

風倒木被害発生と立地及び林分構造との関係解析

福永, 寛之
九州大学農学部林学科

増谷, 利博
九州大学農学部林学科

今田, 盛生
九州大学農学部林学科

加賀, 英昭
九州林産株式会社

<https://doi.org/10.15017/10881>

出版情報：九州大学農学部演習林報告. 69, pp.13-30, 1993-12-24. 九州大学農学部附属演習林
バージョン：
権利関係：

風倒木被害発生と立地及び林分構造との関係解析*

福永寛之**・増谷利博**
 今田盛生**・加賀英昭***

抄 録

1991年9月の17, 19号台風で九州の林業地域では甚大な風倒木被害を受けた。そこで、その被害の実態を立地因子、林分構造因子に着目して解析し、その結果に基づいて育林と保続の側面から検討を加えた。

対象地は大分県にある九州電力(株)社有林の約1800haであり、解析資料の収集には被害発生前後の航空写真、森林基本図及び森林調査簿を用いた。得られた資料を数量化I類と主成分分析によって解析した。

これらの資料の解析によって、次のような結果が得られた。被害は空間分布で見ると、局部的に集中して発生していた。また、被害発生に大きな影響を及ぼしている因子は、林分構造上では樹冠直径の変動係数であり、立地上では斜面方位であった。具体的には、樹冠直径の変動係数が大きくなるほど被害が発生しやすく、南向き斜面の林地で被害が発生しやすいことが認められた。しかし、個々の被害発生林分の空間的位置とその被害強度を具体的に予測することは不可能であることが明らかになった。

以上の結果から、まず、育林面について、被害発生をなるべく抑えるために樹冠直径のばらつきを小さくするように間伐すべきであり、南向き斜面には経営目的との整合性及び他の気象害や生物被害への耐性を考慮した上で、耐風性の高い樹種や品種への転換が望ましいことが示唆された。次に、保続面については、被害発生という突発的な事態をも、なるべく定常的に処理できるような保続経営方式の案出が必要であることが示唆された。

キーワード：風倒木被害、林分構造因子、立地因子、航空写真判読、数量化I類、主成分分析

1. 緒 言

1991年9月の台風17, 19号は、大分県日田市での観測によれば、それぞれ最大瞬間風速34.3 m/s, 44.4 m/sを記録し(気象庁, 1991; 大分地方气象台, 1991)、その暴風により九州の林業地域は甚大な風倒木被害を受けた。中でも、九州北部は日田地域を中心に、それに隣接する福岡県の東部から熊本県の北部にかけて、記録的な被害が発生した(難波, 1992; 竹下, 1992)。

このような大規模な被害が発生した場合、森林経営においては保続と育林という2つの側面からの再検討が必要となる。まず、保続の側面では、被害の程度及びその空間的

* Hiroyuki FUKUNAGA, Toshihiro MASUTANI, Morio IMADA and Hideaki KAGA: The Influence of Topographic Factors and Stand Structure on Wind Damage Occurrence.

** 九州大学農学部林学科

Department of Forestry, Faculty of Agriculture, Kyushu University, Fukuoka 812

*** 九州林産株式会社

Kyushurinsan Co., Inc. Fukuoka 812

布を把握し、被害林分の樹種、齡級及び立地的傾向が明確であれば、伐期齡、伐採予定面積、伐採箇所などの再検討を行う必要が生じる。次に、育林の側面からは、被害発生に対する立地及び林分構造因子別の傾向を解析し、明確な傾向があれば、造林樹種及び造林地の選定、保育指針（密度管理）の変更などの施業上の対策を講ずる必要がある。

これらのことから本研究では、風倒木被害の発生に伴う森林経営への影響を検討するために、大面積の経営林を対象とし、まず、森林基本図、森林調査簿及び航空写真を用いて、被害発生の程度や空間的分布を推定した。次に、それらの資料を基に、被害発生と立地及び林分構造因子との関係解析を行い、その結果に基づき、保続及び育林上の対策について検討した。

2. 対象地

対象地は、図1に示すように、大分県玖珠郡及び大分郡にある九州電力（株）社有林（以下、九電社有林とする）の1林班～17林班、23林班、24林班、26林班～43林班であり、それらの合計面積は約1800 haである。立地的には、北向きの斜面の林地が多く、標高は500 m～1200 mに分布している。飯田・長者原地区における標高1100 m地点での年平均気温は10.4度で年間降水量は2600 mmである。また、冬期には気温が-10度～-20度となる日が多く、30 cm～50 cm程度の積雪が年に数回ある。したがって、九州地方では厳しい自然条件にある（九州林産、1993）。

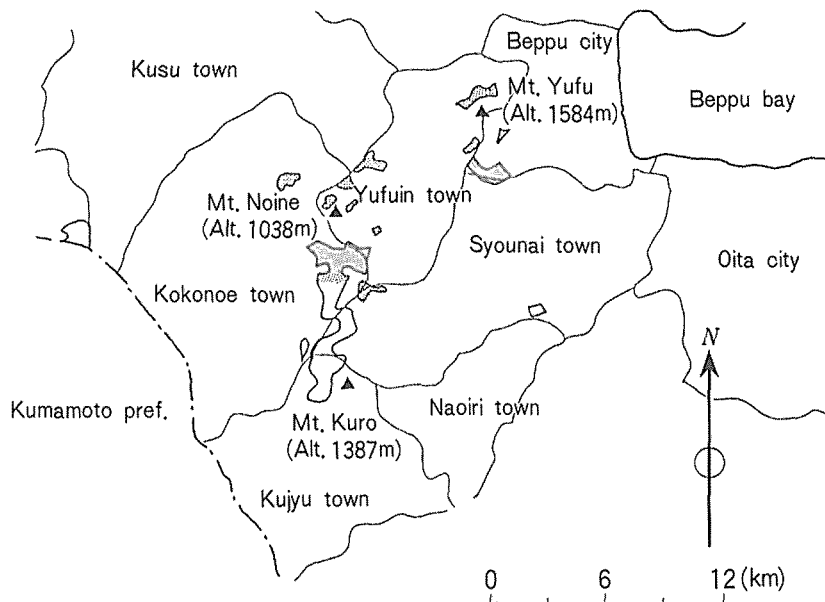


Fig. 1 Location of study areas.
(Study areas are marked with black dots.)

