

竜巻通過時の送電鉄塔の耐風性能に関する研究

石崎 翔

1. 序

送電鉄塔に関する設計指針「送電用支持物設計標準 JEC-127-1979」¹⁾での耐風設計は台風などの風況を想定したもので、竜巻による突風は考慮していない。これは送電鉄塔が竜巻に遭遇する確率が非常に小さいと考えられているからである。しかしながら、2012年に茨城県つくば市で発生した竜巻に代表されるように、近年フジタスケールで²⁾2~3程度の突風風速による被害が注目されていることから、電力供給を担う重要なインフラである送電鉄塔に作用する想定外の外力として、竜巻による激しい突風が作用した場合の応答性状を把握しておくことは重要である。

竜巻通過時の風力に対する送電鉄塔の応答評価³⁾には、速度圧を想定したモデルが使われるが、竜巻モデルによって風速と風向の時刻歴変化は異なる。したがって、いくつかの竜巻モデルを用いた場合の送電鉄塔の応答特性を試算しておくことは、竜巻モデルを選定する際に重要となる。本報告では、日本の原子力発電所の竜巻評価⁴⁾にも用いられている Rankine 渦モデル⁴⁾と Fujita モデル^{5,6)}に加え、Burgers モデル⁷⁾の3つの竜巻モデルを用いて、竜巻移動中心位置と鉄塔塔体中心位置との最短距離をパラメータとした場合の送電鉄塔の応答結果の比較を行い、それぞれ

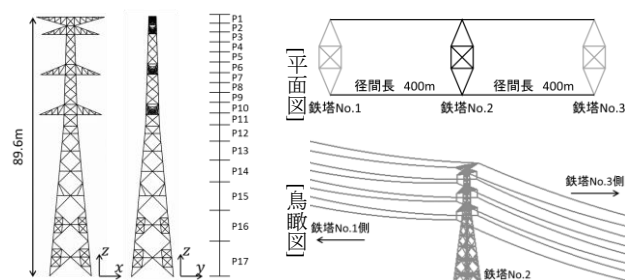


図1 対象鉄塔（鉄塔 No. 2） 図2 連成系モデルの概略図

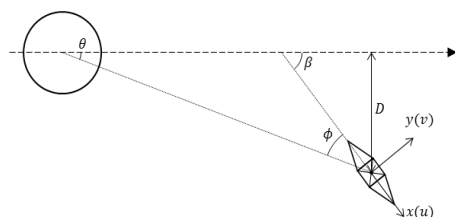


図3 竜巻と送電鉄塔の位置関係

のモデルを用いた場合の応答特性を報告する。

2. 対象鉄塔の概要および風力のモデル化

2.1 鉄塔モデルの概要

図1に解析対象鉄塔とした500kVの標準的な懸垂型鋼管鉄塔の概略図を、図2に本解析で用いた1基2径間の鉄塔-架渉線連成系モデルの概略図を示す。鉄塔は梁要素、架渉線と碍子はトラス要素とし、架渉線は30分割、碍子は4分割でモデル化した。なお、図中のP1~P17は鉄塔のパネル番号を示す。

2.2 竜巻通過時の作用風力の算定

本報告では JEC-127-1979¹⁾を参考に、竜巻通過時の鉄塔部材の風力算定式を次式のように定義する。

$$\begin{aligned} F_x &= 0.5\rho C n_x A U^2 \\ F_y &= 0.5\rho C n_y A U^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 ρ ：空気密度、 C ：風力係数、 A ：各パネルの y 軸方向の受風面積、 n_x と n_y ：JEC-127-1979において風向によって変化する鉄塔の x 軸方向と y 軸方向の応力分担率、 U ：後述する x 軸方向の風速成分 u と y 軸方向の風速成分 v との風速ベクトルの絶対値である。碍子と架渉線も JEC-127-1979を参考に風力を算定した。

3. 竜巻通過時の風速場

3.1 Rankine 渦モデル

Rankine 渦モデルは風速と風向が竜巻中心からの平面方向のみによって変化し、高さ方向によって変化しない2次元流れ場である。竜巻の接線方向風速 V_θ は以下の式(2)で表せる。

$$V_\theta = \begin{cases} V_{R_m} \cdot r' & (r' < 1) \\ V_{R_m} \cdot \frac{1}{r'} & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 V_{R_m} ：最大接線風速、 $r' = r/R_m$ 、 r ：竜巻中心からの半径、 R_m ：最大接線風速半径である。

