九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

台風9117,9119号による森林被害の要因解析

中尾，博美
九州大学農学部林学科

金，錫権
九州大学農学部林学科

又木，義博
九州大学農学部林産学科

藤本，登留
九州大学農学部林産学科

https://doi.org/10.15017/10876

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 68, pp.11-48, 1993-03-29. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

台風9117，9119号による森林被害の要因解析*

中尾博美**・金　錫権**
又木義博***・藤本登留***

抄　録

平成3年9月に九州北西部をかすめ，東北へと進路をとった2つの台風，17号と19号によって，とくに九州中北部に甚大な森林被害が発生した．

この台風の強風による森林被害について，その発生に関連が大きいと考えられる要因群，強風，マクロ，ミクロな地形と樹木などの条件について分析を加えた．

平均風速と瞬間最大風速の関係を明らかにし，最大風速発生時近傍の風速について，瞬間風速の推定を行った．

被害の発生に対して強風の持続時間，斜面方位，斜面内位置，標高，樹齢と樹形などが強い関係があることが分かった．

瞬間最大風速の大きさより，その時間帯近くの強風の平均風速と被害発生率の上限値との間に強い関係が認められた．

一定方向の斜面で高い発生率を示し，この斜面方位は強風時の風向とほぼ一致した．

同一山腹斜面内では比較的下部で，標高についてはその地域の中，下部で高い発生率を示すなど風害発生の恐れの高い斜面位置の推定が可能であることが示唆された．

幼齢の林分で被害の発生は少なく，樹齢が20～40年生位以上の森林に高い被害率が見られた．

樹冠長，胸高直径，樹高等によって，生じた被害の類型が異なることが分かった．

被害類型の中，折損，倒伏について力学的解析を加えた．理論的折損高と実測折損高との差異について考察を加え，受風時の樹体の変形による影響を考慮する必要があることが示唆された．

倒伏のメカニズムについては，根系部の倒伏モーメントに対する抵抗モーメントを，土塊重量によるものと根鉢周辺部のせん断抵抗によるものについて検討し，両機構が成立する可能性が示唆された．

キーワード：台風被害，風速，地形，樹形，倒伏，折損，湾曲

---

* Hiromi NAKAO, Sukkwon KIM, Yoshihiro MATAKI and Noboru FUJIMOTO : Analysis of Factors Affecting the Damage of Forest by Typhoons 9117, 9119.
** 九州大学農学部林学科
Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812
*** 九州大学農学部林産学科
Department of Forest Products, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

1. はじめに

わが国の森林は毎年，病虫害，鳥獣害，火災，気象災害などによって数万～数十万 ha に達する大面積の被害を被っており，中でも気象災害による被害は特に莫大な金額に達している．この気象災害の中では雪害が圧倒的に大きな割合を占めているが，これについで凍害とともに風害が続く（表1）．

表1 気象災害面積（民有林）
Table 1 The areas of meteorological disasters (Private forest).

種類 Type of damage	被害面積 Damage area	被害率 Damage percentage	備考 Remarks
風害 Wind damage	2,672ha	9.5%	・国土面積：3,765万 ha
水害 Flood damage	395	1.4	・森林面積：2,511万 ha
雪害 Snow damage	19,367	69.1	・木材消費量：11,116万 m^3
干害 Drought damage	2,332	8.3	うち、国産材：2,937万 m^3 (平成2年度)
凍害 Frost damage	2,985	10.7	
潮害 Tide water damage	267	1.0	
合計 Total	28,018	100.0	

※ The annual mean areas from 1985 to 1989.

過去の風害の記録では，昭和29年の5月の強風と，とくに9月の15号台風（洞爺丸台風）による北海道の森林被害が大きい．この年の北海道の風害木の材積は国有林，民有林合計で1800万 m^3 に達している．これは当時の北海道の平均年伐量の3.5年分に相当し，今日わが国で1年間で消費する木材の6分の1という膨大な量であった．その後，昭和34年に6万 ha（民有林）の風害が見られる．

平成3年9月の17号，19号の2度にわたる台風による森林被害は，それらに次いで烈しいものであった．2つの台風の経路はほとんど同じで，九州の西南位置に接近してから，北西部隅に上陸し通過した後，北東の日本海へ抜けている（図1）．このため，台風の進路の右半円に位置した九州北部，中部における山林被害がとくに大きくなっている（表2）．

この報告は，被害発生の直後に京都大学防災研究所を中心に編成された，“1991年台風19号による強風災害の研究（総合研究A 研究代表者 光田寧教授）”に参加し，分担した“森林災害”部門の調査，解析結果で，次のような内容となっている．

被災地近傍の風向，風速

森林被害分布と風速との関係

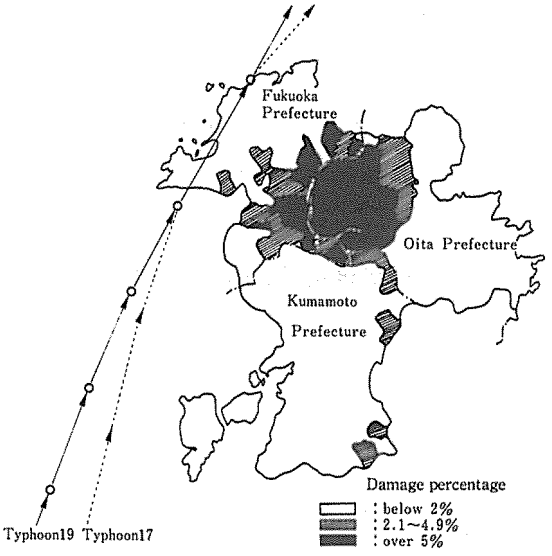

Fig. 1 General description of the course of typhoons 17, 19 and forest damage.

図 1 台風進路と森林被害位置

表 2 九州各県の森林被害状況

Table 2 The wind damage areas in Kyushu.

県 名 Prefecture	森林面積 Forest area	被害面積 Damage area	被害率 Damage percentage
福 岡 Fukuoka	206 × 10^3 ha	7,239 ha	3.5%
佐 賀 Saga	100	1,947	1.9
長 崎 Nagasaki	226	722	0.3
大 分 Oita	407	16,380	4.0
熊 本 Kumamoto	422	3,279	0.8
宮 崎 Miyazaki	571	152	0.03
鹿児島 Kagoshima	555	509	0.09

※ $\text{Damage percentage} = \dfrac{\text{Damage areas}}{\text{Forest areas}} \times 100.$

熊本県産山，南小国両地域の被害分布と地形，林分条件との関係
被害類型別発生傾向
倒伏，折損現象の力学的解析

本報では，被害が特に激甚であった福岡，大分，熊本の3県を対象として，特に強風による森林被災についてマクロ，ミクロな地形条件，森林条件との関係の分析と単木の被害発生について力学的に解析を加えたところを内容としている．

2. 被災地近傍の風向，風速

台風17号と19号は前者で雨量がやや多かった他は，その経路はほぼ同じであった．また最大風速発生時における風速もほとんどの観測所で19号の方が大きく，その時の風向も近似していた（表3）．

表3 台風17号と19号の風向・風速比較
Table 3 Comparison of wind direction and wind velocity of typhoon 17 with typhoon 19 in Kyushu.

観測所 Observatory	最大風速 Maximum wind velocity				瞬間最大風速 Momentary maximum wind velocity			
	台風17号 Typhoon 17		台風19号 Typhoon 19		台風17号 Typhoon 17		台風19号 Typhoon 19	
	風速(m/s) Velocity	風向 Direction	風速(m/s)	風向	風速(m/s) Velocity	風向 Direction	風速(m/s)	風向
福岡 Fukuoka	23.3	NNW	18.3	NNW	40.8	NNW	44.6	WNW
飯塚 Iizuka	15.9	ENE	22.3	S	31.9	NW	48.3	SSE
熊本 Kumamoto	18.6	S	25.8	S	39.6	S	52.6	S
阿蘇山 Asosan	21.9	SSW	30.2	S	39.8	SSW	60.9	SW
牛深 Ushibuka	30.0	SE	27.0	SE	47.6	SE	52.1	SW
人吉 Hitoyoshi	14.0	SSW	21.1	SSW	29.5	S	48.8	SSE
大分 Oita	14.7	SSW	18.3	SSW	28.8	SSE	38.3	SSE
日田 Hita	15.0	S	16.7	SSW	34.3	S	44.4	SSW

そこで，以下の台風による強風と森林被害の分析は，台風19号の風向，風速のデータに基づいて行うこととした．

森林被害の原因となった強風の実態を分析するため，福岡，大分，熊本3県内の43観測所での台風の記録について検討した．

これらの観測所では毎正時前10分間の平均風速，風向が観測され，このうち8観測所で連続的に記録が行われている（図2）．

森林被害と強風との関係を解析するには，最大風速発生時前後のそれぞれの被害森林地帯における風向と最大風速を把握しておくことが必要である．

台風が九州南西部に接近した 9 月 27 日 09 時から，九州北西部をかすめながら日本海に抜けた 28 日 03 時の風向，風速を対象とした．

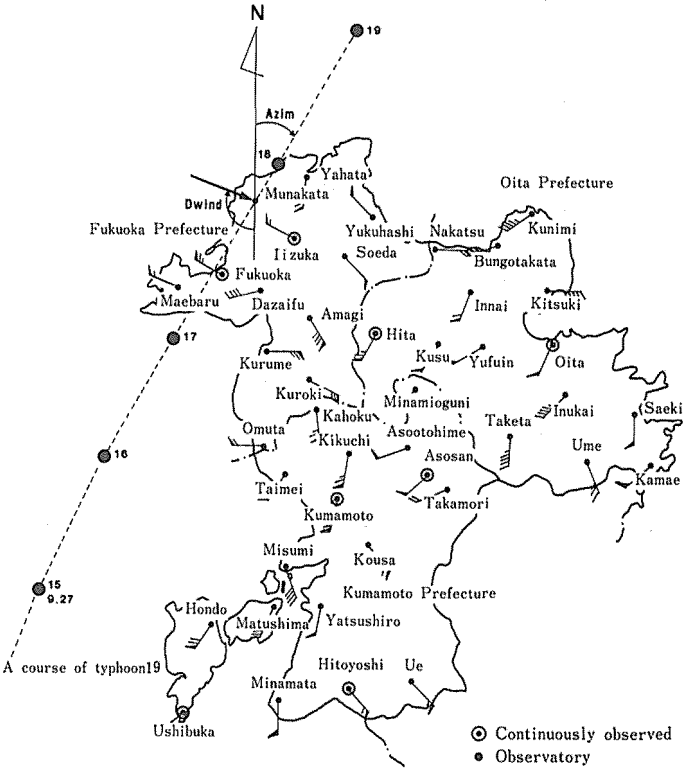

Fig. 2　Relationship between course of the typhonic center and wind direction under typhoon 19 and location of observatories.
図 2　台風位置と風向との関係と観測所の位置

2.1.　平均風速の推定

この時間帯内には，若干の欠測を生じた観測所があった．そこで，この欠測値を同じ時間帯の他の観測所の風速値によって推定することを試みた．

まず，欠測の発生した観測所のそれぞれで，発生時刻前後の時間帯で，観測値のある 2～3 時間帯を抽出する．それぞれの時間毎に，全観測所のデータによって等風速線図を描く．この際，実際には記録されている当該観測所の風速値が欠測であると仮定して線図の作成データから除外しておく．図 3 は宗像観測所の例で，同時刻の観測値を故意に除いた残りの他の観測所のデータによって作成されている．

つぎに，描かれたこの等風速線図から当該観測所位置の風速を読み取る．他の欠測を生じた観測所についてもこのような操作を行い，実際には存在しながら線図の作成のための

データからは除外されている当該観測所位置の風速値を，出来上がった線図から読み取っていく．

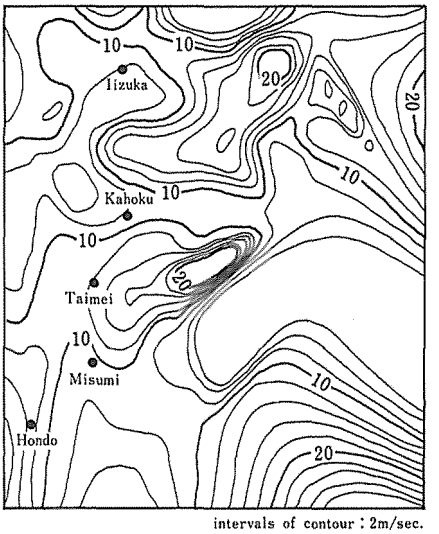

Fig. 3 The contour map of wind velocity (at 18:00 Sep. 27, 1991).
図3 等風速線図（1991年9月27日18時）

