

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26450219

研究課題名(和文)竜巻強度を樹木被害から簡便に推定する手法に関する研究

研究課題名(英文)Study to develop a simple method to estimate tornado intensity from tree damage

研究代表者

鈴木 覚 (Suzuki, Satoru)

国立研究開発法人森林総合研究所・森林防災研究領域・室長

研究者番号：50353735

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：竜巻の強さを樹木の被害状況から評定するため、樹木の被害と被害をもたらす風速とを対応付ける簡便な表を作成した。竜巻等の突風によって樹木に幹折れ、根返り、枝折れなどの様々な被害が発生する。公園樹、街路樹、庭木の毎木調査を行うとともに、森林域においては過去の被害データを使って、被害形態ごとの被害発生風速を個々の樹木ごとに計算した。これら被害発生風速のばらつきが大きかったため、針葉樹、広葉樹の2つのカテゴリーに分けた後に、統計的な処理を加えることによって代表風速、下限値、上限値を推定した。

研究成果の概要(英文)： In order to evaluate the intensity of the tornado from the tree damage, we developed a simple table that associates the situations of the damage of trees with the wind speed that causes damage. Damage such as snapping, turn over, branch breaking, etc. usually occurs in trees by gusts such as tornadoes. We investigated each trees of park trees, street trees and garden trees, and in the forest area we used historical damage data to calculate the damaged wind speed for each damage type for each tree. Due to the large fluctuation of the damaged wind speeds, after dividing into two categories, coniferous trees and broadleaved trees, the representative wind speed, the lower limit value, and the upper limit value were estimated by adding statistical processing.

研究分野：森林気象害

キーワード：竜巻 樹木被害 藤田スケール

### 1. 研究開始当初の背景

世界的に竜巻が頻発しており、我が国においては竜巻の認識件数が増加傾向にある。街路樹や公園樹の被害は竜巻発生に付随して普遍的に観察され、森林被害についても、2012年に茨城県つくば市、栃木県茂木町、2013年に千葉県野田市、栃木県矢板市で発生した。このように、樹木や森林が竜巻で被害を受けるのは決して珍しくない。

竜巻は極めて限られた時空間に現れるため、実態の把握が難しい。観測による詳細把握はドップラーレーダーなどを用いて積極的に対応され始めているが、地表付近の状況は現地調査に頼らざるを得ない状況である。竜巻発生の実態把握を的確に行うには、竜巻の特徴を的確に表す分類評価を実施する必要がある。1971年に藤田哲也により提案されたフジタスケールは世界各国で使用されてきたが、被害程度の認識方法や風速の推定方法が明確でないなどの問題が指摘されており、米国では2001年から従来の藤田スケールに対する見直しが始まり、改良フジタスケール(Enhanced Fujita Scale, EFスケール)として2007年から運用が始まっている。また、2013年にはカナダでEFスケールが発表されるなど、各国が独自スケールの開発を進めている。

FスケールあるいはEFスケールは、被害指標(DI)と被害状況程度(DOD)に分類したリストを、地表面付近の被害状況と照合して竜巻強度を判定するものである(図1参照)。米国のEFスケールは28種のDI、カナダは32種のDIで構成されている。DIのほとんどは家や土木建築物などの人工構造物であるが、いずれのスケールにも樹木被害のDIは含まれている。樹木被害は他のDIと異なる2点の際立った特徴を有している。第一に、樹木被害は公園、森林、原野など、人工構造物が少ない場所の唯一あるいは数少ないDIである、ということである。しかし、周囲の被害状況と樹木被害から推定したF値が大きく異なるなど、現実に観測される被害状況と合致しない問題が指摘されている。第二に、樹木はどの国・地域にも存在し、かつ場所による差異が小さいため、各国共通で使える汎用のDIになり得ることである。人工構造物は国・地域ごとに素材や工法が異なるため、それが国ごとに独自スケールの開発を進める動機になっているが、その中で樹木被害は各国スケールの基準になりえるのである。しかし、米国では針葉樹と広葉樹が別々のDIとして設定され、カナダでは両者を一つのDIとするなど、樹木被害に関する評価基準は定まっていなかったのが実情である。

