四分木構造格子を導入した自然河川における 分岐点と合流点の数値解法

1. はじめに

開水路の合流部や分岐部の問題は古くから研究され ている. 合流部の問題については, 古くは Taylor¹⁾によ る1次元の運動量保存則を導入したものや板倉ら²⁾によ る実験値に基づき支川の流速分布を求めたものなどがあ る. 分流部の問題についての研究は合流部の研究と比べ て一段と少ない。一次元の問題として考えれば分かる通 り、陽的に流量配分を決定することができないことがこ の問題の困難さの根本的な要因だろう。さらに、自然河 川の分岐部では、流量配分比に加えて、流砂量配分比を 流量配分比とは独立に決定しなければならない。これに 対し, 芦田ら³⁾は実験的に取り組み, フルード数と分岐 角度の観点から流量配分比の特性について調べている。 長谷川4)は運動量保存則を巧みに適用して堰を有する分 岐部における流量配分比を求めることに成功している. 守屋・長谷川ら5)は移動床分岐部についての理論解を求 め,不安定条件を明らかにした。理論的な観点からは以 上のように基本的性質の一端が解明されたに過ぎないと いうのが現状である.

合流部や分岐部の流況と河床変動を同時に扱う様々な 数値計算が行われるようになってきている.平面2次元 解析⁶⁾から発展して,最近では合流部の複雑な水理の適 切な解析のために水深方向にも計算格子を設定した準三 次元ないしは三次元計算も行われるようになってきてい る⁷⁾.しかし,同問題の既往のほとんどの研究では本川 と支川を直角に合流させた単純な形状を対象にすること に留まり,本格的に自然河川の分岐や合流部を取扱った 研究は少ない.最近になり,Mungら⁸⁾は一般座標を重 合格子のように繋ぎ合せることで自然河川の合流部の解 析が可能であることを示した.

このように現状では自然河川の分岐や合流部の解析に すぐさま適用できる知見は少ない.その理由として,前 述した水理学的な煩雑さに加え,分合流部や境界部の境 界適合が容易に行えないことが大きな要因として挙げら れる.分合流部を含む自然河川を一般座標により境界適 合した場合⁹⁾,大きく歪曲した格子を含まざるを得えず, この時,格子構成の自由度と引き換えに計算の安定性が 犠牲にされる.この問題は格子構成に対して要請される 数学的条件を満足することで解消されるものの,自然河 川の格子構成においてこの条件を満たすためには極めて 煩雑な試行錯誤が必要となる.そのうえ,歪曲が大きな 格子を有する格子構成では同じ格子構成のままで定常流 量から洪水流量までを一貫して安定に解析できる保証は







図-1 河道形状と河床高

ない.

これに対し、四分木構造格子を利用した格子構成¹⁰⁾ では、格子構成に対する数学的な制約条件は存在しない 上、計算精度に密接に関係する格子の直交性もまた完璧 に保証される.しかも、このような利点を有しながら、 一般座標の格子構成で要求される試行錯誤が不要のため に格子構成の大部分を自動処理できる大きなアドバンテ ージもある.本論文では、自然河川の分岐部や蛇行部に 対して四分木構造格子による格子構成を適用し、その妥 当性について検討を加える.

2. 標津川の再現計算

実河川の分岐・合流部の四分木構造格子による計算の 適応性について調べるため北海道北東部の2級河川であ る標津川を対象とし再現計算を行った.また,洪水時の 降雨開始時から出水ピーク時までを計算することで非定 常時における計算の妥当性についても検証した.計算結 果の比較には実測値と著者ら⁹⁾の過去に行った一般座標 系での解析結果を用いた.

(1) 対象河川の概要

標津川は図-1 に示すように河川環境を復元するため, 直線化された河道を旧蛇行河道に復元する試みがなされ ており,直線部と蛇行部を有する 2way 河道方式が採用 されている.分岐後の直線部では分流堰が設置され,平 常時には蛇行部への流水を促すように堰高が調整されて いる.わずか 300mの区間に分岐と合流を有する河道と なっており,数値計算による流況の把握には分岐・合流







図-3 流量変化(2010/12/3 12:00~12/5 12:00)

の計算の妥当性および両者の一体的な解析が求められる.

