

留萌川の低水路樹木倒伏調査について

留萌開発建設部 治水課 ○西田 貴博
崇田 徳彦
留萌開発建設部 留萌開発事務所 河川課 三佐川 剛昌

河道内樹木の管理においては、洪水の安全な流下能力を確保するとともに生態系保全や河川景観の形成等への配慮を行うほか、洪水時に発生する河道内樹木の流木化による副次的被害の軽減を図ることも重要である。そこで、適正な樹木管理を行う上では、河道内樹木の形態や耐力を把握、評価する必要がある。

本論文は、留萌川で樹木倒伏試験を実施し倒伏限界モーメントを算出し昭和63年洪水を例に洪水時の樹木倒伏状況を検証したので報告するものである。

キーワード：河道内樹木、樹木倒伏限界

1. はじめに

河道内樹木は、出水時の流速低減による河岸保護や生態系保全などの機能を有する一方で、水位をせき上げし流下能力不足を生じさせる。また、出水時に樹木の耐力以上の力が加わることで流木化し、橋脚等の構造物の破壊や構造物に引っかかることで河積阻害を招く恐れがある。

留萌川では、昭和63年8月洪水により、各観測所で計画高水位を超え、大和田観測所では、既往最高水位を記録した。この豪雨により、家屋浸水約3千戸の他、橋梁流失が10ヶ所¹⁾発生するなど甚大な被害を受けた。この洪水では、低水路樹木が全倒伏しその多くが流木化していることから、橋梁等の被害増大を招いた可能性がある。

このため、樹木管理には流下能力確保や生態系保全を図る他、河道内樹木の流木化による副次的被害の軽減を図ることも重要な課題である。

河道内樹木の倒伏限界については、例えば鈴木ら²⁾、油川ら³⁾が沙流川で詳細な調査を実施し、流木の流出過程について報告されている。

本論文では、留萌川での河道内樹木の流木化の現象を把握するため倒伏試験を実施し、昭和63年8月洪水の樹木倒伏の検証を行い、ほぼ妥当な倒伏結果が得られた。また、倒伏限界後の倒伏形態が異なるパターンが見られたので報告する。

2. 試験地の概要

留萌川は、幹線流路延長44km、流域面積270km²で調査範囲は河口から25.2kmの直轄管理区間にて上流、中

流、下流から選定を行った(図-1 参照)。河口～KP5.0の下流部は、河床勾配1/5,000～1/2,500と緩く感潮区間となっており、河道が完成していることから樹木の進入も無く樹木がほとんど無い区間である。KP5.0～KP25.2の中上流部は、河床勾配1/2,500～1/450で山沿いを流れている部分が多く、河川敷幅が狭いことに加え、河道内樹木が繁茂している区間である。また、留萌川の特徴として中上流部は川幅が狭く高水敷幅もほとんどないこと等から、多くの区間は護岸が敷設されており、融雪出水や洪水で護岸上にシルト質の土砂が堆積している。

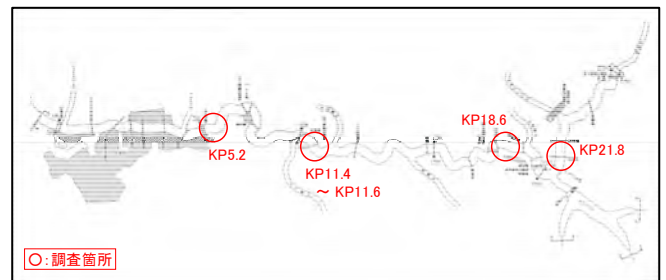


図-1 調査箇所平面模式図(留萌川)

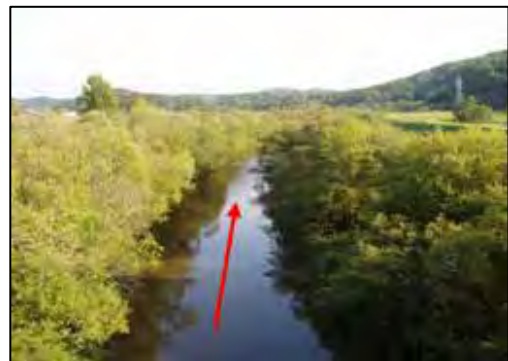


図-2 留萌川樹木繁茂状況 (KP12.0)

