

## ■ウインドウズ オブ Wind (風の窓)

# 風況よもやま話

## —教科書に載っていない風の話あれこれ (第5話: 乱れ) —

株式会社ウインド・エナジー 谷垣 三之介

tel:046-875-9465 e-mail:tngk@pop16.odn.ne.jp

風の乱れは風車構成部材の疲労損傷に大きく影響する要素です。ブレード、そして、増速ギヤ、軸受け、軸継ぎ手、ピッチ制御機構、ヨー制御機構といった機械部品の磨耗、損傷は乱れの影響を特に大きく受けると考えられます。また、計装・制御機器類は据付部分の振動により間接的に乱れの影響を受けます。運転開始後1年から2年の間に発生する初期トラブルと異なり、乱れの影響によるトラブルは、疲労の蓄積される5年後あるいは10年後といった時期になって出始めます。これくらいの時期になると、通常は風車メーカーの保証期間は切れているので、修理交換費用は事業者負担となります。大物部品の交換となると、補修期間も長期間となり、その間の非稼働損失も大きくなります。

プロジェクトを計画するに当たっては、対象サイトの風の乱れ特性を正確に把握し、これに適した風車を選択しておかなければ、後になって維持補修費用が大きく嵩み、結果的に事業収益の予期せぬ低下を招くことがあります。今回は、乱れについてのお話をします。事業者とファイナンサー、保険関係の方々にとって大事な話も入っていますので、技術的に難しいところは読み飛ばすとしても、エッセンスだけは頭に入れておいて頂ければ、と思います。

### 風車のメンテナンス費用はばかにならない

風車のメンテナンス費用の実態については公表されたデータが少なく、当事者以外は把握し難いものですが、例えば、次のような欧州の調査報告<sup>1</sup>があります。

- ▶ ウィンドファームの EBITDA マージン実績値平均は 76% (2008 年)
- ▶ 20 年間のメンテナンス総費用は風力発電事業総投資コストの 54%
- ▶ 20 年間の平均 O&M 費用は 12 ユーロ/MWh
- ▶ 風車の運転寿命 20 年のうち、後半 10 年のメンテナンス費用は前半 10 年の倍

欧州と日本では事情も違い、これをそのまま

我が国に当てはめる訳にはいきませんが、大雑把な目安を得るために、2MW 風車、設備利用率 25%、¥115/ユーロと仮定して、20 年間の O&M 費用を計算すると、約 1 億円という額になります。欧州での 2MW の風車価格 (工場出荷価格; 2006 年) は平均して 928,000 ユーロ/MW だそうですから<sup>2</sup>日本円にすると 2.1 億円ということになり、O&M コストはその約半分の額にのぼる、ということになります。プロジェクトによる O&M コストのばらつきは非常に大きい、ということですが、サイト風況に対する風車選定の適、不適ということもばらつきの大きさに関係しているのではないかと想像されます。このことを考えれば、計画段階でサイトの風況を正確に見積もり、これをもとにサイトに相応しい風車を選択することが如何に大切か、ということが分かると思います。

### 洋服のサイズ・風車の規格

図 1 はある既製服メーカーのサイズ表です。背が高いか低いかによって 3 から 9 までの 7 段階、痩せているか、太っているかによって Y 体から E 体までの 5 段階に規格化されており、体の特長によって贅沢を言わなければある程度満足できるサイズが選べる様になっています。

		ウエスト																			
		70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90	92	94	96	98	100	102	104	106	108
身長	155-160		Y3	A3		AB3					BB3				E3						
	160-165		Y4	A4		AB4					BB4				E4						
	165-170		Y5	A5		AB5					BB5				E5						
	170-175		Y6	A6		AB6					BB6				E6						
	175-180			Y7	A7		AB7				BB7				E7						
	180-185				Y8	A8		AB8			BB8				E8						
185-190					Y9	A9		AB9		BB9											

図 1 ある既製服メーカーのサイズ表

風車でも似たようなものです。ただし、風車は身長、瘦肥の代わりに、風の強さと風の乱れの大きさを規格の基準として使っています。風の強さは風車部材の静的強度設計の基準、乱れの大きさは疲労強度設計の基準となります。

IEC の風車標準 61400-1 の最新版 (Ed.3; 2005 年) では、風の強さは参照風速  $V_{ref}$  を指標値として 3 段階 (それぞれクラス I、II、III) に、

乱れの大きさは参照乱れ強度  $I_{ref}$  を指標値として3段階（それぞれ、カテゴリーA、B、C）にランク付けしています。したがって、風車の規格はその組み合わせでIAからIIICまでの9つに分類されることとなります。

新しいプロジェクトの計画段階のことを考えましょう。サイトが決定された後、そのサイトに相応しい風車をどのようにして決めるか？まず、風の強さについては、そのサイトの強風（10分平均値）の50年最大期待値（50年に1回の強風）が風車設計時の参照風速  $V_{ref}$  を上回らないことを選定条件とします。

次に乱れです。こちらは少し複雑になります。強風の最大期待値はサイトが決まればただ一つの値として決まりますが、乱れは単一の量として規定することが出来ないからです。

### 実際の乱れはどのように分布しているか？

次の図は10分間における風速変動のあるサイトの観測データから抜き出したものです。このように風の強さは常時変動しています。乱れ $\sigma$ はこの変動の大きさを示す量で、定められた平均化時間における風速変動の標準偏差と定義しています。平均化時間は、状況により1分、10分、30分、1時間などと使い分けられますが、風車設計の場合は10分間とします。

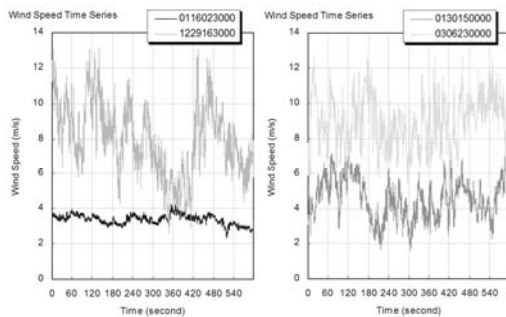


図2 風速の時間変動の例（10分間）

乱れは風速と同じ m/s という単位を持った量ですが、場合によっては無次元化した方が現象を捉え易いことがあります。この場合は、乱れをその10分間の平均値で割った乱れ強度  $I$  を使います。

$$\text{乱れ} : \sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{乱れ強度} : I = \frac{\sigma}{u} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $u_i$ は個々の風速観測値、 $n$ は10分間における風速観測値の個数、 $\bar{u}$ は10分間の平均

