

河川流に関する数値解析の現状と課題

SUBJECTS ON NUMERICAL ANALYSIS OF RIVER FLOWS

渡邊明英¹・西村達也²

Akihide WATANABE and Tatsuya NISHIMURA

1 正会員 工博 広島大学助教授 工学部第四類 (〒739-8527 東広島市鏡山 1-4-1)

2 正会員 工博 建設技術研究所東京支社技術5部

Many numerical models for river flows have been developed. In this paper, the applicative examples of recent numerical models for river flow, river bed variation, flow around river structures and inundation flow are reviewed. Those models are used for the river improvement planning as physical model experiments. The subjects on numerical river hydraulics are examined. At last recent themes on numerical river hydraulics in Proc. of River Engineering are summarized.

Key Words: Numerical analysis, river flow, bed variation, river structures, inundation flow

1. はじめに

1980年代後半から1990年代にかけて、様々な流れの数値解析手法が開発、発展した¹⁾。この要因として、計算機能力の大幅な向上と観測、実験技術、計測手法の進歩が挙げられる。現在行われている数値解析もしくは、数値水理学は、表-1に示すような河道平面形や分合流、施設設置などに関する検討、平面形や河川構造物に起因する平均的な河床変動とその対策に関する検討、樹木やその他の要因で生じる大規模渦に関する検討などがあげられるが、河川流に関するものが主であろう。流れの解析について言えば、従来の1次元計算から平面内の水平混合や横断面内の2次元流の影響を直接的に反映できる2次元計算や3次元計算がかなり多く行われるようになってきた。基本的には計算コストの観点から、統計乱流モデルによる渦動粘性型のモデルが主流であるが、近年ではLESのような大渦構造を直接的に解くことが比較的簡単に行えるようになってきている。特に固定境界内の流れ場に関して言えば、かなり高精度の解析が可能であろう。また、水制工などの河川構造物の形状や影響を取りこんで流れ場や河床形状を解析し、その構造や配置まで設計できる段階まで技術は進歩してきた。河道の蛇行などに関しても多くの研究が行われてきた。自然河岸の河岸侵食に関して言えば、非粘性の河岸侵食の特性については明らかになっているが、粘性河

岸の河岸侵食速度を、河岸構成材料との関係で定量的に表せる所までには至っていない。このため、実測に基づいた何らかのモデリングが行われている。

現在、河川水理学の抱えている問題点の多くは境界領域の中にある。それらと流れ場の関係が明らかになっていないために依然として課題として残っている。構造物や植生の取り扱いについては徐々に明らかになり、種々のモデルや考え方が提案されているが、一般的な方法としてまとまっていない。例えば、平均的な河床変動の計算等は十分実用化されてきているが、局所的な部分も含めた河床変動を再現することは未だ難しい。これは、瞬間的な乱れ場を求められたとしても、それを流砂量やピックアップレイトの変化に反映する実用上の手段をもっておらず、瞬間的な平均流と乱れとせん断力と流砂量の関係を記述できていないためである。現在、流れ場を解きながらもしくは流れ場を与えて、砂粒子の移動を解析することが試みられるまでになっているが、実用の域には達していない。

これらの問題は、流れの解析精度と各部モデルの精度の不均衡によって生じている。これを解消するためには、各境界領域におけるモデルの精度を高める必要があるが、河川における問題として現地計測や境界領域における実験の難しさがある。この他にも、流れ場の数値解析そのものにも、流れ場の局所性や3次元性が問題となるような場合にはモデルや解析方法の改良が必要であろう。

