

## 令和元年台風15号通過時の送電鉄塔倒壊被害からの風速試算

### ESTIMATION OF WIND SPEED FROM TRANSMISSION TOWER COLLAPSE BY TYPHOON FAXAI

野田 稔<sup>1)</sup>

Minoru NODA<sup>1)</sup>

#### ABSTRACT

On September 9, 2019, Typhoon FAXAI left huge damage in eastern Japan, mainly in Chiba Prefecture. One of them was the collapse of two power transmission towers. In this paper, in order to estimate the wind speed when this damage occurs, the influence of the topography on the flow field around the collapse site of the transmission tower was investigated by numerical fluid analysis. Furthermore, the static structural analysis of the transmission tower was carried out by applying wind load based on the obtained flow field. As a result, at the wind direction angle of 146.25 degrees, local wind speed increased due to the topography, and the No. 79 tower began to collapse at a wind speed of about 40 m / s.

Key Words: RANS, Terrain Effect, Frame Structural Analysis, Typhoon FAXAI

#### 1. はじめに

2019年9月5日南鳥島近海で発生した台風15号(FAXAI)は、2019年9月9日未明に「非常に強い」勢力を保って千葉県千葉市付近に上陸した。千葉で最大瞬間風速57.5m/sを記録したこの台風は、千葉県を中心に建物や配電設備、樹木等を中心に甚大な被害をもたらした。2020年3月の時点で損害保険支払額としては、2018年の台風21号による10,678億円、2019年の台風19号による5,826億円、1991年の台風19号による5,680億円に次ぐ歴代4位の4,656億円となった<sup>1)</sup>。その際、千葉県君津市長石において66kVの木内線、小糸川線、内房線の回線を支えていた送電鉄塔2基が強風によって倒壊する被害が発生した(写真1)。

著者は、一般社団法人日本風工学会の突発災害調査費の助成を受けて実施された台風15号の強風被害調査の一環として、ドローンを使って本被害の現地調査を行う機会があり、倒壊現場付近では尾根状の地形や谷状の地形によって風速が増強され、送電線や送電鉄塔の風荷重が極端に強まった可能性が感じられた。その後、科学研究費特別研究促進費の助成を受けて、風工学の見地からこの被害がどのように発生したのかについて検討する機会を得た。この検討では、鉄塔の倒壊状況から推察される風向を中心に倒壊現場付近の地形周りの流れ場を数値流体解析によって求め、その風速分布を元に風荷重を決め、構造解析を実施することで、鉄塔が倒壊する風速を推定した。なお、ここでは、現地調査などに基づいて想定した構造諸元を用いて構造解析を実施しており、実際に倒壊した送電鉄塔を正確に再現しているものではないため、得られた風速値などがそのまま今回の倒壊事故に直接適用できるわけではないことを予め断っておく。

<sup>1)</sup> 高知大学理工学部地球環境防災学科 教授 (〒780-8520 高知市曙町2-5-1)



(a) 78号鉄塔 (高さ45m)



(b) 79号鉄塔 (高さ57m)

写真1 令和元年台風15号により倒壊した送電鉄塔

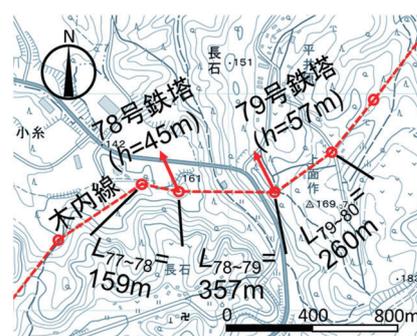


図1 倒壊現場周辺の状況

## 2. 被害概要

9月20日に実施した現地調査では、ドローンを使って鉄塔の基本構造および破損状況の記録を行った。また、9月21日に実施した航空調査によって、送電鉄塔倒壊現場周辺の森林では樹木の幹折れ被害が頻発しており、強風が吹いたことが推察された。

ここで、倒壊現場の概略図を図1に示すが、この送電鉄塔は、1972年に建設された耐張型アングル鉄塔であり、西側の78号鉄塔は、高さ $h=45\text{m}$ 、最下層の主材は $175\text{mm}\times 175\text{mm}\times 15\text{mm}$ の山形鋼であり、水平な場所に建てられているため、最下層の脚部の高さは同じである。一方、東側の79号鉄塔は、高さ $h=57\text{m}$ 、最下層の主材は $200\text{mm}\times 200\text{mm}\times 25\text{mm}$ の山形鋼であり、傾斜地に建てられているため、最下層の脚部の長さは斜面に合わせて異なっていた。いずれの鉄塔も基部のコンクリート基礎には浮き上がり等は認められず、また、鉄塔の風上側主材は特に破断するなどの形跡はなかったことから、倒壊の基本的な原因は圧縮側主材の座屈によるものとの印象を持った。両鉄塔の間は、 $357\text{m}$ 離れており、断面積 $610\text{mm}^2$ のTACSR単導体電力線12本およびACSE単導体電力線6本と断面積 $70\text{mm}^2$ のAC架空地線2本の計20本の電線を支える、腕金において電線の張力を支える耐張鉄塔と呼ばれる形式である<sup>2)</sup>。

