

沙流川2003年8月洪水における 樹木の倒伏状況から算定される流速

FLOW VELOCITY CALCULATED FROM UPROOTED TREES AT THE AUGUST 2003 FLOOD OF SARU RIVER

油川 曜佑¹・渡邊 康玄²・阿部 修也³

Yousuke ABURAKAWA, Yasuharu WATANABE and Shuya ABE

¹ 正会員 修士 (地球環境科学) (株)北開水工コンサルタント (〒062-0052 札幌市豊平区月寒東2条20丁目5番10号)

² 正会員 工博 (独)北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

³ 正会員 (独)北海道開発土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号)

Typhoon No. 10, which struck Hokkaido Prefecture in August 2003, caused serious flood damage on the Saru River, which is in the easternmost part of the Iburi district. Driftwood washed into the river in great quantity. In this research, the flow velocity during the flood on the Saru River was estimated by measuring the critical turning moment at which trees are uprooted and applying it to partly uprooted trees. We also investigated how the influence of the tree crown on water flow depends on the tree crown form, and the relationship between the tree height and the bending arc. Although the calculated flow velocities did not closely correlate with values obtained from measurements, the calculated values can still serve as commonsense values that represent the flow conditions during the flood to some degree.

Key Words: tree crown form, critical turning moment, driftwood, the Saru river

1. はじめに

2003年8月3日に発生した台風10号は、北海道胆振地方の東端に位置する沙流川の洪水を引き起こし深刻な被害を与えた。これまでに、土木学会水工学委員会は調査団を編成しあらゆる側面からの解析を進めてきた¹⁾。その中で渡邊らは、流木の挙動と影響を調査し、この大洪水により発生した当該河川流域における山間部等からの大量の流木の状況を把握するため、河畔林の倒伏状況、流木の堆積分布や堆積量、さらに河道内での流木の発生源等について検討を行った。その結果沙流川河口から二風谷ダムまでの区間において、上流域も含め河道内や河道付近から流出したと推定される河畔性樹種の流木が全体の20%を占めており、河畔林も流木の発生源の一つであることを示した²⁾。

流木は洪水時の流水の障害を招いたり、橋脚等の河川構造物に引っ掛かり大きな流水抵抗がかかることによる構造物の破損を生じさせる場合がある。このため河畔林の流木流出対策を行うことは、洪水被害の低減につながり、今後の河川環境を踏まえた河川整備や河川管理を行う上で必要不可欠な事項となっている。

洪水時の流況を把握する一つとして洪水による樹木の倒伏から流速を算定する手法が提案されている³⁾。本論文では洪水ピーク時における流況が不明であった2003年の沙流川洪水において、河畔林と洪水の関係を把握するため洪水直後に河畔林の状態を調査した結果を報告するものである。なお、現地調査結果を利用し流水に大きな影響を与える樹木の樹冠部の形状についても検討している。

2. 標準地調査

2.1 調査範囲の概要

洪水後の調査を実施した箇所は、沙流川中流(河口から14.5kmの地点)の堤外地右岸に位置する。河道から高水敷にかけて、河畔林が低木林～亜高木林～高木林と推移しており、流域の河畔植生を代表する構造を呈している。高木層はオノエヤナギ、エゾノキヌヤナギが優占し、エゾノカワヤナギ、ハリエンジュが僅かに混交する。低木～亜高木層は上記樹種のほかネコヤナギ、タチヤナギ等も多く出現する。この点から河畔林の構造がこの地域では標準的であると考えられる。しかしながら、一帯を

