台風被害をうけた都市緑化樹木の幹被害と材の曲げ強度との関係

中村彰宏^{*1)}

1) 大阪府立大学大学院生命環境科学研究科 Graduate School of Life and Environmental Science, Osaka Prefecture University

摘要: 台風による都市緑化樹木の被害特性解明のため、2018年第21号台風が樹木に与えた影響を約22haの都市緑地で調査した。台風前には3,122個体の樹木が生育し、台風によって幹折れが145個体、根返りが58個体、傾斜が23個体で発生した。外来種と栽培品種の根と幹の被害比率は、自生種に比べて有意に高く、外来・栽培品種は台風の被害を受けやすいことが明らかとなった。幹被害割合(幹被害数/被害総数)と既報の生材の曲げ強度との間に有意なロジスティック回帰式が得られた。曲げ強度の小さな樹種では幹の被害割合が高くなり、曲げ強度が強風時の幹被害を説明する重要なパラメータと考えられた。

キーワード: 風害, 根返り, 幹折れ, 外来樹木, 生材の曲げ強度, 材密度

NAKAMURA, Akihiro: Relationship between snapping stems and modules of rupture of damaged trees by the typhoon in an urban green space.

Abstract: In order to clarify the characteristics of typhoon effects on the trees in urban green spaces, observations were carried out in a green area after No.21 typhoon in 2018. There were 3122 trees in the area before typhoon, 145 snapping stems, 58 uprooting stems and 23 leaning stems were observed after the typhoon. Damaged ratio of root and stem of exotic woody species and cultivar was significantly higher than that of indigenous species. In the logistic regression analysis, the obtained regression equation between proportion of snapping stems and modules of rupture was statistically significant. These data suggest the possibility that MOR is the important parameter for estimating the windthrow by a typhoon.

Key words: wind damage, uprooting, snapping, exotic tree, modules of rupture of green wood, wood density

1. はじめに

わが国は、気象災害、地震、火山の噴火など、多くの自然災害に見舞われてきた。2011年の東日本太平洋沖地震のように、巨大地震は人間活動とは無関係に古くから繰り返し発生した。台風も同様で、弘仁8年(817年)には摂津国で「海潮暴溢」で200人以上が漂う¹⁶⁾との記載があるように、古くから継続して発生し、人間が向き合わなければならない事象である。台風の発生数・接近数、「強い」以上の発生数にも長期的な変化はみられないが、最大風速や降水強度は高まる可能性が高いことが紹介³¹⁾され、今後はさらなる台風への対策が必要となる可能性がある。

台風による強風被害は、都市域のインフラだけでなく、農地、林地、自然地でも発生する。台風による樹木への多大な影響も発生するため、台風と樹木に関する多くの研究がなされ、強風等の環境条件下での基礎的な実験と、台風後の被害個体や立地等を対象とした現地調査に大別できる。基礎的な研究としては、風洞実験での樹冠がうける風圧力や樹冠の葉群密度や形状によって変化する抵抗係数の算出^{11,17)}、強風下での根系支持力評価のための引き倒し試験があり、都市緑化樹木の支持力データも蓄積されつつある^{15,30)}。海外では、有

限要素法による樹形や曲げヤング係数、風速分布データ等を用いた樹体動態シミュレーション^{3,24)}、樹体の力学に関するレビュー¹⁰⁾など多くの研究があるが、わが国の都市緑化樹木への適用は現状では難しい。

いっぽう、台風後の被害樹木に関する研究では、山地での林業植栽木を対象としたものが多い。台風の上陸の多い九州の人工林^{6,21)}、上陸時には甚大な被害を生じることがある北海道の人工林²²⁾、九州の広葉樹林⁸⁾であり、被害個体のサイズや形状、立地との関係が解明されている。都市域でも、植物園²³⁾や大学構内⁵⁾の研究では多様な樹種の被害結果があるが、樹種ごとの植栽個体数に多寡がある。街路樹に関しては、全国を対象とした台風被害の結果から、被災しやすい樹種の傾向がまとめられた²⁵⁾。

森林での台風による樹種ごとの被害率は、人工林⁶⁾でも自然林^{8,26)}でも北海道²²⁾以外では概ね20%以下と小さく、被害特性を定量的に解析できる対象種は10種程度以下と少ないことが多い^{6,8,22,26)}。都市緑地での詳細な台風被害調査でも全個体の被害率は22%以下と小さい^{5,23)}。100個体以上が植栽された被害樹種データもあるが、多様な樹種が植栽されるため、数個体の被害データしか得られない樹種も多く^{5,23)}、定量的な樹種ごとの被害特性の考察は、樹高、胸高直径のデ

* 連絡先著者 (Corresponding author) : 〒599-8531 大阪府堺市中区学園町1-1 E-mail : nakamura@envi.osakafu-u.ac.jp

