円筒座標でCIP-Soroban法を拡張した蛇行河川の浅水流計算法

NUMERICAL SOLVER FOR SHALLOW-WATER MODEL OF MEANDERING RIVER FLOWS BY CIP-SOROBAN SCHEME IN CYLINDRICAL COODINATE SYSTEM

吉田圭介[1]・石川忠晴[2]
Keisuke YOSHIDA and Tadaharu ISHIKAWA

[1]正会員　博士（工）　東京工業大学大学院　産学官連携研究員（〒226-8502 横浜市緑区長津田4259番地）
[2]フェロー会員　工博　東京工業大学大学院　教授（〒226-8502 横浜市緑区長津田4259番地）

A new numerical solver is developed for a shallow-water flow model to simulate meandering river flows. This solver can investigate the flows in the curved river channel, by means of the adaptive CIP-Soroban (CIP-S) scheme in a cylindrical coordinate system. Time development of water velocity and free-surface level is computed by the orthogonal curvilinear coordinate system without any transformation of the governing equations, and the advection term is calculated by the high-accuracy CIP scheme. The numerical grid points of the waterfront line at the river bank are moved and tracked by the kinematic condition so that the grid points are always located on the line, and the rearrangement of the positions of the girds is easily conducted by the original CIP-S method. From the verification of this solver by the pure advection problem and by the numerical solution of the meandering river flows, in comparison with the CIP-S method in a Cartesian coordinate system and with the boundary fitted coordinate (BFC) method, it is shown that the proposed numerical solver reasonably predicts the main flow profile and water surface elevation and will be a promising numerical method as one of the practical solutions.

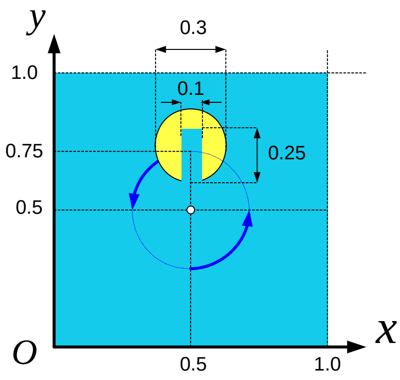
Key Words: *CIP-Soroban scheme, cylindrical coordinate system, shallow-water flow model, meandering river flow, waterfront elevation & tracking*

1．はじめに

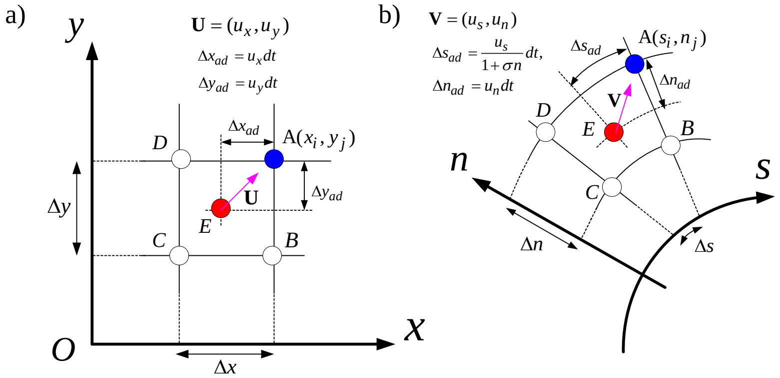
河川流は水流とそれを取り囲む移動砂床の力学的相互作用に支配されており，湾曲・蛇行した河道内の水流の挙動と，その水流に伴う河床変動の，両者の正確な現象予測が重要である．一方，実務では少ないコストで簡便に河川の解析や管理を行う必要があり，解析手段として低負荷の2次元計算法が徐々に利用され，実現象の予測に寄与している．それ故，2次元モデルの枠組みで高精度かつ汎用性の高い実用的な計算法の確立が望まれている．近年，流れや河床変動の予測に関しては2次元計算の枠組みで様々な計算法の提案がなされ，例えば，河岸が浸食・堆積作用によって変化する河道の形状に適合した計算モデル[1)]や，CIP法等の高次精度の移流スキームを利用した浅水流計算法[2)]，及び蛇行河川流で観察される2次流効果を導入するモデル[3)]など，実現象の再現性を向上させるために諸々の検討が行われている．特に，河道計画では中長期的な時間スケールで洪水等の外力による河道平面形状の変化を予測することは重要であり，上述の計算法の実用的解析法としての役割は大きいと考えられる．

