

高水敷に繁茂するヨシの倒伏判定法と それを用いた非定常平面二次元解析

DEVELOPMENT OF A FOLD-DOWN MODEL OF REED AND 2D NUMERICAL
ANALYSIS OF FLOOD FLOW IN TIDAL RIVER LUSH WITH REED

内田龍彦¹・濱邊竜一²・福岡捷二³

Tatsuhiko UCHIDA, Ryuichi HAMABE and Shoji FUKUOKA

¹正会員 博(工) 中央大学研究開発機構准教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所調査課調査係長
(〒843-0023 佐賀県武雄市武雄町昭和745)

³フェロー Ph.D 工博 中央大学研究開発機構教授(〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

To clarify the characteristics of the flood flow in the Rokkaku River affected by large tidal fluctuation of the Ariake Sea, the unsteady numerical model using temporal data of observed water surface profiles is required. And it is necessary for the flood simulation to evaluate the flow resistance of reed lashing in flood plains of the Rokkaku River, which is determined by the behaviors of the reed during a flood. In this paper, the fold-down model of reed is developed based on the previous field experimental results (Fukuoka *et al.*, 2003). We conduct numerical analysis for the 2007 Rokkaku River flood by the unsteady numerical model with the fold-down model of reed using temporal data of observed water surface profiles. It is clarified through the comparison between observed and numerical results that the numerical model can explain unsteady flow characteristics and reed behaviors during the flood.

Key Words : *fold-down model, reed, tidal river, unsteady 2D numerical analysis, water surface profile, foot moment*

1. 序論

低平地を流れる緩流感潮河川である六角川においては、古来洪水被害が頻発し、近年においても昭和55年8月、平成2年7月に多くの点で越水、破堤が生じる等の大災害を受けており、治水安全性について未だ課題の多い河川である。合理的な治水対策を行っていくためには、低平地河川六角川の洪水流下特性を明らかにする必要がある。

六角川では、有明海の大きな潮位変化の影響を強く受けて長い感潮区間で河道貯留が生じ、流量ハイドログラフが大きく変形する。このため、河川管理においては断面を通過する最大流量と同様に、河道への流入量と下流端潮位変化によって発生する外水位とその時間変化が重要となる。洪水流が下流端水位の影響を強く受ける類似の問題は支川合流部¹⁾にも表れる。感潮域²⁾⁴⁾や合流部¹⁾の洪水流の非定常特性を明らかにするためには、洪水時の水面形時系列データを用いた非定常二次元解析⁵⁾が不可欠である。六角川においては、感潮区間が長いこと、高水敷にヨシが繁茂しているために、感潮区間における

精度の高い流量観測が困難であること、及び河道に排水機場、排水樋管の外水位時系列データが多くあることにより、特に水面形時系列を用いた解析法が有効と考えられる。

六角川では、高水敷にヨシが繁茂しており、ヨシの挙動とその抵抗特性が洪水時の水面形に影響を与えることが明らかとなっており、六角川の洪水流解析のためには、ヨシの抵抗を適切に評価する必要がある。ヨシのような柔軟な植生を有する流れに関する研究を概観する。

Kouwenら⁶⁾は柔軟な人工植生を底面に有する開水路流れの流速分布特性を検討し、植生上の流れは対数分布で表せることを示している。室田・福原⁷⁾は、河川高水敷のヨシを有する流れを想定し、植生の撓み・揺動を伴う流れ場や乱流構造について、実験的、理論的に検討している。辻本・北村⁸⁾は柔軟な植生を有する流れについて、植生の変形や揺動が流れに与える影響し、植生の変形効果や抵抗則を検討している。服部⁹⁾は、混合距離モデルを用いて植生内外の流れを表し、植生の変形、倒伏を考慮に入れた植生抵抗の評価法を検討している。

