

河川整備と水害防備林の機能に関する調査研究

RESEARCH ON RIVER IMPROVEMENT AND FUNCTIONS OF FLOOD RESTRAINING FOREST

渡辺訓甫

Kunitoshi WATANABE

佐賀大学理工学部都市工学科(〒840-8502 佐賀市本庄町1番地)

1. はじめに

佐賀市の西部を南流する一級河川嘉瀬川は、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⁾。嘗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ハチク林(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、高水敷は堤外民地として現在も耕作が行われている。

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、算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、算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。

昭和20年代に全国的に頻発した洪水災害に対して水害防備林の再評価が行われ、総理府資源調査会水害防備林の実態等について各地で調査研究を行

った。佐賀県では嘉瀬川改修計画立案との関連で昭和30年に砂地、算両専門員による調査²⁾が実施され、「水害防備林は往時に於いては水防の目的を果たしたものであると思われるが、現在の流域、河川の状況よりすれば、通水断面の縮小、流線の欠陥等があるため全面的に改修を必要とするに至ったものと見ることが出来る。」という否定的な評価と、「中流部の流水を緩める役には堤外地の樹林又は竹林が最も適しているから河川改修に積極的に植樹利用すべきものと思われる。」という肯定的な評価がなされた。岸原⁵⁾は、このことに関して「これは水害防備林の水理学的な機能のうち洪水の疎通をどう評価するにかかっている。」と述べている。

小出³⁾は、水害防備林の低水路固定作用について「こうして複断面が取られる結果、平水はもちろん中小洪水の場合にも、さらには大洪水の場合にさえ、流心が直接堤防に突き当たるということがほとんど起こらない。これが嘉瀬川治水事業に見られる一つの著しい特徴であって、この形態を取るのに水害防備林の実に巧みな応用が見られるのである。」と述べ、両岸竹林帯の重要な作用は「嘉瀬川の流路を固定、従って堤外地を川が乱流するのを防止することである。」と指摘している。更に、小出は「洪水が運搬する土砂礫が森林帯で濾過され遊水地の畑地には肥えた泥水だけが静かに氾濫し畑地の地力が更新される。」と水害防備林による土砂の濾過作用についても述べている。

