

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 8 日現在

機関番号：10101
 研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2009～2012
 課題番号：21580169
 研究課題名（和文）
 樹冠の抗力係数と樹形計測に基づいた緑化樹木の耐風性診断
 研究課題名（英文）
 Windthrow risk diagnosis for park trees based on the drag coefficients of tree crowns and the measurement of tree form
 研究代表者
 小泉 章夫（KOIZUMI AKIO）
 北海道大学・大学院農学研究院・准教授
 研究者番号：40183040

研究成果の概要（和文）：緑化樹の耐風性を定量的に評価する方法について検討し、評価手順を提示した。樹冠にかかる風圧力を推定するために、屋外で風速と樹幹の曲げたわみを連続的に測定することで抗力係数を評価する方法を開発した。得られた抗力係数を用いて、風速から樹幹や根鉢に作用するモーメントを算出できる。樹幹の曲げ耐力を求めるために、不整な樹幹の断面係数を非破壊的に評価する手法を開発した。また、緑化樹の引き倒し試験を行って、胸高直径と根返りモーメントの回帰式を決定した。

研究成果の概要（英文）：Methods of quantitative evaluation for windthrow risk of park trees were discussed in order to propose a procedure for windthrow diagnosis. A field test method was developed to evaluate drag coefficients of trees, using measured data of wind speed and stem deflection. The moment acting on stem and root-soil plate can be calculated as a function of wind speed, using the obtained drag coefficients. To evaluate windthrow resistance with respect to stem breakage, a nondestructive method for determining the shape of a trunk cross section was developed. Furthermore, pull-down tests of park trees were conducted

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 1,300,000 | 390,000 | 1,690,000 |
| 2010年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2012年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 総計 | 3,000,000 | 900,000 | 3,900,000 |

研究分野：農学

科研費の分科・細目：森林学・森林科学

キーワード：緑化・環境保全林，風倒害

1. 研究開始当初の背景

樹木の風倒害防除対策は、針葉樹を中心とした山林の造林木について行われてきた。確

かに造林木の大規模な風倒による経済的被害は大きい。しかし、歩行者や通行車両の安全を確保する意味では、都市の街路樹や公園

樹の方が耐風性診断の必要性が高いといえる。また、伐採による木材利用を想定しない緑化木では老木や心材腐朽ほかの傷害をもった樹木が多く、個体レベルで精度の高い診断が求められている。

従来の緑化木の危険度診断は VTA 法¹⁾といった樹木外部の目視判断に機器診断を併用して、樹幹内部の腐朽状況や生理的な活力を推定する方法が中心であった。風荷重に対する樹冠の抗力や幹折れ、転倒抵抗についての力学的考察は断片的で、風倒を引き起こす限界風速などの定量的な評価も不十分であった。

風による幹折れや根返りに関する限界風速の推定を行うにあたって必要となるデータは、樹冠の抗力係数、樹幹の曲げ耐力、および根系の根返り耐力である。これらのうち、樹冠の抗力係数についてはこれまでに国内外で風洞実験が行われ、造林木を中心に抗力係数の評価が行われてきた。しかし、風洞の大きさの制約から鉢植えの小型樹木や模型を対象とした実験がほとんどで、実大樹木を用いた実験は 1960 年代に英国で針葉樹造林木数樹種を対象として行なわれた 1 回のみである²⁾。さらに、針葉樹造林木とは異なる広葉樹緑化木の耐風性評価を行うにあたって、広葉樹種の抗力係数のデータが決定的に不足している現状である。

風倒害のうち、幹折れ耐力は樹幹形状と木材の曲げ強度から予測できる。ただし、用材生産を目的とした針葉樹造林木とは異なり、老木を含む緑化木では樹幹の断面形状が単純な円断面ではなく不整であることが多い。

一方、根返り耐力を表す根系のモーメント抵抗については、造林木を中心に、ヨーロッパで数多くの引き倒し試験が行われており³⁾、樹木の地上部の大きさと根返り耐力との関係が示されている。申請者らはこれまでに造林地の針葉樹数樹種⁴⁾、果樹園のリンゴ樹⁵⁾、ニセアカシア街路樹⁶⁾について胸高直径との関係を報告した。また、針葉樹造林木について、根鉢（根系と土壌が一体となった樹木のアンカー部）の大きさと根返りの生じやすさの関係について考察した⁷⁾。

引用文献

- 1) Mattheck, C; Breloer, H (藤井英二郎, 宮越リカ訳): “樹木からのメッセージ-樹木の危険度診断”, 誠文堂新光社, (1998).
- 2) Mayhead, GJ: Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies., *Agricultural Meteorology*, 12: 123-130 (1973).
- 3) Peltola H, Kellomäki S, Hassinen A, Granander M: Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland.