3.2 Fujita モデル

Fujita モデルは風速に高さ依存性があることや、半径方向風速成分を考慮していることから Rankine 渦モデルと比べるとやや複雑なモデルである。竜巻の接線方向風速

V_θ は以下の式(3)で表せる。

$$V_\theta = F_r(r')F_h(z')V_{R_m} \quad (3)$$

ただし、

$$F_r(r') = \begin{cases} r' & (r' < 1) \\ \frac{1}{r'} & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (4)$$

$$F_h(z') = \begin{cases} z'^{k_0} & (z' < 1) \\ \exp(-k(z' - 1)) & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $z' = z/H_i$ 、 z ：高さ、 $H_i = iR_m$ 、 $i = 0.55(1 - n^2)$ 、 $n = 0.9 - 0.7\exp(-0.005R_m)$ 、 $k_0 = 1/6$ 、 $k = 0.03$ である。

また、竜巻の半径方向風速 V_r は以下の式(6)で表せる。

$$V_r = V_\theta \tan \alpha \quad (6)$$

ただし、

$$\tan \alpha = \begin{cases} 0 & (r' \leq n) \\ \frac{\tan \alpha_0}{1 - n^2} \left(1 - \frac{n^2}{r'^2}\right) & (n < r' < 1) \\ \tan \alpha_0 & (r' \geq 1) \end{cases} \quad (7)$$

$$\tan \alpha_0 = \begin{cases} -A_m(1 - z'^{1.5}) & (z' < 1) \\ B_m\{1 - \exp(-k(z' - 1))\} & (z' \geq 1) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $A_m = 0.75$ 、 $B_m = \frac{3}{(k_0+1)(k_0+2.5)}kA_m$ である。

3.3 Burgers モデル

Burgers モデルは Rankine 渦モデルと同じく、風速と風向が竜巻中心からの平面方向のみによって変化し、高さ方向によって変化しない 2 次元流れ場である。竜巻の接線

方向風速 V_θ は以下の式(9)で表せる。

$$V_\theta = 1.4(V_{R_m}/r')\{1 - \exp(-1.256r'^2)\} \quad (9)$$

3.4 鉄塔位置での竜巻の風速ベクトル

竜巻の風速は上記に示した各竜巻モデルの接線方向風速 V_θ と半径方向風速 V_r に加えて、竜巻の進路方向に竜巻の移動速度 V が加算されるものと設定した。図3のような場合に、式(2)、(3)、(6)、(9)より求めたそれぞれの竜巻モデルの接線方向と半径方向の各風速成分から、鉄塔の x 軸方向の風速成分 u と y 軸方向の風速成分 v へ変換するのに次式を用いた。

$$\begin{aligned} u &= -V_\theta \sin \phi - V_r \cos \phi + V \cos \beta \\ v &= V_\theta \cos \phi - V_r \sin \phi + V \sin \beta \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、 $\phi = \beta - \theta$ 、 β ：竜巻進路と x 軸とのなす角度、 θ ：竜巻進路と竜巻中心から鉄塔塔体中心とのなす角度、 D ：竜巻移動中心位置と鉄塔との最短距離、 V ：竜巻の移動速度である。

3.5 竜巻の水平風速の分布

本報告では、フジスケールでF2の竜巻を想定しており、東京工芸大の報告書⁸⁾を参考に竜巻の特性値を $V_{R_m} = 64.5\text{m/s}$ 、 $R_m = 46\text{m}$ 、 $V = 11.6\text{m/s}$ と設定した。

図4と図5に各竜巻モデルの高さ方向と平面方向の水平風速の分布を示す。竜巻進路の右側では風速に竜巻の移動速度が加算され、左側では減算されるため、いずれのモデルでも竜巻進路の右側で大きな風速値をとることが分か