一方，一般に河川実務で求められる重要な視点として，上流から下流までの長区間の流域の一貫した解析や管理が挙げられる．そのため，近年の数値解析では長区間の計算に伴う負荷を緩和させる目的で，一般座標（もしくは境界適合座標, BFC）による流体計算法が頻用されている．しかし，このBFCによる計算では基礎方程式に座標変換を施すため，これを数値的に扱う際には計算精度が劣化することがYabe *et al.*[4)]によって指摘されている．この考えに基づき，Yabe *et al.*[4)]は境界に適合した準構造格子であるSoroban格子法を開発し，移動境界問題に適用して良好な結果を得た．水工学においては中村ら[5)]がこのSoroban格子法を利用して，自由水面と固定河床が計算領域内に存在する鉛直2次元流動解析を行い，自由水面変動が正確に予測されることを示した．しかし，このSoroban格子はその名の通り，そろばん軸(計算格子軸)同士を平行に配置し，その格子軸上をそろばんの珠(計算格子点)が移動する仕組みを有する．そのため，河道が大きく蛇行する2次元平面流体解析では，このそろばん格子軸が蛇行する河道に適合せず，そのままでは利用しづらい．

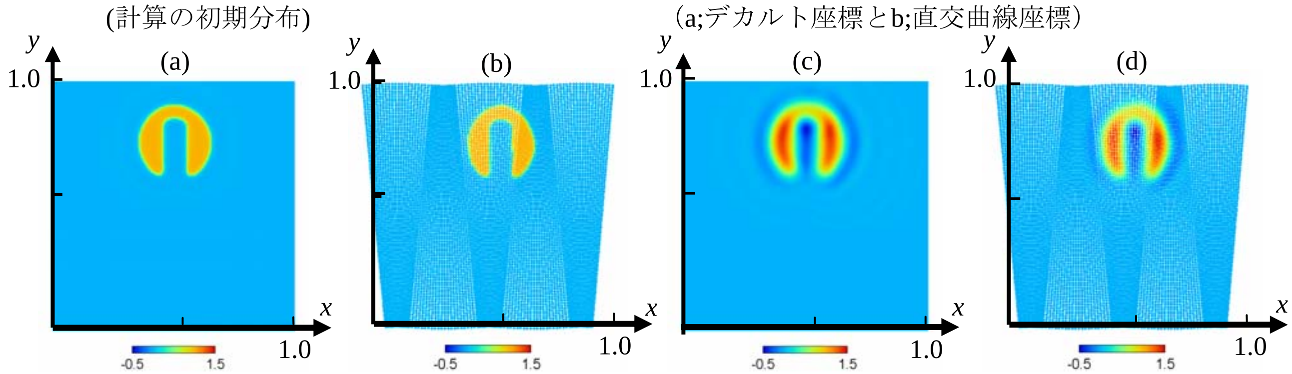
そこで，本報では実際の河道形状に沿うように，このそろばん軸を横断測線に合致するように回転させるという新たなアイデアを提案し，Soroban格子法を利用した浅水流計算法の構築を試みる．つまり，本計算法では円筒座標で記述された流体の基礎式にSoroban格子を適合させて，任意形状の河道側岸を有する蛇行河川流のモデル構築を行った．また，本



図−1　剛体回転問題の模式図
(計算の初期分布)



図−2　CIP法における移流プロセスの模式図
(a;デカルト座標とb;直交曲線座標)



図−3　1周期後の移流計算結果例　格子数102×102
(a; デカルト座標CIP法，b; 円筒座標CIP法，c; デカルト座標3次風上差分，d; 円筒座標3次風上差分)

報で構築された計算法の有効性を検証するために，まず円筒座標におけるCIP法の適用性を確認した．さらに，Soroban格子でのCIP内挿法(CIP-Soroban法)を利用して仮想蛇行河川の浅水流計算を行い，本報で提案する計算法と一般座標による計算法の比較を行って，本計算法の精度について検討を加えた．

2．円筒曲線座標におけるCIP法の精度検証

本節では3次精度のA型CIP法[4]を用いて2次元円筒座標(直交曲線座標) (s,n) におけるスカラー量の移流計算を行う．また，2次元デカルト座標 (x,y) においてCIP法を用いた際の計算結果と比較検討を行い，直交曲線座標でのCIP法による移流計算精度の検証を行う．検証題材として，**図−1**に示すような剛体の回転問題を選んだ．一般に，CIP法では移流現象をラグランジュ的視点から捉えて，移流計算を行う．この計算法は内挿関数が所与の座標系に適合すれば，座標系や計算格子の構造には依存せず利用できる．**図−2**に示すように，直交曲線座標においても，着目しているA点での時刻n+1のスカラー量 f は，移流原点Eで時刻nでの f が移流したものと考える．

