

第 2 章

2

合理的な風荷重評価
技術の確立にむけて

第2章 合理的な風荷重評価技術の確立に向けて 目次

我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 山崎 智之
我孫子研究所 材料構造部 主任研究員 石川 智巳

2 - 1	現在の設計手法の概要と合理化研究の方向性	19
2 - 2	風向別基本風速の評価	19
2 - 3	設計風速の評価	27
2 - 4	等価静的風荷重の評価	29



山崎 智之（1993年東京電力㈱入社、2000年より出向）

これまで、基幹送電線の鉄塔設計および技術開発業務に従事。当所に出向以来、送電用鉄塔の耐風設計合理化研究のうち、主に基本風速に関する研究に従事。現在は、合理化手法の設計への反映を考慮した実用化研究に取り組んでいる。

（2-1、2-2、2-3執筆）



石川 智巳（1994年入所）

入所以来、送配電設備の耐風、耐震問題に従事。特に架空送電線路の耐局地風設計、耐風設計合理化研究において、鉄塔あるいはケーブルの荷重評価、応答解析を中心に指針（案）の取りまとめを実施してきた。現在、開発した荷重評価法の実用化や信頼性評価手法の開発に取り組んでいる。

（2-4執筆）

2 - 1 現在の設計手法の概要と 合理化研究の方向性

現状の送電用鉄塔の耐風設計では、電気設備に関する技術基準を定める省令⁽¹⁾に基づき、風速40m/s(10分間平均風速)の風圧荷重に耐える強度を有するようにしている。一方、補強設計の意味合いで主に大型送電線の設計に用いられている送電用支持物設計標準(以下、JEC-127)⁽²⁾においては、最大瞬間風速の50年再現期間値に基づいて設定した地域別の風圧値が、基準速度圧地域区分として日本全国のマップの形で示されている。送電用鉄塔は、架渉線を支持する構造であるため、これに作用する風荷重は、風向の影響を大きく受けることから、いずれも、送電線路の走行に対して風向を考慮した荷重算定が行われているものの、風圧値はすべての風向で一律の値としているのが現状である。

鉄塔に作用する年最大風速は、対象地点の地理的位置、周辺地形および粗度の状況、台風の通過経路、季節的な風向頻度分布等により、風向によって大きく異なるのは明らかである。風向を考慮しない(以下、全風向という)年最大風速から求めた設計風速が全ての風向から作用するという条件は、構造物の最も不利な方向から作用してもこれに耐え得るように設計するというものであり、構造物にとって安全側であるが、必ずしも合理的とは言えない。

このようなことからASCE7-98⁽³⁾では風向係数という概念を導入し、全風向風速に対する低減効果を構造形式別に反映している。またAustralian Standard⁽⁴⁾では、観測データの豊富な主要都市周辺を対象に風向別基本風速が与えられ、それ以外の地域では全風向風速に対する

低減係数を適用できる領域を定め、風向別風速適用の効果を反映できるようにしている。

一方、日本においても建築、土木分野では風向別設計に関する研究が積極的に行われている状況である。

このような状況を踏まえ、耐風設計合理化研究では、風向別基本風速の評価方法を検討し、気象官署(以下、単に官署という)の観測データ、台風シミュレーション、気流解析などを用いて送電用鉄塔の風荷重評価に用いる風向別基本風速マップの作成を試みた。

また、風は地形に敏感な気象現象であり、風向、風速ともに、地形の影響を大きく受ける。従来、地形の影響を明確な根拠に基づいて設計風速に考慮することはほとんど行われていなかったが、近年、強い台風の襲来時に、崖状地形により増速された風により送電線が被害を受ける事例が見られ、風の地形影響を考慮することの重要性が認識されるに至った。したがって、風洞実験や気流シミュレーションを活用することにより風の地形影響を定量的に評価し、設計風速への反映手法について検討を実施した。

さらに、風荷重による送電用鉄塔の応答評価手法は、従来は設計風速に基づく静的な風圧荷重が作用するものとしていたが、より精緻な応答評価を実現するために、実規模送電線路における風応答観測、動的応答解析、架渉線風応答実験などを通じて、風の乱れによって生じる規模効果、共振効果を考慮した等価静的風荷重算定法の確立を図った。

2 - 2 風向別基本風速の評価⁽⁵⁾⁽⁶⁾

2-2-1 風向別風速による設計合理化の可能性

風向別風速による設計合理化の可能性について評価するため、風向別風速の極値統計解析と送電用鉄塔の荷重効果の観点から検討を行った。

全風向の年最大風速 v に対する非超過確率 $F(v)$ は、

各風向間に相関が無く年最大風速の発生が独立と仮定するならば、各風向における年最大風速 v に対する非超過確率 $F_i(v)$ を用いて

$$F(v) = \prod_{i=1}^n F_i(v) \quad (2-2-1)$$

と表される。ただし n は風向分割数である。ここで、各

風向の年最大風速の非超過確率が同一の場合、

$$F(v) = \{F_i(v)\}^n \quad (2-2-2)$$

と表される。

一方、年最大風速 v に対応する再現期間 R は $F=1 - 1/R$ として表されるので、

$$1 - 1/R = (1 - 1/R_i)^n \approx 1 - n/R_i \quad (2-2-3)$$

$$R_i \approx nR \quad (2-2-4)$$

となる。したがって、風向を分割して評価する場合、年最大風速 v に対して全風向と同一の非超過確率を満足するためには、風向別の再現期間を n 倍とする必要がある。しかし、送電用鉄塔のような風向に敏感な構造物の場合、風向によって荷重効果が大きく影響を受けると考えられることから、風向別に風速と荷重効果を考慮することにより、送電用鉄塔の合理的な荷重評価と、精緻な信頼性評価が期待できる。

そこで、送電用鉄塔の風向による荷重効果特性を把握するため、まず全ての風向の設計風速を同一値と仮定したときの、各風向における最下節主柱材に作用する圧縮軸力を検討した。検討にあたっての計算条件は以下の通りである。なお、粗度区分、乱れのスケールは日本建築学会・建築物荷重指針⁽⁷⁾（以下、建築物荷重指針という）に示されている値に準じ、検討に用いた鉄塔モデルを図2-2-1に示すとおりである。

- ・対象鉄塔：500kV、2回線、耐張型、鋼管鉄塔
- ・鉄塔高さ：77.5m
- ・架渉線種類：架空地線 OPGW290mm²、単導体
電力線 ACSR810mm²、4導体
- ・架渉線張力：架空地線 33.3 kN/条
電力線 49.0 kN/条
- ・10m高さ風速（粗度区分Ⅱ）：40m/s（全風向一定）
- ・ディケイファクタ：水平横方向：10、鉛直横方向：10

最下節主柱材の軸力算定手法は、2-4で述べる等価静的荷重算定法⁽⁸⁾によるものとした。架線状態は、図2-2-2に示すように、径間長、架渉線水平角度の組み合わせによる6ケースとした。なお、風向は北を0度とし時計回りに定義した。

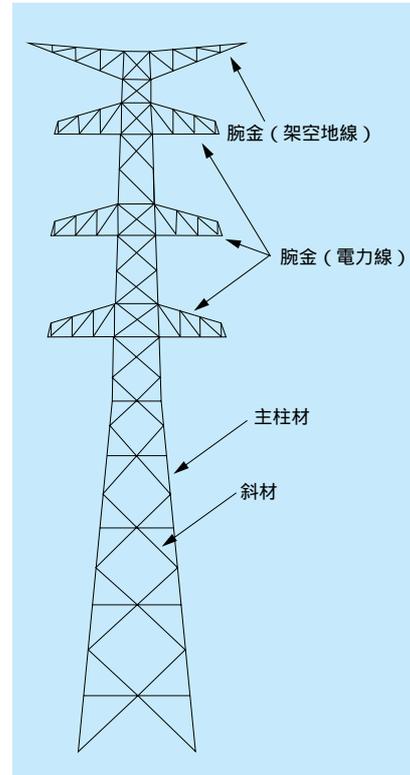


図2-2-1 送電用鉄塔

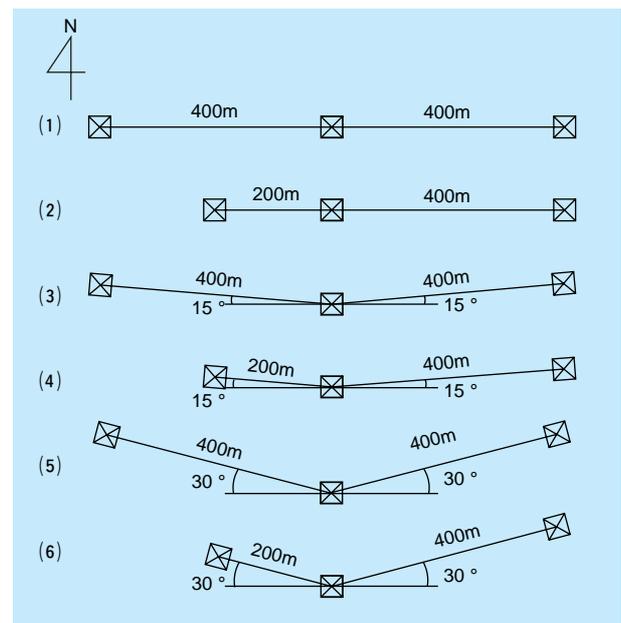


図2-2-2 架渉線状態ケース

図2-2-3は最下節圧縮軸力の最大値に対する軸力比率を示したものである。軸力比の最小値は、ケースにより異なるが、0.35～0.55程度の値となり、最下節主柱材軸力は風向角に対する感度が非常に大きくなっている。また、架線状態、特に水平角度によっても大きく影響を受

