

## 台風による住宅の強風被害予測モデルの開発と防災対策に関する研究

## A DEVELOPMENT OF A STOCHASTIC MODEL FOR PREDICTING TYPHOON WIND DAMAGES TO RESIDENTIAL HOUSES

主査 植松 康  
 委員 山田 大彦 鈴谷 二郎  
 伊藤 颯 月舘 敏栄  
 吉田 正邦

Ch. Yasushi Uematsu  
 mem. Motohiko Yamada Jiro Suzuya  
 Takeshi Ito Toshiei Tsukidate  
 Masakuni Yoshida

### [研究論文要旨]

### [SYNOPSIS]

本研究の目的は、東北地方を対象とし、台風による住宅の強風被害を予測する確率モデルを作成し、それを用いた被害予測シミュレーションを系統的に行い、被害低減に有効な対策を検討することにある。

より適切なモデルを作成するためには、被害の実態を把握することが肝要である。そこで、本研究では、先ず、東北地方に大きな強風被害をもたらした1991年台風19号(台風9119号)による住家被害調査を行った。

次に、被害のほとんどが外装材(特に屋根葺材)に発生していることに着目し、「台風モデル」「局部風圧モデル」および外装材の「耐風圧強度モデル」からなる外装材の被害予測モデルを構築した。「台風モデル」とは、1954～1996年の43年間に東北地方に来襲した68個の台風について気圧場の解析を行い、台風の特性を表すパラメータの確率分布や時間的変化をモデル化したものである。これを用いたコンピュータシミュレーション(台風シミュレーション)により、強風の統計的特性を把握できる。さらに、台風9119号時に各地で観測された風速値に基づき、局所地形が風速の増減に及ぼす影響を検討し、風速増減率に対して地形要因を説明変数とする重回帰式を求めた。「局部風圧モデル」では、住宅の屋根形状を切妻屋根と寄棟屋根の2種類に大別し、それぞれに対して、既往の風洞実験結果に基づき、局部風圧係数の値を与えた。ピーク風圧力は近似的に準定常アプローチによって算定できるので、上記台風シミュレーションの結果と組み合わせることによって、外装材に作用するピーク風圧力の確率分布が推定される。「耐風圧強度モデル」では、外装材耐力の確率密度関数が対数正規分布で表されると仮定し、その平均値を台風9119号時の風速記録と実際の被害率より推定した。

最後に、1例として、青森県弘前市を対象とした屋根被害予測シミュレーションを行い、被害の特徴を考察した。

This paper describes a stochastic model for predicting the wind-induced damage to residential houses in Tohoku District due to typhoons.

First, an investigation was made of the damage to residential houses due to Typhoon No.19 in 1991 (Typhoon 9119), which struck the Tohoku District and caused severe wind damage. The results indicate that most damage was caused to cladding, in particular to roofing materials.

Then, a stochastic model for predicting the typhoon wind damage to cladding has been developed. The model consists of 'typhoon model', 'local pressure model' and 'wind resistance model'. For constructing the 'typhoon model', the statistical characteristics of the atmospheric pressure patterns of 68 typhoons, which struck the Tohoku District during the period of 1954 to 1996, were analyzed and specified. The time change of the typhoon parameters, which specify the pressure pattern, between lat.37 to 42° N were represented by simple functions of time. Based on a computer simulation (typhoon simulation) using this 'typhoon model', the statistical characteristics of strong winds due to typhoons can be understood quantitatively. The effects of topographic factors on wind speeds were investigated by using a multivariate regression analysis. In the 'local pressure model', the roof geometry is classified into two groups, i.e. gable and hip roofs, and the local pressure coefficient is specified for each group, based on the results of the previous wind tunnel experiments. The value of the peak pressure is assumed to be predicted by a quasi-steady approach. Therefore, the probability density function of the local peak pressures is obtained by combining this model with the results of the typhoon simulation. In the 'wind resistance model' of cladding, the probability density function of the strength of cladding is assumed to be represented by the log-normal distribution; the mean was predicted from the damage rate of cladding due to Typhoon 9119.

Finally, the results of a damage simulation made for Hirosaki City are presented and the characteristics of the wind damage to roof are discussed.

## 台風による住宅の強風被害予測モデルの開発と 防災対策に関する研究

主査 植松 康\*<sup>1</sup>  
委員 山田 大彦\*<sup>2</sup> 鈴谷 二郎\*<sup>3</sup>  
伊藤 颯\*<sup>4</sup> 月舘 敏栄\*<sup>5</sup>  
吉田 正邦\*<sup>6</sup>

キーワード：1) 住宅, 2) 台風, 3) 強風被害, 4) 外装材, 5) 台風シミュレーション, 6) 被害予測, 7) 風荷重, 8) 信頼性解析, 9) 東北地方

### 1. はじめに

本研究の目的は、東北地方を対象とし、台風による住宅の強風被害を予測する確率モデルを作成し、それを用いた被害予測シミュレーションを系統的に行い、被害低減に有効な対策を検討することにある。本論文では、いくつかの基本的項目について検討した結果を示す。

1991年台風19号(台風9119号)は、日本列島のほぼ全域を暴風圏に巻き込み、各地に大きな被害をもたらした。被害は多岐にわたるが、建物関係では住宅外装材(特に屋根葺材)の被害が多かった<sup>x1)</sup>。筆者ら<sup>x2,3)</sup>は、大きな被害を受けた青森県と秋田県について調査を行い、建物被害の様相は各地で普及している構・工法に強く関連していること、および住家被害率には局所的な地形の影響が大きいことなどを明らかにした。

青森県や秋田県を代表とする積雪寒冷地では、雪対策という観点から鉄板葺屋根が普及している。特に最近では長尺鉄板が用いられることが多い。このような屋根葺材の飛散は、構造骨組の破壊の原因となるばかりでなく、他の構造物への被害や人的被害といった二次被害をもたらす危険性をはらんでいる。建築物の大半が木造住宅などの小規模低層建築物であり、かつ強風被害の大部分がこのような建築物に生じているという事実からも、住宅の外装材を適切に設計・施工してその被害を抑えることは、地域全体としての被害低減に大きく寄与すると期待される。

以上の観点に立ち、本研究では東北地方の住宅外装材(特に屋根葺材)を対象とし、台風による強風被害を予測する確率モデルの開発を試みる。従来、被害予測には過去の顕著台風時の最大風速(あるいは、最大瞬間風速)と被害率との関係を表す経験式が用いられてきた<sup>x4)</sup>。このような予測方法は直接的で分かり易いが、台風9119号による住家の全壊率が過去の顕著台風による値に比べ

て1桁以上小さくなっていることから分かるように、普遍性をもっておらず、他の地域や将来の予測に対して十分ではない。これに対し、本研究では、「台風モデル」「局部風圧モデル」および「耐風圧強度モデル」からなる被害予測モデルを構築する。すなわち、まず、東北地方に來襲する台風の確率モデルを用いて強風の推定を行い、これと局部風圧モデルから外装材に作用する風圧力の確率分布を推定する。次に、その結果と外装材の耐風圧強度の確率分布から信頼性理論を用いて被害率を推定する。このような推定方法を用いれば、各モデル内のパラメータを対象地域や時代に合わせて適当に設定することによって普遍的な推定が可能となる。

より適切なモデルを作成するためには、被害の実態を把握することが肝要である。そこで、本研究では台風9119号による住家被害調査も併せて行った。本論では、先ず第2章でこの被害調査結果の概要を述べ、次いで、第3章以降で被害予測モデルを構成する各モデルについて説明する。

