

二次元浅水流の保存型 CIP 陽解法の開発とその検証

Development of an Explicit Conservative CIP Scheme for Shallow Water Flows

内田龍彦*・河原能久**

Tatsuhiko Uchida and Yoshihisa Kawahara

*正会員 博(工) 広島大学大学院助手 工学研究科社会環境システム専攻 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

**フェロー会員 工博 広島大学大学院教授 工学研究科社会環境システム専攻 (同上)

A numerical model applicable to shallow water flows in rivers and over flooding area with complex geometry is of great interest to hydraulic researchers and engineers. In this paper, an explicit conservative CIP scheme for shallow water flows is developed based on the control volume method. The scheme simultaneously solves point, line and area averaged values of a computational cell to directly capture the variations of flow and geometry within the cell. Comparisons between numerical results and exact solutions for a one-dimensional dam break problem confirmed the superiority of the present scheme over conventional schemes in terms of accuracy. And other two tests also demonstrated that the present scheme with coarse cells can yield the reliable results for complex flows over undulated bed configuration.

Key Words: shallow water flow, Conservative CIP scheme, dam-break, bed undulation

1. 序論

計算機能力の向上に伴い、高度な数値流体解析法が提案され、局所的な流れにおいては気相、液相、固相の同時解法等が可能となりつつある。水工学の分野では、河川流や氾濫流解析などのように多くは広領域の流れ場が対象となるため、依然として浅水方程式に基づく二次元流解析の重要性は高い。また、高精度の数値解析では、流れの解析モデルの高度化の他に、流れに与える様々な情報を適切に評価することが重要となる。洪水氾濫流解析における家屋配置や幹線道路網、河川流解析における堤防や低水路線形等の流れを支配する境界条件は境界適合座標系を用いることで一般に評価される^{1),2)}。しかし、例えば市街地氾濫流解析では、図-1に示すように様々な地理情報データから計算データが作成されるため、多くの計算データが複雑に重なり合うことになり、これらの平面情報のすべてを適切に評価できるように格子を生成することは困難である。また、氾濫流解析に必要な国土数値情報や統計データがデカルト座標系で整備されていることから、デカルト座標系において都市構造などを適切に評価できる解析法が開発されれば、そのメリットは大きい。このためには、一つの計算格子において、与える境界条件の計算格子内での分布を考慮できる解析法が必要である。

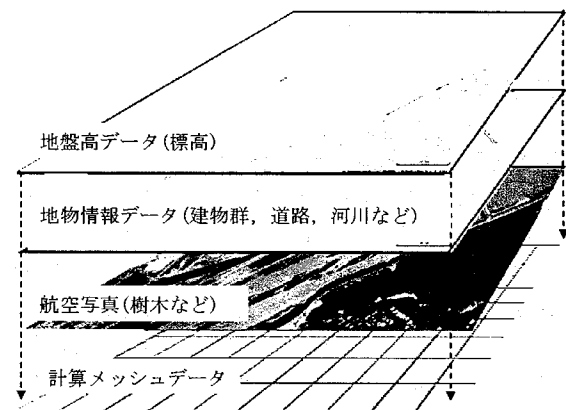


図-1 氾濫流解析における計算データ作成の例

多くの流れの解析法では、移流項の計算のほかに、計算過程において物理量の内挿補間により数値拡散が生じるため、与えた境界条件が平滑化される問題を有する。本研究では高精度かつ安定な移流解法として数値流体解析分野で広く応用されている、CIP法³⁾に着目する。水工学の分野においても、二次元浅水流解法としては、常・射流混在場において移流項の高精度化と安定化を目的としてCIP法が導入されている^{4),5)}。しかし、市街地の氾濫流のような複雑な境界条件を有する流れ場に適用した事例は無い。CIP法の計算格子内の分布自体を解くことに着目すれば、移流項の高精度化と安定化だけでなく、上述

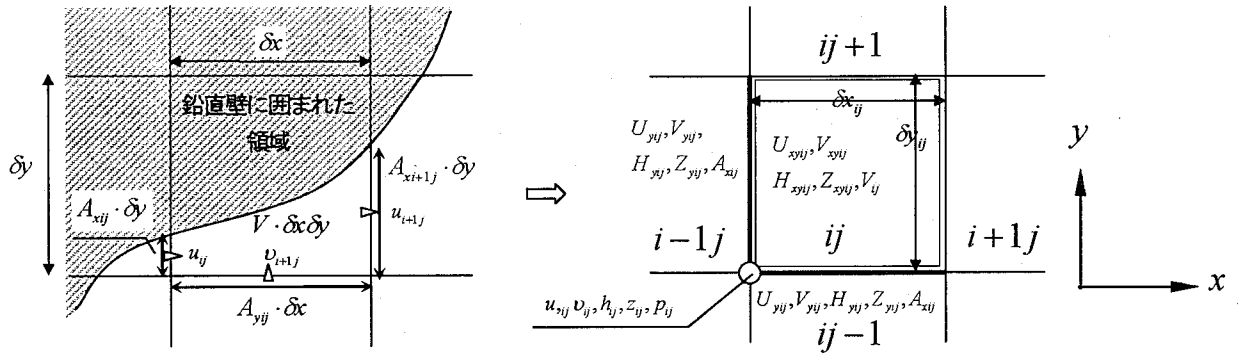


図-2 鉛直壁を空隙率で表現したコントロールボリューム(左)と本解析における主要な変数の配置(右)

したような様々な境界条件を考慮した解析が可能となる。また、二次元浅水流解法としての CIP 法には以下の課題が残されている。オリジナルの CIP 法では①質量の保存性が保証されておらず、②発散型の浅水流方程式にそのまま適用することができない。また、③浅水流解法では実用的な陽解法が多く提案されているが、これまでの CIP 法は基本的に圧力項が陰的に解かれている。

