研究報告

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－

Studies on Wind Resistant Design Using the Directional Basic Wind Speed

－ Recommendations for Wind Loads on Transmission Towers : A Draft －

大熊武司*1

中村秀治*2

石川智巳*3

本郷榮次郎*4

Takeshi OHKUMA, Hideharu NAKAMURA, Tomomi ISHIKAWA, Eijiro HONGO

渡辺敏緒*5

篠田明秀*6

北嶋知樹*4

Toshio WATANABE, Akihide SHINODA, Tomoki KITASHIMA

SUMMARY

Transmission towers are considered to be designed with enough wind-resistant performance, however, it is necessary to re-examine the current estimation methods from both points of design wind speed and wind load to rationalize the tower design and to improve the structural integrity. Wind resistant rationalization committee (FY1999-FY2001), organized by Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI), promoted the studies on directional basic wind speed and equivalent static wind load estimation following the previous committee on wind resistant design method for local winds effected by topography (FY1992-FY1998). The purpose of this paper is to describe the summary of the investigation results of the wind resistant rationalization committee and to show the outline of "Recommendations for wind loads on transmission towers - a draft (2002)".

Key word: wind-resistant design, transmission tower, directional basic wind speed, wind load

1. はじめに

平成3年の台風19号は日本列島を縦断し甚大な被害を建築物等にもたらした。電力設備もまた、西日本地域において、送配電設備を中心に甚大な被害を被った。このため、直ちに資源エネルギー庁公益事業部内に「電力設備台風被害対策特別委員会」、および電気事業連合会内に「流通設備風害対策特別委員会」が設

置され、台風被害の原因の究明および今後の対応策について検討がなされた。

検討の結果は、「流通設備風害対策特別委員会報告書」に取り纏められ、送電用設備については下記3課題に関する研究の必要性が指摘された。

- (1) 地形影響による局地的強風の実態を現地観測等により把握し、その発生機構と時間・空間構造を

*1 神奈川大学 工学部 建築学科 教授
Kanagawa University

*2 広島大学
Hiroshima University

*3 (財)電力中央研究所我孫子研究所
Central Research Institute of Electric Power Industry
(原稿受理：平成15年8月22日)

*4 東京電力株式会社
Tokyo Electric Power Company

*5 関西電力株式会社
Kansai Electric Power Company

*6 中部電力株式会社
Chubu Electric Power Company

解明する。

- (2) 著しく風の強まる特殊地形を対象に、風況を推定する実用的解析予測手法を確立する。
- (3) 現地観測・動的解析により、鉄塔・架渉線連成系の応答特性を把握し設計に反映させる。

これを受けて、電力 9 社および電源開発、学識経験者、電力中央研究所により「局地風対策研究推進委員会」（大熊武司委員長（神奈川大学）、平成 4～10 年度）が設置され、送電設備の合理的耐風設計法の確立に供すべく、以下の基本方針に基づいて「特殊地形における送電用鉄塔の風荷重指針（案）」（以下、局地風指針（案）と呼ぶ）^{1)~4)}を取りまとめた。

- (i) 技術基準の性能規定化、国際化ならびにコンピュータリゼーションの進展に配慮する。
- (ii) 風荷重は確率・統計的手法に基づく等価静的荷重として評価するが、動的応答解析により、直接、荷重を評価する手法も用意する。
- (iii) 設計用風荷重を定めるにあたっては、実況を伝えることを旨として、不明確な数値の割増しや低減あるいは無理な設定を避ける。
- (iv) 設計風速の評価は、今後の研究に待つところが大きい、原則として数値流体解析手法によることとする。

上記局地風指針（案）は、もとより限られた時間内での調査・研究活動による成果であったために課題も残された。そこで、同指針（案）の課題の解決、一層の合理化、使用性の向上を主な目的として、改めて同じメンバーによる「耐風設計合理化委員会」（大熊武司委員長（神奈川大学）、平成 11～13 年度）を設置した。本委員会では、局地風指針（案）を見直すとともに、適用範囲を一般地形にまで広げた検討を実施し、新たな検討結果を反映した「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」（以下、新指針（案）と呼ぶ）をまとめた。

新指針（案）の特徴は次の通りである。

- (1) 設計風速に風向特性を反映させるために「風向別基本風速」を導入した。風向別基本風速の定量化にあたっては、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等のアイデアを採用した。風向別基本風速の再現期間は、「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。
- (2) 設計風速の算定に必要な小地形の影響評価につ

いて、簡易増速率算定法と気流解析コードを整備した。特に、気流解析コードについては、風洞実験との比較を通じて、その精度を確認するとともに、多数の実地形シミュレーションを実施して、利用時の留意点を明らかにした。

- (3) 設計用風荷重算定法では、鉄塔および架渉線の風荷重の組み合わせにおいて、その変動成分の非同時性を考慮するために、非同時性低減係数を提案し、理論的検討により算定式を定めた。併せて、動的応答解析、実規模試験線による観測、風洞実験などにより風荷重算定法の妥当性を確認した。

本研究報告においては、以上の特徴を有する新指針（案）について、その全体構成、各章の要点（設計風速の算定方法、設計用風荷重の算定方法）について具体的に述べる。さらに国内外の既往の設計法の考え方の比較を通じて、相違点などを明確にする。

2. 送電用鉄塔の耐風設計合理化研究の概要

前述の通り局地風対策研究に端を発した送電用鉄塔の耐風設計合理化研究（平成 11～13 年度）は、現行の「送電用支持物設計標準」（以下、JEC-127）⁵⁾の見直しを視野に入れ、JEC-127 制定時以降蓄積された観測データ、解析技術の進歩、国内および諸外国の関連基準類の動向を念頭に置き、最新の知見を取り入れるべく検討を進めた。

耐風設計における風向別風速の採用という視点でみれば、土木・建築分野における技術指針類^{6)~9)}にも例が無く、現在、日本建築学会の建築物荷重指針の改定作業において、積極的に検討が進められている状況にある¹⁰⁾。一方、国外においても ASCE7-98¹¹⁾では建築物の幾何形状別に、Australian Standard^{12), 13)}では、ハリケーン地域を除く地域において、風向係数の導入という形で規定が見られる程度である。

