

蛇行低水路沿いに繁茂した樹木群の 抵抗特性に関する研究

STUDY ON THE RESISTANCE CHARACTERISTICS OF VEGETATION ALONG A LOW-WATER CHANNEL IN A MEANDERING COMPOUND CHANNEL

重枝未玲¹・秋山壽一郎²・中江邦昭³

Mirei SHIGE-EDA, Juichiro AKIYAMA and Kuniaki NAKAE

¹正会員 博士(工) 九州工業大学大学院准教授 工学研究院建設社会工学研究系
(〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1)

²フェロー会員 Ph.D. 九州工業大学大学院教授 工学研究院建設社会工学研究系(同上)

³学生会員 九州工業大学大学院 工学研究院建設社会工学専攻(同上)

The resistance characteristics of vegetation along a low-water channel in a meandering compound channel were investigated experimentally. The flow pattern in a meandering compound channel was classified into three types such as simple and compound meandering channel flow (region I and II) and meandering channel flow with maximum velocity in the center of main channel (region III) by the sinuosity and relative depth. In experiments, the relative depth was changed from 0.31 to 0.52. Through the experiments, it was found that resistance characteristics were changed when the flow pattern changed from region II to region III. The method for estimating the position of the vegetation, which had a great influenced on water level rise, was also shown.

Key Words : *vegetation along a low-water channel, meandering compound channel, resistance characteristics, experiments*

1. はじめに

近年、治水と環境とが調和した川づくりが求められている。河道内樹木は、自然景観や生態系などの環境面や堤防や河岸の保護などの治水面で重要な役割を果たす一方で、適切な管理がなされない場合には河道の流下能力を低減させ、治水面上問題を引き起こす場合がある。幾つかの河川では、出水時に河道内樹木が集中している区間で計画高水位を上回った報告^{1),2)}がなされている。

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」³⁾に取りまとめられている。この中では、樹木伐採範囲は、洪水流下を阻害する樹木を想定し、準2次元解析により洪水時の水位と安全水位との関係などを踏まえた上で決定することが望ましいとされている。つまり、洪水時に流下阻害となる河道内樹木の判別が容易にできれば、より効果的な樹木管理を行うことが可能になると考えられる。

福岡ら⁴⁾は、北海道北部の常呂川を対象に河道特性と

土砂堆積について調査し、低水路が蛇行し樹木が繁茂する区間では、樹木が繁茂していても低水路が直線の場合や樹木があまり繁茂していない区間に比べ土砂の堆積量が大きいこと、などを示している。また、平面2次元非定常解析から、河道線形に対して樹木群が洪水流の流下方向に沿って繁茂している場合と流下を阻害するように繁茂する場合では樹木群の抵抗特性が異なることも示している。このように、堤防や低水路などの河道線形と河道内樹木の位置は、樹木群の抵抗特性と密接に関係しており、これらの関係を明確にすることは、効果的な樹木管理を行う上で極めて重要である。

著者ら^{5),6),7)}は、大分県の大野川とその派川の乙津川を対象に現地調査・数値解析を通じて、そこでの樹木管理方法について検討してきた。大野川と乙津川の横断面形状は複断面であり、複断面蛇行流路の流れは、相対水深(高水敷水深/低水路水深)と蛇行度との関係から、単断面的蛇行流れ(領域Ⅰの流れ)、複断面的蛇行流れ(領域Ⅱの流れ)、低水路線形が流れに影響せず直進性が増す複断面的蛇行流れ(領域Ⅲの流れ)に分類されることがわ

