

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

EXAMINATION OF BOUNDARY MIXING COEFFICIENTS BEFORE AND AFTER DEFORESTATION IN THE OTOTSU RIVER BASED ON NUMERICAL SIMULATIONS

重枝 未玲¹・朝位 孝二²・坂本 洋³・西尾 崇⁴・秋山 壽一郎⁵・

樋口 直樹⁶・石原 仁⁶・徳永 智宏³

Mirei SHIGE-EDA, Koji ASAI, Hiroshi SAKAMOTO, Takashi NISHIO, Juichiro AKIYAMA,
Naoki HIGUCHI, Jin ISHIHARA and Tomohiro TOKUNAGA

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

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

³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)

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)

The boundary mixing coefficients, which is used for estimation of boundary shear stress due to vegetation in quasi 2D simulations, in the Ototsu river is investigated numerically. Firstly, the relation between the boundary mixing coefficients f and vegetation density is examined through comparison of numerical results between quasi 2D and 2D simulations. From the relation, a value of f is found to be 0.08 in the Ototsu river. And it is shown that the quasi 2D model can reproduce the observation data of the water level in the three different flooding when the $f=0.08$ is used. The effects of deforestation to the boundary mixing coefficient f is also examined. It shows that deforestation is not effected significantly on the value of f in the Ototsu river.

Key Words : boundary mixing coefficient, flood flow, the Ototsu River, vegetation, quasi two-dimensional and two-dimensional numerical simulations

1. はじめに

近年、治水と環境の調和した川作りが求められている。河道内樹木は、堤防・河岸保護や生態系環境の提供など治水・環境機能を有する反面、適切な管理がなされない場合には洪水時に流下阻害となり、水位上昇などの治水面上の問題を引き起こす場合がある。河道内樹木の管理法については、「河川における樹木管理の手引き」¹⁾などに取りまとめられており、樹木群の持つ治水機能や環境機能を損なわないように配慮しつつ、支障の大きいものから必要に応じて伐採することが基本とされている。

樹木管理を行うためには、河道内樹木が洪水流に及ぼす影響を適切に評価できるツールが不可欠となる。そのようなツールの一つに、準 2 次元解析²⁾がある。現在の河道改修計画の多くはこの準 2 次元解析結果をベ-

スに検討がなされている。準 2 次元解析では、樹木群を死水域と樹木境界で流れに働くせん断力として取り扱う。このため、洪水時の水位を予測する上で、死水域とせん断応力を算定するための境界混合係数 f を適切に設定することが必要となる。現況河道と樹木繁茂に対する樹木群の取扱いにの手法については「河川における樹木管理の手引き」¹⁾に取りまとめられている。しかし、いずれの設定についても、痕跡水位に基づき修正を行う必要があるために、痕跡水位等が存在しない樹木伐採後の f 値や死水域の推定方法は確立されていないのが実状である。

その一方で、平面 2 次元解析や準 3 次元解析などのツールもある。これらは、一般に樹木を流水抵抗として取り扱い、その評価には樹木の繁茂状況に応じて設定された抵抗係数や透過係数が用いられる。福岡ら³⁾は、平面 2 次元解析結果と観測水位に基づき、河道内樹木

の透過係数の平均的な分布を推定できることを示している．このことは，平面 2 次元解析を用いれば，樹木繁茂状況が洪水流に及ぼす影響を把握可能であることを示している．従って，平面 2 次元解析の結果を準 2 次元解析に反映することができれば，準 2 次元解析の枠組みで治水面上適切な樹木繁茂状況の検討や樹木伐採位置や量などの河道内樹木の管理をより合理的に検討することができると考えられる．

著者らは，平面 2 次元解析モデルを用い，河道内樹木が大野川と乙津川の洪水流に及ぼす影響および河道内樹木が大野川から乙津川への分派流量に及ぼす影響などについて検討した結果，平面 2 次元解析モデルにより洪水時の河道内水位のみならず分派流量までの再現可能であることを示した^{4),5)}．

