

スギ、ヒノキ単層林の台風被害

米丸伸一

Wind damage to single-storied forests of *Cryptomeria japonica*
and *Chamaecyparis obtusa* by typhoons

Shin'ichi Yonemaru

要 旨

スギ、ヒノキ単層林における台風被害を調査し、立地環境、林分構造、施業履歴との関係を解析するとともに、被害地における残存立木の材質調査を行い、被災地での復旧や耐風性を考慮した森林施業のあり方等について検討した。

① 被害と立地環境・林分構造・施業履歴との関係

林分の被害率を外的基準とし、地形条件、位置条件、林分条件の中の12要因をアイテムとする数量化I類による多変量解析を行った。

被害の発生に大きな影響を及ぼす要因としては、林分条件の樹冠長比と形状比、地形条件の開放性距離（調査地の標高より高い風上方向の稜線までの距離）があげられた。樹冠長比は60%を越えると被害率を小さくする方に寄与し、形状比は70程度を越えると被害を大きくする方に寄与しており、これらを考慮した施業の実施が望まれた。開放性距離は1km以下が被害を小さくする方に寄与していた。この他に被害の発生に比較的関連の深い要因としては、地形条件の斜面方位、位置条件の局所地形と風上隣接地の状況、施業履歴の間伐経過年があげられた。間伐経過年では間伐してから2年以下で被害が大きい傾向を示す一方で、6年を越えるものも被害率を大きくする方に寄与しており、林分の適正な密度管理の重要性が示唆された。

② 林分構造と被害発生との関係

平成7、8年の台風により発生した、被害木と残存立木が混在する林分を調査して、林分構造と被害との関係を検討した。

被害木の胸高直径分布は平均値を中心とした正規分布を示し、偏った分布ではなかった。被害率が高くなるにしたがい、被害木の胸高直径は平均値を中心により広い範囲に分布し、各直径階で本数を増やしていた。林分の被害率は胸高直径の変動係数が小さくなるにしたがって高くなる傾向があり、多様な径級の樹木で構成される複層林や混交林等が耐風性から望ましいと考えられた。

③ 被害林分における残存立木の材質

外観上異常の認められない残存立木の樹皮を剥ぐと、被害をもたらした風の風下側の材表面にしわ状のモメが多く視認でき、その範囲は地際から樹高の2/3の高さまでであった。モメ密度（材表面のしわ長の合計/材表面積）が最も低い試料木は樹高の30%の地上高さ付近にモメ長のピークがあり、試料木のモメ密度が高くなるにしたがって、樹高の20%と40%の地上高さ付近にピークが移行していった。また形状比が大きいものや樹冠長比が小さいものほど、モメ密度は高くなる傾向にあった。辺材部で確認できたモメの数は、丸太材の表面で確認できたモメの数に比べて少なく、また動的ヤング係

数の計測結果からは材質的強度の低下が認められず、残存立木を材として利用することについては支障がないと考えられた。一方、平成7、8年の中型台風による被害の発生が平成5年の大型台風の被害地周辺に集中し、しかも被害形態が、折損、なかでも裂断が多かったのは、平成5年の台風によって被害を受けた林分の残存立木が耐風性の低下を伴うかなりの材の損傷を受けていたことによるものと推察された。

キーワード：風害、台風被害、林分構造、残存立木、モメ

I はじめに

近年の台風、最近では特に数百年に一度の規模と言われた平成5年の台風13号は、県下各地の森林に激甚な被害を与えた。とりわけ本県の森林面積の過半を占める人工林、なかでもそのほとんどを占めるスギ、ヒノキ人工林は甚大な被害を被った。このため、被災地の適正な早期復旧はもとより、これまでの森林整備方針の見直しや耐風性を考慮した森林の施業技術の開発が大きな課題となってきた。

そこで、平成5年以降のスギ、ヒノキ単層林での被害地を調査し、被害と立地環境、林分構造、施業履歴との関係等被害の実態を解明し、今後の耐風性を考慮した森林施業のあり方等について検討した。

なお本報告は、地域重要新技術開発促進事業「風害発生危険地の判定及び風害に抵抗力のある森林施業手法の解明」（平成7～9年度）の結果をとりまとめたものである。

II 本県における過去の調査報告の概要

本県におけるスギ、ヒノキ人工林の台風被害に関する過去の調査報告は2件あり、その被害発生の傾向について整理してみた。

(1) 昭和60年の台風13号による被害調査報告（山内：1986）

- ・ 地形的には、斜面方位がN～E～S、傾斜角が10度以下の比較的緩慢な箇所での被害が多かった。
- ・ 土壌の堆積様式では崩積土、匍行土での被害が、局所地形では山脚凹部での被害が多かった。
- ・ 林況では、林齢はスギが20～30年、ヒノキが10～30年生で被害が多かった。平均樹高は10～14m、胸高直径は15～20cmでの被害が多かった。
- ・ 林分のなかには林衣が有効に機能していない林分があった。
- ・ 被害の発生は形状比が70以上の林分で多かった。
- ・ 位置的には、上部が台地の谷頭部、前面の斜面が皆伐更新後間もない箇所、谷の曲がり角の凸部、前面が開けた山脚の凸地形部、狭まった谷とか切り通し部、平坦地、林道沿い部に被害が多かった。

(2) 平成5年の台風13号による被害調査報告（福村ら：1995）

- ・ 被害と被害に関連する要因について多変量解析を行った。
- ・ 被害と最も関係の深い要因は林齢であった。4齢級以下は被害を受けにくい結果を示した。
- ・ 林木の形状比は低い方が被害を減少させる傾向にあった。しかし今回の台風が非常に強く、林木の耐風限界より大きな風圧がかかったため、収穫表から標準的な形状比と判断される林分においても被害が多く発生していた。
- ・ 適正な密度の収量比数0.65～0.84の林分では被害率が低い傾向にあった。密度が高い林分や強度な間伐を実施し短期間に密度を低くした林分では、被害率が高くなる傾向にあった。

- ・枝下比率（枝下高／樹高）が枝打ち指針により中程度と判断される林分は、被害率が低い傾向にあった。
- ・斜面方位は、N, W, S E, S, NWの方位で被害が大きかった。
- ・地形的には、傾斜が10～30度の斜面、斜面形では縦断形が凹部、横断形が凸部、位置的には尾根及び谷部で被害が大きかった。
- ・土壌の深度が大きい箇所、土壌の堆積様式では匍行土で被害が多かった。

以上、2報告は共通した結果が多く、またこれらはスギ、ヒノキ人工林の台風被害に関して他機関が報告している調査結果（例えば、諫本ら（1992））とほぼ同様である。

上記報告における調査は、現地にプロットを設定して行っている点で共通しており、また県内一円を調査対象域としている。最大瞬間風速や強風の時間帯、風向等の風条件は県内一円では異なり、県内一円を調査対象とした被害と被害要因の解析においては、各地の風条件の細かな把握が必要であるが、現地でのデータの把握は現実的にできない。

このため、今回の調査は風条件の差違をできるだけ小さくするために、調査区域を大隅半島に限定して行った。しかしながら、災害の発生から調査を実施するまでに時間が経過していたため、復旧林分も多く、調査箇所数は82点にとどまった。

III 調査地及び調査方法

1. 被害発生要因の解析

平成5年の台風13号により大隅半島で発生した被害地を調査し、被害に関連する諸要因が被害にどの程度影響を及ぼしているのか、数量化Ⅰ類による多変量解析を行った。

(1) 調査地

鹿屋市、肝属郡、曾於郡内の被害林分41箇所、及びその周辺の免害林分41箇所、合計82箇所について現地調査を行った。調査林分の概況は表-1に示す。これら調査地は、台風13号の経路の右側に位置し、最大瞬間風速45～70m/sを観測した範囲にある。

表-1 被害林分の概況

樹種	箇所数	被害率 (%)	林齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	収量比数
スギ	66	0～100	10～60	8～30	8～23	0.57～0.91
ヒノキ	16	0～100	10～40	10～60	10～17	0.64～0.86

(2) 解析方法

被害率(%)を外的基準とし、地形条件や位置条件、林分条件をアイテムとする数量化Ⅰ類による解析を行った。解析法は田中豊ら(1995)によった。本来はスギ、ヒノキの樹種別に解析を行う必要がある。しかし、風害が問題になっているのはほとんどがスギ、ヒノキの人工林であり、マクロ的にみるとスギ・ヒノキ単層林は一括に取り扱っても今回の目的は十分に達せられると考えられ、樹種別の解析は行わなかった。調査林分は1林分を除き林齢40年生以下の林分である。

解析には、地形条件として解放性距離・解放性比高・斜面方位・大地形、位置条件として局所地形・風上隣接地の林況・風向、林分条件として形状比・樹冠長比・収量比数、施業履歴として間伐経過

年・間伐率，合計12アイテムを採用した。以下採用した外的基準及びアイテムについて説明する。

①被害率

調査林分の標準的な箇所に10×10～15×15mの方形プロットを設置し，プロット内の林木の全本数のうちの被害を受けた本数の割合で算出した。

②開放性距離

森林施業図（縮尺1/5,000）により，調査地の風上方向の，調査地より標高の高い稜線までの距離（km）を判読した。

③開放性比高

森林施業図により，調査地の風上方向の上記稜線と調査地の標高差（m）を判読した。

④斜面方位

方位を8方位に区分して，調査地の斜面方位を現地においてクリノメーターで測定した。

⑤大地形

森林施業図において，尾根間が50m以下である谷部を無視して等高線を修正して描き，その等高線から平均傾斜勾配を判読した。

⑥局所地形

調査地が地形的に斜面上でどこに位置しているのか，山頂平坦，山脚上部，山脚下部，山麓部，溪谷部に区分して調査した。

⑦風上隣接地の林況

調査地の風上方向の隣接地がどのような状況になっているのか，無立木地，樹高10m未満，樹高10m以上に区分し調査した。

⑧風向

風害の原因である風の方向を，被害木の倒れ，折損方向から推定して，斜面に対して正面方向，斜方向，逆方向に区分し調査した。

⑨形状比

調査プロット内の林木の，樹高，胸高直径を測定し，平均樹高／平均胸高直径により算出した。

⑩樹冠長比

プロット内の林木の枝下高を測定し，樹冠長＝樹高－枝下高とし，平均樹冠長／平均樹高×100により算出した。

⑪収量比数

被災前の立木本数，平均樹高にもとづき，九州地方のスギ，ヒノキ密度管理図により収量比数を判読し，これを疎仕立て（～0.64），中庸仕立て（0.65～0.74），密仕立て（0.75～0.84），超密仕立て（0.85～）の4つに区分した。