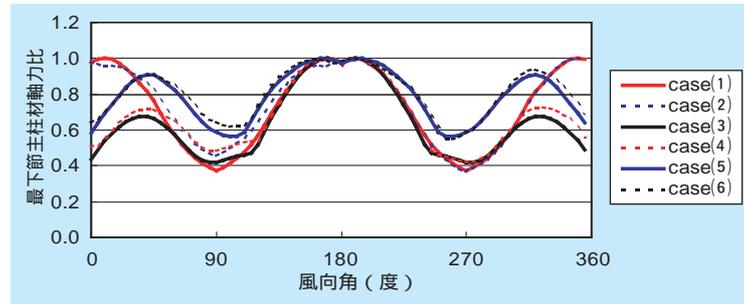


図2-2-3 風向角による最下節支柱材軸力比

ける。

以上の結果から、風向別に設計風速を評価することにより、合理的な荷重評価が可能となることが示唆された。

2-2-2 風向別基本風速の再現期間

現状の送電用鉄塔の耐風設計では、風速40m/sの風圧荷重に耐える強度を有するようにしているが、この風速40m/sの再現期間は不明である。一方、JEC-127においては、全風向年最大瞬間風速の50年再現期間値に基づいて設定した地域別の風圧値が示されている。本研究では、再現期間50年から想定される安全性のレベルが、送電用鉄塔の設計軸力に対する年超過確率0.02に相当するものとし、この安全性と同等の安全性を確保するための風向別再現期間について、風向別風速分布と送電用鉄塔の荷重効果を考慮して検討した。なお、この再現期間50年の意味する安全性のレベルについては、設備重要度、建設コスト等の観点から別途十分な議論が必要である。

風向別基本風速の検討にあたり風向の分割数を設定する必要があるが、ここでは8風向で検討を行うこととした。これは、現在想定している実務設計へ適用する場合の設計の煩雑さ、ならびに観測データその他から基本風速を設定する際の精度の問題を考慮したものである。

前項に示す鉄塔モデルを対象に、架渉線、水平角度、風配とその組み合わせをパラメータに、風向別再現期間の検討を実施した。実際に作用する外力を、長期間のデータで模擬して最下節支柱材の年超過確率を求め、目標としている年超過確率0.02を満足する風向別の再現期間を求めた。その結果、8風向別の再現期間として150年が妥当であることを見出した。なお、このとき部材の軸力の再現期間は、モデル化した年最大風速のGumbel分

布の傾きが3.0の場合50年～350年程度、傾きが4.0の場合50年～250年程度となっている。また、全風向50年再現期間値風速を超える風向については、この風速を上限値とすることにより、再現期間のばらつきが小さくなった。このため、全風向50年再現期間値の上限値を設けることとした。

2-2-3 風向別基本風速の算定

風向別基本風速は、建設地点における台風の襲来頻度や季節風の発生頻度、緯度・経度や、山脈・半島あるいは海からの距離などの大規模な地形影響のみを反映するものとし、対象地点周辺10km程度を代表する、地表面粗度区分Ⅱ、地上10mにおける10分間平均風速（8風向）と定義した。

また、送電線は鉄塔と架渉線からなる構造物であり、架渉線張力荷重は温度の影響を強く受けることから、従来より季節別の条件を考慮した設計がなされている。したがって、夏から秋にかけての季節に発生する強風（主として台風を想定）を考慮した高温季、冬から春にかけての季節に発生する強風（主として冬季季節風を想定）を考慮した低温季として分類することとした。

風向別基本風速の算定にあたり、高々50年程度の官署における台風の観測データのみでは、風向別とすることによるデータ不足とそれによるサンプリングエラーのため、信頼性の高い統計値を算出することは難しい。このため例えばASCE7-98⁽³⁾では、地域によっては基本風速を定める時のハリケーンの観測データは使用しないこととし、シミュレーションによって定めるよう提唱している。一方で、観測データは、実測値であるため一般社会に対する説得力を有していることも確かである。また、

極値統計解析上の問題点として、実際の官署における観測記録が、理論上漸近するはずの極値の漸近線に従わないことがしばしばみられ、再現期間の外挿に疑問がもたれている。これは、複数の成因からなる年最大風速の確率分布は複数の極値分布の合成になるためであり、従来の一つの極値分布を用いた場合に再現期間の大きな範囲では、過小評価になる可能性が指摘されている⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

本研究では、以上に述べた課題に対処するため、高温季については、官署観測データを成因別（台風と非台風）に整理することにした。その結果、データの統計解析上の問題点を排除するとともに、台風データについては、台風モデルによるモンテカルロシミュレーション（以下、台風シミュレーション）によって得られた風速値を、観測値でキャリブレーションするという併用方法を提案した。これにより、地域的な風速レベルは観測データに、風向別風速の分布形は台風シミュレーションに基づいた設定となり、観測データと台風シミュレーションの長所を取り入れた設定が可能であると考えた。また、官署の風向によっては支配的要因が異なり、非台風データの方が上回る場合もあることから、いずれか大きい方を採用することで危険側になることを回避した。一方、低温季については、官署の観測データにより風向別基本風速を算定することとした。

観測データの統計処理にあたっては、測器の変遷に伴う測器補正、風速測定高さ補正、地表面粗度補正を行い、地表面粗度Ⅱ、地上10m位置の風車型風速計への基準化を図った。また観測データは、直近の小地形影響を受けている場合、官署周辺地域を代表する風速となっていない可能性がある。そこで風向別に算定した小地形による

風速の割り増し係数 k_1 ($k_1 > 1.0$) により風速を割り戻すことにより、直近の小地形による増速影響を除去し、危険側評価になる可能性を排除した。観測データの処理結果例を図2-2-4、図2-2-5に示す。⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

また、高温季の風向別再現期風速は、文献による台風シミュレーションにより十分長い期間の台風資料を作成し、これを統計処理して算定した。具体的には以下のとおりである。

- ① 検討領域を定め、過去50年間の台風観測データから、台風の年間発生数、台風移動速度、移動方向、気圧分布などを設定した領域毎に確率モデルで表現する
- ② このデータを用いてモンテカルロ法により台風を発生させ、台風が対象地点に接近した時の傾度風を求める
- ③ あらかじめ求めておいた傾度風と地上風の風向相関、風速比相関を用いて地上風の風向、風速を計算する
- ④ このシミュレーションを長期間にわたって実施することにより、対象地点における長期間の風向別年最大風速のデータが生成され、これを統計処理することで風向別再現期間風速を求める

台風シミュレーションの検討イメージを図2-2-6に示す。台風シミュレーションの計算条件は、シミュレーション期間10000年とし、官署と台風中心間の距離が500km以内に接近したものを対象に風向、風速を算定することとした。

