

下鴨神社糺の森での主要樹種の大規模台風による被害の特性

Characteristics of Large-scale Typhoon Damages to Major Tree Species in Tadasu-No-Mori Forest, Shimogamo-Jinja Shrine

田端 敬三* 橋本 啓史** 森本 幸裕***,****

Keizo TABATA Hiroshi HASHIMOTO Yukihiko MORIMOTO

Abstract: We investigated the effects of large-scale typhoons on the main tree species in a mature urban forest, Tadasu-No-Mori Forest, Shimogamo-Jinja Shrine. As a result, 284 trees of 25 species were directly damaged by the typhoons. Of the trees that survived when the typhoons occurred, the ratio of trees directly affected by the typhoons was 39.6% for *Lithocarpus glaber* and was 23.8% for *Castanopsis* spp., respectively. Typhoon direct damages were seen in 10.4% to 14.9% for *Aphananthe aspera*, *Celtis sinensis* and *Zelkova serrata*, the dominant tree species in the canopy layer. On the other hand, there was little direct typhoon damage in *Cinnamomum camphora* trees (5.5%). Trees with tall height or with large diameters tended to be affected by typhoons directly for most main tree species. Many uprooted trees were observed in *Quercus myrsinifolia* and *C. sinensis*. A large number of stem breakage trees were seen in *L. glaber* and *C. spp.*. Most main tree species tended to be more severely affected by typhoons under the condition that the density of neighborhood trees was low. This result suggests that forest management with high tree stand density is effective in avoiding human damage caused by fallen trees in urban forest.

Keywords: urban forest, uprooting, stem breakage, Typhoon No. 21, competition index

キーワード: 都市林, 根返り, 幹折れ, 台風 21 号, 競争指数

1. はじめに

都市域に位置する森林は、気象の調節、大気浄化、騒音の低減、生物多様性の保全など重要な機能を数多く果たしている¹⁾。こうした都市域の森林の中で、京都最古の神社のひとつである賀茂御祖神社（通称：下鴨神社）の境内林、糺の森は面積 12.4 ha を有し、他に類をみない規模を誇る。

糺の森の植生はムクノキ、エノキ、ケヤキが優占する落葉広葉樹林で、平安京の建設前、約 8500~5000 年前の京都盆地は、ムクノキ、エノキ、ケヤキが優占する落葉広葉樹林により覆われていたと推定されており²⁾、糺の森は京都市内で唯一、古代の山城原野の原植生の面影を残す非常に貴重な空間である^{3,4)}。

また、糺の森では林内の大部分が一般に開放され、市民の様々な余暇活動の場としても活用されており、年中行事のない日でも、1000~1200 人も多数の来訪者がある⁵⁾。

しかし、糺の森が位置する京都市を、2018 年 9 月に台風 21 号と 24 号の 2 つの大型台風が直撃した⁶⁾。特に台風 21 号は、室戸台風次に次ぐ規模ともなる最大瞬間風速 39.4 m を記録し^{6,7)}、これらの台風によって、糺の森でも多数の倒木が発生した。

都市域に位置しながらも自然性の高い植生を有し、且つ、多くの市民に親しまれてきた糺の森での主要樹種の台風被害の特性についての把握は、都市林での風倒木の発生による人的被害のリスクを避ける上で重要である。台風被害の状況とその影響要因についての研究は、シイ、カシ類優占の暖温帯常緑広葉樹林^{8,9)}やスギ、ヒノキの人工林を対象としたもの¹⁰⁾はいくつか散見される。しかし、こうした山地に位置する森林においては、台風による攪乱は地形条件に強く影響される⁸⁾。これに対し、都市域の平坦地の森林では、樹種、対象木のサイズ、周辺に位置する樹木のサイズや密度によつての台風被害の違い¹¹⁾が明瞭となることが予測される。だが、都市域の自然性の高い森林において実施された研究事例は見当たらない。

そこで本研究は、糺の森において実施した毎木調査の記録を基

に、今回の台風 21 号、24 号による被害の状況、さらに台風被害の形態を調査した。加えて樹種間の耐風性の相違や、台風被害との関連性が指摘されている対象木のサイズ、周辺木のサイズおよび密度の影響¹¹⁾も検討し、以上から、主要樹種の大規模台風による被害の特性を明らかにすることを目的とした。