2次元デカルト座標 (x,y) 及び2次元直交曲線座標 (s,n) における f の移流方程式は次式で表される．

$$\frac{\partial f}{\partial t}+u_x\frac{\partial f}{\partial x}+u_y\frac{\partial f}{\partial x}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t}+\frac{u_s}{1+\sigma n}\frac{\partial f}{\partial s}+u_n\frac{\partial f}{\partial n}=0 \tag{2}$$

ここで，(u_x,u_y) 及び (u_s,u_n) はそれぞれ (x,y) 座標及び (s,n) 座標での流速成分である．また，σ は s 軸上での局所曲率である．ここで，基礎式の離散化には有限差分法を用いた．また，計算条件として，クーラン数を0.1とし，初期条件には剛体部分で f =1.0，それ以外では f =0.0とした．

図−3には2次元場での計算格子数を102×102とした場合の1周期後の移流計算結果を示した．図中には，a) (x,y) 座標でのCIP法，b) (s,n) 座標でのCIP法，c) (x,y) 座標での3次風上差分法，及びd) (s,n) 座標での3次風上差分法による，各々の計算結果を合わせて示した．ここで，**図−3**(b)及び(d)で用いた計算格子は，計算領域を曲率 σ の異なる幾つかの (s,n) 座標上の要素領域に区分して，それらを直交条件が満足するように順次接続したものである．なお，**図−3**(b)及び(d)では5つの要素領域を用いた．

図から，3次風上差分では座標系に依存せずに数値拡散及び数値振動が観察される．一方，CIP法では座標系によらず良好な結果が得られることがわかる．なお，計算格子数を増減させた場合や，円筒座標において計算領域内の曲率が大きい場合でも，**図−3**とほぼ同様の結果が得られた．

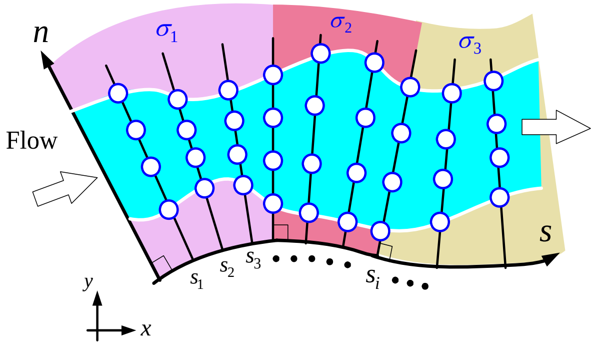


図-4　直交曲線座標におけるSoroban格子
（水色部：河道流路，○：計算格子，σ_k：曲率）

３．円筒座標CIP-Soroban法による蛇行流の計算

3.1　基礎方程式

蛇行する実河川での流体計算を考慮して，円筒座標系 $\xi_i=(r,\theta,z)$ における非圧縮性流体に関する保存則を円筒(直交曲線)座標系 $\zeta_i=(s,n,z)$ に変換する．また，この式系にReynolds分解を施した後に，水深方向にGalerkin積分を施す．本報では簡単のために水深平均流と水位変動を研究対象とするため，Galerkin積分で重み付け関数を1とすると，以下の水深平均流に関する浅水流方程式が導出される．

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial hU}{\partial s}+\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial}{\partial n}\left\{(1+\sigma n)hV\right\}=0 \tag{3}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial U}{\partial s}+V\frac{\partial U}{\partial n}+\frac{\sigma UV}{1+\sigma n}=-\frac{g}{1+\sigma n}\frac{\partial H}{\partial s}-\frac{\tau_s}{\rho h}+\frac{\mathrm{REY1}}{h} \tag{4}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial V}{\partial s}+V\frac{\partial V}{\partial n}-\frac{\sigma U^2}{1+\sigma n}=-g\frac{\partial H}{\partial n}-\frac{\tau_n}{\rho h}+\frac{\mathrm{REY2}}{h} \tag{5}$$

$$\mathrm{REY1}=\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial}{\partial s}\left(-\overline{\overline{u'u'}}h\right)+\frac{\partial}{\partial n}\left(-\overline{\overline{u'v'}}h\right)+\frac{2\sigma}{1+\sigma n}\left(-\overline{\overline{u'v'}}h\right) \tag{6}$$

$$\mathrm{REY2}=\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial}{\partial s}\left(-\overline{\overline{u'v'}}h\right)+\frac{\partial}{\partial n}\left(-\overline{\overline{v'v'}}h\right)-\frac{\sigma}{1+\sigma n}\left(-\overline{\overline{u'u'}}h\right)+\frac{\sigma}{1+\sigma n}\left(-\overline{\overline{v'v'}}h\right) \tag{7}$$