⑫間伐経過年

現地調査及び聞き取りにより伐採年を推定した。

⑬間伐率

間伐経過年と同様に処理をした。

2. 林分構造と被害との関係

被害林分において被害木と残存立木の間に形状的な相違があるかについて，被害木と残存立木が混在する林分で調査した。併せて被害率と林分構造との関係についても検討した。調査林分は風条件が

同様と推察される地区に限定して選定した。

(1) 調査地

スギ林については、平成8年の台風6号により肝属郡田代町に発生した被害林分10箇所、ヒノキ林については、平成7年の台風14号により伊佐郡菱刈町及びその周辺に発生した被害林分6箇所を選定した。調査林分の概況は表-2に示す。

(2) 調査方法

現地において15×15～25×25mの方形プロットを設置し、立地環境、林分状況を調査した。

3. 被害林分における残存立木の材質調査

被害林分の復旧にあたっては、残存立木の取り扱いが大きな問題である。また今後の被害再発の危険性を知るためには残存立木の材質状態を把握しておく必要がある。そこで風害林分における外観上異常の認められない残存立木について、モメ・目回り等の有無を調査した。試料採取地は表-2の10番のスギ林で、残存立木のうちなるべく形状の異なる5本を伐倒して試料木とした。調査地及び試料木の概況は表-3に示す。

この調査地は当初平成5年の台風13号で本数にして40%程度が被災し、更に平成8年の台風6号により77%が被災した林分である。被害形態は平成5年が幹折れが一部あるもののほとんどが根返りであったのに対し、平成8年は幹折れで、しかも「せん断」というより、折れ部がささくれ立つ「裂断」が多かった。平成8年の台風は平成5年の台風に比べ風速は小さく、この被害形態の違いは最初の風害による材質への損傷が要因と考えられ、これを明らかにするための調査を行った。

表-2 調査林分の概況

樹種	番号	被害率 (%)	林齢 (年)	胸高直径 (cm)	樹高 (m)	収量比数	被害形態
スギ	1	24	27	18.1	10.7	0.75	折損
	2	29	38	23.5	15.6	0.80	折損
	3	31	75	39.7	26.8	0.74	折損, 折れ
	4	34	25	14.7	9.5	0.79	傾斜, 湾曲
	5	37	35	19.3	18.0	0.80	湾曲, 傾斜
	6	40	20	20.8	13.9	0.71	傾斜
	7	47	28	21.8	12.5	0.70	折損
	8	55	40	26.6	17.3	0.84	折損
	9	70	27	22.2	14.4	0.52	折損
	10	77	61	25.0	19.8	0.36	折損
ヒノキ	1	28	36	18.4	13.6	0.74	折損
	2	41	39	23.0	16.7	0.86	折損, 湾曲
	3	33	26	18.9	14.1	0.65	折損
	4	46	37	17.3	12.7	0.75	折損
	5	51	35	13.5	13.5	0.76	折損
	6	60	25	13.8	13.8	0.67	折損

表-3 調査地及び試料木の概況

斜面方位	傾斜角	局所地形	番号	試料木の形状		
				胸高直径(cm)	樹高(m)	枝下高(m)
N50W	21°	山腹上部	1	26.6	17.6	9.8
			2	23.0	17.3	9.2
			3	23.6	15.2	9.1
			4	21.1	16.3	11.4
			5	24.3	18.2	11.8

試料木の採取にあたっては、周辺の被害木の折損方向から樹幹の風上、風下側を判定した。伐倒した試料木は図-1のように地際部から、1.2m並びに2.0m部で玉切りし、さらに1.0m毎に玉切りして林業試験場に持ち帰り、樹皮を剥いだ。樹皮を剥いだ後の材表面にはしわ状のものが多く認められた。しわは材内部のモメが材表面に現れたものと考え、今回はこのしわをモメとした。視認できた材表面のしわは表-4により区分し、さらに風上側と風下側に分けてモメの長さを計測した。また各試料木の木口面で目回りの有無についても調査した。

福留ら(1994)は、動的ヤング係数と曲げ強度には比較的高い正の相関関係が認められ、動的ヤング係数の計測はスギ丸太の曲げ強度の推定に有効な手段であるとしている。そこで動的ヤング係数を算出し、残存立木の材質的な強度を調査した。係数は、打撃音法によりFFTアナライザーで得られた固有振動数と密度、材長から算出した。

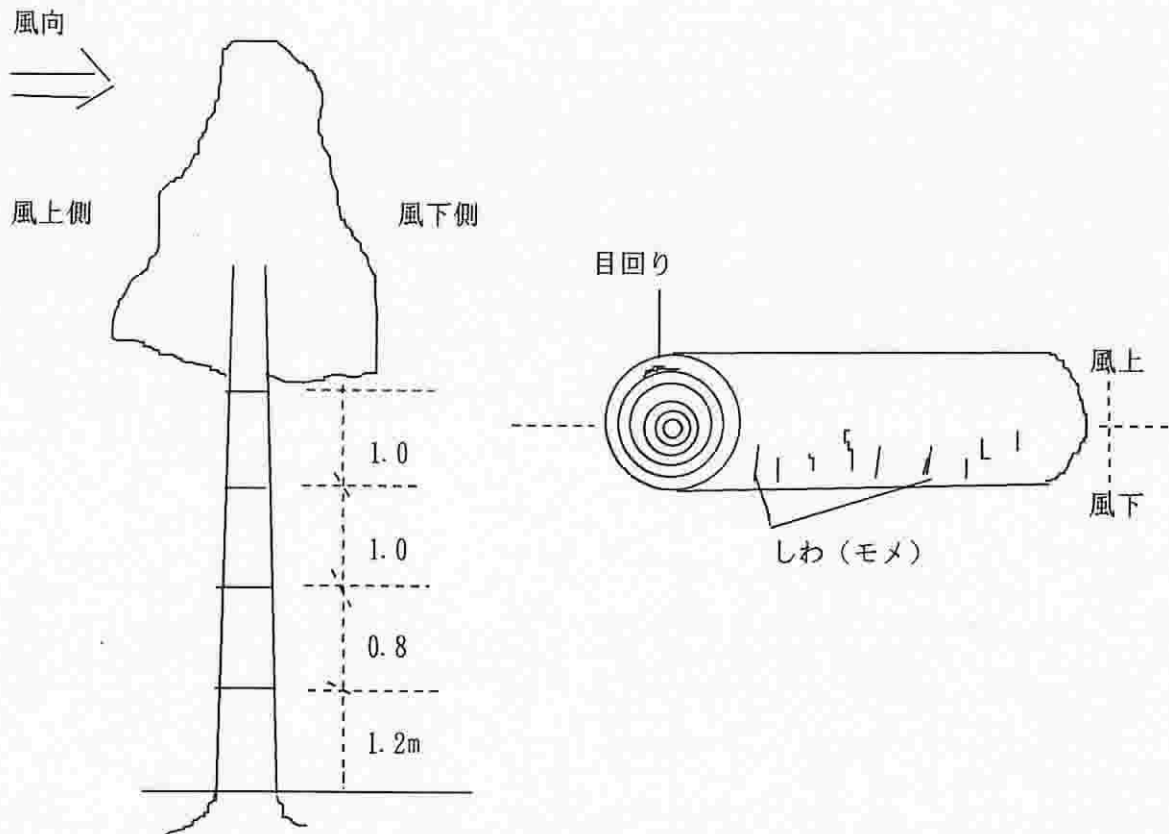


図-1 試験木からの丸太採取方法及びモメ・目回りの概図

表-4 モメ区分

区分	内 容
大	しわが材表面から明らかに盛り上がっているもの
小	しわは認められるものの材表面からの盛り上がりが少ないか、または、材表面に白色の変色した部分が認められるもの

IV 結果及び考察

1. 被害発生要因の解析

解析の結果は表-5に示す。データ数に比べ採用したアイテム数及びカテゴリ数が多かったためか、重相関係数は0.8004と高い精度で解析できた。被害率と各アイテムの偏相関係数は0.5以下と低く、被害の大小はある要因だけでなく、複数の要因が影響し合っていることがうかがえた。被害率に対する各アイテムの影響の度合いは偏相関係数の大小で判断できる。すなわち偏相関係数が大きいほど被害に及ぼす影響は大きいということになる。また各カテゴリの被害率への影響はカテゴリ数量が大きいほど大きく、さらにカテゴリ数量が正の場合は被害率を高くする方に、負の場合は被害率を低くする方に寄与する。

解析の結果、偏相関係数が0.4以上で被害率に大きく影響を及ぼす要因としては、林分条件の樹冠長比と形状比、地形条件の開放性距離があげられた。次に偏相関係数が0.3~0.4で被害の大小に比較的關係の深い要因としては、地形条件の斜面方位、位置条件の局所地形と風上隣接地の林況、施業履歴の間伐経過年があげられた。また偏相関係数が0.2~0.3で被害との関係が浅いと思われる要因としては、地形条件の開放性比高と大地形、位置条件の風向、林分条件の収量比数があげられた。施業履歴の間伐率は偏相関係数が0.091と小さく被害との関係はほとんど無いと判断された。

これらのことから、被害発生 の 主要因には林分条件と地形条件があげられ、林分の耐風性の評価には、林分構造と地形を総合的に評価していく必要があることが知られた。以下採用したアイテム毎に考察する。

(1) 開放性距離

採用したアイテムの中では偏相関係数の高い部類に入っており、風害を受けやすい地形であるかについては局所的な捉え方ではなく、先ず大域的な捉え方が必要であると考えられる。開放性距離が1 kmまでは被害を軽減させる方に寄与している。比高との関係もあるが、今回の結果からは開放性距離が2 kmを越えると風上側に稜線があっても被害の大小には直接関係しないと考えられる。