(2) 計算格子

計算に用いた四分木構造の計算格子を図-2 に示す.この計算格子は境界部に一辺 2mの計算格子を配置し,それ以外を一辺 4mの計算格子とし,河道の平面形状を表現した.この計算格子は著者らの考案した格子生成法¹⁰⁾によって作成した.

著者らは一般座標系による解析も実施している.格子 構成は自由度が高い反面,マトリクスの連続性を維持す る必要があるが,手動でこの座標系が要求する数学的な 条件を満たした格子形状を得るために多大な労力を要す る.そのうえ,非定常計算を行う場合では,一つの格子 構成ですべての流量レンジを安定に解析できる保証はな い.その一方で,四分木構造格子では境界部の座標値さ え入力すれば格子生成の完全なる自動生成¹⁰⁾が行える. しかも,生成される格子構成は必ず一意となる利点も ある.

(3) 計算条件

再現計算の対象としたのは年間最大流量を観測した 2010年12月3日23:00前後で,このときの流量の時間 変化を図-3に示す.図中に丸で示す3つの時刻において 実測値との比較を行った.

(4) 計算結果

各時間ごとの計算結果を図-4,図-5,図-6に示す.各 図の左上は四分木構造格子での計算結果の水深を示して おり,右側はその流線を表している.左下の図は蛇行区 間,直線区間それぞれの最大水深部での縦断的な水位と 河床高を示した.水位は赤線と青線で示しており,それ ぞれ四分木構造格子および著者ら⁹⁾の行った一般座標系 での計算結果の値を示している.また図中の四角形は水 位の実測値を示している.右下の図は図-2に示した線分 上の流速を表しており,上から図-2中の蛇行部右岸側(赤破線),蛇行部左岸側(赤実線),直線部右岸側(青 破線),直線部左岸側(青実線)上の四分木構造格子お よび一般座標系での流速の計算結果を示している.

また全流量のうちの蛇行部に流れた流量の割合を求め た流量配分比の計算結果と実測値を図-7 に示した.な お,一般座標の計算では,いずれの流量でもわずかな水 面変動を生じることが多かった.これに対して,四分木 構造格子は一貫した安定性を有することが確認された.

a) 降雨開始時:Time=2h

図-4の水深図を見ると直線部の堰上では水深が0.5m 以下となり,蛇行部が主流となっていることがわかる. 全体的には水深が1mに満たない箇所が大部分を占め, 蛇行部の外岸に沿う流れが明瞭に表れている.縦断水位 の実測値と比較すると,計算結果は両者とも高い再現性 を示しているが,一般座標系における計算では直線部の 堰下流部で水面に大きな起伏が確認できる.実測値では このときの流量で直線部分に流れる流量は全体の10%以 下であることから堰下流部の直線区間での水位変動は大 きくないと考えられ,四分木構造格子での計算のほうが 実際の流れをより忠実に再現していると思われる.縦断 的な流速はいずれも同様の傾向を示した.

b) 增水期:Time=11h

図-4の9時間後の図-5では水深が1mを超える箇所 が多く存在し、合流部では水深が大きく、最大で3mの 水深を示す. 堰上においても1m程度の水深となる. 実 測値と比べると蛇行部では四分木構造格子と一般座標の 両者の計算とも全体として高い再現性を示した. 縦断的 な流速は一般座標系では変動が大きく、計算の不安定さ が読み取れる. 一方、四分木構造格子では水深も流速も 滑らかに連続しており、安定した計算が可能であること がわかる.

c) 出水ピーク時:Time=14h

出水のピーク時の図-6 では図-5 よりもさらに水深が 大きくなり,分岐部より下流では蛇行部,直線部の両者 ともに水深 2m 以上で流れる箇所が多くなる.流線に着 目すると直線部への流れが卓越しており,流量の増加と ともに蛇行部から直線部へと流れが集中していくことが わかる.実測水位を比較すると両者ともに蛇行部では概 ね一致し,直線部ではどちらの計算も全体に水深が実測 値と比べて小さく算出された.一般座標系の縦断的な流 速は四分木構造と比べると大きな変動を示し,一般座標 系での計算が安定していないことが確認できる.

d) 流量配分比

図-7 は横軸に分岐前の流量,縦軸に全体の流量に対 する分岐後の蛇行部に流れる流量の比をとっている.一 般座標,四分木構造の計算結果は両者とも流量の増加と



図-4 [Time=2h] 水深図(左上),流線(右上),縦断水位(左下),縦断流速(右下)



図-5 [Time=11h] 水深図(左上),流線(右上),縦断水位(左下),縦断流速(右下)

ともに流量の割合が蛇行部で小さく、直線部で大きくな るという特徴が再現された、しかしながら、どの流量で

った.