2. 調査地概要

糺の森は京都市左京区（北緯 35° 2', 東経 135° 45'）に位置している。京都市内の年平均気温は 15.9°C で、最暖月 8 月の平均気温が 28.2°C、最寒月 1 月の平均気温は 4.6°C である¹²⁾。暖かさの指数は 130.7、寒さの指数は -0.4 で、暖温帯常緑広葉樹林帯に属する。年平均降水量は 1491.3 mm である（1981 年~2010 年の平年値¹²⁾）。

2002 年に実施された糺の森（一部、末社の出雲井於神社内のみを除く）での胸高直径 10 cm 以上の全樹木を対象とする毎木調査では、胸高断面積合計は、全樹種では 40.6 m² ha⁻¹であった¹³⁾。樹種別ではクスノキが最大で、9.8 m² ha⁻¹と全体の 22.8% を示した。次いでムクノキ、エノキ、ケヤキの順であった¹³⁾。

3. 調査方法

(1) 毎木調査

糺の森で、2010 年に胸高直径 10 cm 以上の全樹木を対象とする毎木調査を行った¹⁴⁾。測定項目は樹種、樹高、地上 1.3 m の高さでの胸高直径、生育位置である。調査は 2010 年 11 月から翌年 3 月にかけて実施した¹⁴⁾。

(2) 台風被害状況の調査

2010 年に生育が確認された幹直径 10 cm 以上の全樹木を対象として、台風 21 号および 24 号による被害の状況を確認した。

葉が残っておらず、幹の腐朽がかなり進んでおり、今回の台風発生前に既に枯死していたと判断されたもの以外について、台風発生による被害の状況を確認した。被害の状況は「台風による直

*近畿大学農学部

**名城大学農学部

*** (公財)京都市都市緑化協会

****京都大学名誉教授

接被害有り」,他の樹木の下敷きになり倒伏している「他の倒木による間接被害有り」および「被害無し」に区分した⁸⁾。さらに台風による直接被害が見られた樹木については,以下のI~IIIの3つの区分に基づいて被害の形態を記録した¹⁵⁾。

- 「I. 根返り:根こそぎ倒れる」
- 「II. 幹折れ:主幹が途中から折れ,樹冠部が欠損する」
- 「III. 大枝落ち:樹冠の一部のみが落下する」

台風被害の有無および被害形態の調査は,台風発生から1か月後の2018年10月から翌年4月にかけて実施した。

なお,本研究地では,スダジイおよびコジイの2種が存在するが,この2種には中間形が多く,現場での識別は困難であるとされる¹⁶⁾。従って本研究ではこれら2種を一括して「シイ類」として扱った。

4. 解析方法

各対象樹種の台風による直接被害の有無および被害の形態への影響要因として,対象木のサイズ,競争指数,以上2つを検討した。

(1) 対象木のサイズ

対象木のサイズとして,2010年での樹高,胸高断面積,形状比の値を採用した。形状比は,各々の幹について樹高(cm)を胸高直径(cm)で除算して値を得た。

(2) 競争指数

対象木の孤立度の指標として,競争指数(CI, competition index)¹⁷⁾を用いた。対象木を中心とする半径5m~15mの円形の範囲を設定し,範囲内に生育する胸高直径10cm以上の樹木を「全周辺木」,さらに,このうち,対象木以上の樹高を有する樹木を「上層木」と定義した¹⁸⁾。