(2) 開放性比高

開放性距離と同様に、大域的に風上側に風を遮るかあるいは弱めるものがあるのかを表す要因であるが、開放性距離に比べ偏相関係数が小さかった。このことから、風の影響は高低差よりも、風上側のどれだけ近くに風を遮ったり弱めたりするものがあるかが大きく左右していることを示唆している。

しかし、今回の調査では風上側の風を遮るものとして稜線の幅は調査の対象としなかった。本来ならば風を遮るものを高低差、幅について総合的に評価していく必要がある。例えばそれには露出度があるが、三浦ら(1984)は、昭和56年の台風15号の被害解析から露出度(仰角7度で見上げたとき山地に遮られていない水平角度の合計値)と斜面方位が被害に大きく関与し、露出度が270度以上で斜面方位が暴風の主風方向を中心に左右70度の範囲にある林分が大きな被害を受けているとしている。

表-5 被害要因解析

区分	アイテム	カテゴリー	度数	カテゴリー数量	範囲	偏相関係数
地 形 状 件 況 位 置 条 件 林 分 条 件 況 施 業 履 歴	開放性距離	1) ~0.5km	28	-10.795	40.134	0.465
		2) ~1.0	23	-9.234		
		3) ~2.0	11	1.327		
		4) ~3.0	5	11.988		
		5) ~4.0	15	29.340		
	開放性比高	1) ~20m	16	-0.256	23.966	0.235
		2) ~40	18	4.059		
		3) ~60	27	5.223		
		4) ~100	15	-6.502		
		5) 101~	6	-18.743		
	斜面方位	1) N	10	-1.236	32.937	0.352
		2) NE	8	13.941		
		3) E	17	0.589		
		4) SE	6	15.708		
		5) S	9	-11.757		
		6) SW	15	5.563		
		7) W	4	8.972		
		8) NW	13	-16.689		
	大地形	1) ~5%	48	0.018	38.973	0.284
		2) ~10	15	1.652		
3) ~20		10	8.262			
4) ~30		5	-29.351			
5) 31~		4	9.622			
局所地形	1) 山頂平坦	11	12.576	24.874	0.330	
	2) 山腹上部	31	7.539			
	3) 山腹下部	25	-12.298			
	4) 山麓部	8	-10.332			
	5) 溪谷部	7	2.582			
風上隣接地	1) 無立木地	50	6.413	35.458	0.345	
	2) 林地：樹高 ~10m	25	-4.693			
	3) 林地：樹高 11~	7	-29.045			
風向	1) 正方向	22	-9.668	17.361	0.224	
	2) 斜方向	47	2.398			
	3) 逆方向	13	7.693			
形状比	1) ~60	25	-7.382	43.855	0.448	
	2) ~70	28	-9.793			
	3) ~80	12	-1.284			
	4) ~90	10	23.572			
	5) 91~	7	34.062			
樹冠長比	1) ~40%	24	22.308	51.478	0.495	
	2) ~50	21	-5.272			
	3) ~60	28	-5.792			
	4) ~70	9	-29.170			
収量比数	1) ~0.64	4	-0.576	22.849	0.251	
	2) ~0.74	31	-9.706			
	3) ~0.84	34	3.892			
	4) 0.85~	13	13.143			
間伐経過年	1) ~2年	13	18.895	25.946	0.331	
	2) ~4	28	-4.538			
	3) ~6	31	-7.051			
	4) 6~	6	11.169			
	5) なし	4	8.247			
間伐率	1) なし	4	-0.508	10.685	0.091	
	2) ~20%	25	-3.127			
	3) ~30	49	1.020			
	4) ~40	4	7.558			
データ数		82	重相関係数	0.8004	決定係数	0.6406

(3) 斜面方位

NE, SE, SW, Wの方位が大きな正の数量を示しており、被害を大きくする方に寄与している。ただし全方位のカテゴリー数量には正負のばらつきがあり、明らかな傾向は見いだせない。このことは台風13号による風が非常に強く、また調査地が比較的広範囲であったことによると考えられる。

(4) 大地形

平均傾斜が急になるほど被害が大きくなるようであるが、20~30%で負のカテゴリー数量を示しており明らかな傾向は見いだせない。一般的に考えると、平均傾斜が小さいほど風が通り抜けやすく被害が大きくなりそうであるが、今回はどちらかという逆の結果がでているようである。これは今回の調査では斜面方位に対して風が正面よりも斜めの方向から吹いている箇所が過半を占めており、斜めの方向から風が吹くと傾斜が急であるほど斜面の起伏箇所において風衝部が多く発生し、そこで被害が発生しやすくなるためと考えられる。

(5) 局所地形

山頂平坦や山腹上部、溪谷部が正のカテゴリー数量を示し、被害を大きくする方に寄与している。これらの地形は風衝部や風が収束する位置であり、玉手(1967)はこれら被害の発生しやすい地形を風害危険地形とし、風害を回避するにあたり地形的条件に対する一つの指標となるとしている。今回の結果においても同様な結果を得た。

(6) 風上隣接地の林況

風上側で風を遮るものがあるほど、しかもその高さが高いほど被害を軽減する傾向にあり、これは風上側の林分や林縁木の防風効果を示唆したものといえる。ただし被害率との偏相関係数はそれほど高いものではなかった。これは例えば、斜面に向かって直角に吹く風に対しては斜面傾斜が急になるほど林木の防風範囲は小さくなり、風上側に林分があってもその効果は無いに等しい場合もあるためと考えられる。なお林縁木が高く枝打ちされた林分や林衣が一行の林縁木で構成された林分では、防風効果がなかったり、十分でない場合が見受けられた。これらのことから風上隣接地の林分の防風効果を判断する場合はその構造、幅まで評価していく必要があると考えらる。

(7) 風向

カテゴリー数量をみると、正方向が負の数量を、逆方向が正の大きな数量を示し、逆方向の風は被害を大きくする方に寄与している。斜面に対して逆方向の風が吹きやすい箇所は、山腹上部や斜面の鞍部等である。このような箇所はもともと被害を受けやすいが、逆方向の風が吹いた場合は被害がさらに大きくなると推察される。

(8) 形状比

形状比が低いほど大きな負の数量となり、高くなるほど大きな正の数量となっていることから、形状比が低いほど被害を受けにくいことが分かる。形状比70程度がカテゴリー数量の正負の境になっている。

(9) 樹冠長比

偏相関係数が最も大きかったアイテムであった。樹冠長比が40%より小さいと被害を大きくする方に寄与し、60%を越えると被害を小さくする方に寄与している。

(10) 収量比数

今回は林分密度を収量比数で捉えたが、偏相関係数の低い部類に入った。このことから林分密度は耐風性を判断するうえで十分な指標になりにくいと考えられた。密度が中庸の収量比数0.65~0.74ではカテゴリー数量が負の大きな値を示し、収量比数はそれより小さくても、また大きくても被害を大

きくする方に寄与する結果となった。ただし今回調査した密度が疎な林分は、疎な状態になってから時間がさほど経過していない林分であり、そのことが被害を大きくすることに影響したのではないかと推察される。林分密度を現況のみで判断するのではなく、林分密度の時間的経過も被害に大きく影響しているので、林分密度を指標としてとらえるならば、林分密度が現在に至るまでの経過も併せて捉えていく必要があると考えられる。

(11) 間伐経過年

2～4年未満、4～6年未満のカテゴリーが負の数量を示し、被害を小さくする方に寄与している。2年未満と6年以上のカテゴリーは正の数量を示し、特に2年未満が大きな数量を示している。このことから、間伐を実施した直後は被害を受けやすいことがうかがえ、また間伐後6年以上経過し密度の高い林分の耐風性の低下がうかがえる。前項でも述べたが、林分密度を林分の耐風性の指標として捉える場合、林分密度の時間的経過を表しているこの間伐経過年は、林分密度と一連に取り扱っていく検討も必要であると思われる。

(12) 間伐率

間伐率が大きくなるほどカテゴリー数量が正の大きな値になる傾向にあることから、伐採率が大きく、特に強度な間伐を実施し急激に密度を下げた林分ほど被害を受けやすいことがうかがえる。しかし、偏相関係数が小さいことから、今回の解析では被害への寄与度の小さい要因であった。

2. 林分構造と被害との関係

平成5年と平成7,8年の台風による被害の形態は大きく異なり、前者では根返り、傾きが多く、後者では折損が多かった。平成5年では台風襲来以前の降雨量が非常に多く土壌水分が飽和状態にあり、根返りの被害が発生しやすい状況にあったと考えられる。一方、平成7,8年の台風は平成5年の台風に比べて小型であったにもかかわらず、折損の被害が多く、同年の被害の多くは平成5年の台風が残存立木の材質にかなりの損傷を与えたことによる二次的被害と推察される。このため調査地の設定は、平成5年の被害が無い箇所を優先して行ったが、一部には平成5年の被害を受けた箇所があった。また解析には林分の被害率がばらついていることが好ましかったが、今回の調査地は限られた範囲で被害木と残存立木が混在する林分を選定したため、結果的に被害率が中規模に偏ってしまった。

(1) 被害木の胸高直径分布

林分内における被害木の胸高直径の分布について、代表的な林分を図-2～5に示した。林分全体の胸高直径はほぼ平均値を中心とした正規分布を示し、被害木の胸高直径もこれとほぼ同様の分布を示した。これら以外の林分についてもこれらとほぼ同様な傾向であった。

林分の被害率と被害木の胸高直径分布との関係を表-6に示した。被害木の胸高直径は被害率が高くなるにしたがい平均値を中心により広い範囲に分布していき、全体の出現頻度に応じた数量の増加がみられた。

(2) 林木状況と被害

(1) では被害木の胸高直径の分布について検討を行ったが、ここでは被害木と残存立木の形状について検討した。

被害率と林木の形状比との関係を図-6に示した。残存立木と被害木の形状比はそれぞれ各林分の平均値である。被害木の樹高については、同じ林分内の残存立木の胸高直径と樹高の関係から推定した。

