スギ高齢人工林における冠雪害発生と林孔との関係

山崎 遥^{*.1}・國崎 貴嗣²

冠雪害の発生傾向と林孔との関係を明らかにするために、2010年12月に岩手県滝沢演習林のスギ高齢林で発生した事例について Voronoi 多角形面積を用いて解析した。個体の存在した場所の斜面状態、形状比、樹形級、Voronoi 多角形面積を説明変数に用いてロジスティック回帰分析を行った結果、最良モデルには斜面状態、形状比、Voronoi 多角形面積が含まれた。最良モデルの係数から、傾斜地に存在し、Voronoi 多角形面積がより大きく、形状比がより高い個体の方が被害を受けやすいと判断された。また、傾斜地における被害木と健全木の平均形状比の差、平均 Voronoi 多角形面積の差に対するオッズ比は Voronoi 多角形面積で 1.40 であり、形状比の 1.21 より大きかった。ゆえに、冠雪害の発生を抑制する際、形状比のみならず林孔に関する指標にも注目すべきである。

キーワード：冠雪害、高齢人工林、スギ、Voronoi 多角形面積、林孔

Haruka Yamazaki^{*,1}, Takashi Kunisaki² (2014) Relationship between Canopy Opening and Snow Accretion Damage in an Old Planted *Cryptomeria japonica* Stand. J Jpn For Soc 96: 117-120 We evaluated canopy opening, which was expected to be a critical factor affecting snow damage, using Voronoi polygon area to explain the occurrence of snow accretion damage in an old planted *Cryptomeria japonica* stand in December 2010. We performed a logistic regression analysis using slope gradient, height: diameter at breast height (DBH) ratio, tree form class, and Voronoi polygon area as explanatory variables. Trees on the slope site that had a larger Voronoi polygon area and a greater height: DBH ratio tended to be more damaged by snow. The odds ratio based on the difference in average height: DBH ratio between trees on the slope site with and without snow damage was 1.21, and the odds ratio based on the difference in the average Voronoi polygon area between trees on the slope site with and without snow damage was 1.40. In conclusion, canopy opening in dense plantations of old sugi does not prevent snow accretion damage; thus, height: DBH ratio and canopy opening are critical factors affecting snow damage.

Key words: snow accretion damage, old plantation stand, sugi (*Cryptomeria japonica* D. Don), Voronoi polygon area, canopy opening

I. は じ め に

スギ (*Cryptomeria japonica*) で構成された人工林 (以下、スギ林) では、しばしば湿雪による冠雪害が発生する。スギは他の樹種に比べて枝葉量が多く、枝端での着葉量も多い (高橋 1977)。加えて、幹の材質の強度が低いスギは、冠雪に対する抵抗力が他の林業用樹種に比べて弱く、壮齢林では幹の折れ、裂け、根返りなどの致命的な被害を受けやすい (石川ら 1987)。

スギ林では冠雪害と個体の形状比との間に関係が認められ (例えば、佐伯・杉山 1965; 嘉戸ら 1992)、スギ若齢林では形状比 80 以上で被害が多くなる一方で、形状比 70 未満だと被害はほとんど発生しないといわれている (例えば、四手井 1987; 桜井 2002)。スギ高齢林においても、冠雪害と個体の形状比との関係は同様であり、形状比 70 以上の個体では被害を受ける可能性が高い一方で、形状比 70 未満ではほとんど発生しなかった (國崎 2005)。このように、スギ林における冠雪害の発生傾向は形状比との関係で説明されることが多い。しかし、冠雪害には複数の要因が関わっており、単一の要因では十分に説明できない

(嘉戸 2000)。

高橋 (1977) は、林孔は冠雪害を受けやすいといわれる偏樹冠の発生を助長するだけでなく、付近の気流が冠雪を助長したり、つる類が繁茂しやすいため、二次的に冠雪害が起きやすいと述べている。石井ら (1983) は、林分内に個体が倒れるだけの空間が存在するか、あるいはできやすいかということが冠雪害発生の林分側の基本条件と述べている。また、石川ら (1987) も、過密な林分に強度の間伐を施すと、お互いの支えを失うとともに風当りも強くなって冠雪害を受けやすい状態になると述べている。このように、林孔に隣接している個体で冠雪害を受けやすいことは、定性的に指摘されているものの、林孔が冠雪害発生に及ぼす影響を定量的に検討した事例は見受けられない。