このような現状に鑑み、送電鉄塔の耐風設計合理化と同時に、構造健全性の向上を図る上で、風向別基本風速の導入とガスト影響係数を用いた等価静的風荷重算定法の精緻化が不可欠との認識のもと、本合理化研究を実施した。

設定した課題は次の通りである。

（1）設計に用いる風速算定の合理化検討

a) 気象官署における風速データの統計処理

気象官署データ(1951-2000)をもとに、8 風向別再現期間値を算出する。また、各官署の風向毎に台風支配か季節風支配かを判断し、台風シミュレーションの活用を検討する。

b) 風向別基本風速マップの作成

気象官署位置においては風向毎に統計処理して求めた再現期間値に一致し、気象官署間の任意地点においては、風上側の10kmスケール以上の大きな地形による増速・減速効果が反映された8風向別の基本風速マップを作成する。

c) 局所の地形効果の考慮

風向別基本風速マップには反映されない10kmスケール以下の小地形による局所的増速、風向変化などについては、別途考慮する方法を検討する。また、おろしのような気象学的要因による地域的強風等についても個別に検討し、基本風速に対する割増しを検討する。

d) 気流解析コードと風洞実験の比較検討

設計風速の算定に、数値解析技術を積極的に活用するものとし、局地風研究で開発した気流解析コード「L-WIND」²⁾の実地形に対する解析精度を明らかにする。このため1山、2山模型に対する風洞実験結果と気流解析結果の比較検討を行い、地形後部の減速域まで含めた検証を行う。また、領域やメッシュサイズなど数値計算を精度良く実施するための留意事項を明らかにする。

e) 電力各社の現地観測データの活用を検討

電力各社の鉄塔位置での風観測データの中から、利用可能なデータを抽出し、設計風速算定法の妥当性検証に活用する。

(2) 設計風荷重算定の合理化検討

a) 架渉線の風応答に関する風洞実験

2基1径間、3基2径間架渉線(架線条件:耐張、懸垂の両方)モデルの風洞実験を行い、等価静的風荷重算定法の妥当性を主張するためのバックデータを取得する。

b) 赤城山麓での風応答に関するフィールド試験

冬季に季節風の強い赤城山麓で、3基2径間の架渉線風応答に関するフィールド模型実験を行い、自然風による風応答データを取得する。

c) 四国試験線における観測データの収集

「局地風対策研究推進委員会」(平成4~10年度)において、電力会社が建設し観測を開始した四国試験線での観測を3年間延長し、強風下での地形影響を受けた風構造および風応答データの収集を継続する。

d) 鉄塔・架渉線連成系の非同時性の検討

理論的検討と上記の実験値、実測値に基づく検討

を行い、鉄塔・架渉線連成系の風荷重の非同時性に関する定数等を定める。

(3) 「送電用鉄塔の風荷重指針(案)・同解説」の作成

a) 送電用鉄塔の風荷重算定法の取りまとめ

風向別基本風速をもとに、地形効果を考慮した設計風速を定め、等価静的風荷重に基づいて送電用鉄塔を設計する方法を体系化し、「送電用鉄塔の風荷重指針(案)・同解説」を取りまとめる。

b) 試設計による合理化効果の確認

新指針(案)による多数の試設計を行い、従来の設計と比較して、合理化効果を明らかにする。

(4) その他

風応答解析コード、気流解析コードを高度化する。また、設計者が新指針(案)を容易に利用できるよう簡易増速率算定ツール、等価静的風荷重算定ツールなどの設計者用支援ツールを整備する。

3. 「送電用鉄塔の風荷重指針(案)」の構成

新指針(案)は、4章で構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第1章 概要

新指針(案)は、特別高圧架空送電線のうち鉄塔の耐風設計に活用することを目的として、地域的な風向別の風況および送電線路の動的特性を考慮した合理的な設計用風荷重の算定法を示そうとするものである。本章では、用語、記号を定義するとともに、適用範囲において、標準的な2回線鉄塔を対象としていること、評価する荷重は、風によって生じる風圧荷重、架渉線張力荷重であり、固定荷重(自重、無風時の架渉線張力による水平角度荷重および鉛直荷重)は別途考慮する必要があることを明記した。また、Fig.1に示す風荷重算定フローにより、評価法の概要を示した。

本章の構成は以下の通りである。

1.1 本指針(案)の目的
1.2 用語
1.3 記号
1.4 適用範囲
1.4.1 対象支持物
1.4.2 対象荷重
1.5 風荷重算定の手順

第2章 設計風速の算定

本章では、設計風速の算定法と風荷重評価に必要な

乱流統計量について述べている。設計風速は、8 風向の風向別基本風速に当該対象地点の地表面粗度、小地形による増速効果および気象学的増速効果^{1), 2)}を考慮して、5 度ビッチ、72 風向定めることとした。風向別基本風速は、高温季、低温季別とし、計 16 種類のマップを用意した。小地形による増速効果については、2 次元地形による増速率図（割り増し係数 k_1 ）を用い、詳細検討が必要な場合には、気流解析を利用できるものとし

ている。さらに気流解析にあたっての留意事項を別途解説に示した。また、荷重評価に必要な、乱れの強さ、乱れのスケールについては日本建築学会建築物荷重指針・同解説⁶⁾（以下、建築物荷重指針と呼ぶ）に準じており、ディケイファクタは、四国試験線など独自に取得したデータに基づき定めている。

本章の構成は以下の通りである。

Fig. 1 設計用風荷重算定フローチャート
Flowchart of design wind load estimation

- 2.1 概要
- 2.2 設計風速
 - 2.2.1 設計風速の算定
 - 2.2.2 風向別基本風速
 - 2.2.3 小地形による割り増し係数 k_1
 - 2.2.4 気象学的影響による割り増し係数 k_2
- 2.3 その他の乱流統計量
- 2.4 数値シミュレーションによる設計風速の算定

第3章 設計用風荷重の算定

本章は、送電鉄塔および架渉線の風荷重算定法について述べており、構造物の規模効果、共振効果を考慮した等価静的風荷重について示した。等価静的風荷重の基本的考え方は、局地風指針（案）に準じているが、各種風荷重の非同時性低減係数を新たに提示し、荷重の精緻化を図っている。また、各種ガスト影響係数、非同時性低減係数については、今回の研究を通じて実施した各種実験結果との比較により、その信頼性の向上を図った。