一方、福岡ら¹⁰⁾¹¹⁾は、オギ¹⁰⁾、ヨシ¹¹⁾が繁茂する高水

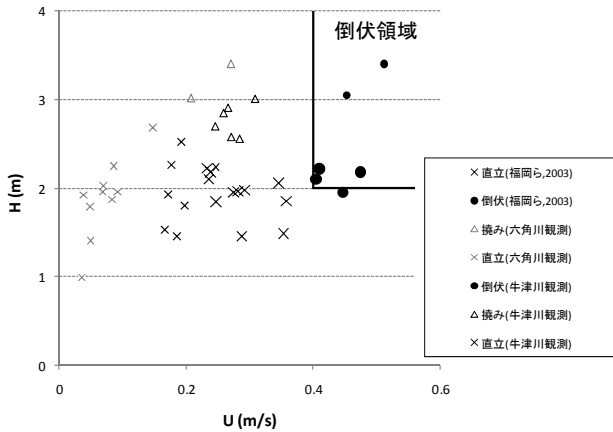


図-1 六角川現地倒伏実験結果とH19.7洪水における六角川、牛津川のヨシ倒伏状況観測結果

敷において実物植生を対象とした現地実験を行い、洪水流の外力によってこれらの植生は倒伏すること、倒伏した場合には抵抗が大きく低下することを明らかにした。また、倒伏した際のマンングの粗度係数 n は概ね $n=0.05\sim 0.06$ で与えられることが示されている^{10,11}。高水敷に繁茂するヨシは流速の大きい低水路際から倒伏していくことが知られている¹¹。このため、高水敷にヨシを有する河道抵抗の評価には、横断方向にどこまで倒伏が進行するかが重要である。しかし、ヨシの倒伏を考慮に入れた実河川で流れの解析には、これまで次元解析が用いられることが多い。また、現地実物実験によって提案された福岡らのヨシの倒伏判定式¹¹の実洪水の広い水理条件に対する検討は十分でない。

本研究では、福岡らの水理実験結果¹¹に基づいて、ヨシの力学的な倒伏限界式を導出し、これを組み込んだ非定常平面二次元解析モデルを構築する。そして、解析結果と観測データを比較し、解析モデルの妥当性を検証することを目的としている。

2. ヨシの倒伏判定法と抵抗評価法

(1) 既往のヨシの倒伏限界条件の洪水流への適用性

図-1は六角川高水敷で行われた実物ヨシを用いた倒伏実験結果¹¹と、H19.7洪水における六角川、牛津川のヨシの倒伏状況観測結果¹²である。ヨシの倒伏状況観測では、洪水時においてヨシの撓み、倒伏状況、植生層内流速測定、洪水前後のヨシ状況の写真撮影、ヨシの繁茂調査が行われた。図-1の倒伏領域は、福岡ら¹¹が実験により得た式(1)の倒伏条件の範囲である。

$$\text{ヨシ倒伏条件: } U > U_{yc} \wedge h > h_{yc} \quad (1)$$

ここに、 U : ヨシ原内の平均流速、 h : 水深、 U_{yc} : 倒伏限界流速 (0.40 m/s)¹¹、 h_{yc} : 倒伏限界水深 (2.0 m)¹¹である。図-1より、式(1)の倒伏限界条件は、H19.7洪水における六角川、牛津川のヨシ倒伏状況観測結果をよく

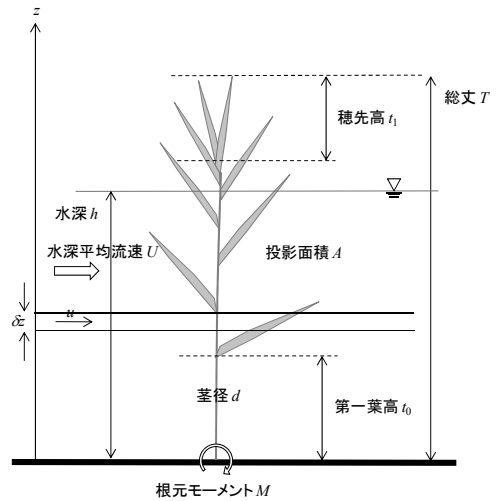


図-2 ヨシ倒伏限界の考え方

説明できていると言える。このことから、実際の六角川高水敷に繁茂しているヨシを用いた現地実験によって提案された福岡らのヨシの倒伏条件¹¹は現地実験の水理条件の範囲内で信頼できると考えられる。そこで、本研究では、この条件式(1)を洪水流解析に応用するために、洪水時の高水敷の広い水理条件に対応できるように、根元モーメントに基づいて拡張する。

(2) 根元モーメントに基づくヨシの倒伏限界条件の導出

流れによる柔軟な植生の変形は、ヨシ茎を弾性体の片持ち梁と同様に取り扱い、流体力によるモーメントを用いて評価されてきた⁷⁻⁹。ヨシの倒伏は断面に作用するモーメントが降伏モーメントを超え、断面が降伏した状態と考えることができる。このため、本研究では、最大のモーメントが作用するヨシの根元において、作用するモーメントがある一定値を超えると茎が降伏し、ヨシの状態は直立から倒伏すると考え、以下のように定式化する。