### 2. 研究の目的

本課題では、樹木被害状況から、簡便に竜巻強度を推定する手法を開発する。我が国において、竜巻の認識件数は増加傾向にある。竜巻強度はフジタスケール(Fスケール)によ

り地表面付近の被害状況から定量化され、それが現象評価と被害対策の基礎になっている。現在、Fスケールの改善が求められており、被害指標の一つである「樹木被害」の改善が重要課題となっている。「樹木被害」は人工構造物の少ない場所の主要な指標であり、各国共通で使える汎用指標でもある特殊な指標だからである。そこで、竜巻を想定する強風-樹木-土壌を一貫したシステムとして解析し、被害発生風速を定量化する。さらに、被害発生風速と相関する樹木属性を探索し、被害樹木の属性から竜巻強度を評定できる簡便に利用可能なツールとして取りまとめる。

### 3. 研究の方法

樹木を扱う上で樹種による違い、ならびに生育環境や人為の有無の影響を考慮する必要がある。そこで、樹木の利用状況に関する属性として、森林、街路樹、公園樹、庭木とに分類し、樹種の属性として、針葉樹、広葉樹とに分類して等価限界風速を推定した。被害形態は根返り、幹折れ、枝折れを対象とした。なお、一様流における限界風速を等価限界風速と表記する。

広葉樹は68本の測定値を用いた。針葉樹はT0423で発生した台風被害の調査データから未被害木のデータを使用し、ヒノキ309本、スギ82本であった。枝折れではスギ、ユリノキ、コナラ、ハナミズキから、それぞれ20本、13本、9本、11本の枝を採取して計算した。

根返り等価限界風速( $U_{uproot}$ )は(1)式で、幹折れ限界風速および枝折れ等価限界風速( $U_{break}$ )は(2)式で計算した。

$$U_{uproot} = \left( \frac{2M_{max}}{\rho C_d AL} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$U_{break} = \left( \frac{MOR \pi D^3}{16 \rho C_d AL} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$M_{max}$ : 最大抵抗モーメント(Nm)、L: 風心距離(m)、 $\rho$ : 空気密度(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_d$ : 風力係数、A: 受風面積(m<sup>2</sup>)、MOR: 生材の曲げ強さ(Pa)、D: 幹または枝の直径(m)

$M_{max}$ は既存の文献を参考に(3)(4)式を使った。

(針葉樹)

$$M_{max} = 0.00901 D_b^{2.67} \quad (3)$$

(広葉樹)

$$M_{max} = 0.0176 D_b^{2.54} \quad (4)$$

ただし、 $D_b$ は胸高直径(cm)である。 $C_d$ は針葉樹に関してMayhead(1973)を参考に $C_d$ の風速に対する変化の平均的な曲線である(5)式で計算し、広葉樹と枝に関しては既存のデータ数が少ないため、平均的な値として(6)

式とした。

(針葉樹)

$$C_d = 0.19 + 0.75 \exp(-0.068U) \quad (5)$$

(広葉樹・枝)

$$C_d = 0.3 \quad (6)$$

生材の MOR はスギ 41MPa、ヒノキ 49MPa、広葉樹はカエデ、ナラ、ニレの平均値として 57MPa とした。

A は針葉樹に関して竹下 (1985) の式を用い、広葉樹に関しては樹冠長と樹冠幅を辺とする楕円で計算した。枝は写真から葉の投影面積を計算して A(m<sup>2</sup>) とし、A を楕円で近似した時の中心までの距離を L(m) とした。