本章の構成は以下の通りである。

- 3.1 概要
- 3.2 風荷重の分類
- 3.3 等価静的風荷重
 - 3.3.1 設計用速度圧
 - 3.3.2 鉄塔風圧荷重の算定式
 - 3.3.3 架渉線風圧荷重の算定式
 - 3.3.4 がいしおよび架線金具の風圧荷重の算定式
 - 3.3.5 架渉線張力荷重の算定式
- 3.4 風荷重の組み合わせ
 - 3.4.1 鉛直方向荷重・線路直交方向荷重・線路方向荷重
 - 3.4.2 非同時性低減係数

第4章 付則・・・動的応答解析

鉄塔設計においては、鉄塔の重要度、経済性などを勘案し、風の平均風速分布、乱れの強さの分布、鉄塔・架渉線の連成効果などを加味して発生応力度を詳細検討したい場合が生じる。これに対応して第4章では、付則として鉄塔設計に動的応答解析⁴⁾を用いることができることを述べている。さらに、解析手法として時刻歴応答解析、周波数応答解析があり目的に応じて適切に選択すること、解析コードの選択に関しては、精度の検証された解析コードを使用することなどを明記している。

- 4.1 動的応答解析
- 4.2 応答解析法の選択
- 4.3 解析コードの選択

4. 設計風速と設計用風荷重の算定

本章では、新指針（案）の本文の第2章、第3章を要約して示し、さらに補足的な説明を加えるものとする。

（1）設計風速

1) 設計風速の算定式

設計風速は、基準高さ z_R における10分間平均風速で、風向別基本風速を定めた8風向について、各風向内5度毎に次式により算定する。

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

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、風向別基本風速マップにより設定する。

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

k_2 : 気象学的影響による風速の割り増し係数

E : 風速の鉛直分布係数で、対象とする風向の地表面粗度に応じて式(1)、Table 1およびTable 2により定める。なお、粗度区分は、建設地点より前方1~2km程度の風上側の状況を考慮して判断する。

$$E = 1.7 \left(\frac{z_R}{z_G} \right)^\alpha$$

ただし、 z_R : 基準高さ[m]

z_G : 上空風高さ[m]

α : 平均風速の鉛直分布べき指数

Table 1 地表面粗度区分

Roughness categories

粗度区分	周辺地域の地表面の状況
I	・海上のようなほとんど障害物のない平坦地
II	・農作物程度の障害物のある田園地帯、草原等 ・樹木が散在している丘陵地 ・低層建築物が散在している平坦地
III	・山岳地と樹木が密集する丘陵地 ・低層建築物が密集する平坦地 ・中層建築物(4~9階)が散在している平坦地
IV	・中層建築物(4~9階)が主となる市街地
V	・高層建築物(10階以上)が密集する市街地

Table 2 z_G , α の値
 z_G and α -values

粗度区分	I	II	III	IV	V
z_G	250	350	450	550	650
α	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35

2) 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。

<風向別基本風速の定義>

- ・粗度区分Ⅱ，地上高 10m の 10 分間平均風速
- ・8 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。
- ・10km 四方位度を代表する風速（大規模な地形影響を考慮）

ここに，上記で定義した再現期間 150 年は，対象地点の風向特性と送電鉄塔の荷重効果から，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 四方位度を代表する風速とすることで，建設地点を中心とした 10km 四方位度の領域においては，小地形による割り増し係数で考慮し，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，基本風速に含まれていることを示している。

風向別基本風速の算定方法に関しては，気象官署観測値を成因別（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

を気象官署観測値でキャリブレーションする方法を提案した。この方法により，気象官署位置の風向別基本風速を求めた。さらに，風向別基本風速マップは，数十の気象官署が含まれる程度の領域で気流解析を行い，その平均風速の水平方向分布を気象官署間の内挿関数とし，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により策定した¹⁴⁾。得られたマップの一例を Fig.2 に示す。

なお，本手法は，現状で得られる限られた情報に基づき，積極的に大規模地形の影響を反映する方法として採用したものである。このため，温度勾配やコリオリ力の影響などの課題も残された。

3) 小地形による風速の割り増し係数 k_1

風向別基本風速マップに反映されていない数 km スケールの小地形による風速の割り増し係数 k_1 は，風上側 10km 程度前方から建設地点までの地形の状況から，斜面の高さ L_z ，斜面の水平距離 L_x ，算定高さ z を設定し，増速率図を用いて算定する。Fig.3 に増速率図の一例を示す。

本増速率図は，局地風指針（案）で特殊地形の判定

Fig. 3 増速率図（崖状地形，斜面勾配 20°）
Speed-up ratio(escarpment, slope angle:20°)

Fig. 2 風向別基本風速マップ（高温季，南風）
Directional basic wind speed map (high temperature season,South wind)

に用いた増速率図を、風洞実験¹⁵⁾により精度を確認した気流解析コード¹⁴⁾による解析結果で置き換えたものである。さらに、山岳内陸部などの様々な地形が複合する場合に対しても、その算定アルゴリズムを見直している。

なお、設計者支援を目的に、緯度・経度の入力のみで、5度ピッチの増速率が算定できる簡易増速率算定ツールを整備している。

4) 気象学的影響による割り増し係数 k_2

基本風速マップは、大規模な地形影響のみを考慮したその地域を代表する風速を示しているため、気象学的影響によって発生する局地風の類は反映していない。したがって、気象学的影響により耐風設計上配慮すべき強風の発生が知られている地域については、風速の割り増し係数 k_2 を設計風速に考慮することとした。ただし、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い。そこでこのような地域に建設する場合には、実状に応じた適切な調査研究に基づき、成因、風向、発生時期、風速レベルを分析し、 k_2 を定めることとしている。なお、現在、このような気象学的に顕著な増速効果が知られている局地風として、以下を提示している。

