

準三次元数値解析手法の河川分流への適用¹

Application of a Semi-Three Dimensional Analysis in the diversion of a river

堀田哲夫²・藤原直樹³・中村謙一³

By Tetsuo HOTTA, Naoki FUJIWARA and Kenichi NAKAMURA

1. はじめに¹⁾

大都市を流れる河川においては、下流低平地に人口と資産が集中しており、洪水時に破堤・氾濫が生じると壊滅的な被害が発生する。このような河川では河道周辺に民家等が集中しているため、洪水流の安全な流下を確保するための河道の拡幅は困難であり、ダムや放水路等による洪水量の低減が必要となる。放水路等により洪水流を分流し過剰な流量を新水路に流す際には、①適正な分流量を確保する、②分流点上下流の流況を乱さず死水域や河床洗掘・堆積をなるべく発生させない、③水衝部分に対して堤防等の安全性を確保する等して、分流点付近の水位・流況、堤防や河岸への影響等に配慮した分流点付近の平面・河床形状の決定、分流堰の位置・構造等の決定を行わなければならない。

従来から広範に用いられている一次元数値解析手法では分流点付近の複雑な流況や分流量等を詳細に把握できないことから、これら分流点付近の流況把握や分流量等の算出に際しては、これまでは模型実験による検討が主に採用されてきた。しかしながら、費用・期間の制約から広範囲を対象とした大規模な実験装置の作成は困難であり、局所的な実験に限られる場合が多かった。

本論文は、河川分流の流況把握等に準三次元解析手法を採用することにより、数値解析による分流点付近の詳細な流況を表現・評価する手法を提案し、現地河川においてその妥当性を検証したものである。

2. 数値解析による分流点付近流況評価方法の提案

2. 1 数値解析手法^{2), 3)}

数値解析手法は、河道分流点形状やわん曲の状態を取り扱うことから座標系には図-1に示す直交曲線座標系を用いた。また、流れの基礎方程式は、連続式および z 方向に静水圧分布を仮定した三次元の運動方程式を用いた。本検討で採用した直交曲線座標系を用いた準三次元不等流計算手法は、以下の特徴を持つ。

①河道の平面形状などに沿って任意の平面メッシュ分割が行える直交曲線座標系を用いたことにより、分流点付近の河道形状が的確に再現できる。

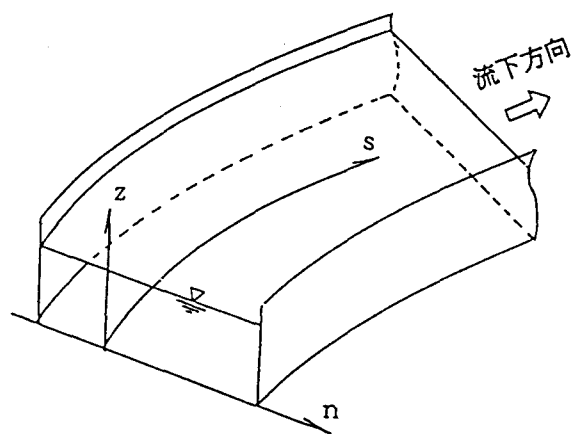


図-1 直交曲線座標系

¹ キーワード：洪水流，分流，数値解析

² 株式会社建設技術研究所東京支社河川本部技術第三部長（〒103 東京都中央区日本橋堀留町 1-7-7）

³ 株式会社建設技術研究所東京支社河川本部技術第三部

②水深方向の流速分布をフーリエ級数で与えたことにより、水深方向にはメッシュを切る必要がなく、平面メッシュ分割を行うだけで三次元流れを解くことができる。

(連続方程式)

$$\frac{\partial u}{\partial s} + \frac{1}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial n} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

(運動方程式)

$$u \frac{\partial u}{\partial s} + v \frac{\partial u}{\partial n} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial n} + w \frac{\partial v}{\partial z} - \frac{u^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} + \frac{\partial}{\partial s} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial n} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial n} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = -g \quad (4)$$

ここで、 u 、 v 、 w はそれぞれ s 、 n 、 z 方向の流速成分、 p は圧力、 r は曲率半径を示す。

2. 2 分流計算方法の概要

数値解析による分流計算のフローは図-2 および以下の通りである。

- ①出水時航空写真等（本検討では既往の模型実験結果を使用）より、本川と支川の流れの境界線（分流境界線）を設定し、この法線形に沿って直交曲線座標系でのメッシュ分割、河床高、上流端流量、粗度係数等の計算定数の設定を行う。
- ②分流量を仮定し、本川・支川各々の下流端水位を設定する。
- ③各メッシュ毎の流速及び水深を計算する。
- ④分流境界線下流端（流線分離点）付近での本川側と支川側の水位が同様となっている場合は計算を終了させる。水位差が生じている場合には分流量を仮定し直し、水位が同様となるまで②、③の処理を繰り返す。