本研究は，大野川と乙津川の治水と環境保全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ている．ここでは，乙津川を対象に，まず，洪水流量の異なる 3 つの出水に対して平面 2 次元解析モデルが十分な精度で痕跡水位を再現できることを示す．次に，平面 2 次元解析と準 2 次元解析の比較から，乙津川の平均的な樹木境界混合係数 f の推定を行い，この f 値を用いた準 2 次元解析の予測精度について検討する．最後に，樹木伐採が樹木混合係数 f に及ぼす影響を数値シミュレーションに基づき検討する．

2. 乙津川の概要

本研究で対象とする乙津川は，大分県の中央部を貫流する一級河川大野川の派川である (図-1)．その延長は 10.9km で図-1 では全区間の内，距離標 0km ~ 大野川からの分流地点までの区間を示している．乙津川の河道特性による河道区分はセグメント 2-2 に対応する．計画高水流量は大野川から分流堰より配分される流量 $1,500\text{m}^3/\text{s}$ である．乙津川の河道内樹木は，距離標 3.4 ~ 5.6km 区間に集中しており，メダケ等の竹林が多く，そのほとんどは低水路沿いに位置する．平成 17 年 9 月の出水では計画高水流量を下回る流量 ($1142\text{m}^3/\text{s}$) であったにも関わらず，高田橋水位観測所 (図-1) において計画高水位を 0.32m 超えたことが報告されている⁶⁾．

3. 境界混合係数

準 2 次元解析では，河道内樹木は (1) 死水域として流積を減少させること，(2) 流れと樹木の境界に働くせん断応力 τ を加えることで取り扱われる．(1) の死水域については，樹木繁茂状況の粗密により死水域を割り引くことなどの基準が存在するが，一般にはある程度の樹木が密生していれば樹木繁茂範囲の全てを死水域として取り扱われることが多い．また，(2) のせん断応力 τ は，境界混合係数 f を用いて式 (1) で定義される．

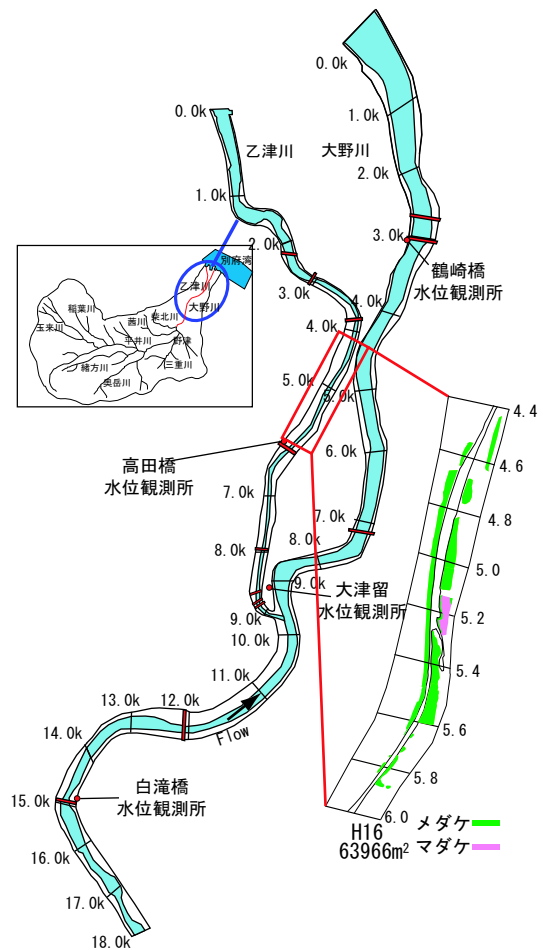


図-1 乙津川の概要

$$\tau = \rho \cdot f \cdot (\Delta u)^2 \quad (1)$$

ここに， ρ = 水の密度， Δu = 樹木群内外の流速差であり，樹木群内の流速はその外側の流速に比べ非常に小さいために通常 0 として計算される．しかし，実際には樹木群繁茂状況によっては樹木内にも流れが生じているために，樹木群内の流速は 0 とならない．このため，樹木群内の流れが洪水流に及ぼす影響は，境界混合係数 f 値に陰的に含まれることになる．従って，痕跡水位に基づく境界混合係数の修正の必要性が生じる．