台風シミュレーションの計算結果として、台風経路図の一例を図2-2-7に、Gumbel確率紙上の年最大風速のプロットの例を図2-2-8に示す。

以上の手順により求めた風向別基本風速の一例として、高温季の宮崎地方気象台の結果を図2-2-9に示す。

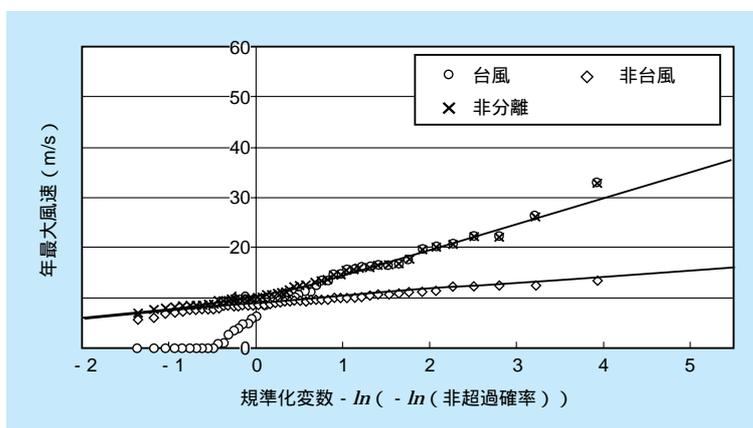


図2-2-4 高温季の例（宮崎）

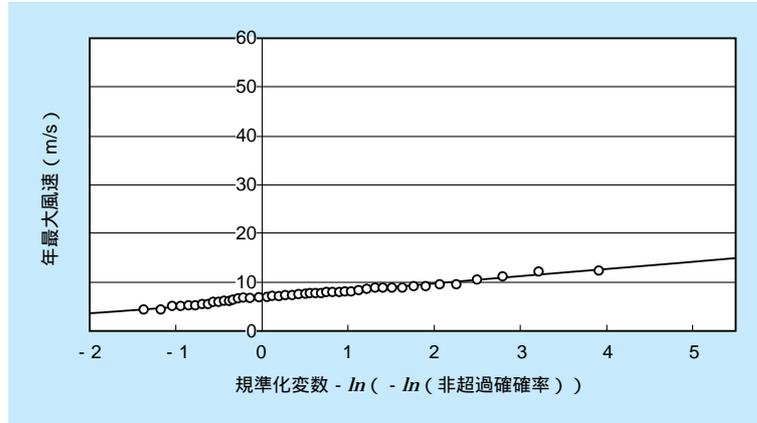


図2-2-5 低温季の例(宮崎)

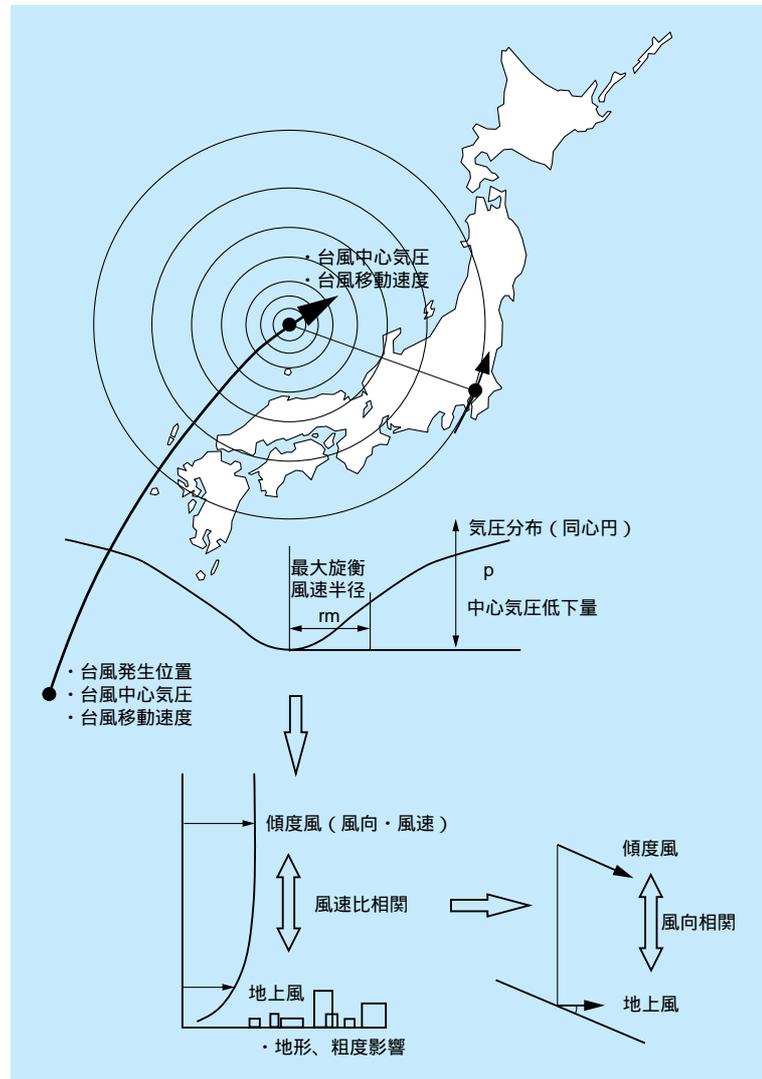


図2-2-6 台風シミュレーションによる風向別風速の検討イメージ

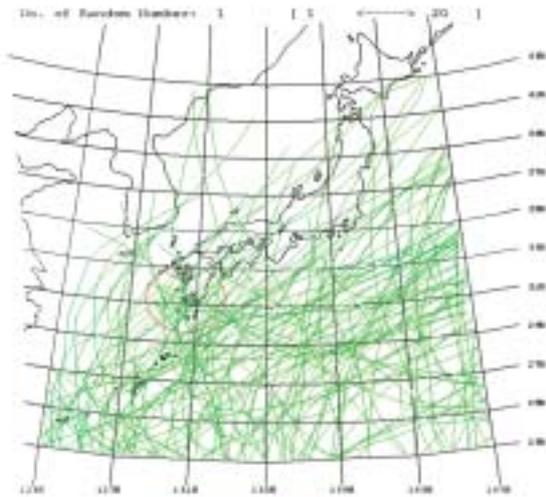


図2-2-7 台風シミュレーション経路図

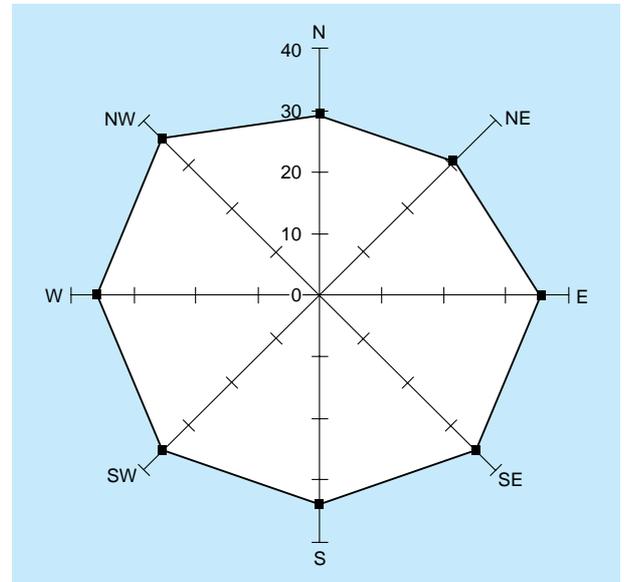


図2-2-9 風向別基本風速の例（高温期・宮崎）

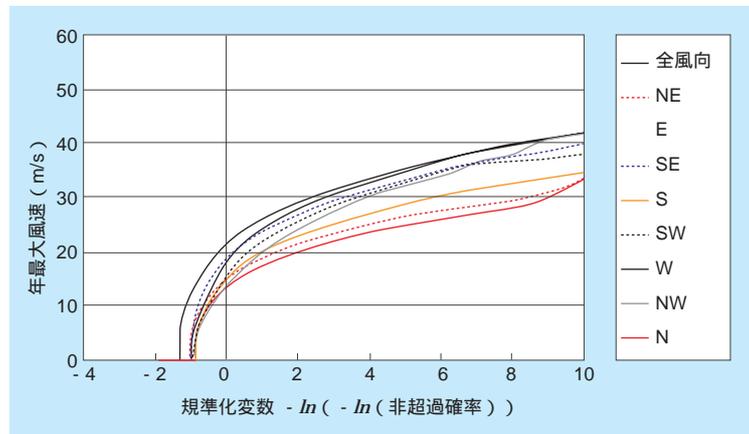


図2-2-8 年最大風速プロットの例（宮崎）

2-2-4 風向別基本風速マップ作成の試み⁽⁶⁾

風向別基本風速マップを作成するため、官署間の風向別基本風速を定める必要がある。建築物荷重指針では、日本全土をメッシュ分割し、その各メッシュ点に最も近い官署の風速値を設定した後に、空間的な平滑化を行うことでマップを作成している。これに対し、今回対象としているのは風向別基本風速マップであることから、単なる空間的な平滑化によるのではなく、風向を考慮した地形影響を反映することが必要であると考えられる。そこで、風向を考慮した大規模な地形影響による増速効果、減速効果をより積極的に風向別基本風速マップに反映するために、気流解析コードL-WIND⁽⁶⁾による気流解析結