また、一般座標系の計算結果はここでも5%程度の振 あっても計算値は直線部に過大に流れている傾向となっ 動を低流量時から洪水時まで常に示しており、計算結果 た. 低流量時には特にその特徴が顕著に表れる結果となの不安定性が明らかである. 一方で,四分木構造格子で



図-6 [Time=14h] 水深図(左上),流線(右上),縦断水位(左下),縦断流速(右下)



図-7 流量配分比

はいずれの流量時においてもその変化を滑らかに追従が 可能であることが示された.

3. まとめ

一般座標で格子構成が困難となる分岐・合流部では四 分木構造による格子生成が優位であり、なおかつ計算の 妥当性が認められた.

四分木構造格子はデカルト座標系を基準にしているた め、いかなる平面形状でさえも容易に表現可能である. 特に標準川のような蛇行・分岐部を擁する複雑な形状を 扱う際には一般座標系では多大な手間を要するにも関わ らず、四分木構造格子では入力情報を揃えることで計算 格子が自動的に作成できる.そのうえ、デカルト座標を 基準とした格子構成により計算精度に直結する格子の直 交性を完全に担保できるため、分岐・合流を一体的かつ 安定な解析として扱うことが可能である.以上のことか ら四分木構造格子による分岐・合流部の計算は格子生成, 数値計算の両面から適した手法であると考えられる.

参考文献

- Taylor, E.H.: Flow characteristics at rectangular openchannel junctions, Trans., ASCE, Vol. 109, Paper No. 2223, pp.893-902, 1944.
- 2) 板倉忠興:河川合流点における流れの機構の研究,水理講 演会講演集,第16巻,pp.7-12,1972.
 3) 芦田和男,川合茂:分岐部周辺における流れの水理特性に
- 3) 芦田和男,川合茂:分岐部周辺における流れの水理特性について,京大防災研究所年報 第22号 B-2, pp.491-
- 4)長谷川和義,藤田将輝,渡邊康玄,桑村貴志:標津川旧蛇 行通水時の堰をともなう分岐流量配分比に関する研究,土 木学会水工学論文集,第47巻,pp.529-534
 5)守屋薫,長谷川和義,小林賢也:常流移動床分岐水路にお
- 5)守屋薫,長谷川和義,小林賢也:常流移動床分岐水路における河床不安定に関する研究,土木学会水工学論文集,第51巻
- 北条紘次,畑敏夫,清水康行:合流部における2次元流況 計算法について,北海道開発局技術研究発表概要集,第33 巻,pp.209-214,1989
- 7)内田龍彦,福岡捷二:浅水流方程式と渦度方程式を連立した準三次元モデルの提案と開水路合流部への適用,水工学 論文集,第53巻
- 8) DINH,Thanh Mung, KIMURA,I. SHIMIZU,Y.:Computation of bed deformation at a river confluence using depth-averaged 2D models, RCEM2011
- 9) 永多朋紀, 安田浩保, 渡邊康玄: 2Way 河道の自律的な維持を可能にする分流堰高に関する検討, 河川技術論文集, 第 17 巻, 2011
- (10) 安田浩保,星野剛:四分木構造格子による局所的な高解 像度格子を導入した浅水流方程式の数値解法,土木学会応 用力学論文集
- 重枝末玲,秋山壽一郎,森山拓士:河川合流部周辺での 流れと河床変動の平面2次元解析,土木学会水工学論文集, 第53巻,2009
- 岸力,黒木幹男:移動床流れにおける河床形状と流体抵抗(1),北大工学部研究報告第67号, pp.1-23, 1973.