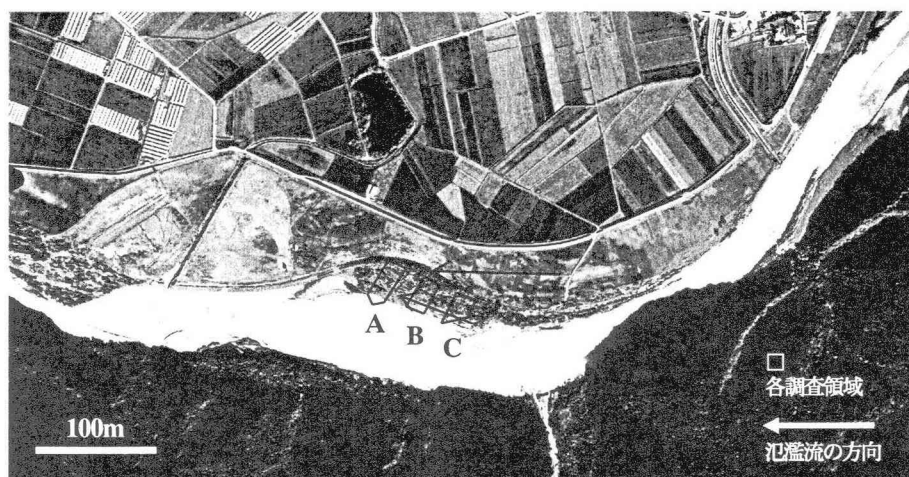


写真-1 標準地全域状況

標準地とするには調査量が膨大となるため、河畔林を横断方向に50m縦断方向に25mの帯状に区切り、このうち写真-1に示したように下流から領域A、領域B、領域Cとし3帯計13,200㎡を調査範囲とした。

2.2 毎木調査

毎木調査の対象としたのは、3領域で1,971本である。この地点の平均立木密度は1.49本/10㎡である。毎木調査により明らかになった標準地の河畔林の各要素について、以下に記す。

① 樹種

ヤナギ類のほかに確認できたものはハリエンジュ、ケヤマハンノキの2種であるが、全体に対する割合が2%と小さい。

② 胸高直径

図-1に示したように4~7cmの個体が多く、平均は7.2cmである。

③ 樹高

図-2に示したように樹高は4~6mのものが多く、平均で6.6mである。河道に近い箇所ほど、また上流側の領域ほど樹高の低い傾向が見られる。

④ 倒伏傾斜角度・倒伏方向

図-3に示したように洪水による倒伏の角度は、50°~75°の範囲が多く、次いで15°~45°の順となっている。河道に近い箇所ほど、また上流側のブロックほど倒伏角度の大きいものが多く、倒伏方向も一定の方向を示している傾向が見られる。ただし、ここでの倒伏角度とは倒伏前後における地表面との角度の差である。

2.4 洪水痕跡調査

河畔林内には、幹枝にゴミや草わら等の付着物が多く確認された。毎木調査時に付着箇所の最高位を記録し洪水時の最高水位を想定した。このとき、隣接する樹木同士で洪水痕跡に差があるものが多く見られた。これは、痕跡が小さい樹木は洪水ピーク水位生起後に付着したも