岸原⁴⁾は、藩政時代の治水の遺構が残っている嘉瀬川についてその治水体系を復元し、その体系下における水害防備林の機能と作用について検討を加え

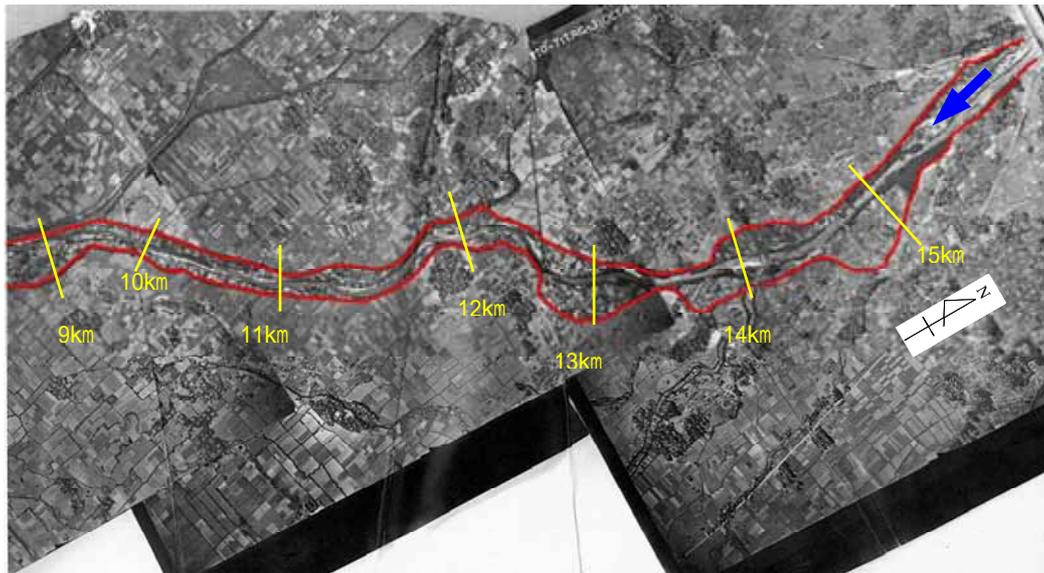


図-1 嘉瀬川中流部の平面形状（昭和 23 年撮影）

た．岸原は低水路の幅や高水敷の標高の変化について詳細な調査を行い，水害防備林の 1) 平水路固定機能，2) 高水敷保護作用，及び 3) 土砂篩分作用と生産力の増強を確認するとともに，4) 高水敷への土砂堆積状況から「洪水流は水害防備林を通して横方向から流速を落として侵入していることを示している」として，遊水地と水害防備林は洪水流の本堤への直撃を防いで破堤を防止し，堤防の保護作用を営んでいると結論付けている．

著者らは，これまで，嘉瀬川中流部の水害防備林，特に，尼寺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，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，これまで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．

ここでは，水害防備林の相反する機能を定量的に評価することによってその管理方策及び河川整備の在り方について検討を行う．

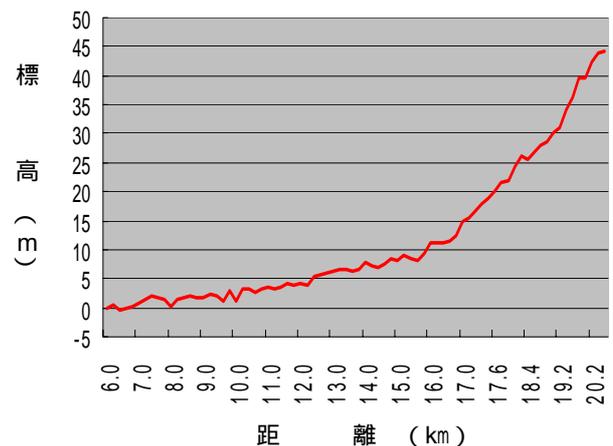


図-2 嘉瀬川中流部の縦断勾配

2. 嘉瀬川の概要とその特性

(1) 嘉瀬川の形状特性

嘉瀬川は，佐賀，福岡両県の県境を構成する背振山系を水源として佐賀平野を南流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．図-1 は昭和 23 年撮影の航空写真で，9km～16km 区間の河川線形を示している．14.2kmから 15.4km間における左岸拡幅部（堤外遊水地）の竹林が「尼寺林」である．図-2 に示すように，嘉瀬川は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，方向変化部の数カ所で拡幅部（堤外遊水地）を

有しているのが特徴である。

このように嘉瀬川の平面形状は極めて特徴的で、岸原⁴⁾は平野部の嘉瀬川を4つの区間に分割してその特異性を検討している。その中で「平野部の嘉瀬川の河状は一般的に上流部ほど川幅が広く下流部ほど狭い。また、最上流部と最下流部で川幅が変化し、蛇行しているが、中間部では川幅の変化がほとんどなく直線的に流れている。また、各区間は地形上立地を異にしており、嘉瀬川が人工的に作られた河川であることを示している」と述べている。岸原は最上流部の特徴的な区間を11.0km～15.6kmとしており、図-1の川幅が大きく変化している区間である。

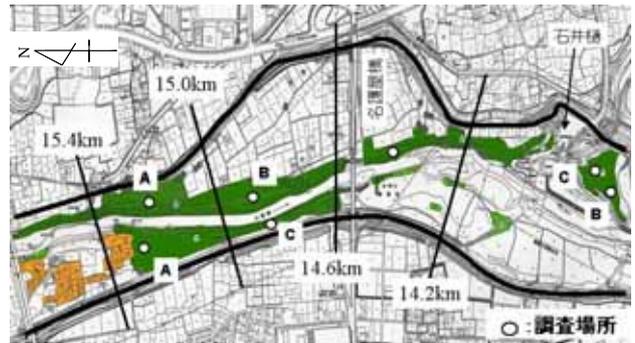


図-3 現地調査場所
(緑：竹林，橙：果樹・高木林)