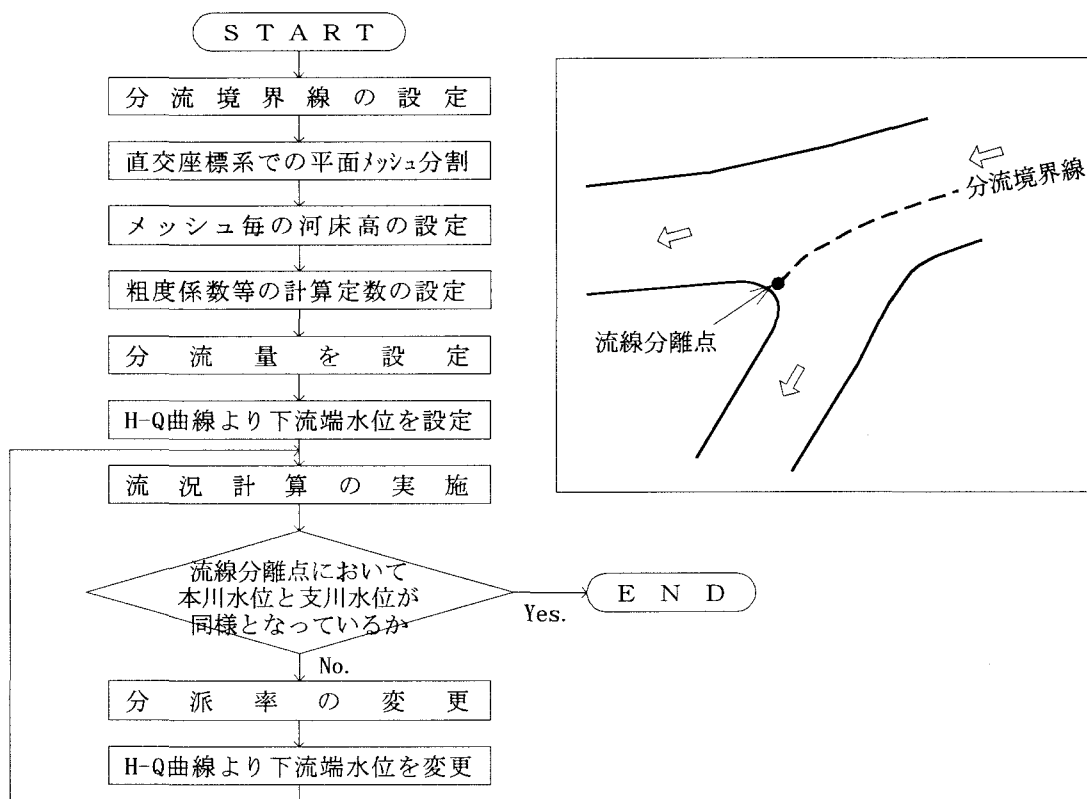


図-2 分流計算のフロー

3. 実河川への適用による本手法の妥当性の検証

3. 1 対象河川

2. で提案した数値解析手法を実河川において適用することにより、妥当性の検証を行った。

対象河川は、図-3 に示すように大分県別府湾に注ぐ大野川と乙津川の分流点（河口から約 9km）とした。大野川は大分、熊本、宮崎の 3 県にまたがる流域を持つ流域面積 1,460km²、幹川流路延長約 107km の一級河川である。分流部下流は古くから洪水被害に見舞われており、昭和 18 年、20 年にも相次いで大洪水が生じた。このため、乙津川に越流堰を設け 1,500m³/s の洪水流を乙津川に分流放流させ洪水被害を軽減させる計画が立案され、昭和 31 年着工、37 年に完成した。なお、本工事に先立ち建設省大分工事事務所および土木研究所は大規模な模型実験を実施し、乙津川分流点位置、分流点形状、越流堰構造等を検討している。

3. 2 解析モデルの作成および妥当性の検証^{4), 5)}

近年の主要洪水のうち最大流量を示した平成 5 年 9 月洪水（ピーク流量 9,500m³/s）を用いて本計算手法の妥当性を検証した。対象区間は分流点を含む 8～11K の 3km をとし、図-4 に示す横断方向 50 分割（約 10m ピッチ）、縦断方向 31 分割（約 40m ピッチ）のメッシュ分割を行った。また、分流境界線は堰構造等検討時の模型実験結果から設定し、下流端水位は本・支川ともに洪水痕跡水位を用いることとした。