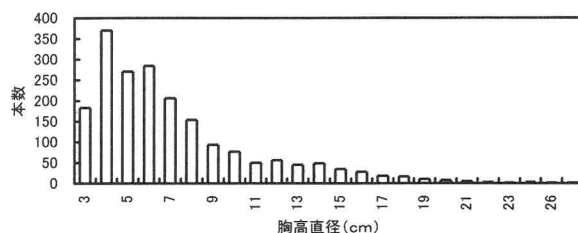


図-1 胸高直径別本数

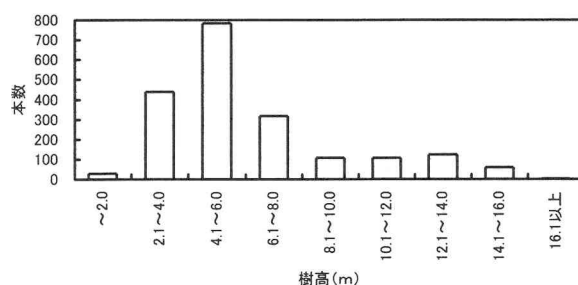


図-2 樹高別本数

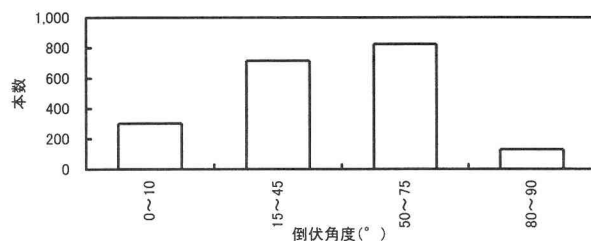


図-3 倒伏角度別本数

のと考え、本イベントでは標高で25~26m、標準地の地表からピーク水深が約6m程度の規模の洪水が生じたと判断した。

2.5 樹幹解析

河畔林の成長の程度を把握することを目的に、6本の立木を伐採し、樹高1m毎に年輪数と年輪幅を計測して樹幹解析を試みた。調査対象木は調査範囲の河畔林の主な構成樹種であるヤナギ類、特にオノエヤナギ、エゾキヌヤナギの2種とした。調査結果を、図-4, 5に示す。図-4には全国7河川に植生するヤナギの樹齢と樹高の関係を

併記した⁵⁾。調査区間では数年生以上の樹木がおおまかに年に1cmの肥大成長を示している。全国の調査結果と比較してこの地点でのヤナギの成長は早いことを示している。また調査木は全て先駆性の樹種であるが、成長の速さは樹種よりも個体差に因るものが大きい結果となった。毎木調査の平均樹高が6~7m、平均胸高直径が6~7cmであることを勘案すると、標準地の河畔林は10年生前後の立木が多いことがわかる。

3. 測定結果

3.1 倒伏試験調査方法

洪水時の流速を推定することを目的として、代表箇所6本の樹木を、樹木の根元から1.2mの高さにワイヤーを張り、油圧ショベルで反力をとった。続いて中間部に荷重計およびレバールックを取り付け荷重をかけていき、引き倒し荷重を計測して倒伏限界モーメントを求めた。また、ピーク時の傾き距離から倒伏角度を求めるため、地上高0.25mと1.0mに変位計をセットした。図-6に最大荷重時での樹木の倒伏角度との関係を示した。この結果から倒伏60°以上を完全倒伏、それ未満を未倒伏とした。

3.2 引き倒し試験結果と回帰式の算定

引き倒し試験を行った結果、樹木の直径(d)と倒伏限界モーメント(M_c)に式(1)で得られる回帰式の関係を見出した。

$$M_c = 1.2 \times 10^6 d^2 \quad (1)$$

ただし樹種、土質等樹径以外の要素を無視し最小二乗法により求めている。これまでも同様な方法で試験が行われてきており、図-7に1992年8月鶴川洪水後の結果を併記した⁴⁾。今回の標準地での樹木が以前行った試験地と比較し倒伏しにくいことがわかる。この理由については生育地の土壌等の影響が存在していると考えられるがそれについては今後の課題としたい。

3.4 樹木の倒伏パターン分けならびに倒伏時の流速推定

本研究では洪水流によって発生した樹木の倒伏という実現象の結果から、どのような流れで樹木の倒伏が生じたかを推定することとした。今回の洪水ではどの時点で樹木の倒伏が発生したかは不明である。このため樹木が倒伏した時間が異なれば、倒伏から推定される流速の生じた時間も異なる。洪水は時間的にも場所的にも複雑な現象の複合であり、倒伏状況が洪水後の状況であることを考え合わせると、得られる結果は概略なものとなる。しかし、洪水時の現象に関する知見は未だ十分とは言えないことから今回の洪水で生じた現象の解明の第一歩として、このときの洪水のピーク時の流れが定常で流れたものとして検討することとした。樹木の倒伏には樹高と水深との関係で次の3パターンが想定される。そのパタ