図-2にヨシの倒伏限界の考え方を示す。微小高さ ϵ のヨシに作用する流体力 δf は式(2)で表わされる。

$$\delta f = \frac{\rho u^2}{2} C_D b \delta \epsilon \quad (2)$$

ここに、 ρ : 水の密度、 u : 流速、 C_D : ヨシの抗力係数、 b : 単位高さ辺りの葉の投影面積、 $b\delta\epsilon$: 微小高さ ϵ のヨシの投影面積である。図-2に示すようにヨシの葉の分布は、第一葉高 t_0 より下になく、葉間高さは高くなるほど減少することから、ヨシの葉の投影面積 b の鉛直分布を式(3)で近似する。

$$\frac{b}{A/T} = \begin{cases} 0 & (z/T < t_0/T) \\ b_0(z/T - t_0/T)^m & (z/T > t_0/T) \end{cases} \quad (3)$$

ここに、 A : ヨシの葉の全投影面積、 T : ヨシの高さ、 t_0 : 河床から第一葉高までの高さである。 b_0 は、単位高さ辺りのヨシの葉の投影面積 b の積分値がヨシの葉の全

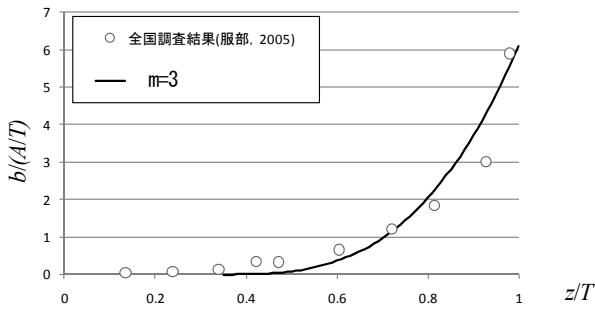


図-3 ヨシの葉の投影面積の鉛直分布

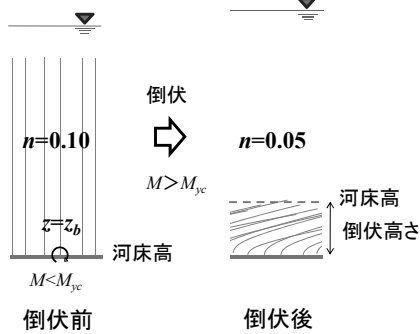


図-4 二次元流解析におけるヨシの抵抗評価法

投影面積 A となるように、 $b_0=(m+1)/(1-t_0/T)^{m+1}$ とする。図-3にヨシの葉の鉛直分布⁹⁾と式(3)の比較を示す。ヨシの諸量については、六角川、牛津川の観測結果¹²⁾の平均値を用いた。図-3より、 $m=3$ を用いて、式(3)により、ヨシの葉の鉛直分布が概ね表現できることが分かる。式(2)、式(3)より、根元に作用するモーメント式(4)が得られる。

$$M = \frac{b_0 \rho A C_D \beta \gamma U^2 (h - t_0)^{m+1}}{2(m+1)(m+2)T^{m+1}} \{(m+1)h + t_0\} \quad (4)$$

ここに、 h ：水深、 β ：運動量補正係数、 γ ：作用点補正係数、 U ：水深平均流速である。ここで、茎に作用する流体力は無視している。福岡らのヨシの倒伏条件¹¹⁾は、図-1に示したように、現地実験の水利条件の範囲内で信頼できることから、福岡らが倒伏判定に用いた $U=U_{yc}$ 、 $h=h_{yc}$ のとき、倒伏限界モーメント M_{yc} が作用すると考えることができる。式(4)で、諸係数が一定であるとすれば、根元モーメントに基づく倒伏判定式(5)が得られる。

$$\frac{M}{M_{yc}} = \left(\frac{U}{U_{yc}} \right)^2 \left(\frac{h - t_0}{h_{yc} - t_0} \right)^{m+1} \frac{(m+1)h + t_0}{(m+1)h_{yc} + t_0} > 1 \quad (5)$$

(3) 二次元流解析におけるヨシの抵抗評価法

流れの基礎方程式には、一般座標系に変換された浅水流方程式を用いる。ヨシの抵抗は、マンギングの粗度係数 n を用いた底面せん断力項で考慮する。図-4に二次元流解析におけるヨシの抵抗評価法を示す。初期条件では、全てのヨシは直立しているとする。直立時のヨシの粗度係数には $n=0.1$ を与える¹¹⁾。洪水流解析において、式(5)

から計算される倒伏限界モーメント M_{yc} に対するヨシの根元モーメント M の比 M/M_{yc} が1を超えると、ヨシは倒伏する。式(5)の m は図-3から $m=3$ を与える。倒伏時のヨシの抵抗は、図-4に示すように、ヨシの倒伏高さ ($\alpha=0.7$ m)¹¹⁾を河床高とし、倒伏時の粗度係数 $n=0.05$ ¹¹⁾に変更する。一度倒伏したヨシは、洪水期間中倒伏したままとしている。

