

風倒木地における山腹表層崩壊に関する研究

2003年3月

松 村 和 樹

目 次

はじめに	1
第 1 章 研究の目的	4
1. 1 概説	4
1. 1. 1 戦後の自然災害	
1. 1. 2 近年の土砂災害等の実態	9
1. 2 風倒木災害の実態と研究	14
1. 2. 1 風倒木災害の実態	14
1. 2. 2 風倒木災害の研究の流れ	17
1. 3 研究の目的	23
1. 4 研究の方法	24
1. 5 論文の構成	27
第 2 章 1991 年台風 19 号の風倒木災害の実態	31
2. 1 風害	31
2. 1. 1 暴風害	31
2. 1. 2 乾風害	31
2. 1. 3 寒風害	31
2. 1. 4 塩風害	31
2. 1. 5 その他	32
2. 2 1991 年台風 19 号の特徴	34
2. 2. 1 気象特性	34
2. 2. 2 一般的被害	36
2. 3 風倒木被害の実態	40
2. 3. 1 九州北部の風倒木の発生状況	40

2.3.2	大分県北部の風倒木の発生状況	42
2.3.3	風倒木の発生と地形的特徴	45
2.3.4	風倒木の状態	50
2.3.5	風倒木の特徴	50
2.3.6	風倒木地の擾乱	52
2.3.7	風倒木地に発生した崩壊	55
2.4	まとめ	57
第3章 風倒木地域における山腹崩壊		59
3.1	1993年6月に発生した崩壊の実態	59
3.1.1	対象流域	59
3.1.2	風倒木地と崩壊状況	63
3.1.3	崩壊発生と斜面勾配	68
3.2	降雨の実態	71
3.2.1	降雨資料の収集・整理	71
3.2.2	降雨の規模	73
3.2.3	等雨量線図の作成	77
3.3	対象流域の崩壊の特徴	81
3.3.1	風倒木地と崩壊	81
3.3.2	崩壊と降雨の関係	83
第4章 風倒木発生周辺域における斜面安定性評価		91
4.1	研究目的	91
4.2	解析手法	91
4.2.1	解析の考え方	91
4.2.2	データ計測	93
4.3	斜面危険度評価	95
4.3.1	植生活力指標とアルゴリズム	95
4.3.2	解析単位	103
4.3.3	斜面崩壊に影響を与える諸条件の把握	104

4.3.4	植生活力と土砂生産の関係	105
4.4	まとめ	114
第5章 風倒木地とその周辺域における山腹表層崩壊機構		116
5.1	表層崩壊に関する既往研究	116
5.1.1	既往実績や地形・地質分類別崩壊面積から推定する方法	117
5.1.2	統計的推定	117
5.1.3	確率的推定	118
5.1.4	物理的モデル	119
5.2	表層崩壊機構の新しい概念	120
5.2.1	飽和浸透モデルと崩壊機構（地下水モデル）	121
5.2.2	新しい崩壊機構の概念	125
5.2.3	不飽和土の降下浸透速度	130
5.3	風倒木地における表層崩壊	137
5.3.1	風倒木地および風倒木発生周辺域の表層土層調査	137
5.3.2	崩壊発生と雨量	143
5.4	まとめ	145
第6章 総括		148
謝辞		155

はじめに

近年土砂災害、特に気象災害としての土砂災害は減少してきたといわれるものの、豪雨や融雪による土砂災害は依然として毎年どこかで発生している。

1 級河川のような大河川での洪水対策の進捗によって洪水による死者数は少なくなってきたおり、自然災害による毎年の死者・行方不明者数や家屋等のインフラストラクチャの被害は減少している。1950 年代から 1970 年代にかけては「自然災害被害者数は減少してきたが、土砂災害被害者数は減少がみられないため、全被害者数に占める土砂災害被害者数の割合はむしろ増加し、土砂災害対策の重要性は増加している」（大八木等 1992、国土庁防災白書 1997）といわれていたが、沼本等（1999）の災害資料研究によれば、最近ではむしろ以下のことが明らかになっている。

- ・ 気象災害被害者数と土砂災害被害者数はどちらも減少傾向を明瞭に示しており、特に 10 年移動平均をとり、片対数グラフ表示をするとその傾向が明瞭になる。
- ・ 気象災害被害者数の減少より土砂災害被害者数の減少傾向の方が大きく、1970 年代に土砂災害被害者数は気象災害被害者数の $\frac{2}{3}$ を占めていたが 1980 年代以降には $\frac{2}{5}$ に減少している。

土砂災害の多くは、崩壊・土石流によって引き起こされるが、その発生機構は複雑である。多くの場合降雨が誘因となっているが、同規模の降雨を受けても崩壊する斜面と崩壊しない斜面が存在する。これは、斜面形状、表層土層厚、表層土強度、基盤地質、植生・土地利用等が複雑に影響しているからと考えられる。これらの要素のうち表層土強度に関しては、風化や地震などの外力を受け、その強度が低下する場合の他に、台風などの強風で斜面上の樹木が揺すられた場合にも表層土強度の低下が起こる。

1991 年の台風 19 号は、典型的な「風台風」で、全国各地に暴風による甚大な被害をもたらした。この台風による風倒木は、大分県、福岡県、熊本県、佐賀県、宮崎県、山口県、石川県能登地方等に発生し、特に九州北部の被害は、甚大であった。その後、1993 年の梅雨時の降雨で、大分県の築後川上流域で風倒木被害の大きい地域に山腹崩壊が多発し、その崩壊土砂が土石流となり人的被害が生じた。このときの降雨の規模は、10 年超過確率程度で、この地域においてこれまでに何度か経験した降雨規模であり、過去にこのような降雨規模でこれほどの崩壊が多発した事例はない。したがって、このような降雨規模で崩壊が多発したことは、風倒木の発生により、山腹表層土

の強度が低下したのではないかと推定された。

さらに、調査を進めると風倒とはなっていない風倒木発生地区周辺域にも多くの崩壊と土石流の発生が認められた。このことから、風倒とならないまでも樹木が強風に強く揺すられることによって、山腹表層土が擾乱され、強度が低下したのではないかと推定される。

このような風倒による森林の被害と崩壊・土石流発生との関係についての研究は、長年土砂災害防止に携わってきた技術者にとって非常に興味を惹くものであるが、風倒被害に関する既往の研究は少なく、特に風倒と土砂生産に的を絞った研究は極めて少ない。

そこで、本論文では、1991年の台風19号で生じた風倒木地、および同様の強風を受けたと思われる風倒木発生周辺域を対象とし、その後の1993年に発生した崩壊・土石流と風倒木の関連を解明することにより、強風による樹木の揺動が土層強度を低下させ、通常より少ない降雨で崩壊を発生させうることを実証的に明らかにするとともに、その過程で土質強度の低下エリアを同定する方法及びそのような条件での崩壊発生メカニズムならびに崩壊発生支配降雨について考察することとした。

引用文献

国土庁：防災白書（平成 9 年度判）大蔵省印刷局，p. 6-8

沼本晋也，鈴木雅一，太田猛彦：日本における最近 50 年間の土砂災害被害者数の減少傾向，砂防学会誌，
Vol. 51, No. 6, p. 3-12, 1999

大八木則夫：土砂災害，災害の辞典（荻原幸男編）朝倉書店，p. 179-258，1992

第 1 章 研究の目的

1.1 概説

1.1.1 戦後の自然災害

我が国の戦後の復興期には、枕崎台風やカスリン台風などの大型台風により、毎年のように多くの人的被害が発生していた。ことに、1959 年の伊勢湾台風では洪水や土砂災害により、記録的な 5041 名の人的被害を生じ、洪水対策の重要性が認識された。そして、洪水対策は、これまでの河川区間毎の管理から、水源地から下流まで水系一貫した流域管理へと大幅な転換をとげることとなり、洪水対策が大きく進み、以降洪水による人的被害は減少した。

精度はあまり良くないが、戦後の統計データから人的被害に関して 1945 年から 1965 年までの間に 1 回のイベントで 100 名以上の人的被害が生じた自然災害を整理した（表 1.1）（松村等 1988）。

この表から過去に 1000 人以上の人的被害を発生させた災害原因は 1953 年の豪雨を除き、枕崎、カスリン、ルース、洞爺丸、狩野川、伊勢湾に代表される大型の台風災害で、その被害は全国的な広がりを持っているのが特徴的である。伊勢湾台風以降は、1995 年の阪神・淡路大震災をのぞき 1 回のイベントで 1000 名を超える人的被害は発生していない。

また、1945～1998 年までの自然災害による死者・行方不明者を図 1.1 に示す。この図からも 1959 年の伊勢湾台風の被害後は、人的被害が非常に少なくなっていることが認められる。表 1.1 から大きな人的被害が生じる原因は、台風災害が主であり、広域的に災害が発生している。この台風災害をさらに詳しく整理すれば、表 1.2、図 1.2 のようになる。これらの図・表からも台風による人的被害は、伊勢湾台風以降減少していることが認められる。この原因は、流域源流部において山地荒廃の復旧が進み、全国の山地は森林に覆われて表層崩壊の発生が抑制されたこと、水源の保水能力が高まったこと、一級河川の築堤が進み洪水発生が抑制されたこと等と考えられる。しかし、今日でも、洪水による人的被害は減少したものの、散発的に生じる土石流やがけ崩れによって人的被害は毎年のように発生している。また、山腹斜面の小規模な表層崩壊に起因する土砂災害に比較し、1997 年に鹿児島県出水市針原川で発生した土石流災害に代表されるように、規模の大きい崩壊（深層崩壊）に起因する災害の発生が目立ち、さらに、1991 年の台風 19 号で全国的に発生した風倒木や、九州北部において、その後の降雨で崩壊が多発したことは着目に値する。

表 1.1 1945 年～1965 年の主な自然災害死者数

西暦	月	日	地方	気象	原因	死者
1945	9	17	中国、四国、九州	枕崎台風		3588
1945	10	10	関東、近畿、中国、四国、九州	阿久根台風		368
1947	9	13	東北、関東	カスリン台風		2164
1948	9	11	九州	豪雨	土砂災害	247
1948	9	15	東北、関東	アイオン台風	土石流	788
1949	6	15	中国、四国、九州	デラ台風		196
1949	8	15	九州	ジェディス台風		165
1950	9	3	近畿、四国	ジェーン台風		418
1951	7	7	近畿	豪雨		163
1951	10	13	中国、四国、九州	ルース台風		1024
1951	10	14	九州	台風	崖崩れ372ヶ所	209
1952	7	7	近畿	豪雨		114
1953	6	23	九州	豪雨		978
1953	7	17	近畿	豪雨		1066
1953	8	14	近畿	豪雨	土石流	336
1953	9	24	中部、近畿	台風13号		404
1954	8	18	四国、九州	台風5号		175
1954	9	12	四国、九州、中国	台風12号		323
1954	9	26	北海道、東北、中国、四国	洞爺丸台風	暴風	1646
1957	7	25	九州	豪雨		539
1957	7	26	九州	豪雨	土石流	179
1958	9	26	北海道、中部	狩野川台風		1061
1959	7	12	関東、中部以西	台風5号		149
1959	9	26	全国	伊勢湾台風		5041
1961	6	27	中部	豪雨	水害	134
1961	9	14	北海道、四国、九州	第2室戸台風		287
1965	8	5	九州	台風14号		295

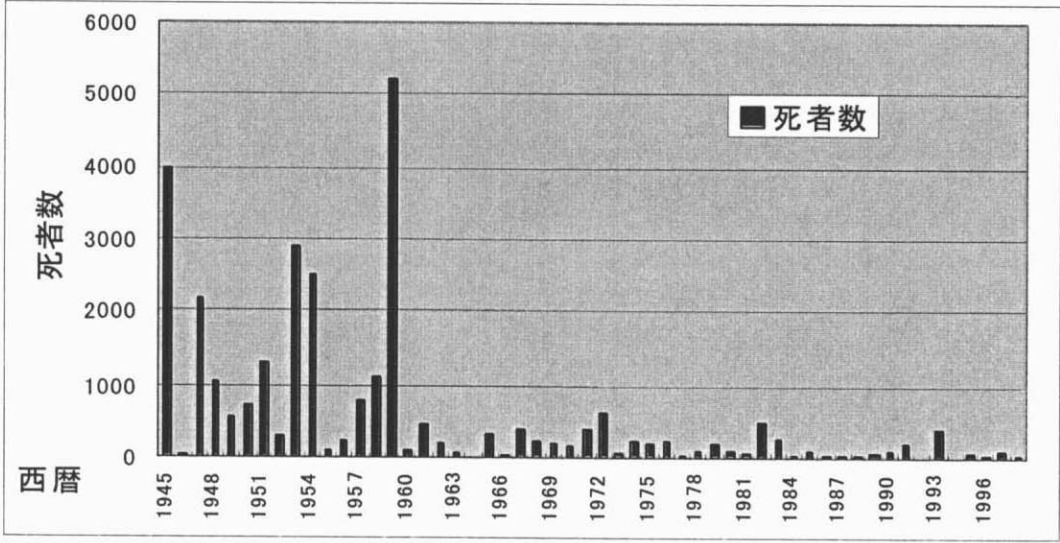


図 1.1 戦後の自然災害による死者・行方不明者数 (1945 年～1998 年)

表 1.2(1) 戦後の台風災害

西暦	月	日	台 風 名	地 方	県・地区	死者・行方不明者	備 考
1945	9	17	枕崎台風	中国 中国 中国 中国 中国 四国 四国 四国 九州	広島 岡山 山口 島根 鳥取 愛媛 香川 高知 福岡, 佐賀, 大分, 宮崎, 鹿児島	2012 121 701 79 10 182 13 17 453 3588	
1945	10	10	阿久根台風	関東 近畿 近畿 中国 四国 四国 九州	山梨 兵庫 京都 山口 愛媛 徳島 鹿児島, 長崎	36 231 12 9 15 8 57 368	
1947	9	13	カスリン台風	東北 東北 関東 関東 関東 関東 関東 関東	岩手 宮城 群馬 栃木 埼玉 山梨 茨城 群馬	88 30 708 437 103 16 74 708 2164	土石流 土石流 土石流 土石流 土石流 土石流
1948	9	15	アイオン台風	東北 東北 東北 関東 関東	岩手 宮城 福島 神奈川 群馬	688 44 16 30 10 788	土石流
1949	6	15	デラ台風	中国 四国 九州	山口 愛媛 鹿児島, 宮崎, 福岡	34 22 140 196	
1949	7	29	ヘスター台風	近畿	京都桂川	11 11	洪水
1949	8	15	ジェディス台風	九州	佐賀, 鹿児島, 長崎, 宮崎	165 165	
1949	8	31	キティ台風	東北 関東 関東 関東 関東	福島 群馬 神奈川 埼玉 千葉	15 49 24 12 8 108	

表 1.2(2) 戦後の台風災害

西暦	月	日	台 風 名	地 方	県・地区	死者・行方不明者	備 考
1950	8	13	津久見台風	九州	大分	35 35	
1950	9	3	ジェーン台風	北海道 近畿 近畿 近畿 近畿 近畿 四国	大阪 和歌山 兵庫 京都 福井 徳島	31 256 58 41 11 14 38 449	
1950	9	13	キジア台風	中国、九州、四国	鹿児島	55 55	
1951	10	13	ルース台風	中国 中国 四国 九州	広島 山口 愛媛 鹿児島、宮崎、大分	132 417 45 267 861	
1952	6	22	ダイナ台風	中部 九州	静岡 長崎	45 15 60	
1953	9	24	台風13号	中部 中部 近畿 近畿 近畿 近畿	三重 愛知 大阪 京都 滋賀 福井	44 74 22 117 43 104 404	
1954	8	18	台風5号	四国、九州		142 142	
1954	9	13	台風12号	九州、四国、中国	熊本	174 174	
1954	9	17	台風14号	中部	静岡	24 24	
1954	9	26	洞爺丸台風	北海道 東北 中国 中国 中国 四国	青森 島根 鳥取 岡山 愛媛、香川	1499 43 25 35 13 31 1646	暴風
1955	9	29	台風22号	中国 九州	山口 鹿児島、宮崎、大分	11 53 64	
1956	8	16	台風9号	全国		36 36	

