

気流解析と台風シミュレーションに基づく 配電設備のリスクマネジメント

石原孟¹・榎木康太²・高原景滋³・荒川洋⁴

¹正会員 東京大学教授 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

E-mail: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

²学生会員 東京大学大学院生 大学院工学系研究科社会基盤学専攻(同上)

(現・(株)大林組研究員 技術研究所 環境技術研究部)

E-mail: enoki.kota@obayashi.co.jp

³非会員 沖縄電力株式会社グループリーダー IT推進本部(〒901-2602 沖縄県浦添市牧港5-2-1)

E-mail: keiji_takahara@okiden.co.jp

⁴正会員 株式会社水城ネットワーク部長 環境計画部(〒134-0088 東京都江戸川区西葛西6-8-10)

E-mail: arakawa@aquanet21.co.jp

本研究では電柱損傷度曲線、台風ハザード曲線および期待総建設費最小化原則に基づく配電設備のリスクマネジメント手法を提案した。台風0314号による被害データ分析および数値流体解析に基づく宮古島全域の瞬間風速の推定を行うことにより、1度の台風被害データから電柱の損傷度曲線の作成を可能とした。また台風シミュレーションと気流解析を組み合わせることにより、宮古島に設置されたすべての電柱位置における台風ハザード曲線を作成することを可能とした。最後に期待総建設費最小化原則に基づく最適設計風速を電柱の損傷度曲線と台風ハザード曲線を用いて求めた。その結果、全ての電柱に各々の最適設計風速を用いた場合では現状の設計風速を用いた場合の期待総建設費用に比べて、13%のコストを削減できることを明らかにした。

Key Words: risk management, power distributions, damage data, gust wind prediction, fragility curve, typhoon simulation, typhoon hazard curve, minimization of expected total cost

1. はじめに

沖縄、九州、四国地方では台風の襲来により、送配電設備が大きな被害を受けることがある¹⁾²⁾。2003年に発生した台風0314号(以下、台風14号)は宮古島の全電柱約20,000本のうち約1,000本に折損や傾斜などの被害をもたらした。電柱倒壊により電力の供給がストップしただけでなく、車両の通行を遮断し、災害復旧にも大きな影響を与えた(図-1)。そのため、台風による配電柱の大量倒壊を未然に防ぐために、電柱の強風リスクを定量的に評価し、費用対効果の高い対策の実施が急務である。

電柱の強風リスクを定量的に評価するには、被害電柱の位置情報と設置地点における風速情報から求められた電柱の損傷度曲線 (fragility curve) と電柱の設置地点における風速の確率分布を表す台風ハザード曲線 (typhoon hazard curve) が必要である。

強風災害に関するこれまでの研究の多く^{3)~6)}は電柱や

建物の損傷度と台風時の最大瞬間風速との関係を調べているが、その際には、被害電柱や建物の設置地点における最大瞬間風速ではなく、気象台で観測された最大瞬間風速が用いられている。しかし、宮古島のように風速の観測データが1箇所の気象台からしか得られない場合には、電柱の損傷度曲線を得るには複数回の台風被害データが必要となる。このような方法では時間がかかる上、気象台の風速を用いて島全体の風速を代表させるには精度の面においても問題がある。

また九州地方を襲った台風9117号と9119号による配電設備の被害状況を分析した前田¹⁾²⁾の研究では、各県を2, 3の大きいエリアに分け、気象台から得られた最大瞬間風速と配電設備の倒壊の関連性を分析した。その結果、台風通過に伴う被害状況は連続的ではなく、特定の地域に集中していることが明らかにされ、エリア内の地形や地表面粗度がエリア内の最大瞬間風速に与える影響を考慮する必要があることが示唆された。

さらに神田ら^{3),4)}の建築物の強風危険度の評価法に関する研究では、建物の一部損壊、半壊、全壊に対する被害率を対数正規分布に当てはめることにより、それぞれのケースに対応する対数正規分布の平均値と標準偏差を求めた。いずれのケースにおいても標準偏差が0.3であり、大きな変動係数を示している。このような大きな変動係数は建物強度のばらつきの他、周辺建物、地形、地表面粗度の影響も含まれている可能性がある。

以上のことを踏まえ、本研究では、まず台風14号による宮古島の倒壊電柱の位置同定を行い、宮古地方気象台における台風14号時の風向・風速観測データを用いて気流解析により宮古島全域の最大瞬間風速を求め、同定された被害電柱の位置情報と合わせて電柱の損傷度曲線を作成する。次に、台風シミュレーションを行い、気流解析の結果と合わせて、宮古島における電柱毎の台風ハザード曲線を求める。最後に、宮古島における電柱毎の損傷度曲線と強風ハザード曲線を用い、電柱毎のリスク評価を行う。期待総建設費最小化原則に基づき、宮古島における配電用電柱毎の最適設計風速を求めると共に、島全体の配電設備における設計風速階級別の期待総建設費を算出し、最適な設計風速を提案する。

2. 台風14号の被害データと気流解析による電柱の損傷度曲線の作成

瞬間風速と電柱の被害率との関係を表わす損傷度曲線を作成するためには、複数の地域における風速の情報とそれらの地域における電柱の被害率の情報が必要である。しかし、宮古島のように1箇所の気象官署の風速データしか得られない場合には1度の台風被害データから損傷度曲線を作成することができない。

そこで、本研究では、宮古島に設置された電柱の被害位置を正確に同定し、1kmメッシュ毎の被害率を算定すると共に、気象台で観測された風速を基に気流解析により宮古島全域における1kmメッシュ毎の最大瞬間風速分布を求め、現在使用されている電柱における損傷度曲線を求めた。

(1) 台風14号の被害データによる電柱被害率の算定

台風14号における宮古島の被害電柱位置を同定するため、表-1に示す(1)~(6)のデータを使用した。同定手順は図-2に示すように現地踏査を踏まえ、(4)国道・県道沿い(図-3)と(5)国道・県道以外の被害電柱図に基づき(1)1/25000地図上に倒壊位置をマーキングし、デジタル化により座標変換を行った。このようにデジタル化された第1次被害電柱位置マップに対して、(2)航空写真、(3)

被害写真(図-1)を用いて修正し、第2次被害電柱位置マップを作成した。最後に、(6)倒壊前の電柱位置と照合し、被害電柱の正確な位置を同定した。図-4には島内の全電柱と被害電柱の位置を示す。

電柱の被害率は、林⁵⁾、林・光田⁶⁾の定義に準じ、あるメッシュ内の電柱の総本数に対する被害電柱の割合で求めた。被害率の算定に用いるメッシュ幅が大き過ぎると風速の代表性が悪くなり、小さすぎると電柱が含まれないメッシュ数が多くなり、風速と電柱の被害率との関係を正確に評価することができなくなる。1km幅のメッシュを用いる場合には、ほぼ全てのメッシュ内に電柱が含まれる。本研究では1kmメッシュ毎に被害率を算定し、図-5に示した。図中には倒壊電柱の位置も併記した。図-5から、宮古島の中央部と平良市の市街地では被害率が小さく、海岸線に近い郊外での被害率が高い。また被害率の高いメッシュには電柱の連続倒壊が含まれていることが分かる。

(2) 気流解析から島全域における最大瞬間風速の算定

台風14号時の宮古島全域における最大瞬間風速の分布を以下に示す手順により求めた。まず、宮古地方気象台近傍の地形、地表面粗度および建物等の影響を考慮した気流解析から風向別風速比(平坦地形に対するもの)を求め、台風14号接近時の気象台で観測された10分平均風向・風速の時系列データを平坦地形上の風向・風速の時系列データに変換した。次に、宮古島全域を対象とする気流解析から島内の任意地点における風向別風速比を算出し、その地点における10分平均風向・風速の時系列データを算出した。最後に、気流解析から得られた乱れ強度を用いて、島全域における台風14号時の最大瞬間風速を算出する。

a) 気流解析の概要と精度検証

本研究では非線形局所風況予測モデルMASCOT^{8),9),10),11)}を用いて、宮古地方気象台近傍の地形、地表面粗度および建物等が風観測データに与える影響を評価した。MASCOTはレイノルズ平均非圧縮ナビエストークス方程式に基づく非線形モデルであり、風速、圧力、乱流統計量を従属変数とする質量保存則、運動量保存則、乱流統計量の保存則を数値的に解くことにより、風速の増減、風向変化を求める。

質量保存則は次式により表される。

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

ここで、 u_j は3つの風速成分、 ρ は空気密度を示す。

また3つの風速成分の運動量保存則は次のようになる。



図-1 被災した配電用電柱

表-1 被害電柱位置同定作業に用いた資料

資料番号	資料名	出典
(1)	1/25000地形図(宮古島全土)	国土地理院
(2)	航空写真(宮古島全土)	国土地理院
(3)	被害写真(1000枚)	宮古支庁
(4)	国道・県道沿い被害電柱図	沖縄電力
(5)	国道・県道以外の被害電柱図	沖縄電力
(6)	倒壊前電柱位置情報	沖縄電力