78号鉄塔と77号鉄塔の間は $159\text{m}$ 、79号鉄塔と80号鉄塔の間は $260\text{m}$ であり、図1に示す通り、78号鉄塔～79号鉄塔の部分がほぼ東西に走っており、77号～78号間は78号鉄塔から見て少し時計回りに送電線軸が回転して直交する風向は南～南南西と考えられる。一方で、79号～80号間は、79号鉄塔から見て反時計回りに送電線軸が回転しており、直交する風向はほぼ南東と考えられる。また、鉄塔および送電線と地形との位置関係としては、78号鉄塔は南側に急傾斜を持つ尾根の上に位置し、79号鉄塔は緩やかな尾根の上に位置している。78号～79号間の送電線は、南西を軸とするような谷を跨いでいる。

以上に述べたように、倒壊現場は尾根沿いに配置された送電線が谷越えする場所であり、尾根越えの気流は谷筋の気流といった増速が起きる可能性のある地形的特徴を有しており、高さにして $60\text{m}$ ほど、倒壊した2基の鉄塔が支える送電線は長さにして $776\text{m}$ に及ぶ規模であることも考えると、送電線および送電鉄塔が受ける風荷重もこれらの地形の影響を受けた複雑な流れ場によって決まるものと考えられる。

## 3. 地形による風況解析

前述の通り、送電鉄塔の倒壊する条件から風速を推定するには、地形の影響を考慮した風荷重を求める必要がある。そこで、地形を再現し、鉄塔が倒壊した方向を中心に風向を変化させ、倒壊現場付近の流れ場を求めることにした。また、地形の再現範囲によって、倒壊現場付近の流れ場が変化する可能性もあるため、地形の再現範囲を変化させた場合の流れ場の変化についても検討することとした。

### 3. 1 解析概要

鉄塔が北北西に倒れたことから、ここでは、南南東の風を中心に南東から南を $11.25^\circ$  ずつの32風向で分割し、風向角を $135^\circ$  (以下SE),  $146.25^\circ$  (以下SSEE),  $157.5^\circ$  (以下SSE),  $168.75^\circ$  (以下SSSES),  $180^\circ$  (以下S)の5風向を解析対象とした。また、地形の再現範囲が倒壊現場周辺の流れ場に及ぼす影響を検討するため、地形の再現範囲を $1\text{km}$ 刻みに半径 $R_0 = 1\sim 5\text{ km}$ とし、その外側 $1\text{km}$ の部分には、動径 $r(\text{km})$ に対して、 $a = 0.5 +$

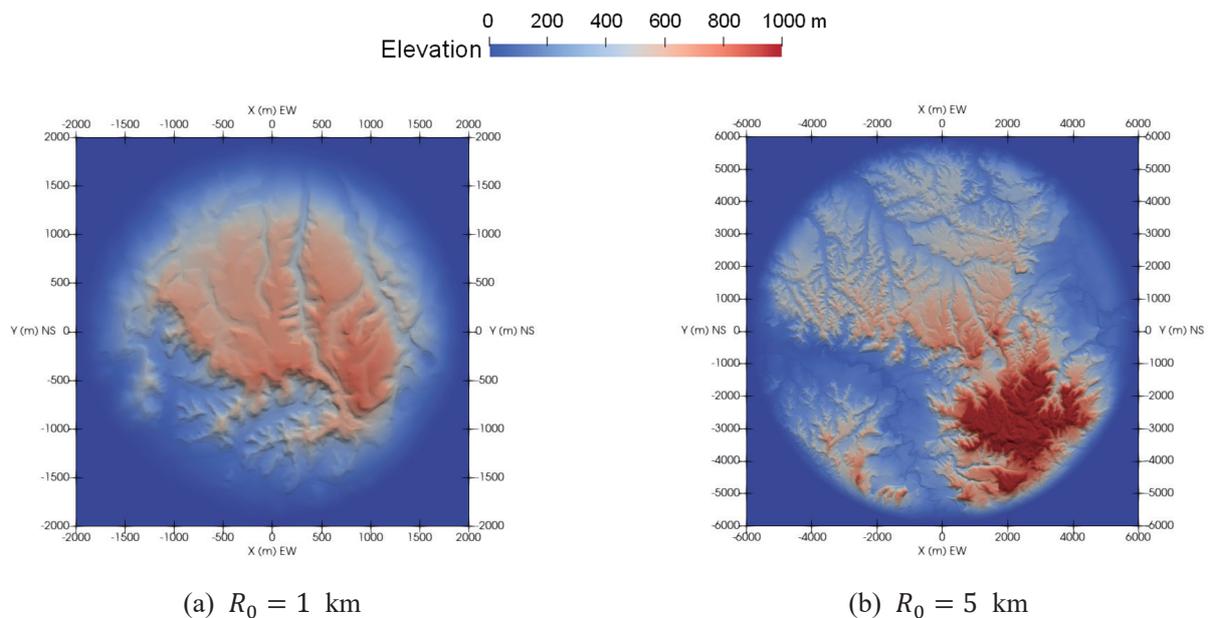


図2 気流解析における地形の再現状況の例

$0.5 \cos \pi(r - R_0)$  [ $R_0 \leq r \leq R_0 + 1$ ]の重み関数を乗じて、地形を標高0mに滑らかに擦り付けるようにした。地形は国土地理院が公開する10m標高メッシュ<sup>3)</sup>を用いた。