表 1.2(3) 戦後の台風災害

西暦	月	日	台 風 名	地 方	県・地区	死者・行方不明者	備 考
1956	9	9	台風12号	全国		39 39	
1958	9	26	狩野川台風	北海道 中部	静岡	21 1040 1061	
1959	7	12	台風5号	関東 中部以西	山梨	89 60 149	
1959	8	12	台風7号	中部 中部	静岡 三重	14 9 23	
1959	9	26	伊勢湾台風	全国		5041 5041	
1960	8	28	台風16号	四国, 西日本 西日本		61 16 77	
1961	6	24	台風	近畿	六甲山系	29 29	土石流
1961	9	14	第2室戸台風	北海道 四国 九州	徳島, 高知 大分	18 266 3 287	山崩れ
1962	8	2	台風9号	北海道		35 35	
1965	8	5	台風14号	九州	鹿児島, 熊本	295 295	
1965	8	23	台風15号	四国 九州	熊本, 鹿児島	4 16 20	
1966	8	12	台風13号	九州	宮崎	26 26	
1970	8	13	台風9号	全国	大分	46 46	
1970	8	20	台風10号	四国	徳島, 高知	15 15	
1971	8	29	台風23号	九州	大分	11 11	
1972	7	23	台風9号	九州, 四国	大分, 愛媛, 高知	477 477	
1972	9	15	台風20号	四国	高知	10 10	山崩れ
1974	5	29	台風, 豪雨	九州	鹿児島, 宮崎, 熊本	143 143	
1976	9	8	台風17号	四国	香川, 徳島, 高知, 愛媛	64 64	土石流, 山崩れ2,102ヶ所
計						19186	

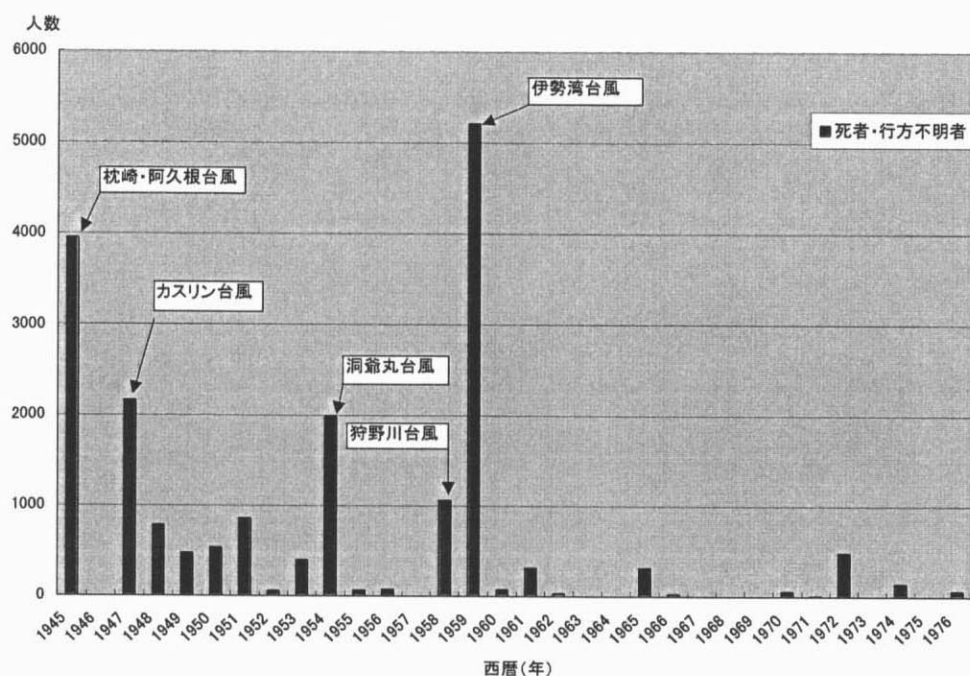


図 1.2 戦後の台風による人的被害

1.1.2 近年の土砂災害等の実態

近年、大型台風による人的被害は少なくなっているが、土砂災害による被害は毎年のように発生している。そこで、過去 20 年間の比較的大きな土砂災害等を概観する。

(1) 1982 年長崎災害

1982 年 7 月 23 日に北上した梅雨前線に強い湿舌が流入し、長崎市では 23 日 19 時から 22 時の 3 時間の間に 315mm 豪雨に見舞われた。長崎県西彼杵郡長与町役場の雨量計では、19 時から 20 時までの 1 時間に 187mm という我が国気象観測史上最大の時間雨量を記録している。そのほかにも長崎海洋気象台でも日雨量 (448mm)、時間雨量 (127.5mm) は、気象台はじめて以来の観測値であった。

この豪雨で、土石流による死者・行方不明者 125 人、がけ崩れによる死者・行方不明者 95 人、合計 220 人が土砂災害の犠牲者となった。その他洪水では 79 人の犠牲者が出ている（（財）砂防・地すべり技術センター1983）。

(2) 1983 年島根災害

この災害を惹起した豪雨は、島根県西部の益田市、三隅町浜田市に集中し、降雨のピークは 1983 年 7 月 23 日 1 時～3 時と 9～12 時の 2 回にあり、前半の方が強く、益田市で 90mm/hr、浜田市で 72mm/hr を記録した。死者・行方不明者は 107 名で、そのうち土石流・がけ崩れ等の土砂災害によるものは約 80%で 87 名であった。土石流・がけ崩れとともに多量の流木が発生したことがこの災害の特徴でもあり、三隅町では橋梁に流木が引っかかり河川水が市街地に流入した（(財)砂防・地すべり技術センター 1984）。

(3) 1984 年長野県西部地震

1984 年 9 月 14 日 8 時 49 分ごろ長野県西部の御岳山南麓付近、深さ 10.0Km を震央とするマグニチュード 6.8 の地震により、御岳山南東斜面 8 合目付近に大規模な崩壊が発生した。この崩壊の規模は、長さ約 1500m、最大幅約 700m、最大深さ約 150m、崩壊土石流砂量は、3600 万 m^3 であった。この崩壊土砂は土石流となって濁沢を流下し、木曽川支川王滝川まで達し、約 3.5km にわたって 20～50m の厚さで堆積した。この土石流で 15 名、地震に伴う地すべりで 14 名の死者・行方不明者の被害が発生した（(財)砂防・地すべり技術センター 1985）。

(4) 1988 年広島県加計町災害

昭和 63 年 7 月 20 日 14 時頃から広島県全域で雨が降り始め、21 日未明から強くなり、加計土木事務所で連続雨量 264mm、最大時間雨量 57mm を記録した。この降雨により加計町江河内谷川で発生した土石流による死者 10 名、その他を含め 15 名の死者・行方不明者を出した。この土石流は、JR 可部線の盛り土部でそのほとんどが堆積した（(財)砂防・地すべり技術センター 1989）。

(5) 1990 年熊本県一の宮災害

災害を引き起こした豪雨の原因は停滞していた梅雨前線に南からの湿舌が入ったため、7 月 1 日から 2 日にかけて熊本県一の宮町（アメダス阿蘇乙姫観測所）では、時間雨量 67mm、3 時間雨量 189mm、24 時間雨量 410mm が観測され、3 時間雨量は既往最大値であった。

古恵川流域では、63 万 m^3 の斜面崩壊土砂量が発生し、土石流となった。土石流の構成材料の主体は阿蘇火山の火山灰の細粒土砂であった。この土石流災害の特徴とし

て多量の流木が混入していたことが挙げられる。発生流木量は、針葉樹約 51000 本、幹材積約 12000m³、広葉樹約 37000 本、幹材積約 1000m³であった。巨礫は、上流の砂防ダム群で捕捉されたが、火山灰を主体とする細粒土砂と流木は下流国道 57 号線橋梁に達し、橋梁を閉塞して周辺宅地に氾濫した。この泥流と流木で 8 名、その他一の宮町内で 13 名が犠牲となった。

この災害では流木による被害が大きく、土砂災害において土石流対策のみならず流木対策の重要性が認識され、同年に「流木対策指針（案）」策定された（（財）砂防・地すべり技術センター 1991）。

(6) 1991 年風倒木災害

1991 年 9 月の台風 19 号は、いわゆる「風台風」で、瞬間最大風速は阿蘇山 60.9m/s、熊本 52.6m/s と、その記録的な強風により大分県を中心に九州北部の広い範囲で、スギ・ヒノキの人工林を主として、風倒木の森林災害が発生した。人的被害は無かったものの、その風倒木地の面積は、大分県では森林面積の 5%にあたる 23000ha、福岡県では森林面積の 4%にあたる 14000ha で、両県の森林被害額は約 800 億円であった（福岡県砂防課 1994. 大分県砂防課 1994）。この災害は本研究の対象であるので詳細については第 2 章で述べる。

(7) 1993 年大分県風倒木地域の梅雨災害

1993 年には、風倒災害が激しい大分県上津江、中津江村で、6 月の梅雨前線の集中豪雨により、崩壊や土石流が多発し、2 名の死者と人家に多くの被害が発生した。このときの土石流のほとんどは、源頭部に崩壊が存在し、土石流の発生は山腹の崩壊が引き金となっている。（この災害も本研究のもう一つの対象であり、詳細については第 3 章で述べる。）

このときに、筑後川に建設されていた下釜・松原ダムには約 9 万 m³の風倒木が流木として流入した。また、同年 9 月には台風 13 号による豪雨のため、大分県の北部の山国町、耶馬溪町、本耶馬溪町の風倒木地を中心に崩壊・土石流が多発した（大分県砂防課 1994）。

(8) 1993 年鹿児島災害

1993 年鹿児島県下では、7 月 4 日～7 日の梅雨前線豪雨と 7 月 31 日～8 月 2 日の豪雨、8 月 6 日の豪雨、さらに 9 月 2～3 日の台風 13 号による豪雨と 4 回の豪雨に見舞

われた。この豪雨による土砂災害で、121名の死者・行方不明者を記録した。このときの7月の降雨量は、800～1200mmと通常の年間降雨量の半分近い量であった（下川 1994）。

(9) 1995 年姫川・関川災害

1995 年 7 月に長野県北部を中心に梅雨前線による豪雨が発生し、この豪雨は姫川、関川、黒部川で激甚な土砂災害を発生させた。特に、姫川水系では流域内の崩壊土砂量は 1000 万 m^3 と推定され、国道や J R の鉄道などに甚大な被害が生じた。幸い、人的被害はなかった（小合沢 1996）。この災害の特徴として、姫川本川の著しい河床上昇があげられる。この原因として、支川源流部等の山腹崩壊もさることながら、地すべり性の崩壊の多発、本川側岸の河岸・溪岸の崩壊があげられる。

(10) 1996 年蒲原沢の土石流災害

1996 年 12 月 6 日に姫川左支川蒲原川上流部の標高 1300m 付近で崩壊（崩壊土砂量約 39000 m^3 ）が生じ、この崩壊土砂は土石流となって流下し、姫川合流点付近まで達した。この土石流により蒲原川下流で砂防・治山工事に従事していた 14 名の死者が発生した。この崩壊は、前年の姫川・関川災害時に発生した崩壊の拡大崩壊で、崩壊時に積雪はあったものの、降雨は前日に 42mm（小谷観測所）が観測されているが、土石流発生時に降雨はなかった（12.6 蒲原沢土石流災害調査委員会 1997）。12 月での土石流の発生、特に、人的被害を発生させたものは、記録上初めてであり、融雪に起因する土石流の発生に一石を投じた。

(11) 1997 年熊沢の地すべり・土石流災害

1997 年 5 月に秋田県鹿角市八幡平の熊の沢で移動土塊 250 万 m^3 の地すべりが発生し、その崩壊土砂のうち 50 万 m^3 が土石流となって、1km 下流の赤川温泉を襲い 16 棟の温泉宿を流出させた。このとき同時に火山性の水蒸気爆発を伴った。この地すべりの発生は、数日前から前兆現象が確認されていたため、事前避難が行われ人的被害は発生しなかった（南等 1997a. 千葉等 1997）。

(12) 1997 年針原沢土石流災害

1997 年 7 月に鹿児島県出水市の針原沢本川中流部右岸斜面で大規模崩壊が生じ、その崩壊土塊は、直接土石流となって下流扇状地の人家を襲い、死者 24 名を出す災害

となった。この崩壊は、安山岩の強風化した厚い土層で発生し、最大崩壊深は 28m、崩壊土量は約 16 万 m^3 であった。4 時間前までの連続雨量は 400mm であったが、崩壊は降雨終了後に発生した（南等 1997b）。

針原川中流で建設中の砂防ダム下流の氾濫状況からは、土塊は、土石流形態で流下したことを示しているが、砂防ダム上流に堆積した崩壊土塊は、プラグ的な流れで乱れがなく流下し、土石流形態を呈していない。この崩壊は平行斜面で発生し、地表の集水地形は認められず、このような大規模崩壊の発生の予測は、非常に困難と言えよう。

(13) 1999 年広島・呉の災害

1999 年 6 月に梅雨前線による局地的な豪雨で、広島市佐伯区と呉市を中心に土石流・がけ崩れが多発し死者 13 名を出す災害となった。この豪雨は、呉土木観測所で最大時間雨量 69mm、魚切ダム雨量観測所 63mm、三津雨量観測所で 39mm を記録する短時間集中型の降雨であった（(財)砂防・地すべり技術センター 2000）。

この災害で多数の人的被害が発生した原因は、都市近郊部において宅地開発が土砂災害発生区域に隣接するようになってきたためと考えられ、この災害を契機に急傾斜地の崩壊、土石流、地すべりの土砂移動から人命を守るため土地利用を制限する「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」が制定された。

以上に述べた過去 20 年間の土砂災害の実態からまとめられる特徴は、以下の通りである。

- ①土砂災害そのものは以前に比較して減少傾向にある。
- ②表層崩壊による災害に比較し、深層崩壊・土石流が目立っている。
- ③これまでも発生は認められていたが、流木災害の重要性が注目されるようになってきた。
- ④1991 年の台風 19 号時、その後の 1993 年の土砂災害は少ない降雨で土砂災害が発生している。

すなわち、過去 20 年間の土砂災害の特徴はすべて日本の森林成長に関係している。つまり②で述べたように、山腹斜面の表層崩壊に起因する土砂災害に比較し、規模の大きい崩壊（深層崩壊）に起因する災害の発生が目立つようになってきたのは、戦後荒廃していた山地が、近年、健全植生に移行し、表層土が植生の根系等に補強され、

表層崩壊が発生しにくくなってきたことが、その理由（太田 1991, 1997）であり、③は戦後植栽された人工林や広葉樹 2 次林の成長が原因であり、さらに④は風倒災害によるものであるが、その原因として、人工一斉林への植生転換、さらにその人工林の除伐・間伐等の森林管理の不徹底が、樹木の根系の発達を阻害し、風圧に対する抵抗力を低減させたこと、および本研究が対象とする成長した樹木の風による揺動が考えられる（K. MATSUMURA 1994）。

1.2 風倒木災害の実態と研究

本研究で取り扱う土砂災害は風倒木災害に起因するものであるので、風倒木災害の実態について検討した。

1.2.1 風倒木災害の実態

森林の風倒による災害調査・研究は多くはなく、風の規模と風倒木地の範囲など記述した文献も少ない。洞爺丸台風、伊勢湾台風、第 2 室戸台風など暴風雨を伴った台風では、風倒災害は発生しているが、山腹斜面等の崩壊や土石流に起因する災害に比較して、残されている資料は少ない。ここでは入手資料を基に風倒被害についてとりまとめる。

(1) 1954 年洞爺丸台風

風台風の著名なものの一つとして「洞爺丸台風」が挙げられる。1954 年 9 月の台風 15 号（洞爺丸台風）は風台風で、大隅半島に上陸し、瀬戸内海を斜めに横断し、能登半島沖を通過し津軽海峡の西に達した。この間の台風の色度は 70~100km/s と猛スピードであり、津軽海峡付近でも発達し、北海道付近でも中心気圧 960mb 以下という強い勢力を持っていた。この台風は、鹿児島県から北海道北部まで日本を縦断したため、その被害も全国的に広がり、死者 1327 名、行方不明者 371 名、負傷者 1387 名（その内、洞爺丸沈没による死者 1047 名、行方不明 92 名）建物被害 3 万 167 建物浸水 10 万 3533 戸、田畑浸水 8 万 2962 町、船舶被害 1752 隻、北海道岩内町の大失火で焼失 3300 戸、死者 34 名、行方不明 29 名、負傷者 223 名という大きな被害を被った。また、石狩川流域では約 8000 万石に及ぶ莫大な風倒木が発生した（自然災害科学事典 1988）。

また、この洞爺丸台風は北海道に大きな風倒災害をもたらしたことで有名である。たとえば、帯広営林支局上士幌営林署管内では、面積 17000ha、材積約 106 万 m^3 の風倒被害が発生している。そして、その後、この風倒による被害の回復は、激害区で 37 年後に被害前蓄積の 90%に達した（佐々木等 1992）。