(2) 堤外遊水地と防備林の機能

この区間について、岸原はさらに「遊水地は上下を狭窄部によって狭められ、請堤があったりして洪水を滞留させる作用が強くなるが、これはあくまで関東流的な発想ではなく、「遊水地前面のマダケ林によって遊水地へ流入する水勢を緩和し、洪水のピーク以前に滞留した遊水地内の水により洪水流の本堤への直撃を防ぐ」という点にあった」と考え、詳細な現地調査から水害防備林は堤外遊水地の機能強化(高水敷・本堤保護作用)及び低水路固定機能があると結論付けている。

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⁴⁾、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、小出³⁾も述べているように、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持たせられていたと思われる^{1,4)}。

以上のことは全てこの堤外遊水地の直下流14.0km地点に築造された取水施設である石井樋の保護と取水機能の維持という利水上の観点からも要求されたことであり^{1,7)}、藩政時代に嘉瀬川改修に取り組んだ成富兵庫は治水体系と利水体系とを同時に構築したと考えざるを得ない。

3. 水害防備林の実態調査

図-3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調査結果⁸⁾である。それによると水害防備林を構成する竹はほとんどがハチクで、左右両岸のハチク林の面積は12.2haである。右岸下流域にメダケが僅かに(0.6ha)点在している。また、右岸の竹林より上流には若干の高木林

表-1 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	
		B 6.63 (5.70)	2.17 (1.92)	10.66	
	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	
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	

平成17年5月25日、6月10日調査 ()内は平成3年の調査結果

と果樹園が分布している。

平成17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。調査結果を透過係数と共に表-1に示す。調査によると左岸側の尼寺林では平均径 $D = 3 \sim 7 \text{cm}$ 、本数密度 $1/s^2 = 2 \sim 4 \text{本}/\text{m}^2$ である。従って、次式で定義される透過係数

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

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。一方、右岸側では平均径が $D = 2 \sim 3 \text{cm}$ と竹林の規模自体が若干小さいが、本数密度 $1/s^2 \approx 5 \text{本}/\text{m}^2$ が大きいため左右両岸で透過係数の値には大きな違いがない。表中に平成3年の調査結果を括弧で示したが、この14年間で平均径、密度ともにほとんど変化していないことがわかる。因みに、尼寺林の透過係数は平成3年の測定値を用いるとその平均値は $K = 11.01 \text{m/s}$ であるから、今回と全く同じ値ともいってよいほどである。

4. 水害防備林の抵抗特性

(1) 数値解析概要

嘉瀬川中流部 10.4km ~ 16.6km 区間について一般座標系の 2 次元浅水流方程式^{9,10)}を用いて計画高水を対象とした流れの解析を行った。河川断面には平成 15 年測量の断面データを用い、マンニングの粗度係数 n は低水路で 0.029(10.4 ~ 13.5km) , 0.036(13.5 ~ 16.6km) , 高水敷で 0.035 とした。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。なお、計算時間間隔は $\Delta t=0.01(\text{sec})$ である。

数値計算の基礎式は、次に示す一般曲線座標系による連続の式と運動方程式である。

連続の式

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

x 方向運動方程式

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

y 方向運動方程式

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

ここに、 t : 時間、 x, y : 空間座標、 h : 水深、 U, V : 水深平均流速ベクトルの反変成分、 M, N : x, y 方向の流量フラックス、 J : 座標変換のヤコビアンである。 $-\overline{u^2}, -\overline{u'v}, -\overline{v^2}$: $x-y$ 座標系の水深平均レイノルズ応力、渦動粘性係数、乱れエネルギーから求める。