風速です。

次の図はあるサイトの1年間の乱れを風速に対してプロットしたものです。左が乱れ $\sigma$ 、右が乱れ強度  $I$  です。一つの10分値が一つの点で表わされています。白抜きの丸印は、風速ごとの平均値です。

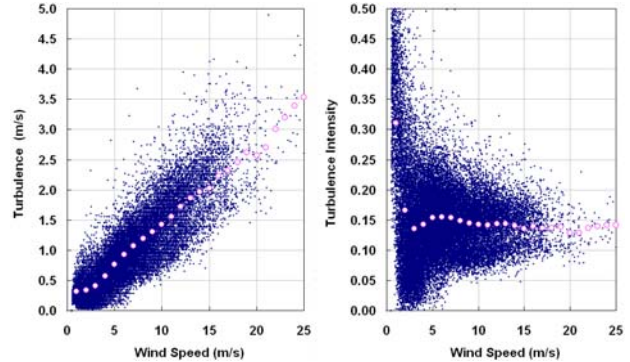


図3. 乱れ・乱れ強度の分布状況の例

このグラフから、①乱れ（あるいは乱れ強度）は同じ風速に対して常に同一の値をとるのではなく、幅を持って分布している（stochasticな量である、と言います）こと、②乱れ $\sigma$ は風速に対してほぼ直線的に増加すること、がわかります。このような傾向は、このサイトだけでなく、ほとんどのサイトに共通して見られます。そこで、乱れ $\sigma$ を風速  $V$  の一次式で近似すると色々な解析に便利です。

$$\sigma(V) = k_1 V + k_2 \dots\dots\dots (3)$$

### IEC61400-1Ed. 2 の設計乱れモデル

IEC61400-1 は現在の最新版は Ed.3（2005年発行）ですが、現時点では Ed.2 に準拠した風車が多く出回っています。そこで、まず Ed.2 の考え方について整理しておきます。

Ed.2 では、外力条件としての乱れ設計値 $\sigma$ を、ハブ後風速  $V_{hub}$  の一次式として次式で定義しています。

$$\sigma = k (15[m/s] + aV_{hub}) / (a+1) \dots\dots\dots (4a)$$

$a$  は乱れ直線の勾配を決めるための定数です。この式で、両辺を  $V_{hub}$  で割り、さらに  $V_{hub}=15m/s$  とおくと、風速  $15m/s$  における乱れ強度が得られ、これは  $k$  と一致します。そこで改めて  $k=I_{15}$  とおくと、

$$\sigma = I_{15}(15[m/s] + aV_{hub}) / (a+1) \dots\dots\dots (4)$$

となります。これが、Ed.2 における乱れモデル式です。繰り返しになりますが、 $I_{15}$  は設計乱れ強度の  $15m/s$  における値として定義されています。

この  $I_{15}$  を指標値として標準モデルの乱れカテゴリーのランク付けを行います。具体的には乱れの大きいサイト用と小さいサイト用の2つのモデル

を考え、前者はカテゴリ-A 乱れとして、 $I_{15}=0.18$ 、 $a=2$ 、後者はカテゴリ-B 乱れとして、 $I_{15}=0.16$ 、 $a=3$  を当てます。

定義式 (4) の形から分かるように、設計に用いられる乱れモデルは、自然界の乱れのようにばらつきを持った stochastic なものではなく、風速に対して唯一つの乱れ値を対応させる、いわゆる deterministic なモデルなのです。

## 風車適合性評価

### - 風車をどのようにして選定するか？

ここで、先程の命題に戻ります。サイトのばらつきを持った (stochastic な) 乱れの中のどの値を使って、風車選定に臨めば良いのか？

これに対する Ed.2 の答えは次のとおりです。

1. サイト乱れのデータをもとに、風速 15m/s におけるサイトの乱れ強度特性値  $I_{15}$  を次式で計算する。

$$I_{15} = I_{\text{mean}}(15) + \Sigma I(15) \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 $I_{\text{mean}}$  は乱れ強度の平均値、 $\Sigma I$  は乱れ強度の標準偏差<sup>i</sup>

2. サイトの  $I_{15}$  と風車の  $I_{15}$  を比較する。前者が後者を超えなければ合格<sup>ii</sup>。超えた場合は詳細の設計検討により確認が必要。

この考え方には、「ばらつきを持って分布している stochastic なサイトの乱れは、 $I_{15}$  という単一の量によって代表できる」という思い切った前提があります。これをさらに分割すると、

- 風車の運転風速域において、風車部材の疲労強度にもっとも大きな影響を及ぼす風速域は 15m/s 近辺の領域である。したがって、風速 15m/s の乱れで全体の乱れを代表することが出来る。
- 風速 15m/s における stochastic な乱れは  $I_{15}$  という単一の量、すなわち平均値に  $1\Sigma$  を加えた量で代表させることが出来る。

ということになります。次の図は  $I_{15}$  が 0.15 となる 3 つのサイトの乱れ強度分布を示しています。風速ビンごとにビン平均値と平均値に  $1\Sigma$

<sup>i</sup> 本稿では乱れ (風速の標準偏差) を示す記号  $\sigma$  と区別するために、乱れ強度の標準偏差を示す記号として  $\Sigma$  を用いています。

<sup>ii</sup> もっとも標準本文には、サイトの  $I_{15}$  について評価しなさいと書いてあるだけで、風車の設計  $I_{15}$  を超えなければ合格、と明確に書いてあるわけではないのですが、一般的にはそのように解釈されているようです。

