

ワイブル分布による風況及び発電量予測に関する一考察

関塚 智* 岡崎 裕** 斉藤 純夫**

Evaluating Wind Conditions and Power Generation of Wind Turbine Generators using Weibull Distribution Data

by Satoshi SEKIZUKA, Hiroshi OKAZAKI, & Sumio SAITO

Wind conditions and power generation were evaluated for two wind turbine generator systems to clarify Weibull distribution effects, namely by changes in shape parameters. The systems had the same nominal rated power but their control methods were different. Shape parameter effects were also studied using measured wind condition data of prototype wind turbines operating at a site.

Keywords: Wind turbine, Wind turbine generator system, Propeller type wind turbine, Power control, Wind speed, Frequency distribution of wind speed, Power performance, Power curve, Weibull distribution, Rayleigh distribution

1. はじめに

近年、国内外において多数の風力発電システムが導入され、発電機としては永久磁石型あるいは巻線励磁型の同期発電機か、巻線形誘導発電機ないしはかご形誘導発電機に代表される非同期発電機が採用されている。日本国内においては、風車は非一様で非定常性の強い風況のもとで稼働される場合が多く、前記発電機のいずれの種類を採用するかによって、適用される風車出力制御及び発電機回転速度制御の方式が異なる^{1~5)}。

風車設置に際しては、一定期間の風速の出現率を精査し、この状況下における発電量予測を行い、風力発電事業の採算性を検討するのが通常である。

また、一般的には風速の出現率すなわち頻度を、ワイブル分布を用いて評価することが行われているが⁶⁾、平均風速から風速出現率を推定する場合、その分布を表す

式において、係数の一つである形状係数 k を2と仮定したレイリー分布がよく用いられている。

しかし、ワイブル分布における形状係数の変化に伴う風速及び発電量の評価を行った例はそれほど多くないのが現状である^{7, 8)}。そのため、風速及び発電量の算出に及ぼす形状係数の影響についての評価を、風車出力及び発電機回転速度の制御方式の異なる種々の風力発電システムについて行っておくことは、日本のような複雑な地形に応じて変化する風況に対し、どの制御方式の採用が



07-76 01/217

写真 風力発電機

Photo Wind turbine generator system

* 株荏原由倉ハイドロテック

** 風水力機械カンパニー エネルギー事業統括部 風力発電事業室 技術計画グループ

** (現) 東京工業高等専門学校 機械工学科 工学博士 教授
(元) 株荏原製作所 新エネルギーカンパニー 風力・太陽光発電事業部

(1) 機械学会論文集 (B編), 71巻, 707号 (2005-7).

(2) JSME International Journal, Series B, Vol.49, No.2 (2006).

適切であるかの判断材料になるものとする。

そこで、本報においては、別報^{4, 5)}で対象とした2種類の風力発電システム、すなわち、後述するように、可変速運転制御方式の巻線形誘導発電機とストール制御方式のかご形誘導発電機を用いた発電システムと基本的には同様で、公称出力の同じ風車を対象に、ワイブル分布における形状係数の変化に伴う風速及び発電量の評価を行い、併せて実機サイトにおける風車(写真)についても実測データに基づいた検討を行った。

2. ワイブル分布による風速出現率の評価

ワイブル分布による風速の出現率分布は、次のように表される⁶⁾。

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left\{-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $f(V)$: 風速 V の出現率
 c : 尺度係数
 k : 形状係数

である。

また、ワイブル分布において、特に、 $k = 2$ の場合はレイリー分布と呼ばれ、次の式で表される。

$$f(V) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right) \exp\left\{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^2\right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 \bar{V} : 平均風速である。

なお、ワイブル分布における平均値 \bar{V} は

$$\bar{V} = c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \dots\dots\dots (3)$$