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

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

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = \frac{gn^2 v}{h^{1/3}} \sqrt{u^2 + v^2}$$

である。また、植生抵抗 f_x, f_y は透過係数 K を用いて

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

$$\frac{f_y}{\rho} = \frac{gh}{K^2} v \sqrt{u^2 + v^2}$$

と表せる。

(2) 計算メッシュ

解析対象区間 10.4km(池森橋) ~ 16.6 km (官人橋) を図-4 に示す。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(平成 15 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 より下流及び 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。植生範囲については国土交通省武雄河川事務所の調査結果(図-3)⁸⁾を利用した。

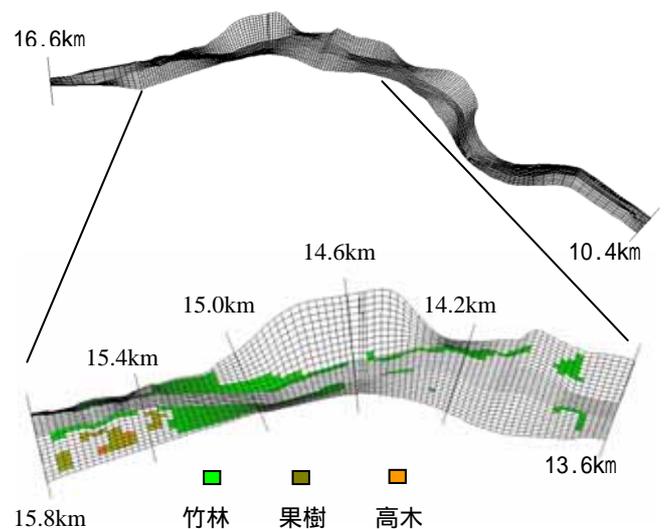


図-4 計算メッシュと植生配置

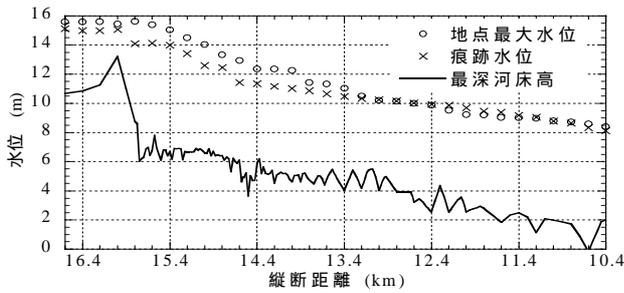


図-5 平成2年洪水の検証

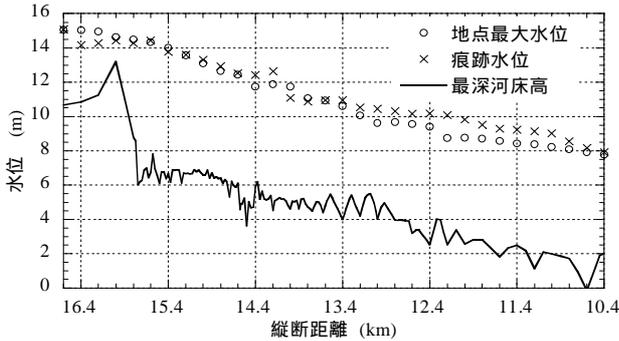


図-6 平成14年洪水の検証

(3) 洪水の再現計算

平成2年7月洪水（ピーク流量約 1,050 m^3/s ）及び平成14年9月洪水（ピーク流量約 750 m^3/s ）の再現計算を行った。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。

平成2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、平成14年洪水に対してはほぼ再現できている。平成2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、今回現在の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。

(4) 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、防備林の有り、無しによって計画規模の洪水流がどの程度影響を受けるかについて考察する。