果の風速の水平方向分布から官署間の基本風速の内挿関数を求め、適切なスムージングを施すことにより、風向別基本風速マップを作成する手法を提案した。

(1) マップ作成方法

① L-WINDによる気流解析（官署間の内挿関数導出）

日本全土を4つの領域（北海道、東北、関東・中部・近畿、中国・四国・九州）に分割し、入口風速を適当に定めて、水平格子間隔2 km、下層鉛直格子間隔100m、地表面粗度は海：Ⅰ、陸地：Ⅲの解析条件で、L-WINDによる気流解析を8風向分実施し、官署間の内挿関数を導出した。なお、4つの領域間は50km～70km程度ラップさせた。

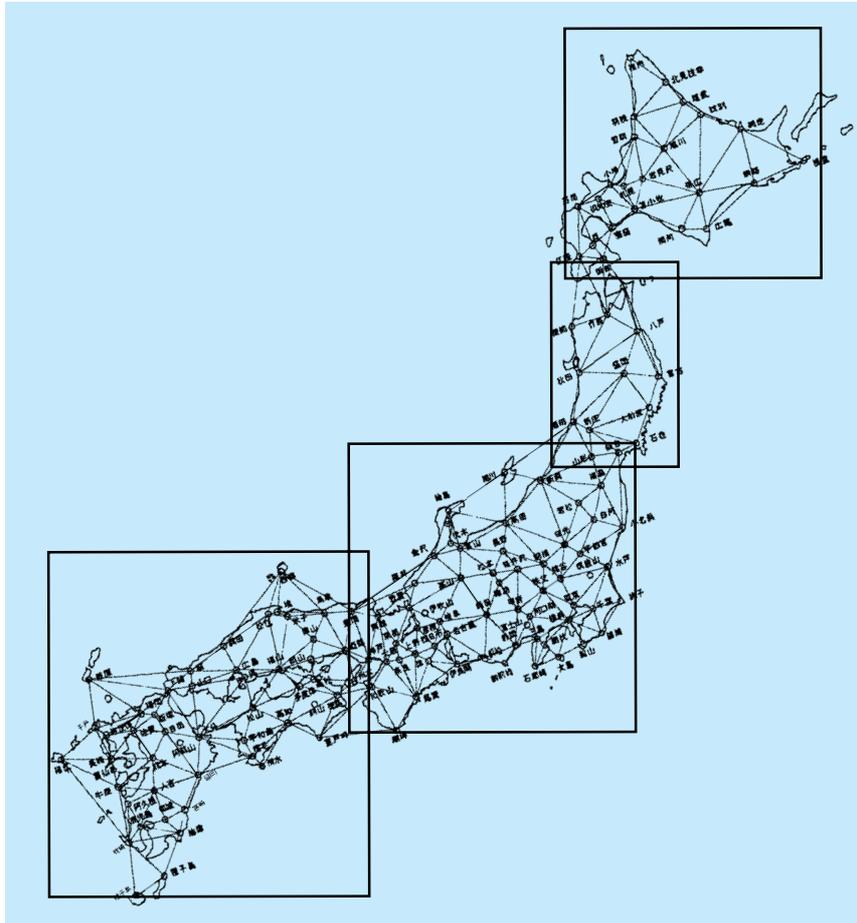


図2-2-10 官署間を内挿するためのメッシュおよび領域のラップ図

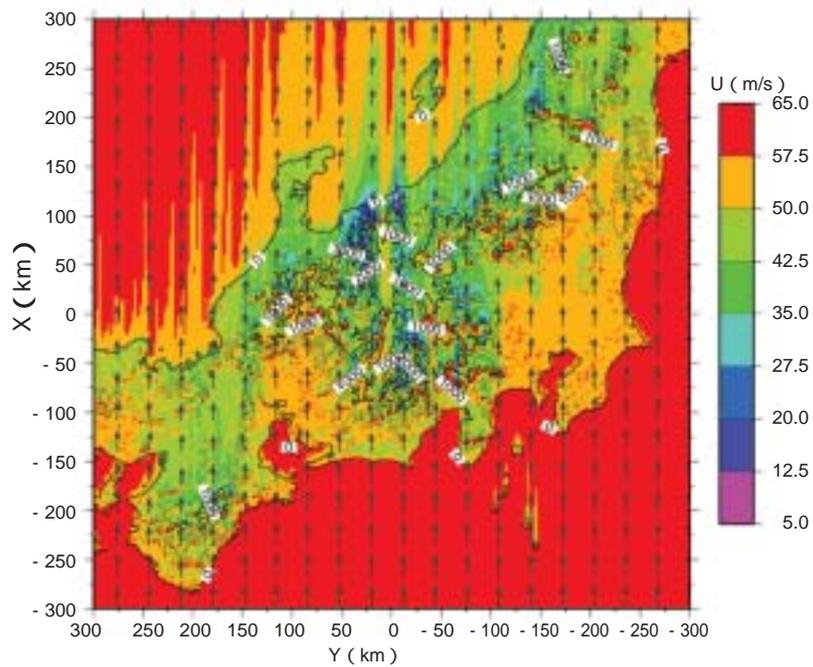


図2-2-11 L-WINDによる気流解析結果（関東・中部・近畿：南風）

② 官署における減速地形影響の除去

官署から見た周辺地形の仰角が特に大きい官署・風向は、減速地形の影響を受けているため、その官署・風向の基本風速は、周辺官署の基本風速と気流解析の結果を利用した内挿により算出することとした。

なお、一般的に地形影響を受けて減速しているといわれている長崎海洋気象台のSE風向の仰角が平均0.2程度であることから、1風向の仰角が平均0.2以上の官署・風向を補正の対象とした。補正の対象とした官署・風向は、大船渡(W)、宮古(W、NW)、網代(SE、S)、日光(N、S、NW)、尾鷲(SW)、舞鶴(S)、長崎(SE)である。

③ 各領域における風向別基本風速の算出

官署間における風向別基本風速は、①の気流解析結果の平均風速の水平方向分布を官署間の風速の内挿関数とし、適切なスムージングを施すことにより

算出した。

(2) 風向別基本風速マップ

上で述べた方法により作成した、関東、中部、近畿地方の高温季・南風の基本風速マップを図2-2-12に例示する。

(3) マップ使用上の留意点

今回作成した風向別基本風速マップは、大規模な地形影響を風向別に取り込んだ従来にないより合理的なマップであるが、その妥当性については十分な検証ができていないのが現状である。特に問題を有している(実態と乖離している)個所として、大型山地の周辺が挙げられている。今後、官署以外の地点での観測値との比較等により、マップの妥当性を評価していくとともに、大気安定度をパラメータにした検討も必要と考えている。

