

# 竜巻被害長さ方向の風速変化を考慮した竜巻ハザード評価法

Tornado hazard model with the variation effects of tornado intensity along the path length

電力中央研究所	平口 博丸	Hiromaru HIRAKUCHI	Corporate Member
電力中央研究所	野原 大輔	Daisuke NOHARA	Corporate Member
電力中央研究所	杉本 聡一郎	Soichiro SUGIMOTO	Corporate Member
電力中央研究所	江口 譲	Yuzuru EGUCHI	Corporate Member
電力中央研究所	服部 康男	Yasuo HATTORI	Corporate Member

**Abstract:** Most of Japanese tornados have been reported near the coast line, where all of Japanese nuclear power plants are located. It is necessary for Japanese electric power companies to assess tornado risks on the plants according to a new regulation in 2013. The new regulatory guide exemplifies a tornado hazard model, which cannot consider the variation of tornado intensity along the path length and consequently produces conservative risk estimates. The guide also recommends the long narrow strip area along the coast line with the width of 5-10km as a region of interest, although the model tends to estimate inadequate wind speeds due to the limit of application. The purpose of this study is to propose a new tornado hazard model which can be apply to the long narrow strip area. The new model can also consider the variation of tornado intensity along the path length and across the path width.

**Keywords:** Tornado, Hazard model, Path length, Tornado intensity, Nuclear power plant

## 1. はじめに

2013年に原子力規制委員会により施行された原子力発電所の新規規制基準において、考慮すべき自然外部事象として竜巻が明示された。「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」[1] (以下、ガイドと呼ぶ)によれば、基準竜巻の最大風速 ( $V_B$ ) は、日本 (あるいは竜巻検討地域) で過去に発生した竜巻の最大風速 ( $V_{BI}$ ) と、竜巻検討地域のハザード曲線 (年超過確率は  $10^{-5}$  を上回らない) による最大風速 ( $V_{B2}$ ) のうちの大きな風速とすること、としている。

竜巻最大風速のハザードに関しては、1970年代の米国において精力的に研究され、その成果は米国原子力規制委員会 NRC の評価ガイド [2] に反映された。最近では、Enhanced Fujita Scale (EF Scale) [3]を用いた評価ガイド Revision 2 [4] が公表されている。一方、わが国の竜巻ハザードを評価した研究は少なく (文献[5])、ガイドでは文献[6]~[8]のハザードモデルが例示されているが、これらのモデルでは竜巻進行方向の風速変化が考慮されていない。

連絡先：平口博丸、〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646、(一財)電力中央研究所  
E-mail: [hiromaru@criepi.denken.or.jp](mailto:hiromaru@criepi.denken.or.jp)

また、ガイドでは、海岸線付近で竜巻発生数が非常に多いと言う、わが国の竜巻発生数の特性を考慮して、「原子力発電所が海岸線付近に立地する場合は、海岸線から陸側及び海側それぞれ5kmの範囲を目安に竜巻検討地域を設定する」こととしている。しかし、竜巻被害域長さ比べて、幅が極端に狭い竜巻検討地域に既往のハザードモデルを適用することには課題も残されている[9]。

本検討では、わが国の竜巻データの年代的な不均質性と、竜巻発生域の空間的不均一性を考慮したハザード評価法について提案するとともに、竜巻被害域長さ方向の風速変化を考慮する方法を提示する。

## 2. 竜巻データの分析と疑似データの作成

竜巻データとして気象庁の「竜巻等の突風データベース」[10] (以下、竜巻DB) を用いる。本研究では1961年から2012年6月までの51.5年間の竜巻データを用いた。ここでは突風関連指数に関する分析結果[11][12]を基に、茨城県から沖縄県にかけての太平洋沿岸を竜巻検討地域とする。

ガイド及び解説[13]に従い、海岸線から陸側5km以内で発生あるいは通過した竜巻の数を分析する。ただし、海側で発生し上陸しなかった竜巻 (水上竜巻) は、藤田ス

ケールや被害域長さ・幅が不明で不確実性が非常に大きい  
ため、解析対象外とする。発生数・通過数の分析結果  
を表1に示す。

当該地域では 241 件の竜巻が確認されているが、近年  
になるほど観測体制が強化されているため、2007 年以降  
の発生数割合が非常に多い（全数の 23%）。特に、F0 や F  
不明竜巻の数の増加が顕著である。そこで、F0 および F  
不明竜巻は、2007 年以降の年間発生頻度を用いる（表 1  
の網掛け参照）。見逃しが少ないと思われる F2, F3 竜巻  
については、1961 年以降の全期間を、F1 竜巻は観測体制  
が整備された 1991 年以降の発生頻度を用いる。