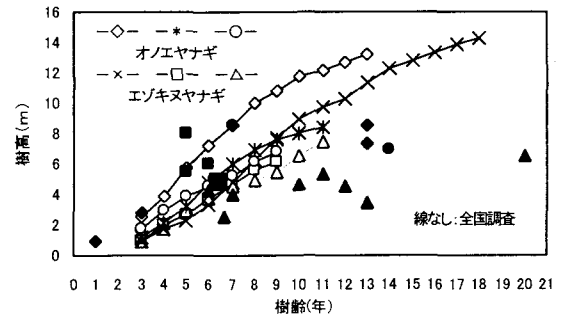


図-4 樹齢と樹高の関係

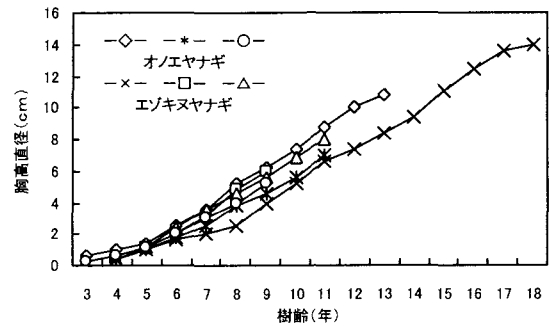


図-5 樹齢と胸高直径の関係

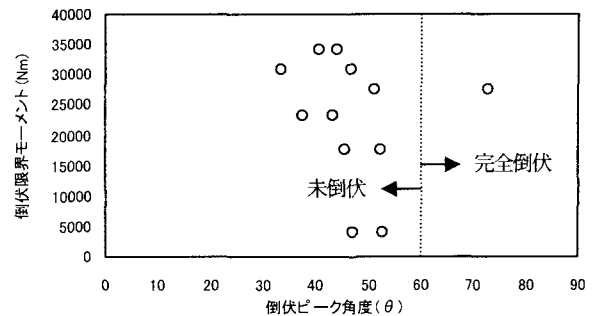


図-6 倒伏ピーク角度とモーメントの関係

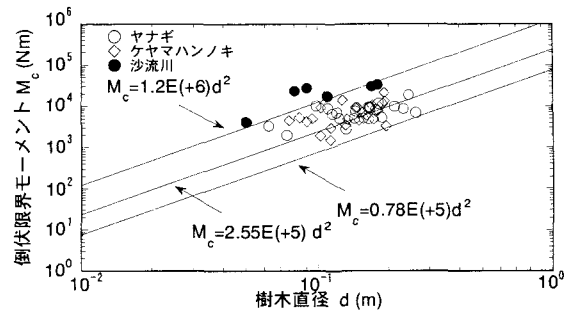


図-7 樹木直径と倒伏限界モーメントの関係

ーンならびにそのときの流速の推定式について記述する。ただし解析において用いた各記号は h ; 水深、 h_0 ; 下枝長さ、 h_1 ; 樹高である。また、水深方向の流速分布には洪水時であることを考え1/7乗則を用いている³⁾。

パターン1) 樹木の樹幹部分のみが浸水しているとき ($h_0 > h$)

このとき流水が幹部のみに作用することから倒伏モーメントは式(2)で与えられる³⁾。

$$M_d = \frac{2}{7} \rho C_d u^2 d h_0^2 \quad (2)$$

このときの倒伏試験結果から、推定流速は式(1)(2)より式(3)で与えることが可能である。

$$u = \left\{ (1.2 \times 10^6) / \left(\frac{2}{7} \rho C_d d h_0^2 \right) \right\} \quad (3)$$

パターン2) 樹木の樹幹部分と樹冠の一部が浸水しているとき ($h_0 < h < h_1$)

このとき流水が幹部と樹冠部に作用するため、それらの合成モーメントを用いる必要がある。ここで樹幹に作用するモーメントは樹冠部に作用するモーメントを樹冠部の総投影面積 A_w とすると式(4)、(5)として推定する手法が報告されている⁵⁾。

$$A_w = N \times d \times l \quad (4)$$

$$A_{wl} = A_w \times (h - h_0) / (h_1 - h_0) \quad (5)$$

ここで N ；計画高水位以下の枝の本数、 d ；枝の平均直径、 l ；枝1本の長さである。今回の調査では洪水水位以下の枝の本数、枝の平均直径、枝1本の長さの測定は測定木が多数であり困難であったため行っていない。そこで、以下の方法で樹冠部の構造を把握することとした。すなわち各領域に残存するその箇所を代表すると考えられる樹木を選定し模式図を作成し、樹冠部構造と樹高との関係を把握することを試みた。