を加えた値もプロットしてあります。サイトごとに分布の様相は結構違っていますが、 $I_{15}$  はどのサイトも 0.15 という同じ値となっているため、風車に与える疲労損傷は同等である、と Ed.2 は評価するわけです。

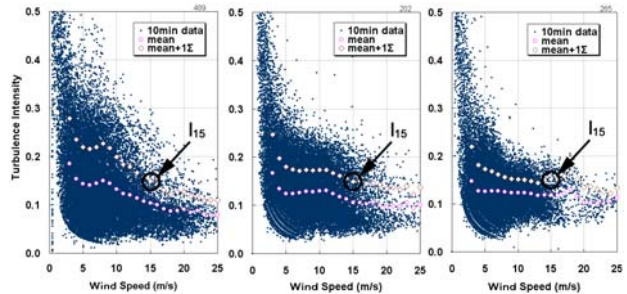


図 4 乱れ強度分布例

標準モデルの  $I_{15}$  はカテゴリ-A で 0.18、B では 0.16 となっていますので、この 3 つのサイトはどれも、カテゴリ-B 風車で十分ということになります。

乱れ強度のグラフでは違いが判別しにくいのですが、乱れのグラフにすると、違いがはっきりと区別できるようになります。次の図です。

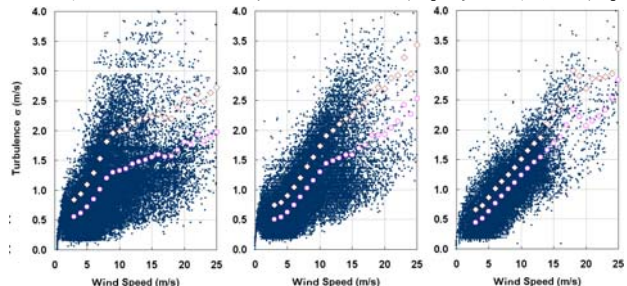


図 5 乱れ分布表示 (図 4 と同サイト)

これだけ、乱れの様相が違っているサイトが疲労に対してすべて同じ影響を与える、と決め付けてしまって大丈夫なのでしょう？

## IEC61400-1Ed. 3 (2005 年) における変更点

おそらくこのような疑問が IEC のメンバーの中から出てきたのではないかと思います。乱れに対する部材の疲労応答感受性は風速によって異なるので、風速 15m/s だけで検討を済ますのは不十分ではないか、ということです。

Ed.3 では、結果的に、風速 15m/s における乱れ値だけではなく、設計参照風速  $V_{\text{ref}}$  を基準にしてその 0.2 倍から 0.4 倍の範囲で評価しなさい、ということになりました。 $V_{\text{ref}}$  の 0.2 倍が年間平均風速になるように設定されていますから、この評価範囲は、設計上の年間平均風速の 1 倍から 2 倍の範囲ということになります。クラス I、II、III に対する  $V_{\text{ref}}$  の設定値 50m/s、



42.5m/s、37.5m/s を当てはめると：

- クラス I 風車 : 10.0m/s ~20.0m/s
- クラス II 風車 : 8.5m/s ~17.0m/s
- クラス III 風車 : 7.5m/s ~15.0m/s

となります。

これと同時に、判定基準とするサイト乱れ値の定義を[平均値]+1 $\Sigma$ から、[平均値]+1.28 $\Sigma$  (正確に言うと 90%分位値) に変えました。 $\Sigma$ は前にも述べましたが、風速ビン毎の乱れのばらつき量 (標準偏差) です。90%分位値とは、データを大きさの順に並べ替えたときに、下から 90%目に来る値のことです。Ed.2 の [平均値]+1 $\Sigma$  は84%分位値に相当します<sup>iii</sup>。90%に上げたということは判定基準を少し厳しくした事を意味します。

さらに、乱れの指標値の考え方を根本的に変えました。Ed.2 では指標値 ( $I_{15}$ ) を「乱れ強度設計値の風速 15m/s における値」として定義していました。

これに対し、Ed.3 は指標値 ( $I_{ref}$ ) を「stochastic な分布をした乱れ強度の風速 15m/s における期待値 (expected value)」と定義し直しました。

「期待値」は、確率論で厳密に定義されている量です。確率密度関数の一時モーメント、つまり、確率変数を出現確率で積分したもの、というのがその定義ですが、もう少しわかりやすくいうと、「無限回の確率試行を行ったときに得られる結果の平均値」、あるいは、「無限個のサンプルを収集したときのそのサンプルの平均値」、ということになります。試行数あるいはサンプル数が有限の場合は、その平均値が期待値の推定値となります。現在の例では、想定した乱れ強度分布の風速 15m/s ビンにおける平均値が指標値  $I_{ref}$  の定義です。これは、設計値 (90%分位値を想定) とは明らかに異なる量です。つまり、Ed.2、Ed.3 両版における乱れ指標値  $I_{15}$ 、 $I_{ref}$  は工学的意味合いがまったく異なっているのです。

このことは、Ed.2 では標準モデルの乱れ指標値 ( $I_{15}$ ) をサイトにおける適合性判定の基準に用いることが出来たのに対して、Ed.3 では指標値 ( $I_{ref}$ ) を判定基準に用いることが出来なくなっている、ということの意味します。

Ed.3 では判定は先に述べた様に 90%分位値

<sup>iii</sup> 正規分布を仮定した場合。分布形状を同仮定するかにより、分位値の値は変わります。正規分布ではなく、対数正規分布を仮定すべきではないかという議論もあります。

をもとに行います。サイトの観測データ等をもとにして、風車位置ハブ高さにおける乱れ 90%分位値を風速ごとに推定し、これをクラスごとに決められた風速範囲で標準モデルの設計値と比較するのです。

標準モデルの定義式も変わりました。Ed.2 の (4)式に変わって、Ed.3 では乱れ $\sigma$ の設計値を次式で定義します。

$$\sigma = I_{ref}(0.75V_{hub} + 5.6[m/s]) \dots\dots\dots (6)$$

乱れのランクは、Ed.2 で2ランクだったのが、Ed.3 では3ランクとなりました。乱れカテゴリーA、B、Cとし、それぞれ  $I_{ref}$  の値として、0.16、0.14、0.12 が当てられました。