ータ数の多い4種のみで行われた²³⁾。このように、都市緑地では樹種の多様性が影響し、被害個体数の少なさが台風による被害特性の解明を妨げていると考えられる。

そこで、2018年9月に上陸し近畿地方に甚大な被害を発生させた21号台風による都市緑化樹木の被害状態を調査し、樹種ごとの被害特性の解明と、既存の樹種パラメータを利用した被害特性推定を可能にすることを本研究の目的とした。具体的には、材の構造が大きく異なる裸子植物と被子植物などの系統分類や、本来の生育環境と大きく異なる外来種と自生種での被害特性の相違、材の強度と相関のある材密度や曲げ強度と被害特性の関係、これらのパラメータから被害可能性を検討できるかについて考察した。

2. 方法

2.1 調査地

調査地は、大阪府南部に位置する堺市(図-1)の大阪府立大学中百舌鳥キャンパスの北部約22haとした。キャンパス北部には研究棟や緑地が存在するが、植栽された樹木密度は比較的高い。対象地は海岸線から約5.2km東にあり、付近のアメダス(堺)から約1.8km南東に位置し、標高は約27mである。この周辺の地質は新生代の第四紀の段丘堆積物の堆積岩とされ²⁷⁾、明治16年に大日本帝国陸地測量部によって測量された地図には対象地一帯に水田の記号とため池の存在が描画されている。また、1970年の学内の広報には、この学舎建設直後の雨後には空き地や路に水溜まりでき、記念植樹されたクスノキは1~2年で多くが枯れたため、隣接する国道の舗装工事で生じた表層土を譲り受け、緑化のために盛土造成された後に植樹されたことの記載がある。図-1には気象庁の台風位置表¹⁴⁾から作成した2018年台風第21号の近畿地方周辺の進路と9月4日11時から15時までの位置も示す。なお、アメダス(堺)での2018年9月4日の最大瞬間風速は43.6m/s、1時間ごとの風速が最大だった14時の時間雨量は16.5mm、14時以前の24時間および48時間降水量は、いずれも9mmだった¹³⁾。

2.2 台風前の生育調査

図-1 2018年第21号台風の進路と調査地の位置

Fig. 1 Course of the typhoon and the observation location

台風前に、対象地域における一部の低木種を除く全生育個体のナンバリングと種同定とハンドヘルドGPSによる位置計測を2016年から2017年にかけて実施した。低木種のツツジ科(Ericaceae)などの群植、列植個体群は除外した。

2.3 台風後の被害調査

台風通過後の2018年9月4日から被害個体の写真を撮影した。その後、調査可能な個体の被害種類として、目視で根返り、傾斜、根元折れ、幹折れ、枝折れ、被害なしと区分し記録した。ただし、被害から時間がたった調査時には、わずかな枝折れを確認できない可能性があった。そのため、集計時には枝折れは、被害なしに、また、根元折れは幹折れに合算した。なお、サクラ属(*Cerasus*)の調査結果には、一部、既報^{19, 20)}のデータが含まれる。

2.4 解析方法

各樹種の根返り、幹折れなどの被害比率を求めた。例えば、根返り比率は、根返り被害数/生育個体数として求めた。そして、根の被害である根返りと傾斜の2つを合わせた根被害比率を根返り比率と傾斜比率の和として求めた。幹の被害は幹折れのみであるため、幹折れ比率と幹被害比率は等しい。上述の通り、都市緑地では多様な樹種が植栽されており、個体数の少ない植栽樹種が存在するため、森林での台風被害の研究²⁶⁾に倣い被害総数のうち幹被害数の割合である幹被害割合を求めた。なお、根被害割合は1-幹被害割合である。この幹被害割合と、既存の材密度、曲げ強度との関係を求めた。幹被害割合を、既存の材密度データまたは生材の曲げ強度データ(MOR Green)を説明変数としてロジスティック回帰をR(version 4.0.3)で行った。なお、国内の樹種では、気乾時の曲げ強度データは存在するが、生材のデータはほぼないため、海外産の樹種での生材と気乾時の曲げ強度の回帰係数を求め、この係数で換算した生材の曲げ強度を用いた。

3. 結果

3.1 被害前の生育個体数

約22haの大学キャンパス内で、低木等を除いた樹木として3,122個体が確認された。裸子植物は5科13種303個体、基部被子植物は2科14種424個体、単子葉植物は2科8種21個体、サクラ属の栽培品種、雑種以外の真正双子葉植物は32科107種2,072個体だった。この他に、サクラ属には、栽培品種やヤマザクラ(*Cerasus jamasakura*)などの雑種と考えられる302個体があった。個体数の多い上位10種は、クスノキ(*Cinnamomum camphora*)、ムクノキ(*Aphananthe aspera*)、ケヤキ(*Zelkova serrata*)、'染井吉野'(*Cerasus x yedoensis* 'Somei-yoshino')、ナンキンハゼ(*Triadica sebifera*)、エノキ(*Celtis sinensis*)、アラカシ(*Quercus glauca*)、クヌギ(*Quercus acutissima*)、イチョウ(*Ginkgo biloba*)、シラカシ(*Quercus myrsinifolia*)だった(表-1)。

