

嘉瀬川水害防備林の水理学的特性とその管理

HYDRALIC CHARACTERISTICS AND CONTROL OF FLOOD RESTRAINING FOREST IN THE KASE RIVER

渡邊訓甫¹・平川隆一²

Kunitoshi WATANABE and Ryuichi HIRAKAWA

¹正会員 工博 佐賀大学教授 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

²正会員 博(工) 佐賀大学助教 理工学部都市工学科 (〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町1番地)

A bamboo forest has been placed as the flood restraining forest in the vast extent of floodplain in the middle reach of the Kase River since the Edo era in order to control the flood flow. It is possible to deforest the bamboo forest all to increase the flood discharge capacity. However, it is thought that there is not only the energy dissipater function as the flood prevention forest but also an ecosystem integrity in the waterside in this bamboo forest.

In this paper, two-dimensional numerical simulations of flood flows in the Kase River were carried out to clarify the hydraulic characteristics of the flood restraining forest and examine the control system for the forest. From the simulated result, it is shown that the flood prevention forest that grew thickly in the flood channel had brought the water level raising that reached to as many as 2.0m by the resistance. Moreover, it has been understood that the waterside flood prevention reservoir has the function to decrease the peak water level of the flood.

Key Words : *Flood restraining forest belt, vegetation management, conservation of vegetation, retarding basin*

1. はじめに

1997年に改正された河川法で堤防に沿って設置された樹林帯が河川管理施設として位置づけられ、河川堤防の質的な安全度向上の観点から、河道内樹林の防災機能、すなわち水害防備林の技術的評価が必要となってきた。

佐賀市の西部を南流する嘉瀬川は、背振山系を水源として有明海に至る一級河川で、流域面積368km²、幹線流路延長57kmである。集水域は風化した花崗岩地帯であり、土砂流出が著しい。河口からほぼ16km付近(佐賀市大和町)で勾配が急変して山地河川から扇状地河川へと遷移し、右岸側へ湾曲するとともに左岸堤防は大きく引かれて広大な堤外遊水地が設けられている。嘉瀬川中流部にはこのような局所的な堤外遊水地が数カ所設置されており、低水路幅30～50mに対し高水敷幅は最大で400mにも及ぶ。また、両岸低水路肩の幅の厚い帯状の竹林は、藩政時代に水害防備林として設けられたもので、成富兵庫が施した巧妙な治水対策の一つといわれている¹⁾。かつて低水路肩に沿って下流まで設けられていた水害防備林は畑地拡張や河川改修に伴って伐採されてきたが、

石井樋付近(14.0km)から上流の左右両岸のマダケ林(面積12.2ha)のみが現存している。特に、14.2kmから15.4kmにかけて繁茂する左岸堤外遊水地の竹林7.5haは「尼寺林」と呼ばれ、その一部は現在も水害防備保安林に指定されている。

嘉瀬川の水害防備林の機能に関する研究は、戦後の相次ぐ大水害の後で行われた砂地・笥²⁾および小出³⁾によって行われた調査によるものが初めてであろう。その後、佐賀平野の治水体系に関する一連の研究の中で岸原^{4), 5)}が詳細な検討を行った。その中で、砂地・笥および小出らによる調査研究について詳細な分析を行うとともに、より実証的な研究を行っている。

著者らは、これまで、嘉瀬川中流部の水害防備林の水理学的機能を中心に一連の研究⁶⁾を行い、堤外遊水地の低水路肩に繁茂する竹林は遊水地の首部で左右両岸高水敷の全面を覆っていることが洪水疎通能力を著しく低下させていること、堤外遊水地は低水路肩に設けられた請堤(内土居)と相俟って洪水初期に予め貯水して減勢する効果があることなどを数値解析により指摘した。洪水疎通能力増大だけを目的化した場合には水害防備林を全て伐採することが考えられるが、尼寺林は藩政時代におけ