DOD は DOD1 (枝折れ、直径 2cm 以下)、DOD2 (枝折れ、直径 2-8cm)、DOD3 (根返り)、DOD4 (幹折れ) とした。また、各 DOD は期待値 (EXP) と上限 (UB) および下限 (LB) で示されるが、根返りおよび幹折れは算出した限界風速を対数変換した後に、平均および平均+1、平均-1 を、それぞれ EXP、UB、LB とした。枝折れは DOD に対応する枝直径の範囲について平均、最大、最小値をそれぞれ EXP、UB、LB とした。

#### 4. 研究成果

##### (1) 生育環境による等価限界風速の違い

広葉樹の根返り等価限界風速について生育環境間で多重比較検定を行うと「街路樹」の等価限界風速が「森林」、「公園樹」、「庭木」よりも有意に大きかった (図 1)。幹折れも同様の結果であった。この原因は、街路樹の樹高や受風面積が他よりも小さい傾向があったためであるが、それは剪定によって人為的にもたらされたものと考えられた。本結果を受けて、DI は街路樹とそれ以外の広葉樹とに分けて評価することとした。

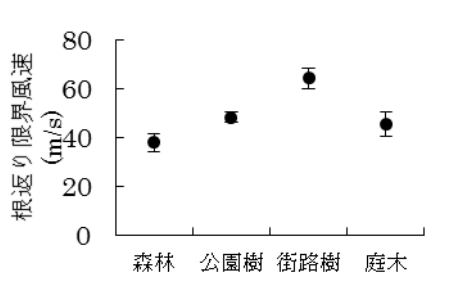


図 1 生育環境ごとに推定した根返り等価限界風速

##### (2) 等価風速の頻度分布

広葉樹の根返り等価限界風速および幹折れ等価限界風速の頻度分布を図 2 に示す。風速の小さい側にピークが現れ、風速の大きい側に裾野を伸ばした形の分布になった。針葉樹の根返り等価限界風速および幹折れ等価限界風速の頻度分布を図 3 に示す。広葉樹と