### 2. 台風9119号による青森・秋田県における住家被害

#### 2.1 台風9119号の概要

図2-1に台風9119号の経路と、風速25m/s以上の暴風圏を示す。この台風は1991年9月13日マーシャル諸島の東で弱い熱帯低気圧として発生し、沖縄諸島の西を通過した後、大型で非常に強い台風に発達し、9月27日16時過ぎに、中心気圧935hPa、中心付近の最大風速50m/sで長崎県佐世保の南に上陸した。その後、日本海に入り、強い勢力を保ったまま、時速80kmもの速い速度で北上した。9月28日早朝には東北地方北部に接近し、秋田地方気象台、および青森地方気象台では51.4m/s、および53.9m/sの最大瞬間風速(いずれも記録更新)を記録した。

\*1 東北大学大学院工学研究科 助教授

\*2 東北大学未来科学技術共同研究センター 教授

\*3 東北工業大学工学部 教授

\*4 八戸工業大学工学部 助教授

\*5 東北工業大学工学部 助教授

\*6 鹿島建設(株)技術研究所 専門部長

\*4 秋田工業高等専門学校 教授

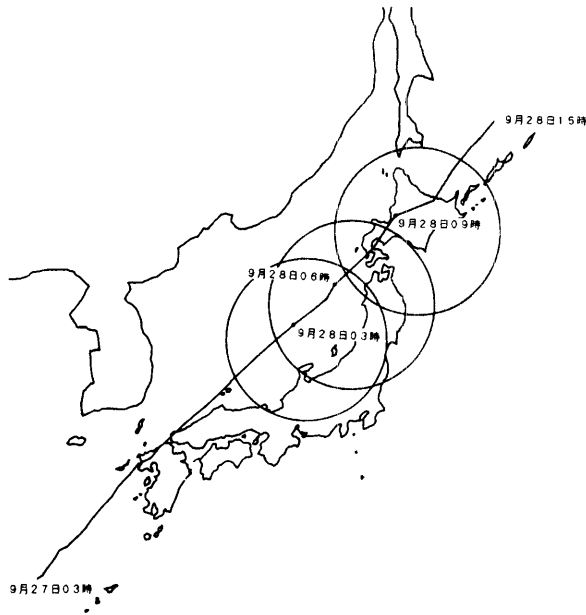


図2-1 台風9119号の経路と風速25m/s以上の暴風域

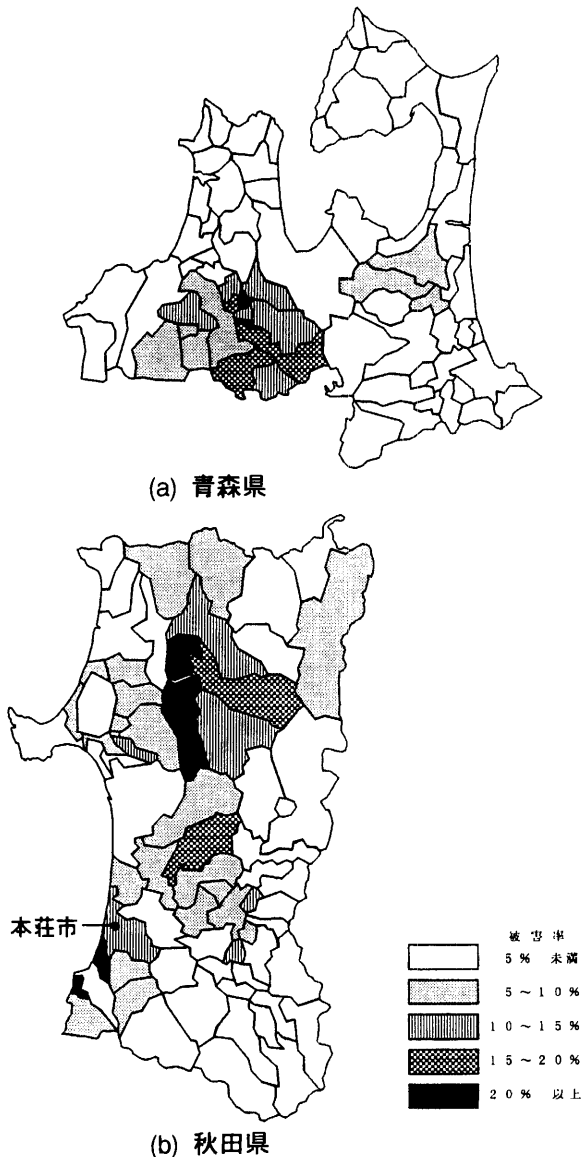


図2-2 台風9119号による市町村別住家被害率

## 2.2 住家被害の概要

図2-2は、青森県および秋田県について、市町村別の住家被害率を表す。これは、各県の災害対策本部がまとめた市町村ごとの被害集計を基に、被害棟数を住家数（住家数が不明の場合、世帯数で代用）で除して算定したものである。これより、被害率の高い地域が台風の進路に沿って帯状に分布していることが分かる。

大きな被害を受けた地域の自治体や消防本部では独自に住家被害調査を行った所も多い。本研究では、以下に示す市町村における被害調査データを収集し、部位別・行政地区別被害状況、屋根構法や屋根葺材と被害との関係などを分析した。

青森県：青森市、弘前市、黒石市、三沢市、板柳町、平賀町、尾上町

秋田県：秋田市、大館市、鹿角市、能代市、大曲市、本荘市、横手市、鷹巣町、森吉町、阿仁町、合川町、山本町、琴丘町、八竜町、河辺町、雄和町、飯田川町、井川町、天王町、昭和町、上小阿仁村

ここでは紙面の都合上、これまで得られた結果の概要を述べる。なお、結果の一部は既に発表済みであり<sup>23)</sup>、更に詳細な分析結果については別途報告の予定である。

図2-3は、秋田県本荘市における行政地区と地区ごとの住家被害状況を示す。これは、地区ごとに屋根、外壁など部位別被害件数を世帯数で除したものであり、全被害率とは全被害棟数を世帯数で除して算定したものである。また、図2-4に地区ごとにみた被害の内訳を示す。部位別被害率の和が全被害率を上回っているのは、被害住家1棟につき複数箇所被害が発生している場合があるためである。図2-3より、全被害率は市全体では9%であるが、地区ごとにみると、松ヶ崎地区の1%から北内越地区の22%まで幅広く分布しており、同一市内であっても地区によって大きく異なっていることが分かる。一般に、本荘地区のような市街地で被害率が低い。また、全体として屋根に被害が多く発生していることも分かる。屋根以外では、窓ガラスの被害率が高く、本荘地区では27%に達している。これは、東北地方では関東以西の地方のように雨戸などが普及しておらず、飛来物による破損が被害を大きくしたものと考えられる。

本荘市では、秋田県北部や青森県と異なり、屋根葺材としてトタンの他に瓦も多く使われている。屋根被害率を屋根葺材でみると、約60%がトタン葺、約25%が瓦葺となっている。図2-5は、トタン葺と瓦葺について、被害面積の頻度分布を示したものである。これより、屋根葺材によって被害面積が大きく異なることが分かる。すなわち、トタン葺では、被害面積が100m<sup>2</sup>程度まで広が

っているのに対し、瓦葺では20m<sup>2</sup>以上はほとんどみられない。平均値でみても、トタン葺33m<sup>2</sup>に対して瓦葺9m<sup>2</sup>と小さい。トタン葺では、最近長尺鉄板を使用することが多くなったため、1つの要素の荷重負担面積が瓦に比べて非常に大きくなる。この場合、局部に被害が発生するとトタンがまくれ上がるように被害が拡大することが多い。一方、瓦葺では、1枚の瓦の荷重負担面積が小さいため、これに働く風力は大きくなるが、瓦の飛散が被害拡大の大きな原因とはならない。

前述のように、同一の市内であっても地区により被害率に差がある。この理由には、局所地形の影響による風速の増減や市街化による遮風効果などが考えられる。図2-6(a)は、秋田市、大館市および本荘市について、地区の屋根被害率を世帯数に対してプロットしたものである。図中、黒塗りの記号(●, ■, ▲)は市全体に対する値を表している。また、実線は全体的な傾向を示す。