境界混合係数 f は，樹木の位置により推奨値があり，樹木が堤防に接している場合は $f=0.03$ ，樹木が河道の中央にある場合には $f=0.10$ が用いられる．また，福岡・藤田らの実験²⁾から樹木が堤防に接した場合と河道の中央にある場合とにわけ， f を求める理論式を提案している．樹木群が河道の中央にある場合は次式のようになる．

$$\frac{K_s \sqrt{h}}{u_m \sqrt{b}} \leq 0.4 \quad f = 0.072 \frac{K_s \sqrt{h}}{u_m \sqrt{b}} \quad (2)$$

$$\frac{K_s \sqrt{h}}{u_m \sqrt{b}} > 0.4 \quad f = 0.017 + 0.029 \frac{K_s \sqrt{h}}{u_m \sqrt{b}}$$

ここに， K_s = 透過係数， h は水深， u_m = 樹木群に接する分割断面での平均流速， b = 樹木群幅である．

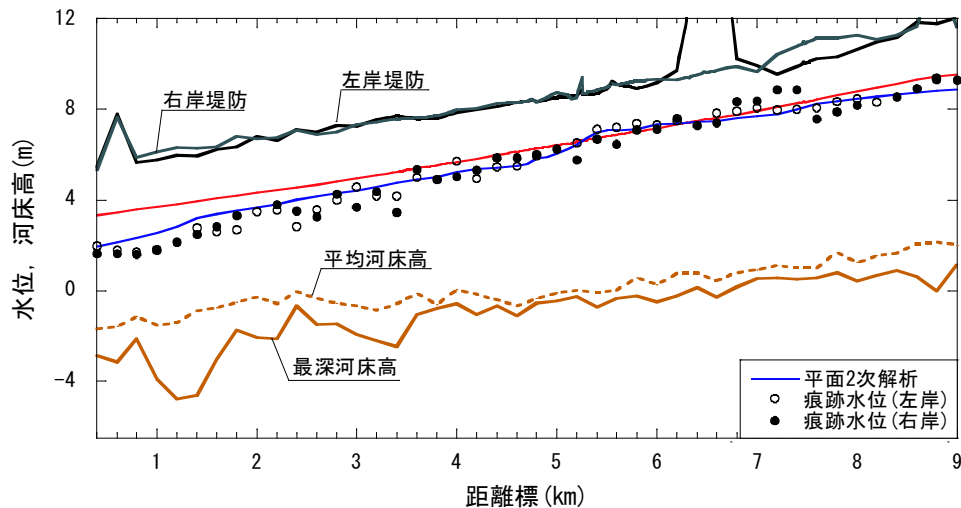


図-2 平成 17 年 9 月の出水時の痕跡水位と平面 2 次元解析結果との比較

4. 数値解析の概要

平面 2 次元解析には著者等が開発した SA-FUF-2DF モデル⁷⁾を、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⁸⁾を用いた。

計算に用いた河道縦横断面は、平成 13 年の測量データを用いた。粗度係数 n については「大野川河道技術資料」⁹⁾で用いられた値を用いた。低水路については河床材料の粒径に基づき $n=0.034 \sim 0.036$ の範囲で、高水敷については水深と植生の高さの関係に基づき $n=0.025 \sim 0.048$ の範囲で与えた。

樹木群の繁茂位置については平成 11 年、17 年については「河川水辺の国勢調査 平成 11 年度、16 年度版大野川水系大野川植生調査報告書」に基づき作成した。平成 9 年についてはデータが存在しなかったため、平成 6 年と 11 年のデータを内挿することで作成した。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、および常緑広葉樹林（ムクノキ・タブノキ群落）（距離標 6.2～6.6km のみ繁茂）を対象とした。