留萌川に生息する樹木は、他の道内河川と同様にオノエヤナギ、エゾノキヌヤナギ、エゾノカワヤナギ、タチヤナギ等のヤナギ類が大半を占めている。生息割合と樹高ならびに胸高直径の関係を図-3ならびに4に示す。

樹高は4~8mが大半を占めており、ヤナギの平均的な樹高の成長1~2/年⁴⁾を考えるとおおよそ17~18年経過していることになる。また、胸高直径は4~10cm程度の個体が特に多く、生息するヤナギ類のほぼ9割が胸高直径20cm程度までの範囲に含まれている。これも平均的な胸高直径の成長1cm/年を考えるとおおよそ20年程度経過していることになる。昭和63年8月洪水により低水路樹木が全倒伏し、そこから新たに発芽していることから考えても妥当な経過年数である。

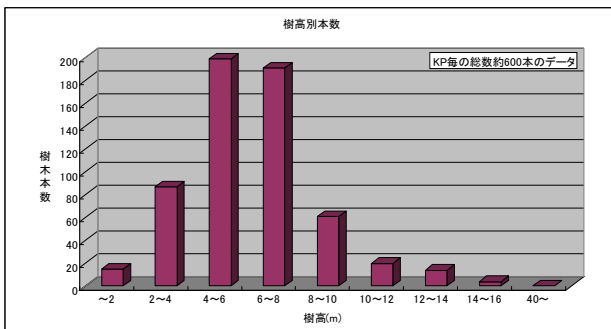


図-3 過年度調査のヤナギ類の樹高分布

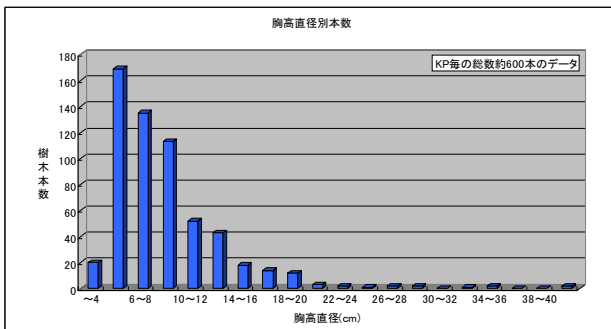


図4 過年度調査のヤナギ類の胸高直径分布

3. 倒伏試験調査

(1) 倒伏試験・計測方法

試験木の種類はヤナギ類とし、本数は合計45本とした。ここで、留萌川の場合、多くの樹木が護岸上に生育していることから、護岸上の土砂堆積厚も考慮し試験木を決定した。試験木の調査条件を表-1に示す。

なお、試験木の胸高直径は全体の90%以上を占める4cm~20cm程度までとした。

倒伏試験調査日は、2009年12月上旬に行った。

表-1 試験木の調査条件

護岸	護岸上の土砂厚	4cm ≤ d < 8cm	8cm ≤ d < 12cm	d ≥ 12cm	合計
あり	30cm以下	1	4	4	9
	30~60cm	6	4	0	10
	60cm以上	5	4	5	14
なし	—	4	5	3	12
合計		16	17	12	45

(2) 倒伏試験調査

河道内樹木が倒伏するのは洪水時であることから、試験では根が浸水条件下とするため、試験木周辺に土嚢を積み水を注入した。また、実際に倒伏する場合は下流に向かい倒伏すると考えられることから試験木は下流方向へ引き倒した。

図-5に示すように、試験木とアンカー木の間に支持台を置きワイヤーが地面と水平になるように設置した。

後述する流水の外力モーメントを算出するため、試験の開始前に試験木の樹高、枝下高、枝張り長を計測した。倒伏試験は、樹木の倒伏角度、ワイヤーの角度を計測した。これらの項目は、原則として荷重0.2tごとに記録した。

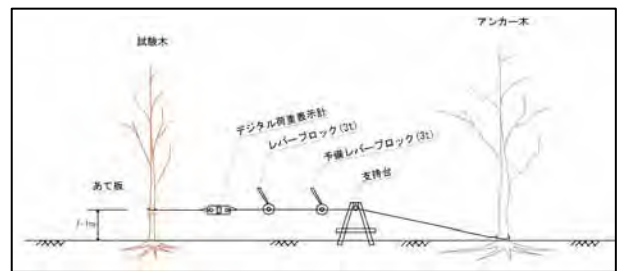


図-5 倒伏試験装置の模式図

4. 調査結果

(1) 倒伏限界モーメントの決定

試験木の胸高直径、樹高および護岸上の堆積土砂厚と、倒伏限界時の倒伏角度、倒伏限界モーメントについて表-2にまとめた。なお、解析の対象とした試験木本数は41本とした(荷重開始後すぐに倒れた2本、載荷点を上げた2本については、倒伏限界点が明瞭に確認できなかったため削除した)。

