

機関番号：32665

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ～ 2010

課題番号：20510178

研究課題名 (和文) 風水害で被災する樹木の流体力評価に関する研究

研究課題名 (英文) Evaluation of drag force of trees damaged from storm and flood

研究代表者

長林 久夫 (NAGABAYASHI HISAO)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：70102431

研究成果の概要 (和文)：

風水害で被災する樹木の抗力評価と倒壊や破断の機構について実験と現地調査から検討した。室内実験からは低風速時に葉の抗力分担は 60% 程度であるが、強風時には枝と葉を加えた樹冠部の抗力が 90% 程度を分担することになり、倒壊や破断にいたる抗力には樹冠の抗力評価が重要であることを示した。強風で被災した河道内樹木の調査から倒壊は樹齢 20 年程度のもので多く、破断は樹齢に関係なく発生したことを示した。樹木の引き倒し試験を行い、倒壊モーメントを求め、樹齢と樹形構造の関係を示した。さらに、曲げ試験を実施して生木の曲げ耐力を調べ、モデル解析から倒壊と破断にいたる限界領域を示しその機構を明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Evaluation of drag force of trees damaged by storm and flood, the mechanism of collapse and the break were examined from the experiment and the field survey. The following were examined from the model experiment. The drag that combined the branch and the leaves would allot 90% at the strong wind, and it was clarified that the drag evaluation of the canopy was important though the leaves in the low wind was an effect of 60% allotment. The following were examined from the field survey. The age of a tree was about 20 years in the collapsing tree, and the breaking showed no relation to the age of a tree. The collapse moment of the struck tree was clarified from the pulling down examination of the tree. The relation between the age of a tree and the tree form structure was requested. In addition, the bending test was executed, the flexural capacity of unseasoned wood was examined, the region of the collapse and the break was shown from the model analysis, and the mechanism was clarified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,400,000	720,000	3120,000
2009 年度	800,000	240,000	1040,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム・自然災害科学

キーワード：気象災害、水災害

1. 研究開始当初の背景

樹木の被災及び樹木を要因とした水理現象による災害は各地で生じているが、多様な樹種と複雑な構造を有する樹木の抗力特性の評価法に関する研究は国内外において比較的少ない。例えば、米国の風災害を契機とする針葉樹の類を対象とした Johnson ら(1975)先駆的な研究及び椎貝博美ら(1985-1990)のスキ等に関する風応力や風による自励振動の影響に関する一連の研究が報告、さらに、福岡捷二・藤田光一(1987)の洪水時の流れに及ぼす竹林の粗度評価の研究、石川忠晴の河川内に自生するワカナギの抗力評価の研究などが報告されている。しかし、樹木の抗力評価は繁茂の状況に応じて葉部や枝を分離した評価が必要であるが、樹形構造や密生度に応じた抗力特性の相違を表現するためには未解明の問題点が残されている。また、河川域においては昭和40年以降の生活様式の変化から、樹木利用による人為的管理が減少したこともあり、全国の河川において河道内の樹林化が進行している。

流水下の樹木に作用する抗力特性はせん断流と自由水面効果による影響も加わり、風応力下のものに比べてさらに複雑となる。強風で倒壊する樹木や洪水で流失する樹木の抗力特性を評価するためには樹幹部と葉部の抗力を合理的に分離評価することが必須の要件であるが、樹木の抗力評価に関して系統的に検討した研究事例は少ない。

申請者はこれまでに九州大学応用力学研究所の共同研究において風応力下における樹木の抗力評価法の研究(研究代表：日本大学工学部、長林久夫)を展開して風速を0~30m/s間で段階的に風速を変化した実験から広葉樹を対象とした幹部、樹冠部及び葉部の各抗力を分離評価する手法を提案し、風応力に応じた抗力評価を可能にした。一方、樹木密生度が高く、枝先まで針葉で覆われているヒノキや杉の類の針葉樹は樹冠と葉部の抗力分離が困難であること、樹木背後における流速遮蔽係数は広葉樹に比べて大きく、高流速時の抗力はより増大するため、この点に関しては流れの透過率を考慮に入れた抗力評価法の提案が待たれている。