その結果、樹高により樹冠部構造が変化することが確認された。図-8にその平均構造の相違を示した。ただしこれらは樹冠部高さ、最大枝張幅で無次元化した後、樹冠部の右部位、左部位の全てについて平均したものである。この関係より樹高と樹冠部構造に相関があると考えられる。ここで代表樹木として選定した全樹木の樹冠部構造を対象に式(6)を用いてフーリエ級数展開を行い、無次元樹冠幅の関数 $f(\alpha)$ を三角関数の和で表現した。

$$f(\alpha) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos k\pi\alpha + b_k \sin k\pi\alpha) \quad (6)$$

ここで α ；無次元樹冠部高である。このとき得られた振幅値と樹高の関係を図-9に示した。これより式(6)の関数形はほぼ振幅値 b_1, b_2, b_3 の3波で表現できると考えられる。これより樹高と振幅には式(7)(8)(9)の関係があることが見出された。

$$b_1 = -0.0035h_1 + 0.5778 \quad (7)$$

$$b_2 = 0.003h_1 + 0.0095 \quad (8)$$

$$b_3 = -0.0029h_1 + 0.1123 \quad (9)$$

これらの結果および実測への換算から、抗力の作用幅の一般式 $f(z)$ は式(10)として表すことができる。

$$f(z) = \sum_{k=1}^3 \left\{ b_k \sin \frac{k\pi}{h_1 - h_0} (z - h_0) \right\} s \quad (10)$$

ここで s ；枝張長、 z ；河床からの高さである。式(10)を用いた値と各樹木の値を比較すると、平均相対

表-1 領域ごとの倒伏発生率

区分	全本数	case1	case2	case3
領域A	203	4.9	30.0	65.0
領域B	332	0.3	19.6	83.0
領域C	326	0.61	13.2	82.5

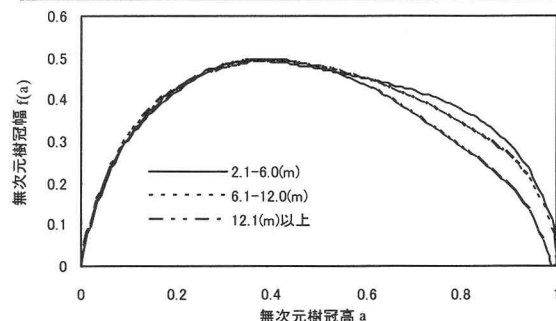


図-8 樹高別の樹冠部構造の比較

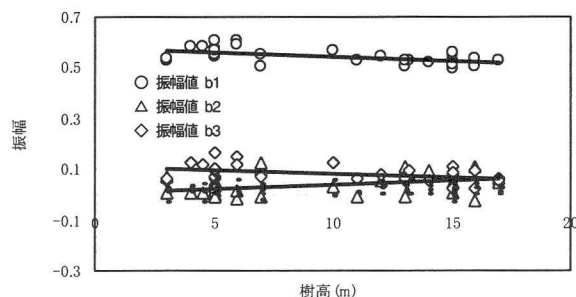


図-9 樹高と振幅との関係



写真-2 倒伏樹木の状況



写真-3 倒伏しなかった高木

誤差4.7%、最小0.5%、最大10.7%となった。この関係より、樹冠部分が受けるモーメントは式(11)で表すことができる。

$$Mc = \frac{64}{49} \rho C_d u^2 h^{\frac{2}{7}} s \int_{h_0}^h z^{\frac{9}{7}} \sum_{k=1}^3 b_k \sin \frac{k\pi}{h_1 - h_0} (z - h_0) dz \quad (11)$$