ここで，h は水深，ρ は水密度，g は重力加速度，σ は s 軸での河道曲率である．また，U,V は各々 s,n 方向のReynolds平均された流速の水深平均値，u',v' はそれらの変動値，τ_s,τ_n は河床せん断応力であり，REY1 及び REY2 は水平方向での水深平均Reynolds応力である．基礎式の導出の過程では，圧力には静水圧分布を仮定し，分子粘性は底面のみに働くものと簡略化した．記号＝は水深平均とReynolds平均の両方を施す演算子を示す．また，後述のCIP-Sを適用するために，流速に関する運動方程式(4)及び式(5)は連続式(3)を用いて非保存形式で表現されている．

3.2　境界条件

(1)　流入・流出境界

流入境界条件としては，流量 Q_{in} を上流端断面で与える．この際，開水路等流を仮定して，Manning式から水深に比例する流量を各格子点に配分した．一方，流出境界条件としては水位 H_{out} を与えた．

(2)　河岸の水際境界

Soroban格子法を利用した中村らの2次元鉛直流動の計算では，内部境界条件[5]を満足させるために気液・固液境界の気体側と固体側にそれぞれ格子点を配置する．一方，本論文で取り扱う浅水流問題では水深がゼロとなる特異点をそのまま扱うことができないため，流路内以外に計算点を配置できず，既報の方法[5]をそのまま適用できない．そこで，本報では河岸では流速に関する境界条件を適用する．つまり，河岸の水際では有限の水際水深 h_o を有する流体塊が常に水際に存在するという考えに基づき，水際の流体塊に運動学的条件式を適用して，水際境界を追跡した．

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial n_k}{\partial s}=V \tag{8}$$

ここで，n_k ($k=left,right$)は河岸の n 座標を示す．

3.3　円筒座標へのCIP-Soroban法の適用

図-4には円筒（直交曲線）座標 (s,n) における河川の平面形状と本計算で用いたSoroban格子の概念図を示す．計算領域ではまず蛇行流路をマクロに観察した時に，各々で曲率 σ_k がほぼ同一と見なせる幾つかの領域要素に区分し，各領域要素では曲率中心を通るような“そろばん”の軸に対応する格子軸 $n(=s_i)$ を配置する．各格子軸には，“そろばん”の珠に対応する格子点(○)を複数個配置する．Soroban格子[4]では，格子軸及び格子点の空間配置や粗密は計算目的により任意に変更可能であり，Soroban格子は準構造格子としての性質を有する．本報では各河道断面に平行に格子軸 n を配置し，各格子軸では両端の格子点は常に河岸に一致するようにした．

４．計算手法

4.1　計算手順

時間分割の考えに従い，式(3)~(5)及び式(8)を以下の2段階の計算相に分解し，順次計算を行うことで流速と水深の時間発展を求める．ただし，本報では中山ら[2]と同様に流速成分のみ，時間分割を行った．

(1^{st} step　移流相)

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial U}{\partial s}+V\frac{\partial U}{\partial n}=0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial V}{\partial s}+V\frac{\partial V}{\partial n}=0 \tag{10}$$

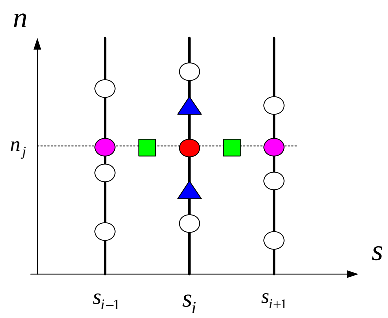
$$\frac{\partial n_k}{\partial t}+\frac{U}{1+\sigma n}\frac{\partial n_k}{\partial s}=V \tag{11}$$

(2^{nd} step　非移流相)