上記のような考え方の基に、51.5 年間の疑似データを  
作成した結果、この期間の竜巻発生数は 636 件（年平均  
12.3 件）と推定された。なお、F 不明竜巻は F0 に分類し  
た。また、被害域幅（長さ）が不明なデータについては、  
対応する被害域長さ（幅）と同じデータがある場合は、  
それらのデータに対応する被害域幅（長さ）の平均値と  
し、同じデータがない場合は、対応する被害域長さ（幅）  
よりも 1 ランク大きなデータに対応する被害域幅（長さ）  
を用いた。

**Table.1 occurrences of tornados (include entering/passing)**

発生・通過数	F0	F1	F2	F3	不明	計
1961 年以降	48	117	49	6	21	241
1991 年以降	48	78	21	1	16	164
2007 年以降	31	13	1	0	11	56
疑似データ	394	187	49	6	0	636

### 3. 竜巻リスクの計算法

#### 3.1 既往の方法

T 年以内にいずれかの竜巻に遭遇し、 $V_0$  以上の竜巻風  
速に見舞われる確率  $P_{i0,T}$  の算定法[6]~[8]が提案されて  
いる。これら既往の研究では、竜巻の年発生数の確率分  
布としてポアソン分布やポリヤ分布が提案されているが、  
竜巻のように単位面積当たりの出現確率が非常に小さな  
場合は（我が国では  $10^3$  以下）、発生数の分布形によらず、  
 $P_{i0,T}$  は次式でよく近似できる。

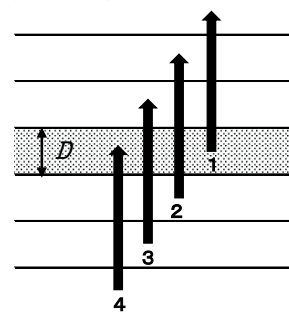
$$P_{i0,T} \approx \nu \times E[DA(V_0)] / A_0 \quad (1)$$

ここに、 $\nu$  は竜巻の年平均発生数、 $E[DA(V_0)]$  は竜巻によ  
る構造物の被害面積の期待値、 $A_0$  は竜巻検討地域の面積  
である。 $E[DA(V_0)]$  の推定には Garson et. al の方法[7]を用  
い、最大竜巻風速、被害域幅・長さの確率分布には多次

元対数正規分布を用いる[5]。

Garson et.al の方法は、竜巻の代表的な被害域長さに比  
べて十分広い領域で、かつ竜巻の発生特性が空間的に一  
様な場を想定している。リスク評価対象地域は、そのよ  
うな場の一部を切り出した地域であり、欧米では半径  
180km の範囲（約 10 万  $km^2$ ）や、2 度×2 度の範囲を一  
つの目安としている。一方、わが国の場合、海岸付近で  
の竜巻確認数が多いことから、ガイドでは、海岸から陸  
側及び海側に 5km の範囲をリスク評価対象地域に設定し、  
かつ 1km 範囲ごとの細分化した地域（以下、短冊領域と  
呼ぶ）でも竜巻リスクの算定を求めている。また、リス  
ク評価対象領域外から侵入あるいは通過した竜巻（以下、  
通過竜巻）も発生数としてカウントする[13]。

図 1 に示すように、海岸付近の領域を、海岸線に沿っ  
て幅  $D$  の短冊状に細分化し、各短冊内で被害域長さ  $3D$   
の竜巻が 1 つ発生するような均一な場を想定する。網掛  
けの短冊内での竜巻発生数は 1 件であるから、それによ  
る被害面積は被害域長さ  $3D$  に比例する。一方、通過竜巻  
を発生数とみなすと網掛け内での発生数は計 3 件となり、  
被害域の長さとして  $3D$  を使用すると、被害面積は  $9D$  に  
比例するため、過大なリスク評価結果となる。特に、短  
冊幅  $D$  に比べて竜巻被害域長さがかなり長い場合、ある  
いは短冊幅  $D$  が極端に狭い場合（例えば 1km 短冊）には、  
その傾向が顕著となる。