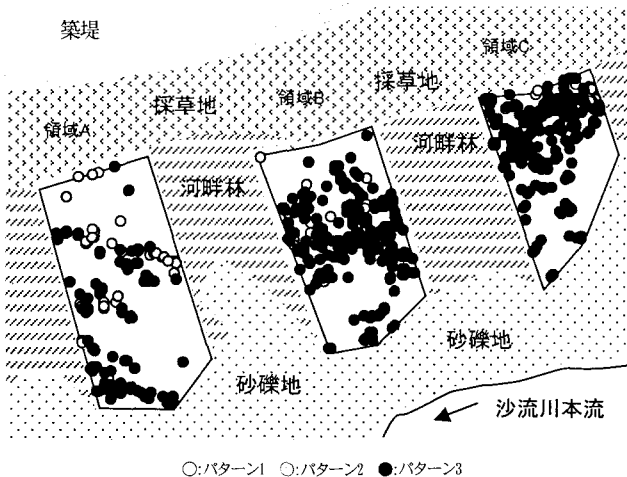


図-10(a) 樹木倒伏分布図 (倒伏角度60°以上)

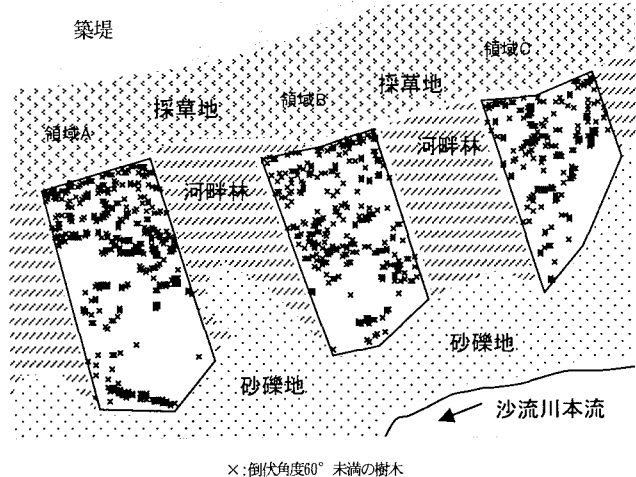


図-11(a) 樹木倒伏分布図 (倒伏角度60°未満)

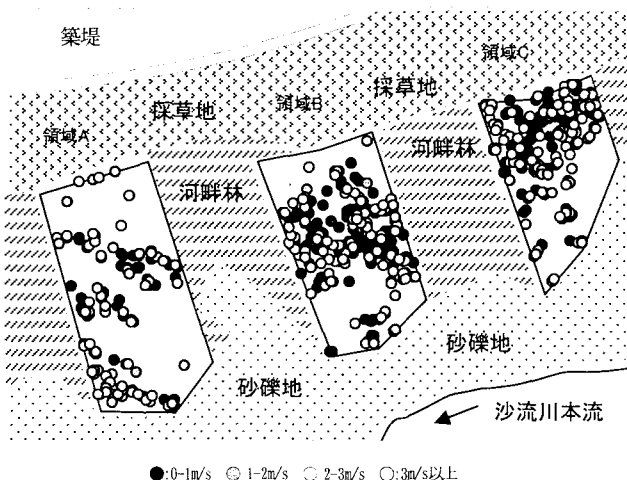


図-10(b) 樹木倒伏生起流速分布図 (倒伏角度60°以上)

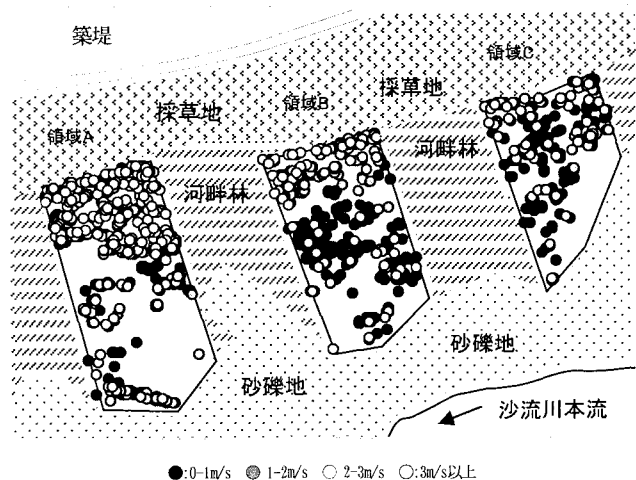


図-11(b) 流速分布図 (倒伏角度60°未満)