計算領域は、東西軸をx軸(東向きを正)、南北軸をy軸(北向きを正)とした直交座標系に合わせた水平方向の1辺が $2(R_0 + 1)$  (km)、高さが2kmの直方体で生成し、水平方向には15mの等間隔分割、鉛直方向には第1メッシュが10mの等比級数で生成した非等間隔分割とした。図2に $R_0 = 1$  kmおよび5kmにおける地表面部分のメッシュを示す。本解析では、風向を上流側に位置する流入面での風速ベクトルで変化させており、流入面では粗度長 $z_0 = 0.1$  mの対数則に基づいた風速鉛直プロファイルを与えた。また、下流側の位置する流出面においては自由境界を設定した。風向角 $180^\circ$  の場合のみ、風向の平行面となる東西面をスリップ境界とした。対象範囲は樹木などが多く起伏に富んだ土地であるため、ここでは粗度長を一律に $z_0 = 0.1$  mとし、ゼロ面補正やキャノピーモデルなどは用いなかった。

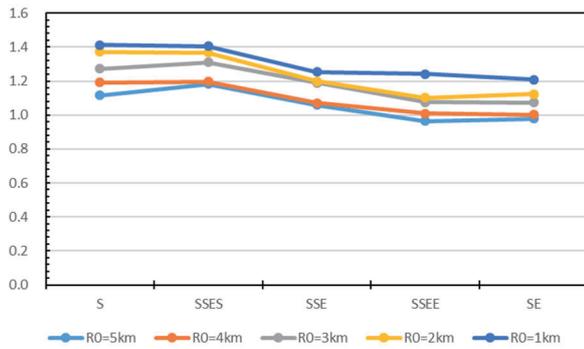
数値流体解析は、OpenFOAM7.0<sup>4)</sup>の定常流ソルバーであるsimpleFOAMを用いて実施し、乱流モデルは標準 $k - \epsilon$ モデルを用いた。ここでは、地形による風速の変化を評価するため、同じメッシュ条件で地形のない平坦な状態での解析領域中心における風速分布も求め、その場合の地上高40mの平均風速で除すことで、地形の再現範囲による風速基準点の風速変化を評価した。

### 3. 2 地形再現範囲と基準風速の関係

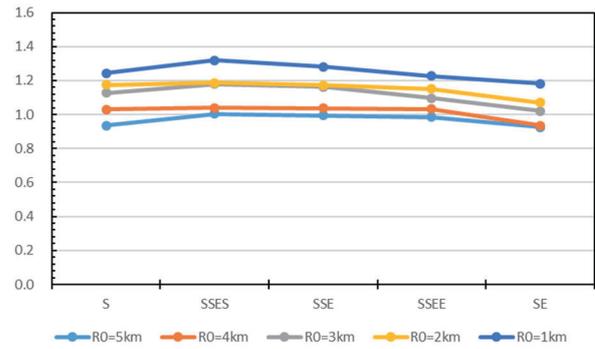
ここでは、倒壊した両鉄塔の位置における基準風速に対する地形と風向の影響について検討する。図3に78号鉄塔が位置する場所、79号鉄塔が位置する場所における地上高40mの地形なしの平均風速に対する地形ありの平均風速比(以下、基準風速比と呼ぶ)を示す。いずれの地点においても地形の再現範囲が狭まるにつれて基準風速比が高まる傾向にあり、近隣の地形が鉄塔地点の風速を増加させる効果を持っていると考えられる。逆に、遠方の地形が再現されるほど基準風速比が低下していくことから、遠方の地形は風速を下げる効果を持っていると言える。風向による基準風速比の変化を見ると、風向SおよびSSESにおいては、78号鉄塔側の方が高い風速を示すが、風向SSE~SEの間では、両鉄塔とも同程度の基準風速比となることが分かった。

### 3. 3 送電線路沿いの鉛直面内の流れ場

ここでは、送電線路に沿った鉛直面における風速分布について検討する。図4に78号鉄塔の位置を原点として、79号鉄塔に向かう方向を正とする送電線路沿いに設定した座標軸S軸と鉛直軸Z軸が作るS-Z面における合成風速および鉛直風速成分を78号鉄塔の位置における地上高40mの合成風速で基準化した風速比分布を示す。ここでは、今回の解析で得られた代表的な2つのパターンとして、地形再現半径 $R_0 = 5$  kmにおける風向SSES