そこで、本研究では、まずこれらの課題を克服しつつ、流れに与える地盤高や建物群などの様々な条件の変化とそれに伴う流れ場の変化をデカルト座標系で表現するために、これらの計算格子内の分布を直接評価できる、CIP 法に基づいた流れの基本解法を検討する。そして、本解析法が非定常性の強い流れや起伏を有する地形上の流れを粗い計算格子上でも良好に算出することを示す。

2. 解析方法

2.1 基礎方程式と本解析法の概説

本研究では市街地の氾濫流解析を意識して、建物群や堤防、盛土等による流水の遮断を考慮するため、図-2に示すようにコントロールボリュームにおいて不透過の鉛直壁に囲まれた領域を考え(本解析ではコントロールボリュームにおいて鉛直壁位置が定義される点で水際境界とは異なる)、流体占有率を考慮した以下の二次元浅水流方程式を基礎方程式とする。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{Vh} \left(V \frac{\partial u_i h}{\partial t} + \frac{\partial A_j u_j h}{\partial x_j} \right) \\ & = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} - f_i + \frac{1}{Vh} \frac{\partial A_j h \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、添え字 ij は総和規約に従い、1,2 はそれぞれ x, y 方向を表す。添え字 J は j と等しいが、総和規約には従わないものとする。また、 h は水深、 u_i は i 方向流速、 $\zeta = z + h$ (z : 鉛直方向) であり、 A_j, V は i 方

向断面と計算格子の流体占有率(空隙率)である。 f_i は流体が境界に与える i 方向の外力であり、本論文では底面せん断力をマニングの粗度係数 n を用いて与える。 τ_{ij} は水平せん断力であり、渦粘性係数 $\nu = 1/6 \kappa u_* h$ のゼロ方程式モデルを用いて計算する。

CIP 法では一般に物理量の方向微分値が解かれるが、方向微分値の非移流項に含まれる種々の外力項の取り扱いが難しい。本研究では、近年開発された完全保存保証型 CIP 法のひとつである、CIP-CSL2 法⁶⁾に着目する。この解法では、CIP 法の課題であった保存性が保証されるだけでなく、物理量の方向積分値を解くことになるため、水深 h や流速 u 以外の量が評価しやすいため、複雑な境界条件を有する水工学分野の解析に適していると考えられる。例えば、河床高に関して言えば、その勾配よりも積分(平均)値の方が与えやすい。

図-2に不透過の鉛直壁を空隙率で表現したコントロールボリューム(左)と本解析における変数の配置(右)を示す。一般に CIP 法は Staggered 格子で流速とその方向微分値が連立されて解かれる。本研究では図-2に示すように、ある計算格子 ij において、格子の交点の値(点値、小文字の変数)、 x, y 方向の格子一辺にわたる平均値(線平均値、添え字 x もしくは y の大文字の変数)、格子内にわたる平均値(面平均値、添え字 xy の大文字の変数)を同時に解くことによって、流速値の補間を必要としない解析法である。さらに、流れ場と同様に、図-1に示す流れ場に影響を与える他の要素に関する変数(例えば、流体占有率や地盤高)の境界条件もひとつの計算格子に対して、点値、線平均値、面平均値が与えられれば、方程式に用いる種々の条件の計算格子内の分布を基礎方程式により直接評価することが可能となる。また、本研究では1章で述べた目的によりデカルト座標系で検討を行っているが、格子の点値、線平均値、面平均値が連立して解かれるため、一般座標系に拡張した際に変数を補間する必要がない利点がある。

本解析手法の概要を述べる。従来の CIP 法と同様に、運動方程式の移流項とその他の項は分離して解かれ、運動方程式では u_i を、連続式では h を計算する。連続式の解法には R-CIP-CSL2 法^{6),7)}を用いるが、移流項の解法については次節 2.2 に示す。これらに

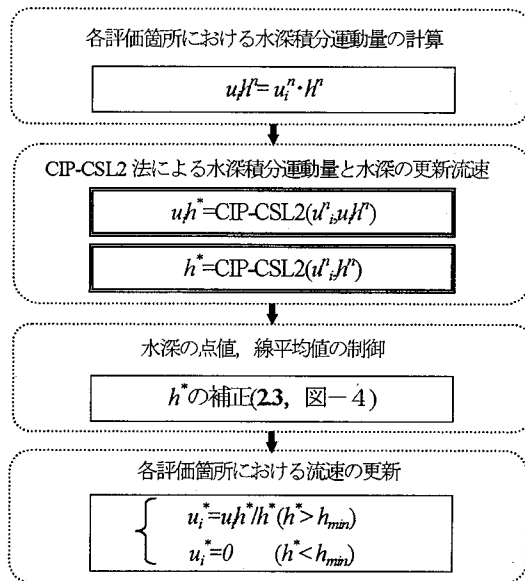


図-3 保存型移流解法のフロー

用いる格子間の内挿関数は Nakamura ら⁹⁾と同じであるが、本解析では Flux の計算に面積通過率が考慮される^{8),9)}。方程式各項の計算は 2.3 に示すフローに従い、陽的に解かれる。

2.2 移流項の解法

平面二次元解析におけるこれまでの CIP 法の多くは、式(2)の左辺項を連続式が満たされるとして、非保存型(もしくは勾配型)で表されている。本研究では、次項(1)に示すように式(2)をそのまま CIP-CSL2 法で解く解法(保存型解法)を提案し、(2)に示す運動方程式の左辺を連続式を用いて水深を含まない形に変換して解く場合(非保存型解法)と比較する。

