

大野川と乙津川を対象とした樹木群を考慮した 準3次元洪水流解析と準2次元解析の改良

FLOOD FLOW SIMULATIONS IN THE OONO AND OTOTSU RIVER BY A
QUASI- 3D NUMERICAL MODEL WITH TREATMENT OF VEGETATIONS AND
ITS APPLICATIONS TO QUASI- 2D NUMERICAL SIMULATIONS

坂本 洋¹・重枝 未玲²・朝位 孝二³・徳永 智宏¹・

西尾 崇⁴・秋山 壽一郎⁵・中江 邦昭⁶

Hiroshi SAKAMOTO, Mirei SHIGE-EDA, Koji ASAI, Tomohiro TOKUNAGA,
Takashi NISHINO, Juichiro AKIYAMA and Kuniaki NAKAE

¹正会員 株式会社 建設技術研究所 九州支社河川部 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12 CTI福岡ビル)

²正会員 博士(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

³正会員 博士(工) 山口大学准教授 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

⁴正会員 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所所長 (〒870-0820 大分市西大道 1-1-71)

⁵フェロー会員 Ph. D. 九州工業大学教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

⁶学生会員 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻(同上)

Quasi- three-dimensional numerical simulations of flood flows in the Oono and the Ototsu River were performed to examine the effects of the vegetations as well as curved or meandering or sinuous reach on the behavior of flood flows. A quasi-3D numerical model, which is based on the depth-averaged equation with the effects of the secondary flows and the vegetations on the flows, were used for the simulations. The model was verified through the observation data of the water level and diversion discharge. The effects of the vegetations and the curved or meandering or sinuous reach at the design flood discharge were also examined based on the numerical results, and the relations of water level rise and the distance/discharge were obtained. The quasi- 2D model was shown to be able to reproduce the observation data of water level when the relation described before was used.

Key Words : Flood flow, the Oono River, The Ototsu River, vegetations, quasi two-dimensional and quasi three-dimensional numerical simulations

1. はじめに

近年, 治水と環境の調和した川づくりが求められている。河道内樹木は, 水衝の緩和などの治水機能や豊かな生態系環境の提供などの環境機能を有する。その一方で, 流下阻害による水位上昇などの治水上の問題^{1), 2)}を引き起こす場合がある。

本研究で対象とする大野川と乙津川には河道が湾曲, 蛇行あるいは屈曲する区間があり, その区間に樹木群が繁茂している。湾曲・蛇行・屈曲区間と河道内樹木はいずれも水位上昇を引き起こす要因であり, これらが洪水流に及ぼす影響を適切に評価することは河道の流下能力を評価する上で極めて重要となる。

一般に, 流下能力の検討は準2次元解析により行われる⁴⁾。準2次元解析では, 樹木群は死水域と樹木群境界に働くせん断応力として取り扱われる。せん断応力の算定には境界混合係数が必要であり, その値は乙津川では $f=0.08$ ³⁾, 大野川では $f=0.11$ 程度であることがわかっている。一方, 湾曲区間による水位上昇は, 遠心力と砂州による水位上昇量を比較し大きな量を水位補正量とすることで取り扱われる⁴⁾。

準2次元解析は広義の1次元解析であるため, 当然のことではあるが, 河道が蛇行や屈曲する区間では適用に限界がある。また, 流向の変化による樹木の死水域の変化も考慮することはできない。一方, 準3次元解析では河道線形, 2次流の影響さらに面的な樹木繁茂位置を考慮することができる。この準3次元解析結果に基づき, 湾