こうして読み取られた風速値（V_{read}）と先に除外したその観測所の実測風速値（V_{obs}）との関係を示すと図4のとおりで，両者の関係は次式で示される．

$$V_{obs} = 3.5 + 0.88 \times V_{read} \qquad (r = 0.66^{**})$$

この両者の関係が，実際に欠測値が出現した時間帯にも同様に成立するものと考える．欠測値のある時間帯の，他の観測所の実測データをもとに等風速線図を作成し，この図上で同観測所位置の風速を読み取る．読み取った風速値（V_{read}）を上の式に代入して得られる値を欠測定値の推定値とした．

なお，上の関係式は最大風速発生時近傍でのみ成立するもので，より弱風の時間帯には成立せず，別に両者の関係式を求めなければいけないことも明らかになった．

等風速線図は，地形図作成ソフト CONBIRD（センチュリリサーチセンタ株式会社）によって作成した．

2.2. 風向の測定

欠測風向については，その観測所の1時間毎の風向の変化の傾向から推定することも試みたが，欠測が頻発した最大風速発生時近傍で風向の変化が激しく，良好な推定が出来ないことが分かった．種々検討した結果，風向と台風位置との関係に着目した．

すなわち，最大風速発生時近傍の観測所における風向（D_{wind}）は，その時点の台風中心とその観測所を結ぶ線の方位角（A_{zim}）との間に高い相関関係が成立することが認め

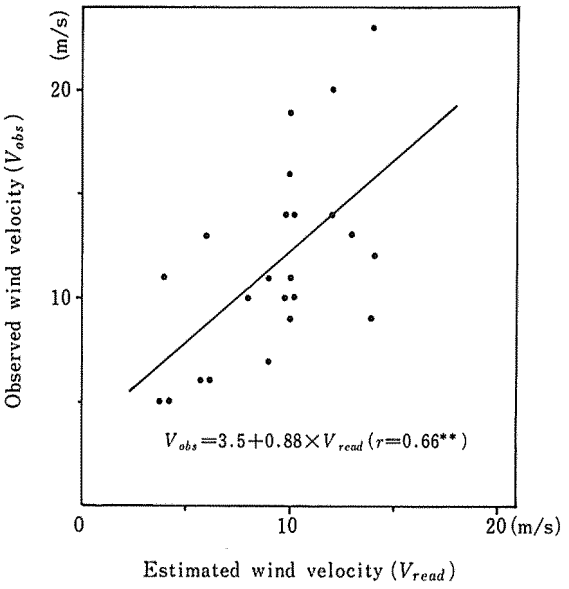

Fig. 4　Correlation between the wind velocity (V_{read}) estimated from contour map and the observed wind velocity (V_{obs}).
図4　等風速線図による風速推定

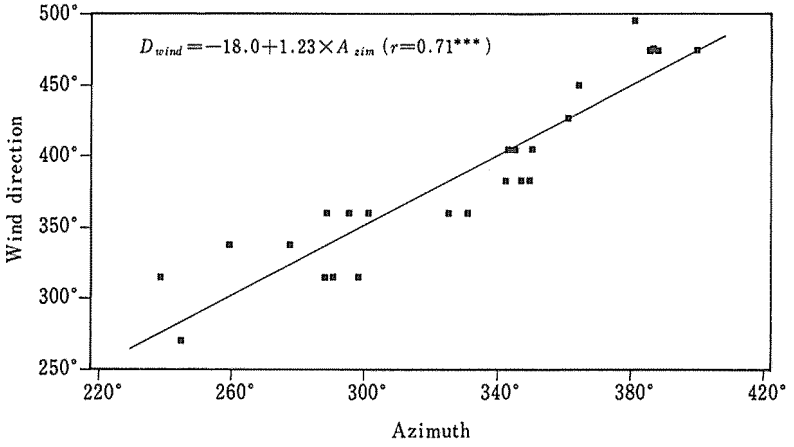

Fig. 5　Correlation between azimuth and wind direction.
図5　方位角と風向との関係

られた．43観測所の中，最大風速発生時の観測値があるものについて，風向と方位角との関係を調べたところ，図5のような関係を示した．両者の関係は次式で示される．

$$D_{wind} = -18.0 + 1.23 \times A_{zim} \qquad (r = 0.71^{***})$$

ただし，風向はSを0°として右回りの角度とし，風向，方位角とも0°～180°の場

合には360° を加えている．これは，0° の前後で両者の関係が不連続になる場合に，0° を360° と読み替えて両者の関係を連続したものにするためである．

2.3. 平均風速と瞬間最大風速との関係

実際の森林被害とより密接な関係を有するのは瞬間最大風速であろう．しかし，連続的に風速が観測されているのは，対象の3県内43観測所の中8観測所だけで，他は10分間の平均風速が観測されているだけである．そこで，実測されたこれらの観測所の値をもとに，残り35観測所の瞬間最大風速を推定することを試みた．

連続的に観測が行われている8観測所の，台風通過時間中（27日09時～28日03時）の風向，風速の記録紙を取り寄せ，各観測所に1時間毎の正時前10分間内の最大風速を読み取った．この値と正時前10分間の平均風速との関係を調べたところ，両者の間には高い相関関係があることが認められた．図6に飯塚観測所の例を示す．

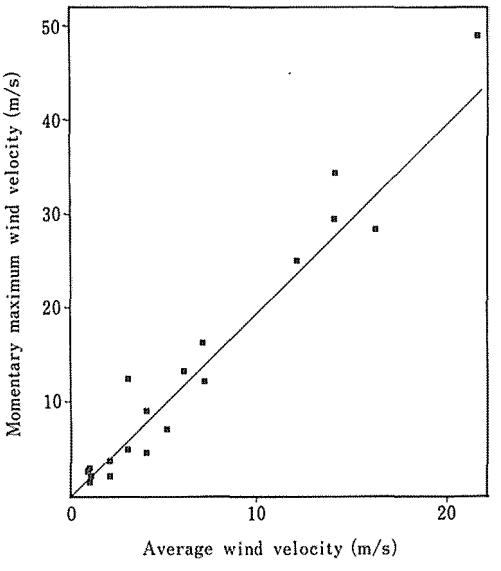

Fig. 6 Relationship between average wind velocity and momentary maximum velocity for 10 minutes before every hour at Iizuka observatory.
図6 正時前10分間平均風速と同瞬間最大風速（飯塚観測所）

図中の両者の関係を示す直線は，原点を通ると仮定してその傾き，すなわち最大風速の平均風速に対する比を求める．各観測所毎に同様の方法で求めた比を表4に示す．

従来，瞬間最大風速と平均風速の比は，1.5～2.5と言われており（正野，1960）（和達，1954），これらの観測所で得られた表中の平均値2.1という値は，ほぼ妥当な範囲にあると考えられる．

ただ，この平均値を一律に残りの35観測所の平均風速に乗じて，最大風速に換算するには，それぞれの観測所間の差異が大きいと考えられる．

そこで，周辺の他の 35 観測所の最大風速の推定に際しては，各観測所毎に 8 観測所の中からより直近の実測観測所 1 ～ 3 を抽出し，その間の距離，介在する山岳地の高低などを考慮して，それらの観測所の風速の比を決定した．この値を用いて，強風時間内の各観測所の平均風速を最大風速に換算した．

表 4　正時前 10 分間最大風速の同平均風速に対する比
Table 4　Relationship between average wind velocity and momentary maximum velocity for 10 minutes before every hour in Kyushu under typhoon 19.

観測所 Observatory	飯塚 Iizuka	福岡 Fukuoka	日田 Hita	大分 Oita	熊本 Kumamoto	阿蘇山 Asosan	人吉 Hitoyoshi	牛深 Ushibuka	平　均 Average
比 Rate	2.06	2.10	2.48	1.96	2.35	2.00	1.90	1.75	2.08±0.24

3.　森林被害分布と風速との関係

3 県内 197 市町村の森林被害率を表 5，森林被害分布を図 7 に示す．
県全体の被害率が高い福岡，大分県では 5 %以上もの高い被害率を示す市町村が多く，これに対し熊本県では被害率の小さな市町村が大半を占めていることが分かる．

図 8 はこれらの市町村の被害率の階層別の分布を示している．福岡，大分，熊本 3 県の県境地帯に強度の被害が集中し，これより北西側へ台風進路に近づくにつれて，また逆に南東側へこれから遠ざかるにつれて被害率が小さくなっていることが分かる．この被害率の高い地帯は台風の進路の右側，直線距離で 70 ～ 100 km に位置し，この時の風向は S ないし SW であった．

これらの被害発生に関与したと考えられる風速について考察を加える．
各市町村の被害発生時の風速を，43 観測所のうちそれぞれの市町村に最も近い観測所での風速値に等しいと見なして，これと被害発生傾向との関係を検討した．

表 5　3 県内市町村別森林被害状況
Table 5　Class distribution of forest damage at Fukuoka, Oita and Kumamoto prefectures under typhoon 19.

被害率階 Class of damage percentage	福岡 Fukuoka		大分 Oita		熊本 Kumamoto		全体 Total	
	箇所 No.	割合 Perc.	箇所 No.	割合 Perc.	箇所 No.	割合 Perc.	箇所 No.	割合 Perc.
～0.25%	7	9%	16	31%	24	34%	47	24%
～0.50	10	13	10	19	17	24	37	19
～1.00	9	12	6	12	13	18	28	14
～2.00	18	24	3	6	9	13	30	15
～5.00	17	23	5	10	7	10	29	15
5.01～	14	19	11	22	1	1	26	13
合　計 Total	75	100	51	100	71	100	197	100

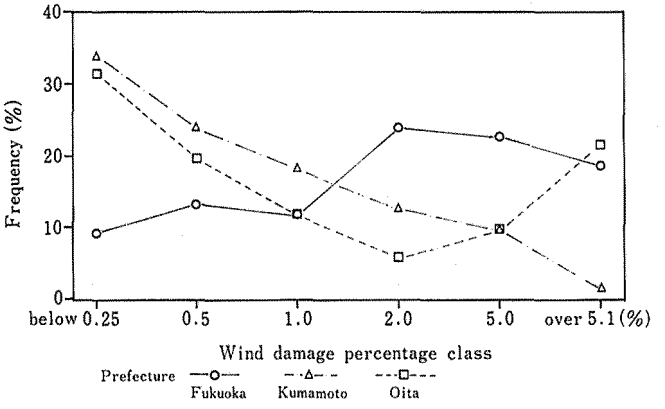

Fig. 7 Class distribution of forest damage percentage at Fukuoka, Oita and Kumamoto prefectures.
図7 3県の森林被害率階別分布

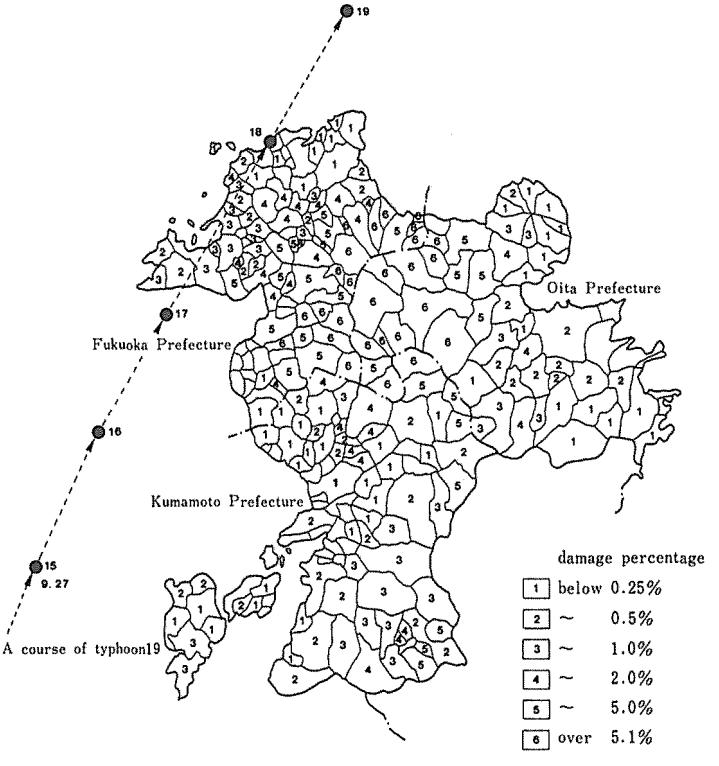

Fig. 8 Distribution of forest damage percentage of cities, towns, villages in Fukuoka, Oita and Kumamoto prefectures.
図8 3県内市町村別被害率分布

表 6　地域別瞬間最大風速

Table 6　Distribution of the estimated momentary maximum wind velocity in each hour at the observatories in Kyushu.