比較し易いように、カテゴリーごとに値を入れて標準モデルの定義式 (4)、(6) を書き直すと、次のようになります。

**カテゴリーA**

$$\text{Ed.2 : } \sigma = 0.12V_{hub} + 0.9 [m/s] \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Ed.3 : } \sigma = 0.12V_{hub} + 0.896 [m/s] \dots\dots (8)$$

**カテゴリーB**

$$\text{Ed.2 : } \sigma = 0.12V_{hub} + 0.6 [m/s] \dots\dots (9)$$

$$\text{Ed.3 : } \sigma = 0.105V_{hub} + 0.784 [m/s] (10)$$

**カテゴリーC**

Ed.2 : なし

$$\text{Ed.3 : } \sigma = 0.09V_{hub} + 0.672 [m/s] \dots (11)$$

グラフにすると、

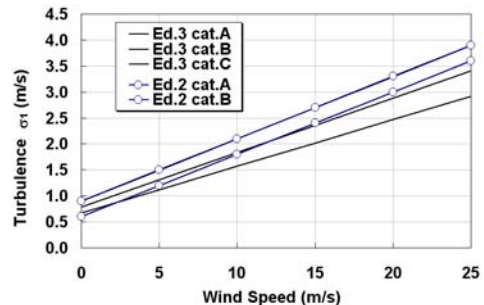


図6 Ed.2 と Ed.3 の標準乱れモデルの比較

式からも分かるように、Ed.2 と Ed.3 のカテゴリーA 乱れは殆ど同じで、グラフ上では重なっています。(バージョンの移行による混乱を最小限にするため同じになるように決めた様です)。カテゴリーB もほぼ同じで、風速 15m/s における値をほぼ同じにしていますが Ed.3 の方が傾斜が緩やかになっています。カテゴリーC は新しく追加になったものです。乱れの小さいサイト用に設計条件を緩くしたコストの安い風車を作れるようにしたということでしょう。わが国のように比較的乱れの大きいサイト

を考えて上の方にも広げて貰えれば良かった、と今では思うのですが、当時はまだ世界的な観測データの集積が充分ではなかったのでしょう。

なお、風車の最大手認証機関である GL のガイドライン (Guideline for the certification of Wind Turbines) は 2010 年に改訂されこれが最新版ですが、乱れモデルに関しては旧版の考え方 (IEC 標準の Ed.2 と同じ) をそのまま踏襲しています。GL の人たちは Ed.3 の改訂内容が納得できなかったようです。しかし、評価風速域に関しては、風速 15m/s 一点ではなく、Ed.3 と同様、 $V_{ref}$  の 0.2 倍から 0.4 倍の範囲、としています。

### Ed.3 における風車適合性評価

先に示した 3 つのサイトについて、Ed.3 による風車の評価をして見ましょう。Ed.2 では全サイトともカテゴリ B 風車で OK と判定したわけですが、Ed.3 ではどうなるのでしょうか？

サイトの乱れ  $\sigma$  の 90% 分位値を IEC の標準モデルとともに示したのが次の図です。標準モデルは上から順にカテゴリ A、B、C となります。

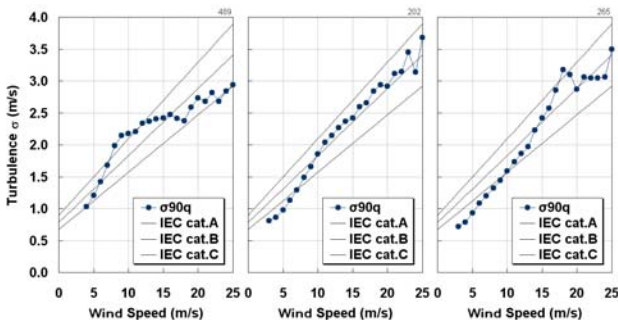


図 7 風車適合性評価 (図 4、5 と同サイト)

前項に示した風速範囲でサイトの 90% 分位値と標準モデルの大小関係を比較すると結果は次のようになります。グラフの左から順にサイト #1、サイト #2、サイト #3 と呼ぶことにします。なお、サイトの乱れは十分長期間 (常識的には 10 年以上) の値を推定してこれにより評価することとされています。上のグラフは 1 年間のデータですが、説明の便宜上、長期間でもこれと同じになると仮定します。

#### サイト #1

- 乱れカテゴリ B/C 風車は全クラス不合格
- 乱れカテゴリ A 風車はクラスによって差
  - クラス I 風車 (判定風速域 10~20m/s) は多少微妙だが合格？

- クラス II 風車 (判定風速域 8.5~17m/s) は不合格
- クラス III 風車 (判定風速域 7.5~15m/s) は不合格

#### サイト #2

- 乱れカテゴリ A 風車は全クラス合格
- 乱れカテゴリ B/C 風車は全クラス不合格

#### サイト #3

- 乱れカテゴリ C 風車は全クラス不合格
- 乱れカテゴリ B 風車
  - クラス I・II 風車は不合格
  - クラス III 風車は多少微妙だが合格？
- 乱れカテゴリ A 風車
  - クラス I 風車は多少微妙だが合格？
  - クラス II・III 風車は合格

評価風速範囲に幅を持たせることにしたため、Ed.2 で判定するか Ed.3 で判定するかによって結果が大きく違ってくるということになりました。

### 何故 90% 分位値なのか？

先に風車の選定に際しては、サイトの乱れの 90% 分位値 (Ed.2 では 84%) を風車標準モデルと比較する、と述べました。平均値を使うのではなく、分布の上限値に近い 90% 分位値という値を使うのは何故でしょうか？

これは、疲労損傷というものの性格に由来します。疲労損傷の大きさは繰り返し荷重の振幅に影響を受けますが、その影響の大きさは指数関数的で、振幅が少し大きくなっただけで影響度は桁違いに大きくなります。材料によって異なりますが、例えばブレードのようなプラスチック材料の場合、荷重振幅 (従って、近似的に乱れ  $\sigma$  の大きさ) の 10~12 乗で効いてきます。鋼材であれば 4~6 乗です。