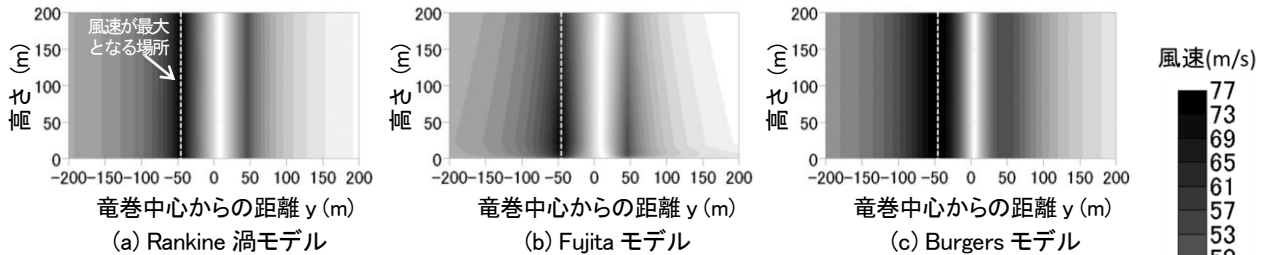


図4 各竜巻モデルの高さ方向の水平風速分布

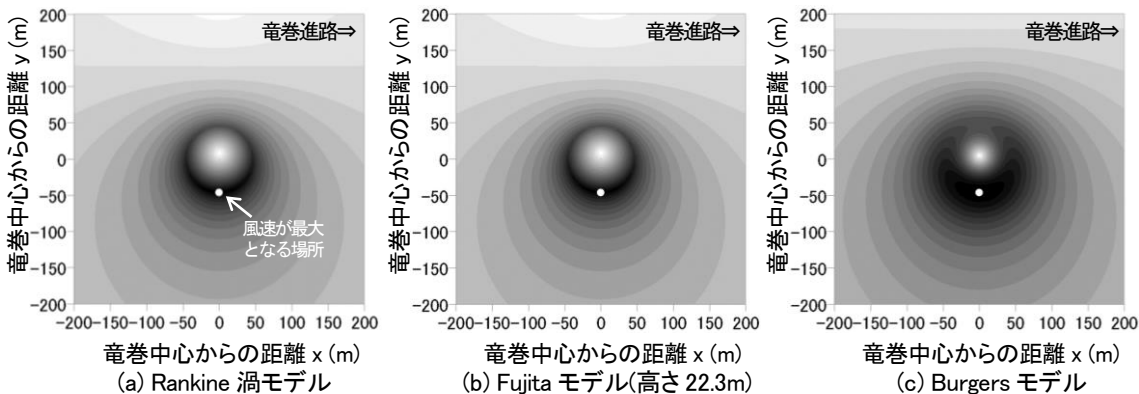


図5 各竜巻モデルの平面方向の水平風速分布

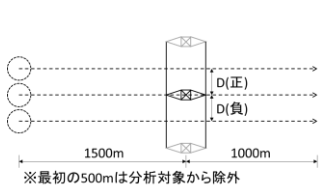
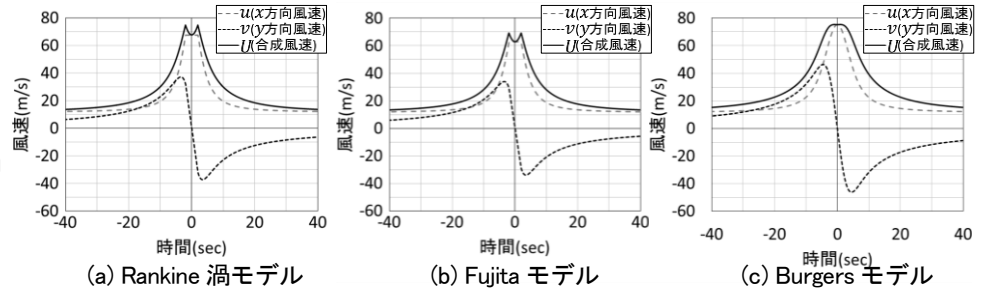


図6 パラメータ概要



(a) Rankine 渦モデル (b) Fujita モデル (c) Burgers モデル

図8 塔頂位置 (高さ 89.6m) での時刻歴竜巻風速 ($D=40m$)

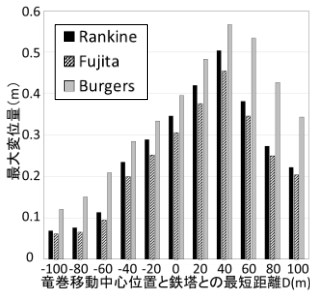
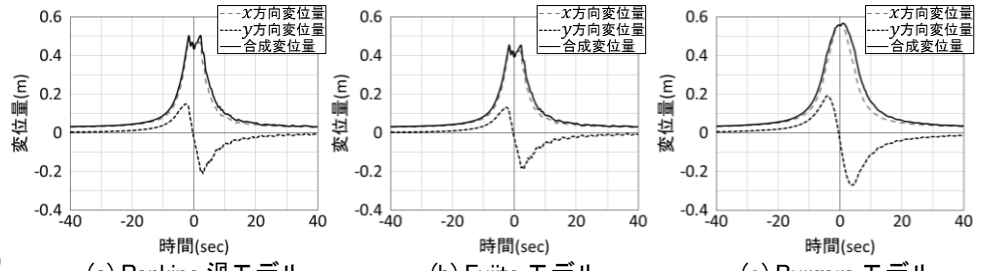