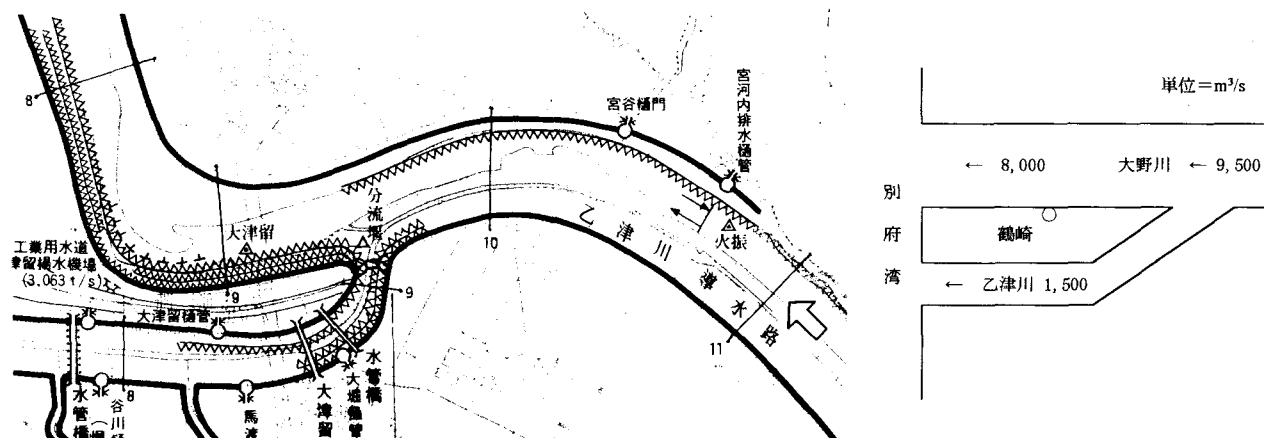


図-3 乙津川分流点付近平面形状及び計画高水流量配分図

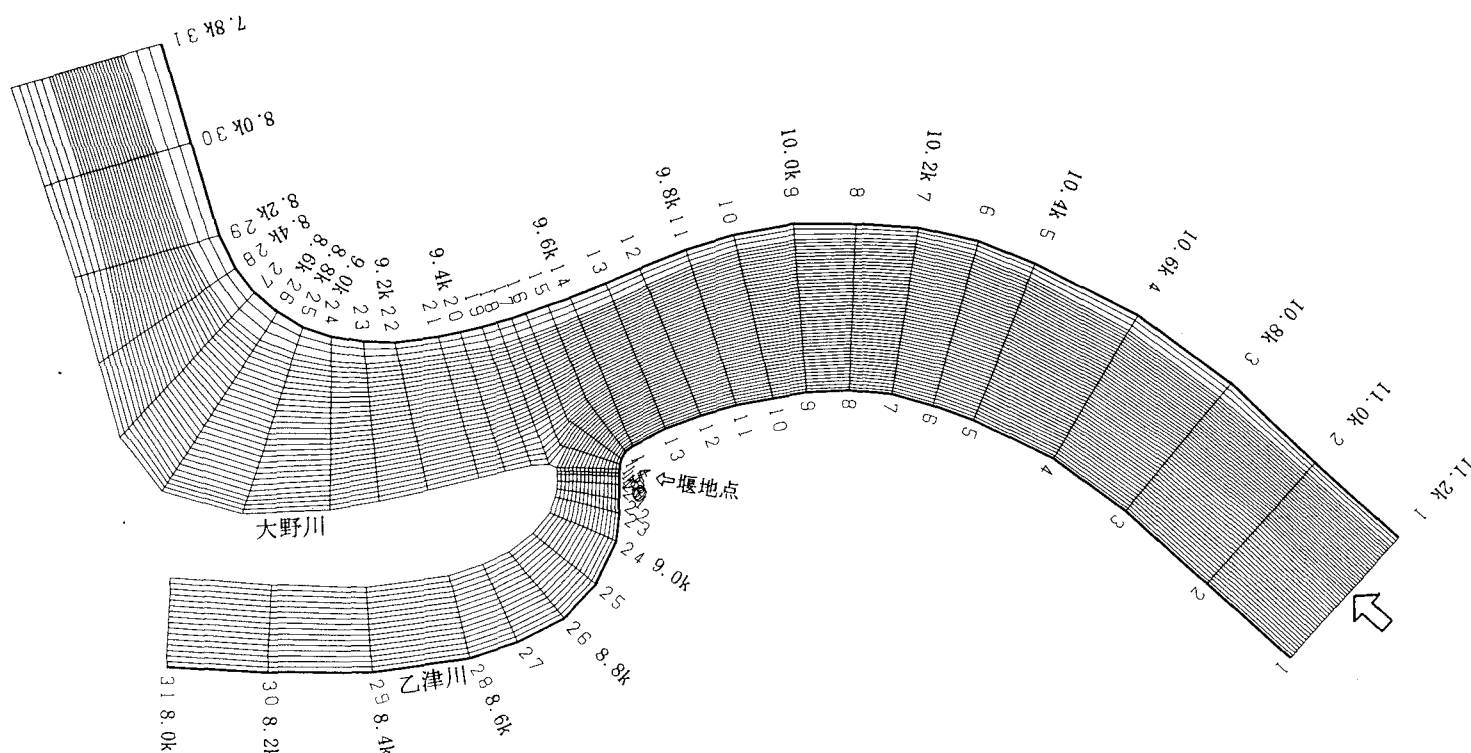


図-4 数値解析モデルメッシュ分割図

(1) 分流点付近の流況

本対象洪水では洪水時の航空写真が撮影されていないことから、模型実験当時とは河床形状等が若干異なるが堰構造等検討時模型実験結果流線図と計算による流速ベクトルとの比較を行うことにより、計算流速分布の妥当性を検討した。対象区間全体の水深方向平均流速ベクトル、分流点付近の表面流速および河床付近流速ベクトルを図-5に示す。分流点上流側の本川の流向、分流堰に向かって本川流が巻き込まれる様子や表面流速と河床付近流速の流向の差異等がよく表現されており、妥当な流況を表現しているものと考えられる。

