

豊平川における出水時の樹木影響と 河畔林管理について

—H23.9出水における河畔林の倒伏解析—

札幌開発建設部 札幌河川事務所 計画課

○小川 康介
得能 泰治
大山 孝

豊平川は、河道が単調化するとともに攪乱力が低下し、それに伴って河道内がヤナギ林化する状況となっている。河道内の樹林化は、洪水流を阻害するとともに、流木化によって被害をもたらすことが懸念される。平成23年9月に発生した洪水では、局所洗掘などが発生するとともに、多くの樹木が倒伏した。この洪水時に観測された水位データ及び河道内樹木データベースを基礎情報として、出水時の流況解析、出水に対する樹木群の挙動分析の検討を行った。

本論文では、出水時の樹木影響の検討結果について報告を行うとともに、それらを考慮した適切な樹木管理の考え方について報告するものである。

キーワード：河畔林、災害情報、防災

1. 豊平川の樹林化状況

豊平川は全国の都市河川の中でも有数の急流河川であり、過去に幾度となく氾濫を繰り返してきた。このため人々の生命財産を守ることを目的に、様々な河川整備を進め治水上の安全性を高めてきた。その結果、従来は自由に蛇行氾濫していた豊平川が滯筋の固定化、局所的な深掘れを生じ、河道形状が単調化するとともに、洪水の頻度や強度の低下により攪乱力が低下し、それに伴って河道内がヤナギ林化することとなった。河道内のヤナギ林化は、さらに滯筋の固定化や局所的な深掘れ促進させるとともに、樹林化の拡大に拍車をかける結果となり、現在の豊平川では、ほぼ全川にわたって砂州が過度にヤナギ林化している状況となっている。

これにより、表-1に示すとおり、治水面に対して影響を及ぼすだけでなく、環境や利用、管理、景観についても課題を生じることとなっている。

表-1 河畔林に関する課題の整理

	課題
治水	<ul style="list-style-type: none"> ヤナギ林化による流下断面阻害 ヤナギ林化による滯筋固定化と河床低下
環境	<ul style="list-style-type: none"> 貴重な生物の生息空間 滯筋固定化による瀬・淵環境の減少
利用	<ul style="list-style-type: none"> 過度な樹林化による親水活動への阻害 視認性低下による水難事故等への影響
管理	<ul style="list-style-type: none"> 流量観測や監視装置の視認性の低下 樋門の吐口水路等における流下阻害
景観	<ul style="list-style-type: none"> 周辺から水辺への眺望阻害 砂州景観の減少と景観の単調化

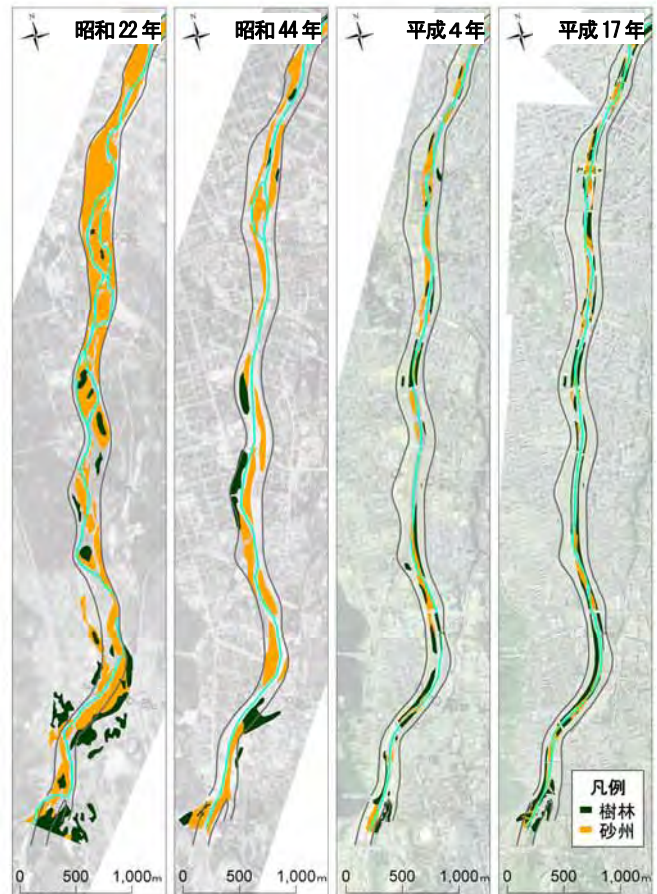


図-1 豊平川における樹木の変遷（一条大橋～藻岩橋）
※航空写真判読により作成
※一は各年代とも現在の堤防箇所を表示

2. 平成 23 年 9 月出水の状況

平成23年9月出水は、豊平川の雁来地点でピーク水位 8.43m、ピーク流量約1,090m³/s（速報値）の洪水規模となり、昭和56年8月洪水以降、最も大きい規模であった。