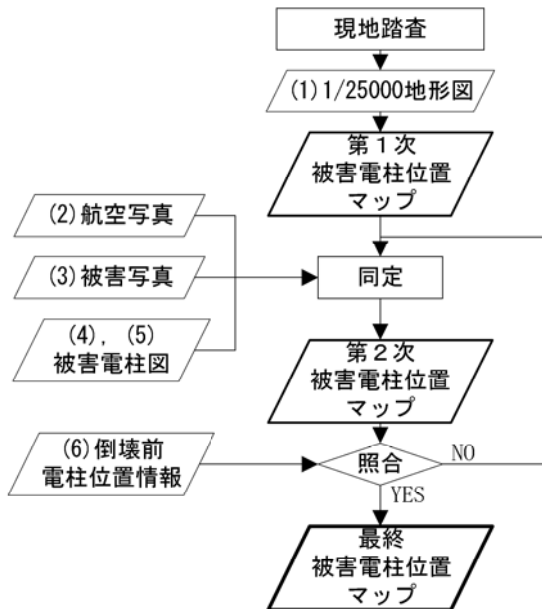


図-2 被害電柱位置同定作業のフロー図

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right) + f_{u,i} \quad (2)$$

ここで、 p は圧力、 μ は分子粘性係数である。 $f_{u,i}$ はキャノピーモデル¹¹⁾の流体力を表す。レイノルズ応力 $\overline{\rho u_i' u_j'}$ は、渦粘性モデルを用いて近似される。

$$\overline{\rho u_i' u_j'} = \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} - 2 C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

ここで、 k は乱流エネルギー、 ε は乱流散逸率を表す。 k と ε に関する輸送方程式は次式により表される。

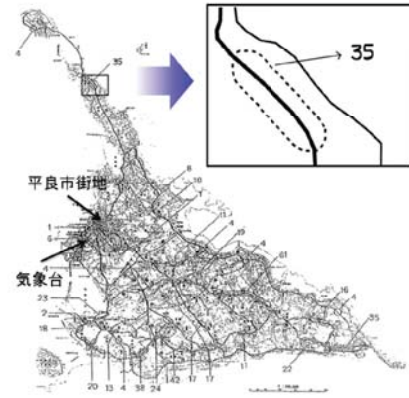


図-3 国道・県道沿い被害電柱図

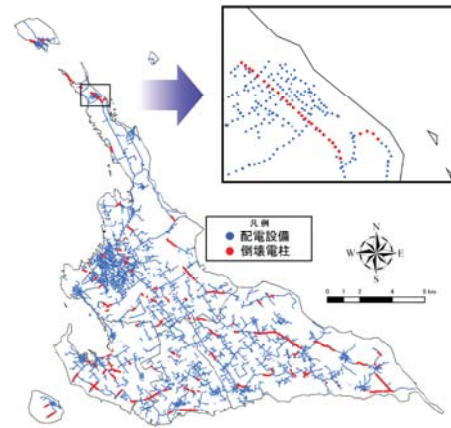


図-4 被害電柱位置の同定結果

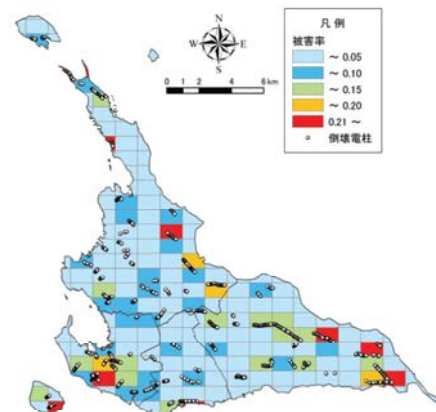


図-5 1kmメッシュ毎の電柱被害率の分布

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] - \overline{\rho u_j' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + f_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} + f_\varepsilon \quad (5)$$

ここで、 f_k 及び f_ε はそれぞれキャノピー層内の乱流エネルギー及び乱流逸散の生成と消散を表した項¹¹⁾である。また式中のモデル定数は標準 $k-\varepsilon$ モデルの値を採用した。

本研究では、宮古島地方気象台及び宮古島全域を対象とした2つの気流解析を行った。宮古島地方気象台を対象とした気流解析では、気象台周辺市街地が台風14号時の風観測記録に与える影響を調べると共に、石原らの風洞実験⁷⁾の結果と比較することにより本研究で用いた気流解析手法の精度検証を行う。また宮古島全域を対象とした気流解析では平坦地形及び実地形に関して16風向の解析を行い、風向別風速比を求め、風向風速の時系列データの変換に用いる。表-2には各対象領域の解析条件を示す。また図-6には宮古島全域を対象とした気流解析に用いた流入風の鉛直分布を示す。

宮古島地方気象台を対象とした気流解析では、実験に用いられた市街地模型を参考に建物及び植生の電子地図データを作成して用いた。また気流解析では風洞実験⁷⁾と同様に、市街地模型を設置した場合と設置していない場合の風観測高さでの風速比及び乱れ強度を求めた。図-7には風観測塔高さにおける風速比及び乱れ強度の風向による変化を示す。実測値は石原ら⁷⁾による風洞実験の結果を、解析値は気流解析の結果を示す。図-7(a)から、気流解析により求めた風速比は風洞実験から得られた風速比とよく一致することが分かる。いずれの風向も風速比は1より小さく、市街地の影響により平均風速が平坦な地形上の風速より減少していることが分かる。特に、測風塔の上流に市営団地及び気象台庁舎が存在する東風向及び北北西から西北西にかけての風向では、これらの建物の存在が気象台で観測された平均風速の減少が顕著に見られた。台風14号時に最大風速が記録された北風における風速比は0.73となっており、平坦地形上の風に比べ、平均風速が3割程小さいことが分かる。図-7(b)には風観測高さでの乱れ強度の風向による変化を示す。風速比が大きく減少している風向では乱れ強度が大きくなっていることが分かる。

b) 平坦地形上の風向・風速の時系列データの算出

台風14号の時の島内任意地点における風向・風速の時系列データを求めるため、まず、気象台での風観測記録から周辺市街地の影響を取り除いて、平坦地形上の風向・風速の時系列データを求める必要がある。

本研究では、時刻 t における平坦な地形上の風速 $\bar{U}_{F,A}(t)$ は気象台で観測された風速 $\bar{U}_{T,A}(t)$ と気流解析から得られた風速比 $C_{i,A}$ 、平坦な地形上の風向 $\bar{\theta}_{F,A}(t)$ は気象台で観測された風向 $\bar{\theta}_{T,A}(t)$ と気流解析から得られた風向偏角 $\Delta\theta_{i,A}$ から次のように求めた。

表-2 解析条件

(a) 宮古島地方気象台

解析ケース	平坦地形	実地形
流入風	実測値 ⁷⁾	
標高	一定値 (0m)	10m 数値地図 ¹²⁾
地表面粗度長	一定値 (0.02m)*	付表-1
電子地図	-	市街地模型 ⁷⁾ を参考に作成
解析領域	10.0km×3.2km×1.5km	
最小格子	25m(水平), 5m(鉛直)	25m(水平), 3m(鉛直)

*風洞床面より決定

(b) 宮古島全域

解析ケース	平坦地形	実地形
流入風	粗度区分Ⅱに対応する流入風	
標高	一定値 (0m)	50m 数値地図 ¹³⁾
地表面粗度長	一定値 (0.01m)*	付表-1
電子地図	-	電子住宅地図 ¹⁴⁾
解析領域	44.0km×44.0km×1.5km	
最小格子	25m(水平), 5m(鉛直)	25m(水平), 3m(鉛直)