表-1(a) 現在行われている主な河川流に関する数値解析

(解析対象)	(解析目的)	(解析手法)	(文献)
河道弯曲部, 急縮・急拡部	河道法線の蛇行や川幅の急縮・急拡による水衝部の把握とそれに伴う河床洗堀深の予測	直交曲線や一般座標系の平面二次元・準三次元モデル	1)8)17)33)35)
合流地点	合流地点の平面形状の違いによる水衝部と水位の把握	直交曲線や一般座標系の平面二次元・準三次元モデル	9)
分流地点	分流量の把握	一次元モデル	
	分流地点の平面形状の違いによる分流量と平面流況の把握	直交曲線や一般座標系の平面二次元・準三次元モデル	34)
複断面河道 (高水敷幅が 広い場合)	堤防法線と低水路法線の蛇行の位相が同じ場合の流れ場の把握	直交曲線や一般座標系の平面二次元・準三次元モデル	
	堤防法線と低水路法線の蛇行の位相が異なる場合の流れ場の把握	非静水圧分布を考慮した三次元モデル	11)12)
	高水敷と低水路境界に発生する水平渦の把握	乱流を考慮した平面二次元モデル	10)
河道内樹木	樹木による平均的な水位上昇の把握	準二次元不等流計算モデル	3)
	樹木による平面流れ場への影響把握	平面二次元モデル	39)
	樹木境界で発生する平面渦の把握	乱流を考慮した平面二次元モデル	4)5)6)7)
ベーン工	ベーン工設置による流れの変化の把握	ベーン工によって発生する流れ(外力)を考慮した準三次元モデル	18)
水制工	非水没型水制の設置による平面流況の把握	平面二次元モデル	19)20)21)
	水没型水制の設置による平面流況と河床変動の把握	水制が流れに及ぼす影響を外力として取り入れた準三次元モデル	22) 23)38)
	水制近傍の局所的な流れと河床洗堀の把握	非静水圧分布を考慮した三次元モデル	32)
床固工	床固工付近の平面流況と河床変動の把握	常・射流混在した流れが解析可能な平面二次元 MacCormack モデル	13)14)15)

表-1(b) 現在行われている主な河川流に関する数値解析

(解析対象)	(解析目的)	(解析手法)	(文献)
氾濫流	氾濫域だけを対象とした氾濫流の解析	デカルト座標系の平面二次元モデル	25)
		一般座標系の平面二次元モデル (氾濫流が道路内を流下する影響が大きい場合等)	29)
		ネットワーク型モデル	31)
	河道内水位が氾濫域の流れに及ぼす影響の把握	河道内の一次元モデル等と二次元氾濫モデルの組み合わせ	40)
感潮域	河川水と塩水の密度差による流れへの影響把握 (塩水くさび等)	河川水と塩水の密度差を考慮したモデル (鉛直二次元モデル, 三次元モデル)	

2. 既往の研究

(1) 流れと河床変動

先にも述べた様に、数値解析によって湾曲や分合流など河道平面形に対する流れ場と河床変動の関係を求め、適切な河道の形状や河床変動対策法について検討することが行われるようになってきており、河道形状がそれほど複雑でなく静水圧近似が適用可能である場においては、ほぼ実用的な段階にあると言えよう。単断面蛇行流路や交互砂州上における流れと河床変動に関する解析は数多く行われている²⁾。河川流は浅い流れであるため、基本的には平面二次元流れに二次流の影響を組み込んだモデルや流れの3次元性を考慮した静水圧近似したモデルで、流れや河床変動を表せることが多い。

植生を伴う流れ場に関する多くの研究が行われ、現在では、境界混合係数を用いて樹木の抵抗を考慮した準2次元の水位解析³⁾が一般的に行われるようにまでなっており、河道内に繁茂した樹木の影響を直接的に取りこんで、樹木に起因する二次元的な渦構造を捉えて樹木の抵抗を評価することも可能になっている。福岡・渡邊ら⁴⁾は、樹木群周辺では大規模かつ規則的な水平渦構造が現象を支配していることに着目して、これを低周波のフーリエ級数で表し、渦の波長や強さ、抵抗の大きさなどが非線形的に決まることを理論的に説明を行っている。灘岡・八木⁵⁾は、浅水流における乱れの代表スケールが水深であるとして、乱れ強度 k と代表長さスケール h を用いた1方程式モデルであるSDS&2DHモデルを開発し、平面せん断乱流場である樹木群周囲の渦構造を解析している。SDS&2DHモデルについては、池田ら⁷⁾が違う場への適用を試みている。