で表される。

ここで、 Γ は、ガンマ関数である。

3. 検討対象風車

3-1 制御方式の異なる2種類の1500 kW風力発電システムの比較

3-1-1 風車出力曲線の比較

表に今回検討の対象とした制御方式の異なる2種類の1500 kW風車の仕様を示す。

ここで、風車Aは可変ピッチ翼により風車出力を制御し、これに接続する発電機は可変速運転制御が可能な巻線形誘導発電機を用いている。

一方、風車Bは翼先端をストール(失速)させて出力を制御する方式を採用し、発電機は極数変化により2段階に回転速度を変えることが可能なかご形誘導発電機を用いている。

図1は風車A及び風車Bの公称出力曲線をまとめて示

表 風車の仕様

Table Specifications of wind turbines

仕様 Specifications		風車A Wind turbine A	風車B Wind turbine B
出力制御 Power control	翼 Blade	可変ピッチ方式 Variable pitch type	ストール方式 Stall type
	発電機 Generator	巻線形誘導発電機 Wound-rotor induction generator	かご形誘導発電機 Squirrel-cage induction generator
定格出力 Nominal rated power		P_n 1500 kW	1500/400 kW
定格風速 Rated wind speed		V_n 12 m/s	14 m/s
カットイン風速 Cut-in wind speed		V_i 3.5 m/s	4 m/s
カットアウト風速 Cut-out wind speed		V_o 25 m/s	25 m/s
ロータ直径 Rotor diameter		D 70 m	64 m
ハブ高さ Hub height		H 65 m	68 m
ロータ回転速度 Rotor speed		N 11 ~ 22 min ⁻¹	17.2/11.5 min ⁻¹

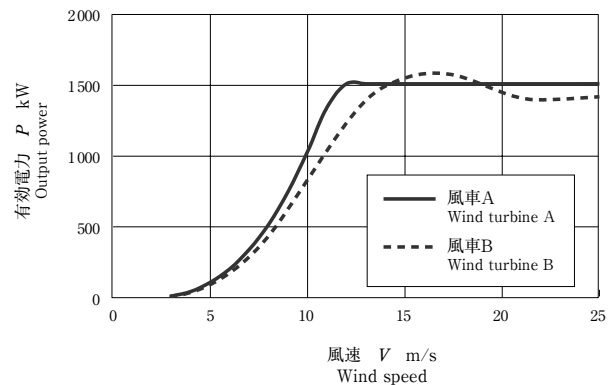


図1 性能曲線

Fig. 1 Power curve

したものである。上述のような制御方式の違いにより、カットイン風速から定格風速までの範囲では、風車Aの出力の方が大きく現れており、また、定格風速以降の出力については、風車Bの方が翼先端をストールさせて制御していることもあり、出力曲線より上にピークをもったカーブとなっている。

3-1-2 風速出現率と風況曲線(累積出現率)及び発電量分布

ここでは風速出現率と風況曲線(累積出現率)の一般的な検討を、ワイブル分布を用いて行う。

図2は、ワイブル分布による風速出現率を式(1)を用い、一例として、尺度係数 $c = 7$ m/s について、形状係数 k をパラメータにして算出したものである。

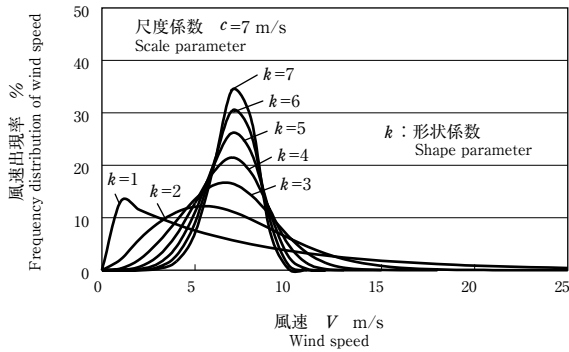


図2 風速出現率

Fig. 2 Frequency distribution of wind speed

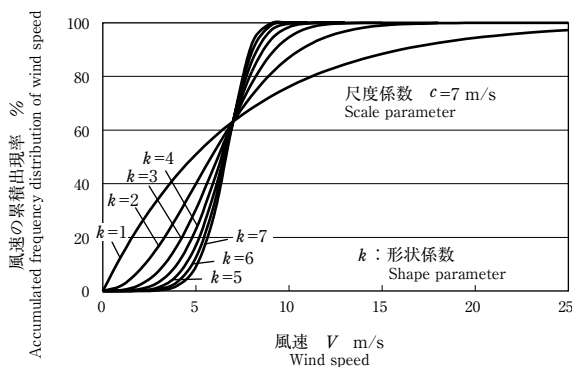


図3 風速の累積出現率

Fig. 3 Accumulated frequency distribution of wind speed

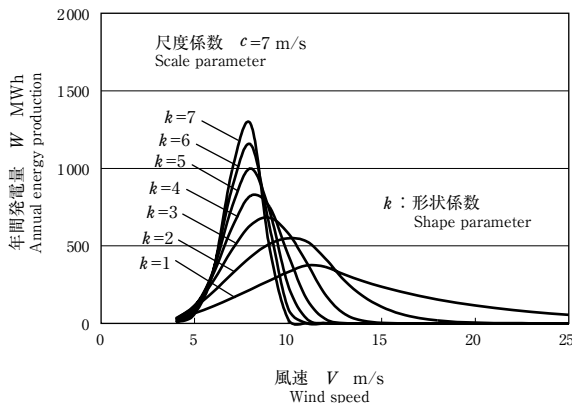


図4 発電量分布 (風車A)