秋田市では、他の2市に比べ各地区の世帯数が多いため、地区内の町単位で同様にプロットしたものが図2-6(b)である。これらの結果より、世帯数の増加による屋根被害率の低下が明確な傾向として読み取れる。この3市では、住家が比較的多く分布している所では地形の起伏が小さいため、局所地形による風速の増減が被害率に及ぼす影響は小さいと考えられる。従って、世帯数が多

い、すなわち、建物が密集している所では、周辺建物の遮風効果によって、世帯数の少ない周辺地区より風速が低下し、被害率が低減したものと推定される。市街化(建物の密集度)の程度を定量的に表すためには、建物密度比<sup>(x5)</sup>などの指標が妥当と考えられるが、いずれの市においても、ごく中心部を除けば2階建の戸建住宅が建物の大半を占めることを考慮すると、世帯数でもある程度把握できるものと考えられる。3市における世帯数300~400程度の地区(あるいは町)に対する屋根被害率は、本荘市約18%、秋田市約8%、大館市約6%であり、これらの市で観測された最大風速値(地上10m換算値<sup>(x2)</sup>)の27, 19, 12m/s(図2-6(a)中の値)に良く対応している。

### 3. 台風による強風の予測

#### 3.1 台風パラメータの確率モデル

台風の気圧場  $P$  は以下に示すSchloemarの式で近似できる<sup>(x6)</sup>。

$$P = P_c + \Delta P \cdot \exp\left\{-\frac{r}{r_m}\right\} \quad (1)$$

ここで、 $P_c$ =中心気圧、 $\Delta P$ =中心気圧低下量、 $r$ =中心からの距離、 $r_m$ =最大旋衡風速半径。

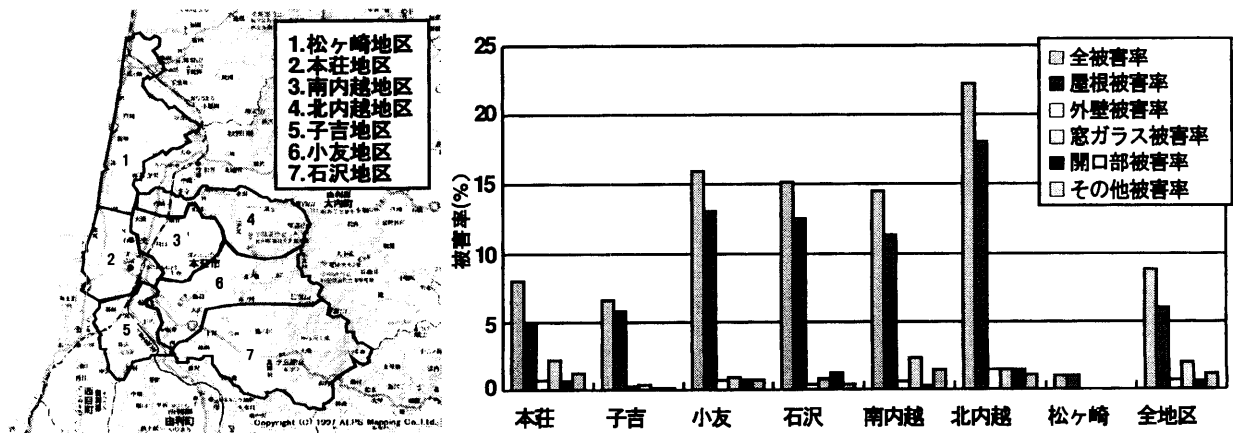


図2-3 本荘市における行政地区と住家被害状況

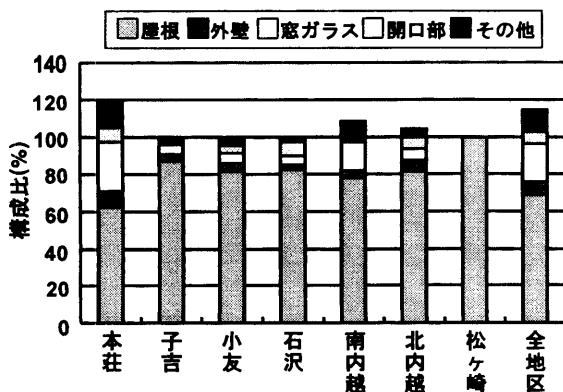


図2-4 本荘市における部位別被害の内訳

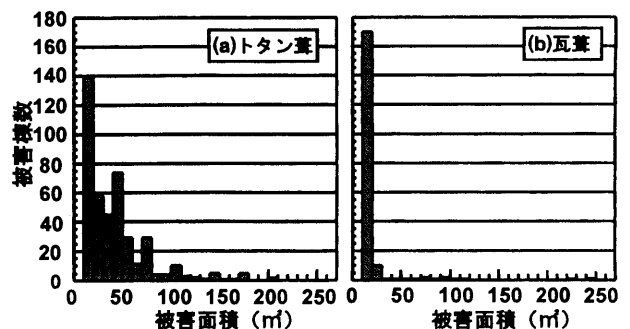


図2-5 屋根被害面積の頻度分布(本荘市)

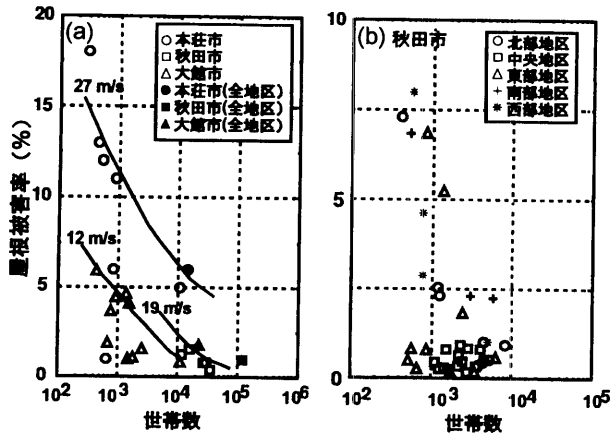


図2-6 屋根被害率と世帯数の関係

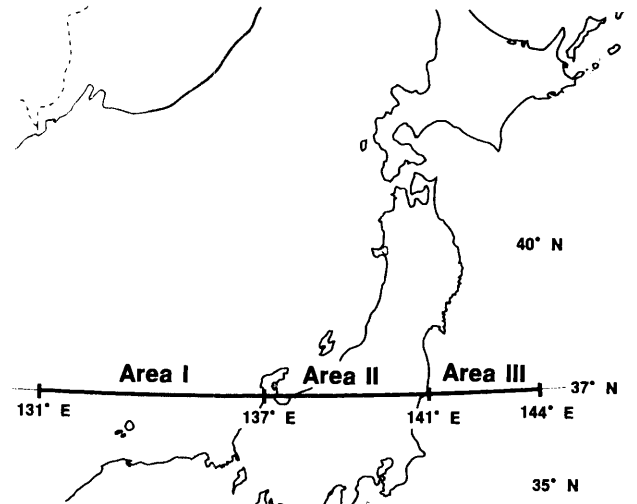


図3-1 台風の通過位置の区分 (I~III)

従って、周辺気圧を一定（既定値）と仮定すれば、台風による傾度風速 $U_g$ は、上記の $\Delta P$ 、 $r_m$ の他、移動速度 $C$ と移動方向 $Dir$ が分かれば、Blatonの公式を用いて計算できる<sup>6)</sup>。台風モデルとは、これらのパラメータの他、年発現頻度 $n$ の確率分布をモデル化したものであり、藤井ら<sup>6),7)</sup>によって提案されたものである。モンテカルロ法を用いてコンピュータ上で仮想台風を発生させ、長期間にわたるシミュレーションを行うことにより、対象地点における長い再現期間に対する風の統計量を把握することができる。西日本から関東地方の海岸に上陸する台風を対象とし、台風パラメータの上陸時の値と上陸後数時間の変化について、詳細な解析とモデル化が彼らによってなされているが、そのモデルをそのまま東北地方にまで適用することはできない。

