

日本型風力発電ガイドライン

台風・乱流対策編

概要版

平成 20 年 3 月

発行： 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構

調査委託先： 株式会社 東洋設計

再委託先： 財団法人 日本気象協会

財団法人 電力中央研究所

序 文

今般、NEDOの「日本型風力発電ガイドライン策定事業」において、日本国内で風力発電設備を設置する事業者向けに、風車被害の低減に資することを目的として、風力発電設備設置にかかる環境条件のうち台風、乱流及び雷に対して風条件の設定、風車選定に関する検討結果等をガイドラインとしてとりまとめた。

本概要版は、「日本型風力発電ガイドライン～台風乱流対策編～」からの重要な部分の抜粋であり、事業者が風力発電設備の導入を検討する上で考慮すべき最低限の事項について記したものである。

なお、本事業の観測データ、試験データ及び調査結果等の詳細については、「日本型風力発電ガイドライン」本編を参照されたい。

適用範囲

本ガイドラインは、「水平軸プロペラ式」風力発電設備を対象としている。ただし、小形風車は対象外である。また、風力発電設備の構成要素として、タワーの基部までを対象とするが、具体的な設計にかかる指針ではない。したがって、荷重の具体的計算手法等は、別途、建築基準法に基づいて行う必要がある。

目 次

序 文	
適用範囲	
目 次	
1. 風条件の評価～風車の選定【総論】	1
1.1 風車選定のための風条件の設定	1
1.2 風車の選定	3
1.2.1 技術規格に適合した風車からの選定	4
1.2.2 技術規格による標準的な風条件を超える場合の風車の選定	5
1.3 風車本体以外（タワー、電気設備）の設計	6
1.3.1 タワーの設計	6
1.3.2 電気設備の設計	6
2. 風条件の評価方法【各論】	7
2.1 現地風況観測	8
2.2 地形の複雑度の判定	10
2.3 極値風速マップ及び極値風速データベース	12
2.3.1 気象官署等における風観測データによる極値風速算出	14
2.3.2 極値風速マップ	15
2.3.3 極値風速データベース	21
2.3.4 数値シミュレーションまたは風洞実験による小地形影響評価	22
2.4 風観測データの統計解析および推定式による乱流強度の設定方法	23
2.4.1 観測データからNTM式パラメータの導出	24
2.4.2 単純地形モデルおよび線形モデルを用いた乱流強度の設定	25
2.4.3 非線形モデルまたは風洞実験による乱流強度の設定	25
[参考] 風車被害の実例と要因分析	28

1. 風条件の評価～風車の選定【総論】

1.1 風車選定のための風条件の設定

風車選定のために必要な風条件のうち主要なものは、以下のとおりである。

これらの評価は、**図 1.1**に示す手順に従うこと。

- (1) ハブ高さにおける 10 分間平均風速の 50 年再現期待値（以下「極値風速」と称する）
- (2) ハブ高さにおける 10 分間平均風速 15m/s に対する乱流強度の期待値
- (3) ハブ高さにおける年平均風速

なお、ほかにも「気流傾斜角」、風速の鉛直分布を示す「べき指数」、「空気密度」などについても、標準的な条件と異なる場合にはそれらを考慮すること。

風車設置を検討する場合、設置場所における 1 年間以上の風況観測を実施することが一般的である。しかしながら、上記の主要三項目について観測結果から直接求めるためには、以下に示す事項が課題となっている。

①観測高度

ハブ高さでの観測を原則とするが、近年になって風車が大型化した結果、観測を実施する高度はハブ高さを下回る場合がほとんどであるため、ハブ高での風条件を評価するためには複数高度における観測結果を外挿して推定する必要がある。

②観測場所

ウィンドファームのように数 km にも及ぶ広範囲の事業計画を行う際には、各風車設置場所での風条件を観測場所と周辺の地形条件などを考慮して推定する必要がある。

③観測期間

日本国内における風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、短期間の風況観測のみから再現期間 50 年の極値を求めると誤差が大きくなる場合がある。

これらの課題に対処するための評価手順を**図 1.1**に示す。図中の V_{ref}^* 、 I_{ref}^* および V_{ave}^* は、それぞれ、本ガイドラインに記載された手順で設定された極値風速、乱流強度および年平均風速であり、各々の詳細に関しては**2 章**に記述する。

また、特に③観測期間での課題に対処するためには、**2.3.1 項**に示す気象官署等における観測データにより極値風速を算定する方法がある。しかし、風車設置予定場所における 1 年間程度の観測データと気象官署等の長期観測地点の観測データとの間に風速の相関がなく、かつ風況の経年変化が少ないという条件を満たさない場合は、この方法で極値風速を評価できない可能性がある。そこで、本ガイドラインでは、日本の耐風設計に関する最新の知見に基づき、気象官署の観測データおよび大規模地形効果などを考慮した極値風速マップ/データベースを提供する。極値風速マップの具体的な内容は、**2.3.2 項**に記述する。

風車の選定に必要な極値風速、乱流強度及び年平均風速は、最低 1 年間にわたる現地での風況観測結果と合わせて、地形の複雑度に応じて、極値風速マップあるいは極値風データベースに基づく手法、気象官署等における観測データに基づく手法、数値シミュレーションあるいは風洞実験に基づく手法などの適切な手法を組み合わせることで評価を行うこと。