(a) 78号鉄塔地点における基準風速比



(b) 79号鉄塔地点における基準風速比

図3 倒壊鉄塔地点における地上高40mの基準風速比

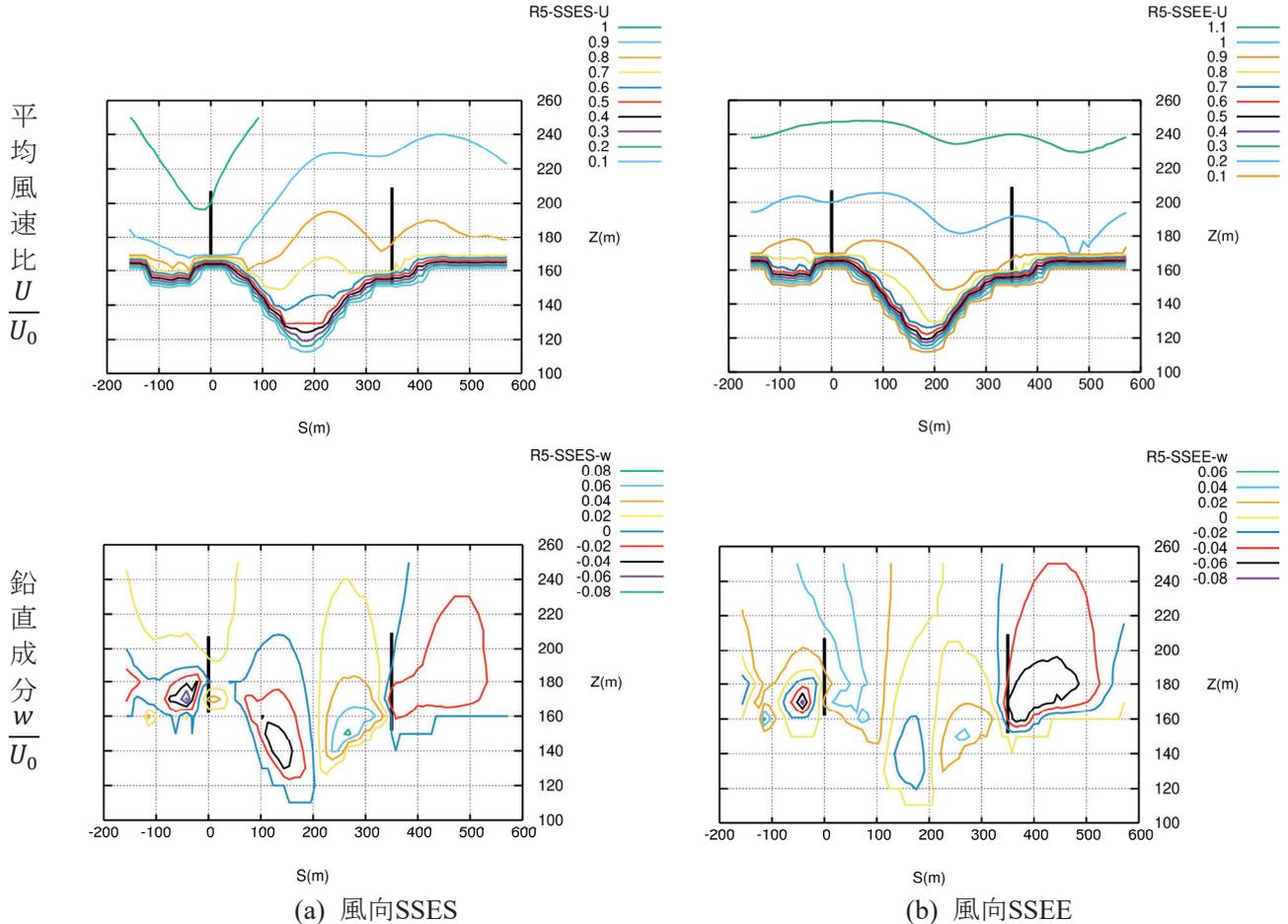


図4 送電線路沿いの鉛直面における合成および鉛直成分の風速比分布  
(基準点：78号鉄塔地上高40m,  $R_0 = 5$  km)

とSSEEの合成風速比および鉛直風速比について示す。

風向SSESでは、78号鉄塔付近に局所的に風速の高い部分が生じ、79号鉄塔の辺りの風速は低くなる風速分布となった。この場合、谷の上部の風速も低い。また、この時、78号鉄塔の79号鉄塔側、谷の南側斜面付近には吹き降ろしの流れが現れており、谷の北側斜面には吹き上げの流れが現れている。この傾向から、78号鉄塔付近に上空の速い流れが降りてきており、流れは谷筋に対して南寄りにずれているものと考えられる。

一方、風向SSEEでは、78号鉄塔から79号鉄塔の風速はほぼ同程度の一様な状態に加え、79号～80号鉄塔の間に高い風速域が生じている。また、風向SSESと比べて谷の南側斜面での吹き降ろし、谷の北側斜面での吹き上げはいずれも弱まり、谷筋に沿った流れになっている上に、79号～80号鉄塔間の吹き降ろしが強まっていることから、79号～80号鉄塔間に上空の速い流れが吹き降りてきていることが分かる。

