

洪水時における河道内樹木の倒伏限界

Critical Conditions for Trees Lodging in Flood Plain during Flood

渡邊康玄*・市川嘉輝**・井出康郎***

By Yasuharu WATANABE, Yoshiteru ICHIKAWA and Yasuro IDE

When trees in river channels drift during flood, those that are stacked in rivers sometimes cause flooding of river water. In addition, when they lodge against river structures, such as bridge piers, the structures may be destroyed due to an increased pressure of the river flow. Therefore, the plans for felling and planting trees in river channels need to be made so that trees do not lodge or drift during flood. The purpose of this research is to understand how the critical lodging value calculated from the results of the general test on felling trees fluctuates during flood. The results of the examination on relevant factors affecting the critical lodging value are reported in this paper.

Keywords: field survey, channel vegetation, critical lodging value, flood

1. はじめに

洪水時等に河道内に存在する樹木が倒伏し流木となると、ある箇所に詰まって氾濫を引き起こしたり、橋脚等の河川構造物にひっかかり大きな流水抵抗がかかることによる構造物の破壊が生じる場合がある。このため、河道内樹木の伐採および植栽計画の立案を行ううえで、河道内の樹木が洪水時に倒伏あるいは流木化しないよう配慮する必要がある。

荏住¹⁾によると、樹木の支持力と根鉢の大きさは密接な関係があり根鉢が大きいほど支持力が大きく、根鉢の直径および深さは根系の分布特性によって異なるが樹木の胸高直径と関係が認められる。このことから、樹木の支持力は樹木の胸高直径からある程度推定することが可能として、建設省土木研究所では種々の樹木の引き倒し試験を実施し、胸高直径と樹木の倒伏限界モーメントとの関係を調べている。その結果、河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案)²⁾では、根系の生育状況への影響も加わって樹種や土質による大きな違いは無いが、河道内では樹木の生育条件による差が大きく対象とする箇所に生育する樹木を用いて引き倒し試験を行い耐力を推定することが望ましいとしている。このことから計画立案に際して、様々な河川で河道内樹木の倒伏を判断するための基準となる樹木の倒伏限界値が、引き倒し試験等により求められている。

*正会員 工博 北海道開発局 環境審査官室
(060 札幌市北区北8条西2丁目)