3. H19.7六角川洪水への適用

(1) H19.7洪水の概要と解析方法

本研究ではH.19.7六角川洪水を対象とする。H.19.7六角川洪水では、潮見橋観測所(30.3k)において氾濫危険水位を超過するなどの大きな出水となり、武雄市橋町などで内水浸水被害が生じた。一方、牛津川流域では六角川に比べて降雨量が少なく、大きな洪水となっていない。ここでは、洪水規模の異なるH19.7の六角川、牛津川洪水に本解析法を適用し、解析法の妥当性を検討する。

六角川と牛津川を分離して、観測水面形を用いた横流入を含む非定常二次元解析を行う。解析領域を図-5に示す。六角川の解析区間は、感潮区間全体を含む潮見橋(30.3k)から住之江橋(3.8k)下流の2kまでとする。下流端の境界条件は、住之江橋の水位観測値である。上流端の水位境界条件は、大日堰(29.1k)の湛水区間で無い東川排水機場(28.2k)としている。武雄川(六角川支川、合流点：26.2k)及び周辺の排水機場からの排水による横流入量は、横流入点を武雄川合流点とし、川添川排水機場外水位(25.6k)の観測値と解析値が合うように横流入量を推定している¹³⁾。牛津川からの合流量は、牛津川の解析で計算された下流端流量ハイドログラフを合流点で与えている。牛津川の解析の下流端境界条件として与える水位時系列データには六角川の影響が含まれているため、水面形時系列データを用いれば六角川と分離して牛津川解析を行うことができる。同様の考え方は、既に水面形を用いた分派流量¹⁴⁾、破堤流量¹⁵⁾の推定に用いられており、その有効性が示されている。牛津川の解析区間は、六角川合流点(六角川4.8k付近)から妙見橋(14.4k)までとしている。下流端の境界条件は牛津川合流点付近の鳴江排水機場(六角川、5.09k)の水位時系列データを用いている。上流端は、妙見橋水位観測データを境界条件としている。また、牛津江排水機場等の牛津川中流ポンプ及び晴気川(牛津川支川、合流点：8.5k)からの横流入量は、牛津江排水機場(7.35k)を流入点とし、流入量を砥川大橋水位観測所(7.37k)の水位ハイドログラフから推定している。