**Fig.1 Moving tornados in strip areas**

#### 3.2 セグメント長さに基づく被害面積の算定法

ガイドでも指摘されているように、わが国の竜巻確認  
数は沿岸域で非常に多い。特に、海上で発生しその後上  
陸した竜巻（上陸竜巻）は、陸上で発生した竜巻の倍以  
上に達するため、陸側の短冊領域で発生した竜巻のみを  
発生数としてカウントすることは、ハザードの過小評価  
につながる可能性がある。その意味では、上陸竜巻を適  
切に評価することが、合理的なハザード評価につながる。

通過数を発生数にカウントする場合、図 1 の考察から

分かるように、竜巻の被害域長さ（以下、全長と呼ぶ）ではなく、短冊を横切る被害域の長さ（以下、セグメント長と呼ぶ）を考えるのが適切である。そのための方法として、竜巻発生・消滅位置の緯度・経度から短冊内のセグメント長さを求め、それを全長の代わりに用いる方法が考えられる（以下、方法1と呼ぶ）。

その他の方法として、幾何学的にセグメント長さを規定する方法も考えられる（以下、方法2と呼ぶ）。例えば、図2に示すように、幅  $D$  の短冊が  $y \sim y+D$  の区間内にあるとする。原点  $0$  で発生し、 $y$  軸方向を中心とする  $180$  度の範囲内（例えば、海側から陸側）へ移動する全長  $L_0$  の竜巻が、この短冊を横切るセグメント長の期待値  $L_S$  は、次式で表される。

$$L_S(y, L_0; D) = \frac{2}{\pi} \left[ L_0(\alpha_2 - \alpha_1) - \frac{y+D}{2} \log \left| \frac{1 - \cos \alpha_2}{1 + \cos \alpha_2} \right| + \frac{y}{2} \log \left| \frac{1 - \cos \alpha_1}{1 + \cos \alpha_1} \right| \right] \quad (2)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \sin^{-1}(y/L_0) && ; 0 < y < L_0 \\ \alpha_1 &= 0 && ; y < 0 \\ \alpha_2 &= \sin^{-1}((y+D)/L_0) && ; -D < y < -D + L_0 \end{aligned} \quad (3)$$

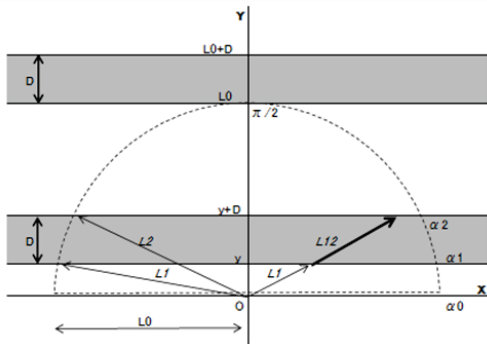


Fig.2 Segment length in a narrow strip area

図3は  $D=5km, L_0=2,5,15km$  とした時の一例である。 $y=-5 \sim 0km$  は、短冊内で竜巻が発生している区間であり、短冊端部 ( $y=0km$ ) で竜巻が発生するときに  $L_S$  は最大となる（以下、最大有効セグメント長）。短冊中央部 ( $y=-2.5km$ ) で竜巻が発生した時の  $L_S$ （中央発生有効セグメント長）は、短冊幅に比べて全長が短ければ、短冊内の広い範囲で一定値を取る（ $2km$  の細線参照）。なお、上式を  $-D \sim \max(-D+L_0, 0)$  の区間内で平均したものを、平均有効セグメント長と呼ぶことにする。平均有効セグメント長は、竜巻がランダムに発生する際に期待される長さである。

図4は、全長に対する、幅  $5km$  の短冊内での様々な有

効セグメント長を示す。短冊幅に比べて全長が長くなると、平均有効長は短冊幅に近づく。全長  $20km$  の竜巻に対する最大有効長は約  $10km$  と半分になる。