そこで本研究では、岩手大学農学部附属寒冷フィールドサイエンス教育センター滝沢演習林のスギ高齢林 (以下、滝沢高齢林) を対象に、2010 年の冠雪害発生と林孔との関係を、斜面状態、個体の形状比・形質といった複数の要因を同時に考慮しつつ、明らかにすることを目的とする。なお、本研究では、林孔という用語を「ほぼ閉鎖した林冠に、自然災害や伐採により形成された林冠木 1 本から数本

*連絡先著者 (Corresponding author) E-mail: halyamazaki@fsc.hokudai.ac.jp

¹ 北海道大学環境科学院 〒060-0810 北海道札幌市北区北 10 条西 5 丁目 (Graduate School of Environmental Science, Hokkaido University, N10 W5, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan)

² 岩手大学農学部 〒020-8550 岩手県盛岡市上田 3-18-8 (Faculty of Agriculture, Iwate University, 3-18-8 Ueda, Morioka, Iwate 020-8550, Japan)

(2013 年 10 月 8 日受付, 2014 年 1 月 27 日受理)

分の欠所部」という意味で用いる。

II. 調査地と方法

1. 調査地

滝沢高齢林は岩手県滝沢村に所在し、2010年時点で165年生であった。滝沢高齢林は学術参考林に指定され、風雪害木の処理を除き、原則として伐採が控えられており、146年生時に材積間伐率9%という弱度の下層間伐が実施されたのみである(國崎ら1999)。そのため、被圧による枯死木が多数発生する過密林であり(國崎2005)、2010年の冠雪害発生直前には、ほぼ閉鎖した林冠の数カ所に林孔が形成されている状態であった(図-1)。滝沢演習林の標高210m地点における気象観測資料(1983~2003年)によれば、年平均気温9.2℃、暖かさの指数76.7、年平均降水量1,219mmであり、最深積雪深40cm程度の少雪地域に相当する。滝沢高齢林の面積は1.14haであり、傾斜22~29度の北東~南東向き斜面と傾斜5度前後の平坦地からなる(図-1)。

滝沢高齢林では、2010年以前に3例(1981年1月、1999年3月、2009年2月)の冠雪害が発生した。それらの冠雪害の中でも特に被害の多かった2例(1981年1月、1999年3月)については國崎(2005)が詳述している。1981年、1999年、2010年の冠雪害の被害形態はいずれも幹折れ、梢端折れ、幹曲がりであり、根返りは発生しなかった。

滝沢高齢林から11km離れた盛岡地方気象台(標高155m)における気象観測資料(気象庁2013)を解析した結果、2010年の冠雪害発生時における降雪の深さの日合計は35cm/日、降雪時の気温は0℃前後であり、降雪時に

風速4m/s以上の風が連続的に吹いていた(図-2)。盛岡地方において、1979年12月~2011年3月の32冬期間で30cm/日以上 of 降雪の深さの日合計が確認されたのは、11日だけである。以上のように、少雪地域にしては降雪の多かった日に冠雪害が発生していた。冠雪害発生時の気象条件について、石川ら(1987)は風速4~10m/sでの冠雪害発生が目立ち、風速の大きいときは、気温0~2℃のプラス域でのヌレ雪との組み合わせで激害が出るようであるとしている。2010年の冠雪害はこの条件下で発生しており、気温が0℃前後で降った湿雪により冠雪が発達した後に、強風が被害の発生を助長する、強風湿降雪型(松田1988)に相当すると考えられる。