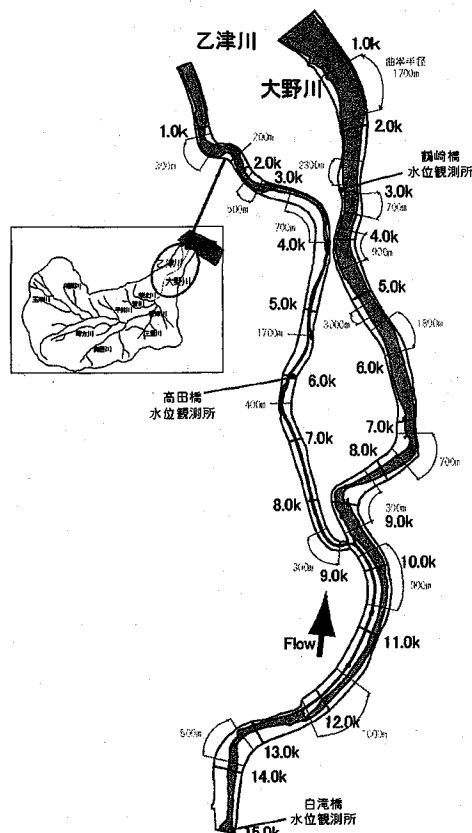


図-1 大野川・乙津川の概要

曲や屈曲区間，流向により樹木の死水域が変化する区間で，どの程度の水位上昇量を与えれば準2次元解析のフレームワークで妥当な結果が得られるかを知ることは，河道管理を行う上で有用な情報であると考えられる。

本研究は，大野川の治水と環境とが調和した樹木管理基準を明確にすることを目的としたものである。ここではまず，本川と派川を包括した準3次元洪水解析を行い，既存の洪水痕跡と分流量の観測結果に基づき，準3次元数値モデルの流況と派川への分流量の再現性について検証した。次に，計画高水流量を基本とし流量を数ケース設定した準3次元解析と準2次元解析の結果とを比較することで，蛇行・屈曲区間とそこに繁茂する樹木群が水位上昇に及ぼす影響について検討した。最後に，この検討結果を踏まえ，準2次元解析の改良を試みた。

2. 大野川と乙津川の概要

本研究の対象河川は，図-1に示す大分県の中央部を貫流する一級河川の大野川とその派川の乙津川である。なお，図中には河道中心軸の曲率半径を示している。対象区間は，大野川の計画基準点の白滝橋(距離標15km付近)から両河川の距離標0.0kmまでの区間である。この区間の河道特性による河道区分は，大野川の距離標0.0～7.4km区間ではセグメント2-2，距離標7.4～15.0km区間ではセグメント2-1，乙津川はセグメント2-2に区分される。大野川の距離標9.5km付近で分流堰により乙津川

への分流が行われており，計画高水流量の配分は計画基準点の白滝橋で9,500m³/s，乙津川で1,500m³/sである。

大野川・乙津川の直轄管理区間の堤防整備率は96%である。平成5年9月の出水(白滝橋流量：9,422m³/s)では，大野川・乙津川のいずれも計画高水位を超過した。また，平成17年9月の出水(白滝橋流量：8,318m³/s)では，乙津川の高田橋水位観測所(図-1)で計画高水位を0.32m超えた⁵⁾。以上のことから，河積が不足している区間が存在することがわかる。このため，大野川の距離標6～8kmや乙津川の距離標2.5～5.2kmの区間では流下能力の確保を目的とした高水敷掘削や樹木伐採などの河川改修または河川工事が計画されている。

平成16年の大野川・乙津川の樹木群の繁茂分布は，図-2に示すとおりである。樹木は，胸高直径の比較的大きなもの，繁茂状況が密で繁茂面積が大きなものを抽出し，平成16年の河川水辺の国勢調査大野川植生調査結果⁶⁾から求めた。図-2から，多くの樹木群が低水路と高水敷の境界に沿って繁茂しており，特に以下の箇所での繁茂が顕著であることが認められる。

- ・大野川 6.0～8.0km 左岸
- ・大野川 9.0～11.0km 右岸
- ・大野川12.0～15.0km 左岸
- ・大野川12.0～13.0km 右岸
- ・乙津川 4.0～6.0km 両岸

大野川と乙津川の繁茂面積と距離標との関係の経年変化(平成11～16年)については参考文献⁷⁾に示しているので参照されたい。

3. 数値解析の概要

(1) 数値モデルの概要

準3次元解析に用いたモデルは，直交曲線座標を用い，余弦関数の合成で s ， n 方向の流速 u ， v の水深方向の分布を近似した福岡らの準3次元モデル⁸⁾をベースとしている。樹木群の取り扱い，福岡らの透過係数によるもの⁹⁾から， s 方向， n 方向の運動方程式にそれぞれ $F_x = C_d \cdot a/2 \cdot u h(u^2 + v^2)^{0.5}$ ， $F_y = C_d \cdot a/2 \cdot v h(u^2 + v^2)^{0.5}$ で表される空間平均された流体力項を付加する取り扱い⁹⁾に変更している。ここに， u ， v ， s ， n 方向の流速， h =水深， a =樹木群密度パラメータ($=d \cdot N$)， d =樹木の投影幅， N =樹木密度(本/m²)および C_d =抵抗係数である。本モデルの特徴は，各パラメータが樹木繁茂状況に応じて設定されることである。また，準2次元解析には財団法人国土技術研究センターが作成した河道計画シミュレータ¹⁰⁾を用いた。