(2) 六角川、牛津川の解析結果と観測結果の比較

図-6に六角川におけるH19.7洪水の増水期と減衰期の縦断水面形の比較を示す。25k付近で最大水位がHWLを

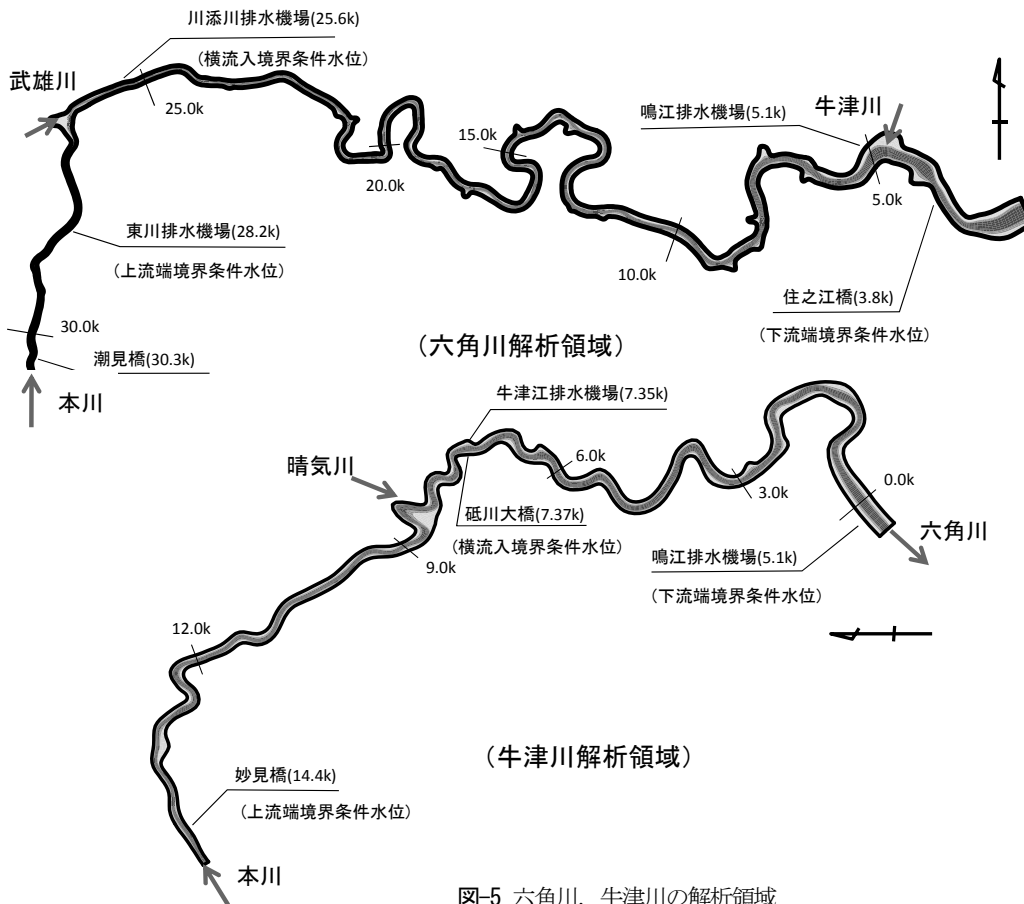


図-5 六角川, 牛津川の解析領域

超える大きな出水であることが分かる。下部の痕跡水位は、本出水中の最大水位よりかなり高くなっている。これは、この出水期間中の下流最大水位は大潮時の満潮水位に比べると低いことから、痕跡水位はそれ以前の大潮時の満潮位を計測したものと考えられる。

解析結果と観測結果を比較すると、解析結果は洪水前の水位がかなり低い時間帯において観測結果と合わない点があるが、洪水流量が多く、水位が高い時間帯において、洪水の増水期、減衰期の水面形とその時間変化を良く捉えていることが分かる。図-7(a)に潮見橋(30.3k)、新橋(24.1k)における観測流量と解析流量の比較を示す。解析時間は、2007/7/6 0:00:00をゼロとしている。解析結果は観測流量と概ね一致していることが分かる。また、図-7(b)は武雄川合流部付近の六角川の横流入量の解析値と観測値の比較である。観測値は、武雄川の流量観測値と高橋、板橋、川添川排水機場の排水実績値の合計を示している。本川の水位時系列データから解析により推定した横流入量は、合計横流入量と同程度である。

図-8, 9にそれぞれ牛津川におけるH19.7洪水の増水期と減衰期の縦断水面形、妙見橋(14.4k)の流量ハイドログラフの比較を示す。図-9において、解析流量波形は観測流量波形と極めてよく一致しているが、流量観測値はHQ換算値であるため波形が一致することにあまり大きな意味はなく、ここでは流量の絶対値が概ね一致していることが重要である。六角川洪水と比べると、HWL

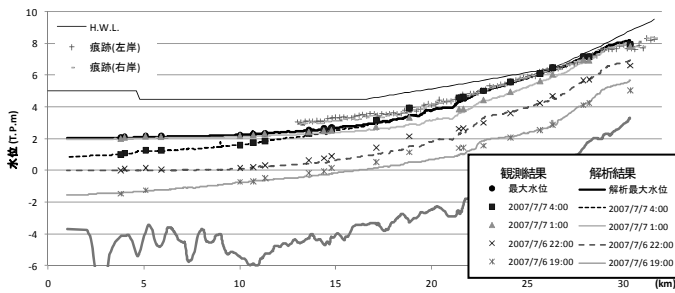
に比べて水位が低い小規模な出水であることが分かる。解析結果は、水面形、流量ハイドログラフともに観測結果を再現している。

以上より、本解析モデルは、H19.7洪水において、出水規模、河道条件の異なる六角川、牛津川において、河道の抵抗を適切に評価し、洪水流を概ね再現できると言える。

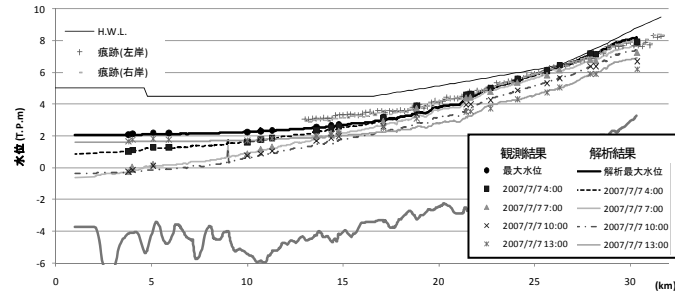
(3) ヨシの倒伏状況の比較

図-10にH19.7洪水による六角川、牛津川のヨシ倒伏の解析結果、表-1にヨシの倒伏状況の縦断状況の観測結果¹²⁾を示す。六角川では、本出水によって計画水位付近まで水位が上昇した25.8kより上流でほとんどのヨシが倒伏している。下流に行くほど、ヨシの倒伏が見られなくなり、20.4kより下流では、ヨシは直立している。牛津川では、牛津江付近(7.4k)付近より上流でヨシの倒伏が顕著に見られ、晴気川合流部より上流のヨシはほとんど倒伏している。解析結果は、観測結果と比べると、六角川ではやや倒伏傾向であるが、観測結果のヨシの倒伏状況の特徴を良く説明できている。