SA-FUF-2DF モデルでは樹木群は x 方向、 y 方向の運動方程式にそれぞれ $F_x = C_d \cdot a/2 \cdot uh\sqrt{u^2 + v^2}$, $F_y = C_d \cdot a/2 \cdot vh\sqrt{u^2 + v^2}$ で表される空間平均された流体力項を付加することで取り扱われる⁷⁾。ここに、 a =樹木群密度パラメーター（ $=d \cdot N$ ）、 d =樹木の投影幅、 N =樹木密生度（本/㎡）および C_d =抵抗係数であり、各パラメーターは、樹木繁茂状況に応じて設定される。樹木群密度パラメーター a については、現地で行ったコドラード調査結果¹⁰⁾をもとに設定した。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 $C_d=1.2$ ²⁾を用いた。なお、準 2 次元、平面 2 次元解析のいずれも、非水没状態として樹木群を取り扱った。

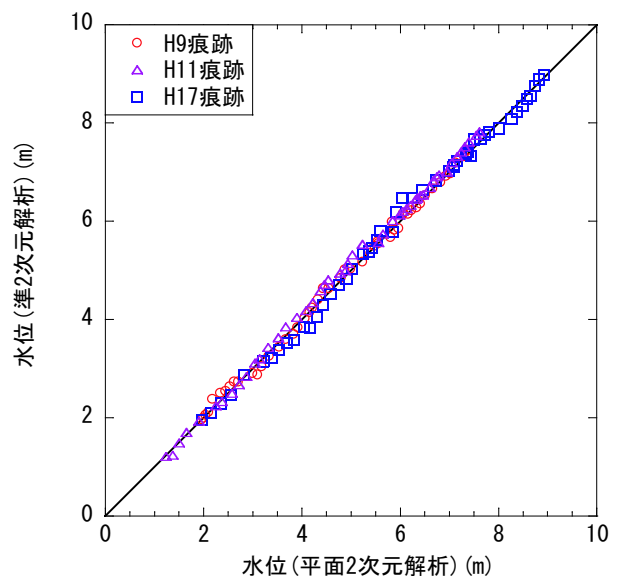


図-3 平面 2 次元解析と準 2 次元解析との比較（洪水痕跡）

境界条件として上流端（距離標 9.0km）に流量を、下流端（距離標 0.4km）に水位を与えた。痕跡水位との比較では、高田橋水位観測所での痕跡水位から算出された出水時の流量と痕跡水位を、計画高水流量時の解析では計画と同様に、計画高水流量 $1500\text{m}^3/\text{s}$ と淡水と海水の密度差による水位上昇を考慮した朔望平均満潮位と河口水深 $\times 2.5\%$ の和 T.P1.158m を与えた。

5. 結果と考察

(1) 平面 2 次元解析モデルの予測精度の検証

まず、平成 9、11、17 年に発生した流量（H9: $572\text{m}^3/\text{s}$ 、H11: $725\text{m}^3/\text{s}$ 、H17: $1142\text{m}^3/\text{s}$ ）の異なる 3 つの出水に対して、痕跡水位に基づき平面 2 次元解析モデルの検証を行った。図-2 は、平成 17 年の出水での平面 2

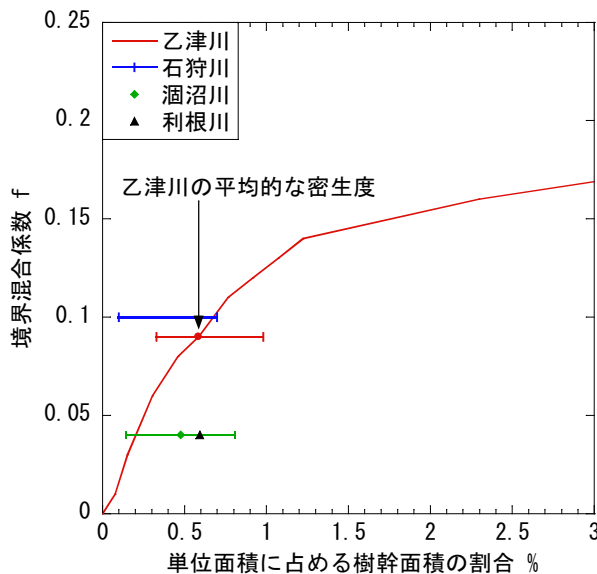


図-4 境界混合係数と単位面積中の樹木面積との関係

次元解析の河道中心軸上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、平面 2 次元解析は痕跡水位を十分な精度で再現していることが確認できる。また、いずれの出水に対しても同程度の精度の結果が得られた。これらより、本平面 2 次元解析は十分な精度で洪水流を再現できることが確認できる。