豊平川では9月5日の午後から水位が急激に上昇し、9月6日の9時前後でピークを迎えた後約1週間にわたって水位の高い状況が続いた。

表-2 平成 23 年 9 月出水と主要洪水の比較

洪水ピーク 水位・流量		S56.8	H13.9	H23.9 速報値	平均 年最大 流量
雁 来	水位 (m)	9.99	7.51	8.43	440
	流量 (m ³ /s)	1,417	749	1,090	

※平均年最大流量は、S48～H21の平均値

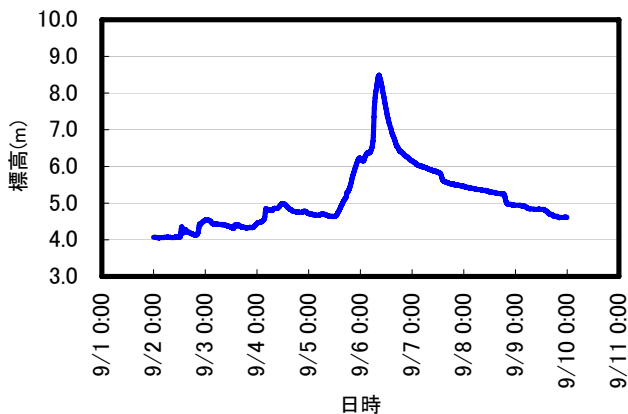


図-2 雁来地点における水位変化

3. 平面 2 次元解析による流況の再現

豊平川では、H23年度に同時水位観測を縦断的に実施しており、これを基に出水ピーク時の水位縦断形をとらえることが可能であった。この水位縦断を基に、平面2次元流況解析を用いてピーク時の流速、水深について再現解析を行った。この結果、勾配の急な区間（セグメント1）では樹木による水位上昇が実際の水位よりも大きく算出され、勾配の緩い区間（セグメント2-2）では実際の水位と同程度の結果となった。これを踏まえ、流況を再現するにあたり、整備計画に用いられている粗度が妥当であると仮定した上で、樹木の透過係数を流速に併せて調整する手法を取り、再現を試みた。

(1) 樹林構造の推定

本解析では出水に伴う樹木の挙動を把握することを目的としていることから、解析に用いる樹木を詳細に設定することが必要となった。しかし、豊平川に生育するすべての樹林について解析に必要なデータを調査することは多くの労力を必要とする。このため、本解析では、以下に示す樹林化構造予測式を用いた。

■ 樹高を基にした樹林構造予測式

- 樹林密度=434010.669×樹高^{-2.41}……【A】
- 枝下高=0.504×樹高^{0.922}………【B】
- 胸高直径=0.189×樹高^{1.799}………【C】
- 林 齢=1.095×樹高^{1.121}………【D】
- 樹冠直径=0.394×樹高^{1.124}………【E】

この樹林化構造予測は、道内河川の既往調査結果を基に統計処理により相関式を算定したものであり、樹高を基礎とした樹林構造の予測を行うことが可能となっている。この予測式に対して、LPデータおよび現地調査から得られた豊平川の樹高分布を用いて、解析に必要な樹林の構造諸元（樹林密度、枝下高など）を算定した。

