「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の基本的考え方

Basic Concept of “Recommendations of Wind Loads for Overhead Transmission Towers”

○大熊 武司¹⁾

Takeshi OHKUMA¹⁾

石川 智巳²⁾

Tomomi ISHIKAWA²⁾

1. はじめに

送電用鉄塔の設計にあたっては、台風等の風荷重で設計荷重が決められることが多く、また、近年の台風による損壊例の発生、大規模化、基数の増大などにより、有事の際の社会的影響度の点から、合理性を兼ね備えた高い信頼性が求められるようになってきている。一方で、近年の構造設計における「性能設計の考え方」への転換、既存鉄塔の安全性診断・補強等への対応など、荷重効果の実況の評価法も必要な状況となっている。

電気事業連合会では、平成3年9月の台風19号による送電鉄塔の設備被害をきっかけとして、送電鉄塔の耐風設計法に関する検討を進めてきた。本報告はこれまでの研究活動の概要とその成果である「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」の基本的考え方を紹介する。

2. 近年の架空送電設備の耐風安全性に関する研究動向

台風9119号による事故後の被害調査を踏まえ、全電力会社、学識経験者および（財）電力中央研究所により「局地風対策研究推進委員会（委員長：筆者（大熊武司）、平成4年10月～平成11年3月）」が設置され、①局地風の実体把握と構造の解明、②局地風の実用的解析予測手法、③送電設備の風応答特性の把握と合理的な設計手法の確立を主な課題として研究が開始された。本研究プロジェクトでは、九州試験線（既設66kV送電線）、四国試験線（3基2径間、500kV送電線）による風および風応答観測（Photo 1 参照）とその分析、地形影響を評価するための数値流体解析コードの開発、鉄塔・架渉線連成系の動的応答解析手法の開発、および等価静的風荷重算定法の検討を行った。これらの成果は、既存の設計法を補完す

Photo 1 Shikoku Test Line

るものとして「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」¹⁾にまとめられた。

引き続き、上記指針案の一般地形への拡張、より合理的な設計手法の確立を目指して、「耐風設計合理化委員会（委員長：筆者（大熊武司）、平成11年度～平成13年度）」を設置し、研究活動を継続した。本委員会では、風向別風速の導入、風荷重評価法の精緻化（風荷重の組み合わせ法）を中心に検討が行われた。また、数値流体解析コードや風荷重評価式の信頼性を保障するために、2山地形周りの気流場の測定（Photo 2）や、架渉線風応答に関する風洞実験・フィールド実験（Photo 3）を実施し、バックデータの蓄積に努めた。さらに、一連の成果を取りまとめ、局地風指針案の適用範囲を拡大した「送電用鉄塔の風荷重指針（案）・同解説」²⁾を策定した。

3. 「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の基本的考え方

3. 1 特徴²⁾

本指針案の技術的な特徴は以下の通りである。

¹⁾ 神奈川大学工学部建築学科 教授
Professor, Kanagawa University

²⁾ （財）電力中央研究所 地球工学研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

(Two-dimensional hills)

(Three-dimensional hills)

Photo 2 Measurements of turbulent flow

(Wind Tunnel Test)

(Field Test)

Photo 3 Measurements of cable gust response

- ① 技術基準の性能規定化，国際化ならびに技術環境のコンピュータリゼーションの進展に配慮した。
- ② 最新の統計データ，シミュレーション技術を活用して風向別基本風速を策定するとともに，ガスト影響係数法に基づく荷重評価体系とした。
- ③ 数値シミュレーション技術を積極的に導入し，その適用にあたっての留意点を整備した。

Fig.1 に本指針案の風荷重算定フローを示す。また，以下に，設計風速，設計用風荷重の算定における基本的考え方を概説する。

Fig.2 Fig.1 Flowchart of design wind load estimation

3. 2 設計風速²⁾

設計風速は，8 風向の風向別基本風速に当該地点の地表面粗度，小地形による増速効果および気象学的増速効果を考慮して，5 度ピッチ，72 風向定めるものとした。風向別基本風速の策定にあたっては，気象官署観測データの成因（台風と非台風）による区別，台風モデルを用いたモンテカルロ・シミュレーション，気象官署値とのキャリブレーションなどのアイディアを採用した。また，その再現期間は，「風向別に評価したことによる全体としての安全性については，従来と同程度のレベルを維持すること」を基本方針として定めた。