図1 対象地

対象地の樹種構成を、森林調査簿（1990年作成）を基に集計すると、図2に示すように面積割合ではスギ (*Cryptomeria japonica* D.Don) 66.2%、ヒノキ (*Chamaecyparis obtusa* Endl.) 18.1%、カラマツ (*Larix leptolepis* Gordon) 5.2%、アカマツ (*Pinus densiflora* Sieb.et Zucc.) 3.1%、その他7.4%であり、人工林率92%である。蓄積割合ではスギ72.3%、ヒノキ15.7%、カラマツ3.3%、アカマツ3.0%、その他5.6%となっており、面積的にも蓄積的にもスギ、ヒノキの両樹種で占める比率が極めて高い。これらの両樹種の年齢配置について示したのが図3であるが、1年齢は10年で表示している。スギの場合、2年齢級20.2%、3年齢級29.6%、4年齢級27.8%であり、ヒノキの場合、1年齢級16.3%、2年齢級37.4%、3年齢級19.5%である。若年齢級、壮年齢級の林分が多く、老年齢級の林分は極めて少ない。

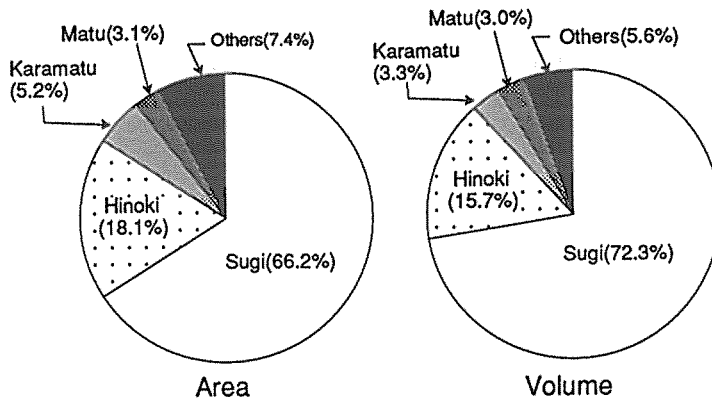


Fig. 2 Species composition for area and volume.
図2 樹種構成

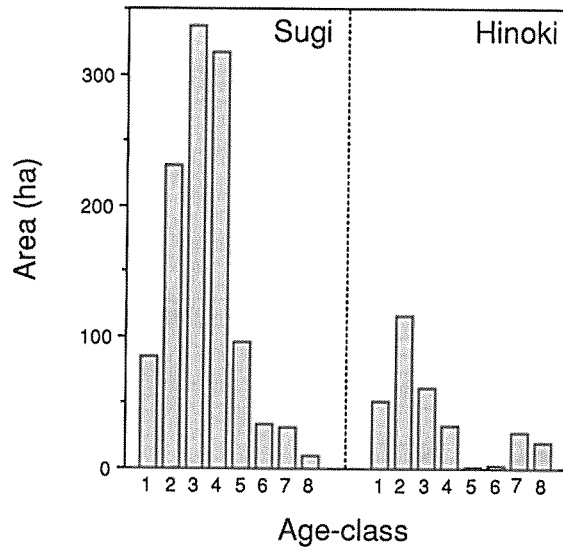


Fig. 3 Age-class distributions for Sugi and Hinoki before wind damage occurrence.
The number of years in each age-class is 10.

図3 年齢構成

3. 資 料

3.1. 資料の収集方法

本研究における対象地の面積が約 1800 ha と大面積であることから、同一精度の測定値を現地調査で収集することは、費用、労力、時間等の問題から実行不可能である。また、風倒木発生要因をよりの確に解明するために、被害林分ばかりでなく無被害林分をも研究対象とした。そこで、被害林及び無被害林の台風前の林分構造の比較を行う必要があったために、航空写真、森林基本図及び森林調査簿を用いて、被害の程度及びその分布、立地因子、台風前の林分構造因子を求めた。

森林基本図の縮尺は 5000 分の 1 であり、森林調査簿は九州林産（株）により 1990 年に調製されたものを用いた。被害発生前の林分構造因子の判読に用いた航空写真は国土地理院により 1991 年 4 月、5 月に撮影された白黒の 2 倍引伸の写真であり、平均縮尺は 9700 分の 1 である（以下、航空写真（前）とする）。被害発生後の被害の有無及びその被害率の判読に用いた航空写真はアジア航測（株）により、1992 年 4 月から 5 月に撮影されたカラー 2 倍引伸の写真であり、平均縮尺は 6500 分の 1 である（以下、航空写真（後）とする）。

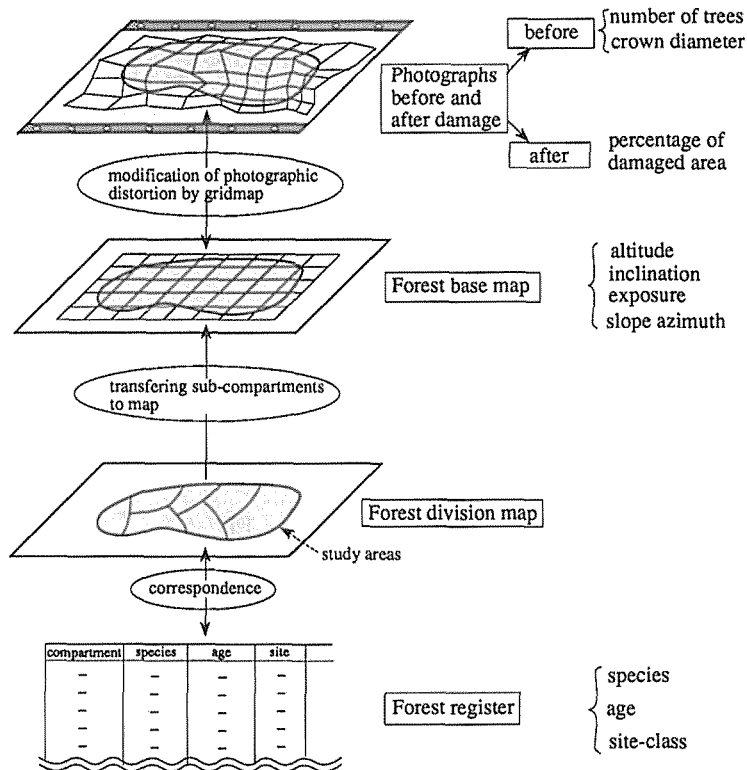


Fig. 4 Capture method of data.