(2) 1959 年伊勢湾台風

伊勢湾台風は、1959 年 9 月 26 日に潮岬西方に上陸し、そのときの勢力は、最低気圧 929.5hPa, 最大風速 50m/s を記録するとともに暴風半径も 500km におよぶ超大型の強い台風であった。上陸後は奈良・三重両県の境を平均速度 65km/h で通り、1 時過ぎに名古屋市の西を通過し、6 時間あまりで本土を横断し、翌日 0 時過ぎには富山県から日本海に出て衰えながら北上し、秋田県に再上陸して東北地方北部を横断した。

この台風の被害は九州と北海道をのぞく全国各地におよんだが、特に伊勢湾では台風通過時刻が、満潮に重なったため、観測史上空前の高潮と烈風による波浪で海岸堤防を破壊し名古屋市南部とそのほかの湾岸沿いの低地帯を飲み込み、被害は死者・行方不明者の総数は 5098 名（うち愛知県 3251 名、三重県 1273 名）にのぼり、明治以降では最大の台風災害となった。その他の被害は、家屋全壊 3 万 6135 棟、家屋流出 4703 棟、家屋半壊 11 万 3052 棟、家屋浸水 36 万 3616 棟、山・崖崩れ 7231 カ所であった。

また、この台風でも多くの風倒災害が発生している。すなわち紀伊半島では、伊勢神宮鏡内で樹齢何百年という大木が強風によって多数倒壊したほか、奈良県内でも春日山原始林やその他で巨木の倒壊が多数発生した。また、長野・山梨・群馬各県においても強風による建物の損壊や倒木などの被害が大きかった（日本の自然災害 1998）。

なお、この台風による長野営林局南木曾営林署管内（3500ha）における風倒は針広混交林や広葉樹林ではほとんど発生はなく、主として針葉樹林で発生し、樹齢別では 40 年未満の林地ではほとんど発生はなかった（林野庁治山課 1993）。

(3) 1981 年台風 15 号

8 月の台風 15 号の観測では、最大風速は苫小牧で 27.7m/s, 最大瞬間風速では浦河 40.4m/s, 苫小牧 38.6m/s, 釧路 33.2m/s と記録的であった。この強風のため十勝、胆振東部、日高西部、上川南部の北海道中央部から東部で風倒木被害が生じた。その面積は、58780ha で、カラマツ人工林の被害が多く全体風害量の 35%を占めている（東京大学付属演習林 1990）。

(4) 1982 年台風 10 号

台風 10 号は、浅間連峰南麓域に非常に強い山岳下波を引き起こし、樹齢 70 年以上のカラマツを含む、カラマツ一斉林に大きな風倒被害を発生させた。軽井沢での最大

瞬間風速は8月2日0時30分頃に発生しており、台風が渥美半島に上陸した頃で、台風の位置関係からは一般風であるが、いわゆる台風のショルダー効果がはたらき軽井沢周辺に強風をもたらしたものと考えられる。この一斉林の風倒被害は、木材不況のため手入れが行き届かないことが原因であるとされている。また、この地域では、昭和1959年台風7号でも風倒被害が生じている（樋口 1985）。

(5) 1990 年台風 19 号

台風19号は、9月19日20時過ぎに和歌山県白浜町に上陸し、尾鷲測候所で最大瞬間風速56.1m/s、三重県津地方気象台で43.9m/sの最大瞬間風速を記録した。三重県下での風倒木被害は、スギ、ヒノキを中心に2700ha及んだ（陶山 1993）。

(6) 1991 年台風 19 号

1991年の台風19号は、9月27日16時過ぎに長崎県佐世保市に上陸した。その時の中心気圧は940HP、中心付近の最大風速は50m/s、暴風（25m/s以上）半径が300km以上、強風（15m/s以上）半径が600kmの勢力であった。

風倒木の被害が大きかった大分県におけるこの台風19号の最大瞬間風速、最大風速とともに風向は南西から南南西であり、風倒木の倒れている方向とほぼ一致しているため、風倒木は、この台風の強風時に発生したと推定される。

風倒木は、全国各地で発生したが、特に、九州北部の大分県、福岡県、熊本県、佐賀県の被害は激甚であった。その中で、特に被害の著しい大分・福岡・熊本県境の流域での風倒木地面積率は、山国川で12.7%と非常に大きく、全流域の平均は、9.7%である（（財）砂防・地すべり技術センター 1993）

日田測候所で観測された降雨記録は、総降水量で74.0mm、最大日降水量で70.5mm、最大1時間降水量で28.5mmとこのような被害を発生させた台風の降雨にしては少なく、風倒木発生と同時に生じたと推定される崩壊地は、風倒木の影響があったため、このような小さな降雨で発生したと考えられる。

(7) 1993 年台風 13 号

9月3日午後4時ごろ薩摩半島に上陸した台風13号は、中心気圧930hpa、暴風域半径半径190km、中心付近の最大風速は、50m/sで、大隅半島肝属郡大根占町で74m/sの瞬間最大風速を記録し、薩摩半島南部、大隅半島南部で風倒木の被害が発生した。その被害区域面積は6500ha、被害額は66億円であった。

被害の特徴は、以下のものであった（安楽 1994）。

- ①スギの人工林の被害が多く見られる。
- ②被害は、20 年生以上の林分に多い。
- ③被害の形態は、根返りが 80%、折損が 20%程度となっている。
- ④被害は、傾斜 0～10 度の比較的緩やかな傾斜のところに多く見られる。
- ⑤ 被害は局所的で、0.1ha 以下の小面積で発生している。

(8) 1998 年台風 7 号

台風 7 号は、9 月 22 日日本州中央部に上陸し、近畿・中部地方、特に岐阜県下では大きな風災害を与えた。このときに奈良の室生寺では、国宝の五重塔が、強風で倒れた巨木で大きく損傷を受けた。この台風の局所的な最大風速は 40m/s 以上と想定された。その 2 日後（9 月 24 日）に秋雨前線に伴う降雨が 53mm あり、9 月 25 日に局地的な降雨(76mm)があり、飛騨川支川大洞谷では台風 7 号時に発生した風倒木箇所でも多数の崩壊が発生し、これを引き金に土石流も多発した。

奈良県下での森林被害は、2579.35ha にのぼり、被害面積では、とくに室生村、吉野町、東吉野村で 300ha を超えている。一方、被害率では、明日香村(5.41%)、菟田野町(4.88%)、室生村(3.98%) 吉野町(3.94%) で高い値を示している（松本等 1999）。

以上の風倒木の実態から以下のような事柄がまとめられる。

- ① 全国的な広がりをもつ風倒木被害は、強風を加速させる速度の非常に速い、大型の台風によるものが多い。
- ② 倒木は、スギ・ヒノキやカラマツなどの針葉樹に多く発生するが、伊勢湾台風では春日山原始林でも風倒は発生している。
- ③ 倒木は高齢林に多い。
- ④ 倒木の発生により、雨が少なくても同時に崩壊を発生させる。
- ⑤ 倒木の発生は、山腹斜面表層土の強度低下を招きその後の崩壊発生に対する抵抗力を小さくする。

1.2.2 風倒木災害の研究の流れ

風倒木災害を扱った研究はそれほど多くはない。資料のほとんどが報告書の形式で災害の記述のみである。また、扱う分野も気象学、災害科学、砂防学、森林生態学、造林学などに分散しており、研究スタイルはどれも単発のトピック的な研究である。

そのため、既往の研究成果を集めることも困難である。ここでは入手できた論文・報告書のうち単なる被害調査を除き何らかの解説が加えられたものを列記する。

A. 風倒木の被害と崩壊の関係については以下の研究がある。

(1) 伊勢湾台風で風倒被害が発生した長野営林局南木曾営林署管内において、その後の 10 年間の追跡調査では、昭和 44 年（1969）時点で 100×100m のメッシュ内の崩壊は風倒のメッシュでは、風倒のないメッシュに比較し崩壊割合が多くなっている。これは、1959 年の風倒発生がその際の崩壊を誘発し、また崩壊が発生しなかった林地でも風倒木の発生がその後の豪雨による崩壊発生を招いたと考えられる。また、1959 年時点で風倒した林地は、その後の 10 年の間に新たに崩壊した割合が大きい。また、風倒しなかった林地を伐採（皆伐）・造林した場合も、風倒した場所と大差ない割合で崩壊が起こっている。それらに比較すると、風倒も伐採もしない林地は 10 年後の崩壊の発生割合が著しく小さい（林野庁治山課 1993）。

(2) 木村等（1992）は 1991 年台風 19 号時に出羽三山神社周辺において、国の特別天然記念物である大杉の被害を調査し、その原因を、①台風の移動速度が大きかったこと、②樹齢が高く樹勢が衰えていたこと、③地形と風向の関係、④地すべりの発生、としている。この地域においては、1959 年の台風 15 号（伊勢湾台風）や 1961 年の台風 18 号（第 2 室戸台風）で被害が発生している。

(3) 陶山（1993）は、台風 19 号の森林被害に対して、①樹木部位別被害形態の分類、②樹木モデルを用い樹冠形状や配置による風圧力の推定、③木材強度の関連で風倒・折損発生機構の検討、④現地での伐根試験用いた樹木根系の風倒・折損抵抗力の力学的評価を行った。

この論文では、樹木根系の風倒に対する抵抗を評価しようとしているが、その抵抗は根系そのものによるものか、根系が作る土塊と斜面土層との抵抗なのかが明確になっていない。当然、相互作用も考えられる。

B. 砂防対策の観点からは、以下のような研究報告がある。

(4) 1991 年台風 19 号による激甚な風倒被害が発生した九州北部において、風倒木の

発生箇所は、風が集中しやすい地形、また、尾根部の風が剥離しやすい箇所、孤立峰の中腹部で風が加速されやすい部分で生じていることを指摘し、さらに、風倒木はスギを中心とした人工林に多く((財)砂防・地すべり技術センター 1993, 宮本等 1992), また、同時に生じた山腹崩壊は、30度以上の急勾配斜面に多いことも明らかにした。

(5) 北園等(1993)は、1991年台風19号で風倒災害が発生した熊本県小国町と南小国町の風倒木災害斜面でポータブルコーン貫入試験器を用いて地盤強度を調査した。その結果、風倒木の影響が大きい斜面ほど、表層から40～50cm深さの根系発達部の強度低下が著しいことを指摘し、その後の大雨による二次災害の危険性を指摘した。

(6) 安部等(1993)は、1991年台風19号で発生した広島県北西部の風倒木地で、翌年(1992年)8月の局地的集中豪雨で生じた斜面崩壊・土石流に関し、根返り風倒木の影響の調査を行った。この地域は、1989年の集中豪雨(加計町の災害)で多数の崩壊が発生した地域で、その時の崩壊発生斜面形は凹型であったが、今回の崩壊斜面は、急勾配・平衡斜面に多く発生したのが特徴的であるとした。その原因として、樹木に2種類の根系発達パターンはあるものの、根系発達は同一深度で、風倒木根系の影響で不安定土層が平面的に形成されていたためとしている。

(7) 村田等(1994)は、熊本県小国町、坂本村において、1991年に風倒木災害が生じ、1993年に発生した斜面崩壊について、降雨と風倒木の関係を定性的に考察し、崩壊の発生は、①風倒木による表層土の強度低下、②表層土擾乱による透水係数の増大、③その結果、地下水の上昇が容易になり、基岩をすべり面とする崩壊が発生したとした。

C. 1991年九州北部で発生において台風19号で発生した風倒木地の面積は広大であることから、その地域の同定にリモートセンシング技術を用いる方法が採用され始めた。

(8) 後藤等(1992)は、1991年の台風19号で生じた大分県日田市の森林被害について、MOS/MESSRデータを用い、後藤等の既往研究成果であるRVI(=近赤外の反射強さ/赤色光域の反射強さ)の植物活性指標を計算した。その比較データから、スギ、ヒノキ等の人工林の風倒災害が、目視による規模(4800ha)以上に及ぶことを明らかにした。

この論文においては、植物の活性度と反射特性の関係は従来の研究成果の典型的

なものを使っているが、チェックデータの信頼性が低く、グラントゥールースが十分行われていないと判断される。

(9) 石黒等(1995)は、後藤らと同じ地域で、風倒木被害地の抽出を Landsat の TM データを用いて調査を行った。植生活力指標のアルゴリズムとして RVI と NDVI を用い、さらに新たな植生指標として RIB ($IR1/IR2=Band5/Band7$) 考案し、その比較を行った。そして、これらの植生指標による風倒木地の同定において大きな差異は少なく、どの指標も風倒木地の判別に用いることが可能とした。

しかし、この調査でも、グラントゥールースを行っていないことから、チェックデータが信頼できるものではなく、リモートセンシングで判別された風倒木地が実際の風倒木地なのかどうか明確定でないと考えられる。

このように森林の風害に関する研究は、リモートセンシング技術の進歩により 1991 年以降多くはなっているがその精度は十分でないといえる。

D. その他、風倒木災害に関する研究には以下のようなものがある。

(10) 1993 台風 13 号は熊本県南部の坂本村鮎婦川流域で風倒木を発生させ、1997 年に大規模崩壊（崩壊土砂量約 13 万 m^3 ）が生じ、油谷川をせき止めた。この崩壊の原因は、強風で倒れたスギが地盤を攪乱し雨水が浸透しやすい状況となり、崩壊斜面に集中的に流入したためとしている。崩壊当日には雨は降っていない（村田等 1998）。

(11) 1993 年台風 13 号は宮崎県内において、宮崎市で県内観測史上最高の瞬間最大風速 57.9m/s を記録し、南郷村においても 1115ha の風倒木被害を発生させ、その被害額は 2 億 9 千万円であった。このときの土壌硬度調査結果から、強風による斜面への影響は深さ 70~80cm 程度であったことが認められている（谷口等 1998）。

(12) 稲垣(1999)は、1998 年台風 7 号時に土石流が発生した飛驒川支川大洞谷地域を調査し以下の結果をまとめた。

- ・倒木の樹種は主にスギ・ヒノキである。周辺の植生についてはヤブツバキクラス域で斜面にはシキミーモミ群集が分布している。
- ・調査地とした飛驒川支溪では南向き斜面で風倒木被害が発生していた。
- ・表層土（崩壊に関わる難透水面までの層）の厚さは 0.7~0.8m である。

- ・調査地周辺の針葉樹林帯では 40～60%が倒木し、広葉樹林帯では僅か 1～2%の倒木しかなかった。
- ・倒木ヒノキの胸高直径は平均で 19.7 (16.9) cm, 倒木の根鉢は深さ 0.74 (0.71) m, 直径 1.49 (1.58)m, 推定樹齢は 15 年程度であった（カッコは別調査地）。
- ・倒木スギは同様に, 胸高直径:22.8cm, 根鉢深さ:1.08m, 同直径:1.6m であった。
- ・同地区の倒木ヒノキ林と未倒木ヒノキ林の樹林間隔を比較すると, 前者が 1.58m, 後者が 2.39m であった。
- ・倒木被害の多い地域は, 樹林間隔の狭い地域が顕著で表層土の薄い地盤であった。
- ・基岩は粘板岩とチャートである。
- ・風倒木のあった植林の表土は簡易貫入試験における N_c は値 2 以下であった。
- ・表土が比較的深い（深度 2.9m）箇所では表層の（0.75m 以浅）の N_c 値が低くても倒木を免れていた。
- ・表層崩壊の発生箇所は, 地下水や地表水の集まりやすい凹地形の斜面であった。

上記研究報告をまとめれば以下になる。

- ① 風倒木の発生は, 風が集中しやすい地形に存在する森林や樹勢の衰えが原因となる。
- ② 風倒木地には崩壊が発生しやすいことは以前から認められていたが, 1991 年台風 19 号の風倒災害発生以降, その類の研究が多くなってきた。
- ③ 風倒木は, 風が集中しやすい地形や尾根部や孤立峰などの風が加速されやすい地形に集中している。
- ④ 風倒木地では根系発達部の強度低下が著しく, その後の雨で崩壊が発生しやすい。
- ⑤ 根系発達が同深度であれば, 平行斜面でも風の影響を受けた崩壊は容易に発生する。
- ⑥ 風倒木地では, 斜面の擾乱で強度低下, 透水係数の増大で雨水が集中しやすくなり, その後, 崩壊が生じやすい。
- ⑦ リモートセンシング技術は広大な面積の風倒木地の同定に利用可能であるが精度的に課題があり, グラントゥールスを入念に行う必要がある。