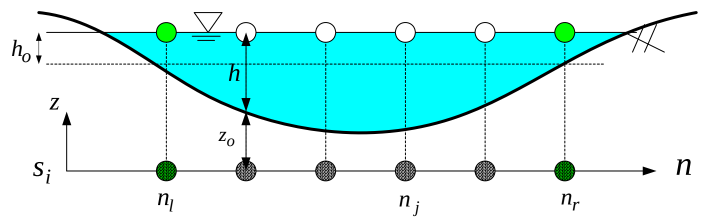
$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial hU}{\partial s}+\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial}{\partial n}\left\{(1+\sigma n)hV\right\}=0 \tag{12}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}=-\frac{g}{1+\sigma n}\frac{\partial H}{\partial s}-\frac{\tau_s}{\rho h}-\frac{\sigma UV}{1+\sigma n}+\frac{\mathrm{Rey1}}{h} \tag{13}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}=-g\frac{\partial H}{\partial n}-\frac{\tau_n}{\rho h}+\frac{\sigma U^2}{1+\sigma n}+\frac{\mathrm{Rey2}}{h} \tag{14}$$



図−5　Soroban格子配置と変数の定義点



図−6　河道断面における格子点配置と水際の定義

ここで，移流相はCIP法を用いて計算を行う．また，移流計算により河岸の水際が移動するため，移流相の計算後，Soroban軸両端の格子点は水際にこの格子点が一致するように再配置される．一方，非移流相の計算では連続式(12)及び水際境界条件式(8)を満足するように，流速と水深の反復計算を行う．

変数配置ではレギュラー格子（集中配置）を利用し，流速成分U,V，河床高z_o及び水深hは各Soroban格子点上に定義した（**図−5**の(s,n)空間において，●および○の位置）．一方，Reynolds応力は格子点の中間で定義した（同図中，▲および■の位置）．

4.2　各相の計算法と水際境界の扱い

本研究では離散化手法として，有限差分法を用いる．移流相では式(9)~(11)に基づき，流速U,V及び水際n_kの移流による変化量をM型CIPスキームから算定した[6]．つまり，n軸方向では通常のCIPスキームを用い，s軸方向では補間点(●)での線形補間を利用したCIP差分計算を行った．

一方，水際は以下のように簡易に取り扱った．**図−6**には静水状態における河道断面内での格子点(○)の配置を示した．図中，●は○のn軸への射影点である．図に示すように，本報で定義する水際は有限の水深h_oを有する流体塊であり，式(11)にCIP法を適用することで水際$n_k(s_i,t)$ $(k=right,or,left)$の時間発展を求める．このとき，水際点(●)はその点における流速値に基づいて常に同じ軸上（$n(=s_i)$軸）を移動し，この水際上の物理量は移流計算では保存される．一方，水際点以外の移流後の格子点n_jは両端の水際点n_kの間を軸上で等間隔に分割するように移動させる．この移動に伴って格子点の物理量は変化するが，この変化量の算定では移流前の格子点からCIP内挿を利用した．

移流相の計算の結果，移流計算後の流速値U^*,V^*が求められる．非移流相の計算ではこれらを用いて式(12)~(14)から次の時刻n+1での流速U^{n+1},V^{n+1}と水深h^{n+1}を求める．一方，本報では流速と水深を同一点に定義しているために，この変数配置に特有の非物理的な数値振動が発生することが想定される．そこで，牛島ら[6]に倣い，流速と水深の解法では水位勾配以外の項を予め格子点で評価し，連続式は格子点間において離散化する手法を採用した．さらに，式系(12)~(14)は完全陰形式で離散化して解く．このとき，これらの連立式は非線形である．本報ではこれらの式系を解く際に減速緩和法を利用して収束解を得て，時刻n+1での流速と水深の数値解を求めた．また，非移流相の計算では差分計算を行う必要があるが，河岸以外の計算点ではSoroban軸上のCIP内挿と線形内挿を適宜組み合わせて計算を行った．一方，河岸計算点で直接的な差分構成が不可能な場合には，河岸計算点同士の値から近似的に差分計算を行った．