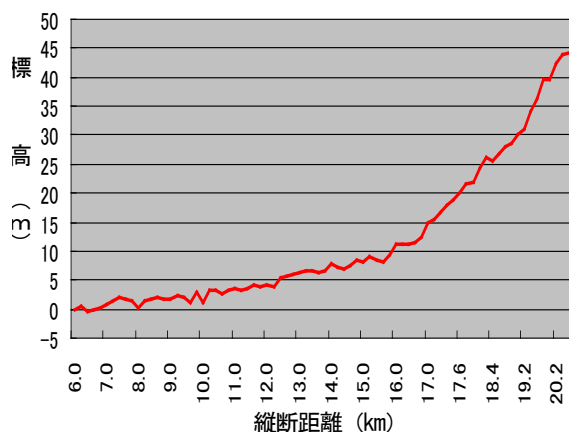


図-1 嘉瀬川中流部の縦断形状

る成富兵庫の治水事業の遺産としての歴史的な価値を有しており⁷⁾、水際の生態系保全や河川景観にも寄与していると思われる。更に、小出³⁾や岸原⁴⁾らの研究によって指摘されている水害防備林としての機能は河川整備上依然として重要である。

本研究は、河道内樹林の抵抗を透過係数で評価した一般座標系の2次元浅水流方程式^{9), 9)}による流れ解析から、水害防備林の相反する機能を定量的に検討し、その管理方策について考察を行ったものである。

2. 研究対象区間と水害防備林の概要

(1) 研究対象区間の概要

本研究の解析対象区間は、嘉瀬川の河口から10.4km～16.6kmの4.2kmである。図-1に中流部における平均河床の縦断形状を示す。山地部と平地部の境界が明瞭で、16.6km(管人橋)付近から河床勾配を1/600程度に急減して扇状地地帯に入る。この区間では14km付近で河川はほぼ45°に近い角度で方向を変え、数カ所で拡幅部(堤外遊水地)を有している。山地部から流下した洪水が平野部に出てそのまま直進すれば洪水は佐賀城下(現在の佐賀市市街地)を直撃する。このため河川の方角を変えて洪水の本体をそらし、方向を変える位置に広大な堤外遊水地と幅の厚い竹林帯を設けて水勢を緩和したと思われる。また、両岸低水路肩に設けた竹林は低水路を固定して掃流力を維持し、洪水の乱流と出水時の大量流出土砂の堆積による天井川化を防止する機能を有していたと思われる^{3), 4), 5)}。

(2) 水害防備林の実態調査

図-2は国土交通省武雄河川事務所が作成した嘉瀬川高水敷上における樹木群の分布図¹⁰⁾で、図中に著者等による竹林調査地点を示した。水害防備林を構成する竹はほとんどがマダケで、左右両岸のマダケ林の面積は12.2haである。右岸下流域にメダケが僅かに(0.6ha)点在してい

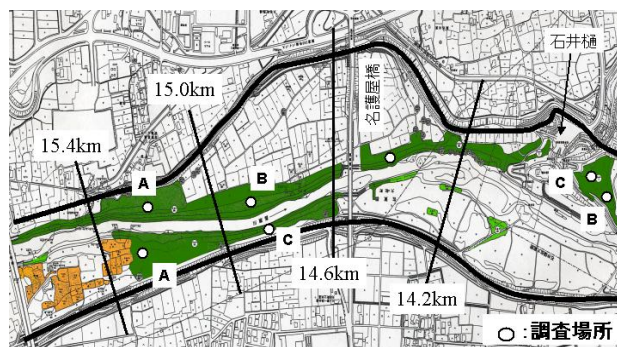


図-2 樹木群の分布状況¹⁰⁾と竹林の現地調査場所
(緑：竹林、橙：果樹・高木林)

表-1 竹林の現地調査結果

測定地点			平均径 (cm)	本数密度 (本/m ²)	透過係数 K (m/s)
左岸	名護屋橋上流	A	5.48 (5.65)	2.67 (2.06)	10.57 (11.85)
		B	6.63 (5.70)	2.17 (1.92)	10.66 (12.22)
	名護屋橋下流		4.06	4.19	9.80
	石井樋下流	B	3.87 (4.25)	3.25 (3.38)	11.4 (10.66)
		C	2.89	3.00	13.73
左岸全体平均			4.59	3.05	11.06
右岸	名護屋橋上流	A	3.20	5.25	9.86
		C	1.58	5.56	13.64

