

2004年台風23号により富山県西部のスギ林で発生した風害の要因解析

嘉戸 昭夫*¹・凶子 光太郎*²

Analysis of the wind damage caused by Typhoon No.23 in 2004 to Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D.Don) stands in Western Toyama Prefecture

Akio KATO*¹, Kotaro ZUSHI*²

2004年10月20日に台風23号の暴風により、富山県西部の森林を中心に大規模な風倒害が発生した。そこで、氷見市北部のスギ林に74箇所の調査プロットを設けて、本数被害率と林況および地形要因との関係について重回帰分析を用いて検討した。林況要因には立木本数、蓄積、平均胸高直径、平均形状比を取り上げ、これらを各調査プロットにおいて測定した。地形要因には標高、斜面方位、開空度、斜面傾斜角、横断面曲率、縦断面曲率、土壌湿潤度などをとりあげ、これらをすべて数値標高モデル (DEM) から読み取った。ステップワイズ法による重回帰分析の結果、被害率の調査プロットによる変動は、斜面方位、平均形状比、横断面曲率、開空度、土壌湿潤度および標高の6要因によって62%が説明された。斜面方位の偏相関係数は最も大きく、その次が平均形状比であった。本数被害率は風上側に位置する東向き斜面で最も高く、平均形状比が大きくなるのに伴っても増加する傾向が認められた。

1. はじめに

我が国の森林における主な気象災害は雪害と風害である。富山県は多雪・豪雪地帯に位置することか

ら雪害の常習地帯であり、とくに県西部の丘陵地帯は冠雪害の危険性が最も高いといわれている¹³⁾。雪害に比べると、風害の発生頻度は低い。1959年の伊

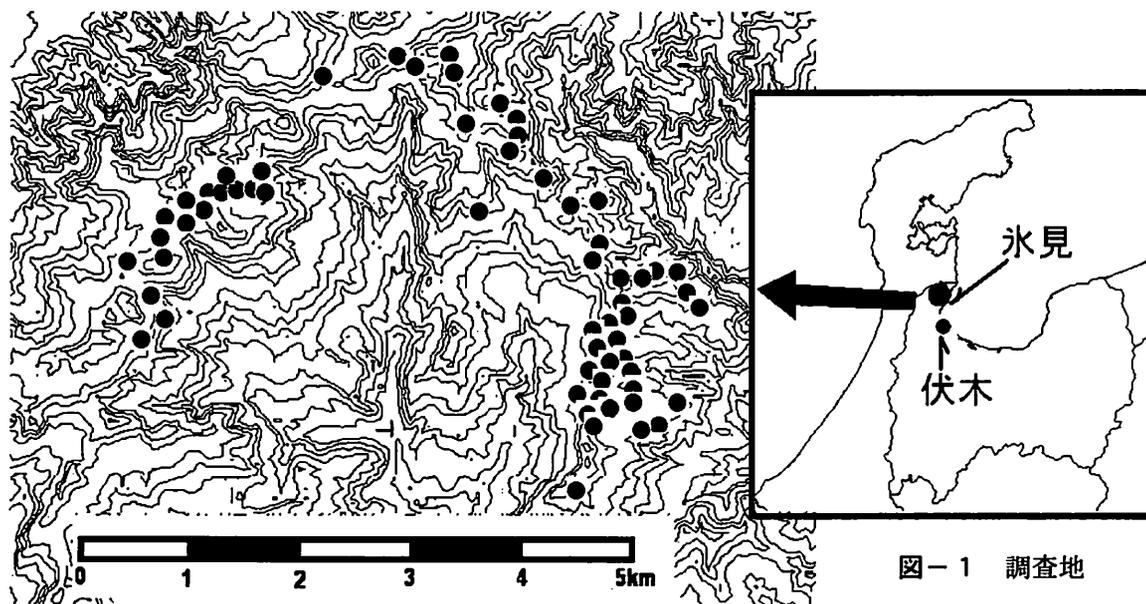


図-1 調査地

*1: 林業試験場, *2: 林業試験場 (現富山農地林務事務所)