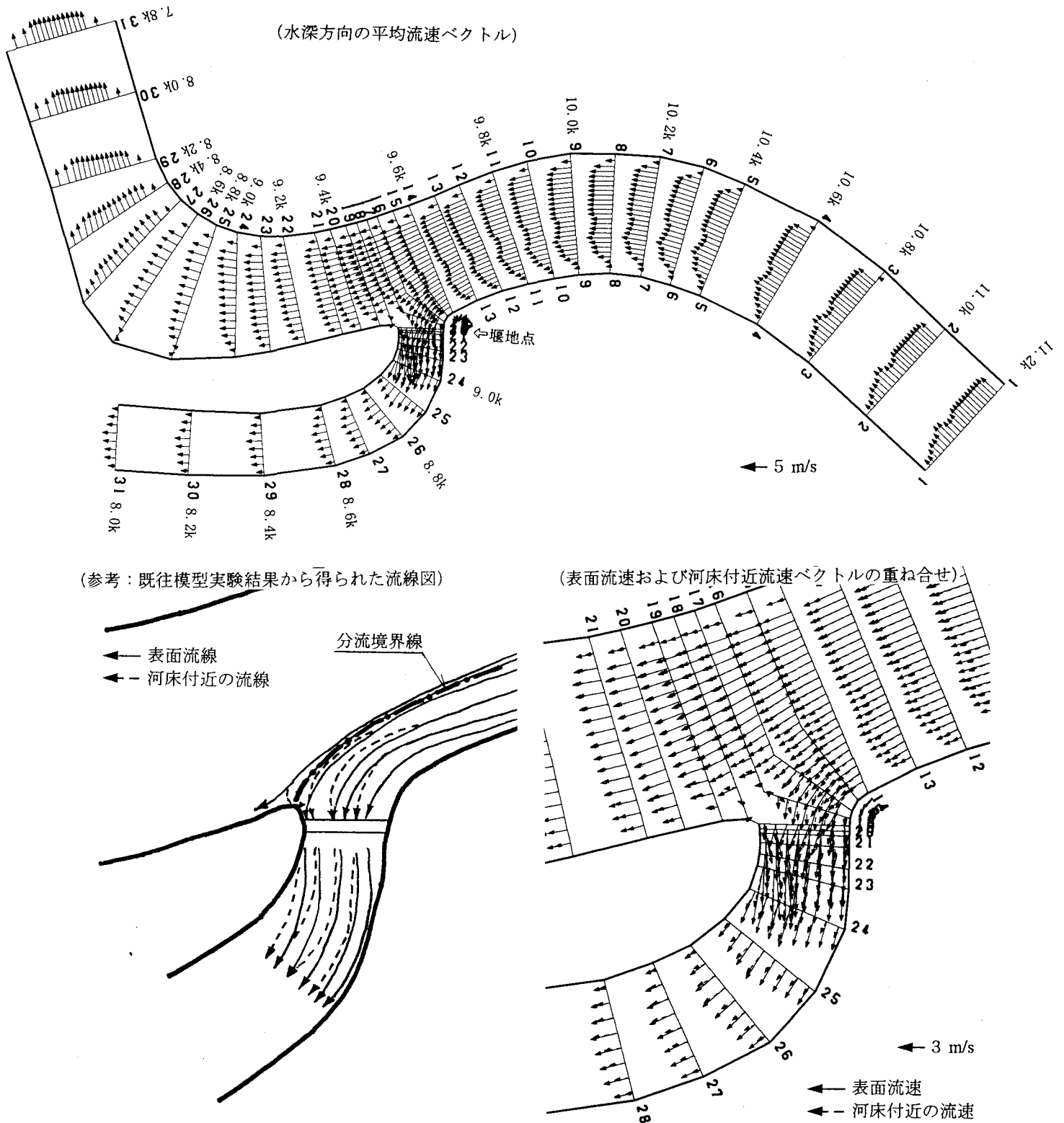


図-5 数値解析結果流速ベクトル図

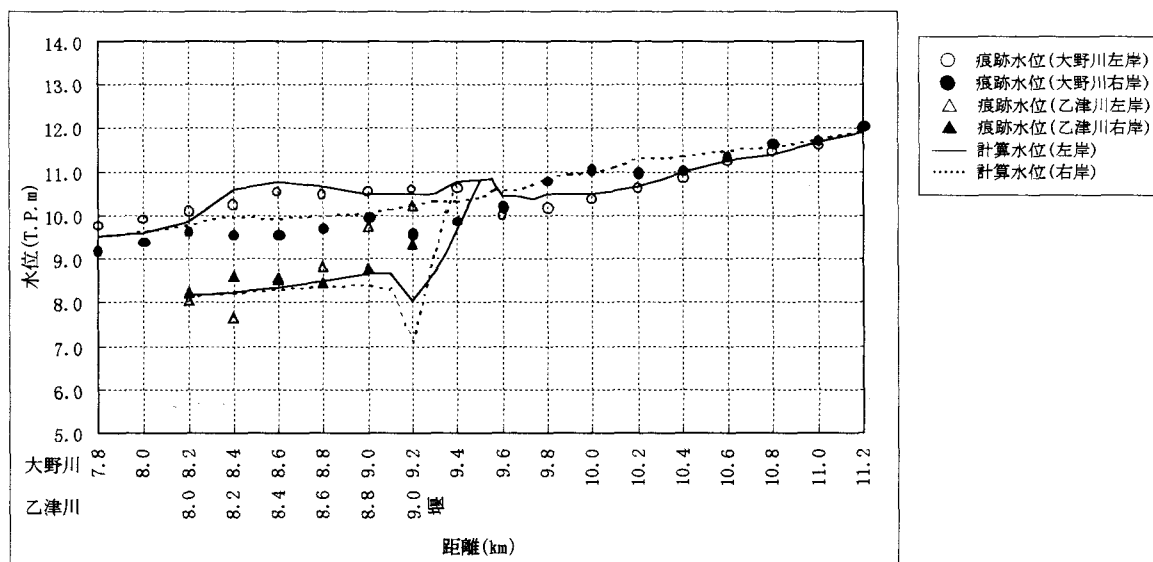


図-6 数値解析結果水位縦断面図

(2) 分流点付近の水位

左右岸の洪水痕跡水位と計算水位を比較することにより、水位の妥当性を検討した。水位縦断面図は図-6に示す通りであり、分流堰直下流の水位については本計算結果の方が低くなっているものの、その他の区間では実績水位と痕跡水位は概ね同様の結果となっており、わん曲部における外岸側と内岸側の水位差も十分に表現されている。

(3) 乙津川への分流量

本計算から得られた分流量は $1,450\text{m}^3/\text{s}$ であった。既往検討によれば、分流点上下流の流量観測所のピーク流量相関から算出した場合の結果が $1,448\text{m}^3/\text{s}$ 、分流量関係図からの読み取り値が $1,410\text{m}^3/\text{s}$ 等いずれも $1,450\text{m}^3/\text{s}$ 程度となっていることから、概ね妥当な分流量が得られたものと考えられる。

4. 分流点形状等の変更に伴う影響検討^{1), 4), 5)}

分流点付近の平面・横断形状を変化させた場合および分流堰形状を変化させた場合の流況変化についての検討を行うことにより、分流点形状計画検討時における本検討手法の適用可能性について検討した。