提案した抗力評価法を実樹木へ適用するためには、樹種に対応した樹形構造と各部の応力特性の評価及び外力に応じた幹部、樹冠部及び葉部の変形を評価することが必要となる。そのためには、強風と洪水下における樹木の揺動と外力との関係の検討及び荒天時に被災した樹木の引倒し試験を行い、樹木の倒壊条件を検討するとともに実樹木の抗力評価を実施

することが必要である。

2. 研究の目的

強風下における樹木の倒壊や森林の被災及び洪水時に水没し倒伏や破断に至る樹木の抗力特性に関し、これまで提案した樹木抗力の分離評価法の研究を進めるとともに、樹木倒壊に至る流体力を評価する現地実験を行うことを目的とする。(1)広葉樹と針葉樹の代表樹種に対する空気流と水流についての樹木抗力に関する実験的検討と種々の樹種に対応する樹木抗力の総合評価法の検討、(2)荒天時における樹木被災を想定した強風下の樹木の揺動観測と洪水流下後の伐開予定地における河道内樹木の引き倒し実験を国土交通省とともに共同実験し、風水害時における実樹木の倒伏時の流体力算定を可能にする。

3. 研究の方法

(1)樹木抗力の総合評価法に関する実験的検討

大型風洞実験についての過去のデータより樹種と風透過率の検討を進めるとともに針葉樹の樹形評価の検討を行い、風透過率を考慮に入れた樹木の抗力評価法の検討を進める。実験により、樹木抗力と射影面積および透過流速の計測を行い、平面流況と透過流速を算定する。

(2)実樹木への抗力評価の応用

強風によって倒壊や破断の被災を受けた樹木の抗力特性を調べるため、河道内樹木の樹形調査を実施する。2008年2月の爆弾低気圧の強風により阿武隈川左支川荒川の樹林約800本が倒伏、破断した被災に関する緊急調査を実施する。さらに、阿賀川の抜開予定地における樹木の引倒し試験を実施し、荒天時に倒壊する樹木の体力評価を行う。次いで、引き倒し試験後の樹木の曲げ試験から破断に至る曲げ応力を求め、現地で被災した樹木の倒壊と破断にいたる機構を検討する。

4. 研究成果

(1)樹木抗力の総合評価法に関する実験的検討

①強風下における樹木の抗力評価法の検討

風応力を受けて変形する樹木に作用する流体力を幹部と樹冠部に区分して、さらに風速に応じて変形する樹幹部の射影面積を実験的に評価して樹木が受ける流体力を評価する検討を実施している。以下ではこれまでの検討を進め、流力に応じた各部の抗力の分担比率を算定した。写真-1は風速20m/sにおける模型樹木(高さ1.5m)の変形状況である。



写真-1 強風下の樹木の変形

幹もたわみ、細枝は背後になびいている。強風下の抗力算定においては樹幹部の変形を考慮することが必要となる。

各部の抗力を評価するためには樹冠の細枝や葉に着目して抗力を算定することになり、式(1)の各項を模型実験から算定する方法を提案した。

$$F = \frac{1}{2} C_D \rho A_D U^2 + \frac{1}{2} C_C \rho A_C U^2 + \frac{1}{2} C_f \rho A_f U^2 \quad (1)$$

$$F = F_D + F_C + F_f = \alpha U^\beta$$

ここで F : 樹木の抗力 (N)、 F_D : 幹部の抗力 (N)、 F_C : 枝部の抗力 (N)、 F_f : 葉部の抗力 (N)、 C_D : 幹部の抗力係数、 A_D : 幹部の投影面積 (m^2)、 C_C : 枝部の抗力係数、 A_C : 枝部の投影面積 (m^2)、 C_f : 葉部の抗力係数、 A_f : 葉部の片面積 (m^2)、 ρ : 空気密度 (kg/m^3)、 U : 風速 (m/sec)、 α 、 β : 定数である。