勢湾台風により県内のスギ林で被害が発生したとのことであるが、当時の被災記録が残っていない。また、1991年台風19号により九州地方をはじめ、隣接する石川県能登地方で大きな被害が発生したものの、本県では被害面積は僅かであった。

ところが、2004年台風23号が長野県を横断したのに伴って、富山県下において北東の強風が吹き荒れ、県西部のスギ林や屋敷林を中心に大規模な風倒害を引き起こした。富山県森林政策課の調査によると、実損被害面積は合計239haに達し、なかでも小矢部市(94ha)、高岡市(旧福岡町含む;79ha)、氷見市(19ha)などの県西部のスギ林での被害が多かった。

そこで、今回の台風による大規模な風倒害の実態を記載するとともに、この防止対策を検討する上での基礎資料を得る目的で、富山県氷見市のスギ林を対象に風害の要因解析を行ったので報告する。

2. 調査方法

2.1 被害調査

調査地は氷見市北西部の八代地区のスギ林である(図-1)。この地区を調査対象として選定したのは、激害林分から無被害林分まで被害程度が異なる様々なスギ林が存在したこと、近年、2004年10月の台風害以外に顕著な森林災害を受けておらず、台風被害の判別が容易であったこと等の理由による。

被害調査は2005年4月から7月にかけて、20×20mの方形プロット18箇所と半径10mの円形プロット56箇所の合計74箇所の調査プロットを設けて行った。このうち、初期成長がよいボカスギまたはカワイダニスギなどの品種が66箇所、タテヤマスギが8箇所

であった。なお、調査プロットを激害地から無被害地までを含むように心がけたが、激害林分が多かった尾根部に集中する結果となった。

各調査プロットにおいて被害形態と胸高直径を毎木調査した。被害形態は幹折れ、幹曲がり、根返り、傾幹の4区分とした(写真-1)。幹曲がりは樹幹の上部が大きく撓みかつ幹折れしていないもの、傾幹は樹幹が根元から10度以上傾きかつ根返りまでに至っていないものである。傾幹は樹幹が根元から10度以上傾きかつ根返りまでに至っていないものである。樹高は調査プロット当り10~15本のサンプル木について調査し、胸高直径と樹高の関係にヘンリクセン式を適応して各林木の樹高を推定した。各林分の平均形状比はまず各林木の形状比を求め、次にこれらを平均して算出した。

各調査プロットの地形特性を数値地形解析により算出するため、緯度経度をハンディGPSで測定した。

2.2 解析方法

林木の台風害の発生には林況要因や地形要因など複数の要因が関与しており、各要因間にも何らかの関係が存在することも少なくないと考えられる。そこで、スギ林の台風害の発生に関与する要因を検討するために重回帰分析を行った。

まず、各調査プロットにおける台風害の程度を本数被害率(全被害木/全立木本数×100%)で表わし、これを目的変数とした。つぎに、立木密度、蓄積、断曲率、土壌湿潤度などの地形要因を説明変数とし平均胸高直径、平均形状比などの林況要因と、標高、斜面方位角、斜面傾斜角、開空度、横断面曲率、縦断曲率、土壌湿潤度などの地形要因を説明変



写真-1 被害形態

数として取り上げた。なお、平均樹高、平均胸高直径および平均形状比を一緒に解析すると三者が閉じた関係になるので、平均樹高を外して解析した。

本研究では10m メッシュの数値標高モデル (DEM) を用いて、各調査プロットにおける地形要因を近接する4個のメッシュから算出した。なお、開空度¹⁷⁾は垂直方向の開放度を表わすもので、90度から山体によって遮られる見上げ角度を差し引いて求めた。本調査では調査プロットの周囲8方位の平均値を用いた。この値は0~90度の範囲で変動し、値が大きいほど解放領域が大きいことを示す。横断面曲率¹⁸⁾は、その地点の等高線方向における地形の凹凸を示しており、凹型の斜面では正の値を、凸型の斜面では負の値を、平衡斜面では0に近い値を示す。縦断曲率¹⁹⁾は、その地点の縦断方向における地形の凹凸を示す。凹凸に対する数値の変化は横断面曲率と同様である。土壌湿潤度²⁾は、その地点の集水面積と斜面傾斜の比を求めることによって、土壌の水分状況を表しており、湿潤なほど大きい値を示す。