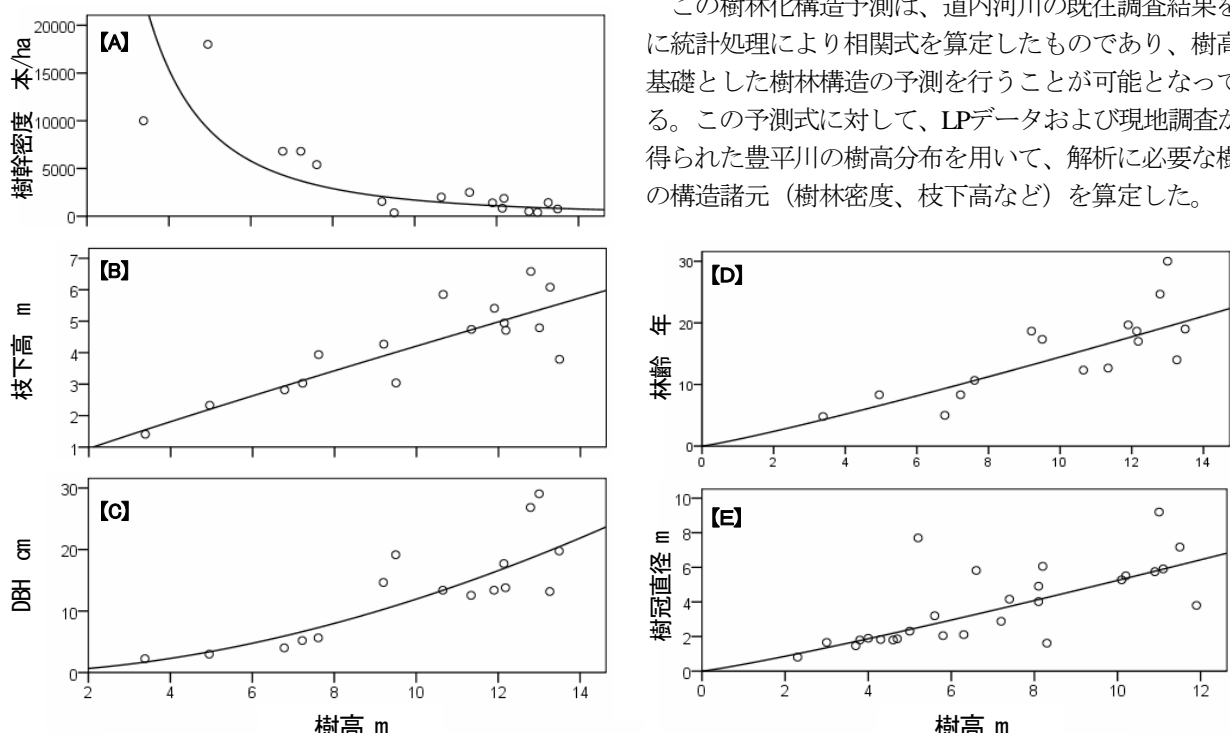


図-3 樹林構造予測式

※H21 水辺域・水辺林管理検討業務報告書（札幌開発建設部）より

(2) 平面 2次元流況解析

平面2次元流況解析に用いた解析条件は以下のとおりである。

■解析条件

河道条件：H18測量横断を基に2次元メッシュを作成
 流量：1,090m³/s
 計算範囲：KP7～21
 粗度係数：整備計画粗度を使用
 水位条件：実測データを基に下流端水位を設定
 樹木条件：透過係数で解析に反映

このうち、樹木条件については、『河川における樹木管理の手引き 財団法人リバーフロント整備センター編集』を参考に透過係数 k_s として与えた。

$$k_s = \sqrt{\frac{2g}{a_w C_d}}$$

ここに、 a_w ：単位体積流塊中の樹木の投影面積
 C_d ：樹木群の抗力係数
 g ：重力加速度

単位体積流塊中の樹木の投影面積 a_w は、以下の式で与えた。

$$a_w = \frac{N a_f}{A h_f}$$

ここに、 N/A ：樹木群密度
 a_f ：樹木の投影面積
 h_f ：HWL 以下の樹木水深

解析結果を図4に示す。実際に観測された水位データと比較した結果、解析当初においては、下流側では再現性がある程度確保されたものの、上流側では解析結果が実際の水位よりも高い結果が算出された(図4上段グラフ)。この乖離は、樹木の影響が十分に評価されていないものと推測し、透過係数を見直すことを検討した。透過係数は樹木の投影面積と抗力係数からなる関数で与えているが、渡邊ら(2004：河川技術論文集)によれば、流水中の樹木の投影面積は流速の増加に伴って小さくなること示されている。

本解析においてもこの視点を考慮し、抗力係数を1.2(円柱の場合)で固定しながら、流速の変化に合わせて、投影面積を調整する手法を取り、繰り返し計算によって樹木の影響を補正した結果、ある程度の再現性が確認された(図4下段グラフ)。