同じく風速の小さい側にピークが現れ、風速の大きい側に裾野を伸ばした形の分布になった。対数変換した風速の頻度分布は根返り、幹折れともに正規分布していた。

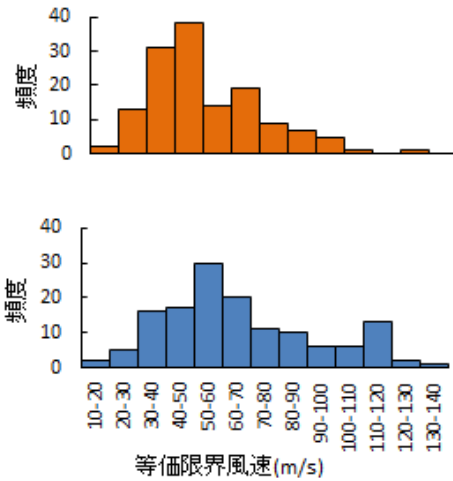


図 2 広葉樹の等価限界風速の頻度分布  
上図が根返り、下図が幹折れ

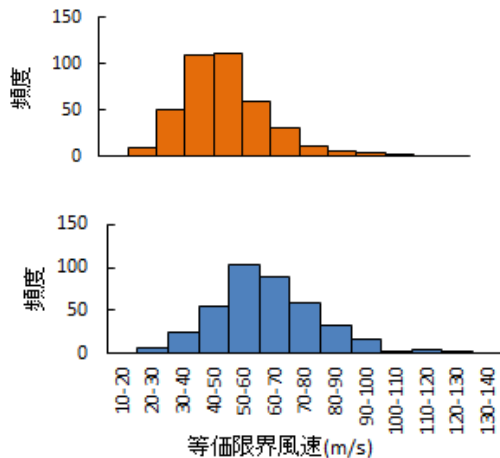


図 3 針葉樹の等価限界風速の頻度分布  
上図が根返り、下図が幹折れ

##### (3) DI および DOD の推定

調製した DI および DOD の一覧を表 1 に示す。DOD1 および DOD2 は針葉樹と広葉樹に大きな差は見られず、DOD3 は両者がほぼ同じ値であった。DOD4 は広葉樹の方が 50%程度大きかった。森林の台風被害において、一般的に針葉樹より広葉樹の方が強風への耐性が高く被害を受けにくい。DOD3 は観察と一致しないことから、さらなる検討が必要と考えられる。街路樹は針葉樹や広葉樹の 200%前後の大きな等価限界風速が計算され、他の生育環境に比べて被害が発生しにくいといえる。しかし、実際の被害において、街路樹の被害の殆どは根株腐朽等の腐朽を伴っていることから、腐朽を考慮していない数値の実用性に

は検討が必要と考えられる。したがって、街路樹については被害指標に含めず、今後の検討課題とした。

針葉樹の限界風速の期待値は根返りよりも幹折れの方が大きく Wellpott (2008) の報告と一致していた。一方、上村 (2007) は等価限界風速の樹高依存性を検討し、樹高が高いほど限界風速が小さくなると指摘したが、本研究では限界風速と樹高との間に相関はみられなかった。上村は林分密度管理図を用いて林分成長を評価しており、均一密度で均等に成長した場合の理想的な推定値と捉えられる。一方、本研究のように樹形の実測値をベースとした場合は、個体配置、形質等の不均一性が大きいため限界風速の個体ごとのばらつきが大きく、樹高との間に相関がみられなかったものと考えられる。

表1 調整した DI および DOD

	DI : 針葉樹			DI : 広葉樹			DI : 街路樹		
	EXP	LB	UB	EXP	LB	UB	EXP	LB	UB
DOD1 (枝折れ) 2cm以下	19	14	22	12	7	17	-	-	-
DOD2 (枝折れ) 2-8cm	36	23	46	36	18	49	-	-	-
DOD3 (根返り)	42	30	58	44	31	63	63	47	113
DOD4 (幹折れ)	50	36	70	79	52	119	113	80	160

## 5.まとめ

竜巻の強さを樹木の被害状況から評定するため、樹木の被害と被害をもたらす風速とを対応付ける簡便な表を作成した。竜巻等の突風によって樹木に幹折れ、根返り、枝折れなどの様々な被害が発生する。また、樹木は森林、街路樹、公園、庭木など様々な植栽環境に分布し、それぞれ植栽される主要樹種も異なる。そこで、公園樹、街路樹、庭木の毎木調査を行うとともに、森林域においては過去の被害データを使って、被害形態ごとの被害発生風速を個々の樹木ごとに計算した。これら被害発生風速のばらつきが大きかったため、針葉樹、広葉樹の2つのカテゴリーに分けた後に、統計的な処理を加えることによって代表風速、下限値、上限値を推定した。すなわち、被害を発生させる風速の頻度は対数正規分布を示したため、対数変換を行った上で、平均値を代表値、± を上限値、下限値とした。

これらの被害形態と発生風速との関係は気象庁による竜巻等突風の強さを評定する日本版改良藤田スケールの策定に活用され、スケールにおける被害指標として「針葉樹」「広葉樹」が採用された。策定されたスケールは平成28年度から気象庁によって運用が始まった。なお、代表値、上限値、下限値

を決定する際には、建造物などの人工物における被害発生風速と相互に比較を行って決定した。

日本版改良藤田スケールにおいて樹木以外は人工物が被害指標となっており、樹木は田園地帯や森林などの人工物が少ない場所の数少ない被害指標として特に重要である。また、樹木は世界中に分布するので、世界各国に共通した汎用の被害指標として活用できる可能性もある。科学的根拠に基づく樹木被害データは、竜巻研究、竜巻対策の有効な基礎データになると考えられる。