2005年5月25日，6月10日調査 ()内は1991年の調査結果

る。また、右岸の竹林より上流には若干の高木林と果樹園が分布している。

2005年5月から6月にかけて竹の平均径、本数密度の調査を行った結果を表-1に示す。左岸側の尼寺林では平均径 $D = 3 \sim 7\text{cm}$ 、本数密度 $1/\text{s}^2 = 2 \sim 4\text{本/m}^2$ である。従って、(1)式で定義される透過係数 K の値は抵抗係数 $C_d = 1.2$ として $K = 10 \sim 14\text{m/s}$ の程度である。

$$K = \sqrt{2gs^2/C_d D} \quad (1)$$

一方、右岸側では平均径が $D = 2 \sim 3\text{cm}$ と直径は若干小さいが、本数密度が約 5本/m^2 と大きいので左右両岸で透過係数の値には大きな違いがない。表中に1991年の調査結果も示しているが、この14年間で平均径、密度ともにほとんど変化しておらず、透過係数の値も $K = 11 \sim 12\text{m/s}$ と、2005年時とほぼ同じ値である。

3. 数値計算の概要

(1) 基礎式

数値計算の基礎式は、水深方向に積分したデカルト座標系 (x, y) の連続式と運動方程式を一般座標系 (ξ, η) に変換した以下の式である。

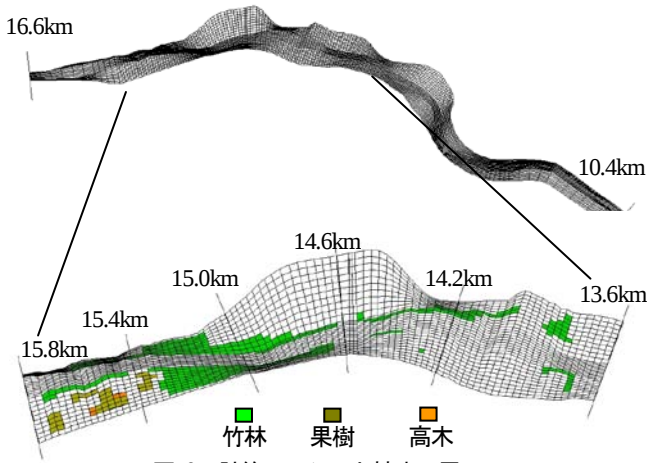


図-3 計算メッシュと植生配置

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{Uh}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{Vh}{J} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{M}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{VM}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VM}{J} \right) \\ &= -gh \left(\frac{\xi_x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_b}{\rho J} - \frac{f_x}{\rho J} + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u^2 h} \right) \\ &+ \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'h} \right) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u^2 h} \right) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'h} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{N}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{VN}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{VN}{J} \right) \\ &= -gh \left(\frac{\xi_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \xi} + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial z_s}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{by}}{\rho J} - \frac{f_y}{\rho J} + \frac{\xi_x}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{u'v'h} \right) \\ &+ \frac{\xi_y}{J} \frac{\partial}{\partial \xi} \left(-\overline{v^2 h} \right) + \frac{\eta_x}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{u'v'h} \right) + \frac{\eta_y}{J} \frac{\partial}{\partial \eta} \left(-\overline{v^2 h} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 J は座標変換のヤコビアンで、 (u, v) はデカルト座標系の x, y 方向流速、 (M, N) は流量フラックス、 h は水深である。底面剪断応力 (τ_{bx}, τ_{by}) は、マンニングの粗度係数 n を用いて

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = \frac{gn^2 u}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2 v}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2} \quad (5)$$

である。また、単位面積あたりの植生抵抗 f_x, f_y は、直立円柱の抵抗式に透過係数 K を導入して

$$\frac{f_x}{\rho} = \frac{gh}{K^2} u \sqrt{u^2 + v^2}, \quad \frac{f_y}{\rho} = \frac{gh}{K^2} v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (6)$$

