

利根川河道の樹木群透過係数と 高水敷粗度係数

VEGETATION PERMEABILITY COEFFICIENT AND MANNING ROUGHNESS COEFFICIENT OF THE TONE RIVER

福岡捷二¹・藤澤寛²・大沼史佳³

Shoji FUKUOKA, Hiroshi FUJISAWA and Fumiyoshi OHNUMA

¹フェロー 工博 Ph.D 中央大学研究開発機構教授 (〒122-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

²正会員 工修 国土交通省関東地方整備局 利根川上流河川事務所 所長 (〒349-1198 埼玉県北葛飾郡栗橋町2-19-1)

³学生会員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒122-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

Vegetation management in the river is very important for not only flood control but also the river lives. Fukuoka et al.¹ have estimated vegetation permeability and roughness coefficients of floods at the branch section of the Tone River and Edo River by the two-dimensional unsteady flow analysis using observed water levels with the time and space.

Based on their results, we examined the effect of vegetation permeability coefficients on the velocity field in the Tone River. Furthermore, we clarified the relationship between the vegetation permeability coefficient and the roughness coefficient of flood channel. From these investigations the roughness coefficients were found to be nearly constant as far as effects of vegetations are considered properly by the value of vegetation permeability coefficient in the unsteady two dimensional analyses.

Key Words : flood flow, permeability coefficient of vegetation, roughness coefficient, river management, unsteady two-dimensional analysis

1. 序論

樹木群を有する河道では、洪水流の安全な流下とともに、樹木群の環境的な機能を保持した樹木管理をすることが求められている¹⁾。これまで、洪水流に対する河道内樹木群の抵抗力を樹木群の繁茂形態に基づき評価するため様々な検討が行われている²⁾。

非定常平面二次元解析は、河道の平面、横断面形や樹木群の存在を適切に考慮することができ、観測された水面形の時間変化データを用いることができるため、樹木群のある河道の水利現象を高精度で解析をすることができる^{1), 3), 4)}。

この解析において、樹木群のある河道の洪水流に対する抵抗力を、式(1)に示す運動方程式中の抵抗項 (τ_s, τ_n) として評価している⁵⁾。

$$(\tau_s, \tau_n) = \left(\frac{gh_a}{K^2} + \frac{gn^2}{h^{1/3}} \right) \sqrt{u^2 + v^2} (u, v) \quad (1)$$

ここで、 s は縦断方向、 n は横断方向を示し、 K : 樹木群透過係数、 n : 粗度係数、 h : 高水敷水深、 h_a : $\min(h, \text{樹木高})$ 、 g : 重力加速度、 u : 縦断方向流速、 v : 横断方向流速、である。つまり、樹木群抵抗力は樹木群透過係数、摩擦抵抗力は粗度係数を用いてそれぞれの抵抗力を評価されており、樹木群透過係数は河道内樹木群の繁茂形態によって、粗度係数は河道の状況や河床材料による抵抗でそれぞれ決まる。これまで、樹木群透過係数と粗度係数については、福岡・渡邊ら⁴⁾が利根川と江戸川に分派点を含む区間について算定した樹木群透過係数と粗度係数を用いて、樹木群の繁茂状況等物理的視点から福岡・佐藤ら⁶⁾が検討を行っているが、いくつかの課題が残されている。

本研究は、著者らの先の研究⁶⁾を発展させ、まず、水面形の時間変化を再現するように樹木群透過係数を与えた解析では、どのような流れ場が形成されているのかを考察し、樹木群の位置関係と樹木群透過係数の値の関係について検討を行う。次に、樹木群がある場所の樹木群抵抗力と摩擦抵抗力の大きさを解析より得られた各量よ