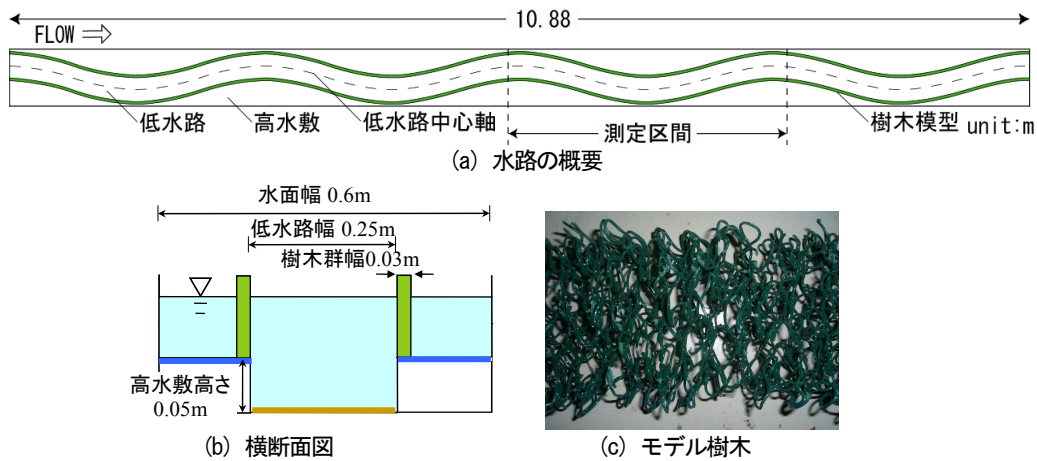


図-1 実験装置

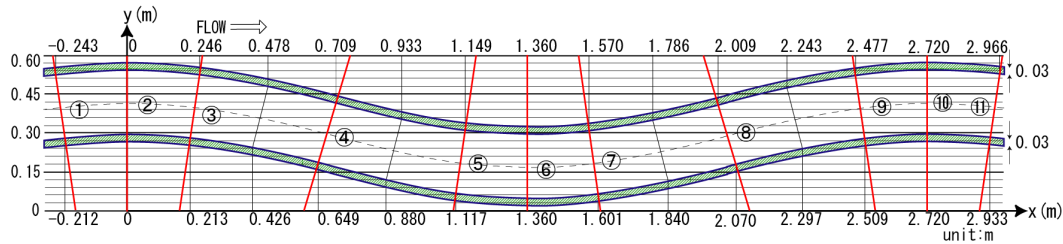


図-2 測定点

かっている⁸⁾。大野川や乙津川で樹木による水位上昇が顕著であった区間の蛇行度 S と相対水深 Dr との関係を調べると、流れは直進性の強い複断面蛇行流れ(領域III)⁷⁾であることが確認された。また、実験結果⁹⁾からも同様に、蛇行度と相対水深との関係により生じる流況の変化が樹木群の抵抗と密接に関係していることを示した。

本研究は、河道内樹木の効率的かつ効果的な管理方法の確立を目的としたものである。ここでは、低水路の影響を受ける領域IIあるいは低水路の影響を受けず直進性の強い領域IIIの複断面蛇行流れが低水路沿いの樹木群の抵抗特性に及ぼす影響について実験に基づき検討した。さらに、その結果を踏まえ、水位上昇を引き起こす樹木群の推定方法についても検討した。

2. 実験の概要

実験装置は、図-1に示す可変勾配型開水路(長さ $L=20.5\text{m}$, 幅 $B=0.6\text{m}$)である。可変勾配型開水路内には、低水路幅 0.25m , 高水敷幅 0.35m , 高水敷高さ 0.05m の発泡スチロール製の蛇行低水路が設置されている。高水敷には粒径 $d=0.75\text{mm}$ の珪砂を敷設し、低水路より粗度係数を大きくした。高水敷と低水路の粗度係数は、それぞれ 0.016 と 0.009 である。水路床勾配 I は $1/500$ とした。下流端には、限界水深が生じるように急勾配のスロープを設けている。

低水路線形はSine-generated curveに従って蛇行しており、蛇行部は4波長設けた。その形状は、わが国の河川の平面形状特性の統計資料⁸⁾を踏まえ、蛇行度(低水路蛇行長/低水路蛇行波長)が 1.02 , 低水路幅と水面幅の比が