と表せる。

(2) 計算条件

図-3に計算領域全体の計算メッシュと植生の配置を示す。計算メッシュは流下方向に20～200m間隔で分割し、横断方向には低水路、両高水敷をそれぞれ10分割して作成した。河床標高は横断測量図面(2003年3月、8月測量)から25～200m間隔で読み取り、メッシュ格子点に与え

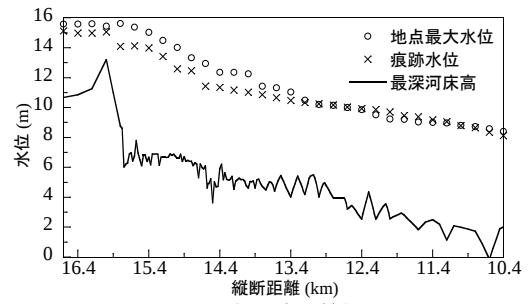


図-4 1990年洪水の検証

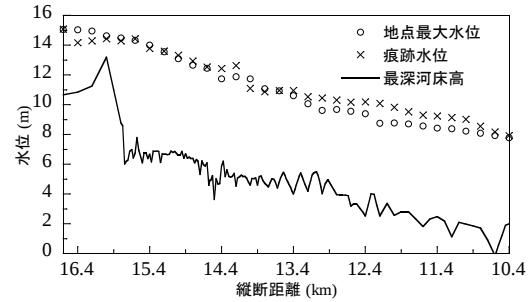


図-5 2002年洪水の検証

た。13.6kmから15.8kmにかけては25m間隔の、下流部の断面変化の少ない直線部は200m間隔の横断測量図面を用いた。13.6kmより下流および15.8kmより上流区間については河川幅の変化の程度に応じてメッシュ幅を与え、200m間隔の横断測量図より直線近似した河床標高を与えた。

マンニングの粗度係数 n は、低水路については河床材料・河床形態による推定から、高水敷については草本類や利用状況による推定から、低水路で0.029(10.4～13.5km)、0.036(13.5～16.6km)、高水敷で0.035とした¹¹⁾。竹林の抵抗は透過係数 K で評価し、実態調査から左岸で $K=11.06\text{m/s}$ とし、右岸では上流部の竹林を重視して $K=9.86\text{m/s}$ とした。また、右岸上流部高水敷の果樹園、高木林については大まかな面積、本数、幹の大きさから概算し、果樹 $K=40\text{m/s}$ 、高木林 $K=18\text{m/s}$ とした⁶⁾。植生範囲については図-2を利用した。

4. 解析結果と考察

(1) 洪水の再現計算による数値計算結果の検証

1990年7月の洪水(ピーク流量約1,050 m^3/s)および2002年9月洪水(ピーク流量約750 m^3/s)の再現計算を行った。その結果を図-4および図-5に示す。境界条件として上流端(16.6km地点)に観測流量の、下流端(10.4km地点)に観測水位のハイドログラフを与えた。粗度係数、透過係数の値は前述の通りとした。

1990年洪水の再現計算は上流部で抵抗を過大評価する結果となったが、2002年洪水に対してはほぼ再現できている。1990年の高水敷上の植生状況が今のところ正確に復元できていないため、今回の計算では、現時点の植生

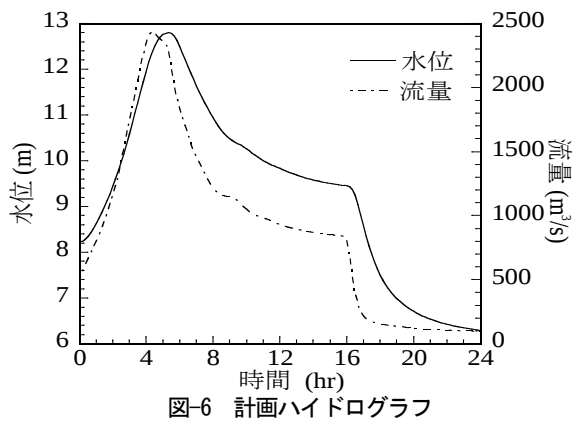


図-6 計画ハイドログラフ

データを用いて計算を行ったことが原因であると思われるが、この点については今後検討が必要である。

(2) 水害防備林の抵抗特性

水害防備林の洪水に対する抵抗特性を把握するため、ピーク流量約2,500 m³/sの計画高水¹⁾を外力として、図-6に示した16.6km地点の計画高水流量ハイドログラフと10.4km地点の水位ハイドログラフを境界条件として、水害防備林の繁茂状況が洪水流に与える影響について検討する。図-7には13.6km～15.8km間における流量ピーク時の計算最大水位を最深河床高とともに示した。図中、Case1は現況の植生配置、Case2は防備林を全て伐採した場合である。