そこで、本研究では、東北地方に適したモデル化を試みる。具体的には、1954~1996年の43年間に東北地方に影響を及ぼした台風のうち、北緯37°線上で中心気圧990 hPa以下の勢力を保つ68個の台風について気圧場の解析を行い、北緯37°線上での台風パラメータの確率モデルと、北緯37~42°の範囲におけるそれらの時間的変化を表すモデル式を以下のように設定する。なお、台風の経

路によって、すなわち、(i)日本海を北上するもの、(ii)本州を縦断するもの、および、(iii)太平洋を北上するもので、台風の性質が異なると考えられるので、北緯37°線を図3-1に示すように、3つの領域 (I~III) に分けた。実際のシミュレーションでは、北緯37°線上に仮想台風を発生させ、その後の変化を考える。

(a) 北緯37°線上 ( $t=0$ ) での台風パラメータの特性

各領域における年発現頻度 $n$ は、藤井ら<sup>6)</sup>と同様、図3-2に示すように、ポアソン分布で近似可能である。図中の‘predicted’はポアソン分布を表している。領域I~IIIにおける $n$ の期待値は、0.74, 0.51, および、0.44である。

時刻 $t=0$ における $\Delta P$ 、 $r_m$ 、 $C$ 、 $Dir$ の値（以降、サフィックス0を付けて表す）の確率分布は、図3-3~6に示すように、いずれも以下のワイブル分布（図中の実線）で良好に近似できる。

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\frac{(x-\gamma)^m}{\alpha}\right) \quad (2)$$

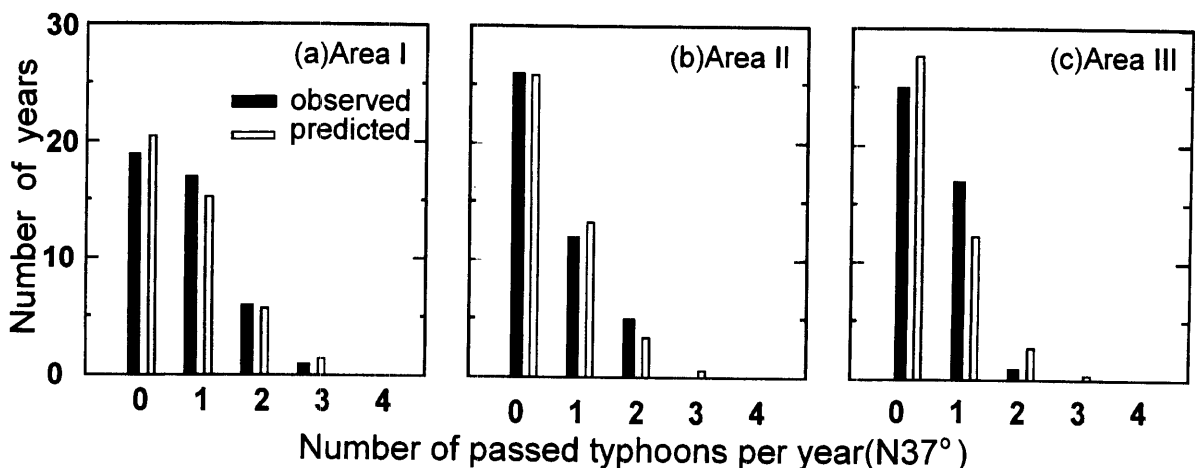


図3-2 各領域における年発現頻度 $n$ の分布

表3-1 ワイブルパラメータの値

(a) $\Delta P_0$ (hPa)			
領域	$\alpha$	$m$	$\gamma$
I	133.6	1.59	19
II	50.5	1.39	18
III	20.9	1.13	26

(b) $C_0$ (km/h)			
領域	$\alpha$	$m$	$\gamma$
I	37.6	1.13	31
II	2636	2.05	25
III	81.8	1.23	29

(c) $Dir_0$ (deg)			
領域	$\alpha$	$m$	$\gamma$
I	77105	2.91	10
II	13300	2.34	6
III	902	1.92	15

(d) $r_{m0}$ (km)			
領域	$\alpha$	$m$	$\gamma$
$\Delta P_0 < 30$	93616	1.98	0
$30 \leq \Delta P_0 < 40$	62333	2.06	0
$40 \leq \Delta P_0$	8346	1.79	48

(注)  $\Delta P_0$ の単位は hPa

ここで、 $x$ は $\Delta P_0$ ,  $r_{m0}$ ,  $C_0$ , または $Dir_0$ を表している。 $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $m$ はワイブルパラメータであり、最小二乗法を用いて最適値を決定する。なお、藤井・光田<sup>27)</sup>と同様、 $\Delta P_0$ ,  $C_0$ ,  $Dir_0$ については、各領域ごとに設定するが、 $r_{m0}$ については、 $\Delta P_0$ との間に従属関係があるため、 $\Delta P_0$ の範囲を30hPa未満、30~40hPa、40hPa以上の3つに分けて扱う。

解析の結果得られたワイブルパラメータの値を表3-1にまとめて示す。ちなみに、藤井ら<sup>6),7)</sup>は $F(x)$ として対数正規分布を用いているが、データへの適用度は本研究ほど良好ではない。