3.2 台風による被害種別の種特性

表-1に被害のあった種または10個体以上生育する種の被

表-1 被害のあった種または 10 個体以上生育する種の被害特性, 材密度, 生材の曲げ強度 (MOR Green)

Table 1 Damaged characteristics, wood density and modules of rupture of green wood of damaged species or the species had more than 10 individuals

分類群	和名	学名	科名	区分	生育 個体	根返り 被害数	傾斜 被害数	幹折れ 被害数	被害 総数	幹被害 割合	根被害 割合	材密度 g/cm ³	引用 文献	MOR Green MPa	引用 文献
裸子植物	イチョウ	<i>Ginkgo biloba</i> L.	イチョウ科	外来	97			16	16	100%	0%	0.55	12)	27.0	12)
	ヒマラヤスギ	<i>Cedrus deodara</i> (Roxb.) G.Don	マツ科	外来	25	8		1	9	11%	89%	0.52	2)	48.3	2)
	クロマツ	<i>Pinus thunbergii</i> Parl.	マツ科	自生	67			6	6	100%	0%	0.54	12)	51.0	12)
	カイズカイブキ	<i>Juniperus chinensis</i> L. 'Kaizuka'	ヒノキ科	栽培	23	2		2	2	0%	100%				
	メタセコイア	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> Hu et W.C.Cheng	ヒノキ科	外来	10			4	4	100%	0%	0.26	9)	31.0	9)
	コノデガシワ	<i>Platycladus orientalis</i> (L.) Franco	ヒノキ科	外来	6	2		2	2	0%	100%				
	センベルセコイア	<i>Sequoia sempervirens</i> (D.Don) Endl.	ヒノキ科	外来	8		5	5	0%	100%	0.34	4)		41.0	4)
	ラクウショウ	<i>Taxodium distichum</i> (L.) Rich.	ヒノキ科	外来	45	2		2	0%	100%	0.42	4)		46.0	4)
被子植物	クスノキ	<i>Cinnamomum camphora</i> (L.) J.Presl	クスノキ科	自生	224	3		14	17	82%	18%	0.52	12)	43.6	28)
	基部被子	<i>Litsea japonica</i> (Thunb.) Juss.	クスノキ科	自生	12			0	—	—	—				
	植物	タブノキ	クスノキ科	自生	23			0	—	—	—	0.65	12)	43.6	12)
		ユリノキ	<i>Liriodendron tulipifera</i> L.	外来	48	5		5	0%	100%	0.42	1)		41.4	1)
植物	ハクモクレン	<i>Magnolia denudata</i> Desr.	モクレン科	外来	14			0	—	—	—				
	カラタネオガタマ	<i>Magnolia figo</i> (Lour.) DC.	モクレン科	外来	54			0	—	—	—				
	タイサンボク	<i>Magnolia grandiflora</i> L.	モクレン科	外来	29			2	2	100%	0%	0.46	1)	46.9	1)
	被子植物	モジバシ	スズカハシ科	外来	21			2	2	100%	0%	0.5	12)	45.0	1)
真正双子	フウ	<i>Liquidambar formosana</i> Hance	フウ科	外来	12			0	—	—	—				
	モミジバフウ	<i>Liquidambar styraciflua</i> L.	フウ科	外来	7			2	2	100%	0%	0.46	1)	49.0	1)
	ヒメズリハ	<i>Daphniphyllum teijsmannii</i> Zoll. ex Kurz	ユズリハ科	自生	22			0	—	—	—				
	ナンキンハゼ	<i>Triadica sebifera</i> (L.) Small	トリカグサ科	外来	169	3	2	12	17	71%	29%				
葉植物	アカギ	<i>Bischofia javanica</i> Blume	ミカンソウ科	自生	2			2	2	100%	0%				
	ボブラ	<i>Populus x canadensis</i> Moench	ヤナギ科	外来	9	1		1	0%	100%					
	ネムノキ	<i>Albizia julibrissin</i> Durazz.	マメ科	自生	1			1	1	100%	0%	0.53	12)	29.3	12)
	ニセアカシア	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	マメ科	外来	51	7	3	12	22	55%	45%	0.77	12)	74.8	12)
エンジュ	エンジュ	<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	マメ科	外来	14	4		1	5	20%	80%	0.74	12)		
	スダジイ	<i>Castanopsis sieboldii</i> (Makino) Hatus. ex T.Yamaz. et Mashiba	ブナ科	自生	26			0	—	—	—				
	クスギ	<i>Quercus acutissima</i> Carruth.	ブナ科	自生	109	2		8	10	80%	20%	0.85	12)	38.0	12)
	ナラガシワ	<i>Quercus aliena</i> Blume	ブナ科	自生	15	1		4	5	80%	20%				
アラカシ	アラカシ	<i>Quercus glauca</i> Thunb.	ブナ科	自生	144			4	4	100%	0%	0.96	12)		
	シラカシ	<i>Quercus myrsinifolia</i> Blume	ブナ科	自生	91		1	1	0%	100%	0.83	12)		74.8	12)