(2) 倒伏限界モーメントと倒伏形態

倒伏限界モーメントと胸高直径との関係を図-6にまとめた。図には「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、1999)⁵⁾(以下「手引き」)のデータを比較のために加筆した。これを見ると、「手引き」の全データの近似式と下限式のちょうど中間付近に今回の試験の近似式は位置した。

今回の試験データの分布は、「手引き」の結果より若

干小さい値を示したが、ほぼ同様の結果であった。

表-2 倒伏試験結果一覧

	KP	樹木 No.	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	護岸上の堆積土厚 (cm)	倒伏角度 (°)	倒伏限界Mc (kg・m)
1	5.2	1-1	9.0	9	90	11.8	217.6
2	5.2	1-2	16.7	8	90	42.9	799.7
3	5.2	1-3	10.0	12	90	24.3	437.8
4	5.2	1-4	4.0	4.5	90	78.1	98.4
5	5.2	1-5	5.6	5.5	90	67.8	251.6
6	5.2	1-6	17.0	13	90	39.6	1004.8
7	5.2	1-7	12.1	11.5	90	36.5	559.1
8	5.2	1-12	15.1	13.5	90	65.2	899.7
9	11.4	2-1	16.2	7	護岸なし	6.4	1399.9
10	11.4	2-2	4.5	5.5	護岸なし	59.5	89.2
11	11.4	2-5	5.2	8	護岸なし	22.8	199.6
12	11.4	2-6	9.6	8	護岸なし	24.0	430.0
13	11.4	2-8	7.4	8.5	護岸なし	27.4	604.0
14	11.4	2-9	6.5	7.5	護岸なし	18.0	117.8
15	11.6	3-2	7.5	8	50	39.8	599.9
16	11.6	3-3	7.5	6.5	50	45.3	398.9
17	11.6	3-4	5.2	7	50	19.9	114.8
18	11.6	3-6	7.5	10	80	29.6	258.1
19	11.6	3-8	5.5	7	80	53.2	194.8
20	11.6	3-12	8.0	9.5	80	70.2	279.6
21	11.6	3-13	10.8	10	80	30.3	638.9
22	18.6	4-1	18.2	6.5	20	10.7	1199.4
23	18.6	4-3	10.0	5.8	50	37.6	396.8
24	18.6	4-4	7.5	5	70	79.4	399.5
25	18.6	4-5	7.5	4.3	50	55.3	397.8
26	18.6	4-6	8.5	5	20	61.2	458.4
27	18.6	4-7	9.5	5.8	50	60.2	399.3
28	18.6	4-8	7.3	4	50	79.4	399.6
29	18.6	4-9	10.7	5	40	41.5	406.4
30	18.6	4-10	9.2	6	50	61.2	388.5
31	18.6	4-11	10.9	5.5	20	15.5	396.4
32	21.8	5-1	6.1	5.5	20	35.7	137.5
33	21.8	5-3	13.0	10	10	12.4	1599.6
34	21.8	5-4	11.5	9	20	30.5	798.1
35	21.8	5-5	8.7	9	護岸なし	8.0	200.0
36	21.8	5-8	10.5	10	護岸なし	27.3	299.0
37	21.8	5-10	11.3	9	護岸なし	8.3	798.8
38	21.8	5-11	14.3	9	護岸なし	0.8	597.9
39	21.8	5-12	8.0	6	護岸なし	29.9	67.6
40	21.8	5-13	14.4	7	20	10.3	798.8
41	21.8	5-14	21.2	9	20	7.3	2008.3