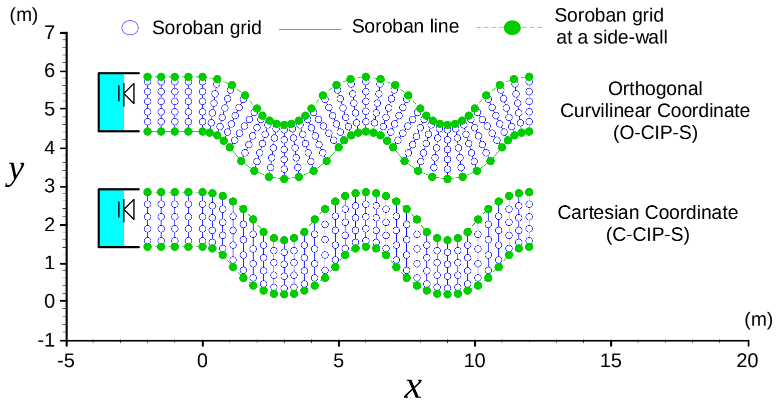
5．蛇行流における浅水流計算への適用

本節では上述の解析モデルを，緩慢な曲率を有する規則的な仮想の蛇行河川流へと適用する．ここでは同一の基礎式(3)~(5)に対して，本報で提案する円筒座標CIP-Soroban法(O-CIP-S法)を適用した場合，デカルト座標CIP-Soroban法(C-CIP-S法)を適用した場合，及び境界適合座標(BFC法)[7, 8]を適用した場合の各々の計算結果の比較を行い，計算法の検証を行う．

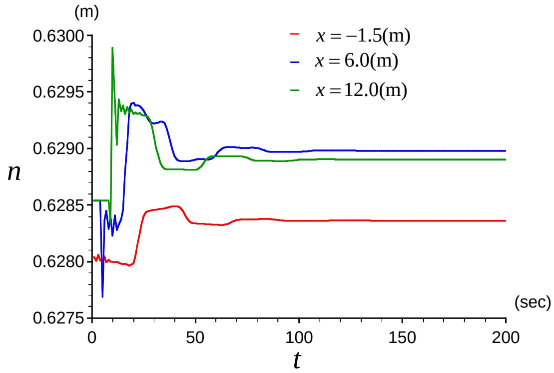
図−7には本計算で用いた仮想水路と座標系に関する模式図を示し，同図には各座標系に適合する格子配置も併示した．水路は直線部と蛇行部から構成され，蛇行部は径の異なる円弧群を2周期分接続したもので，1つの周期波に対しては蛇行波長6m，蛇行水路長$3\pi/\sqrt{2}$である．既往研究の定義に従うと，蛇行度S (= 蛇行水路に沿う距離/蛇行波長)は1.11程度となる．水路幅は$\sqrt{2}$ mであり，水路断面は矩形とした．また，水路底面の流下方向勾配は0とした．格子点数は，O-CIP-S法では流下方向に82点，横断方向に10点とし，C-CIP-S法ではx方向に87点，横断方向に10点とした．横断方向の空間解像度を確保し，曲線蛇行部をデカルト座標の格子で表現するため，またソロバン格子特有の差分構成を実現するために，C-CIP-S法の方は若干格子数が多い．

一方，水路側岸においては，有限の水深h_oを設定する必要がある．そこで，本計算では側岸点付近の底面形状はべき乗関数で表現し，h_o=0.01mとして微小な水際移動を許容させた．また，C-CIP-Sを用いた計算では，基礎式の上では水路の平均的な曲率をあらゆる領域で0と設定し，水路の側壁境界に格子点を配置することで水路の曲がりを表現した．

計算条件は以下のようにした．上下流端では流量

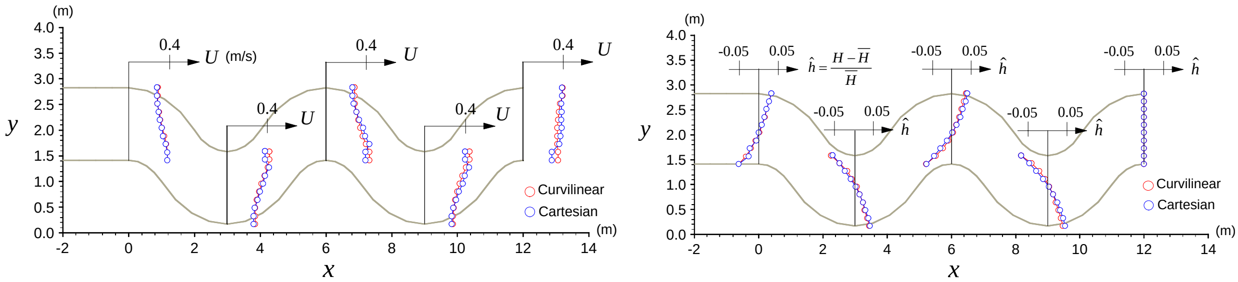


図−7　計算領域スケールと格子点配置に関する模式図(O-CIP-S法とC-CIP-S法の比較)



図−8　初期条件から平衡状態までの，格子点の n 座標の時系列(O-CIP-S法)