周辺木および対象木の2010年でのサイズ値から,以下の3つの競争指数¹⁷⁾を算出した。

$$CI_1 = \sum BA_i$$

$$CI_2 = \sum (H_i / H)$$

$$CI_3 = \sum (D_i / D)$$

[BA_i:周辺木の胸高断面積(m²), H_i:周辺木の樹高(m), H:対象木の樹高(m), D_i:周辺木の胸高直径(cm), D:対象木の胸

表-1 各樹種の台風被害の状況

樹種	台風による 直接被害有り		他の倒木による 間接被害有り		被害無	
	本数	%	本数	%	本数	%
シリブカガシ	21	39.6	2	3.8	30	56.6
シイ類	19	23.8	0	0.0	61	76.3
ムクノキ	45	14.9	0	0.0	258	85.1
シラカシ	15	13.9	2	1.9	91	84.3
ケヤキ	32	12.1	2	0.8	231	87.2
エノキ	34	10.4	1	0.3	292	89.3
イチヨウ	5	9.3	0	0.0	49	90.7
ナナメノキ	8	9.0	0	0.0	81	91.0
タラヨウ	8	8.6	0	0.0	85	91.4
アラカシ	38	7.2	4	0.8	489	92.1
クスノキ	20	5.5	1	0.3	343	94.2
サカキ	2	3.3	0	0.0	58	96.7
イロハモミジ	5	2.9	0	0.0	168	97.1
ツバキ	4	2.0	0	0.0	192	98.0
イチイガシ	1	1.3	1	1.3	76	97.4
モチノキ	0	0.0	1	1.4	69	98.6
その他	27	6.6	4	1.0	377	92.4
計	284	8.7	18	0.6	2950	90.7

高直径(cm)]

競争指数の値がより大きい程,対象木の周囲に,より大きな木が,より多く存在し,樹冠の密閉度が高い環境にあることを示す。

なお,以上の競争指数の算出においては,台風発生前に既に枯死していたと判断された個体は除外した。

(3) 統計解析

台風発生時での生存本数が50以上を示した樹種間で,「台風による直接被害有り」,「他の倒木による間接被害有り」,「被害無し」の比率の相違について,Fisherの正確確率検定を用いて有意性を検討した。さらに,台風による直接被害木の数が10以上であった樹種間で「根返り」,「幹折れ」,「大枝落ち」の被害形態区分の比率の相違の検討を,Fisherの正確確率検定により行った。

対象木のサイズ,競争指数について,同一樹種の「台風による直接被害有り」と「被害無し」との間で,平均値の有意差を,Welchのt検定で検討した。また,台風による直接被害木の被害形態区分でサンプル数が3以上を示した間において,平均値の有意差を,2つの形態区分間はWelchのt検定,3以上の形態区分間はTukeyの多重比較検定を用いて検討した。

さらに,各樹種の対象木サイズおよび競争指数と台風被害の有無との関係性を総合的に評価するため,応答変数の分布を二項分

表-2 台風被害の有無と各要因との関係

樹種	被害	本数	対象木サイズ						競争指数(半径10m範囲内)											
			樹高(m)		胸高直径(cm)		形状比		全周辺木		全周辺木		上層木		上層木		上層木			
			平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.	平均	S.D.		
シリブカガシ	被害有	21	15.4	5.1	29.6	13.4	58.3	21.6	1.09	0.39	11.1	6.4	12.2	6.0	0.92	0.43	8.4	6.9	9.7	6.4
	被害無	30	11.8	5.2	23.3	13.7	57.7	19.7	1.38	0.53	13.8	6.4	18.8	11.2	1.25	0.51	11.7	6.3	16.5	11.1
	p値		*		n.s.		n.s.		*		n.s.		**		*		n.s.		**	
シイ類	被害有	19	21.0	6.7	59.5	16.7	36.4	11.3	1.14	0.40	9.6	6.4	6.4	2.7	0.56	0.45	4.8	7.5	2.9	3.1
	被害無	61	15.1	5.6	37.3	19.6	46.5	18.3	1.14	0.41	13.4	7.9	12.7	8.1	0.89	0.45	9.9	9.0	9.4	8.2
	p値		**		***		**		n.s.		*		***		*		*		***	
ムクノキ	被害有	45	22.8	5.3	64.3	30.5	41.4	14.6	0.89	0.43	6.5	3.2	5.6	3.8	0.42	0.44	2.7	3.1	2.6	3.6
	被害無	258	20.5	5.5	49.0	24.2	48.5	17.9	1.06	0.50	8.5	5.4	8.9	7.3	0.63	0.54	4.4	5.4	5.1	6.9
	p値		**		**		**		*		**		***		**		**		***	
シラカシ	被害有	15	18.2	4.5	28.1	11.0	69.8	21.8	1.26	0.52	9.9	3.6	13.4	5.7	0.79	0.47	5.3	4.3	7.4	5.4
	被害無	91	13.4	5.1	23.4	9.2	59.4	17.7	1.10	0.49	14.0	8.6	17.2	10.5	0.92	0.52	10.9	9.3	13.2	10.9
	p値		**		n.s.		n.s.		n.s.		**		*		n.s.		***		**	
ケヤキ	被害有	32	23.7	5.6	60.2	31.2	47.0	16.7	0.92	0.55	6.6	4.3	6.7	6.7	0.47	0.53	3.1	4.7	3.7	6.8
	被害無	231	19.3	5.6	37.7	21.1	60.0	21.6	1.11	0.52	9.4	5.8	11.7	8.6	0.75	0.56	5.7	5.9	7.3	7.7
	p値		**		***		***		n.s.		**		***		**		*		**	
エノキ	被害有	34	24.1	4.2	52.1	16.3	49.0	11.8	1.24	0.55	7.2	3.5	7.2	3.9	0.63	0.60	2.8	3.4	3.0	3.8
	被害無	292	20.5	6.1	42.9	17.2	52.3	18.7	1.10	0.52	9.2	5.0	9.6	6.2	0.60	0.51	4.3	4.8	4.6	5.4
	p値		***		**		n.s.		n.s.		**		**		n.s.		*		*	
アラカシ	被害有	38	13.7	4.7	24.6	12.3	59.7	18.6	1.14	0.55	14.4	9.2	16.5	8.4	0.92	0.53	10.9	10.0	12.1	8.2
	被害無	489	10.5	3.7	18.8	8.0	59.2	18.5	1.23	0.51	18.5	10.1	22.2	11.2	1.11	0.52	15.4	10.8	18.3	11.1
	p値		***		**		n.s.		n.s.		*		***		*		*		***	
クスノキ	被害有	20	22.1	5.3	48.8	21.8	52.1	20.0	1.29	0.65	9.0	6.2	10.2	8.4	0.72	0.72	4.5	5.9	5.6	7.5
	被害無	343	22.9	5.5	52.4	17.2	46.7	13.3	1.26	0.50	9.0	5.2	8.4	5.7	0.60	0.55	3.8	5.4	3.8	5.5
	p値		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		n.s.	