本調査地の林木要因と地形要因の概要は表-1のとおりである。調査地の林齢は18年から74年生であるが、30年生前後の林分が多かった。ボカスギやカワイダニスギは疎植である影響で、立木密度も最大2,000本/haと少なかった。調査地の標高は173mから491mであった。

3. 調査結果

3.1 被災時の気象状況

気象庁のアメダスデータ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) によると、台風23号の影響によって富山県内で風速が最も強くなったのは、2004年10月20日19時~21時の間である。その間における富山県および石川県における最大風速と風向は図-2の通りである。この図から、日最大風速は富山県西部で20~23 m/sと強かったのに対し、県東部や内陸部では20m/s以下と弱かったことがわかる。そして、本調査地から南方7.5kmにある気象庁氷見アメダス観測所 (標高7 m) の最大風速は21m/sであった。この値は過去26年間で2番目に大きい値であった。なお、氷見観測所では、瞬間最大風速は測定されていない。そこで、富山県内で瞬間最大風速が測定されていた富山气象台と伏木測候所における風速を調べたところ、日最大風速

表-1 調査値の概要

要因	最小値	平均値	最大値
被害率 (%)	0	34	100
林齢 (年生)	18	25	43
立木密度 (本/ha)	382	980	2006
材積 (m ³ /ha)	151	442	1199
胸高断面積 (m ² /ha)	25	46	84
平均胸高直径 (cm)	16	23	37
平均樹高 (m)	11	17	29
平均形状比 (m/m)	50	66	94
標高 (m)	173	318	491
斜面方位角 (度)	1	153	333
斜面傾斜角 (度)	1	15	35
開空度 (度)	73	82	90
横断面曲率	-0.135	-0.012	0.106
縦断面曲率	-0.030	-0.001	0.024
土壌湿潤度	3.33	5.25	7.85

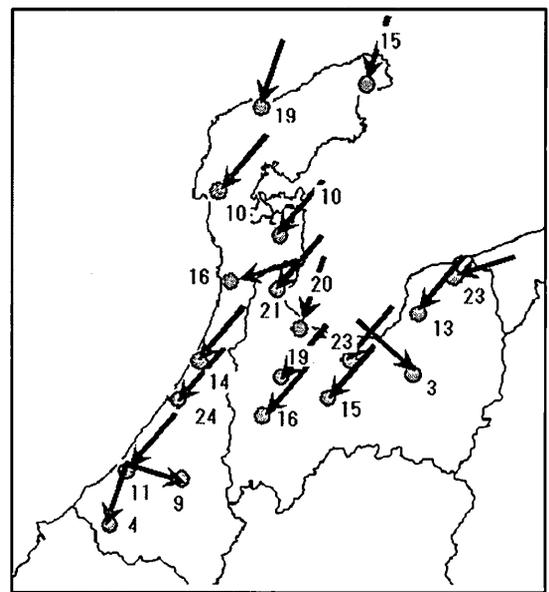


図-2 被災時の最大風速と風向 (数字：風速 m/秒)

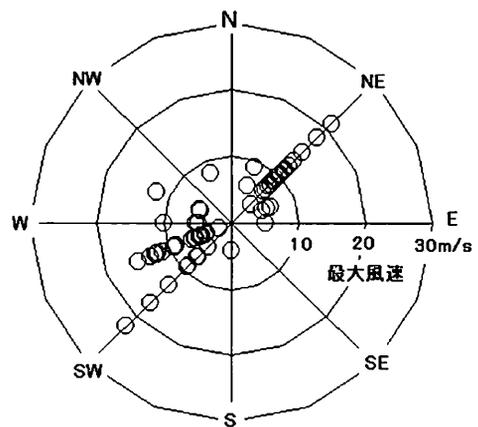


図-3 氷見観測所における台風接近時の最大風速と風向き (1979-2005年)

はそれぞれ22.9, 19.5m/秒であったのに対して、日瞬間最大風速はいずれも40.6m/秒で、日最大風速の約2倍であった。これらのことから、氷見観測所の日瞬間最大風速も約40m/秒と推定された。