図 8 の例で考えて見ましょう。同じサイトの乱れ値を乱れ  $\sigma$ 、乱れ強度 I で示したものです。どちらで考えても同じことですが、このような分布をするサイトには A、B、C のどのカテゴリの風車を選べば良いのでしょうか？

図には個々の 10 分値がプロットされています。10 分値の数は 1 年分の 52,560 点です。一つ一つの点はその大きさに対応した疲労損傷を風車に与えます。これをすべて合計すると 1 年間の乱れが風車に与える疲労損傷になります。同じ乱れ値であっても、風速が違えば風車の構成部材に与える疲労損傷度は違ってきます。したがって、全領域の乱れを風速によって

区分し、区分（ビン）ごとに解析します。区分幅（ビン幅）は通常 1m/s、あるいは 2m/s とします。ある風速ビンを考え、そのビンに含まれる 10 分値データの数を N とします。そしてこの N 個の乱れが風車部材に与える疲労損傷度の合計を仮に F とします。これに対し、疲労等価乱れというものを考えます。ここで疲労等価乱れは、その大きさの乱れが N 個あったときに、F と同じ疲労損傷度を与えるような乱れの大きさと定義します。つまり、その風速ビンの stochastic な乱れと同等の疲労効果（損傷度）を与える乱れの大きさのことで、つまり、等価乱れという概念は stochastic な乱れを deterministic な乱れで代表させるための一つの手段と考えて良いでしょう。

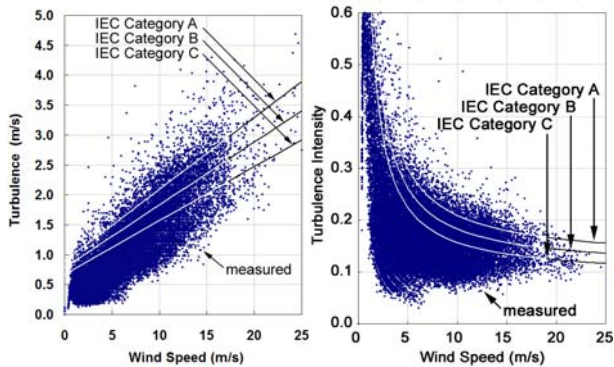


図 8 サイトの乱れ分布と IEC 標準乱れ

数式化すると次のようになります。

$$\sigma_{eff} = \sqrt[m]{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\sigma_i)^m} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 $\sigma_{eff}$  は等価乱れ、N は風速ビン内の 10 分値データ個数、 $\sigma_i$  は個々の 10 分値データの乱れ、m は疲労強度に関する材料定数（疲労強度指数、Wöhler exponent）です。（乱れ  $\sigma$  で表現していますが、風速を固定しているので乱れ強度 I で置き換えても同じ事になります。）

等価乱れの大きさは、自然界の乱れの分布状況によって異なりますが、通常分布状況だと 90%分位値を超えることはない、と判断したようです。

そこで、サイト乱れによる疲労損傷度と標準設計風車の乱れによる疲労損傷度を比較する代わりに、サイトの疲労等価乱れを設計乱れと比較する。サイトの乱れの 90%分位値を考えれば、これはサイトの疲労等価乱れより必ず大きくなるので、90%分位値を設計乱れと比較すれば、必ず安全サイドの評価が得られる、ということでこの値を基準にすることにした、と思わ

れます。Ed.2 の平均値+1 $\Sigma$  (84%分位値) から数字を大きくしたのは、おそらく、84%では危険側に評価してしまう可能性がある、ということに危惧したのでしょう。

なお、上記の議論は、ビン内のデータ数の議論を無視しています。(12)式で計算する等価乱れの算定に使用するデータ数 N はサイト観測から得られた値で、サイトの固有値です。これと、標準モデルに使用する風速出現率は当然連動していません。サイトの等価乱れと標準モデルの乱れを比較する際には、厳密には、出現率の補正をする必要がありますが、計算が煩雑になるのを避けるため、IEC 標準では、別途評価項目の中で、サイトの風速出現率曲線が標準モデルの出現率曲線より低位にあることと定めています。評価を簡単にするために、過度に安全サイドの評価になることの不利益を許容した、といえます。

### 救済策

前々項の評価で、サイト#1 ではクラス IIIA 風車は不合格となりました。風速 10m/s 以下で設計乱れを上回っていたからです。実はこの判定法はかなり安全サイドの判定法になっています。風速 13m/s 以上の風速域ではサイト値は設計乱れを十分下回っています。この部分は設計的な余裕になるので、上回った分と相殺できるのではないかと、いう考えが出てきます。また、風速出現率の余裕があるかもしれません。

実は Ed.3 における判定法は 2 段階方式になっています。最初の段階がサイト風況データさえあれば判定できる簡易判定法とも言うべき方法 (Assessment of structural integrity by reference to wind data) で、どんな場合も安全側の判定になることを至上命題としているので、本来十分に安全な風車を不合格としてしまう可能性のあることを許容しています。先に述べた判定はこの方法に従っています。

第 1 段階で不合格となった風車を救済するための第 2 段階の判定法が、サイト風況を入力条件として風車部材の荷重応答を計算して、大丈夫かどうかを判定する方法 (Assessment of structural integrity by load calculations with reference to site specific conditions) です。しかしこの方法は詳細な設計データを必要とするため、事業者が単独に判定することは不可能であり、検討をメーカーに委ねなければならない点が難点です。



## 日本型風力発電ガイドラインの考え方

平成 20 年に NEDO 調査事業の成果品として「日本型風力発電ガイドライン」が刊行されました。ここでは、前述の考え方と多少異なった判定法が記載されています。かなり難しい書き方になっていますが、私なりに解釈すると次のようなことのようにです。