(2) 解析条件

河道縦横断面は，平成13年の200mピッチの測量データと，特定の区間についてはより詳細に測量した平成17年の測量データに基づき作成した。低水路および高水敷の

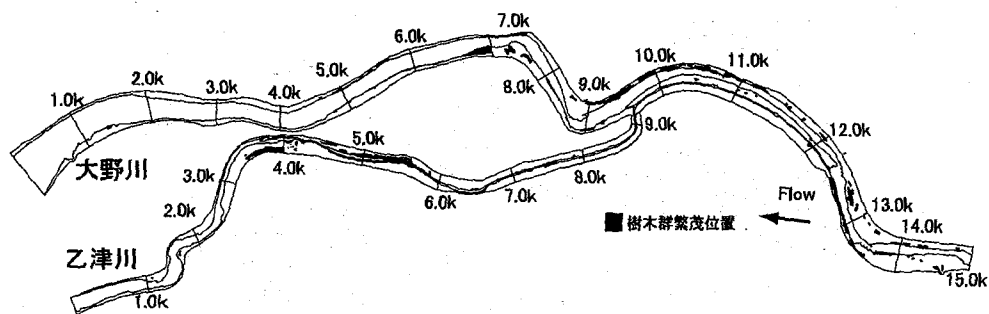


図-2 樹木繁茂分布図

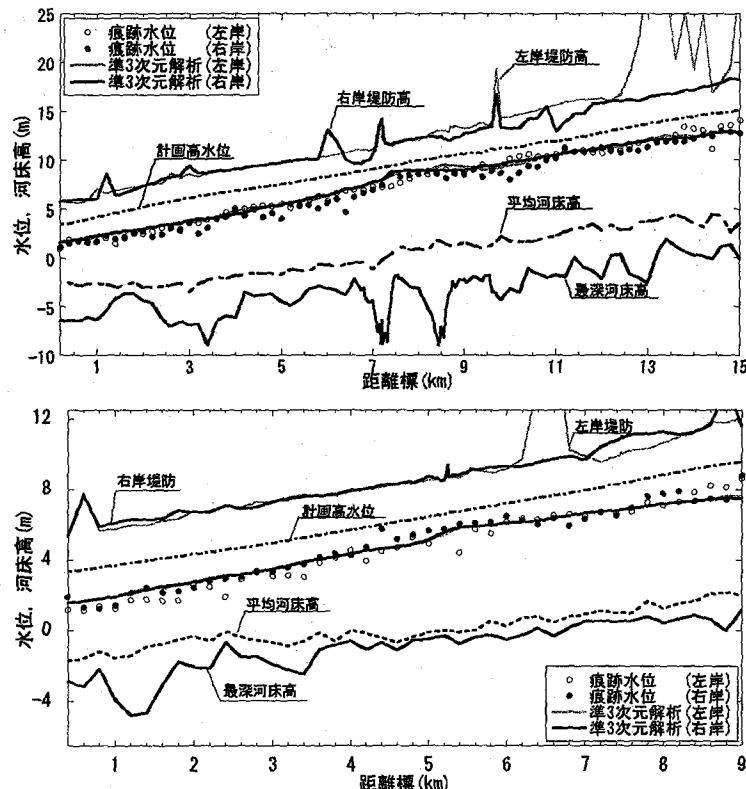


図-3 平成11年9月の出水時の水位の解析結果と痕跡水位との比較(上:大野川, 下:乙津川)

表-1 境界条件

洪水年月	流量 (m^3/s)	出発水位(T.P.m)		備考
		大野川	乙津川	
検証	H9.9	6.447	2.270	下流端痕跡水位
	H11.9	7.061	1.900	
	H17.9	8.318	2.400	
計画高水 流量	9,500	1.194	1.158	期望平均満潮位河水 水深 $\times 2.5\%$