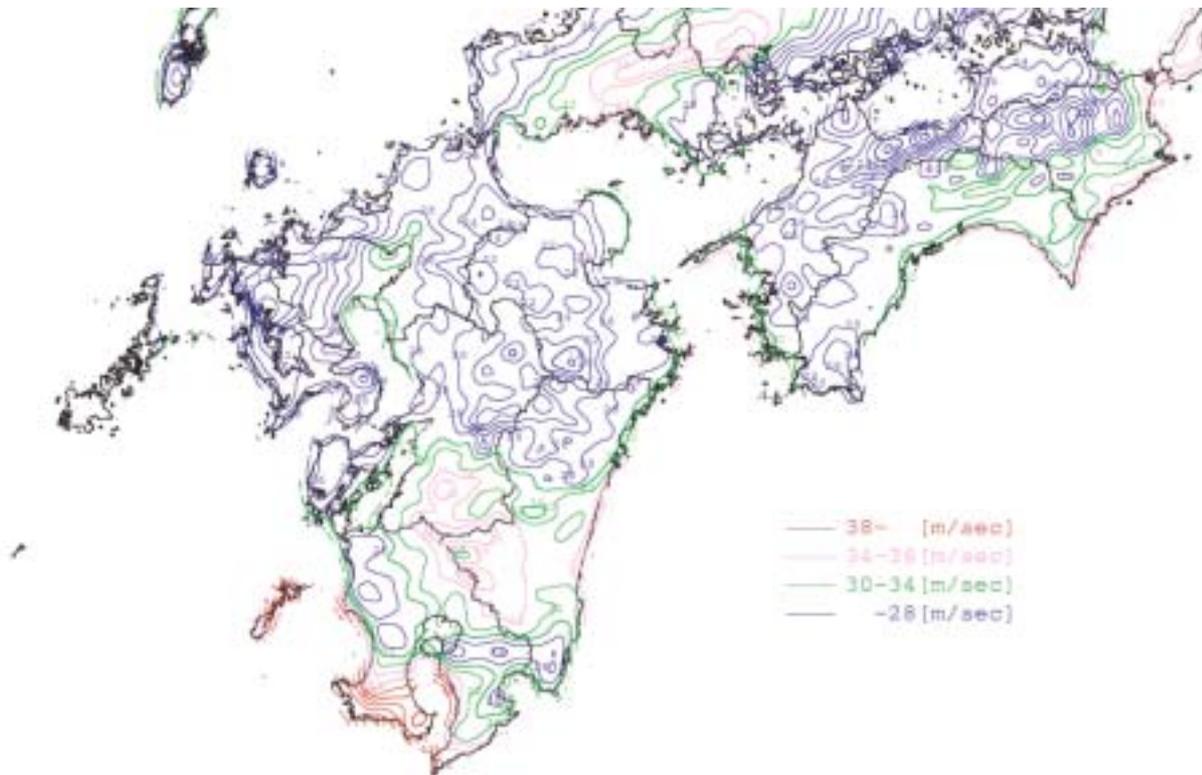


図2-2-12 風向別基本風速マップ(高温季・南風)

2 - 3 設計風速の評価

風は上空では摩擦のない一定風速と扱うことができるが、地表に近い風は、地表面の粗度による摩擦のため風速が低減しており、その度合いは地表面粗度の状況によって大きく影響を受ける。また、送電用鉄塔は、山の斜面や頂部に建設されることも多く、送電線に作用する風は直近の地形の影響を強く受けることが多い。過去の送電鉄塔の被害事例でも、斜面により、増速された風が山の斜面頂部に建設された鉄塔に作用し被害を与えた事例が見られている。日本は山岳地帯が多く、送電線もそのようなルートをとらざるを得なくなっている。したがって、地表面粗度の影響と直近の風の影響を考慮して設計風速を評価することは、風荷重評価の合理化につながるため、耐風設計上非常に重要である。ここでは、設計風速の算定方法に必要な風の統計量について述べる。

2-3-1 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 風向について算定することとしており、地表面粗度の影響、直近の小地形の影響、気象学的影響を考慮して求める。

$$U_R = k_1 k_2 E U_0 \quad (2-3-1)$$

ここで、 U_0 は、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から設定する。 k_1 は、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 は気象学的影響による風速の割り増し係数、 E は、風速の鉛直分布係数で、対象とする風向の粗度区分に応じて定めるものである。

(2) 地表面粗度の影響

地表面粗度は、建築物荷重指針に示されている粗度の分類を参考に 5 区分とした (表 2-3-1)。粗度区分に応じて上空風高さ Z_G と、べき指数 α が示されている (表 2-3-2)。

上空風速は粗度によらず一定と考え、基本風速は地上

表2-3-1 地表面粗度区分

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

表2-3-2 上空風高さ Z_G 、べき指数 の値

粗度区分	I	II	III	IV	V
Z_G (m)	250	350	450	550	650
	0.10	0.15	0.20	0.27	0.35

10m、粗度 II を基準としているので、式 (2-3-2) により対象地点の粗度に応じた風速を求める。なお、粗度区分は、建設地点より前方 1 ~ 2 km 程度の風上側の状況を考慮して判断する。

$$E = 1.7 \left(\frac{z_R}{Z_G} \right) \quad (2-3-2)$$

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を表すべき指数

粗度は現地の状況を見て判断するため、主観的な評価になることがある。粗度の判定により、設計風速が大きく影響を受けることから、より客観的な手法が望まれており、今後の研究に期待される。

(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 を読みとり、増速率図を用いて算定する。斜面が 10、20、30 度の増速率図の例を図 2-3-1 ~ 図 2-3-3 に示す。この増速率図は、風洞実験により精度が検証された気流解析コード L-WIND による解析結果である。

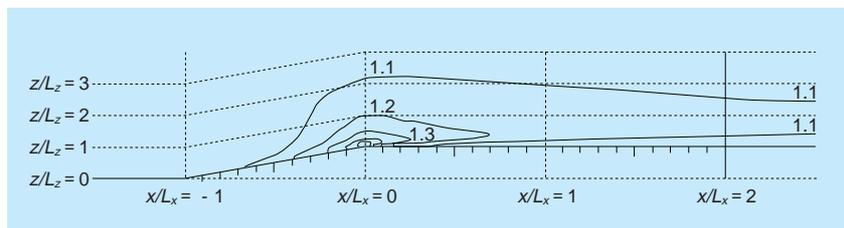


図2-3-1 増速率図（崖状地形、斜面勾配10°）

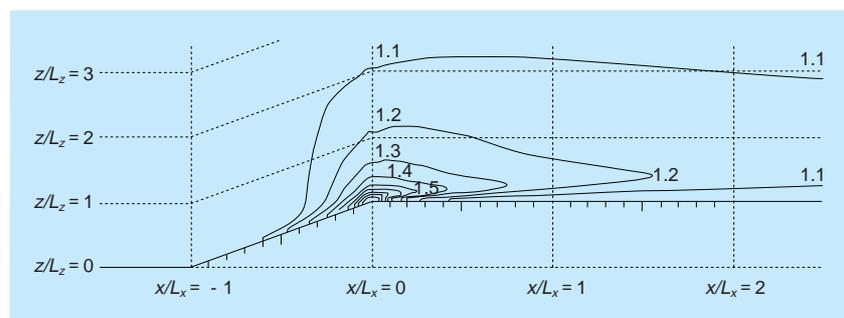


図2-3-2 増速率図（崖状地形、斜面勾配20°）

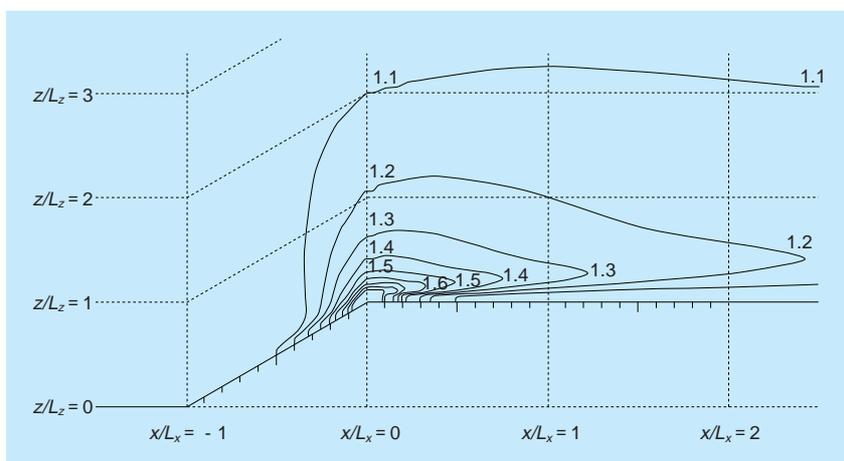


図2-3-3 増速率図（崖状地形、斜面勾配30°）

また、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。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。気流解析は、膨大な解析時間が必要になるため、アルゴリズムの改良など計算の高速化が今後の課題として挙げられている。

(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。しかし、現在取得可能なデータから、具体的な数値あるいは評価手順を明示することは困難であったため、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 を定める必要がある。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、以下を提示した。

- 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

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表2-3-3で与えることとした。なお、これら乱流統計量設定のもととなったデータは、4-1で述べる。

表2-3-3 風の乱流統計量

I_{ur}	k_x	k_z	L_{ur}
$0.1 \left(\frac{Z_R}{Z_G} \right)^{-0.05}$	10	10	$100 \sqrt{\frac{Z_R}{30}}$

2-3-2 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 - 4 等価静的風荷重の評価

架空送電線路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¹³⁾、大規模化、基数の増大などにより、送電設備の有事の際の社会的影響度の観点から、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。