2. 調査方法

2009年(164年生)の10~12月に胸高直径、樹高、樹形級(表-1)を毎木調査した。また、2011年の5月に冠雪害の被害木を確認した。本研究では、冠雪害によって幹折れ、梢端折れ、幹曲がりが発生した個体を被害木と定義した。

林分面積を個体の占有空間に分割した。宮本・天野(2002)は、個体の占有空間を対象木とその隣接木を結ぶ線分の垂直二等分線により作られる潜在的利用可能面積(Area potentially available, APA)により定義した。また、隣接木とは対象木を中心としてVoronoi多角形を構成する個体であると定義している。そこで、各個体の占有空間の指標としてVoronoi多角形面積を使用した。傾斜地上にある個体の占有空間を推定するにあたり、個体間の水平距離を利用する方法はよく用いられている(高田・小林1983; 宮本・天野2002; Mitsuda *et al.* 2002; Masaki *et al.*

図-1. 調査地の地形と個体位置

数字は標高を、図中の黒点は被害木、白点は健全木的位置を表している。また、図中の地形を横切る実線の東側は平坦地、西側は傾斜地を表している。

図-2. 2010年12月31日の気象状況

表-1. 樹形級区分

樹形級	評価方法
1	優勢木で、樹冠の発達が隣接木に妨げられず、かつ幹に欠点のないもの
2	優勢木だが、樹冠の発達が隣接木に妨げられたもの、もしくは幹に欠点があるもの
3	劣勢木(樹冠はまだ圧せられていないもの)
4	被圧木(樹冠が被圧されているもの)

2006)。Voronoi 多角形面積の計算には、2003 年に測量した立木位置データを用いた。図-1 中の点は各個体の位置を示す。

3. 解析

傾斜変換点に基づき、滝沢高齢林を傾斜 22～29 度の傾斜地と約 5 度の平坦地に分け、個体の存在した場所の斜面状態を分類した。被害の有無と斜面状態との関係を調べるため、Fisher の直接確率検定を行った。

冠雪害の発生傾向について複数要因を同時に考慮しながら解析するために、ロジスティック回帰分析を行った。冠雪害の有無（有を 1、無を 0）を目的変数、個体の存在した場所の斜面状態（傾斜地を 1、平坦地を 0）、形状比、樹形級、Voronoi 多角形面積を説明変数とし、総当たり法により、全てのモデルの赤池情報量基準 (AIC) を求め、AIC の数値が小さいものから並べた。AIC は、予測の最適化の上でより良いモデルを選ぶものであり、AIC の相対的に小さい方が良いモデルである（粕谷 2012）。

以上の統計解析にはすべて、R2.15.1 (R Development Core Team 2012) を用いた。

III. 結 果

2010 年の冠雪害発生前年である 2009 年時点における調査林分の概要を表-2 に示す。被害木本数は、傾斜地で 30

表-2. 調査林分の概要

	傾斜地	平坦地
立木密度 (本/ha)	373	284
平均胸高直径 (cm)	50.8	60.1
平均樹高 (m)	35.4	40.1
平均形状比	71.22	68.28
林分材積 (m ³ /ha)	1,044	1,182
収量比数	0.64	0.61
Voronoi 多角形面積 (m ²)	26.17	34.67
該当面積 (ha)	0.75	0.39

本、平坦地で 4 本であり、傾斜地で有意に多かった (Fisher の直接確率検定, $p < 0.05$)。

ロジスティック回帰分析の結果を表-3 に示す。Voronoi 多角形面積、形状比、斜面状態を含むモデルが最良モデルであった。Voronoi 多角形面積は上位六つのモデルに入っていたものの、Voronoi 多角形面積のみでは 8 番目であった。Voronoi 多角形面積、形状比、斜面状態はすべてのモデルにおいて有意であった ($p < 0.05$)。一方、樹形級は、含まれるすべてのモデルにおいて有意でなかった ($p > 0.05$)。