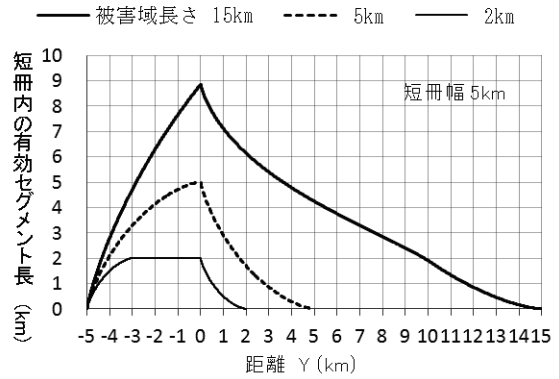


Fig.3 Effective segment length in a narrow strip area

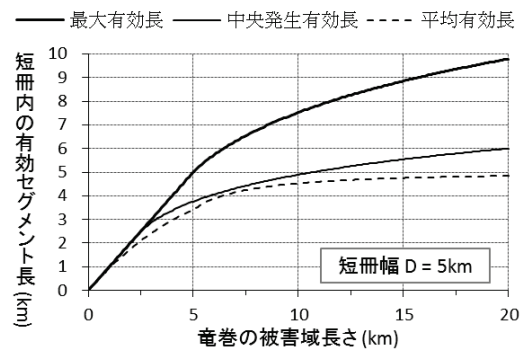


Fig.4 Damage length and effective max segment length

式(2)では、 $y$  軸方向へ移動する竜巻の方向関数は  $180$  度の範囲内で一様としたが、 $\sin^n \alpha$  型の方向関数について考え、主方向の入射角（海岸線直角方向との成す角）を  $\theta_0$  とする。図5は、 $5km$  幅の短冊領域に、全長  $10km$  の竜巻が入射角  $45$  度で侵入した際の最大有効セグメント長さを方向関数毎に比較した結果である。方向集中度の違いが有効セグメント長に与える影響は小さいこと、一様分布（Uniform）を仮定した結果は入射角  $45$  度の結果とほぼ同じであることが分かる。

図6は、方向集中度の高い  $\sin^8 \alpha$  を対象として、異なる竜巻入射角に対する最大有効セグメント長を比較した結果である。一様分布の結果は、竜巻入射角が  $45$  度の結果とほぼ同じかそれよりも大きい。即ち、式(2)の最大有効セグメント長を用いた評価は、入射角が  $\pm 45$  度以内の結果を保守的に評価可能である。入射角が  $45$  度以上ある場合には、最大有効セグメント長の結果は過小評価となる可能性があるため、注意が必要である。

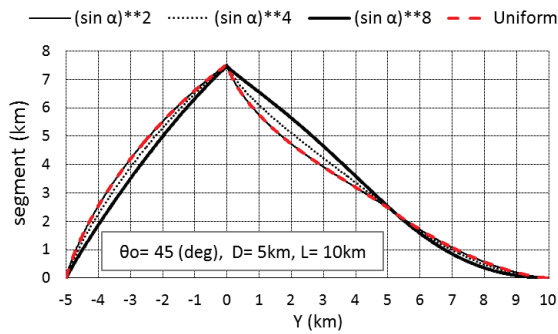


Fig.5 Effective segment length in a narrow strip area with different directional functions.

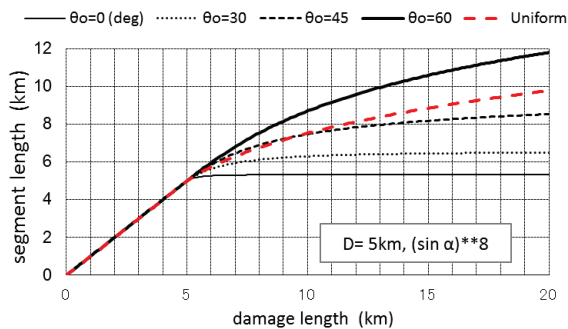


Fig.6 Damage length and max effective segment length with different incident angle  $\theta_0$  of the directional function,  $\sin^8 \alpha$ .

### 3.3 被害域幅・長さの補正法

竜巻の被害は、被害域全域に渡って様な風速被害となるわけではなく、竜巻進行方向に竜巻強度は変化する。また、竜巻中心から横断方向に離れるに従い風速は小さくなる。文献[8]では、風速  $V$  以上の被害を及ぼす幅  $W(V)$  を次式のように設定している。

$$W(V) = (V_{min}/V)^{1/k} w_d \quad (4)$$

ここに、 $V_{min}$  は被害を与える最小風速、 $w_d$  は最小風速に対応した被害域幅、 $k$  は定数であり、 $k=1$  のときは Rankine 渦に対応する。本研究では、文献[8]に習い  $k=1.6$  とする。また、 $V_{min}$  は、ビューフォート風力階級（屋根瓦が飛んだりして人家に被害が始まる大強風 20.8~24.4m/s）を参考にして 25m/s とした。これは、F0 の中央値に相当する。