Case1では、堤外遊水地の首部15.0km付近から上流で急激な水位上昇を生じているのが特徴である。Case2では、計画高水位とほぼ一致した結果が得られている。これらのことから、現況における著しい水位上昇は堤外遊水地首部の両岸高水敷全面に繁茂する防備林の抵抗によるものであることは明らかであり、それによる水位上昇は2.0mにも達する。

図-8は、Case1(現況)とCase2(全伐採)の流量ピーク時における流速ベクトルを示したものである。Case1の現況繁茂状態における竹林内の流速は1.0m/s程度まで減速されており、竹林通過後若干加速されるが高水敷上の流速は高々2.0m/sである。一方、Case2の場合、左岸高水敷への流入速度は約4.0m/sであり、15.1km地点でも3.0m/sとかなり大きい。拡幅により徐々に速度を減じるが首部では本堤に対する危険度が高い。このように、洪水本体は低水路肩の竹林帯により低水路に集められ、左岸高水敷への流入はかなり抑制されていることが判る。また、14.6km～15.0km区間では防備林を横切って低水路から高水敷へ向かう流れを確認でき、このことは岸原⁵⁾の調査結果を裏付けている。

(3) 水害防備林の管理に関する検討

水害防備林としての機能を極力維持しつつ洪水疎通能力を増大させるための竹林の配置方法について考察するため、ここでは前節に次に示す3つのケースを追加してその

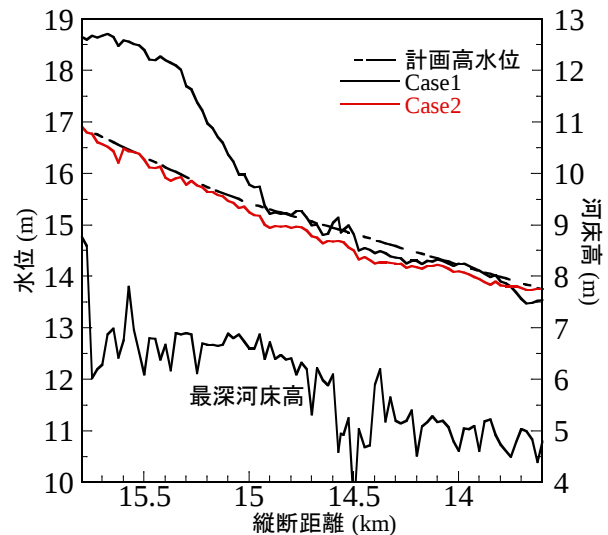


図-7 植生配置の有無による縦断水面形

抵抗特性を調べる。

Case3では繁茂範囲を現況のままとし、間引きにより竹林の密度を1本/m²程度に調整するとして透過係数の値を右岸で $K=22.6\text{m/s}$ 、左岸で $K=18.9\text{m/s}$ とする。