**正会員 開発土木研究所 環境水工部河川研究室
(062 札幌市豊平区平岸1-3)

***正会員 工修 開発土木研究所 環境水工部河川研究室
(062 札幌市豊平区平岸1-3)

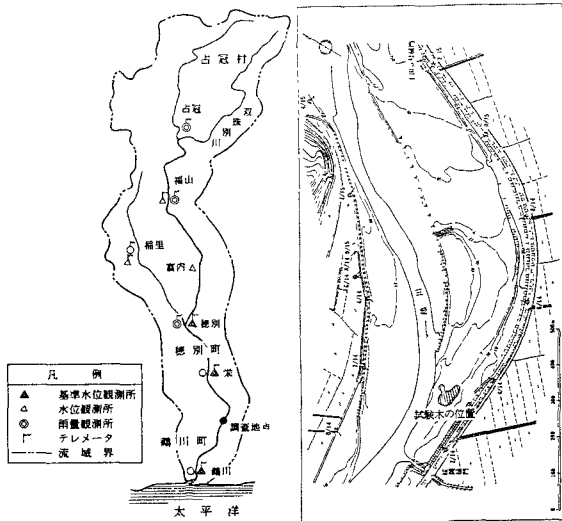


図-1 試験木の位置

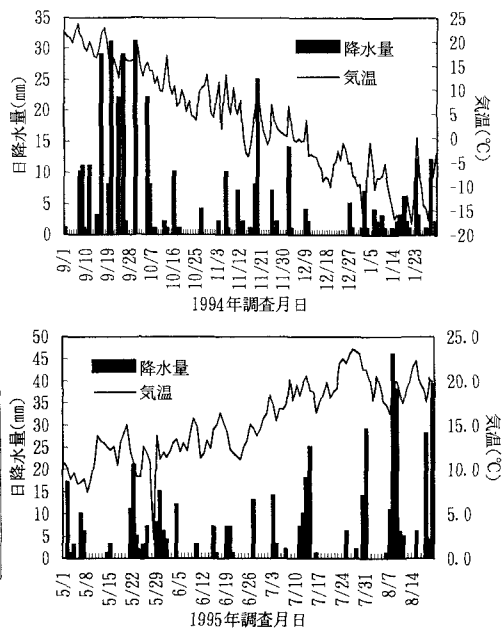


図-2 引き倒し試験実施前後の降雨量

著者ら³⁾は、1992年8月鵜川洪水後の倒伏樹木調査を実施し、樹木の倒伏角度から洪水時の流速を推定した。その際使用した樹木のヤング率は後日現地で実施した引き倒し試験の結果を用いているが、算定された流速が想定される流速よりも大きな値を示したものが多く存在した。この原因として、樹木へのごみ等の付着、樹木の流水中での振動等による根のゆるみおよび降雨や流水による土中水分の増加に伴う根の支持力低下が考えられる。本研究は、一般に平常時に行われている樹木の引き倒し試験結果による倒伏限界値が実際の洪水時にどのように変化するかを把握する目的で、倒伏限界値に影響を及ぼす要因について検討を行った結果を報告するものである。

2. 倒伏試験

調査を実施した箇所は、1992年8月洪水時に河道内樹木が多数倒伏した箇所であり、樹木倒伏調査⁴⁾および高水敷堆積調査⁵⁾を実施した箇所と同一の地点である。図-1に調査箇所および試験木の位置を示した。引き倒し試験は、ヤナギとケヤマハンノキを対象として、1994年10月～12月および1995年6月～7月にかけて実施された。

1994年の調査は、高水敷の土中水分が異なる時期を想定して降雨の状況をみて3回に分けて行なわれた。大きな洪水では、洪水継続時間が長く降雨だけの給水では不十分と考えられることから、1995年の調査では試験木の周囲を高さ1.0m、直径1.8mの鉄製コルゲート管で囲いその中に河川水を注いで概ね24時間放置した後実施した。鵜川気象観測所の調査実施時前後の降水状況および気温を図-2に示した。なお、降水量は、調査箇所近傍の鵜川町の日降水量である。1994年の第1回目の調査は、調査前1週間に降雨が無かった10月24～26日にかけて20本(ヤナギ10本、ケヤマハンノキ10本)実施した。また、第2回目は、10日程度前にまとまった降雨がありさらに直前に降雨のあった10月28日に6本(ヤナギ4本、ケヤマハンノキ2本)実施した。3回目の調査は、2回目の調査時に比べて雨量は少ないが直前に降雨のあった12月12～13日に14本(ヤナギ6本、ケヤマハンノキ8本)実施した。1995年の調査は降雨に関係なく、6月29日～7月29日にかけて20本(ヤナギ10本、ケヤマハンノキ10本)実施した。

調査方法は、樹木の根元から50cmの高さにワイヤーロープを設置し、油圧ショベルで反力を取り、中間にレバーブロックを取り付け荷重を架けていき、引き倒し荷重を計測して倒伏限界モーメント M_0 を