(3) 解析結果の考察

この再現解析の過程で、河床勾配が大きくなるにつれ、樹木の影響が小さくなるものと推察された。特にセグメント1に相当する区間では、流速が速く、これに伴って、樹木が変形を生じ、透過係数が大きくなることによって、樹林内においてもある程度の流速が生じやすいのではないかと考えられた。セグメント2-2に相当する区間では流速が遅く、樹木の変形も生じ難くなるため、透過係数が流速の早い区間に比較して小さくなり、そのため、樹林内の流速が低下するとともに、樹木の影響による水位上昇が生じやすいものと考えられた。

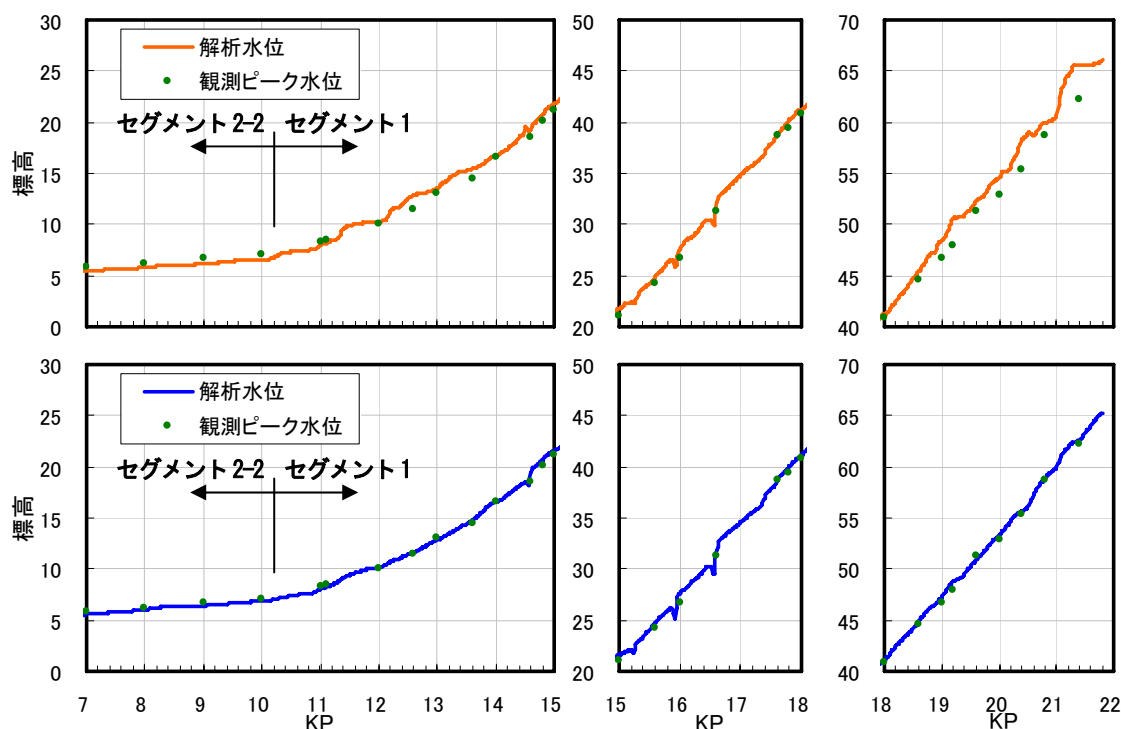


図4 平面 2次元流況解析による水位解析結果
 上段：樹木調整なし 下段：樹木調整あり

4. 倒伏状況と流況との関係

(1) 現地踏査による出水時の流況

出水が及ぼす樹木への影響を確認することを目的に、出水中の豊平川において現地踏査を行った。

代表的な箇所は、図-5に示す藻岩橋下流右岸部の樹林である。この箇所では、流心が樹林に向かう状況にあったが、樹林の存在により、流れの方向が変化し、対岸に向かう局所流を生じさせる結果となっていた。



図-5 出水前後の状況（藻岩橋下流右岸）
上写真：出水時 下写真：出水後

また、一条橋下流においては、低水路内に繁茂した樹林によって低水路の河積が小さくなっており、このため高水敷においてもある程度大きな流速が発生している状況が確認された。