このように、樹木群などがある場合の流れ構造は2次元レベルでは十分実用の段階に入っている。

樹木群周囲の流れを解析するために使われた手法と同様なものを、複断面河道や分合流部における渦構造を求め、抵抗特性を評価することも行われている。細田・木村ら⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾は、QUICKスキームを用いた浅水流モデルを開水路のせん断流場へ適用し、渦構造や流速変動、渦動粘性係数の与え方などについて検討している。また、これを高水敷高で2層化したモデルを用いて複断面直線水路に適用し、平面渦の発生について検討している。

また、堤防と低水路の蛇行の位相等が異なる場合における流れ場の特性を数値水理学的に明らかにし、河道計画に役立てることも試みられている。福岡・渡邊ら¹¹⁾¹²⁾は、河道の平面形状もフーリエ級数で取り込んだ形で、静水圧を近似しない流れの3次元解析モデルを開発し、これを用いて複断面蛇行河道における流れと河床変動の機構について説明している。静水圧とずれる範囲は狭いが、高水敷上の冠水深が大きくなると河岸近傍で圧力が大きくなり、これを考慮しないと河床変動位置が説明できないこと、また、単断面蛇行に見られる河床変動は主に流速の縦断的な変化に起因し、複断面的蛇行河道に見られる主流線沿いの洗掘は、主流の潜り込みとこれによって生じる二次流に起因するものであることが示されている。

近年の流れ場のモデルに関して言えば、常流・射流混在流れの解析¹³⁾¹⁴⁾、移流部分に関する高精度化¹⁶⁾、乱流現象に対するモデルの高精度化、複雑な境界形状や移動境界の取りこみ¹⁷⁾などが行われている。

(2) 構造物周辺の流れと河床変動

河道内に建設された橋脚や河床洗掘対策として設置さ

れる水制工やべーん工によって、水衝部の変化やそれに伴う新たな河床洗掘が発生する場合がある。このような現象を正確に解くためには、静水圧分布を仮定したモデルではなく、静水圧分布からの圧力偏差を解く三次元モデルが必要となる。しかし、非静水圧分布を解くために要する時間やコストの問題から、静水圧に近似したモデルを用いている場合がほとんどである。

福岡・渡辺¹⁸⁾は、河床洗掘対策としてのべーん工の設計を目的に、べーん工による流れへの影響を外力として表す準三次元モデルを開発し、流れおよび河床変動の実験結果と比較することにより、そのモデルの妥当性を明らかにするとともに、べーん工の設計に適用可能であることを示している。

崇田・清水¹⁹⁾や増田・田中・中谷²⁰⁾は、非越流型水制工を対象に、水制工によって生じるレイノルズ応力の変化を平面二次元モデルに取り入れ、実験結果と比較することにより、水制工背後の流れを解くことができることを示している。崇田・清水²¹⁾は、平面二次元モデルによる水深平均流速解を基に半解析的な手法で水深方向の流速分布を算出し、平面二次元計算では表すことのできない水制背後の二次流の再現を試みている。この方法は平面二次元モデルによる流速解を基本としているため、非越流型水制工前面で発生する局所的な流れを十分に表すことができない。

福岡・西村ら²²⁾は、水没型水制工を対象に、河床が変動しても計算が容易になるように準三次元モデルを開発し、解析を行っている。水深方向に差分計算メッシュを切らない準三次元モデルでは、水没した水制が流れに与える影響を十分に表すことができないことから、このモデルでは水制工が流れに与える影響を外力として取り入れ、解析結果を流れと河床変動の実験結果と比較し、準三次元モデルで水制工による河床変動への影響を解析できることを示している。