4. 1 分流点平面形状等の違いによる流況変化状況

現在の乙津川分流点の平面形状は図-3および図-5に示した通りであるが、これは昭和30年の模型実験により得られた最終案であり、当初案は当時の河道の平面形状を尊重した分流形状となっており、図-7に示すように分流点川幅が広く分流堰も下流側に計画されていた。

分流点付近の死水域の発生は、主に以下の二つの原因により発生すると考えられている。

①断面の拡大：分流点付近では一般に上流に比し断面が拡大するため、このために流線が剥離して死水域が発生する。

②堤防法線のわん曲：法線の急激な曲がりによる流線の剥離が起こる。

当初案での模型実験結果（図-8参照）を見ると、上記原因に加え計画分流量を維持するために越流堰幅を川幅より狭くしたことも重なって、分流堰上流の左岸側および堰下流右岸側に大規模な死水域が発生している。ここでは当初案の平面形状および横断形状を設定し、これを用いたシミュレーションを行い同様の死水域が発生することの確認を行った。

平面・横断形状修正後のメッシュ分割図および計画流量 $9,500\text{m}^3/\text{s}$ 流下時の断面平均の流速ベクトル図を図-9に示す。当初案分流点形状における計画流量流下時の分流量は $1,650\text{m}^3/\text{s}$ であり、模型実験結果と同様に堰上流左岸側および堰下流右岸側に死水域の発生が確認され、本計算手法が分流点付近の平面・横断形の変更に伴う流況変化についても十分表現し得ることが確認された。