表-1 実験条件

	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	勾配 I	蛇行度 S	相対水深 D_r	フルード数 Fr	レイノルズ数 Re
Case1	0.0070	1/500	1.02	0.17	0.52	23697
Case2	0.0086			0.35	0.37	24685
Case3	0.0095			0.39	0.36	26232
Case4	0.0110			0.44	0.35	29147
Case5	0.0128			0.50	0.33	32443
Case6	0.0150			0.54	0.33	36898
Case7	0.0170			0.58	0.32	40715
Case8	0.0190			0.61	0.32	44673
Case9	0.0200			0.62	0.31	46569

0.42 , 低水路幅と蛇行帯幅の比が 0.5 , 低水路幅と蛇行波長の比が 0.92 とした。

樹木繁茂状況は、図-1に示すように低水路沿いの全区間で繁茂させた。樹木群は透過係数 $K_s=0.32(\text{m/s})$ のプラスチック製の糸が絡み合った多孔体でモデル化した。樹木の配置幅は 0.03m とした。また、樹木群の高さは非水没状態となるように設定した。

実験は、領域II, IIIでの流れが生じるように流量を9通り変化させ、全てのCaseで水面形を、領域IIの流れとなるCase 3と領域IIIの流れとなるCase 9では、流速ベクトルと樹木に作用する流体力を測定した。各Caseの水理条件は表-1に示す通りである。いずれのCaseについても通水を開始し、定常状態を確認した後、測定を開始した。測定項目は、水深、Case 3と9については流速と樹木に作用する流体力である。水深は容量式波高計で、流速は2次元電磁流速計で、流体力は3分力計でそれぞれ測定を行った。流速測定では、各測定点で河床から鉛直方向に水深の3.5割の位置で計測し、1点法により水深平均流速を算定した。水深が浅く2次元電磁流速計で測定ができない箇所については、PTV解析を用い表面流速を計測し、log則より水表面と水深平均流速を求め断面平均流速を算定した。流体力測定では樹木群を 0.15m 間隔で20分割

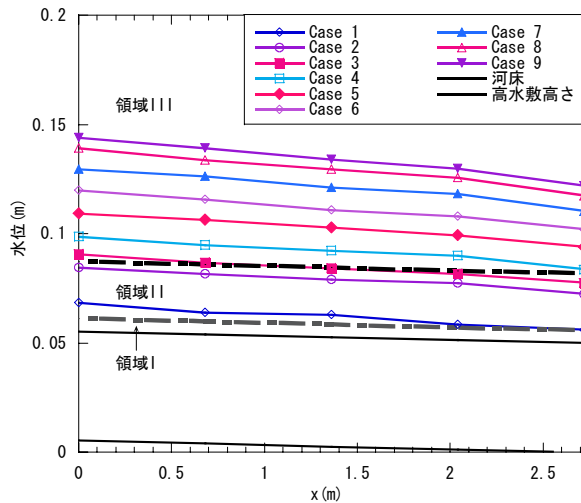


図-3 低水路中心軸上の水位

し、それぞれに3分力計を設置し計測した。上流から3波長目を測定区間とした。測定点は図-2に示す通りである。なお、図中の赤線は、後述する境界混合係数 f を求める際に流速測定を行った箇所である。水深、流速測定のサンプリング間隔、サンプリング時間はそれぞれ0.05秒、90秒である。また、流体力のサンプリング間隔、サンプリング時間はそれぞれ0.05秒、120秒である。

3. 結果と考察

(1) 水面形状と合成粗度係数

図-3は低水路中心軸上の水位の実験値を示したものである。これより、領域IIから領域IIIの流れへと変化することについて水面勾配が大きくなることがわかる。水面勾配は、領域IIの流れであるCase 1では0.004程度、領域IIIの流れとなるCase 9では0.008程度で、Case 1の2倍程度であった。