Fig. 4 Distribution of energy production (Wind turbine A)

形状係数 k が大きくなるに従い、風速出現率の曲線のピークとなる風速は大きい方に移動している。そして k がほぼ4以上では、約7 m/sの位置にピーク点が現れており、 k の増加につれてその風速での出現率は大きくなっている。

また、風況曲線すなわち累積出現率については、図3に示すように、形状係数 k の値によらず、累積出現率が63%における風速値が、尺度係数 c の値すなわち7 m/sを表している。曲線の傾向は、形状係数 k の値が大きくなるに従い、7 m/sを含む前後の風速の範囲での傾きが大きくなっている。

前記の風速出現率と風況曲線（累積出現率）の一般的な検討結果を適用し、具体的な発電量分布について、風車Aを例として次に示す。

図4は、図1の風車出力曲線と図2の風速出現率分布から、風車Aの場合について、年間発電量の風速に対する分布を試算したものである。

発電量分布において、発電量がピークとなる時の風速値は、形状係数 k が大きくなるにつれて、小さい方に移動している。具体的には、発電量がピーク時の風速値は、 $k=1$ のときは約12 m/sであるが、 k がほぼ4以上になると、約8 m/s近傍へと漸近し、その発電量の値も増加している。

3-1-3 形状係数 k の変化に対する年間発電量の変化 (尺度係数 c をパラメータにして)

図5は、風車A及び風車Bについて、3-1-2項と同様の検討をいくつかの尺度係数 c について試算し、各風速における発電量を積算して、年間発電量として形状係数 k に対し表示したものである。

風車A及び風車Bとも、試算した範囲内においては、尺度係数が $c=4$ と小さい場合には、すべての形状係数 k の範囲において年間発電量が最も小さく、かつ、形状係数 k の増加に伴い発電量は減少している。これに対し、尺度係数 $c=10$ では、すべての形状係数 k の範囲において年間発電量が最も大きく、かつ、形状係数 k の増加に伴い発電量は増加する傾向を示している。

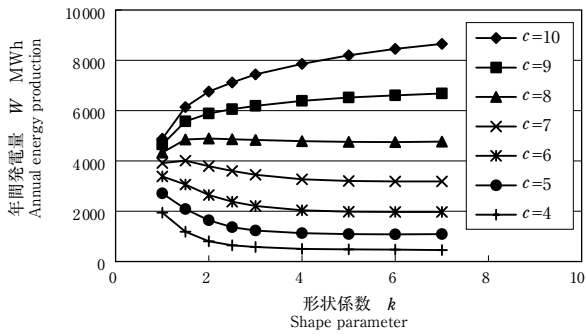
すなわち、風車Aについては、尺度係数 c が7と8の中間の値のときに、また、風車Bの場合には、尺度係数 $c=8$ のときに、形状係数 $k=1\sim7$ の範囲にわたり、ほぼ一定の年間発電量を示している。

そして尺度係数が7ないしは8より大きい場合と、それより小さい場合における形状係数 k の変化に対する年間発電量の増減の傾向は、図1に示す風車出力曲線の変化の違いによるものと言える。

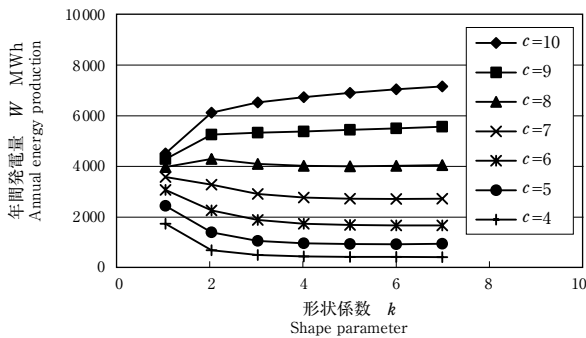
また、図5 (a) (b) において、尺度係数 c と形状係数 k が同じ場合には、風車Aの場合の年間発電量は、風車Bのそれよりも大きく現れている。