被害有:台風による直接被害有り

形状比:樹高(cm)/胸高直径(cm)

BA_i:周辺木の胸高断面積(m²), H_i:周辺木の樹高(m), H:対象木の樹高(m), D_i:周辺木の胸高直径(cm), D:対象木の胸高直径(cm)

t検定の結果, n.s.:p ≥ 0.05, *:p < 0.05, **:p < 0.01, ***:p < 0.001

布, リンク関数を logit, ランダム効果を対象個体とする一般化線形混合モデルを構築した。

一般化線形混合モデルの応答変数は、「台風による直接被害有り」を 1, 「被害無し」を 0 とした。

説明変数は、「(i) 対象木のサイズ」および「(ii) 競争指数」の 2 項目とした。多重共線性の回避のため, 同一モデル内で, 説明変数「(i) 対象木のサイズ」については, 「樹高」, 「胸高直径」, 「形状比」の 3 つのいずれかとした。また, 説明変数「(ii) 競争指数」に関しては, 競争指数 $CI_1 \sim CI_3$ の 3 種類に対して, 周辺木の範囲 11 通り (半径 5 m から 15 m まで 1 m 間隔), 周辺木 2 通り (全周辺木, 上層木) の計 66 通りのうちいずれか 1 つを, 同一モデル内の説明変数とした。

説明変数 (i) と (ii) のうち, いずれか 1 つ, あるいは 2 つとも選択する, 総計 267 通りの組み合わせの全モデルについて, 赤池情報量基準 (AIC) を計算し, 各樹種について AIC が最小を示したものを, 予測精度が最も高いモデルとした。

以上の統計解析には, R version 3.5.0¹⁹⁾を用いた。

5. 結果

(1) 台風被害の有無と各要因との関係

糺の森で 2010 年に生育が確認された幹直径 10 cm 以上の樹木 3652 本のうち, 台風発生時において生存していたのは 3252 本であった。このうち 25 種 284 本の樹木において台風による直接の被害が見られた。被害の割合はシラカガシで最も高く 39.6%, 次いでシイ類が 23.8%であった。林冠層の優占樹種での比率は, ムクノキが 14.9%, ケヤキ 12.1%, エノキ 10.4%となっていた。対して, クスノキは 5.5%であった。台風発生時での生存本数が 50 以上を示した 16 樹種の間で「台風による直接被害有り」, 「他の倒木による間接被害有り」, 「被害無し」の比率は有意に異なっていた ($p < 0.001$, 表-1)。

