

防災樹林帯による氾濫流制御に関する研究

FLOOD CONTROL BY MEANS OF 'FOREST ZONE FOR FLOOD PREVENTION'

末次忠司¹・舘健一郎²・小林裕明³
Tadashi SUETSUGI, Kenichiro TACHI, Hiroaki KOBAYASHI

¹ 正会員 工修 建設省土木研究所 都市河川研究室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)

² 正会員 工修 建設省土木研究所 都市河川研究室

³ 正会員 建設省土木研究所 都市河川研究室

Before modern technology of flood control was introduced to Japan, in floodplains where serious disaster frequently occurred existed some unique ways by the residents to reduce flood damages to their houses. 'Funagata-yashiki' in the basin of Ooi river is one of such ways, which is to grow trees and bushes upstream to the house in order to deflect and retard the momentum of flooding water.

We propose applying such a flood control method to floodplains with steep slope like fans, putting a forest upstream to a community so as to protect houses from being broken or washed away by flooding water.

Here in this paper, results of an experiment on effect of forest in a simple model floodplain is reported. It is made clear that the loss of the momentum of flooding water is effected by the density and longitudinal length of the forest.

Key words : flood control, forest zone for flood disaster prevention, flooding water, momentum

1. はじめに

近代の治水手法は、計画洪水を設定し、築堤などにより洪水を河道内に閉じこめるというものが主であった。しかし、近年は河道への流出を抑制するための総合治水や計画規模以上の洪水で氾濫した場合に被害を軽減するための氾濫原管理、あるいは氾濫流制御など、従来とは違った理念に基づく手法が取り入れられるようになってきている。

近代治水の発達以前の浸水常襲地帯では、地域や住民により様々な水害対策が行われていた。大井川下流域の扇状地には、舟型(三角)屋敷と呼ばれる独特の家屋群が存在する。これらの屋敷の敷地は頂点が大井川上流側を向いた三角形や舟型をしており、先端部には土盛りされ樹木が密に植えられている。洪水氾濫時には先端部が氾濫水を二分するとともに、樹木群により水勢を弱めることで家屋、人命、財産を流失から守る工夫である。これらはいわば個人や地域共同体が主体となった氾濫原管理であり、現在の河川事業に氾濫原管理を導入するにあたって学ぶべき知恵が含まれていると考えられる。

本研究では、氾濫原の一区域を局所的に防御するため、集落の上流側に数十から数百メートルの帯状

の樹林帯を設置することを想定する。これは上述の舟型屋敷と同様の手法であるが、その規模を拡大して集落単位での防御を目指すものである。対象とするのは扇状地のような急勾配な氾濫原(勾配 1/300 程度)であり、樹林の抵抗により氾濫流速を低減させ、氾濫流の流向をそらし、土砂等を堆積させることで、家屋流失などの激甚な被害を軽減することが出来ると考えられる。

本論文では、防災樹林帯の水理効果の基礎的な検討のために行った模型実験について報告する。

2. 実験概要

(1) 実験条件

実験は、流下方向長さ 16m、幅 5.2m の氾濫流実験水路で行った(図-1)。氾濫原勾配は 1/300、水路床の粗度係数 n はボルトを貼り付けて約 0.020~0.022 に調整し、水路中心部に樹林帯模型を設置した。そこに横断方向に一樣な単位幅流量 $0.0558\text{m}^2/\text{s}$ (流量条件Ⅰ)、 $0.0212\text{m}^2/\text{s}$ (流量条件Ⅱ) の二通りの氾濫流を流下させた。それぞれの場合の等流流速、水深は、 0.59m/s 、 0.095m (流量条件Ⅰ) 及び 0.38m/s 、 0.056m (流量条件Ⅱ) となり、フルード則による模型縮尺を 1/30 と想定すると、氾濫原勾配