次に，小地形の影響評価については，数値流体解析の利用のほか，2 次元崖状地形の増速率データベースに基づく簡易増速率算定法を用意した。気象学的影响評価については，現状では取得可能なデータに限界があることから，具体的数値あるいは評価手順を明示することはできなかったが，実況に応じ，適切な調査研究に基づき，その影響を評価するものとした。

3. 3 設計用風荷重²⁾

設計用風荷重は，設計用速度圧に，風力係数，受風面積，ガスト影響係数を乗じて算定される。ここで，ガスト影響係数法の適用にあたり，構造特性の異なったサブシステム（鉄塔，架渉線など）で構成されていることに配慮する必要がある。本指針案では，鉄塔と架渉線の動的連成効果は小さいことを前提に，鉄塔風圧荷重，架渉線風圧荷重，がいしおよび架線金具風圧荷重，架渉線張力荷重に分類し，各々の風荷重を個別に評価するものとした。また各々の風荷重から水平角度による座標変換により，鉄塔軸に対する鉛直荷重，線路直交方向荷重，線路方向荷重を算定することにより，鉄塔設計への適用を考慮した風荷重評価法としている。さらに，鉄塔風圧荷重および各架渉線風荷重の変動成分の組み合わせ方法として，任意の風向，架渉状態に適用できる非同時性低減係数を定式化し，その値を適用した。

4. 結 び

本報告では，近年の送電用鉄塔の耐風設計法に関する研究動向と「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の概要について紹介した。現在，実務的な観点から簡便法の構築，設計省力化ツールの整備を進めている。

謝辞

本研究を実施するにあたりご指導，ご助言いただいた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大熊武司他，特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究（その 1）局地風対策研究成果の取りまとめ，日本風工学会論文集，第 82 号，pp.39-48，2000
- 2) 大熊武司他，風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究－「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の骨子－，日本風工学会論文集，第 98 号，pp.137-150，2004

風向および地形影響を考慮した設計風速算定法

Design wind speed estimation method considering wind direction and topographic effect

○中村 秀治¹⁾

山崎 智之²⁾

石川 智巳²⁾

田中 伸和²⁾

Hideharu NAKAMURA¹⁾

Motoyuki YAMAZAKI²⁾

Tomomi ISHIKAWA²⁾

Nobukazu TANAKA²⁾

1 はじめに

送電用鉄塔の合理的耐風設計法の確立のためには、建設地点の風の風向特性と地形による影響を考慮した設計風速の算定法を確立することが重要となる。ここでは、耐風設計合理化委員会¹⁾で検討した設計風速の算定式と風向別基本風速の概要、および小地形による風速の割り増し係数について最近の検討を含め報告する。

2 設計風速の算定式

設計風速の算定にあたっては、風向に敏感な送電用鉄塔の特性を踏まえ、8風向の風向別基本風速に当該対象地点の地表面粗度、小地形の影響および気象学的増速効果を考慮して5度ピッチ、72風向定めることとした。

設計風速 U_R は、基準高さ z_R における10分間平均風速を表し、次式に示すとおりとした。

$$U_R = k_1 k_2 E U_0 \quad (1)$$

ここに、

U_0 : 建設地点から10km程度風上の風向別基本風速[m/s]
で、8風向別に設定(1風向45度内は一定値)。

k_1 : 鉄塔の基準高さ位置における小地形による風速の割り増し係数を表し、5度ピッチ、72風向別に設定。

k_2 : 気象学的要因による風速の割り増し係数で、8風向別に設定。

E : 風速の鉛直分布係数で、建設地点対象風向の地表面粗度に応じて定める(8風向別に設定)。なお、地表面粗度区分は、対象風向前方1~2km程度の風上側の状況を考慮して定める。

3 風向別基本風速

風向別基本風速 U_0 は、直近の地形による影響が k_1 により評価されること、風向特性を考慮することを勘案して、次のように定義した。

①粗度区分Ⅱ、地上高10mの10分間平均風速

②8風向別とし、風向別再現期間150年に対する風速、ただし、全風向再現期間50年に対する風速を上限とする。

③10km四方程度を代表する風速(大規模な地形影響を考慮)