道上・檜谷²³⁾は、不透過非越流水制工周りの河床変動を求めるために、流れの三次元モデルを用いている。この三次元モデルでは静水圧を仮定せず、静水圧からの偏差を求めている。このモデルは、鉛直流速分布は連続式から求め、流速分布を鉛直方向の運動方程式に代入してこれを積分することにより、ポアソン型の方程式を用いずに圧力偏差を解いている。圧力の変化に対する流れ場の補正の取り扱いについては記述されていないが、平衡状態を求める場合大きな問題はないと考えられる。解析による洗掘深さは実験値よりも小さな値となっていたが、これは流砂の非平衡性に起因したものと推察されている。

また、橋脚周辺の流れと河床変動を対象とした解析も行われている。福岡ら²⁴⁾は、大型水理模型実験による橋脚周辺の局所洗掘結果と比較することによって実用的な橋脚

周りの局所洗掘深推定法を提案している。このモデルは、流れ解析は準三次元モデルを使用し、河床変動計算では掃流砂の非平衡運動と河床から浮上する砂の非平衡分布を考慮することにより、剥離領域における流れ場の解析に対する不十分さを補っている。

(3) 氾濫流

大規模な洪水による溢水・破堤が生じた場合の氾濫流の解析法は、氾濫原と河道を一体に取り扱って計算を行う一次元解析法と氾濫原の流れを二次元的に計算を行う二次元解析法の2種類がある。しかし、近年では二次元解析法を用いているのがほとんどである。氾濫流における解析上の問題点は、氾濫流先端部の挙動や堤内地の構造物の影響、破堤過程の形状と越流量等である。

首藤ら²⁵⁾は、堤内地の家屋、農地部の道路または畦、稲等の植生領域の3つについて抗力係数を用いて抵抗を評価する方法を提案し、8610 台風による吉田川の氾濫へ適用して、その妥当性を示している。大久保ら²⁶⁾は、氾濫流モデルの基礎方程式と格子間隔、土砂氾濫等について検討を行って土砂氾濫解析により地形変化を扱うことが可能であるが、水田の稲等の植生が浮遊砂の堆積に及ぼす影響や堆積による植生粗度の変化の重要性等を指摘している。Iwasa ら²⁷⁾は、排水路と排水ポンプを配置して氾濫解析を行い、それらの効果について検討し、効率の良いポンプ能力や水路配置を求めている。高橋ら²⁸⁾は、氾濫解析による湛水深の伝播と避難場所・避難ルート・避難速度等を用いて避難シミュレーションを行い、その適用性について検討し、避難命令の発令時期を適切にしなければ適切な避難が行われないことを見出すとともに、実際には住民の心理状況等の問題が残っていることを述べている。

福岡ら²⁹⁾は、密集市街地では道路網を正確にモデル化することから、一般曲線座標系で表した基礎方程式を用いて道路網をモデル化するとともに、家屋群に作用する流体力の算定式を流体力項として基礎式に付加した氾濫シミュレーションモデルを構築している。このモデルを市街地氾濫模型実験に適用し、シミュレーションモデルが氾濫流の推定に妥当であることを示すとともに、家屋の流体力については、これまでの抗力係数を用いた方法ではなく、家屋前と後面の水深から求める方法が妥当であることを示している。

河川が溢水・破堤するような大規模な洪水氾濫だけでなく、短時間に集中した降雨が発生した場合には、地上部だけでなく、氾濫水は地下空間へも広がる場合があり、地下空間を対象とした氾濫解析も行われている。高橋ら³⁰⁾は、地下空間へ階段を通して流入する水の流れを段落ち流れと仮定し、それを地下街への流入条件として与えることによって地上部と地下空間の氾濫解析を行う平面二次元

モデルと組み合わせたモデルによる解析を行っている。戸田³¹⁾らは、地上部の洪水氾濫解析においては平面二次元モデル、地下空間の浸水解析においては一次元ネットワークモデルに地下街の天井高を考慮できるスロットモデルを組み込んだ数学モデルを開発するとともに、これを大阪市内の「梅田」地下街に適用し、氾濫水の地下空間への浸水過程がこのモデルによって計算できることを示している。