Observatory	Momentary maximum wind velocity (1991. 9. 27)											
	Am.10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Fukuoka Pre.												
Munakata	5	6	7	11	12	16	20	22	22	*30	*30	15
Yahata	4	6	5	6	8	12	12	*33	16	12	10	10
Yukuhasi	7	7	10	12	14	15	18	23	24	22	*28	15
Iizuka	6	5	8	9	12	15	26	28	20	*32	28	12
Maebaru	4	4	6	9	7	9	19	22	20	*32	*22	12
Fukuoka	4	6	8	12	12	16	22	26	19	*34	31	16
Dazaifu	2	4	4	6	5	6	10	18	*19	14	12	5
Soeda	4	6	8	9	12	15	23	27	20	*28	27	12
Amagi	9	11	10	9	10	19	26	*56	35	38	16	6
Kurume	6	8	6	7	8	13	20	*40	20	18	10	10
Kuroki	5	8	8	9	9	15	29	*40	24	18	17	10
Omuta	8	7	5	7	9	9	16	22	24	*29	20	11
Oita Pre.												
Kunimi	10	7	8	3	10	18	10	10	20	24	16	2
Nakatsu	11	12	12	18	19	24	26	*35	14	12	12	15
Bungotakata	12	10	12	12	20	20	20	25	30	30	34	16
Innai	3	5	4	9	9	5	14	19	*33	28	18	9
Kitsuki	8	5	8	4	16	14	14	18	17	*24	22	8
Hita	2	2	6	7	9	9	14	22	*37	30	25	12
Kusu	3	12	14	19	21	21	28	36	*42	28	38	21
Yufuin	6	11	7	9	9	12	10	12	18	*26	22	7
Oita	11	10	15	16	21	22	*26	*26	24	22	19	10
Inukai	7	8	11	9	15	16	18	19	20	*22	16	11
Taketa	6	6	7	7	10	10	8	*21	12	18	14	11
Ume	2	8	8	3	1	*9	8	8	*9	4	6	1
Saeki	7	10	8	9	12	14	12	16	18	*26	22	9
Kamae	15	16	12	21	24	21	18	22	22	*28	19	5
Kumamoto Pre.												
Kahoku	2	9	9	10	12	15	16	*38	26	20	22	12
Minamioguni	2	6	8	10	6	10	10	*18	*18	15	10	4
Taimei	6	8	8	10	12	20	27	*36	33	30	12	10
Kikuchi	4	9	11	12	10	14	23	*37	28	22	12	11
Asootohime	8	10	10	12	8	12	16	23	24	*28	20	12
Kumamoto	3	10	10	11	12	16	21	*42	30	25	16	13
Asosan	11	16	18	18	15	17	*28	*28	24	26	20	12
Takamori	*7	4	2	0	0	2	0	0	0	6	6	0
Misumi	2	6	8	10	6	10	10	*18	*18	15	10	4
Kousa	2	3	5	19	25	30	*33	31	18	19	10	8
Matsushima	7	9	10	11	16	21	20	*22	18	12	13	8
Hondo	12	13	4	21	27	36	*42	33	26	12	5	3
Yatsushiro	6	9	11	11	15	22	*28	*28	19	12	7	4
Minamata	6	10	8	10	17	17	22	*26	10	11	7	7
Hitoyoshi	14	16	18	18	21	*29	28	*29	18	11	8	14
Ue	17	17	18	22	22	31	28	*32	22	11	11	17
Ushibuka	20	18	26	33	33	34	*40	33	28	16	9	12

※　*：Maximum wind velocity.
　　_：Consecutive strong wind.

被害の発生に強い関係を持つ要因としては，まず瞬間最大風速が考えられる．この風速が倒伏や折損などの被害類型別の樹体の抵抗力，たとえば樹幹曲げ強度や根系部の倒伏抵抗の閾値を超したときに被害が発生すると思われる．

しかし，九州全体の被害傾向を見たとき，宮崎県など南部でかなり大きな瞬間最大風速が記録されたにもかかわらず被害はそれほど大きくなかったことが認められている．この地域は，台風の進路から遠く離れ，強風の継続時間が比較的短かったことが分かっている．

これに対して，強度の被害が発生した3県の県境付近は，長い時間にわたって強風が吹き続けている．表6は各観測所における，強風時間帯の最大風速である．

このように強風が長時間にわたって続くときは，樹木はある大きさ以上の力を波状的に繰り返し受けることになる．この場合，樹体には単純な静的曲げではなく，時時刻刻大きさの変化する応力が発生することになり，一種の疲労のような現象が加わることが容易に推測される．応力変動による木材の疲労現象に関しては，圧縮応力について実験的に確認されている（渡辺，1978）．すなわち，弾性域内のある一定応力でも，その繰り返し回数が 10^3 ～ 10^4 回位に達すると破壊強度が低下することが認められている．

そこで，各市町村別に風速のピーク時およびその前1，2時間とその後1時間の風速値を換算した累計風速値と被害率の関係を検討した．風速値はさきに求めた各観測所の瞬間最大風速値を用いた．

これによると，県によって相違はあるが，最大風速値のみとの関係よりは，ピーク時とその前1，2時間およびピーク後の1時間の中の3時間平均最大風速が，被害発生率の上限値との間に高い関係を示すことが分かった（図9）．同図からは，また風速がかなり小

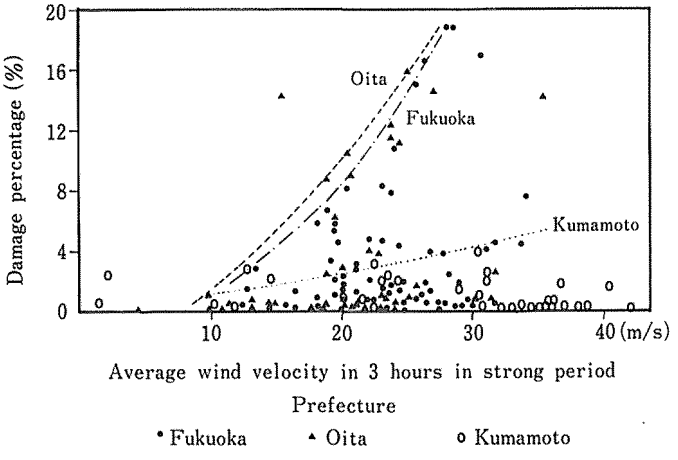

Fig. 9 Relationship between maximum wind velocity (average wind velocity in 3 hours in strong period) and forest damage percentage.
図9 最大風速（強風時間帯内3時間平均）と被害率

さい場合にも被害が発生し，強風継続3時間の平均限界風速は10m/s程度であることが分かる．後述の被害の力学的分析によると折損時の瞬間風速の最小値が約20m/s以下となることが明らかになる．要するに，被害の発生に関わる最小風速はかなり低いものと考えられる．

また，マクロな地形との関係では，たとえば福岡と大分の県境に位置する1000m級の高い山地では，最大風速時の風向に正対する前面の市町村とともに，その裏側斜面の市町村でも強度の被害が発生していることが先の図からもうかがわれる．

よりミクロな地形との関係については次節で触れる．

4.　熊本県産山，南小国両地域の被害分布と地形，林分条件との関係

地形によって森林被害がどのような発生傾向を示すかについて，熊本県でも高い被害率を示した阿蘇郡産山村と南小国町を対象にして若干の解析を行った．

県では，被害発生の実態を把握するために，山林所有者の個別の森林毎に被害区域面積，被害率，樹種，樹齢などの事項に関する調査を行っている．また，個々の被害箇所を森林基本図（縮尺　5000分の1）に挿入している．

これらの資料をもとに，斜面方位，標高，斜面内位置，斜面傾斜などの地形要因と樹種，樹齢などの林分条件によって森林被害の発生がどのような影響を受けているかについて検討することとした．

まず，森林基本図上で全被害林分箇所毎に前記4地形要因を読み取った．
各項目の読み取りは，斜面方位－16方位，標高－5m階，斜面内位置－尾根・上部・中腹・下部・谷・全体，斜面傾斜－等高線間隔から換算した傾斜角（°）などである．

つぎに，母集団である全地域の各要因の分布状態を把握するために，同基本図に5cm（実長250m）の正方形格子を挿入し，その格子点について同じ項目の計測を行った．なお，格子点の斜面方位については，全点を無作意に4グループに分かちながら計測し，その後各グループ間で分布状態を比較し，全グループともほぼ8方位に均等に分布していると見なしても差し支えないと判定した．図10(a)(b)は両地域の全格子点の斜面方位別の出現頻度を示している．

それぞれの項目毎に，被害林地と標準点（母集団）の階層別出現頻度を求め，次式で求めた指標値によって，被害発生の傾向を検討することとした．ただし，各要因階は，斜面方位－8方位，標高－50m，斜面内位置－上部・中腹・下部，斜面傾斜角－5°とした．

要因階相互間の被害発生度合の大小は，それぞれの要因階の母集団の大きさを同じにして比較することによって，初めて正しい傾向をうかがい知ることが出来る．

ここでは，次式で表される「発生比」を計算してこれを求めた（中尾，1974）．

$$\text{発生比} = \frac{\text{ある階層に属する被害林地の面積／全被害林地の面積}}{\text{その階層に属する母集団の面積／全母集団の面積}}$$

上記4地形要因別の，被害林地と母集団の各階層別出現頻度と発生比を求めた．

4要因やその他の要因も含めた統計的分析については，相互の関わり合も包含した多変量解析を行うべきであるが，今回は個々の要因について発生傾向を検討するにとどめる．

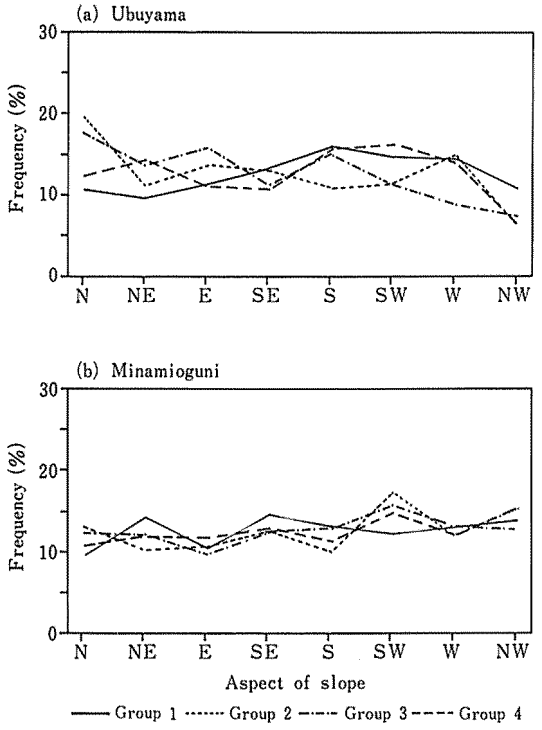

Fig. 10 Frequency distribution of aspect of slope by random sampling method in the target areas.
図 10 無作意抽出による斜面方位別出現頻度

4.1. 斜面方位（図 11）

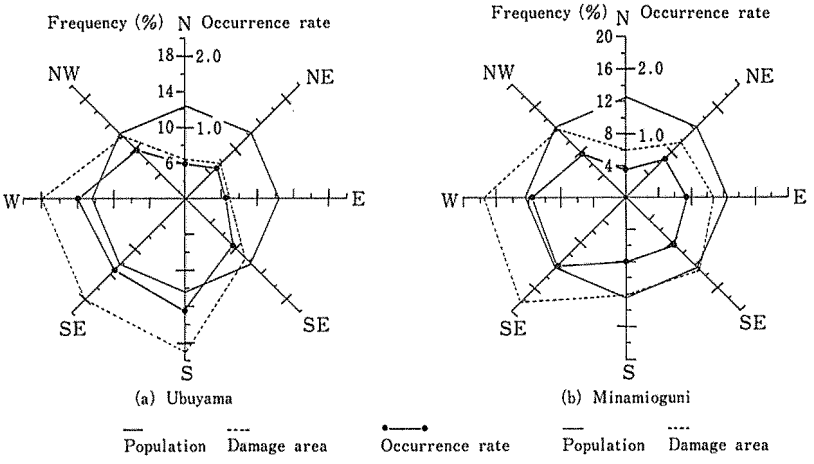

Fig. 11 Frequency distribution of forest damage percentage and aspect of slope.
図 11 斜面方位別被害発生傾向