Case4では、図-9(a)に示すように現況の竹林密度で防備林を低水路肩に沿って幅20m程度の帯状に残す。

Case5では、図-9(b)に示すようにCase4において左岸遊水地首部の竹林を全て伐採し、流れを高水敷へ誘導する。

以上の3ケースを追加した縦断水面形を図-10中に示した。遊水地首部を覆う防備林を伐採し、低水路肩に沿って帯状に残したCase4では、15.1kmより上流の水位上昇が著しく緩和され、最大で1.0mもの水位低下が見込まれる。繁茂範囲を変えず密度調整のみを行ったCase3も、Case4とほとんど同程度の抵抗減効果を示した。このような間引きの手法は竹林の繁茂範囲を変えないため景観はほぼ保全されるが、ある密度を維持する管理手段が必要となる。両ケースとも遊水地上流の狭窄部で防備林が残されており、それによる抵抗が水位にして1.0m程残されている。Case5のように低水路肩の防備林を一部犠牲にして左岸首部の防備林を全て伐採して洪水の一部を遊水地へ誘導すれば、さらに50cm近くの水位低下を期待できる。ただし、この場合は高水敷への流入速度がCase2の場合と同じく約4.0m/sである上に、首部から下流低水路肩に沿って防備林を残すため高水敷が水路化し、かなりの区間に渡って3.0m/s以上の高速流を生じる。このことは水害防備林の高水敷保護・堤防保護機能をかなり低下させることを意味する。低水路肩に沿って竹林帯を維持し、水害防備林としての機能と作用を極力活かそうとすれば、これ以上の抵抗減は困難と思われる。

図-11に、Case4の最大流量時における流速ベクトルを示す。全伐採時のCase-2では遊水地へ約4m/sで流入していたのに対して、竹林によって遊水地への流入流速が約1m/sにまで抑えられていることが分かる。しかし遊水