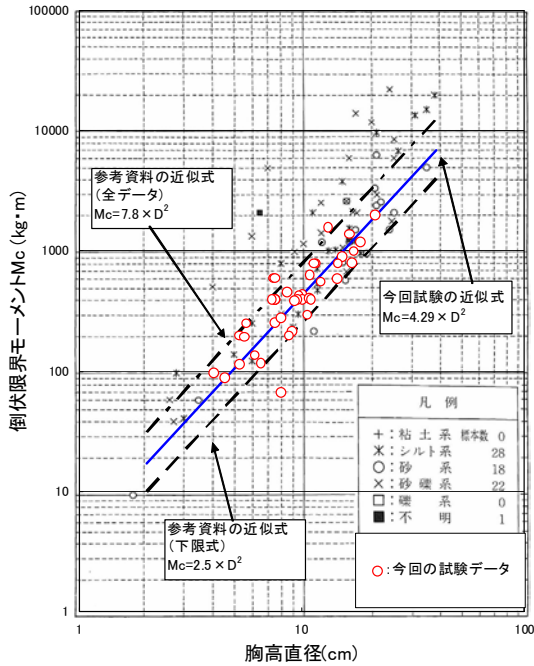


図-6 倒伏限界モーメントと胸高直径

ここで、倒伏試験を実施している中で、倒伏限界モーメントに違いが見られないが倒伏形態が異なる状況が確認された。具体的には、倒伏限界点に達した後に根鉢が明瞭に現れた試験木と倒伏限界点に達しても根鉢が明瞭に現れなかった試験木に分類された。それぞれの写真を図-7ならびに8に示す。

図-7によると、根は深く張らず水平方向に広がっている。ヤナギ類は、浅根性で水平方向にたくさんの細根(ひげ根)を張ることで樹木本体を支え、土砂厚が30cm程度で成長すると言われている。

写真-8は、ヤナギの成長後に冠水により土砂が堆積している箇所の試験木であり、明確な根返りは確認されていない。一般に成長後に土砂が堆積しているようなヤナギ類は、地表近くの幹から新たな根(不定根)を発根させる⁴⁾ことが知られている(図-9)。これを確認するため引き倒してしていない樹木について地表面を掘削し根の張り方を確認した。(図-10)



図-7 根鉢が明瞭な試験木(護岸上、土砂堆積厚 20cm)



図-8 根鉢が不明瞭な試験木(護岸上、土砂堆積厚 90cm)

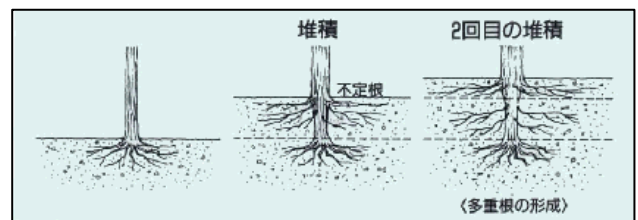


図-9 不定根の形成過程

(『独立行政法人寒地土木研究所』HP引用)



図-10 試験木の根（不定根）の確認状況
(護岸上、土砂堆積厚 60cm)

このように、樹木の成長後の冠水による土砂堆積により根の張り方が大きく異なることが確認されたが、図-11 に示すとおり、土砂堆積厚(30cm 以下、30~60cm、60cm 以上)毎に区分し、胸高直径と倒伏限界モーメントの差を調べたが、大きな違いは見られなかった。これは、留萌川に広く繁茂しているヤナギ類は、土砂厚が 30cm 程度で根を広く張り、充分成長することで倒伏強度を有しているためと考えられる。また、成長後に冠水により土砂堆積を受けたヤナギ類は不定根を発根させることで、土砂堆積のないヤナギ類と同様の倒伏強度を有していると考えられる。

