

■役立つページ

風況よもやま話

—教科書に載っていない風の話あれこれ—

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

はじめに

風車は風があって始めて発電をすることができます。したがって風力発電に携わるものにとっては風況に関する基礎知識が必須です。風況に関する参考書はいろいろありますが、風力発電の観点からの風況という点、エッセンスだけをまとめたものが多く、実務に長く携わっていると、参考書に書いていないことに遭遇する機会が多く、また、参考書の記述に合わないような事象も、たびたび経験します。

このような事から、私がこれまでの経験でいろいろと悩みながら自分なりに調べて納得したことなどを、気促に纏めて見ようと思いました。協会誌の発行にあわせて、その時々で気をついたテーマについて思いつくままに紹介しようと思います。テーマは全く私の独断で統一性はありませんが、お暇な折に目を通して頂いて感想など聴かせて頂ければ幸いです。

べき乗則は信頼できるか？

べき乗則という法則があります。風は上空に行けば行くほど強くなり、風の強さは地上高さのべき乗に比例する、というものです。

$$[\text{風速}] \propto [\text{地上高さ}]^\alpha$$

べき指数 α の逆数を N 値といい、 N 値とべき乗則を使えば低高度で計った風速から高高度の風速が推測できると参考書に書いてあります。

私が風の世界に入って仕事を始めて最初に途惑ったのは、丘陵地の牧場地帯での N はいくらになるか、ということでした。例えば、NEDO の「風力発電導入ガイドブック」を見ると、「平坦な地形の草原」「海岸地方」「田園」「市街地」について N 値がそれぞれいくらになるかは書いてありますが、牧場でいくらになるかはどこを探しても書いてありません。山岳地についてもそうです。

ほかの参考書をいろいろ探してみたのですが、やはりどこにも答えはありませんでした。

皆さん、何故だかわかりますか？ 答えは非常に簡単なものでした。べき乗則は丘陵や山岳地の様に土地に起伏のあるところに使ってはいけない、ということです。

べき乗則は経験則であり、いろいろな場所、いろいろの高さでの風速の観測結果を整理してみると、高さの指数関数として表現できることがわかった、ということであり、理論的に導き出されたものではありません。もともとは建築設計上の必要性から生まれたものらしく、人の生活する範囲でしかもこのような観測データの得られる範囲、という平地でのデータが主になります。山岳地や丘陵地になると得られるデータが少なく、どのような分布になっているかは良く判らない、というのが正直なところだろうと思います。

理論的に導き出されたものとして対数則というものがあります。対数則によれば、風速は地上高さを周辺の地表面粗度（地表面の粗さをあらわすパラメータ）で割って無次元化した量の対数と、摩擦速度という、その時吹いている風の乱れの強さを表すパラメータに比例します。

$$[\text{風速}] \propto [\text{摩擦速度}] \times \log_e \left(\frac{[\text{地上高さ}]}{[\text{地表粗度}]} \right)$$

対数則は、一様粗度の平坦地形という条件と大気安定度「中立」という条件をおいて運動方程式から導き出したものです。

実は、この対数則で表現した風速の鉛直分布はべき乗則によりかなりの精度で近似することが出来ます。下の図はべき乗則分布がどの程度対数則分布を近似できているかを三つの例で示したものです。

横軸は基準高さ（地上 50m）の風速に対する風速比で、0.5 ずつ横にシフトしています。グラフに示されたパラメータから逆算すると、左から順に大都市、農場、広い芝地に該当し、粗度値が小さくなるほどべき乗則の近似精度が良くなっていくことが判ります。

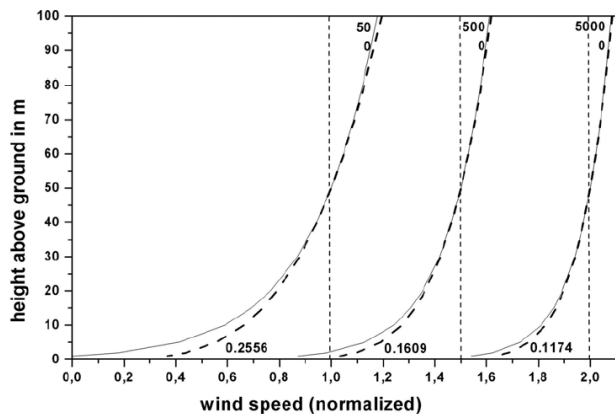


図 1 べき乗則分布と対数則分布の比較

(出典：S. Emeis, “How Well Does a Power Law Fit to a Diabatic Boundary-Layer Wind Profile?”, DEWI Magazin Nr. 26, Feb 2005, p59 Fig2)

対数則は平坦な地形という仮定のもとに導き出されたと書きました。

地表面が平坦でない場合は、風速の分布は地形の起伏による気流変化の影響を受け、起伏の状況に対応した鉛直分布が生じます。最終的な分布は、先に対数則に従った分布と地形起伏に対応した分布を足し合わせたものとなり、結果的には対数則（そしてべき乗則）から逸脱してくることになります。つまり、起伏のある地形ではべき乗則が成り立たない場合も出てくる、ということです。どの程度成り立たないかは地形の起伏の状況によって全く異なります。