① やまじ風

愛媛県東部の伊予三島市周辺の南風

② 広戸風

岡山県北東部の奈義町、勝北町周辺の北風

③ 日高しも風

北海道日高山脈南西側一帯の北東風

④ 羅臼風

北海道知床半島南東側一帯の北西風

⑤ 寿都だし風

北海道寿都町周辺に位置する地峡帯の南風および南東風（寿都気象官署のデータは、基本風速マップ策定に利用せず）

なお、新指針（案）解説において、代表的な地形に対する理論的な考察と、やまじ風に対する詳細なシミュレーションの結果¹⁶⁾などから、 $k_2=1.3$ を参考値として示した。

5) 風荷重評価に必要な風の乱流統計量

風荷重評価に必要な風の乱流統計量

① 乱れの強さ (I_{uR})

② ディケイファクタ（水平横方向： k_x 、鉛直横方向： k_z ）

③ 乱れのスケール (L_{uR})

は、文献調査や九州・四国試験線の風・風応答観測結

果に基づき Table 3 で与えることとした³⁾。

Table 3 風の乱流統計量
Wind turbulence parameters

I_{uR}	k_x	k_z	L_{uR}
$0.1 \left(\frac{z_R}{z_G} \right)^{-\alpha-0.05}$	10	10	$100 \sqrt{\frac{z_R}{30}}$

6) 数値シミュレーションによる設計風速の算定

3)に示した小地形による割り増し係数は、2次元地形の解析結果に基づく増速率図によるため、地形の状況が複雑で、風向が大きく変化するような場合には、精度に限界がある。

このため新指針（案）では、建設地点周辺の地形の状況が複雑で、かつ重要度、経済性等の観点から精緻な検討を要すると判断した場合には、数値シミュレーションによる設計風速の算定を行うことができるものとした。ただし十分実績を有するか、または設計者が精度を検証した気流解析コードを使用し、解析条件を適切に設定して実施する必要があることを述べている。新指針（案）では、本研究を通じて開発検証を行った気流解析コードを推奨するとともに、風洞実験あるいは実地形における観測結果との比較結果を踏まえて、解析領域、メッシュサイズ、境界条件など解析上の留意点をまとめている。

なお気流解析は、膨大な解析時間が必要になるため、設計実務への適用にあたり計算の高速化が課題として残された。

（2）設計用風荷重の算定¹⁷⁾

新指針（案）に示した風荷重評価法では、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ている。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。またこれらの風荷重の組み合わせにおいては、新たに非同時性低減係数を提案し、風荷重の精緻化を図っている。

本風荷重算定法は、従来の荷重評価法に対して、座標変換など多少の煩雑さは増すものの、風向別設計風速に対応できる、すなわち任意の風向に対して荷重算定を可能としたため、架空送電線路の実挙動に即した精度の高い荷重算定法となっている。

Fig.4に、鉄塔風圧荷重（線路方向平均値： $\bar{P}_T^L$ 、変動

Fig. 4 風荷重の定義
Definition of wind loads

成分の最大値： P_T^L ，線路直交方向平均値： $\bar{P}_T^r$ ，変動成分の最大値： P_T^r ，架渉線風圧荷重（平均値： $\bar{P}_C$ ，変動成分の最大値： P_C ），架渉線張力荷重（平均値： $\bar{P}_h$ ，変動成分の最大値： P_h ），がいしおよび架線金具風圧荷重（平均値： $\bar{P}_g$ ，変動成分の最大値： P_g ）を例示する。また荷重を算定するうえでの鉄塔，架渉線に対する風向（鉄塔の場合 θ_r ，架渉線の場合 θ_c ），水平角（ θ ）を定義する。ただし下付括弧内の数字は，架渉線番号を表す。

1) 等価静的風荷重

以下に，新指針（案）における風荷重評価式を，具体的に示す。共通の記号として以下を定義する。

- q_R : 基準高さ位置における設計用速度圧[kgf/m²]
- I_{uR} : 基準高さにおける乱れの強さ
- L_{uR} : 基準高さにおける乱れのスケール[m]
- k_z : 鉛直横方向のディケイファクタ
- k_x : 水平横方向のディケイファクタ
- z_R : 基準高さ[m]（鉄塔：鉄塔高さの2/3，架渉線：弛度底位置における地表面からの架渉線高さに，弛度の1/3を加えた高さ，がいしおよび架線金具：架渉線取り付け高さ）

なお，風圧荷重算定に必要な風力係数と応力分担率については，いまのところ合理化できる程度の有効なデータがないため，ここではJEC-127に準じている。

a) 鉄塔風圧荷重

<平均成分>

$$\bar{P}_T^r, \bar{P}_T^L = q_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T \quad (2)$$

<変動成分の最大値>

$$P_T^r, P_T^L = q_R \left(\frac{z}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T (G_{RT} - 1) \quad (3)$$

ここに，

- z : 各パネル中心の地表面からの高さ[m]
- α : 平均風速の鉛直分布を表すべき指数
- C_T : 塔体（各パネル）および腕金の風力係数
- A_T : 塔体（各パネル）および腕金の受風面積[m²]
- n_T : 鉄塔風圧荷重の線路方向，線路直交方向の応力分担率
- G_{RT} : 鉄塔のガスト影響係数で，次式により算定する。

$$G_{RT} = 1 + 2g_T I_{uR} \frac{2 + 2\alpha}{2 + \alpha} \left(\frac{2}{3} \right)^\alpha \sqrt{B_T + R_T} \quad (4)$$

ただし，

$$B_T = \frac{1}{1 + 0.163 \left(\frac{k_z H}{L_{uR}} \right)^{0.709}}$$

$$R_T = \frac{\pi}{4h_T} S_T F_T$$

$$S_T = \frac{1}{1 + 0.334 \left(\frac{k_z H f_1}{U_R} \right)}$$

$$F_T = \frac{4(f_1 L_{uR} / U_R)}{\{1 + 70.8(f_1 L_{uR} / U_R)^2\}^{5/6}}$$

$$f_1 = 100 / H \quad (\text{鉄塔の1次固有振動数[Hz]})$$

$$g_T = \sqrt{2 \ln(600 \nu_T) + 1.2}$$

$$\nu_T = f_1 \sqrt{\frac{R_T}{B_T + R_T}}$$

ここに、

H : 鉄塔高さ[m]

h_T : 鉄塔の1次減衰定数 (臨界減衰比)