以上の風倒被害の実態と研究レビューから以下のことが明らかとなった。

- ① 森林の風倒被害は, 針葉樹で高齢林に多い傾向がある。
- ② 樹林間隔が狭く表層土の薄い地盤で風倒被害は多く発生している。

- ③ 風倒木地では、その後崩壊が発生しやすくなり、その発生しやすさは森林を皆伐したと同等であり、少ない降雨でも崩壊が発生する。
- ④ 表層崩壊の発生箇所は、地下水や地表水の集まりやすい凹地形の斜面であった。
- ⑤ 風倒木は、風が集中しやすい地形や尾根部や孤立峰などの風が加速されやすい地形に集中している。
- ⑥ 風倒木発生後の崩壊は、根系の発達が同一深度であり、土層境界が平面的に形成された箇所で発生しやすい。
- ⑦ 強風による斜面表装土層に対する影響は、40～50cm または、70～80cm との調査結果があり、表層土層厚さ程度と推定される。
- ⑧ 風倒被害は、森林の手入れが行き届かないことも原因である。
- ⑨ リモートセンシング技術の植生指標を用いることで風倒木地の判別が可能である。

森林の風害は、樹木などの財産の消失といった経済的な面、流木が発生させるなどの災害面がよく認められているが、災害面ではさらに、風倒木の発生は、山地の表層土を擾乱させるといった面がある。この表層土の擾乱は、表層土を弱体化し、崩壊に対しての抵抗力が小さくなると考えられる。

土砂災害防止の観点から山腹崩壊は、土石流の発生や下流河道への流出土砂の影響を考えると重要なテーマであるが、風倒木や強風に揺すられた樹木が山腹斜面に与える影響に関する研究は少ない。

1.3 研究の目的

これまでの既往研究成果において、風倒被害は立木等の森林被害のみならず風倒木地において根系の枯死により次第に表層崩壊が発生しやすくなることその他、山腹表土が強風で擾乱される、つまり根系で補強されていた表層土がゆるみ、強度等が低下し、その後の降雨で崩壊が生じやすくなっているといった点は、一般的に認識されつつある。

風倒木の発生は、山地に対して森林の喪失と等価、つまり荒廃地が出現したことと同じ影響を与え、次世代の森林が成育するまで表層崩壊発生のポテンシャルが高くなる。つまり、①枯死木の根系の腐朽で山地表層土自体の崩壊に対する抵抗力が低下していると推定される。さらに、②風倒木の発生により、山腹斜面の表層土は大きく擾乱を受ける。さらに、このような状況下では、これまで、山腹崩壊が発生しないような少ない降雨量で、山腹崩壊・土石流の発生が生じる可能性が危惧される。

上記①の場合では根系の腐朽が要因となるため、斜面が不安定になるまでには5～15年程度を有すると言われている。一方、②の場合には風倒が直接的に表層土を擾乱するため、すぐに土層の強度低下が生じる。

一方、風倒被害はスギやヒノキ、さらにカラマツの人工林に発生しやすい傾向が見られることも多く報告されている。これらの森林は、1950年以降に木材の増産を目的として、全国的に推進された「拡大造林」の密植された人工造林地である。

近年、人件費の上昇や廉価な外国木材の輸入より、国内産の木材の競争力が相対的に小さくなり、林業従事者が減少した。これに加え、林業従事者の高齢化で、除伐・間伐等の森林の適正な管理が行き届かなくなってきた。その結果、植林地において植林初期の密植状態が続き、樹冠の成長がさまたげられ、樹幹が細い、いわゆる「モヤシ状」になっている森林を多く見かける。さらに、密植状態が持続することにより個々の樹木根系の発達が阻害され、根系による表層土の補強力や樹木自体の支持力が小さくなってきている。この発育阻害や補強力等の低下は、樹木の強風に対する抵抗力の低下にもつながり、近年の風倒被害多発の原因になっていると考えられる。

上記のように、木材価格の低廉化、林業従事者の減少・高齢化等の事情から森林管理が行き届かない中で、一見まともな森林が成立している山地において、強風などの外力を受けることにより、一挙に山腹崩壊のポテンシャルが高まることが推定される。風倒災害は、全国どこにでも生じる災害であり、森林被害はもとより、その後の土砂生産・災害の発生は、国民の生命と財産に多大な影響を与えることから、これらの現

象の解明は重要である。

本論文は、1991 年台風 19 号において大規模な風倒木被害が発生した大分県の筑後川上流域、前津江村・中津江村・上津江村の 3 村、流域面積約 284km²を対象として、風倒木被害ばかりでなく、その周辺を含めた地域を選定して、

- ① 風倒被害の実態を調査・解析するとともに、
 - ② その後、この地域に発生した崩壊の発生メカニズム
 - ③ その崩壊発生の支配降雨量等
- を解析することとした。

それは、倒れるまででなくとも、樹木が強風で強く揺すられ、根系を通じて表層土に擾乱を与え、その強度が低下したことが非常に重要な影響を及ぼしていることと考えられるからである。さらに、強風の影響を受けた林地の同定の方法についてはリモートセンシング技術を用いた検討を確実なものとすることを目指した。

1.4 研究の方法

本研究では、

- ① 既往の研究成果をもとにまず風害そのものの実態を整理し、その中で風倒木被害の位置づけを確認する。
- ② 次に 1991 年台風 19 号の風害について詳しく調査する。すなわち、気象資料より強風特性の解析、被害地の航空写真による地形特性、現地調査による被害木の特性をまとめる。
- ① 本論文の重要なテーマである「風倒が生じなかった森林地においてもその後、崩壊・土石流が発生している」点に関して「目に見えない擾乱の発生地」を定義し、その抽出にリモートセンシング技術を用いる方法を試みる。
- ② さらに、「目に見えない擾乱の発生地」では、表層土の強度低下が起こっていると考えられることから、その低下状況について簡易貫入試験を用いて調査する。
- ③ 最後にこのような状況下での「特殊な」崩壊発生メカニズムとその崩壊支配降雨について検討する。

以上のプロセスをまとめると図 1.3 のようになる。

1) 台風・強風

1991 年台風 19 号の強風特性を気象台からの発表等既往報告からとりまとめた。

2) 風倒木の発生

風倒木は、山地の全てで発生したわけではなく、また、局地的にも風倒木の状況は同質ではない。風倒木は風が加速されるような地形特性を有する箇所が発生し、樹種や樹齢等も関連すると考えられる。

風倒木の発生に関して、風倒木地を航空写真から判読し、風倒木地の分布を把握し、地形との関連で検討した。また、風倒が発生した樹種や樹齢に関しても現地調査から整理し、とりまとめた。

3) 林地の目に見える擾乱

風倒木は、「根返り」、「幹折れ」、「曲がり」のようにその損傷形態が異なるが、風倒木の発生は、林地に影響を与えることになる。このことから、林地の擾乱は、風倒木の存在で把握できる。風倒木地の分布に関しては上記に述べたように航空写真判読で計測し、地形図に移写した。また、風倒木地の擾乱の深さを現地調査により確認した。

4) 林地の目に見えない擾乱

風倒木地周辺域で、発生2年後の崩壊・土石流の多発は、今回の対象地域では特異なことであり、風倒木地周辺域においても何らかの強風の影響があったと推定された。その地域の樹木の変状は、航空写真から判読はできず、現地調査においてもその一部が把握できる程度である。対象地域は約284Km²と広く、そのすべてを調査はできない。そこで強風による樹木の枝折れや根切れ等を起こし、樹木の活性に影響を与えていると仮定し、林地の擾乱に関する指標として樹木の活性度に着目した。

樹木の活性度は、衛星と航空機による2段階のリモートセンシングデータ技術を用いて把握した。また、取得データの精度向上のため地上計測に分光放射輝度計測器を用いてキャリブレーションを行った。

5) 表層土の強度低下

山地表層土の強度低下とその範囲は、風倒木発生後の超過確率年にして約10年規模の降雨で多発した崩壊分布から推定される。その仮定に対して風倒木発生時に発生した崩壊地とその周辺地で現地において簡易貫入試験を実施し、表層土強度の鉛直分布把握した。

6) 崩壊発生機構

対象地域における崩壊・土石流の発生は、風倒木地とその周辺地域における表層土の弱体化が素因となり、その後の約数年～10年超過確率規模の降雨が誘因となっている。ここでは、降雨の浸透過程に降下浸透と表層土の不飽和強度の関連に検討を加え、

新たな崩壊のメカニズムの提案を行い、航空写真判読や現地調査から得られた崩壊データを用いて崩壊を発生させる支配的な雨量について検討した。

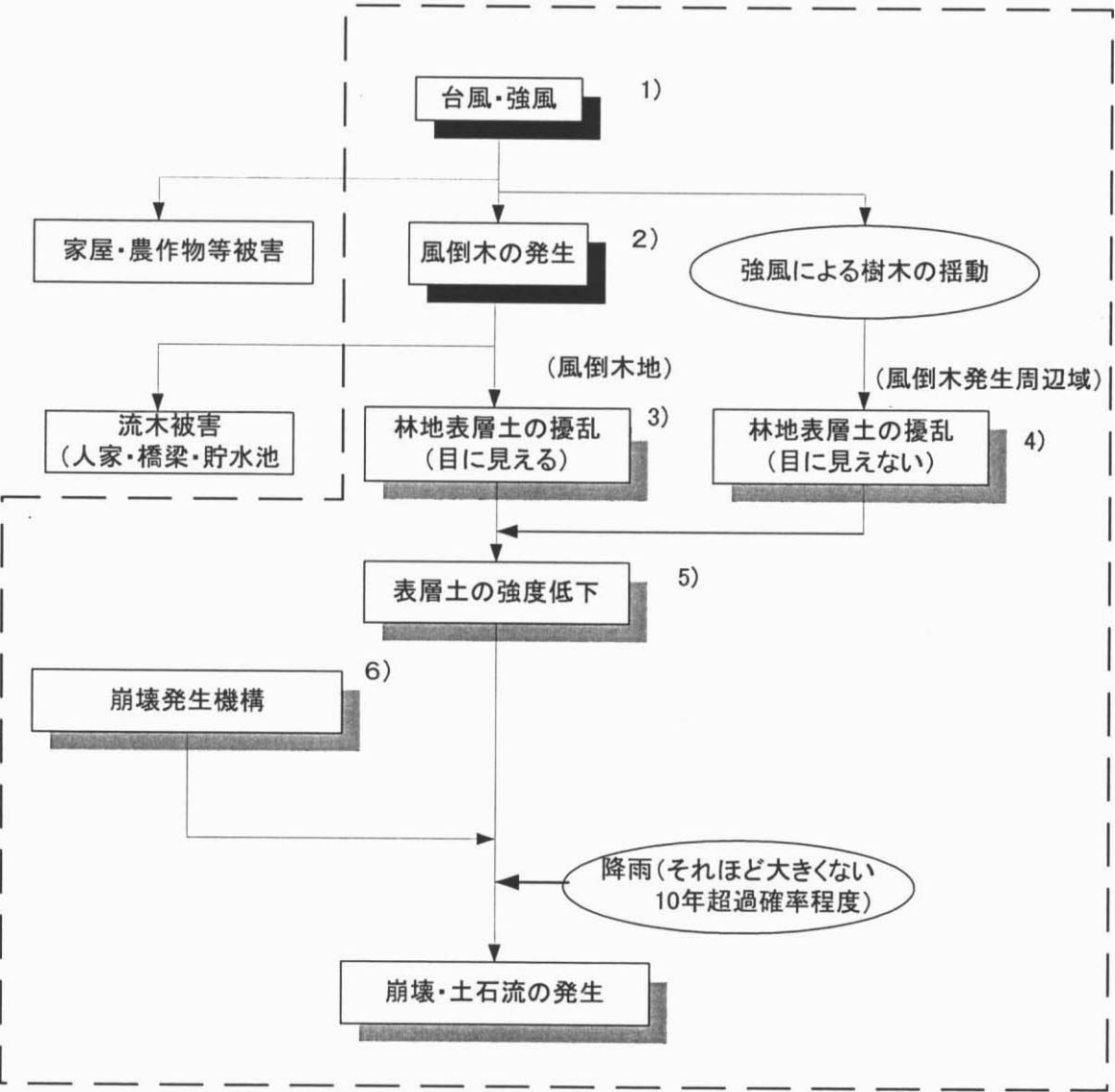


図 1.3 研究のターゲット（対象現象破線内）

1.5 論文の構成

第1章では、すでに述べたように戦後の人的被害の大きい主な台風と人的被害について既往資料からまとめ、最近20年の主要な土砂災害について若干詳しく整理した。また、それらをふまえ本論文の研究の目的とターゲットについて記述した。

第2章では、風害の分類を行い本研究のターゲットである風倒木被害と土砂災害の位置づけを示す。また、1991年台風19号の特徴と全国的に発生した被害を整理し、まとめ、本研究の対象範囲である大分県日田市周辺の風倒木被害の実態を調査し、まとめる。

第3章では、対象地域で多くの崩壊を発生させた1993年6月の降雨の実態を把握し、解析する。崩壊は風倒木地のみならず風倒木地周辺エリアにおいても多く発生していることについて言及する。

第4章では、非風倒木地での崩壊発生は表層土層の強度低下に原因があると推察し、そこで植生指標をパラメータとしてリモートセンシング技術を用いて崩壊発生の要因となる表層土層強度低下地区の同定を行う。