3-2 実機風車による検証

前述の議論を確認するため、実機風車による検証を



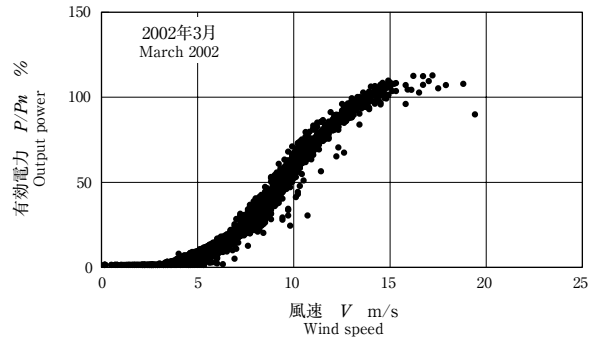
(a) 風車A
(a) Wind turbine A



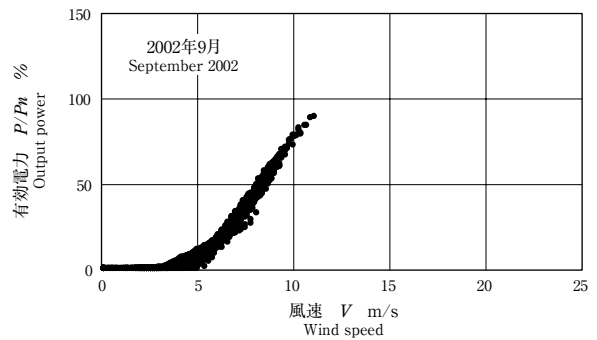
(b) 風車B
(b) Wind turbine B

図5 形状係数の変化に対する年間発電量の変化
(尺度係数 c をパラメータにして)

Fig. 5 Annual energy production vs. shape parameter k
(with the Scale parameter c)



(a) 平均風速の大きい例
(a) High average wind speed



(b) 平均風速の小さい例
(b) Low average wind speed

図6 性能曲線 (対象風車の例)

Fig. 6 Power curve (Example of prototype wind turbine)

行った。

対象としたのは、日本海側のある地点に設置の翼枚数3枚の風車で、風車Bと同様に翼先端をストール (失速) させることにより出力制御し、かつ、発電機は極数変化により2段階に回転速度を変化できるかご形誘導発電機を用いている。

3-2-1 風車出力曲線

図6 (a) (b) は、対象とした風車について、一例として平均風速の大きい2002年3月と、平均風速の小さい2002年9月のそれぞれの時期における風車出力の実測値を、公称の定格出力に対し無次元表示したものである。

後述の風速の出現率分布と併せて評価すると、平均風速の大きい2002年3月には、20 m/sに近い風速のデータが得られたのに対し、平均風速の小さい2002年9月には、最大でも約10 m/sを多少超える風速がわずかに出現している程度であった。

3-2-2 風速の出現率分布とワイブル分布

(1) 風速の出現率分布

図7 (a) (b) は2002年3月と9月の両方について、実

機風車サイトにおける風速の出現率分布を示したものである。

平均風速の大きい2002年3月においては、風速が6~7 m/sでは、出現率が約12%程度であるが、この風速をはさんで0から20 m/sの広い風速域にわたり風速の出現率が分布している。

一方、2002年9月においては、風速が約5 m/sにおいて出現率が24%を示しており、風速の出現率は0から11 m/s程度の狭い範囲内に限られた分布となっている。