文献[14]では、米国での観測値を基に、竜巻進行方向の竜巻強度変化を分析した。表 2(a)は、個々の竜巻に対して竜巻強度とその被害域長さを求め、全長に対する割合を平均した結果である（文献[14]の表 6b）。例えば F2 竜巻の場合、竜巻強度が F2 相当の被害域長さの割合は全長の 54.1%、F1 相当の被害域長さは 27.9% である。NUREG[2]

では文献[14]の表 6c が長さ補正として用いられているが、ここではより保守的な表 2(a)を用いることにする。

本研究で用いるハザードモデルでは、風速・長さ・幅の分布関数を数値積分するため、表 2(a)の関係を連続関数で表現する必要がある。ここでは、ある風速以上となる被害域長さの割合を近似式で表すために、表 2(a)の累積値、表 2(b)を用いる。図 7 の太線は、最小風速  $V_{min}$  から最大風速  $V_{max}=100\text{m/s}$  に至るまでの、被害域長さ方向の風速変化を模式化した一例である。 $R$  は風速  $V_0$  以上となる被害域長さの割合であり、次式で表される。

$$R = R_c + (1 - R_c) \frac{V_{max} - V_0}{V_{max} - V_{min}} \quad (5)$$

ここに、 $R_c$  は  $V_{max}$  が維持される長さ方向の割合を表す。様々な  $V_{max}$ ,  $V_0$  に対して表 2(b)を満足するような  $R_c$  として、次式を提案する。

$$R_c = \frac{\log 160 - \log V_{max}}{\log 160 - \log 17} \quad (6)$$

ここでは、竜巻強度  $F_i$  に対応する風速レンジの最小風速以上となる被害域長さの割合が、表 2(b)の値を極力下回らないように式(6)を設定した。

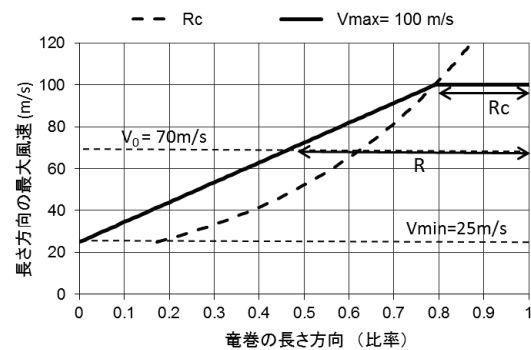


Fig.7 Schematic model of the tornado wind speed intensity variation along a path length.

Table 2 Variation of tornado intensity along the path length

(a) table 6b in ref. [14]

[14] Table 6b		Recorded Tornado F Scalse					
Percentage		F0	F1	F2	F3	F4	F5
Intensity F Scale	F0	1.000	0.383	0.180	0.077	0.130	0.118
	F1		0.617	0.279	0.245	0.131	0.125
	F2			0.541	0.310	0.248	0.162
	F3				0.368	0.234	0.236
	F4					0.257	0.187
	F5						0.172



(b) accumulated value of (a)

[14] Table 6b		Recorded Tornado F Scale					
Accumulate		F0	F1	F2	F3	F4	F5
Intensity F Scale	F0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	F1		0.617	0.820	0.923	0.870	0.882
	F2			0.541	0.678	0.739	0.757
	F3				0.368	0.491	0.595
	F4					0.257	0.359
	F5						0.172

(c) accumulated value of Eq.(5)(6)

Eq. (5) (6)		Recorded Tornado F Scale					
Accumulate		F0	F1	F2	F3	F4	F5
Intensity F Scale	F0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
	F1		0.793	0.869	0.900	0.918	0.930
	F2			0.590	0.687	0.744	0.782
	F3				0.437	0.540	0.608
	F4					0.305	0.408
	F5						0.199