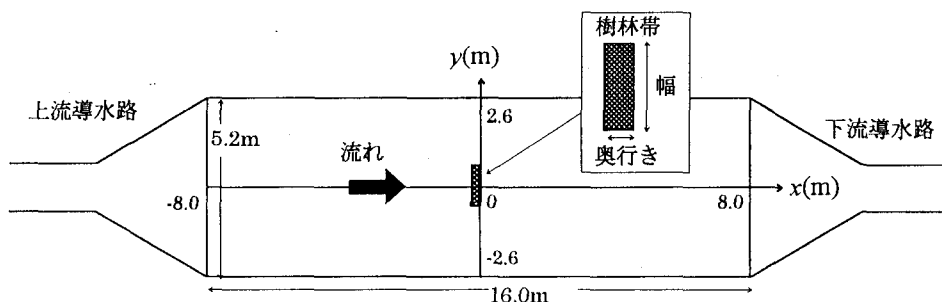


図-1 氾濫流実験水路概略図と座標系

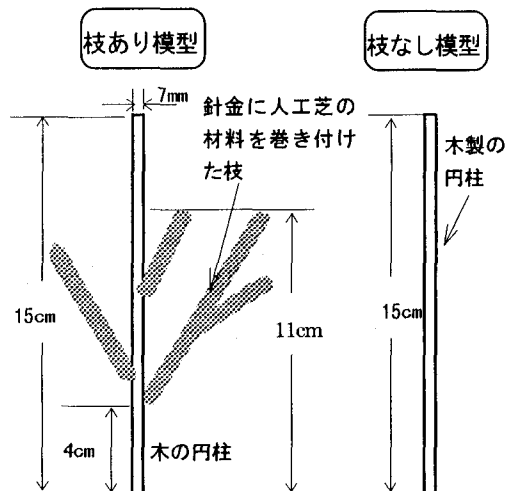


図-2 樹木模型

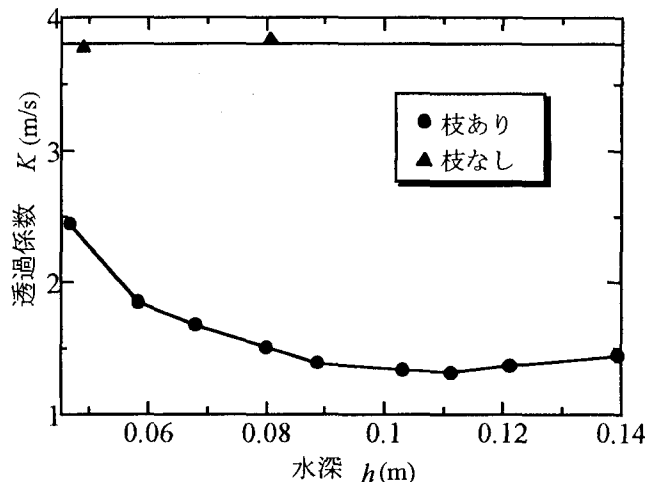


図-3 樹林帯模型透過係数 K (樹木間隔 8cm、格子状配列)

1/300、氾濫原粗度 $n=0.035\sim0.039$ の扇状地における流速 3.3m/s、水深 2.8m (流量条件Ⅰ) 及び流速 2.1m/s、水深 1.7m (流量条件Ⅱ) の非常に激しい氾濫流に相当する。

測定項目は、水深 (ポイントゲージ)、河床から水深の6割の高さでの x 、 y 方向流速 (2次元電磁流速計) の平面分布である。測定点は、樹林帯幅中心縦断線 ($y=0$ m) において $x=-3.0\sim4.0$ m、 $y=0.5, 1.0, 1.5$ m において $x=-1.5\sim3.0$ m、それぞれ縦断方向に 0.5m 刻みで設定した (1ケース当たり 45点)。また、主要なケースについては樹林帯周辺をより詳細に測定した。さらに、写真、ビデオによる流況観察を行った。サーボ式水位計による水面変動の計測も行ったが、樹林帯周辺での周期的な変動は把握できなかった。

(2) 樹林帯の条件

模型と実現象の相似則を成り立たせるためには、樹木の密度 (流水の障害の大きさ)、抗力係数や投影面積等の関係が相似則を満たさなければならない。樹林帯の力学的相似則は次のように考える。

control volume 内の水の重力と樹木群による抵抗の釣り合い式から、エネルギー勾配 I と樹林帯内の流速 v は以下のように表される。

$$v = KI^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{naC_D/2g}} \quad (2)$$

ここに、 K は透過係数 (樹木抵抗の指標で大きいほど流れ易い、単位 m/s)、 n は control volume 内の樹木の本数、 a は樹木一本の投影面積、 C_D は抗力係数 (樹木の形状や密生度で変化する) である。以下において樹林の流体に対する障害の大きさの指標として透過係数 K を用いることとする。