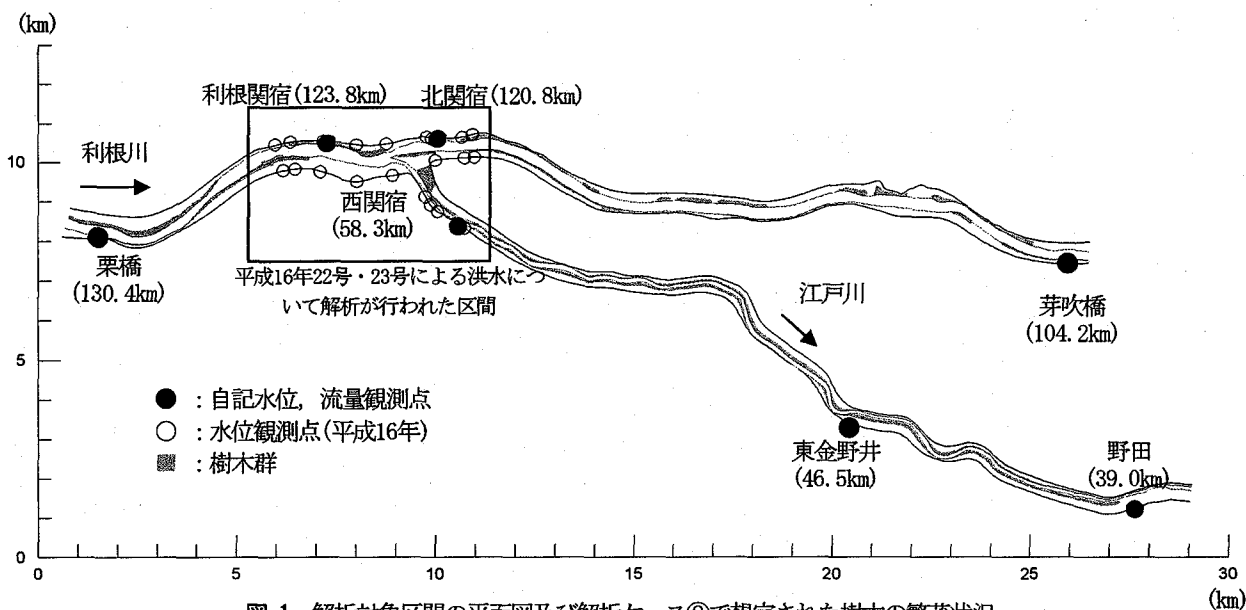


図-1 解析対象区間の平面図及び解析ケース②で想定された樹木の繁茂状況

表-1 解析対象洪水と観測ピーク流量

発生年月	台風	観測ピーク流量 (m^3/s)		解析ケース
		栗橋	野田	
S57年 9月	18号	11,606	2,872	①
H10年 9月	5号	10,431	2,449	②
H13年 9月	15号	7,980	2,020	
H14年 7月	6号	8,555	1,622	
H16年 10月	22号	4,563	1,333	③
H16年 10月	23号	4,025	1,210	

り算出できることから、両者の関係について検討する。また、その結果から樹木群透過係数と高水敷粗度係数について考察し、高水敷粗度係数の決め方を言及している。

2. 利根川と江戸川の分派点を含む区間における 洪水流解析に基づく樹木群透過係数および粗 度係数⁹⁾

検討対象区間は、図-1 で示す利根川と江戸川の分派点を含む区間であり、利根川は栗橋(130.4km)～分派点(121.5km)～芽吹橋(104.2km)、江戸川は分派点(59.75km)～野田(38.0km)である。この区間は、蛇行を有する複断面河道である。この区間の河道内には、高水敷にヤナギの高木林や低木林が多く存在している。

福岡・渡邊ら⁹⁾によって解析が行われた洪水は、表-1 に示す昭和57年から平成16年台風23号までの主要な6洪水である。樹木群透過係数と粗度係数は、洪水規模によって2パターンで決めればよい⁹⁾ため、ピーク流量の大きい昭和57年9月・平成10年9月・13年9月・14年7月の洪水と、ピーク流量の小さい平成16年台風22号・23号による洪水について異なる分布を与えている。ここで、前者のうち河道の地被状況と断面形状の異なる昭和57年洪水を解析ケース①、現在の河道状況考えられる平成10年・

13年・14年の洪水を解析ケース②としており、後者を解析ケース③として解析を行っている。また解析ケース③では、狭い区間(利根川：126.0km～分派点～119.0km、江戸川：分派点～57.0km)について解析が行われている。