第5章では、代表的な風倒木地と非風倒木地の現地で簡易貫入試験を行い、崩壊発生メカニズムの検討を行い、崩壊を発生させた支配降雨について検討を行う。

第2章以降の論文の構成とそれぞれの章の流れとその関係を図1.4に示す。

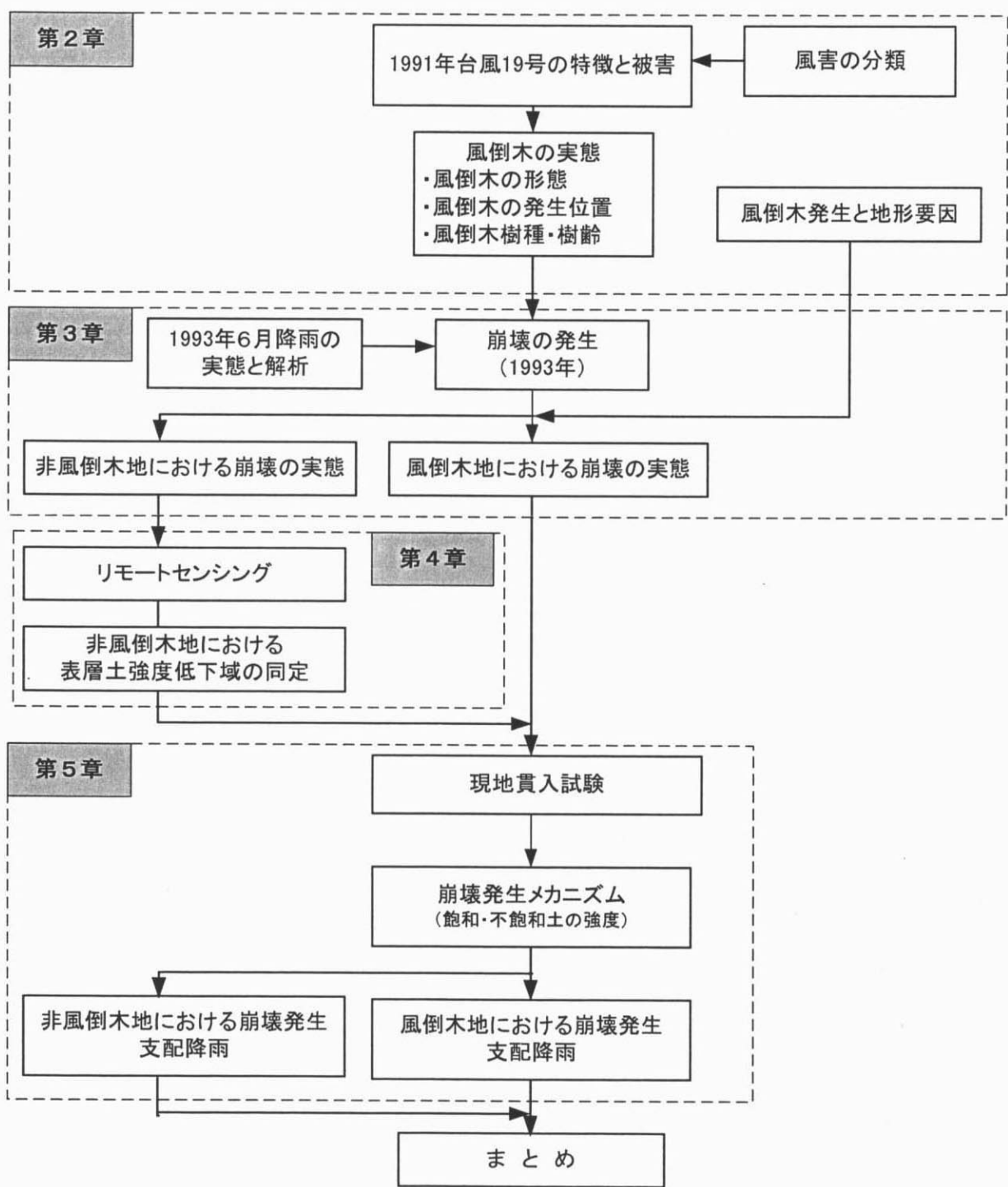


図 1.4 論文の構成

引用文献

- 12.6 蒲原沢土石流災害調査委員会：12.6 蒲原沢土石流災害調査報告，砂防学会誌，Vol. 50, No. 3, p. 89-94, 1997
- 安楽孝治：台風 13 号被害と今後の対応について，日林九支研論集，No47, p. 291-292, 1994. 9
- 安部真一，坂本省吾，底引洋隆：広島県北西部における 1991 年台風 19 号による風倒木に関連する自然斜面崩壊，第 28 回土質工学研究発表会，p. 2173 - 2174, 1993
- 千葉達朗，林信太郎，遠藤邦彦，伊藤英之，小野田敏，藤田浩司，宮原智哉：1997 年 5 月八幡平澄川地すべりと水蒸気爆発の概要，日本火山学会講演予稿集，p. 110, 1997
- 後藤恵之助，浜崎一弘，湯藤義文：台風 9119 号による風倒木災害の衛星リモートセンシング調査，日本リモートセンシング学会，第 13 回学術講演会論文集，p. 209-212, 1992
- 稲垣秀輝：植生の違いによる風倒木の発生と斜面崩壊，応用地質，第 40 巻，第 4 号，p. 196-205, 1999
- 石黒悦爾，岩崎浩一，守田和夫：Landsat-5/TM データによる森林被災地域抽出の可能性，農業機械学会誌，57(5)，p. 65 - 72, 1995
- KAZUKI MATUMURA, KUNIAKI MIYAMOTO, AKITAKA KITAZAKI：STUDY FOR A INFLUENCE ON HILL SIDE COLLAPSES BY WINDFALL TREES：PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FOREST HYDROLOGY, IUFRO, p. 415-420, 1994
- 木村正義，本間典子：台風 19 号による羽黒山での杉の被害について，鶴岡工業 高等専門学校研究紀要，27, p. 39-51, 1992
- 北園芳人，鈴木敦巳，中川寿隆，富野真：風倒木が地盤に与える影響，第 28 回土質工学研究発表会，1993 年，p. 95-96
- 樋口和夫：昭和 57 年台風 10 号による浅間山南麓の風倒木の被害状況について，日本気象学会大会講演予稿集，47, p. 233, 1985
- 福岡県砂防課：平成 3 年風倒木災害の記録，1994
- 松本勝，白土博通，八木知己：1998 年 9 月台風 7 号による奈良盆地周辺の強風被害，1998 年 9 月台風 7 号による近畿地方を中心とした強風災害に関する調査研究，平成 10 年度科学研究補助金研究成果報告書，p. 3-18, 1999. 3
- 松村和樹，中筋章人，井上公夫：土砂災害調査マニュアル，鹿島出版会，1988，p. 236-253
- 南哲行，綱木亮介，小山内信智，藤沢和範，萬徳昌昭，杉浦清徳：平成 9 年 5 月秋田県鹿角市八幡平で発生した土砂災害報告（速報），砂防学会誌，Vol. 50, No2, p. 68-73, 1997a
- 南哲行，山田孝，水野秀明，古賀省三：平成 9 年 7 月 10 日に鹿児島県出水市針原川で発生した土石流の土砂量と面積について（速報），砂防学会誌 Vol. 50, No. 3, p. 81-82, 1997b
- 宮本邦明，岡田寛，高浜淳一郎，三重野友親，岩尾道也，中尾剛：1991 年台風 19 号による風倒木に関する調査，新砂防，Vol. 45, No. 3, p. 18-23, 1992
- 村田重之，渋谷秀昭，河田晃男，矢田博久：台風による風倒木の発生と斜面崩壊の関係，自然災害西部地区部会報・論文集，p. 7-16, 1994

村田重之, 渋谷秀昭:平成 9 年 7 月熊本県坂本村鮎帰の斜面崩壊と平成 5 年 9 月台風 13 号による風倒木との関係,

自然災害西部地区部会報・論文集-22 号, p. 245-250, 1998

小合沢辰夫:平成 7 年姫川の土砂流出, 第 28 回砂防学会シンポジウム講演集, 総合的な土砂管理のあり方, p. 63-86,

1996

大分県砂防課: 風倒木災害対策砂防, 1994

太田猛彦: 土保全のための森林管理モデル, 森林科学, No. 3, p. 107-111, 1991

太田猛彦: 「生態系と調和した砂防」の基本的な考え方, 砂防学会誌, Vol. 50, No. 2, p. 55-60, 1997

林野庁治山課, (財)水利科学研究所:平成 3 年の台風 19 号による二次災害対策に関する調査報告書, 1993, p. 9-13

佐々木信彦, 木村英三: 昭和 29 年台風被害跡地の現況, 国有林業務研究発表集, Vol. 1992, 1 993, pp. 30-39

下川悦郎: 土砂災害の実態, 鹿児島豪雨災害特別シンポジウム講演概要集, p. 25-41, 1994

自然災害科学辞典: 1988, p. 413

谷口芳信, 高峰光一, 田中宏征: 1993 年宮崎県南郷村に発生した風倒木に関する地形的・土質力学的考察, 砂防

学会誌, Vol. 50, No5, p. 34-42, 1998

陶山正憲: 台風による樹木の風倒・折損機構, 水利科学, Vol. 37, No 1, p. 25-53, 1993

東京大学付属演習林: 演習林第 27 号, 1990

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 1983. 5

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 1984. 5

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 1985. 5

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 1989. 5

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 1991. 5

(財)砂防・地すべり技術センター: 平成 4 年度大分県風倒木対策全体計画, 1992

(財)砂防・地すべり技術センター: 平成 4 年度大分県風倒木対策全体計画, 1993

(財)砂防・地すべり技術センター: 土砂災害の実態, 2000. 5

第2章 1991年台風19号の風倒木災害の実態

2.1 風害

2.1.1 暴風害

暴風害被害は、地上 10m の風速が 20m/s になると耐風性の低い森林に被害が起こり始め、風速 30m/s を超えると耐風性の高い森林にも被害が発生する。風で生じる被害としては、常風害と暴風害があり、強風による森林樹木の被害は、倒壊、枝葉の折損等があり、樹木の風害形態としては、以下の表のようにまとめられている(川口 1960)。

表 2.1 暴風害の森林被害

樹体の部位		風 害 形 態
梢	頭	梢曲, 梢折
主	幹	割裂 (立木のまま裂傷), 幹折 (挫折, 裂断, 剪断, 捩折れ)
	根	根返
	枝	枝折
幹	内 部	年輪離れ (年輪に沿って材が割裂), 繊維切断
総	体	傾斜, 湾曲

また、森林以外に農地の土壌流出や果実の落下等、さらに農作物の被害、住宅の倒壊・破損、交通設備の破損、それに伴う交通遮断、送電線の切断や鉄塔倒壊による停電なども強風による被害に挙げられる。

さらに、二次的なものとして森林樹木の風倒等により山腹斜面の強度低下が生じ、それに起因する崩壊・土石流による人的・家屋の被害がある。

2.1.2 乾風害

乾風害は乾熱風害またはフェーン風害とも言われ、乾燥した高温強風の被害を指す。強風と乾燥高温風による樹木の強制蒸散が相乗的に作用して樹木枯死等の被害が生じる。また、フェーン（乾風）現象の発生は、その乾いた高温の強風で森林火災や住宅火災を生じさせる。さらに森林の消失は、その後の土壌流亡の原因となる。

2.1.3 寒風害

小雪寒冷地において冬期間に土壌凍結、根部凍結、幹部凍結などが生じると植物の水分吸収が阻害され、さらに強風により枝葉から強制的に水分が蒸散されると体内水

分が減少し、落葉や枝条の枯死などの被害が生じる。

2.1.4 塩風害

塩風害は、沿岸農地の作物に海水の飛塩粒子が樹木の葉などに付着し、塩分が樹体に進入し生理的傷害を生じさせる現象である。強風で樹木に傷が生じた場合、また塩分付着後に降雨が少ない場合には被害が拡大する。暴風時には海岸から 10～30km までの内陸部まで被害が及ぶ場合がある。

また、送電線に飛塩粒子付着すれば、漏電により停電を生じさせる。1991 年台風 19 号では、全国的に停電被害が生じた。

2.1.5 その他

強風は大きな波浪を起こし船舶の難破をおこす。1954 年の洞爺丸事故がよく知られている。さらに、台風時の潮位が高いときに波浪が大きければ沿岸域に浸水被害が発生する。地吹雪は、乾いた積雪のある地域ではよく見られる現象であり、交通障害や事故の原因となっている。

図 2.1 に強風による被害の関係を示す。

本論文では、図中上部の点線で示した強風による森林被害と被害を受けた斜面で二次的に生じる崩壊・土石流の発生を主題として取り上げる。

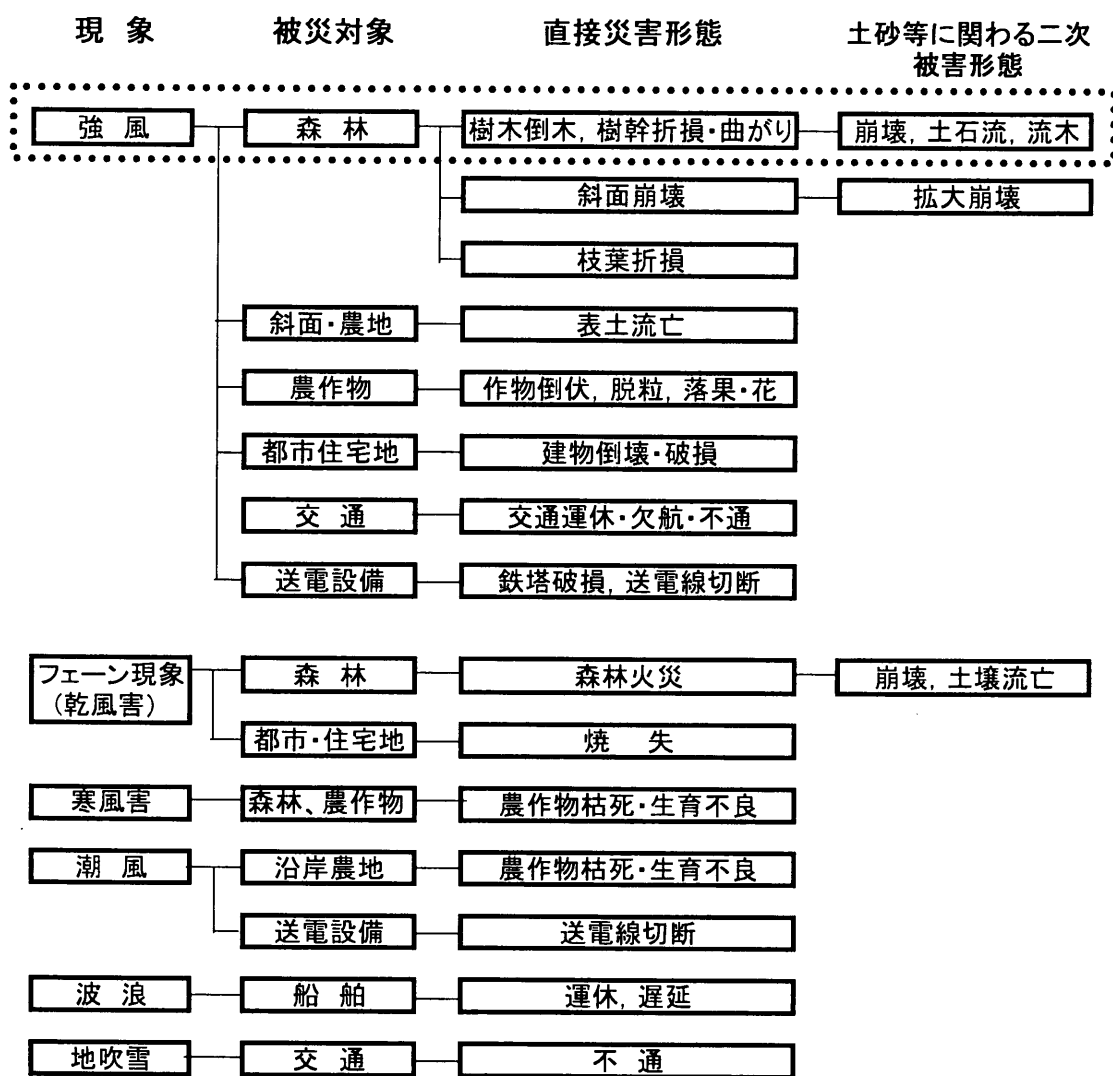



図 2.1 強風による現象と被害

 : 研究の範囲

2.2 1991年台風19号の特徴

2.2.1 気象特性

1991年の台風19号は、9月26日に沖縄付近を通過し、9月27日16時過ぎに長崎県佐世保市に上陸した。その時の中心気圧は940HP、中心付近の最大風速は50m/s、暴風（25m/s以上）半径が300km以上、強風（15m/s以上）半径が600kmの勢力であった。

その後、19時頃山口県萩沖、20時には島根県浜田市の西北西40Kmを70km/hrの速度で北東に進み、さらに速度をあげて28日8時頃北海道渡島半島に再上陸した。その後勢力を弱めオホーツク海に抜け、温帯低気圧に変わった。台風19号の進路を図2.2に示す。この進路は、同様の風台風であった1959年の洞爺丸台風に酷似している。

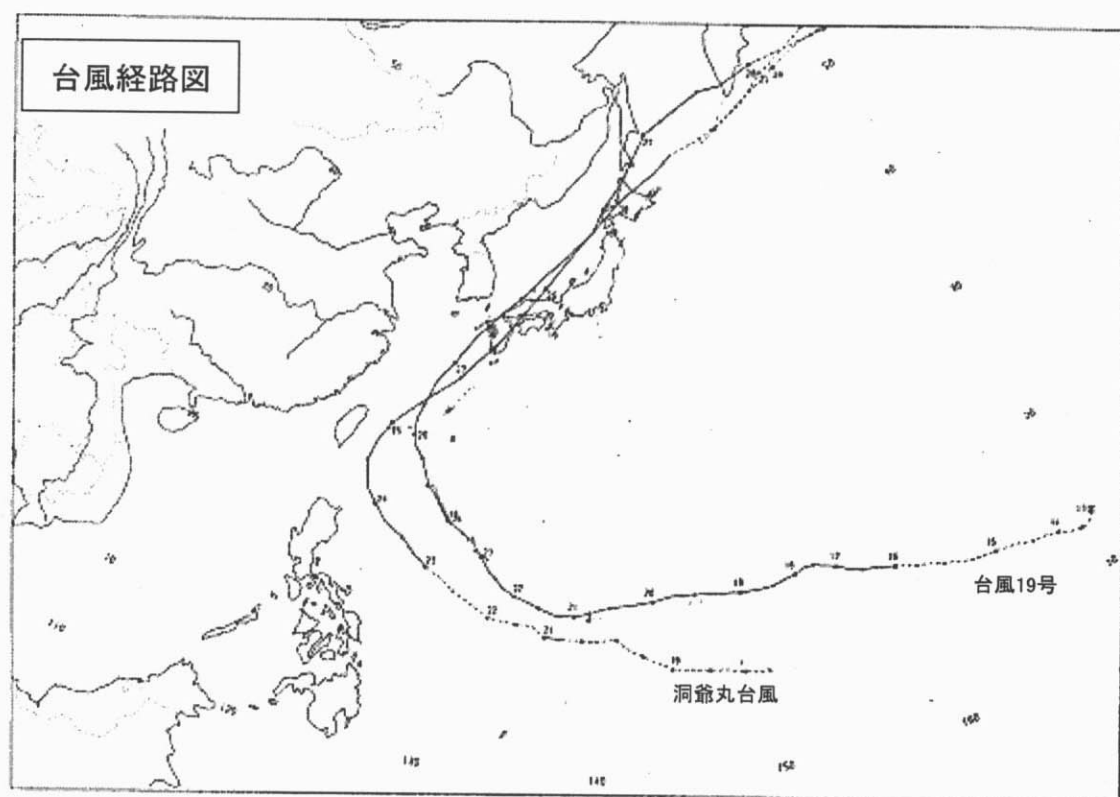


図2.2 台風19号と洞爺丸台風の進路

台風19号は、北海道に再上陸する頃には、その速度が90km/hr（25m/s）を超えていた。そのため、台風の進路右側にあたる地域の西日本から北日本にかけて日本海側を中心に各地で観測史上最大もしくは上位の瞬間風速を観測した。各地での最大瞬間