3. 河川技術に関する論文集に見られる数値解析例

ここでは、第3回～第6回の河川技術に関するシンポジウムに見られた数値解析例についてまとめる。

河原らは³²⁾k-ε乱流モデルを不透過越流型水制工が設置された直線水路に適用して、水制工周辺の剥離や再循環領域を表現するためにはモデルの高精度化や改良が必要であるとしている。道上ら³³⁾は、急流部における狭窄部や障害物周りの流れと河床変動をMacCormack法によって求めて、山地河道における淵の形成について説明している。

堀田・藤原ら³⁴⁾は準3次元モデルを河川分流点に適用し、分流地点の河道平面形状と分流堰の位置や高さについて検討し、従来型の1次元モデルでは不十分であることを、準3次元モデルで的確に流れの状況を把握できることを示している。永田ら³⁵⁾は、準3次元モデルを用いて、河道狭窄部周辺の流れと河床変動を解析し、狭窄部開削の効果を評価し、数値解析手法が河道計画策定に役立てられることを示している。辻本ら³⁶⁾は河道内の植生が、周囲の河床変動と共に河床材料の粒度変化に与える影響について検討している。

堀田・藤原ら³⁷⁾は、ネットワーク型河川網における一次元流出・不定流解析を行い、構造物による流出のコントロールについてシミュレートし、操作規則の検討や水位・流量の監視・管理などへの適用可能性について検討している。石川・青木ら³⁸⁾は不透過型水制工周辺の流れを場について、現地観測と2層2次元モデルによる数値解析を行いモデルの妥当性について検討し、水制の設置角度が及ぼす影響などについても検討している。前野ら³⁹⁾は旭川放水路百間川の洪水流について現地調査を行い、植生の倒伏状況と洪水流を再現する粗度の関係について検討を行った。これより、倒伏状況に応じて植生の粗度を変化させることで洪水痕跡を表せることを示している。後藤・山田ら⁴⁰⁾は洪水氾濫流解析を高速に行う方法について検討し、河川流に1次元不等流、氾濫流に移流項を除いたモデルで解析を行い、現地における観測データと比較した。その結果、氾濫域や水位などは十分な精度で再現できることを示している。辻本ら⁴¹⁾は低堰貯水池からの排砂について、実験と数値解析を行い、モデルの妥当性について検討を行っている。

近年見られる数値解析の事例はモデルを適用して現象の解明を試みたり、実用性を考えたモデルの開発などが多くなっている。

4. おわりに

これまでに多くの数値モデルが開発されてきており、実際に利用されている。近年、現地河道などへの数値モデルの適用事例が増えつつあり、モデルの検証を行いながら河道計画に役立てられるようになってきている。しかしながら、未だ完全ではなく、モデルで用いている仮定や限界をよく考慮してモデルを適用していく必要がある。

現在、実用的に使われているモデル、もしくは利用に支障がないモデルは概ね、1) 樹木が繁茂した河道や複断面河道における水位の解析に用いられている準2次元解析、2) 渦水平構造の解析に用いられる2次元もしくは3次元モデル流れモデル、3) 河道平面形の影響や河川構造物の影響を考慮した2次元、準3次元モデルなどであろう。河川構造物の形や配置が複雑な場合には、未だ検討を重ね、改良を施して行く必要がある。特に実際には圧力が静水圧近似できない場合でこれが重要な場合には計算時間コストがかなりかかることになる。特に圧力を解きながら河床変動計算を行う場合には非常に計算時間がかかることになり、実用化にあたっては何らかの工夫が必要である。

はじめに述べた様に、流れの解析モデルの精度を高めても、河川を対象とする場合には、周辺の境界条件などが相互に大きく作用するので、境界領域の部分についての基礎研究を進めていくことが重要であろう。これと共に、現地で起きている現象を把握してモデルの精度を高めるために、現地データの収集と蓄積が一層重要になるだろう。