図-7 に 16.6km地点と 10.4km地点に境界条件として与える計画高水の流量ハイドログラフ（ピーク流量約 2,400 m^3/s ）及び水位ハイドログラフを示す。図-8 には 13.6km～15.8km間における流量ピーク時の計算縦断面水面形を河床高とともに示した。図中、Case1 は現況における水面形で、堤外遊水地の首部

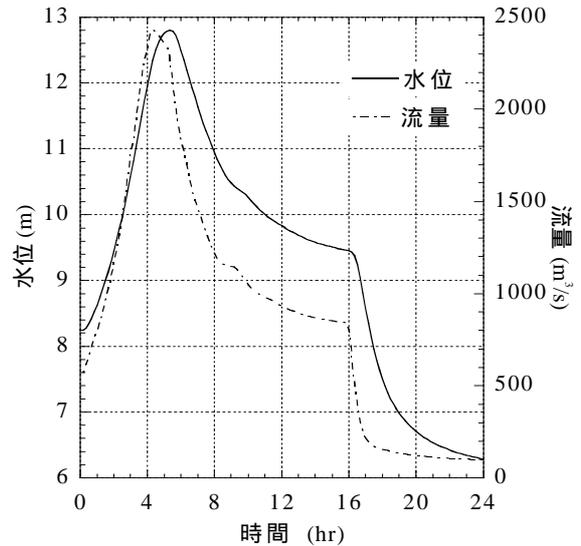


図-7 計画ハイドログラフ

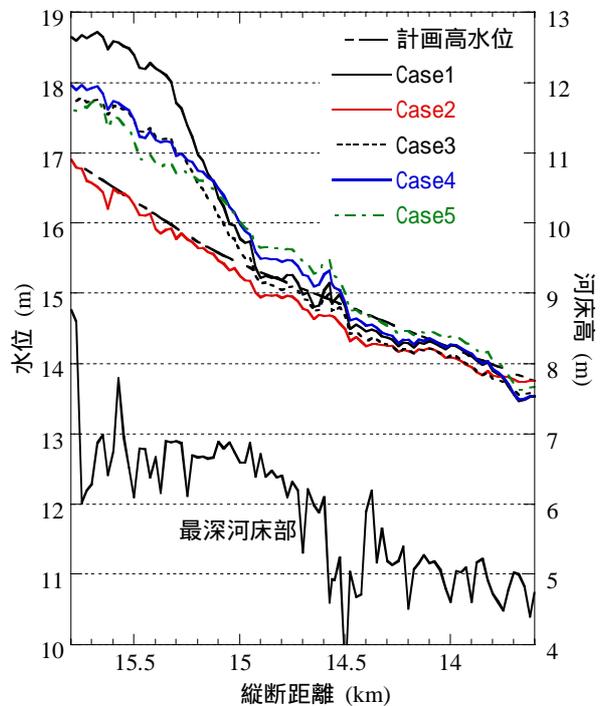


図-8 縦断面水面形（13.6km～15.8km）

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 は、防備林を全て伐採した場合であり、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-9 は、Case1（現況）とCase2（全伐採）の流速ベクトルを示したものである。Case2 の場合、左岸高水敷への流入速度は約 4.0 m/s であり、15.1km地点でも 3.0 m/s と