*粗度区分Ⅱ

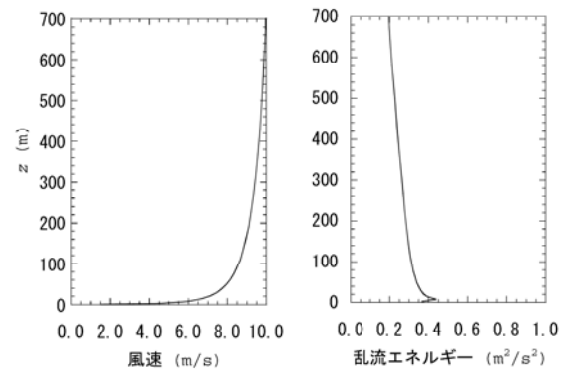
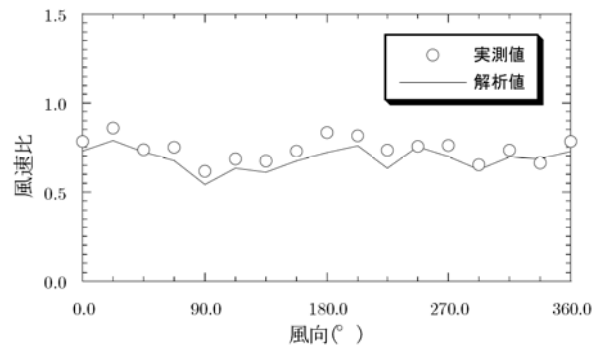
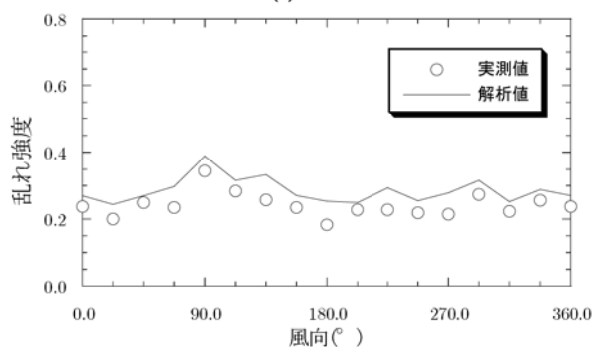


図-6 気流解析に用いた流入風の鉛直分布



(a) 風速比



(b) 乱れ強度

図-7 風速比及び乱れ強度の風向による変化

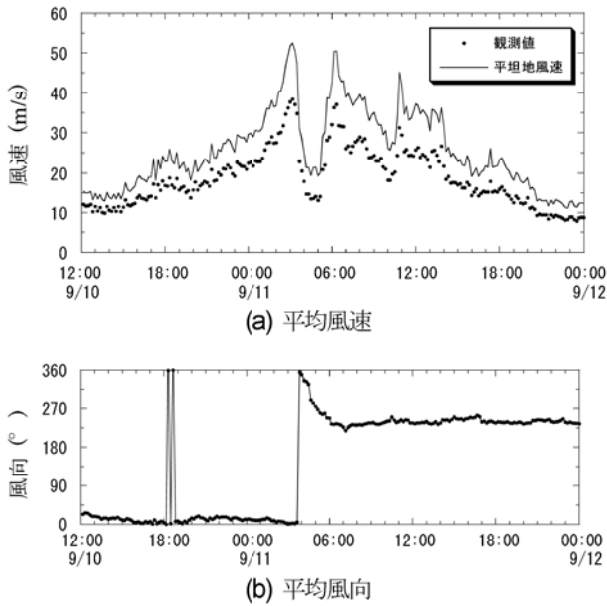


図8 気象台風観測記録と平坦地形上の平均風速と風向の推定値との比較

$$\begin{aligned}\bar{U}_{F,A}(t) &= \bar{U}_{T,A}(t) / C_{i,A} \\ C_{i,A} &= \frac{U_{T,A}}{U_{F,A}}\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_{F,A}(t) &= \bar{\theta}_{T,A}(t) - \Delta\theta_{i,A} \\ \Delta\theta_{i,A} &= \theta_{T,A} - \theta_{F,A}\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $U_{T,A}$ 、 $\theta_{T,A}$ は実地形を対象とした気流解析から求めた風向 i の時の気象台における風速計設置地点での風速と風向を表し、また $U_{F,A}$ 、 $\theta_{F,A}$ は同地点とその周辺を平坦地と仮定し気流解析から求めた風速と風向を表す。図-8には式(6)と式(7)により求められた平坦地形上の風速と風向の時系列データを示す。この図から、11日3時に気象台で記録された最大風速38.4m/sは気象台の周辺市街地の影響を取り除いた平坦地形上に変換した場合に52.5m/sとなることが分かる。

c) 島全域における風向・風速の時系列データの推定

次に、推定された平坦地形上の風向・風速に基づき島内の任意地点での10分平均風向・風速を当該地点の風速比及び風向偏角を用いて式(8)と式(9)により算出する。

$$\begin{aligned}\bar{U}_{T,i}(x, y, z, t) &= \bar{U}_{F,A}(z, t) \times C_i(x, y, z) \\ C_i(x, y, z) &= \frac{U_{T,i}(x, y, z)}{U_{F,i}(x, y, z)}\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\bar{\theta}_{T,i}(x, y, z, t) &= \bar{\theta}_{F,A}(z, t) - \Delta\theta_i(x, y, z) \\ \Delta\theta_i(x, y, z) &= \theta_{T,i}(x, y, z) - \theta_{F,i}(x, y, z)\end{aligned}\quad (9)$$

ここで、地上高さ z での実地形上の10分平均風速 $\bar{U}_{T,i}$ は

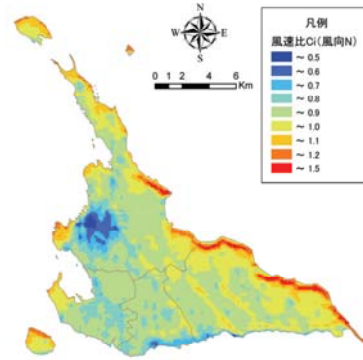


図-9 風速比 C_i の分布(風向N)

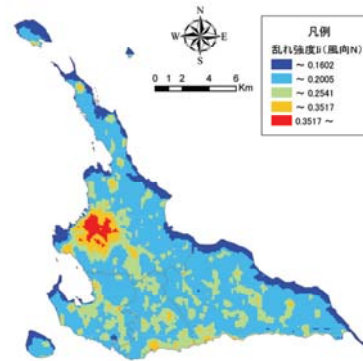


図-10 乱れ強度 I_i の分布(風向N)

同じ高さの平坦地形上の10分平均風速 $\bar{U}_F(z, t)$ に風速比 C_i を乗じて求められる。風速比 C_i は、気流解析から得られた実地形上の風速 $U_{T,i}$ と気流解析から得られた平坦地形上の風速 $U_{F,i}$ との比である。また実地形上の10分平均風向 $\bar{\theta}_{T,i}$ は、気流解析から求められた平坦地形上の10分平均風向 $\bar{\theta}_F$ と風向偏角 $\Delta\theta_i$ との和により求められる。風向偏角 $\Delta\theta_i$ は気流解析から得た実地形上の風向 $\theta_{T,i}$ と平坦地形上の風向 θ_F との差である。なお、平坦地形上の地上高さ z における風速 $\bar{U}_F(z, t)$ は次式に示す測風塔位置の平坦地形上の水平風速の鉛直分布から次式により求める。

$$\bar{U}_{F,A}(z, t) = \bar{U}_{F,A}(t) \times C_{F,A}(z), \quad C_{F,A}(z) = \frac{U_{F,A}(z)}{U_{F,A}} \quad (10)$$

ここで、 $C_{F,A}(z)$ は平坦地形上の測風塔位置における地上高さ z での風速 $U_{F,A}(z)$ と風速計高さでの風速 $U_{F,A}$ との比を表す。式(8)と式(10)をまとめると、任意地点・任意高さにおける平均風速の時系列 $\bar{U}_{T,i}(x, y, z, t)$ は平坦地形上の平均風速の時系列 $\bar{U}_{F,A}(t)$ から式(11)により求めることができる。また平坦地形上の平均風向は地表面付近では高さによって変化しないことを考えると、任意地点・任意高さにおける平均風向の時系列 $\bar{\theta}_{T,i}(x, y, z, t)$ は

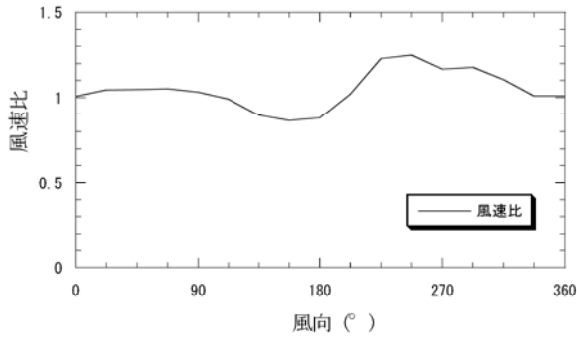


図-11 沖縄電力宮古支店風速計位置(地上高さ 22.0m)における風向別風速比

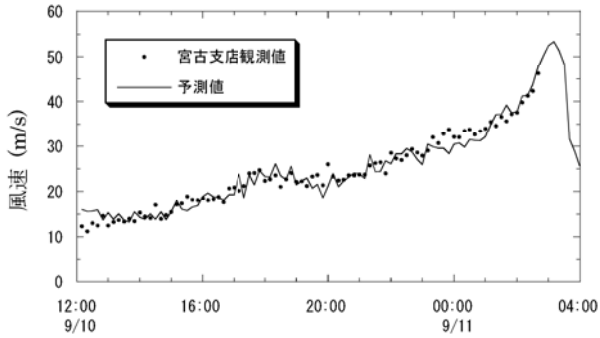


図-12 沖縄電力宮古支店風速計位置における平均風速の観測値と予測値の比較

平坦地形上の平均風向の時系列 $\bar{\theta}_{F,A}(t)$ から式(12)により求めることができる。

$$\begin{aligned} \bar{U}_{Ti}(x, y, z, t) &= C_{i,A}(x, y, z) \times \bar{U}_{F,A}(t) \\ C_{i,A}(x, y, z) &= C_i(x, y, z) \times C_{F,A}(z) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta}_{Ti}(x, y, z, t) &= \bar{\theta}_{F,A}(t) - \Delta\theta_{i,A}(x, y, z) \\ \Delta\theta_{i,A}(x, y, z) &= \theta_{Ti}(x, y, z) - \theta_F(x, y, z) \end{aligned} \quad (12)$$