1. 判定は、サイトの乱れを標準モデルの  $I_{ref}$  値と比較することにより行う。
2. このために、 $I_{ref}$  と比較できるよう、サイトの  $I_{ref}^*$  を次式で定義する。

$$I_{ref}^* = I_{90q} / 1.12$$

ここで、 $I_{90q}$  はサイトの風速 15m/s における乱れ強度の 90%分位値

3. 計画風車の  $I_{ref}$  がサイトの  $I_{ref}^*$  より大きければ合格。

Ed.3 の Ed.2 からの変更内容について解説した項で、「Ed.2、Ed.3 両版における乱れ指標値  $I_{15}$ 、 $I_{ref}$  は工学的意味合いがまったく異なっている。Ed.2 では標準モデルの乱れ指標値 ( $I_{15}$ ) をサイトにおける適合性判定の基準に用いることが出来たのに対して、Ed.3 では指標値 ( $I_{ref}$ ) を判定基準に用いることが出来なくなった。」ということを書きました。上記ガイドラインでは、このことを踏まえた上で、Ed.2 の手法に馴染んだ人の便宜を考え、敢えて Ed.2 と同じ概念で、 $I_{ref}$  を基準として判定する手法を提示した苦肉の策のように思えます。

この方法は、IEC の評価基準対象値の双方を 1.12 という定数で除して比較している事になるので、風速 15m/s という一点における評価に限定すれば、結果的には Ed.3 と同じ評価をしていることとなります。ただし、幅を持った風速域でない、という点で Ed.3 とは異なっています。

また、本来期待値（平均値）として定義されている  $I_{ref}$  を、サイト値に対しては期待値（平均値）ではなく 90%分位値を 1.12 で除した値という、工学的には判り難い量で定義しているという不自然さがあります。サイト値に対してこのような定義をしている例は、少なくとも私が調べた限りでは海外にはなく日本独自のものです。海外との対話における無用な誤解を避けるためにも、 $I_{ref}$  のこのような使い方は改めた方が良くと思います。 $I_{ref}$  という量は標準モデルを規定するためだけに定義された量であると割り切った方が良いでしょう。

## 特性値？ 代表値？

設計条件としての乱れ (4)、(6) 式を表現するのに Ed.2 と Ed.3 では異なった用語を使っています。それぞれの日本語版 JIS では「特性値」「代表値」と訳していますが、日本語の「特性値」「代表値」は分野によってかなり広い意味で使われ、かなり曖昧に解釈されることもあり、厳密な意味を伴った原文の本来の意図を表現するには不適切な用語であるように思えます。本稿では、どちらも、設計条件として想定される最も厳しい外力条件を示すものとして「設計値」と表現することにしています。

”characteristic value”、”representative value” が Ed.2 および Ed.3 それぞれに使われている原語です。どちらも ISO19900 に定義があり、前者は value assigned to a basic variable associated with a prescribed probability of not being violated by unfavorable values during some reference period (変動荷重の中で、参照期間内にそれ以上厳しくなる確率が所定の値以下になるような最大値) とされており、Ed.2 においてもその意味で、使われていると思われます。後者はもう少し包括的な意味を持った概念で、value assigned to a basic variable for verification of a limit state” (変動荷重における、極限状態を立証するための値) と定義されています。両用語における ISO 定義の微妙なニュアンスの違いを検討した上で、限定的な意味を持つ characteristic よりも representative の方がより適切、ということで Ed.3 ではこちらに変更したようですが、もともとは同じ意図で用いられています。いずれにしても、日本語における用語の使われ方としては「設計値」がより適切だと思います。

## 我が国の乱れの状況

我が国における乱れの状況はどうでしょうか。

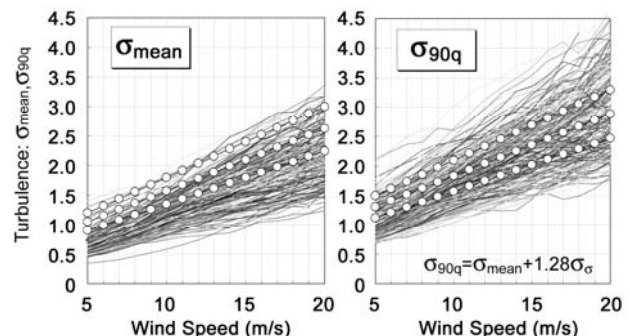


図 9 NEDO 風況精査サイトの乱れ分布と IEC 標準モデル

上の図は、NEDO の風況精査のサイトから風況の良い 259 点を抽出して、縦軸が乱れ、横軸が風速のグラフにしたものです<sup>3</sup>。最近の代表的

な風車のハブ高さを 80m として、この高さの値に換算しています。左の図はビン平均値、右の図は 90%分位値で、それぞれに IEC の乱れ標準モデルの値を白丸で表示しています。上からカテゴリーA、B、C の順です。

風車の適合性評価の基準となる 90%分位値のグラフで見ると、カテゴリーA 乱れを超えたサイトがかなりの割合で存在することが分かります

先に示した Ed.3 の第 1 段階の判断基準で評価した乱れカテゴリー別の適不適の状況を次図に示します。クラス I 風車の場合を例にとると、カテゴリーA 乱れを超える、つまり、標準風車はすべて不合格のサイトは全体の 39%と非常に大きな割合となっています。カテゴリーB は不合格だが A だと合格、というサイトは全体の 25%、C では不合格だが B では合格、というサイトは 20%、C でも大丈夫、というサイトは 15%です。詳細は参考文献をご覧ください。

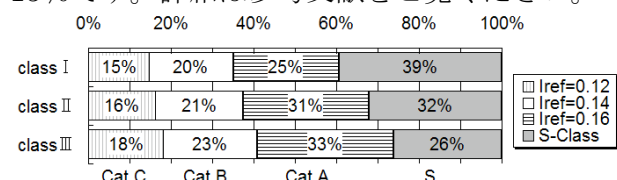


図 10 我国サイトにおける IEC 風車適合状況

我国サイトには、IEC 標準風車では適応出来ない程乱れの大きいサイトも多くあります。このような場合は、期待できる発電量やその他のプロジェクト要素を加味した上で、後々の損失を考えれば、プロジェクト断念という決断を下した方が良い場合もあります。そのためには、サイト乱れを正確に推定する必要があります。