風速を以下に列記する。

大分県日田測候所では、最大瞬間風速44.4m/sを記録し、これまでの30.1m/sを大幅に更新した（大分県・大分地方气象台，1991，宮沢，1992）のをはじめ，佐賀气象台で52.6m/s（観測史上第2位），福岡県甘木農林事務所で67.0m/s，筑後市63 m/s，熊本県阿蘇山で60.9m/s，広島市で58.9m/s，岡山で39.4m/s，松江56.5m/s，鳥取市で48.6m/s，石川県輪島市で57.3m/s，新潟市で45.5m/s，山形県酒田市で45.9m/s（観測史上第2位），秋田市で51.4m/s，青森市で53.9m/s，青森県黒石市で62m/sを観測した。

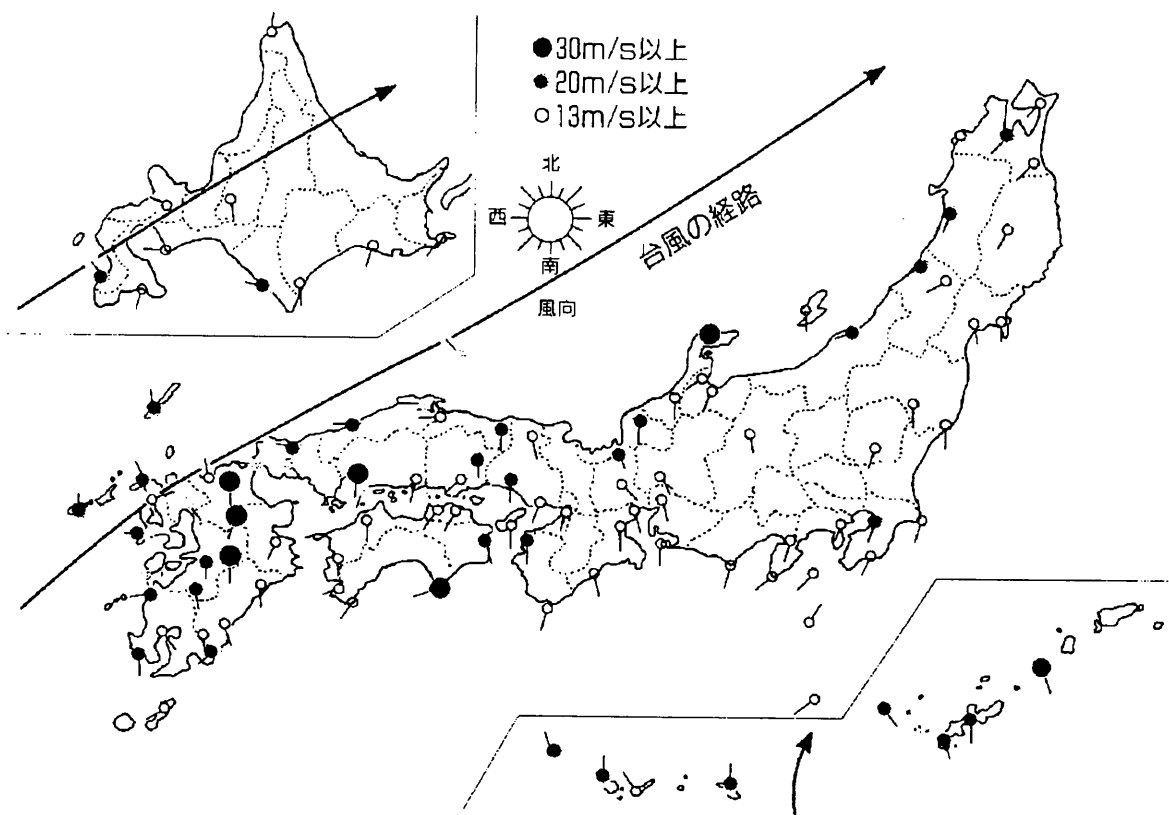


図 2.3 台風の進路と気象官署の最大10分間平均風速分布

2.2.2 一般的被害

台風19号は小雨と非常に強い風が特徴で、各地で強風に伴う被害が発生した。以下に分野別の被害の概況を既往資料からとりまとめる。

(1) 農産物被害

佐賀県では、水稻の登熟期間に県の中心部を横断する形で県下全域を暴風雨圏に巻き込み通過した台風19号により、倒伏や穂切れや脱粒などにより未曾有の大被害をもたらした。台風17号の塩害と相まって、佐賀県の水稻の10aあたりの収穫は333Kgで、作況指数は64と全国最低となり、佐賀県の作況指数として戦後最悪のものとなった（山本等 1993）。

福岡県では主要果実産地で最大瞬間風速60m/s相当を記録し、台風の被害は全栽培果実に発生し、中でも収穫前のカキ、キウイフルーツの被害が大きかった。カキの直接的被害は、果実の落果及び傷害実、落葉、倒伏、枝の折損が主要なもので、早期落葉による果実肥大の抑制及び着色遅延の間接的被害も見られ、福岡県内のカキの出荷量は前年対比47%にとどまった（林等 1994）。

鳥取県では、鳥取東郷農協では7割の梨が落下したのをはじめ、牛舎倒壊による乳牛の圧死、停電で採卵鶏の衰弱死などの被害が生じ、果実被害13億7,800万円、野菜被害11億4300万円など農作物関連で約27億6,900万円の被害、畜産関係被害4億8200万円のが生じた（野田 1992）。

愛媛県中島は、6つの島からなり、明治はじめからミカン園が開かれて、全島ともほぼ山頂までミカン園が普及している。このミカン園は、台風19号の強風の塩害により開設以来の被害を受けた。被害の大きい順で、①海水が高波により直接進入した海岸近くの平地部、②直接風の当たった西及び南斜面、③山に至るまでの平地であり、海拔300mまで塩害が及んでいる（田中等 1993）。

青森県下では、リンゴ樹が約44万本強風で倒伏し、約13万本で大枝の折損が認められた。リンゴ果実の落果も34万トであり、これまでの最大の被害の1981年台風15号の約8万トンを大きく上まった（福田 1992）。

(2) ライフラインの被害

中国5県の電力供給は、中国電力(株)によって行われているが、台風19号の強風により、電柱の折損や樹木が電線に倒れるなどして、電線が切断された。中国地方も山口県を中心に約142万戸が停電した。さらに沿岸部においては、停電はいったん回復に向かったが、台風通過後3日目の雨の塩害のため2次的な停電が発生し停電期間が

長くなった。この停電影響で、交通や水道などに被害が及んだ（後藤等 1993）。東北6県では、秋田県の19万戸の停電を中心に約24万戸が電力障害を被った。各地の停電被害を表2. 2に示す（秋田県林業技術センター 1998）。

表2.2 各地方の停電被害

電力会社	停電戸数	発生日	回復日	最大停電時間
北海道	4000	9月28日	9月28日	7時間45分
東北	468000	9月27日	10月2日	115時間09分
東京	39000	9月27日	9月28日	13時間38分
中部	10000	9月27日	9月28日	15時間42分
北陸	216000	9月27日	10月1日	94時間15分
関西	196000	9月27日	9月28日	2時間48分
中国	1552000	9月27日	10月4日	157時間42分
四国	117000	9月27日	9月30日	77時間07分
九州	2102000	9月27日	10月1日	113時間55分
沖縄	39000	9月26日	9月27日	34時間55分
合計	4743000			

(3) 住宅等被害

強風で発生したフェーン現象で、富山県朝日町で午前1時に36.5度、山形県酒田市で午前4時13分に33.0度を記録し、秋田県男鹿地方でも29.9度となり、富山県小矢部市と山形庄内地方で火災を発生させている。

また、青森県では住宅全壊焼102戸、半壊焼14,263戸が発生し、秋田県では全壊焼39戸、半壊焼12526戸が被害を被った。また、鶴岡市と酒田市で約6800棟のビニールハウスが破損・倒壊した。これは、両市のビニールハウスの80%以上を占める。

(4) 森林被害

森林の被害は、九州北部域で甚大なものとなり、福岡県での森林被害は、14000ha、大分県では23000haに及んだ。しかし、台風19号の2週間前に台風17号がきわめてにているコースを通過しているので、いずれの台風に起因する被害かは明確に区分され

ていない（（財）砂防・地すべり技術センター 1992）。

1991 年台風 19 号による九州福岡県で発生した森林被害は，人工林を中心に福岡県下で 7000ha におよんでいる。これらの台風による暴風は，台風 19 号では，甘木農林事務所で最大瞬間風速 67m/s を記録した。

次に，台風19号の各県の被害状況を表2.3に示す。全国では死者・行方不明者62名，全壊家屋371棟，半壊家屋2903棟，全焼23棟の被害が生じている。

表2.3 台風19号の全国被害

	人的被害(人)	建物被害(棟)			山・崖崩れ
	死者・行方不明	全壊	半壊	全焼	(箇所)
北海道	1	3	7	0	0
青森	9	4	34	0	0
岩手	0	3	3	0	0
宮城	0	0	0	0	1
秋田	5	21	592	0	1
山形	1	0	8	0	0
新潟	1	0	21	0	0
富山	0	0	5	16	0
石川	1	7	95	0	0
福井	0	2	1	2	0
長野	0	0	4	0	0
岐阜	0	0	1	0	0
三重	0	0	0	0	2
京都	0	0	1	0	0
大阪	3	0	0	0	0
兵庫	0	0	1	0	0
鳥取	3	2	10	0	0
島根	1	16	103	0	26
岡山	0	6	74	0	0
広島	6	41	200	1	26
山口	5	32	414	0	14
徳島	0	0	0	0	7
香川	0	1	1	0	0
愛媛	1	34	24	0	2
高知	1	0	0	0	3
福岡	11	116	922	1	4
佐賀	0	5	1	0	1
長崎	5	33	230	0	11
熊本	5	27	93	3	8
大分	1	8	6	0	9
宮崎	0	0	0	0	7
鹿児島	2	10	50	0	19
沖縄	0	0	2	0	0
計	62	371	2903	23	141

2.3.1 九州北部の風倒木の発生状況

風倒木は、全国各地で発生したが、特に、九州北部の、佐賀県の被害は大きいものであった。九州で発生した風倒木地の分布を図2.4に示す。

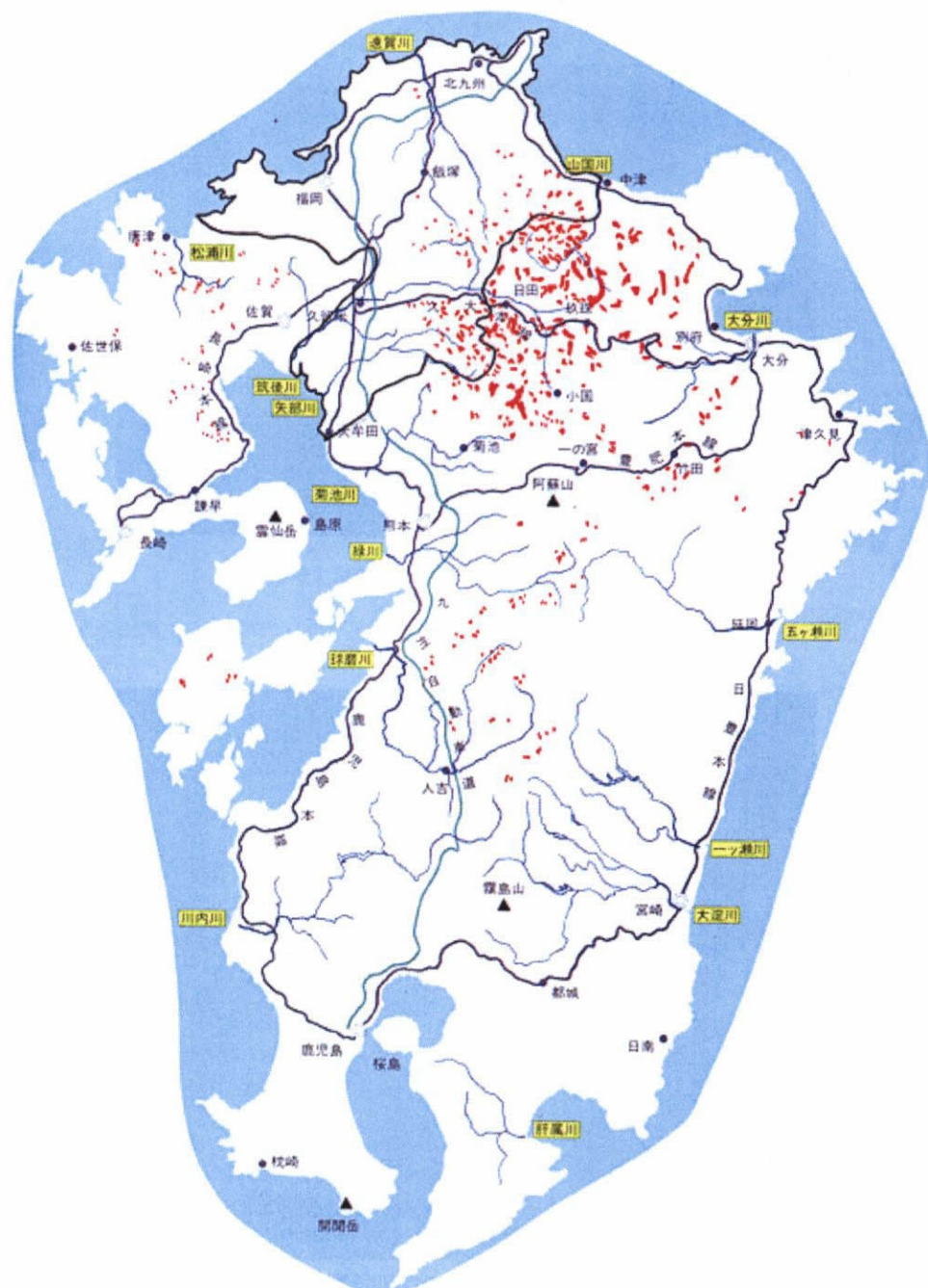


図2.4 台風19号による九州の風倒木地の分布

この図から、大分・福岡・熊本県の県境付近での風倒被害面積が大きいことが認められる。被害の著しい大分・福岡・熊本県では、風倒木のほとんどがスギ・ヒノキであった。風倒被害が人工林で発生したとして、人工林面積に占める風倒面積について整理すれば、表 2.4のようにまとめられる。大分県の人工林面積に占める風倒面積率は10.1%と他の2県を凌駕している（（財）砂防・地すべり技術センター 1992）。

表2.4 各県の風倒木被害

	大分県	福岡県	熊本県	合 計
風倒木本数（千本）	22,000	10,900	6,000	38,900
風倒面積（ha）	22,018	7,239	5,780	35,037
人工林面積（ha）	218,885	131,041	243,452	593,378
被害率（％）	10.1	5.5	2.4	5.9

また、上記各県に関わる主要河川における、流域面積にしめる風倒木地面積率を、以下に示す。この表から山国川で12.7%と非常に大きく、全流域の平均は、9.7%である。

表 2.5 流域別風倒木地面積

流 域 名 (Km ²)	流域面積 10 ³ m ²	風倒木面積 m ²	面積率 (%)
筑 後 川	1,100.39	102,652.0	9.3
山 国 川	444.83	59,192.5	12.7
犬 丸 川	39.46	3,738.8	9.5
駅 館 川	152.72	7,148.7	4.7
そ の 他	54.09	3,613.9	5.3
合 計（平均）	1,813.49	176,354.9	9.7

2.3.2 大分県北部の風倒木の発生状況

上記図2.4に示したように風倒木地は九州全域に発生しているが、特に大分県北西部には、集中的に発生している。そこで、下記に示す対象エリアにおいて航空写真判読調査を行った。航空写真は1991年10月8日に撮影され、縮尺は1:16,000のものを使用した。

判読結果のまとめを表2.6に示す。この表から、対象地域の風倒木地面積率は、平均で15%と大きく、特に筑後川上流域に位置する上津江村の風倒木地面積率は22%と非常に大きいものである。