## 4. 送電線の支持力解析

### 4. 1 解析概要

前節において、送電線が張られている空間における平均風速が地形の影響によって増減しており、一様な分布ではないことを示した。そのため、送電鉄塔が支持する送電線は風速分布の影響を受けることとなり、流れ場の中でどのように変形するかを考慮して、送電線の支持力を決定する必要があると考えられる。そこで、張力、自重、風荷重のみを考える簡易な個別要素法によって、任意の風速分布に対する送電線の静的な変形状態を求めた。自然長が $L$ の送電線を $n$ 分割し、自然長 $dx = L/n$ の $n$ 本のバネ乗数 $k (= EA/dx; E, A$ はそれぞれ送電線のヤング率および断面積) のバネ要素と考え、要素同士の結合部分の座標 $\mathbf{x}_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, n$ )における力のつり合い状態を考えれば、次式のように表される。

$$\sum \mathbf{F} = k(|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i| - dx) \frac{\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i}{|\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i|} - k(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}| - dx) \frac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}}{|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{i-1}|} + \mathbf{F}_i - c_i |\dot{\mathbf{x}}_i| \dot{\mathbf{x}}_i - m_i \ddot{\mathbf{x}}_i = 0$$

ここで、 $\mathbf{F}_i$ は節点 $i$ に作用する外力、 $c_i$ は節点における減衰係数(解析を安定させるためのパラメータ)、 $m_i$ は節点に配分する要素の質量である。外力については、ここでは、重力と風荷重の合力となり、風荷重については、節点の位置 $\mathbf{x}_i$ における要素軸直角成分の風速 $\mathbf{U}_i$ を求め、 $0.5\rho C_D d |\mathbf{U}_i| \mathbf{U}_i dx$  ( $\rho, d$ はそれぞれ空気密度および送電線直径) として加算した。ここでは、強風時を想定していることや気流が乱れていることを勘案して、抗力係数を $C_D = 0.81$ とした。また、節点に配分する質量は、 $m_i = \rho_c dx$  ( $\rho_c$ は送電線の単位長質量) である。これを線形加速度法によって数値積分を実施し、送電線の定常状態の変形を求め、端部の要素の復元力から送電線の支持力を求めた。なお、自然長は所定のサグ比<sup>5)</sup>となるように無風状態の解析結果によってあらかじめ調整した。

### 4. 2 送電線の静的変形と支持力

図5に78号~79号鉄塔の風向Sに対する風速分布を使った送電線形状に対する基準風速の影響を示す。ここで、基準風速とは、78号鉄塔位置の地上高40mの合成風速値である。図中のYは東西軸を表しており、図中の3つのグループは、上から地線、最上段の送電線、最下段の送電線の各基準風速における静的変形状態を示している。この結果より、基準風速の増加に従って、送電線ケーブルおよび地線ケーブルはそれぞれ風によって吹き流されていることが分かる。また、図6に基準風速の変化に対する送電線支持力の変化の一例として、78号鉄塔最下段腕金に作用する79号鉄塔側送電線の張力による力を示す。ここで、 $F_x, F_y, F_z$ は、鉄塔の番号が増える方向に正とした座標軸を $x$ 、 $x$ 軸の正方向に向いた時の左側直交方向を $y$ 軸、鉛直方向を $z$ 軸としたもので、鉄塔の構造軸基準の座標系である。この結果からもわかるように、風速の増加によって2軸方向の水平面内の力が増加していることが分かる。

次に基準風速一定の条件下で風向が変わった時の送電線ケーブルの変形状態の変化を図7に示す。図中の3

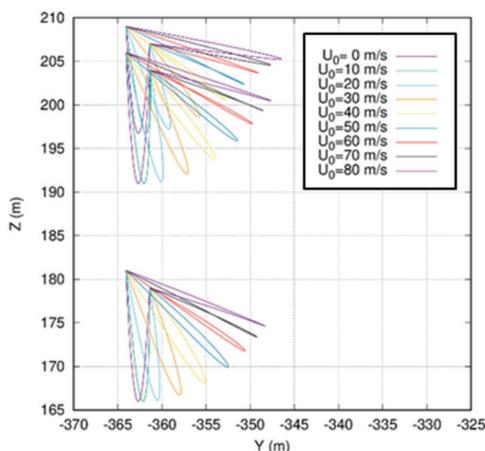


図5 送電線の変形に対する基準風速の影響 (風向S)

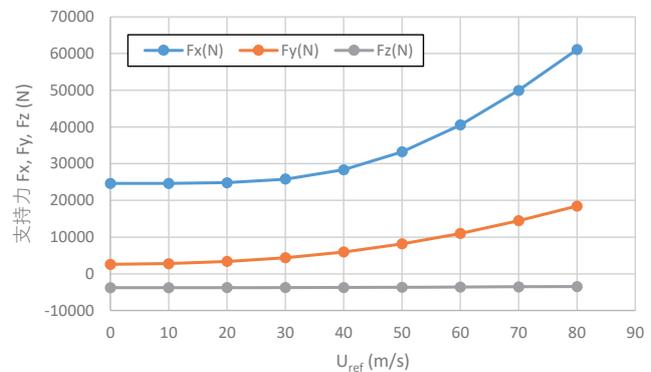


図6 送電線の支持力に対する基準風速の影響 (風向S, 78号鉄塔最下段の79号鉄塔側)