(鋼管鉄塔 : 0.01, 山形鋼鉄塔 : 0.02, コンクリート充填鋼管鉄塔(MC 鉄塔) : 0.01)

b) 架渉線風圧荷重

$$\langle \text{平均成分} \rangle \quad \bar{P}_c = q_R C_c A_c \kappa_c n_c \quad (5)$$

<変動成分の最大値>

$$P_c = q_R C_c A_c \kappa_c n_c (G_{RC} - 1) \quad (6)$$

ここに、

C_c : 架渉線の風力係数を表し、JEC-127 による。

A_c : 架渉線の受風面積[m²] (= $ld/2$)

d : 架渉線外径[m]

l : 径間長[m], ただし支持点高低差を有する場合は、支持点間距離とする。

n_c : 架渉線風圧荷重の応力分担率を表し、JEC-127 による。

κ_c : 架渉線に対する吹き上げ風の効果を考慮する係数を表し、次式で与える。

$$\kappa_c = \frac{1}{\cos \varphi}$$

ここに、 φ は吹き上げ角[°] ($\varphi \geq 0$)

G_{RC} : ガスト影響係数で、次式により算定する。

$$G_{RC} = 1 + 2g_c I_{uR} \sqrt{B_c}$$

ただし、

$$B_c = \frac{1}{1 + 0.140 \left(\frac{k_x l}{L_{uR}} \right)^{0.707}} \quad (\text{非共振係数})$$

ここに、

g_c : 架渉線風圧荷重のピークファクタを表し、 $g_c = 3.5$ とする。

c) がいしおよび架線金具の風圧荷重算定式

がいしおよび架線金具は、架渉線のカスト影響係数を適用できるものとし、次式により算定する。

$$\langle \text{平均成分} \rangle \quad \bar{P}_G = q_R C_G A_G \kappa_c n_c \quad (7)$$

<変動成分の最大値>

$$P_G = q_R C_G A_G \kappa_c n_c (G_{RC} - 1) \quad (8)$$

ここに、

C_G : がいしおよび架線金具の風力係数を表し、JEC-127 による。

A_G : がいしおよび架線金具の受風面積[m²]

d) 架渉線張力荷重

$$\langle \text{平均成分} \rangle \quad \bar{P}_h = \bar{h} \quad (9)$$

<変動成分の最大値>

$$P_h = 2g_h q_R n_c C_c d \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos^2 \varphi} \frac{H_0 + \bar{h}}{p(1 + 12/\lambda^2)} I_{uR} \sqrt{B_h} \quad (10)$$

ただし、

$$p = \sqrt{\left(q_R n_c C_c d \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 + \left(w_c - q_R n_c C_c d \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \right)^2}$$

$$B_h = \frac{1}{1 + 0.136 \left(\frac{k_x l}{L_{uR}} \right)^{0.719}}$$

$$\lambda^2 = \left(\frac{pl}{H_0 + \bar{h}} \right)^2 \frac{E_c A}{H_0 + \bar{h}}$$

ここに、

$$\psi : \text{架渉線の横振れ角} \left(= \sin^{-1} \left(\frac{q_R n_c C_c d}{p \cos \varphi} \right) \right)$$

E_c : 架渉線の弾性係数[kgf/m²]

A : 架渉線の断面積[m²]

w_c : 架渉線単位長重量[kgf/m]

H_0 : 無風時水平張力[kgf]

$\bar{h}$: 設計風速による水平張力増分[kgf]

g_h : 架渉線張力荷重のピークファクタを表し、 $g_h = 3.5$ とする。

2) 風荷重の組み合わせ

各風荷重の組み合わせは以下の手順で行う。また組み合わせの考え方の模式図を Fig.5 に示す。

① 架渉線に関する風荷重について、鉄塔軸（鉄塔軸とは、Fig.4 の線路方向および線路直交方向に関する座標系）に関する座標変換を行う。

② ①で求めた荷重に対し、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る。(Fig.5 参照)

Fig. 5 風荷重の組み合わせ法の模式図
Outline of wind load combination

③これらを足しあわせることにより、応力計算に対応した鉛直荷重、線路直交方向荷重、線路方向荷重を算定する。ただし、風荷重の変動成分は、それらが同時に最大値にはならないため、非同時性の影響を低減係数 ε により考慮する。(Fig.5 参照)

なお、安全側の評価として風上側と風下側の回線間には、非同時性に関する低減は考慮しないものとする。この時、鉛直荷重、線路直交方向荷重、線路方向荷重は、それぞれ次式により求められる。

<垂直荷重 H^z >

$$H^z = (\bar{P}_{h(1)} + P_{h(1)}) \tan \delta_{(1)} + (\bar{P}_{h(2)} + P_{h(2)}) \tan \delta_{(2)} \quad (11)$$

<線路直交方向荷重 H^r >

$$H^r = |\bar{P}_r^r + \bar{P}_{c(1)}^r + \bar{P}_{c(2)}^r| + \varepsilon_4 |P_r^r| + \varepsilon_1^r \varepsilon_2^r \varepsilon_3 \varepsilon_4 (|P_{c(1)}^r| + |P_{c(2)}^r|) \quad (12)$$

ただし、

平均成分：

$$\begin{aligned} \bar{P}_{(1)}^r &= (\bar{P}_{c(1)} + \bar{P}_{g(1)}) \cos \theta_{(1)} + \bar{P}_{h(1)} \sin \theta_{(1)} \\ \bar{P}_{(2)}^r &= (\bar{P}_{c(2)} + \bar{P}_{g(2)}) \cos \theta_{(2)} + \bar{P}_{h(2)} \sin \theta_{(2)} \end{aligned}$$

変動成分の最大値：

$$\begin{aligned} P_{(1)}^r &= |(P_{c(1)} + P_{g(1)}) \cos \theta_{(1)} + P_{h(1)} \sin \theta_{(1)}| \\ P_{(2)}^r &= |(P_{c(2)} + P_{g(2)}) \cos \theta_{(2)} + P_{h(2)} \sin \theta_{(2)}| \end{aligned}$$

<線路方向荷重 H^L >

$$H^L = |\bar{P}_r^L + \bar{P}_{c(1)}^L + \bar{P}_{c(2)}^L| + \varepsilon_4 |P_r^L| + \varepsilon_1^L \varepsilon_2^L \varepsilon_3 \varepsilon_4 (|P_{c(1)}^L| + |P_{c(2)}^L|) \quad (13)$$