図-3の水面勾配から水路全体の合成粗度係数 N を求め、その合成粗度係数と相対水深との関係を示したものが図-4である。また図中には領域区分のラインもあわせて示している。これより、相対水深の増加に伴い、合成粗度係数も増加することがわかる。また、その勾配を比較すると、明らかに領域IIとIIIの境界で勾配が変化しており、領域IIIの増加率が大きいことがわかる。この合成粗度係数から、低水路と高水敷の粗度係数をそれぞれ0.009、0.016として与え、断面分割法から樹木群の合成粗度係数 N' を逆算したものが図-5である。この図から、樹木群の合成粗度係数 N' は、水路全体の合成粗度係数 N と同じような傾向であることがわかる。また、その値は、透過係数 K_s と水深との関係から得られる値 $N'=(n_b^2+h^{4/3}/K_s^2)^{0.5}$ と同程度の値となる。ここに n_b =樹木群が存在する範囲での底面の粗度係数である。このことから、合成粗度係数 N の増加は、樹木群による抵抗の増加が要因であることがわかる。

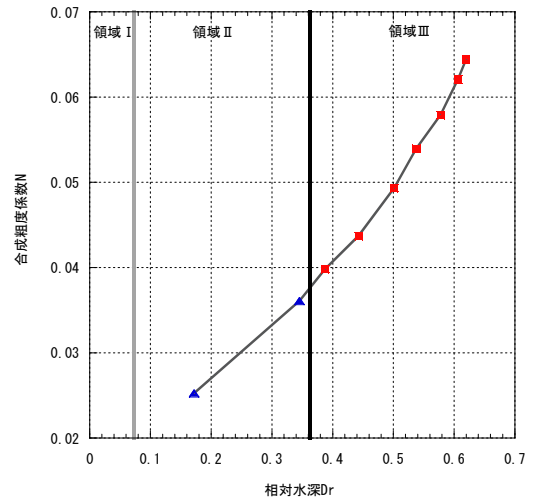


図-4 水路全体の合成粗度係数と相対水深との関係

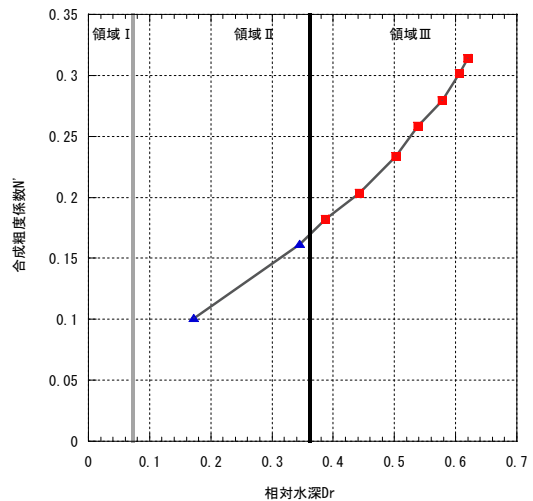


図-5 樹木群の合成粗度係数と相対水深との関係

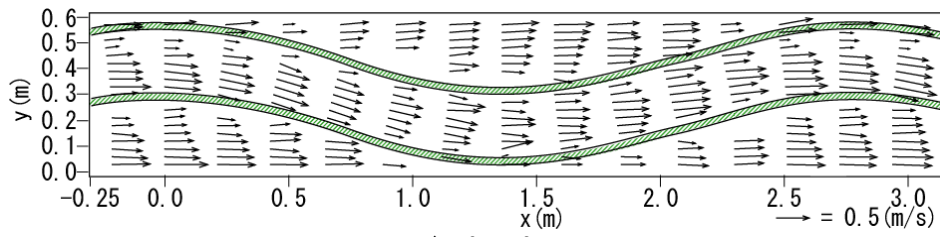
このように、樹木の抵抗特性は、領域IIの複断面的蛇行流れ(領域II)から直進性の増す複断面的蛇行流れ(領域III)で変化し、領域IIに比べ領域IIIの流れの方が大きな抵抗として働くことが確認できる。

(2) 流速ベクトルと流体力

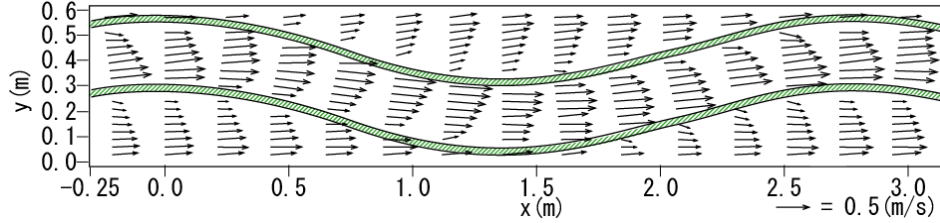
以下では、Case 3と9の流速ベクトルと流体力の測定結果から、領域による樹木の抵抗特性の違いが生じる理由を考察する。