実験で用いる樹木模型として、直径 7mm の円柱に人工芝で作成した枝を付けたもの (枝あり模型)、直径 7mm の円柱 (枝なし模型) を用い、水路中央に設置して樹林帯とした。その2種類の樹木模型を、横断・縦断方向樹木間隔 7cm、8cm、9cm (格子状配列) 及び 16cm (千鳥状配列) として設置した。また、横断方向の本数は 22 本、16 本、12 本、6 本、流下方向の本数は 3 本、4 本、5 本に変化させ、樹林帯の幅と奥行きを変化させた。

枝なし模型 (樹木間隔 8cm) は、抗力係数 C_D が縮尺によって変わらないとすると、縮尺 1/30 のときの実寸法で直径 0.21m の円柱 (幹だけの樹木) が 1m² あたり約 0.17 本生えている樹林に相当すると考えられる。図-3 は樹林による抵抗を透過係数 K で表し

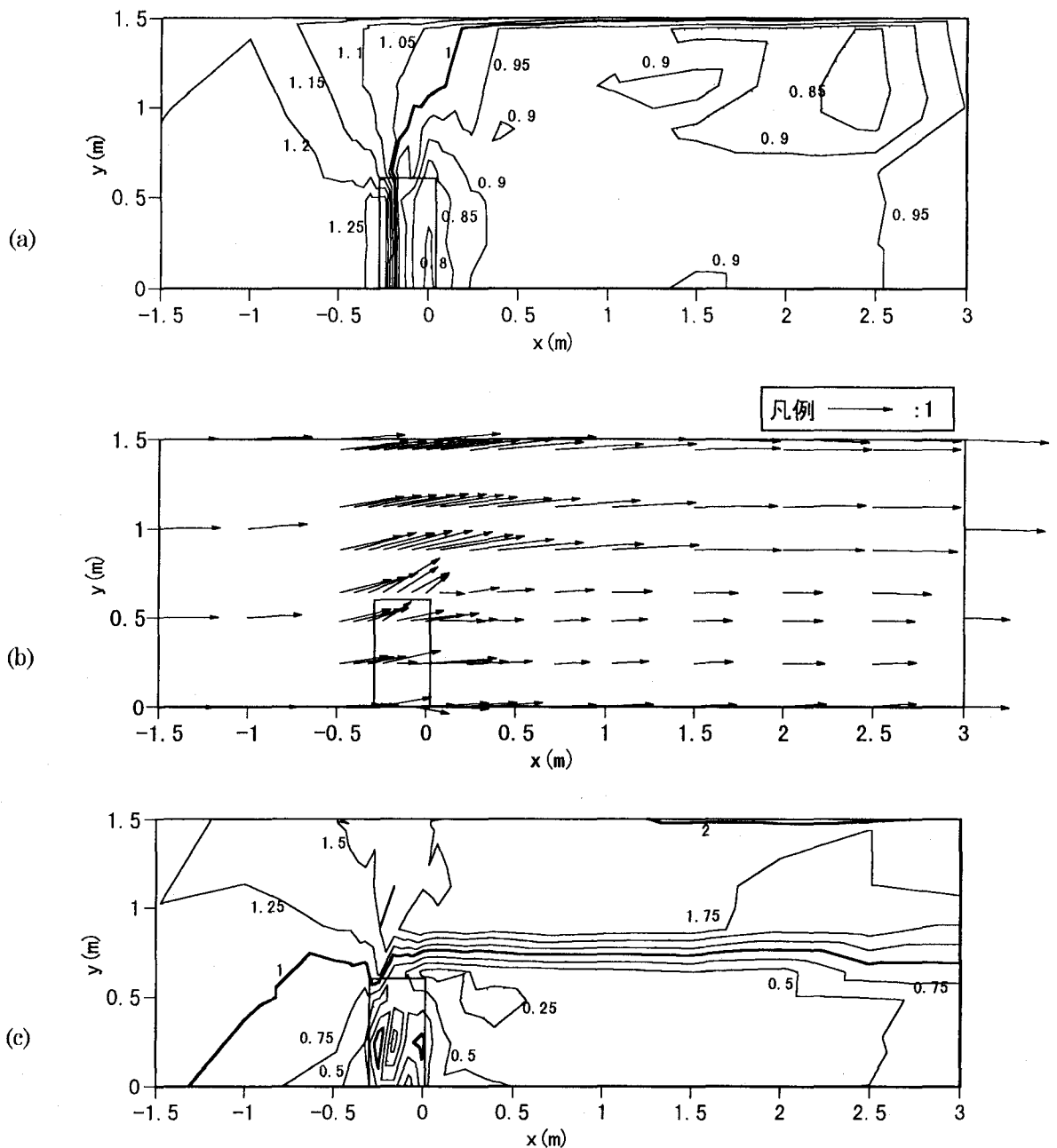


図-4 実験結果 (枝あり模型・8cm 間隔格子状配列・樹林帯幅 16 本×奥行き 4 本、流量条件 I)