我が国の送電鉄塔の設計では、基本的に電気設備技術基準¹⁾に基づき、地表面粗度によらず全国一律の平均風速をベースに、鉄塔部材の規格降伏点応力度の1/1.5に対応させることとしている。またJEC-127²⁾は、最新の学術的知見を反映したものとして、電気事業者の自主判断のもと、主に大型の架空送電線路における補強設計用の資料として利用されている。JEC-127は、地域性を考慮して定められた基準速度圧(瞬間最大風速に対応)による部材応力度を、降伏点応力度の規格値に対応させるものであり、一部架渉線については径間長によって規模による低減係数を考慮している。なお、地表面粗度の区別はない。

いずれの設計法においても、簡便でかつある程度の合理性を備えているものの、静的に風荷重を評価しているため、動的な応答特性に関して、実態に応じて評価する

ことは難しい。

このような現状に鑑み、世界的に動的効果を考慮した耐風設計法が主流となっている現在、我が国においても架空送電線路の動的効果を考慮した設計法を確立する必要性が高まっている¹⁴⁾。また、2-2で紹介したように、風向別設計風速の検討も進められている。風荷重についても、任意の風向に対して、十分な精度で評価できることが必要である。

動的効果を考慮した風荷重評価法としては、建築物や橋梁の設計で一般的に用いられているガスト影響係数法^{3)(4)、15)~17)}がよく知られている。また、送電鉄塔に限ってみても、同様の考え方に基づくいくつかの評価法が提案されておりASCE Guidelines¹⁸⁾、EPRI report¹⁹⁾、あるいはIEC60826²⁰⁾、などにまとめられている。ASCE GuidelinesあるいはEPRI reportでは、Davenport²¹⁾が提案した送電鉄塔および架渉線の風圧荷重のガスト影響係数を共振成分を無視した形で採用している。またIEC60826では、送電鉄塔については鉄塔高と地表面粗度、架渉線については平均径間長、地表面粗度および導体の平均地上高の関数としてガスト影響係数を図示

している。

ここでガスト影響係数を用いた等価静的風荷重とは、風に対する最大応答と同じ荷重効果をもたらす静的な風荷重であり、この風荷重を構造物に作用させることにより各部材の最大発生応力度、変形を計算することができる。すなわち等価静的風荷重には、構造物の規模（塔高あるいは径間長）が大きくなる程、相対的に風が同時には作用しなくなる効果（規模効果）と構造物の最も揺れやすい周波数（1次固有振動数）に対する動的な増幅を表す効果（共振効果）が含まれる。このため、構造物の動的な特性を考慮できる合理的な風荷重算定法といえる。

このような荷重の考え方は、1960年代にDavenportによってはじめて体系化されたもので、外力となる風の乱れを定常正規確率過程と仮定し、不規則振動論と確率統計的手法を適用して、振動応答の最大値を理論的に予測するものである。先に示したASCE Guidelines⁽¹⁸⁾、IEC60826⁽²⁰⁾はいずれも同様の考え方による。

ただし、上述の文献では、風荷重評価の点で架渉線の張力変動の影響や各風荷重の組み合わせについては十分には考慮されていない。特に、送電鉄塔は、多数の架渉線が付属し、かつ各々の支持点反力は同時に最大になることはない。このため、これらの非同時性を考慮してその組み合わせを考えるべきであろう。

我が国は、山岳部で複雑なルートを採らざるを得ない状況から耐張型鉄塔が多く用いられる。耐張型鉄塔では、特に組み合わせの影響を受けやすいため、合理的荷重評価手法の確立のためには、この点に十分配慮しておく必要がある。

このような現状を踏まえ、当所では電力各社とともにガスト影響係数法に基づく鉄塔と架渉線の等価風荷重評価法を提案した。さらに、これらの連成効果を考慮するために、非同時性低減係数を考案し、任意風向に適用できる風荷重評価体系とした。

ただし、本荷重評価法で対象としている風荷重は、強風中において鉄塔骨組や架渉線等が弾性的挙動をするものとして検討したものである。つまり許容応力度設計を前提としている。また、風の乱れ（風向、風速の時間的・空間的变化）に起因する変動風力を扱ったものであり、さらに大部分の鉄塔がラチス構造であるため、風方向の風荷重のみを対象としている。架渉線にみられる風上側電線の後流側の渦発生が原因とされるサブスパン振動や、物体の振動と

周囲の流れの相互作用により発生するギャロッピングなどの不安定振動については、対象としていない。ギャロッピング現象に関する当所の取り組みについては、第5章に紹介しているので、併せて参照頂きたい。

2-4-1 風荷重の分類

新たに提案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、碍子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。したがって、特に架渉線については架線方向に対する風向を考慮することになり、多少の煩雑さは増すものの、架空送電線路の実挙動に即した荷重算定法となっている。なお、これらの風荷重算定に関連して、3-4に等価静的風荷重評価ツールを紹介している。

2-4-2 各種風荷重

ここでは、鉄塔風圧荷重、架渉線風圧荷重、架渉線張力荷重算定式の概要を、ガスト影響係数法の特徴とともに述べる。

(1) 風圧荷重の考え方

風圧荷重は、基準高さにおける設計用速度圧に、風力係数、受風面積、応力分担率、ガスト影響係数を乗じて算定される。ここに用いるガスト影響係数は、変動風速に起因する風力の影響を評価するもので、次式で定義される。

$$(\text{ガスト影響係数}) = \frac{(\text{最大応答値})}{(\text{平均風力による応答値})}$$

ガスト影響係数は、風によって生じる最大応答値と等価な応答値を与えるように平均風力を補正する係数である。ガスト影響係数を適切に定めれば、風の時間空間特性だけでなく、構造物の振動特性（固有振動数、減衰定数）を考慮した風圧荷重の算定が可能となる。

なお、風圧荷重算定に必要な風力係数と応力分担率に

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、既存の設計法に準じるものとした。これらについては、荷重評価に与える影響が大きいため、適切な試験によりデータを蓄積することが望ましい。

(2) 風荷重評価式

提案した風荷重評価式は、図2-4-1に示す各風荷重の算定方法であり、結果のみを以下に示す。なお誘導に用いた仮定および誘導方法については、文献(8)、(22)~(25)に詳しい。

- 1) 鉄塔風圧荷重（線路方向平均値： P_T^L 、変動成分の最大値： P_T^T 、線路直交方向平均値： \bar{P}_T^L 、変動成分の最大値： \bar{P}_T^T ）

<平均成分>

$$\bar{P}_T^T, \bar{P}_T^L = q_R \left(\frac{z_i}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T \quad (2-4-1)$$

<変動成分の最大値>

$$P_T^T, P_T^L = q_R \left(\frac{z_i}{z_R} \right)^{2\alpha} C_T A_T n_T (G_{RT} - 1) \quad (2-4-2)$$

ここに、

- q_R : 鉄塔の設計用速度圧 [N/m²]
- z_i : i パネル中心の地表面からの高さ [m]
- z_R : 基準高さ [m] (鉄塔高さの2/3)
- 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を表し、JEC-127に準拠し、充実率に応じて求める
- 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、線路直行方向の応力分担率を表し、JEC-127による
- G_{RT} : 鉄塔のガスト影響係数で、次式により算定する

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

ただし、

$$B_T = \frac{1}{1 + 0.163 \left(\frac{k_z H}{L_{UR}} \right)^{0.709}} \quad (\text{非共振係数})$$

$$R_T = \frac{\pi}{4h_T} S_T F_T \quad (\text{共振係数})$$

$$S_T = \frac{1}{1 + 0.334 \left(\frac{k_z H f_1}{U_R} \right)} \quad (\text{規模係数})$$