(1) 移流項の保存型解法

本研究で提案する保存型解法では、式(2)の左辺の式変形を行わず、水深積分運動量の変化を直接解き、流速の変化を求める⁸⁾。保存型解法のフローを図-3に示す。まず、流速ベクトルと水深の点値、線平均値、面平均値を用いて、それぞれの積を取り、水深積分運動量 $u_i h$ を求める。次に、水深積分運動量 $u_i h$ と水深 h の保存式を CIP-CSL2 法で解き、更新された水深積分運動量 $u_i h^*$ と水深 h^* から、式(2)で更新される流速 u_i^* を求める。ここで、線平均値、面平均値の水深積分運動量と流速の算出において、それぞれが定義される平均領域区間の分布を考慮せずに、水深積分運動量 $u_i h^*$ を流速 u_i^n と水深 h^n の平均値の単純な積で、更新される流速 u_i^* を水深積分運動量 $u_i h^*$ を水深 h^* で除したものとしている。また、フロー中の水深の点値、線平均値の制御方法及び最小水深 h_{min} による流速の制御は 2.3 節に示す。

(2) 移流項の非保存型解法

移流項の非保存型解法は既往論文⁹⁾に示している

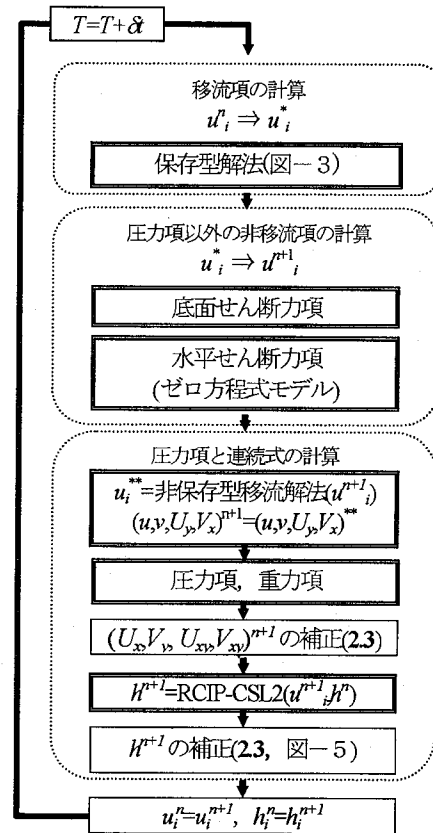


図-4 二次元浅水流の保存型陽解法のフロー

ため、ここでは要点のみ示す。詳しくは文献⁹⁾を参照にされたい。運動方程式(2)の左辺を連続式(1)が満たされるとして、以下のように変形し、流速を発散型方程式で表しつつ、運動方程式(2)の左辺から水深を除去する。

$$\text{左辺} = \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{1}{V} \frac{\partial A_j u_i u_j}{\partial x_j} \right) - \frac{u_i}{V} \left(\frac{\partial A_j u_j}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

式(3)を運動方程式(2)の左辺として解く。式(3)を一次元において解く場合、点値と線(x 軸)平均値は、通常の CIP-CSL2 法から第二項を引けばよく、それぞれ式(4)、(5)で更新される。

$$u_i^* = u_i^n (x - u_i \Delta t) \quad (4)$$

$$U_{xi}^* = U_{xi}^n + \Delta t \cdot \frac{U_{xi}^n}{V_i} \frac{A_{i+1} u_{i+1}^n - A_i u_i^n}{\Delta x_i} + \frac{1}{V_i \Delta x_i} \left(A_{xi+1} \int_{x_i}^{x_i - u_i \Delta t} u_{i+1} dx - A_{xi} \int_{x_i}^{x_i - u_i \Delta t} u_i dx \right) \quad (5)$$

ここで、式(4)及び式(5)の右辺第三項の積分に用いられる、格子間の補間関数は流速の点値と積分値を満たす二次曲線である⁹⁾。

2.3 非移流項の解法と解析フロー

提案する二次元浅水流の保存型陽解法のフローを図-4に示す。従来の CIP 法と同様に、運動方程式

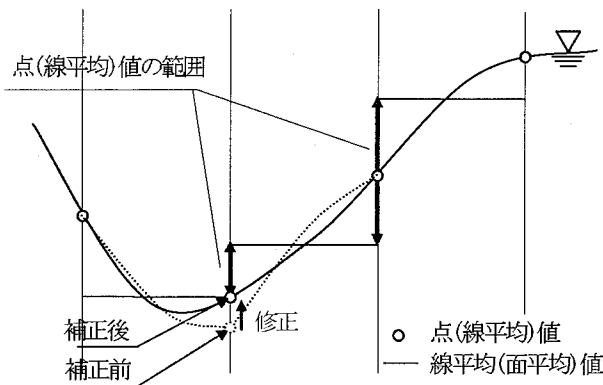


図-5 水位の点(線平均)値の制御方法

の移流項とその他の項は分離して解かれ、運動方程式から流速 u_i を、連続式から水深 h を計算する。

(1) 非移流項の解法

非移流項の解法を示す。本解析法では Regular 格子と同様に、点、線平均、面平均値において水深と流速の評価点と同じであるが、以下に示すように圧力項の差分には Staggered 格子と同様の考えを適用する⁹⁾。即ち、連続式に用いられる流速成分 (CIP-CSL2 法で用いる流速成分, u, v, U_y, V_x) の圧力勾配項の差分は Staggered 格子の場合に習って、連続式と整合が取れるように圧力勾配(流速)方向の積分(平均)値で表す。連続式に用いない流速成分 (U_x, V_y, U_{xy}, V_{xy}) は Regular 格子と同様の中央差分で表す。x 方向流速に関する圧力項をまとめると、以下のように表される。

$$\begin{aligned} u_{ij} &: -g(H_{xij}^n + Z_{xij} - H_{xi-1j}^n - Z_{xi-1j}) / \delta x \\ U_{yij} &: -g(H_{xyij}^n + Z_{xyij} - H_{xyi-1j}^n - Z_{xyi-1j}) / \delta x \\ U_{xij} &: -g(H_{xi+1j}^n + Z_{xi+1j} - H_{xi-1j}^n - Z_{xi-1j}) / 2\delta x \\ U_{xyij} &: -g(H_{xyi+1j}^n + Z_{xyi+1j} - H_{xyi-1j}^n - Z_{xyi-1j}) / 2\delta x \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、添字の記号と評価箇所は図-2 (右) に対応している。底面せん断力項および水平せん断力項はそれぞれの評価箇所の流速から計算している。