各データは，　x = -1.5, 6.0, 12.0 (m)の地点での水路中央に近い格子点の n 座標を示す．



図−9　x 方向のa) 流速 U とb) 水位変動に関する計算結果の比較(O-CIP-S法○ とC-CIP-S法○)

$\overline{H}$ は各断面での平均水位．　x = 0, 3, 6, 9, 12(m)の地点での横断分布を比較した．

Q_{in} (=0.1m^3/s)及び水位 H_{out} (=0.22m)を与えた．側岸では流速のスリップ条件とした．また，乱流モデルには以下の経験的０次モデル式を用いた[9]．

$$-\overline{u'u'} = 2D\left(\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial U}{\partial s}+\frac{\sigma V}{1+\sigma n}\right)-\frac{2}{3}K \qquad (15)$$

$$-\overline{u'v'} = D\left(\frac{\partial U}{\partial n}+\frac{1}{1+\sigma n}\frac{\partial V}{\partial s}-\frac{\sigma n}{1+\sigma n}\right) \qquad (16)$$

$$-\overline{v'v'} = 2D\frac{\partial V}{\partial n}-\frac{2}{3}K \qquad (17)$$

ここで，D は平面方向の渦動粘性係数，K は水深平均乱れエネルギーである．渦動粘性係数 D についてはRichardsonの4/3乗則から，K に関しては，Nezu & Nakagawa[10]による乱れエネルギーの水深方向分布に関する式を水深積分して得られる値を用いた．また，底面抵抗則にはManning式を用いた．この際，粗度係数は簡単のため，一定(=0.032)とした．

本計算では各方法(O-CIP-S，C-CIP-S，BFC)を用いて，静水状態を計算の初期条件として，定常解の比較を行う．**図−8**にはO-CIP-S法の場合の，初期条件から平衡状態までの，格子点の n 座標の時系列を示した．各データは x = -1.5, 6.0, 12.0 mの地点での水路中央に近い格子点の n 座標を示す．**図−8**より，計算初期には突発的な水流入によって，各格子点は各格子軸上において水路幅比で10^{-3}程度の僅かな移動を行い，その後は境界における力学的条件から動的平衡の位置へ漸近することがわかる．このことから，O-CIP-S法においても，初期の規則的な格子点配置は若干不規則となり，Soroban状の準構造格子となる．

図−9には x = 0, 3, 6, 9, 12mの地点での x 方向流速 U 及び水位 H の横断分布に関して，O-CIP-S法とC-CIP-S法とで比較して示した．これらの図から，僅かな相違が観察されるものの，O-CIP-S法とC-CIP-S法による結果は概ね良好に一致しており，内岸では流速が大きく，かつ水位が低いといった，緩慢な曲率を有する2次元浅水流の計算に特有の現象を再現