各部の抗力係数は式(2)を用いて、実験をもとに算定した。その結果、葉の抗力係数を流速の関数値で与え、樹冠の射影面積を風力に応じた堆積率の変化として与えることによって、各部の抗力を評価した。

$$C_C = \frac{F - F_D}{\frac{1}{2} \rho A_C U^2} \quad , \quad C_f = \frac{1}{A_f} \left(\frac{F - F_D}{\frac{1}{2} \rho U^2} - C_C A_C \right)$$

$$C_C = \frac{F - (F_D + F_f)}{\frac{1}{2} \rho A_C U^2} \quad (2)$$

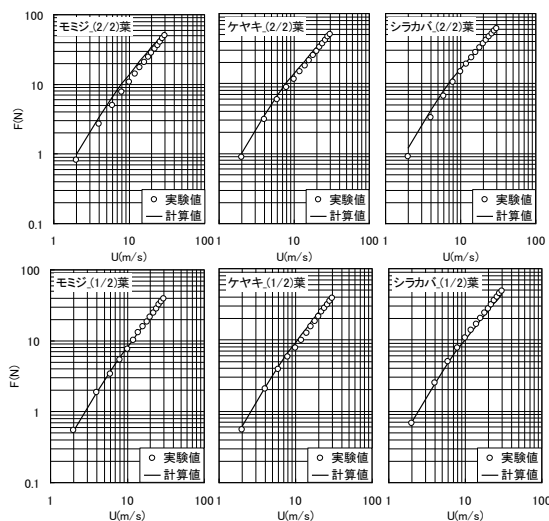


図-1 樹木抗力のモデルによる再現計算

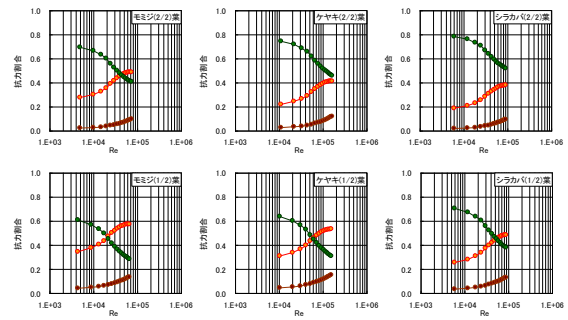


図-2 各部の抗力分担割合の比較

抗力を再現した結果を図-2に示す。1/2葉は樹木の葉の枚数を半減した場合を示す。

低風速の葉部の分担抗力は6割以上程度であり、強風時には3~4割程度に減少するが、葉部の抗力分担はかなり大きい。枝部は低風速において2割程度を分担しており、強風時に4~5割程度となる。したがって、枝と葉を加えた樹冠部の抗力が9割程度を分担することになり、強風時に倒壊や倒伏する樹木について、樹冠部の抗力評価が極めて重要であることを示した。

②洪水下の下草帯を有する樹木の抗力評価の検討

洪水時の河道内樹木は流水障害による水位上層や流失による橋梁への閉塞による災害をもたらすことがあり、樹木流失機構の検討は重要である。ここでは下草帯がある場の樹木群の抗力評価についての検討を実施した。実験は長さ15m、幅B=0.5m、高さ0.6m、定格流量100l/secの木製の水路を使用して、下流水路上流端より6.93mの位置より植生区間として、長さ2.7m、植生間幅0.05mの正方配列で設置し、下草モデルとした。その下草設置上流端より1mの下流を、樹木区間として直径0.01mの木製円柱を図-3のように0.40m全幅に設置した。樹木間隔は $K_L=0.1m$ の正三角形の千鳥配列である。

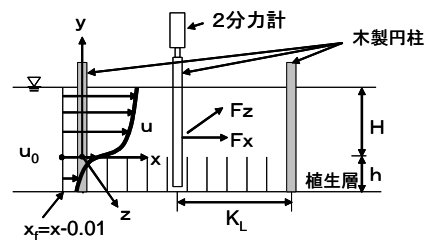


図-3 下草帯を有する樹木効力の流水実験

下草帯と上層の速度分布を式(1)のように示し、抗力式を式(2)で与え各項を実験から評価した。

$$u = \frac{u_s}{\kappa \alpha (h-d)} e^{\alpha z} \quad (3)$$

$$u = \frac{u_s}{\kappa} \ln \frac{y+h-d}{h-d} + \frac{u_s}{\kappa \alpha (h-d)}$$

$$\alpha = \frac{AC_D}{2} \left(\frac{u_0}{u_*} \right)^2$$

$$F = F_U + F_L + D$$

$$F = \frac{1}{2} \rho C_{DU} A_U v_U^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DL} A_L v_L^2 + \frac{1}{2} \rho C_{DW} A_W v_W^2 \quad (4)$$