(2) 連続式の解法と水深・流速の制御

連続式の解法を示す。連続式は運動方程式で更新された流速を用いて計算する。この考え方は、よく用いられている二次元浅水流の陽解法¹⁰⁾のものと同様であり、連続式に用いる流速成分 (u, v, U_y, V_x) は、圧力項と連続式の計算の前に、移流項の計算により更新される。この移流項の計算においては保存型解法と非保存型解法の計算結果が変わらないことが確認されており、ここでは非保存型解法としている。

この計算法をダムブレイク問題に適用すると、正の段波上流端でアンダーシュート、先端でオーバーシュートが生じる^{8),9)}。これを解決するために以下のように水深(水位)の計算法を改良する。図-5に示

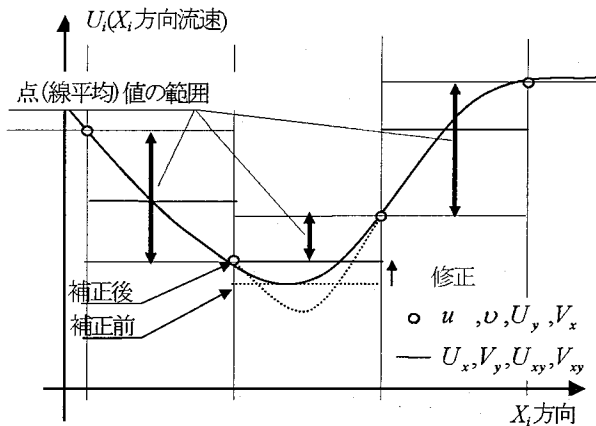


図-6 流速の線(面平均)値の制御方法

すように、水位の点(線平均)値は挟まれる線(面)平均値の間に強制的に収まるように修正する。線(面)平均の水深のいずれかが最小水深 h_{min} 以下の場合、挟まれる点(線平均)の水位は水がある方の水位と一致させている。また、水深の内挿関数による解の振動を抑えるために、連続式の計算においては単調性と凹凸性が保存できる有理関数を用いた R-CIP 法^{6),7)}を適用する。ここで、図-3に示す移流項の保存型解法に含まれる連続式の計算には、前者の水位(水深)の制御は用いられるが、R-CIP 法は適用しない。次に、流速の制御方法を示す。流速を更新する際にその箇所が最小水深 h_{min} 以下である場合は強制的にゼロを与える。また、連続式に用いられる流速成分 (u, v, U_y, V_x) については、その上流側の格子平均水深 (H_x, H_y, H_{ax}, H_{ay}) が最小水深 h_{min} 以下である場合も強制的にゼロを与える。これらの処理により、後述するような平坦河床のダムブレイク問題に関しては数値振動が生じることなく安定した計算が可能となるが、地形変化等を有する実用の計算の際には計算が不安定となる場合がある。そこで、連続式に用いない流速成分 (U_x, V_y, U_{xy}, V_{xy}) は、図-5に示した水位の制御方法とは逆に、図-6に示すように、挟まれる連続式に用いられる流速成分 (u, v, U_y, V_x) に用いられる流速の間の値になるように修正している。この制御は Staggered 格子では圧力場のチェッカーボード不安定による振動を生させないことを考慮したものであるが、計算の安定性を向上させる半面、他の制御と異なり積分量を修正することになるため、運動量の保存性を低下させる恐れがある。これについては、次章 4.1 で検証する。

4. 解析結果と検証

4.1 一次元ダムブレイク問題の再現性

まず、二次元浅水流解法の検討にしばしば用いられている一次元ダムブレイク問題に本解析法を適用し、検証する。図-7 (a)-(d) は種々の移流計算法による一次元ダムブレイク問題の再現性と格子解像度の影響の比較である。図-7 (a) に示す Regular 格子