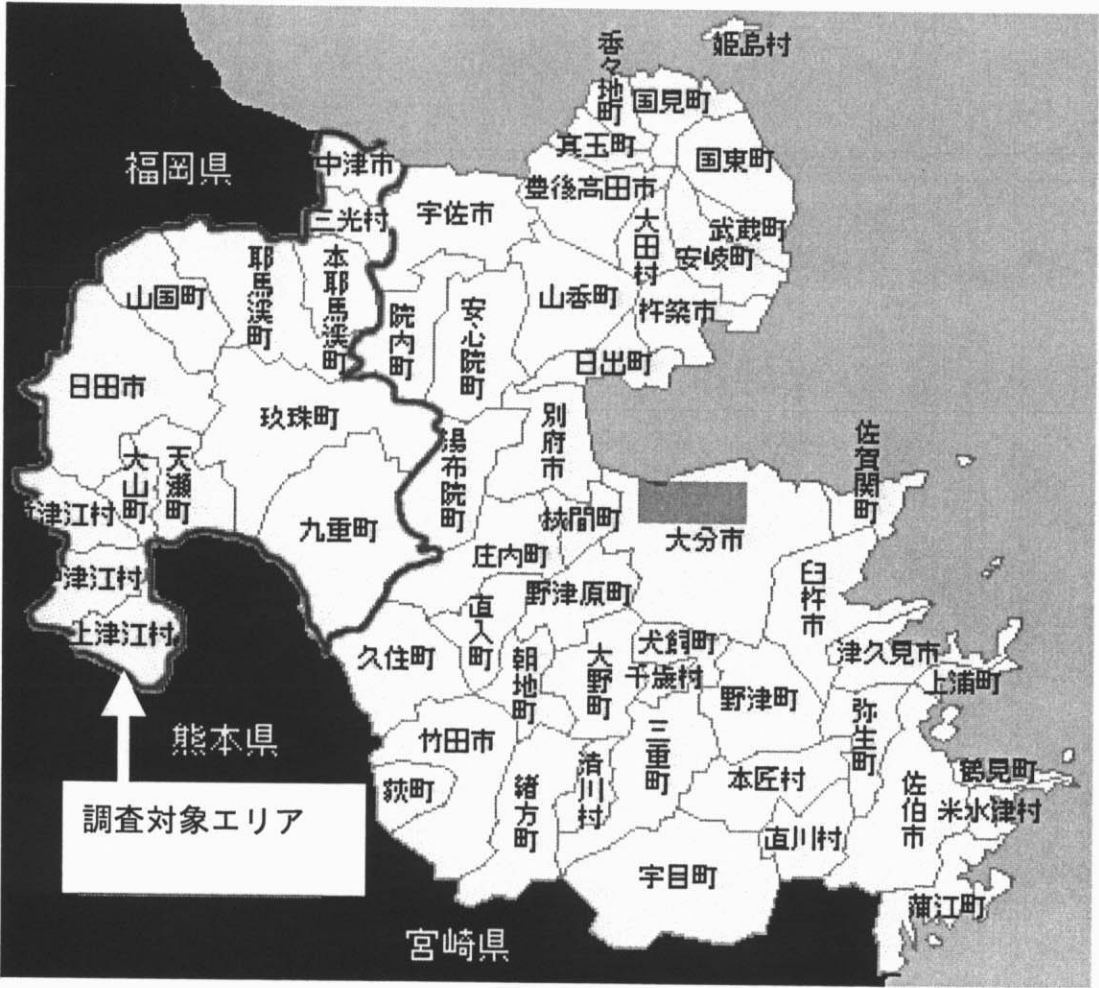


図2.5 調査対象範囲（大分県北東部）

表2.6 大分県北西部の風倒木被害

(大分県土木建築部調)

土木事務所	市町村		面積(A)	森林面積(B)		風倒木t地面積(C)	
			(km2)	B(km2)	B/A(%)	C(km2)	C/B(%)
中津	中津市		55.50	3	5	0	0
	下毛郡	三光村	46.05	26	56	3	12
		本耶麻溪町	85.04	66	78	10	15
		耶麻溪町	184.65	159	86	30	19
		山国町	119.60	107	89	10	9
	小計		490.84	361	74	53	15
日田	日田市		270.78	208	77	29	14
	日田郡	前津江村	78.99	73	92	14	19
		中津江村	81.91	77	94	7	9
		上津江村	88.53	83	94	18	22
		大山町	45.64	36	79	6	17
		天瀬町	101.45	80	79	15	19
	小計		666.10	557	84	89	16
玖珠	玖珠郡	九重町	270.70	216	80	19	9
		玖珠町	287.46	198	69	33	17
	小計		558.16	414	74	52	13
合計			3431.40	2664	78	388	15



図2.6 1991年台風19号による風倒木地状況（大分県北西部）

2.3.3 風倒木の発生と地形的特徴

風倒木は、以下のような地形的特徴を有する箇所で発生しやすいとされている(川口 1960)。

大地形的特徴

- ① 大きい山岳あるいは山脈の風全面
- ② 円錐形の山の中腹山麓地帯
- ③ 風前の高い山からの吹き下ろし風を強く受けるところ
- ④ 暴風方向と一致した広く長い溪谷
- ⑤ 山脈の風上斜面を流下する川沿い
- ⑥ 山脈の風下斜面の高所
- ⑦ 平坦な台地

局所地形としては、

- ⑧ 風に向かった急斜面
- ⑨ 風前斜面にある窪地地形
- ⑩ 鞍部とくに風前の部分
- ⑪ 山頂の平坦部
- ⑫ 風に向かった谷筋
- ⑬ 風通りの良い平坦面

以上の地形的特徴は、強風を直接受けるかまたは、地形上風が集中し加速されるような場所であると一般的に解釈できる。

1991年に大分県北西部に多発した風倒木地は、調査範囲の約15%を占める広い面積で発生しているが、図2.7(a～c)（(財)砂防・地すべり技術センター 1992）のように風の集中、または風が加速され・乱れが生じる地形的特徴のある箇所での発生が多く認められる。

その主な特徴を以下に示す。

(a) 南～南西向きの斜面

図2.7(a)のような、南南西向きの斜面における倒木の発生は、図2.7(a)の下図に示すように風向と一致した南南西の風が尾根に強風が駆けあがり、この風は、凸型の曲率をもつ物体の流れとなり、風速が加速されたことが原因と推定される。これは先ほどの記述では「①大きい山岳あるいは山脈の風全面」にあたる。

山頂部がなだらかな台地では、台地の曲率が小さいので流れは加速されず、倒木は

発生しにくくなる。また、風が山頂を過ぎるときに流れの剥離が生じる。この剥離点下部の流れは逆向きとなり、強いせん断力が作用するので、樹木の幹折れがみられる。これは「③風前の高い山からの吹き下ろし風を強く受けるところ」になる。この現象を慣性力の卓越した流れの場で考えると、加速された風が周囲の風速に戻るため減速され、乱流境界層に圧力が増加する。そのため、尾根部近傍に生じている境界層に剥離が生じ、剥離した点の下流部には逆流が生じるためと理解される。

(b) 南～南西側が開けている谷筋

図2.7(b)のように、南西からの風が谷の下流から上流に向かって駆け上がる場合の谷筋、特に源頭部の斜面での風倒木の発生は、図2.7(b)下部の図のように谷の断面の縮小によって流れが集中し、オリフィスの流れとなって風が加速されたためと考えられる。これは、「④暴風方向と一致した広く長い溪谷」あたる。

(c) 孤独峰の東西斜面

図2.7(c)示す孤立峰のような鈍い形状の物体を通過する風は、流体力学のポテンシャル流でみられるように、物体の両サイドで風が加速される。この現象で、孤立峰の中腹において風倒木が発生したと考えられる。また、山頂や山腹を回り込んだ風が、風下の斜面に衝突する場合にも風倒木が発生している。この場合の倒木の方法は、一様ではない。これは、「②円錐形の山の中腹山麓地帯」と同様な現象である。

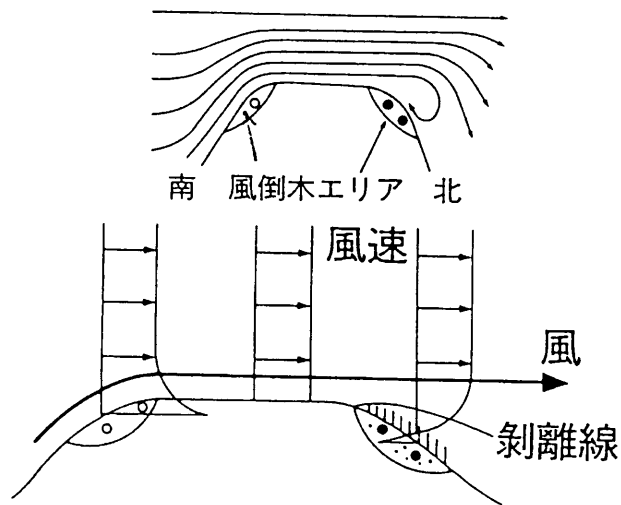
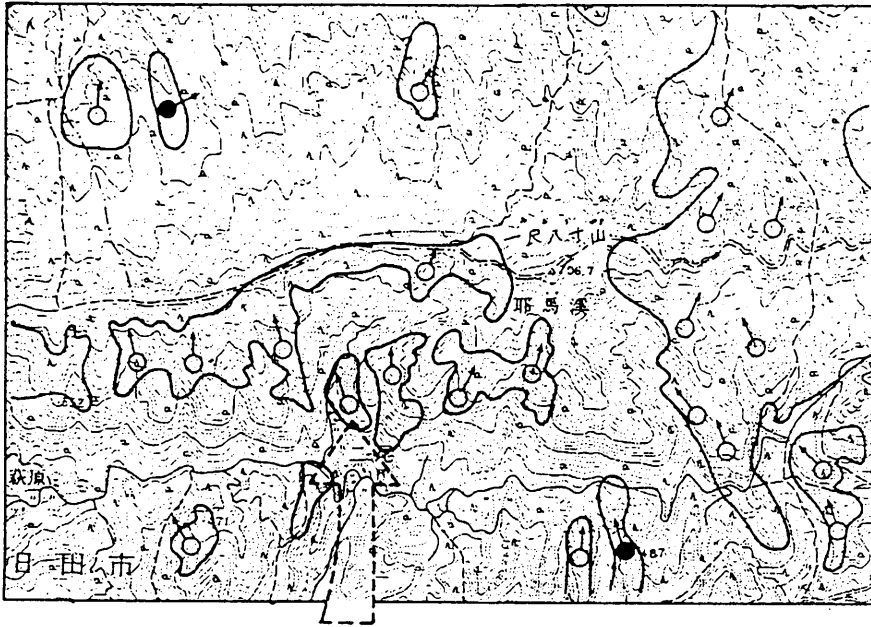
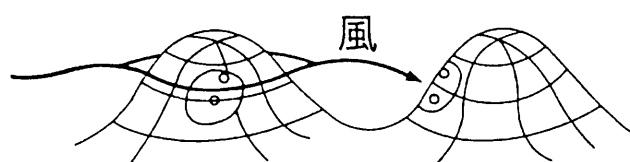
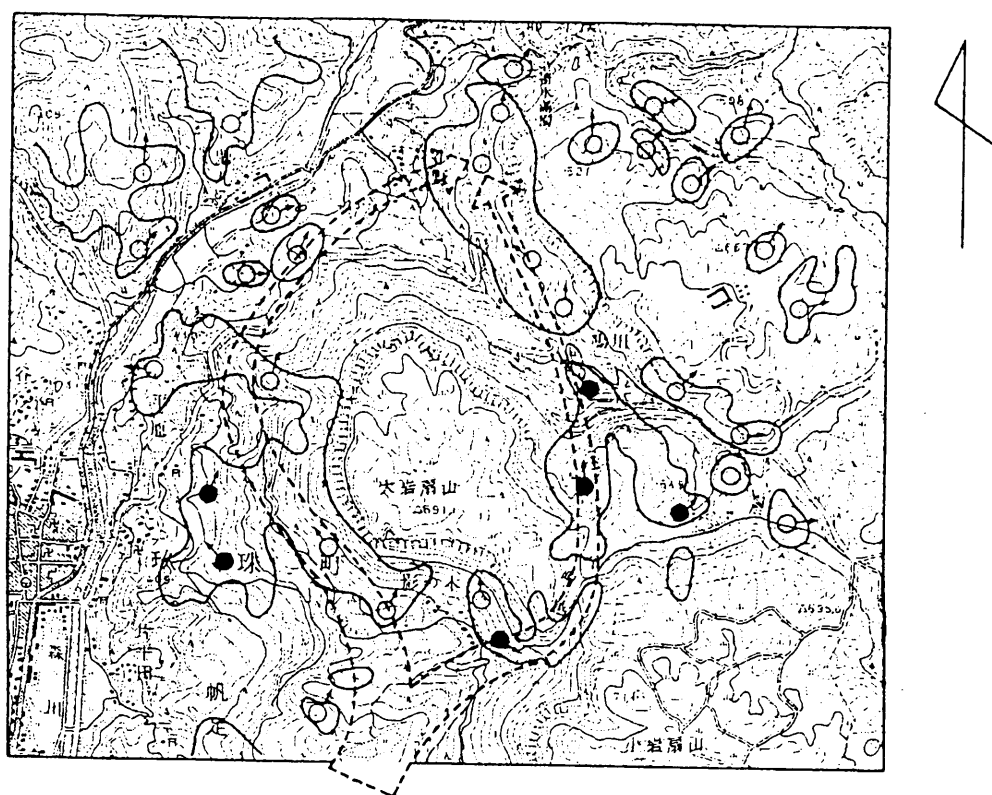


図 2.7(a) 風倒木発生箇所の地形的特徴と倒木形態
南～南西向きの斜面



- 凡例
- ♡: 倒木エリア
 - : 根返りタイプ
 - : 幹折れタイプ
 - : 倒木の方向

図 2.7(c) 風倒木発生箇所の地形的特徴と倒木形態
孤立峰の東西斜面

2.3.4 風倒木の状態

倒木の被害形状について陶山（1992）は、「幹折れ」「幹曲がり」「幹傾斜」「根返り」「枝折れ」「枝葉損傷」ように詳細に分類しているが、山腹斜面安定・崩壊の観点から大きく区分すれば、表層土層に影響を与える「根返り」「幹折れ」「曲がり」の3分類で十分と考える。

- ・根返りは、樹幹が途中で折れることなく、根ごと転倒している状態をいう。
- ・幹折れは、樹木の幹が途中で折れている状態をいう。
- ・曲がりは、転倒までに至らず半転倒の状態で傾いている状態をいう。

調査地域内における風倒木の形状は、「根返り」タイプが多い。

「根返り」状態の風倒木は、山腹斜面の表層土を著しく擾乱し、その強度を低下させている。また、「幹折れ」、「曲がり」状態の樹木も強風に揺すられていることから、表層土層に擾乱を与えていると推定される。

2.3.5 風倒木の特徴

大分県北西部（日田地方）に発生した風倒木について調査を行った。この地域は、わが国の中でも林業が盛んな地域であり、図2.8に示すように森林の73%はスギ・ヒノキの人工林で占められ、人工林の内スギが77%を占めている。

風倒木の82%はスギが占めており、倒木となったスギの内、30年生以上のものが78%を占め、20年生以上のスギでは98%を占めている（図2.9）。幼樹は樹冠が小さく、しなやかな樹幹を有しているため倒木とならなかったと推定される。

