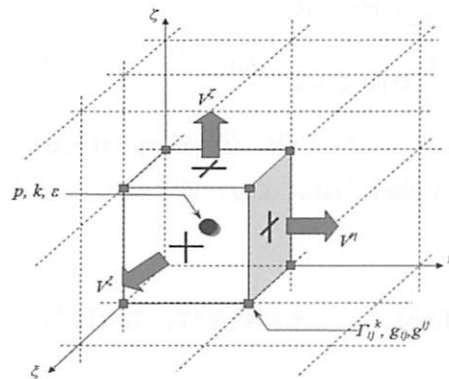


図-23 完全スタガード格子系における変数配置

参考文献

- 1) Mohamed, Nabi.: PhD, Thesis, Delft University of Technology, 2012.
- 2) Ali, M. S., Hosoda, T. and Kimura, I. : A non-linear k-ε model to predict the spatial change of turbulent structures in large scale vortices, Journal of Applied Mechanics., JSCE, vol.10, pp.723-732, 2007.
- 3) 木村一郎, 細田尚, 音田慎一郎: 完全スタガード移動一般曲線座標系における三次元開水路乱流シミュレータの開発, 四日市大学環境情報論集, 第5巻, 1,2号合併号, pp.145-170, 2002.
- 4) 木村一郎・細田尚・音田慎一郎: 非線形k-εモデルによる斜め越流型水制周辺の三次元流況に関する数値解析, 土木学会応用力学論文集, Vol.5, pp.717-726, 2002.
- 5) Kimura, I. and Hosoda, T. : A non-linear k-ε model with realizability for prediction of flows around bluff bodies, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.42, pp.813-837, 2003.
- 6) Meyer-Peter, E. and Müller, R.: Formulas for bed-load transport. Proceedings of 2nd Meeting, IAHR, Stockholm, Sweden, pp.39-64, 1948.
- 7) 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206号 pp.59-69, 1972.
- 8) 山口里実, 泉典洋: デューン平坦床遷移過程にみられる亜臨界分岐現象, 土木学会論文集 740 号 pp.75-94, 2003.
- 9) 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, 北海道大学博士論文 pp. 1-184, 1984.
- 10) Itakura, T., and Kishi, T.: Open channel flow with suspended sediments, Proc. Am. Soc. Civ. Eng., Vol.106, No.8, pp.1325-1343, 1980.
- 11) 杉山均, 秋山光庸, 他: 複断面開水路内の乱流構造解析と縦渦生成に関する研究, 土木学会論文集 515, 55-65, 1995.
- 12) 細田尚: 開水路流れにおける乱流拡散機構に関する水理学的研究, 京都大学博士学位論文, 1990.
- 13) Takizawa, A., Koshizuka, S. and Kondo, S.: Generalization of physical component boundary fitted coordinate (PCBFC) method for the analysis of free-surface flow, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol.15, pp.1213-1237, 1992.