図-11は、図-1に六角川と牛津川の各点におけるヨシの倒伏状況とその点の解析による水理条件を重ねたものである。各点におけるヨシの倒伏状況は六角川20.5k~26.3k、牛津川4.9k~10.1kの区間を撮影した洪水前後の撮影画像を比較して調べ、適当な縦断間隔でヨシが倒伏、

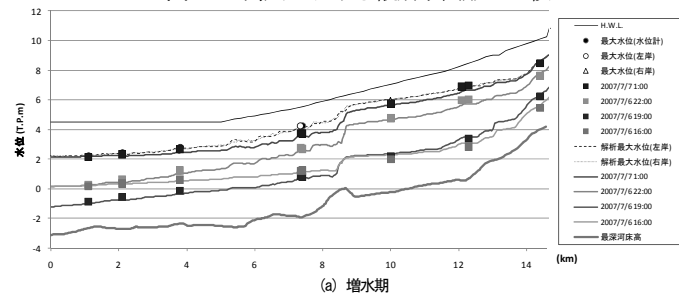


(a) 増水期

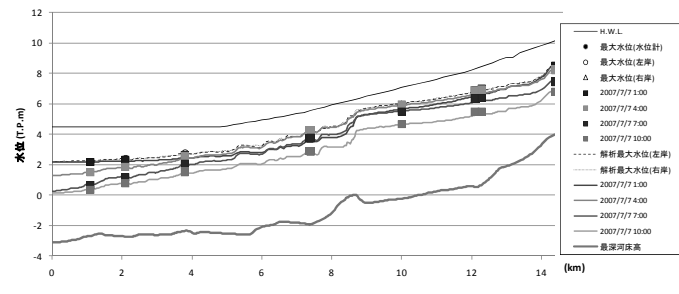


(b) 減衰期

図-6 六角川における縦断水面形の比較



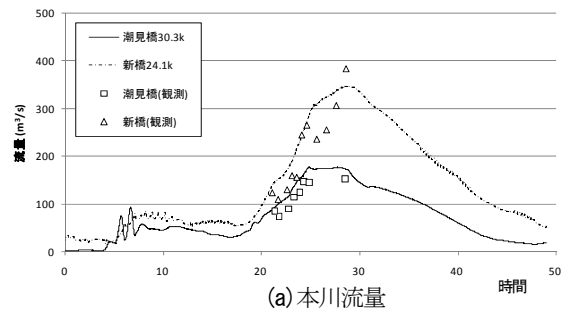
(a) 増水期



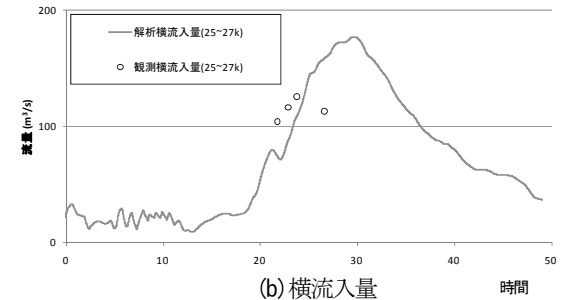
(b) 減衰期

図-8 牛津川における縦断水面形の比較

直立している横断位置を定め、それらの座標点を抽出する。抽出した点で最大のモーメントが作用する場合の水深、流速を求め、図-11にプロットしている。図-11には、式(5)による倒伏限界線($m=3$, 実線)を示しており、解析では、この線より上の領域で倒伏、下の領域で直立と判定されている。プロットで示すヨシの倒伏調査結果から、倒伏、直立が混在する領域（もしくは撓み領域）は主として水深が大きく、流速の小さい領域であり、流速が大きい場合は比較的明確に倒伏領域と直立領域に分けられている。福岡らのヨシの倒伏条件¹¹⁾は、図-1に示したように、現地実験の水理条件の範囲内では、概ね観測条件と一致しているが、流速が倒伏限界流速よりもかなり大きい条件では、倒伏限界水深以下でもヨシが倒伏することが分かる。即ち、福岡ら¹¹⁾の倒伏条件は、洪水時の広