図-6は、それぞれCase 3と9の流速ベクトルを示したものである。Case 3では低水路中心軸と流速ベクトルの向きが概ね一致しており、樹木群に沿った流れが生じていること、低水路と高水敷には流速差があること、特に、上流左岸側でその傾向が強いこと、一方、Case 9では、低水路の線形とは異なる向きに流速ベクトルが向いており、直線性が強い流れが生じていることなどがわかる。

図-7は樹木群に作用する流体力ベクトルを示したものである。Case 3では、流速ベクトルと同様に低水路線形沿いに流体力が作用していること、領域IIの流れで内岸側に主流速が生じるのでそこでの流体力は大きく作用していること、などがわかる。一方、Case 9では、領域III

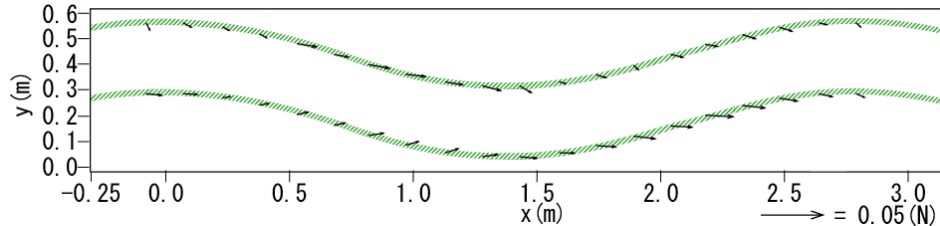


a) Case 3

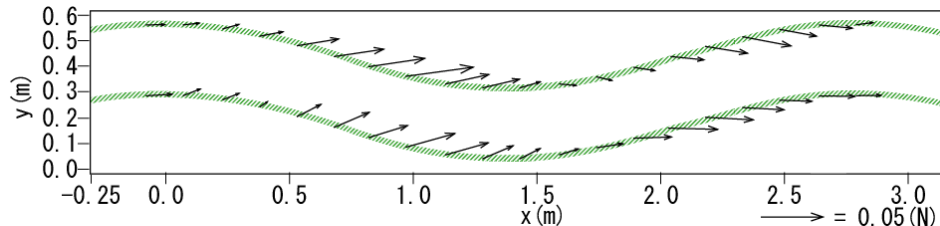


b) Case 9

図-6 流速ベクトル



a) Case 3



b) Case 9

図-7 流体力ベクトル

の流れが生じるので、樹木繁茂状況が直線に近い場合にはさほど大きな流体力は作用していないが、直進性を妨げるように繁茂している場合には大きな流体力が作用していることがわかる。

以上の結果から、樹木群に主に作用する流体力は、Case 3では樹木群境界に作用するせん断応力が、Case 9では樹木による圧力差によって生じる抗力であると考えられる。