対象木のサイズと台風による直接被害の有無との関係を見ると, 樹高ではシラカガシ, シイ類など 7 樹種で, また胸高直径は 5 樹種で, 台風の直接被害木が無被害木より有意に大きな値を示した (表-2)。一方, 形状比は, シイ類, ムクノキ, ケヤキで無被害木が有意に高い値を示した (表-2)。

競争指数と台風の直接被害の有無との関係では, ムクノキで, 周辺木の断面積合計 ΣBA_i , 対象木と周辺木の樹高の相対比の総和 $\Sigma (H_i / H)$, 胸高直径の相対比の総和 $\Sigma (D_i / D)$, いずれも, 無被害木が台風の直接被害木より有意に大きな値を示した (表-2)。

(2) 台風による直接被害の形態と各要因との関係

台風による直接被害の形態は, 全樹種では, 大枝落ちが 116 本と最多で, 直接被害木全体の 40.8%を占めていた。次いで, 根返りが 91 本 (32.0%), 幹折れが 77 本 (27.1%)の順であった (表-3)。

表-3 各樹種の台風による直接被害の形態

樹種	根回り		幹折れ		大枝落ち	
	本数	%	本数	%	本数	%
シラカガシ	7	33.3	11	52.4	3	14.3
シイ類	4	21.1	7	36.8	8	42.1
ムクノキ	6	13.3	5	11.1	34	75.6
シラカシ	9	60.0	2	13.3	4	26.7
ケヤキ	10	31.3	3	9.4	19	59.4
エノキ	14	41.2	9	26.5	11	32.4
アラカシ	11	28.9	12	31.6	15	39.5
クスノキ	4	20.0	4	20.0	12	60.0
その他	26	43.3	24	40.0	10	16.7
計	91	32.0	77	27.1	116	40.8

台風による直接被害木が 10 本以上であった樹種の, 直接被害木全体に対する各被害形態区分の本数の比率は, 根返りは, シラカシで 60.0%, エノキでは 41.2%となっていた。また幹折れは, シラカガシで 52.4%, シイ類では直接被害木の 36.8%を占め, これらの樹種で高い比率となっていた。台風による直接被害木の本数が 10 以上であった 8 樹種間で, 被害形態 3 区分の比率は有意な相違が見られた ($p < 0.001$, 表-3)。

台風による直接被害の形態と対象木のサイズの関係は, クスノキで樹高, 胸高直径のいずれについても, 「大枝落ち」と「根回りおよび幹折れ」の間で平均値に有意差が見られた。またケヤキでは「根回り」と「幹折れ」との間で樹高が有意に異なっていた。一方, エノキでは「幹折れ」と「根回りおよび大枝落ち」の間で, また, シラカシでは「根回り」と「大枝落ち」の間で, 形状比の平均値に有意差が見られた (表-4)。

競争指数と台風による直接被害の形態との関係では, ケヤキで, 対象木と周辺木の樹高の相対比の総和 $\Sigma (H_i / H)$, 胸高直径の相対比の総和 $\Sigma (D_i / D)$ の平均が, いずれも「幹折れ」が「根回りおよび大枝落ち」より有意に大きな値となっていた。またクスノキでは, 胸高直径の相対比の総和 $\Sigma (D_i / D)$ が「大枝落ち」において「根回りおよび幹折れ」より有意に小さな平均値を示した (表-4)。

(3) 台風による直接被害の有無に対する各影響要因の総合的評価

対象木のサイズについては, シラカガシでは形状比, シイ類, シラカシ, エノキ, アラカシでは樹高, ムクノキ, ケヤキでは胸高直径が各々説明変数として選択され, 偏回帰係数はいずれも正の値であった (表-5)。

また競争指数は, シラカガシ, シイ類, クスノキで, 周辺木との胸高直径の相対比の総和 $\Sigma (D_i / D)$ が選択された。偏回帰係数はシラカガシ, シイ類では負の値, クスノキでは正の値を示した。シラカガシ, シイ類では対象木から半径 12 m ~ 14 m の範囲内に位置する全周辺木, 一方, クスノキでは半径 6 m の範囲内に位置する上層木による影響が見られた (表-5)。