(b) 台風パラメータの時間的変化

北緯37~42°の範囲における $\Delta P$ ,  $r_m$ ,  $C$ ,  $Dir$ の時間的変化は以下の式で良好に近似できる。

$$\Delta P(t) = \Delta P_0 \exp(-a_p t) \quad (3)$$

$$r_m(t) = r_{m0} \exp(a_r t) \quad (4)$$

$$C(t) = C_0 (1 + a_c t) \quad (5)$$

$$Dir(t) = Dir_0 = const. \quad (6)$$

(3)~(5)式に含まれるパラメータ $a_p$ ,  $a_r$ ,  $a_c$ の値は、各台風に対し最小二乗法を用いて決定する。これらの値は、

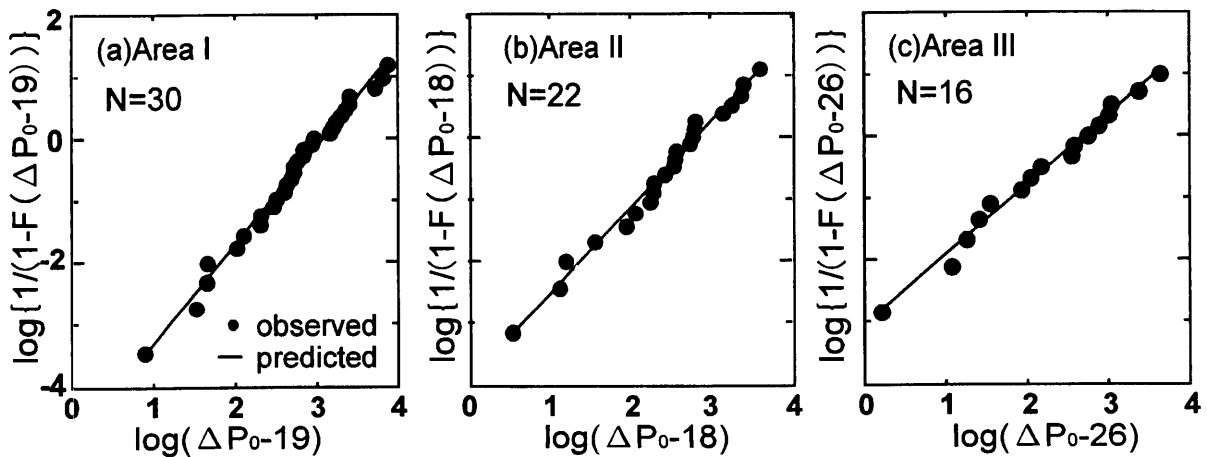


図3-3 各領域における $\Delta P_0$ の確率分布関数

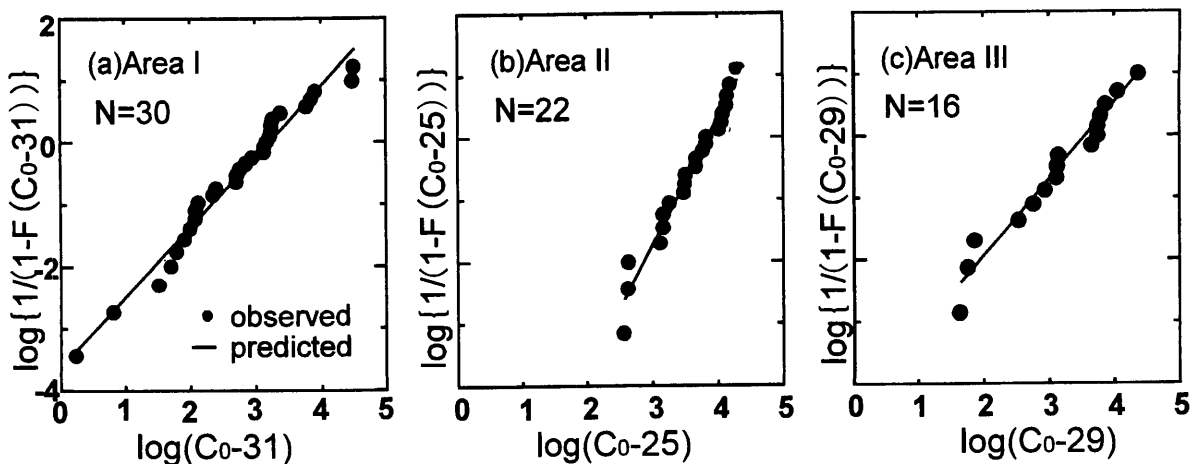


図3-4 各領域における $C_0$ の確率分布関数

表3-2  $a_p$ ,  $a_r$ ,  $a_c$ の平均値と標準偏差  $\sigma$

		領域 I	領域 II	領域 III
$a_p$ (1/hour)	$\mu$	0.016	0.013	0.018
	$\sigma$	0.02	0.02	0.02
$a_r$ (1/hour)	$\mu$	0.036	0.024	0.000
	$\sigma$	0.06	0.06	0.07
$a_c$ (1/hour)	$\mu$	0.000	-0.010	0.004
	$\sigma$	0.04	0.03	0.03

従来一定と仮定されることが多いが、一般にばらつきをもっている（図3-7参照）、本研究ではこの分布を正規分布で仮定する（図中の実線）。各パラメータの平均値  $\mu$  および標準偏差  $\sigma$  を表3-2に示す。

### 3.2 地上風モデル

前節で与えられるのは上空の傾度風であり、これより地表面の粗度を考慮して地表付近の風向・風速を推定する必要がある。この地上風モデルとして、これまでいく

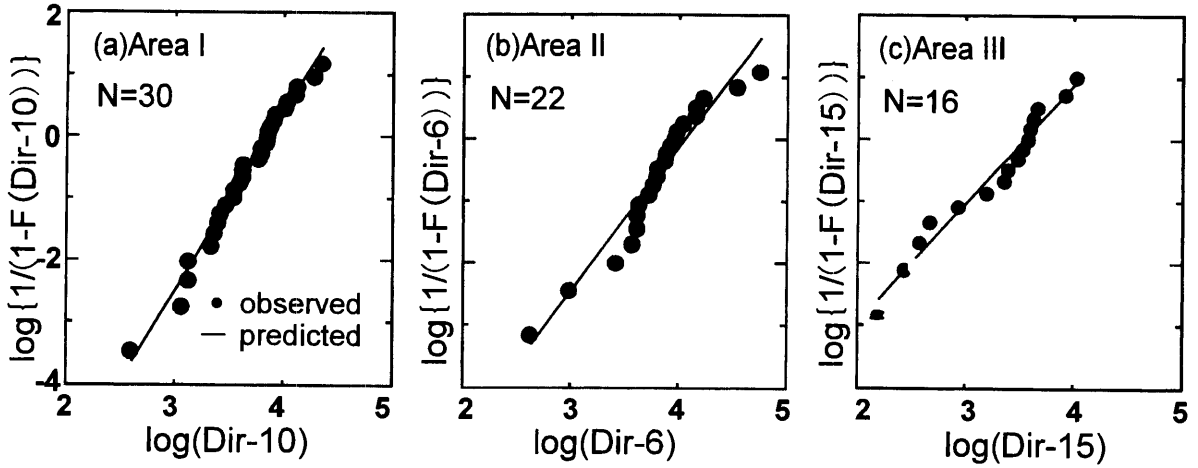


図3-5 各領域におけるDirの確率分布関数

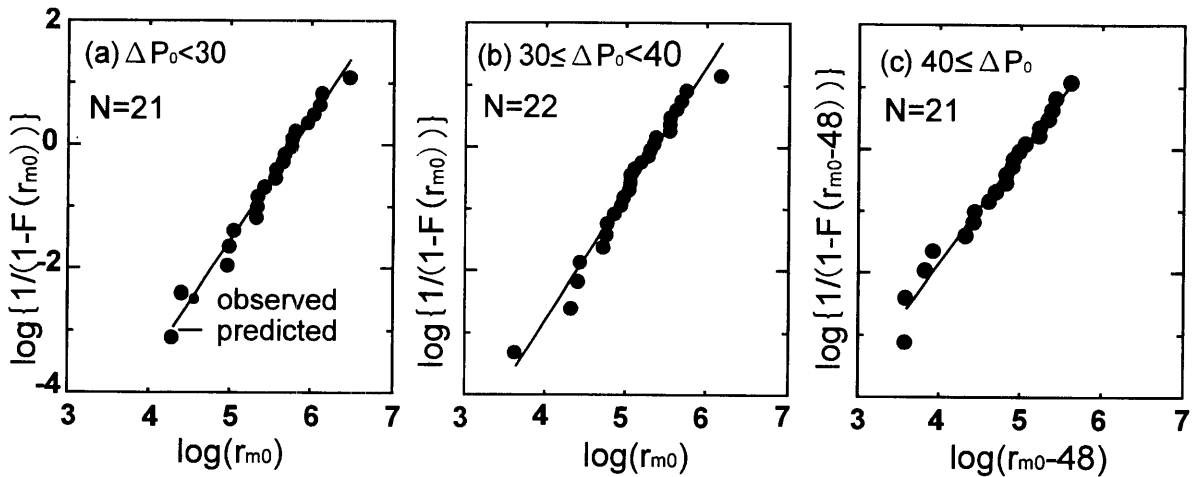


図3-6  $r_{m0}$ の確率分布関数

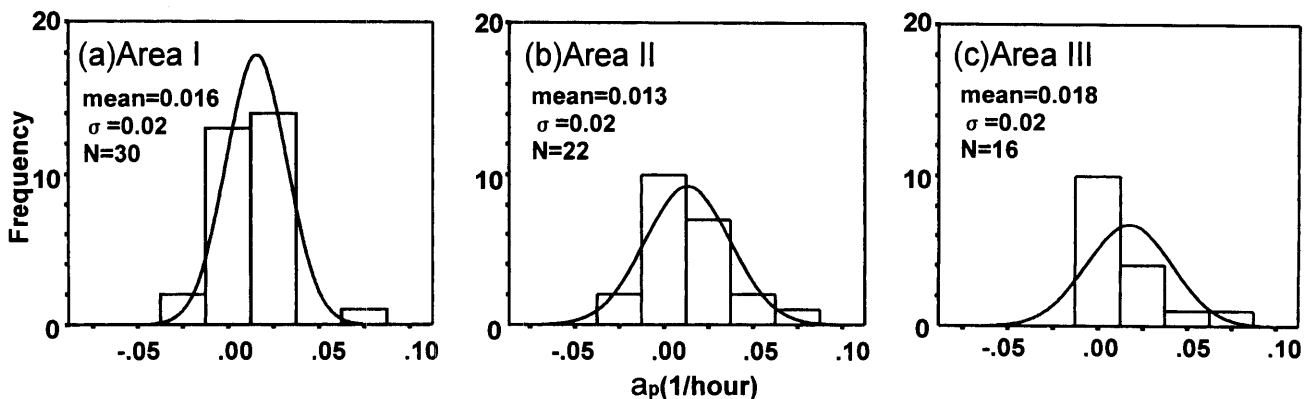


図3-7  $a_p$ の頻度分布

つかの提案がなされているが<sup>(8),9)</sup>、ここでは現在のところ最も汎用性が高いと考えられている孟ら<sup>(9)</sup>による方法を用いる。