福岡・永井ら³⁾は、観測された水面形の時間変化を用いて流量ハイドログラフを高精度で求めており、この区間を対象に行われた解析⁴⁾も、この方法を用いて行われている。この方法では、上下流端の境界条件として観測された水位ハイドログラフを与え、観測された水面形の時間変化を再現する樹木群の繁茂状況に基づいた樹木群透過係数と粗度係数を算定することができる。ここで、著者らは⁴⁾、樹木群透過係数を計算メッシュ毎に細かく与えているのではなく、樹木群の繁茂する区間の平均的な値として算定し、洪水時の水面形の時間変化を説明している。この区間で平均した樹木群透過係数と樹木群の繁茂形態に有意な関係があることは、既に確認している⁹⁾。各区間において算出された樹木群透過係数と高水敷粗度係数の関係を図-2 に示す。この図より、樹木群透過係数は、洪水規模や河道内樹木群の繁茂状況によって10～80 (m^3/s) の範囲で与えられるのに対して、高水敷粗度係数は0.030～0.045 ($\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s}$) 程度の範囲の値をとることが分かる。

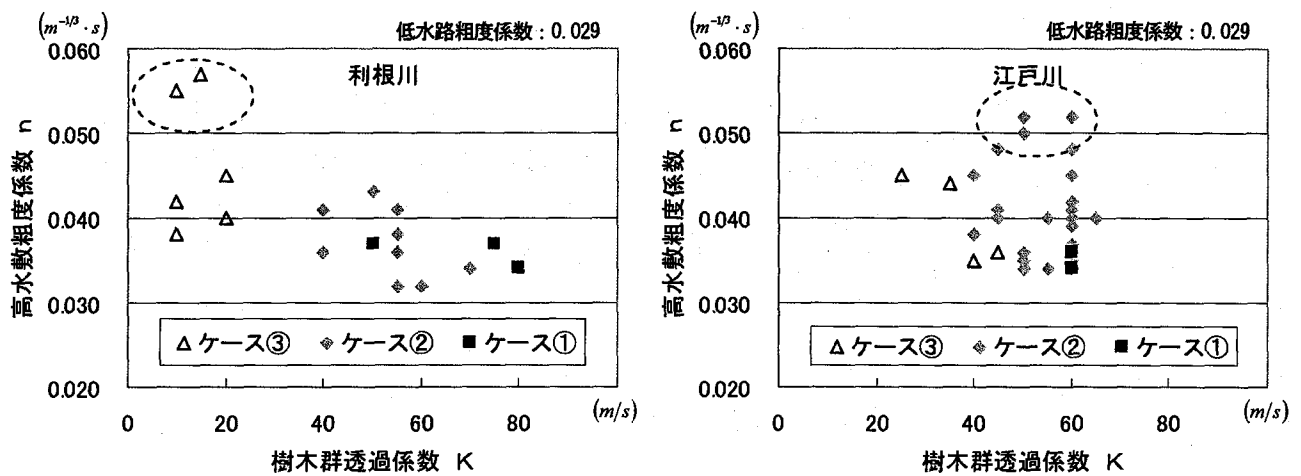


図-2 樹木群透過係数と高水敷粗度係数

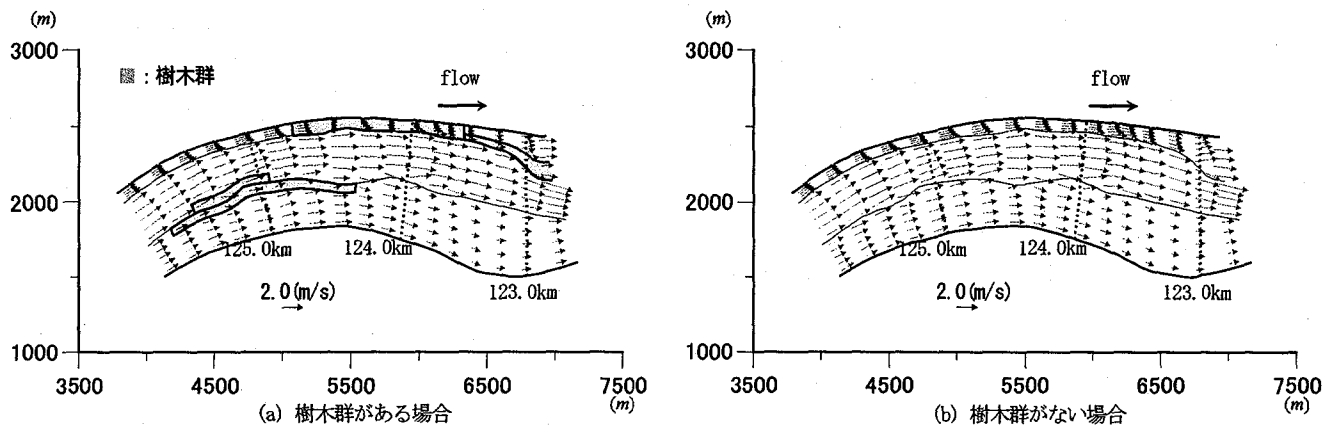


図-3 流速ベクトル (利根川123.0km～125.0km)