### サイト乱れの推定には大きな障壁がある

ところが、このサイト乱れを正確に推定するという事はそう簡単な話ではありません。このことについてお話ししましょう。

風車プロジェクト計画に当たっては、まず、計画候補サイトの風況を精査します。風況観測マストの位置と計画風車位置が一致している場合は良いのですが、特にウインドファームの場合は全風車位置に観測マストを立てて風況観測を行う、ということはありません。通常は、観測マスト位置の風況から、周辺数基の風車位置の風況を推定することになります。地形が単純でマスト位置と風車位置がそう離れていない場合は、両者の風況に大きな差が出ることはないのですが、通常はそうでない場合の

ほうが多いと考えてよいでしょう。

風車位置の風況の推定の目的は次の 3 点です。

1. 期待発電量の推定
2. 風速分布の推定
3. 乱れ分布の推定

1 は言う迄もなく事業採算性検討のため、2、3 は風車適合性判定のためです。

風車位置風況の推定は通常はコンピュータによる数値シミュレーションにより行います。ここでは、3 の乱れの推定について述べます。

風況シミュレーションについて考えるときは、大気安定度に対する理解を欠かす訳にはいきません。普通天気予報で次のような言葉を頻繁に耳にしていると思います。「大気の状態が不安定となり、雷雨、突風が予想されます。」これはまさに大気安定度のことを言っているのです。真夏の日中晴天時や、寒冷前線の通過により冷氣団が温気団の下に潜り込む場合のように、上空に比べて地表面近くの温度が高くなるような条件が整うと、上下の温度差（従って密度差）により激しい上昇気流が発生し、雷雨、突風の原因となります。これが典型的な大気安定度「不安定」の状態です。これとは逆に真冬の夜間晴天時は放射冷却により地表面近くの大気が冷やされ、空気密度差による上昇気流は抑制されます。これが大気安定度「安定」です。「中立」はその中間の状態です。大気安定度の状態により、風速の鉛直分布状態は大きく変化します。

風況シミュレーションは通常大気安定度「中立」か、あるいはそれに近い状態を仮定して行います。長い時間の統計をとると「中立」である割合が、特に風車の発電領域である中・強風速域では、比較的大きい、とされているからです。

サイト乱れの推定の場合にはここで問題が生じます。乱れのシミュレーションでは通常、周辺の地形情報、地表面粗度情報を入力データとして、乱れ強度を出力しますが、出力された乱れ強度は大気安定度中立時の値であり、風速依存性を持ちません。つまり、風速の大小にかかわらず一定の値なのです。

次の図を見て下さい。実際の乱れは、大きな幅（ばらつき）を持って分布しており、平均値も風速に応じて変化しています（理想的には直角双曲線様の分布形状になります）。数値シミュレーションで算出される乱れ強度は、図中、中立乱れ強度として水平線で表しています。風車適合性評価に必要なサイトの乱れ情報は



風車位置における風速ごとの90%分位値(図ではI90q)ですが、これを算出するためには、乱れのばらつきの情報が必要です。

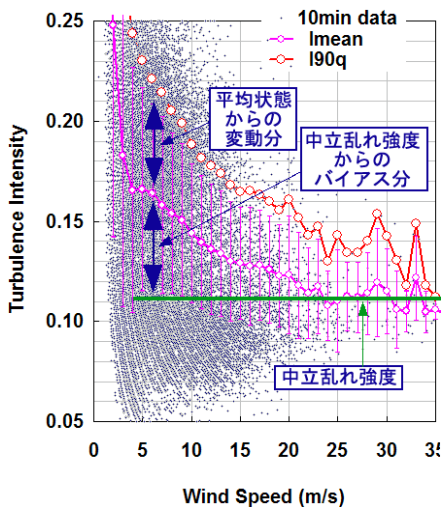


図 11 自然界の乱れと数値シミュレーションで得られる乱れ

乱れ分布のばらつきの原因を構成する大きな要因の一つとして大気安定度の変動が考えられます。そこで、大気安定度の指標値(モニン・オブコフ数、リチャードソン数等)を入力条件として中立以外の条件における乱れをシミュレーションで算出し、これを想定される出現率に応じて分散させてやれば乱れ分布のばらつきをある程度は再現することが出来そうです。しかし、これは実際には不可能な話です。サイトの大気安定度の出現率分布はほとんどの場合判っていないからです。図 12 はデンマークの2つの洋上風況観測塔で観測した大気安定度出現率分布図です。我が国でこのような分布図が作成された例はないのでしょうか。

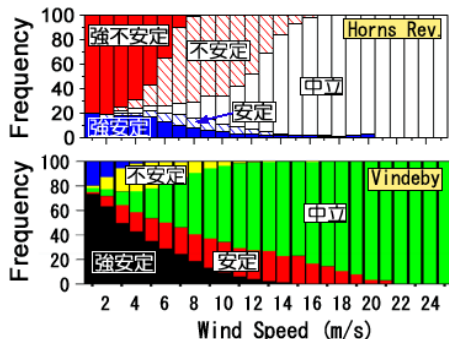


図 12 大気安定度出現率分布の例

風力発電の事前調査としての風況精査でもこのような計測が行われた例はないと思います。要約すると、数値シミュレーションによりサ

イトの乱れを推定する場合、2つの根源的な問題があります。

1. シミュレーションでは大気安定度中立を仮定した風速依存性のない乱れ強度しか計算できず、大気安定度の変動とともに風速に応じて変化する自然の乱れを再現できない。
2. シミュレーションでは、乱れのばらつきを再現できない。したがって、風車適合性評価に必要な90%分位値を算出できない。

「日本型風力発電ガイドライン」では、数値シミュレーションに加えて風洞テストによる方法や、「建築物設計荷重指針」の単純地形モデル<sup>iv)</sup>による方法の記述がありますが、この場合も、算出できる乱れ強度は大気安定度中立状態の値なので、全く同じ問題が残っています。同ガイドラインでは、この問題を解決する手段として、サイト乱れの分布形状はIECの乱れ標準モデルと相似であると仮定して結果を導き出す方法を記載しています。デンマークのRisoが開発した線形シミュレータに基づいた解析支援ツールであるWAsP Engineeringも実は同様の考え方を採っているのですが、この考え方にも大きな問題があります。