(a) 本川流量



(b) 横流入量

図-7 六角川本川の流量と横流入流量の比較

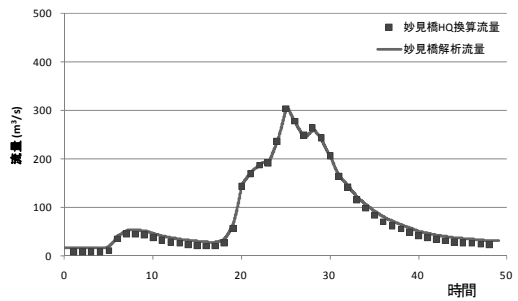


図-9 牛津川における流量ハイドログラフの比較

い水理条件を対象とした場合には倒伏範囲が限定され、これを用いて水位を計算すると高めに計算される。根元モーメントを用いて拡張した倒伏判定式(5)は、流速が大きな領域で浅い水深でもヨシが倒伏しやすくなる傾向を説明している。実測結果と解析結果を比較すると、解析による倒伏領域の範囲には直立したヨシはないが、解析結果は全体的に観測結果よりも倒伏しにくく判定されているように思える（観測結果の倒伏、直立の境界より倒伏限界式の線はやや右上に位置している）。より倒伏限界の算定制度を高めるために、倒伏限界水深 h_{yc} 、流速 U_{yc} 、及び係数 m を調整することが考えられる。しかし、用いた係数はヨシの倒伏実験、ヨシ繁茂調査から得られた値であること、解析水面形が観測結果を概ね捉えていることなどから、図-11で解析結果と観測結果を合わせるように係数を調整することは重要でない。このことから、本解析モデルは、H19.7牛津川洪水において、ヨシの倒伏限界を適切に評価できていると言える。

4. 結論

本研究では、ヨシが繁茂する低平地緩流感潮河川である六角川の洪水流解析法を構築し、平成19年7月六角川洪水に適用し、以下の結論を得た。

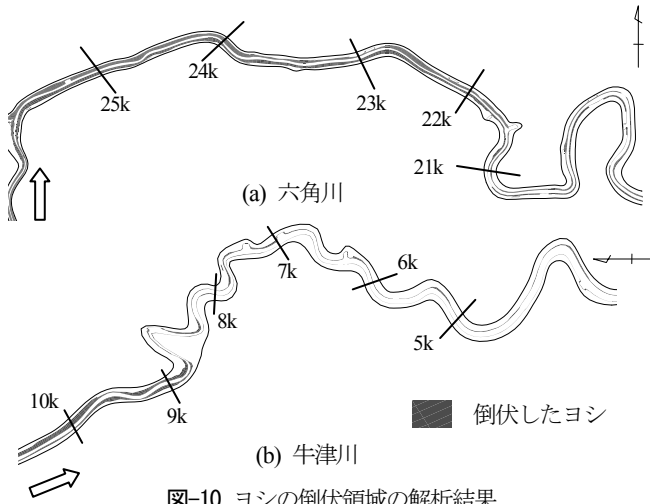


図-10 ヨシの倒伏領域の解析結果

- 1) 六角川現地実験による既往のヨシの倒伏判定式¹¹⁾は、現地実験の水理条件の範囲内で信頼できることを六角川、牛津川の現地観測結果から明らかにした。また、流速が大きい条件では、この判定式¹¹⁾は実際よりも倒伏しにくい。
- 2) ヨシの根元モーメントに基づいて、既往の倒伏判定式¹¹⁾を拡張し、広い水理条件に適用できる倒伏限界式を導いた。これを取り込んだ非定常二次元流解析モデルは H19.7六角川、牛津川洪水において、河道の抵抗を適切に評価し、水面形、流量等の洪水流の観測結果を再現できることを示すとともに、ヨシ倒伏の観測結果を説明できることを明らかにした。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Suzuki, K., Fukuoka, S. and Matsuo, K.: Bed material structure and sand transport by flood flows in the estuary of the Chikugo river, *Proceedings of the third international conference on estuaries and coasts*, ICEC2009, pp.101-108, 2009.
- 3) 岡村誠司, 福岡捷二, 竹本隆之: 利根川河口部の河床形状と洪水時の河床変動, 水工学論文集, 第54巻, pp.751-756, 2010.
- 4) 後藤岳久, 福岡捷二, 阿部徹: 太田川放水路と旧太田川への洪水流量配分及び感潮域の河床変動, 水工学論文集, 第54巻, pp.757-762, 2010.
- 5) 福岡捷二, 渡邊明英, 原俊彦, 秋山正人: 水面形の時間変化と非定常二次元解析を用いた洪水流量・ハイドログラフと貯留量の高精度推算, 土木学会論文集, 第761号/II-67, pp.45-56, 2004.
- 6) Kouwen, N., Unny, T. E. and Hill, H. M.: Flow retardance in vegetated channels, *Journal of the irrigation and drainage division, Proceedings of ASCE*, IR2, pp.329-342, 1969.
- 7) 室田明, 福原輝幸: 直立性の植物を有する開水路の流れ構造について, 水理講演会論文集, 第28巻, pp.225-331, 1984.
- 8) 辻本哲郎, 北村忠紀: 柔軟な植生粗度を伴う流れに関する研究, 土木学会論文集, No.607/II-45, pp.29-44, 1998.