	ウバメガシ	<i>Quercus phillyreoides</i> A.Gray	ブナ科	自生	15			0	—	—	—	0.99	12)	74.8	12)
	チリメンガシ	<i>Quercus phillyreoides</i> A.Gray f. <i>crispa</i> (Matsum.) Kitam. et T.Horik.	ブナ科	栽培	3			1	1	100%	0%				
コナラ	コナラ	<i>Quercus serrata</i> Murray	ブナ科	自生	42			4	4	100%	0%	0.76	12)	39.3	12)
	アベマキ	<i>Quercus variabilis</i> Blume	ブナ科	自生	13			0	—	—	—				
	ムクノキ	<i>Aphananthe aspera</i> (Thunb.) Planch.	アサ科	自生	196	2		1	3	33%	67%	0.67	12)	45.5	12)
	エノキ	<i>Celtis sinensis</i> Pers.	アサ科	自生	148			3	3	100%	0%	0.62	12)	29.9	12)
ヤマザクラ	ヤマザクラ	<i>Cerasus jamasakura</i> (Siebold ex Koidz.) H.Ohba	バラ科	自生	10			1	1	100%	0%	0.62	12)	65.4	12)
	'関山'	<i>Cerasus Sato-zakura</i> Group 'Sekiyama' Koidz.	バラ科	栽培	38	1	2	3	6	50%	50%				
	オオシマザクラ	<i>Cerasus speciosa</i> (Koidz.) H.Ohba	バラ科	自生	18			0	—	—	—				
	'染井吉野'	<i>Cerasus x yedoensis</i> (Matsum.) Masam. et S.Suzuki 'Somei-yoshino'	バラ科	栽培	178	5		16	21	76%	24%				
カナメモチ	カナメモチ	<i>Photinia glabra</i> (Thunb.) Maxim.	バラ科	自生	13	1		1	0%	100%	0.98	12)			
	アキニレ	<i>Ulmus parvifolia</i> Jacq.	ニレ科	自生	12			1	1	100%	0%	0.62	12)		
	ケヤキ	<i>Zelkova serrata</i> (Thunb.) Makino	ニレ科	自生	192	2		4	6	67%	33%	0.69	12)	63.6	12)
	サルスベリ	<i>Lagerstroemia indica</i> L.	ミソハギ科	外来	13			0	—	—	—				
アオギリ	アオギリ	<i>Firmiana simplex</i> (L.) W.F.Wight	アオイ科	自生	5			3	3	100%	0%	0.53	12)		
	フヨウ	<i>Hibiscus mutabilis</i> L.	アオイ科	自生	1	1		1	0%	100%					
	カイノキ	<i>Pistacia chinensis</i> Bunge	ウルシ科	外来	36	1		1	2	50%	50%				
	ハゼノキ	<i>Toxicodendron succedaneum</i> (L.) Kuntze	ウルシ科	外来	12			1	1	100%	0%	0.72	12)		
センダン	センダン	<i>Melia azedarach</i> L.	センダン科	自生	46			8	8	100%	0%	0.58	12)	35.8	12)
	イロハモミジ	<i>Acer palmatum</i> Thunb.	ムクロジ科	自生	14			1	1	100%	0%				
	ムクロジ	<i>Sapindus mukorossi</i> Gaertn.	ムクロジ科	自生	3			1	1	100%	0%	0.69	12)	36.1	12)
	ハナミズキ	<i>Cornus florida</i> L.	ミズキ科	外来	21		1	1	0%	100%	0.64	1)		60.7	1)
モッコク	モッコク	<i>Ternstroemia gymnanthera</i> (Wight et Arn.) Bedd.	サカキ科	自生	23			0	—	—	—	0.8	12)	45.5	12)
	ヤブツバキ	<i>Camellia japonica</i> L.	ツバキ科	自生	40			0	—	—	—	0.81	12)	49.8	12)
	アメリカキササゲ	<i>Catalpa bignonioides</i> Walter	ノボリギク科	外来	6			1	1	100%	0%	0.38	1)	35.9	1)
	シマトネリコ	<i>Fraxinus griffithii</i> C.B.Clarke	モクセイ科	外来	50	1	6	1	8	13%	88%	0.84	33)	76.7	33)
ネズミモチ	ネズミモチ	<i>Ligustrum japonicum</i> Thunb.	モクセイ科	自生	17			0	—	—	—				
	トウネズミモチ	<i>Ligustrum lucidum</i> Aiton	モクセイ科	外来	52	1		3	4	75%	25%				
	オリーブ	<i>Olea europaea</i> L.	モクセイ科	外来	6	2	3	5	0%	100%	0.72	32)		96.8	32)
	キンモクセイ	<i>Osmanthus fragrans</i> Lour. var. <i>aurantiacus</i> Makino f. <i>aurantiacus</i> (Makino) P.S.Green	モクセイ科	栽培	85	1		1	0%	100%					
ヒイラギモクセイ	ヒイラギモクセイ	<i>Osmanthus x fortunei</i> Carrière	モクセイ科	栽培	61			0	—	—	—				
	シナヒイラギ	<i>Ilex cornuta</i> Lindl. et Paxton	モチノキ科	外来	11			0	—	—	—				
	クロガネモチ	<i>Ilex rotunda</i> Thunb.	モチノキ科	自生	16			0	—	—	—	0.7	12)	42.4	12)
	トベラ	<i>Pittosporum tobira</i> (Thunb.) W.T.Aiton	トベラ科	自生	36			0	—	—	—				