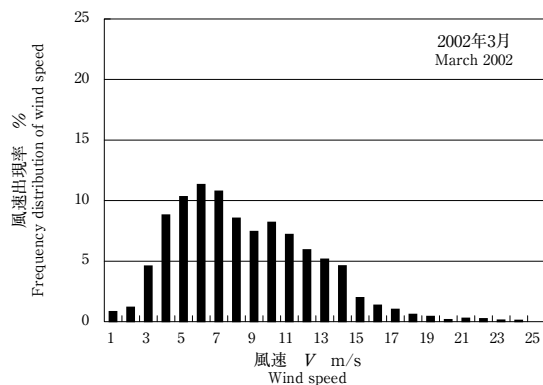
(2) ワイブル分布による風速の出現率の評価

次に、図7 (a) (b) の風速の出現率をワイブル分布を用いて検討する。

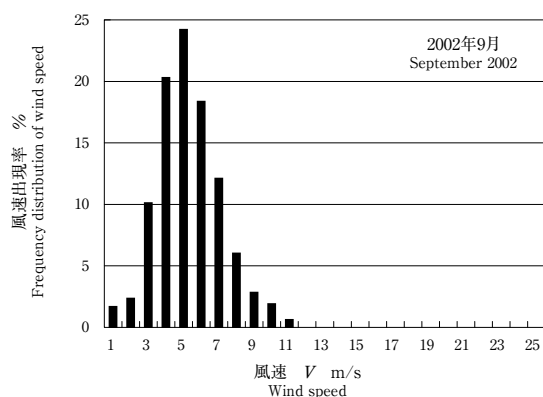
ワイブル分布は素材強度を解析するために適用されたのが最初である。そこで、故障分布がワイブル分布で示されるとき信頼度を、風況の一般的な表示にならって風速の出現率に置き換え、 $R(V)$ で表わすと次式を得る⁹⁾。

$$R(V) = 1 - F(V) = \exp\left\{-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right\} \dots\dots\dots (4)$$

尺度係数 c はワイブル分布でいう特性寿命に相当し、



(a) 平均風速の大きい例
(a) High average wind speed



(b) 平均風速の小さい例
(b) Low average wind speed

図7 風速出現率 (対象風車の例)

Fig. 7 Frequency distribution of wind speed (Example of prototype wind turbine)

$$c = t^{\frac{1}{k}} \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。ここで、 t はワイブル分布では、スケールパラメータと呼ばれている。

式(4)を式(5)を用いて書き換え、両辺の対数を2度とると、

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(V)} = k \cdot \ln V - \ln t \dots\dots\dots (6)$$

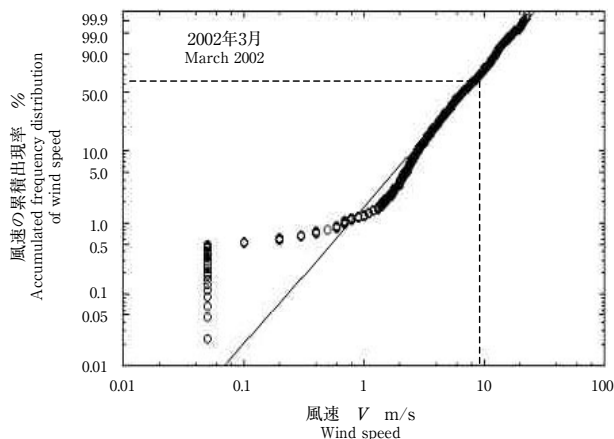
となる。

よって、ワイブル確率紙によれば、縦軸 Y 及び横軸 X は、

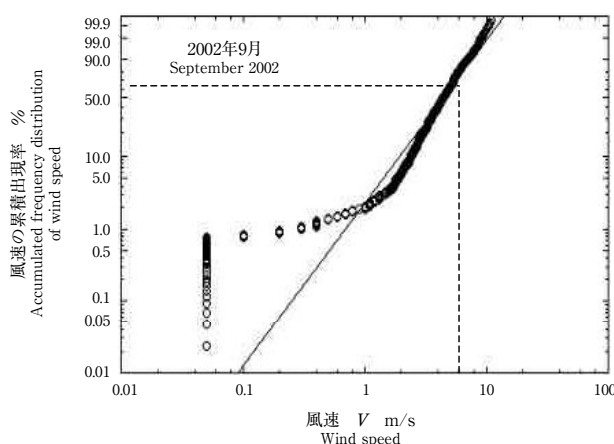
$$\left. \begin{aligned} Y &= \ln \ln \frac{1}{1 - F(V)} = \ln \frac{V^k}{t} \\ X &= \ln V \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

と表示できる。

したがって、式(7)のグラフを直線で表示すると、形状係数 k は直線の傾き $\angle Y / \angle X$ から求めることができる。また、尺度係数 c は、ワイブル分布による解析を風速の評価に適用したときに、風速の小さい方からの累積出現



(a) 平均風速の大きい例
(a) High average wind speed



(b) 平均風速の小さい例
(b) Low average wind speed

図8 ワイブル分布にもとづく風速出現率 (対象風車の例)

Fig. 8 Frequency distribution of wind speed based on Weibull distribution (Example of prototype wind turbine)