図 4 資料の収集方法

その具体的な資料収集方法を図4に基づいて明らかにすると次のとおりである。まず、対象地を森林基本図上で2 cm (現地 100 m) 方形のメッシュに区切り、このメッシュの交点を標本抽出の基準点とした。次に、森林基本図上のメッシュ交点を2組の航空写真上に移写し、航空写真の判読の基準点とした。その際、航空写真の歪みを補正するために、野田ら(1990)のグリッドマップを用いた。さらに、それぞれのメッシュ交点が属する林小班名を森林基本図から読み取り、森林調査簿との対応付けを行った。

これらの対応付けを行った後、すべてのメッシュ交点、すなわち1767点で、被害の有無と被害率の判読を行い、さらに、立地因子として標高、傾斜角、斜面方位、露出度及び地位の5因子を、林分構造因子として樹種、齢級、立木本数及び樹冠直径の4因子を判読した。

3.2. 被害率

航空写真(後)の全メッシュ交点上に現地面積0.25 haに相当する円形プロットを設定し、被害の有無を判読した。被害発生地点においては、このプロット内に占める被害面積の割合を10%単位で判読し、この割合をプロット内被害率とした。

3.3. 立地因子

(a) 標高

森林基本図上のメッシュ交点で標高を1 m単位で判読した。

(b) 斜面方位

斜面方位の求め方は渡辺(1980)の方法を用いた。森林基本図上のメッシュ交点に方位・等高線本数測定板の円形モデルを当て、円形モデルの中心(Oとする)と同一標高が円形モデルの円周を切る点をそれぞれp, qとし、角pOqを二等分する線を引き、水の流下方向に矢印をつけた。この矢印がこのメッシュ交点の局所地形に応じる平均方位であり、矢印の属する方位のカテゴリーを判読し、8方位区分の斜面方位を決定した。

(c) 傾斜角

森林基本図上のメッシュ交点に直径2 cm (現地直径100 m)の円を被せて円内の等高線本数nを判読し、傾斜角 α を $\tan \alpha = b \times n / 100$ から算出した。ただし、bは等高線間隔である。

(d) 露出度

森林基本図上のメッシュ交点を中心とした直径40 cm (現地直径2 km)の円を設定し、その中心から円内を仰角0度で水平360度を見回した時に、山体に遮断されていない水平角の合計を露出度として判読した。

(e) 地位

森林基本図と林小区分図の対応づけにより、メッシュ交点が属する林小班を判定し、その林小班の地位を森林調査簿から調べ、メッシュ交点の地位とした。九電社有林では、地位を1, 2, 3, 4, 記載なし(15年生以下)の5段階に分けているが、地位4とは成長の極めて劣悪な林地である。

3.4. 林分構造因子

(a) 樹種

地位の判定手順と同様にしてメッシュ交点の属する林小班の樹種を森林調査簿より調べた。

(b) 齡級

地位及び樹種の手順と同様にして、メッシュ交点の属する林齢を、森林調査簿より調べ、1 齡級を 10 年として齡級を求めた。

(c) ha 当たり本数

航空写真（前）のメッシュ交点にプロットセット板を用いて現地面積 0.25 ha のプロットを設定し、プロット内の本数を判読した。そして、以下の算出式により ha 当たり本数に換算した。

$$N = n/A \times (s/S)^2$$

ただし、 N は ha 当たり本数、 n はカウント本数、 A はプロットの面積、 s はプロットセット板における使用縮尺、 S は写真縮尺である。

(d) 樹冠直径（樹冠直径の平均及び変動係数）

航空写真（前）上のメッシュ交点に、プロットセット板を用いて現地面積 0.25 ha のプロットを設定し、プロット内の全林木を対象として単木ごとに樹冠直径を判読した。縮尺の違いによる換算は以下の式を用いた。

$$CD = CD_p \times S/s$$

ただし、 CD は樹冠直径、 CD_p は樹冠直径の写真判読値、 S は写真縮尺、 s は樹冠直径測定板の縮尺である。

判読した樹冠直径から、樹冠直径の平均及び変動係数を求めた。

4. 数量化 I 類による解析

以上のような手順で得られた被害率、立地及び林分構造因子の資料を用いて、被害発生に主として影響を及ぼす立地及び林分構造因子は何であるか、また、その因子がどの程度影響しているかについて検討した。また、対象地の樹種構成（図 2）を見るとスギ、ヒノキのみで面積的には 84.3%、蓄積的には 88.0% を占めていることから、この 2 樹種についてのみ解析を行った。外的基準は被害率であることから定量データであり、立地及び林分構造因子は定性及び定量データが混在しているため、その解析にあたっては数量化 I 類を適用した。

4.1. 方法

数量化 I 類の適用にあたっては、スギ、ヒノキの樹種ごとに行うこととし、外的基準はプロット内被害率とした。アイテムは表 1 及び表 2 に示すように、立地因子として標高、斜面方位、傾斜角、露出度及び地位の 5 アイテム、林分構造因子として ha 当たり本数、齡級、平均樹冠直径及び樹冠直径の変動係数の 4 アイテム、合計 9 アイテムとした。

表1 数量化I類による解析結果 (スギ)
Table 1 Quantification method I-item, category and score affecting wind damage for Sugi.

Item		Category	Frequency	Category score	Range	Partial correlation coefficient
Altitude: A (m)	1	$0 \leq A < 800$	279	1.141	3.424	0.069
	2	$800 \leq A < 900$	288	-2.011		
	3	$900 \leq A < 1000$	248	0.380		
	4	$1000 \leq A$	118	1.413		
Slope azimuth	1	N	199	-0.273	21.800	0.219
	2	NE	188	-4.195		
	3	E	118	-2.854		
	4	SE	74	-1.128		
	5	S	93	0.596		
	6	SW	40	17.605		
	7	W	62	-1.243		
	8	NW	159	3.652		
Inclination : I (deg)	1	$0 \leq I < 10$	50	-2.690	7.005	0.129
	2	$10 \leq I < 20$	350	-2.708		
	3	$20 \leq I < 30$	347	0.815		
	4	$30 \leq I$	186	4.297		
Exposure : E (deg)	1	$0 \leq E < 30$	130	-0.702	5.392	0.085
	2	$30 \leq E < 60$	177	0.466		
	3	$60 \leq E < 90$	218	-1.143		
	4	$90 \leq E < 120$	200	2.164		
	5	$120 \leq E < 150$	107	-3.228		
	6	$150 \leq E$	101	1.725		
Site-class	1	1,2	333	3.569	8.970	0.153
	2	3	378	0.027		
	3	4	222	-5.400		
Number of trees per hectare : n	1	$0 \leq n < 1000$	122	-0.174	6.983	0.094
	2	$1000 \leq n < 1200$	119	-3.178		
	3	$1200 \leq n < 1400$	154	0.018		
	4	$1400 \leq n < 1600$	164	1.118		
	5	$1600 \leq n < 2000$	215	-1.255		
	6	$2000 \leq n$	159	3.805		
Age-class	1	1	43	-7.434	9.769	0.151
	2	2	140	-6.389		
	3	3	304	0.942		
	4	4	286	2.335		
	5	5	85	1.858		
	6	6 or more	75	1.362		
Average of crown diameter: AC	1	$0.0 \leq AC < 1.0$	367	-3.841	9.845	0.154
	2	$1.0 \leq AC < 2.0$	268	-0.196		
	3	$2.0 \leq AC < 3.0$	205	4.409		
	4	$3.0 \leq AC$	93	6.004		
Coefficient of variation of crown diameter : CV	1	$0 \leq CV < 10$	42	-4.109	24.474	0.326
	2	$10 \leq CV < 20$	322	-6.320		
	3	$20 \leq CV < 30$	234	-1.766		
	4	$30 \leq CV < 40$	135	0.334		
	5	$40 \leq CV < 60$	131	10.100		
	6	$60 \leq CV$	69	18.154		
Constant term				10.675		
Multiple correlation coefficient: R				0.471		
Coefficient of determination: R ²				0.222		

表2 数量化I類による解析結果(ヒノキ)
Table 2 Quantification method I—item, category and score affecting wind damage for Hinoki.