8 方向の斜面が均等に分布する母集団に対して，この母集団の中に発生した被害林地は，産山村で SW を中心に，W，S の斜面に，南小国町で W，SW，SE の斜面に偏在している．

産山村では，この 3 方位の斜面だけに全被害林地の 55 %が，南小国町でも 36 %が集中している．この傾向を発生比で見ると，これらの斜面では約 2.0 に近い値となっており，平均発生率の 2 倍に近い発生強度となったことを示している．

この両地域にもっとも近い観測所である No. 31 阿蘇乙姫（推定値），No. 33 阿蘇山での最大風速発生時間帯の風向を調べるといずれも SW となっており，この風向に正対した斜面上の森林に被害が偏って発生したことが容易に推察される．

産山村の被害木の方向はいくつかの例外は見られたが，多くは E，NE であった．ただ，産山村でも南小国町でも強風に正対する斜面の後背に成立している森林もかなりの被害が発生していることも観察され，正対斜面を吹き登った風の後背斜面への吹きおろしの作用がうかがわれる．

4.2.　標高（図 12）

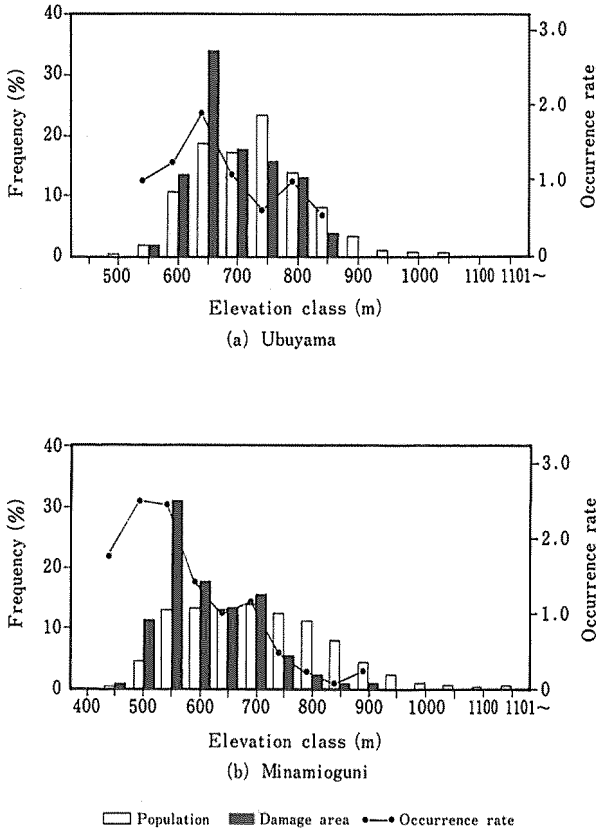

Fig. 12　Frequency distribution of forest damage percentage and elevation class.
図 12　標高別被害発生傾向

いずれの地域も森林地帯は，500～1000m 位の標高範囲に分布している．

産山村では 600～650m 階に 34 %の被害林が集中し，発生比は 1.8 となっている．また，南小国町では 450～600m の 3 階層に全被害林の 6 割が集中発生し，発生比は 2.0 に近い値となっている．両地域とも，750m 以上の森林では発生比が小さくなっている．比較的低い標高階で多発していることが認められる．

4.3. 斜面内位置（図 13）

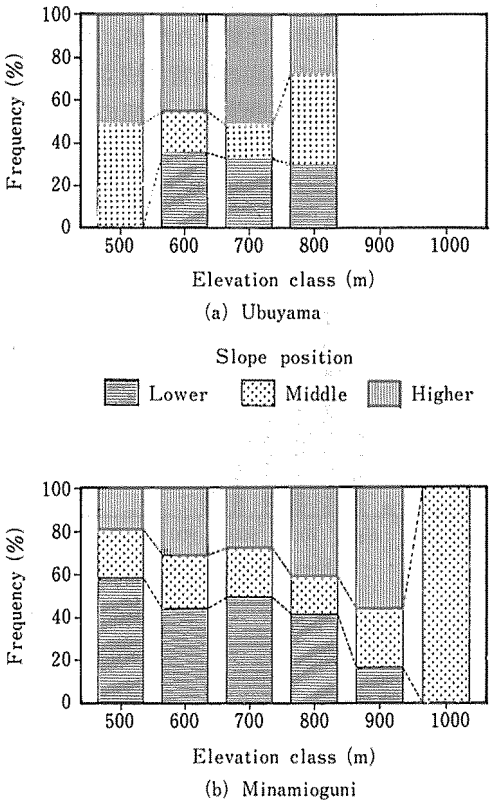

Fig. 13 Frequency distribution of forest damage percentage and position on the slope.

図 13 斜面内位置と被害発生傾向

全林地の斜面内位置は，上部，中部，下部すべてが均等に分布するものと仮定した．

産山村では全体の 9 割以上の被害が集中する 600～800m 階で，斜面下部で中部，上部に比べて高い発生傾向を示している．この傾向は，場所の異なる数カ所での現地調査においても，感覚的には認められていたことであった．風衝地の斜面上部や尾根筋付近と同様，斜面下部や谷筋で被害が発生し易いことが分かった．

この理由については，斜面下部の比較的湿潤な土壌層では樹木根系の発達が進まず，倒

伏，湾曲などの被害が生じ易いなど，生育の場による樹木の強風に対する抵抗性の違いなど樹体制の要因および，谷沿いの長い林帯での被害が多発していることから，風向と一致した谷における風の収束による風速の増大を原因とする考えもある．今後の詳細な現地調査，分析に待ちたい．

ただ，広い斜面内の比較的均一の条件の森林で，中央部分の一部のみに被害が発生し，その周辺部は健全に見える林分が頻度高く見られるが，この現象については，通常の風の吹き方では説明は難しいようである．

4.4. 傾斜（図 14）

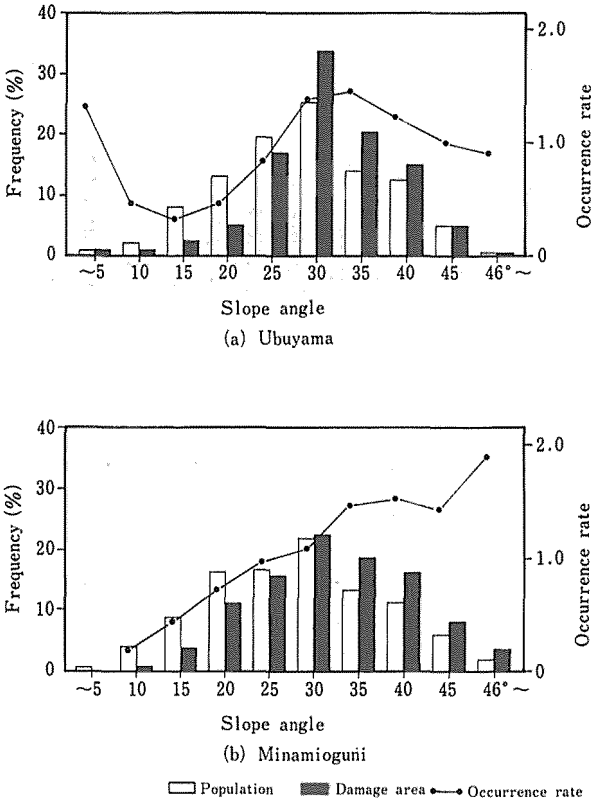

Fig. 14　Frequency distribution of forest damage percentage and slope angle.

図 14　傾斜階別被害発生傾向

産山村で 25° 以上，南小国町で 30° 以上の急傾斜地では，それより緩い斜面の林地より顕著に発生比が高く，前者で 1.3，後者で 1.4 となっている．急傾斜地での樹木根系の伸長の仕方などとの関係などもうかがわれるが，他の要因と同様，今後の要因相互の多変量による解析が必要と思われる．

4.5. 樹齢（図 15）

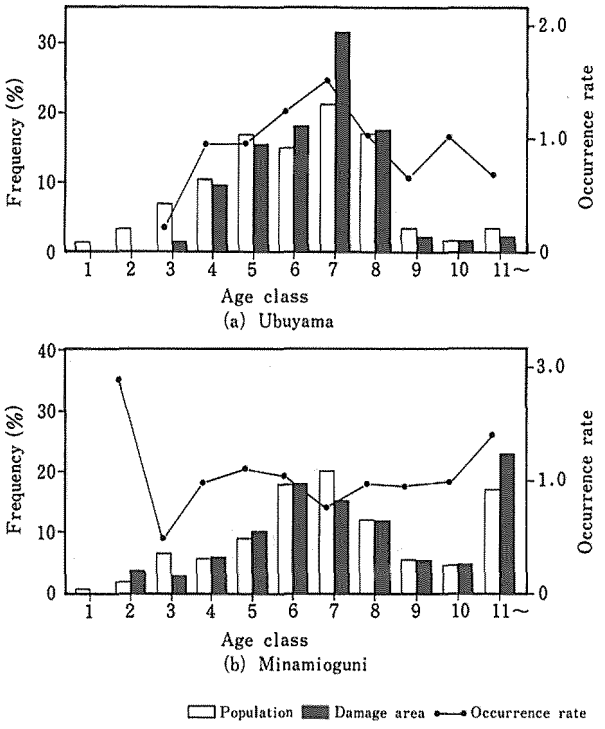

Fig. 15 Frequency distribution of forest damage percentage and age class.
図 15 齢級別被害発生傾向

産山村では，被害はほとんど 6～8 齢級（26～40 年生）に集中して，それより高齢級では平均的に，若齢級では僅かしか被害は起こっていない．これに対して，南小国町では，4～6 齢級（16～30 年生）で僅かに平均より高く，むしろ 11 齢級（51 年生）以上の高齢の林分で高い発生比となっている（図 16）．

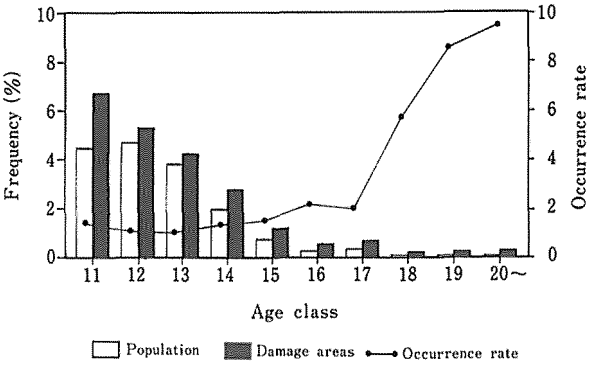

Fig. 16 Frequency distribution of forest damage percentage and age class (Japanese cedar) in Minamioguni.
図 16 齢級別被害発生傾向（スギ，南小国）

これは，南小国町の場合，高齢級のスギ林が多く，その階層に被害が高い割合で発生していることによると考えられる．

5.　被害類型別発生傾向

強風によって発生する立木の被害類型は，従来の調査例など（坂口ら，1965）をまとめると表7のように多くの種類に分別されるが，概略倒伏，湾曲，折損の3種に大別される．

表7　被害類型
Table 7　Type of wind damage.