一般に、河道計画は準2次元解析の結果に基づき行われる。準2次元解析では、樹木群を抵抗として取り扱い、式(1)に示すせん断力と死水域により評価される。

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

ここに、 τ =せん断応力、 ρ =水の密度、 Δu =低水路および高水敷の流速差である。また、 f =境界混合係数で、本実験のように樹木群が2つの主流部に挟まれている場合、式(2)から求めることができる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} \frac{K_s \sqrt{h}}{u \sqrt{b}} > 0.4 \text{ の場合} & \quad f = 0.029 \frac{K_s \sqrt{h}}{u \sqrt{b}} + 0.017 \\ \frac{K_s \sqrt{h}}{u \sqrt{b}} \leq 0.4 \text{ の場合} & \quad f = 0.072 \frac{K_s \sqrt{h}}{u \sqrt{b}} \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 b =樹木幅である。もし、先ほどの推論が正しければ、Case 3では測定した流体力と流速を式(1)に代入することで求められる境界混合係数 f と式(2)から算定される f 値は一致し、一方、Case 9では式(2)から算定される境界混合係数 f 値はせん断応力に加え圧力による抗力が作用するので式(2)より大きくなるはずである。図-8は f と $(K_s h^{0.5})/(u \cdot b^{0.5})$ との関係を示したものである。実験値については図-2の赤線位置での水深および流速を用いて、平均流速法¹⁰⁾に基づき算定した。平均流速法¹⁰⁾は、樹木群内とそれ以外の流れの力の釣り合いと連続の式および式(1)から、境界混合係数 f を逆算する方法である。なお、樹木群内の流速については0とした。図中には式(2)を併せて示している。これより、Case 3の f 値は式(2)と概ね一致しており、一方、Case 9の f 値は式(2)よりも大きくなる。

このように、領域IIの流れが生じる場合には樹木群境界に作用するせん断応力が、領域IIIの流れが生じる場合には樹木群による抗力が流れの抵抗として主に働くことになる。従って、低水路が蛇行する複断面流れの低水路沿いに繁茂する樹木群は、蛇行度と相対水深との関係から生じる領域IIとIIIの流れによって抵抗特性が変化し、領域IIIの流れが生じる場合に大きな抗力が作用すること

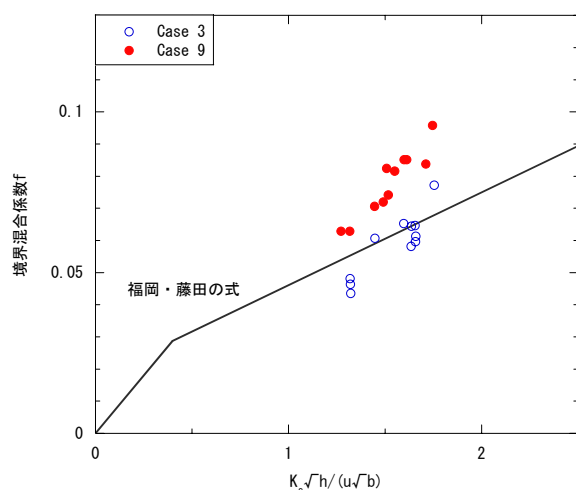
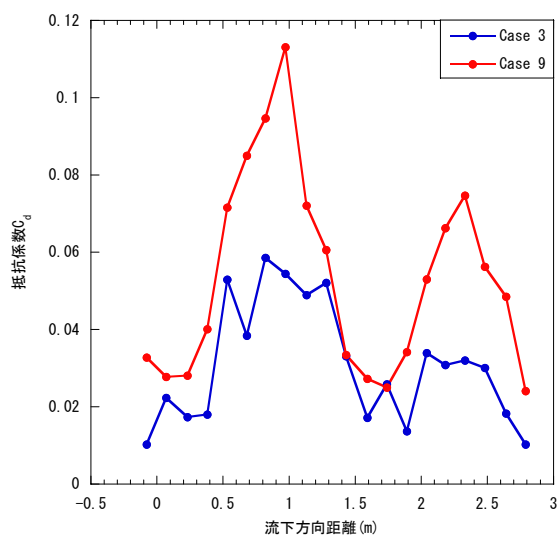