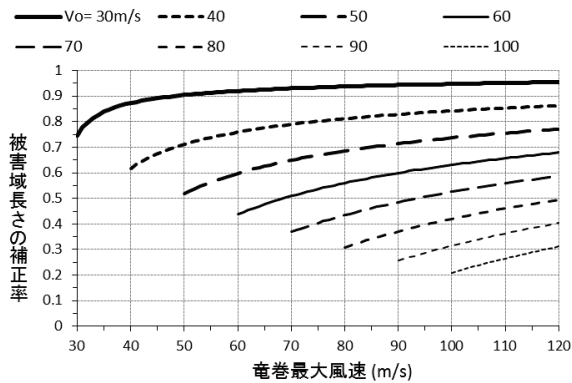


Fig.8 Path length modification rate

式(5)(6)による結果を表 2(c)に示す。図 8 は、 $V_0$ をパラメータとして、被害域長さの補正率  $R$  を竜巻最大風速  $V_{max}$  に対して示した結果である。 $V_{max}$  が大きくなるほど、強風による被害域長さは短くなる。全長あるいはセグメント長さに、式(5)(6)を考慮することにより、竜巻移動方向の風速変化を考慮した評価が可能となる。

#### 4. 竜巻リスクの計算結果

図 9 は、直径 300m の円形構造物を対象として、太平洋岸陸側 5km 短冊での竜巻ハザードを推定し、発生数等の

定義の違いによる結果を比較した。ここでは、式(4)の幅補正のみを考慮した。5km 短冊内で発生した竜巻のみを考慮した場合のハザードは最も低い。発生数に通過数もカウントし、被害域長さを全長で評価すると、ハザードは最も高くなる。一方、方法 1 のセグメント長 (観測値) に基づく方法は、上記 2 つの結果の中間に位置している。

表 1 に示した竜巻データの場合、観測された F3 竜巻 (6 件) の被害域長さの平均値と標準偏差は約 14km と 15km であり、短冊幅の約 3 倍である。また、F3 竜巻の半分が検討地域外から侵入している。これらの影響のため、通過数も発生数にカウントし、しかも全長を用いた結果は過大評価となることが理解できる。

図 10 は、方法 2 の有効セグメント長を用いた結果である。観測されたセグメント長を用いた結果は、理論的に推定される最大有効セグメント長と平均有効セグメント長の中間に位置しており、適切なハザードとなっているものと推察される。ただしここでは、観測されたセグメント長の確率分布は対数正規分布に従うものと仮定しているが、これについては検討の余地がある。

図 11 は、方法 1 と方法 2 (最大有効セグメント長) に対して、長さ補正を行った結果である。竜巻移動方向の竜巻強度変化を考慮することにより、ハザードは低下することが確認できる。

本検討では、文献[14]の表 6b の近似式として式(5)(6)を提案したが、これは藤田スケールで整理された米国での観測値を基にしている。わが国への適用性については、日本版改良藤田スケールへの修正も含め、今後の課題である。

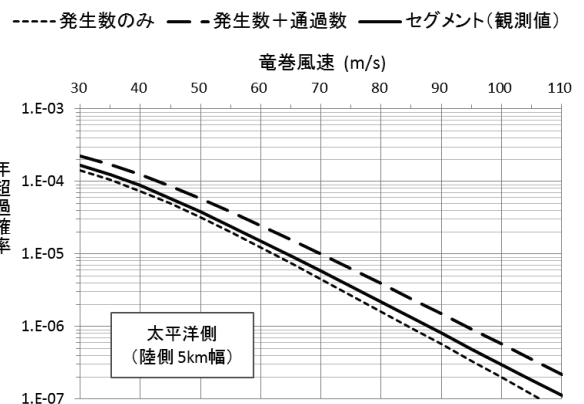


Fig.9 Tornado wind speed hazard curves with different tornado occurrence definitions.

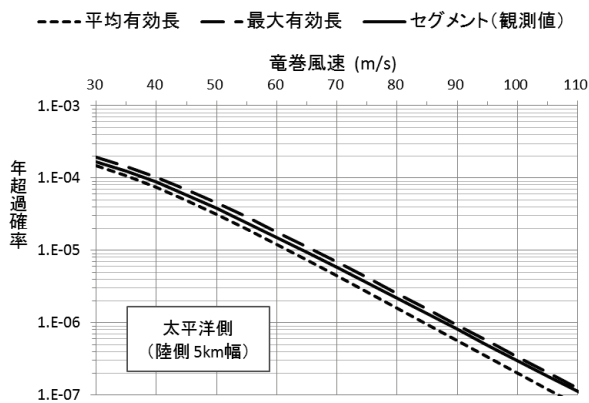


Fig.10 Tornado wind speed hazard curves with different effective segment definitions.