ここで、 F_U : 植生層上の樹木抗力 (N)、 F_L : 植生層内の樹木抗力 (N)、 C_{DU} : 植生層上の抗力係数、 C_{DL} : 植生層内の抗力係数、 C_{DW} : 造波抵抗係数、 A_U : 植生層上の樹木投影面積 (m^2)、 A_L : 植生層内の樹木投影面積 (m^2)、 A_W : 造波抵抗部樹木投影面積 (m^2)、 v_U : 植生層上の平均流速 (m/s)、 v_L : 植生層内の平均流速 (m/s)、 v_W : 造波抵抗部平均流速 (m/s) である。

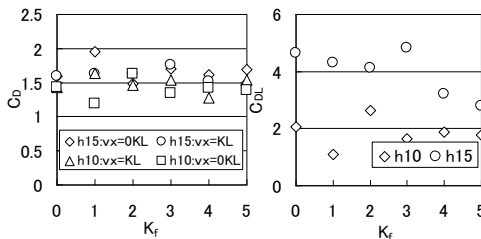


図-4 植生帯を有する樹木の抗力評価

図-4 に樹木に作用する全抗力と植生帯内の抗力係数の算定結果を示す。左の全抗力としては 1.5 と大きくなり、造波抵抗と植生帯の抗力を分離評価する必要がある。植生体内では過大の抗力となっており、植生体内の速度評価と造波効果による影響が大きいことを示した。

(2) 実樹木への抗力評価法の応用

① 強風による荒川の樹木被災調査

強風による荒川の河道内樹木の被災は約 800 本であり、根の部分から倒れている「倒伏」と、幹の部分から折れて倒れている「破断」に分けることができる。倒伏した樹木の根周りは直径約 2~3.5m であり、礫を抱いていたため根は直下に生育せず、横に広がっていた。一般的なアカマツと比べ根による支持力が弱く根の支持力が十分あった樹木で、幹部が耐えられなくなったものが破断していた。調査した被災樹木は 122 本であるが、このうち倒伏した樹木が 80 本(65.5%)、破断した樹木が 42 本(34.4%)であった。被災した全樹木に対して約 90%がアカマツであり、残りがアカシアを始めとした広葉樹であった。図-5 に示すとおり倒伏した樹木は 20m 以上の高木が多くであり、破断については樹高に依存しない結果となった。幹の胸高直径に関して、倒伏と破断した樹木に明確な違いはなく、同じ胸高直径と樹高を持つ樹木でも、倒伏と

破断をしていることや 40cm 以上の太い幹を持つ樹木でも破断していることが確認した。

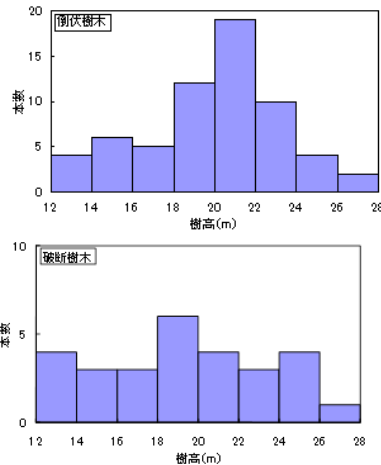


図-5 荒川の被災樹木の倒伏と破断

② 樹木の引き倒し試験

引き倒し試験を荒川と阿武隈川における河道内樹木について実施した。選定した樹木にワイロープを地面から 1.2m のところにかけて、チェーンブロックおよび重機により水平に引張力を加えた。倒伏限界力はロードセルによって測定した。これらの年輪、樹高、胸高直径を樹種別に求めて、これらの関係を関数化した。本試験で得られた倒伏限界モーメントと胸高直径との関係を図-6 に示す。