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

$f_1 = 100/H$ (鉄塔の1次固有振動数 [Hz])

$$g_T = \sqrt{21n(600v_T) + 1.2} \quad (\text{ピークファクタ})$$

$$v_T = f_1 \sqrt{\frac{R_T}{B_T + R_T}} \quad (\text{期待振動数 [Hz]})$$

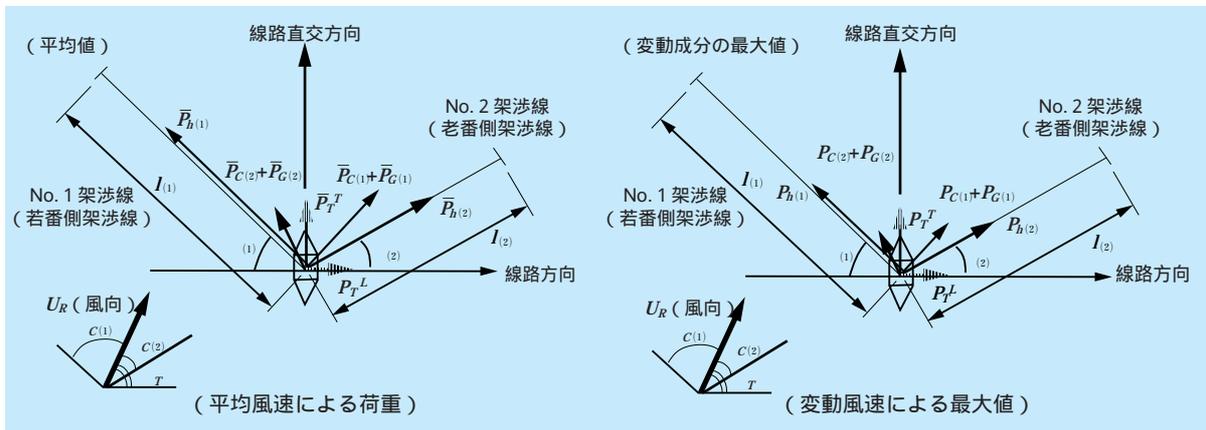


図2-4-1 任意の架線状態に対する風荷重の定義

ここに、

- H : 鉄塔高さ [m]
- 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
- h_f : 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)

2) 架渉線風圧荷重 (平均値 : P_c 、変動成分の最大値 : P_c)

< 平均成分 >

$$\bar{P}_C = q_R C_C A_C k_C n_C \quad (2-4-4)$$

< 変動成分の最大値 >

$$P_C = q_R C_C A_C k_C n_C (G_{RC} - 1) \quad (2-4-5)$$

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]
- l : 径間長 [m] ただし支持点高低差を有する場合は、支持点距離とする
- n_C : 架渉線風圧荷重の応力分担率を表し、JEC-127による
- k_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

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

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

$$G_{RC} = 1 + 2g_c I_{uR} \sqrt{B_C} \quad (2-4-6)$$

ただし、

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

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。
- k_x : 水平横方向のディケイファクタ

3) 架渉線張力荷重 (平均値 : \bar{P}_h 、変動成分の最大値 : P_h)

< 平均成分 >

$$\bar{P}_h = \bar{h} \quad (2-4-7)$$

< 変動成分の最大値 >

$$P_h = 2g_h q_R C_C d n_C \frac{\sin(\psi - \varphi)}{\cos^2 \varphi} \frac{E_c A}{L_e} \frac{pl^2}{2(H + \bar{h})^2} - I_{uR} \sqrt{B_h} \quad (2-4-8)$$

ただし、

$$p = \sqrt{\left(q_R n_C C_C d \frac{1}{\cos \varphi} \right)^2 + \left(w_C - q_R n_C C_C d \frac{\sin \varphi}{\cos^2 \varphi} \right)^2}$$

(平均風速作用時の単位長さあたりの面内方向分布力)

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

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

ここに、

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

E_c : 架渉線の弾性係数 [N/m²]

w_C : 架渉線単位長重量 [N/m]

H_0 : 無風時水平張力 [N]

\bar{h} : 平均風速による水平張力増分 [N]

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。

(2-4-10)

2-4-3 各風荷重の組み合わせ

以上により求められた各風荷重について、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、線路方向荷重が算定される。これら個別に評価された風荷重を組み合わせる際の考え方の模式図を図2-4-2に示す。

各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により考慮している。ただし、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 >

$$H^Z = (\bar{P}_{h(1)} + P_{h(1)}) \tan \delta_{(1)} + (\bar{P}_{h(2)} + P_{h(2)}) \tan \delta_{(2)} \quad (2-4-9)$$

< 線路直交方向荷重 H^T >

$$H^T = \left| \bar{P}_T^T + \bar{P}_{C(1)}^T + \bar{P}_{C(2)}^T \right| + \varepsilon_4 \left| P_T^T + \varepsilon_1^T \varepsilon_2^T \varepsilon_3 \varepsilon_4 \left(\left| P_{C(1)}^T \right| + \left| P_{C(2)}^T \right| \right) \right|$$

ただし、

平均成分：

$$\bar{P}_{(1)}^T = \left(\bar{P}_{C(1)} + \bar{P}_{G(1)} \right) \cos \theta_{(1)} + \bar{P}_{h(1)} \sin \theta_{(1)} \quad (2-4-11)$$

$$\bar{P}_{(2)}^T = \left(\bar{P}_{C(2)} + \bar{P}_{G(2)} \right) \cos \theta_{(2)} + \bar{P}_{h(2)} \sin \theta_{(2)} \quad (2-4-12)$$

変動成分の最大値：

$$P_{(1)}^T = \left| \left(P_{C(1)} + P_{G(1)} \right) \cos \theta_{(1)} + P_{h(1)} \sin \theta_{(1)} \right| \quad (2-4-13)$$

$$P_{(2)}^T = \left| \left(P_{C(2)} + P_{G(2)} \right) \cos \theta_{(2)} + P_{h(2)} \sin \theta_{(2)} \right| \quad (2-4-14)$$

< 線路方向荷重 H^L >

$$H^L = \left| \bar{P}_T^L + \bar{P}_{C(1)}^L + \bar{P}_{C(2)}^L \right| + \varepsilon_4 \left| P_T^L + \varepsilon_1^L \varepsilon_2^L \varepsilon_3 \varepsilon_4 \left(\left| P_{C(1)}^L \right| + \left| P_{C(2)}^L \right| \right) \right| \quad (2-4-15)$$

ただし、

平均成分：

$$\bar{P}_{(1)}^L = \left(\bar{P}_{C(1)} + \bar{P}_{G(1)} \right) \sin \theta_{(1)} - \bar{P}_{h(1)} \cos \theta_{(1)} \quad (2-4-16)$$

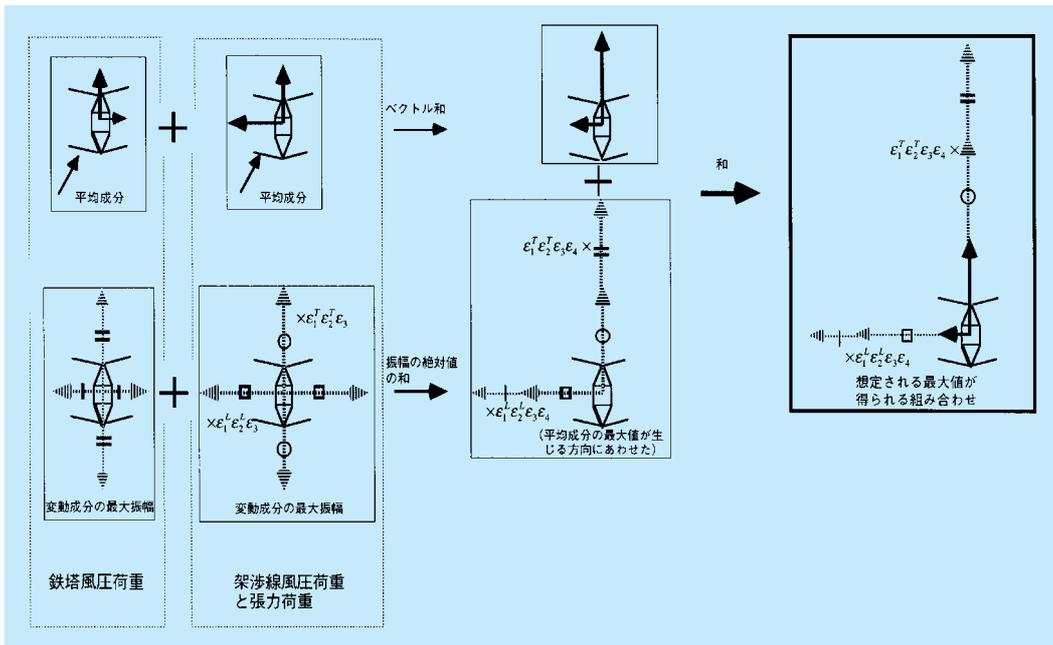


図2-4-2 風荷重の組み合わせ法の模式図

$$\bar{P}_{(2)}^L = -(\bar{P}_{C(2)} + \bar{P}_{G(2)})\sin\theta_{(2)} - \bar{P}_{h(2)}\cos\theta_{(2)} \quad (2-4-17)$$