また、日最大風速が観測された時の風向は北東であり、富山県西部や隣接する石川県能登地方や加賀地方においてほぼ一定であった(図-2)。今回の台風では北東風が卓越していたが、このような傾向が氷見市において一般的であるのか否かについて、1979年から2005年までの27年間におけるアメダスデータを用いて調べた(図-3)。その結果によると、台風接近時には北東風が卓越する場合とその反対側の南西ないし西南西の風が卓越する場合の2パターンがあることがわかった。したがって、今回の被災時における風向は氷見市で多く認められる2パターンのうちのひとつといえる。

3.2 被害形態

被害形態の特徴を見るため、被害形態別の被害率を算出して、表-2に示した。なお、この表の平均被害率は34.8%であったが、これは激害地を多く選定したためであり、この地域における平均被害率は表-2よりもかなり小さい値であったと推測される。

最も多い被害形態は傾幹で、ついで根返り、幹折れ、幹曲がりの順であった。傾幹と根返りは根系の支持力が相対的に小さい場合に、反対に幹折れと幹曲がりは樹幹の強度が相対的に小さい場合に生じる被害形態と考えられる。したがって、今回の被害は根系の支持力に起因する被害形態が多かったといえる。本調査地と同様に根返りが幹折れよりも多かった事例として、玉手¹⁰⁾や箕口ら⁸⁾の報告があげられる。一方、諫本・高宮⁹⁾や岡野ら¹²⁾の九州での調査によれば、同じスギであっても根返り被害が多い品種と幹折れ被害が多い品種とがあったことが報告されている。

表-2 被害形態別の本数率

被害形態	被害率		
	最小値	平均値	最大値
傾幹	0.0	14.3	93.5
根返り	0.0	11.1	100.0
幹折れ	0.0	8.6	87.5
幹曲がり	0.0	0.8	10.7
合計		34.8	