率が63%になるところの風速値を意味する。

図8(a)(b)は、上述のワイブル分布による評価をミーンランク法により行い、図7(a)(b)の実際の風速に適用した結果である。このとき、0 m/sのデータについては、後述する形状係数及び尺度係数の評価にすべてのデータを寄与させることを考え、今回計測に用いた風速計の計測最低値が0.1 m/sであることから、この値以下のデータについては0.05 m/sとして図8中に表示した。その結果、破線で示すように、尺度係数 c は、図8(a)では約8 m/sに、また図8(b)では約4.7 m/sとなっている。

一般的には、特に断りがなく平均風速と呼ぶ場合は、次のように、全サンプリングデータ n を代数平均した値 \bar{v} を示している。

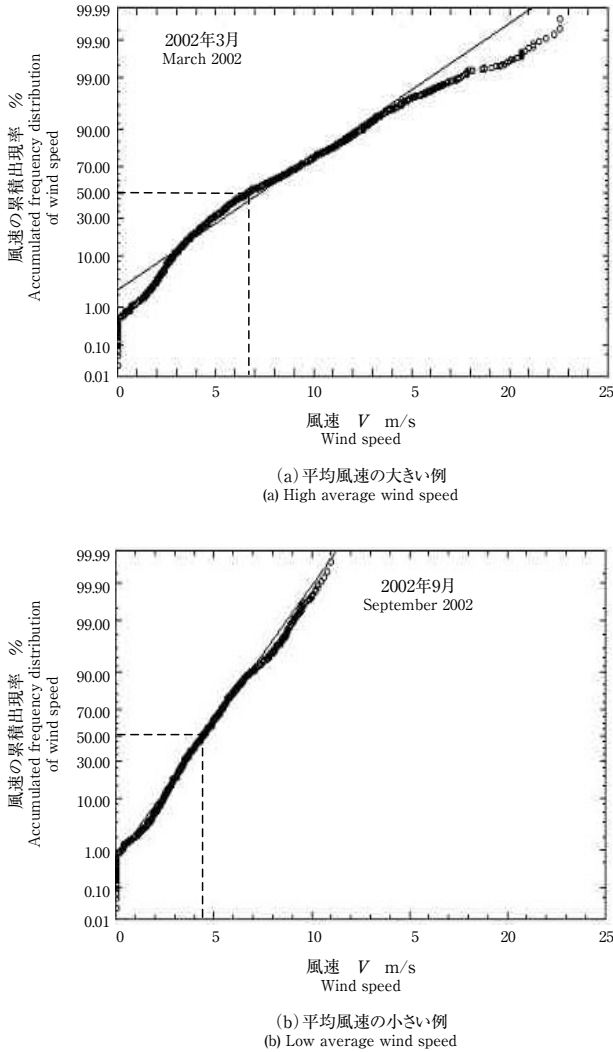


図9 正規分布にもとづく風速出現率 (対象風車の例)

Fig. 9 Frequency distribution of wind speed based on normal distribution (Example of prototype wind turbine)

$$\bar{v} = \frac{\sum V_1 + V_2 + \dots + V_n}{n} \dots\dots\dots (8)$$

そこで、ワイブル分布における尺度係数と正規分布における代数平均による風速との関連について検討するため、風速の出現率を正規分布に従うものとして評価したものが、図9 (a) (b) である。

この場合、横軸の風速はリニア表示したもので、縦軸の50%に対応する風速値が、平均風速 \bar{v} を表す。

すなわち、破線で示したように、図9 (a) では、6.7 m/s が、また、図9 (b) では4.3 m/s が正規分布により評価したときの平均風速値となる。

以上より、ワイブル分布における尺度係数 c と正規分布における平均風速値 \bar{v} を比較すると、ワイブル分布に

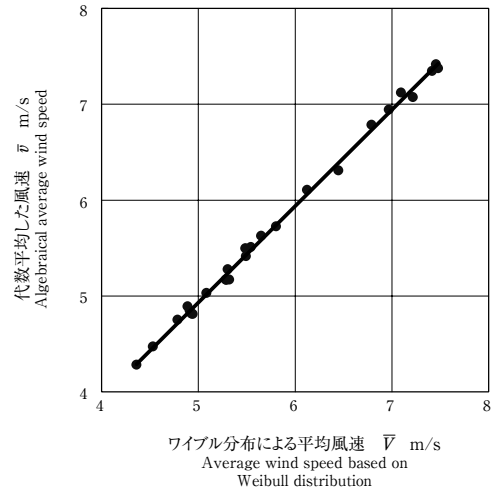


図10 ワイブル分布と正規分布にもとづく平均風速の比較
Fig. 10 Average wind speed based on Weibull and normal distributions