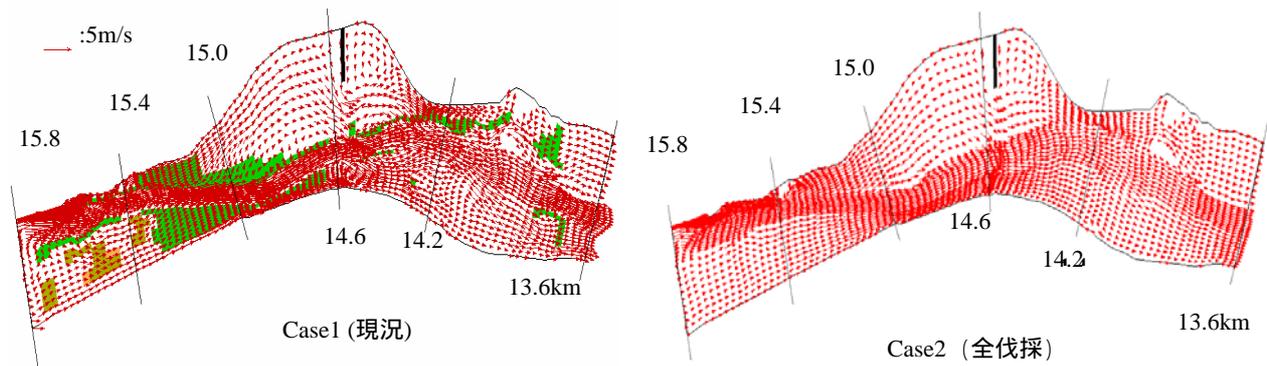


図-9 現況と全伐採した場合の流速ベクトル

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大きい。一方、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。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⁴⁾の調査結果を裏付けている。

4. 水害防備林の管理に関する検討

ここでは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、次に示す三つのケースを追加してその抵抗特性を調べる。

Case3: 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: 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: 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。

以上のケースの縦断面水面形を図-8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逡減効果を示した。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、これ以上の抵抗逡減は困難と思われる。

5. 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-10は、水害防備林を現況のままとして14.2km～

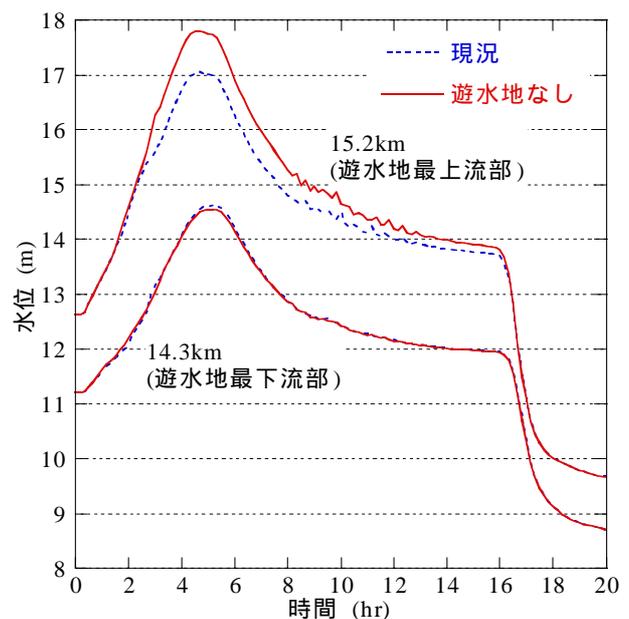


図-10 堤外遊水地の遊水効果

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、遊水地首部 15.2km 地点においては図-10 に示すようにピーク水位が約 80cm 低下する。このように堤外遊水地は減勢機能だけでなく、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。

7. おわりに

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 にかけての兩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 18 年度、委員長 渡辺訓甫)による研究の一環として行われた。また、国土交通省九州地方整備局武雄河川事務所から貴重な資料を多数提供していただいた。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, 信評社, 1977.
- 2) 砂地国良・寛 斌治:水害防備林に関する所見, 総理府資源調査会, 1955.
- 3) 小出 博:嘉瀬川と成富兵庫, 佐賀県治山治水協会, 1955.
- 4) 岸原信義:水害防備林に関する研究() 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, 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, 1990.
- 6) 例えば, 中田哲二・平川隆一・渡辺訓甫: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), 2006.
- 7) 土木学会編:明治以前日本土木史, 岩波書店, 1994.
- 8) 国土交通省武雄河川事務所:尼寺・東山田地区樹木調査, 2003.
- 9) 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, 1999.
- 10) 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.

(2006.5.12 受付)