図-9と図-10には、風向Nにおける宮古島全域の電柱高さ10.8mにおける風速比 C_i と乱れ強度 I_i の分布を示す。これらの図から、市街地における風速比が小さく、乱れ強度が大きいことが分かる。一方、島の北側の海岸付近では風速比が大きく、乱れ強度が小さくなっていることが分かる。

本研究で提案した予測手法を検証するために、台風14号接近時の平均風速及び風向の観測値が得られている沖縄電力宮古支店における地上高さ $z = 22.0\text{m}$ での平均風向・風速を予測した。沖縄電力宮古支店は、宮古島地方気象台の北約4kmの地点に位置する。図-11には同地点における風向別風速比を示す。沖縄電力宮古支店周辺は地形の起伏が緩やかであり、建物も気象台周辺と比較して少ないため、大きな減速は見られない。また西側は海に面しているため、風速比は1より大きくなっている。

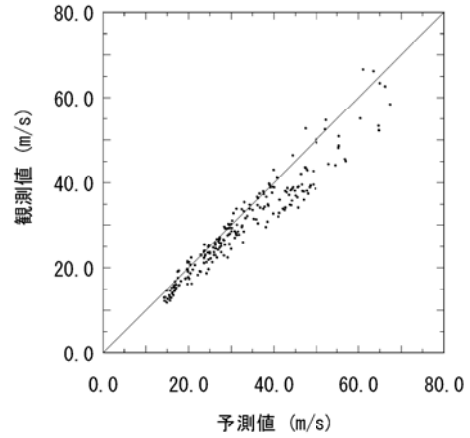


図-13 宮古島地方気象台における瞬間風速の観測値と予測値の比較

図-12には提案した手法による平均風速の予測結果を示す。予測された平均風速は宮古支店での観測結果とよく一致し、予測誤差の平均値は-0.14m/s、標準偏差は1.98m/sである。本提案手法により、気象台風観測記録から島内の他の地点における風向・風速を精度よく推定できることが示された。

d) 最大瞬間風速の推定

最後に、島内の任意地点における平均風速の推定値と気流解析により得られる乱れ強度により、台風接近時の最大瞬間風速を推定する。瞬間風速は気象庁の定義に従い、風速の3秒間の平均値を算出した。本研究では最大瞬間風速 U_E を100mメッシュ毎に求められた10分平均風速の時系列データにガストファクター $G_{u,i}$ を乗じて次式により求めた。

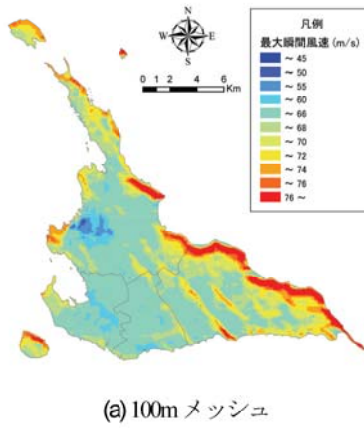
$$U_E(x, y, z) = \max(\bar{U}_{Ti}(x, y, z, t) \times G_i) \quad (13)$$

ここで、ガストファクター G_i は以下の式により表される。

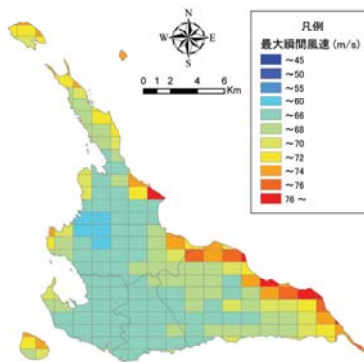
$$G_i = 1 + I_i P_f, \quad I_i = \sqrt{I_{u,i}^2 + I_B^2} \quad (14)$$

$$P_f = 0.5 \ln\left(\frac{T}{t}\right) \quad (15)$$

式(14)中の乱れ強度 I_i は、ウインドシアにより作られた乱れ強度で、気流解析により得られる乱れ強度 $I_{u,i}$ と、バックグラウンドの乱れ強度 I_B から求める。なお I_B は観測に基づき10%と設定した。また、式(14)中のピークファクター P_f はIshizaki¹⁵⁾により提案された式(15)を用い、10分間($T=600$ 秒)平均風速より最大瞬間風速($t=3$ 秒)を算出する。本研究では、最大瞬間風速の推定手法を検証するために、台風14号接近時の宮古島地方気象台における10分間の最大瞬間風速の観測記録と、10分間平均風速から求めた最大瞬間風速を図-13に示す。予測された最



(a) 100m メッシュ



(b) 1km メッシュ

図-14 最大瞬間風速 U_E の分布

大瞬間風速は観測値とよく一致し、予測誤差の平均値は-2.84m/s、標準偏差4.5m/sである。これにより本手法の有効性が確認された。図-14(a)には100mメッシュ毎の最大瞬間風速の分布を示し、図-14(b)に100mメッシュ毎の最大瞬間風速を1kmメッシュ毎に平均した分布図を示す。平良市街地で最大瞬間風速が低く、海岸付近で最大瞬間風速が高いことが分かる。これらの結果は、市街地の粗度が大きいことや海岸付近において海風の影響を強く受けることに対応している。

(3) 電柱の損傷度曲線の作成

本研究では1kmメッシュ毎の電柱被害率と1kmメッシュ毎の最大瞬間風速を用いて電柱の損傷度曲線を求めた。図-15には1km毎の電柱の被害率と最大瞬間風速との関係を示す。また比較するために、宮古地方気象台で観測された台風14号の平均風速から求めた最大瞬間風速と電柱被害率との関係も図中に併記した。1箇所の気象台で観測された風速を用いる場合には、風速と被害率の関係は1直線になり、損傷度曲線を作成できないことがわかる。一方、本研究で提案した手法により1度の台風被害データと1箇所気象台で観測された風速から電柱の損傷率と最大瞬間風速の関係を求めることが可能となる。

図中の実線は式(16)に示す対数正規分布を最小二乗法

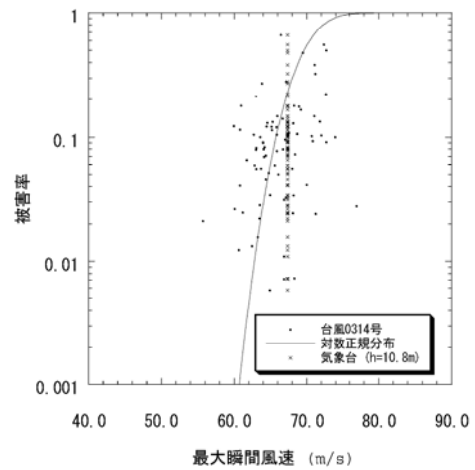


図-15 配電用電柱の損傷度曲線

表-3 設計風速別の最頻値

設計風速 U (m/s)	35	40	45	50	55	60
比率 R_M	1.74					
最頻値 U_M (m/s)	61.0	69.7	78.4	87.1	95.8	104.5
平均値 $\mu_{\ln U_E}$	4.110	4.243	4.362	4.467	4.562	4.649
標準偏差 $\sigma_{\ln U_E}$	0.044					

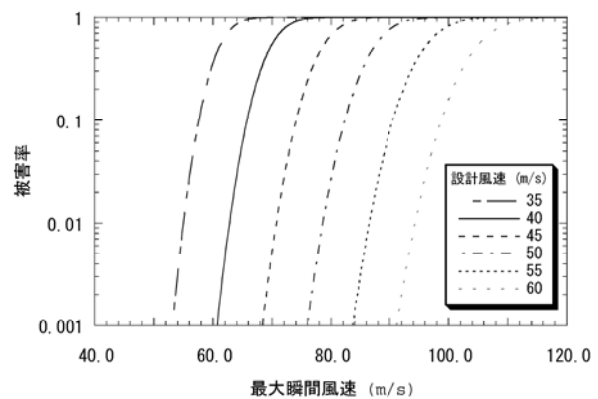


図-16 設計風速別の損傷度曲線

により同定した近似曲線である。

$$F_F(U_E) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln U_E}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_{\ln U_E}}{\sigma_{\ln U_E}} \right)^2 \right] \quad (16)$$