材密度と生材の曲げ強度は、以下の文献データから引用、または換算して用いた。

Hardwood of North America¹⁾, Awan²⁾, Wood Handbook³⁾, Jagels⁹⁾, 原色木材図鑑¹²⁾, 木材工業ハンドブック²⁸⁾, The wood database³²⁾, Wang³³⁾.

害特性を示す。被害が確認されたのは、根返りで 23 種 58 個体、幹折れで 34 種 145 個体、傾斜で 8 種類 23 個体、計 226 個体で、全体の被害比率は 7.2% だった。20 個体以上が生育して被害がない種は、タブノキ (*Machilus thunbergii*)、カラタネオガタマ (*Magnolia figo*)、ヒメユズリハ (*Daphniphyllum teijsmannii*)、スダジイ (*Castanopsis sieboldii*)、ヤブツバキ (*Camellia japonica*)、モッコク (*Ternstroemia gymnanthera*)、ヒイラギモクセイ (*Osmanthus x fortunei*)、トベラ (*Pittosporum tobira*) の 8 種だった (表-1)。根返り数の上位 5 種は、ヒマラヤスギ (*Cedrus deodara*)、ニセアカシア (*Robinia pseudoacacia*)、ユリノキ (*Liriodendron tulipifera*)、' 染井吉野'、エンジュ (*Styphnolobium japonicum*) だった。根返り比率の上位 5 種は、100% のフヨウ (*Hibiscus mutabilis*)、33% のオリーブ (*Olea europaea*) とコノデガシワ (*Platycladus orientalis*)、32% のヒマラヤスギ、29% のエンジュだった。傾斜数の上位 5 種は、シマトネリコ (*Fraxinus griffithii*)、センペルセコイア (*Sequoia sempervirens*)、ニセアカシア、オリーブ、ナンキンハゼ (*Triadica sebifera*)、' 関山' (*Cerasus Sato-zakura* Group 'Sekiyama') だった。傾斜比率の上位 5 種は、63% のセンペルセコイア、50% のオリーブ、12% のシマトネリコ、6% のニセアカシア、5% の' 関山' とハナミズキ (*Cornus florida*) だった。これらの根返り数と傾斜数の上位種は、自生地外のシマトネリコを除くと全て外来種か栽培品種だった。幹折れ数の上位 8 種は、イチョウと' 染井吉野'、クスノキ、ナンキンハゼ、ニセアカシア、クヌギ、センダン (*Melia azedarach*)、クロマツ (*Pinus thunbergii*) だった。幹折れ比率の上位 8 種は、100% のアカギ (*Bischofia javanica*) とネムノキ (*Albizia julibrissin*)、60% のアオギリ (*Firmiana simplex*)、40% のメタセコイア (*Metasequoia glyptostroboides*)、33% のムクロジ (*Sapindus mukorossi*) とチリメンガシ (*Quercus phillyreoides* A.Gray f. *crispa*)、29% のモミジバフウ (*Liquidambar styraciflua*)、27% のナラガシワ (*Quercus aliena*) だった。

3.3 系統分類群ごとの被害特性

表-2 に系統分類群ごとの被害特性を示す。被害をうけた種数は、裸子植物で 8 種、基部被子植物で 3 種、単子葉植物は 0 種、真正双子葉植物で 35 種類 (栽培品種を含む、表-2)、被害をうけた科数は、裸子植物で 3 科、基部被子植物で 2 科、基部真正双子葉植物で 16 科だった (表-1)。根と幹を合わせた各群の総被害比率は裸子植物で 16%、基部被子植物と真正双子葉植物では 8% と 9% と低く、裸子植物と他の 2 群間の被害比率には有意差があった (フィッシャーの正確確率検定と Hochberg の多重比較: ともに $P < 0.005$)。裸子植物と真正双子葉植物間において、根返りと傾斜を合算した根被害比率と被害なしの比率にのみ有意差があり (フィッシャーの正確確率検定と Hochberg の多重比較: $P < 0.05$)、真正双子葉植物に比べて裸子植物の根は被害をうけやすかった。各分類群

表-2 系統分類群ごとの被害特性

Table 2 Damage characteristics of the phylogenetic group

分類群	被災 種数	生育 個体数	根被 害数	幹被 害数	被害 総数	総被害 比率	根被害 比率	幹被害 比率	根被害 割合	幹被害 割合
裸子植物	8	281	19	27	46	16%	7%	10%	41%	59%
基部被子植物	3	301	8	16	24	8%	3%	5%	33%	67%
真正双子葉植物	35	1802	54	102	156	9%	3%	6%	35%	65%
計	46	2384	81	145	226	9%	3%	6%	36%	64%