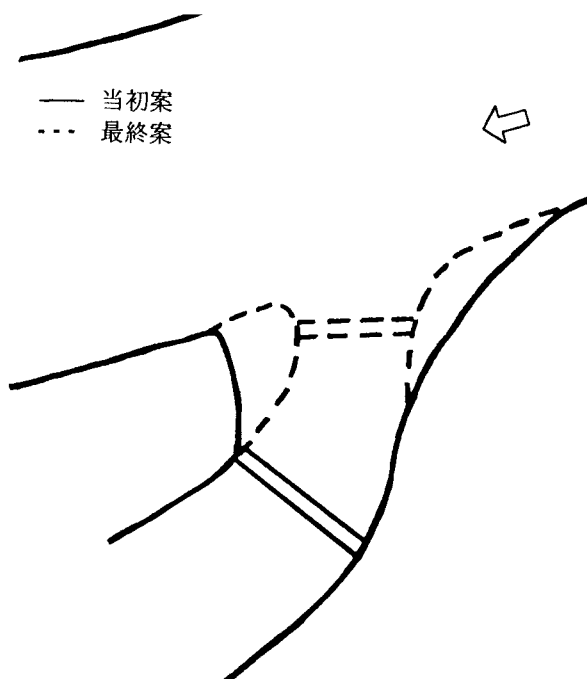


図-7 分流点形状の当初案および最終案

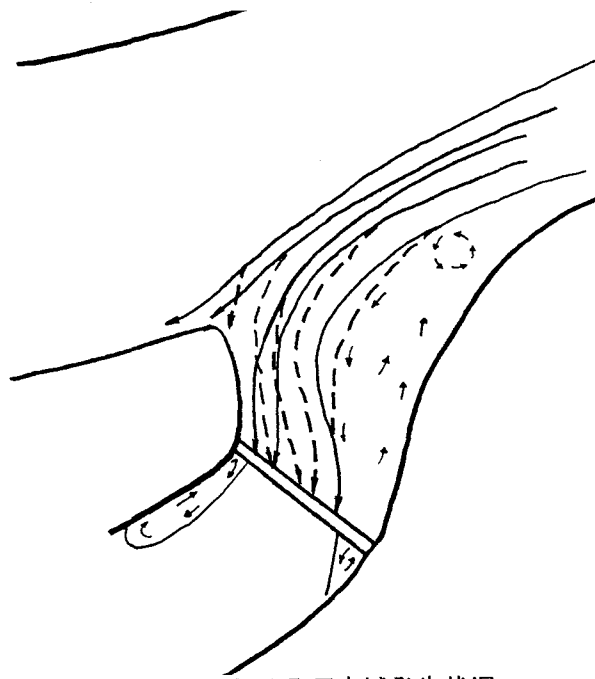


図-8 当初案における死水域発生状況
(模型実験結果)

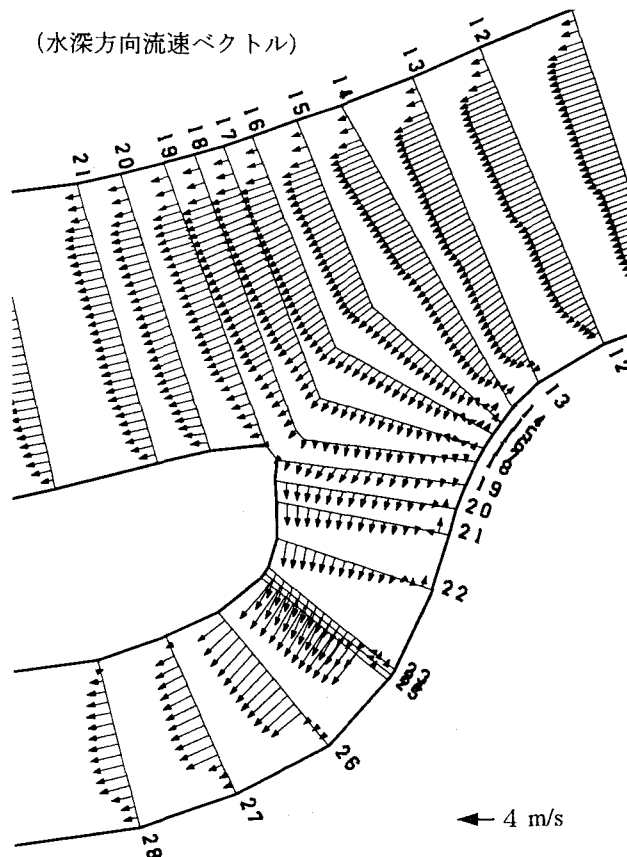
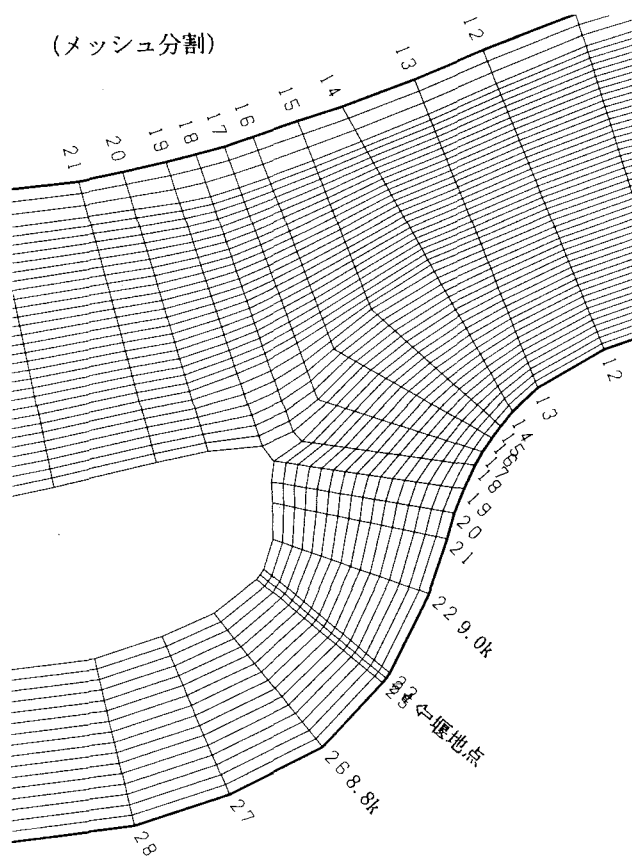


図-9 当初案における数値解析結果

本手法を用いて算出した分流量と従来から実施されている一次元不等計算結果から得られた分流量との比較図を図-10 に示す。（一次元不等流計算での分流量の算出方法の考え方は図-2 と同様とした。なお堰上げ計算は本間の越流公式を用い、平面形状変化による損失は考慮していない。）