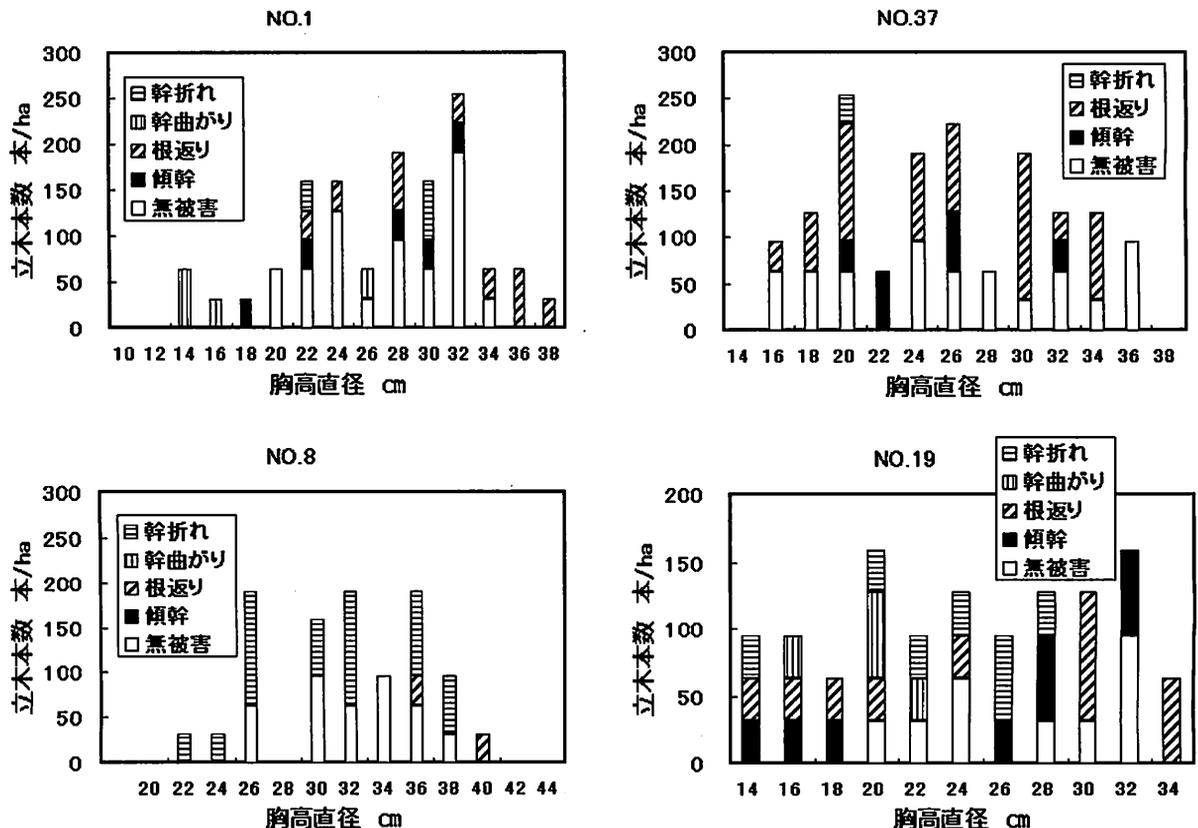


図-4 胸高直径階別被害形態別の本数分布

なお、本調査地の主要品種であるボカスギやカイダニスギが冠雪害を受けた場合には根返り型の被害よりも折損型の被害が多い傾向がある⁶⁾。このような風害と冠雪害とによる被害形態の違いは、発生機構、例えば風圧と冠雪荷重などの外力の大きさや方向の違いにもとづく樹幹の応力分布などの差異に起因することが考えられる。

3.3 被害と個体サイズ

被害と個体サイズの関係について検討した。一例として、4箇所の調査プロットについて、胸高直径階別被害形態別の本数分布を図-4に示した。調査プロット毎に比較すると、根返り木は幹折れ木や幹曲がり木よりも若干大きな径級に多い傾向が見られたが、調査プロット当りの本数が少なく、統計的な解析ができなかった。

つぎに全ての被害形態を込みにして、被害木と無被害木に大別し、それぞれの本数が調査プロット当り8本以上あった9箇所のプロットを対象に、胸高直径についてt検定を行った。その結果、図-4を含む全てのプロットにおいて、被害木の胸高直径と無被害木のそれとの間に統計的に有意な差異が認められなかった。したがって、全ての被害形態を込みにした場合には、被害と個体サイズとの間には明瞭な関係がなかったといえる。

3.4 台風害の発生に関わる林況および地形要因

図-5は調査プロット当りの本数被害率と斜面方位角との関係について示したものである。この図から、本数被害率は風上側の東向き斜面で高く、北向きまたは南向きになるほど低くなり、風下側に当る西向き斜面ではほとんど被害が発生しなかったことがわかった。なお、被災時の風向はアメダスデータ(図-2)から北東と推測されている。このような条件下では強風を正面から受ける北東向き斜面で被害率が最も高くなるのではないかと考えられるが、実際には東向き斜面の方の被害率が高かった。両者の方位のズレがどのような原因に因るのかについて明かではない。

図-5から、スギ林の台風被害の発生に斜面方位の影響が大きかったことが明らかになったが、同じ斜面方位にあっても被害率が大きく変動しており、その変動を斜面方位だけで説明できないことも併せて明らかになった。

そこで、台風害に関わる要因についてステップワイズ法による重回帰分析を行ない、赤池情報基準

AICが小さくて、かつ自由度調整済み決定係数 R^2 が大きな重回帰モデルを求めた。このモデルで選定された説明要因の回帰係数と偏相関係数を表-3に示した。なお、被害率は東向き斜面で高く、北および南向き斜面になるほど低くなる傾向が認められたことから、斜面方位角は東向きを0度、南と北向きを90度、西向きを180度として計算した。

この重回帰モデルでは、平均形状比、標高、斜面方位角、開空度、横断面曲率、土壤湿潤度が説明要因として得られ、これらの要因によって本数被害率の全変動の62%が説明された。また、偏相関係数の絶対値が最も大きい要因は斜面方位角で、ついで平均形状比、横断面曲率、開空度、土壤湿潤度、最後に標高の順であった。これらの要因のなかで、斜面方位角と平均形状比は1%水準で、横断面曲率、開