これより推定限界流速式は式(12)で与えることが可能である。

$$u = \left(\frac{1.2 \times 10^6 d^2}{\frac{64}{49} \rho C_d h^{-\frac{3}{2}} s \int_{h_0}^h z^{\frac{9}{2}} \sum_{k=0}^3 b_k \sin \frac{k\pi}{h_1 - h_0} (z - h_0) dz \frac{2}{7} \rho C_d h_0^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

パターン3) 樹木全体が浸水しているとき ($h > h_l$)

パターン2同様、合成モーメントを用いる必要がある。このとき樹冠部全てが完水しているため、水深(h)を樹高(h_l)に置き換えることで推定流速式を式(12)で表すことが可能である。

3.5 樹木倒伏パターンの分類

標準地の毎木調査の対象である1971本について樹高と水深との関係から倒伏パターンで分類した。ここで、樹木の倒伏角度に着目する。図-3に示した通り、全ての樹木が完全に倒伏してはいない。対象領域ごとの倒伏発生率は表-1に示した通りである。これらは樹高の存在比を反映している。すなわち、領域C、領域Bでは低木が多

く繁茂しているためパターン3の割合が圧倒的に高い。一方で領域Aでは、築堤近傍で高木が多いためパターン1,2の割合が他と比較し高いと考えられる。

完全倒伏した樹木の分布図を図-10(a)で示した。また図-11(a)は完全倒伏していない樹木の位置を示した。さらに倒伏した樹木ならび、しなかった樹木の例をそれぞれ写真-2,3に示した。

3.6 流速分布

3.4において各倒伏パターン別による流速算定式を用いて全樹木の倒伏生起推定流速を求めた。ここで樹幹部まで浸水し倒伏すると想定したパターン2,3での樹冠部モーメント算定に用いる抵抗係数値について、林らの知見⁹⁾、また著者らの実際に植生するヤナギ樹木を用いた水理実験より得られた値 $C_d=0.62$ を用いた⁷⁾。また幹部の抵抗係数値は $C_d=1.2$ とした。しかし3.4で得られた各々の推定流速式は樹木が完全に倒伏するときのみに適用が可能であり倒伏が不十分ときには妥当な値を得ることができない。ゆえに、図-6で示されたように本解析では倒伏角度60°以上の樹木を完全倒伏とした。この時対象となるのは630本である。