Item	Category	Frequency	Category score	Range	Partial correlation coefficient
Altitude : A (m)	1 $0 \leq A < 800$	67	2.688	4.275	0.094
	2 $800 \leq A < 900$	77	-0.784		
	3 $900 \leq A < 1000$	51	-1.414		
	4 $1000 \leq A$	30	-1.587		
Slope azimuth	1 N	42	-0.345	21.943	0.304
	2 NE	33	-2.753		
	3 E	28	-5.211		
	4 SE	35	1.247		
	5 S	17	16.732		
	6 SW	20	1.059		
	7 W	17	-4.085		
	8 NW	33	-0.866		
Inclination : I (deg)	1 $0 \leq I < 10$	25	-1.576	2.943	0.066
	2 $10 \leq I < 20$	44	-1.444		
	3 $20 \leq I < 30$	85	0.070		
	4 $30 \leq I$	71	1.366		
Exposure : E (deg)	1 $0 \leq E < 30$	30	-0.727	4.820	0.085
	2 $30 \leq E < 60$	41	0.026		
	3 $60 \leq E < 90$	47	0.325		
	4 $90 \leq E < 120$	42	-1.596		
	5 $120 \leq E < 150$	28	3.225		
	6 $150 \leq E$	37	-0.516		
Site-class	1 1,2	116	2.408	4.972	0.127
	2 3,4	109	-2.563		
Number of trees per hectare : n	1 $0 \leq n < 1000$	54	1.809	7.250	0.154
	2 $1000 \leq n < 1200$	33	-2.403		
	3 $1200 \leq n < 1400$	30	0.317		
	4 $1400 \leq n < 1600$	36	3.906		
	5 $1600 \leq n < 2000$	48	-3.343		
	6 $2000 \leq n$	24	-0.335		
Age-class	1 1	28	-1.653	10.430	0.235
	2 2	75	-2.630		
	3 3	44	-1.328		
	4 4,5	29	-2.681		
	5 6 or more	49	7.750		
Average of crown diameter: AC	1 $0.0 \leq AC < 1.0$	60	-3.540	8.609	0.211
	2 $1.0 \leq AC < 2.0$	67	2.162		
	3 $2.0 \leq AC < 3.0$	54	4.554		
	4 $3.0 \leq AC$	44	-4.054		
Coefficient of variation of crown diameter : CV	1 $0 \leq CV < 10$	22	-10.019	31.351	0.509
	2 $10 \leq CV < 20$	80	-6.559		
	3 $20 \leq CV < 30$	48	-4.178		
	4 $30 \leq CV < 40$	21	1.081		
	5 $40 \leq CV < 60$	28	13.163		
	6 $60 \leq CV$	26	21.332		
Constant term			9.867		
Multiple correlation coefficient: R			0.722		
Coefficient of determination: R ²			0.521		

各アイテムにおけるカテゴリー分類は、スギの場合を表1、ヒノキの場合を表2に示している。標高、傾斜角、露出度、ha 当たり本数、平均樹冠直径及び樹冠直径の変動係数については、それぞれのカテゴリー分類を、標高4、傾斜角4、露出度6、ha 当たり本数6、平均樹冠直径4、樹冠直径の変動係数6とした。斜面方位は8方位を北から時計回りに1～8の8とした。これら7つのアイテムのカテゴリー分類は、スギ、ヒノキ共通である。地位はスギの場合、地位1の頻度が20と極めて少ないので、地位1と地位2を1つのカテゴリーとし、カテゴリー分類は3とした。また、ヒノキの場合、地位1及び地位4の頻度はそれぞれ1及び11であり、地位2及び3と比較して極めて少ないことから、地位1と地位2、地位3と地位4をそれぞれ1つのカテゴリーとし、カテゴリー分類は2とした。齢級については、スギの場合、6、7及び8齢級の頻度はそれぞれ34、30及び11と低いことから、6齢級以上を1つのカテゴリーとし、カテゴリー分類は6とした。また、ヒノキの場合、5齢級の頻度は1、6齢級は3、7齢級は25、8齢級は21と少ないことから、4齢級と5齢級、6齢級以上をそれぞれ1つのカテゴリーとし、カテゴリー分類は5とした。

4.2. 結果及び考察

数量化I類による解析結果をスギの場合を表1に、ヒノキの場合を表2に示している。決定係数 R^2 は、それぞれ0.222及び0.521であり、前述の9個のアイテムによってプロット内被害率に影響を及ぼす因子は、スギの場合約22%、ヒノキの場合約52%説明できることになる。

各アイテム間の内部相関係数について、川端(1977)は内部相関係数が小さいほどそれぞれの独立性が高いと述べており、また、その許容限界については、渡辺ら(1966)及び戸田ら(1973)は相関係数0.6としている。内部相関係数はスギの場合-0.44～0.15、ヒノキの場合-0.15～0.43であり、ともに0.6の範囲内にあるので、アイテムの独立性は保たれていることになる。

外的基準であるプロット内被害率に対する各アイテムの影響の程度は、カテゴリー数量の範囲の値あるいはアイテム内の偏相関係数により比較することができる。つまり範囲の値あるいは偏相関係数が大きいほど被害率に対する影響が大きいと考えられるからである。そこで範囲の値の大きい順に並べると、スギの場合は樹冠直径の変動係数、斜面方位、平均樹冠直径、齢級、地位、傾斜角、ha 当たり本数、露出度、標高の順になり、ヒノキの場合は、樹冠直径の変動係数、斜面方位、齢級、平均樹冠直径、ha 当たり本数、地位、露出度、標高、傾斜角の順になる。上位4つのアイテムをみると、両樹種とも樹冠直径の変動係数、斜面方位、平均樹冠直径及び齢級と共通しており、上位2つのアイテム順は、樹冠直径の変動係数及び斜面方位であった。これら4つのアイテムについて考察を加えながら述べると次の通りである。