よる値の方が、約1.1~1.2倍程度大きく現れていることが分かる。

次に、参考までに、前述の実機風車のデータをもとに、1箇月ごとのワイブル分布における平均値 \bar{v} と正規分布における平均値 \bar{v} との関係を表すと図10のように直線で回帰できる。

ワイブル分布及び正規分布において、ともに平均値で評価すると、ほぼ1:1の相関関係にあることが分かる。

3-2-3 形状係数 k 、尺度係数 c 及び発電量 W の月別変化

図11は、実機風車について、形状係数 k 、尺度係数 c 及び発電量 W の月別変化を示す。

検討対象とした3月及び9月については、前項で詳細

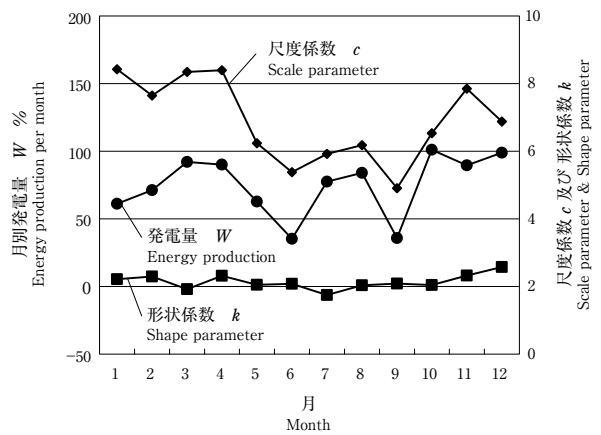


図11 形状係数、尺度係数及び発電量の月別変化 (対象風車の例)
Fig. 11 Shape parameter, scale parameter and energy production per month (Example of prototype wind turbine)

に議論したが、ここでは2002年の他の月についても同様に検討した結果をまとめて表示した。

これより、尺度係数 c については、前述のようにワイブル分布における風速の出現率が63%となるときの風速を表すが、1月から4月の高風速の時期と、6月から9月までの低風速の時期とに大別される。

月別の発電量の値の変化の傾向については、大局的には尺度係数 c の変化に類似な傾向を示し、風速の大きい時期には、概して大きな発電量を示している。1年間を通してみれば、月別の発電量は、最大発電量を示す月の値に対し、約40～100%の範囲で大きく変動している。

これに対し、ここで検討した実機風車に関する形状係数 k については、風速の大小によらず、 $k = 2$ 前後で一定に近い値となっている。

3-2-4 日本各地の観測所におけるワイブル分布の形状係数 k と尺度係数 c

以上の議論を更に検証するため、日本各地の観測所におけるワイブル分布の形状係数 k と尺度係数 c について検討する。

日本各地の観測所におけるワイブル分布の形状係数 k と尺度係数 c については、文献(8)に記載されているので、この結果と前項までに議論した実機サイトにおけるそれらの値とを比較する。

図12は、文献(8)に記載の形状係数 k と尺度係数 c を平均風速に対して描いたものである。図12中には、

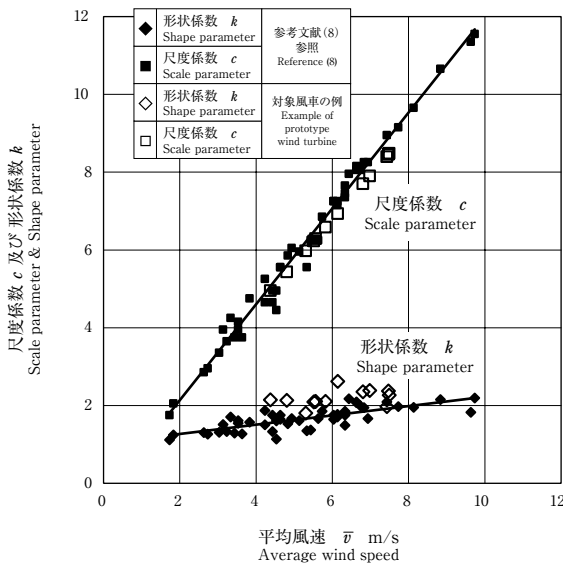


図12 日本各地の観測所におけるワイブル分布の形状係数と尺度係数

Fig. 12 Shape parameter and scale parameter based on Weibull distribution at each measuring point in Japan