参考文献

- 1) 渡邊明英：開水路流れの数値解析手法、水理講演会10年の歩みとこれからの基礎水理の展開、基礎水理部会、pp.1-6, 1999.
- 2) 清水康行：沖積河川における流れと河床変動の予測手法に関する研究、北海道大学学位論文、1991.
- 3) 福岡捷二・藤田光一・新井田浩：樹木群を有する河道の洪水位予測、土木学会論文集 No.447/II-19, pp.17-24, 1992.
- 4) 福岡捷二・渡邊明英・津森貴行：樹木群のある河道の流れの水平混合とその卓越波数、第38回水工学論文集、pp.357-364, 1994.
- 5) 渡邊明英・福岡捷二：樹木群を有する河道流れの境界混合係数fの評価、土木学会論文集 No.503/II-29, pp.79-88, 1994.
- 6) 難岡和夫・八木宏：SDS&2DHモデルを用いた開水路水平せん断乱流の数値シミュレーション、土木学会論文集、No.473/II-24, pp.35-44, 1993.
- 7) 池田駿介・河村一弘・福元正武・佐野貴之：低水路側岸部に植生を有する複断面開水路に生じる組織渦と横断方向浮遊砂量、水工学論文集第44巻、pp.795-800.
- 8) 木村一郎・細田尚・安永良・村本嘉雄：開水路流れ死水域周