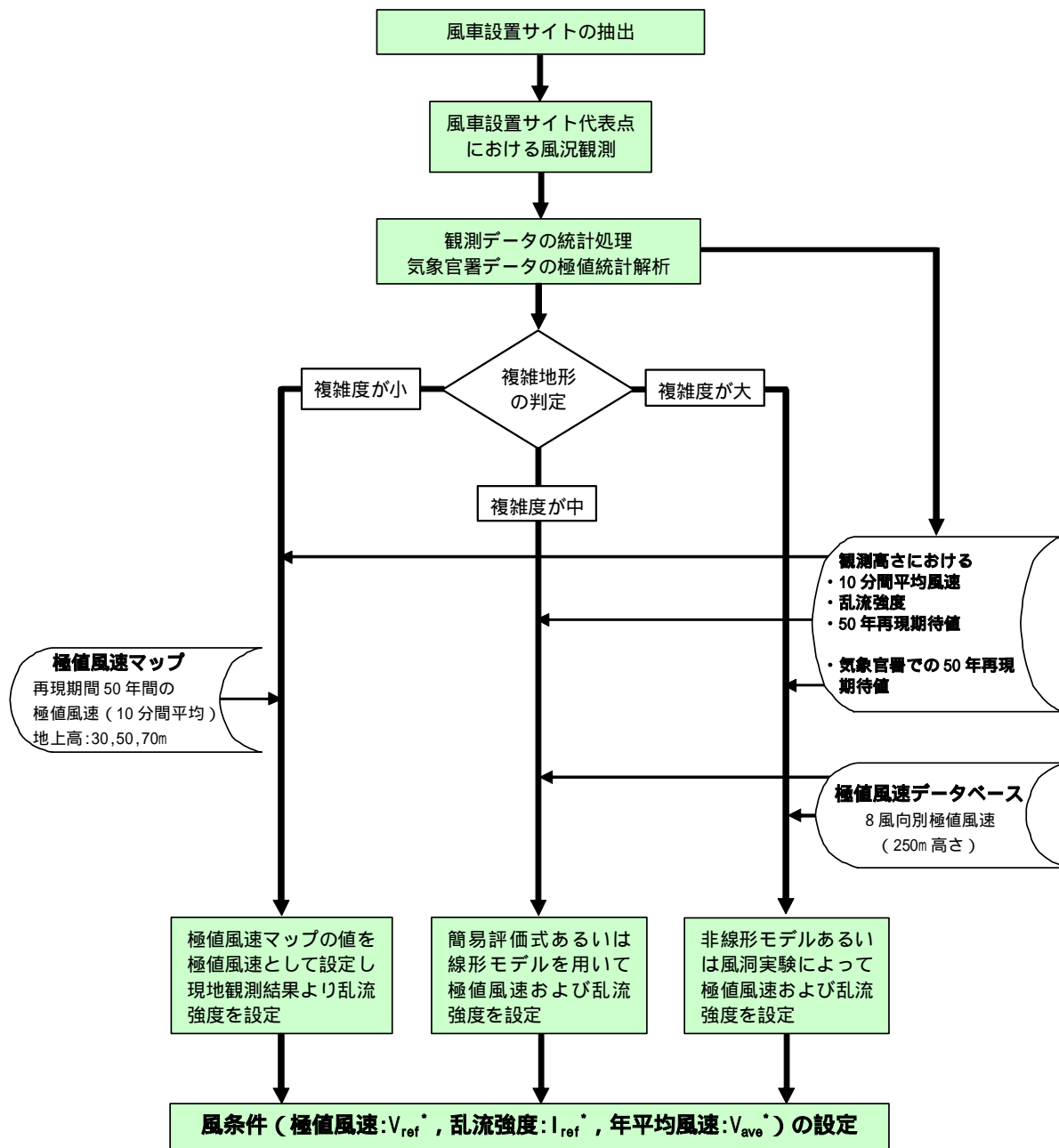


図 1.1 風条件の評価手順

1.2 風車の選定

前節において設定されたハブ高さにおける風条件に適合する風車を選定する際には、**図1.2**に示す手順に従うこと。

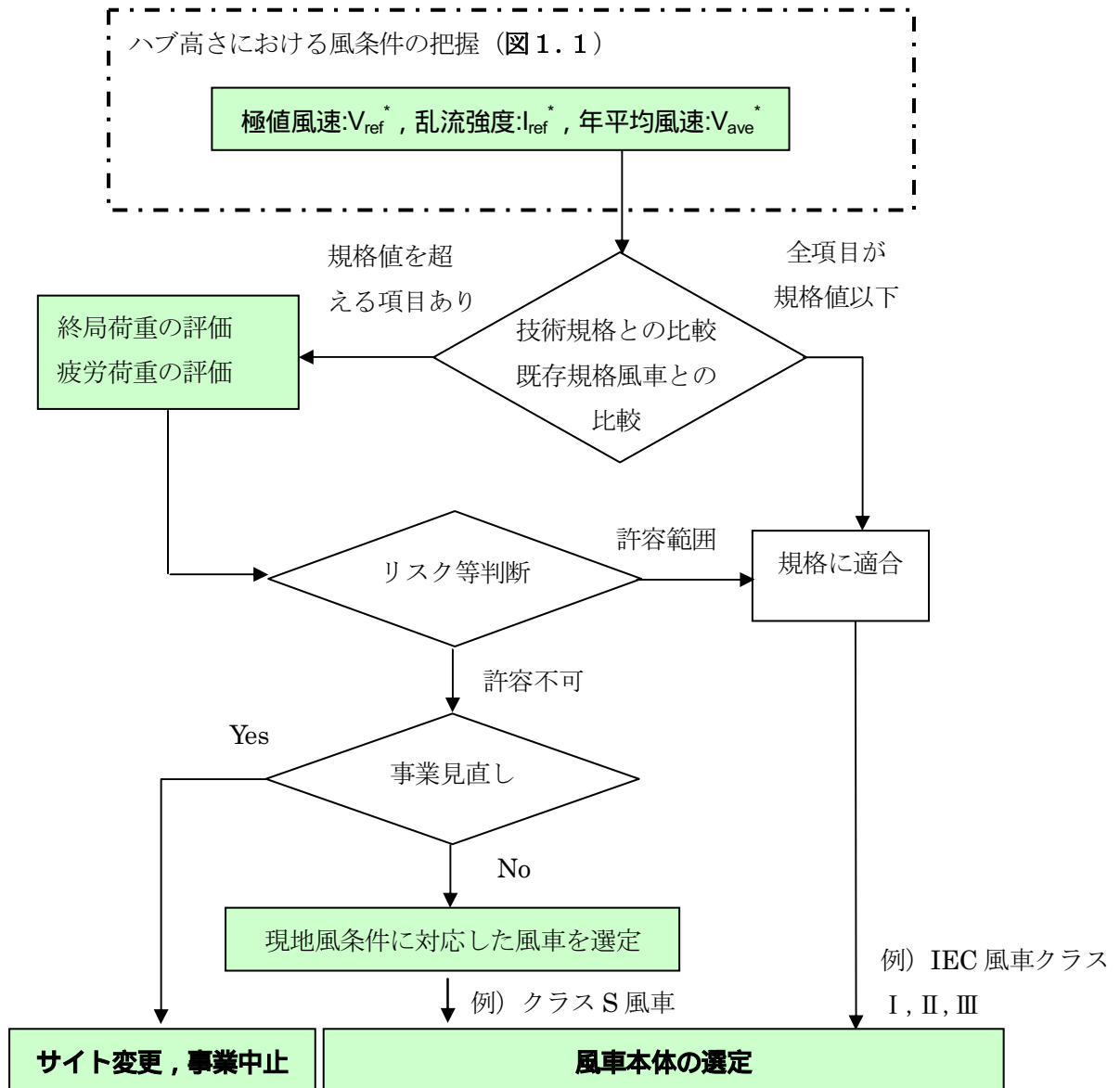


図1.2 サイトの風条件を考慮した風車本体の選定手順

1.2.1 技術規格に適合した風車からの選定

以下の条件を満足する場合には、風車の技術規格により設計・製造された風車を選定する。複数の風車が隣接する場合、相互の影響を考慮すること。

- $V_{ref}^* \leq 50\text{m/s}$
- $I_{ref}^* \leq 0.16$
- $V_{ave}^* \leq 10\text{m/s}$

ただし、 V_{ave}^* は、適合する風車クラスの V_{ref} に 0.2 を乗じた風速を上回らないこと。

注) ○○*は風車設置予定地のハブ高さにおける風条件を示す。例えば、 V_{ref}^* は風車設置予定地におけるハブ高さでの 10 分間平均風速の 50 年再現期待値を意味する。

ここで、風車設置予定地におけるハブ高さでの 10 分間平均風速の 50 年再現期待値 (極値風速) V_{ref}^* 、および風速 15m/s における乱流強度の期待値 I_{ref}^* に関しては、表 1.1 に示す IEC 規格による風条件に示される基準風速 V_{ref} 、乱流強度 I_{ref} との比較を行って適合する風車を選定する必要がある。

表 1.1 風車の国際規格 IEC 61400-1(2005)に規定されている風条件

風車クラス	I	II	III	S
V_{ref} (m/s)	50	42.5	37.5	設計者が規定する数値
A $I_{ref}(-)$	0.16			
B $I_{ref}(-)$	0.14			
C $I_{ref}(-)$	0.12			

上記の IEC 規格では、年平均風速は、基準風速 V_{ref} に 0.2 を乗じた値と定めており、サイトにおける年平均風速 V_{ave}^* も、IEC 規格に対応する風車クラスの年平均風速以下であることを確認する。

参考までに IEC 61400-1(2005)では、風車クラスの基本パラメータおよび付加パラメータを表 1.2 のように定めている。

表 1.2 風車クラスの基本パラメータおよび付加パラメータ

項目	記号	IEC (JIS)	サイト条件	備考
ハブ高さにおける再現期間50年の10分間平均風速	V_{ref}	50 m/s (I) 42.5m/s (II) 37.5m/s (III)	(設置サイトにおいて設定した風条件を記入)	暴風時の風速
再現期間 50 年のガスト (3 秒平均風速)	V_{e50}	$1.4 \times V_{ref}$		
再現期間 1 年のガスト (3 秒平均風速)	V_{e1}	$0.8 \times V_{e50}$		故障等の考慮
ハブ高さにおける年平均風速	V_{ave}	$0.2 \times V_{ref}$		発電量・疲労荷重
ハブ高さにおける乱流強度 (風速 15m/s)	I_{ref}	0.16 (A) 0.14 (B) 0.12 (C)		疲労荷重 $\sigma_2 = 0.7\sigma_1$ $\sigma_3 = 0.5\sigma_1$
気流傾斜角(風のロータ面への流入角)	θ	8°		
風速の鉛直分布 (べき法則)	α	通常時は 0.2 暴風時は 0.11		地表面粗度、障害物の影響
空気密度	ρ	1.225 kg/m^3		高地、極低温

1.2.2 技術規格による標準的な風条件を超える場合の風車の選定

風車設置サイトの風に関する風条件が、技術規格 (IEC 61400-1(2005)など) で定められた通常の風車クラス (クラス I, II, III) の設計条件を超える場合には、図 1.2 に示す手順で風車の選定を行うこと。

「風車クラス S」とは、IEC 規格等で定められている通常の風車クラス (I, II, III) に当てはまらない設計条件によって設計・製造された風車全てを指す。したがって、必ずしも厳しい風条件に適合した風車とは限らず、例えば台風の影響がほとんどなく非常に平坦な地形を対象として、設計条件を「緩和した」風車も「クラス S」に分類されるため、クラス S では具体的設計条件を詳細に確認する必要がある。

1.3 風車本体以外（タワー、電気設備）の設計

タワーおよび基礎などの支持構造物、系統連系のための電気設備などの仕様は、風車本体（ロータ、ナセル）の仕様に適合させるとともに、設置場所の環境条件にも適合するように決定する必要がある。

1.3.1 タワーの設計

風車タワーの設計には、台風や低気圧による暴風時の風荷重、風及び翼荷重による変動荷重によって生じる疲労荷重を考慮すること。また、IEC規格等に基づいてガストの影響や異常時の荷重など、風車特有の荷重条件についても考慮すること。

風以外の荷重については、我が国固有の環境条件（地震）を考慮した建築基準を満足する必要があるが、機器故障を含めた種々の状況を想定した設計が必要であるため、風速に応じた比例計算のような単純な補正計算によって設定しないこと。

暴風時のタワーの扱いに関しては、土木学会「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」（以下、土木学会指針と称する）を参考とすることができる。この指針ではタワーに加えて、基礎の設計も対象としている。

1.3.2 電気設備の設計

風力発電所の電気設備は、適切な国際規格（IEC規格等）もしくは日本国内の規格に基づいて適切に設計すること。また、系統連系設備は、その要件を満たすこと。

風車設計時に想定していないような長期間の停電などが想定される場合には、制御装置のバックアップ電源として自家発電機を用意するなどの必要な安全措置を講じること。

台風時のヨー制御など、風車の能動的な制御を前提とした荷重設定を行う場合には、各機器の制御用電源を確保しなければならない。また、制御に必要な計測機器、制御用の駆動機器、ブレーキ等についても、想定される条件での動作が可能であることを確認する必要がある。

一方で、これは、制御用バックアップ電源の設置を義務づけるものではない。

2. 風条件の評価方法【各論】

風車の選定に必要な極値風速及び乱流強度は、極値風速マップあるいは極値風速データベースに基づく手法、または、最低1年間にわたる現地での風況観測結果を合わせて評価すること。

周辺地形の複雑度が大きく、平坦地として取り扱うことができない場合、また、複数の地形要素が組み合わさるなど単純な地形モデルが適用できないと判断された場合には、数値シミュレーションあるいは風洞実験など適切な手法を用いた評価を行うこと。