流れは、右岸に繁茂した樹木によって阻害され、右岸の高水敷に早い流れを生じさせる形となっていたほか、対岸の左岸高水敷に乗り上げる形で速い流れを生じていた。

これらの2箇所の調査から、河道内に繁茂した樹木の影響は水位上昇のみではなく、予期しにくい箇所に局所的な流れを生じさせる可能性が高いことを示しており、治水安全度の確保を検討する上で重要な項目の1つであると考えられた。



図-6 出水時の状況（一条橋下流）
上写真：低水路 下写真：右岸高水敷

(2) 樹木の倒伏状況

出水後の現地調査の結果から、低水路の流心に近い水際や中洲などの流速の速くなりやすい箇所において倒伏が発生していることが確認された。倒伏の形態は、流水による外力の作用と考えられるもの、河床の洗掘に伴って基盤が流出して倒伏したと考えられるもの、河床材料が移動する過程で、樹木を押し流したと考えられるもの大きく3つの倒伏形態を生じているものと推測された。



図-7 出水後の状況（北13条大橋上流左岸）



図-8 出水後の状況（水穂大橋下流）

5. 流水の作用と倒伏の関係

豊平川では、河畔林データベースを作成しており、河畔林の主要樹木を対象とした毎木調査結果が整理されている。このデータベースに記載されている樹木の倒伏の有無について現地調査を行った。この調査結果に対して、平面2次元流況解析の結果を基に、流水の作用と倒伏の関係について分析を行った。

分析は、流況解析結果に基づく流速と水深を基に、樹木の樹高、枝下高、枝張、胸高直径を考慮して樹木に作用したと考えられる外力モーメントを算出し、この外力モーメントと倒伏の関係を基礎データとして整理した。外力モーメント M は、樹幹部にかかる外力 Md と、樹冠部にかかる外力 Mu の和として算出した。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_D S u^2 L$$

- ここに、 M : 倒伏モーメント (kg・m)
- ρ : 水の密度 (102 kg・s²/m⁴)
- Cd : 抗力係数 (樹幹部 1.2、樹冠部 0.6)
- S : 流水中の樹木の投影面積 (m²)
- u : 水深平均流速 (m/s)
- L : 流水の作用中心面からの高さ (m)

現在用いられている倒伏の判定式は、樹木の胸高直径から算出される倒伏限界モーメントの形で示されており、作用した外力モーメントが倒伏限界モーメントより大きい場合には倒伏すると判定される。この倒伏限界モーメントの判定式は建設省（現国土交通省）で示された判定式に加え、沙流川において実験から算出された判定式（渡邊ら）が考案されている。

豊平川における外力モーメントと樹木の胸高直径との関係について分析した結果、以下の相関式を得ることができた。

$$Mc = 1.712D^2$$

- ここに、 Mc : 倒伏限界モーメント
- D : 樹木の胸高直径

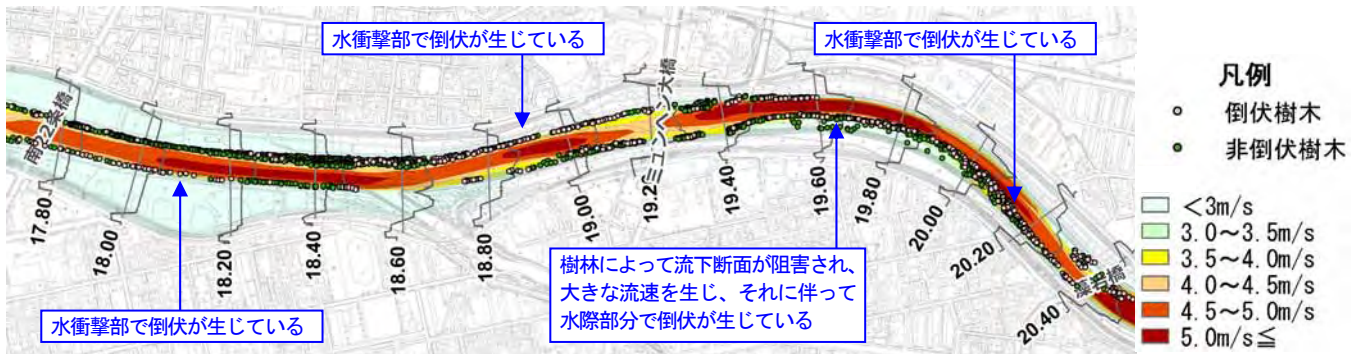


図-9 倒伏樹木と平面2次元流況解析による流速シミュレーション結果

こうして得られた判定式と、これまで用いられてきた判定式を比較した場合、豊平川におけるH23.9出水では、渡邊らによる判定式に近い値を示しており、現地試験によって渡邊らによる判定式よりもやや倒伏しやすい傾向を示すものと推測された。