## 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 5件)

中尾 圭佑、服部康男、森林層を考慮した地表面を移動する竜巻状渦の性質、査読有、第24回風工学シンポジウム論文集、2016、pp.43-48

黒川潮、鈴木覚、北村兼三、壁谷直記、街路樹の根返り抵抗力の推定について、査読有、九州森林研究、2016、Vol.69、pp.139-140

鈴木覚・渡井純・加藤徹・野口宏典・南光一樹、日本版改良藤田スケールの開発 - 樹木の DI と DOD の提案 -、査読無、日本風工学会誌、2015、Vol.40、pp.127-128

奥田泰雄、脇山善夫、中川貴文、荒木康弘、石原直、喜々津仁密、鈴木修、須田一人、中里真久、小鷹博之、小司禎教、山内洋、佐藤英一、前田潤滋、丸山敬、坂田弘安、鈴木覚、伊藤優、勝村章、植松康、小野裕一、小林文明、野田稔、田村幸雄、松井正宏、吉田昭仁、岡田玲、日本版改良藤田スケールの開発 - 全体概要 -、査読無、日本風工学会誌、2015、Vol.40、pp.117-118

鈴木覚、野口宏典、坂本知己、風によって林木に作用する回転モーメントの測定手法の開発、査読有、海岸林学会誌、2014、Vol.13、pp.1-6

〔学会発表〕(計 4件)

鈴木覚、樹木被害に関する検討、東京工芸大学・風工学共同研究拠点公開研究会「日本版竜巻スケールおよびその評価手法に関する研究」、平成29年3月5日、東京工芸大学中野キャンパス(東京都中野区)

TAMURA Yukio、NIINO Hiroshi、ITO Masaru、KIKITSU Hitomitsu、MAEDA Jyunji、OKUDA Yasuo、SAKATA Hiroyasu、SHOJI Yoshinori、SUZUKI Satoru、TANAKA Yoshinobu、Development and Implementation of Japanese Enhanced Fujita Scale、28th

Conference on Severe Local Storms、平成  
28年11月7日～11月11日、ポートランド  
(アメリカ、オレゴン州)

鈴木覚、樹木のDI・DOD、東京工芸大  
学・風工学共同研究拠点・公開研究会「日本  
版竜巻スケールおよびその評価手法に関す  
る研究」、平成27年2月27日、東京工芸大  
学中野キャンパス(東京都中野区)

鈴木覚、樹木のDI・DOD案、東京工芸  
大学・風工学共同研究拠点・公開研究会「日  
本版竜巻スケールおよびその評価手法に関  
する研究」平成26年12月1日、新宿NSビ  
ル(東京都新宿区)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

竜巻の強度を評価するための日本版改良藤  
田スケールの策定に貢献しました

[http://www.jma.go.jp/jma/press/1512/21a/  
/jef\\_sakutei\\_H271221.html](http://www.jma.go.jp/jma/press/1512/21a/jef_sakutei_H271221.html)

鈴木覚、野口宏典、南光一樹、勝島隆史、加  
藤徹、渡井 純、樹木の被害から竜巻の強さ  
を知る、平成28年度版研究成果選集、  
pp.50-51

森林総研森林防災研究領域、静岡県農林技術  
研究所、樹木の風害の被害形態と等価限界風  
速の関係、林業新技術、2016、pp.5-6

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 覚 (Suzuki, Satoru)

国立研究開発法人森林総合研究所・森林防災  
研究領域・室長

研究者番号：50353735

### (2) 研究分担者

服部 康男 (Hattori, Yasuo)

一般財団法人電力中央研究所・流体科学領  
域・主任研究員

研究者番号：60371473

黒川 潮 (Kurokawa, Ushio)

国立研究開発法人森林総合研究所・九州支  
所・グループ長

研究者番号：10353674

### (3) 連携研究者

田村 幸雄 (Tamura, Yukio)  
東京工芸大学・工学部・客員教授  
研究者番号：70163699

吉田 昭仁 (Yoshida, Akihito)  
東京工芸大学・工学部・准教授  
研究者番号：90329219