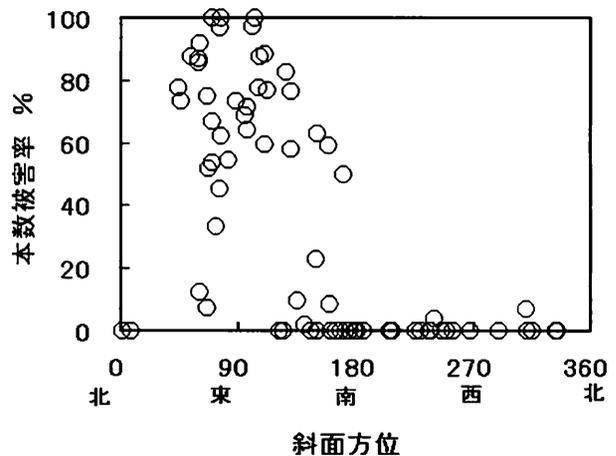


図-5 本数被害率と斜面方位の関係 (数字：北からの方位角度)

表-3 本数被害率と林木および地形要因の重回帰分析結果

説明要因	回帰係数	偏相関係数
平均形状比	1.09	0.362 **
標高	0.05	0.218
斜面方位角	-0.56	-0.778 **
開空度	2.47	0.280 *
横断面曲率	303.53	0.316 *
土壤湿潤度	-7.77	-0.268 *
定数項	-176.54	
決定係数 (R^2)		0.652
自由度調整済み決定係数 (R^2)		0.621
赤池情報基準 (AIC)		685

空度と土壌湿潤度は5%水準で統計的に有意性が認められた。回帰係数および偏相関係数の値から、次のような傾向が認められた。

- ① 被害率は斜面方位角の小さな林分、すなわち風上側にあたる東向きの林分で高く、西向斜面で低い。東向き斜面と西向き斜面との被害率の差異は約90%と推定された。
- ② 被害率は平均形状比が大きな林分、すなわち幹形が細長な林分で高い。平均形状比が10m/m大きくなると被害率が約10%上昇する。
- ③ 被害率は横断面曲率が大きな林分、すなわち凹型斜面で高い。
- ④ 被害率は開空度が大きな林分、すなわち尾根や鞍部で高い。
- ⑤ 被害率は土壌湿潤度が小さな林分、すなわち乾燥気味の地形で高い。
- ⑥ 被害率は高標高に位置する林分ほど高い。標高100mにつき被害率が5%上昇する。

4. 考察

4.1 被災時の風速と風向

樹木の風害というまでもなく風圧が樹冠や幹に外力として作用して引き起こされる被害である。その風圧は風速の2乗に比例して増加することから、風速は風害発生に関わる最も重要な因子といえる。氷見観測所のアメダスデータから、本調査地の風倒害は最大風速21m/s、最大瞬間風速約40m/sという条件下で発生した。玉手(1967)は、風倒害は平均風速(最大風速)20m/s、最大瞬間風速30m/s前後になると発生しはじめると述べている。また、日本各地において大きな被害を引き起こした1991年台風19号では、激害となった大分県日田において最大風速16.8m/s、最大瞬間風速44.4m/s(諫本・高宮, 1992)、スギ-ヒノキアスナロ複層林が被災した佐渡において最大風速27m/s、最大瞬間風速43m/s(箕口ら, 1992)であった。したがって、本調査地における被災時の風速は1991年台風15号にほぼ匹敵する規模であったといえる。

氷見市に接近した台風の中で風害が発生しはじめるとされる最大風速20m/s以上の回数を調べた(図-3)。その結果、このような台風が27年間に2回あったことから、風害の恐れがある台風の再来間隔は平均13.5年と計算された。ただし、氷見観測所の観測期間が比較的短いので、富山気象台(調査地

より南東へ35km)の記録を調べたところ、1956年から2005年までの50年間における最大風速20m/s以上の再来間隔は平均7.1年であった。氷見市および富山市の再来間隔は北海道の道南地方の5年¹⁾に比べて長い、富山県のスギ標準伐期齢45年と比べるとかなり短い。したがって、本調査地では一伐期の中に少なくとも3回は風倒害を引き起こすような台風に遭遇すると予想されることから、何らかの風害対策が必要と考えられる。