最良モデルの係数から、傾斜地に存在し、Voronoi 多角形面積がより大きく、形状比がより高い個体の方が被害を受けやすかった (表-4)。

最良モデルの係数から求めたオッズ比は、斜面状態で 3.61 と最も大きかった (表-4)。また傾斜地における被害木と健全木の平均形状比の差、および傾斜地における被害木と健全木の平均 Voronoi 多角形面積の差より求めたオッズ比を表-5 に示す。差に対するオッズ比は Voronoi 多角形面積で 1.40 であり、形状比の 1.21 より若干高かった。

IV. 考 察

最良モデルに含まれる説明変数は Voronoi 多角形面積、形状比、斜面状態であり (表-3)、これらが複合的に冠雪害発生の要因となっていた。Voronoi 多角形面積の係数の符号は正であり (表-4)、林孔を除いてほぼ林冠が閉鎖している滝沢高齢林において、Voronoi 多角形面積の大きな個体とは、隣接木との距離の大きな、林孔に接する個体を意味する。このように、Voronoi 多角形面積が大きいという状態は、冠雪害の要因になっていると考えられる。ただし、Voronoi 多角形面積のみのモデルは 8 番目であり、上位とはいえない。このことから、Voronoi 多角形面積のみで冠雪害の発生傾向を説明することはできない。

表-3. 総当たり法による各モデルの AIC と p 値

AIC	要 因	各要因の p 値			
		Voronoi*	樹形級	形状比	斜面状態
217.83	Voronoi, 形状比, 斜面状態	0.001		0.01	0.021
219.71	Voronoi, 樹形級, 形状比, 斜面状態	0.001	0.728	0.01	0.020
222.62	Voronoi, 斜面状態	0.003			0.014
222.77	Voronoi, 形状比	0.002		0.005	
224.49	Voronoi, 樹形級, 斜面状態	0.003	0.721		0.013
224.76	Voronoi, 樹形級, 形状比	0.002	0.937	0.005	
226.86	形状比, 斜面状態			0.039	0.049
228.66	Voronoi	0.009			
228.74	樹形級, 形状比, 斜面状態		0.729	0.038	0.047
229.12	斜面状態				0.032
229.72	形状比			0.021	
230.65	Voronoi, 樹形級	0.009	0.920		
231.03	樹形級, 斜面状態		0.765		0.031
231.71	樹形級, 形状比		0.947	0.021	
235.03	樹形級		0.973		
233.03	null model				

*Voronoi 多角形面積。

表-4. 最良モデルに含まれる各要因のオッズ比と係数

	要 因		
	Voronoi*	形 状 比	斜面状態
オッズ比	1.03	1.05	3.61
係 数	0.03	0.046	1.283

*Voronoi 多角形面積。

表-5. 傾斜地における被害木、健全木の Voronoi 多角形面積、形状比、オッズ比

	被害木	健全木	差	対 数 オッズ比	差に対する オッズ比
Voronoi* (m ²)	36.1 ± 18.1**	25.0 ± 18.5**	11.1	0.030	1.40
形状比	75.0 ± 7.7**	70.8 ± 10.9**	4.2	0.046	1.21

*Voronoi 多角形面積。**平均 ± 標準偏差。

最良モデルにおいては、斜面状態のオッズ比は 3.61 であった (表-4)。これは傾斜地では平坦地に比べて 3.6 倍被害を受けやすいことを示している。國崎 (2005) は、滝沢高齢林における過去の冠雪害について、傾斜地では平坦地に比べて幹成長が悪く、かつ密度効果により直径成長が抑制され、相対的に細長い幹になることで、冠雪害が多く発生しやすいとしている。傾斜地における本数密度の高さや幹サイズの低さは 2009 年時点でも継続しており (表-2)、傾斜地は林地生産力の低さや過密を反映していると考えられる。これらに加え、傾斜地と平坦地の個体では、樹冠形や枝葉量 (中島ら 1989)、樹冠の偏奇 (松田 1988) にも差が生じている可能性が考えられるものの、本研究では明らかにすることはできなかった。