3. 樹木群の配置が流況に与える影響

樹木群透過係数の値は、樹木群透過係数が検討された区間の、高水敷面積に対する樹木群面積の比だけでなく、樹木群が繁茂している位置や当該区間の上流に繁茂する樹木群との連続性が関係している⁹⁾。ここでは、福岡・渡邊ら⁴⁾の解析結果より得られた流速分布について考察し、樹木群の有無による速度差から、樹木群の繁茂位置および、上流部樹木群との連続性について検討を行う。流速分布に与える樹木群の影響を、先に示した利根川と江戸川の分派点を含む区間について解析された洪水のうち、解析ケース②の平成10年洪水について検討した。

検討は、樹木群が存在する場合と樹木群が存在しない場合を計算した上で、樹木群がある場合の流速から樹木群がない場合の流速を引き、樹木の有無による速度差を算出して行った。このときの流速の変化率も併せて算出しており、樹木群によって流速が1割以上減少している区間を樹木群による影響域とし、上流部樹木群との連続性の判断材料とした。

図-3 に水面形の時間変化を再現するように樹木群透過係数が与えられたときの(a)樹木群がある場合と(b)樹木群がないと想定した場合の水位ピーク時の流速分布を示す。図より、低水路流れに比べ高水敷上の流れが遅く

表-2 検討した樹木群の繁茂形態

樹木群の検討結果		
場所	利根川左岸 123.5～122.4km	利根川左岸 117.3～116.8km
	40	55
樹木群透過係数(m/s)	0.036	0.038
高水敷粗度係数(m ^{-1/3} ・s)	0.16	0.08
樹木群面積/高水敷面積	半分	半分
高水敷幅に対する樹木群幅	有	—
上流部樹木群との連続性	有	—

なっていることが確認でき、樹木群透過係数を与えた区間(樹木群存在区間)では、特に流速が小さくなっていることが分かる。樹木群の有無による流速ベクトルの方向の変化はほぼない。これは、樹木群をその中に洪水流が流れない物体として扱っているのではなく、樹木群内の領域も洪水流は透過するという条件で計算しているためである。

図-4、5 に樹木の有無による速度差を示した。図-4 は利根川126.0～122.0km区間、図-5 は120.0～116.0km区間について樹木群の存在する場所を実線で囲い、樹木群の存在による流速変化をコンターで示している。この図から、樹木群によって流速が最大で1.0(m/s)程度小さくなっていることが分かる。この二区間の中で、特に123.5～122.4kmの左岸と117.3～116.8kmの左岸に繁茂す

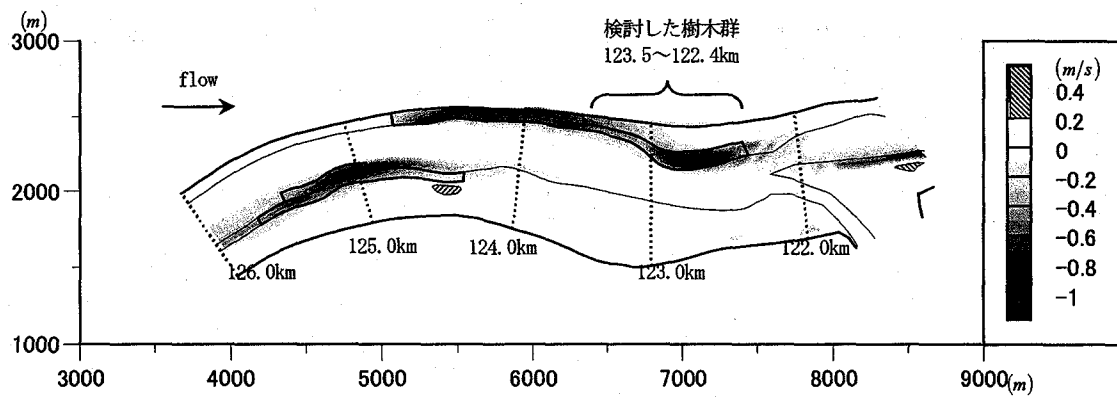


図-4 速度差コンター (利根川126.0~122.0km)