6. 考察

表-4 台風による直接被害の形態と各要因との関係

樹種	被害形態	本数	対象木サイズ			競争指数 (半径 10m 範囲内)														
			樹高 (m)		形状比	全周辺木		全周辺木		上層木		上層木								
			平均	S.D.		ΣBA_i	S.D.	$\Sigma (H_i / H)$	S.D.	$\Sigma (D_i / D)$	平均	S.D.	平均	S.D.						
シラカシ	根回り	9	17.0	5.7	29.6	10.3	61.6	10.9 a	1.13	0.43	9.9	4.4	11.9	5.6	0.70	0.42	5.3	4.8	6.7	6.0
	大枝落ち	4	20.0	0.9	26.7	16.0	89.8	34.0 b	1.17	0.35	9.1	2.2	15.8	7.4	0.73	0.57	3.3	2.6	7.2	5.2
ケヤキ	根回り	10	26.6	3.7 a	53.1	20.0	53.6	11.1	0.92	0.56	4.7	1.9 a	5.2	2.7 a	0.35	0.53	1.2	1.3 a	1.4	1.8 a
	幹折れ	3	17.9	9.4 b	52.1	53.8	50.4	23.5	1.08	0.30	13.0	8.9 b	15.5	15.9 b	0.74	0.71	10.4	11.0 b	13.6	16.6 b
エノキ	根回り	14	25.1	4.3	54.6	17.7	47.9	8.9 a	1.15	0.62	6.5	2.6	6.3	2.8	0.62	0.63	2.4	3.0	2.6	3.1
	幹折れ	9	24.8	2.8	43.4	7.4	58.8	13.4 b	1.30	0.55	7.6	2.4	8.5	1.7	0.60	0.62	2.3	2.0	2.5	2.0
クスノキ	根回り	4	17.2	3.1 a	32.5	15.2 a	58.4	18.6	1.73	0.77	13.0	7.5	16.8	10.0 a	1.41	0.69 a	9.4	6.2 a	12.3	7.6 a
	大枝落ち	12	24.9	3.4 b	59.9	18.2 b	46.5	21.2	1.04	0.53	6.5	2.2	5.8	2.9 b	0.28	0.34 b	1.3	1.5 b	1.1	1.2 b

形状比: 樹高 (cm) / 胸高直径 (cm)
 BA_i : 周辺木の胸高断面積 (m^2), H_i : 周辺木の樹高 (m), H : 対象木の樹高 (m), D_i : 周辺木の胸高直径 (cm), D : 対象木の胸高直径 (cm)
 同一樹種での被害形態間の異なるアルファベットは有意差を示す。 ($p < 0.05$)

表-5 各樹種の台風による直接被害予測に最適な

一般化線形混合モデルで選択された説明変数

樹種	本数	説明変数	偏回帰係数	AIC
シリブカガシ	51	形状比 半径14m範囲内の全周辺木 $\Sigma(D_i/D)$	0.052* -0.093*	65.4
シイ類	80	樹高(m) 半径12m範囲内の全周辺木 $\Sigma(D_i/D)$	0.118 -0.185**	72.0
ムクノキ	303	胸高直径(cm)	0.022	144.8
シラカシ	106	樹高(m)	0.205	52.0
ケヤキ	263	胸高直径(cm)	0.036	104.6
エノキ	326	樹高(m)	0.132***	111.7
アラカシ	527	樹高(m)	0.175	124.9
クスノキ	363	半径6m範囲内の上層木 $\Sigma(D_i/D)$	0.107***	69.2

形状比: 樹高(cm)/胸高直径(cm)

D_i: 周辺木の胸高直径 (cm), D: 対象木の胸高直径 (cm)