ここで、 $F_F(U_E)$ は対数正規累積分布、 $\mu_{\ln U_E}$ と $\sigma_{\ln U_E}$ はそれぞれ最大瞬間風速 U_E の対数の平均値と標準偏差を表す。同定された対数正規分布の平均値 $\mu_{\ln U_E}$ は4.243、標準偏差 $\sigma_{\ln U_E}$ は0.044である。それに対応する最大瞬間風速 U_E の最頻値と標準偏差は式(17)、式(18)より求められ、それぞれ69.7m/s、3.07m/sであり、変動係数は約4%である。

$$\mu_{U_E} = \exp \left(\mu_{\ln U_E} + \frac{1}{2} \sigma_{\ln U_E}^2 \right) \quad (17)$$

$$\sigma_{U_E}^2 = \mu_{U_E}^2 \left(e^{\sigma_{\ln U_E}^2} - 1 \right) \quad (18)$$

表-4 宮古島における各台風パラメータに関する統計モデルおよびモデル係数

台風パラメータ	確率密度関数		モデル係数
中心気圧低下量 ΔP	混合確率分布	$F_M(x) = a \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\ln x}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu_{\ln x}}{\sigma_{\ln x}}\right)^2\right] + (1-a) \times \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right]$	$\mu = 1.7537$ $\sigma = 0.1498$ $k = 3.3334$ $c = 66.9012$ $a = 0.907$
最大旋衡風速半径 R_m			$\mu = 1.8649$ $\sigma = 0.2052$ $k = 2.1155$ $c = 92.4527$ $a = 0.981$
進行速度 C			$\mu = 1.2554$ $\sigma = 0.1930$ $k = 2.7487$ $c = 22.0978$ $a = 0.0$
進行方向 θ	正規分布	$F_S(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$	$\mu = 199.7945$ $\sigma = 50.9627$
最接近距離 $d_{\min}$	二次関数	$d_{\min}(x) = zx^2 - (z-2r)x - r$	$z = -340.795$ $r = 500$
台風の年発生数 λ	ポアソン分布	$\lambda(x) = \frac{\lambda_m^x \exp(-\lambda_m)}{x!}$	$\lambda_m = 4.925$

配電設備のリスクマネジメントを行うためには、設計風速別の損傷度曲線が必要である。本研究では台風14号の被害率と最大瞬間風速から求めた電柱の損傷度曲線を現在採用されている設計風速40m/sのものとして代表させ、それを基に設計風速別の損傷度曲線を作成した。その際には対数正規分布における標準偏差（最大瞬間風速の変動係数）は電柱の設計風速によらず、一定と仮定した。また最大瞬間風速の最頻値 U_M と電柱の設計風速 U との比率 R_M は設計風速によらず一定とし、対数正規分布における平均 $\mu_{\ln U_E}$ は次式により求めた。

$$\mu_{\ln U_E} = \ln(U_M) \quad (19)$$

$$U_M = R_M \times U \quad (20)$$

図-16と表-3には設計風速別電柱の損傷度曲線とそのパラメータを示す。最大瞬間風速の最頻値と設計風速との比は図-15から同定した最大瞬間風速の最頻値と現在採用されている電柱の設計風速40m/sとの比により求めた。

3. 台風シミュレーションによるハザード曲線の作成

配電設備のリスクマネジメントを行う際には、配電用電柱の損傷度曲線の他に、電柱毎の台風ハザード曲線が

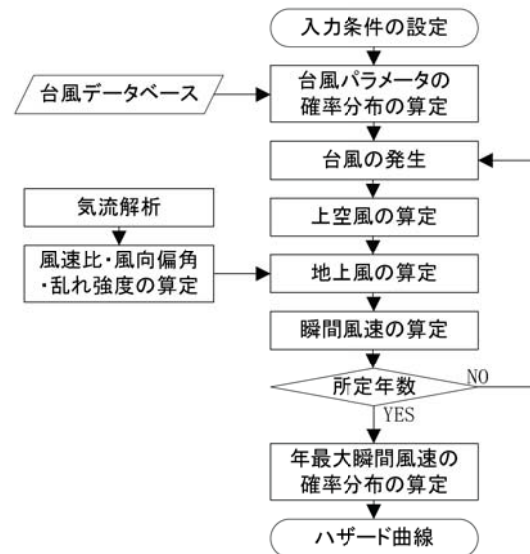


図-17 台風ハザード曲線作成のフロー図

必要となる。現在日本における風観測は最長70年間程度しかないため、超過確率の低い風速の算定は外挿となってしまう問題がある。この問題を解決するために、本研究では台風シミュレーションにより年最大瞬間風速の超過確率を評価する。

台風時における地表面付近の風速場は台風に伴う気圧場により支配され、対象地点周辺の局所地形や地表面粗度の影響も受ける。ただし、台風に伴う気圧場のスケールと局所地形や地表面粗度のスケールが大きく異なることに着目し、二つの効果を分離し評価した。具体的には、

表-5 台風パラメータ間の相関係数

	$\ln(\Delta P)$	$\ln(R_m)$	$\ln(C)$	θ	$d_{\min}$
$\ln(\Delta P)$	1.00	-0.383	-0.042	0.058	0.066
$\ln(R_m)$	-0.383	1.00	0.072	0.128	-0.024
$\ln(C)$	-0.042	0.072	1.00	-0.031	-0.219
θ	0.058	0.128	-0.031	1.00	-0.130
$d_{\min}$	0.066	-0.024	-0.219	-0.130	1.00

一様粗度の平坦地形上の風速場を解析的に求めることのできる石原ら¹⁶⁾の半理論モデルと対象地点周辺の局所地形や地表面粗度の影響を評価できる気流解析より求めた風速比・風向偏角を組み合わせることにより、台風時における地表面付近の風速場を推定し、宮古島における電柱毎の台風ハザード曲線を作成する。図-17には台風ハザード曲線作成の手順を示す。

(1) 台風シミュレーション

台風シミュレーションではまず過去の台風観測データにより、台風の年発生数 λ 、最接近距離 $d_{\min}$ 、進行方向 θ 、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m の6つのパラメータの確率分布を求める。次に、各パラメータの確率分布に従い、人工的に台風を発生させる。本研究では5000年間の台風を発生させた。そして、発生させた台風の気圧場から上空風を求め、地表面粗度や地形の効果を考慮して地上風に変換し、さらに台風シミュレーションにより求めた風速を瞬間風速に変換し、年最大瞬間風速を求める。

本研究において台風パラメータの確率分布を近似する際に、気象庁によりデジタル化された1951年から2005年までの台風経路データ、1961年から2005年までの気圧の地上観測データおよび天気図からデジタル化された中心位置と等圧線情報により構築された台風データベース¹⁷⁾を用いた。

台風シミュレーションにより設計風速を評価する際には台風パラメータの確率分布を精度よく近似することが重要である。台風パラメータの統計的な性質は場所によって異なるため、単一の確率分布ですべての地点の台風パラメータを近似することは困難である。そこで、本研究では、進行速度 C 、中心気圧低下量 ΔP 、最大旋衡風速半径 R_m の3つのパラメータについて石原ら¹⁷⁾の開発した混合確率分布関数MPDF(Mixed Probability Distribution Function)を用いた。また、台風の年発生数 λ についてはポアソン分布、最接近距離 $d_{\min}$ は二次関数、進行方向 θ は正規分布により近似した。宮古島における台風パラメータの近似に用いた確率分布関数と変数の一覧を表-4に示す。ここで、 μ は対象とするパラメータの平均値、 σ は対象とするパラメータの標準偏差、 k は形状係数、 c は尺度係数、 a は混合係数、 z は二次関数の係数、