図-8 境界混合係数

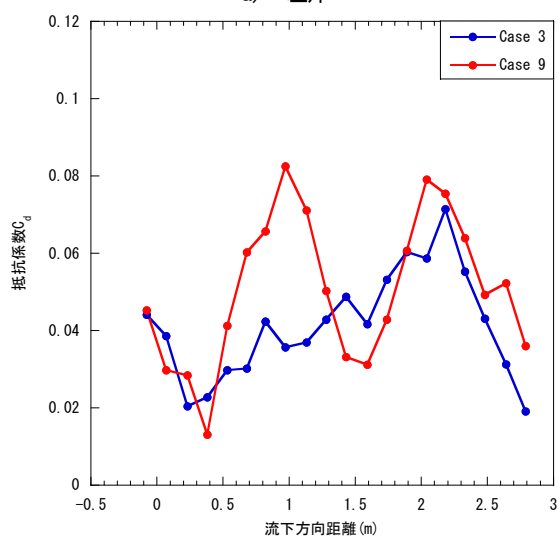
が確認された。

この抵抗特性の違いが生じる要因を検討した。図-9は、流体力測定、水深、流速から求めた抵抗係数 C_d の縦断分布である。なお、抵抗係数 C_d は $C_d = 2F / (\rho b U^2 h)$ とした。ここに、 F =樹木に作用する流体力、 ρ =水の密度、 U =接近流速である。抵抗係数 C_d を求めるためには接近流速の位置を求める必要があるが、樹木が低水路沿いに沿っているため設定は困難であったので、ここでは各測定断面での水路中央の水深と断面平均流速を用いて抵抗係数を求めた。左岸の結果に着目すると、抵抗係数の増減の傾向は一致しているが、その値は全体的にCase 9が大きくなる。差の大きな位置は、流下方向距離が0.5~1.2m、2.0~2.7mの位置で、いずれも水路を遮る樹木群である。また、右岸側についても、差の大きな位置は流下方向距離が0.5~1.2mの位置で先ほどと同様に水路を遮る樹木群である。一方、右岸側の2.0~2.7mの位置ではさほど大きな違いはない。差の大きな左岸0.5~1.2m、2.0~2.7mと右岸0.5~1.2mの位置での流速ベクトル図(図-6)に着目すると、流速ベクトルの傾向に大きな違いが認められる。一方、さほど大きな違いのない右岸側の2.0~2.7mの位置では、流速ベクトルの傾向には大きな違いは認められない。従って、抵抗係数に差が生じなかったと考えられる。

以上を踏まえると、低水路線形や堤防特性などの河道特性に応じて生じる流れに対して、その流れを遮る位置に樹木が繁茂する場合に、樹木群は大きな抵抗として作用すると考えられる。つまり、堤防線形が直線で低水路が蛇行している場合、必ず堤防線形を遮るように樹木は繁茂するので、領域Ⅲの流れが生じた場合には樹木群は大きな抵抗として作用することとなる。そのため、そこでの水位上昇は大きくなると考えられる。著者ら⁹⁾の大分県の大野川・乙津川を対象に行った調査・数値解析結果から検討した水位上昇を引き起こす樹木の推定結果とも一致している。また、福岡らが行った低水路が蛇行し樹木が繁茂する区間で土砂の堆積量が多くなったという調査結果⁴⁾とも一致する。



a) 左岸



b) 右岸

図-9 抵抗係数の縦断分布

このような結果は、堤防線形が直線の場合である。しかし、堤防線形が蛇行している場合でも、複断面的蛇行流れの特徴は大きく変化しない¹¹⁾ことを踏まえると、堤防線形が直線の場合だけでなく、蛇行する場合にも当てはまるかもしれない。これについては今後更なる検討が必要であると考えられる。

(3) 水位上昇を引き起こす可能性の高い樹木群の推定

以上のように、領域Ⅲの流れが生じる場合に、樹木は流れに対して大きな抵抗となる。従って、水位上昇を引き起こす可能性の高い樹木群は、①痕跡水位などの実績水位と河道形状特性を用いて求められる蛇行度と相対水深との関係から、その位置で生じる流れを確認し、②領域Ⅲの流れが生じる場合には堤防線形と樹木群の位置を確認し、③その位置が堤防線形に応じて生じる主流流方向を遮る位置かどうかを確認することで推定することができると考えられる。このように河道特性と樹木の繁茂位置から、水位上昇を引き起こす樹木群を推定し、そのような区間については重点的に樹木群の繁茂状況をモ