形状比が大きくなるほど被害率は高くなる傾向が認められた。しかしながら、同じ林分では必ずしも被害木の形状比が残存立木のそれよりも大きいということではなかった。

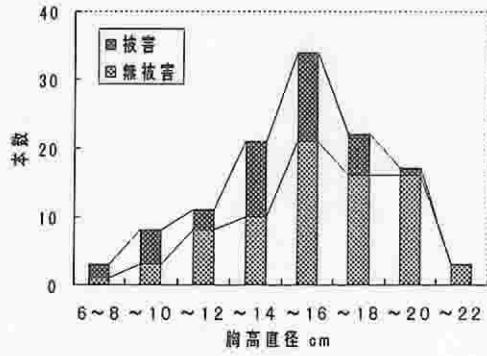


図-2 胸高直径階の本数分布(スギ:被害率34%)

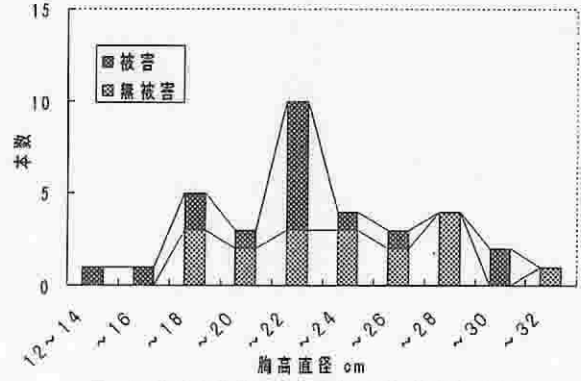


図-3 胸高直径階の本数分布(スギ:被害率47%)

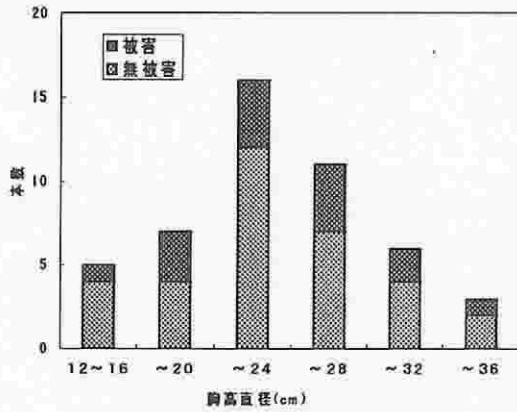


図-4 胸高直径階の本数分布(ヒノキ:被害率41%)

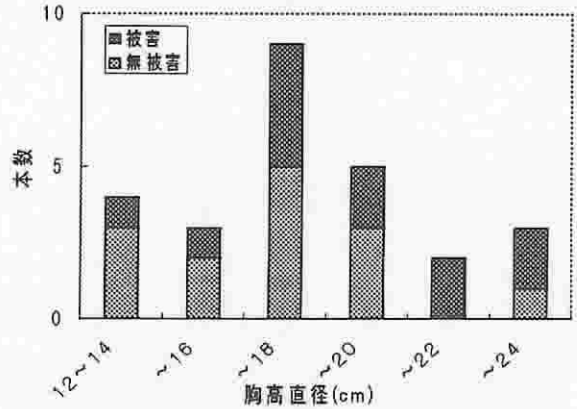


図-5 胸高直径階の本数分布(ヒノキ:被害率46%)

表-6 被害林分における胸高直径分布

樹種	被害率 (%)	林分全体	被害木
		平均±SD	平均±SD
スギ	24	18.1±3.4	21.3±2.8
	29	23.5±6.4	26.2±8.3
	31	39.7±7.6	37.9±6.1
	34	14.7±3.2	13.4±2.9
	37	19.3±3.5	18.0±2.1
	40	20.8±4.9	17.8±4.5
	47	21.8±4.4	20.6±4.5
	55	26.6±4.3	28.3±3.0
	70	22.2±2.9	22.0±4.0
ヒノキ	28	18.4±2.9	18.9±2.1
	41	23.0±5.8	23.0±5.3
	33	18.9±2.7	17.9±1.5
	46	17.3±3.0	19.4±2.6
	51	16.7±2.5	16.8±2.3
	60	18.6±2.4	18.9±2.2

次に被害率と樹冠長比との関係を図-7に示した。樹冠長比が小さくなるほど被害率は高くなる傾向が認められた。しかし形状比と同様に、同じ林分では残存立木の樹冠長比が被害木のそれに比べて必ずしも大きいということにはなかった。

これらのことから、林木の形状を表す形状比や樹冠長比は林分間の耐風性を相対的に判断する指標となりえても、同一林分における耐風性の指標としては有効でないといえる。

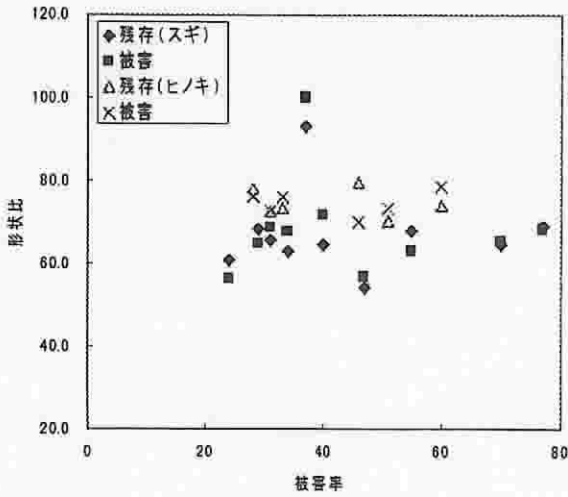


図-6 被害率と形状比

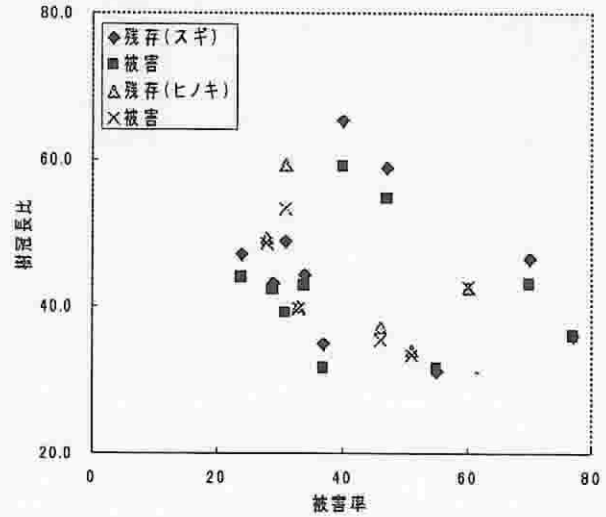


図-7 被害率と樹冠長比

(3) 林分状況と被害

IV-2-(1)の結果から、胸高直径のばらつきが大きく、大小さまざまな形状の林木から構成される林分ほど被害が軽減できるのではないかと想定される。そこでばらつきの度合を表す変動係数（標準偏差／平均値）を用い、胸高直径の変動係数と被害率との関係を図-8に示した。変動係数が小さくなるにしたがい被害率が高くなる傾向にある。このことから同様な形状の林木で構成された林分ほど被害が大きくなることが推察される。このことは、一斉林より混交林、混交林より広葉樹林が耐風性が高いことの一つの根拠を示したものと見える。

次に収量比数と被害率の関係を図-9に示した。収量比数が0.6~0.8に集中しており明瞭ではないが、収量比数0.75程度が最も被害率が小さく、そこを境に被害率が高くなる傾向がみられる。このことは、適切な密度が保たれている林分は構造上耐風性を有していることを示唆しており、IV-1の解析結果と同様であった。では何故、密度が高すぎても、低すぎても被害率が大きいか。例えば林分密度が高すぎる場合は、林冠が閉鎖して一定の耐風性はあるものの、一旦災害が発生すると林分を構成する林木の形状比が高い等の構造的欠陥を内在しているため、被害が一挙に拡大していくものと考えられる。また密度が低すぎる場合は林冠が閉鎖していないため、林内に風が吹き込みやすいことが要因と考えられる。しかしながら、収量比数はIV-1-(10)では被害率との相関が低く、また間伐経過年との関連もあり、耐風性の指標としては不十分である。

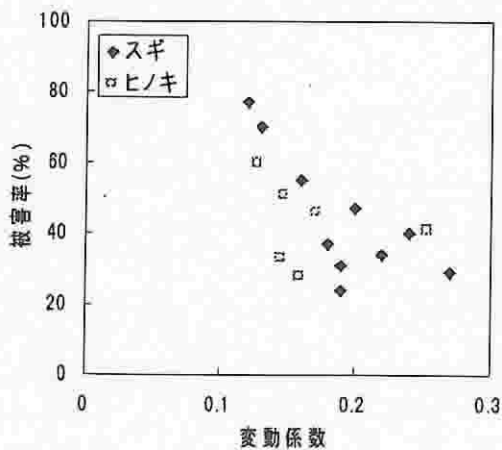


図-8 胸高直径の変動係数と被害率

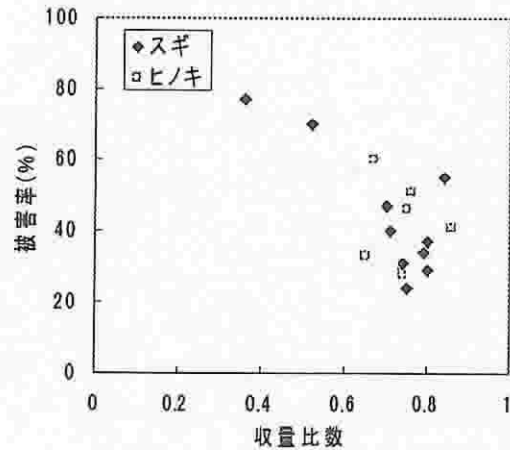


図-9 収量比数と被害率

次に収量比数と胸高直径の変動係数との関係を図-10に示した。

明瞭な関係はなく、これは間伐を実施してから時間が経過していない林分も含まれていたためと考えられる。林分密度が高いほど変動係数は小さく、低いほど変動係数は大きくなる。また下層間伐や上層間伐を実施すると径級を揃えることになり、間伐直後は変動係数が小さくなる。このため、胸高直径の変動係数は林分密度や間伐経過年を反映した指標であるといえ、林分の耐風性を判断するうえで有効な指標になると考えられる。