秋田地方気象台における台風9119号通過時の風向・風速の時間的変化について、観測記録と計算結果との比較を図3-8に示す。図中、□印は観測結果を、実線は計算結果を表している。なお、時間の起点は9月27日0時である。また、計算においては、地表面の粗度長を $z_0=0.1\text{m}$ と仮定し、風速はいずれも地上10mでの値に換算してある。この図より計算結果はおおむね観測値を再現していることが分かる。青森地方気象台についてもほぼ同程度の一致が得られた。次に、青森・秋田両県内の地域気象観測所(AMeDAS)のデータに対して同様の比較を行った結果を図3-9に示す(○および△印)。これを見ると、両者の対応の悪い地点も多く見られる。この不一致の原因としては、(i)AMeDASのデータの信頼性と(ii)観測地点周辺の局所地形(メソスケール程度)の影響<sup>(10)</sup>が考えられる。(i)に関連し、筆者らは両県

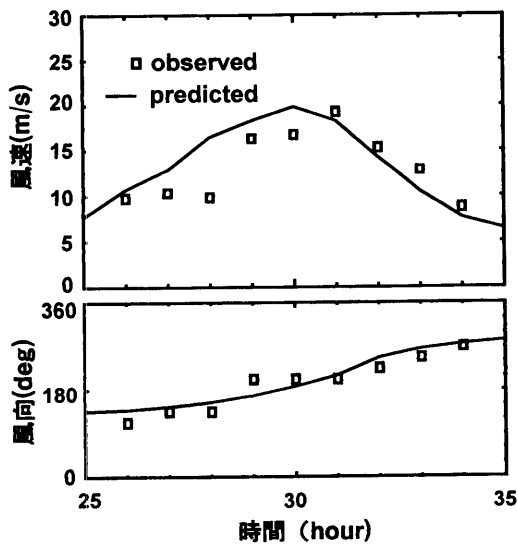


図3-8 台風9119号の通過に伴う風速・風向の時間的変化(秋田地方気象台,地上10m換算値)

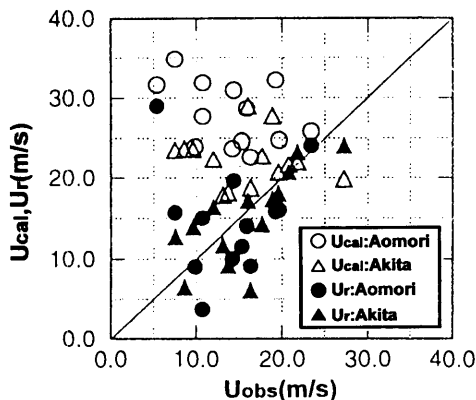


図3-9 AMeDAS観測地点における台風9119号通過時の最大風速:観測値と計算値との比較

内のAMeDAS観測地点の周辺状況を全て調査した<sup>(11)</sup>。その結果、風向・風速の観測値が明らかに周囲の建物や樹木などの影響を受けていると思われる地点がいくつか存在することが分かった。しかし、そのような地点のデータを除いても、観測値と計算値の不一致は依然として大きく、観測地点周辺の局所地形が風向・風速に影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、青森市や秋田市は海に面した平野に位置しており、周囲はおおむね平坦であるとみなせるため、観測値と計算値の一致度は良好であるが、内陸部の市町村では、周囲にある山の影響を受け、風速が増減したものと考えられる。

### 3.3 局所地形の影響に関する重回帰モデル

前節での考察に基づき、台風9119号により住家被害のあった市町村で、ある程度信頼できるAMeDASデータのある27地点を対象として解析を行った。地表面の粗度長 $z_0$ は、市では $0.1\text{m}$ 、町村では $0.01\text{m}$ と仮定した。最大風速に対し、観測値 $U_{obs}$ と計算値 $U_{cal}$ の差(風速の増減)が、局所地形の影響によるものと考え、これを $U_{cal}$ で除した値(風速増減率) $G$ を目的変数とし、対象地点周辺の地形要因を説明変数とする重回帰モデルの設定を試みた。説明変数としては、図3-10に示す7つの地形要因と1つの海岸要因、および、都市の規模について市と町村にカテゴリ分けを行った2つのダミー変数(City, Town)である。地形要因および海岸要因の抽出は、縮尺50万分の1の地図(国土地理院)を用いて行った。

変数減少法(F確率=0.4)により変数を選択した結果、選ばれた変数は、 $H_M$ ,  $H_M/L_M$ ,  $L_M$ ,  $L_b$ ,  $S_f$ , Townの6変数であった(重相関係数0.82)。この時選択された変数のうち、風下側の情報は $L_b$ だけである。その標準偏回帰係数を調べてみると、他の変数よりも小さく、風速増減率にはあまり有効に働いていないことが分かった。

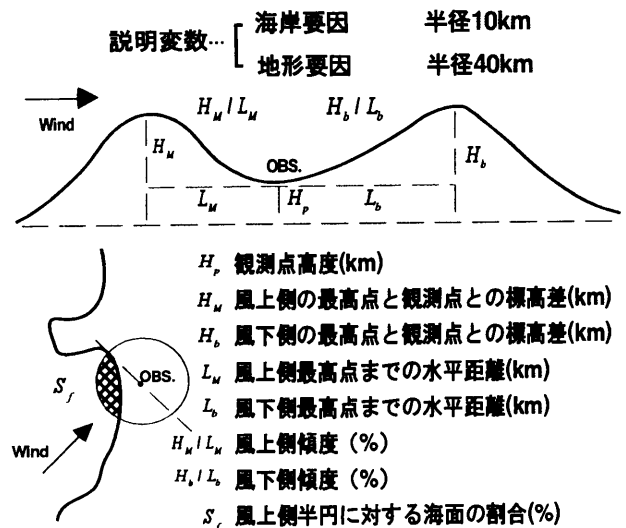


図3-10 重回帰モデルの説明変数の定義



表3-3 重回帰分析の結果

変数	標準偏回帰係数	分散拡大係数	p 値
$H_M$	0.715	5.40	0.025
$H_M/L_M$	-0.449	5.98	0.164
$S_f$	0.246	1.48	0.004
$1/L_M$	0.499	2.61	0.246
Town	-0.660	1.03	0.000
定数			0.001

そこで、本研究では風上側のみに着目し、 $L_n$ を除く上記5変数を用いて、 $G$ に対する重回帰モデルを作成した。なお、 $L_M$ については、小さいほどその影響が強くなるように、逆数 ( $1/L_M$ ) として扱った。表3-3に解析結果を示す。得られた回帰式は、

$$G = 0.395H_M - 0.056(H_M/L_M) + 0.007S_f + 2.314(1/L_M) - 0.369Town \quad (7)$$

であり、重相関係数は0.81、F確率は有意水準を0.05とすると高位で満たされている。標準偏回帰係数の大きさは、 $H_M$ 、Townに対して大きく、風速増減にこれらの変数が強く関連していることが分かる。(7)式で与えられる $G$ を用いれば、局所地形の影響を考慮した修正最大風速 $U_r$ は次式で計算される。

$$U_r = U_{cal}(1+G) \quad (8)$$

このように計算された $U_r$ は、図3-9中の●および▲印で示されており、 $U_{obs}$ に比較的よく対応している。なお、 $G$ の重回帰モデルについては、数量化理論I類の手法を用い、変数をカテゴリー分けして解析すると、よりばらつきの小さいモデルを作成可能であることが分かったが<sup>212)</sup>、本論文では取り扱いの容易さを考慮し、(7)式を用いることとする。