図7 塔頂の最大変位量



(a) Rankine 渦モデル (b) Fujita モデル (c) Burgers モデル

図9 塔頂 (高さ 89.6m) の時刻歴変位量 ($D=40m$)

る。また、図中には風速が最大となる場所を示しているが、いずれのモデルでも竜巻進路の右側で竜巻中心からの距離が46mのときに最大風速76.1m/sを示す。これらの値は R_m および V_{Rm} と V の合計値と一致する。なお、Fujitaモデルは高さ依存性があるが、今回用いた竜巻の特性値の場合、高さ22.3mで風速は最大となる。それぞれのモデルの風速分布を比較すると、Burgersモデル、Rankine渦モデル、Fujitaモデルの順に高風速となる領域が大きいことが分かる。

4. 送電鉄塔の竜巻応答解析

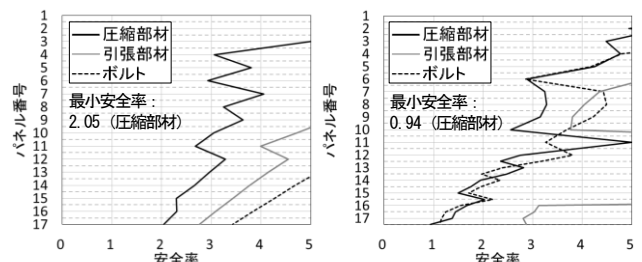
4.1 動的応答解析の概要

有限要素解析ソフトADINAを用いて動的応答解析を行った。時間刻みは0.01sec、構造減衰は剛性比例型とし、鉄塔は減衰定数1%、架渉線は減衰定数0.4%を用いてそれぞれ1次固有周期に対して設定した。なお、式(10)から得られるパネル毎の竜巻風速を用いて式(1)より風力を求め、得られた風力を各パネルの支柱材接合部接点に等分した。架渉線と碍子も同様にして風力を求め各節点に与えた。

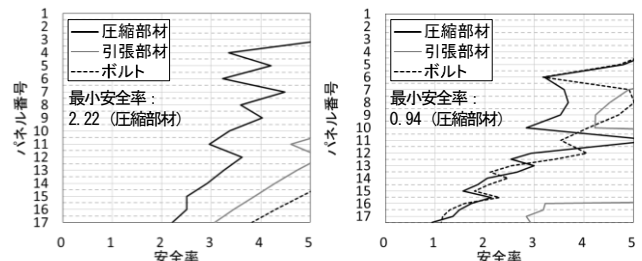
本報告では、竜巻移動中心位置と鉄塔塔体中心位置との最短距離 D をパラメータとしており、 $D=-100\sim 100m$ (20m刻み) での鉄塔の応答値の検討を行っている。なお、 $\beta=0^\circ$ とした。図6にパラメータの概要をまとめる。解析は竜巻接近前1500mから竜巻接近後1000mの合計2500mの経路で行っており、最初の500mは助走期間として分析対象からは除外した。

4.2 塔頂の最大変位量

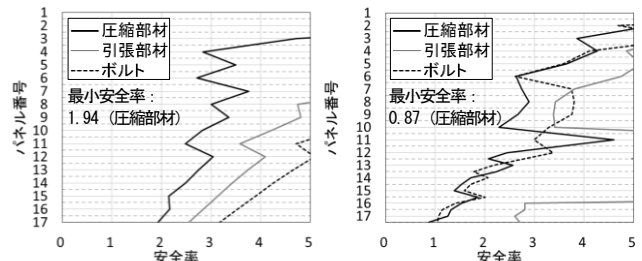
$D=-100\sim 100m$ のときの塔頂の最大変位量を図7に示



(a-1) 支柱材 (Rankine) (a-2) 斜材 (Rankine)



(b-1) 支柱材 (Fujita) (b-2) 斜材 (Fujita)



(c-1) 支柱材 (Burgers) (c-2) 斜材 (Burgers)

図10 各竜巻モデルの支柱材と斜材の安全率分布

す。いずれのモデルを用いた場合でも $D=40m$ のときに塔頂の最大変位量は最も大きくなる。これは、3.5節で示したように、鉄塔に作用する竜巻の風速が大きくなるのは鉄塔位置が竜巻進路の右側で、鉄塔が R_m ($=46m$) 付近にあ