ニタリングすることで、より効率的な樹木管理が可能になると考えられる。

(4) 準2次元解析への適用

水位上昇を引き起こす樹木群がわかれば、その水位上昇量を検討する必要がある。そのような検討は、一般的に、準2次元解析で行われる。これまでの実験結果を踏まえると、準2次元解析では流況に応じて死水域の設定が必要であり、低水路線形の影響を受ける領域Ⅱの流れが生じる場合には樹木幅を、領域Ⅲの流れについては、堤防線形に応じて主流速が生じるので、その流れ方向から求められる死水域を設定すれば良いと考えられる。準2次元解析の f 値は、推奨値³⁾や式(2)などで設定されるが、必ず痕跡水位を用いてその値の検証を行う必要がある³⁾。また、その値も $f=0.01\sim0.37$ の範囲を取る場合もある³⁾。このような値のばらつきは、これまで述べてきたように、蛇行度と相対水深との関係によって、樹木群の抵抗特性が変化するためではないかと考えられる。このような抵抗特性を準2次元解析に組み込むことができれば、より合理的に樹木の取り扱いが可能になると考えられる。この点については、今後の検討課題である。

4. おわりに

本研究では、河道内樹木の効率的かつ効果的な管理方法の確立を目的に、低水路の影響を受ける領域Ⅱあるいは低水路の影響を受けず直進性の強い領域Ⅲの複断面蛇行流れが低水路沿いの樹木群の抵抗特性に及ぼす影響について実験に基づき検討した。その結果、(1) 領域Ⅱの流れが生じる場合には樹木群境界に作用するせん断応力が、領域Ⅲの流れが生じる場合には樹木群による抗力が流れの抵抗として主に働くこと、(2) 低水路が蛇行する複断面流れの低水路沿いに繁茂する樹木群は、蛇行度と相対水深との関係から生じる領域ⅡとⅢの流れによって抵抗特性が変化し、領域Ⅲの流れが生じる場合に大きな抗力が作用すること、(3) 低水路線形や堤防特性などの河道特性に応じて生じる流れに対して、その流れを遮る位置に樹木が繁茂する場合に、樹木群は大きな抵抗として作用すること、(4) これらを踏まえると、水位上昇を引き起こす可能性の高い樹木群は、領域Ⅲの流れが生じ、かつ堤防線形に応じて生じる主流速方向を遮るように繁茂している樹木であること、つまり、痕跡水位などの実績水位と河道特性からその区間で生じる流れを推定し、その流れと樹木の繁茂位置から水位上昇を引き起こす可能性の高い樹木を推定できること、など樹木管理を行う上で有用な情報を得ることができた。

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、当時本学工学部生 古賀恭輔君、山下徹也君には実験を行うにあたり、本学学部生 小手川雄治君にはデータ整理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) 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.
- 4) 福岡捷二, 岡部博一, 飯島直己: 蛇行低水路の土砂堆積に及ぼす樹木群の影響, 河川技術論文集, 第14巻, pp.19-24, 2008.
- 5) 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へ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) 重枝末玲, 朝位孝二, 坂本 洋, 西尾 崇, 秋山壽一郎, 重岡広美, 樋口直樹, 徳永智宏: 大野川と乙津川の河道内樹木群が有する治水機能の検討, 水工学論文集, 第51巻, pp.595-600, 2007.
- 7) 重枝末玲, 朝位孝二, 坂本 洋, 徳永智宏, 西尾 崇, 秋山壽一郎, 中江邦昭: 拡張準2次元解析を用いた大野川・乙津川の河道内樹木の管理に関する研究, 水工学論文集, 第52巻, pp.655-660, 2008.
- 8) 岡田将治, 福岡捷二, 貞宗早織: 複断面蛇行河道の平面形状特性と蛇行度, 相対水深を用いた洪水流の領域区分, 水工学論文集, 第46巻, pp.761-766, 2002.
- 9) 重枝末玲, 朝位孝二, 坂本 洋, 西尾 崇, 秋山壽一郎, 石原 仁, 樋口直樹, 徳永智宏: 低水路沿いの樹木が複断面蛇行水路の洪水流の挙動に及ぼす影響, 水工学論文集, 第51巻, pp.643-648, 2007.
- 10) 福岡捷二, 藤田光一: 洪水流における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.
- 11) 福岡捷二: 洪水の水利と河道計画の設計法, 森北出版, 2005.