#### 4. 局部風圧モデル

外装材の被害に直接関連する局部風圧の大きさやその最大値の発生箇所は、建物形状（特に屋根の形状と勾配）や風向によって変化する<sup>213)</sup>。住宅の形状は多種多様であり、精度の良い被害予測モデルを確立するためには、風圧力に関してきめ細かい設定が望まれるが、既往の風洞実験や実測のほとんどが切妻屋根と寄棟屋根（陸屋根はこれらの特殊な場合と考える）を対象として行われていることを考慮し、ここでは屋根形状をこれら2種類に大別する。全風向に対する最大局部風圧は、屋根勾配に応じて、屋根隅角部や周辺部、または棟部に発生する<sup>213)</sup>。建築物荷重指針<sup>214)</sup>や既往の風洞実験結果<sup>215), 17)</sup>によれば、局部風圧係数（時間平均値） $C_p$ の最大値は、切妻屋根で約1.4、寄棟屋根で約1.0である。そこで本研究では、屋根勾配にかかわらず、これらの値を用いることとする。

より正確には、風圧係数を風向ごと、場所ごとに設定し、台風による強風の風向特性や建物配置との関連で最大風圧力を算定するのが望ましい。しかし、(i)実際の市街地にある住宅では、主として街路によって配置が規定されるため、様々な方向を向いていること、(ii)台風の通過中、強風が吹くのは1~2時間程度であるが、その間に平均風向が30°程度は変化すること（図3-8参照）、および、(iii)地表面付近では風向変動が大きく、10分間でみて±30°以上の変化を示すこと<sup>218)</sup>、を考慮すれば、市街地にある住宅は全て、台風の通過中に上述の風圧係数で計算される最大局部風圧を受けると考えることができよう。

住宅は小規模であるから、準定常アプローチを用いて最大局部風圧 $\hat{P}$ を算定することが可能である<sup>213)</sup>。すなわち、

$$\hat{P} = \frac{1}{2} \rho \hat{U}_n^2 C_p = \frac{1}{2} \rho (G \cdot U_n)^2 C_p \quad (9)$$

ここで、 $\rho$  = 空気密度、 $U_n$  = 基準高さ $H$ （屋根平均高さ：ここでは2階建住宅を想定し、7mと仮定）における10分間平均風速、 $G$ はガストファクターであり、ピーク風圧の評価時間として1秒を想定すると、約1.78である<sup>219)</sup>。 $\hat{U}_n$ は最大瞬間風速に相当する。また、 $C_p$ は上で与えられた局部風圧係数である。

Davenport<sup>220)</sup>は、市街地に建つ低層建築物を対象とし、カナダ規準によって計算されるピーク風圧力のばらつきを検討し、変動係数が約0.3となることを示した。そこで本研究では、局部風圧力の最大値は、(9)式で与えられる値 $\mu_p$ を平均値とし、変動係数 $V_p=0.3$ をもつ対数正規分布に従うと仮定する。

#### 5. 外装材の耐風圧強度モデル

住宅外装材の耐力の確率モデルは、実大試験片を用いた加力試験の結果に基づいて構築するのが望ましい。しかし、実際の住宅を対象とした場合、そのようなデータはほとんどないのが実状である。特に、劣化している古い住宅に関するデータは筆者の知る限り皆無である。そこで本研究では、台風9119号時の風速記録と被害率に基づいて推定する。

外装材の耐力（風圧換算値） $R$ も $\hat{P}$ と同様、対数正規分布に従うとし、その平均値を $\mu_R$ 、変動係数を $V_R$ とすると、破損確率 $P_f$ は次式で与えられる<sup>221)</sup>。

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln \left[ \left( \frac{\mu_p}{\mu_R} \right) \sqrt{(V_R^2+1)/(V_p^2+1)} \right]}{\sqrt{\ln((V_R^2+1)(V_p^2+1))}} \right] \quad (10)$$

ここで、 $\Phi$ は標準正規分布関数を表す。

青森県および秋田県内のいくつかの市町に対し、台風9119号時に観測された最大風速から $\hat{P}$ を(9)式を用いて

表5-1 屋根材の耐風圧強度の推定結果

	最大風速(m/s)	$R_g$	$R_h$	$P_f$ (%)	$\mu_R$ (kgf/m <sup>2</sup> )
青森	23	0.89	0.11	1.16	321
黒石	19	0.75	0.25	11.6	139
秋田	19	0.53	0.47	0.84	215
能代	18	0.75	0.25	0.60	214
横手	14	0.50	0.50	1.78	105
鹿角	20	0.75	0.25	8.09	165
鷹巣	19	0.75	0.25	11.3	142
五城目	20	0.55	0.45	5.46	160

\* 地上高さ 10m 換算値

計算し、(10)式で推定される $P_f$ の値が実際の屋根被害率に一致するように $\mu_R$ を決定した。結果を表5-1に示す。なお、 $P_f$ の値は、切妻屋根と寄棟屋根とで $C_p$ の値が異なることより、それぞれの屋根形状に対する被害率( $P_{fg}$ ,  $P_{fh}$ )と構成比( $R_g$ ,  $R_h$ )を用い、次式で算定した。

$$P_f = P_{fg} \cdot R_g + P_{fh} \cdot R_h \quad (11)$$

各市町における $R_g$ および $R_h$ の値は、平井によるアンケート調査結果<sup>(22), (23)</sup>より推定した。また、 $V_R$ の値は、風圧力と同様0.3と仮定した。

いま、文献[24]に基づいて、屋根葺材の設計風圧力 $P_{design}$ を計算すると、 $P_{design} = 60\sqrt{7} \times 1.5 = 238$  (kgf/m<sup>2</sup>)となる。これを上で推定された $\mu_R$ と比較すると、多くの市町において $\mu_R$ が $P_{design}$ を下回っている。これは、AMeDASデータの信頼性のほか、比較的古い住宅に被害が多く発生していることを考慮すれば、老朽化による耐力の低下が主な要因であると推定される。

## 6. 屋根被害予測シミュレーション

### 6.1 シミュレーション方法

第3～5章に示した各モデルに基づき、屋根の被害予測シミュレーションを行った。まず、台風モデルを用いて風向・風速のシミュレーションを行い、対象地点における風の統計量を算定した。次に、得られた風速の再現期待値より局部風圧モデルを用いて風圧力の確率分布を求め、さらに、耐風圧強度モデルで推定した屋根葺材の確率分布により対象地点の被害率を計算した。

### 6.2 台風シミュレーション

第3章で設定した台風パラメータの確率モデルを用いて1000年間のシミュレーションを行った。発現位置については、I～IIIの各領域内で一様と仮定した。また、ここでは10年を1期間として扱い、10年最大風速を求めた。

図6-1は、弘前市を対象とし、地上高さ10mにおける風速を計算した結果である。縦軸に風速、横軸に基準化変量をとり、局所地形による風速の増減を考慮しないも

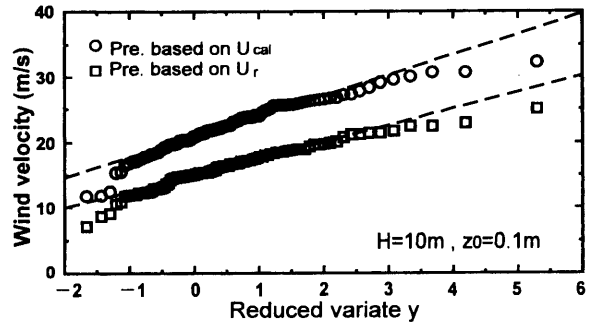


図6-1 台風シミュレーションによる10年最大風速

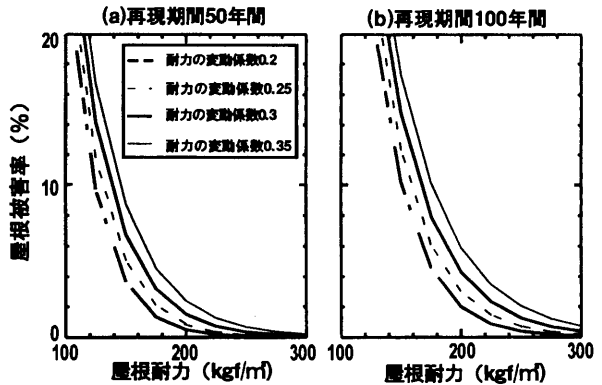


図6-2 屋根被害率の推定結果(弘前市)