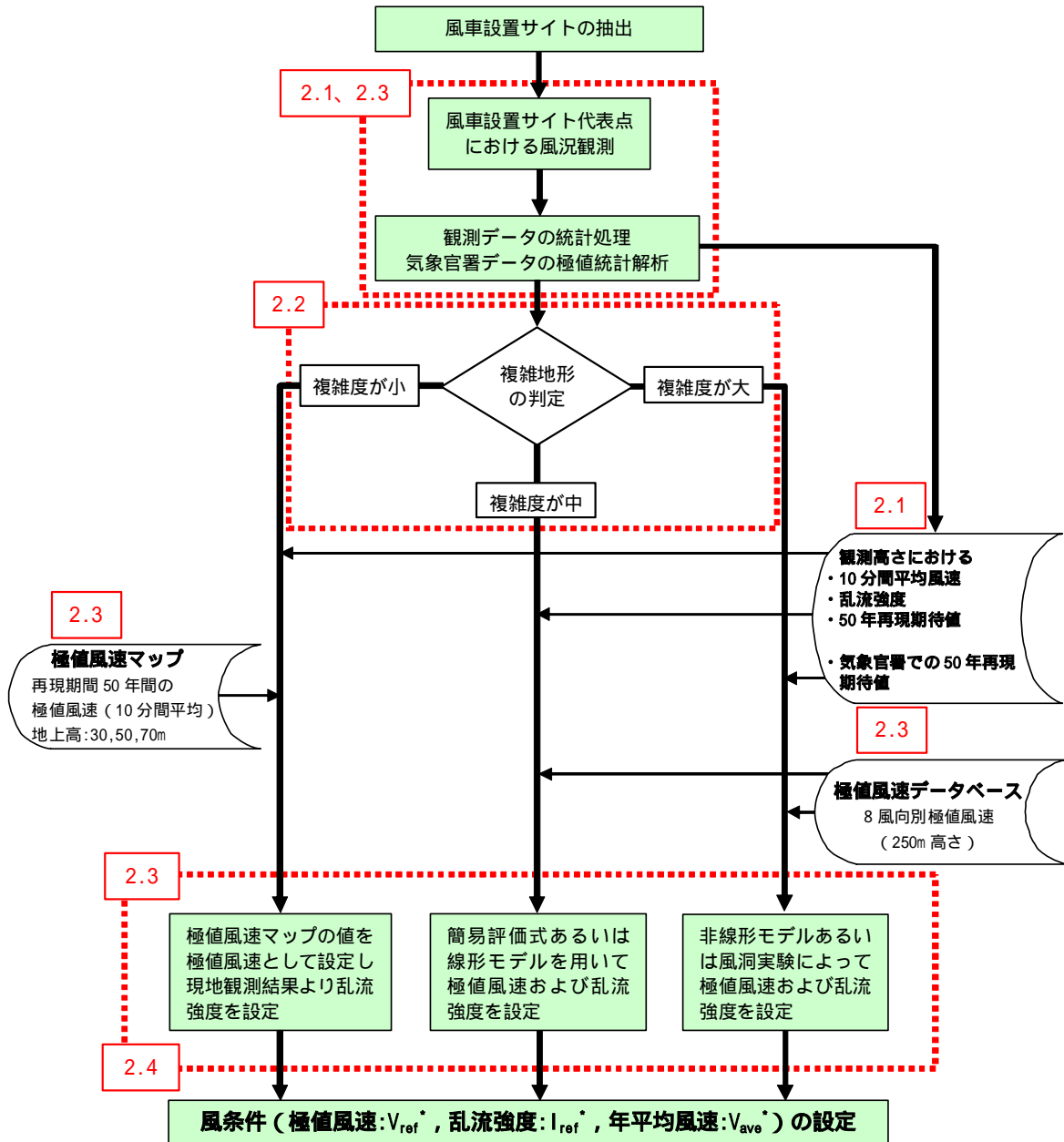


図2.1は、図1.1の再掲であり、風条件の評価手順を示している。図中の番号は本章の各節に対応している。

風力発電の事業者は、風車設置予定場所において適切な風車を選定するにあたり、極値風速、乱流強度および平均風速を確認する必要がある。この章では、予定場所における地形の複雑度の判定法とともに、極値風速および乱流強度の評価方法を記載している。

2.1 現地風況観測

風力発電事業の予定地では、事前に現地での風況観測（風況精査）を少なくとも1年間以上実施すること。

観測高さは風車のハブ高さを原則とするが、これを満足することができない場合には、複数の高さで観測した結果を用いて外挿するなど適切な方法で高度補正を行うこと。

風況観測を行う際、次の3つのパラメータを評価できるように考慮すること。

- (1) ハブ高さにおける10分間平均風速
- (2) ハブ高さにおける10分間平均風速に対する非超過確率90%に相当する乱流強度
- (3) 風の鉛直分布を示すべき指数

上記のパラメータ以外に、現地観測やその他の方法を用いて、空気密度や、地形の複雑と判定される場合に気流傾斜角および乱流強度の3成分を評価できるようにすること。

日本においては、季節変動を考慮し、1年間の観測結果は風条件の把握の面でも妥当と考えられる。また、風力発電を補助事業として行う場合は、少なくとも1年間以上の風況観測の実施が必要とされている。

風況観測地点の選択には、風車設置予定地と地形が著しく異なることや、丘陵や障害物の影響が及ばないこと等に十分留意する必要がある。

風況観測から得られる風速の頻度分布は、風力発電の事業採算性を判断する材料となるほか、乱流強度の頻度分布ともあわせて、風車の選定にも用いられる。

風況観測の高さは、IEC規格等にしたがって、設置を計画している風車のハブ高さで実施することが求められるが、物理的制約や法的規制のためにそれが困難である場合には、可能な限り高い高さでの観測を実施し、さらに複数高さでの観測を行うことにより、ハブ高さにおける風速を推定する。ただし、地形が複雑な場合には、このような外挿により推定されるハブ高さにおける風速の予測誤差が大きくなる可能性がある。このため、数値解析による風況解析を実施し、確認することを推奨する。

風条件のうち、乱流強度は、現地での観測データから推定することができるが、ウィンドファ

ーム等、複数の風車を設置する場合で、全ての風車位置での風況観測を行うことができない場合には、地形の複雑度に応じて数値解析による風況解析を実施するなど追加検討を行う必要がある。

風況観測データの取得方法については、NEDO 風況精査マニュアルもしくは NEDO 高所風況精査マニュアルに示された方法に従うこととするが、IEC 61400-1（設計要件）および IEC 61400-12-1（性能計測）の規定にしたがって実施することも可能である。

2.2 地形の複雑度の判定

平坦な地形条件に対応して設定されている標準風条件に対して、別途風条件の確認、評価が必要な地形条件に関しては、以下の指標を用いて地形の複雑度を判定すること。

- (1) 地形の傾斜が 10 度以上。
- (2) 半径 5km 以内での風上側地形断面での標高の標準偏差が $1.5 \times$ ハブ高さ以上。
- (3) 半径がハブ高さ $\times 5$ 、10、20 内の風上側地形断面での標高の標準偏差がそれぞれハブ高さ $\times 0.5$ 、0.8、1.4 を超える。
- (4) 小地形による増速率が 1.1 を超える。
- (5) 隣り合う等高線間の勾配のうち、勾配が 30%以上の割合が 3 割を超える。

これらの指標は風向別に評価した後、その最大値によって判断する必要がある。

上記の指標による複雑度の判定条件は以下の通りである。

- | | |
|---------------------------------------|--------|
| a) (1)、(2)、(3)、(4)、(5)の全てが該当せず | : 複雑度小 |
| b) (1)、(2)、(3)、(4)のいずれかが該当および(5)が該当せず | : 複雑度中 |
| c) (1)、(2)、(3)、(4)のいずれかが該当および(5)が該当 | : 複雑度大 |

ただし、ここで示される判定方法は地形の複雑度の目安であり、複雑度が小または中と判定された場合でも、地形によっては乱流強度や極値風速が大きな値を取る可能性もあるため、注意を要する。

風車の国際規格である IEC 61400-1(2005)および GL ガイドライン(2003)では、ヨーロッパを中心とした比較的平坦な地形条件を前提に設定された標準風条件に対して、別途地形の影響などを考慮すべき複雑地形の判定条件を表 2.1 のように定めている。

表 2.1 複雑地形の判定指標

風車からの離隔	最大傾斜	風車周辺の最大起伏
$< 5 \cdot Z_{hub}$	$< 10^\circ$	$< 0.3 \cdot Z_{hub}$
$< 10 \cdot Z_{hub}$		$< 0.6 \cdot Z_{hub}$
$< 20 \cdot Z_{hub}$		$< 1.2 \cdot Z_{hub}$

注) Z_{hub} : ハブ高さ 最大起伏: 標高差

風車設置場所の地形の複雑さは、地形の平面からの変化によって特徴づけられ、表2.1に示す全ての条件を満たさない設置場所は複雑であると判定される。

本ガイドラインは、地形の複雑度の大きさに対応した風車の選定パラメータを設定する方法を示すものであるため、上記 IEC 規格の方法では複雑度の大小を評価することが難しい。このため、本ガイドラインでは、地形の複雑度の評価方法の判定には上記 (1)～(5)の値を用いることとする。ただし、(1)～(5)までの指標は、風向別に評価した後、その最大値によって判断すること。風向の分割数は16とする。

(1)～(3)は、IEC 規格に準拠した指標であり、(1)により、小地形による風速への影響の可能性があると判断され、(2)および(3)により、風車近傍での複雑度が判定される。風上側に標高の高い山岳地が広がる場合、ハブ高さにおける風速の増速を考慮する必要性は小さいと考えられるが、風の乱流強度は大きくなる可能性がある。

(4)は、(1)の小地形による増速効果と関連する項目である。増速率の評価については、送電用鉄塔の耐風設計技術、建築学会の建築物荷重指針・同解説(2004)における小地形による風速の割り増し係数についての記述を参照のこと。(1)では増速の可能性が示されるが、通常、増速率は地表のごく近くで大きく、離れると小さくなる。したがって、大型風車に対しては、ハブ高さにおける風速を増速率によって補正すれば、風車上部の風速分布を平坦地のものと仮定しても風車の強度等の評価に与える影響は小さいと考えられる。

(5)に係わる指標として代表的なものは、Risoe 研究所の開発した風況シミュレーションソフト WAsP で用いられている RIX である。RIX は、WAsP の適用範囲を判定するための基準であり、流れるはく離が発生すると言われている勾配以上の地形が占める割合を方位別に示したものである (Mortensen 他、2006)。通常、RIX の算定に用いるはく離発生判定のための斜面勾配の閾値は、0.3 (傾斜度で約 17 度、勾配で 30%) に設定される。

以上示したように、ここで示した判定基準は、地形の複雑度の目安であり、複雑度が小または中と判定された場合でも、地形によっては (例えば、谷風) 乱流強度や極値風速が大きな値を取る可能性もあるため、注意を要する。

ただし、現地観測結果の風速データが標準風条件およびこれに小地形の影響補正を加えた結果から大きくずれている場合には、上記地形影響評価の結果に関わらず、風特性の把握を行い、周辺への展開に際しても数値シミュレーションの適用などを考慮すること。また、得られた風特性を整理し、風車構造や運用上の問題の有無を評価することが必要となった場合に参照できるように保存すること。なお、地形の判定を行うためのツールとして、電力中央研究所の開発したプログラムや WAsP があり、一般に入手可能である。

2.3 極値風速マップ及び極値風速データベース

風車の選定条件としての極値風速は、サイトにおける最低1年間以上の期間を有する観測データと気象官署の風観測データとの相関係数、もしくは極値風速マップ/極値風速データベースを用いて決定すること。ただし、数値シミュレーションを行う場合には、極値風速データベースに代わり気象官署における50年再現期待値を用いることを妨げない。

具体的な地形の複雑度の判定は、**2.2節**に記載される定義によって行うこと。

(1) 気象官署等における風観測データを用いる場合

風車設置場所近傍に長期の気象データを有する気象官署等が存在し、風車設置場所で観測されたデータと高い相関を有する場合は、統計解析に基づく評価によることができる(**2.3.1項**参照)。

(2) 風車設置場所での十分な期間の観測データがない場合、もしくは近傍気象官署データとの相関が高くない場合

① 平坦地形と判断される場合

本ガイドラインの「極値風速マップ」(**2.3.2項**参照)の値を利用することができる。「極値風速マップ」の仕様は以下のとおりである。

- ・ 10分間平均風速の50年再現期待値
- ・ 1kmメッシュマップ
- ・ 地上高30、50、70mの3高度の風速
- ・ 国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮

② 平坦地形ではないと判断される場合

「極値風速データベース」(**2.3.3項**参照)をもとに、地形の複雑度に応じて単純地形モデル(建築物荷重指針・同解説(2004)の「小地形による乱れの強さの補正係数」の項で定義される方法)あるいは適切な数値シミュレーションや風洞実験を実施して求める(**2.3.4項**参照)。「極値風速データベース」の仕様は、以下のとおりである。

- ・ 風向別の10分間平均風速の50年再現期待値
- ・ 1kmメッシュマップ
- ・ 上空250mにおける8風向の風速
- ・ 小地形影響評価のためのデータベース

なお、①の平坦地形の場合でも、②の方法により極値風速を求めることを妨げるものではない。

本ガイドラインでは、風車設置場所の極値風速(V_{ref}^*)は、以下の手法で評価する。

熱帯性低気圧（台風）が頻繁に襲来する気象条件にある日本においては、風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、短期の風況観測から再現期間 50 年の極値風速を直接求めることは誤差が非常に大きいため適切ではない。しかし、サイト近傍に長期の気象観測データを有する気象官署等が存在し、風車設置場所で観測された風速データと高い相関を有し、風況の経年変化が少ないという条件が満たされていれば、統計解析によって極値風速を推定することができる。

風車設置場所での十分な期間の観測データがない場合、もしくは近傍気象官署データとの相関が低い場合、短期間の風況観測のみから再現期間 50 年という長期間の極値を統計的に推定すると誤差が大きくなってしまう場合がある。それを補完するため、本ガイドラインでは、建築学会「建築物荷重指針・同解説」（2004）におけるデータをもとに、数 km 以上のスケールでの大規模地形の影響を考慮して「極値風速マップ」および「極値風速データベース」を作成・提供する。すなわち、風車設置予定地点における極値風速を簡易に評価するための支援資料として、

- ① 極値風速分布の概略が把握できる「極値風速マップ」
- ② 小地形の影響などさらに詳細な検討を加える利用者向けの「極値風速データベース」

の 2 種類の資料を提供する。

上記のデータは、いずれも全国を平面的に 1km メッシュで網羅したものであり、平均標高データ（1m 単位）で表現されるような数 km 以上のスケールにおける大規模地形の影響を考慮したものである。さらに、小スケールの地形の影響については、必要に応じて利用者が「極値風速データベース」の値をもとに個別に検討する必要がある。

提供する極値風速マップ／極値風速データベースは、以下のような条件を備えたものである。

- ①気象官署があるメッシュの値（以下、気象官署メッシュ値と称する）は、観測値および台風シミュレーション結果を統計処理して求められた建築物荷重指針・同解説（2004）の 50 年再現期待値を用いて求め、それ以外のメッシュの値は、気象官署メッシュ値と気流解析結果をもとに内挿により求めたものである。
- ②気象官署メッシュ値は、建築物荷重指針・同解説（2004）に基づく 50 年再現期待値を、風向別に気流解析結果の風速鉛直分布から求めたべき指数・粗度区分を用いて上空（地上高 250m）の風速に換算し、極値風速マップ／極値風速データベースの作成に用いている。
- ③気象官署間の任意地点においては、風上側の数 km スケール以上の大きな地形による増速・減速等の効果が反映されている。
- ④「極値風速マップ」は、全風向の中で最大の極値風速をプロットしたものである。また、「極値風速データベース」は、8 風向別に極値風速のデータが用意されている。
- ⑤「極値風速データベース」は、上空（地上高 250m）の風速として与えている。

2.3.1 気象官署等における風観測データによる極値風速算出

気象官署等における風観測データを用いて極値統計解析を行う場合には、極値Ⅰ型分布（Gumbel 分布）、極値Ⅱ型分布（Frechet 分布）、極値Ⅲ型分布等、適切な分布関数を用いて行うこと。

風車設置場所で観測された風速データと近傍の気象官署等での同期間の風速データとの相関解析を行い、相関係数 0.8 以上が得られる場合に、気象官署等のデータから得た再現期待値に回帰係数を乗じることで、風車設置場所での極値風速を求めることができる。

日本国内における風車設置場所の極値風速は、稀に通過する台風によって決定される地域が多いため、一般的に、一年間程度の短期間の風観測により再現期間 50 年の極値風速を推定することは困難であるが、以下の条件を満足して信頼性が確保された場合にはその限りではない。

- ①風向及び風速に関して、相関係数 0.8 以上が得られる場合。
- ②風況の経年変化が少ない場合。（①で規定する高い相関が毎年保たれると期待できる場合）

なお、気象官署等における長期間の風観測データを用いて、相関解析により風車設置場所での極値風速を求める際には以下の点に留意する必要がある。

（1）気象官署等における観測資料の均質性の確認

・観測場所、観測高度

観測途中において観測場所、観測高度が変更となっている場合があるので確認する必要がある。

・使用測器

4 杯型風程式風速計、3 杯風速計、風車型風向風速計等、使用測器を確認する必要がある。

・観測法

日当たりの観測回数や平均風速の評価時間などを確認する必要がある。

・統計法

気象官署等における年最大値の算出に際して、欠測データの取扱いなど統計処理方法について確認する必要がある。

（2）使用測器の違いによる補正

使用されている測器の特徴を確認するとともに、使用測器の交換時期、ならびに測器間における観測データの補正が行われているか確認する必要がある。

2.3.2 極値風速マップ

風車設置場所が平坦地形と判断される場合は、「極値風速マップ」から求められる値をその場所における極値風速として使用することができる。

「極値風速マップ」は、**図 2.2**～**図 2.6**に示したとおり全国を 1km メッシュで網羅した極値風速であり、これにより風車設置場所周辺の極値風速分布の概要を把握できる。

「極値風速マップ」の特徴は、以下のとおりである。

- ・地上高 30m、50m、70m の 3 高度における風速であること
- ・国土数値情報の土地利用区分に基づく地表面粗度の影響を考慮したこと
- ・極値風速分布を把握できるように分布図の形で提示したこと

「極値風速マップ」は、1km メッシュの平均標高データおよび地表面粗度分布による風況への影響が考慮されて作成されている。そのため、そのようなメッシュで表現されるような数 km 以上のスケールにおける大規模地形の影響は考慮されているが、それより小スケールの地形起伏が顕著である地域では、その影響について必要に応じて利用者が **2.3.3 項**に示す「極値風速データベース」をもとに個別に検討する必要がある。

また、「極値風速マップ」は、地上高 30～70m 程度のハブ高さを持つ風車を主な対象としている。対象とする風車のハブ高さにおける極値風速を「極値風速マップ」から求める際には、各高度の「極値風速マップ」の値をもとに高度方向の線形補間で求める。べき法則を利用して 2 高度の極値風速から補間することも可能であるが、地上高 30～70m 前後では極値風速マップとの高度差が小さいので線形補間した結果と実用上ほとんど差がない。

なお、極値風速マップを地上高 30m、50m、70m の 3 高度、地表面粗度の影響を考慮したマップとした理由は、以下のとおりである。

- ・「極値風速マップ」が極値風速分布の概略を把握するためのものと位置づけ、利便性やわかりやすさという観点から、高度・地表面粗度の補正ができるだけ必要ないようなマップとした。
- ・日本における風車は、山間部のような比較的複雑な地形上に立地される場合が多く、風速の鉛直分布が必ずしもべき法則に従うとは限らないため、簡易式による高度補正でハブ高さでの風速を求める方法ではなく、ハブ高さ付近の風速を直接示すものとした。
- ・地表面粗度影響の考慮には、数値シミュレーションによる気流解析を利用している。このような気流解析は、風況調査では一般的に用いられる手法であり、風上側の粗度分布の影響を客観的に取り入れることができる。