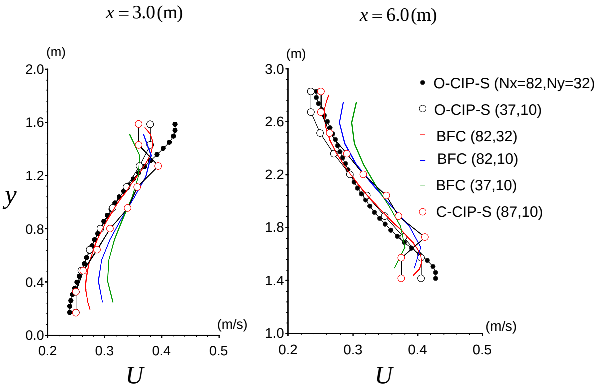


図-10　x 方向の流速U に関する計算結果の比較
(O-CIP-S法と1次風上差分によるBFC法)
x = 3m, 6mの地点での横断分布を比較した．

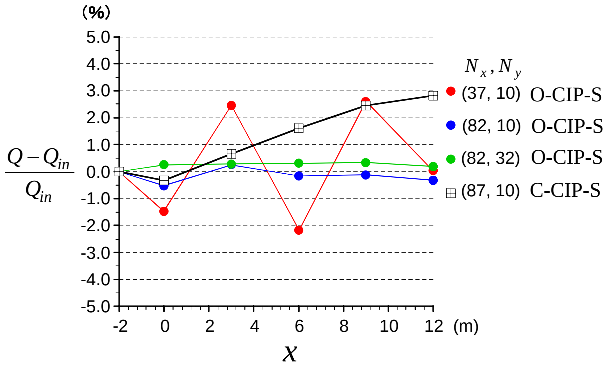


図-11　断面流量Q の縦断変化の比較
Q_{in} は上流端の流入量を示す．

していることがわかる．このことから，浅水流計算における円筒座標CIP-S法が既報のデカルト座標CIP-S法とほぼ同等の計算精度を有することが確認される．

一方，**図-10**にはx = 3m, 6mの地点での x 方向流速 U に関して，O-CIP-S法，BFC法およびC-CIP-S法を比較して示した．なお，BFC法では移流項に1次風上差分を利用している[7), 8)]．図中，括弧内の数値は用いた2次元計算空間での格子数(N_x, N_y)を示す．BFC法で格子数を増大した場合，少ない格子数を用いた場合のO-CIP-S法やC-CIP-S法の結果にほぼ漸近することがわかる．これはここで提案するO-CIP-S法の移流計算精度の高さを示すものと考えられる．一方，C-CIP-S法ではO-CIP-S法や格子数が多い場合のBFC法と結果が一致する．しかし，内岸近辺で流速が減少し，それ以外では若干増加する様子も観察される．これは3. 2で示した側岸での水際境界条件の影響により，河道湾曲が急峻な場合には，側岸近辺で用いた近似的な差分構成に問題が生じ，計算結果に影響を及ぼすからだと考えられる．よって，河道湾曲が比較的大きい場合には，本報で提案するO-CIP-S法の適用が検討される．

一般に河川流の解析では断面毎の流量の把握が重要となる．一方，有限差分法を利用した本計算法(O-CIP-S法，C-CIP-S法)では流量の保存性に関しては明確ではない．そこで，**図-11**には断面内の総流量Q の縦断変化に関して，格子数を変化させて比較して示したものである．O-CIP-S法では格子数の増大に従い，上流端の流入量Q_{in} に対する断面流量の変化は2%程度から0.5%未満となり，流量の保存は完全ではないが，ほぼ満足されることがわかる．しかし, C-CIP-S法では縦断方向に流量誤差が徐々に増大することがわかる．よって，C-CIP-S法では，湾曲を有する実際的な河川流への適用時には，流量の保存性について検討の余地がある．

5．おわりに

本報では円筒座標でCIP-Soroban法を拡張した，新たな浅水流計算法の構築を試みた．本計算法では円筒座標で記述された基礎式に直接CIP-Soroban法を適合させて，仮想蛇行河川流の計算を行った．境界適合座標を利用した蛇行河川に関する浅水流モデルとの比較から，本計算法はいくつかの点で改良すべき点があるものの，概ね妥当な結果を示し，有用な手法である可能性が示された．今後は，実用性の観点から，河道縦断方向の物理量（例えば流量など）の保存性や複断面河道への適用等を考慮して，本計算法を柔軟に適用していきたい．

参考文献

1) たとえば，清水康行・平野道夫・渡邉康玄: 河岸浸食と自由蛇行の数値計算, 水工学論文集, 第40巻, pp.921-926, 1996.
2) 中山恵介・佐藤圭洋・堀川康志: CIP法を用いた浅水流方程式の数値計算法の開発，水工学論文集，第42巻, pp.1159-1164, 1998.
3) たとえば，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2次流の遅れを考慮した平面2次元流モデル，水工学論文集，第44巻, pp.587-592, 2000.
4) Yabe, T., Mizoe, H. Takizawa, K., Moriki, H. Im, H. and Ogata, Y.: Higher-order schemes with CIP method and adaptive Soroban grid towards mesh-free scheme, *J. Comput. Phys*., Vol.194, pp57-77, 2004.
5) 中村恭志・石川忠晴・矢部孝・滝沢研二: Soroban格子法に基づく浅水２次元自由水面流れの計算手法の開発，水工学論文集，第49巻，pp.685-690, 2005.
6) 牛島省・竹村雅樹・禰津家久: コロケート格子配置を用いたMAC系解法の計算スキームに関する考察，土木学会論文集，No.719/II-61, pp.11-19, 2002.
7) 水理公式集・例題プログラム集，例題2-8，土木学会, 2001.
8) 吉田圭介・石川忠晴: 2次流の時間発展を考慮した水深積分モデルに関する基礎的検討, 水工学論文, 第50巻, pp.781-786, 2005.
9) 梶島岳夫: 乱流の数値シミュレーション, 補遺1および2, 1999.
10) Nezu, I. and Nakagawa, H.: Turbulence in Open-Channel Flows, IAHR-Monograph, Balkema, 1993.

（2006. 9. 30受付）