(2) 樹木伐採前の境界混合係数 f 値の検討と妥当性の検証

先述したように、樹木繁茂状況によっては樹木群内の流れが生じ、境界混合係数 f 値に影響を及ぼす。そこで、乙津川の平均的な樹木繁茂面積の割合に対する境界混合係数値を把握することを目的として、計画高水流量時について単位面積中に占める樹木繁茂面積の割合を変化させた平面 2 次元解析と境界混合係数 f を変化させた準 2 次元解析を行い、両解析結果が一致するような単位面積中に占める樹木繁茂面積の割合と境界混合係数 f との関係を調べた。なお、先述したように乙津川は、竹林が多いことから樹木繁茂面積は樹幹面積としている。また、低水路沿いに繁茂している樹木が多いため、ここでは樹木が河道の中央にある場合の境界混合係数についてのみ検討している。

図-3 は、各距離標について、平面 2 次元解析と準 2 次元解析で得られた河道中心軸上の水位の比較を行ったものである。これより、平面 2 次元解析と準 2 次元解析は直線上に集中しており、両結果が一致していることが確認できる。

この結果を用い樹木繁茂面積の割合と境界混合係数 f との関係を調べたものが、図-4 である。図中には、石狩川¹¹⁾、湊沼川¹²⁾、利根川¹³⁾の樹木混合係数 f についても併せて示している。また、図中のプロットは平均値

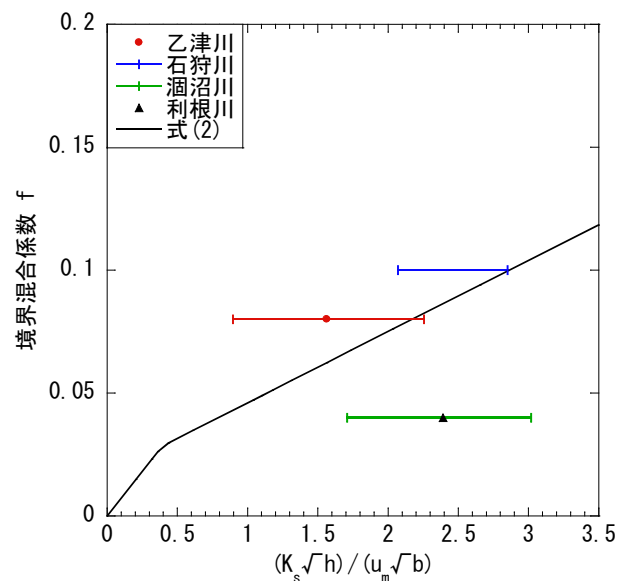


図-5 境界混合係数と無次元パラメータとの関係

を、エラーバーは樹木面積割合の最大値、最小値を示している。なお、石狩川については代表的な樹木繁茂状況の範囲のみを示している。これより、境界混合係数 f は、樹木繁茂面積の割合が増加すると大きくなり、樹木面積の割合が 1% 近くになるとその増加率は減少することがわかる。乙津川では樹木繁茂面積の割合は 0.3 ~ 1.0% であることから、境界混合係数は $f = 0.06 \sim 0.12$ の範囲にあり、平均的な樹木面積の割合に応じた境界混合係数 f は 0.08 であることがわかる。また、石狩川¹¹⁾、湊沼川¹²⁾、利根川¹³⁾についてみると、乙津川を対象に求められた境界混合係数 f と樹木面積の割合との関係を表す曲線付近にデータがちらばることがわかる。これは、境界混合係数が、樹木の繁茂位置や形状などの各河川の河道の特性に応じて変化するためと考えられる。実際、境界混合係数の検討事例を見ると、 f 値は 0.01 ~ 0.37 程度の幅を持っている¹⁾。したがって、ここで得られた関係は乙津川に限定されるものだと考えられる。