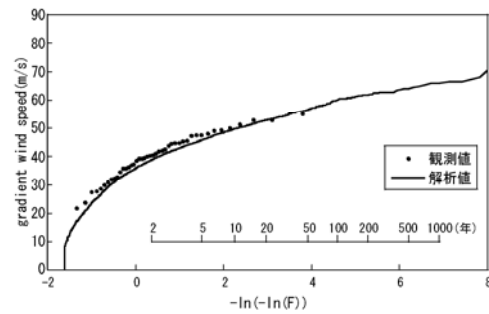


図-18 上空における年最大風速の確率分布

λ_m は平均年発生回数、 $x \in (0,1)$ である。また r は半径 500km を表す。

表-5には宮古島地方気象台を中心とし、半径500km以内に通過した台風のパラメータ間の相関係数を示す。パラメータによって高い相関関係が見られる。例えば、中心気圧低下量 ΔP と最大旋衡風速半径 R_m との間に負の相関が見られるが、最大旋衡風速半径が大きい程中心気圧低下量が小さい。また、進行速度 C と最接近距離 $d_{\min}$ との間にも負の相関が見られるが、西進する台風が大陸の高気圧によって進路を北に変える場所が、宮古島の東側(最接近距離の符号はプラス)に比べて西側(最接近距離の符号はマイナス)を通過した場合に進行速度を増すことに対応している。本研究では、モンテカルロシミュレーションにより台風を作り出す際に、台風パラメータの確率分布を正しく再現するだけでなく、パラメータの間の相関関係も忠実に再現できる石原ら¹⁷⁾の開発した修正直交変換法MOD (Modified Orthogonal Decomposition)を用いた。

(2) 台風時の地上風の算定

強風時の大気境界層が中立であると仮定すれば、台風に伴う強風場を、ナビエストークス(N-S)方程式で記述することができ、この方程式を数値的に直接解くことにより、台風時の強風場が求められる。しかし、N-S方程式を数値的に直接解くことは、膨大な計算時間を要する。そこで、本研究では、石原ら¹⁶⁾の提案した台風モデルを用いた。この台風モデルでは、台風場を巨視的に取り扱うこととし、上空風の風速は台風の移動効果を考慮し、気圧の勾配、コリオリ力および遠心力のバランスから求め、式(21)、式(22)により示される。

$$v_{rg} = 0 \quad (21)$$

$$v_{\theta g} = \frac{C \sin \theta - fr}{2} + \sqrt{\left(\frac{C \sin \theta - fr}{2}\right)^2 + \frac{r}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r}} \quad (22)$$

ここで、 v_{rg} と $v_{\theta g}$ はそれぞれ半径方向と接線方向の速度成分を示し、 C は台風移動速度、 θ は台風中心とサ

イト位置のなす角度, f はコリオリパラメータ, ρ は空気密度である. 図-18には宮古島地方気象台における上空風の年最大風速の確率分布を示す. 図中の実線は表-4に示す台風パラメータに関する統計モデルにより発生した台風の気圧場から求めた年最大風速, 黒丸は観測された気圧分布から求めた年最大風速を示し, 両者はよく一致し, 本台風シミュレーションから得られた気圧場は実際に観測された気圧場を精度良く再現していることが分かる.

台風時の上空風を地形, 地表面粗度, 市街地内の建物の影響を考慮した電柱の高さでの風速へ変換するために, まず石原¹⁰⁾により提案された台風時の大気境界層モデルを用い一様粗度の平坦地形上10.8m(電柱の高さ)での風速・風向を求めた. このモデルでは, 台風時の大気境界層内の風速分布 $U(z)$ と風向分布 $\gamma(z)$ は次式のように表される.

$$U(z) = U_g \left(\frac{z}{z_g} \right)^{\alpha_u} \quad (23)$$

$$\gamma(z) = \gamma_s \left(1.0 - 0.4 \frac{z}{z_g} \right)^{1.1} \quad (24)$$

ここで, $U_g (= \sqrt{v_{\theta g}^2 + v_{rg}^2})$ は傾度風, z_g は傾度風高さ, z は地表面からの高さ, α_u は鉛直プロファイルを表すべき指数, γ_s は風向の偏角である. またこれらのパラメータは傾度風 U_g , 地表面粗度長 z_0 , 絶対渦度 f_λ , 渦度の非一様性を表すパラメータ ξ を用いて以下のように表すことができる.

$$\alpha_u = 0.27 + 0.09 \log(z_0) + 0.018 \log^2(z_0) + 0.0016 \log^3(z_0) \quad (25)$$

$$z_g = 0.052 \frac{U_g}{f_\lambda} (\log Ro_\lambda)^{-1.45} \quad (26)$$

$$\gamma_s = (69 + 100\xi) (\log Ro_\lambda)^{-1.13} \quad (27)$$

$$f_\lambda = \left(\frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \left(2 \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \quad (28)$$

$$\xi = \left(2 \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} / \left(\frac{\partial v_{\theta g}}{\partial r} + \frac{v_{\theta g}}{r} + f \right)^{1/2} \quad (29)$$

ここで, $Ro_\lambda (= U_g / f_\lambda z_0)$ は修正地表ロスビー数と呼ばれる無次元数である.

この台風モデルの特徴は, 従来風工学の分野で用いられてきたべき法則モデルの扱い易さという長所を兼ね備えつつ, 風速の鉛直分布のべき指数, 傾度風高さ, 風向

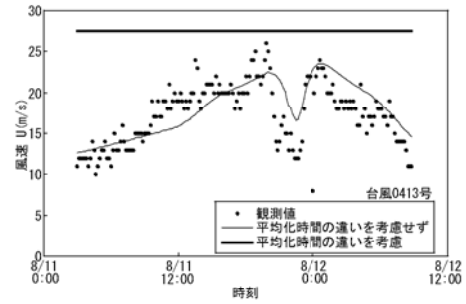


図-19 台風 14 号における平均風速の時間変化

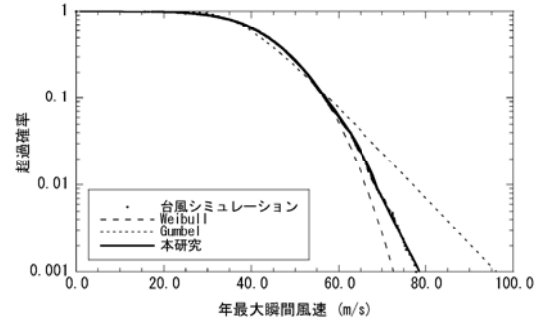


図-20 年最大瞬間風速の超過確率分布

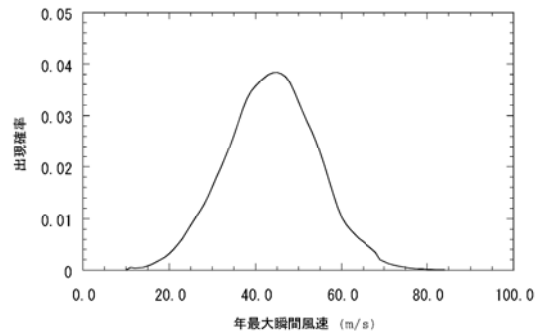


図-21 年最大瞬間風速の確率密度分布

の偏角と地表面粗度長との関係が半理論的に与えられた点である. このように, 対象地点における地表面粗度長を定めると, 一様粗度をもつ平坦地形上の台風時の風向・風速が式(23)と式(24)により求められる. またこのモデルにより算出した台風時の地上風の最大風速は傾度風が最大となる位置より内側で生じていることが分かる. さらに台風時の地上風は台風中心に向かって吹き込む性質も表現されている. 本研究では電柱に位置する周辺地形, 建物, 地表面粗度の違いを考慮するため, 気流解析により求めた宮古島全域の風速比と風向偏角を用いて, 一様粗度をもつ平坦地形上の台風時の風向・風速から電柱位置における風速・風向を式算出した.

台風シミュレーションで用いられている気圧場のモデルは台風に伴う数100kmの渦運動のみを表しており, 実際の台風内に含まれる積乱雲に代表される小さな渦運動を再現していない. このため, 台風シミュレーションより得られた風速の平均化時間は観測値の10分平均風速と

異なる。Vickery and Twisdale¹⁸⁾によると、台風シミュレーションの計算結果の平均化時間はおよそ1時間である。この問題を解決するために、本研究では松井¹⁹⁾の提案した平均化時間の違いを補正する手法を用い、10分平均風速の最大値を求めた。図-19には台風14号時に観測された10分平均風速、平均化時間の違いを考慮していない10分平均風速の予測値および平均化時間の違いを考慮した10分平均風速の最大値を示す。平均化時間の違いを考慮することにより、観測期間中の10分平均風速の最大値を精度良く再現できることが分かる。

(3) 台風ハザード曲線の作成

第2章に述べた瞬間風速を求める方法を用い、平均化時間の違いを考慮した10分平均風速から電柱位置における年最大瞬間風速を算出した。シミュレートした5000年間の年最大瞬間風速を大きい順に並べ、年最大瞬間風速の超過確率分布、すなわち台風ハザード曲線を求め、図-20に示す。図中には、Gumbel分布とWeibull分布により近似した年最大瞬間風速の超過確率分布も併記した。Gumbel分布とWeibull分布はそれぞれ台風シミュレーションの値を過大または過小に評価していることが分かる。本研究では最小二乗法により台風時の超過確率分布を以下に示す回帰式で近似した。

$$F_V(U_E) = \begin{cases} f(a_i U_E + b_i) & (U_E < U_{E,100}) \\ \exp(AU_E + B) & (U_E \geq U_{E,100}) \end{cases} \quad (30)$$