4.2.1. 斜面方位

スギの場合では、範囲の値が21.800と2番目に大きな値であった。カテゴリー数量についてみるとカテゴリー6が17.605と突出しており、SW方位が他の方位に比べプロット内被害率が極めて高い。ヒノキの場合でも、範囲の値が21.943と2番目に大きな値で

あった。カテゴリー数量についてはカテゴリー5が16.732と突出しており、S方位が他の方位に比べプロット内被害率が非常に高い。

このことから、スギの場合はSW方位、ヒノキの場合はS方位で被害率が極めて高い傾向にあるが、斜面方位別に相対的被害率（被害面積の全面積に対する割合）を示すと図5のようになる。スギの場合、SW方位23.8%、S方位15.6%、SE方位13.1%、W方位12.8%であり、ヒノキの場合、S方位23.9%、SE方位13.1%であり、この相対的被害率から南向き斜面で被害率が高い傾向にある。過去の研究例（三浦ら、1984；大貫ら、1992）でも、斜面方位については本研究と同様な傾向があることが報告されている。本対象地において南向き斜面で被害率が高い原因は、台風の通過コースが九州の西側沿岸であり、台風の暴風圏の右半円では強烈的な南風が吹き、それが直撃したためと推察される。

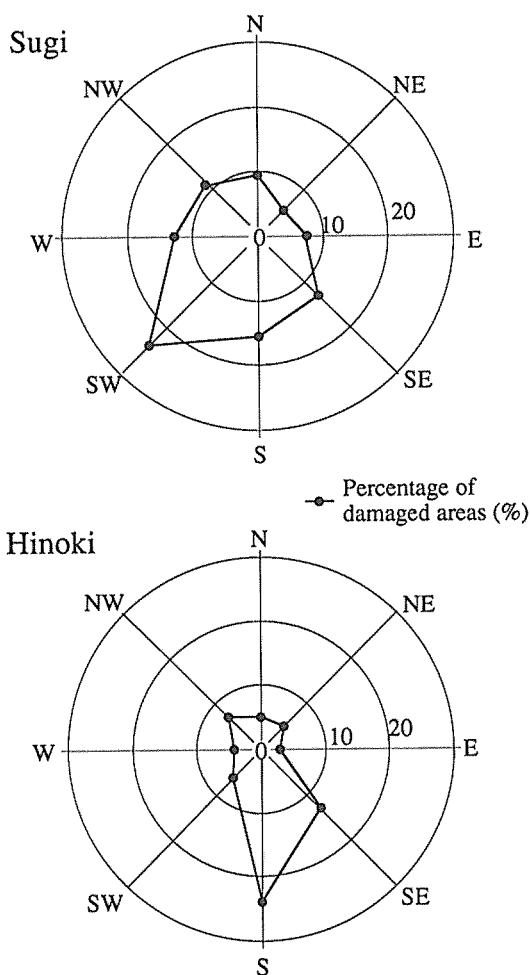


Fig. 5 Percentage of damaged area to total area in each slope azimuth for Sugi and Hinoki.

図5 斜面方位別被害率

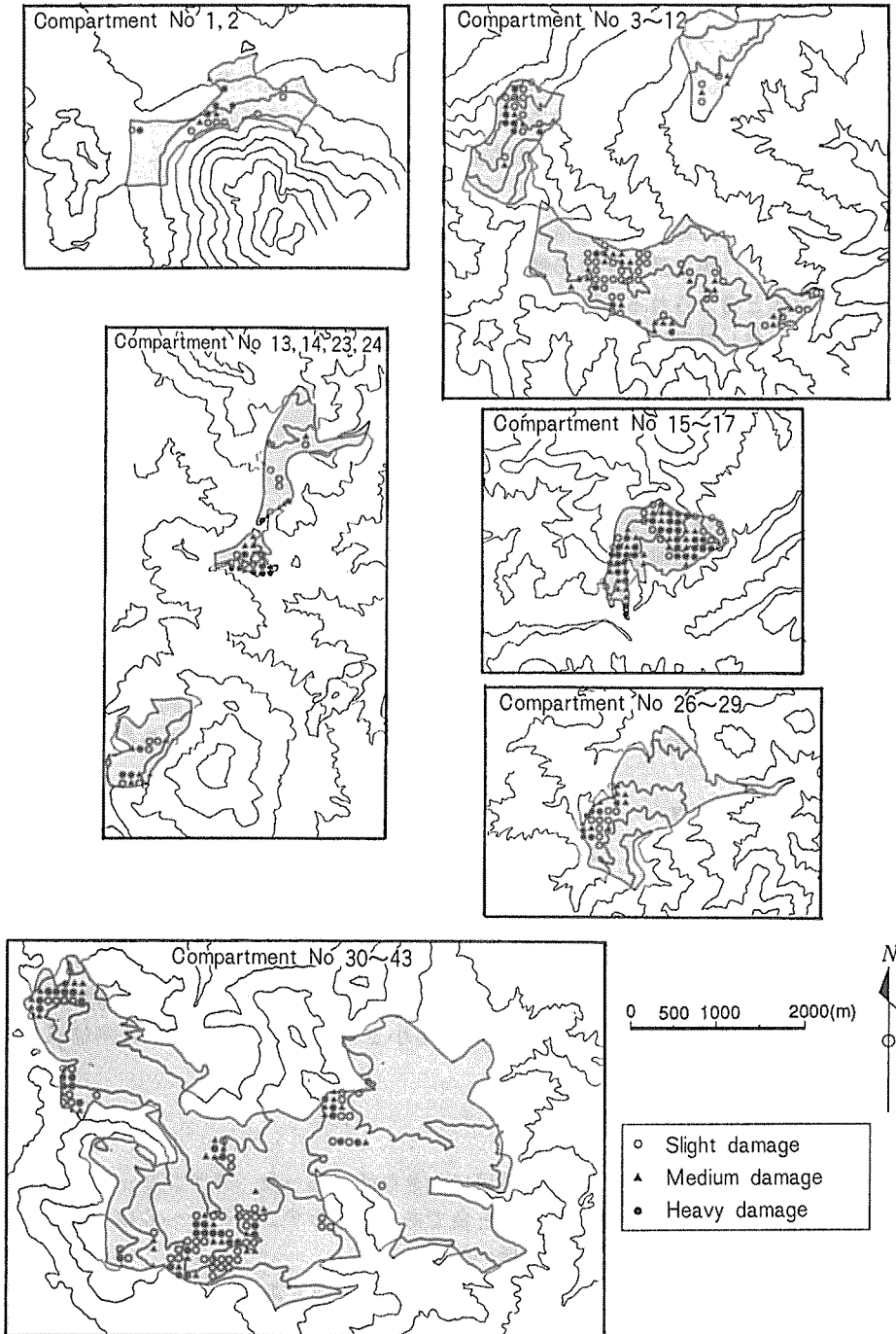


Fig. 6 Distributions of damaged stands.
Study areas are marked with shaded black color.