変動成分の最大値

$$P_{(1)}^L = \left| (P_{C(1)} + P_{G(1)})\sin\theta_{(1)} - P_{h(1)}\cos\theta_{(1)} \right| \quad (2-4-18)$$

$$P_{(2)}^L = \left| -(P_{C(2)} + P_{G(2)})\sin\theta_{(2)} + P_{h(2)}\cos\theta_{(2)} \right| \quad (2-4-19)$$

ここに、 \bar{P}_C^T ：架渉線風荷重（線路直交方向）の平均値、 P_C^T ：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、 γ ：垂直角である。また下付括弧用の数字は架渉線番号を表す。さらに、非同時性低減係数は、それぞれ以下の通りである。

γ_1, λ_1 ：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

γ_2, λ_2 ：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

γ_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

γ_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するものとして、理論的に与えている。具体的な算定方法、計算式は文献(8)、(26)を参照いただきたい。

2-4-4 等価静的風荷重の妥当性確認

等価静的風荷重算定法の精度検証を目的に、第3章で紹介する動的応答解析（周波数領域）による3基2径間立体骨組モデルの発生軸力の計算結果と、等価静的風荷重による発生軸力を比較した。特に風向別設計を可能と

するには、任意の風向に対しても一定の精度で評価ができなければならない。そこで主として風向をパラメータとして、等価静的風荷重の適用性を評価した。

ここでは、以下の2ケースにおける比較結果を紹介する。

解析モデル①：500kV 鋼管耐張型（塔高77.5m、水平角15度、径間長450m、等径間）

解析モデル②：500kV 鋼管耐張型（塔高77.5m、水平角15度、径間長600m、300m、径間比2：1）

また入力としては、地上高10m位置の平均風速を40m/s、粗度区分Ⅱ（表2-2-1参照）とし、図2-4-3に示すように風向30度ピッチとした。上記解析モデル①のモデル図を図2-4-4に示す。

主要パネル（4、7、10、15パネル、図2-4-4参照）の発生軸力の比較図を図2-4-5、図2-4-6に示す。凡例中の数字は、パネル番号を表す。ただし、ここに示す発生軸力は、風荷重のみによって生ずる軸力であり、自重、無風時張力による水平角度荷重は含まない。

これらの図より等価静的風荷重による発生軸力は、各風向とも動的反応解析結果と概ね一致を示していることがわかる。なお、いずれのケースにおいても240度、300度風向については、誤差が若干大きい結果となっている。これは、詳細な考察により鉄塔の変位に伴う架渉線の支持点移動が起因しているためであり、鉄塔・架渉線連成系として扱わない限りさけることのできない問題である。このようなケースに対して精度良く発生応力を算定したい場合は、動的応答解析を実施するなど別の対応が必要と考えられる。したがって等価静的風荷重の適用範囲の明確化が重要であり、今後の課題である。

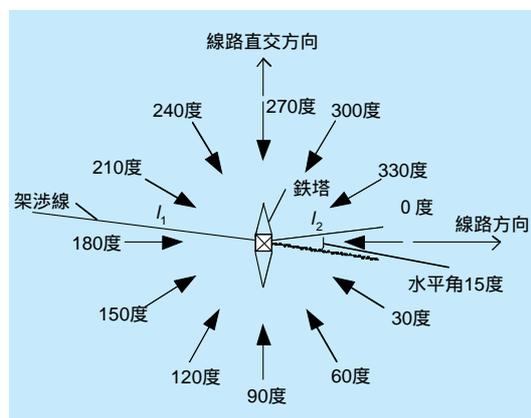


図2-4-3 風向の定義

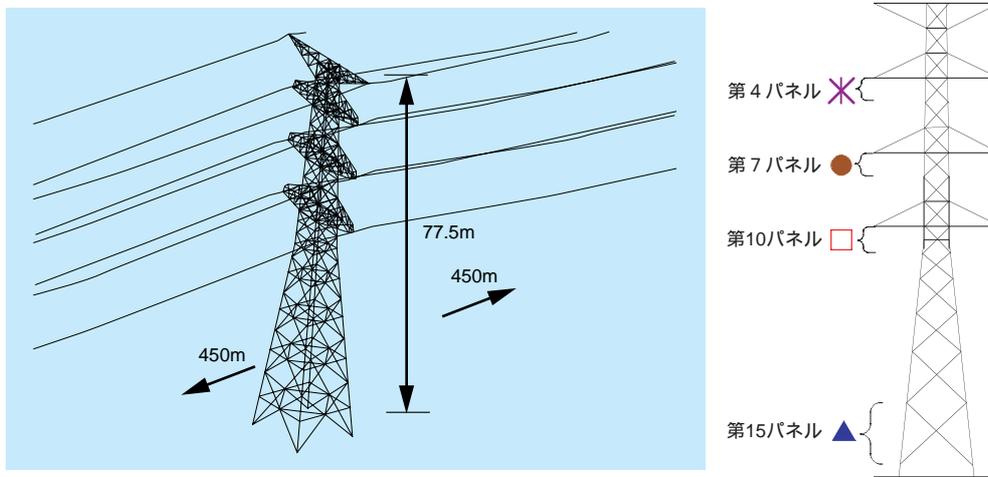


図2-4-4 検討用モデル図（解析モデル①）

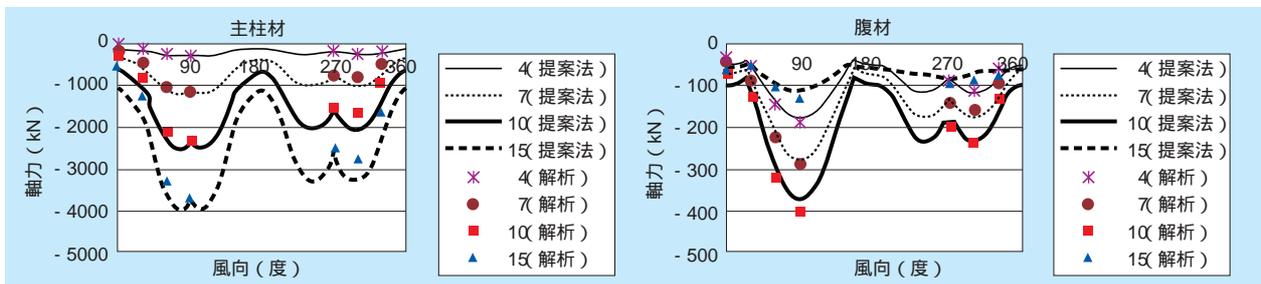


図2-4-5 主要パネル（4、7、10、15パネル）の風向別発生軸力の比較（解析モデル①）

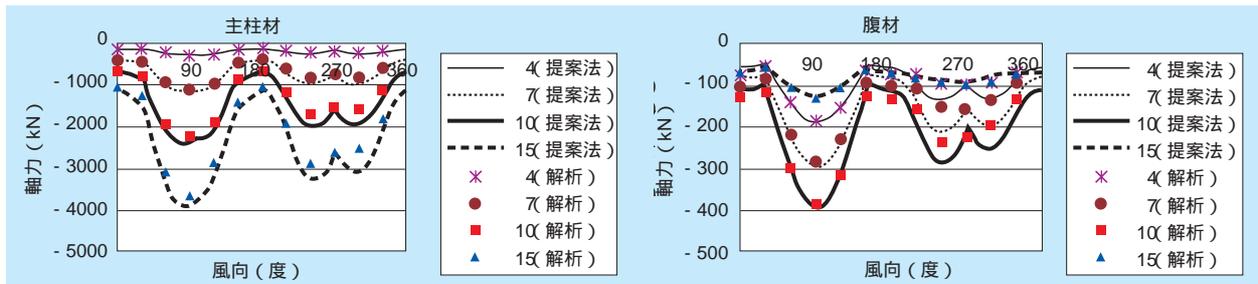


図2-4-6 主要パネル（4、7、10、15パネル）の風向別発生軸力の比較（ケース②）

2-4-5 ま と め

送電鉄塔の耐風設計に活用することを目的として、動的効果を考慮した等価静的風荷重評価法を提案した。本手法では、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さらに架渉線張力荷重の算定式を誘導するとともに、これまでに特に風荷重として規定され

ていなかった架渉線張力荷重の評価式を提示した。また、架空送電線路は鉄塔および多数の架渉線で構成されることから、これらの動的な連成効果を考慮するために非同時性低減係数を新たに提案することにより、風荷重評価法を体系化した。また、ここに提案した風荷重評価法と動的応答解析による鉄塔・架渉線連成系の発生軸力を比較した結果、任意の風向、架線条件に対しても、概ね一致する結果となり、本評価法の妥当性を明らかにした。