ここに、上記で定義した風向別再現期間150年は、対象地点の風向特性と送電用鉄塔の荷重効果から、鉄塔部材の設計軸力に対して年超過確率0.02(従来と同程度の

レベル)を目標として定めたものである。また、10km四方程度を代表する風速としたのは、建設地点を中心とした10km四方程度の領域においては、小地形による割り増し係数 k_1 で考慮し、それよりも遠方あるいは大規模な地形の影響については、基本風速として配慮していることを明確にするためである。

風向別基本風速に関しては、風向別基本風速マップを用意することとした。マップの作成にあたっては、まず送電線の張力が気温の影響を顕著に受けることを踏まえ、全国の気象官署の観測値を高温季、低温季に分類した。次に高温季にあつては成因別(台風と非台風)に整理するとともに、台風データについては、台風シミュレーションによる値を気象官署の観測値でキャリブレーションする方法を提案し、気象官署位置の風向別基本風速を求めた。さらに、風向別に大規模地形の影響を考慮するため、風洞実験²⁾により精度を確認した k - ϵ モデルによる気流解析³⁾から得られる平均風速の水平方向分布を気象官署間の内挿に用い、気象官署の基本風速とのフィッティングとスムージング処理を行うことにより、マップ化を図った。ただし、上述の解析方法では、大気の温度勾配やコリオリ力による風速への影響などは考慮されていないという課題を有している。

4 小地形による風速の割り増し係数

基本風速に考慮されていない数kmスケールの小地形による風速の割り増し係数 k_1 の評価は、増速率図を用いて行うこととした。増速率図は、二次元崖状地形を対象に k - ϵ モデルによる気流解析を行い、地形周りの平均風速の水平方向分布を入口部の風速分布で除し、入口風速に対する対象地点の風速の倍率として、コンタを描くことにより作成した。気流解析の条件は、斜面の高さ H を200m、入口風速は地表面粗度区分Ⅲのプロファイル、地表面粗度区分をⅢ、水平格子間隔は斜面部水平距離の1/16とし、鉛直格子間隔は下層10メッシュを10m、それより上空10000mまでを20メッシュに分割した。また斜面の種類は勾配5度から60度まで5度刻みの12ケースとした。地形のモデルをFig.1に、気流解析によって求めた増速率図($\theta=40deg$)の例をFig.2に示す。解析結果では、斜面入口部では淀み域が生じて減速し、崖上のエッジ部分では、ごく一部に2.0以上の大きな増速率が

¹⁾ 広島大学大学院 工学研究科 教授
Professor, Hiroshima University

²⁾ (財)電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

生じているが、1.0未満は増速率1.0に、2.0を超える場合は増速率2.0に補正して解析結果を用いた。これは、風速の割り増し係数 k_f では増速のみを評価し、また、2.0を超える極端に大きな値は、シャープなエッジを有する解析モデルを用いた数値解析上の値であるという認識によるものである。

Fig.1 Topographic model for single slope

Fig.2 Speed-up ratio for single slope

増速率図の適用にあたり、地形の状況によっては単一の斜面で評価しがたい場合、特に風上側に斜面が複数存在する場合に、地形をどのように評価すべきか、という問題に直面する。これまで、二つの斜面を有する地形(以下、複合斜面という)の k_f は、直近の二つの斜面の各々の増速率の積により評価するものとしていた。しかし、気流解析によって求めた k_f に比べて過大評価を与えることから、複合斜面による増速率図を作成することとした。複合斜面のモデル化にあたり、二つの斜面の勾配 θ_1 , θ_2 と水平距離 L_{x1} , L_{x3} , および斜面間の距離 L_{x2} が主なパラメータとなる。検討した地形のパラメータとその設定値をTable 1に示す。気流解析の条件は、二つの斜面の高さの和 H を200m、地表面粗度区分をⅢとし、解析メッシュは二斜面のスケールとその組み合わせに応じて適切に定めた。複合斜面の地形モデルをFig.3に、求めた増速率図($\theta_1=\theta_2=40deg$)の例をFig.4に示す。

Table 1 Values of topographic parameter

parameter	value
$\theta_1(deg)$	5,10,15,20,25,30,35,40
$\theta_2(deg)$	5,10,15,20,25,30,35,40
L_{x2}/L_{x3}	1/4,1/2,1,2,4
L_{x1}/L_{x3}	1/4,1/2,1,2,4
L_{x2}/L_{x1}	1/16~16