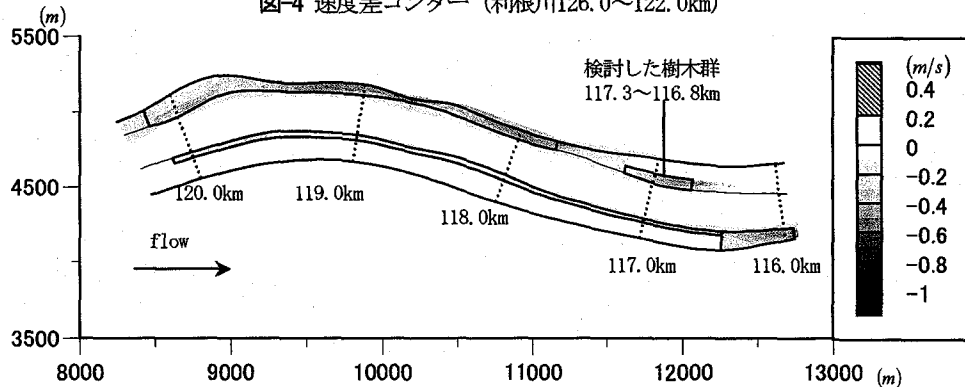


図-5 速度差コンター (利根川120.0~116.0km)

る樹木群を例に、上流部樹木群との連続性についての検討結果を示す。

表-2 は、123.5~122.4km左岸と117.3~116.8km左岸における樹木群透過係数と樹木繁茂状況の関係を示しており、この区間の樹木群は、それぞれ40(m/s)と55(m/s)の樹木群透過係数を有している。抵抗項において、樹木群透過係数は-2乗で与えられているため、二つの値には2倍程度の違いがある。123.5~122.4km左岸樹木群では、同じ樹木群透過係数を有する他の樹木群に比べ、高水敷面積に対する樹木群面積の比が小さく⁹⁾、この要因の一つとして、洪水流に対する樹木群の位置や上流部樹木群との連続性が考えられる。この123.5~122.4km左岸の区間(K=40)では、この区間の直上流部区間(124.8~123.5km)にある樹木群によって約650mの長さの影響域が形成されているため、上流部樹木群による影響を含めた連続性が樹木群透過係数の値に影響していると考えられる。一方、117.3~116.8km左岸の区間(K=55)では、この区間上流部の樹木群(120.3~117.8km)により形成された約450mの影響域があるが、対象区間には及んでいないため、上流部樹木群との連続性がないと判断される。このことより、対象区間の樹木群透過係数の値には、その直上流部樹木群との連続性が関係しており、連続性がある場合には、対象区間の樹木群透過係数が小さくなる(抵抗が大きくなる)と考えられる。

また、123.5~122.4km左岸の区間では、123.0~122.5kmの高水敷が、低水路に突出した形状をしており、この区間の樹木群が洪水流に対して盾のように繁茂して

いることによって、洪水流に対して大きな抵抗要素となっている。このような繁茂形態の樹木群について、流れの状況からその活用も含めてさらなる検討を要する。

4. 運動方程式の抵抗項における樹木群抵抗力と摩擦抵抗力の割合

非定常の平面二次元解析では、樹木群のある流れの運動を解くときに、抵抗力を式(1)で評価している。ここでは、樹木群のある河道の摩擦抵抗力に対する樹木群抵抗力の大きさについて検討を行う。平成10年洪水を対象に、式(1)の各量を与え、樹木群の抵抗力を摩擦抵抗力によって除いた値で評価している。ここで、樹木群抵抗力の項における h_d には、高水敷の樹木群が水没しないと仮定して高水敷水深を用いている。

図-6 は、縦軸に高水敷粗度係数、横軸に樹木群透過係数を取り、また、図中には解析に用いた両者の値もプロットし、樹木群抵抗力の摩擦抵抗力に対する割合を示している。実線が樹木群抵抗力と摩擦抵抗力が等しい場合、破線は樹木群の抵抗力が摩擦抵抗力の3倍の場合である。プロット値が実線より左下にあるほど、樹木の抵抗力が摩擦抵抗力に比べて大きいことを示している。