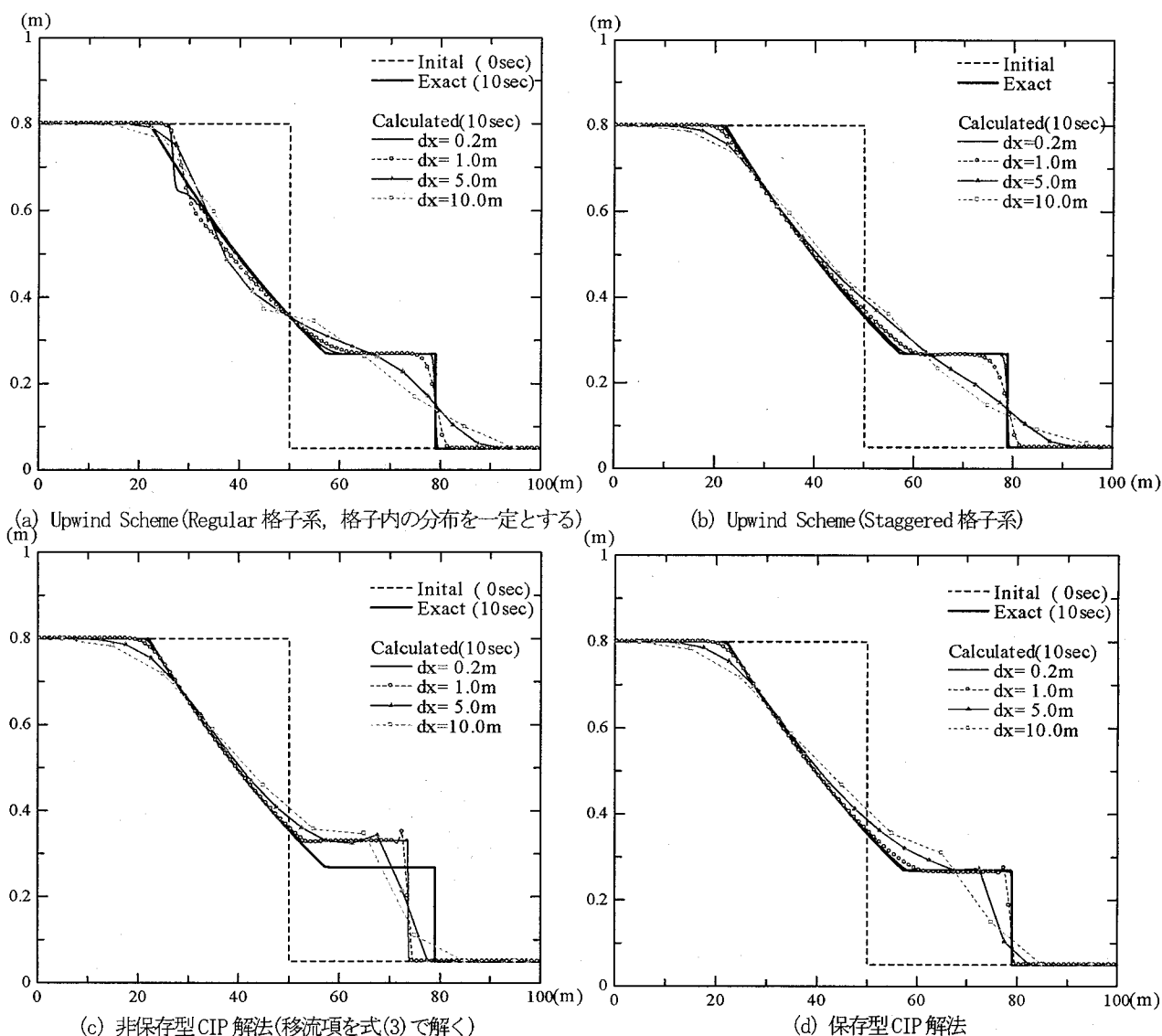


図-7 種々の移流計算法の一次元ダムブレイク問題の再現性と格子解像度の影響

系の Upwind 解法(本解析法で格子内の分布を考慮せずに保存式を解く場合)は、圧力勾配を中央差分で計算する場合、負の段波の到達点において理論値と異なる不自然な解となることが知られている。Ying ら¹⁰⁾によれば、この問題は圧力勾配項を上流側と下流側の圧力勾配を適切な重み付けにより評価すれば解決されるが、ここに示す中央差分系以外の評価方法では正の段波部の計算精度が低下するようである。図-7 (b)に示すように汜濫流解析によく用いられている Staggered 格子系の Upwind 解法ではこの問題は回避される。しかし、有限体積領域が Staggered 格子系で配置されるため、汜濫領域の複雑な地物情報や地盤高等を評価しにくい問題がある。また、段波の計算では生成項の影響が強くいずれの Upwind 解法でも不連続な段波先端を捉えることが出来るものの、図-7 (a), (b)より段波先端部を表現するためにおよそ7点の格子点数が必要である。このため、計算格子点数が少なくなると Upwind 解法では正の段波を表現できなくなり、段波先端位置は格子が粗くなるほど前進する。図-7 (c)に示す運動量保存式の

移流項の水深の項を連続式を用いて排除する非保存型 CIP 解法(移流項を式(3)で解く)は、それぞれの変数が Regular 格子系で配置されるが、負の段波先端部が Staggered 系解析法と同様に計算できている。また、正の段波部については必要最小限の点数と言える2点で表現しており、不必要に計算結果が拡散しておらず、格子が粗くなっても段波先端位置は変化しない。しかし、後述するドライベット上のダムブレイク計算でも見られるように、正の段波の波高が高く計算される問題がある。これに対し、提案する保存型 CIP 法(図-7 (d))は、連続式を数値的に扱うことによって、正の段波の波高が適切に表現されており、ここに挙げた問題点を解決した他の計算法の利点を合わせたような計算結果が得られている。また、非保存型 CIP 解法、保存型 CIP 解法のいずれの方法も、2.3に示した陽解法に従うものであるが、ダムブレイク問題の解析で生じやすい、正の段波上流端でアンダーシュート、先端でオーバーシュートが見られず、安定した陽解法であることが確認される。また、本モデルでは実用的な汜濫解析においても安

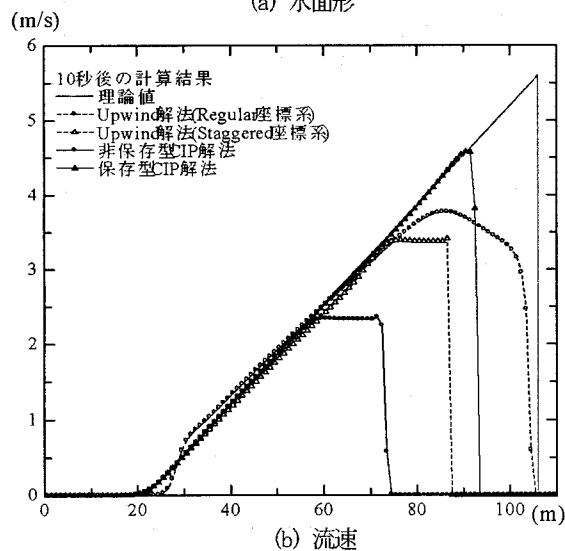
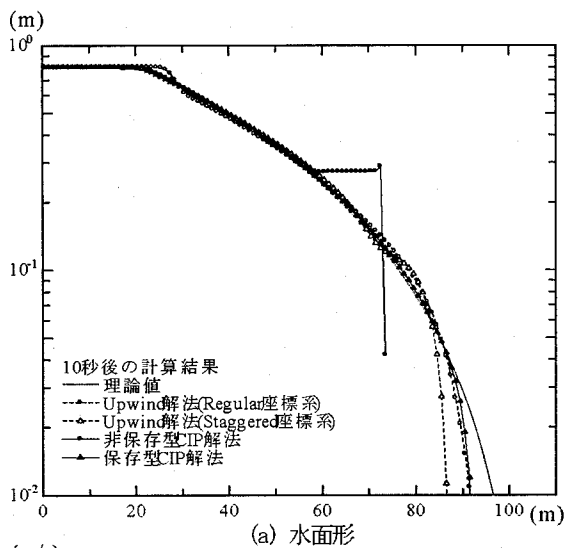