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$

糺の森の林冠層の優占種のムクノキ、エノキ、ケヤキでは、10.4%~14.9%の樹木で、台風による直接被害が見られた(表-1)。しかし被害形態は樹種によって異なっており、エノキ、ケヤキでは根返り木が高い比率となっていた(表-3)。3樹種とも浅根性である²⁰。加えて、ケヤキの材の気乾比重は0.69とやや重く²¹、特に、強風の影響を受けやすいと考えられる。他方、エノキの材の気乾比重は0.62、ムクノキは0.67といずれも中庸であるが²¹、エノキの幹の材の強度は比較的小さい¹⁶。また前述のようにムクノキは浅根性ではあるが、大径木では板根を発達させ、樹体を支持する¹⁶。このような材及び根系の性質の相違が、優占樹種間での被害形態の違いにつながったものと考えられる。

一方、クスノキの台風による直接被害木の割合は5.5%と、他の林冠層の優占種と比較して低い値となっていた(表-1)。クスノキの根系の垂直分布は中間型ではあるが²⁰、材の気乾比重は0.52と軽い²¹。また枝の乾重比は、ケヤキの38.0%~58.7%に対し、クスノキでは19.8%~30.3%と大きな幹に対して細い枝をつける傾向を示す²²。こうした特性により、クスノキでは強風に対し、主に枝だけが折損し、柔軟性を持つ幹は大きな被害を回避したものと考えられる。また幹に比べ、細い枝をつけるこの特徴が、今回、クスノキでは、半径6m範囲の近接した位置にある樹木の影響が見られた一理由であると思われる(表-5)。

アラカシの材の気乾比重は0.96と重く²¹、そのため、幹折れの発生は比較的多く見られた(表-3)。しかし、全体では台風の直接被害木の割合が7.7%と低い値を示していた(表-1)。アラカシの根系の垂直分布も中間型であるが、根の分岐は多い²⁰。また、林冠層から突出した高木では耐風性が低下するとされ²³、糺の森で、アラカシは、本数は多いものの、樹高10m程度と小さなサイズの個体が殆どであり(表-2)、このためアラカシでは台風被害が軽微な結果となったと考えられる。

同じブナ科の常緑樹のシラカシでは、根返りによる被害が顕著となっていた(表-3)。シラカシの根系の垂直分布も中間型である²⁰。しかし根の深部での分岐は少なく、殆どが土壌の上層部で成長が停止する²⁰、こうした根系の特徴が、シラカシでは根返り木が多く見られた一要因だと考えられる。

一方、シリブカガシでは幹折れ木の割合が高くなっていた(表-3)。宮崎県の常緑広葉樹林での樹木の台風被害についての研究例で、マテバシイが幹折れ被害を多く受けていたことが報告されている⁹。これはマテバシイの幹の木材性質に要因があると推測されている⁹。シリブカガシとマテバシイは同じマテバシイ属に分類され、互いに近縁な樹種である。マテバシイの材の気乾比重は0.61、0.76~0.81²⁴、他方、シリブカガシは0.57~0.85と、マテバシイより重硬である²⁴。こうした材の特性が今回、シリブカガシで幹折れが顕著となっていた一つの要因であると推測される。

また、シイ類においても幹折れ木が多く発生していた(表-3)。シイ類は深根性で、根の分岐が多い²⁰。しかし、材の気乾比重は

0.52と中庸であるが²¹、腐朽を受けやすく¹⁶、材の強度が低いことが報告されている⁸。根系及び幹のこうした性質が、シイ類で幹折れが多数見られた一要因であると思われる。

広葉樹では特に、大枝が落ちることにより強風の抵抗が減少し、幹折れなどの被害が回避される²⁵。また、山地の斜面では、表土が不安定であり、強風により根返り木が発生しやすい⁸。しかし糺の森は平坦地に位置しており、このことが今回、比較的軽微な被害である、大枝落ちの樹木が多数見られた一つの理由だと考えられる。

今回の結果において、主要樹種はいずれも競争指数の値が小さい、即ち、孤立度が高い状態で、台風の被害をより強く受ける傾向が見られた(表-2)。単木の状態では風圧に対する樹木の抵抗係数が低下する²³。都市の樹林地での風害による倒木の人的被害を回避するためには、樹木が互いに孤立していない状態、樹冠や枝の密閉度を高く保つ樹林管理が必要であると思われる。

謝辞: 本研究の実施にあたり、賀茂御祖神社からは、境内での調査を許可頂きました。(株)空間創研、宇戸睦雄氏には糺の森の台風被害状況についてご教示頂きました。また、本研究の一部は、公益財団法人 阪本奨学会の助成を受けたものです。以上の皆様に心よりお礼申し上げます。