4.2 台風害の発生に関わる林況および地形要因

台風害の発生に影響する要因について解析した結果、選定された要因の大半が斜面方位をはじめとする地形要因であった。これまでの報告でも、台風害に影響する地形要因として斜面方位(風上側斜面)とともに露出度または開空度が取り上げられていることが多い^{1), 9)}ことから、これらは台風害の危険地帯を検討する上で重要な要因といえる。風上側斜面や開空度が高い尾根部などで被害率が高いのは、強風を遮るものがなく、風圧を正面から受けたからであろう。

今回は北東風によって風倒害が発生したが、氷見市における台風接近時の風向は北東と並んで南西ないし西南西の場合も多い(図-2)。このような場合には、風上側にあたる南西ないし西南西向き斜面で被害率が高くなることが予想される。したがって、氷見市では少なくとも2つの斜面方位について風害対策を講ずる必要がある。

ところで、台風時の風向は、九州では一定しなかった¹⁰⁾のに対し、東北地方や北海道地方では台風時の風向が一定化する傾向が強く、日本海側では南西、太平洋側では南東に片寄る傾向¹⁾が認められている。これらに対して、氷見市では台風による風向には一定の傾向が認められたものの、東北・北海道地方のように一方向に集中することはなく、両者の中間的な傾向が認められた。

台風害の発生に地形要因が大きく影響すること、広範な地域の地形要因もDEMから比較的容易に算出できることなどから、地形要因だけに基づく台風害のハザードマップの作成が可能と考えられる。ただし、本調査地における風害の発生に対する寄与率が斜面方位の方が開空度よりも大きかったのに対し、北海道の天然林では露出度(水平方向の開空度)の方が斜面方位よりも大きかった⁹⁾ことが報告されており、各要因の寄与率は調査地によって変動するよ

うである。そのため台風害のハザードマップの作成にあたっては、さらに調査事例を増やす必要がある。

一方、台風害の発生に影響する林木要因として平均形状比が選定された。これまでも、被害率と形状比の間に密接な関係があることが、ニュージーランドのラジアータパイン林³⁾や1991年19号台風によって被害を受けた大分県のスギ林⁵⁾でも認められている。一方、風害の発生に個体サイズ(胸高直径)が影響したとの報告^{9), 14)}もあるが、本調査地では明瞭な傾向が認められなかった。以上のことから、平均形状比がスギ林における耐風性の指数として有効と考えられた。

4.3 防除対策

スギ林の台風害防除法について、本調査から得られた事項や既存の文献等から以下のようなことが考えられた。

(1) 暴風の力を回避する方法

① 暴風に遭遇する機会を減らす。

カワイダニスギのような早生型の品種は、長伐期施業を避けて短伐期施業によって暴風に遭遇する機会を少なくすることが望まれる。

② 暴風を受けにくい地形を選ぶ。

氷見市では台風害の危険性が低い北西向き斜面、南東向き斜面に造林する(図-2, 表-3)。台風害の危険性が高い尾根部でのスギ造林を避ける。

③ 防風林によって保護する。

耐風性の大きな広葉樹、ヒノキ・クロマツ・アカマツなどからなる防風林を設けて強風を防ぐ¹⁶⁾。

(2) 林分の耐風性を高める方法

① 耐風性の高いスギ品種を選ぶ。

樹幹の強度的性質の大きな品種を選定する。樹幹強度はボカスギやカワイダニスギよりもマスマスギやタテヤマスギが大きい⁶⁾。

② 平均形状比の小さな林分に誘導する。

平均形状比を小さくするには、立木密度を低くして、直径成長を促進させる。この地域では冠雪害の危険性も高いことから、平均形状比を65程度に保つように繰り返し間伐を行うことが望ましい⁹⁾。また、間伐率を高くして樹冠の閉鎖を大きく破ると耐風力が著しく低下するとの指摘^{15), 16)}があることから、弱度の間伐を繰り返