表-1 樹木倒伏調査結果

ヤナギ 調査日	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	倒伏限界モー メント(kgf m)	含水比 (%)	根張り (cm)	根の厚み (cm)	ケヤマハンノキ 調査日	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	倒伏限界モー メント(kgf m)	含水比 (%)	根張り (cm)	根の厚み (cm)
'94/10/24	7.4	8.00	200.0	39.90	—	—	'94/10/24	8.4	6.65	535.5	44.50	—	—
'94/10/24	9.9	8.55	1037.5	27.20	—	—	'94/10/24	11.4	8.95	306.0	45.20	—	—
'94/10/24	12.1	8.75	700.0	34.60	—	—	'94/10/25	9.5	9.60	510.0	38.20	—	—
'94/10/24	12.4	9.15	500.0	30.00	—	—	'94/10/25	10.4	10.10	944.0	27.40	—	—
'94/10/24	16.8	11.10	900.0	44.70	—	—	'94/10/25	12.8	10.50	1428.5	40.90	—	—
'94/10/26	24.4	24.40	1923.0	42.00	—	—	'94/10/25	14.6	10.50	944.0	34.20	—	—
'94/11/28	6.2	7.20	331.5	46.30	—	—	'94/10/25	15.0	11.00	459.0	39.40	—	—
'94/11/28	11.6	7.20	663.5	41.20	—	—	'94/11/28	7.6	7.20	459.0	48.20	—	—
'94/11/28	16.7	11.10	956.5	50.00	—	—	'94/11/28	9.0	9.10	433.5	35.20	—	—
'94/11/28	26.2	11.50	689.0	48.30	—	—	'94/12/12	10.3	4.60	191.5	46.00	—	—
'94/12/13	11.1	9.00	918.5	49.80	—	—	'94/12/12	13.1	10.10	357.0	43.30	—	—
'94/12/13	14.6	10.00	765.5	52.50	—	—	'94/12/12	13.4	9.30	497.5	41.00	—	—
'94/12/13	18.2	12.00	1173.5	30.70	—	—	'94/12/12	17.1	11.60	1071.5	49.60	—	—
'95/6/29	14.4	10.10	506.0	55.10	144.0	54.0	'94/12/13	11.3	8.20	153.0	34.10	—	—
'95/6/30	23.3	11.20	867.9	50.90	172.0	78.0	'94/12/13	19.2	11.30	2143.0	34.10	—	—
'95/7/6	21.4	9.70	1004.3	47.70	184.0	68.0	'95/6/29	18.1	10.60	796.4	40.40	146.0	28.0
'95/7/6	18.7	10.20	535.7	55.60	122.0	58.0	'95/6/29	14.8	11.40	924.0	40.50	158.0	44.0
'95/7/6	13.2	11.80	280.5	38.00	138.0	45.0	'95/6/29	17.3	12.70	498.3	41.90	176.0	48.0
'95/7/27	15.7	11.20	517.0	40.10	134.0	46.0	'95/6/30	18.9	12.30	1173.7	40.00	202.0	68.0
'95/7/27	16.5	10.80	486.2	46.50	72.0	40.0	'95/6/30	15.6	12.60	722.7	42.20	110.0	62.0
'95/7/29	16.5	12.10	948.2	39.30	102.0	64.0	'95/6/30	19.3	12.40	1358.5	40.80	112.0	62.0
'95/7/29	17.8	11.60	829.4	35.20	142.0	75.0	'95/7/6	19.5	11.20	332.2	36.20	150.0	78.0
							'95/7/27	16.1	12.70	618.2	39.00	104.0	58.0

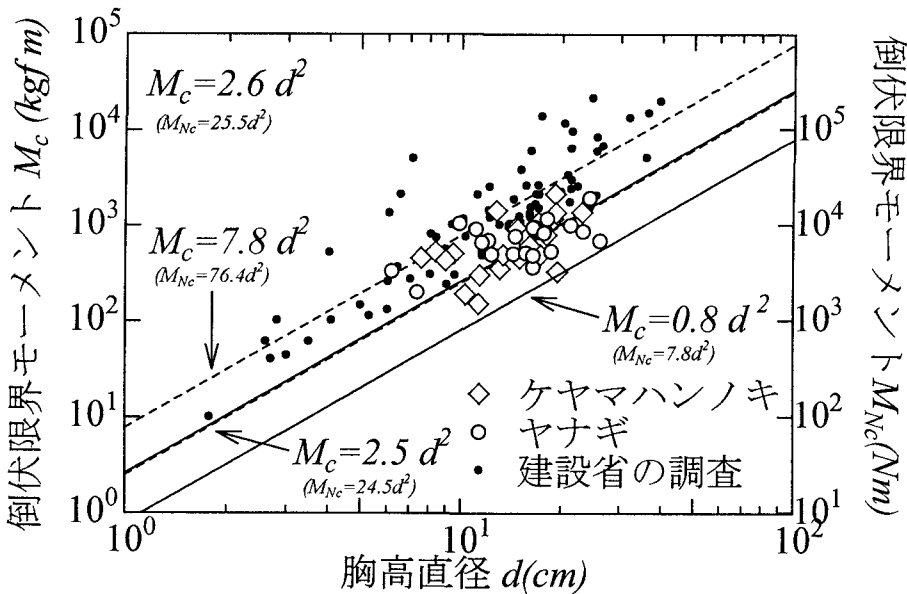


図-3 試験木の倒伏限界モーメント

求めた。さらに、試験木の根の分布する地下20cmから土壌を採取し、含水比を測定した。根の支持力は根の成長と大きな関係があることから、1995年の調査では根の状況を把握する目的で、根張り倒伏した試験木の根鉢の直径(根張り) R_w および厚さ(根の厚さ) R_d を測定した。調査結果をまとめて表-1に示した。なお、1994年の調査のうちヤナギ1本ケヤマハンノキ2本については、引き倒し荷重不足により限界倒伏モーメントは得られなかった。また、1994年調査のヤナギ6本ケヤマハンノキ3本、1995年調査のヤナギ1本ケヤマハンノキ2本は、引き倒し時に幹がおれる等の理由により正確な根張り倒伏が再現できなかったため、今回の検討からは除外した。