また、式(1)における高水敷水深は、樹木群透過係数を与えた区間の平均値を用いて計算しており、データ要素は、曲線で示した水深が5mと4mと仮定した場合の色に対応するように分類している。

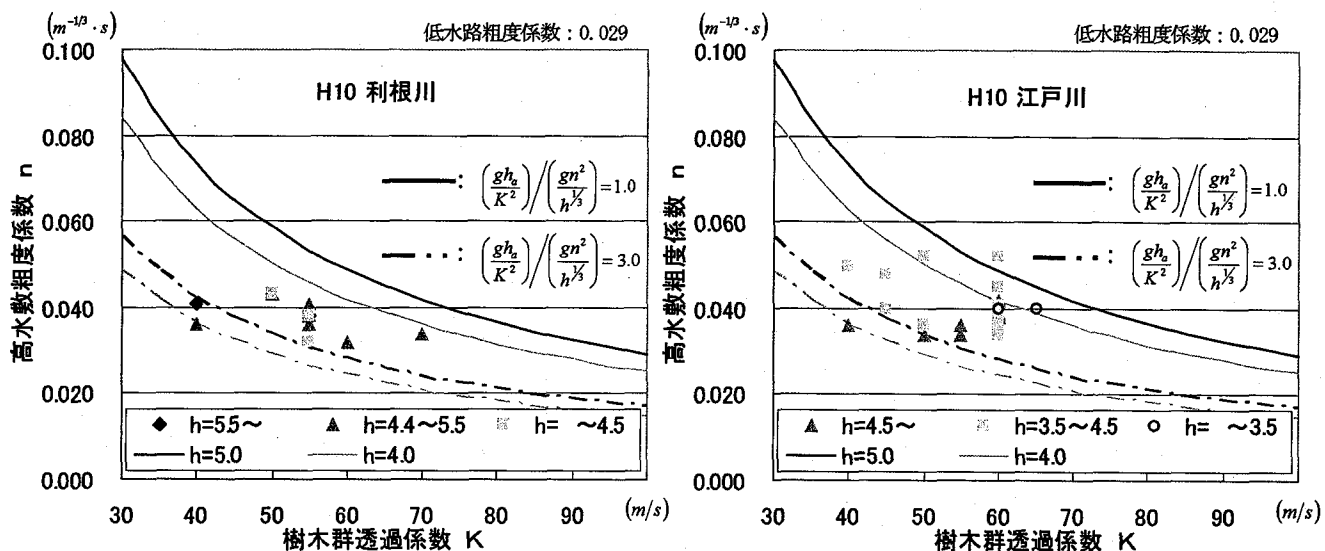


図-6 運動方程式の抵抗項における樹木群抵抗力と摩擦抵抗力の割合

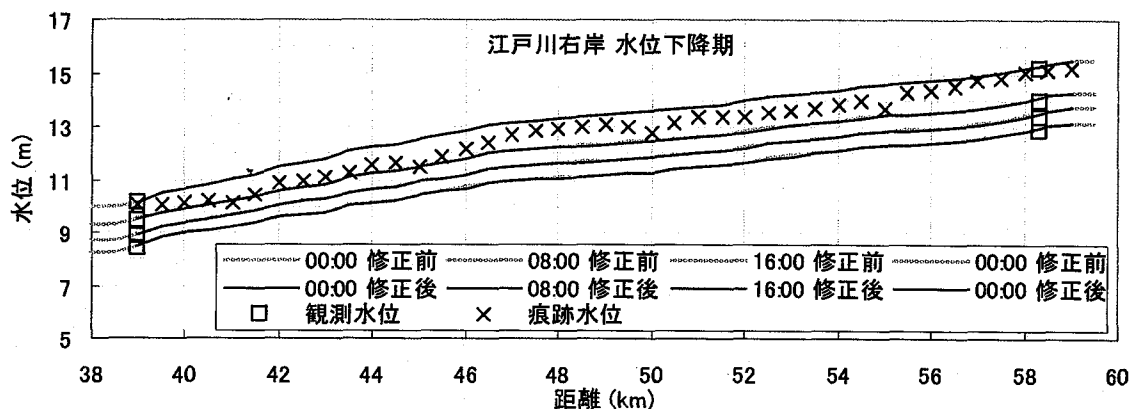


図-7 平成10年洪水について江戸川の粗度係数を修正した解析結果

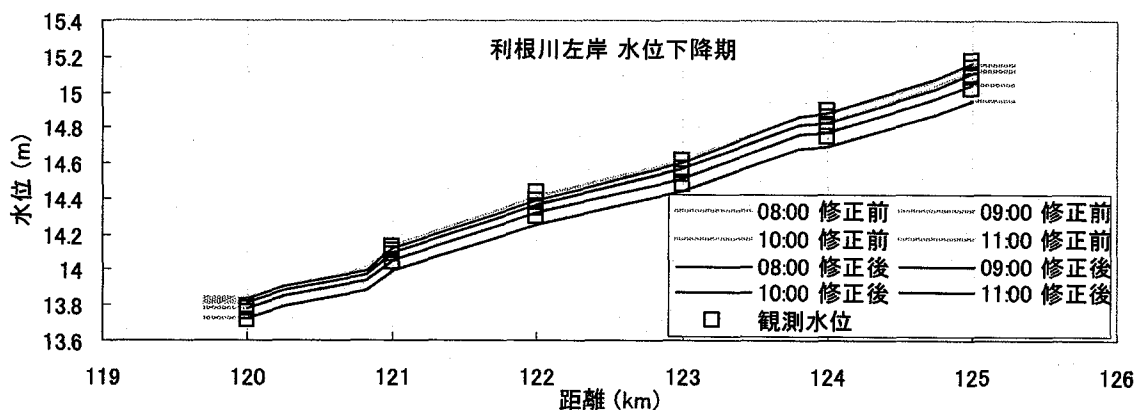


図-8 平成16年台風22号洪水について利根川の粗度係数を修正した解析結果

この図において、水面形の時間変化から決められた樹木群透過係数と高水敷粗度係数は、ほとんどが実線の左下の領域にプロットされている。これより、樹木群のある領域では、樹木群の抵抗力が摩擦抵抗力より大きく、利根川では1.5～3.5倍程度、江戸川では1.5～2.5倍程度であることが分かる。

このことより、河道に存在する樹木群が、洪水流に対し大きな抵抗として作用しており、また、樹木群の抵抗が摩擦抵抗より十分大きいことから、樹木群透過係数の値を正しく決めることが重要である。

5. 高水敷粗度係数の決め方の検討

樹木群のある河道の洪水流においては、樹木群の抵抗が摩擦の抵抗より十分大きいことが明らかとなった。このことは、水面形の時間変化を説明するためには、樹木群透過係数の値をほぼ正しく決めると、粗度係数については、それほど厳密に決めなくても問題にならないことを意味する。さらに言えば、粗度係数は、樹木群のない