返して実施することが望ましい。

5. おわりに

2004年の台風23号によって風害をうけた富山県氷見市のスギ林を対象に、本数被害率と林況および地形要因との関係について検討した。この結果、斜面方位、平均形状比、横断面曲率、開空度、土壌湿潤度および標高からなる被害率を予測する重回帰モデルが得られた。しかし、このモデルでは被害率の変動の62%しか説明できなかったことから、予測精度を高めるためには有効な要因の抽出が望まれる。そして、本調査で認められたような傾向が他の地域においても広く認められるのか否かについて、空中写真やリモートセンシングなどの技術を併用することにより、より広域的でかつ一般性の高い重回帰モデルを検討する必要がある。

引用文献

- 1) 阿部友幸：北日本における暴風の再来周期と風向，第118回日本森林学会大会学術講演集，P2c26 (2007)
- 2) Beven K.: Topmodel: a critique, Hydrological process.11, 1069-1085 (1997)
- 3) Cremer K.W. and Borough C.J.: Effect of stocking and thinning on wind damage in plantations, New Zealand journal of forestry science 12(2), 244-268 (1982)
- 4) 福永寛之・増谷利博・今田盛生・加賀英昭：風倒木被害発生と立地および林分構造との関係解析，九大演報69, 13-30 (1993)
- 5) 諫本信義・高宮立身：1991年9月，台風19号により発生した大分県における森林被害の要因解析 (1992)
- 6) 嘉戸昭夫：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，富山県林技セ研報4, 1-77 (2001)
- 7) 嘉戸昭夫・凶子光太郎：富山県のスギ林における冠雪害と地形要因の関係 (吉本・広嶋・近藤編：森林資源管理と数理モデル6, 163pp.)，森林計画学会出版局，宇都宮，77-88 (2007)
- 8) 箕口秀夫・川村昇：1991年台風19号により佐渡郡相川町の複層林で発生した風害，新潟県林試験研報34, 47-53 (1991)
- 9) 三浦寛・松本陽介・真下育久：台風15号(昭和5

- 6年)により東京大学北海道演習林に発生した風害の要因解析,東大演報73, 139-60 (1984)
- 10) Moore I.D., Gessler P.E. Nielsen G.A, and Peterson G.A.: Soil attribute predicting using terrain analysis, Soil Sci. Soc. Am.J.57, 443-452 (1993)
- 11) 長濱孝行: 鹿児島県のスギ人工林の成長と新管理基準の作成 (林業改良普及双書153; 長伐期林を解き明かす. 189pp.), 131-150 (2006)
- 12) 岡野哲郎・伊藤哲: スギ品種の台風抵抗性と感受性, 九大演報68,1-9 (1993)
- 13) 佐伯正夫・杉山利治: 林木の冠雪害危険地域, 林試研報172: 117-137 (1965)
- 14) 佐藤 創・阿部友幸: 2004年台風18号による風倒木被害の要因,光珠内季報143, 7-11 (2006)
- 15) Savil.P.S.: Silviculture in windy climates, Forest abstracts 44(8), 473-488 (1983)
- 16) 玉手三稜寿: 森林の暴風害とその防除, 林業技術(9) 306,21-25 (1967)
- 17) Wilson JD: Determining a topex score, Scot For 38,251-256 (1984)

Summary

The forests in the western part of Toyama Prefecture were severely damaged by Typhoon No.23 in 2004. We set up 74 investigation plots in the northern cedar stands of Himi City, and made analyses of the relation between the percentage of wind damaged trees and some stand conditions and certain topographic factors by using a multiple linear regression analysis. Four stand condition factors (number of trees, volume, average diameter and average height/diameter ratio) were measured in each investigation plot. Seven topographic factors (elevation, slope aspect, inclination, openness, plan curvature, profile curvature and wetness index) were calculated from a 10-m cell size digital elevation model in each investigation plot. From the step-wise multiple regression analysis, three variables of the slope aspect, the average height/diameter ratio, the profile curvature, the openness, the wetness index and the elevation had significant contribution in explaining 62% of the total variance in the percentage of damaged trees. The partial correction coefficient of the slope aspect was the biggest, and the next was the height/diameter ratio. The percentage of the damaged trees was the highest in the eastern slope located in the windward side and showed a tendency to increase with the height/diameter ratio.