図-8 種々の移流計算法によるドライベット上の一次元ダムブレイク計算結果

定した計算が可能であるように、前章 2.3 に示したように運動量の保存性を保障しない流速の制限を加えているが、その影響はほとんど見られないことが確認できる。

図-8は、ドライベット上におけるダムブレイク問題に対して、図-6に示した解析法の計算結果と理論値の比較である。ここで数値計算上の最小水深は計算結果に影響を及ぼさない程度まで小さく設定しているが、Staggered 格子系の Upwind 解法では先端部で数値振動が生じたため、振動の生じない最小の水深、 $h_{min}=10^{-2}\text{m}$ としている。非保存型 CIP 解法(丸と実線)ではドライベットであっても段波先端部で高い波高が形成される。これは、水工学の分野でこれまで行われてきた CIP 法を用いた計算結果^{4),5),9)}と同様である。Staggered 格子系の Upwind 解法(白抜三角と点線)は最小水深を大きめに設定する必要があったため、それにより段波が形成されている。Regular 格子系の Upwind 解法(白抜丸と点線)は、よりフロントに近い小さな水深まで計算されており、流速分布を見ると、先端位置は理論値と良好に一致

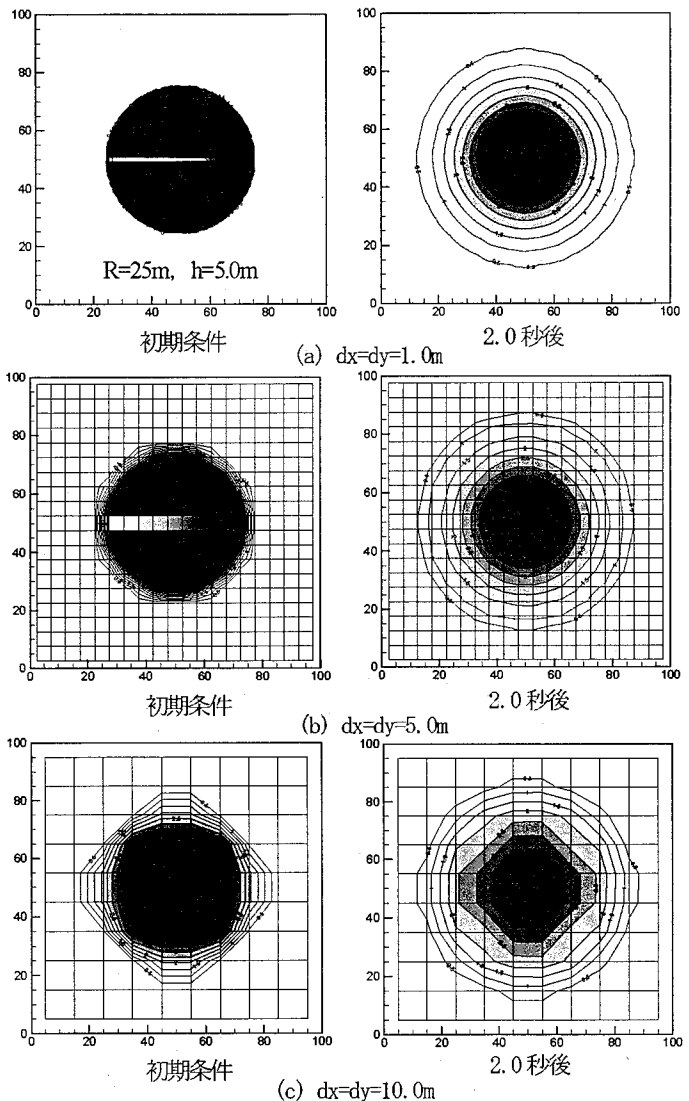


図-9 円形ダムブレイク解析における計算結果

する。しかし、フロント付近において理論値のシャープな流速分布を捉えることが出来ず、流速が低下しており、その結果、水深が盛り上がり、フロント付近の水深は理論値と一致しない。一方、保存型 CIP 解法(丸と実線)では、フロント先端位置は理論値と異なるものの、より小さな水深まで理論値の流速分布と一致しており、理論値の水深分布を先端部極近傍まで表現している。また、水深が大きい領域においても、他の計算法よりも精度が高いことが確認できる。底面が non-slip 条件であれば微小な水深で高速流が流れることは無いため、極先端部付近の本解析法の誤差は実用問題においては問題にならないと考えられる。