この図を見ると、本手法による計算結果に比べ一次元不等流計算結果の分流量がかなり多くなる結果とな

っている。これは一次元計算では断面内の平均的な流れしか解くことができないため、図-5、図-9 に示したように分流部の平面形状が急変したり死水域が生じたりして本川下流方向への流れが卓越する場合においては一次元計算では適正な分流量の推定は困難であり、本検討手法のような平面的な流れの解析が必要であることを示している。この観点からも本手法の有効性は高いと言えよう。

4. 2 分流堰構造の違いによる流況変化状況

堰高を変化させることにより堰高と分流量の感度分析を行い、堰構造の違いによる流況変化が把握できることの確認を行った。

図-4 で示した現況河道における計画流量流下時の堰高と分流量の関係を図-11 に、堰なし（堰高＝高水敷高とした）、堰高 9m 時の表面流速の流速コンター図および水位コンター図を図-12、図-13 に示す。堰構造の違いによる流況変化についても十分評価可能であることが確認された。

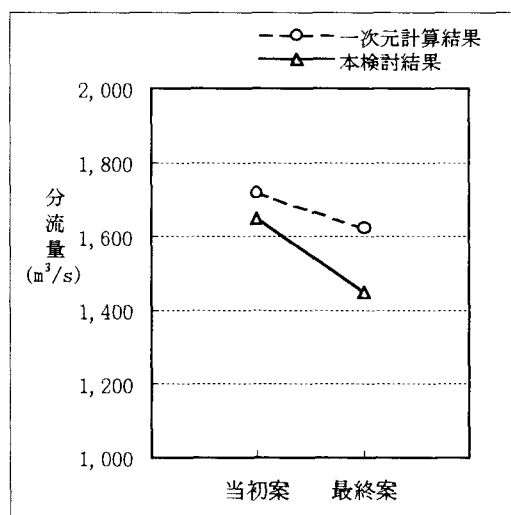


図-10 分流量の一次元不等流計算結果との比較（計画流量流下時）

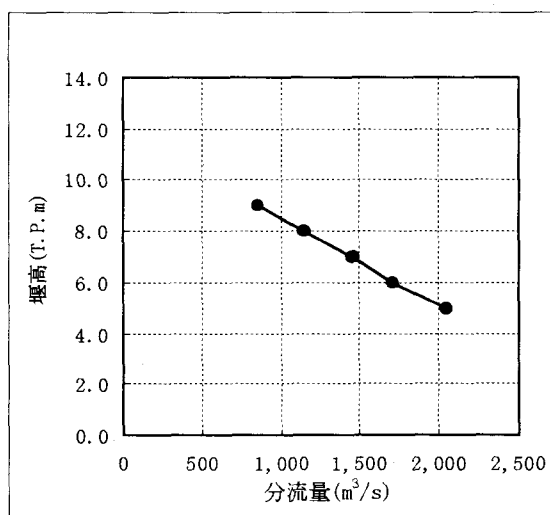
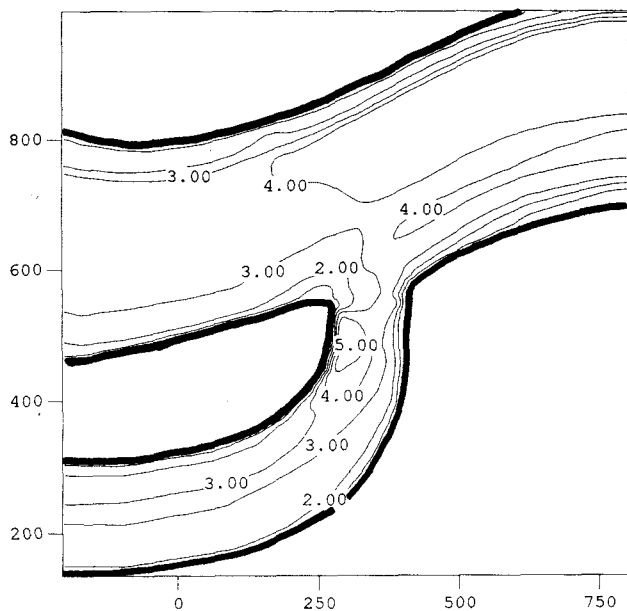


図-11 堰高と分流量の関係図（計画流量流下時）

（堰なし）



（堰高 9m）

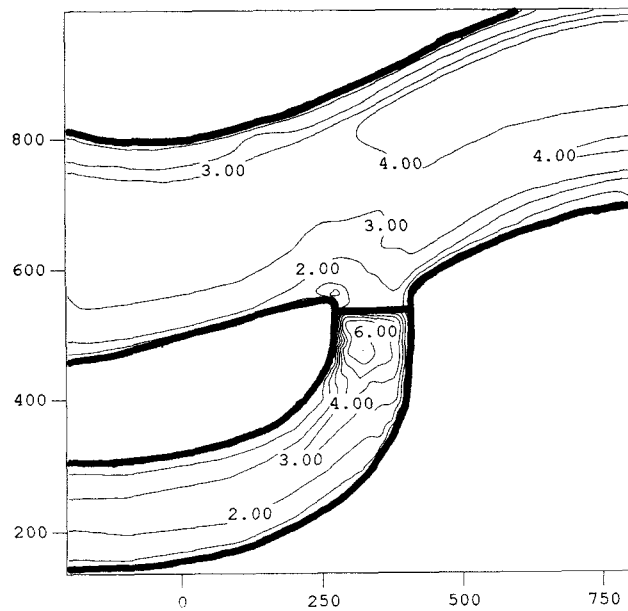


図-12 計画流量流下時の流速コンター図

(堰なし)