次ページ以降に、地上高 70m の極値風速マップを示す。

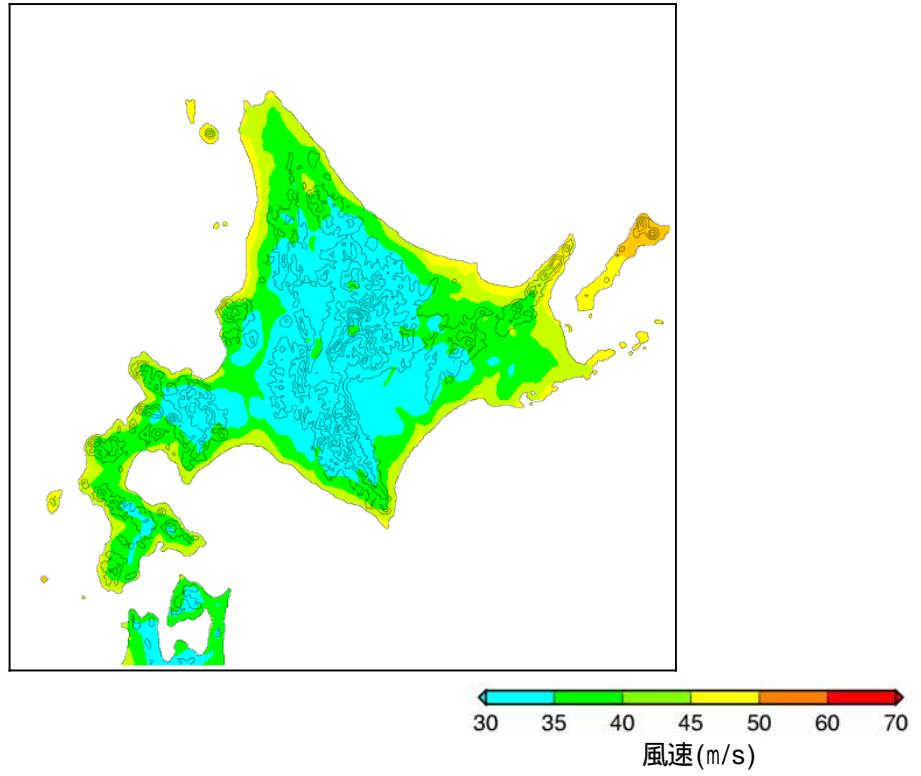


図 2. 2 極値風速マップ：北海道エリア（地上高 70m）

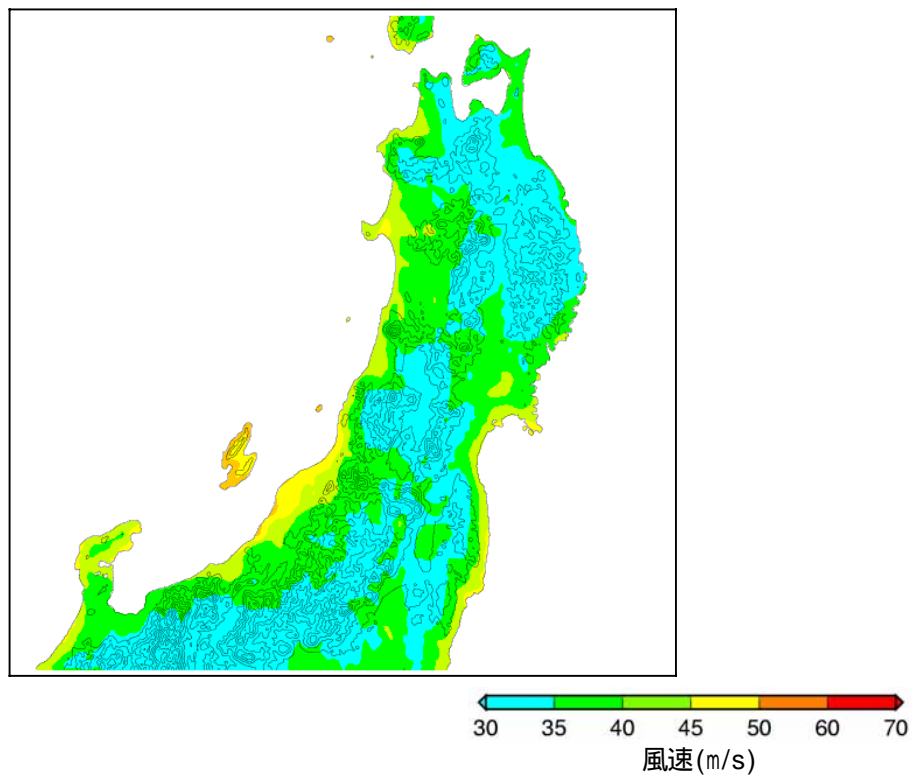


図 2. 3 極値風速マップ：東北エリア（地上高 70m）

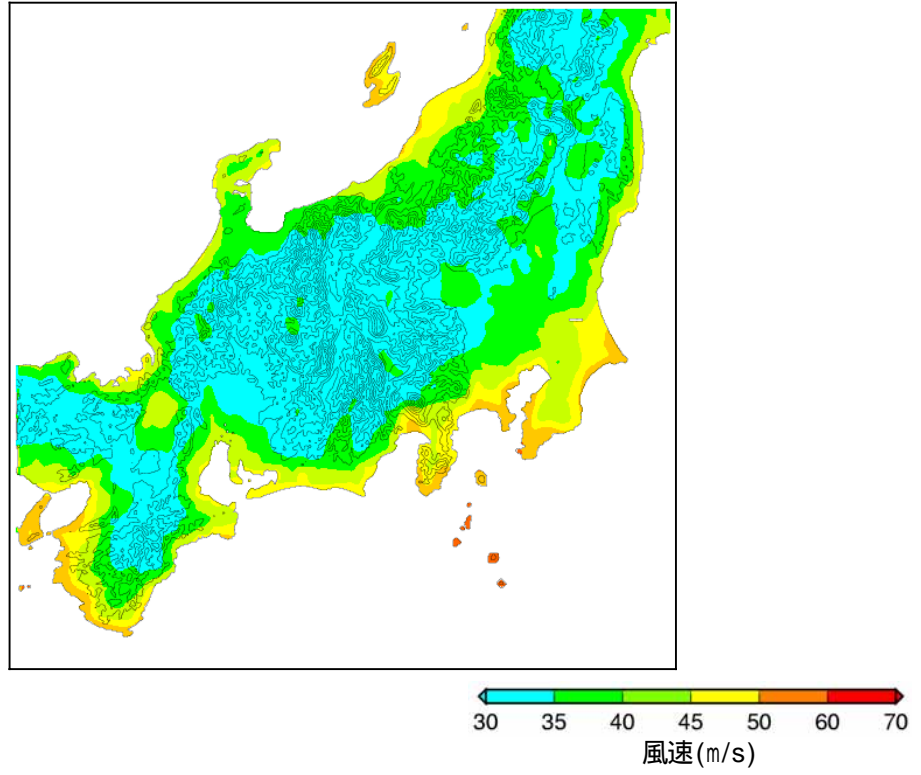


図 2.4 極値風速マップ：関東・中部・近畿エリア（地上高 70m）

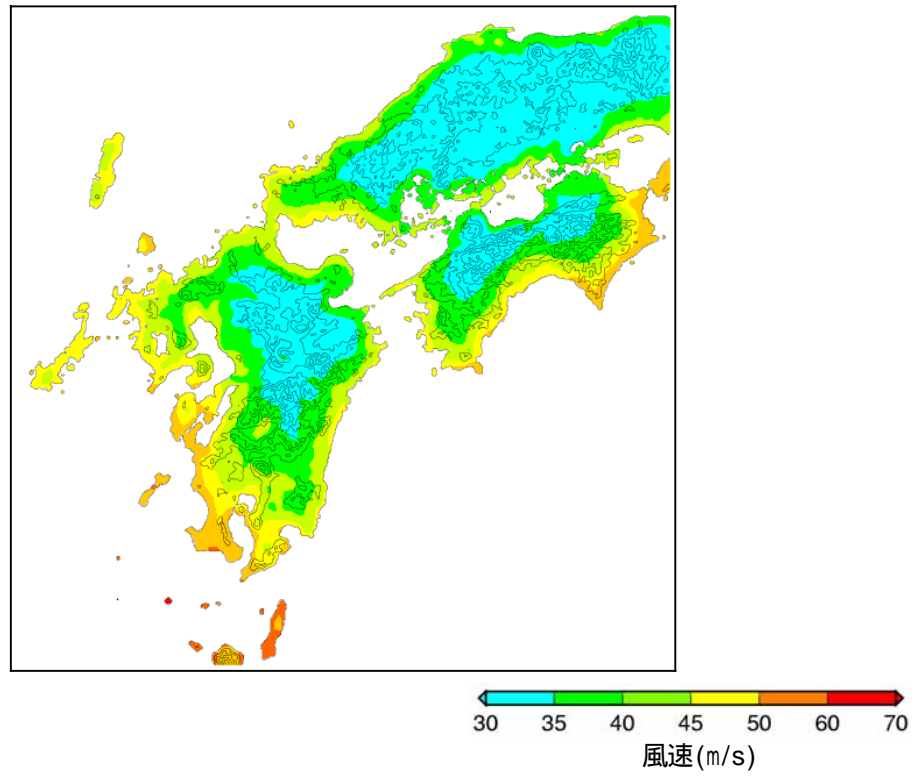


図 2.5 極値風速マップ：中国・四国・九州エリア（地上高 70m）

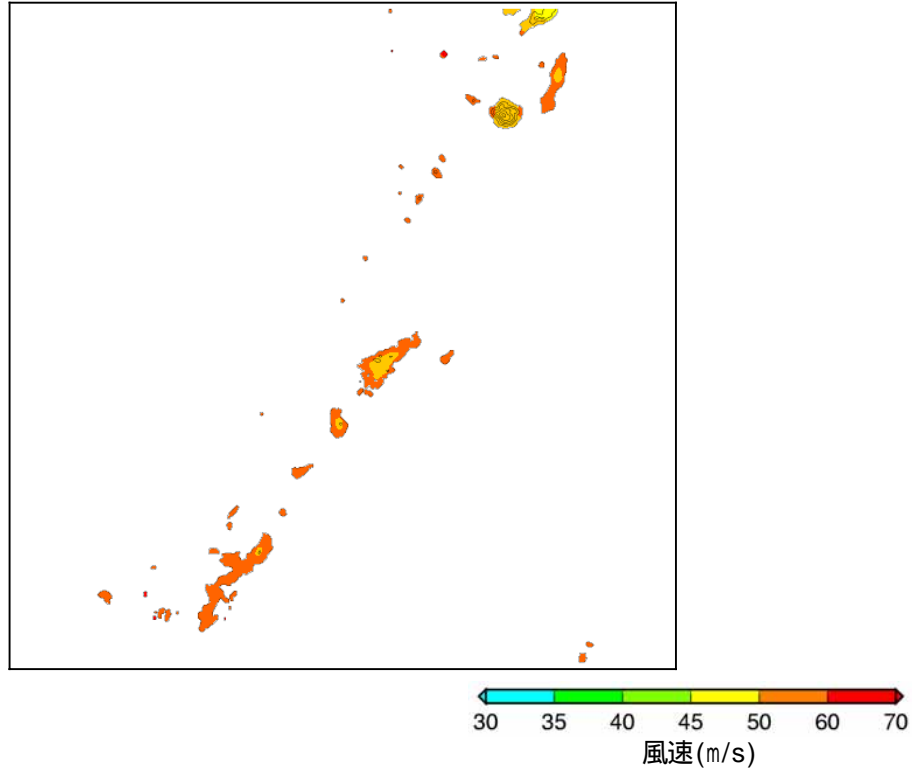


図 2.6 極値風速マップ：沖縄エリア（地上高 70m）

ここで、気象官署位置のメッシュ上で、建築物荷重指針・同解説(2004)に基づく50年再現期待値を疑似突風率から算出されたべき指数・粗度区分を用いて地上高70mの風速に換算した値と極値風速マップの値とを比較すると、-10~+10m/s程度の差が生じている(図2.7および図2.8)。この差は、極値風速マップ/データベース作成時において、高度補正係数 $E_{pv}(P)$ を気流解析結果の風速鉛直分布から算出していることによる手法の差の結果であって、直接に誤差を示す数値ではないが、マップ値が過大もしくは過小の双方に評価されている可能性を示すものと考えられる。

従って、その利用には以下の留意が必要である。

- ① 図2.8に示す風速差の絶対値が、3.0m/s以内の気象官署が周辺にある場所以外では、極値風速の推定は他の方法を優先すべきであり、マップ値の使用は大きな誤差が生ずる恐れがある。
- ② 風速差が3.0m/s~7.0m/sの気象官署に囲まれた地域において、他の手法の選択と共にマップ値を使用することが避けられない場合においては、実際に観測したデータを用いて、マップ値や複数の気象官署値との相関を取るなど、自ら検証を行うことが必要である。
- ③ 極値風速データベースの値を非線形モデルに入力する場合は、周辺気象官署値を用いるなど他の手法と、その結果を比較して評価することが望ましい。