- (a) 無次元水深 h/h_0 コンター図 (□ は樹林帯部)
 (b) 無次元流速 u/u_0 ベクトル図
 (c) 無次元流体力 $u^2h/u_0^2h_0$ コンター図

た場合の K と水深 h の関係の測定値である (樹木間隔 8cm、格子状配列) が、枝あり模型は鉛直方向に不均一に枝がついているため水深により K は変化し、水深 10cm では約 1.3m/s (模型縮尺 1/30 の実寸法では約 7.1m/s) である。この値は抗力係数 $C_D=1.0$ とした場合の直径 0.2m の円柱 (幹だけの樹木) が 1m² あたりの 1.94 本生えている樹林相当である。

(3) 樹林帯の被害軽減効果の指標

氾濫流による家屋への被害は、氾濫流の流体力 u^2h (流体の運動量束) に関係するという報告^{2),3)}があり、1986 年 8 月の吉田川の氾濫の際の調査²⁾では、 u^2h

が 1.5m³/s² を越えると家屋に何らかの被害を生じ、2.5m³/s² を越えると居住不可能となる家屋が出現すると報告している。また、1983 年 7 月山陰豪雨による三隅川の氾濫の際の調査³⁾では、氾濫流の u^2h は最大 35m³/s² 程度に及び、流失家屋の方が、全壊家屋よりも流体力の平均値が大きかったと述べている。

実際の洪水氾濫時の被害程度には、家屋の構造や築後年数、流下物の影響など様々な要因が関係しており、被害発生限界の流体力を明確にすることは困難である。また、家屋群が存在する場合には、家屋の抵抗が氾濫流況に影響を及ぼし、個々の家屋に加わる抗力は家屋の密度や配置などによって変化する