図6 被害分布

ところで、数量化Ⅰ類による解析では、被害の空間的分布は把握できないことから、被害程度を地形図上にプロットしたのが図6であり、プロット内被害率(D)が、0%を無被害、 $0\% < D \leq 20\%$ を小害、 $20\% < D \leq 50\%$ を中害、 $50\% < D \leq 100\%$ を激害と階級区分した。この図から認められる主な傾向としては、第1に被害地の風上側に鞍部が存在していることが多いこと、第2に被害は位置的に集中して発生していること、第3に激害地の周囲に中害地や小害地があること、つまり被害は激害地を中心に波紋状に広がっていることが挙げられる。第1の傾向は、鞍部によって暴風がさらに強められることが原因であると考えられる。第2及び第3の傾向は、玉手(1967)の指摘した林内の空所による被害の拡大が原因と考えられる。具体的には、立地的及び林分構造的に耐風性の弱い部分に、一たび被害が発生し林内に空所ができると、その空所に風が吹き込み渦流を生じ、その渦流のために空所の周囲に被害が拡大していくことによって引き起こされると考えられる。

4.2.2. 樹冠直径の変動係数

スギの場合、全アイテムの中で範囲の値が最も大きく24.474で、プロット内被害率に最も影響を及ぼしているアイテムであった。カテゴリ-数量についてみると、カテゴリ2(-6.320)からカテゴリ6(18.154)へと増加していた。つまり樹冠直径の変動係数が大きくなるとプロット内被害率が増加する傾向にある。

ヒノキの場合でも、全アイテムの中で範囲の値が最も大きく31.351であり、プロット内被害率に最も影響を及ぼしている因子であった。カテゴリ-数量についてもカテゴリ1(-10.019)からカテゴリ6(21.332)へと増加しており、スギと同様の傾向であり、樹冠直径の変動係数が大きくなるとプロット内被害率が増加する傾向にある。

4.2.3. 平均樹冠直径

スギの場合、範囲の値は9.845と3番目に大きな値であった。カテゴリ-数量についてはカテゴリ1(-3.841)からカテゴリ4(6.004)へと増加していることから、平均樹冠直径が大きくなるに従ってプロット内被害率が漸増する傾向がある。

ヒノキの場合では、範囲の値が8.609と4番目に大きな値であった。カテゴリ-数量については、カテゴリ1, 4が負、カテゴリ2, 3が正であることから、平均樹冠直径が1~3mであれば被害が増加し、これよりも小さいか、大きければ被害率は減少する傾向が認められる。

4.2.4. 齢級

スギの場合、範囲の値が9.769と4番目に大きな値であった。カテゴリ-数量についてはカテゴリ1, 2で-7.434, -6.389と負であるが、カテゴリ3~6は正であることから、若齢林ではプロット内被害率が低い傾向にある。

ヒノキの場合、範囲の値が10.430と3番目に大きな値であった。カテゴリ-数量についてはカテゴリ5のみが7.750と突出しており、6齢級以上でプロット内被害率が高い。

4.2.5. 小括

林分構造的には、スギの場合は、樹冠直径の変動係数の大きい林分、平均樹冠直径の大

大きい林分、齢級の高い林分で被害率が高い傾向にある。ヒノキの場合は、樹冠直径の変動係数の大きい林分、齢級の高い林分で被害率が高く、平均樹冠直径が小さい林分と大きい林分で被害率が小さい傾向にある。一方、過去の研究例では、森林が被害にあうかどうかは主として立地因子で決まり、地形的な危険性があまり高くなく同程度ならば林況によって被害の程度に差が生じる（三浦，1984）、被害率の差異は林分構造ではなく地形的な要因が大きく作用していたと考えられる（箕口ら，1992）と報告されている。

このように台風による被害は立地因子が大きく関わっていると考えられてきたが、本研究における数量化Ⅰ類による解析結果では林分構造因子の方が、立地因子よりも風倒木被害発生に影響を及ぼしていることが認められたので被害に対する林分構造因子の影響について、次章でさらに検討する。

5. 主成分分析法による解析

数量化Ⅰ類による解析結果から、風倒木被害発生に影響を及ぼす上位4因子は、立地因子として斜面方位、林分構造因子として樹冠直径の変動係数、平均樹冠直径及び齢級であった。このことは立地因子よりもむしろ林分構造因子の方が風倒木被害発生の主要因であることを意味しており、従来の研究例とは異なる結果であった。そこで、風倒木被害と林分構造との関係を、より詳細に検討する必要があることから、主成分分析法を用いて解析した。主成分分析法を用いたのは、林分構造は通常、多因子で表現されるが、多因子では理解が困難であることから、1～2個の主成分に要約し、これらの主成分と被害率の関係をスコア散布図上で視覚的に捉えるためである。

5.1. 方法

主成分分析法の適用に当たっては、独立変数はha当たり本数、平均樹冠直径、樹冠直径の変動係数及び林齢の4変数とし、スギの場合及びヒノキの場合について解析した。主成分の数の決定は、第1に累積寄与率が70%以上となること、第2に各主成分の寄与率が元の変量の1個分以上であること、つまり固有値 $\lambda \geq 1.0$ であることを基準とした。次に、主成分スコアと被害階級（無被害、小害、中害、激害の4階級）のデータとを結合し、その結合したデータを用いてスコア散布図を作成した。そのスコア散布図をもとに、被害発生率に対する林分構造因子の影響について検討した。

5.2. 結果

5.2.1. スギの場合

主成分分析法による解析結果を示したのが表3であり、固有値が1以上の主成分は第2主成分までである。また第1、第2主成分の寄与率はそれぞれ48.5%、25.4%であり、この2つの主成分で累積寄与率は73.9%であることから、この2つの主成分の意味づけを行った。

第1主成分の因子負荷量の絶対値が大きい変数を見てみると、ha当たり本数は負、平均樹冠直径は正であることから、ha当たり本数が多ければ、第1主成分の値は小さくなり、逆に、樹冠直径が大きくなれば、主成分の値は大きくなる。このことから第1主成分

表3 主成分分析による解析結果
 Table 3 Eigenvalues and eigenvectors of the correlation matrix of the principal component analysis for Sugi and Hinoki.