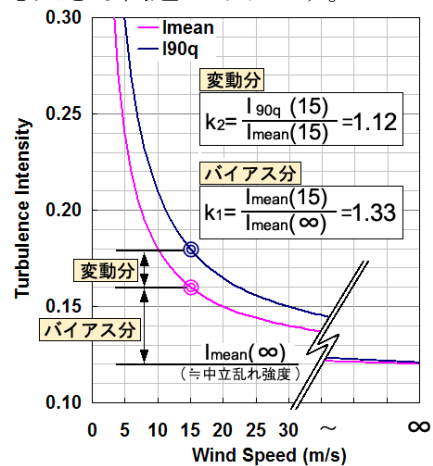


図 13 日本型風力発電ガイドラインの方法  
I<sub>mean</sub>(∞) は中立乱れ強度に等しい。

上記ガイドラインによる方法では、結果的には、大気安定度中立を仮定して数値シミュレーションによって求めた乱れ強度に対して、実測

<sup>iv)</sup> 「日本型風力発電ガイドライン」では WAsP Engineering を単純地形モデルによる方法として記載していますが、これは誤りです。WAsP Engineering は数値地図に基づいた地形・粗度情報を入力データとして用いる線形数値シミュレーション手法の一つであり、単純地形モデルは採用していません。

データによる補正を施した後に  $1.12 \times 1.33 = 1.5$  を乗じた値が当該サイトの 90%分位値になる、と仮定したことになります。ところが、NEDO の風況精査サイトの実測値からこの 1.5 (IEC 乱れ標準モデルの値) に相当する係数を計算すると、図 13 に示すように 1.2~2.4 という広い値で分布しており、一律 1.5 という値を適用すると、サイトによっては大きな誤差に導くこととなります。

例えば、シミュレーションから得た中立時の乱れ強度が 0.10 であったとしたとき、同ガイドラインの方法によると、風速 15m/s における 90%分位値は 0.15 と推定されることとなります。

しかしながら、係数(乱れ強度 90%分位値を中立乱れ強度で除した値)が 1.2 であるサイトでは、実際の 90%分位値は 0.12 が正しく、ガイドラインの方法は過大評価していることとなりますし、2.0 であるサイトであれば、実際の値は 0.20 が正しい値となるため、きわめて危険側の評価になってしまうこととなります。

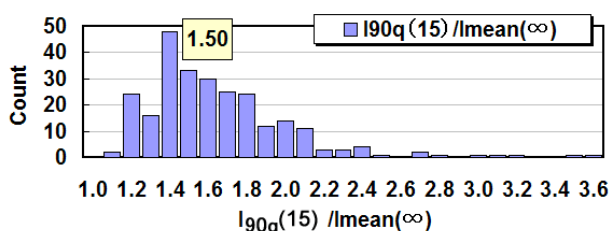


図 14 NEDO 風況精査サイトにおける  $I_{90q}(15)/I_{mean}(\infty)$  の分布状況

標準モデルにおけるカテゴリ間での乱れ強度の刻みは 0.02 という小さな値ですが、導き出される誤差はこれに優に匹敵する、あるいはこれをはるかに超える量になることとなります。

同ガイドラインでは、この問題について、「日本における風速に対する乱流強度の分布は、IEC61400-1Ed.3 (2005) の NTM 式の形状とほぼ相似なことで理解されているため、ここでの乱流強度の補正は、IEC61400-1Ed.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。」と特記し注意を促しています。しかし、実情は「近似できない場合もある」のではなく、図 14 に示すように、近似できない場合の方が多いので、この方法で評価するのは危険が多過ぎます。

(なお、同ガイドラインの策定時点では図 14

に示すような我が国の乱れの分特性は未だ明らかになっていませんでした。その意味では、このガイドラインの手法は策定時点ではベストのものであったといえることができます。)

サイトの乱れを推定する手法について紹介したものは、これが非常に重要な問題であるにもかかわらず、これまでに私が調べた限りでは「日本型風力発電ガイドライン」と WAsP Engineering 以外にはありません。そこで、精度を使用に耐えるまで改善する方法として、IEC の乱れ標準モデルの代わりにマスト観測データを参照値として用いる方法を考え、その詳細を実サイトに適用した例とともに、昨年の風力エネルギー利用シンポジウムに紹介しました。内容が技術詳細にわたるため、ここでの紹介は差し控えますが、ご興味のある方はその論文<sup>4</sup>を参照して頂ければ幸いです。論文集が手元にはない方にご連絡を頂ければお送りすることも可能です。

サイト乱れ推定の議論は以上に留まらず、ウインドファームの場合は、上流側に位置する風車のウエークの影響や、複雑地形の場合は乱流構造変質に伴う割り増しを考慮する必要もあります。これらについてはここでは触れておりませんが、改めて稿を起こしたいと思っております。

なお、IEC 標準の本文に記載されているのは最終結果だけで、策定の過程で侃々諤々なされたであろう議論の過程は一切記されておりません。本稿内容には私が推測を交えて解釈した部分も一部にあることをご寛恕頂ければ幸いです。また、本稿内容に対するコメント、ご批判、あるいはご質問も歓迎いたします。是非共、首題部連絡先にご連絡下さい。

#### 参考文献

- 1 A.Albers, O&M Cost modeling, technical losses and associated uncertainties, EWEC 2009
- 2 Intelligent Energy – Europe, Wind Energy - The Facts, 2009.3
- 3 谷垣,他,「我が国風況の乱流特性と IEC61400-1 Ed.3 の乱流モデル」2010.11、第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム講演集 pp127-130
- 4 谷垣,「IEC61400-1Ed.3 による適合性評価とサイト乱れ推定法」2010.11、第 32 回風力エネルギー利用シンポジウム講演集 pp135-138