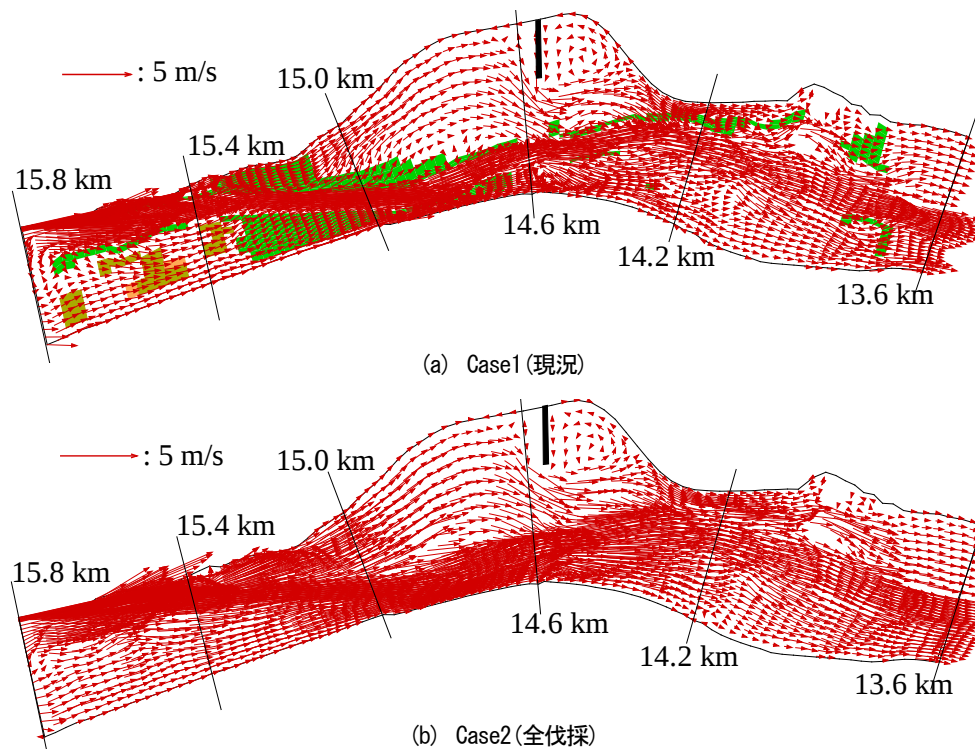


図-8 流量ピーク時の流速ベクトル

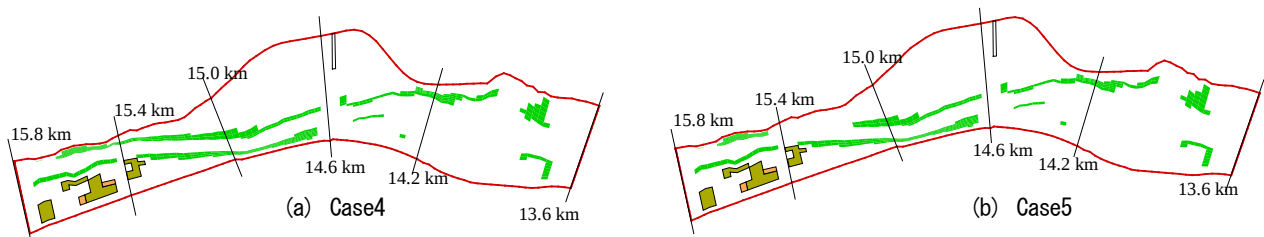


図-9 水害防備林の配置方法

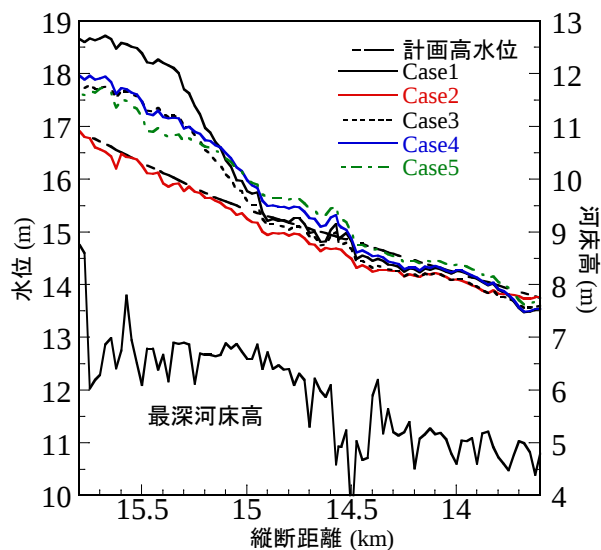


図-10 植生配置の違いによる縦断水面形

池上流首部の本堤付近で、流速がCase-1に比べて大きくなっており、防備林を全伐採したCase-2と同様に、本堤に対する危険性が大きいことが考えられる。

(4) 堤外遊水地の遊水機能

堤外遊水地の存在が水位に与える影響を調べるために、遊水地がない場合についての解析を行った。図-12は、水害防備林を現況のままとして14.2km～15.1km間の拡幅部をカットして遊水地が存在しないとした場合と遊水地が存在する現況との水位ハイドログラフを比較したものである。遊水地の尾部にあたる14.3km地点では遊水地の有無による波形の違いは現れない。しかしながら、遊水地が存在する場合には14.7km地点より上流域で遊水地が無い場合より水位が低下し、さらに遊水地首部15.2km地点においてはピーク水位が約80cm低下している。このように堤外遊水地は減勢機能だけではなく、ピーク水位の低減機能も有していることが明らかになった。