表-3 自生種と外来・栽培品種の被害特性

Table 3 Damage characteristics of indigenous species and alien species or cultivars

区分	被災 種数	生育 個体数	根被 害数	幹被 害数	被害 総数	総被害 比率	根被害 比率	幹被害 比率	根被害 割合	幹被害 割合
自生種	19	1334	12	66	78	6%	1%	5%	15%	85%
外来・栽培品種	27	1050	69	79	148	14%	7%	8%	47%	53%

でデータの存在する種での平均材密度 (表-1) は、裸子植物 ($n=6$) では 0.47 g/cm^3 、基部被子植物 ($n=4$) では 0.52 g/cm^3 、真正双子葉植物 ($n=28$) では 0.72 g/cm^3 だった (表-1)。

3.4 自生種と外来・栽培種での被害特性

表-3 に自生種と外来・栽培品種の被害特性を示す。被害をうけた樹種を自生種 ($n=1,334$) と外来種・栽培品種 ($n=1,050$) に区分したところ、被害総数は、自生種で 78 個体、外来・栽培品種で 148 個体だった (表-3)。区分ごとの総被害比率は自生種で 6% だったが、外来・栽培品種では 14% と高かった (表-2)。外来・栽培品種の根被害比率は 6.6%、幹被害比率は 7.5% と自生種に比べて有意に高かった (フィッシャーの正確確率と Hochberg の多重比較: ともに $P < 0.005$)。樹種別では、根被害割合が 80% 以上だった種は、自生種ではシラカシ、カナメモチ (*Photinia glabra*) の 2 種だったが、外来・栽培品種ではユリノキ、ラクウショウ (*Taxodium distichum*)、ハナミズキ、ヒマラヤスギ (*Cedrus deodara*)、シマトネリコ、エンジュ、キンモクセイ (*Osmanthus fragrans* var. *aurantiacus* f. *aurantiacus*)、カイズカイブキ (*Juniperus chinensis* 'Kaizuka') の 8 種あった (表-1)。

3.5 材密度、曲げ強度と幹被害割合の関係

表-1 に示す材密度と幹被害割合についてロジスティック回帰したところ有意な回帰式は得られなかった ($P=0.395$)。図-2 に被子植物 55 種¹⁾の気乾時の材の曲げ強度 (MOR Dry) と生材の曲げ強度 (MOR Green) の関係を示す。生材では気乾時の材に比べて曲げ強度が 62% ($r=0.92$) だった。同様に、裸子植物 47 種⁴⁾では MOR Green/MOR Dry の比率は 60% だった ($r=0.83$)。分類群ごとの比率を用いて換算した生材の曲げ強度を表-1 に示す。この生材の曲げ強度と幹被害割合の関係を図-3 に示す。曲げ強度が小さな樹種では幹被害割合が高く、逆に大きな樹種では幹被害割合が低い。ロジスティック回帰によって有意な回帰式 ($P < 0.05$, AIC=31.12, 切片=4.129, 係数= -0.0726, $n=25$) が得られた。

4. 考察

4.1 系統分類群と自生・外来種での被害特性

分類群ごとの総被害比率に大差はなかったが、根被害比率、幹被害比率は被子植物の2群に比べて裸子植物で高かった(表-2)。材の強度は、気乾状態でも生材でも材密度の増加とともに増加する⁷⁾ため、幹の強度は、裸子<基部被子<真正双子葉植物の順に増加すると考えられる。強度が最低と考えられる裸子植物で幹被害比率は最大(10%)だが、裸子植物と材密度に大差がない基部被子植物で最小(5%)となり、材密度と幹被害比率の対応はなかった(表-2)。九州の照葉樹林では木部密度と被害比率に有意な相関があった²⁶⁾が、本研究の材密度と被害特性の間には対応がなく、本研究で材密度から被害特性を推定することは困難と考えられた(表-2)。外来種と栽培品種では、自生種に比べて被害数、被害比率が高く(表-2)、特に根の被害数、根被害割合の上位を占めた(表-1)。外来種の根が弱いとの報告を見つけれなかったが、外来種は、自生地と異なって本調査地の排水性が劣ると考えられる土壌環境によって、根系が十分に発達できない、腐朽菌などの影響を受けやすい可能性が考えられる。都市緑地の安全な樹木管理には、土壌環境によっては外来種や栽培品種の危険木評価を念入りに実施する必要があると考えられた。

4.2 既報の台風被害樹種との比較

人工林^{6, 22)}や伊豆大島¹⁸⁾での台風被害種と本研究での重複種はほぼなかったが、九州南部の照葉樹林ではスダジイ、タブノキ、ヤブツバキなどの風倒被害結果がある^{8, 26)}。九州