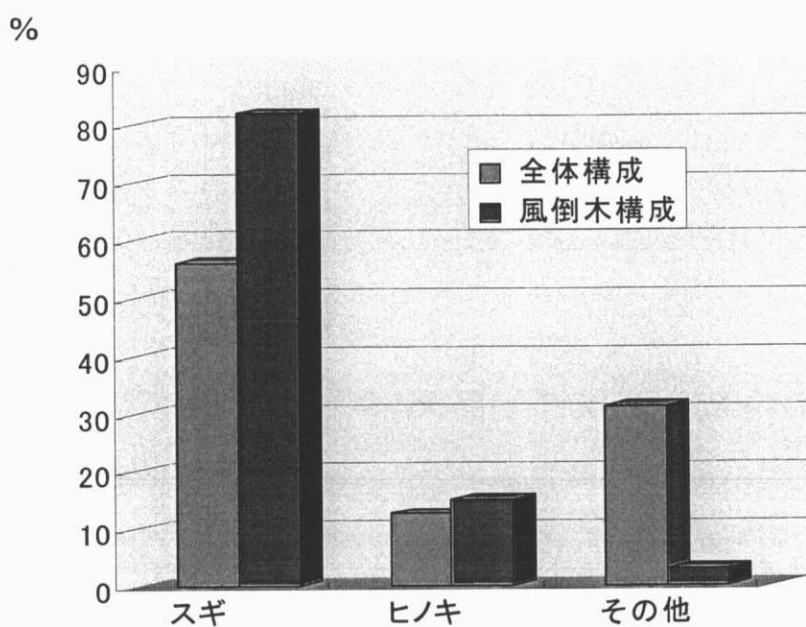


図2.8 風倒木と森林全体の樹種構成

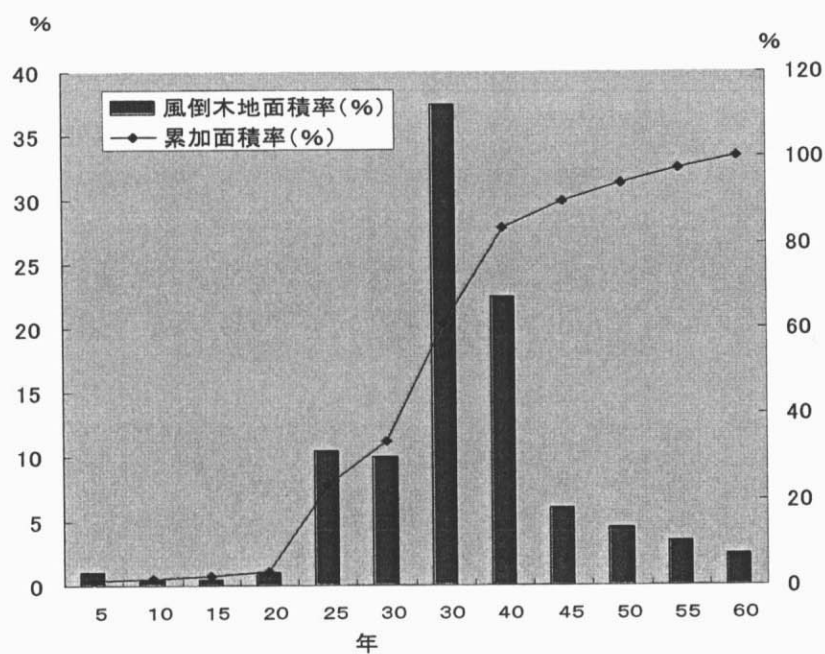


図2.9 樹齢別風倒木地面積率

2.3.6 風倒木地の擾乱

「根返り」タイプの根系の貫入深や根返り直径の径を図2.10のように定義し、調査を行った。その関係を図2.11に示す。この図からは、根系の貫入深と根返り直径に関して明確な関係は認められない。一部のデータを除き、貫入深については0.5m～1.0mの狭い範囲に集中し、根返り直径は、1.5m～2.5mの範囲に集中している。表層土厚さの範囲が1.0～2.0mであること、また樹高（20～30m）を比較すれば、貫入深は小さいと考えられる。一方、現地での観察から根返り直径は、各樹木の植樹間隔に一致している。このことは、樹木相互の干渉で根系の成長が抑制され、密植された人工林は、不安定な状態になることを示している。

根返りが生じた風倒木地では、シート状に表層土が掘り返されたようになっている。このような倒木が生じた箇所では、斜面勾配が急峻であると倒木と同時に斜面崩壊が生じている。そのときに崩壊が生じなかったとしても、斜面は非常に不安定な状態となっているので、その後の少量の降雨でも崩壊や土石流が発生しやすくなっているものと考えられる。

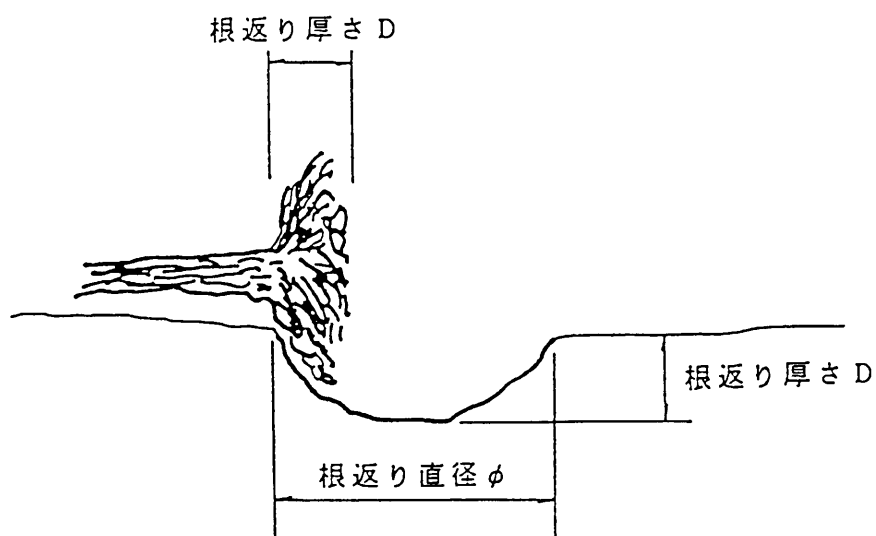


図 2.10 根茎の代表的ディメンジョン

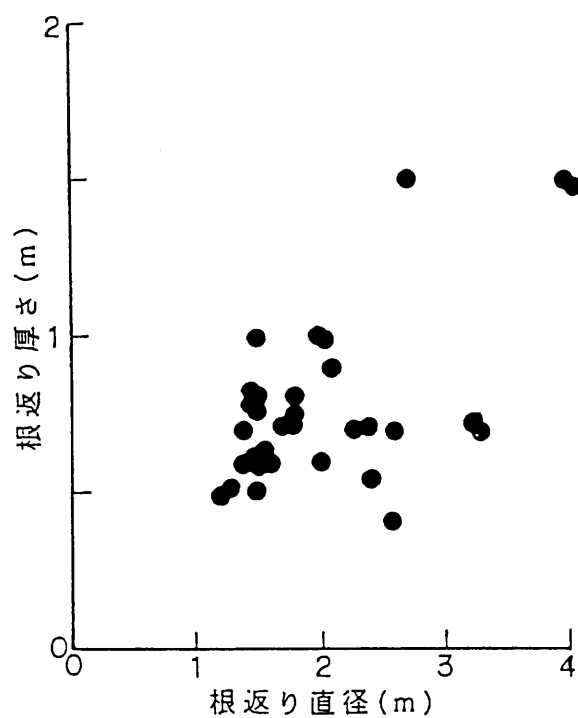


図 2.11 根返り厚さと根返り直径の関係

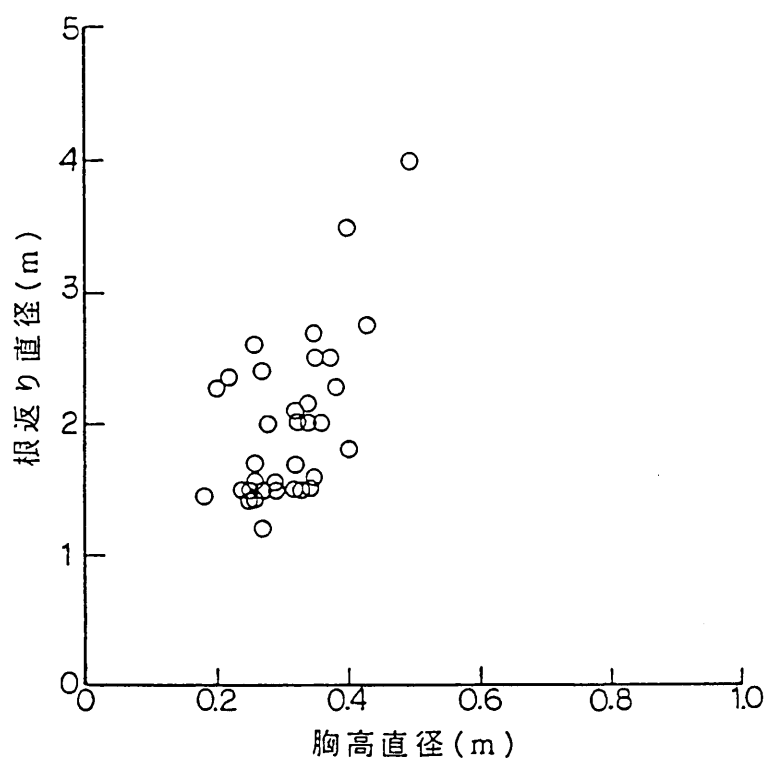


図 2.12 胸高直径と根張り直径の関係

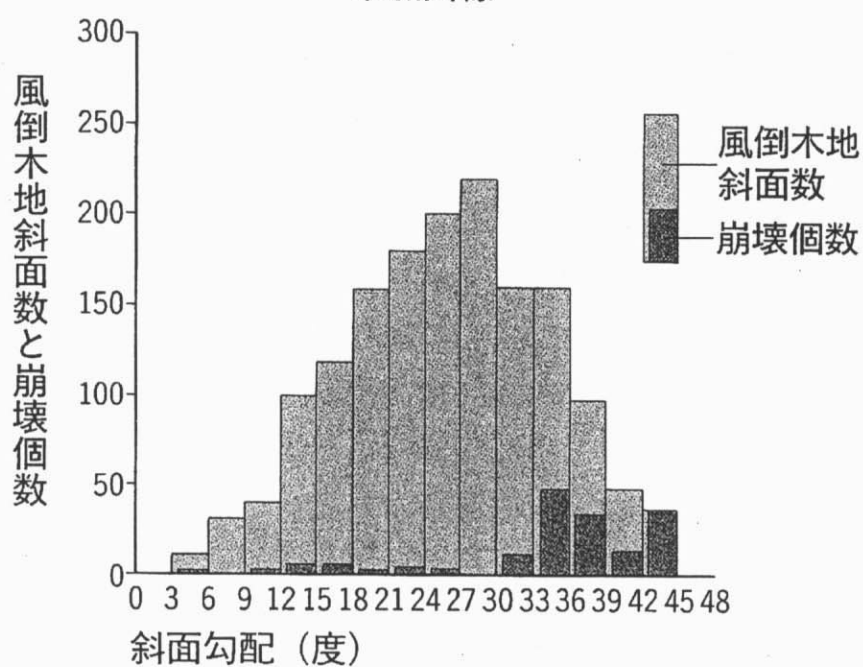
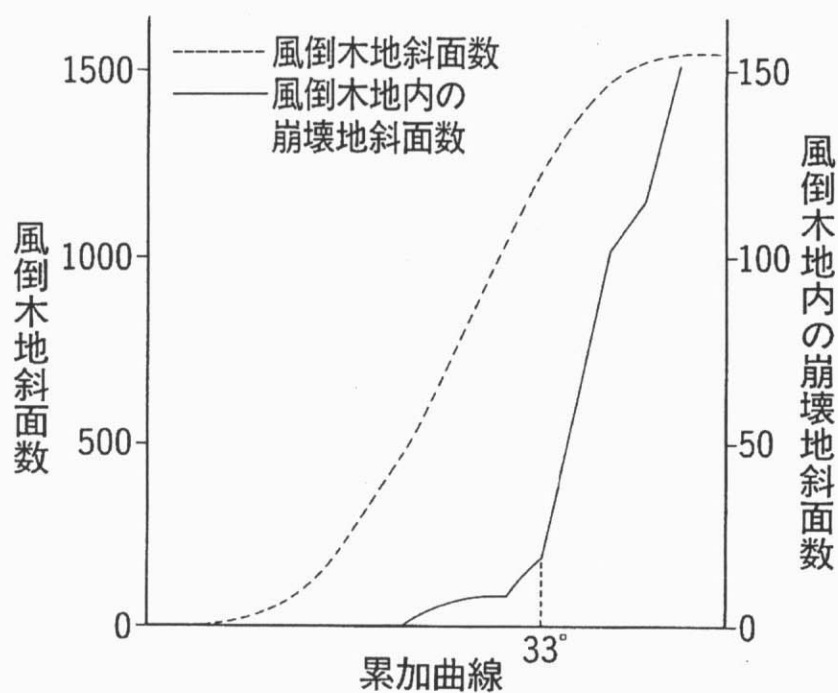
2.3.7 風倒木地に発生した崩壊

大分県におけるこの台風19号の最大瞬間風速、最大風速ともに風向は南西から南南西であり、風倒木の倒れている方向とほぼ一致しているため、風倒木は、この台風の強風時に発生したと推定される。日田測候所で観測された降雨記録は、総降水量で74.0mm、最大日降水量で70.5mm、最大1時間降水量で28.5mmと被害を発生させた台風の降雨にしては少なく、風倒木発生と同時に生じたと推定される崩壊地は、このような小さな降雨で発生したと考えられる。

根返りを起こした風倒木が分布する斜面は、表層土層が激しく擾乱を受けており、土質強度の低下が生じ斜面崩壊に関して不安定な斜面といえる。しかし、根返りが生じていても、勾配の緩い斜面では崩壊の発生可能性は小さいと考えられる。

ここでは、調査対象地域内において約1,500箇所の風倒木地を無作為に抽出し、その斜面縦断勾配を調べた。また、その一方で風倒木の発生と同時に生じたと推定される崩壊箇所について斜面縦断勾配を調査した。その斜面勾配分布結果を図2.13に示す。

風倒木地の勾配は、約27度～30度を中心にほぼ正規分布を示しているが、崩壊地斜面の勾配は、33度を超えると急に崩壊地が増加する傾向を示している。さらに、33度以上の崩壊地の分布系は、風倒木地の分布系に類似している。このことから、33度以上の非崩壊地斜面は、非常に不安定な状態といえよう。



2.13 風倒木地および崩壊斜面の縦断勾配分布

2.4 まとめ

1991年9月の台風19号は、その進路は1959年の洞爺丸台風に酷似し、台風の移動速度とあいまって、各地で風速の記録を更新した近年まれにみる「風台風」である。青森県において収穫期直前のリンゴの落果被害が喧伝されたため、「リンゴ台風」とも呼ばれている。この台風被害は、全国各地で様々な形態の災害を引き起こした。

特に、九州北部における風倒木の多発はこれまで経験がなく、大分県、福岡県、熊本県では甚大な被害を被り、これら3県の風倒木地面積は35037haにもなった。

さらに、甚大な風倒木の発生をみた大分県西北部 1715.1km²に関して航空写真判読を行い、風倒状況を調査した。全域における風倒木地は194km²であり森林面積に対して15%程度である。日田郡上津江村における風倒木地面積は18km²となり、森林面積の22%を占めている。

風倒木の発生は、風の集中・加速される以下の地形的特徴を有する箇所に多く発生している。

- ① 大きい山岳あるいは山脈の風全面
- ② 風前の高い山からの吹き下ろし風を強く受けるところ
- ③ 暴風方向と一致した広く長い溪谷
- ④ 円錐形の山の中腹山麓地帯

調査対象エリアは、森林の73%はスギ・ヒノキの人工林で構成されている。風倒木の82%はスギが占めており、倒木となったスギの内、30年生以上のものが78%を占め、20年生以上のスギでは98%を占めている。

日田測候所で観測された降雨記録は、総降水量で74.0mm、最大日降水量で70.5mm、最大1時間降水量で28.5mmと台風の降雨にしては少ないが、風倒木が発生した急勾配斜面では崩壊が発生し、斜面勾配が33°以上の斜面に多く発生している。

引用文献

秋田県林業技術センター；風害危険森林と耐風力のある森づくり，1998

後藤恵之輔，太田哲男，森正寿：1991年台風19号による山口地方の塩害の衛星リモートセンシング調査，九州大学大型計算機センター計算機科学研究報告題10号，p. 17-24，1993

林公彦，姫野周二，吉永文浩，下村克己：台風によるカキの早期落葉が果実品質及び翌年の結実へ及ぼす影響，福岡県農業総合試験所研究報告B（園芸）第13号，p40-43，1994

福田博之；特集 果実の台風被害の実態と対策，リンゴ，今月の農業 農業・資材・技術，32-36，1992

川口武雄：森林物理学，気象編，地球出版，1960, p. 122-130

野田茂；1991年の都市災害の特質とそのダイナミックス，鳥取大学工学部研究報告第23巻，pp215-224，1992

宮沢清治：1991年の台風台風災害を顧みて，近代消防，Vol. 30 , p. 103～107，1992

大分県・大分地方気象台：大分県農業気象災害速報，平成3年9月27日の台風19号による強風・大雨害，平成3年10月23日，1991

陶山正憲：台風による樹木の風倒・折損機構，水利科学，Vol. 37, No 1 , pp. 25-53，1993，Vol. 45, No. 3, p. 18-23，1992

田中正昭，鳥羽良明：台風9119号による塩害と内陸への塩分侵入量について，京都大学防災研究所年報，第36号B-2，p. 103-119，1993

山本勇，中村大四郎，雪竹照信，福田敬，三原実，松雪セツ子，横尾浩明，広田雄二：佐賀県における1991年大型台風の気象特性と水稻被害の実態および解析，佐賀県農業試験研究センター報告，p. 81-106，1993

(財)砂防・地すべり技術センター：平成4年度大分県風倒木対策全体計画，1992

(財)砂防・地すべり技術センター：平成3年土砂災害の実態，1992