補注及び引用文献

- 1) 真鍋 徹・石井弘明・伊東啓太郎(2007): 都市緑地としての社寺林の機能評価に向けて: 景観生態学 12(1), 1-7
- 2) 高原 光(1998): 近畿地方の植生史: 安田喜憲・三好教夫編「図説日本列島植生史」: 朝倉書店, 114-137
- 3) 森本幸裕・吉田博宣・小橋登台(1984): 糺の森の樹木および土壌調査(1): 斜面緑化研究 6, 157-176
- 4) 四手井綱英編(1993): 下鴨神社の森: ナカニシヤ出版, 296 pp
- 5) 木村宗美(1985): 都市林における利用行動と林内の状態について - 糺の森(下鴨神社境内)を事例として - : 緑化研究 7, 12-45
- 6) 京都新聞記事: 京都新聞ホームページ
<<https://www.kyoto-np.co.jp/local/article/20180909000022>>, 2018. 9. 9 参照
- 7) 気象速報: 気象庁ホームページ
<<https://www.jma-net.go.jp/kyoto/data/kishousokuhou2018T21.pdf>>, 2019. 12. 1 参照
- 8) 井藤宏香・伊藤 哲・中尾登志雄(2009): 南九州の壮麗照葉樹二次林における主要構成樹種の台風被害の特徴 - 一斉萌芽に由来する二次林構造と地形の影響 - : 日本森林学会誌 91(1), 35-41
- 9) 齊藤 哲・佐藤 保(2007): 照葉樹林の主要樹種の台風被害の特性: 日本森林学会誌 89(5), 321-328
- 10) 米丸伸一(1998): スギ、ヒノキ単層林の台風被害: 鹿児島県林試研報 4, 1-23
- 11) 鳥田宏行(2006): 2002年台風 21号により北海道十勝の防風保安林に発生した風害の要因解析: 日本森林学会誌 88(6), 489-495
- 12) 気象統計情報: 気象庁ホームページ
<<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrm/index.php>>, 2019. 9. 1 参照
- 13) 田端敏三・橋本啓史・森本幸裕・前中久行(2004): 糺の森におけるクスノキおよびニレ科3樹種の成長と動態: ランドスケープ研究 67(5), 499-502
- 14) 田端敏三・橋本啓史・森本幸裕(2015): 都市域成熟林でのアラカシ(*Quercus glauca* Thunb.), シラカシ(*Quercus myrsinaefolia* Blume)の成長に対する初期サイズ、周辺競争個体の影響: 日本緑化工学会誌 41(1), 97-102
- 15) 日本生態学会編(2011): 森林生態学: 共立出版, 293 pp
- 16) 日本樹木誌編集委員会編(2009): 日本樹木誌 1: 日本林業調査会, 762 pp
- 17) Lorimer, C. G. (1983): Tests of age-independent competition indices for individual trees in natural hardwood stands: Forest Ecology and Management 6(4), 343-360
- 18) 田端敏三・鈴木雄也・奥村博司・阿部 進(2017): 都市近郊二次林におけるムラサキシキブ(*Callicarpa japonica* Thunb.)の開花状況とその影響要因: 日本緑化工学会誌 43(1), 68-73
- 19) R Development Core Team(2018): R: a language and environment for statistical computing: R Foundation for Statistical Computing, Vienna
- 20) 菊住 昇(1979): 樹木根系図説: 誠文堂新光社, 1121 pp
- 21) 貴島恒夫・岡本省吾・林 昭三(1977): 原色木材大図鑑 改訂版: 保育社, 204 pp
- 22) 藤原宣夫・山岸 裕・村中重仁(2002): 都市緑化樹木によるCO₂固定量の算定方法に関する研究: 日本緑化工学会誌 28(1), 26-31
- 23) 陶山正憲(1993): 台風による樹木の風倒・折損機構: 水利科学 37(1), 25-53
- 24) 平井信二(1996): 木の百科: 朝倉書店, 642 pp
- 25) 木上真一郎・村上拓彦・溝上展也・吉田茂二郎(2006): 九州における風倒木被害の発生リスクに関する研究レビュー: 九州森林研究 59, 292-295

(2019. 9. 28受付, 2020. 3. 30受理)