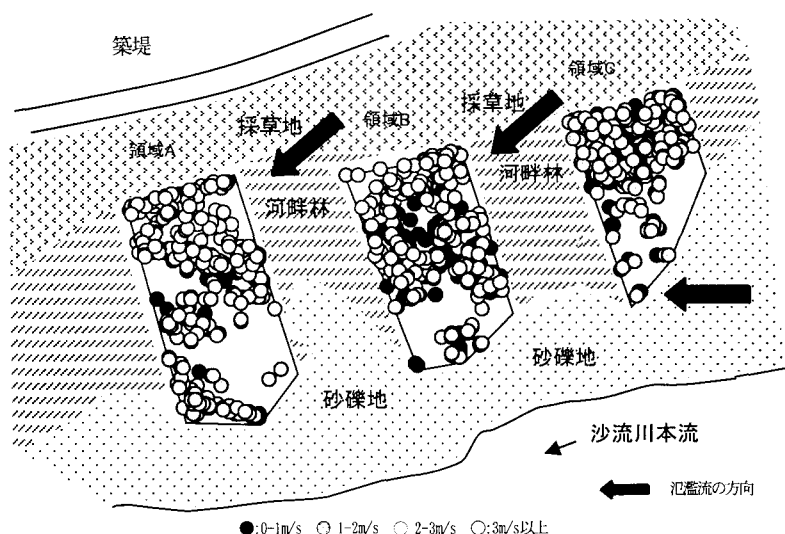


図-12 流速分布図

ここで、完全倒伏した樹木から算定される流速を u_1 、完全倒伏していない樹木から算定される流速を u_2 とし、実際に流下した流速を u_0 とすると $u_1 < u_0 < u_2$ になる関係が存在することになる。

図-10(b)に完全倒伏したと判断されるすなわち倒伏角度 60° 以上の樹木を対象とした倒伏生起流速分布図を示した。図-11(b)に完全倒伏していないと判断されるすなわち倒伏角度 60° 未満の樹木を対象とした流速分布図を示した。図-11(b)については実際倒伏していないのにも関わらず倒伏したとしているため、算定された流速は実際よりも大きい。図-10(b)と図-11(b)との比較から実際に生じたと考えられる流速分布図として図-12が得られた。これより各領域ごとの流速分布に違いが見られることがわかる。領域Cでは全域を通じてほぼ同じ流速 $1\sim 2\text{m/s}$ を生じたと判断される。一方A、Bでは低水路から遠ざかるにつれ流速が速くなる傾向が見られる。低水路付近では $1\sim 2\text{m/s}$ 、高水敷側で $2\sim 3\text{m/s}$ となった。一般に高水敷の流れが低水路内の流れに比べ遅くなるが、領域A、Bでは逆の現象が生じたことになる。このことについてはさらに詳細な検討が必要であるが樹木の倒伏方向から以下のように考えることができる。すなわち写真-1に示された通り、今回の洪水では河畔林を縦断する流れと採草地を縦断する流れが存在するが、採草地上の流れはこの地点の直下流で堤防に接近しており、流れが強制的に河畔林方向へ向けられることとなっている。このことから領域Aの採草地側では採草地を流下してきた流速の大きな流れが流入することとなり今回の結果となったと判断される。

4. まとめ

沙流川で生じた既往最大の洪水により大量の流木が発生した。河畔林は、上流から流下する流木を捕捉した自分自身も流木となる場合も存在した。洪水時の流況

が不明であったことから、本研究では河畔林の倒伏状況から倒伏限界モーメント測定値との比較による流速の推定を行った。その流速は、具体的に観測値と比較されていないが常識的な値となっており、ある程度洪水時の流況を再現できたものと判断している。

今回取り扱った現象は非常に複雑であり、現象解明には2次元流況計算による数値解析なども必要となる。今後、それらの解析結果を合わせることにより、生じた現象のより詳細な推定と考察が可能と考える。

謝辞：本論文における樹種等の調査については、(財)林業土木コンサルタントの協力を得た。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- (社)土木学会水工学委員会：平成15年台風10号北海道豪雨災害調査団報告会，2004
- 鈴木優一、渡邊康玄：出水に伴い発生した流木の影響，河川技術論文集第10，pp107-112，2004
- 渡邊康玄、市川嘉輝、井出康郎：洪水時における樹木の河道内倒伏限界，水工学論文集第40巻，1996。
- 渡邊康玄、橋本識秀、三谷修司：鶴川平成4年8月洪水における河道内樹木の倒伏調査，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集，pp181-188，1994
- リバーフロント整備センター：河川における樹木管理の手引き—河川区域内における樹木の伐採・植樹基準の解説，山海堂，pp170-171，1999
- 林建次郎、辰野正和、長林久夫、橋本晴行，単独樹木に作用する風力計，流体力の評価とその応用に関する研究論文集第2巻，pp96-103，2003
- 油川曜佑、鈴木優一、渡邊康玄：高水敷に生育するヤナギの抵抗，河川技術論文集第10巻，pp83-88，2004

(2004. 9. 30 受付)