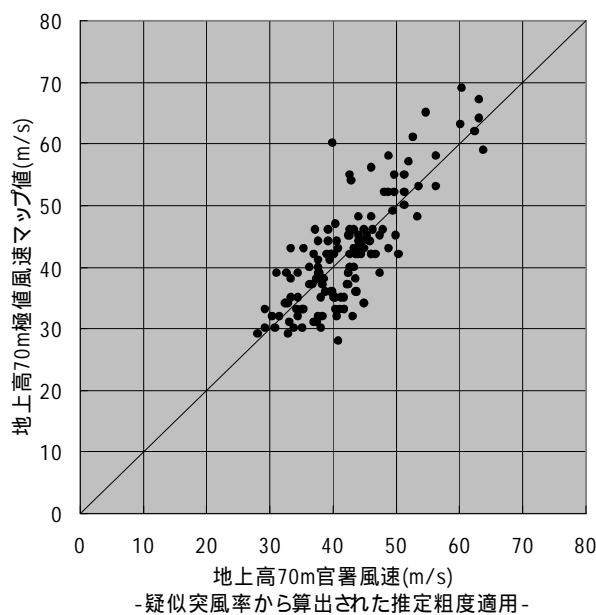


図2.7 気象官署位置における極値風速の比較(地上高70m)

地上高70mにおける気象官署における極値風速マップ値と気象官署極値風速算定値との差異を図2.8に示す。

(図2.7の横軸・縦軸の風速差 ΔV の絶対値をプロットしたものが図2.8である)

- ・極値風速マップは地上高70mの極値風速を示す。
- ・気象官署極値風速算定値は建築物荷重指針・同解説(2004)による再現期間50年換算値と気象官署位置における2000年推定粗度を使用して地上高70mの値を計算したものである。
- ・気象官署の位置は気象庁HPの位置図から概定。

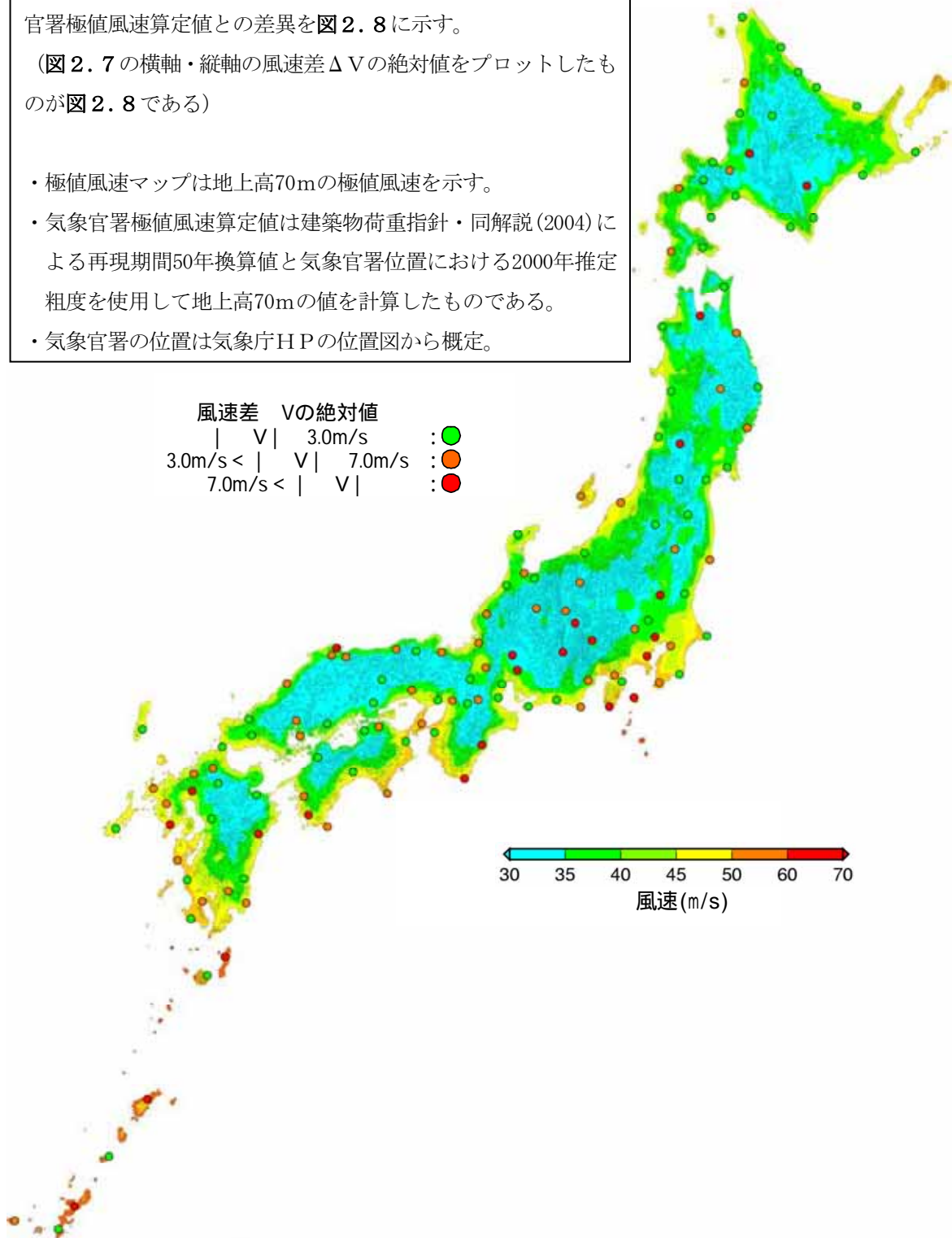


図2.8 気象官署位置における極値風速マップ値と気流解析による算定値の比較 (地上高 70m)

また、風車設置場所での極値風速を数値シミュレーション (あるいは非線形モデル) によって求める場合においては、その入力値として気象官署位置での 50 年再現期待値を用いることを妨げるものではない。

2.3.3 極値風速データベース

風車設置場所が平坦地形でないと判定される場合には、「極値風速データベース」を用いて極値風速を評価すること。その際には、小地形の影響は2.3.4項に記載する方法により評価すること。数値シミュレーションを行う場合には、極値風速データベースに代わり気象官署における50年再現期待値を用いることを妨げない。

2.2節で複雑地形と判定された場合は、地形による増速効果を評価する式、数値シミュレーション、風洞実験などにより小地形の影響を評価し、極値速を算定する必要がある。地形による影響は、風上側の地形に起因し、風向によってその影響の度合いが異なることから、風向別の極値風速である「極値風速データベース」をもとに検討する必要がある。

なお、「極値風速データベース」は、「極値風速マップ」と同様に1kmメッシュの極値風速であるが、以下の点で「極値風速マップ」と異なる。

- ・風向別（8風向）の極値風速であること。
- ・上空（地上高250m）の風速であること。
- ・小地形影響評価のためのデータベースとして数値情報の形で提供していること。

「極値風速データベース」を風向別および高度250mの風速の形で提供する理由は、以下のとおりである。

- ・ある地点における小地形影響は、風上側の地形や粗度分布に大きく左右される。よって、その評価には、風向毎の検討が必要となるため、風向別の極値風速を提供する。
- ・数値シミュレーション等で、現地の粗度分布を考慮した詳細な解析を実施する場合を想定して、上空（地上高250m）の極値風速を提供する。なお、この高度は、データベースのもととなった建築物荷重指針・同解説(2004)における極値風速の取り扱い方を考慮して、決定されたものである。
- ・極値風速を上空250mの風速で与えることにより、利用者が250m以下の任意の高さにおける極値風速を設定できる。

2.3.4 数値シミュレーションまたは風洞実験による小地形影響評価

数値シミュレーションまたは風洞実験により小地形の影響を評価する場合、必要な境界条件（流入風条件）を適切に設定すること。

線形モデルの代表である WAsP では、計算領域における標高と粗度長マップおよび風況観測点における観測データを入力値として、任意の地点における風速を求めることができる。WAsP の計算結果は、粗度長マップおよび計算領域の影響を受けるため、十分注意する必要がある。

非線形モデルを用いて小地形影響を正しく評価するためには、境界条件（流入風条件）を適切に設定する必要がある。境界条件の設定方法としては、ネスティング手法、理想化された上流風を設定する手法等がある。

2.4 風観測データの統計解析および推定式による乱流強度の設定方法

乱流強度は、現地観測結果により 10 分間平均風速に対する非超過確率 90%に相当する乱流強度、および風速 15m/s における期待値 I_{ref}^* により評価すること。

任意の地点における I_{ref}^* は、複雑度に応じて推定すること。

- (1) 複雑度が小の場合は、IEC 規格の方法を用いる。
- (2) 複雑度が中の場合は、単純地形モデルおよび線形モデルによる方法を用いる。
- (3) 複雑度が大きい場合は、非線形モデルまたは風洞実験による方法を用いる。

ただし、風況観測点における I_{ref}^* は、観測値を用いて導出すること。

IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) では、正常風条件として、10 分間平均風速に対する流れ方向の乱流強度分布を表わす式 (NTM 式) を規定しており、15m/s における乱流強度の期待値である I_{ref} を用いて A、B、C の 3 つのカテゴリーに区分している。また、乱流強度の横および縦方向に対しては、流れ方向の比で表わしている。

風車を選定するに当たり重要なパラメータである乱流強度カテゴリーに関しては、基本的に現地における風況観測の結果をもとに決定すること。観測されたデータは、風向ビン (8 または 16 風向) 毎および風速ビン毎 (通常 2m/s の刻み) に統計処理し、非超過確率 90%に相当する乱流強度を求め、風車規格の乱流強度との大小関係により判定する。

近年、風車が大型化しているため、高高度での風況観測データの取得がより重要となるが、高高度における風況観測にあたってはドップラソダやライダ等を用いた方法もある。ただし、ドップラソダやライダの計測による乱流強度の評価は困難である。また、複雑地形上で乱流強度の評価を行うためには、風速の 3 成分計測や、スペクトル取得のための高速サンプリング計測に効力を発揮する超音波風速計等の計測器の利用も有用である。

また、風車設置範囲が広域にわたり、風況観測点での観測値をもとに設置範囲にわたる補正が必要な場合には、地形の複雑度に応じて、単純地形モデルあるいはシミュレーションもしくは風洞実験など、適切な方法で補正を加える必要がある。

以下では、観測点から離れた場所における乱流強度を推定する方法について記載する。乱流強度の推定は、風況観測地点における平均風速および乱流強度をベースとする。乱流強度の補正に関しては、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証したその他の適切な方法により評価すること。