南部の43.1~57.9 m/s以上の台風によるこれら3種の被害比率はおよそ5~15%だったが、本研究でのこれら3種の被害比率は0%と異なった(表-1)。風速、立地、サイズや立木密度に起因する樹形、自生と植栽での根系の相違などが影響したと考えられる。多様な植栽個体を対象とした風倒調査として、2004年の台風18号による北海道札幌市の植物園²³⁾や北大構内⁵⁾の結果がある。本研究対象地と気候が異なるため重複樹種は多くないが、ニセアカシアが植物園では122個体中55個体(45%)の被害があり、さらに根返りが23個体と多かった。北大構内ではニセアカシアが424個体中67個体(15.8%)で被害を受け、2004年の14個の台風での街路樹被害集計結果²⁵⁾でも、北海道と中部地方ではニセアカシアの被害個体数は2位だった。本調査地のニセアカシア被害比率も同様に43%と高く(表-1)、ニセアカシアは被害を受けやすく、注意を要する樹種といえる。街路樹の被害結果において、本調査地がある近畿地方の被害個体数の上位10樹種は、ケヤキ、カイズカイブキ、ポプラ類、センペルセコイア、ハナミズキ、メタセコイア、クスノキ、サルスベリ、タイサンボク(*Magnolia grandiflora*)、サクラ類だった²⁵⁾。本研究では、クスノキ、タイサンボク、‘染井吉野’、‘関山’の被害比率は7%以上と相対的に高かったが、ケヤキ、カイズカイブキ、ハナミズキでは5%以下と相対的に低く(表-1)、本研究と街路樹の結果で一部、異なる傾向の樹種もあった。樹形や個体サイズなどの影響もあると考えられ、これらの定量データを用いた解析を可能にすることが今後の課題である。

4.3 生材の曲げ強度と幹被害比率の関係

木材の曲げ強度を用いて強風時の幹被害割合を評価できることが判明した。回帰式(図-3)から幹被害割合が75%と25%時の曲げ強度はおよそ40 MPaと70 MPaと求められる。この2つの閾値を用いて、材の曲げ強度(表-1)と幹被害比率の関係を検討する。曲げ強度が40 MPa以下の樹種の幹被害比率は(表-1)、裸子植物のイチョウで16%、メタセコイアで40%、被子植物のクスギで7%、コナラで10%、エノキで2%、センダンで17%、ムクロジで33%、アメリカキササゲ(*Catalpa bignonioides*)で17%だった。いっぽう、曲げ強度が70 MPa以上の被子植物のシラカンとウバメガシとオリーブでは0%、シマトネリコで2%だった。このように、おおむね曲げ強度で幹被害の発生を推察することも示唆される。本研究でデータ数が少なかったヤナギ科、コブシ、ヤマモモ、ミズキ、キリも生材では40 MPa以下と換算され¹²⁾、幹折れが発生しやすいと推察される。実際の風倒被害は、地上部と地下部の、すなわち幹の強度と根系の強度とのバランスを考慮する必要がある²⁹⁾。根系支持力については、多大な労力をかけて実測をすることも可能^{15, 30)}だが、強風時のデータを平時に取得することは不可能である。かといって、データ蓄積のために巨大台風の襲来を期待することもできないし、都市緑化樹木全種の定量的なデータ取得もできない。それゆえ、新たなアプローチから強風による被害発生確率を求

図-2 被子植物の気乾時の材と生材の曲げ強度の関係

Fig. 2 Relationship between MOR at dry and green condition of angiosperm lumber

図-3 生材の曲げ強度と幹被害割合の関係

Fig. 3 Relationship between MOR Green and proportion of snapped stems

めることが必須だ。地上部の強度データと地下部の根系データを蓄積し、都市緑化樹木の風倒発生の可能性を予測して安全な都市緑地の維持や創成に務めることが重要である。

謝辞：本研究のデータの一部は、大阪府立大学の緑地保全学研究グループおよび緑地計画学研究グループの学生によって取得された。本研究の一部は JSPS 科研費 JP15K07831, JP20K06110 によるものである。ここに厚くお礼申し上げる。