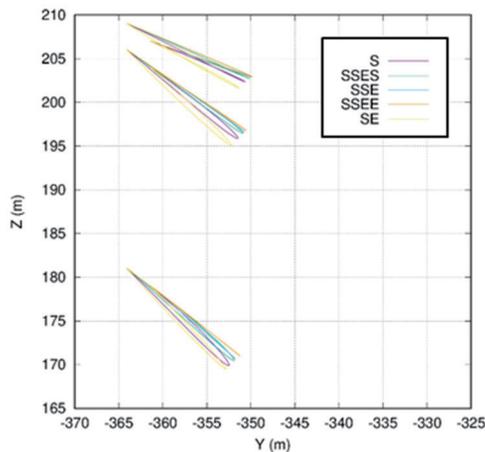


図7 送電線の変形に対する風向の影響  
(基準風速：50m/s)

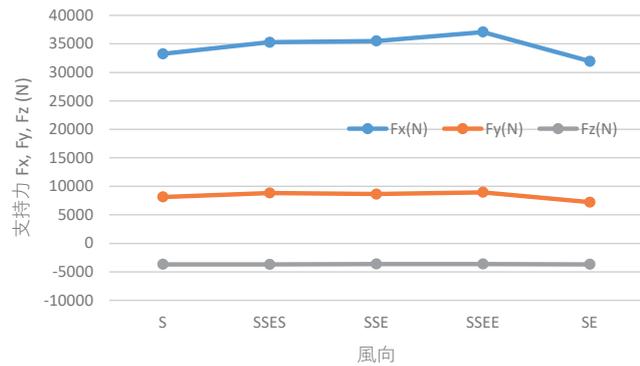


図8 送電線の支持力に対する風向の影響  
(基準風速：50m/s, 78号鉄塔最下段の79号鉄塔側)

つのグループについては前述と同じである。この結果より、風向変化によっても送電線ケーブルの変形状態は変化することが分かる。この変化は、風向によるものと、風向によって起きる風速変化によるものが合わさったものであると考えられる。また、図8に図6と同様の送電線ケーブルの張力を示す。この結果より、 $F_x, F_y$ は風向によって変化していることが分かる。したがって、基準風速の影響に比べれば、風向の影響は小さいものの影響を受けていることには違いがないため、構造解析に与える送電線ケーブルの張力は、流れ場の影響を加味したものを与える必要があると考えられる。

## 5. 送電鉄塔の構造解析

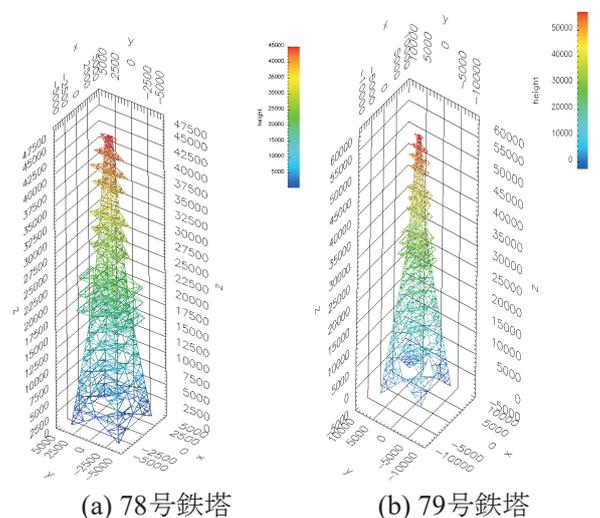
### 5.1 解析概要

ここでは、送電鉄塔に作用する風荷重、送電線に作用する風荷重、自重を外力とする構造解析を実施する。解析は、現地調査などで得られた情報をもとに構築した図9に示すような構造モデルによって行った。構造モデルは2次部材、3次部材まで極力再現するようにした。解析は、3次元骨組み構造解析コードのFrame3DD<sup>6)</sup>を用いて実施した。ここで、倒壊した2基の送電鉄塔は、いずれも等辺山形鋼で構成されるアングル鉄塔であり、部材に対する風向角も様々であるため、アングル型の平均的な値として抗力係数を1.9として風荷重を算定し、断面形の非対称性によって発生する揚力については、構造の対称性から打ち消されることを期待して無視した。この際の風荷重の算定においては、鉄塔中心位置の部材高さにおける風速ベクトルを用い、部材軸直角方向の風速成分を求めて、その風速による抗力を風荷重として求めた。なお、送電鉄塔のようなトラス構造の場合には、遮蔽効果により下流側の部材に作用する空気力は低減することになるが、鉄塔本体に作用する風荷重が生む部材力は送電線の風荷重による部材力に比べれば非常に小さいため、遮蔽効果などについては考慮しなかった。ここでは、鉄塔本体の部材に働く風荷重と自重に加え、前節で求めた送電ケーブルの張力を腕金に載荷することで、構造解析を行い、鉄塔の各部材力を求めた。

### 5.2 構造解析結果からの風速推定

ここでは、主材である柱部分についてはSM540、そのほかの部材についてはSS400相当と想定し、部材の耐力は、それぞれの部材の降伏応力またはオイラー座屈応力に基づいて求めた。また、倒壊の要因には主材である柱部が重要であると考えられたため、主材の耐力に対する実際の軸力の比の数値ごとの頻度によって解析結果について検討していく。