粗度係数については、河床材料に基づき設定された大野川河川整備計画で用いられている値を用いた¹¹⁾。

樹木群の繁茂位置については、図-2に基づき設定した。なお、樹木群については、乙津川の樹木群のほとんどを占有しているマダケ、メダケ群集、ムクノキタブノキ群落、アラカシ、およびジャヤナギを対象とした。

樹木群密度パラメーター α については、現地で行ったコードラード調査結果¹²⁾に基づき設定した。また、調査地点外の樹木群においては、調査結果の平均値を与えた。抵抗係数 C_d については、植生繁茂状況でその値は変化すると考えられるが、ここでは円柱の抵抗係数 $C_d=1.2$ ¹³⁾を用いた。なお、準2次元、準3次元解析のいずれも、樹木群を非水没状態として取り扱った。

境界条件を表-1に示す。モデルの検証を行った平成9, 11, 17年の出水については、大野川の上流端と大野川・乙津川の下流端に表中の流量と痕跡水位をそれぞれ与えた。計画高水流量を与えた解析については、大野川の上流端と大野川・乙津川の下流端に表中の計画高水流量と計画に用いられた水位をそれぞれ与えた。

4. 結果と考察

(1) 準3次元モデルの検証

平成9, 11年に生じた出水時の痕跡水位に基づき、モデルの検証を行った。いずれの結果も同程度の精度が得られたので、ここでは平成11年の結果のみを示している。図-3は、大野川と乙津川について準3次元解析の左岸・右岸の水位と痕跡水位との比較を行ったものである。この図から解析結果は、若干差がある区間も存在するが、全体的には痕跡水位を概ね再現していることがわかる。また、解析結果と痕跡水位に基づく乙津川への分流量は、それぞれ平成9年では $564\text{m}^3/\text{s}$ と $572\text{m}^3/\text{s}$ 、平成11年では

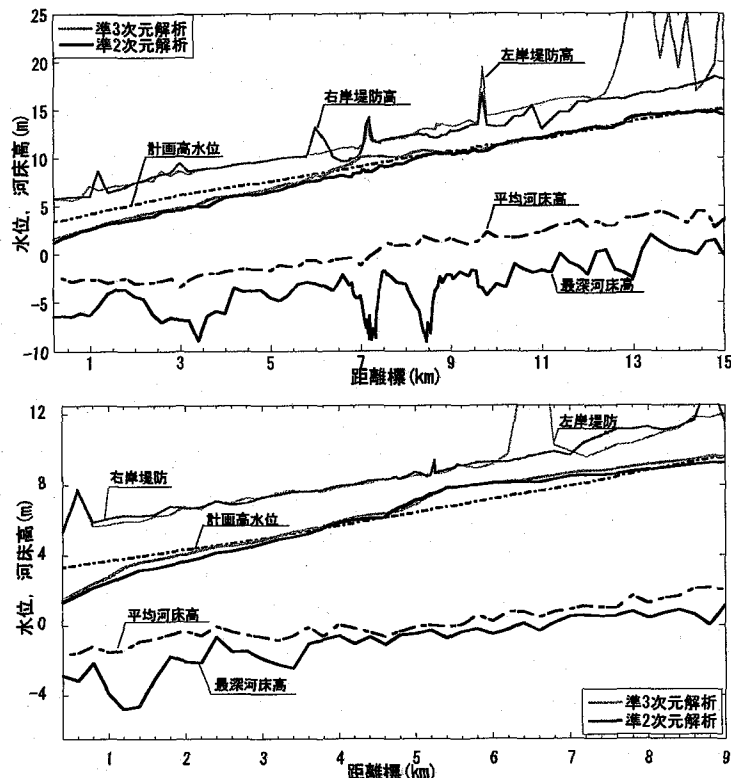


図-4 計画高水流量時の水位の準2次元と準3次元解析結果の比較(上：大野川，下：乙津川)