表3 セグメント・樹種・倒伏有無別の集計

		倒伏	非倒伏	合計
セグメント1	ヤナギ類	558	2201	2759
	ケヤマハンノキ	20	102	122
	ハルニレ	18	72	90
	ヤチダモ	6	13	19
	オニグルミ	34	74	108
	イヌエンジュ	25	30	55
	シラカンバ	3	11	14
	ハリエンジュ	7	1	8
	その他中高木	4	30	34
	灌木類	19	43	62
セグメント2-2	ヤナギ類	12	624	636
	ケヤマハンノキ	0	83	83
	ハルニレ	0	5	5
	ヤチダモ	0	1	1
	オニグルミ	3	55	58
	イヌエンジュ	0	1	1
	シラカンバ	0	4	4
	その他中高木	1	4	5
	灌木類	15	82	97

※ DBH3cm未満で冠水していないものは除外して集計

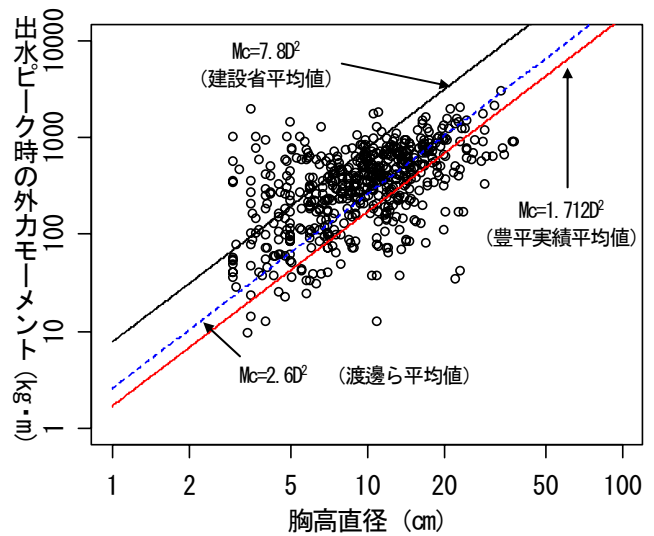


図-10 胸高直径と外力モーメントとの関係

6. 樹木影響を考慮した樹木管理

(1) H23.9 出水による樹木の倒伏分析結果

豊平川における出水と樹木との関係について分析した結果、以下の2点が推測された。1点目は、水位に及ぼす樹林の影響が、河床勾配によって異なっているという点である。勾配の急な流速の早い区間では、樹木による水位への影響は少なく、樹林内においても相応の流速が生じやすい。また、勾配の緩い区間では樹木による水位上昇への影響が大きく、流速が遅いことから倒伏も生じ難いものと推測された。2点目は、流水による外力と樹木の倒伏との関係である。倒伏判定予測については、渡邊らによる判定式が有効と考えられるが、実際の状況では同じ外力でも倒伏の状況にばらつきが大きいことが確認された。これは、樹木の倒伏が、流水による外力のほか、侵食や堆積などの河床の変化によっても倒伏に至ることや、生育状況の違いによって倒伏限界モーメントが異なることが可能性として考えられた。