78号鉄塔、79号鉄塔において、各主材を対象として、耐力に対する各風向・各風速で発生した軸力の比（以下、対耐荷



(a) 78号鉄塔 (b) 79号鉄塔  
図9 本解析に用いた送電鉄塔の構造モデル

力軸力比) の階級別発現頻度を求めた結果を図10に示す。ここでの風速は、78号鉄塔位置における地上高40mにおける風速である。また、対耐荷力軸力比の発現頻度を階級幅0.1で求め、数値および棒グラフによって図示している。

78号鉄塔の結果に注目すると、無風時では対耐荷力軸力比の値はほとんどが0.3未満を占めており、風速の増加とともに対耐荷力軸力比の値は増加していく。この原因は鉄塔本体および送電線に働く風荷重の増大である。そして、対耐荷力軸力比が1に達する、つまり発生軸力が耐荷力を超えるのは、ほとんどが基準風速60m/sであり、この鉄塔が設計された当時の設計風速40m/sに比べてかなり余裕のある数値となっている。

一方、79号鉄塔の結果に注目すると、無風時の耐荷力軸力比が0.5程度に達しており、無風時で発生する軸力が78号鉄塔に比べて高い結果となっている。当然、風荷重の増大に対する耐力的な余裕も小さくなるため、破壊条件に達する風速は、風向SSEおよびSSEEにおいては、78号鉄塔位置の高さ40mにおける風速が40m/s、そのほかの3風向で同じく50m/sとなった。

図11に、両鉄塔が破壊条件に達する78号鉄塔位置における高さ40mでの風速値をまとめる。このことから、両鉄塔を比べると破壊条件に達する78号鉄塔位置における基準風速が低い79号鉄塔の方が先に静的に破壊に至ったと考えることができる。また、図3に示した78号鉄塔と79号鉄塔の風速値の関係から、79号鉄塔における地上高40mの風速値に直した結果を併せて求めたところ、79号鉄塔が破壊条件に達する79号鉄塔における地上高40mの風速値は40m/sをわずかに上回る結果となり、当時の設計風速40m/sに準ずる風速値で破壊条件に到達したものと考えられる。図12に79号鉄塔の最上段の送電線を支持する腕金に作用する送電線支持力の水平

78-S											79-S											
N/C	0 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s	40 m/s	50 m/s	60 m/s	70 m/s	80 m/s		N/C	0 m/s	10 m/s	20 m/s	30 m/s	40 m/s	50 m/s	60 m/s	70 m/s	80 m/s		
0 0.0-0.1	0.2917	0.3833	0.3500	0.2500	0.0333	0.0000	0.0000	0.0000	0.0667		0 0.0-0.1	0.0188	0.0188	0.0250	0.0375	0.0500	0.0500	0.0750	0.0750	0.0750		
1 0.1-0.2	0.4417	0.2333	0.1667	0.0833	0.2000	0.0667	0.0167	0.0000	0.2250		1 0.1-0.2	0.2125	0.3063	0.3133	0.3750	0.4500	0.4500	0.4125	0.4000	0.4000		
2 0.2-0.3	0.2500	0.2750	0.2417	0.1750	0.0667	0.1167	0.0833	0.0000	0.0417		2 0.2-0.3	0.1125	0.2125	0.1750	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0125	0.0250	0.0250	
3 0.3-0.4	0.0167	0.1083	0.2250	0.2750	0.1250	0.1000	0.0833	0.0000	0.0500		3 0.3-0.4	0.1250	0.1188	0.0750	0.0313	0.0250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
4 0.4-0.5	0.0000	0.0000	0.0167	0.2000	0.3583	0.0833	0.0833	0.0167	0.0667		4 0.4-0.5	0.2875	0.2750	0.1625	0.0938	0.0188	0.0188	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
5 0.5-0.6	0.0000	0.0000	0.0000	0.0167	0.1000	0.2167	0.0417	0.0083	0.0333		5 0.5-0.6	0.0438	0.0688	0.2313	0.1688	0.0750	0.0125	0.0125	0.0000	0.0000	0.0000	
6 0.6-0.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1167	0.2167	0.0917	0.0250	0.0167		6 0.6-0.7	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1938	0.1063	0.0688	0.0125	0.0125	0.0125	
7 0.7-0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.2083	0.1750	0.0000		7 0.7-0.8	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2313	0.0375	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125	
8 0.8-0.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1000	0.1000	0.0583	0.0000		8 0.8-0.9	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.0000	0.0625	0.0000	0.0000	
9 0.9-1.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0833	0.1000	0.0167		9 0.9-1.0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.2188	0.0375	0.0188	0.0188	0.0188	
10 1.0-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1333	0.6167	0.4833		10 1.0-	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0438	0.3825	0.4583	0.4583	0.4583	