の $U_{cal}$ (○印)と考慮した $U_r$ (□印)がプロットされている。図中の破線はGumbelの積率法によって求めた回帰直線である。これより、再現期間30, 50, 100年の風速( $U_r$ )を求めると、それぞれ、17.3, 18.8, 20.7 m/sである。ちなみに、台風9119号によるAMeDAS観測値は15m/sであり、30年再現期待値より小さい。これは、弘前市におけるAMeDAS観測地点は周囲を住宅や樹木に囲まれているため<sup>(21)</sup>、遮蔽効果によって風速が低減したためと考えられる。

### 6.3 屋根被害率

風速の50年および100年再現期待値に対し、屋根被害率を計算した結果を図6-2に示す。

計算に当たり、 $V_p = 0.3$  (一定)とし、屋根葺材の耐力の平均値 $\mu_R$ と変動係数 $V_R$ を変化させた。(10)式からも推定されるように、 $\mu_R$ の増大と $V_R$ の低下は被害率の低減に寄与する。 $\mu_R$ が $\mu_p$ に比べてそれほど大きくない時、 $V_R$ が増大すると被害率は大きく増大する。一方、 $\mu_R$ が十分大きくなると、 $V_R$ は被害の低減にほとんど寄与しなくなる。

台風9119号による強風は、青森県並びに秋田県内の市町村においては、ほぼ50年再現期待値に相当すると考えられる<sup>(21)</sup>。いま、変動係数を $V_p = V_R = 0.3$ と仮定し、図6-2(a)を用いて、台風9119号時の屋根被害率7.32%に対応する $\mu_R$ を求めると約150kgf/m<sup>2</sup>となる。次に、この値を文献[24]の規定値(238kgf/m<sup>2</sup>)まで高めると、屋根被害率は約1%まで低下し被害低減に効果的である。

## 7. おわりに

本論文では、筆者らの提案した住家の強風被害予測モデルを用いたシミュレーション手法の一連の流れを示した。但し、ここに示した各モデルには、それぞれいくつかの問題点を含んでいる。特に、局部風圧モデルにおける風圧係数の設定では、既往の文献や実験結果が少なく、本論文ではパラメータを屋根形状のみとした。また、耐風圧強度モデルで用いた外装材の耐力分布に関しても、既往の文献や調査結果は極めて少なく、本論文では、台風9119号による実被害率から推定した。しかし、本来ならば、実大試験片を用いた加力試験などによって設定するのが望ましい。

今後、このようなデータ不足を補うための実験も併せて行い、モデルに改良を加え、より妥当な被害予測が可能となるようにしたい。

## 謝 辞

台風9119号による住宅被害調査に際しては、青森、秋田両県内の各市町村役場並びに消防署より多大な協力をいただいた。ここに記し、感謝の意を表する。

## <参考文献>

- 1) 自然災害総合研究班：1991年台風19号による強風災害の研究，平成3年度文部省科学研究費・突発災害調査研究報告，1992.8
- 2) 植松 康，鈴谷二郎，野澤寿一：青森県および秋田県における台風9119号による建物被害，日本風工学会誌，No.51，pp.35～47，1992.5
- 3) 植松 康，三吉拳志，佐々木和彦，山田大彦：台風による住宅外装材の強風被害について—東北地方を対象とした実被害調査結果—，東北地域災害研究，Vol.34，pp.155～164，1998.3
- 4) 光田 寧，藤井 健：台風による風災害の予測，日本風工学会誌，No.72，pp.73～91，1997.7
- 5) 田村幸雄，須田健一，松井源吾：設計基準風速についての一考察（建物密度の経年変化を考慮した年最大風速の均質化），日本建築学会構造系論文報告集，No.400，pp.101～111，1989.6
- 6) 藤井 健，塚本 修，光田 寧：日本本土に襲撃する台風の統計的性質について，京都大学防災研究所年報，No.28 B-1，pp.1～11，1985.4
- 7) 藤井 健，光田 寧：台風の確率モデルの作成とそれによる強風のシミュレーション，京都大学防災研究所年報，No.29 B-1，pp.1～11，1986.4
- 8) 吉田正邦：弾塑性型鋼板ダンパーの風応答による疲労損傷評価に関する研究，東北大学博士学位論文，1994.12
- 9) 孟 岩，松井正宏，日比一喜：中立時の大気境界層における強風の鉛直分布特性（その2 台風時の強風），日本風工学会誌，No.66，pp.3～14，1996.1
- 10) 羽倉弘人，小泉俊雄：地形解析を考慮に入れた地表風の強さの推定—台風災害におよぼす局所地形の影響に関する研究（V），日本建築学会構造系論文報告集，No.363，pp.31～41，1986.5
- 11) 植松 康，佐々木和彦：東北地方における風観測（その1 青森県と秋田県の場合），日本風工学会誌，No.78，pp.81～93，1999.1

- 12) 三吉拳志，佐々木和彦，植松 康，山田大彦，吉田正邦：東北地方における台風と住家の強風被害予測モデルに関する研究—局所地形による風速増減率の検討—，台風の強風による被害の確率的予測法に関する研究（研究代表者：藤井 健），京都大学防災研究所，pp.51～64，1998.2
- 13) 植松 康，ニコラス・イシモフ：低層建築物に作用する局部風圧力に関する研究（その4 文献調査），日本風工学会誌，No.78，pp.13～27，1999.1
- 14) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，1993.6
- 15) 岡田 恒：強風による屋根瓦の飛散に関する風洞実験，日本風工学会誌，No.35，pp.1～15，1988.4
- 16) 森崎稔璋，齋藤 通，本田明弘，佐藤勝彦：屋根瓦に作用する風力に関する研究，日本風工学会誌，No.58，pp.19～31，1994.1
- 17) D. Meecham, D. Surry and A. G. Davenport : The magnitude and distribution of wind-induced pressure on hip and gable roofs, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.38, pp.257～272, 1991
- 18) G. M. Richardson, R. P. Hoxey, A. P. Robertson and J. L. Short : The Silsoe Structures Building : The completed experiment Part 1, Proc. 9th Int. Conf. Wind Eng., Vol. 3, pp.1103～1114, 1995.1
- 19) 石崎隆雄：耐風工学，朝倉書店，1977.9
- 20) A. G. Davenport : On the assessment of the reliability of wind loading on low building, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol.11, pp.39～62, 1983
- 21) P. トフークリステンセン，M. J. ベイカー（室津義定 監訳）：構造信頼性—理論と応用，シュプリンガー・フェアラーク東京，1986.5
- 22) 平井和喜：青森県主要都市における住宅外装構成の比較検討，第10回日本雪工学会大会論文報告集，pp.209～212，1994.1
- 23) 平井和喜：秋田県および岩手県主要都市における住宅外装構成の比較検討，第11回日本雪工学会大会論文報告集，pp.273～276，1994.11
- 24) 亜鉛鉄板会：鋼板製屋根構法標準 SSR92，1992.9

## <研究協力者>

三吉 拳志 (株)大林組（元東北大学・大学院生）  
佐々木和彦 東北大学大学院・前期課程