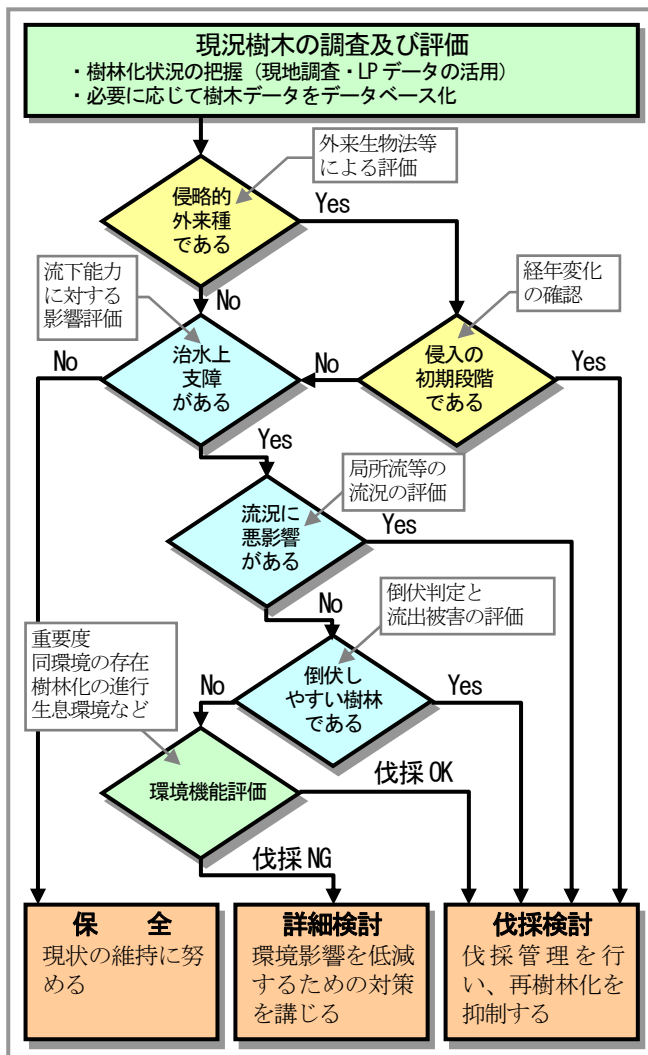


図-11 河畔林管理におけるの伐採検討フロー案

- ※ 河床勾配やセグメント等の河道特性に応じて区間毎に伐採手法を評価
- ※ 最終段階で利用面、景観面についても評価

(2) 河畔林管理への適用

今回の分析結果を基に、河畔林管理への応用方法について考察する。

勾配の急な区間 (セグメント1) では流速が大きくなりやすいことから、流況への影響や樹木倒伏・流出被害を考慮した適切な管理を視点とすることがポイントと考えられる。特に流速の速くなる個所では、樹林化を抑制することが重要な視点であり、必要に応じて管理伐採を行うことが考えられる。

勾配の緩い区間 (セグメント2-2) では、樹木による水位上昇の影響を考慮した適切を視点とすることがポイントと考えられる。特に樹木により低水路内の河積が小さくなっている箇所では、樹木伐採によって適切に流下能力を確保することが必要と考えられる。

7. おわりに：今後の課題

本論文では、実際の出水状況において観測された水位データと3,000本に至る樹木の倒伏状況の現地調査結果を基に樹木による流況への影響の推測とこれに基づく流水による外力と樹木倒伏の関係の評価を行った。解析においては、粗度係数の設定等いくつかの仮定を用いており、この仮定をさらに検証していくことが必要と考えられる。

また、本論文における分析結果により、樹木の物理的な特性について、ある程度の検証を行うことができたが、適切な樹木管理を検討していく上では、さらに様々な検討を行う必要があると考えられる。図-11に示したフロー図は、今後の河畔林管理における考え方を整理したものである。河畔林管理においては、治水安全度の確保の視点が重要となるものの、これ以外にも外来種や自然環境に関する機能評価を行っていくことが必要となる。

更に、今後の河畔林管理においては伐採後の再樹林化についても考慮していくことが必要と考えられる。適切な伐採方法 (地際伐採や成長期伐採など) に加え、伐採後の管理 (萌芽枝伐採や草本による抑制など) についても知見を集積することが望まれる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり、北見工業大学渡邊教授より貴重なご意見を賜った。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) リバーフロント整備センター (編) (1999)：河川における樹木管理の手引き。山海堂。
- 2) 渡邊康玄・市川嘉輝・井出康郎 (1996)：洪水時における河道内樹木の倒伏限界。水工学論文集 40：169-174。
- 3) 油川曜佑・鈴木優一・渡邊康玄 (2004)：高水敷に生育するヤナギの抵抗。河川技術論文集 10：83-88。
- 4) 油川曜佑・渡邊康玄・阿部修也 (2005)：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。水工学論文集 49：583-588。