ただし、

平均成分：

$$\begin{aligned} \bar{P}_{(1)}^L &= (\bar{P}_{c(1)} + \bar{P}_{g(1)}) \sin \theta_{(1)} - \bar{P}_{h(1)} \cos \theta_{(1)} \\ \bar{P}_{(2)}^L &= -(\bar{P}_{c(2)} + \bar{P}_{g(2)}) \sin \theta_{(2)} + \bar{P}_{h(2)} \cos \theta_{(2)} \end{aligned}$$

変動成分の最大値

$$\begin{aligned} P_{(1)}^L &= |(P_{c(1)} + P_{g(1)}) \sin \theta_{(1)} - P_{h(1)} \cos \theta_{(1)}| \\ P_{(2)}^L &= |-(P_{c(2)} + P_{g(2)}) \sin \theta_{(2)} + P_{h(2)} \cos \theta_{(2)}| \end{aligned}$$

ここに、 $\bar{P}_c^r$ ：架渉線風荷重（線路直交方向）の平均値、 P_c^r ：架渉線風荷重（線路直交方向）の変動成分の最大値、 $\bar{P}_c^L$ ：架渉線風荷重（線路方向）の平均値、 P_c^L ：架渉線風荷重（線路方向）の変動成分の最大値、 δ ：垂直角である。さらに、非同時性低減係数は、それぞれ以下の通りである。

$\varepsilon_1^r, \varepsilon_1^L$ ：架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重による線路直交方向荷重および線路方向荷重の若老間の非同時性低減係数

$\varepsilon_2^r, \varepsilon_2^L$ ：架渉線風圧荷重、がいしおよび架線金具風圧荷重、架渉線張力荷重による線路直交方向荷重の上下間の非同時性低減係数

ε_3 : 架渉線風圧荷重, がいしおよび架線金具風圧荷重, 架渉線張力荷重による線路直交方向荷重と線路方向荷重間の非同時性低減係数

ε_4 : 鉄塔風圧荷重と架渉線風荷重(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)間の非同時性低減係数

上記, 非同時性低減係数はFig.6に示す算定対象部材が存する領域に応じ Table 4 により算定する。

ここに,

$$K = \frac{|\rho_{3(1)} P_{a(1)}^r P_{a(1)}^L + \rho_{3(2)} P_{a(2)}^r P_{a(2)}^L - \rho_4 (P_{a(1)}^L P_{a(2)}^r - P_{a(1)}^r P_{a(2)}^L)|}{a^r a^L}$$

$$a^r = \varepsilon_1^r (P_{a(1)}^r + P_{a(2)}^r), \quad a^L = \varepsilon_1^L (P_{a(1)}^L + P_{a(2)}^L)$$

$$\rho_1 = \frac{1}{\{1 + 0.524(k_x L / L_{uR_a})\}^{0.185}}$$

$$\rho_2 = \frac{1}{1 + 0.268(k_x L / L_{uR_a})^{0.531}}$$

$$\rho_{3(1)} = \frac{1}{\{1 + 0.140(k_x l_{(1)} / L_{uR_a})^{0.398}\}^{0.117}}$$

$$\rho_{3(2)} = \frac{1}{\{1 + 0.140(k_x l_{(2)} / L_{uR_a})^{0.398}\}^{0.117}}$$

$$\rho_4 = \frac{1}{\{1 + 0.597(k_x L / L_{uR_a})\}^{0.237}}$$

ただし,

L : 若番側径間長 ($l_{(1)}$) と老番側径間長 ($l_{(2)}$) の和[m]

D : 上下の腕金間距離の平均値[m]

$$(\equiv (D_1 + D_2 + D_3)/3)$$

$P_{a(1)}^r, P_{a(2)}^r$: $P_{(1)}^r$ および $P_{(2)}^r$ の全電力線(地線を除く)に関する平均値[kgf]

$P_{a(1)}^L, P_{a(2)}^L$: $P_{(1)}^L$ および $P_{(2)}^L$ の全電力線(地線を除く)に関する平均値[kgf]

L_{uR_a} : L_{uR} の全架渉線に関する平均値[kgf]

Fig.6 非同時性低減係数の領域
Domains to apply non-simultaneity reduction coefficient

Table 4 非同時性低減係数
Non-simultaneity reduction coefficient

	領域①	領域②	領域③
ε_1^r		$\eta^r \sqrt{\frac{P_{a(1)}^r{}^2 + 2\rho_1 P_{a(1)}^r P_{a(2)}^r + P_{a(2)}^r{}^2}{P_{a(1)}^r + P_{a(2)}^r}}$	
ε_1^L		$\eta^L \sqrt{\frac{P_{a(1)}^L{}^2 - 2\rho_2 P_{a(1)}^L P_{a(2)}^L + P_{a(2)}^L{}^2}{P_{a(1)}^L + P_{a(2)}^L}}$	
ε_2^r	1	$\sqrt{0.5 + \frac{0.5}{1 + 0.0525(k_x D / L_{uR_a})^{0.398}}}$	$\sqrt{0.34 + \frac{0.44}{1 + 0.0525(k_x D / L_{uR_a})^{0.398}} * \frac{0.22}{1 + 0.0525(2k_x D / L_{uR_a})^{0.398}}}$
ε_2^L	1	$\sqrt{0.5 + \frac{0.5}{1 + 0.106(k_x D / L_{uR_a})^{0.531}}}$	$\sqrt{0.34 + \frac{0.44}{1 + 0.106(k_x D / L_{uR_a})^{0.531}} * \frac{0.22}{1 + 0.106(2k_x D / L_{uR_a})^{0.531}}}$
ε_3	$\frac{\sqrt{a^{r2} + a^{L2} - 2K a^r a^L}}{a^r + a^L}$		
① η^r : 耐風型 1.0, 懸垂型 1.0 ② η^L : 耐風型 1.0, 懸垂型 0.2 ③ 鋼材用荷重は, $\varepsilon_3 = 1.0$ とする ④ 腕金用荷重は, $\varepsilon_2^r = \varepsilon_2^L = \varepsilon_3 = 1.0$ とする			