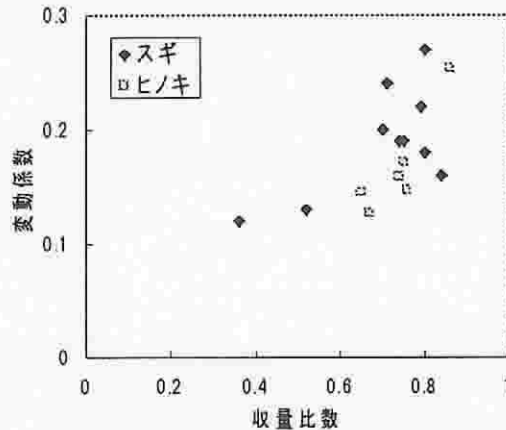


図-10 収量比数と変動係数

3. 被害林分内の残存立木の材質調査

(1) 試料木のモメ

試料木の材表面で視認できたモメの状況を写真-1に示した。材表面に盛り上がりの大きいしわや盛り上がりの小さいしわ状のものが多数認められ、ここではこのしわをモメとした。このモメの存在や長さを立木の段階で剥皮せずに計測できないか検討したものの、盛り上がりの大きい一部のしわでは樹皮が盛り上がり、外観からの計測が可能視されたが、全てを確実に計測できる特徴は見出せなかった。

各試料木のモメ長を図-11~15に示した。各図は材表面で視認できたモメの量が少ないに順に並べたものである。モメ長は材表面で認められたしわの長さの合計で、モメ密度はモメ長を丸太の表面積で除して算出した。

同じ林分内の残存立木間でもモメの量にはかなり違いがあることが分かる。モメ密度の最も小さいN0.1試料木は、樹高の約40%にあたる地上高7~8m部分でモメ密度が最も高く、それを境としてモメ密度は低くなっている。また他の試料木もモメ密度は樹高の約30~40%の地上高の部位が最も高かった。檜山ら(1974)は幹折れ部の地上高は樹高の高さの1/3ぐらいが一般的であるとしている。これは樹高の1/3付近が幹断面積に対し最大の風圧モーメントが発生することを示唆しており、モメ密度が幹断面積に対する風圧モーメントの大きさを反映していると考えると今回の調査結果も同様といえる。今回の調査では、地際から風心高(枝下高+樹冠長/3)と考えられる地上高11m程度までの範囲内に大部分のモメは出現していた。

またモメの総量が最も少なかった図-11では、前述したとおり樹高の約40%の高さの部位でモメ密度のピークがあった。次に図-12以降でモメの総量が増えるにしたがい、樹高の約25%と約45%の高さにあたる二つの部位でピークがみられるようになっている。

モメは、図のようにそのほとんどが風下側に出現し、風上側にもモメの出現が一部に認められたが、

これは被害木の主な折損方向をもとに風向を推定したため実際の風向とにはずれがあり、今回判定した風上側が風下側ではなかったのではないかとと思われる。またモメは風下側の樹幹中心の軸に沿って多く認められ、モメの量が多くなるほど中心軸から両側へとモメの出現範囲が広がる傾向が認められた。

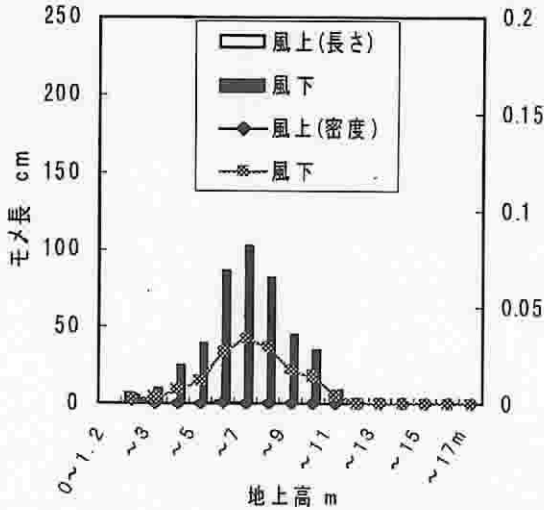


図-11 各部位のモメ長(N0.1)

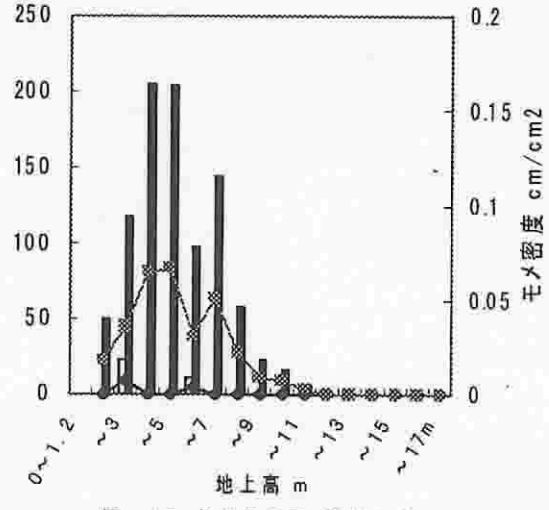


図-12 各部位のモメ長(N0.2)

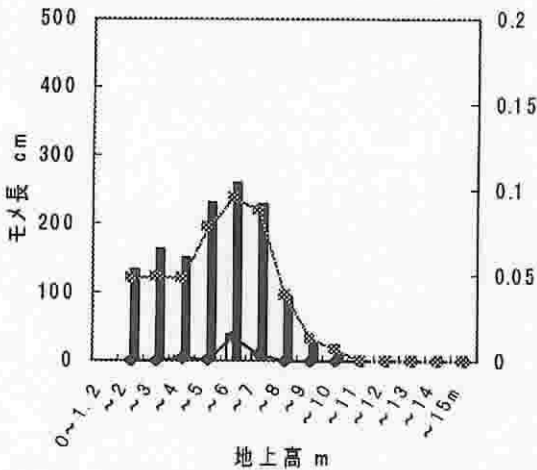


図-13 各部位のモメ長(N0.3)

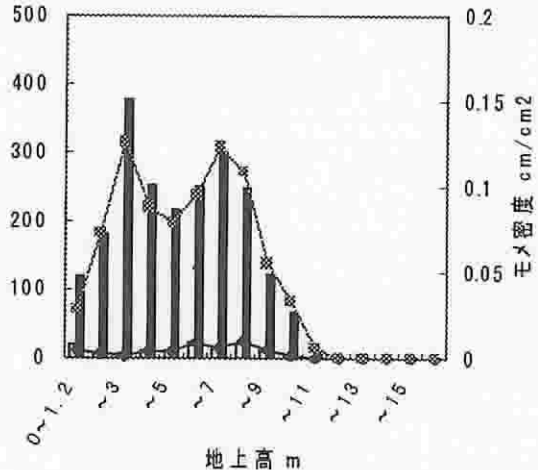


図-14 各部位のモメ長(N0.4)

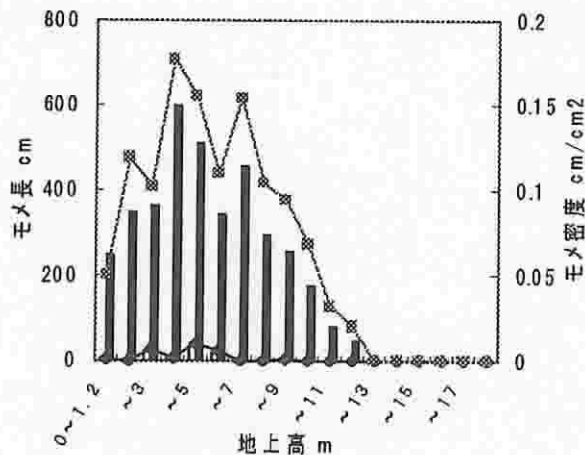


図-15 各部位のモメ長(N0.5)

次に表-4により区分したモメの割合を図-16~20に示した。図-11においてモメ密度が高かった樹高の40%付近の地上高7mの部位は、図-16では区分の小の割合が大きく、その両側で大の割合が大きい。そして両側へ離れていくにつれ、区分の小の割合が多くなっている。他の試料木においてもモメ密度の高い部位では区分の小の割合が大きく、その両側で大の割合が大きいようである。また梢頭部に近くなるほど、モメ区分の小の割合が大きくなっている。図-17は他の試料木と比べモメ密度が小さいが、区分の大の割合が全体的に大きい。これは他の試料木と比べ樹冠長比が大きいことにより大きな風圧を全体的に受け、さらに試料木のなかでは幹直径も小さかったことが影響しているものと思われる。

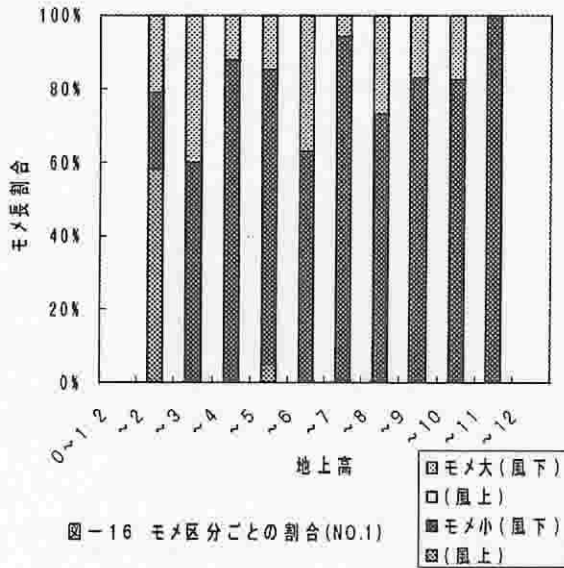


図-16 モメ区分ごとの割合(N0.1)