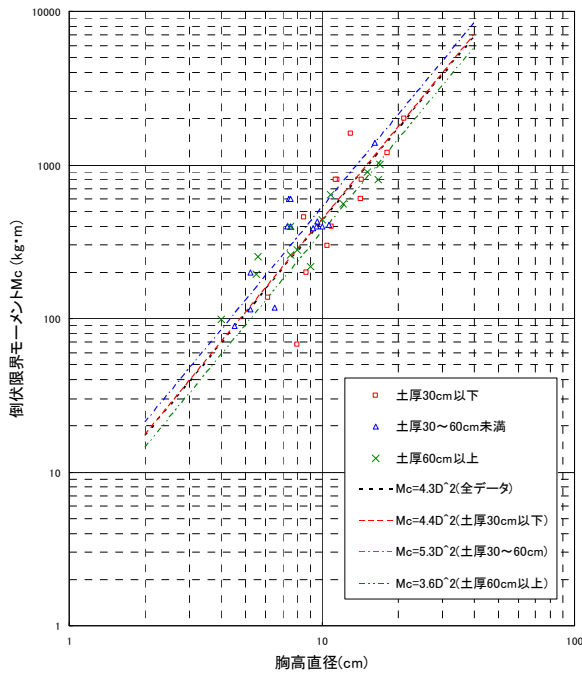


図-11 堆積土厚区分ごとの倒伏モーメント
と胸高直径分布の関係

5. 樹木倒伏検証

(1) 外力モーメント・倒伏限界モーメント算定

a) 調査方法

調査は、今回倒伏試験を実施した試験木について、倒伏試験前に樹高、枝下高、枝張り長を計測した。また、倒伏試験後に樹冠部分を撮影し、画像解析により樹冠箇所の枝や幹の割合（樹冠寄与率）を計算した（図-12）。この結果、樹冠寄与率の最小は 17.8%、最大は 39.5%、平均は 28%であった。後述する流水による樹冠の外力モーメント算出には、平均の寄与率 28%を採用した。

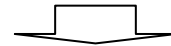
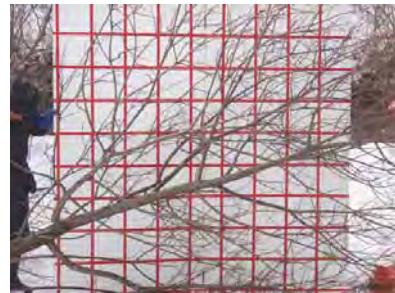


図-12 樹冠面積の解析
(葉面積測定ソフト LIA32 を使用)

b) 流水による外力モーメント算定方法

流水による外力モーメント算定を式(1)に示す。また、樹木模式図を図-13に示す。

$$M = \frac{1}{2} \rho C_d S u^2 L \quad (1)$$

ここで、 M は流水による外力モーメント(kg/m)、 ρ は水の密度($102\text{kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^3$)、 C_d は樹木の効力係数、 S は流水中の樹木の投影面積(m^2)、 u は流速で準 2次元不等流計算による昭和 63 年 8 月洪水再現計算値、 L は流水の作用中心面からの高さ(m)である。

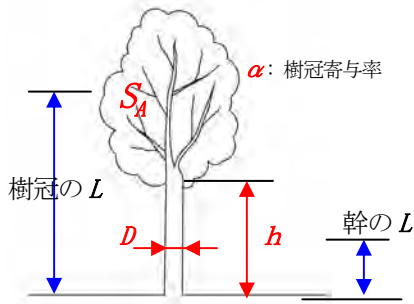


図-13 樹木模式図

ただし、 S は幹部分と樹冠部分に分割し式(2)～(3)で与えた。

(幹部分)

$$S = Dh \quad (2)$$

ここで、 D は胸高直径(m)、 h は枝下高(m)である。なお、 C_d については1.2を用いた⁴⁾。

(樹冠部分)

$$S = \alpha S_A \quad (3)$$

ここで、 α は樹冠寄与率(%）、 S_A は樹冠部分の投影面積(m^2)である。

なお、 C_d については0.6を用いた⁴⁾。

c) 倒伏限界モーメント

今回調査を行った試験木の樹高と胸高直径の関係から昭和63年8月洪水時の樹高より胸高直径を算出し、図-6から倒伏限界モーメントを算出した。

(2) 昭和63年8月洪水時の樹木倒伏検証

昭和63年8月洪水時の樹木倒伏状況の把握を試みた。ここで、洪水時に生起している樹木の倒伏現象は、洪水による流れやそれに伴う樹木周辺の局所洗掘等が複雑に関連し、また洪水ピーク前に倒伏している可能性も充分考えられるが、ここでは単純に流水による外力モーメントと倒伏限界モーメントの比較を行った。

検討方法として、昭和63年洪水前に繁茂していた樹木の樹高が把握されているが、その他のデータは無いため、今回倒伏試験を実施した樹木と相関関係があるものと仮定し樹高から樹冠、樹高から枝下高を算出し検討した。