日本における風速に対する乱流強度の平均的な分布は、IEC 61400-1Ed. 3 (2005) の NTM 式の形状とほぼ相似なものと理解されているため (小垣ら、2007)、ここでの乱流強度の補正は、IEC 61400-1 Ed. 3 (2005) の定める NTM 式の I_{ref} に対して行うものとしている。ただし、複雑度が大きな地形では、乱流強度の分布が NTM 式では近似できない場合もあることに注意しなくてはならない。

2.4.1 観測データからNTM式パラメータの導出

乱流強度は、風車設置予定地近くの風況観測点で観測した風況データを用いて、10 分間平均風速に対する非超過確率 90%に相当する乱流強度、および風速 15m/s における期待値 I_{ref} *により評価すること。

IEC 61400-1 Ed. 3(2005)において、10 分間平均風速に対する流れ方向の乱流強度分布を表わす式 NTM 式は以下のように与えられている。

$$\sigma_{90q} = I_{ref}(0.75V + b) \quad (2.4.1)$$

$$I_{90q} = \frac{\sigma_{90q}}{V} = \frac{I_{ref}(0.75V + b)}{V} \quad (2.4.2)$$

ここで、式中の記号はそれぞれ次の通りである。

- b : パラメータ、 $b=5.6$ [m/s]
- I_{ref} : $V=15$ m/s における乱流強度の期待値
- I : 乱流強度
- V : 10 分間平均風速 [m/s]
- σ : 風速の標準偏差 [m/s]
- 添え字 90q : 非超過確率 90%

しかしながら、IEC 61400-1 Ed. 3(2005)中では、風速のデータから乱流強度の非超過確率 90%値や I_{ref} を算出する方法が明確に記述されていないため、以下にその算出方法を記載する。

I_{ref} は、15m/s における乱流強度の期待値であり、 I_{90q} を求める式 (2.4.2) に $V=15$ m/s を代入することで得られる次の式で算出する。

$$I_{ref} = I_{90q_{V=15}}/1.12 \quad (2.4.3)$$

また、風速ビンにおける σ_{90q} は、正規分布、対数正規分布を仮定する方法および直接求める方法の3つの算出法があるが、正規分布による方法⇨対数正規分布による方法としてもよいことから、IEC 規格で用いていると考えられる正規分布を仮定して次式によって求める。

$$\sigma_{90q} = E(\sigma) + 1.28Std(\sigma) \quad (2.4.4)$$

ここで、 $E(X)$ はある確率変数 X の期待値、 $Std(X)$ はある確率変数 X の標準偏差である。

2.4.2 単純地形モデルおよび線形モデルを用いた乱流強度の設定

複雑度が中程度の場合、単純地形モデルおよび線形モデルを用いて乱流強度 I_{ref}^* を推定すること。ただし、推定した I_{ref}^* を風況観測点における観測値と比較し、推定した I_{ref}^* が風況観測点における観測値と著しく異なる場合、非線形モデルまたは風洞実験による評価を行うこと。

地形の複雑度が中程度と判別された場合、単純地形モデルを用いる。単純地形モデルによる乱流強度の補正方法には、建築物荷重指針・同解説(2004)の小地形による乱れの強さの補正係数を用いる方法や、WAsP Engineering 2000(Risoe 研究所、2002) 等により推定する方法がある。ただし、これらの方法では、NTM 式で表わされる乱流強度の風速変化を考慮していないため、 I_{ref} を推定するための補正が必要である。

参照地点（風況観測地点）以外の任意の場所において $PO(\theta_i)$ を見積もる手法として、WAsP を用いる方法がある。なお、参照地点における実測値から求めた I_{ref} が、上式で算出された値と著しく異なる場合は、2.4.3項の方法による乱流強度の補正を行う必要がある。

また、上記以外に方法として、GL ガイドライン（2003）は評価地点の上流側地形の影響を風向別（8風向）に対して、

- ・ 流れ方向の乱流強度を最大 25%まで割り増しする。
- ・ 横方向、鉛直方向の乱流強度を流れ方向の乱流強度と等しくする。

と定めている。これは、IEC 規格の定める標準の風条件における乱流強度に対して過大に評価することとなり、クラス S 風車での対応となる。

2.4.3 非線形モデルまたは風洞実験による乱流強度の設定

複雑度が大きい場合、非線形モデルまたは風洞実験により乱流強度 I_{ref}^* を推定すること。 I_{ref}^* は、観測値を用いて補正すること。

ただし、地形の複雑度が大きであっても、単純地形モデルおよび線形モデルにより妥当な数値を算出可能な場合もある。

(1) 非線形モデルによる乱流強度の評価

地形の複雑度が大きいと判別されるような複雑地形の影響が大きい場合、風速および乱流強度も場所によって大きく変化することが多いことから、平坦地や単純地形による補正では不十分であるため、ここでは複雑地形上の複雑な流れ場解析手法として有効と考えられる非線形モデルによる数値シミュレーションによる方法について記載する。非線形モデルによる数値シミュレーションは、アルゴリズム、物理モデル、格子、境界条件等が予測精度に与える影響に留意しながら、十分実績を有するか、または設計者が精度を検証したコードを使用し、格子分割や境界条件など

の解析条件を適切に設定して風向別に風況解析を実施する必要がある。

非線形モデルにより求められた乱流強度は、シミュレーションのモデルの違い、境界条件等により異なることが考えられるため、その補正方法として、参照地点（風況観測地点）および高さにおける乱流強度と平均風速との比較を行うことにより、風向 θ 毎に NTM 式 (2.4.1) における推定値 $I_{ref_e}(\theta_i)$ を補正した $I_{ref}^*(\theta_i)$ を決定する。

$$I_{ref}^*(\theta_i) = I_{ref_e}(\theta_i) + \Delta I_{ref}(\theta_i) \quad (2.4.5)$$

ただし、 $\Delta I_{ref}(\theta_i)$ は、十分大きい風速における乱流強度の実測値を NTM 式で近似した期待値との差とし、次式で表わされる。

$$\Delta I_{ref}(\theta_i) = E_{obs_\infty}(\theta_i) - E_e(\theta_i) \quad (2.4.6)$$

ここで、 $E_{obs_\infty}(\theta_i)$ および $E_e(\theta_i)$ は、それぞれ、風向別の実測値を NTM 式で近似した場合の十分大きい風速における乱流強度の期待値および非線形モデルにより求めた乱流強度の期待値である。この方法の概念図を **図 2.9** に示す。

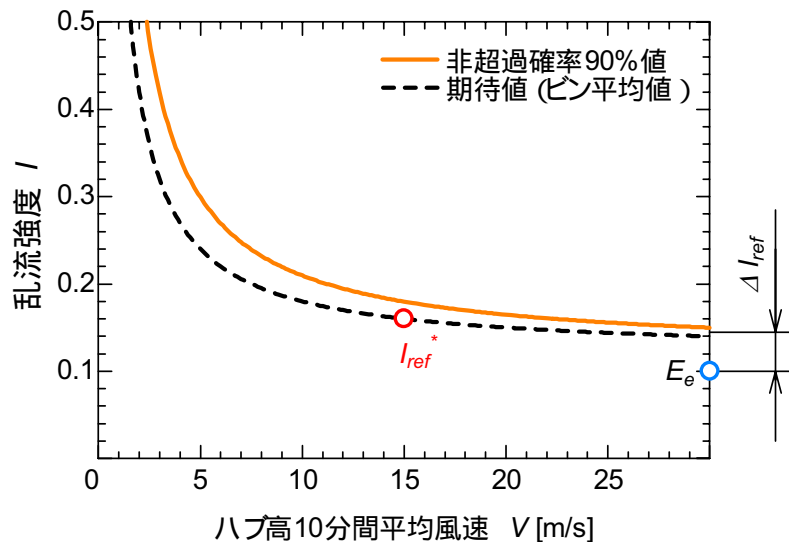


図 2.9 I_{ref}^* の補正量 ΔI_{ref} の決定方法

参照地点において風向別に求めた $\Delta I_{ref}(\theta_i)$ を用いて、サイトの任意の評価地点における I_{ref} は、風向別出現頻度 $PO(\theta_i)$ と風向別 $I_{ref}^*(\theta_i)$ との積により、次式のように再定義する。これは、NTM 式が全風向の乱流強度に対して定義されているためである。ここで、 $\Delta I_{ref}(\theta_i)$ は、場所によらず一定と仮定している。

$$I_{ref}^* = \sum_{i=1}^N PO(\theta_i) I_{ref}^* (\theta_i) \quad (2.4.7)$$

非線形モデルによる数値シミュレーションを行うことで、計算領域内の乱流強度のマップも作成することが可能となり、リスクに対する評価として有効となる。

非線形モデルとして、 $k-\varepsilon$ モデルに代表される RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation) と LES (Large Eddy Simulation) があげられるが、乱流強度の算出方法が異なるため、以下にその方法を記載する。

$k-\varepsilon$ モデルの場合：

土木学会指針では、乱れエネルギー k を用いて流れ方向の乱流標準偏差 σ_u を算出する。

$$\tilde{\sigma}_u^{Surface} = 0.93\sqrt{k} \quad (2.4.8a)$$

$$\tilde{\sigma}_u = \tilde{U} \times \sqrt{\left(\frac{\tilde{\sigma}_u^{Surface}}{\tilde{U}}\right)^2 + I_a^2}, \quad I_a=0.1 \quad (2.4.8b)$$

ここで、 \tilde{U} は、参照高さにおける風速である。詳細は、風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 (2007) を参照のこと。

LES の場合：

LES では、計算格子における速度場の時系列変化を計算するため、実測から算出する方法と同じ手法により乱流強度を求めることができる。このとき、実時間で 10 分以上のデータを取得できるようなシミュレーションを行うことが適切である。また、横方向、鉛直方向の乱流強度についても、流れ方向と同様に算出することができる。

(2) 風洞実験による乱流強度の評価

風洞実験は、十分実績を有する機関および設計者が信頼性を確認した設備において実施しなければならない。実験条件や測定方法を適切に設定して、風向別 (8 風向) に実験を実施することを推奨する。

[参考] 風車被害の実例と要因分析

1. 風車被害の実例

(1) ブレードの被害

暴風により、風車のブレードが被害を受けることがある。これらの事象が発生すると、風力発電設備としての機能が損なわれ、修復を必要とする。特に、運転時のブレード折損に関しては、飛散したブレードによって二次災害が発生しないように、立ち入り制限などの措置を講じる必要がある。

また、落雷による被害が発生した後に強風が作用する等の複数要因から事故となる場合もある。

(図 3.1、図 3.2)



(<http://www.nbu.ac.jp/CE/kounot/miyako/miyako.htm>)