696m³/sと725m³/sであり、その相対誤差は最大で4%程度であった。

以上のことから、本準3次元モデルは、大野川・乙津川の洪水流の挙動や分流量を十分な精度で再現できていることが確認された。

(2) 蛇行・屈曲区間が水位上昇に及ぼす影響

計画高水流量時の準3次元・準2次元解析による水位の解析結果の比較を行い、両解析結果に生じる違いについて検討した。

図-4は、準3次元および準2次元解析の水位の解析結果の比較を行ったものである。準3次元解析については左右岸水位の大きな方をプロットしている。準2次元解析と準3次元解析とを比較すると、大野川については、(1) 距離標6.0kmから顕著な差が生じ始め、距離標7kmで最も大きな差が生じていること、(2) 距離標6.0kmより下流、または9.0kmより上流では差が若干生じていること、乙津川については、(1) 距離標1.0km～4.0km区間で顕著な差が生じていること、(2) その他の区間では差が若干生じていること、などがわかる。両解析結果に顕著な差が生じた区間は、図-2から明らかなように、いずれも大野川距離標6.0～9.0km区間のような屈曲区間や乙津川1.0～4.0km区間のような蛇行区間に位置している。

このような解析結果の差は、出水規模によって変化すると予想される。そこで、両解析で与える流量規模を計画高水流量 Q_0 の0.7、0.8、0.9倍に変化させた解析を行い、流量の違いが水位上昇に及ぼす影響について検討した。図-5は、各流量での水位上昇率(= $(WL_{q3} - WL_{q2}) / WL_{q2}$)

と距離標との関係を調べたものである。ここに、 WL_{q3} =準3次元解析の水位、 WL_{q2} =準2次元解析の水位である。

これらより、大野川については、屈曲部については最大で20%程度の水位上昇が生じることが確認できる。また、(1) 計画高水流量時に若干の差が生じる距離標6.0kmより下流の区間、(2) 顕著な差が生じ、水位上昇率が増加・減少する距離標6.0～9.0km区間、(3) 流量が増加すると水位上昇率が減少する距離標9.0kmより上流の区間のような3つの特徴的な区間に分類され、各距離標の水位上昇率は流量の関数となることが確認できる。(1)の区間では計画高水流量時の水位上昇率だけに差が生じていることから、この区間では低水路よりも堤防線形が湾曲する区間が多く、流量の増加に伴い水位が上昇し堤防線形の影響を受ける流れが生じたことなどが理由として考えられる。(2)の区間では最大値の発生位置が流量によって異なり、その位置は下流側に遷移していることから、流線の曲がりによる2次流が発達し、それが下流の水位に影響を及ぼしたことが理由として考えられる。(3)の区間では水位上昇率が流量に増加すると減少していることから、この区間は低水路沿いに樹木が繁茂しており、主流線と樹木の位置関係から樹木の死水域が変化したことが理由として考えられる。これらの詳細については今後検討する予定である。

乙津川については、(1) 水位上昇率が距離に応じて減少する距離標4.0kmより下流の区間、(2) 水位上昇率が流量、距離に依存せず概ね一定となる距離標4.0kmより上流の区間のような2つの特徴的な区間に分類され、水位上昇率は河道形態によらず一定となることが確認できる。

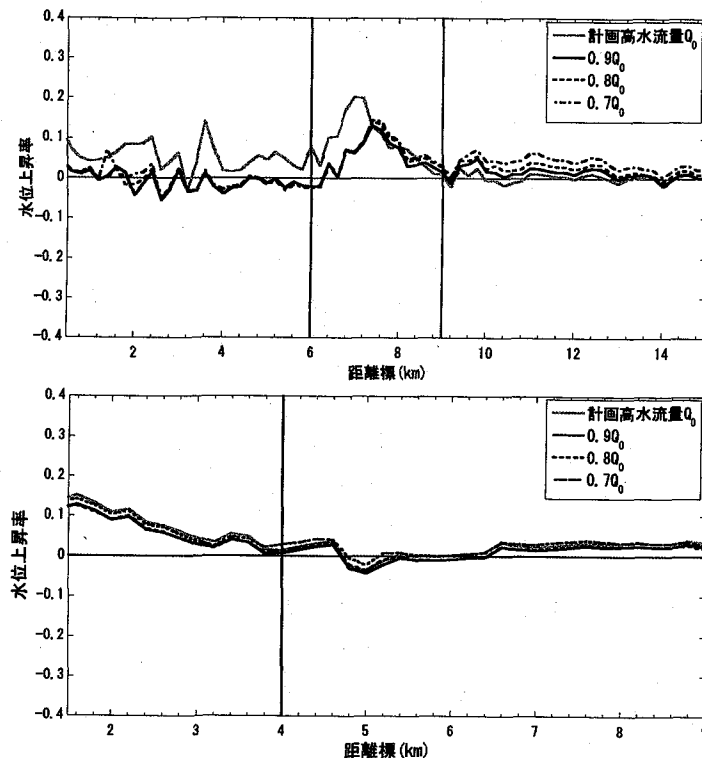


図-5 準3次元と準2次元解析の水位差と距離標との関係(上：大野川，下：乙津川)