以上のように、提案する保存型 CIP 陽解法は安定かつ高精度に浅水流方程式が解かれることが示された。

4.2 二次元円形ダムブレイク解析

図-9 (a)-(c)は、円形の水柱崩壊問題に対して、本解析法による計算格子の大きさを変えた解析結果

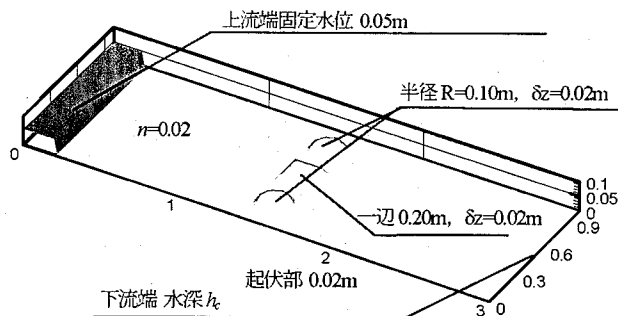


図-10 地形変化を有する流れの解析条件

の比較である。初期値として、計算領域中央に半径 25m、高さ 5.0m の円形の水柱を与えている。図は格子平均水深を表している。格子が粗い計算結果 (b), (c) については、参考のため、計算格子中央に交点をもつグリッドを表示している。一般に、多くの数値解析法は移流項の各方向微分を個別に扱うため、軸方向に対してそれ以外の方向の計算精度は低下する傾向にある。本解析法では移流項はすべての方向に対して同等の精度が得られるように、計算格子の点値、線平均値、面平均値を解いているため、方向依存性はほとんどなく、同心円の結果が得られている。計算格子を粗くした場合、初期条件を見れば分かるように、(c) $dx=dy=10.0m$ では格子平均水深では円形水柱の初期値を表現できていない。しかし、この粗い格子状での 2.0 秒後の計算結果を見ると、細かな計算格子の場合 (a) もしくは (b) とほぼ同様の解が得られている。これは、提案する保存型 CIP 陽解法は計算格子の面平均値だけでなく、点値、線平均値を考慮することによって、移流項の高精度化だけでなく、一つの計算格子に対する解くべき変数の分解能が上がっていることを示している。

4.3 地形変化を有する場の解析

本解析法では、一つの計算格子に対して流速と水深の点値、線平均値、面平均値の同時解法であり、かつ計算過程に内挿補間を伴わない解法であるため、基礎方程式(1),(2)に含まれる全ての変数に対して、一つの計算格子に対して明確に値が定義されるこれら四つの値を考慮した解析が可能である。ここでは、図-10に示すような地形変化を有する場合について、非定常流解析を行い、計算格子の大きさによる地盤の起伏状況の分解能を検討する。計算条件は図-10に示す通りであり、上流端水深を固定し、下流端は段落ちによる限界水深としている。用いた計算格子は $dx=dy=0.02, 0.05, 0.10m$ であり、0.05m は起伏間の隙間の長さ、0.10m は起伏スケール(格子平均値では起伏のピークが表せない)に相当する。このような急な地盤高の起伏を越流する流れは静水圧分布の仮定に基づく浅水流解法では抵抗を正しく評価できないことが知られている¹¹⁾が、ここでは本解析法の地盤高の分解能を検討するため、十分に地盤形状

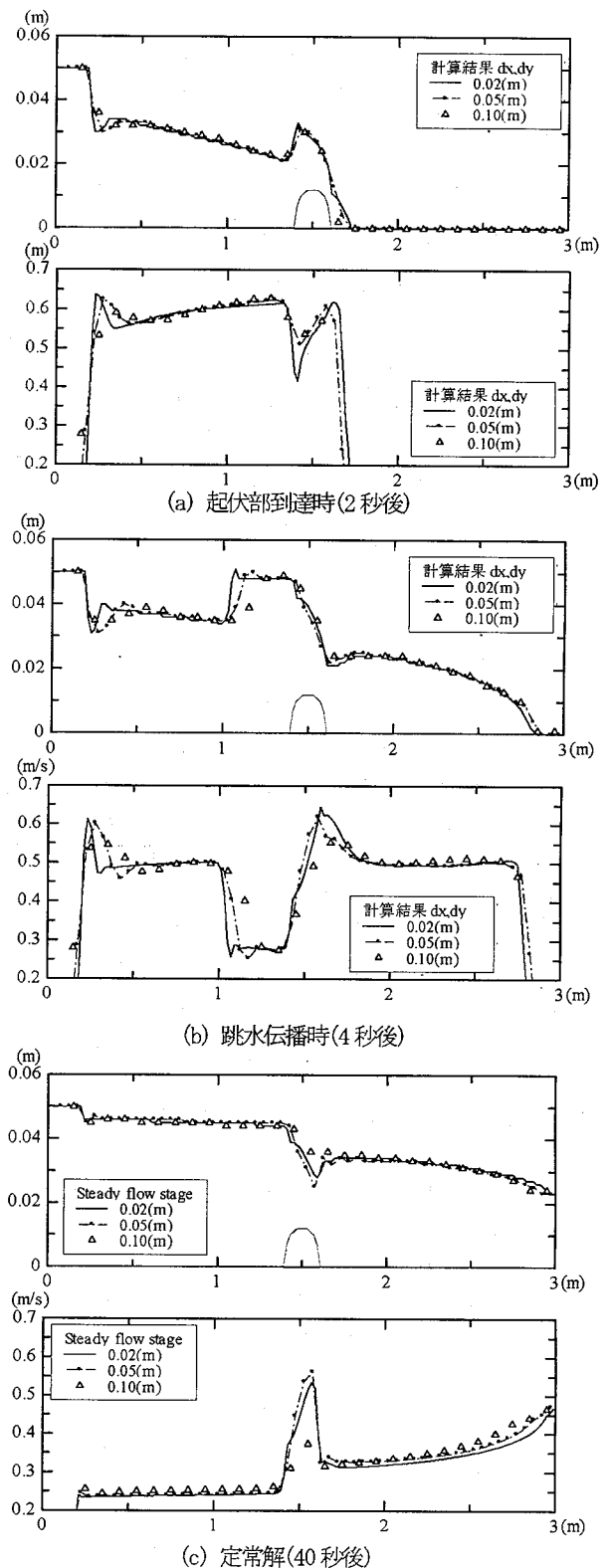


図-11 横断平均縦断水面形・流速分布の時間変化

を分解できる $dx=dy=0.02m$ と他のケースを比較する。

図-11 (a)-(c) は計算格子の大きさによる横断平均水位と流下方向流速の縦断分布の比較である。段波先端が河床急上昇部に到達する(図-11 (a))と、水位が急上昇し、常射流、ドライ・ウェット混在の厳しい流れとなるが、本解析モデルはこのような流れ場の計算が可能であることが分かる。また、格子