そこで、理論的に求められた式 (2)²⁾と乙津川の平均的な f 値との適合性を調べたものが図-5 である。先ほどと同様に、図中には石狩川¹¹⁾、湊沼川¹²⁾、利根川¹³⁾の樹木混合係数 f についても併せて示している。これより、いずれの河川についても式 (2) 周辺にデータがあることから、式 (2) の関係に概ね従っていること、また、式 (2) は第 1 近似として十分であることが確認できる。

以上の検討から、乙津川での平均的な境界混合係数は $f=0.08$ と考えられる。そこで、この境界混合係数を用いて、平成 9, 11, 17 年に発生した流量 (H9: 572m³/s, H11: 725m³/s, H17: 1142m³/s) の異なる 3 つの出水に対して痕跡水位に基づき準 2 次元解析の検証を行った。図-6 は、平成 17 年の出水での準 2 次元解析の河道中

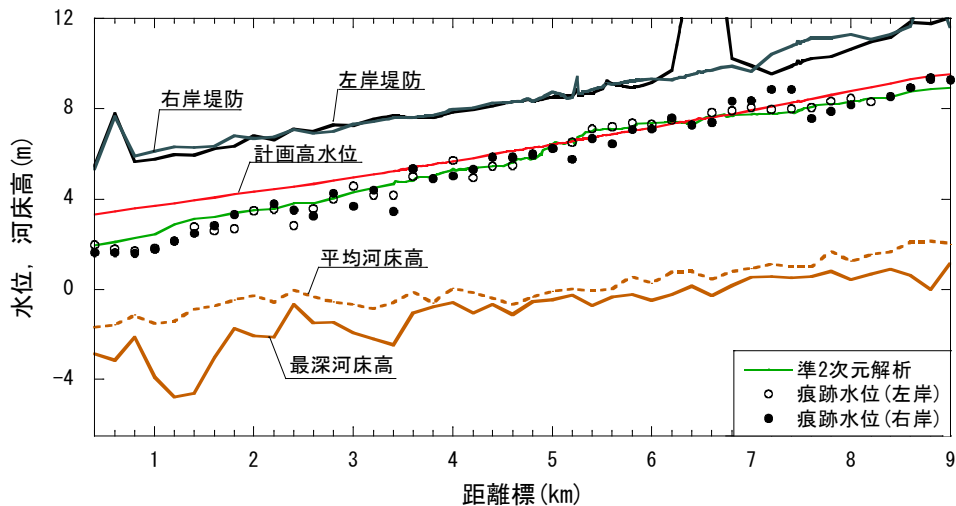


図-6 平成 17 年 9 月の出水時の痕跡水位と準 2 次元解析結果との比較 ($f=0.08$)