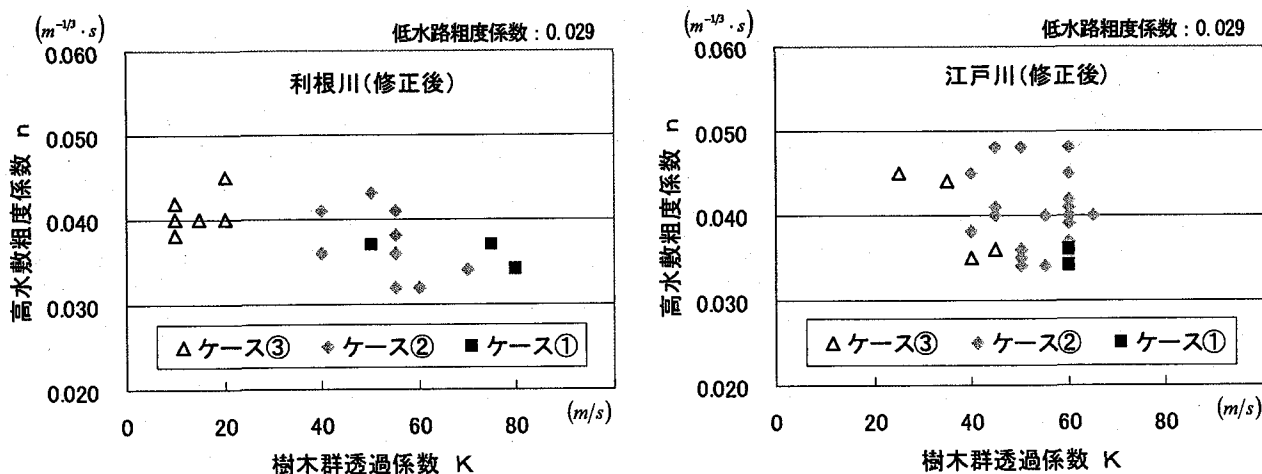


図-9 修正後の樹木群透過係数と高水敷粗度係数

状態の河道断面形や河床材料に関係する値として、ほぼ一定の値をとってもよいのではないかと考えられる。このことを考慮に入れて、高水敷粗度係数の初期設定値(図-2)において値が大きく異なっているものについて再検討を行う。図-2の中に点線の円で囲まれた解析ケース②の江戸川と解析ケース③の利根川の高水敷粗度係数の値は、他の値よりも大きいため、どちらの値も他の洪水時の値から想定して $0.040(\text{m}^{-1/3} \cdot \text{s})$ 程度になるように修正し、平成10年洪水と平成16年22号洪水について検討した結果を図-7, 8に示す。図中には、太い実線で修正前の水面形の計算結果、細い実線で修正後計算結果を示している。この図よりどちらの解析結果も高水敷粗度係数の修正前後で水面形に表れるほどの差はない。これより、利根川と江戸川の樹木群透過係数と高水敷粗度係数の値は図-9で与えられることができる。

重要なことは、非定常平面二次元解析で水面形の時間変化を再現するように決めた河道の抵抗要素の中で、樹木群の影響を樹木群透過係数で適切に考慮すると、高水敷粗度係数は、樹木の存在しない河道に固有の値とみなし、ほぼ一定値で与えられてよいと考えられることである。

6. 結論

本研究では、利根川と江戸川に分派点を含む区間において、観測された水面形の時間変化を再現するように算定された樹木群透過係数と高水敷粗度係数の意味について、流速分布や運動方程式の樹木群抵抗力と摩擦抵抗力の割合等により検討を行った。

まず、解析により得られた流速分布において、樹木群透過係数を与えた領域で流速が小さくなっていることを示し、樹木群の有無による速度差から、樹木群の位置や上流部樹木群との連続性によって樹木群透過係数の値が異なることを示した。また、樹木群透過係数が与えられている区間において、樹木群抵抗力は、摩擦による抵抗

力より、1.5~3.0倍の大きさであることを示した。さらに、洪水流に対する樹木群透過係数の影響の大きさを考慮に入れて高水敷粗度係数の決め方について検討を行った。その結果、非定常二次元計算において、樹木群の影響を樹木群透過係数によって取り除くと、高水敷の粗度係数は、樹木のない河道に固有のほぼ一定値をとるように決めてよいことが明らかとなった。

これより、樹木群のある河道では、樹木群透過係数を樹木群の位置関係を含めた樹木群の繁茂形態に基づき適切に評価できてさえすれば、粗度係数は河道形状や河床材料の摩擦によって決まる河道本来の値でよいと考えられる。

今後は、今回の検討に加えて、流況と樹木群透過係数の関係などについて仔細な検討を行うことや、利根川と江戸川の他区間や他の河川について検討することによって、今回の知見の一般性について議論していきたい。

参考文献

- 1) 福岡捷二: 洪水の水理と河道の設計法, 森北出版, 2005.
- 2) 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, 建設省土木研究所, 1990.
- 3) 福岡捷二, 永井慎也, 佐藤宏明: 河川合流部を含む本・支川の流量ハイドログラフ, 貯留量の評価—利根川・渡良瀬川の平成13年9月洪水を例として—, 水工学論文集, 第49巻(1), pp. 625-630, 2005.
- 4) 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.
- 5) 財団法人リバーフロント整備センター編集: 河川における樹木管理の手引き, 山海堂, 1999.
- 6) 福岡捷二, 佐藤宏明, 藤澤寛, 大沼史佳: 洪水流と河道の樹木繁茂形態に基づく樹木群透過係数と粗度係数の算定法, 水工学論文集, 第51巻, pp. 607-612, 2007.

(2007.4.5 受付)