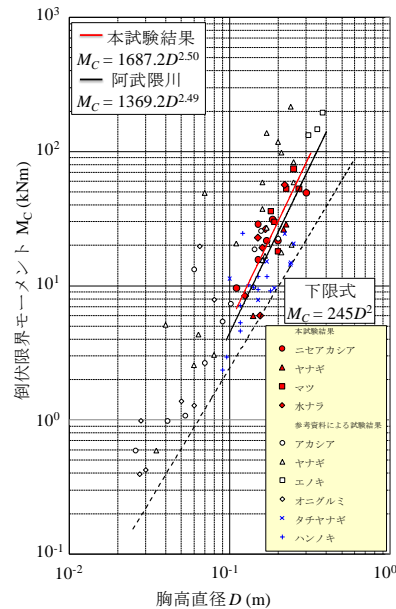


図-6 阿武隈川と荒川における樹木の引倒し試験結果

③ 樹木の限界曲げ応力の算定

風によって抗力を受けた場合、樹木は、根の支持力によって立っているが、幹の曲げ強さが風の抗力を耐えられない場合、樹木は幹

の部分で破断することになるので、幹の曲げ強さが必要になる。そのため樹木の曲げ試験を行った。使用した曲げ試験機の概略図を図-7に示す。引き倒し試験に用いた樹木をそのまま曲げ試験に使い、上部から荷重をかけ破断させ、その時の降伏力を測定した。この時の樹木の曲げ強さを以下のようにして求めた。ただし、部材断面は統一しやすいように円形断面とした。

$$\sigma = \frac{a \times P_{\max}}{2Z} \quad Z = \frac{\pi d^3}{32} \quad (5)$$

ここで、 σ : 曲げ強さ(N/m²)、 a : 支点から荷重点までの距離(=1.3m)、 P_{\max} : 最大降伏荷重(N)、 Z : 断面係数(m³)、 d : 部材の直径(m)である。曲げ試験による結果を表-4に示す。

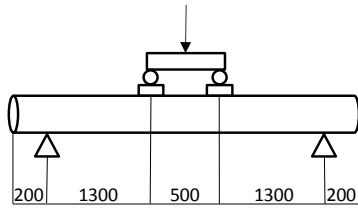


図-7 樹木の曲げ試験装置模式図

表-1 に本実験による樹木の限界曲げ応力の実験結果を示す。これまで住宅用材の試験値はあるものの、生木の曲げ試験結果は少なく本実験は貴重な値を提示している。

表-1 樹木の限界曲応力実験

樹種	直径	最大荷重	断面2次	a(mm)	曲げ強さ
	D (mm)				P(kN)
アカシア	184.2	58.216	56468238	1300	61.71
アカシア	152.0	33.83	26180919	1300	63.82
アカシア	110.0	9.67	7191950	1300	48.08
アカシア	155.6	24.818	28787978	1300	43.60
アカシア	123.5	16.812	11401932	1300	59.16
アカシア	221.4	30.512	117912861	1300	18.62
クルミ	118.7	6.282	9740071	1300	24.88
マツ	182.8	28.708	54847778	1300	31.10
マツ	224.9	44.546	125610882	1300	25.92
マツ	165.4	38.36	36773281	1300	56.09
マツ	182.2	50.844	54077508	1300	55.67
マツ	241.2	101.352	166269495	1300	47.79
水ナラ	147.5	28.914	23237508	1300	59.65
水ナラ	183.7	36.974	55953595	1300	39.46
水ナラ	137.4	17.118	17482509	1300	43.72
水ナラ	113.5	6.648	8133780	1300	30.14
水ナラ	168.1	32.09	39176574	1300	44.74

④強風で被災する樹木の倒壊と破断の判定

この実験地にもとづいて河道内の樹木に関して、倒伏モーメントを算出することが可能である。風によって抗力を受けた場合、樹木は根の支持力によって直立しているが、幹の曲げ強さが抗力に耐えられない場合、樹木は幹の部分で破断することになり、幹の曲げ強さが必要になる。そのため樹木の曲げ試験を行った。使用した曲げ試験の概略図を図-7に示す。引き倒し試験において倒した樹木をその

まま曲げ試験に使い、上部から荷重をかけ破断させてその時の最大降伏力を測定した。その時の樹木の曲げ強さを以下のようにして求めた。ただし、部材断面は円形断面としている。

樹木の幹は地面と接している部分が一番太く、上部に行くほどに細くなっているので幹は台形とし、 d は地面からの距離 x の関数とした。また、樹木の種々の長さは引倒し試験に用いた樹木の樹形調査から算出し、その結果、キャノピー内のアカマツについて、次式が成り立ったのでこれらを使用することとした。

$$\frac{D_c}{D} = 0.461 \quad \frac{W_c}{D} = 15.441 \quad \frac{h_c}{H} = 0.762 \quad (6)$$