ここで、 F_V は超過確率分布関数、 U_E は年最大瞬間風速、 $U_{E,100}$ は年最大瞬間風速 U_E のうち高風速側から数えて総データ数 N (5000)の1%にあたる年最大瞬間風速であり、再現期間100年の年最大瞬間風速にあたる。 $U_{E,100}$ より低い年最大瞬間風速はノンパラメトリック回帰²⁰⁾、また $U_{E,100}$ より高い年最大瞬間風速は指数関数で近似した。係数 a_i 及び b_i は、1m/sごとに設定した風速ビンにおける中央値 $\hat{U}_{E,i}$ から $\pm 5\text{m/s}$ の範囲のデータに基づき重み付き最小二乗法により決定した。なお、重み付けにはtricube型²¹⁾の重み関数を用いた。一方、 $U_{E,100}$ より高風速の範囲では、データ数が少ないため、全データ数 N の上位1%の風速値を用いて指数係数にある係数 A 及び B を最小二乗法により推定した。図-20から本提案手法により台風シミュレーションから得られた年最大瞬間風速の超過確率分布を精度良く近似できることが分かる。

年最大瞬間風速の確率密度関数 f_V は年最大瞬間風速の超過確率分布関数から式(31)により求める。

$$f_V(U_E) = \frac{d}{dU_E} F_V(U_E) \quad (31)$$

図-21には図-20に示した台風ハザード曲線を基に求めた年最大瞬間風速の確率密度関数 f_V を示す。 $U_{E,100}$ より

低い年最大瞬間風速域では $f_V = a_i$ となり、また $U_{E,100}$ より高い風速域では $f_V = A \exp(AU_E + B)$ となる。

4. 配電設備のリスクマネジメント

本章では、電柱損傷度曲線と台風ハザード曲線を用いて配電用電柱のリスク評価を実施すると共に、期待総建設費最小化原則に基づき宮古島における全ての電柱の最適設計風速を求め、配電用電柱のリスクマネジメントを行う。

(1) 期待総建設費最小化原則と費用の算定

期待総建設費最小化原則^{22), 23)}に基づく配電用電柱のリスクマネジメントは、式(32)に示すような期待総建設費が最小となる最適設計風速を導くことである。

$$C_T = C_I + P_F C_F, \quad P_F = R \times T \quad (32)$$

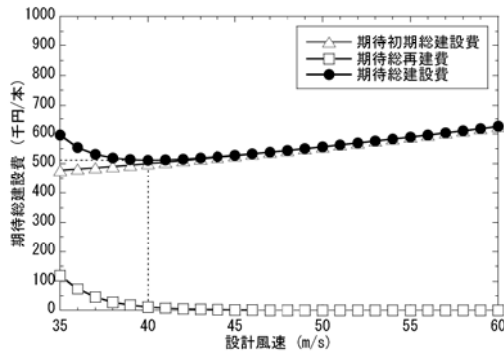
ここで、 C_T は期待総建設費、 C_I は期待初期建設費、 P_F は耐用期間中の破壊確率、 C_F は期待再建費、 R は年間台風リスクである。 T は耐用年数であり、本研究では42年と設定した。電柱の年間台風リスク R は電柱の損傷度曲線より求めた各風速階級の損傷発生確率(被害率)と台風ハザード曲線より求めた各風速階級の年最大瞬間風速の確率密度関数との積の累積値から次式により求めることができる。

$$R = \sum_{U_E=1}^{100} F_F(U_E) f_V(U_E) \quad (33)$$

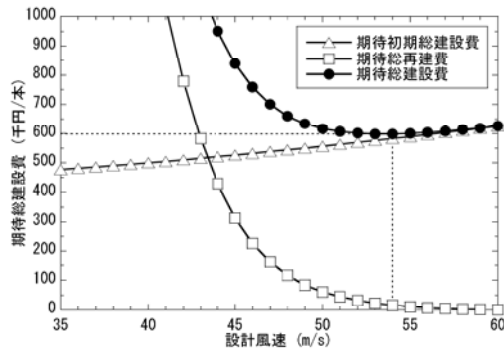
電柱の期待総建設費は、電柱の耐用年数が一定の場合に電柱の期待初期建設費と期待再建費の他、電柱設置地点での電柱の年間台風リスク R に依存することが分かる。電柱の期待初期建設費、期待再建費および年間台風リスクは電柱の設計風速の関数であることから、電柱毎の最適設計風速を決定するためには設計風速を変化させ、期待総費用の最小値を求める必要がある。

配電設備の期待初期建設費には電柱費用の他、配電線、柱上機器、電柱設置費も含まれる。現在一般に使用される設計風速40m/sの配電設備の初期建設費の電柱費用とその他の費用をそれぞれ10万円と40万円と仮定した。また期待再建費は初期建設費に被害電柱の撤去費用などが加算されるため初期建設費より高い。本研究では台風14号における送配電用設備の復興費用約7.7億円より求めた1本当たりの復興費用77万円から電柱費用10万円を差引いた67万円を電柱費用を含まない期待再建費と設定した。設計風速の異なる電柱の期待再建費はこの費用にそれぞれの設計風速の電柱費用を加えて求める。

設計風速別の期待初期建設費と期待再建費は電柱の設



(a) 地点A



(b) 地点B

図-22 設計風速別期待総建設費

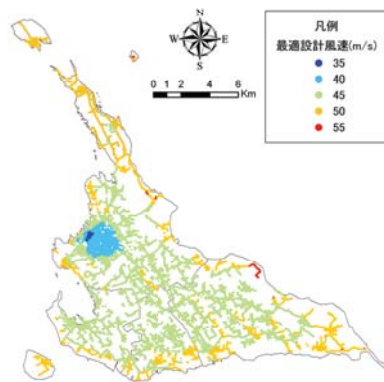


図-23 島内電柱毎の最適設計風速

計風速が高くなるにつれ、電柱費用が高くなるように設定した。電柱にかかる荷重が風速の2乗に比例することから、電柱費用は設計風速の2乗に比例して増大すると仮定し、またその他の費用は設計風速によらず一定とし、期待初期建設費 C_I と期待再建費 C_F を次式により算出する。

$$C_I(U_M) = C_{IP}(U_M) + C_{IC} = C_{IP40} \left(\frac{U_M^2}{U_{M40}^2} \right) + C_{IC} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} C_F(U_M) &= C_{IP}(U_M) - C_{IP40} + C_{F40} \\ &= C_{IP40} \left(\frac{U_M^2}{U_{M40}^2} - 1 \right) + C_{F40} \end{aligned} \quad (35)$$

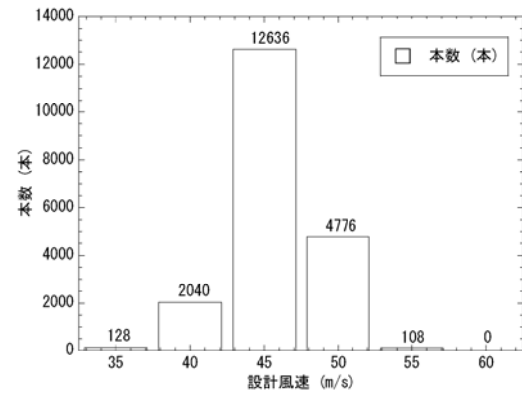


図-24 最適設計風速別の電柱設置本数

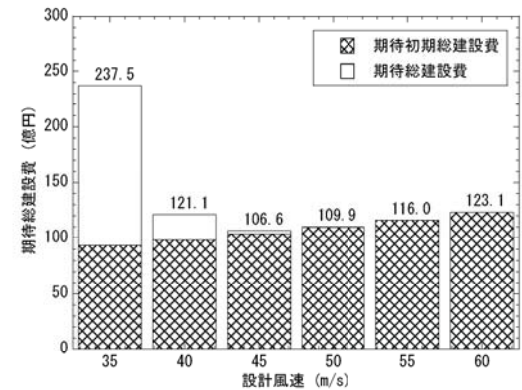


図-25 設計風速別の島内期待総建設費

ここで、 C_{IP} は電柱費用、 C_{IC} は電柱費用を除いた配電線、柱上機器、建設等の費用(40万円)、 C_{IP40} は設計風速40m/sの電柱費用(10万円)、 U_M はそれぞれの設計風速に対応する最頻値、 U_{M40} は設計風速40m/sに対応する最頻値、 C_{F40} は設計風速40m/sの電柱における期待再建費(77万円)である。