Fig.3 Topographic model for double slopes

Fig.4 Speed-up ratio for double slopes

求めた単斜面および複合斜面の増速率図は、設計に活用することを目的に、データベース化を図るとともに、任意の地点の k_f を求めるためのツールを作成した。このツールは、50mメッシュの地形データを準備し、緯度、経度および構造物の基準高さを入力することで、風上側の斜面を評価し、適合する増速率データベースを参照することにより、水平方向5度刻みの k_f を算定するものである。本ツールによって算定された k_f は、実地形による気流解析結果との比較により、概ね妥当な値を与えることを確認した。なお、本手法は、風上側の地形を二次元崖状地形と仮定して k_f を求める簡便な手法である。このため、風上側地形による遮蔽の影響や三次元の影響、および凹凸による境界層の発達の影響などを詳細に評価したい場合は、気流解析や観測などによるべきである。

5 結び

送電用鉄塔の設計合理化を目的とした設計風速の算定式、風向別基本風速の概要、および二次元崖状地形の気流解析データベースを用いた小地形による風速の割り増し係数の評価法について報告した。

謝辞

「耐風設計合理化委員会(平成11年4月~平成14年3月)」、「耐風設計実用化検討会(平成14年4月~平成17年3月)(大熊武司委員長(神奈川大学))の関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大熊武司, 中村秀治, 石川智巳, 本郷栄次郎, 渡辺敏緒, 篠田明秀, 北嶋知樹: 風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究-「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の骨子-, 風工学論文集, 第98号, pp.137-150,2004.1
- 2) 中村秀治, 石川智巳, 大熊武司, 田村幸雄, 田中伸和, 北嶋知樹: 風向別基本風速マップ作成の試み, 日本風工学論文集, 第97号, pp.121-136,2003.10
- 3) 南 浩二, 老川 進, 服部康男, 漆原育男, 石原 孟, 中村秀治, 田中伸和: 風洞実験による2山地形周りの乱流特性に関する検討, 日本風工学論文集, 第98号, pp.105-115,2004.1

鉄塔・架渉線連成系の風荷重評価法の概要と観測値との比較による検証

Wind loads evaluation method for transmission tower-conductor system and verification results

○石川 智巳¹⁾ 橋本 純也¹⁾
Tomomi ISHIKAWA¹⁾ Junya Hashimoto¹⁾

1. はじめに

風向別風速と送電線路の構造特性を考慮した耐風設計を実現するためには、任意の風向に対する風荷重を精度良く評価できなければならない。すなわち、風向に応じた鉄塔・架渉線連成系の動的効果を考慮できる必要がある。このため、著者らは、ガスト影響係数法に基づき鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、張力荷重といった個々の風荷重評価式を提案¹⁾した。さらに、理論的、実験的考察に基づきこれらの荷重の組み合わせ方法を開発し、より実況に応じた風荷重評価が可能となった。

本報告では、本風荷重評価法の特徴を述べるとともに、四国試験線観測値との比較検証例を示す。

2. 設計用風荷重の分類

本風荷重評価法では、風荷重を鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重に分類した (Fig.1 参照)。これらの風荷重は、ガスト影響係数法により算定することを基本とし、風に対する構造物の最大応答値と同じ荷重効果をもたらす静的な風荷重として与えられる。さらに、これらの荷重から、水平角、高低差の補正を行い鉄塔軸に対する鉛直方向荷重、線路直交方向荷

重、線路方向荷重を算定することにより、鉄塔設計に適用するものとした。

3. 設計用風荷重の組み合わせ

各風荷重について、鉄塔軸に関する座標変換を行い、平均成分についてはベクトル和、変動成分については絶対値和を求め、両者を組み合わせることにより、設計に必要な荷重が算定される。このとき、各風荷重の変動成分については、それらの最大値が同時に作用しないことを考慮するため、非同時性低減係数が乗じられる。ここで、非同時性低減係数は、理論的考察から誘導した各荷重間の相関係数に基づき定めている。

4. 本評価法の妥当性検証

以上に述べた風荷重評価法の妥当性検証を目的に、四国試験線 (3 基 2 径間) における過去の主要な台風による張力、軸力などの応答観測値と各台風時の乱流統計量を入力値とした本評価法による計算値の比較を行った。一例として、台風 9807 号、台風 9810 号時の南側老番 C2 電線における架渉線風圧荷重の最大値、ガスト影響係数の比較結果を Fig.2 に、架渉線張力荷重の最大値の比較結果を Fig.3 に示す。また、台風 9426, 9514, 9798, 9719, 9810,