5. 結論

平面2次元モデルを用いて広大な堤外遊水地と水害防備林を有する嘉瀬川中流部の流れ解析を行い、低水路肩に

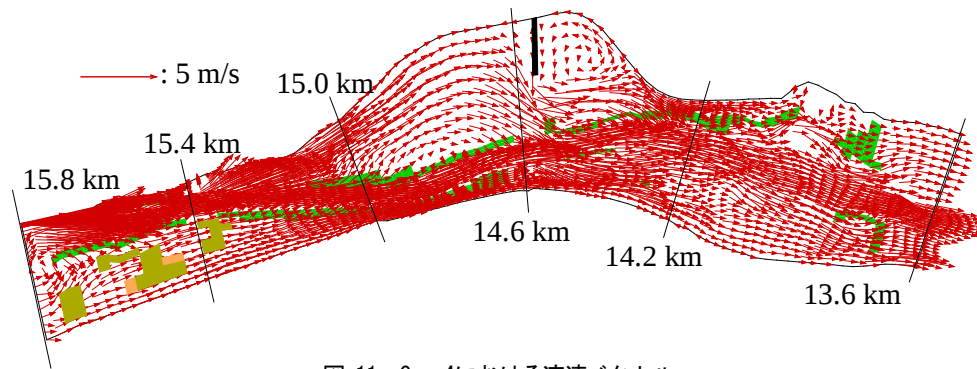


図-11 Case4における流速ベクトル

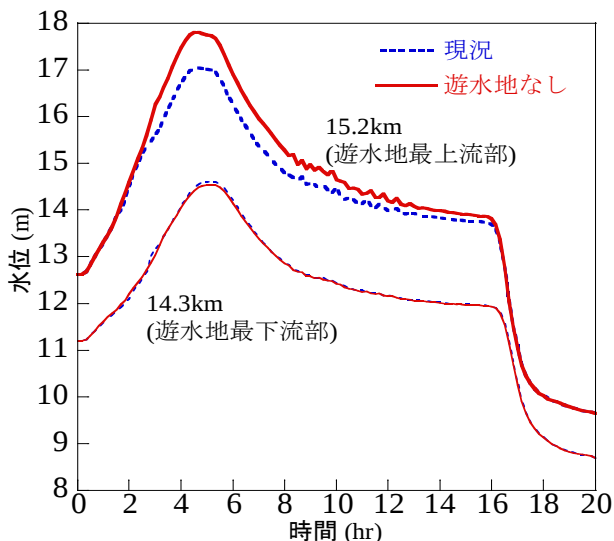


図-12 堤外遊水地の遊水効果

沿って幅厚く繁茂する水害防備林(竹林)の機能と抵抗特性について検討を行った。

その結果、堤外遊水地首部の15.1kmから15.3kmにかけての両岸高水敷全面に繁茂する水害防備林が洪水疎通能力を著しく減じており、その抵抗によって上流には2.0mにも及ぶ著しい水位上昇がもたらされていることを明らかにした。また、既往の研究で指摘されている低水路固定機能や高水敷保護・堤防保護機能などの水害防備林の機能・作用を水理学的に検証した。

最後に、堤外遊水地の機能についても考察し、堤外遊水地が高水敷上の流れに対する減勢機能だけではなく、洪水のピーク水位低減機能も有していることを明らかにした。

竹林の管理の仕方によっては洪水阻害要因としての作用をかなり減じることができる。嘉瀬川の治水対策上、洪水疎通能力を増加させてより治水安全度をあげることが重要な課題として残されているが、中流部の水害防備林に持たされた様々な機能や作用を定量的に的確に把握し、それらを河川整備の中で有効に活かすことが河川法の趣旨に沿うものと考えている。

謝辞：本研究は一部、土木学会西部支部調査研究委員会「植生および樹林を利用した河川整備に関する水理学的な調査検討・研究委員会」(平成17年度～平成19年度、委員長 渡邊訓甫)による研究の一環として行われた。本研究を遂行するにあたり、当時佐賀大学大学院工学系研究科都市工学専攻博士前期課程の中田哲二君には、多大な協力を頂いた。また、国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所から計画高水、洪水実績および地形に関する貴重な資料を多数提供して頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮地米蔵監修:佐賀平野の水と土, pp.124-145, 信評社, 1977.
- 2) 砂地国良, 笥 斌治:水害防備林に関する所見, 総理府資源調査会, pp.1-18, 1955.
- 3) 小出 博:嘉瀬川と成富兵庫, 佐賀県治山治水協会, pp.2-3, 1955.
- 4) 岸原信義:水害防備林に関する研究(II) 嘉瀬川の水害防備林と遊水地について, 日本林学会誌, Vol.61, No.9, pp.311-320, 1979.
- 5) 岸原信義, 荒谷清英, 竹下和孝, 山本文彦:藩政時代における佐賀平野の治水について, 水利科学, No.191, pp.1-31, 1990.
- 6) 例えば, 中田哲二, 平川隆一, 渡邊訓甫:嘉瀬川尼寺林の抵抗特性と適正管理に関する検討, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集(CD-ROM), 2006.
- 7) 土木学会編:明治以前日本土木史, 岩波書店, pp.163-164, 1994.
- 8) 長田信寿:一般座標系を用いた平面2次元非定常流れの数値解析, 水工学における計算機利用の講習会講義集, pp.61-76, 1999.
- 9) 土木学会編:水理学公式集 例題プログラム集, 平成13年度版, 2002.
- 10) 国土交通省武雄河川事務所:尼寺・東山田地区樹木調査, 2003.
- 11) 国土交通省河川局:嘉瀬川水系河川整備基本方針資料, 2006.

(2009. 9. 30受付)