表-1 ヨシ倒伏状況の観察結果¹²⁾

	区間	ヨシ倒伏状況
六角川	~20.5k	直立
	20.5~21.8k	一部倒伏(水際の一部)
	21.8~23.8k	一部倒伏(水際, 高水敷の一部)
	23.8~25.8k	部分倒伏(高水敷水際側半分程度)
	25.8k~	完全倒伏(高水敷のほとんど)
牛津川	~5.6k	直立
	5.6~6.9k	一部倒伏(水際の一部)
	6.9~8.1k	一部倒伏(水際, 高水敷の一部)
	8.1~9.7k	部分倒伏(高水敷水際側半分程度)
	9.7k~	完全倒伏(高水敷のほとんど)

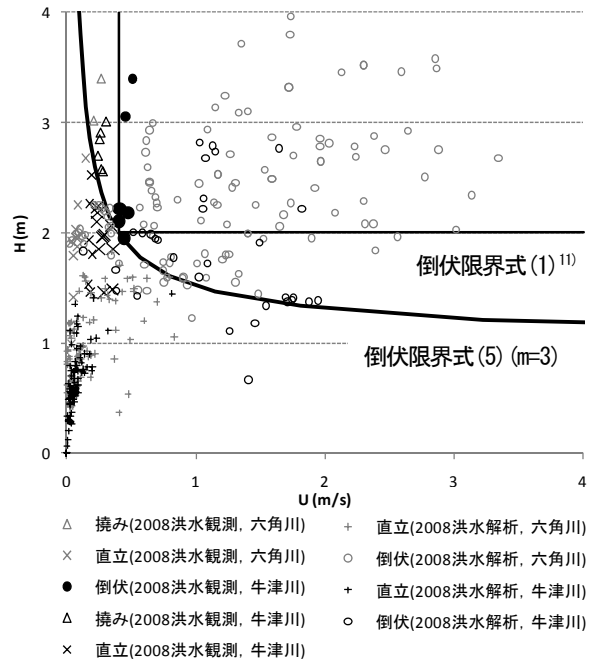


図-11 H19.7洪水における各点のヨシ倒伏の解析結果

と観測結果の比較

- 9) 服部敦: 流れによる変形を考慮した高径草本植物の抵抗則, 土木学会論文集, No.782/II-70, pp.65-80, 2005.
- 10) 福岡捷二, 渡邊明英, 盛谷明弘, 日比野忠史, 大村靖人: オギ原上を流れる洪水流に関する現地実験とオギ原の抵抗特性, 河道の水理と河川環境に関するシンポジウム論文集, 第3巻, pp.245-250, 1997.
- 11) 福岡捷二, 島谷幸宏, 田村浩敏, 泊耕一, 中山雅文, 高瀬智, 井内拓馬: 水流による高水敷上のヨシ原の倒伏・変形と粗度係数に関する現地実験, 河川技術論文集, 第9巻, pp.49-54, 2003.
- 12) 平成19年度六角川水系河床変動及びヨシ挙動観測調査業務, 国土交通省九州地方整備局 武雄河川事務所, 2008.
- 13) 内田龍彦, 福岡捷二, 工藤美紀男: 河川上流域における本川・支川流量・ハイドログラフの合理的推定法, 河川技術論文集, 第15巻, pp.309-314, 2009.
- 14) 佐藤宏明, 大沼史佳, 福岡捷二: 利根川・江戸川分派を含む河道区間における非定常準二次元解析法の適用方法の研究, 河川技術論文集, 第15巻, pp.303-308, 2009.
- 15) 安部友則, 福岡捷二, 塚本洋祐: 破堤による氾濫流量・ハイドログラフ計算法の構築と河川への適用方法の研究, 土木学会論文集B, Vol.65, No.3, pp.166-178, 2009.

(2010. 4. 8受付)