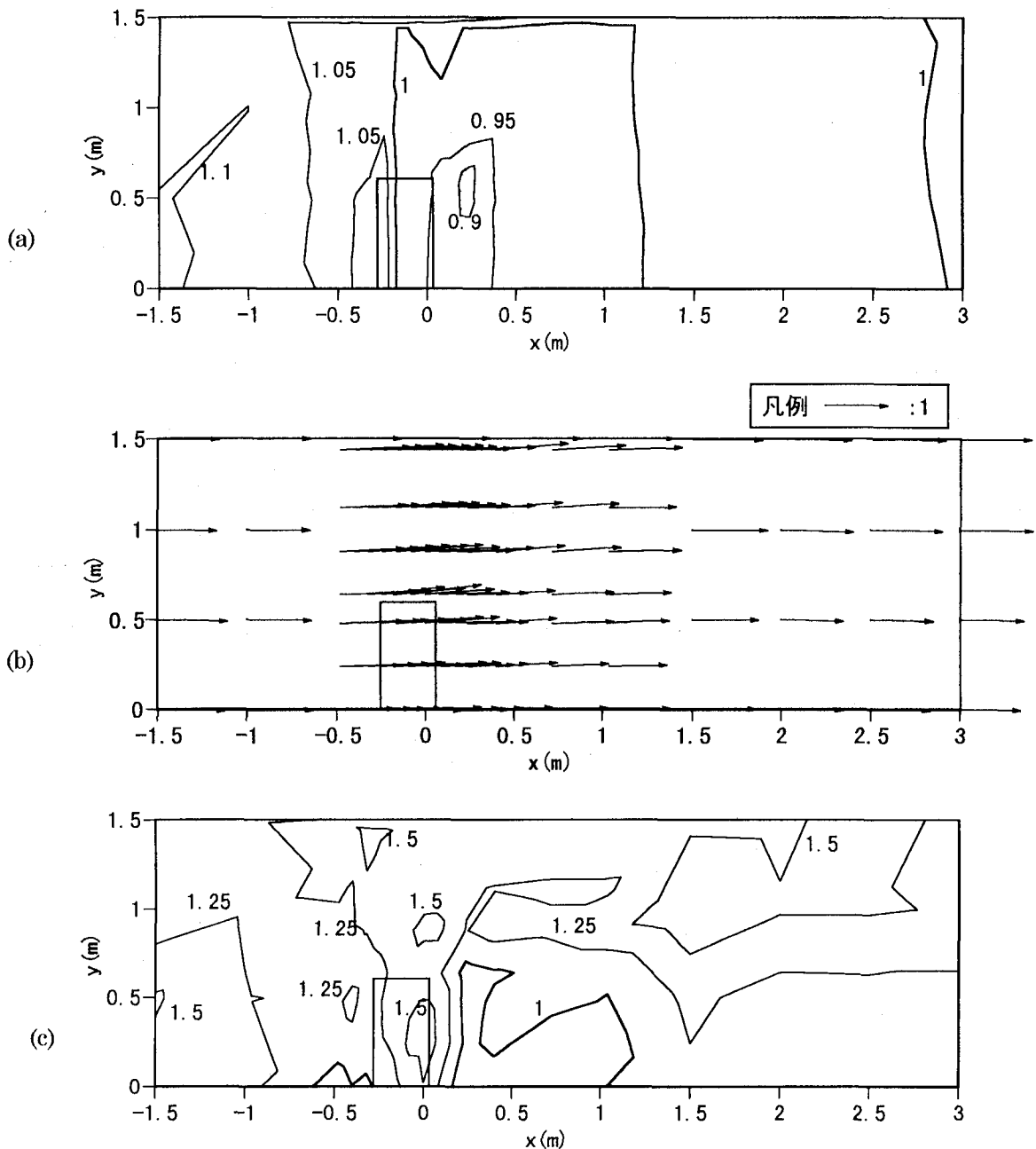


図-5 実験結果 (枝なし模型・8cm 間隔格子状配列・樹林帯幅 16 本×奥行き 4 本、流量条件 I)

(a) 無次元水深 h/h_0 コンター図 (□ は樹林帯部)

(b) 無次元流速 u/u_0 ベクトル図

(c) 無次元流体力 $u^2h/u_0^2h_0$ コンター図

ことが知られており (例えば、福岡ら 4)、家屋を考慮しない場合の氾濫流の u^2h は、実際に家屋に作用する流体力を表しているものではない。しかし、樹林帯が氾濫被害発生可能性に及ぼす影響の比較のためには、家屋を考慮しない場合の氾濫流の u^2h を指標として用いるのは妥当と考えられる。本論文では、便宜的に u^2h を流体力と称することとする。なお、家屋に実際に生じる被害を定量化する場合には、家屋が存在する条件での氾濫流況の検討が必要である。

今回設定した 2 つの流量条件を 1/30 縮尺で現地換算すると、樹林帯のない等流状態では

$u^2h=29.8\text{m}^3/\text{s}^2$ (流量条件 I)、 $u^2h=7.3\text{m}^3/\text{s}^2$ (流量条件 II) となる。

3. 実験結果

(1) 樹林帯による効果の平面分布

図-4(a)、図-4(b)、図-4(c)はそれぞれ流量条件 I、枝あり模型、樹木間隔 8cm の格子状配列、樹林帯の幅 16 本、奥行き 4 本の水深コンター図、流速ベクトル図、コンター図である。これらの図の値は樹林帯がない場合の同流量での等流の値で無次元化しており、水路横断方向に半分の領域だけ表示している。

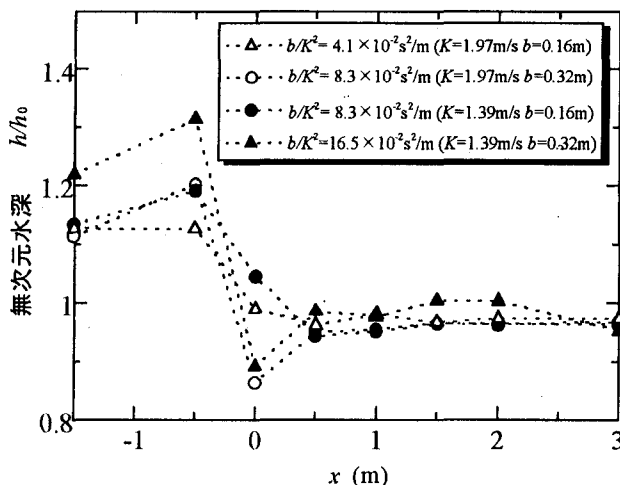


図-6 $y=0$ での無次元水深 h/h_0 縦断分布 (樹林帯幅 16 本)