本非同時性低減係数は、設計上考慮すべき強風時には空力減衰の効果が大きいことを前提として、非共振成分のみを考慮し理論的に算定したものであり、数値解析結果との比較により、その妥当性を検証している。

5. 国内外の設計基準類との比較

新指針（案）の位置づけおよび特徴を明確にするために、送電用鉄塔の国内外の設計指針あるいは基準類（IEC60826¹⁸⁾、ASCE No.74¹⁹⁾、電気設備技術基準（通称、電技）²⁰⁾、JEC-127）と新指針（案）との風荷重算定における基本的考え方を比較した。比較表を Table 5 に示す。なお、基準毎に記号などの標記が異なるため、Table 5 の各荷重の記号は、基本風速に対する速度圧 q_0 を基本とし、本質的な意味を損なわない程度に新指針（案）のものに改めた。したがって、必ずしも原指針、基準に対応するものではない。また、新指針（案）に使用されていない記号は、表中に明記した。

同表より、国外の主要な設計標準は、粗度区分別の設計風速（全風向）およびガスト影響係数法による評価体系になっており、風向別基本風速を除き新指針（案）と設計体系における基本は同等のものとなっている。ただし、架渉線張力の算定方法や各種風荷重の組み合わせ方法に不明な点があり、これらに充分配慮したものとは言い難い。

一方、国内の基準である電技では、全国一律の設計風速、平均風速による静的風荷重を採用し、動的な特性は安全率 1.5 でカバーするといった非常にシンプルな体系である。また JEC-127 は、各地の気象官署のデータと地形因子解析から最大瞬間風速に対応する基準速度圧マップ（全風向）を作成しており、これにより最大瞬間風速に対応する静的風荷重を設計に用いることとしている。また荷重の組み合わせに関しても、不平均張力という形で考慮されている。なお、電技、JEC-127 とともに、風の乱流特性や鉄塔・架渉線の動的特性は陽に考慮はされていない。

以上の各種設計指針、基準類との比較から、新指針（案）は、風向別基本風速の採用、鉄塔・架渉線の動的連成を考慮しているため（ガスト影響係数法および非同時性低減係数の導入）、実態に応じた荷重算定を可能にしていること、数値の根拠が明確であることなど、他の指針、基準類にない顕著な特徴を有していることがわかる。

6. まとめ

本研究報告は、送電用鉄塔の風荷重算定法の合理化を目的とした「耐風設計合理化委員会」での研究成果である「送電用鉄塔の風荷重指針（案）」の概要を取りまとめたものである。本指針（案）の顕著な特徴としては、風向別基本風速の策定、数値解析手法の積極的導入および任意の風向に適用可能なガスト影響係数法に基づく等価静的風荷重算定法の開発が挙げられる。

今後は、本指針（案）をベースに、より合理的な実務基準を完成させることを目的に、設計風速および風荷重算定手法の簡便化、各種解析コードおよび設計支援ツールなどの充実を図る予定である。

謝 辞

前記のとおり、本研究は耐風設計合理化委員会（1999 年～2001 年）において実施したものである。本委員会に特別委員として参加いただいた田村幸雄教授（東京工芸大学）、田村哲郎教授（東京工業大学）、前田潤滋教授（九州大学）、岩谷祥美教授（日本大学）、内藤玄一教授（防衛大学校）、木村吉郎助教授（九州工業大学）、本田明弘氏（三菱重工工業長崎研究所）および山岸啓利氏（日本鉄塔協会）には、学術的な見地から多数の貴重な意見をいただいた。また、電力各社からは、委員会および WG、SWG において、実務的な観点から種々の有益な意見をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