¹⁾ (財) 電力中央研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry

Fig.2 Wind force of cable

Fig.3 Tension Force of cable

Fig.4 Axial Force of main leg member

9905 号時の最大風速計測時の 10 分間データ対象に、中央鉄塔最下節主柱材圧縮軸力の比較した。その結果を Fig.4 に示す。ただし、架渉線荷重の比較に用いた入力値は、風観測結果に基づき、台風 9807 号時、乱れの強さ 0.2、吹き上げ角 15 度、台風 9810 号時、乱れの強さ 0.3、吹き上げ角 20 度とし、平均風速によらず一定とした。一方、最下節主柱材軸力比較に用いた入力値は、中央鉄塔頂部超音波風速計の平均風速、風向で代表させ、平均風速のべき指数をゼロとした。なお、ディケイファ

クタは 10、乱れの強さは日本建築学会建築物荷重指針に従った。

これらの結果から、架渉線風圧荷重の最大値およびガスト影響係数の観測値と計算値は、台風 9807 号時には較的よく一致しているが、台風 9810 号時には観測値方が若干大きめの評価となっている。これらの傾向は、渉線張力荷重についても同様であった。この原因とし、台風 9810 号時の風は、台風 9807 号時に比べ、乱れ強さ、吹き上げ角が比較的大きく、変動風速の 2 乗項影響や地形による風の非定常性の影響が考えられる。実、特に示していないが台風 9810 号時には、風圧荷重、張力荷重とも正規分布から大きくずれており、張力荷重についてはピークファクタも大多数が 5 以上であった。このように、提案した評価式は、多くの場合設計としてよい評価値を与えるものの、台風の種類や地形によっては誤差を生じる場合があり、この点については後の課題である。

一方、最下節における主柱材圧縮軸力については、計値の方が若干小さめの評価を与えるものの、全体の傾としては概ね一致することが確認された。観測値と計値に差異が生じた原因としては、風の乱流統計量の情不足のため、入力値として中央鉄塔の観測値で代表されたこと、昇降機レールや各種計測機器およびケーブルなどの付帯設備を無視したこと等が考えられる。以上のことを考慮すれば、今後ともデータの充実、比較例の蓄を図る必要があるが、本風荷重評価法は実用的な精度有していると考えられる。

結 び

本報告では、風向に応じた鉄塔・架渉線連成系の動的果を考慮した風荷重評価法の特徴を紹介した。また四試験線観測値と本風荷重評価法による計算値を比較、その妥当性を明らかにした。

辞

本研究は、「耐風設計合理化委員会（平成 11 年 4 月～平成 14 年 3 月）」、「耐風設計実用化検討会（平成 14 年 4 月～平成 17 年 3 月）」（大熊武司委員長（神奈川大学））において実施したものである。本研究を実施するにあたりご指導いただいた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 大熊武司, 中村秀治, 石川智巳, 本郷栄次郎, 渡辺敏緒, 篠田明秀, 北嶋知樹: 風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究—「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の骨子—, 日本風工学論文集, 第 98 号, pp.137-150, 2004.1

台風0221号下の強風による送電用鉄塔の風応答解析

Wind Response Analyses of Transmission Towers to the Strong Wind under Typhoon 21st, 2002

大石 祐司¹⁾ 〇北嶋 知樹²⁾ 三上 康朗²⁾ 山崎 智之³⁾
Yuji OHISHI¹⁾ Tomoki KITASHIMA²⁾ Yasuo MIKAMI²⁾ Motoyuki YAMAZAKI³⁾