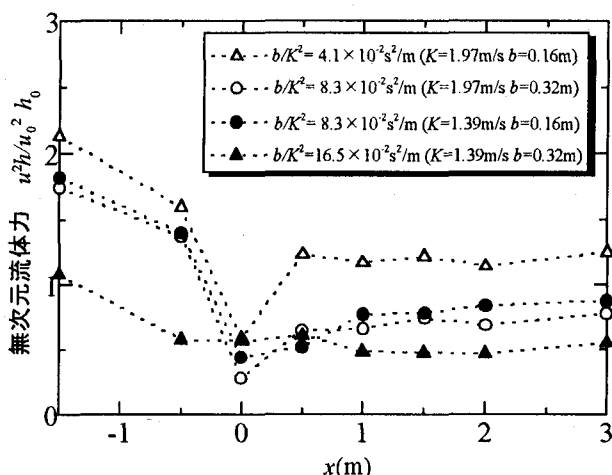


図-7 $y=0$ での無次元流体力 $u^2 h / u_0^2 h_0$ 縦断分布 (樹林帯幅 16 本)

図-4(a)の水深分布に着目すると、樹林帯より上流側では樹林帯の流下阻害による堰上げにより樹林帯がない場合の等流水深以上となっており、樹林帯より下流側では等流水深以下となり流下とともに低下して平面水路下流端(段落ち)に漸近している。樹林帯幅よりも内側の水深の縦断変化は、樹林帯直上流で極大値をとり樹林帯内で急激に低下して樹林帯直下流で極小値となり、その後少し回復するような変化を示している。樹林帯直下流での水深の極小値は、急激な水深変化による縮流の効果であると考えられる。一方、樹林帯幅より外側では、樹林帯上流側の堰上げられた水深から樹林帯後方の低水深へと滑らかに変化している。

図-4(b)の流速ベクトルより、樹林帯後流部(樹林帯幅の内側)では流速が減少しており、反対に樹林帯幅の外側では流速が増加しているのが分かる。流下に伴い樹林帯幅内外の流速差は減少している。また、樹林帯上流部では堰上げから外側へと向かう強い流れがみられる。

図-4(c)の流体力分布から分かるとおり、樹林帯

による流体力の低減域(すなわち家屋被災の危険性低下すると推定される領域)が樹林帯上流部から樹林帯背後にかけて広がっている。しかし、樹林帯幅の外側では堰上げから外に向かう流れにより流体力が増大しており、家屋が存在する場合の被災危険性が、かえって高くなると推定される。ただし、今回実験を行った水路は横断方向幅が 5.2m であり、樹林帯の外側での流体力の上昇が大きく出ていることを考慮する必要がある。なお、流体力の最小値は樹林帯左右端の樹林帯よりやや下流側で生じているが、これは樹林帯からの剥離による死水域である。

図-5 は、図-4 と同条件で樹木模型のみを枝なし模型に変えた場合の結果である。枝あり模型を用いた場合よりも透過係数 K が大きく、流れの阻害が小さい樹林帯と考えることができる。

図-5(a)の水深分布をみると、図-4(a)の枝ありの場合と比較して樹林帯上流側での堰上げが小さく、樹林帯下流側での水深の回復が早くなっている。

図-5(b)の流速ベクトルを図-4(b)の枝ありの場合と比較すると、枝なしの場合には堰上げから樹林帯外側へと向かう流れが弱く、樹林帯下流側での樹林帯幅内外の流速差も小さくなっている。

図-5(c)の流体力コンターを図-4(c)の枝ありの場合と比較すると、樹林帯背後の流体力低減域の面積が非常に小さくなっているとともに、低下の度合いも小さくなっている。また、樹林帯幅よりも外側での流体力の増大も小さい。この結果は、枝なし模型樹林は流れの阻害が小さい(透過係数 K が大きい)ために樹林帯の抵抗による運動量損失が小さいことだけでなく、氾濫流の阻害により生じる外向きの流れが弱いため、樹林帯幅の外側へと運動量を運ぶ効果が小さいことを表している。

以上から、防災樹林帯背後での流体力低減効果には、樹木の抵抗による運動量損失の効果とともに、氾濫流の阻害により生じる外向きの流れが樹林帯幅の外側へと運動量を運ぶ効果が働いていることが分かる。