引用文献

- 1) Alden, H.A. (1995) Hardwoods of North America. <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/plgtr/fplgtr83.pdf> (参照: 2021 年 3 月 6 日).
- 2) Awan, A.R., Chughtai, M.I., Ashraf, M.Y., Mahmood, K., Rizwan, M., Akhtar, M. et al. (2012) Comparison for physico-mechanical properties of farm-grown eucalyptus camaldulensis dehn. Pakistan Journal of Botany, 44: 2067-2070.
- 3) Ciftci, C., Brena, S.F., Kane, B. & Arwade, S.R. (2013) The effect of crown architecture on dynamic amplification factor of an open-grown sugar maple (*Acer saccharum* L.). Trees - Structure and Function, 27: 1175-1189.
- 4) F.P. Laboratory (1999) Wood handbook. https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf (参照: 2021 年 3 月 6 日).
- 5) 福井良恵・宮本敏澄・小泉章夫 (2007) 北海道大学構内樹木の 2004 年台風 18 号による風倒被害状況および被害木中の腐朽状況. 北海道大学演習林研究報告, 64: 123-129.
- 6) 福永寛之・増谷利博・今田盛生・加賀英昭 (1993) 風倒木被害発生と立地及び林分構造との関係解析. 九州大学農学部演習林報告, 69: 13-30.
- 7) 石丸 優・古田裕三・杉山真樹 (2017) 木材の物理. 海青社, 210pp.
- 8) 井藤宏香・伊藤 哲・中尾登志雄 (2009) 南九州の壮齢照葉樹二次林における主要構成樹種の台風被害の特徴. 日本森林学会誌, 91: 35-41.
- 9) Jagels, R., Visscher, G.E., Lucas, J. and Goodell, B. (2003) Palaeo-adaptive properties of the xylem of *Metasequoia*. Annals of Botany, 92 (1): 79-88.
- 10) James, K.R., Dahle, G.A., Grabosky, J., Kane, B., Detter, A. (2014) Tree biomechanics literature review: Dynamics, Arboriculture and Urban Forestry. 40: 1-15.
- 11) 神山健二・大橋征幹・成田健一 (2004) 葉面積密度を代表面積とした樹木の抵抗係数に関する風洞実験. 日本建築学会環境系論文集, 69: 71-77.
- 12) 貴島恒夫・岡本省吾・林 昭三 (1962) 原色木材大図鑑. 保育社, 204pp.
- 13) 気象庁. “過去の気象データ検索”. <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (参照: 2021 年 5 月 6 日).
- 14) 気象庁. “台風位置表”. https://www.data.jma.go.jp/fcd/yoho/typhoon/position_table/table2018.html (参照: 2021 年 5 月 6 日).
- 15) 小泉章夫・平井卓郎・笠康三郎・中原 亮・新谷克教・清水英征 (2007) ニセアカシア街路樹の耐風性. 北海道大学演習林研究報告, 64:105-112.
- 16) 国史大系. 第 5 巻 “日本紀略”. <https://dl.ndl.go.jp/nfo:ndljp/pid/991095/2>. 参照: 2021 年 3 月 6 日).
- 17) Mayhead, G.J. (1973) Some drag coefficients for british forest trees derived from wind tunnel studies. Agricultural Meteorology, 12: 123-130.
- 18) 村上 亘・小川明穂 (2016) 2013 年台風 26 号により伊豆大島で崩壊が発生した斜面周辺に見られる風倒木の特徴について. 森林総合研究所研究報告, 15: 39-47.
- 19) 中村彰宏・守村敦郎 (2017) タブレット端末を利用した植物学習と樹木管理のためのサクラ属のデータベース (CerasusDB) の開発. 日本緑化工学会誌, 43: 174-179.
- 20) 中村彰宏・藤野和臣・木寺由樹・中山祐一郎・守村敦郎 (2019) 野外調査と内業を効率化するスマートフォン利用データベースの開発. 日本緑化工学会誌, 45: 228-231.
- 21) 中尾博美・金 錫権・又木義博・藤本登留 (1993) 台風 9117, 9119 号による森林被害の要因解析. 九州大学農学部演習林報告, 68: 11-48.
- 22) 扇 大輔・長慶一郎・山内康平・大崎 繁・田代直明・古賀信也 (2012) 平成 18 年 10 月に九州大学北海道演習林で発生した低気圧による風害について. 九州大学農学部演習林報告, 93: 28-36.
- 23) 大野祥子 (2004) 平成 16 年台風 18 号被害調査報告. 北大植物園研究紀要, 4: 2-17.
- 24) Rodriguez, M., De Langre, E. and Moulia, B. (2008) A scaling law for the effects of architecture and allometry on tree vibration modes suggests a biological tuning to modal compartmentalization. Am. J. Bot., 95: 1523-1537.
- 25) 緑化生態研究室 (2019) 街路樹の倒伏対策の手引き 第 2 版. 国土技術政策総合研究所資料, 669, 144pp.
- 26) 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: 321-328.
- 27) 産総研地質調査総合センターウェブサイト. “地質図 Navi”. <https://gbank.gsj.jp/geonavi/geonavi.php> (参照: 2021 年 5 月 6 日).
- 28) 森林総合研究所監修 (2004) 木材工業ハンドブック, 丸善出版, 1236pp.
- 29) 陶山正憲 (1993) 台風による樹木の風倒・折損機構. 水利科学, 37: 25-53.
- 30) 橘 大介・直木 哲・今井一隆 (2018) 移植高木の引き倒し試験による耐風性の評価. 日本建築学会技術報告集, 58: 1325-1330.
- 31) 竹内義明 (2015) 巨大台風を科学する. 表面科学, 36: 382-384.
- 32) The wood database. <https://www.wood-database.com/olive/> (参照: 2021 年 3 月 6 日).
- 33) Wang, S.Y. (1990) Reduction of mechanical properties of seventeen Taiwan native-wood species subjected to a seven-year exposure in an outdoor environment. Mokuzai Gakkaishi, 36 (1), 69-77.

(2021年6月28日受理)