1. はじめに

平成14年9月27日に発生した台風21号は、関東地方に上陸した台風としては戦後最大級と言われ、銚子地方気象台では10月1日21時20分に昭和12年の統計開始以来、観測史上最大となる52.2m/sの最大瞬間風速を記録した。この台風により茨城県潮来市で東京電力の送電用鉄塔(275kV香取線および66kV湖南線)10基が損壊した(図1)。このため東京電力では直ちに事故調査委員会を設置、学識経験者の参画を得て、原因調査を行った。その結果、アーク痕の存在や目撃情報、鉄塔基礎部の引き揚げ変位の発生状況などから、最初に倒壊したのは香取線No.22であると判断された。また同鉄塔の倒壊原因は基礎の引き揚げ耐力が設計耐力を下回っていたためと推定され、これは当該鉄塔に採用されていた基礎形式(井筒基礎)と現地地盤に起因する固有の問題であること、他鉄塔は香取線No.22鉄塔倒壊によって二次的に倒壊・折損したことが明らかにされた。この原因調査の過程において「局地風対策研究推進委員会」¹⁾および「耐風設計合理化研究委員会」²⁾の研究成果を活用し、鉄塔・基礎に作用した応力を評価したので、本稿ではその概要について紹介する。

図1 被害発生箇所

2. 風速データの分析

2.1 被害箇所および風向風速計の設置箇所

損壊事故当時の風速データが被害箇所近傍の鹿島線No.177鉄塔に設置された風速計で得られている。位置関係を図2に示す。被害箇所の風上となった南側には水田、湖が広がっている。

2.2 観測結果概要

(1) 風向風速記録

鹿島線No.177風速計(風車型風向風速計、設置高さ68.5m、サンプリング時間0.25秒)で観測された風向(16方位)・風速データを図3に示す。事故直前の主風向は南であり、観測記録中の最大瞬間風速は、21時12分に観測された56.7m/sであった。

図2 事故箇所と風速計の位置関係³⁾

図3 鹿島線No.177風向風速計データ

¹⁾東京電力(株)工務部送電グループ

Overhead Transmission Group, Power System Engineering Department, Tokyo Electric Power Company(TEPCO)

²⁾東京電力(株)工務部送変電建設センター

Transmission & Substations Construction Center, Power System Engineering Department, TEPCO

³⁾東京電力(株)工務部(財団法人電力中央研究所出向)

Power System Engineering Department, TEPCO

図4 鹿島線No.177風向風速計の時刻歴データ

(2) 統計的性質

図4に事故直前の風向，風速時刻歴波形を示す。21時5分過ぎに停電による欠測がある以外は，機器は概ね正常に稼働していたと推定される。図4のSample毎に風速変動の統計的性質を分析した。結果，平均風速は約33m/s～39m/sで，最大瞬間風速が観測されたSample3の平均風速が最も高く39.0m/sであった。ガストファクタは概ね1.5で，ピークファクタはSample1を除き3.0に近い値であった。乱れ強さは，Sample1は0.23，他は0.16～0.18程度である。乱れスケールはSample1は335m，他は100m～150m程度であった。

(3) 風速変動のスペクトル特性

図5にSample毎の風速変動のパワースペクトル密度を示す。同図には，スペクトルピーク付近を最も良く近似するように求めたKarman型スペクトルも合わせて示した。

図5 風速変動のパワースペクトル密度

3. 台風シミュレーションと風観測データの比較

鹿島線No.177で得られた風向風速データの妥当性確認等を目的として台風シミュレーションを実施した。

3.1 台風シミュレーション方法

台風中心から500km以内に存在する気象官署の海面気圧データを収集し，Schloemerの気圧分布式とBlatonの式により傾度風の風速を求めた。⁴⁾ 地上風の風向，風速を算定は石原ら⁵⁾の提案している強風時の大気境界層における鉛直分布特性の数値モデルを使用した。

3.2 台風シミュレーション結果

(1) 傾度風の風向・風速分布

21時10分における水平方向の分布図を図6に示す。台風進行方向の右側領域では風速45m/s以上の極大域が被害箇所(×印)付近に認められる。

(2) 観測との比較

シミュレーションと鹿島線 No.177 鉄塔地点とを比較して，図7に示す。シミュレーションから得られた風速，風向およびその変化傾向は観測と良く一致していることが確認できた。

図6 傾度風の風向・風速分布 (21:10)

図7 風向・風速の比較 (鹿島線No.177)

4. 気流解析による風速推定

4.1 解析方法

被害箇所の風速推定のため、I-wind⁶⁾を用いて気流解析を実施した。解析条件を表1に示す。解析にあたり地表面粗度は土地利用データに応じて図8のとおり設定した。

4.2 解析結果

解析の結果、以下のことが確認できた。なお解析結果は鹿島線No.177 風速計位置において Sample3 観測値（平均風速 39m/s, 乱れ強さ 0.16）に一致するよう補正してある。