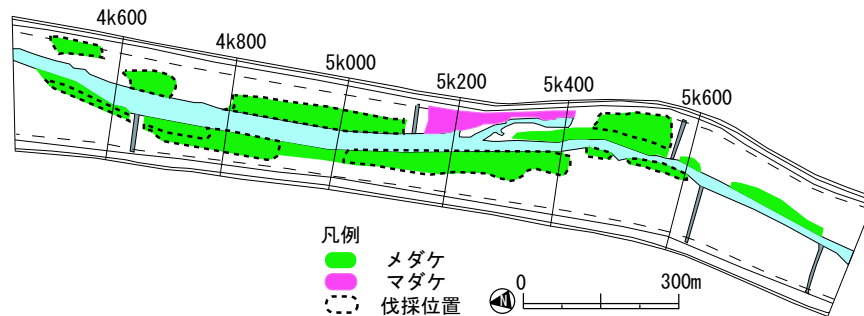


図-7 樹木及び竹林伐採計画案

心軸上の水位と痕跡水位との比較を行ったものである。これより、先ほどの平面 2 次元解析と同様に痕跡水位を十分な精度で再現していることがわかる。著者らは、これまでに推奨値 $f=0.10$ を用いて準 2 次元解析を行ってきた。全体的には十分な精度で痕跡水位を再現できるものの、樹木が密生する距離標 3.4～5.6km 区間では若干大きく評価していた⁴⁾。境界混合係数 $f=0.08$ を用いた計算ではこのことは改善されている。また、いずれの出水に対しても同程度の精度の結果が得られたことから、乙津川での平均的な境界混合係数が $f=0.08$ であることの妥当性が確認できる。

(3) 樹木伐採後の境界混合係数 f の推定

最後に、樹木伐採が境界混合係数 f に及ぼす影響について検討した。当然のことながら、計画段階で樹木伐採後の痕跡水位は存在しないために、樹木伐採による f 値を検討することは計画を行う上で有用であると考えられる。

伐採対象区間は、樹木が最も繁茂する距離標 4.6～5.6km である。間伐等を行う場合には、図-4 に従えば、 f 値はおおよそ予測できるので、ここでは樹木の伐採は区域伐採とした。樹木の幅方向に $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ とした場合と図-7 に示す「樹木及び竹林伐採計画案」に

従った場合とした。それぞれ樹木繁茂面積は伐採前に比べ、約 0.25、0.30、0.50 および 0.75 倍となっている。流量は計画高水流量とした。

まず、樹木伐採後の平面 2 次元解析を行い、次に準 2 次元解析を行い、この結果と一致するような f 値を求めた。図-8 は、各距離標での平面 2 次元解析と準 2 次元解析の水位を比較したものである。いずれも直線上にあり、平面 2 次元解析と準 2 次元解析とが一致していることがわかる。なお、樹木幅を $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ とした場合と「樹木及び竹林伐採計画案」の場合 4.6～6.0km の水位の低下率は 13～18%であった。

平面 2 次元解析と一致した場合の境界混合係数 f と樹木伐採量を調べたものが図-9 である。いずれの伐採も、境界混合係数 f 値は大きな変化はなく、 $f=0.08$ の一定値となることがわかる。これは、乙津川の樹木の平均的な透過係数 $K_s = 6.5(\text{m/s})$ であり、この程度の透過係数であれば樹木幅による境界混合係数 f の変化が小さいためと考えられる。このことは、樹木によるせん断応力により水位上昇が引き起こされている河道であれば、樹木伐採を行ったとしても水位低下が生じる可能性が低いことを示唆している。しかしながら、乙津川では低下率は 13～18%であり、乙津川の樹木伐採に伴う水位低下は、河積の増加が主な要因であり、境

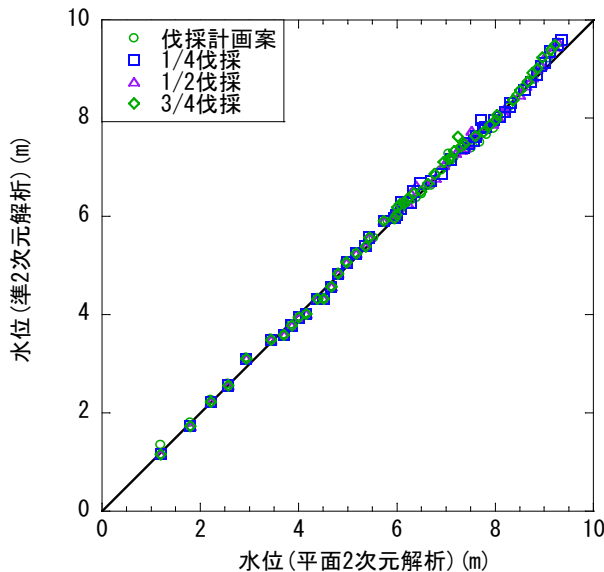


図-8 平面 2 次元解析と準 2 次元解析との比較 (樹木伐採時)