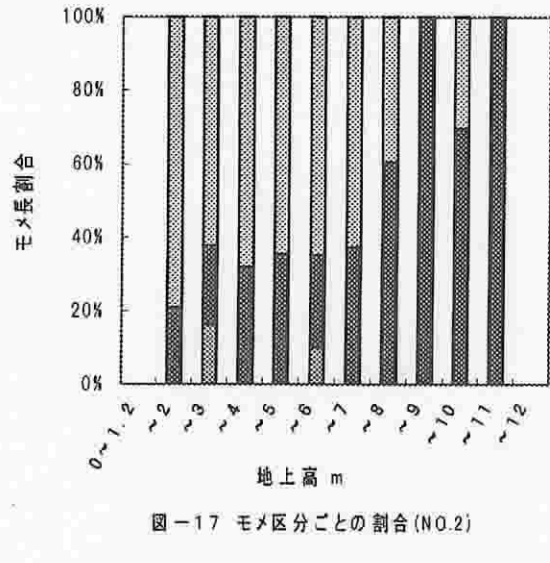


図-17 モメ区分ごとの割合(N0.2)

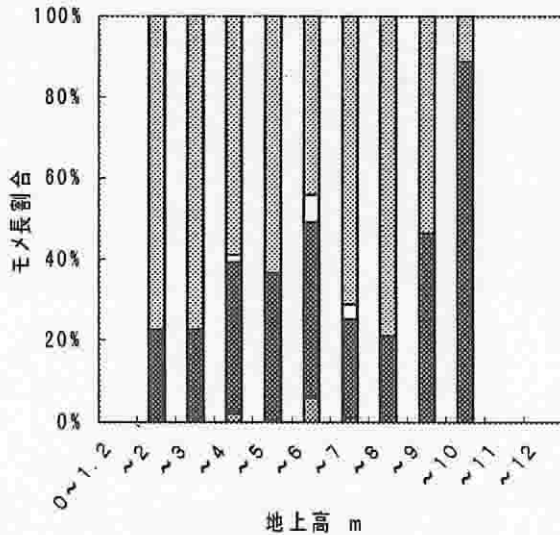


図-18 モメ区分ごとの割合(N0.3)

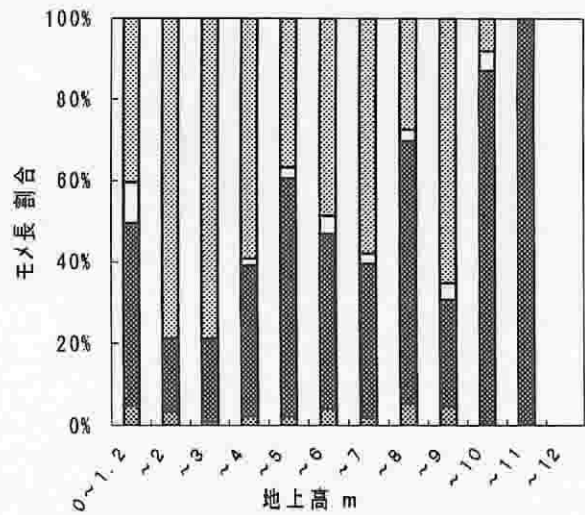


図-19 モメ区分ごとの割合(N0.4)

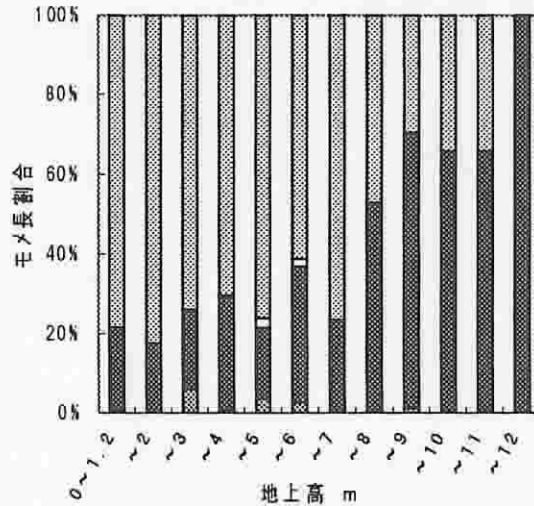


図-20 モメ区分ごとの割合 (N0.5)

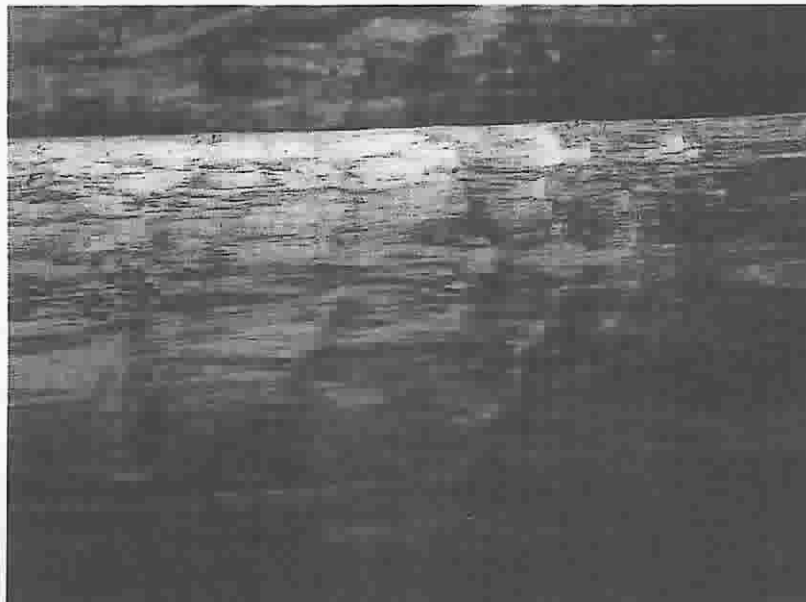


写真-1 モメの状況

次にモメ密度の高かった試料木N0.4を割材し、材表面からどの程度の深さまでモメが入っているか調べた。割材は、風下側表面から最初は1.5cm、次からは3cm間隔で行った。材表面には多くのモメが確認できたものの、材内部においてはモメと明確に判断できた箇所は少なかった。また材内部でモメと明らかに判断できた箇所は材表面が大きく盛り上がったしわの内側で、それも材の表面近くに多かった。モメ以外には辺材部と心材部の境付近に大きさが1×1cm程度の赤褐色の斑状のものが随所にみられた。この斑状のものは節の周辺に多く、また色が濃いほど材表面からさらに深い部分にもみられた。視認できたモメの状況を写真-2に示した。材表面で視認できた盛り上がったしわの内側の辺材部に、白い筋状のモメがみられる。また心材部と辺材部の境部には濃く変色した斑状のものがみられる。写真-2の白い筋の部分の顕微鏡写真が写真-3である。夏材部において仮道管の座屈や剥離、また剥離部の周辺に異常組織が認められる。

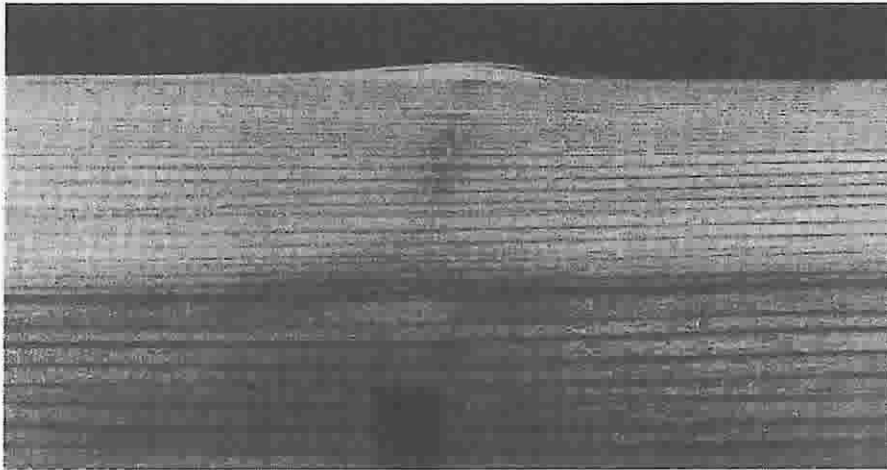


写真-2 割材面のモメの状況

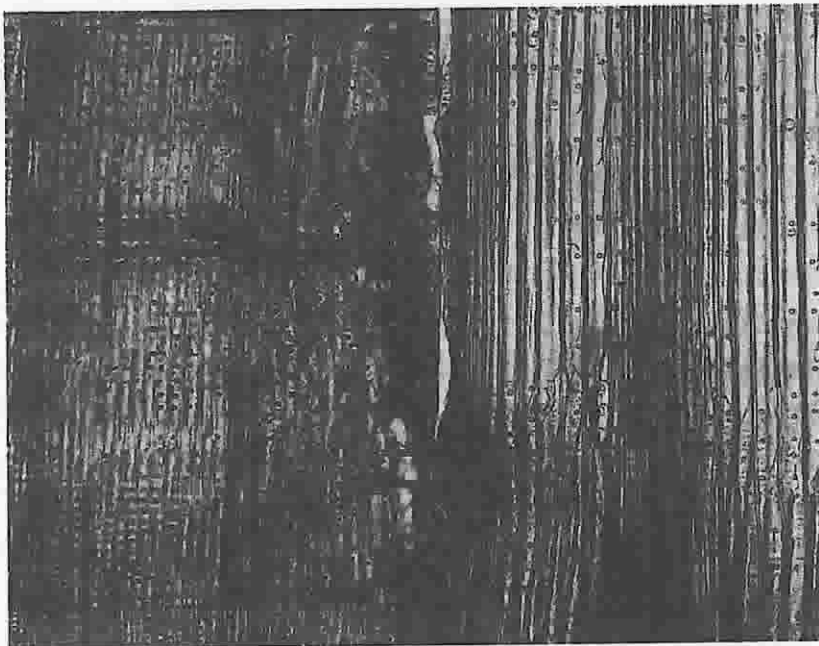


写真-3 モメにおける組織破壊状況

材表面で確認できたモメの出現の深さを図-21に示した。モメ出現の深さはいずれの地上高においても材表面から3cm程度であり、この深さは調査木の辺材部の厚さとほぼ一致した。

次に風下側から割材した位置毎に割材面で確認できたモメの数を図-22に示した。1.5cmの割材面は辺材部であり、全体として材色が白く、モメ等破壊組織の確認は困難であった。4.5cmの位置から割材面に心材部が入り、モメの確認が容易となった。胸高直径の35%にあたる、風下側から7.5cmの位置までにモメのほとんどが確認できた。地上高毎の材内部のモメ総数は、材表面のモメ密度を示した図-14と同様な傾向にあった。材表面に出現したしわと同じく材内部に出現したモメも風下側に集中し、風上側では確認できなかった。