Sugi					
Variables \ PC	1st	2nd	3rd	4th	
X(1)	-0.628	-0.108	0.389	0.666	
X(2)	0.660	-0.079	-0.193	0.722	
X(3)	-0.184	0.904	-0.344	0.175	
X(4)	0.370	0.405	0.833	-0.072	
Eigen	1.940	1.017	0.816	0.228	
Prop.	0.485	0.254	0.204	0.057	
Cum. prop.	0.485	0.739	0.943	1.000	

Hinoki					
Variables \ PC	1st	2nd	3rd	4th	
X(1)	0.625	0.006	0.490	0.607	
X(2)	-0.675	-0.008	-0.050	0.736	
X(3)	0.266	0.717	-0.609	0.210	
X(4)	-0.287	0.697	0.622	-0.213	
Eigen	1.927	1.163	0.689	0.220	
Prop.	0.482	0.291	0.172	0.055	
Cum. prop.	0.482	0.773	0.945	1.000	

PC : principal component

Eigen : eigenvalue

Prop : proportion

Cum. prop. : cumulative proportion

Where variables in this analysis are :

X(1) : Number of trees per hectare

X(2) : Average of crown diameter

X(3) : Coefficient of variation of crown diameter

X(4) : Age

は林木の大きさそのものを表す主成分であり、林木が大きければ主成分の値も大きくなると考えられる。

第2主成分の因子負荷量を見てみると、樹冠直径の変動係数と林齢が正であることから、この主成分は、樹冠直径の変動係数が大きく、高齢級の林分であれば大きくなる。一般に、高齢級になると、樹冠直径のばらつきが大きくなることから第2主成分は樹冠直径のばらつきを大きさを表す主成分であると考えられる。

各プロットの林分構造のスコアを第1、第2主成分の因子負荷量から求め、被害率の階級と対応づけて図示したのが、図7のスコア散布図である。この図から、第1主成分の大小と被害率とは関係が認められず、一方、第2主成分の大きい林分、つまり、樹冠直径の変動が大きい林分の方が、被害がより多く発生していることが認められる。

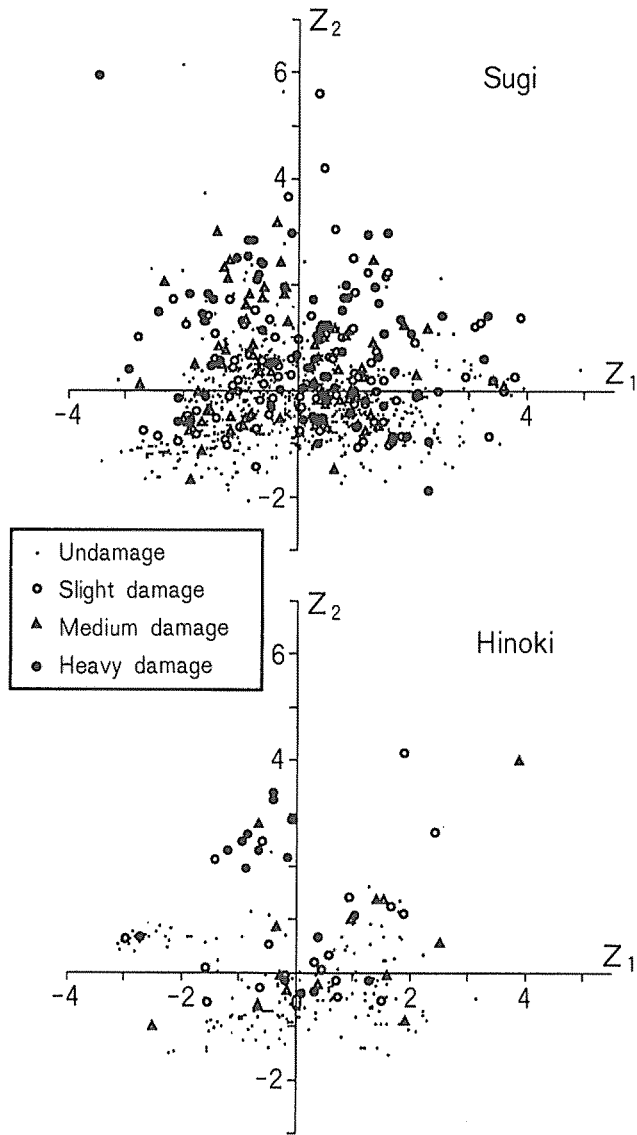


Fig. 7 Scatter diagrams of scores of principal component analysis.
 Z_1 : 1st principal component
 Z_2 : 2nd principal component

図7 スコア散布図

5.2.2. ヒノキの場合

主成分分析法による結果を示したのが表3であり、固有値が1以上の主成分は第2主成分までである。寄与率を見てみると、第1主成分が48.2%、第2主成分が29.1%であり、この2つの主成分の累積寄与率は77.3%である。スギの場合と同様、これら2つの主成分の意味づけを行うと、まず、第1主成分は、ha当たり本数の因子負荷量が正で、平均樹冠直径が負であることから、林木の大きさそのものを表す主成分と考えられる。しかし、スギの場合とは正負が逆であり、この主成分が大きくなると林木の大きさは小さくなる。

第2主成分の因子負荷量を見てみると、樹冠直径の変動係数および林齢が正であり、スギの場合と同様、樹冠直径の変動係数が大きく、高齢級の林分であれば大きくなることから、樹冠直径のばらつきの大きさを表す主成分であると考えられる。

そこで、スギの場合と同様に各プロットのスコアと被害率の階級とを対応づけて図示したのが図7である。スコアの散布状態を見ると、第1主成分は被害率とは無関係であるが、第2主成分のスコアが大きい林分では被害を受ける頻度が高いことが、スギの場合よりも明瞭に認められる。

5.3. 考察

主成分分析法による解析結果から、被害の発生には、第1に、スギ及びヒノキに共通して樹冠直径のばらつきが影響しており、ばらつきが大きい林分ほど被害の発生頻度が高い傾向が認められた。すなわち、通常、樹冠直径のばらつきが大きい林分では、樹高のばらつきも大きいと考えられることから、樹冠直径のばらつきの大きい林分で被害率が高い原因は、林冠上部の凹凸であると考えられる。玉手(1967)は、林内に空所がある場合、そこに風が吹きこみ渦流を生じて瞬間的に非常に強い風になり、そのため空所の周囲の森林に風倒木被害を起し、周辺の林分に風倒木被害を拡大する原因となると報告している。樹冠直径の変動が大きく林冠上部に凹凸がある場合も、凹部で渦流が生じ被害が発生することが推察される。

第2に、ヒノキの方がより顕著であるが、60年生以上の老齢林では被害率が若干高くなるのが主成分分析法による解析結果から明らかになった。被害と林齢の関係について、藤森(1992)は、風に対して若い木が強いのは、若い木は樹体の地上部と地下部の配分量、分布位置などが高齢木に比べて安定的であり、樹体に柔軟性があるからではないかと考えられると報告している。本研究でも、林齢の高い林木ほど被害を受ける傾向があり、その原因は、藤森(1992)の指摘している樹体の柔軟性の欠如も考えられる。