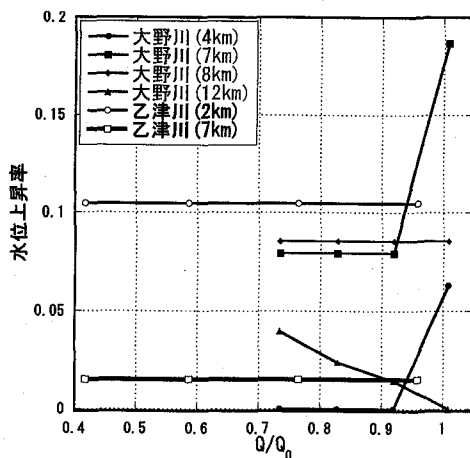


図-6 水位上昇率と流量比 Q/Q_0 との関係

(1)の区間については低水路と堤防線形には大きな変化がないことから、蛇行区間の影響により差が生じたと考えられる。

図-6は、各距離標での水位上昇率と流量比(Q/Q_0)との関係を調べたものである。大野川の距離標6.0kmより下流では計画高水流量時の平均値と他の流量の平均値を、6.0～9.0kmの区間については計画高水流量時の結果、または他の流量の平均値に基づく近似直線を、9.0kmより上流の区間は各流量の平均値を水位上昇率とした。乙津川の4.0kmより下流は各流量の平均値に基づく近似直線を4.0kmより上流は各流量の平均値を水位上昇率とした。いずれの距離標についても、この図に示すように、(1)流量に依存せず一定、(2)流量が増加すると減少、(3)計画高水流量時のみ増加の3つの関係となった。

以上の準3次元解析との比較から、準2次元解析では考慮されない(1) 屈曲や蛇行区間での2次流の発達、(2)

樹木位置と主流線位置との違いから生じる水位上昇とその発生区間が確認された。

(3) 準2次元解析の改良と検証

以上の結果を踏まえ、準2次元解析の改良を試みた。図-6に示すような関係を各距離標で求め、準2次元解析から得られた水位を補正することで、(1) 屈曲や蛇行区間での2次流の発達や(2) 樹木位置と主流線位置との違いから生じる水位上昇を考慮した。また図-6は左右岸の最大水位から求められたものであるため、これから得られる水位は左右岸のいずれかの最大水位となる。

図-7は、平成17年の出水時の痕跡水位に基づき、本研究で検討した補正を加えたモデルの検証を行ったものである。図中には通常の準2次元解析の結果もあわせて示している。これより、従来の準2次元解析に比べ、補正を加えたモデルが大野川距離標6.0～9.0km区間の水位を良好に再現していること、乙津川についても、距離標2.0～4.0kmの最大水位をほぼ再現していることがわかる。このことから本補正法の妥当性が窺える。

5. おわりに

本研究では、大野川と乙津川の準3次元解析を行い、その結果と準2次元解析結果とを比較することで、蛇行・屈曲区間とそこに繁茂する河道内樹木が水位上昇に及ぼす影響について検討し、その準2次元解析の改良を試みた。その結果、以下のような大野川・乙津川の河道管理を行う上で有用な知見を得ることができた。