- 辺の水面振動・流体混合特性, 第41回水工学論文集, pp.717-722, 1997.
- 9) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄・櫻井寿之: 開水路横流入部における渦運動の数値シミュレーション, 第41回水工学論文集, pp.717-722, 1997.
- 10) 木村一郎・細田尚・村本嘉雄・安永良: 平面二層モデルによる複断面開水路流れの水平渦運動解析, 第48回水工学論文集, pp.61-66, 1992.
- 11) 福岡捷二・渡邊明英: 複断面蛇行水路における流れ場の3次元解析, 土木学会論文集 No.586/II-42, pp.39-50, 1998.
- 12) 渡邊明英・福岡捷二: 複断面蛇行流路における流れと河床変動の3次元解析, 水工学論文集第43巻, pp.665-670, 1999.
- 13) 河村三郎・中谷剛: TVD-MacCormack 法による常・射流混在流の数値計算法, 水工学論文集第37巻, pp.337-342, 1992.
- 14) 岡部健士・山下秀基・天野裕仁: 常・射流が混在する2次元浅水流の数値計算法, 第39回水工学論文集, pp.403-41-, 1995.
- 15) 川島幹雄・福岡捷二: 床止め周辺の河床変動計算法に関する研究, 第39回水工学論文集, pp.689-694, 1995.
- 16) 大川秀典・清水康之・藤田陸博: FDS を用いた開水路における衝撃波を含む流れの数値計算, 水工学論文集第41巻, pp.611-617, 1997.
- 17) 長田信寿・細田尚・村本嘉雄・Md. Munsur Rahman: 移動一般座標系による側岸侵食を伴う河道変動の数値解析, 水工学論文集第40巻, pp.889-894, 1997.
- 18) 福岡捷二, 渡邊明英, 萱場裕一, 曾田英輝: ベーン工が漸続的に配置された河道弯曲部の流れと河床形状, 土木学会論文集, No.479/II-25, pp.61-70, 1993.
- 19) 崇田徳彦, 清水康行: Reynolds 応力を考慮した水制を含む流れの計算, 水工学論文集, 第37巻, pp.487-494, 1993.
- 20) 増田尚弥, 田中祐一郎, 中谷 剛: 水制工周辺に射流域を生じる流れの数値計算に関する研究, 水工学論文集, 第39巻, pp.551-556, 1995.
- 21) 崇田徳彦, 清水康行: 水制を含む流れの準3次元数値計算モデルの開発, 土木学会論文集, No.497, II-28, pp.31-39, 1994.
- 22) 福岡捷二, 西村達也, 高橋 晃, 川口昭人, 岡信昌利: 越流型水制工の設計法の研究, 土木学会論文集, No.593, II-43, pp.51-68, 1998.
- 23) 道上正規, 檜谷 治: 水制周辺の平面2次元河床変動計算に関する研究, 水工学論文集, 第36巻, pp.61-66, 1992.
- 24) 福岡捷二, 富田邦裕, 堀田哲夫, 宮川朝浩: 橋脚まわりの局所洗掘推定のための実用的数値シミュレーションの開発, 土木学会論文集, No.497, II-28, pp.71-79, 1994.
- 25) 佐藤 智, 今村文彦, 首藤伸夫: 洪水氾濫の数値計算および家屋被害について-8610 台風による吉田川の場合-, 第33回水理講演会論文集, pp.331-336, 1989.
- 26) 大久保賢治, 村本嘉雄, 李智遠: 洪水氾濫モデルに関する二, 三の考察, 第33回水理講演会論文集, pp.337-342, 1989.
- 27) Arvind Kumar GARG, Yoshiaki Iwasa, Kazuya Inoue and Kiyoshi Matsumoto: Flood Flow Simulation in Low Land Areas by Two-Dimensional Model, 第33回水理講演会論文集, pp.343-348, 1989.
- 28) 高橋 保, 中川 一, 東山 基: 洪水氾濫とリンクした避難のシミュレーション, 第33回水理講演会論文集, pp.355-360, 1989.
- 29) 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, II-44, pp.23-36, 1998.
- 30) 高橋 保, 中川 一, 野村 出: 洪水氾濫に伴う地下街浸水のシミュレーション, 京都大学防災研究所年報, 第33号 B-2, pp.427-442, 1990.
- 31) 戸田圭一, 井上和也, 前田 修, 谷野知伸: 大都市の地下空間の氾濫浸水解析, 水工学論文集, 第43巻, 1999.
- 32) 河原能久・彭 静・藤井和之: 越流型水制工を有する河道内の流れの3次元数値解析, 第3回河川技術に関する論文集, pp.17-22, 1997.
- 33) 道上正規・檜谷治・池見拓・永瀬恭一: 山地河道における淵の形成に関する数値シミュレーション, 第3回河川技術に関する論文集, pp.223-230, 1997.
- 34) 堀田哲夫・藤原直樹・中村謙一: 準3次元数値解析手法の河川分流への適用: 第3回河川技術に関する論文集, pp.9-16, 1997.
- 35) 永田雅一・伊藤寛・若松大資・西村達也・岩田通明: 狭窄部付近の流れ, 河床変動と開削による影響, 第4回河川技術に関する論文集, pp.1-7, 1998.
- 36) 辻本哲郎・辻倉裕喜・村上陽子: 植生周辺の微細地形と表層粒度構成, 第4回河川技術に関する論文集, pp.123-129, 1998.
- 37) 堀田哲夫・藤原直樹: ネットワーク型河川網への一次元流出・不定流解析の適用, 第6回河川技術に関する論文集, 2000.
- 38) 青木政一・吉村亮・玉井信行・河原能久・石井浩・安田実: 越流型水制周りに関する流速分布, 第6回河川技術に関する論文集, 2000.
- 39) 前野詩朗・石井宏幸・大賀祥一: 台風 9819 号による百間川の植生倒伏状況と洪水解析による河道粗度の推定: 第6回河川技術に関する論文集, 2000.
- 40) 安田浩保・後藤智明・山田正: 那珂川下流域を対象とした高速洪水氾濫予測モデルの開発, 第6回河川技術に関する論文集, 2000.
- 41) 後藤孝臣・田中良樹・北村忠紀・辻本哲郎: 低堰堤堆積土砂のフラッシュに関する数値解析, 第6回河川技術に関する論文集, 2000.

(2000.4.17.受付)