試験木の倒伏限界モーメント M_c (kgf m)、 M_{Nc} (Nm)を樹径 d (cm)で整理し図化すると図-3となる。なお、力の単位の表記について原則はSI単位系(N)を用いるが、現場において通常実用単位(kgf)を用いることから両者の併記とした。今回の調査においてもヤナギとケヤマハンノキでは樹種による違いは見られなかった。今回の調査は、時期は異なるものの同一地区の高水敷で実施されたものであることから、

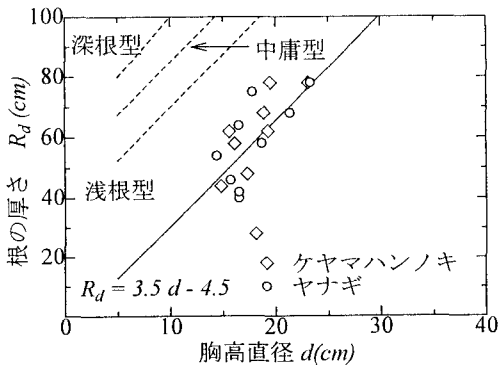


図-4 根の厚さ R_d と胸高直径 d との関係

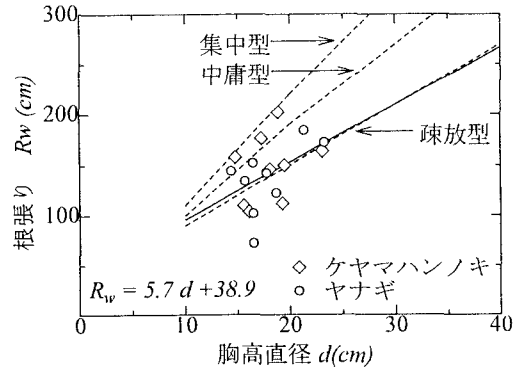


図-5 根張り R_w と胸高直径 d との関係

土中水分を除けば土質条件はほぼ同一と考えてよい。樹種、土質等樹径以外の要素を無視し最小2乗法により回帰式を求めると(1)式となる。

$$M_c = 2.6d^2 \quad \text{or} \quad M_{Nc} = 25.5d^2 \quad (1)$$

なお、建設省の調査結果およびそのときの回帰式 ($M_c = 7.8d^2$) と下限式 ($M_c = 2.5d^2$) も併せて示した¹⁾。(1)式はこれらの回帰式の間に入るものの下限式にきわめて近く、建設省の調査結果の1/3程度の大きさにとどまる結果となり、下限式を下回る値を示したものが少なくない結果となった。

洪水流の水深方向分布を1/7乗則で表されるものとする、流速分布 $u_{(z)}$ は、(2)式となる。

$$u_{(z)} = \frac{8}{7} U_m \left(\frac{z}{h} \right)^{1/7} \quad (2)$$

ここで、 U_m ; 水深平均流速、 z ; 河床からの高さ、 h ; 水深である。いま、樹木を直径 d の円柱と見立てて根本にかかるモーメント M_N を計算すると(3)式となる。

$$M_N = \frac{2}{7} \rho C_d U_m^2 d h^2 \quad (3)$$

ここで、 ρ ; 水の密度、 C_d ; 円柱の抗力係数である。樹木の根本にかかるモーメントは平均流速の2乗に比例することとなる。すなわち、倒伏限界モーメントが1/3になるということは、限界平均流速が60%程度に低下する事を意味する。河道内の樹木配置計画を立案する上で、河道内樹木の流木化を防止することが極めて重要な事項であることから、得られた倒伏限界モーメントが既往の調査結果に比較して小さくなった原因を明確にする必要がある。