(1) 平均風速

平均風速分布を図9に示す。解析領域の右側で粗度による減速が認められる。鹿島線No.177 鉄塔および香取線No.22 鉄塔地点の平均風速の鉛直プロファイルを図10に示す。風上側が湖となるNo.22 鉄塔はNo.177 鉄塔に比べ、高さ 50m（≒鉄塔高さの 2/3；基準高さ）で約 2m/s 大きい結果となった。

(2) 乱れ強さ

鹿島線 No.177 鉄塔と香取線 No.22 鉄塔地点の乱れ強さの解析結果を図11に示す。地上 50m付近では、香取線 No.22 鉄塔地点の乱れ強さは、鹿島線 No.177 鉄塔に比べ 0.02 程度小さい。

表1 解析条件

項目	条件
入力風	風向 S
	V10(粗度Ⅱ) 28.6m/s
	傾度風高さ 350m(地表面粗度Ⅱ)
解析中心	緯度 35° 36' 04"
	経度 140° 36' 48"
解析領域	水平 7km×6km
	鉛直 10km
	地表面粗度 土地利用データにより個別設定
メッシュ幅	水平 50m
	鉛直 100mまで10m, 10kmまで対数20分割

図8 解析領域の地表面粗度設定

図9 平均風速水平方向分布（高さ 10m, 補正前）

図10 鹿島線No.177 と香取線 No.22 の平均風速

図11 鹿島線No.177 と香取線No.22の乱れ強さ

5. 等価静的風荷重算定および応力解析

「送電用鉄塔の風荷重指針(案)・同解説, 2002 年 6 月, 電力中央研究所 (以下, 風荷重指針案)」²⁾ により各鉄塔の等価静的風荷重算定および鉄塔・基礎の応力解析を行い, 設計耐力と比較した。

5.1 風の性状の設定

等価静的風荷重算定に用いた風の性状を表2に示す。平均風速および乱れ強さについては, Case1: 鹿島線 No.177 観測値 (高さ68.5m) 基準とした場合および Case2: 香取線No.22鉄塔地点解析値 (高さ50m≒鉄塔高さの2/3) を基準とした場合の2ケースとし, 風荷重指針案の粗度Ⅱの $\alpha=0.15$ を用いて鉛直プロファイルを設定した。乱れスケールおよびディケイファクタは風荷重指針案に基づいた。

5.2 検討風向

検討風向は南風($180^\circ \pm 20^\circ$, 5° 刻み: 図 12 参照) とし, 実線路走向を考慮して荷重・応力を解析した。

5.3 検討結果

鉄塔・基礎の応力は Case2 が Case1 を 4~6%程度上回った。主柱材軸力が最大となる風向は, No.22: 180° , No.25: 170° , その他: 160° 風向であった。No.22, 23 の風向と応力比との関係を図 13 に示す。線路直交風向 (約 170°) に対し, 風向が (長径間側に) 約 10° シフトした際に最大値となっていることが確認される。No.22 の部材圧縮軸力(Case2)を送電用支持物設計標準 (JEC127-1979)⁷⁾ に基づく解析値 (基準速度圧 125kgf/m^2) と比較して図 14 に示す。これより, 部材軸力が部材強度 (JEC127-1979 に基づく公称座屈強度) を下回っていることが確認できる。No.22 基礎の最大引揚反力 (約 1700kN) は設計地盤降伏支持力の約 70%の値であった。

表 2 風荷重解析に用いた風のプロファイル

検討ケース	Case1	Case2
平均風速 U_z	$39 \cdot (Z/68.5)^{0.15}$	$39 \cdot (Z/50)^{0.15}$
乱れ強さ I_z	$0.16 \cdot (Z/68.5)^{-0.20}$	$0.15 \cdot (Z/50)^{-0.20}$
乱れスケール L_z	$100(Z/30)^{0.5}$	
ディケイファクタ	$k_y=k_z=10$

図 12 検討風向

図 13 風向と主柱材軸力との関係 (最大値基準)

図 14 No.22 鉄塔強度検討結果

6. 動的応答解析

時刻歴風応答解析プログラム TC-DAS[®]を使用して被害箇所の鉄塔-架渉線連成系の動的応答解析を実施し、挙動を確認するとともに等価静的風荷重に基づく応力解析結果と比較した。