(2) 樹林帯の諸元による効果の違い

防災樹林帯を氾濫流制御に適用するためには、その効果(氾濫流の流体力の低下量と低下する範囲)と樹林帯の諸元(透過係数 K 等で表せる流れの阻害の大きさ、奥行き、幅、形状)および氾濫外力の規模等の関係を明確にする必要がある。

図-4 が示すように、樹林帯後流部の流体力低下域の幅はほぼ樹林帯幅に等しくなっており、樹林帯幅よりも内側では横断方向にほぼ一様な流体力の低下がみられた(但し図-5 のように樹林帯による流れの阻害が小さいケースでは流体力低減域効果が小さく、流体力低下域、低下量ともに明確ではない。この原因の一つには測定精度の問題もある)。樹林帯幅が異なると堰上げの大きさや樹林帯幅内外の流速差に

よる混合の影響が異なるため、流体力の低下量、低下が及ぶ下流側の距離などに違いが出ると考えられるが、今回行った実験では樹林帯幅の異なるケース間の比較ではその点を明確に捉えることは出来なかった。

次に、樹林帯の奥行き、流れの阻害の大きさと流体力の軽減の関係について考察する。樹林帯による流体力の低減量が樹林帯の抵抗により失われる運動量であると考え、樹林帯後方で流体力の低下量は樹林帯内での単位流下距離の樹林帯の抵抗の大きさ ($1/K^2$ に比例) 及び樹林帯奥行き長さ b に関係すると考えられる。したがって、それらの積である b/K^2 をパラメータとして測定結果を比較してみた。なお、水深によって変化する枝付き模型の K には水深 9cm での値を用い、樹林帯奥行き長さ b = (樹木間隔 $\times$ 奥行き本数) とした。

図-6 は横断方向中心 ($y=0m$) での無次元水深 h/h_0 の縦断分布を、樹林帯幅が同じ 4 ケース (流量条件 I) について示したものである。水深は樹林帯上流側で堰上げられ、樹林帯内で急低下し、樹林帯後流部ではほぼ一定となって流下する。また、樹林帯より上流側での堰上げの大きさは b/K^2 が大きいほど大きくなっている。

図-7 は横断方向中心 ($y=0m$) での無次元流体力 $u^2 h/u_0^2 h_0$ の縦断分布を図-6 同様に示したものである。樹林帯より上流側では b/K^2 が小さいほど無次元流体力が増加している。また、各ケースとも $x=1m$ より下流側での無次元流体力はほぼ一定となっており、 b/K^2 が大きいほど無次元流体力は小さい値となっている。

樹林帯による流体力の低下には b/K^2 と関係があると考えられる。しかし、 b/K^2 の増加による堰上げの大きさの増加および樹林帯外側へ向かう流れの強化、樹林帯奥行き長さ b の増加による樹林帯内単位流下

距離あたりの運動量損失の減少などの効果のため、無次元流体力の低減量と b/K^2 の関係は線形ではない。

4. おわりに

防災樹林帯による効果 (樹林帯背後での流体力の低減面積、低減の度合い) には樹林帯の流れに対する阻害の大きさ (透過係数 K) による違いがみられた。また、樹林帯背後の運動量の低減量には、透過係数 K 、樹林帯奥行き長さ b との関係がみられた。しかし、樹林帯背後での運動量の低下には、樹林帯の流れの阻害の大きさ (透過係数 K)、奥行き以外にも、樹林帯幅、樹林帯形状、氾濫外力等が影響を及ぼしており、それら個々の要素による効果の違いを定量的に把握していく必要がある。

参考文献

- 1) 福岡捷二, 藤田光一, 平林桂, 坂野章: 樹木群の流水抵抗について, 第 31 回水理講演会論文集, pp.335-340, 1987.2.
- 2) 佐藤智, 今村文彦, 首藤伸夫: 洪水氾濫の数値計算および家屋被害について—8610 号台風による吉田川の場合—, 第 33 回水理講演会論文集, pp.331-336, 1989.2.
- 3) 河田恵昭・中川一: 三隅川の洪水災害—洪水氾濫と家屋の被害—, 京大防災研年報, 27B-2, pp.179-196, 1984.4.
- 4) 福岡捷二, 川島幹雄, 横山洋, 水口雅教: 家屋群に作用する氾濫流の流体力に関する実験的研究, 水工学論文集 第 41 巻, pp.693-698, 1997.2.

(1997. 9. 30 受付)