流水による外力モーメントと倒伏限界モーメントの比較を図-14に示す。

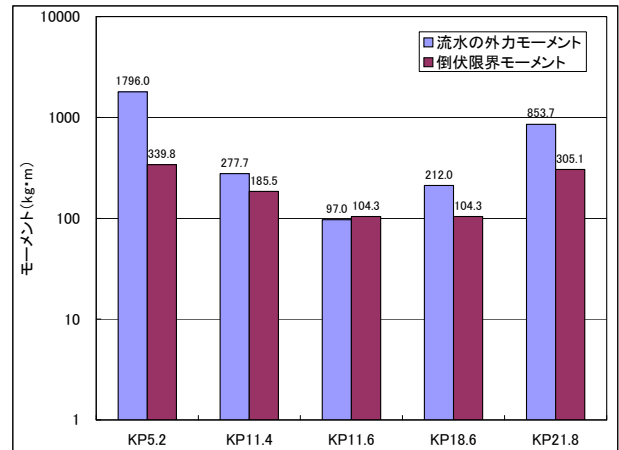


図-14 S63洪水の低水路樹木倒伏判定

この結果によると、検証地点 KP11.6 を除いては、流水による外力モーメントが倒伏限界モーメントを上回り、倒伏することを示した結果となり、昭和63年洪水後に低水路樹木が全倒伏していた結果と一致している。洪水時の倒伏現象は、ほぼ妥当な検証結果と考えられる。

(3) 樹高の違いによる樹木倒伏検証

外力の流速(1.8m/sec)を一定として与えたときの樹高の違い(3~6m)に着目し、樹林が全て水没する条件で樹木倒伏検証を行った。図-15にその検討結果を示す。

この結果によれば、全ての樹高において流水の外力モーメントが倒伏限界モーメントに比べて大きく、樹高が高くなるに従いその差は大きくなった。つまり、樹林が成長するほど倒伏しやすくなる傾向を示している。一般的に、樹高が高くなれば、倒伏限界も大きくなるが、樹冠面積の増大や地上からの樹冠部の増大により流水の外力モーメントが倒伏限界モーメントより大きくなる傾向にある。

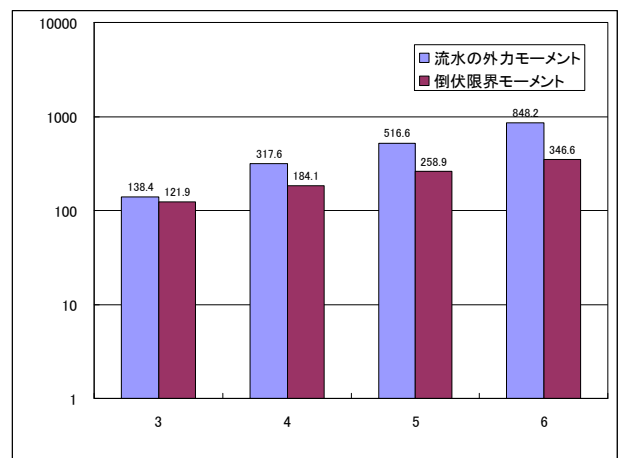


図-15 樹高の違いによる樹木倒伏判定

6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下の通りとなる。

- ①胸高直径と倒伏限界モーメントの関係は、図-6 に示す既往資料結果と同様の傾向を示した。また、倒伏形態の違いが確認されたが、倒伏限界モーメントへの違いは生じなかった。
- ②成長後、冠水により土砂堆積を受けたヤナギ類は、不定根を発芽させることが確認された。
- ④昭和 63 年 8 月洪水時における樹木倒伏の検証を行った結果、実現象と同様にほぼ全て倒伏する結果となった。
- ⑤流速が一定で樹冠が全て水没する条件下では、樹高高くなるに従い、流水による外力が樹木の倒伏限界より増大傾向になり、倒伏する可能性が高くなることが示された。ただし、樹高と枝下高、樹高と樹冠面積等の関係は、明らかでなく今後の課題としたい。

謝辞：本研究の実施にあたり、北海道大学工学部工学研究科泉教授に論文全般にわたり御指導いただきました。厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 北海道開発協会編：水害，pp. 330，2005.
- 2) 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 巻，pp. 107-112，2004.
- 3) 油川曜佑，渡邊康玄，阿部修也：沙流川 2003 年 8 月洪水における河畔林倒伏調査，平成 16 年度北海道開発局技術研究発表会，pp. 329-336，2005
- 4) 新山馨：石狩川に沿ったヤナギ科植物の分布と生育地の土壌の土性，日本生態学会誌 37:163-174. 1987.
- 5) (財) リバーフロント整備センター編：河川における樹木管理の手引き，山海堂，pp. 154-171，1999.