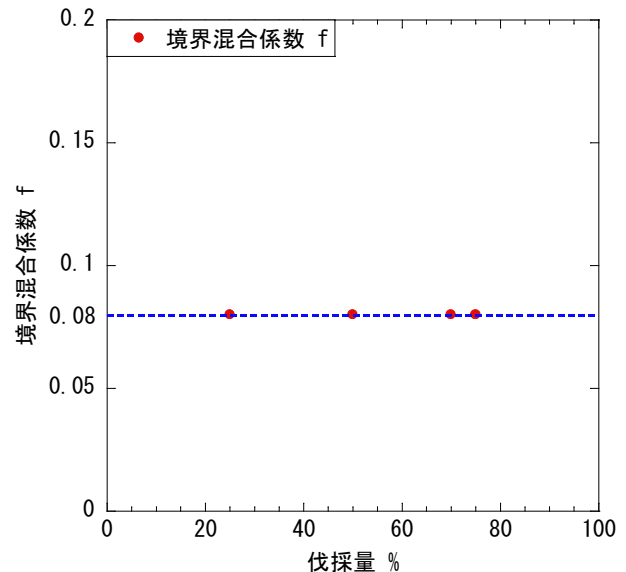


図-9 境界混合係数と伐採量との関係

界混合係数 f の変化によるものではないと考えられる。

以上のように、乙津川については、樹木を区域伐採する場合には、境界混合係数 $f=0.08$ としても良いと考えられる。

6. おわりに

本研究では、乙津川の平均的な樹木境界混合係数 f の推定を行った後、この f 値を用いた準 2 次元解析の予測精度について検討した。また、樹木伐採が樹木境界混合係数 f に及ぼす影響を数値シミュレーションに基づき検討した。その結果、乙津川の平均的な樹木境界混合係数 f の値は $f=0.08$ であること、この $f=0.08$ を用いれば、流量の異なった 3 つの出水に対する痕跡水位を再現可能であること、また、数値シミュレーション結果に基づけば、間伐を行う場合には図-4 の関係を、区間伐採を行う場合には $f=0.08$ を用いれば樹木伐採後の水位を予測できること、などの乙津川の樹木管理を行う上で有用な知見が得られた。今後は、治水機能を有する樹木、水位上昇や堤防沿いの高速流などの治水問題を生じさせる可能性がある樹木を抽出し、大野川・乙津川の適切な樹木管理法について検討する予定である。

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現地調査の実施やデータの提供など多大な協力を得た。また、九州工業大学工学部生柳善之君にはデータ作成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) 財団法人リバーフロント整備センター（編）：河川における樹木管理の手引き，山海堂，1999。
- 2) 福岡捷二，藤田光一：洪水流に及ぼす河道内樹木群の水利的影響，土木研究所報告，第 180 号-3，pp. 129-190，1990。
- 3) 福岡捷二，渡邊明英，田端幸輔，風間聡，牛腸宏：利根川・江戸川分派点を含む区間における流量ハイドログラフと粗度係数・樹木群透過係数の評価，水工学論文集，第 50 巻，pp. 1165-1170，2006。
- 4) 重枝未玲，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 次元数値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。
- 5) 重枝未玲，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。
- 6) 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。
- 7) 重枝未玲，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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 国土交通省 九州地方整備局大分河川国道事務所・九建設計株式会社：乙津川定期縦断測量（植物調査）報告書，2005。
- 11) 福岡捷二，藤田光一，新井田浩：樹木群を有する河道の洪水水位予測，土木学会論文集，Vol. 447/II-19，pp. 17-24，1992。
- 12) 福岡捷二ら：涸沼川における洪水流と河床変動の研究，土木研究所報告，第 180-2 号，pp. 35-128，1990。
- 13) 福岡捷二，渡邊明英，上阪恒雄，津森貴行：低水路河岸に樹木群のある河道の洪水流の構造 - 利根川新川通昭和 56 年 8 月洪水 -，土木学会論文集，Vol. 509/II-30，pp. 79-88，1995。

(2006. 9. 30 受付)