6.1 解析概要

解析対象範囲は、No.20～25 鉄塔を考慮した 6 基 7 径間とし（図 15 参照）、No.19 および No.26 鉄塔側架渉線の支持条件はピン支持とした。鉄塔・架渉線のモデルおよび境界条件は表 3 のとおり。材料は弾性モデルで幾何学的には線形モデルとした。減衰定数は鉄塔：線路直交方向 1 次固有振動数に対し 2%，電線：1Hz で 0.4%とした。解析は 10 分間×6 回とし、アンサンブル平均により応答の変動値を算定した。入力風の統計的性質は 5.1 項に示す Case1，風向は南（180°）とした。

表 3 鉄塔および架渉線モデルと境界条件

鉄塔 (立体骨組)	主柱材：梁要素（⇒剛）
	腹材：トラス要素（⇒ピン）
架渉線	基部-地盤：固定（⇒剛）
	トラス要素（径間内 30 要素） ※電線は 4 導体と等価剛性を有する単導体へ簡略化，平均風力に対しては幾何非線形を考慮
がいし連	トラス要素（片側 3 要素）

6.2 解析結果

解析の結果，以下が確認された。

- 鉄塔頂部変位のリサージュ図で最も変位が大きいのはNo.22鉄塔の約60cmであった。この値は鉄塔高に対する比率では0.9%に過ぎない（図16）。
- 主柱材の解析値は等価静的手法による値とほぼ同等となった。腹材は動的解析値が等価静的手法による値を若干上回った。（図17）
- No.22鉄塔の部材軸力，基礎反力の解析値はいずれも設計耐力を下回る結果であった。

7. まとめ

以上，台風 0221 号による鉄塔損壊事故の原因調査の過程で実施された風応答解析の結果について述べた。この強風により，倒壊の起点となった香取線No22 鉄塔・基礎に作用した応力は，設計耐力より低い値であった。なお，倒壊は基礎の引き揚げに対する実耐力が設計引き揚げ耐力を下回っていたことが原因と判断されており，東京電力では本調査結果に基づき，現存する同種の基礎全てについて地盤の再調査および耐力評価を行い，必要な補強を実施済みである。

謝辞

本稿は 275kV 香取線他の倒壊に伴い，東京電力が設置した事故調査委員会で検討された内容の一部を紹介

図 15 鉄塔 6 基の立体骨組モデル

図 16 No.22 鉄塔頂の変位履歴 (m)

図 17 No.22 動的解析結果（左：主柱材，右：腹材）

介したものである。同委員会に顧問として参加頂いた國生剛治教授（中央大学）、田村幸雄教授（東京工芸大学）、内藤玄一教授（防衛大学校）、前田潤滋教授（九州大学大学院）および山岸啓利氏（日本鉄塔協会）には多数の貴重な意見をいただいた。また動的解析にあたっては丸川・安井両氏（泉創建エンジニアリング）の協力を得た。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 大熊武司, 田村幸雄, 山岸啓利, 中村秀治, 石川智巳, 本郷榮次郎, 箕田義行, 特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究（その1）局地風対策研究成果のとりまとめ, 日本風工学会誌 第82号, 2000.1
- 2) 大熊武司, 中村秀治, 石川智巳, 本郷榮次郎, 渡辺敏緒, 篠田明秀, 北嶋知樹: 風向別風速を用いた送電鉄塔の耐風設計法に関する研究ー「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の骨子ー, 日本風工学会誌 第98号, 2004.1
- 3) 平成13年7月1日 国土地理院発行 50,000分の1 地形図: 潮来 (縮小)
- 4) 光田寧, 藤井健: 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第29号B-1, 1986.
- 5) 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, 日本風工学会誌 第66号, 1996.1
- 6) 中村秀治, 田中伸和, 中園信, 松山彰, 友延伸幸: 特殊地形における送電用鉄塔・架渉線連成系の耐風設計に関する研究（その2）特殊地形の簡易判定法と気流シミュレーションに基づく設計風速の算定法, 日本風工学会誌 第82号, 2000.1
- 7) 電気学会: 電気規格調査会標準規格, 送電用支持物設計標準JEC-127-1979
- 8) 安井八紀, 丸川比佐夫, 大熊武司: 送電用鉄塔の風応答解析, 日本風工学会誌 第76号, 1998.7