3. 根系の影響

根の支持力は、根の成長と大きな関係があることから、今回の試験木の根系がどのような状態であったかを把握することとする。根張り R_w および根の厚さ R_d と胸高直径 d との関係を図示したものが図-4および図-5である。根張りについては、集中型(根系分布が根株の周囲に集中するもの)、疎放型(根系の水平分布が根株付近に集中せず広い範囲にわたるもの)、中庸型(集中型と疎放型の中間のもの)、また根の厚さについては、深根型(根系分布が堅密のもの)、浅根型(大部分の根系分布が表層土壌にあるもの)、中庸型(浅根型と深根型の中間の型で根系分布が中庸の深さにおよぶもの)の胸高直径との関係¹⁾を比較のため図中に示した。今回の試験木の根系について、根張りは概ね集中型と疎放型の間に位置するものの、根の厚さは浅根型よりも小さく浅根型の1/2程度となっている。調査地点が高水敷であり、比高が1.0m前後と低く地下水位が地表から下方に0.5~1.0mの所であるため、根の地下方向への成長が浅くなったと考えられる。一方、図-6に示す釧路地方の河畔ケヤマハンノキ林の収穫予想表⁶⁾(A等地B等

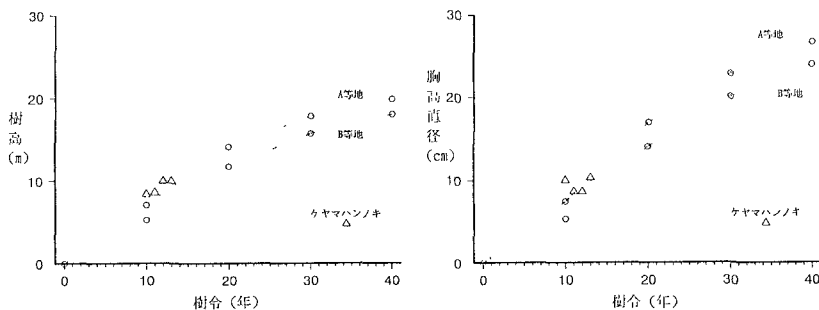


図-6 収穫予想表との比較

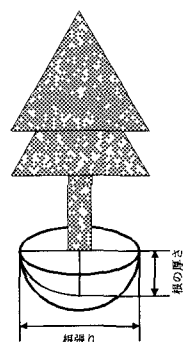


図-7 根鉢の模式図

地に分けて、林齢と樹高、林齢と胸高直径等の標準的な成長の基準で、これと比較することにより、おおよその成長の良否を判定できるものである。なお、A等地とは成長良なもの、B等地とは成長並なものを意味している。)との比較から、地上系の成長はかなり良い成長をしているものと判断される。以上のことから、地下水位の影響による根の厚さが小さくなったこと以外、試験木は通常の生育をしていたものと判断される。

根の支持力として倒伏限界モーメントを用い根鉢の大きさととの関係を見ることとする。根鉢は複雑な形状をしているが、ここでは図-7に示すような楕円の回転体として考えることとし、根むくれ倒伏した樹木の根張り R_w と厚さ R_d から根鉢の表面積 S_r を算定した。根鉢の表面積と倒伏限界モーメントの関係を図示すると図-8 となり、本調査においても根鉢表面積が増加するとともに倒伏限界モーメントが増加する傾向を示した。最小2乗法による関係式は(4)式となる。

$$M_c = 484.2S_r^{0.46} \quad \text{or} \quad M_{Nc} = 4745S_r^{0.46} \quad (4)$$

根の厚さが通常の生育をしたものと仮定し測定結果の2倍の値であった場合、根鉢の表面積はほぼ2倍となることから、倒伏限界モーメントは(4)式から今回得られた倒伏限界モーメントの約1.4倍程度となる。しかし、建設省で行われた調査においても対象は高水敷の樹木であり、一般に林学で研究されている樹木の生育環境よりは地下水位が高い箇所に存在し程度の差はあるが根の生育について地下水位が高い影響を受けているものと考えられる。このため、倒伏限界モーメントに対する根の厚さの影響すなわち常時の地下水位の影響は極めて大きく引き倒し試験により倒伏限界モーメントを求める場合十分に考慮される必要があるが、今回の調査結果が建設省の調査結果²⁾を大きく下回る結果となったことを説明するには不十分である。

4. 土中含水比の影響

1994年度の調査は土中含水比が異なるよう調査日を選定したが、日降水量から判断すると根鉢の厚さの位置である地下0.5m~1mまで高い含水比が維持する条件ではなく、地表面のみ含水比が高くなっている状況にあったものと考えられる。このため、根鉢周辺の土壌は平常時に比較すると高い含水比になっているものの、地表面近傍で採取された土壌の含水比が根鉢周辺の土壌の含水比を代表しているとはいえない。従って1994年の調査結果は、根鉢周辺の土壌全体が高含水比となる1995年の調査方法の結果と同一の条件として比較することができない。ここでは、より実際の洪水の状況に近い1995年の調査結果を用い、土中含水比と倒伏限界モーメントの関係をみることとする。