(2) 期待総建設費最小化原則に基づいた最適設計風速の評価

最適設計風速は設計風速を35m/sから60m/sまで1m/s刻みで変化させ、各設計風速における期待総建設費が最小となる風速を最適設計風速とした。

図-22には宮古島のある地点Aと地点Bに設置した電柱の設計風速別期待総建設費を示す。この図から、初期建設費は設計風速の増加につれ増大し、期待再建費は反対に減少することが分かる。地点Aでは設計風速40m/s、地点Bでは55m/sにおいて期待総建設費が最小となり、建設地点の違いにより期待総建設費に大きな差が生じることがわかる。

最適設計風速を求めた後、55～60m/sは設計風速60m/sの電柱を適用するというように5m/s刻みに正規化した場合の島内における全ての電柱の最適設計風速の分布を図-23に示し、平良市の市街地では最適設計風速が低く、

郊外や海岸部では高くなっていることが分かる。図-24には5m/s刻みの設置本数を示し、設計風速45m/sの電柱が全電柱の64%を占めていることがわかる。

図-25には電柱の設計風速を一律35m/sから60m/sまで5m/s刻みで変化させた場合の宮古島における全電柱の期待総建設費を示す。この図から一律に設計風速を設置した場合には、設計風速45m/sの電柱を採用した時に全電柱の期待総建設費が最小となることが分かる。また、島内における全ての電柱に最適設計風速を採用した場合の期待総建設費は104.8億円であり、設計風速45m/sを一律に設置した場合の期待総建設費106.6億円と大きな差はないが、現状の設計風速40m/sを用いた場合の期待総建設費用に比べ、コストを13%削減できることが分かる。

5. まとめ

本研究では台風14号による被害電柱位置の同定を行い、宮古島全体における1km毎の電柱被害率を算出すると共に、宮古地方気象台における台風14号時の風向・風速の観測値と気流解析により求められた島全体の風向別風速比から宮古島全体の風速分布を推定することにより宮古島における配電用電柱の損傷度曲線を求めた。本研究で提案した手法は、1度の台風被害データから配電用電柱の損傷度曲線を求めることができ、これにより迅速な被害対策の検討が可能になった。次に台風シミュレーションにより島内電柱毎の台風ハザード曲線を作成し、設計風速別の損傷度曲線とあわせて、期待総建設費最小化原則に基づき電柱毎の最適設計風速を求めた。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 台風14号により宮古島で倒壊した電柱の位置情報をデジタル化し、電柱被害率のマップを作成すると共に、宮古島の中央部と市街地で被害が少なく、郊外では連続倒壊を含む被害が顕著であることを明らかにした。また本研究で提案した気流解析から島全域における最大瞬間風速の推定手法により、1度の台風被害データと一地点における風観測記録から電柱の被害率と最大瞬間風速の関係を表す損傷度曲線を求めることを可能とした。
- 2) 台風シミュレーションと気流解析を組み合わせることにより、電柱周辺の地形、地表面粗度、建物の影響を考慮した宮古島全域の地上風を予測し、個々の電柱の台風ハザード曲線を作成することに成功した。
- 3) 設計風速40m/sの電柱の損傷度曲線から、設計風速を変化させた場合の損傷度曲線を作成し、台風ハザード曲線と組み合わせることにより、個々の電柱の最適設計風速を明らかにした。

付表-1 土地利用区分データ⁷⁾と対応地表面粗度

土地利用区分	地表面粗度長(m)	土地利用区分	地表面粗度長(m)
1.田	0.03	A.その他用地	0.03
2.その他農用地	0.03	B.河川・湖沼	0.0002
5.森林	0.1	E.海浜	0.01
6.荒地	0.03	F.海水域	0.0002
7.建物	0.03	G.ゴルフ場	0.03
9.幹線交通用地	0.03		

4) 島全域の電柱に最適設計風速を用いる場合の期待総建設費は、設計風速一律45m/sの電柱を用いる場合の期待総建設費との差が小さいが、現状の設計風速を用いる場合の期待総建設費用に比べ、コストを13%削減できることを明らかにした。

謝辞： 本研究の実施にあたり、東京大学大学院工学系研究科修士2年（研究当時）南邦毅氏、クー・カイ・シアン氏にご協力を頂いた。ここに記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 前田潤滋：台風9119号による九州地区における強風分布と送電用鉄塔および配電柱の被害状況、日本風工学会誌、第50号、pp.27-30、1992。
- 2) 前田潤滋：台風9117号と9119号による九州地区における強風分布特性と建築物および送電用施設の配電柱の被害分布、日本風工学会誌、第53号、pp.15-26、1992。
- 3) 神田順、高田毅士、崔恒、岩崎良二、諏訪仁、近藤宏二、中村豊、坂本成弘、谷口元、神田誠一、越智沙香：建築物の標準的構造的評価法の開発、平成13年度国土交通省建設技術開発費補助金研究成果報告書、2001。
- 4) 近藤宏二、神田順、崔恒：建築物の危険度の評価法に関する研究、第17回風工学シンポジウム、pp191-196、2002。
- 5) 林泰一：1991年台風19号の強風による強風被害の研究、平成3年度文部省科学研究費(総合研究(A)03306022)突風災害研究成果報告書(自然災害総合研究班：代表研究者 光田)、8.台風9119号による住宅の災害について、1992。
- 6) 林泰一、光田寧：台風9119号による被害について、第12回風工学シンポジウム、1992。
- 7) 石原孟、山口敦、高原景滋、銘苅莊宏、新城文博：風洞実験と気流解析に基づく台風0314号の最大風速の推定、構造工学論文集、Vol.51A、pp.911-920、2005。
- 8) 石原孟：非線形風況予測モデルMASCOTの開発とその実用化、日本流体力学会誌、第22巻、第2号、pp.387-396、2003。

- 9) 石原孟, 山口敦, 藤野陽三: 複雑地形における局所風況の数値予測と大型風洞実験による検証, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.195-221, 2003.
- 10) 石原孟, 日比一喜: 急峻な山を越える乱流場の数値予測, 日本風工学会論文集, No.83, pp.175-188, 2000.
- 11) 榎木康太, 石原孟: 一般化キャノピーモデルの提案と都市域における風況予測への応用, 土木学会論文集, (投稿中).
- 12) 北海道地図株式会社: GISMAP(ジスマップ) Terrain Ver.2.00 標準仕様書, 2006.
- 13) 国土交通省: 国土数値情報, <http://www.mlit.go.jp>.
- 14) 株式会社ゼンリン: 住宅地図データベース製品説明書, 2006.
- 15) Ishizaki, H.: Wind profiles, turbulence intensities and gust factors for design in typhoon prone regions, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.13, pp.55-66, 1983.
- 16) 石原孟, 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, 第66号, pp.3-14, 1996.
- 17) 石原孟, ホタイホーム, チョンチーリョン, 藤野陽三: 台風シミュレーションのための混合確率分布関数と修正直交変換法の提案, 第18回風工学シンポジウム論文集, pp.5-10, 2004.
- 18) Vickery, P. J. and Twisdale, L. A.: Wind-field and filling models for hurricane wind speed prediction, *J. Struct. Eng.*, Vol. 121, No. 11, pp.1700-1709, 1995.
- 19) 松井正宏: 構造物の耐風設計における台風モデルを用いた風速の評価とその応用に関する研究, 京都大学, 博士論文, 1999.
- 20) Nielsen, T. S.: Online Prediction and Control in Nonlinear Stochastic Systems, Department of Mathematical Modeling Technical University of Denmark Ph.D. Thesis No. 84, July 2002.
- 21) William, S. C.: Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.74, No.368, 1979.
- 22) 星谷勝, 中村孝明: 構造物の地震リスクマネジメント, 山海堂, 2002.
- 23) 長尚: 改定新版 基礎知識としての構造信頼性設計, 山海堂, 1995.

(2010. 6. 16 受付)

RISK MANAGEMENT FOR POWER DISTRIBUTIONS BASED ON LOCAL WIND PREDICTION AND TYPHOON SIMULATION

Takeshi ISHIHARA, Kota ENOKI, Keiji TAKAHARA and Hiroshi ARAKAWA

A framework for the risk management of power distributions was developed, which consists of the fragility curve of the electric pole, the typhoon hazard curve and the minimization method of expected total cost. The fragility curve of the electric pole was constructed by the damage data caused by Typhoon 0314 and the local gust wind speed in Miyakojima evaluated by a CFD model. The typhoon hazard curve at the individual location of electric pole was constructed based on the annual maximum gust wind speeds obtained from the typhoon simulation and the local wind prediction. The optimum design wind speed for each pole was decided by using the minimization method of expected total cost. The expected total cost in the design life of the poles by the proposed mitigation measure was reduced by 13% comparing that by the current design.