$$h_c = 15.836D^{0.089} \quad h_c = -10.51D + 6.6268$$

ここで、 D : 胸高直径、 D_c : 幹上部直径、 W_c : 樹冠幅である。

倒伏・破断の推算結果を図-8に示す。この図はキャ倒伏・破断の推算結果を図-9に示す。

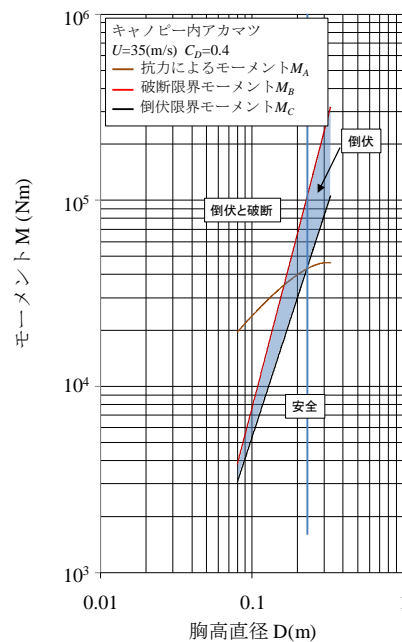


図-8 胸高直径に対する倒伏と破断限界

この図はキャノピー内のアカマツを対象とし、災害当時、福島県内で最も強い風が吹いた白河市の最大瞬間風速 $U=35$ (m/s)における樹木被災を予測したものである。 $M_A > M_B$ ならば破断、 $M_A > M_C$ ならば倒伏することが予測される。この結果 $D < 0.17$ (m)で倒伏と破断、 $0.17 < D < 0.22$ (m)で倒伏、 $D < 0.22$ (m)ではどちらにも被災しない安全ということにな

った。被災結果とほぼ一致した結果ではあるが、これよりも太いアカマツが被災していることから、実際には強風によって樹木が前後に振動が起き、その影響で倒伏や破断を助長させたこと、ねじれ破断していることが確認されているので3次元的に風が吹きさまざまな力が作用していたことなどが考えられる。

また、樹木の破断位置について検討したものが図-9である。横軸に地面からの高さ $x(m)$ 、縦軸に地点 $x(m)$ における曲げ応力 (N/mm^2) を $D=0.2(m)$ の樹木がそれぞれ $U=35(m/s)$ と $U=45(m/s)$ の風速を受けた場合について示した。それぞれの曲線の最大値が風による破断限界モーメントが最大になり、曲げ応力も最大になる点であり、この結果から $x=2\sim 3(m)$ の地点が最大で破断しやすく、調査結果と比べほぼ一致した結果となった。

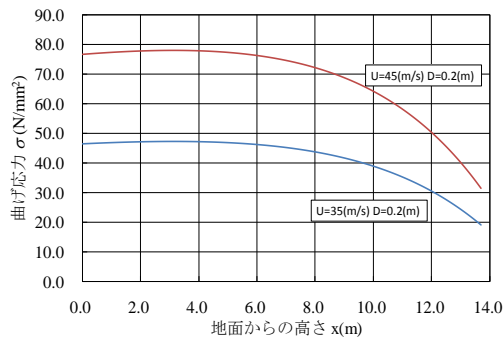


図-9 樹木の破断位置に関する検討

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3件)

- ①山田泰正、長林久夫、サンジェイパーク、二瓶昭弘：2008年2月強風による福島県荒川河道内樹木の被災について、東北地域災害科学研究、査読無し、Vol. 45、2009、pp. 17-21.
- ②Y. YAMADA, and H. NAGABAYASHI : Collapse Trees Induced by Gust Disaster at the ARAKAWA RIVER on FEB 2008, IAHR-APD Congress 2010 7th IUMEC, 査読有,2010, in CDROM.
- ③山田泰正、長林久夫：強風によって被災した樹木群の倒壊破断機構に関する検討、水工学論文集、査読有、Vol.54、2010、pp.1231-1236.

[学会発表] (計 3件)

- ① 山田泰正、長林久夫：2008年2月強風による福島県荒川河道内樹木の被災

調査について、土木学会東北支部技術研究発表会、2009.

- ② 山田泰正・長林久夫：2008年2月福島県荒川河道内樹木の被災について、土木学会第64回学術講演会、2009.
- ③ 山田泰正・長林久夫：風応力による河道内樹木の倒伏は段機構に関する検討、平成22年度土木学会東北支部技術研究発表会、2010.

[その他]

ホームページ等

<http://www.ce.nihon-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

長林 久夫 (NAGABAYASHI HISAO)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：70102431