(1) 式を基準値とした倒伏限界値の値 $M_c/(2.6d^2)$ あるいは $M_{Nc}/(25.5d^2)$ を土中含水比 $\theta(\%)$ で整理したものが図-9である。土中含水比のばらつきがそれ程大きくなく明確ではないが、1995年の調査結果を

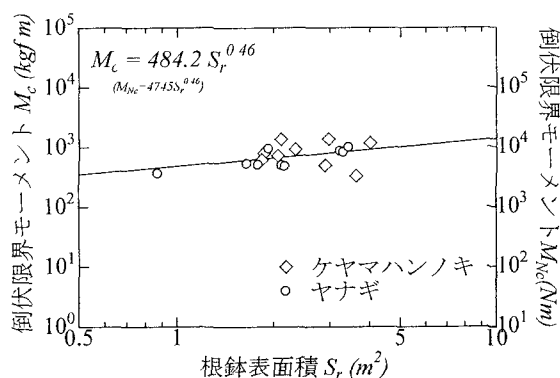


図-8 根鉢表面積 S_r と限界倒伏モーメント M_c, M_{Nc} の関係

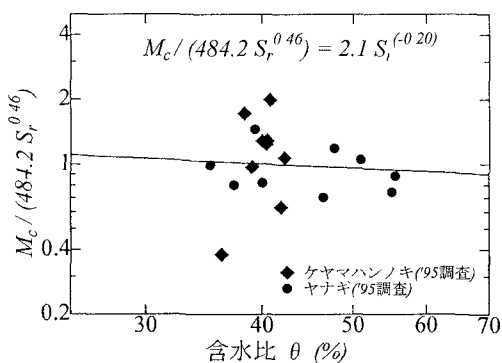


図-9 倒伏限界モーメントに及ぼす土中含水比の影響

最小2乗法を用いて回帰式を求めると(5)式となり、土中含水比が大きくなるに従って $M_c/(2.6d^2)$ が小さくなる傾向が伺える。

$$\frac{M_c}{2.6d^2} = 3.1\theta^{-0.35} \quad \text{or} \quad \frac{M_{Nc}}{25.5d^2} = 3.1\theta^{-0.35} \quad (5)$$

(5) 式を用いると、含水比が30%および50%の状態での倒伏限界モーメントの比は、1.2程度となる。なお、図-9には、1994年度調査結果についても併記した。1994年の調査において根鉢付近全体の含水比が表面で採取された土壌の含水比の結果に比較して低い値であるとすれば得られる回帰式の傾きも大きなものとなると考えられ、樹木の引き倒し試験を実施する場合土中の含水比についても十分考慮する必要があるといえる。

5. おわりに

今回の調査により、根系の生育特に根の厚さおよび土壌の含水比が樹木の倒伏限界値に大きな影響を及ぼすことが判明した。一般に平常時に実施される引き倒し試験によって求められる樹木の倒伏限界をそのまま河道内樹木の配置計画等に利用することは危険側の判断を下すこととなる。このため、河道内樹木の配置計画の策定に当たっては、その箇所の地下水位あるいは比高を考慮するとともに、樹木の引き倒し試験を実施する場合洪水時における土中含水比の影響を加味する必要がある。

参考文献

- 1) 荻住昇: 樹木根系図説, 誠文堂新光社, 1987.
- 2) 建設省河川局治水課: 河道内の樹木の伐採・植樹のためのガイドライン(案), 1993.
- 3) 渡邊康玄・三谷修司・橋本識秀: 鶴川1992年8月洪水における河道内樹木の倒伏と流れ, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集第2部, pp468~469, 1993.
- 4) 渡邊康玄・三谷修司: 鶴川KP14.1~KP15.2における河道内植生の変遷と平成4年8月洪水による河道内樹木の倒伏状況調査, 北海道開発局開発土木研究所月報No.483, pp55~69, 1993.
- 5) 三谷修司・渡邊康玄・北條紘次: 平成4年8月鶴川洪水による高水敷の土砂堆積状況, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第2部(A), pp234~235, 1994.
- 6) 森林計画研究会北海道林務部支部: 北海道の主要樹種, 林分収穫表, 1960.