Table 5 送電用鉄塔の風荷重に関する設計基準・設計標準との比較

Comparison of proposal recommendation with other standards

項目		IEC60826	ASCE No.74	電技	JEC-127	新指針(案)
評価法		ガスト影響係数法	ガスト影響係数法	10分間平均風速による静的設計	最大瞬間風速(3~5秒)による静的設計	ガスト影響係数法
設計風速	再現期間	信頼性レベル1~3 レベル1:50年 レベル2:150年 レベル3:500年	再現期間50年をベースに 100年, 200年, 400年の 荷重係数を提示	-	50年	風向別(8風向)に150年 (破壊確率約0.02に対応)
	粗度区分	A, B, C, D(A粗度大)	B, C, D(B粗度大) ASCE7-88に準拠, 粗度区分Aは適用しない	区別なし	区別なし	I, II, III, IV, V (一般的な山岳地をⅢとする)
	基本風速	roughness B, 地上高10m 10分間平均風速	roughness C, 地上高10m, 再現期間50年 fastest-mile風速	地上高15m 10分間平均風速 全国一律40m/s	地上高10m 最大瞬間風速	粗度区分Ⅱ, 地上高10m, 風向別(8風向)再現期間 150年, 10分間平均風速
	マップの有無	なし	有り	なし	有り (速度圧による区分, 高温季, 低温季別)	有り (高温季, 低温季, 8風向)
	べき指数 α 上空風高 Z_G	不明(ガスト影響係数に含まれる)	B: $\alpha=1/4.5$, $Z_G=1200\text{ft}$ C: $\alpha=1/7$, $Z_G=900\text{ft}$ D: $\alpha=1/10.0$, $Z_G=700\text{ft}$	$\alpha=1/7$	$\alpha=1/8$	日本建築学会建築物荷重指針に準拠
	地形の影響	風の収束, 山および丘, 谷の増速を考慮(設計者判断)	風の収束, 山および丘, 谷の増速を考慮(設計者判断)	—	特殊地域については, 地点毎に増速を考慮(設計者判断)	増速率 σ or 気流解析による割り増し係数で評価
風荷重	鉄塔風圧荷重	$\cdot P_T=q_0 K_R^2 C_T A_T G_{RT} n_T$ G_{RT} : roughness, 鉄塔の重心位置の関数として図示(上空増速の影響を含む) K_R : 地表面粗度係数(地上高10m位置におけるroughness Bに対する各粗度の比)	$\cdot P_T=q_0 E^2 C_T A_T G_{RT} n_T$ G_{RT} : 鉄塔高さ, roughnessの関数として図と式を与えている. 応答の評価時間は10分間	$\cdot P_T=q_0 E^2 C_T A_T n_T$ (規格降伏応力度の1/1.5に対応)	$\cdot P_T=q_0 E^2 C_T A_T G^2 n_T$ G: 突風率	$\cdot P_T=q_0 (k_1 k_2 E)^2 C_T A_T G_{RT} n_T$ k_1 : 小地形による風速の割り増し係数 k_2 : 気象学的影响による風速の割り増し係数
	架渉線風圧荷重	$\cdot F_c=q_0 K_R^2 C_G A_G G_{RG} n_G$ G_{RG} : roughness, 径間長, 架渉線平均高さの関数として図示(上空増速の影響を含む) K_R : 地表面粗度係数(地上高10m位置におけるroughness Bに対する各粗度の比)	$\cdot P_G=q_0 E^2 C_G A_G G_{RG} n_G$ G_{RG} : 基準高さ, roughnessの関数として図と式を与えている. 応答の評価時間は10分間	単導体100kgf/m ² 複導体90kgf/m ² (規格降伏応力度の1/1.5に対応)	$\cdot P_G=q_0 E^2 C_G A_G G^2 n_G \beta$ G: 突風率 β : 構造規模による低減係数(=0.5+40/l)	$\cdot P_G=q_0 (k_1 k_2 E)^2 C_G A_G G_{RG} n_G$ k_1 : 小地形による風速の割り増し係数 k_2 : 気象学的影响による風速の割り増し係数
	がいしおよび架線金具風圧荷重	$\cdot P_G=q_0 K_R^2 C_G A_G G_{RT}$ G_{RT} : 鉄塔と同じ, roughness, がいしの重心位置の関数として図示されている. K_R : 地表面粗度係数(地上高10m位置におけるroughness Bに対する各粗度の比)	$\cdot P_G=q_0 E^2 C_G A_G G_{RT}$ G_{RT} : 鉄塔と同じ, 鉄塔高さ, roughnessの関数, 応答の評価時間は10分間	140kgf/m ²	$\cdot P_G=q_0 E^2 C_G A_G G^2$	$\cdot P_G=q_0 (k_1 k_2 E)^2 C_G A_G G_{RG} n_G$ k_1 : 小地形による風速の割り増し係数 k_2 : 気象学的影响による風速の割り増し係数
	架渉線張力に関連した荷重	架渉線風圧荷重に対応する張力で評価(具体的な記載なし)	架渉線風圧荷重に対応する張力で評価(具体的な記載なし)	・水平角度荷重(線路直交方向荷重): 架渉線風圧荷重に対する水平張力の線路直交方向成分 ・不平均張力荷重(線路方向荷重): 長径間(800m以上)以外, 基本的に考慮しない.	・水平角度荷重(線路直交方向荷重): 耐張型: 想定張力の10% 懸垂型: 想定張力の3% (想定張力: 高温季と低温季各々の架渉線風圧荷重により生ずる水平張力あるいは着氷, 雪, 無風時張力を含む) ・不平均張力荷重(線路方向荷重): 耐張型: 想定張力の10% 懸垂型: 想定張力の3% (想定張力: 高温季と低温季各々の架渉線風圧荷重により生ずる水平張力あるいは着氷, 雪, 無風時張力を含む)	平均風速に対応する平均張力および変動風速に対応する変動成分の最大値を式で与えている.
	各荷重の組み合わせ	具体的な記載なし	鉄塔風圧荷重と架渉線風圧荷重の変動成分について, その相関ゼロとしてガスト影響係数の中で考慮(変動成分の0.75倍)	-	-	架渉線に関連する風荷重に対して水平角度に關し座標変換し, 線路方向, 線路直交方向成分とする. その際, 平均成分はベクトル和, 変動成分は絶対値和に非同時性低減係数 ε を乗じる. また, 鉄塔風圧荷重と架渉線荷重の変動成分についても非同時性低減係数(0.8)を考慮.

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取りまとめ, 日本風工学会論文集, 第 82 号, pp.39-48, 2000.
- 2) 中村秀治, 田中伸和, 中園信, 松山彰, 友延信幸: 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, 日本風工学会論文集, 第 82 号, pp.49-60, 2000.
- 3) 三上康朗, 漆原育男, 櫃本充美, 赤井幸夫, 加藤央之, 山元康裕, 朝山修: 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3) 特殊地形における風構造特性, 日本風工学会論文集, 第 83 号, pp.117-128, 2000.
- 4) 漆原育男, 石川智巳, 清水幹夫, 三上康朗, 中村秀治, 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法に関する研究(その4) 送電鉄塔・架渉線連成系の風応答特性と風荷重算定法, 日本風工学会論文集, 第 83 号, pp.129-140, 2000.
- 5) 電気学会: 送電用支持物設計標準 JEC-127, 1979.
- 6) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993.
- 7) 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧, 1991.
- 8) 本州四国連絡橋公団: 耐風設計基準・同解説, 1976.
- 9) 本州四国連絡橋公団: 明石海峡大橋耐風設計要領・同解説, 1990.
- 10) 日本建築学会構造委員会荷重運営委員会: 建築物荷重指針改定案本文を公表し意見を問う, 2002 年日本建築学会大会(北陸), 構造(荷重)部門パネルディスカッション資料, 2002.
- 11) ASCE: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7-02, 2003.
- 12) Australian Standard: SAA Loading Code, Part 2: Wind Loads, 1989.
- 13) DRAFT AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDERD FOR COMENT: Structural design-General requirements and design actions, Part2: Wind actions, 1999.
- 14) 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, 日本風工学会論文集, 第 97 号, pp.121-136, 2003.
- 15) 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, 日本風工学会論文集, 第 98 号, pp.105-115, 2004.
- 16) Kazuo Saito: A numerical study of the local downslope wind "Yamaji-kaze" in Japan, part3, J.Meteor. Soc. Japan, Vol.72, No.2, pp.301-329, 1994.
- 17) 石川智巳: 送電用鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.738, I-64, pp.139-158, 2003.
- 18) IEC: Loading and Strength of Overhead Transmission Lines, IEC Technical Report 60826, Second Edition 1991.
- 19) ASCE: Guidelines for Electrical Transmission Line Structural Loading, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.74, 1987.
- 20) 経済産業省: 電気設備技術基準・解釈, オーム社, 2002.