るときであるためだと考えられる。また、各竜巻モデルを用いた場合の最大変位量を比較すると、全てのDの場合で Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に値が大きくなっている。

4.3 塔頂位置での時刻歴竜巻風速と塔頂の時刻歴応答変位

塔頂の最大変位量が最も大きくなる $D=40\text{m}$ のときの、それぞれの竜巻モデルを用いた場合の塔頂位置での時刻歴竜巻風速を図8に、塔頂の時刻歴変位量を図9に示す。塔頂の竜巻風速の大きさはx方向とy方向ともに Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に大きく、変位量の大きさもこの順番に大きくなっていることから、鉄塔に作用する風力が各竜巻モデルを用いた場合の変位量の差異に影響しているものと考えられる。また、3.5節で示したように高風速となる領域は Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に大きく、送電鉄塔は架渉線を含めると長大な構造物であることから、この順に架渉線が高風速(高風力)に曝される領域が大きいことも各竜巻モデルを用いた場合の変位量の差異の一因として考えられる。

4.4 安全率分布

本報告では以下の式(11)のように安全率を定めた。

$$\text{安全率} = \text{降伏強度} / \text{発生軸力} \quad (11)$$

ここで、降伏強度は部材降伏強度とボルト降伏強度で、発生軸力は発生圧縮軸力と発生引張軸力である。

図10に各パネルでの支柱材と斜材の圧縮部材と引張部材およびボルトの最小安全率分布を示す。いずれの竜巻モデルを用いた場合でも安全率分布はおおよそ似た形となり、支柱材と斜材ともに圧縮側の最下部材で安全率の値は最小となる。支柱材の安全率の最小値を比較すると、Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に1.94, 2.05, 2.22 となっており、この順に支柱材に発生する最大軸力が大きくなるのが分かる。またいずれの竜巻モデルでも斜材の安全率が1を若干下回る部材が見られた。

5. まとめ

3つの竜巻モデル(Rankine 渦モデル、Fujita モデル、Burgers モデル)を用いて、竜巻移動中心位置と鉄塔塔体中心位置との最短距離をパラメータとし、F2クラスの竜巻(最大接線風速64.5m/s、移動速度11.6m/s)が通過する場合を想定したときの500kV懸垂型鋼管鉄塔の応答特性の比較を行ったところ、以下の所見を得た。

- (1) いずれの竜巻モデルでも風速が最大となるのは竜巻進路の右側で竜巻中心からの距離が46mのときに最大風速76.1m/sを示す。これらの値は最大接線風速半径および最大接線風速と移動速度の合計値と一致する。
- (2) 各竜巻モデルの風速分布を比較すると、Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に高風速となる領域が大きい。
- (3) いずれの竜巻モデルを用いた場合でも、鉄塔位置が竜巻進路の右側で、竜巻移動中心位置と鉄塔塔体中心位置との最短距離が40mのときに塔頂の変位量は最大となる。また、塔頂の最大変位量を比較すると、いずれのパラメータでもBurgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に値が大きくなる。
- (4) 支柱材の安全率分布を比較すると Burgers モデル、Rankine 渦モデル、Fujita モデルの順に安全率の最小値は小さくなる。

参考文献

- 1) 電気学会:送電用支持物設計標準JEC-127-1979, 1979.
- 2) 気象庁ホームページ: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/now/toppuu/tornado1-2.html>, (2016.01.26 参照)
- 3) 田村幸雄(代表):竜巻の実態および発生予測と対策,平成19年度科学技術振興調整費補助金 重要政策課題への機動的対応の推進 研究成果報告書, 2008.
- 4) 原子力規制委員会, 原子力発電所の竜巻評価ガイド, 2013.
- 5) T.Theodore Fujita: Workbook of Tornado and High Winds for Engineering Applications, 1978.
- 6) 江口謙, 杉本聡一郎, 服部康男, 平口博丸: 竜巻による物体の浮上・飛来解析コードTONBOSの開発, 電力中央研究所 研究報告 N14002, 2014.
- 7) Vincent T. Wood, Rodger A. Brown: Simulated Tornadoic Vortex Signatures of Tornado-Like Vortices Having One- and Two-Celled Structures, J. Appl. Meteor. Climatol., 50, 2338-2342., 2011.
- 8) 東京工芸大学:平成21~22年度原子力安全基盤調査研究(平成22年度)竜巻による原子力施設への影響に関する調査研究, 2010.