部位 Part		被害類型 Type of wind damage
梢 Tree-top		梢折れ
樹幹 Stem	外観 内部	折損，割裂，湾曲，傾き，倒伏 年輪離れ，繊維切断
枝 Branch		枝折れ
葉 Leaf		破損，変色

それぞれの被害類型の発現には，地形，土・地質や風の要因を除くと，森林の条件ー樹種，樹齢，立木密度，隣接林分条件，樹形（樹冠形，樹幹形），樹幹や根系の力学的性質などが関与していることが推測される．

被害の形態と樹木の形質との関係を調べるために現地調査を行った．
調査は，福岡県久山町，小石原村，星野村，大分県日田市，耶馬渓町で行った．調査木は，スギ，ヒノキ，広葉樹など計113本で，調査項目は次のとおりである．

樹種，品種
樹高，胸高直径，枝下高，樹冠幅（風向方向，直角方向）
被害類型（倒伏，湾曲，折損）
　倒伏木：方向，根系幅（風向方向，直角方向），根系深
　折損木：方向，折損高，折損直径
　湾曲木：方向，形状
斜面方位，傾斜

また，樹形などと被害の発生傾向を分析するために，樹形諸元を基に求めた指標値はつぎのとおりである．

枝下率：枝下高／樹高
樹冠側面積：（樹冠幅×（樹高－枝下高）／2）
形状比：樹高（m）／胸高直径（cm）
相対折損直径：折損直径／胸高直径
相対折損高：折損高／樹高

樹冠長率：（樹高－枝下高）／樹高
以下の分析は，広葉樹を除いたスギ，ヒノキの針葉樹を対象に行った．

5.1. 被害類型と胸高直径，樹高（図 17）

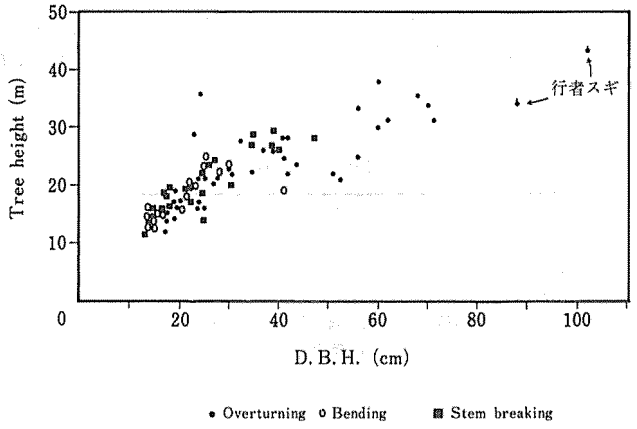

Fig. 17 Relationship between D.B.H. and tree height in every damage type.
図 17 被害類型別胸高直径と樹高

図は類型別の被害木の胸高直径と樹高の関係を示している．

倒伏木は直径と樹高が比例関係を示しながら，小径木から大径木まで広い範囲にわたって分布するのに対し，湾曲木は同じく比例関係を示しながらも，ある樹高，胸高直径以下の樹木に発生している．また，折損木も同様の傾向を示しながら，湾曲木よりやや広い範囲に分布している．

現地調査で，倒伏は針葉樹では単木的に発生するのに対し，広葉樹では齢級の進んだ疎開したシオジ林などでは単木的に，またアラカシその他密生した林では，2，3本が一緒に倒れるなど針葉樹とは異なった状況が観察された．

成立の場の条件に関連しても，幼稚樹の時代から強風を受けることの多い風衝地と，育成後に伐採や道路開設によって，周辺の林分が急に疎開を受けて林縁木になった樹木では，異なった結果となっているところもみられるなど複雑である．

図中の●印は 300 年生以上のスギ（福岡県小石原村の行者スギ）の倒伏被害木を示している．

5.2. 被害類型と枝下率，樹冠側面積（図 18）

図は被害類型別の枝下率と樹冠側面積との関係を示している．

湾曲木と折損木が比較的樹冠側面積の小さな範囲に分布しているのに対し，倒伏木は僅かに小さな枝下率，すなわちより大きな樹冠側面積の範囲に分布しており，風圧力が大きく，風心高が低くなることが示唆される．

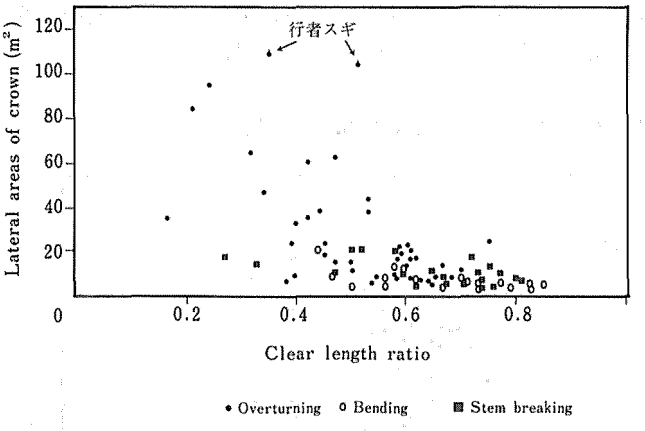

Fig. 18　Relationship between clear length ratio and lateral areas of crown in every damage type.
図18　被害類型別枝下率と樹冠側面積

5.3.　形状比と樹冠側面積（図19）

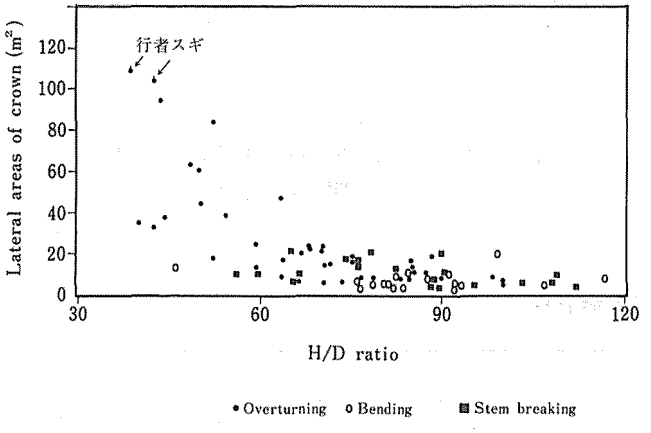

Fig. 19　Relationship between H/D ratio (tree height-to-diameter ratio) and lateral areas of crown in every damage type.
図19　被害類型別形状比と樹冠側面積

湾曲木と折損木が形状比の大きさに関係なく樹冠側面積の小さな樹木に発生しているのに対し，倒伏は形状比の小さな樹木，すなわち樹高に対して直径の大きな，樹冠側面積も大きな樹木で発生していることが分かる．大きな風圧力でも樹幹の途中で曲げ崩壊を発生しにくい樹幹形となっており，折損を発生する前に風圧による倒伏モーメントが地下の根系部の倒伏抵抗力を越えたものと推察される．

この点については，風圧，樹冠側面積，根系部寸法などをもとに被害類型別に力学的な解析を加えていくこととする．

倒伏と折損に関しては，樹齢，樹冠条件，根系の発達状態（谷筋の湿潤地と斜面上部の乾燥箇所）などが複雑に影響を及ぼしているものと思われる．

5.4. 胸高直径と枝下高，樹高，相対折損高（図 20）

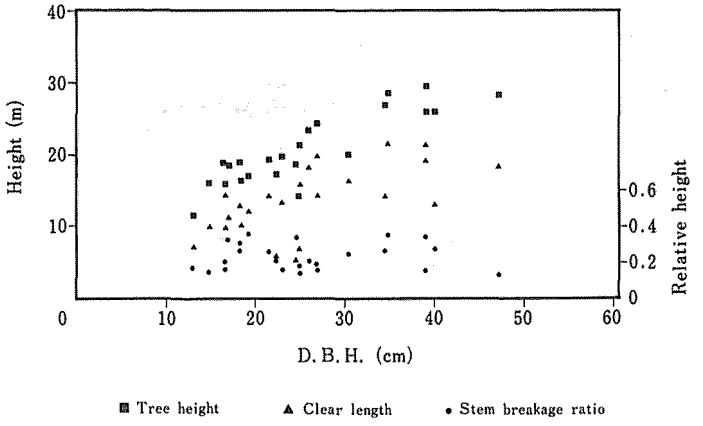

Fig. 20 Relationship between D.B.H and tree height, clear length, breakage height(*Hb*)ratio (*Hb/H*) on the stem breakage tree.
図 20 胸高直径と樹高・枝下高・相対折損高（*Hb/H*）

図は折損被害木の樹形と折損の生じる高さとの関係を示している．胸高直径が大きくなるにつれて，樹高，枝下高が増大するが，折損高の変化はそれほど大きくない．

樹高，枝下高すなわち，樹冠長の大小に関わらず，樹高の 2 分の 1 より下 10 分の 1 という，ほとんど根元付近で折れたものまでが見られる．

5.5. 胸高直径と樹冠長率（図 21）

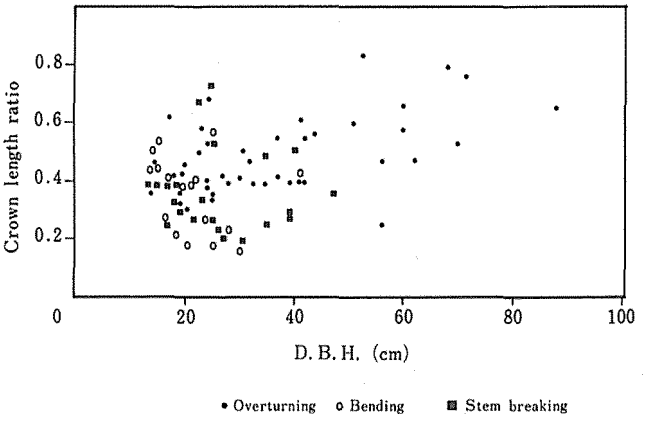

Fig. 21 Relationship between D.B.H. and crown length ratio in every damage type.
図 21 被害類型別胸高直径と樹冠長率

樹高に対して樹冠が長いものほど，倒伏被害が生じ易いことがうかがわれる．これに対して，湾曲は樹冠長が樹高に対して小さい木に発生し易く，折損はその中間くらいの樹冠長の樹木に生じ易い傾向があることが分かる．

湾曲，折損がある大きさ以下の樹木に発生するのに対し，胸高直径がある程度以上になると倒伏しか発生しない傾向がうかがわれる．

5.6.　形状比と相対形状比（図 22）

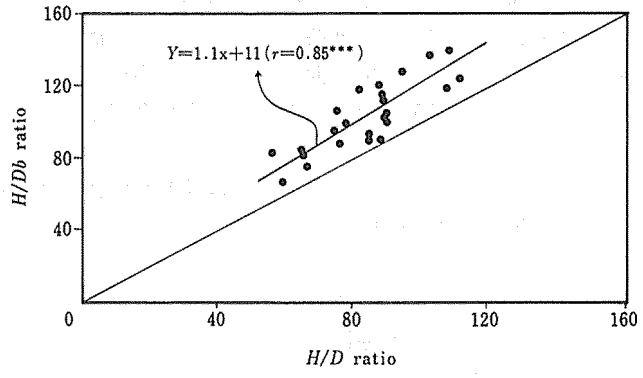

Fig. 22　Relationship between *H/D* ratio and *H/Db* (diameter at stem breakage height) ratio.
図 22　形状比（*H/D*）と相対形状比（*H/Db*）

図は胸高直径と折損直径を基にした形状比の関係を示している．両者の関係は 1 対 1 の関係を示す直線より一定間隔，形状比でほぼ 20 位高い位置で平行な直線関係を示している．このことは樹幹の直径が胸高直径に対してほぼ一定の割合になる位置で折損が生じることを示している．

5.7.　樹高と相対直径（折損直径／胸高直径）（図 23）

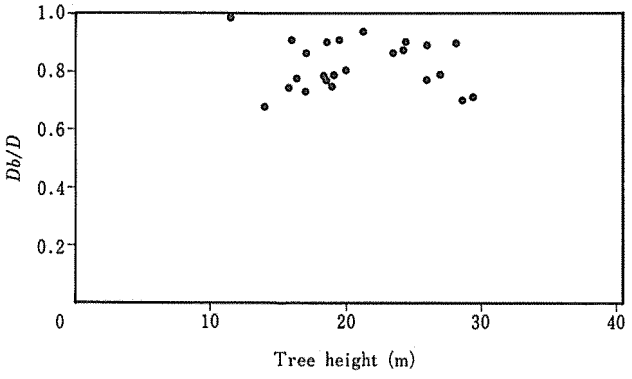

Fig. 23　Relationship between tree height and *Db/D* ratio.
図 23　樹高（*H*）と相対直径（*Db/D*）

前項の関係を図で見直すと，折損は樹高の大小に関わらず，胸高直径の1／（1.05～1.50）の直径の樹幹部で発生していることがうかがわれる．

6. 倒伏，折損現象の力学的解析

樹木の被害類型は，先述のように大略折損，湾曲，倒伏に分かれる．
同一樹種，同一樹齢からなる林分では，同時にそれらの中の2ないし3種の被害が発生することはなく，ほとんどの場合いずれか1つの被害類型が発生しているのが認められた．

これは樹種，品種，樹齢，立木密度，立地条件で異なってくる樹木の力学的性質，たとえば，その材質と樹幹形で決まる曲げ強度，曲げヤング率と樹形，たとえば樹冠形と根系の広がり，土層の深さ，局所の地形条件などによって被害類型が定められることによると考えられる．