図 3.1 台風 0314 号によるブレード被害



(<http://niraikanai4792.ti-da.net/e1773003.html#comments>)

図 3.2 台風 0715 号によるブレード被害

(2) タワーの被害

暴風による系統故障（停電）が原因で風車タワーが座屈した事故も報告されており、これは甚大なレベルのリスクに相当する。これらの座屈は、マンホール周辺での応力集中などにより発生する。(図3.3)



(<http://www.cosmos.ne.jp/~miyako-m/photo/030923/6-1.JPG>)

図3.3 台風0314号による風車タワーの被害

(3) 基礎の被害

風車の運転管理の問題で基礎が破壊される事故も報告されており、これも甚大なレベルのリスクに相当する。これらの被害は、過回転などにより基礎の耐力を超える荷重が作用する場合などに発生する。(図3.4)



(<http://kankyo44.jugem.jp/?eid=66>)

図3.4 風車基礎の倒壊例

2. 風車被害の要因分析

これらの悲惨な結果を招いた事例について、要因分析を行った一例が図3.5であり、我が国において特徴的な「台風・暴風」と「乱れ」による故障・事故発生の連鎖を示す。

実際に設置されて稼働している風車に対して、台風・乱流が損傷を与えた事例から要因を抽出して、分析した一例を以下に示す。

なおこれは、平成16年から平成18年にかけて稼働していた風車に対する強風・乱流を発生要因とする風車の故障・事故に関するもので、NEDO事業「風力発電故障・事故等調査委員会」において、アンケート形式により事業者からの協力のもと収集されたデータによる。

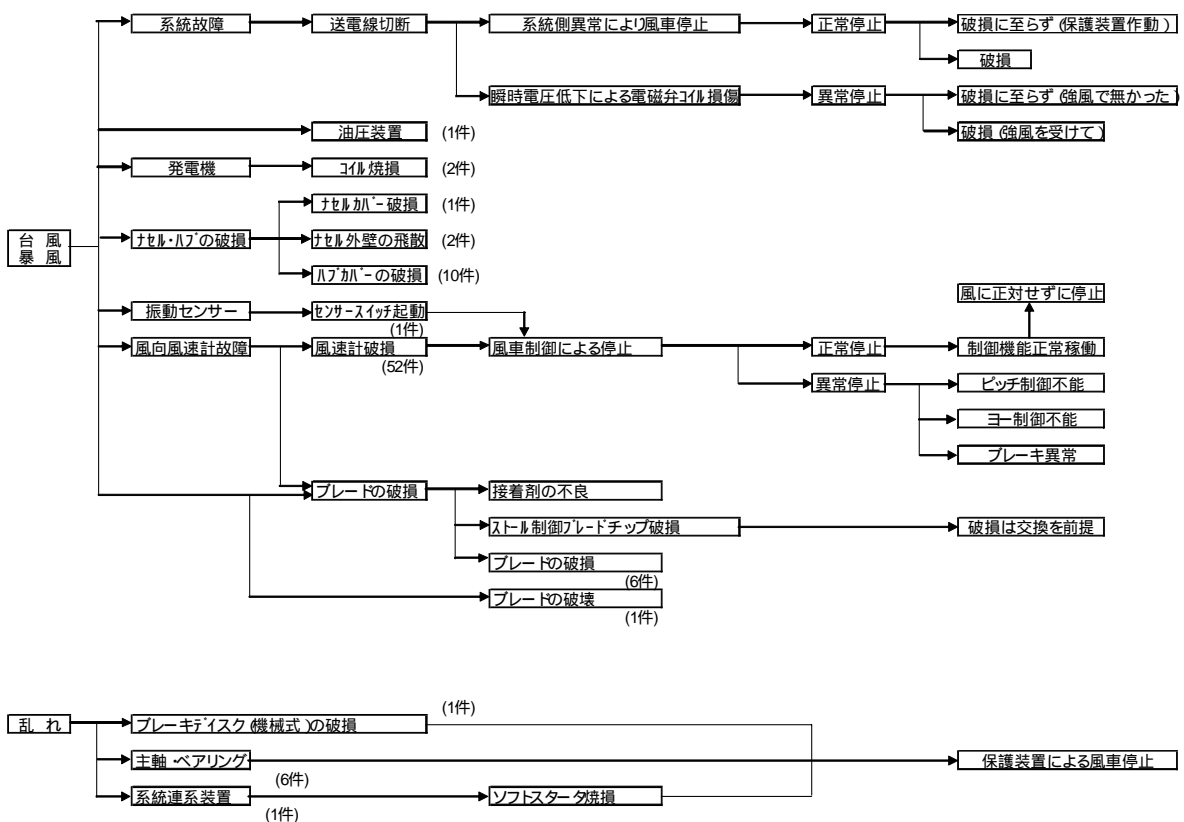


図3.5 風車の被害に関する流れ図(国内事例・1)

また、海外事例としては、CWIFの資料（Wind Turbine Accident Compilation：2006Caithness Windfarms Information Forum）に基づく、2005年までの主にヨーロッパにおける風車事故データより、ブレード破損に関するもの67例を抽出し分析すると、**図3.6**の通りとなる。

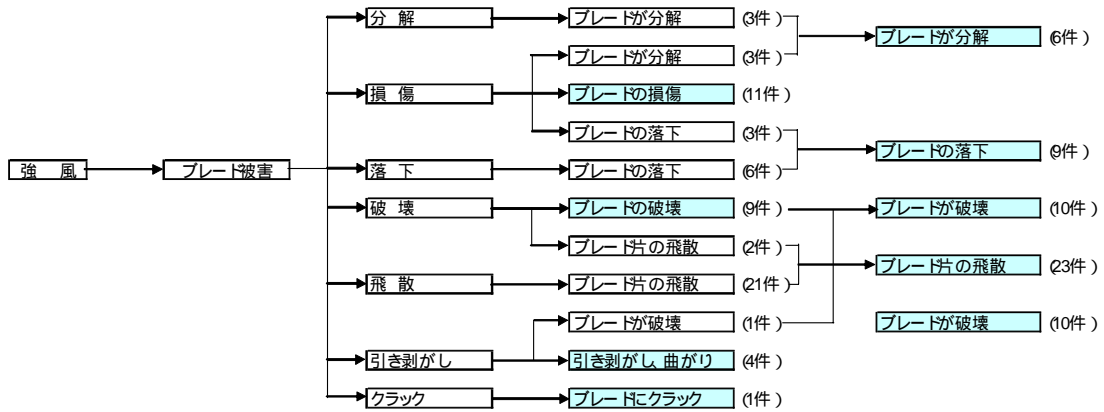


図3.6 風車の被害に関する流れ図（海外事例）

さらに、ブレードの被害が、落雷によるブレード損傷により引き起こされる場合もあることから、落雷被害からブレード損傷等の被害を生じた例を抽出した結果、**図 3.7**に示すような数例を得ることができた。なお、落雷による軽微な損傷の場合、運転に支障がないとの判断で運転を継続する場合もある。このような場合のリスクは、運用面でのものと考えることができる。

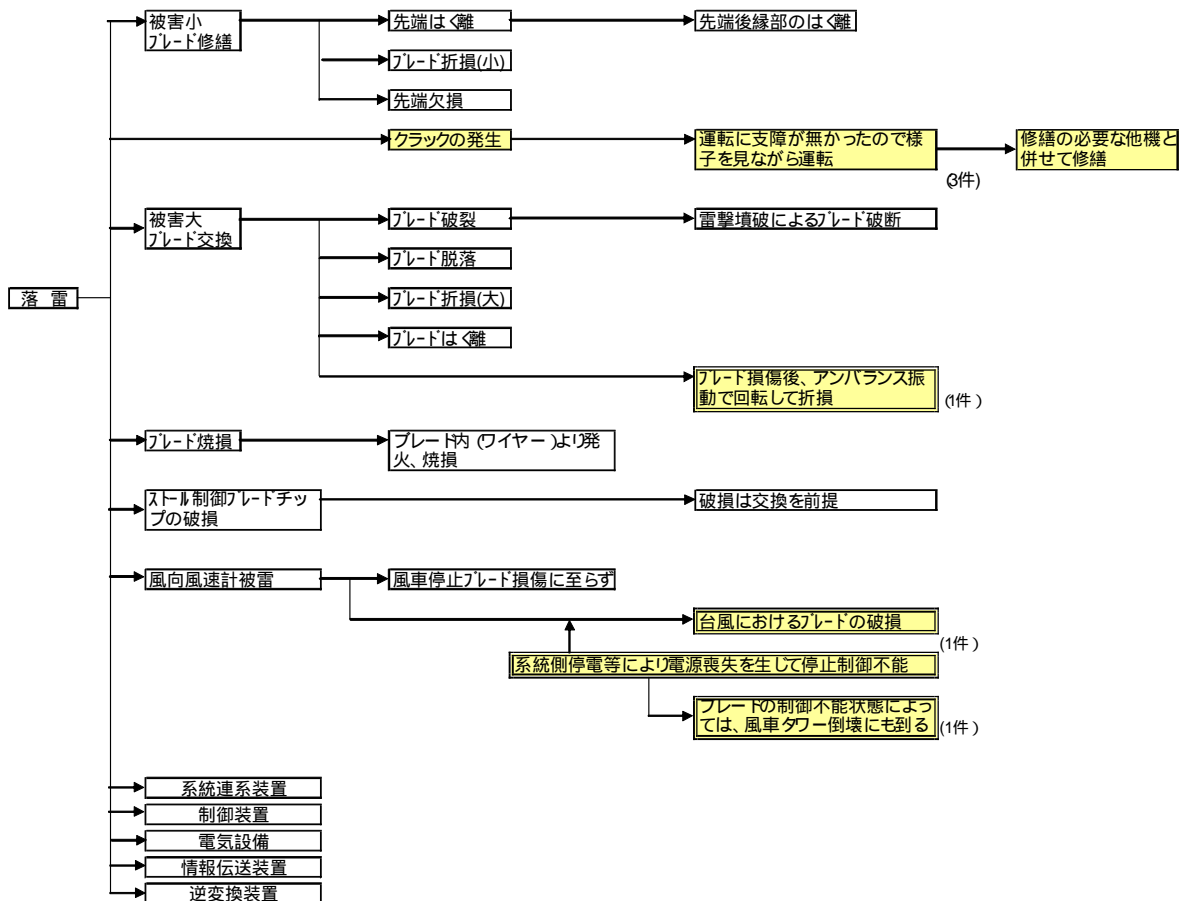


図 3.7 風車の被害に関する流れ図 (国内事例・2)