6. 総合考察

以上の解析結果を総合すると、被害率に大きく影響を及ぼす立地因子としては斜面方位、林分構造因子としては樹冠直径の変動係数及び林齢であることが明らかになった。具体的には、立地上では南向き斜面で被害率が高く、林分構造上では樹冠直径の変動係数が大きくなるほど、また、林齢が高くなるほど被害率が高くなることが明らかになった。

ここで注目すべきことは、風倒木被害の対応策を検討するに当たって、立地因子のみならず、樹冠の構造という林分構造因子についても十分に考慮すべきであるという点である。

このような結果に基づいて、育林面からの対策を検討すると、まず、樹冠直径の変動係数が大きくなると被害率が大きくなることから、樹冠直径の変動係数を小さくするように育林を行う必要がある。具体的には、間伐を行う際には樹冠直径の大きいものと小さいものとの間伐するように配慮すべきである。通常、樹冠直径と胸高直径との相関は極めて高いことから、大径木と小径木を主体に、間伐すればよいということになる。このことは間伐の主目的を主伐時における径級の分散を小さくするということにすれば、その主目的と合致することになる。

次に、南向き斜面で被害率が高いことから、耐風性の高い樹種及び品種へと転換することが考えられる。樹種の耐風性については、玉手(1967)は造林木の耐風力を比較するとヒノキ、クロマツ、アカマツが最も強く、ついでスギ、エゾマツ、トドマツ、最も弱いのはカラマツとなるとしている。諫本ら(1992)は、台風19号における針葉樹の耐風性は概略、アカマツ、ヒノキ、スギの順で高いと報告している。また、スギ品種の耐風性については、メアサが耐風性が高いと報告されている(岡野ら, 1992; 矢幡, 1992)。しかし、メアサ以外のスギ品種の耐風性についてはそれぞれの報告によって異なっており、また、林分単位での樹種及び品種の耐風性については明確な報告がないので、今後の研究成果を待たねばならない。もちろん、このような育林面の被害対策は、他の気象害や生物被害への耐性も考慮するとともに、用材生産や水源かん養機能の発揮などに対しても整合性を持たさなければならない。

保続面の対策については、個々の被害発生林分の空間的位置とその被害強度を的確に予測できないので、現段階では具体的な方法を提示することは困難である。しかしながら、そのような突発的被害の発生をあらかじめ組み込んだ融通性に富む経営方式を検討すべきである。例えば、ドイツのプロイセン地方において、病虫害発生に対応して案出され移動作業級(片山ら, 1954)を応用することも考えられる。ここでの風害のみならず病虫害などの種々の被害発生をも考慮に入れた伐採順序・伐採面積・保護樹帯設定などの方策を講ずるべきである。

謝 辞

本研究を遂行するにあたって、九州電力株式会社立地部より航空写真を、九州林産湯布院支店より森林基本図及び森林調査簿を快く提供して頂いた。また、九州大学農学部林学科森林経理学教室学生、大谷勇樹氏、岡村篤憲氏、小野崎証氏、寺本佳代氏には森林基本図における立地因子判読にあたりご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

引用文献

- 藤森隆郎(1992): 台風19号等による森林災害の記録。日本造林協会, 東京, pp. 39-50
諫本信義・高宮立身(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。大分県林試研報18: 1-43
片山茂樹・田中祐一(1954): 森林経理, 林野共済会, 東京, pp. 160-162
川端幸蔵(1977): 林業試験場電算機プログラミング報告(5)数量化(I型)。林試研報288: 1-54

- 気象庁 (1991) : 気象要覧 第1105号, 気象庁, 東京, pp. 10-51
- 九州林産株式会社 (1993) : 九州電力社有林の概要, 九州林産株式会社, 福岡, p. 11
- 箕口秀夫・河村昇 (1992) : 1991年台風19号により佐渡郡相川町の複層林に発生した風害, 新潟県林試研報 34 : 47-53
- 三浦覚・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
- 難波宣士 (1992) : 昨年の台風19号による九州北部の森林被害と今後の対応, 山林 1300 : 2-7
- 野田徹・澤田耕作 (1990) : 航空写真からのグリッドデータ判読法—矩形グリッドマップの地形図から写真への転写プログラム, 41回日林関西支論 : 227-230
- 岡野哲郎・伊藤哲 (1993) : スギ品種の台風被害抵抗性と感受性, 六演習林スギ品種試験地第I試験地における被害の分析, 九大演報 68 : 1-10
- 大分地方気象台 (1991) : 大分県気象月報, 日本気象協会大分支部, 大分, p. 1
- 大貫仁人・加藤宏明 (1992) : 台風19号等による森林災害の記録, 日本造林協会, 東京, pp. 3-11
- 竹下敬司 (1992) : 台風による九州地域の森林災害の解析—森林立地懇談会シンポジウムから—, 山林 1300 : 17-23
- 玉手三稜寿 (1967) : 森林の暴風害とその防除法, 林業技術 306 : 21-25
- 戸田春光・三輪明男 (1973) : 地位指数調査 (地位指数表作成), 広島林試験報 8 : 56-61
- 矢幡久 (1992) : 台風19号等による森林災害の記録, 日本造林協会, 東京, pp. 12-38
- 渡辺宏 (1980) : 新森林航測テキストブック, 日本林業技術協会, 東京, pp. 247-252
- 渡辺定元・田中正則・若月勇 (1966) : 地位指数調査の実際, 日本林業調査会, 東京, p. 233

(1993年7月16日受付; 1993年9月7日受理)

Summary

This paper describes the influence of topographic factors (altitude, inclination, slope azimuth, exposure and site class) and stand structure (species, age-class, number of trees, average of crown diameter and coefficient of variation of crown diameter) on wind damage occurrence in the managed forests under Kyushurinsan Co., Inc.

The results of analyzing by the quantification method I and the principal component analysis were as follows:

- (1) Percentage of damaged areas in south slopes to total area was higher than that in other slopes.
- (2) Percentage of damaged areas to total area increased with coefficient of variation of crown diameter.
- (3) It was difficult to predict which of many individual stands in the forest will be damaged.

From the results obtained above, the problems on forest management were suggested as follows:

- (1) Planting species in south slope forest lands must be changed to those which have higher resistance for wind damage occurrence.
- (2) Variation of crown diameter should be decreased through the silvicultural operation such as thinning.
- (3) The sustainable management system corresponding to the damages should be devised.

Key words : wind damage; stand structure; topographic factor; aerial photograph interpretation; quantification method I; principal component analysis.