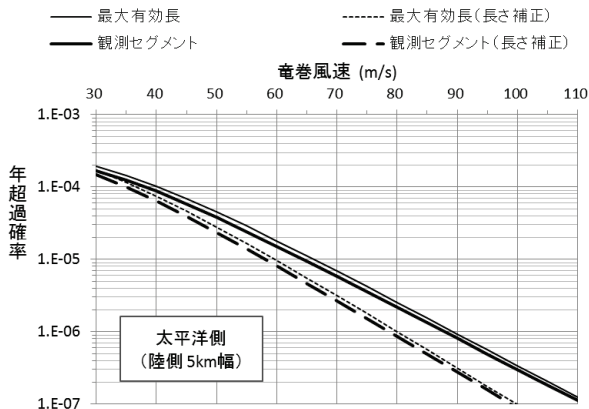


Fig. 11 Tornado wind speed hazard curves with and without path length modification.

## 5. まとめ

本研究では、太平洋岸陸側 5km 幅を対象として、竜巻データの年代的な不均質性を解消するために、F スケール毎にサンプリングを行い、期間内で均質な疑似データを作成した。また、竜巻発生域の空間的不均一性を考慮したハザード評価法として、セグメント長さに基づく 2 種類の評価法を提案した。これらの評価法は、上陸竜巻の数が非常に多いと言う、わが国の竜巻発生特性を適切にかつ合理的に評価できる。提案した方法 2 で最大有効セグメント長を用いた場合、竜巻入射角が 45 度以内であれば、ハザードを適切に評価できる。

竜巻移動方向に竜巻強度が変化する効果（長さ補正）を考慮するために、竜巻の発生から消滅に至る風速変化をモデル化し、長さ補正量の近似式を提案した。これにより、幅補正に加え、長さ補正も考慮することが可能となり、合理的なハザード評価が可能となった。

## 参考文献

- [1] 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻影響評価ガイドの制定について, 原規技発第 13061911 号, 2013.
- [2] Ramsdell, J.V., and G.L. Andrews : Tornado Climatology of the Contiguous United States, NUREG/CR-4461, 1986.
- [3] Texas Tech University (TTU) : A Recommendation for an Enhanced Fujita Scale (EF-Scale), Submitted to The National Weather Service and Other Interested Users, Wind Science and Engineering Center, TTU, 111pp., 2006.
- [4] Ramsdell, J.V. and J.P. Rishel : Tornado Climatology of the Contiguous United States, NUREG/CR-4461, Rev.2, 2007.
- [5] 東京工芸大: 竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 平成 21-22 年度原子力安全基盤調査研究 (平成 22 年度), 独立行政法人原子力安全基盤機構委託研究, 424 pp., 2011.
- [6] Wen, Y.K. and Chu, S.L. : Tornado risks and design wind speed, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.99, No.ST12, 2409-2421, 1973.
- [7] Garson, R.C., Morla-Catalan J. and Cornell C.A. : Tornado Design Winds Based on Risk, Journal of Structural Division, ASCE, Vol. 101, No.ST9, 1883-1897, 1975.
- [8] Garson, R.C., Morla-Catalan, J. and Cornell C.A. : Tornado Risk Evaluation Using Wind Speed Profiles, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.101, No. ST5, 1167-171, 1975.
- [9] 平口博丸, 野原大輔, 杉本聡一郎, 江口譲: 原子力発電所の竜巻ハザードの評価法について, 日本風工学会誌, 第 40 巻第 2 号, pp.133-134, 2015.
- [10] 気象庁: 竜巻等の突風データベース (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/index.html>)
- [11] 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸: 国内既往最大規模の竜巻を対象とした発生頻度の地域特性について, 日本保全学会保全学会第 11 回学術講演会, pp.395-402., 2014.
- [12] 杉本聡一郎, 野原大輔, 平口博丸: 突風関連指数を用いた大きな竜巻の発生環境場の地域性に関する検討. 2014 年度日本気象学会春季大会講演予稿集, B464, 2014.
- [13] (独) 原子力安全基盤機構: 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド(案) 及び解説, JNES-RE-2013-9009, 76pp., 2013.
- [14] Reinhold, T.A. and B. Ellingwood : Tornado Damage Risk Assessment, NUREG/CR-2944, 1982.