図10 各風向・各風速における78号鉄塔、79号鉄塔の主材の耐力Cに対する軸力Nの比の階級別頻度分布

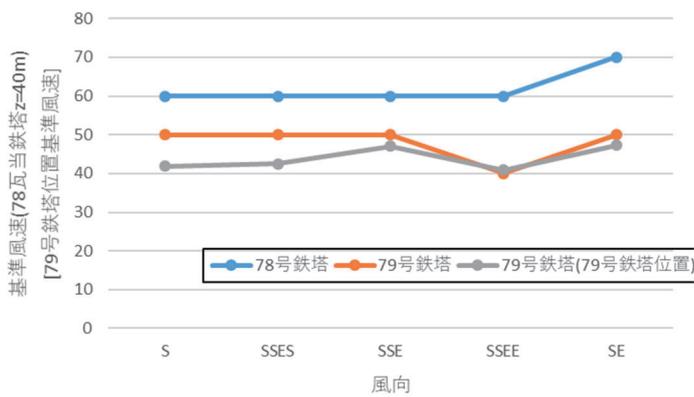


図11 各鉄塔の主材が破壊条件に至る78号鉄塔位置における地上高40mの風速および79号鉄塔破壊時の79号鉄塔位置における地上高40mの風速

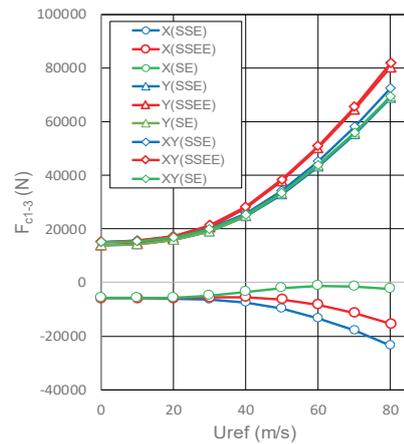


図12 79号鉄塔最上段腕金に作用する送電線支持力（送電軸方向X，送電軸直交方向Y，水平合成XY）の変化（風向SSE～SE）

成分を示す。この結果を見ると、風向がSSEEの送電線軸直交方向の成分がSEやSSEの場合に比べて10%ほど強まっていることが分かる。この原因と考えられるのが、風向SSEEの際に認められた79号～80号鉄塔間に発生する高風速域である。77号～79号鉄塔間ではほぼ同程度の風速であるのに対して、79号～80号鉄塔間という長い区間に生じた高風速域が、送電線に働く風荷重を増大させたため、と考えられる。

ただし、ここで判断に用いているのは降伏応力度または座屈応力度から求めた耐荷力と静的風荷重による発生軸力であり、実際に破壊状態に到達する風速はより高い風速であると考えられる。しかし、最終的な結果から、倒壊被害のプロセスとしては、79号鉄塔が先に倒壊条件に至った可能性が高く、その際の79号鉄塔での風速は最低でも40m/s程度だったのではないかと考えられる。

## 6. まとめ

ここでは、令和元年台風15号の通過の際に発生した送電鉄塔倒壊事故について、気流に対する周辺地形の影響を検討し、求めた流れ場を用いて静的構造解析を行い、想定した構造部材の耐力に対する倒壊風速を求めた。その結果、79号鉄塔が風向SSEEにおいて、破壊開始風速が最も低くなる結果を得た。その理由は、79号鉄塔側に作用する送電線の風荷重が風向SSEEの場合のみ他風向に比べて10%程高まったためであり、その原因は、79号～80号鉄塔間における風速が風向SSEEの際に強まったためと考えられる。ここでは、平均風速場に基づいた静的解析に留まっているため、今後は変動風速場を考慮して、動的応答解析を行なうことで、より現実に近い条件に基づいた風速推定を行う必要がある。

## 謝辞

本研究は、日本風工学会突発災害調査費、科学研究費特別研究促進費（19K24677，代表者 丸山喜久）による助成を受けて実施された。現地調査などにおいては、東京電力パワーグリッド株式会社の協力を賜った。また、構造解析作業の一部において、高知大学工学部地球環境防災学科3年の尾田春雄君、伊藤修一君、同2年の井田直宏君、中村里菜君の協力を得た。ここに記し、感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 一般社団法人日本損害保険協会，自然災害での支払額「風水等による保険金の支払い・過去の風水害等による高額支払保険金事例（見込み含む）」，<https://www.sonpo.or.jp/report/statistics/disaster/index.html>, 2020.
- 2) 令和元年台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ，令和元年台風15号における鉄塔及び電柱の損壊事故調査検討ワーキンググループ<中間報告書>，2020年1月21日.
- 3) 国土地理院，基盤地図情報10mメッシュ，<https://fgd.gsi.go.jp/download/mapGis.php?tab=dem>, 2020.
- 4) The OpenFOAM Foundation, OpenFOAM, <https://openfoam.org/>, 2020.
- 5) 国際協力機構，ニュージェック，中国電力，「カンボジア国プノンペン首都圏送配電網拡張整備事業フェーズ2準備調査ファイナルレポート」，JICA報告書PDF版，[https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12182671\\_03.pdf](https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12182671_03.pdf), 2014.
- 6) Henri P. Gavin, Frame3DD. Static and Dynamic Structural Analysis of 2D and 3D Frames, <http://frame3dd.sourceforge.net/>, 2015.