Forest Ecology and Management 135: 143-153 (2000).

4) 小泉章夫: 生立木の非破壊試験による材質評価に関する研究, 北大演習林研報, 44: 1329-1415 (1987)

5) Koizumi, A; Araki, H; Hori, H; Inagawa, Y: Windthrow resistance of apple trees grafted in an orchard, *J. Wood Science*, 54: 10-15 (2008).

6) 小泉章夫, 平井卓郎, 笠康三郎, 中原亮, 新谷克教, 清水英征: ニセアカシア街路樹の耐風性, 北大演習林研報, 64: 105-112 (2007).

7) Koizumi, A; Oonuma, N; Sasaki, Y; Takahashi, K: Difference in uprooting resistance among coniferous species planted in soils of volcanic origin, *J. Forest Research*, 12: 237-242 (2007).

2. 研究の目的

本研究では、樹冠における風圧力の受圧、樹幹の曲げ破壊、根鉢の根返り破壊について力学モデルを構築し、定量的な耐風性評価法を確立することを目的とした。なかでも評価が難しかった樹冠の抗力係数について、野外実験で広葉樹の抗力係数を評価する手法を確立する。また、樹幹の曲げ破壊に関しては、樹幹断面のイメージを取得する手法を開発し、これに数値計算手法を併用して断面係数を求める方法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 野外試験による抗力係数の評価

抗力係数測定試験は供試木の風心高（風圧中心の高さ）での風向・風速と供試木の枝下部樹幹の曲げたわみを同時に継続測定することによって行なった（図 1）。

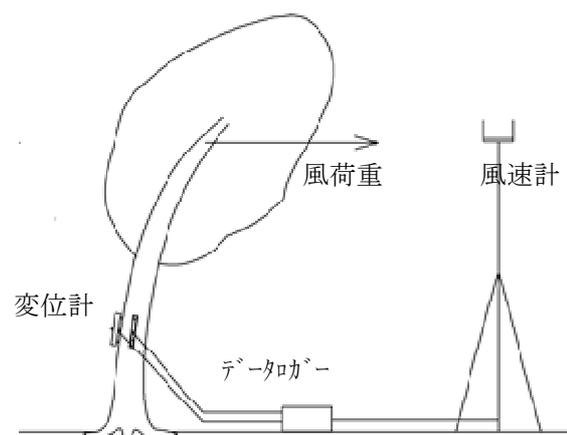


図 1 抗力係数評価試験

供試木は北海道大学構内に生育する若齢のポプラ 3 本およびノルウェーカエデ 1 本、

札幌市内建物屋上に植えられたヨーロッパトウヒとシラカンバ各1本とした。設定した供試木について、樹体各部の寸法を測定し、撮影した写真をもとに樹冠の受圧面積、風圧中心（樹冠重心）の高さを決定した。

風向・風速の測定と同時に、枝下部樹幹の一定区間の曲げたわみを測定した。これらの測定は10ヘルツのサンプリング速度で連続的に行った。

風・樹幹たわみの連続測定試験とは別に、無風時に供試木の曲げ剛性試験を行って風心高の負荷量と樹幹の曲げ矢高の弾性関係に関するバネ定数を算出した。抗力係数測定試験で測定した樹幹の曲げ矢高にバネ定数を乗じて風心高の風荷重に換算し、これに風速のデータを対応させることで各供試木の抗力係数を決定した。

(2) 樹幹断面形状の非破壊測定

樹幹外周の各標点（図2の例では5点）間の形状を型取りゲージでかたどり、点線で示した標点間の距離を測定して決定した各標点の座標に、かたどった樹幹外周の曲線を重ね合わせて断面形状を非破壊的に推定した。