これらのことから、風害が発生しうるような強風を受けたスギの立木は、外観上の異常は認められなくても、材表面や辺材部にはかなりの損傷を受けているといえる。これは、平成5年のスギ林の被害形態が根返りが多かったのに対し、平成7,8年は被害形態が「せん断」ではなく折れ部がささくれ立つ「裂断」の折損が多く、しかも平成5年の被害地及びその周辺に被害が集中していた事実からも推察される。したがって外観上異常を認めないスギ林であっても、過去に被災した林分は耐風性が低下しており、被災していない林分に比べ風害発生危険度が高いといえる。

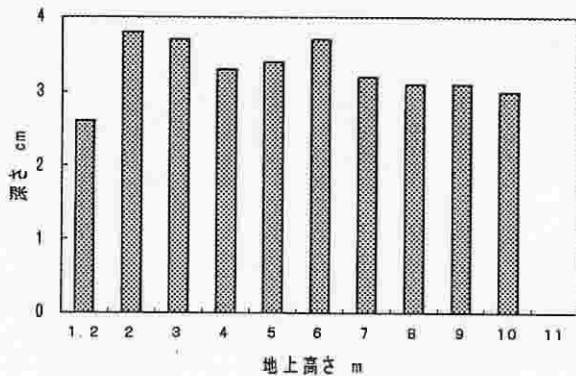


図-21 材表面からのモメの深さ

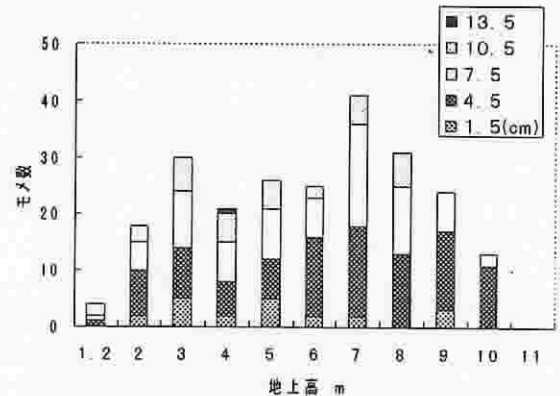


図-22 風下側距離毎のモメ数

(2) モメと残存立木の形状

地上高1.2mからモメが確認できた高さまでのモメ長の合計を、その範囲の材の表面積で除して算出したモメ密度と調査木の形状比との関係を図-23に示した。形状比が大きくなるほど、モメ密度は高くなる傾向にある。これは、形状比が大きいほど材の損傷が大きいことを示唆している。

モメ密度と樹冠長比との関係を図-24に示した。樹冠長比が小さいほどモメ密度は高くなっている。

形状比が大きい立木や樹冠長比が小さい立木ほど材の損傷が大きくなるこれらの傾向は、被害発生要因の解析結果と一致した。

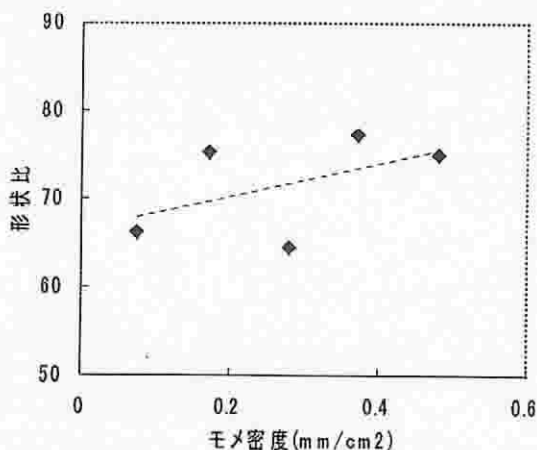


図-23 モメ密度と形状比

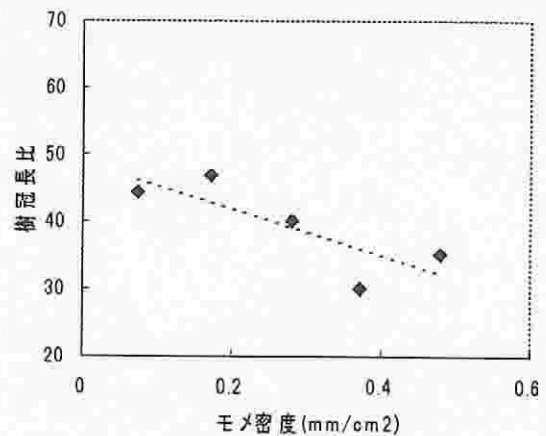


図-24 モメ密度と樹冠長比

(3) 試料木の目回り

木口面で一部ヤニ等による変色は認められたが、目回りは確認できなかった。

(4) 残存立木の強度

地上高2～8mの範囲の樹幹を1m毎に丸太にして測定した動的ヤング係数を表-6に示した。動的ヤング係数は、モメ密度の高かった試料木NO.4とNO.5において最大値と最小値の差が大きかったものの、各試料木とも80～130tf/cm²の範囲にあった。また各試料木のそれぞれの丸太の動的ヤング係数が特別に低い値を示したものはなかった。これらのことから、風害跡地の残存立木は材質的な強度の低下は認められず、構造材として利用することについては支障がないと判断された。ただしモメは材表面に集中して出現していたことから、材表面部位の用途については注意が必要と考えられた。

福岡県林業試験場(1992)はモメのある材を調査し、脆さや粘りのなさを指摘できる結果は見いだせなかったとしている。一方で、松村ら(1993)は残存立木を調査し、肉眼的にモメが認められない部位でも顕微鏡レベルで仮道管壁に“しわ”を確認し、その“しわ”やモメがヤング係数を著しく低下させるとしている。残存立木は材としての利用においては問題はないにしても、平成7年以降の災害が平成5年の被害地及びその周辺に発生し、また、被害形態が折損、特に“れつ断”が多かったことから、台風による被害林分の残存立木は耐風性が低下しているものと推察される。

表-6 各試料木の動的ヤング係数

番号	地上高さ(m)	密度(g/m ³)	動的ヤング係数(tf/cm ²)
1	2～8	0.58～0.71	86.6～94.8
2	”	0.54～0.59	101.7～106.9
3	”	0.71～0.77	82.4～90.2
4	”	0.42～0.68	73.6～110.5
5	”	0.66～0.71	116.9～127.0

V 総括

台風による林分の被害は同様な風の条件であっても、立地条件や林分条件等複数の要因が相互に影響しあっているためその形態は様々である。今回、台風被害発生要因等の解明に取り組んだが、現地における風速、風向等の詳細な把握ができず、その解明には一定の限界がある。しかしながら、今回の調査によりいくつかの知見が得られたので、これまでの結果等を踏まえ風害を軽減させるための対策等について考察する。

1. 被害発生要因について多変量解析を行った結果、被害の発生には林木の形状を表す樹冠長比や形状比、風を遮るものが風上側にいかに近くあるのかを示す開放性距離が大きく影響していることが分かった。特に樹冠長比の影響が大きく、林分に耐風性を持たせるには樹冠に配慮した施業が重要であると言える。本県の枝打ち技術指針(1981)では、スギ中伐期では枝下高率は60%程度、ヒノキでは50%程度以下にとどめるべきとしている。しかし、今回の解析結果では樹冠長比が50～60%を越えると被害を小さくする方に寄与していたことから、林分の耐風性を高めるためには枝下高率は50%程度以下と先の技術指針より低く抑える必要があると考えられる。また中村ら(1995)は、樹冠層率(林分全体の樹冠層の厚さ/林分における高木層の樹高×100)が林分の耐風性の指標としてはより有効で、樹冠層率80%以上を維持することにより被害を防ぐことが可能としている。より耐風性のある林分に誘導していくための林分の樹冠管理技術の開発が今後重要と考えられる。
2. 形状比については、60～70が被害の規模を左右する境であった。本県の育林技術体系化指針

(1974)によると、植栽本数4,000本/ha以上のスギ林では形状比は常に65程度以上である。林分に耐風性を持たせていくには、形状比60程度以下に保つ必要があり、植栽本数は3,000本/ha以下とし、長伐期の施業が効果的と考えられた。

3. 被害の発生と比較的関連のある要因として斜面方位があげられた。そこで過去(1965～1996)に風害発生のおそれの高い最大風速20m/s以上の強風がどの方位から、何回吹いたかについて、鹿児島県農業気象月報により調べた。鹿児島地方気象台、阿久根測候所、枕崎測候所、航空測候所における観測値を図-24～27に示した。風速20m/s以上の強風は、いずれの観測地においても一定範囲の方位から吹く頻度が高かった。

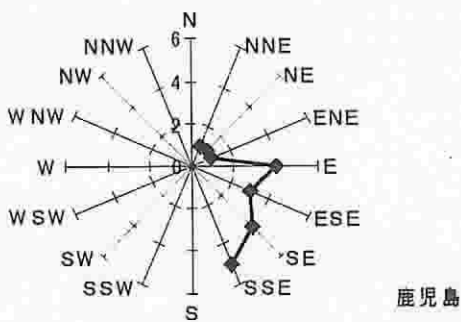


図-24 方位別の回数(1965～1996)

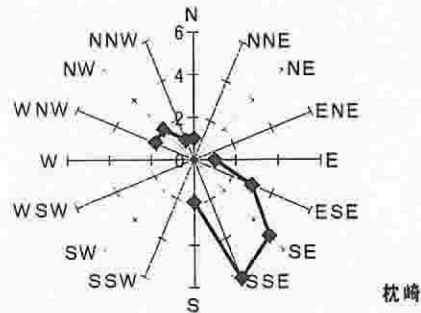


図-25 方位別の回数(1965～1996)

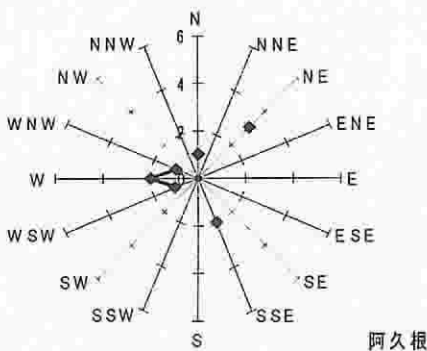


図-26 方位別の回数(1965～1996)