とくに，スギではたわんでしなり易いヤブクグリ系は湾曲や倒伏が多く観察された（台風19号等災害復旧対策調査委員会，1992）のに対し，クモトオシでは，折損が多発していることなど，品種によって顕著な差異が認められる場合がある．

これはヤブクグリの縦圧縮ヤング率が，クモトオシの約2分の1であること（小田，1990）など，品種間の力学的性質の相違が原因の一つとなっていると考えられる．

これらの被害類型別の力学的解析を行うとともに，逆にそれらの被害発生の瞬間の風速，根系の倒伏抵抗モーメントを推察することを試みた．

倒伏，折損のメカニズムの検証に用いた被害木は，5．で得た調査木の中のスギである．

6.1. 折損

折損現象の力学的機構については，単純に静的な風圧力による曲げ破壊では説明できず，樹冠形の非対称などに起因する捻れモーメントによる応力の増加，風の息と強風の長時間継続で生じるであろう木材の疲労現象の付加（渡辺，1978）などが推測される．

事実，被害木を観察すると，残存部に縦方向の割れを生じたもの，捻りせん断によって軸に直角の面で捻切られたようなものや，樹体の風下側で圧縮破壊を生じた痕跡であるもめが縦方向に広く分布するものなどが見られた．

ここでは，強風の風圧が樹冠に静的に加わったと仮定して，とくに折損の生じる高さについて詳細に検討することとする．

まず直立木が強風を受ける初期の段階から，たわんで樹体が変形した状態について考察を加えることとする．

直立樹木が強風を受けると，主として樹冠部でこれを受けることによって，樹幹の各部で曲げモーメントによる曲げ応力が発生する．

この時の任意高さの曲げ応力（縁応力）は次式で求められる．

$$\sigma_x = (M_x / Z) \quad 10^{-4} \qquad (1)$$

(1)式に次の各項を代入すれば，(2)式を得る．

$$M_x = (L - x)$$

$$Z = \pi D_x^3 / 32$$
$$D_x = D(H-x) / H$$
$$D = HD_{bh} / (H-1.2)$$
$$\sigma_x = \{32H^3F(L-x) / \pi D^3(H-x)^3\} \times 10^{-4} \qquad (2)$$

ここで，σ_x：任意高さの曲げ破壊係数（kgf/cm²）
M_x：同上位置の曲げモーメント（kgf・m）
Z：断面係数（m³）
F：風圧力（kgf）
H：樹高（m）
L：風心高（m）
x：高さ（m）
D_x：高さxにおける樹幹直径（m）
D：根元直径（m）
D_{bh}：胸高直径（m）　である．

(2)式で，$\alpha = L / H$，$\beta = x / H$と置き換えると，

$$\sigma_X = \{32HF(\alpha-\beta) / D^3(1-\beta)^3\} \times 10^{-4} \qquad (3)$$ となる．

$\rho = (\alpha-\beta) / (1-\beta)^3$　　$(1 > \alpha > \beta \geqq 0)$ とおいて，

ρが最大，すなわちσ_xが最大となる点を求める．

$\partial\rho / \partial\beta = (-1 + 3\alpha-2\beta) = 0$ より，

$\beta = (3\alpha-1) / 2$　を得る．

このことから，　$= L/H > 1/3$　の時は，$\beta = (3\alpha-1) / 2$　　(4)　の位置で，
　　$= L/H \leqq 1/3$　の時は，$x = 0$　　(5)　の位置，すなわち根元で最大の応力を発生することになる（森岡，1991）．

なお，(4)式は次のように枝下高（C_L(m)）の樹高に対する比を示している．

$$L = C_L + (H-C_L) / 3$$
$$C_L = (3L-H) / 2$$
$$\therefore C_L/H = (3L-H) / 2H = (3\alpha-1) / 2$$

折損を発生するのは，σ_xがその樹木の曲げ強度σ_b（kgf/cm²）に達した場合である．σ_bとしては，無欠点気乾材スギの強度（650kfg/cm²）を基に，立木時の高含水率と節などの欠点を考慮して，その50％の値を採用した．

図24は被害現場で実測したスギ折損木のβ_{obs}と上式で求めたβ_{cal}を示している．β_{cal}は0.9～0.5となっているのに対して，β_{obs}は0.4～0.1となっており，計算値は明らかに過大な値を示していることが分かる．

樹幹形はここで仮定した円錐形を中心に，完満なものからうらごけのものまでさまざまな形状のものがあり，それによって折損高も影響を受けるであろうことが推測される．しかし，樹幹形の微妙な差異とともに，受風後の樹体のたわみによる風圧の変化と受風高の低下，さらにたわんだ樹幹と樹冠重量による偏心モーメントが加わることによって，さらに荷重の重心が下がることも併せて考えるべきであろう．

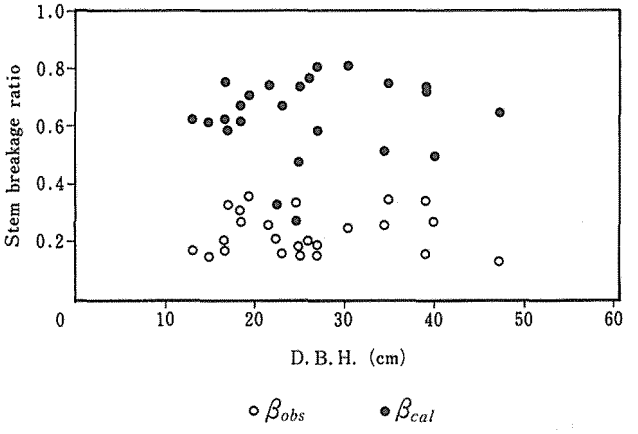

Fig. 24 Relationship between D.B.H. and ovserved and estimated breakage heights.
図 24 胸高直径と相対折損高の実測値と計算値

図 25 は折損木の破壊発生箇所で，その木の曲げ破壊係数に等しい曲げ応力が発生したと仮定した場合の，樹冠と樹幹の重量による偏心モーメントが作用している状態を示している．

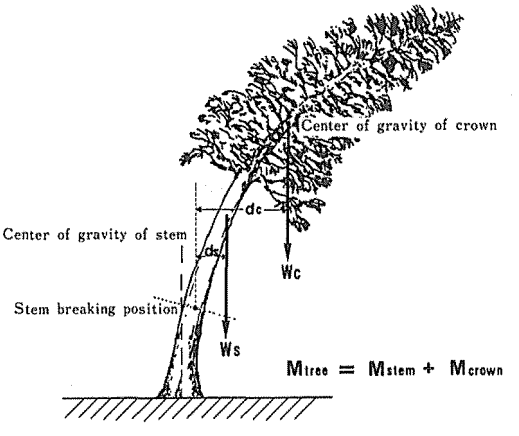

Fig. 25 Eccentric moment generated by transformation of tree form.
図 25 樹体の変形による偏心モーメント

樹体のたわみは，簡単のために樹体をより完満な等強度円形断面片持ちハリと仮定し，式中の曲げヤング率は無欠点気乾材の 75 %の値を用いた．

任意高さの樹体のたわみとたわみ角は次式で求められる．

$$i = (3\sigma_b / E_b D)\,(L^{0.33}x'^{1.66} - L)$$

$$y = (3\sigma_b / E_b D)\,(0.6L^{0.33}x'^{1.66} - Lx' + 0.4L^2)$$

ただし，i：たわみ角の正接（tan）

y：たわみ量（m）

E_b：曲げヤング率（kgf/cm^2）

x'：風心位置を原点とする樹幹下向きの距離（m）

実際には，曲げによる破壊が発生する時点では，すでに比例限度を超えており，E_b を用いることは問題があるが，大略の傾向を見るためにそのままの値を用いている．

図 26 は実際に折損を生じた木の破壊発生箇所で，その木の破壊係数に等しい曲げ応力

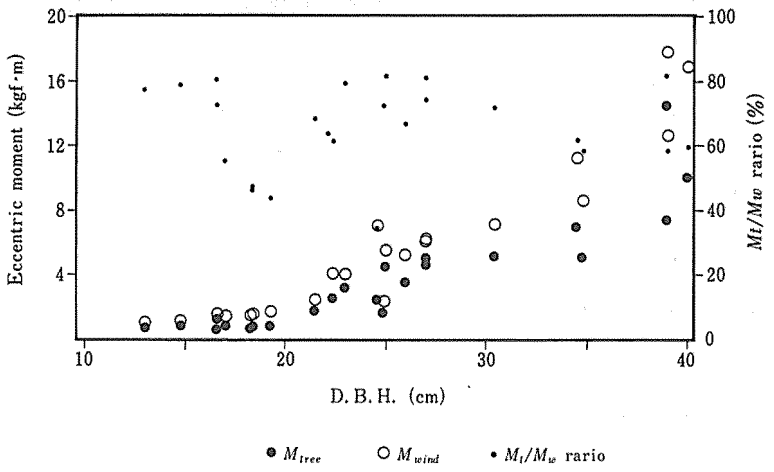

Fig. 26　Relationship between D.B.H. and eccentric moment at the stem base.
図 26　胸高直径と地際モーメント

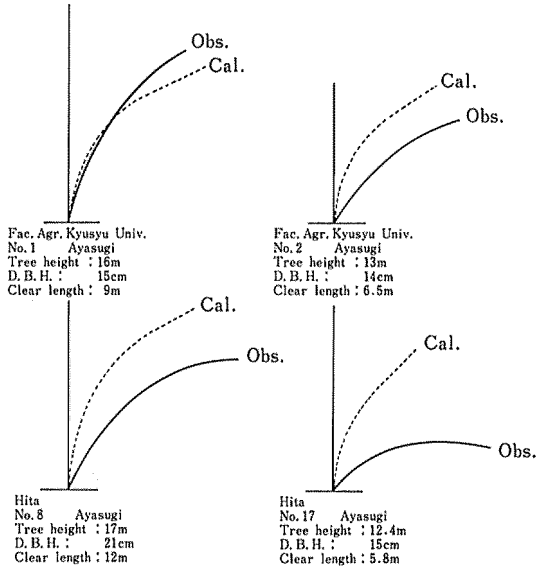

Fig. 27　Transformation of tree bent by strong wind (observed).
図 27　湾曲木の樹体の変形

が発生したと仮定した場合の，樹冠と樹幹の重量（汰木，1964）による地際の偏心モーメントと風圧による地際のモーメントを示している．樹体の変形による偏心モーメントは，直立時の風圧モーメントの 40～80％以上にも達していることが分かる．

胸高直径 20cm 以下の 25～30 年生位の樹木では，かなり大きな外力が加わっていることになる．したがって，風圧が直立した樹体に大きなたわみを生じせしめた場合には，樹体の自重が加算され，破壊が発生し易くなったと考えられる．

破壊発生時近傍の樹体の形状は，各部分のたわみ量と，風心位置のたわみ傾斜角で見るように大きく湾曲している．この形状は現地調査で目撃されたスギ湾曲木の形状と類似している．図 27 に実測した湾曲木の形状と，この樹体に曲げ破壊が発生したと仮定した場合の破壊直前の変形状態を推測した結果を示す．

つぎに，破壊箇所の曲げモーメントから樹冠部に作用している風圧力を逆算し，風速を次式から求めることが出来る．ただし，樹木の抵抗係数は正確な値は求め難いので，風洞実験（游，1985）で得られた値，その他（陶山ら，1991）を参考にしている．

$$v = \sqrt{2F / C_D \rho A}$$

ただし，F：風圧力（kgf）
v：風速（m/s）
C_D：抵抗係数（0.5）
ρ：空気密度（0.125kgf・s^2/m^4）
A：樹冠側面積（m^2）　である．

図 28 は胸高直径と風速の関係を示している．樹木が大きくなるにつれて折損時の風速は直線的に大きくなり，胸高直径が 10cm 近くなると 20m/s 以下の風で被害が生じるこ