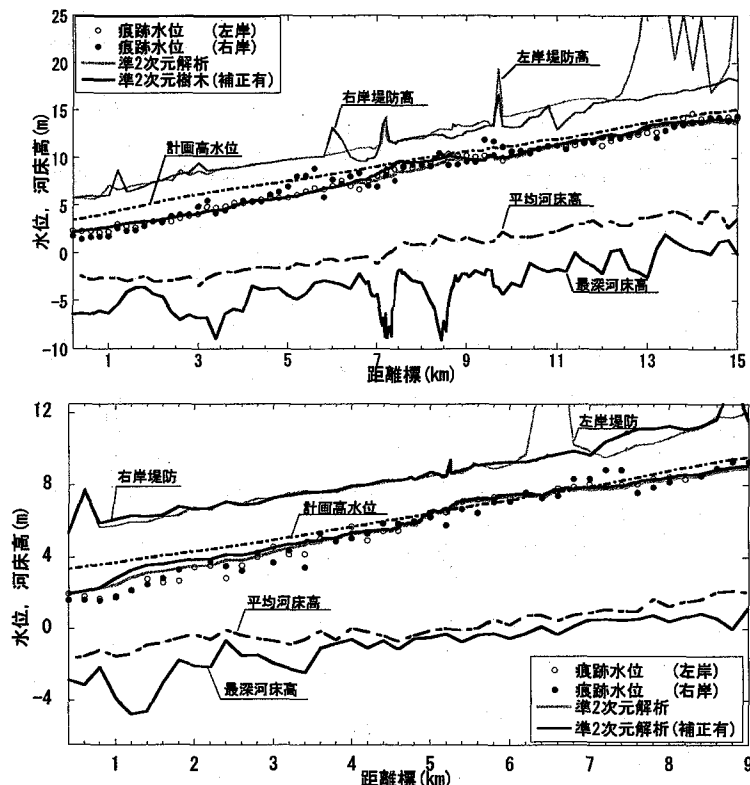


図-7 屈曲・湾曲区間の水位補正を考慮した準2次元解析の解析結果と痕跡水位との比較(上：大野川，下：乙津川)

- (1) 準2次元解析と準3次元解析との間に、大野川では距離標6.0～9.0の屈曲区間で最大20%程度の差が、乙津川では距離標4.0kmより下流の区間で最大15%程度の差が生じること
- (2) 各距離標での流向による樹木の死水域の変化や屈曲・蛇行による水位補正量は図-6のようになること
- (3) 図-6に基づき水位補正を行うことで、準2次元解析により痕跡水位を良好に再現できること

謝辞：本研究は、河川懇談会の活動の一環として、国土交通省大分河川国道事務所と共同で研究を行ったものである。本研究を実施するに当たり、大分河川国道事務所の関係各位にはデータ提供などの多大な協力を得た。また、当時九州工業大学大学院生 樋口 直樹君、石原 仁君、重岡広美さんにはデータ整理や解析を行うにあたり協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 桑原正人、藤堂正樹、小笠原豊、石尾年光、石井克尚、犬丸潤、中村敬司：加古川の河道内樹木の生長特性を考慮した管理方法、河川技術論文集、第12巻、pp.461-464、2006。
- 2) 重枝末玲、朝位孝二、坂本洋、長太茂樹、秋山壽一郎、樋口直樹、重岡広美、徳永智宏：樹木群を考慮した平面2次元モデルによる乙津川の洪水流解析、水工学論文集、第50巻、pp.1171-1176、2006。
- 3) 重枝末玲・朝位孝二・坂本 洋・西尾崇・秋山壽一郎・樋口直樹・石原 仁・徳永智宏：数値シミュレーションに基

- づく乙津川の樹木伐採前後の境界混合係数値の検討、水工学論文集、第51巻、pp.601-606、2007。
- 4) 財団法人 国土技術研究センター (編)：河道計画検討の手引き、山海堂、2002。
- 5) 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所：台風14号大分川・大野川の出水状況平成17年9月4日～6日、2005。
- 6) 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所：大野川水系大野川植生調査報告書、2004。
- 7) 重枝末玲、朝位孝二、坂本洋、長太茂樹、秋山壽一郎、樋口直樹、重岡広美、徳永智宏：大野川とその派川の乙津川を包括した平面2次元洪水流解析と河道内樹木が乙津川の分流量に及ぼす影響、河川技術論文集、第12巻、pp.85-90、2006。
- 8) 福岡捷二 著：洪水の水理と河道の設計法 ―治水と環境の調和した川づくり―、森北出版、2005。
- 9) 重枝末玲、秋山壽一郎：数値シミュレーションに基づく堤防に沿った樹林帯の治水機能の検討、土木学会論文集、No.740/II-64、pp.19-30、2003。
- 10) 財団法人国土技術研究センター：河道計画シミュレータ、WebSite、<http://kasen-keikaku.jp/index.html>、2004。
- 11) 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所：大野川河道技術資料平成14年3月、2002。
- 12) 国土交通省九州地方整備局大分河川国道事務所・九建設株式会社：乙津川定期縦断測量(植物調査) 報告書、2005。
- 13) 福岡捷二、藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水理的影響、土木研究所報告、第180号-3、pp.129～190、1990。

(2007.4.5 受付)