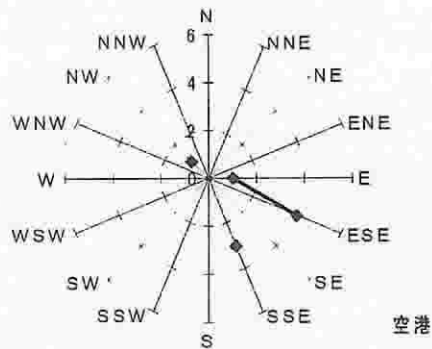


図-27 方位別の回数(1985～1996)

次に先と同じ観測地における方位別の最大・最大瞬間風速を図-28～31に示した。なお最大瞬間風速は1979～1996年までのものである。いずれの観測地でも図-24～27において強風の吹く頻度の高かった方位から、最大・最大瞬間風速が観測される頻度が高かった。

これらのことから、強風の方位には地域性があり、林分の耐風性を高めるための施業を効果的、効率的に実施していくには当該地域の強風の方位性を把握しておくことが望ましい。さらには過去に災害の発生した林分は当然として、風害発生のおそれの高い強風の吹く頻度が高かった方位に面する斜面、あるいは風害危険地形に位置する林分を特定し、将来にわたり耐風性のある林分を維持造成していくことが重要である。

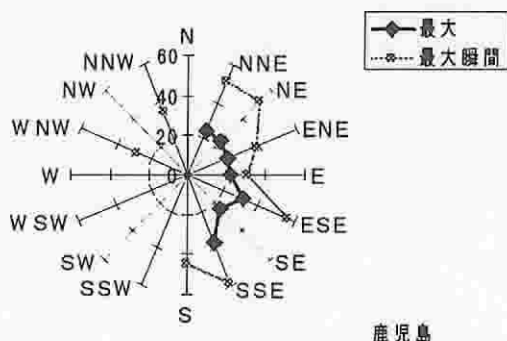


図-28 方位別の最大風速(1965~1996)

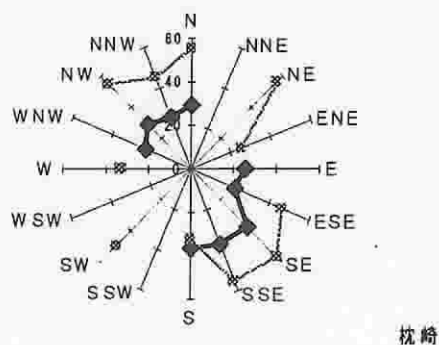


図-29 方位別の最大風速(1965~1996)

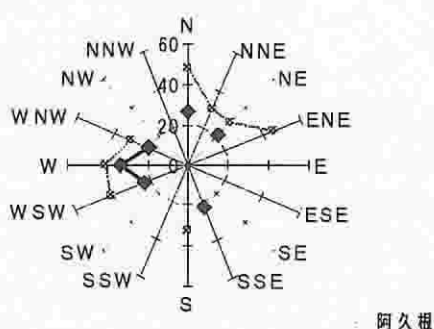


図-30 方位別の最大風速(1965~1996)

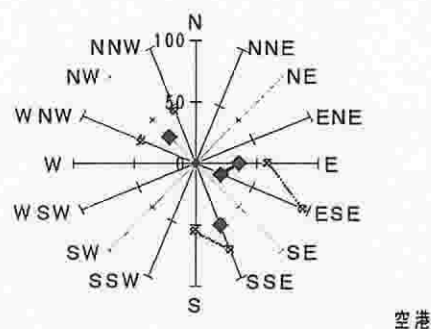


図-31 方位別の最大風速(1985~1996)

4. 被害発生要因の解析結果では、風上隣接地の林況は被害に大きく影響を及ぼす要因ではなかった。これは斜面傾斜が急になるほど風上の林分による防風範囲が小さくなる等、場所によっては地形条件による影響がより大きくなるためと考えられた。しかし、風害を軽減するためには林縁木を配置することは重要である。現地では、林縁木まで枝打ちが行われ林衣のない林分や林衣はあるものの1列の林縁木で構成された林分があり、防風効果が十分でない事例も見受けられた。林衣は、1列のみでなく2~3列の林縁木で構成したり、暴風の風向を想定し林縁のみでなく林内にも格子状に設けたり、広葉樹で構成していくことも検討する余地があると思われる。
5. 施業履歴においては間伐率より間伐経過年が被害率に大きく影響を及ぼしていた。特に間伐経過年が2年以下では被害の発生率が高く、間伐の影響による林分の耐風性の一時的な低下は間伐後2年程度と推察される。間伐の影響の期間を最小限に抑えるためには、林分構造を急激に変えるような強度な間伐を控え、弱度な間伐を繰り返し実施していく必要があると考えられる。
6. 被害林分における被害木と残存立木の胸高直径は同様の分布を示し、林分の胸高直径の変動係数が大きいほど被害率が小さくなる傾向にあった。林分密度や間伐経過年を反映すると思われる胸高直径の変動係数は、林分の耐風性を評価するうえで有効な指標になると考えられた。従来の単層林での保育間伐や利用間伐は個体間のばらつきを一時的に小さくさせるものであり、その方法については今後の課題である。しかしながら林分の個体間にばらつきを持たせる目標林型としては、例えば混交林、複層林、広葉樹林であり、耐風性を考慮した場合それらは単層林より指向されていくものであると考えられる。

7. 被害林分内の残存立木には、被害をもたらした風の風下側の材表面や辺材部に集中してモメ出現が多く見られたものの、動的ヤング係数の計測結果からは強度の低下が認められず、材としての利用については支障がないといえる。

しかしながら、これらのモメは耐風性を低下させていることを、その後に来襲した台風による被害の形態から指摘できる。このことから、被害林分及びその周辺林分は被害再発の危険性が高く、林分の耐風性を評価するには現況だけではなく、過去の被害の時期、規模を勘案していく必要があると考えられる。

本県の台風害対策技術指針（1993）では、被害林分の更新方法として被害率が70%以上の場合は全面改植とし、それ以下の30~70%の被害林分では残存立木を残し、部分改植あるいは複層林仕立てで復旧するとしている。しかしながら、残存立木は耐風性の低下を伴う材の損傷を多くが受けており、また被害発生要因の解析結果では間伐率が40%以上の林分の被害は高まる傾向にあった。これらのことから、被害率40%程度の林分であっても、被害再発の危険性が高く、全面改植の検討も必要であると考えられる。

飯塚（1958）は人工林は天然林に比べ、また針葉樹は広葉樹に比べ風害に弱いとしている。また玉手（1967）は針葉樹の単層林は風害に弱く、混交林は強いとしている。スギ、ヒノキの単層林は風害等の気象災害に対して耐性が小さいにもかかわらず、これまでの林業施策として単層林を全面的に造成してきたことが近年の激甚な災害発生の引き金になったことには間違いない。台風19号等災害復旧対策調査検討委員会（1992）では広葉樹林の配置を基本的に増やすことが重要であると述べている。耐風性の高い森林を育成していくには、スギ、ヒノキ一辺倒の森林造成から広葉樹の導入も図る等の多様な森林づくりが重要であるといえる。さらには将来の森林資源の充実に向け、風害林分の復旧はもとより、現在あるスギ、ヒノキ単層林を耐風性の高い林分として、いかに適切に管理し、また複層林や混交林に誘導していくのかも大きな課題と考える。

謝 辞

この調査研究を進めるにあたり、南橋仁林務係長（当時 大口農林事務所）、堂込清文林務係長及び田中賢二林業技師（鹿屋農林事務所）には現地案内、福村寛之林業技師（当時 林業試験場）及び渡辺尚一技術補佐員（林業試験場）には現地調査、遠矢良太郎木材工業部長及び図師朋弘研究員（工業技術センター）には材質調査にご協力を頂いた。また小牧三郎氏（当時 田代町農業委員会）には、風害林分の残存立木を試料として無償で快く提供して頂いた。ここに関係各位に深く感謝の意を表する。

引用文献

- 福岡県林業試験場（1992）：1991年9月に発生した台風17・19号による森林被害調査報告書。
研究資料NO. 18, 1～83
- 福村寛之ら（1995）：平成5年台風13号被害調査の解析結果。鹿児島県林業試験場業務報告 43,
24～30
- 福留重人（1994）：県産スギ品種別の強度特性。鹿児島県工業技術センター研究報告 8, 75～78
- 飯塚肇（1958）：森林防災工学。森北出版, 238～254
- 諫本信義ら（1992）：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。
大分県林業試験場研究時報第18号, 1～43
- 鹿児島県・鹿児島地方気象台（1965～1996）：鹿児島県農業気象月報
- 鹿児島県（1974）：育林技術体系化指針, 1～30
- 鹿児島県（1981）：枝打ち技術指針, 1～21
- 鹿児島県造林協会ほか（1993）：台風害対策技術指針, 1～36
- 樫山徳治ら（1974）：林木の気象被害。日本林業技術協会, 61～80
- 三浦寛・松本陽介・真下育久（1984）：台風15号（昭和56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。東大農演報 73, 139～160
- 林野庁（1980）：九州地方スギ密度管理図
- 林野庁（1982）：九州地方ヒノキ密度管理図
- 松村順司ら（1993）：スギ、ヒノキの力学的性質におよぼすもめの影響について。
日本林学会九州支部研究論文集NO. 46, 291～292
- 中村松三ら（1995）：スギ人工林の林分構造と台風被害。日本林学会論文集106, 401～402
- 台風19号等災害復旧対策調査検討委員会（1992）：平成3年台風19号等による森林災害の記録。
日本造林協会, 39～49
- 玉手三葉寿（1967）：森林の暴風害とその防除法。林業技術NO. 306, 21～25
- 田中豊ら（1995）：統計解析ハンドブック多変量解析。共立出版, 1～159
- 山内惇（1986）：昭和60年台風13号被害調査。鹿児島県林業試験場業務報告 34, 163～167