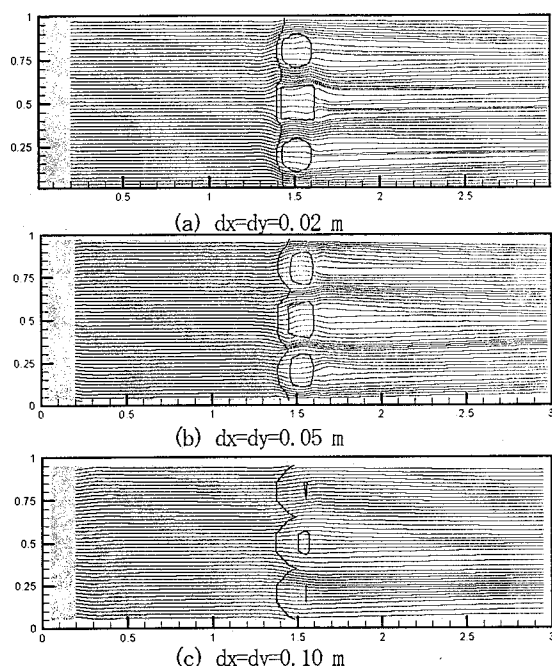


図-1 2 定常状態における水位コンターと流線

平均値で地盤の起伏状況が表現できる限界の格子間隔である $dx=dy=0.05m$ の結果は、いずれの状況においても $dx=dy=0.02m$ の水面形とほぼ一致している。計算格子を起伏部の大きさ程度まで粗くした $dx=dy=0.10m$ においては、格子の小さい他の結果に比べて、跳水の移動速度がやや遅いこと(図-1 1 (b))と、定常状態(図-1 1 (c))において起伏部直下の水面形が滑らかになり、僅かに起伏部上流の流速が大きいなどの相違はあるが、格子平均値では起伏部のピークが表せない解像度でありながら、小さな計算格子の計算結果と大きな違いは見られない結果となっている。

図-1 2 (a)-(c)は定常状態における水位コンターと流線を示したものである。 $dx=dy=0.05m$ (図-1 1 (b))は $dx=dy=0.02m$ (図-1 1 (a))と同様に、地盤の起伏部を迂回し、起伏部の間を流れている。 $dx=dy=0.10m$ (図-1 1 (c))では、起伏部の影響が他のケースに比べて弱く、起伏部間の集中する流れが表現できなくなっているが、水面形は他のケースと同様の形となっている。

以上より、本解析法は陽解法でありながら、常・射流、ドライ・ウェット混在の厳しい流れに適用可能である。さらに、計算格子スケールの地盤高の変化が流れ場に与える影響を捉えることができる。

5. 結論

本論文では、各計算格子の点値、線・面平均値を同時に解くことができる二次元浅水流の保存型の陽解法を提案した。従来の CIP 解法で課題であった段波先端部で波高が高くなる問題を解決し、従来の解法に比べ少ない格子点数で段波を表現することが出

来、かつ陽解法でありながら、常・射流、ドライ・ウェット混在の厳しい流れに適用可能であることを示した。さらに、計算格子スケールの流れ場や境界条件の変化を捉えることができることを示した。

本研究ではダムブレイク、地形変化といった単純な境界条件下においての検討に留まったが、本解析法は基礎方程式(1),(2)に含まれる全ての変数に対して、一つの計算格子に対して明確に値が定義される点値、線平均値、面平均値の四つの値を直接考慮できるため、氾濫流や河川流解析に必要な複雑に絡む多くの境界条件の高分解能評価に応用できると考えられる。今後は、本解析法を種々の境界条件を評価法できるように拡張し、現地への適用性と有効性を検討する。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 密集市街地の氾濫シミュレーションモデルの開発と洪水被害軽減対策の研究, 土木学会論文集 No.600, pp23-36, 1998.
- 2) 重枝未玲, 秋山壽一郎, 浦勝, 有田由高: 非構造格子を用いた有限体積法に基づく平面二次元洪水流数値モデル, 水工学論文集, 第 45 巻, pp.895-900, 2001.
- 3) T. Yabe, T. Ishikawa, and Y. Kadota: A Multidimensional Cubic-Interpolated Pseudoparticle(CIP)Method without Time Splitting Technique for Hyperbolic Equations, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.59, No.7, pp.2301-2304, 1990.
- 4) 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解析手法の開発, 水工学論文集, 第 42 巻, pp.1159-1164, 1998.
- 5) 川崎浩司, 小野稔和, Naparorn PIAMSA-NGA, 熱田浩史, 中辻啓二: CIP 法と SMAC 法に基づく平面 2 次元氾濫流モデルの構築, 水工学論文集, 第 48 巻, pp.565-570, 2004.
- 6) T. Nakamura et al.: Exactly Conservative Semi-Lagrangian Scheme for Multi-dimensional Hyperbolic Equations with Directional Splitting Technique, J. Comput. Phys. 174, 171 - 207, 2001.
- 7) F. Xiao, T. Yabe and T. Ito: Constructing oscillation preventing scheme for advection equation by rational function, Computer Physics Communications 93, 1-12, 1996.
- 8) 内田龍彦, 河原能久: 様々な境界条件を有する二次元浅水流の CIP 解法, 第 19 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, CD-ROM, A2-1, 2005.12.
- 9) 内田龍彦, 河原能久: 任意の境界形状を有する二次元浅水流の高精度解析手法の開発, 水工学論文集, 第 50 巻, pp.799-804, 2006.2.
- 10) X. Ying et al.: Upwind Conservative Scheme for the Saint Venant Equations, Jour. Hydraul. Eng., ASCE, p.977, 2004.
- 11) 内田龍彦, 福岡捷二, 福島琢二, 田中正敏: 大型粗度群上の浅い流れの平面二次元解析とその応用, 土木学会論文集, No.691, pp.93-103, 2001.

(2006 年 4 月 13 日 受付)