(堰高 9m)

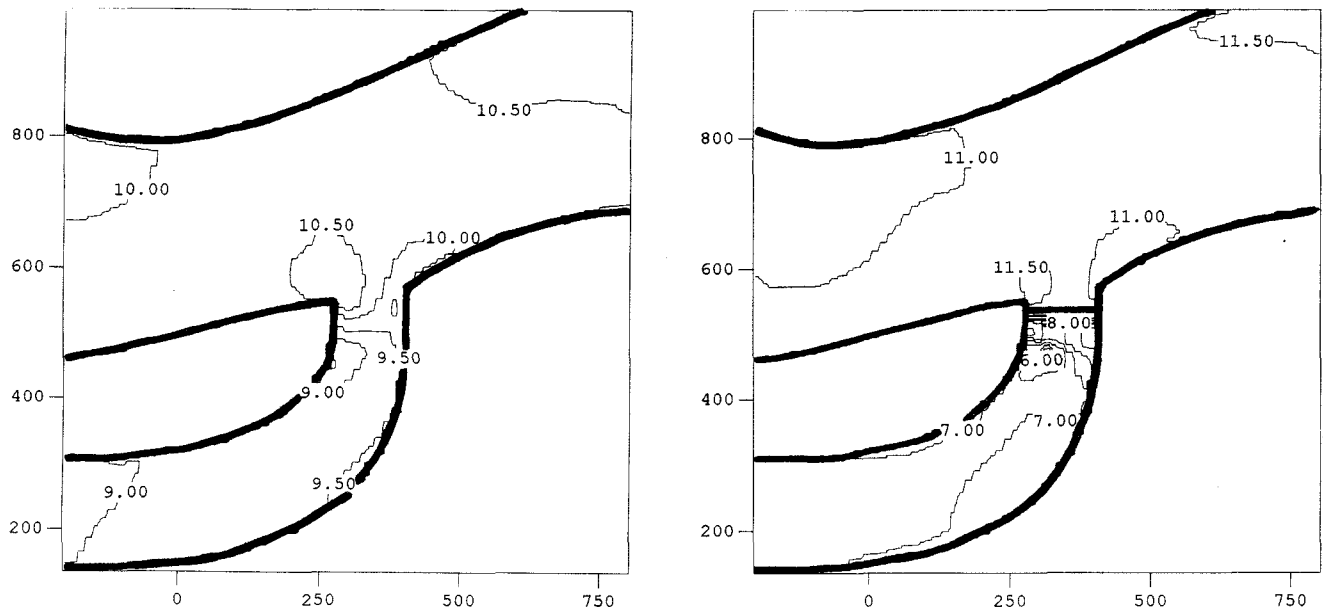


図-13 計画流量流下時の水位コンター図

5. まとめ

本研究は、法線形や河道断面形状等の河道条件が異なる場合の分流部の流れや分流量を精度良く把握することができるモデルの開発を行い、モデルの妥当性を明らかにするとともに、河道条件や水理条件の違いによる分流点の流況の変化と分流量の変化について検討を行った。主な結論は以下の通りである。

①準三次元モデルを改良した本モデルは、実績洪水時の水位および模型実験で得られた分流部の流れを再現でき、分流部の流れの解析に適用可能であることを示した。

②本研究で用いたモデルは、分流点の平面・河床形状や下流端水位の違いによる死水域の発生状況や分流量、流向・流速、水面形等の変化状況を的確に評価することができ、任意の河道形状を有する地点の分流計算に適用できることが明らかとなった。また、分流越流堰付近の流れの特性が表現でき、堰構造の変化に対応した流況、分流量等の変化状況も把握できることが明らかとなった。

③分流点の流れおよび分流量を把握するためには、従来から分流計算に用いられている一次元数値解析では不十分であり、本研究で用いたような平面的な流れの解析を行うことができるモデルが必要である。

本解析モデルは、模型実験の補完的役割を十分に果たし得ることが明らかとなったが、今後は他河川においても適用性の確認を行い本手法の実用性を高めるとともに、河床変動特性を考慮できるよう改良を加え、分流位置の選定、分流点周辺の的確な流況把握による分流形状検討、そして分流越流堰改築時の構造検討などに適用していきたいと考える。

謝辞：本検討にあたり、建設省九州地方建設局大分工事事務所には各種データや既往検討結果の提供等多くのご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉川秀夫：河川工学，朝倉書店，1966
- 2) 福岡捷二，渡辺明英，西村達也：水制工の配置法の研究，土木学会論文集，No.443／Ⅱ-18，1992. 2
- 3) 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-28，1994. 8
- 4) 大野川派川乙津川分流に関する分流機構の実験研究報告，建設省九州地方建設局大分工事事務所，1955
- 5) 佐藤清一，吉川秀夫，山下泰三：河川分流に関する研究(2)－大野川分流の機能設計－，土木研究所資料第 92 号，1956