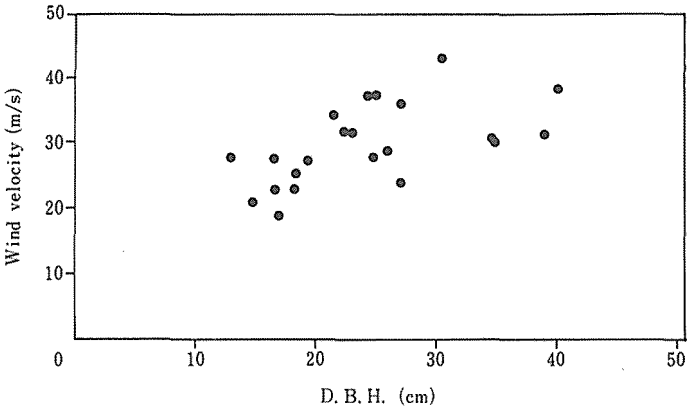

Fig. 28 Relationship between D.B.H. and wind velocity on the stem breakage tree (Japanese cedar).
図 28 胸高直径と風速（折損木）

とが分かった．

この最小風速の値は，瞬間の風によって破壊が発生したと考えて算出したものであり，先の市町村の森林被害率と最大風速との関係分析で明らかになった，被害発生の最小限界風速（3時間平均）10m/sよりはかなり大き目の値となっている．

折損の主要な原因となる風圧力の荷載を静的な状態であると仮定したことがこの差異の一因ではないかと推測される．

6.2. 倒伏

倒伏現象の力学的機構は，樹冠部で受ける風圧力による地際におけるモーメントと根系部の根鉢の抵抗力との関係で説明されよう．

ここでは根鉢の倒伏抵抗力として，根鉢の土と根系の合計重量による，風下側根鉢端部を支点とする回転モーメント抵抗と考える場合（図29(a)）と，根鉢部を円筒体と考え，

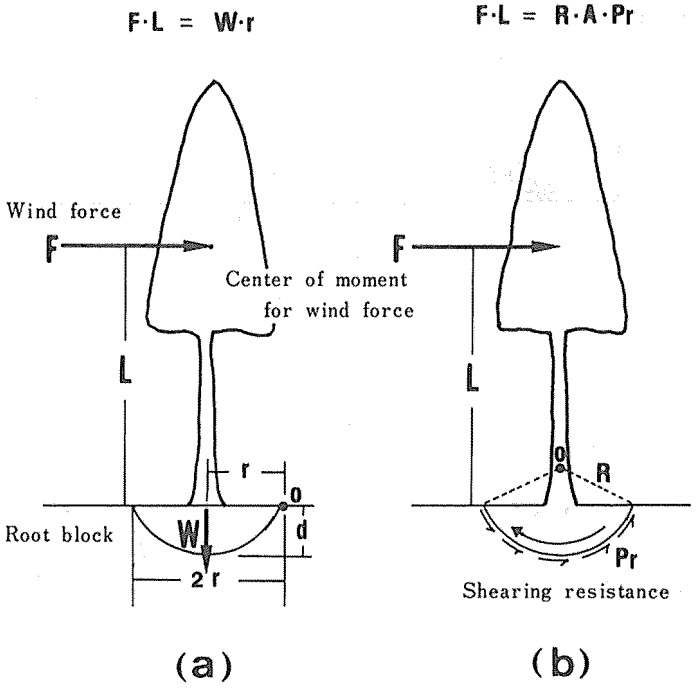

Fig. 29　Resisting mechanism for overturn.
図29　倒伏抵抗力

その下方の根系辺縁部のせん断抵抗力の，この円筒の中心に関するモーメント抵抗と考える場合（図29(b)）の2とおりについて考察を加えてみた．

これは現地調査において，倒伏した樹木の根系部が風下側端部に乗っているものや根鉢の内部に横たわっているものなど，様々に異なった倒伏の状態を呈していることが観察されたことによった．

6.2.1. 根鉢部土塊による倒伏抵抗

土の湿潤単位体積重量は，林道切取りのり面のヒノキ伐根周辺で実測した値 1.5kg/m^3 とした．また，倒伏木の根系に至るまでの揺動などによって根系辺縁部の土が離脱し，大径の根系が裸出していることから，実際に計測した根鉢の大きさより 10 %程度実測寸法より小さ目に見込んだ．

根鉢部を球体の一部と見なして体積を計算し重量を求めた．根鉢部の転倒の支点を根鉢風下側の端部と仮定し，根鉢の重量とその半径の積で倒伏抵抗モーメントを計算した．

この倒伏木の地際のモーメントと，先に折損木について試算した地際のモーメントを図で対比する（図 30）．

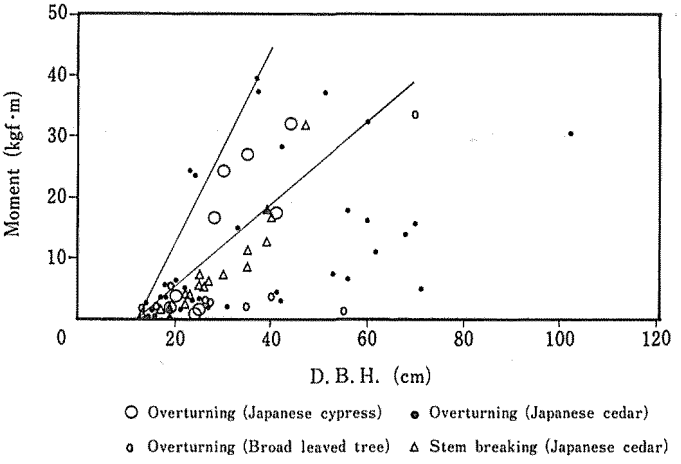

Fig. 30 Relationship between D.B.H. and resisting moment of each species.
図 30 樹種別胸高直径とモーメント

上限値に注目すると，倒伏木の地際モーメントは，折損木における折損の瞬間の地際モーメントの 2 倍近い値になっている．倒伏と折損の 2 つの現象は品種は異なっても，同じ樹種の，同じ径級の樹木で発生している．圧縮強度については，倒伏を多発したヤブクグリと折損を多発したクモトオシで僅かな差異しか認められていない（小田ら，1960）ことから，曲げ破壊係数についても同様な傾向があると推測される．

したがって，この図からつぎのようなことが推論される．すなわち，折損現象が同じ大きさの樹木が，倒伏を起こす大きなモーメントを受ける前に発生していることになる．同じ樹種，同じ径級の樹木であるから，その強度，特に曲げ破壊係数にも大きな差異があるとは考えられない．したがって，折損することなく 2 倍近い曲げ破壊係数を生じるまで風圧に耐えたとは考え難い．逆の現象，つまり折損が生じる前に倒伏が生じることは，成立の場などによる根系の発達の違いを考慮に入れれば容易に首肯出来よう．

折損のモーメントが，対象木の力学的性質に基づいて算出されたことを考慮すると，上で試算された根系根鉢の全体積の重量による倒伏モーメントをそのまま抵抗モーメントとした考え方に問題があると考えざるを得ない．

根系部を測定する際に，地際の中心から裸出根の先端までの長さを計測し，この部分一杯に土砂が密に抱え込まれていたと考え，これを根系部の重量と見なした．実際には根鉢部分の辺縁の根系は，多くの場合数十cm位，土を保有していない裸の状態であった．したがって，倒伏の瞬間に根系部に抱えられていた土砂を含む根鉢容積，重量を今少し小さ目に見なければならない．根鉢部辺縁部の根系が，縦，横，深さの3方向で実測長の3割位裸の状態で，残り7割程度の部分にしか土石が固着していなかったと見なせば倒伏モーメントと折損木の折損の瞬間の地際のモーメントはほぼ等しくなる．

6.2.2.　根系辺縁部のせん断抵抗力による倒伏抵抗

根鉢部を円筒体の一部と考え，その下方の根系辺縁部のせん断抵抗力の，この円筒の中心に関するモーメント抵抗と考える倒伏抵抗について検討する．

6.2.1.で検討した結果に基づいて，倒伏を生じた瞬間のモーメントを2分の1，つまり折損発生の瞬間の地際モーメントとほぼ同じ大きさと仮定する．

この仮定に立って，根系部辺縁の単位面積当りのせん断抵抗力（r_s）を求める．

簡単のために根系の底面の形状は，球体でなく円筒形と仮定する．その半径は底面を球体と考えて算出した値を用いる．

図31に胸高直径とr_sとの関係を示す．なお，図中に伐根の引き抜き試験結果（陶山ら，

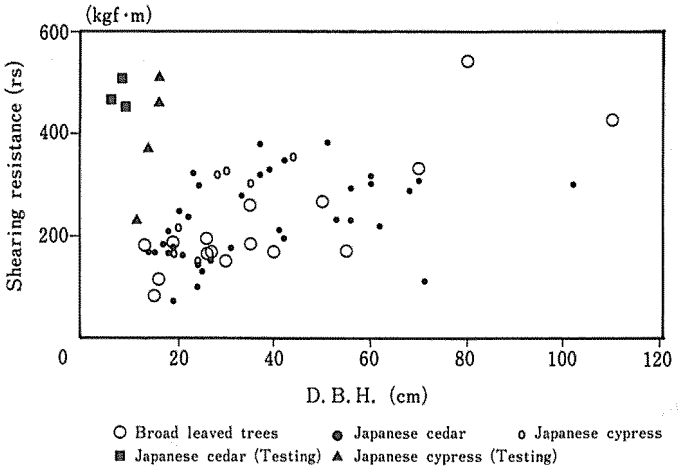

Fig. 31　Relationship between D.B.H. and overturning moment of each species.
図31　樹種別胸高直径と倒伏モーメント

1991）からもとめた根系の辺縁単位面積当りのせん断抵抗値を挿入している．

現実には，以上2とおりの抵抗モーメントが，それぞれの寄与の度合を変えながら作用しているものと考える．

7. ま と め

台風の強風による被災森林の調査・分析は少しでも風害を防止する上での林業技術上の指針を得るために必要であり，このために大きな災害を発生した台風の度に，多くの機関で調査・分析が行われている．このためには，条件の異なる場に成立していた森林が，強風に対してどの様な反応を示したかなどが詳細に調べられ，被害の実態と関連する要因との関係が分析されている．それによって危険地形の判定，被害類型別にその被害を受け易い樹形，樹種，品種など明らかになってくる可能性がある．事実，これまでの数多くの災害調査の結果からも共通した有用な指針などが得られつつある．

本調査および分析の結果について考察したところを以下に述べる．

7.1. 被災地近傍の風向，風速

台風17号と19号は，その経路，風速，風向も近似していたので，強風と森林被害の関係分析は，台風19号について行うこととした．

森林被害の原因となった強風の実態を分析するため，福岡，大分，熊本3県内の43観測所での風向，風速について検討した．

7.1.1. 平均風速の推測

最大風速発生時近傍で見られる欠測値の推定を試みた．欠測を生じた観測所を除く，残りの観測所の推定値を元に作成した等風速線図から読み取られた，その観測所位置の風速値をもとにして，当該観測所の欠測値の推定が可能であることが分かった．

7.1.2. 風向の推定

欠測風向についても推定を試みた．最大風速発生時近傍の観測所における風向は，その時の台風中心とその観測所を結ぶ線の方位角との間に高い相関関係が成立することが分かった．

7.1.3. 平均風速と瞬間最大風速との関係

実際の森林被害と，より密接な関係を有すると考えられる瞬間最大風速の推定を行った．連続的に観測が行われている8観測所別に，1時間毎の正時前10分間内の最大風速と10分間の平均風速との関係を分析したところ，両者の間には高い相関関係があることが認められた．すなわち，最大風速の平均風速に対する比が1.75～2.48，平均2.1を示すことが分かった．

各8観測所の比をもとに，他の観測所の平均風速を最大風速に換算した．

7.2. 森林被害分布と風速との関係

3県内197市町村の森林被害率と最大風速との関係について分析した．

各市町村の被害発生時の最大風速を，最も近い観測所での値に等しいと見なして，これと被害発生傾向との関係を検討した．

強風が長時間にわたって続くときは，樹木はある大きさ以上の力を波状的に繰り返し受けることになり，樹体には時時刻刻大きさの変化する応力が発生することになり，一種の疲労現象が加わることが容易に推測される．

そこで，各市町村別に風速のピーク時とその前1，2時間およびピーク後の1時間の中の3時間平均最大風速と被害率の関係を検討した．その結果，この平均風速値と最大被害率との間に高い相関関係があることが分かった．また，最大風速がかなり小さい場合にも被害が発生し，風速の増大とともに被害率も上昇していることがうかがれた．

マクロな地形については，最大風速時の風向に正対する前面の市町村とともに，その裏側斜面の市町村でも強度の被害が発生していることが分かった．

7.3. 熊本県産山，南小国両地域の被害分布と地形，林分条件との関係

地形と森林被害について，熊本県産山村，南小国町の2地域を対象にして解析を行った．斜面方位，標高，斜面内位置，斜面傾斜などの地形条件と樹種，樹齢などの林分条件と森林被害の発生の傾向について検討した．