このようにして作成した樹幹断面の画像について数値解析を行って断面係数を推定した。

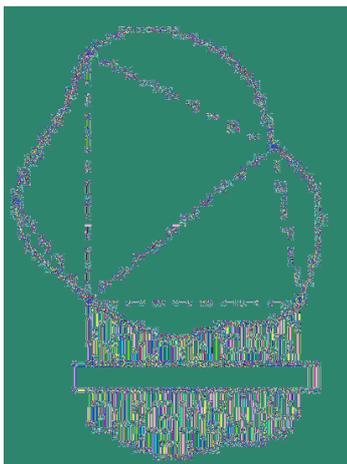


図2 型取りゲージによる外周形状の取得

(3) 根回りモーメントの測定試験

ニセアカシア大径木の引き倒し試験を行って根回りモーメントを求めたほか、カラマツについて低荷重レベルの繰り返し荷重試験を行い、土壌含水比の影響、繰り返し荷重の影響を検討した。

4. 研究成果

(1) 野外試験による抗力係数の評価

風速と樹幹たわみの連続同時測定による樹冠の抗力係数の評価法を検討した。実験の結果、図3に示すように、抗力係数は風速の増加に伴って平均値、ばらつきともに減少することが確かめられ、風倒被害が強風時に発

生することを勘案すると、本方法が実大樹木の抗力係数を評価する決定的な手法の一つになることが示された。

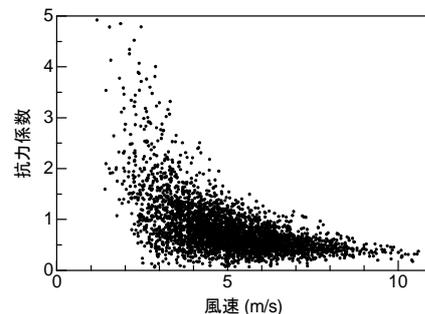


図3 風速と抗力係数の関係

一連の実験から推定された風速30m/sec時の供試木の抗力係数を表1に示す。ポプラやシラカンバの抗力係数は既往の風洞実験で得られている針葉樹造林樹種のそれらより小さいことが明らかとなり、シラカンバでは剪定の効果があることが示唆された。屋上緑化木のヨーロッパトウヒの抗力係数は風洞実験で得られている同樹種の実大樹木のそれよりやや大きく、樹高が低いことの影響が考えられた。屋上緑化木では樹高を抑える樹形管理が行われていることから、その抗力係数の評価に注意が必要なが示唆された。また、ポプラについて、着葉時と落葉時に抗力係数を測定して比較した結果、落葉期の抗力係数は着葉期のそれより小さいことが明らかとなった。

表1 風速30m/sec時の抗力係数推定値

| 樹種 | 樹高 | 抗力係数 |
|----------|------|-------|
| イタリクホプラ | 13.1 | 0.12 |
| | 12.3 | 0.095 |
| | 12.9 | 0.202 |
| ルウェーカエデ | 4.9 | 0.285 |
| ヨーロッパトウヒ | 4.7 | 0.545 |
| シラカンバ | 3.97 | 0.098 |

(2) 樹幹断面形状の非破壊測定

樹幹の曲げ耐力を算出する際に必要となる樹幹の断面形状の非破壊推定法を開発した。この方法では、はじめに樹幹の外周上に設けた複数の標点の座標を各標点間の距離から決定する。次に標点間の形状をかたどりゲージによって測定し、両者を合成することで樹幹断面の画像を復元した。4種類の形状パターンと4段階の直径をもつ試験体を作成し、開発した推定法の精度について検証実験を行った。検証は復元した画像と対象断面の写真画像の両者について算出した断面係数値を比較す

ることで行った。断面係数比（復元画像/写真）の平均値は0.994であり、本方法が高い推定精度をもつことが確かめられた。また、内部に腐朽部をもつ樹幹の断面係数は本方法にレジストグラフなどのドリル貫入抵抗式試験器を併用することで推定できることがわかった。内部の腐朽部が断面係数の低減に及ぼす影響を精査した結果、健全な木部厚が直径の26%以上あれば、断面係数の減少は5%以下であることを明らかにした。