傾斜地で冠雪害が発生しやすいため、以下、傾斜地を対象に Voronoi 多角形面積と形状比のオッズ比について考察する。Voronoi 多角形面積のオッズ比 (表-4) は、Voronoi 多角形面積が 1 m² 増加した際に何倍被害を受けやすいか、形状比のオッズ比 (表-4) は、形状比が 1 ポイント増加した際に何倍被害を受けやすいかを示している。一方、表-5 は、傾斜地における被害木、健全木の Voronoi 多角形面積と形状比の平均の差に基づきオッズ比を算出することで、冠雪害の発生しやすさを示したものである。Voronoi 多角形面積では被害木が健全木よりも平均で 11.1 m² 広い Voronoi 多角形面積を有しており (表-2)、1.4 倍被害を受けやすかった。形状比では被害木が健全木よりも平均で 4.2 ポイント高い形状比を有しており、1.2 倍被害を受けやす

かった。このように、Voronoi 多角形面積は、従来冠雪害発生指標として最も注目されてきた形状比と同程度、あるいは形状比よりも若干高いオッズ比を示す変数であるといえる。ゆえに、冠雪害の発生を抑制するにあたり、形状比のみならず林孔に関する指標にも注目すべきと考えられる。

引用文献

- 石井 弘・片桐成夫・三宅 登 (1983) 最も軽度な冠雪害をうけたスギ人工林における被害の特徴. 日林誌 65: 288-293
- 石川政幸・新田隆三・勝田 柁・藤森隆郎 (1987) 冠雪害—発生のかみりと回避法—. 林業科学技術振興所
- 粕谷英一 (2012) 一般化線形モデル (R で学ぶデータサイエンス 10). 共立出版
- 嘉戸昭夫 (2000) スギ人工林における冠雪害抵抗性の推定とその応用に関する研究. 岩手大学大学院連合農学研究科博士論文, p 152
- 嘉戸昭夫・中谷 浩・平 英彰 (1992) ボカスギ林の冠雪害と林木および地形要因の関係. 日林誌 74: 114-119
- 気象庁 (2013) 気象統計情報. <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (2013 年 10 月 5 日取得)
- 國崎貴嗣 (2005) 岩手山麓のスギ高齢人工林における冠雪害の発生傾向. 日林誌 89: 426-429
- 國崎貴嗣・藁谷紀恵・柴田信明 (1999) 岩手山麓におけるスギ高齢林の林分構造と成長. 日林誌 81: 346-350
- Masaki T, Mori S, Kajimoto T, Hitsuma G, Sawata S, Mori M, Osumi K, Sakurai S, Seki T (2006) Long-term growth analyses of Japanese cedar trees in a plantation: neighborhood competition and persistence of initial growth deviations. J For Res 11: 217-225
- 松田正宏 (1988) スギ人工林の冠雪害発生機構に関する研究. 福井県グリーンセンター林試研報 8: 1-78
- Mitsuda Y, Ito S, Takata K (2002) Effects of competitive and cooperative interaction among neighboring trees on tree growth in a naturally regenerated even-aged *Larix sibirica* stand in considering height stratification. J For Res 7: 185-191
- 宮本麻子・天野正博 (2002) 立木の空間分布および生育条件が個体成長に及ぼす影響. 森林総研報 383: 163-178
- 中島 清・新田隆三・藤森隆郎・勝田 柁 (1989) スギの冠雪害抵抗性の要因解析—人工冠雪装置による実験—. 森林総研報 356: 1-28
- R Development Core Team (2012) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. <http://www.R-project.org> (2013 年 10 月 5 日取得)
- 佐伯正夫・杉山利治 (1965) 林木の冠雪害危険地域. 林試研報 172: 117-137
- 桜井尚武 (2002) 長期林の実態—その効果と取り扱い技術—. 林業科学技術振興所
- 四手井綱英 (1987) 森林保護学. 朝倉書店
- 高田和彦・小林正吾 (1983) 最終回の間伐以後のスギ林分における直径および断面積生長量と競争因子の関係. 日林誌 65: 113-118
- 高橋啓二 (1977) 造林地の冠雪害とその対策. 林業技術協会