被害林分と標準点（母集団）で地形要因を読み取り，各項目毎に，被害林地と母集団の階層別出現頻度を求め，発生比によって被害発生の傾向を検討した．

7.3.1. 斜面方位

被害林地は，産山村でSWを中心に，W，Sの斜面に，南小国町でW，SW，SEの斜面に偏在していた．産山村，南小国町でともに1.5という高い発生比を示した．ただ，産山村でも南小国町でも強風に正対する斜面の，後背斜面に成立している森林もかなりの被害が発生していることも観察された．

7.3.2. 標高

産山村では600～650m階に，また，南小国町では450～600m階に被害が集中発生していた．発生比はそれぞれ1.8と2.0となっている．

7.3.3. 斜面内位置

風衝地の斜面上部や尾根筋付近と同様，斜面下部や谷筋で被害が発生し易いことが分かった．斜面下部の比較的湿潤な土壌層では樹木根系の発達が進まず，倒伏，湾曲などの被害が生じ易いなど，生育の場による樹木の強風に対する抵抗性の違いなど樹体側の要因および，谷沿いの長い林帯での被害が多発していることから，風向と一致した谷における風の収束による風速の増大を原因とする場合も考えられる．

7.3.4. 傾斜

25°～30°以上の急傾斜地では，それより緩い斜面の林地より顕著に発生比が高いことが分かった．急傾斜地での樹木根系の伸長の仕方などがその原因として推測される．

7.3.5. 樹齢

齢級配置によって発生傾向が異なるが，4～8齢級以上の高齢の林分に被害が発生し，

若齢級では僅かしか被害は起こっていない．

7.4. 被害類型別発生傾向

強風によって発生する立木の被害類型は，概略倒伏，湾曲，折損の3種に大別される．それぞれの被害類型の発現には，地形，土・地質や風の要因を除くと，森林の条件ー樹種，樹齢，立木密度，隣接林分条件，樹形（樹冠形，樹幹形）と樹幹や根系の力学的性質などが関与していることが推測される．

被害の形態と樹木の形質との関係について以下の傾向がうかがわれた．

7.4.1. 被害類型と胸高直径，樹高

倒伏は小径木から大径木まで広い範囲にわたって発生するのに対し，湾曲木はその樹高と胸高直径に上限値が見られるようである．また，折損木は湾曲木よりやや広い範囲に分布している．

7.4.2. 被害類型と枝下率，樹冠面積

湾曲木と折損木が比較的樹冠面積の小さな範囲に分布しているのに対し，倒伏木は僅かではあるが大きな樹冠面積の範囲に分布しており，風圧力が大きく，風心高が低くなっていることが示唆される．

7.4.3. 形状比と樹冠面積

湾曲と折損が形状比に関係なく，樹冠面積の小さな樹木に発生しているのに対し，倒伏は形状比の小さな樹木，すなわち樹高に対して直径が大きく，樹冠面積も大きな樹木で発生していることが分かる．折損を発生する前に，倒伏モーメントが根系の倒伏抵抗力を越えたものと推察される．

7.4.4. 胸高直径と枝下高，樹高，相対折損高

胸高直径，樹高，枝下高に関係なく，折損高は樹高の半分以下10分の1の高さ範囲に分布している．

7.4.5. 胸高直径と樹冠長率

樹冠長率が大きいほど倒伏被害が生じ易いことがうかがわれる．湾曲は樹冠長率が小さい木に発生し易く，折損は両者の中間位の樹木に生じ易いことが分かった．

7.4.6. 形状比と相対形状比（樹高／折損直径）

樹幹の直径が胸高直径に対してほぼ一定の割合，すなわち相対形状比がその木の形状比の1.2倍位になる位置で折損が生じる．

7.4.7. 樹高と相対直径（折損直径／胸高直径）

前項の関係によると，折損部の直径は樹高の大小に関わらず，胸高直径の1／（1.05～1.50）となっている．

7.5. 倒伏，折損現象の力学的解析

樹木の主たる被害形態は倒伏，湾曲，折損に分かれる．これは樹種，品種，樹齢，立木密度，立地条件で異なってくる樹木の力学的性質，たとえばその材質と樹幹形で決まる曲げ破壊係数，曲げヤング係数と樹形，たとえば樹冠形と根系の広がり，土層の深さ，局所の地形条件などによって被害形態が相違することによると考えられる．

倒伏，折損現象の力学的機構について解析し，被害発生時の風速，根系の倒伏抵抗モーメントを推測することを試みた．

7.5.1. 折損

直立する樹木の樹冠部で強風を受けると，樹幹の各部で曲げモーメントによる曲げ応力が発生する．一定の樹幹形を仮定すると曲げ応力が最大となる点が求められる．この値がその木の曲げ破壊強度を越えると折損が起こる．

この折損高の理論値を実測値と比較すると，常に過大の値を示すことが分かった．
この原因としては，樹幹形の影響とともに，受風時の樹体のたわみによる偏心モーメントの付加が考えられる．折損の瞬間の樹体のたわみを求め，実測した湾曲木と酷似していることを確認した．この時の樹冠と樹幹の重量による地際の偏心モーメントは直立時の風圧モーメントの80％以上にも達する場合があることが分かった．

つぎに，破壊箇所の曲げモーメントから樹冠部に作用している風速を逆算した．
その結果，樹木が大きくなるにつれて折損時の風速は直線的に大きくなり，胸高直径が10cm近くなると20m/s以下の風で被害が生じることが分かった．

7.5.2 倒伏

倒伏現象の力学的機構は，樹冠部で受ける風圧力による地際でのモーメントと根系部の根鉢の抵抗力との関係で説明される．根鉢の倒伏抵抗力としては，根鉢の土と根系の合計重量による風下側根鉢端部を支点とする回転モーメント抵抗と，根鉢部の根系辺縁部のせん断抵抗力によるモーメント抵抗の2とおりについて考察した．

根鉢部土塊による倒伏抵抗モーメントの場合は，倒伏の瞬間に根系部に抱えられていた土塊を根鉢の体積の4割程度と考える．

根系辺縁部のせん断抵抗力による倒伏抵抗モーメントを，折損木の地際モーメントと同じ大きさと仮定し，根系部辺縁の単位面積当りのせん断抵抗力を求めた．

その結果，実験的に求められたスギの引き抜き抵抗よりやや小さ目の値が得られた．

8. おわりに

被災後の森林の状態から，林業技術上の指針を得るためには，さまざまな条件の場に成立していた森林が強風に対してどの様な反応を示したかなどを詳細に調査，分析する必要がある．この報告では，このような指針を整理，抽出するには至っていないが，このような調査によって，風害を受け易い危険地形，被害別の樹形，樹種などが浮かび上がってくる可能性はあることが分かった．ただ，今回の台風の周期は，風害を受けた福岡県小石原村の“行者スギ”の樹齢から400～500年とも推定される場合もある．このように非常に

長周期の強風のもとで得られる林業技術上の知見を今後どのように生かして行くかはまた，慎重に検討されるべき課題であろう．

この台風は，別の重大な課題を残している．

第一の課題は被害跡地の処理，すなわち倒伏木，湾曲木，折損木などの伐採搬出とその利用の仕方，そして跡地への造林である．被害木の伐採搬出は，通常の立木伐採とは比べようのないほど危険な作業であることから，熟練者の慎重な作業が必要である．国有林や民間の専業の作業員に対しては，営林局や県の林務関係者により安全作業のマニュアルが作成され，指導などもあったようであるが，それ以外の人々でこの作業にやむを得ず緊急に従事した作業者の中に重大な事故などが発生したことは耳目に新しい．

また，造林作業についても国，県などによる補助が用意されているとはいえ，通常年の作業量と比較にならないほどの面積を前にして，現在の激減した地元林業労務者だけでは対応することが出来ない状態にある．

第二の問題は遅々として跡処理の進まない被災森林地における，二次災害の危険性である．風害発生森林の二次災害としては，山火事，病虫害などの多発であるが，特に降雨量が多い九州山地で危惧されているのは，雨期の山地崩壊の多発とこれが引金となって発生する土石流や土木流である．

国や県では，このための方策として危険度の高い被災森林斜面を抽出し，後処理と防護施設の設置を急いでいるところである．

土石流や土木流の発生と強風害を受けた森林との関係についても多くの解明されるべき問題が残されている．

この研究の要旨については，気象利用研究会シンポジウムで報告した．

謝　　辞

森林被害調査に際して，諸統計資料のご提供，ならびに現地での調査，測定等に際して親しくご協力を頂いた国および福岡，大分，熊本各県の各林務関係の方々に深く感謝申し上げます．また，台風に関するデータの収集に際してご協力頂きました福岡気象台の方々にも御礼を申し上げます．さらに，調査や資料の収集，解析の作業に協力頂きました九州大学農学部の教職員と学生の方々にも感謝申し上げます．

引 用 文 献

森岡　昇・オンウォナ　アジマン　シアウ・近藤　稔・北川勝弘 (1991)：立木の樹幹と根株の力学的バランスを表す指標 LT 比．日林誌　**73**：380-383

中尾博美・末勝海・中島勇喜 (1974)：航空写真による予防治山の研究 (VII)，崩壊の斜面偏在性について．日林講　**85**：280-281

小田一幸・渡部演一・堤　壽一 (1990)：構造部材を意識したスギ 12 品種の木材性質，スギ材材質評価法確立を目指して．九大演報　**62**：115-126

坂口勝美・伊藤清三監修 (1990)：造林ハンドブック．養賢堂，東京，pp. 347

陶山正憲・加茂皓一・吉岡二郎・田畑勝洋 (1991)：平成 2 年台風 19 号による東紀州地方の森林被害調査報告書．森林総合研究所関西支所，pp. 52，60

正野重方（1960）：気象学総論．地人書館，東京，pp. 71，72
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 号等災害復旧対策調査報告書．台風 19 号等災害復旧対策調査検討委員会，p. 16
和達清夫監修（1954）：気象の事典．東京堂，東京，pp. 252
渡辺治人（1978）：木材理学総論．農林出版，東京，pp. 577，588，625，626
游繁結（1985）：台湾における海岸砂防に関する基礎的研究．博士論文，p. 206
汰木達郎（1964）：林木の成長を支配する要因に関する解析的研究．九大演報　**37**：85-17

（1992 年 12 月 15 日受付；1993 年 1 月 21 受理）

Summary

Forests in northern and central Kyushu were severely damaged by typhoons 9117 and 9119 in September 1991.

The two typhoons both traveled northeastward after skirting the northwestern part of Fukuoka Prefecture.

Fukuoka, Oita and Kumamoto prefectures were chosen as target areas for study.

Factors affecting forest damage were analyzed, including wind velocity and direction, topography and types of tree damage.

(1) In order to demonstrate the relation between average wind velocity and momentary maximum velocity, wind velocity in the target areas was estimated during periods of the highest wind velocity.

(2) It became clear that the occurrence of the damage was considerably influenced by such factors as the duration of high velocity wind, aspect of slope, position on the slope, altitude, tree age and form.

(3) The upper limit of the occurrence rate of forest damage was more significantly affected by average wind velocity during periods of high velocity than by momentary maximum velocity.

(4) Severe damage occurred on slopes with certain aspects, the direction of which coincided with the direction of high velocity wind.

(5) It became clear that the damage occurrence rate was higher on slopes at lower positions and in areas of lower altitude.

It is therefore suggested that it may be possible to predict the likelihood of damage at various positions.

(6) The occurrence rate in young stands was low, and high in stands over 20 years old.

(7) It was observed that the types of the damage were affected by tree height, diameter breast high and length of crown.

(8) Mechanisms of stem breakage and overturn were analyzed statically.

Significant differences between calculated and observed breakage heights were detected. It is suggested that the deformation of trees as a result of high wind velocity must be considered.

In the overturn phenomenon, a balance must be considered between the moment of power induced by wind blowing on a crown and the resisting moment of the root system.

With regard to the resisting moment, two cases were investigated.

One moment was the product of the total weight of the root system and the horizontal radius of the root system. The other was the product of the shearing stress and the average radius of root system calculated three dimensionally from the length of the root system.

Therefore, the possibility of two mechanisms was suggested.

Key words: typhoon damage, wind velocity, topography, tree form, overturn, stem breakage, bending.