(3) 根回りモーメントの測定試験

ニセアカシア大径木（胸高直径:41cm）の引き倒し試験を行って、これに以前に行った街路樹の引き倒し試験のデータを加えることで直径10~40cmの範囲の直径と根回りモーメントの関係について回帰式を得ることができた。

また、カラマツについて弾性限度内の正除荷繰り返し曲げ剛性試験を行って、繰り返し荷重の影響、土壌含水比の影響などを検討した結果、1回目の載荷除荷後の見かけの根鉢の回転角の残留が顕著であることが明らかとなった。また、2回目以降の載荷除荷ではほぼ同じ軌跡を描くことがわかった。土壌含水比の影響は、含水比と1回目載荷除荷後の根鉢の見かけの残留回転角には正の相関があり、降雨のあとなどで根鉢の回転剛性が低下することが確かめられた。

(4) まとめ

以上の知見をもとに緑化樹の耐風性診断の手順をまとめると以下のように提案できる。

- ① 対象とする樹木、樹種の抗力係数を野外試験で評価し、樹形を計測して風圧力・風心高を計算する。
- ② 樹幹断面を測定して幹折れ耐力を計算する。
- ③ 胸高直径から根回り耐力を推定する。
- ④ ②、③の結果から対象樹木の破壊形態と限界風速を推定する。

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 Urata, T.; Shibuya, M.; Koizumi, A.; Torita, H.; Cha, J-Y.: Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting, *J. Forest Research* 17(1),65-71 (2012).(査読有り)
DOI:10.1007/s10310-011-0249-6
- ② Koizumi, A.; Ikeda, K.; Sawata, K.; Hirai, T.: Nondestructive measurement of cross-sectional shape of a tree trunk, *J. Wood Science*, 57(4) (2011). (査読有り)

DOI:10.1007/s10086-011-1174-1

- ③ Koizumi, A.; Motoyama, J.; Sawata, K.; Sasaki, Y.; Hirai, T.: Evaluation of drag coefficients of tree crowns by a field test method, *J Wood Science*, 56(3) , 189-193 (2010). (査読有り)
DOI:10.1007/s10086-009-1091-8

〔学会発表〕（計 5件）

- ① 清水美里, 小泉章夫, 佐々木義久, 平井卓郎: 屋上緑化木を対称とした抗力係数の現場測定, 第63回日本木材学会大会, 岩手大学, 盛岡市 (2013.03.17)
- ② 関矢陽, 佃猛司, 佐々木義久, 小泉章夫: 土壌含水比の変化がカラマツ立木の根鉢剛性に与える影響. 第42回日本木材学会北海道支部研究発表会, 札幌コンベンションセンター, 札幌市 (2010.11.4)
- ③ 小泉章夫, 池田啓輔, 佐々木義久: 樹木の耐風性診断のための樹幹断面形状の非破壊測定法, 第60回日本木材学会大会, 宮崎観光ホテル, 宮崎市 (2010.03.18)
- ④ 関矢陽, 石原亘, 小泉章夫, 平井卓郎, 佐々木義久, 橋本俊市, 宮本敏澄: ニセアカシアの根回りモーメントの評価試験, 日本木材学会北海道支部 2009年度研究発表会, 旭川地場産業振興センター, 旭川市 (2009.11.09)
- ⑤ 石原亘, 関矢陽, 小泉章夫, 澤田圭, 橋本俊市, 宮本敏澄: ニセアカシア菌害木における縦圧縮強度の樹幹内分布, 日本木材学会北海道支部 2009年度研究発表会, 旭川地場産業振興センター, 旭川市 (2009.11.09)

〔図書〕（計 1件）

- ① Koizumi, A.: In-situ evaluation for drag coefficients of tree crowns, In: Pereira JD Ed. "Wind Tunnels: Aerodynamics, Models and Experiments", Nova Science Publishers pp.147-166 (2011)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉章夫 (KOIZUMI AKIO)
北海道大学・大学院農学研究院・准教授
研究者番号: 40183040

(2) 研究分担者

澤田 圭 (SAWATA KEI)
北海道大学・大学院農学研究院・助教
研究者番号: 10433145

(3) 連携研究者

平井 卓郎 (HIRAI TAKURO)
北海道大学・大学院農学研究院・教授
研究者番号: 20173205