前項で検討した実機サイトでのそれぞれの係数の値も併記した。

形状係数 k は平均風速が小さいときには1.2程度の値ではあるが、平均風速が10 m/s近くまで大きくなると2を超える値を示している。

一方、尺度係数 c については、平均風速の増加につれて大きくなり、両者の相関は、ワイブル分布における尺度係数 c と正規分布における平均風速値 \bar{v} との比が、約1.1～1.2であるという3-2-2項の結果を裏付けるものとなっている。

実機サイトの形状係数 k と尺度係数 c についても、多少の増減はあるものの、文献(8)の結果に近い値を示しており、日本各地の風況に対するそれぞれの係数の有効性を示すものと考えられる。

4. あとがき

ワイブル分布における形状係数の変化に伴う風速及び発電量の評価を、風車出力及び発電機回転速度の制御方式の異なる2種類の風力発電システムについて行い、併せて実機サイトにおける風車についても実測データに基づいた検討を行った。

その結果、明らかになった点は次のとおりである。

(1) 風車A及び風車Bとも、試算した範囲内においては、尺度係数が $c = 4$ と小さい場合には、すべての形状係数 k の範囲において年間発電量が最も小さく、かつ、形状係数 k の増加に伴い発電量は減少している。

これに対し、尺度係数 $c = 10$ では、すべての形状係数 k の範囲において年間発電量が最も大きく、かつ、形状係数 k の増加に伴い、発電量は増加する傾向を示している。

尺度係数 c と形状係数 k が同じ場合には、風車Aの場合の年間発電量は、風車Bよりも大きい。これは2種類の風車出力曲線の違いに関連している。

(2) 実機サイトにおける風車の実測データに基づいた検討により、ワイブル分布における尺度係数 c と正規分布により評価した平均風速値 \bar{v} を比較すると、ワイブル分布による値の方が、約1.1～1.2倍程度大きく現れている。

(3) 本論文で対象とした実機サイトにおけるワイブル分布の形状係数 k と尺度係数 c は、多少の増減はあるものの、日本各地の観測所におけるそれらの値に近い結果を示しており、日本各地の風速に対するそれぞれの係数の有効性を示すものと考えられる。

(4) ワイブル分布における風速の平均値 \bar{v} と正規分布における平均値 \bar{v} とは、ほぼ1:1の相関関係にある。

参考文献

- 1) 今村博, 松宮輝, 土屋敬一, 山田佐佳, 複雑地形における風況測定と風力タービン性能評価に関する研究 (第1報, 竜飛ウィンドパークにおける NEDO-500 kW 機の性能評価), 日本機械学会論文集 (B編), 64-626, (1998), p.3323-3329.
- 2) Müller.S, Deicke.M, De Doncker.R.W., Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines, IEEE Industry Applications Magazine, May/June (2002), p.26-33.
- 3) Hofmann.W, Okafor.F, Doubly-Fed Full-Controlled Induction Wind Generator for Optimal Power Utilisation, PEDS '01 Conference Proceedings (2001), p.1-7.
- 4) 齊藤純夫, 関塚智, 佐藤健一, 佐藤有信, 制御方式の異なる2種類の風力発電システムの性能比較, 日本機械学会論文集 (B編), 70-700, (2004), p.3174-3181, (論文No.04-0222) .
- 5) 齊藤純夫, 関塚智, 佐藤健一, 佐藤有信, 制御方式の異なる2種類の風力発電システムの過渡的性能, 日本機械学会論文集 (B編), 71-707, (2005), p.539-545. (論文No.04-0362) .
- 6) 新エネルギー・産業技術開発機構 新エネルギー導入促進部編, 風力発電導入ガイドブック, (2000), P.19-20.
- 7) 別府真也, 佐藤建吉, 船橋市三山の10年間風況データの解析と評価, 第25回風力エネルギー利用シンポジウム, (2003-11), p.193-196.
- 8) 長井浩, 洋上風力発電の可能性と将来, ENERGY, (2001), p.64-70.
- 9) 日科技連編, 信頼性データの解析, (1986), p.16&18, 日科技連出版社.