これ以外にも、近くに構造物や樹木などの障害物があればこれも逸脱の要因となります。障害物の影響範囲はその高さの 10～20 倍の距離といわれますが、状況によってはそれよりはるか遠くまで及ぶ場合もあり、注意が必要です。

このようなことから、風車の建設予定地で風況精査を行う場合は、べき乗則が成り立つことの方がむしろ稀と言った方が良いのではないかというのが私の実感です。実際、20m と 30m の高さの観測値から N 値を計算すると、参考書では 5～7 程度になっても良いような場所でも、2～3 と書いたとんでもなく低い値となることが良くあります。また、50m の観測塔で 10m おきに設けた風速計の観測値を使って、層間の

風速比から N 値を計算すると、低い位置での N 値と高い位置での N 値が大きく違うということも多く経験します。

参考書にはある高さの風速がわかれば、それより高い位置（例えば風車のハブ高さ）の風速はべき乗則を使って計算することが出来る、と書いてあります。今は NEDO の風況精査の高さは 40m から 50m となっていますが、昔は 20m の高さでした。これからハブ高さを 50m としてその風速を推定するとした場合、実際は $N=7$ に相当する分布であったものを観測結果に基づいて $N=3$ で計算したとすると、19% 風速を過大評価することになります。これは年間発電量にすると 35%～45% 程度の過大評価となります（風力のエネルギーは風速の 3 乗に比例しますが、風車の取得エネルギーは風車の性能特性の関係からその通りにはならないことに注意してください）。

因みに 40m の観測結果からだとも 4%（発電量では 10% 程度）の過大評価で済みます。風況精査の観測高さを出来るだけハブ高さに近づけることの重要性がわかると思います。

風速鉛直分布を決める大きな要因-大気安定度

これまでの解説では風速の鉛直分布を決定する要因は、地表粗度、そのときの風の乱れの状況、そして地形の起伏の三つでした。

実はこれにもう一つ大きな要因があります。大気安定度と言われるものです。真夏のかんかん照りの状況を想定してください。入道雲がくもくと湧き上がるのは、地面が激しく熱せられてそれにより激しい上昇気流が発生するからです。地表近くと上空との間の気温差が大きく、活発な対流が生じています。そのうち雷とともに夕立がやってきます。このような時は上下で大きく空気が掻き混ぜられますから、上下の風速差は殆どありません。このような大気の状態を「不安定」と言います。

晩秋の頃の天気予報を注意深く聞いていると、「大陸からの寒気団の影響で大気の状態が不安定になっており～～」というような解説をしていることがあります。地上付近の気温がそれほど下がっていない時期、上空にシベリア大陸から寒気が流れ込んでくるような状況が発生すると、先ほどの真夏の状況と同じことで、上空と地上との大きな温度差により、対流が活発となり、激しい上昇気流により雷雲が発達し、雷や突風を伴った激しい雨が降ります。このよ

うなときも大気は「不安定」です。

これに比べて、真冬の晴天の夜間では放射冷却により地表面の温度どんどん下がっていきますから、上空から高度が低くなるほど大気の温度が低くなる状況（逆転層）が発生します。このような状況では空気塊に浮力は発生しませんから対流も不活発で、風速が極端に大きくない限り、上下の攪拌は少なく、従って上下の風速差は大きくなります。このような大気の状態を「安定」と言います。

北海やバルト海では、春先に安定状態の発生頻度が多くなります。これは、海水温度が未だ十分に温まりきっていないところに欧州大陸から暖かい空気が流れ込み、逆転層が発生するケースが増えるためです。

このように同じ場所であっても、季節によって、一日の時間帯によって、また気象の状態によって風速の鉛直分布（したがって N 値も）は大きく変化しています。参考書に記載されている N 値はあくまでも長期にわたって平均した値である、ということをお忘れ下さい。瞬時値、或いは 1 週間とか、1 ヶ月間といった短期間の観測結果から出した風速鉛直分布というものは必ずしもその地点を代表する分布とはならないことにも注意が必要です。

大気安定度によって風速の鉛直分布がどの程度変化するか整理した例があります。デンマークの西岸沖 Horns Rev 洋上風力発電所の風況観測塔で現地の風況を調べたものです。

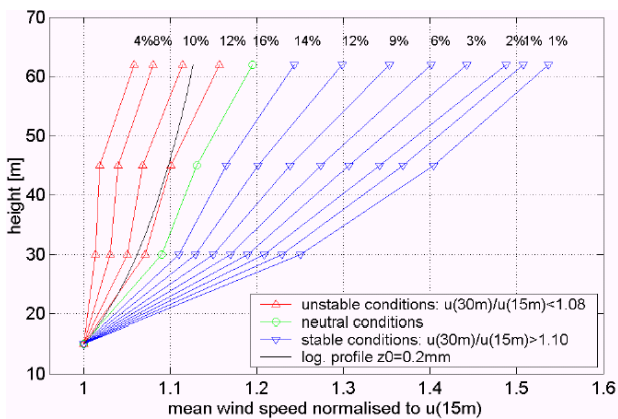


図2 Horns 実測風速鉛直分布

(出典 : Tambke J. et al : Offshore Meteorology for Multi-Mega-Watt Turbines, proc. ewec 2006, 27 February - 2 March, Athens, Greece ; Fig5)

冬季を挟んだ約半年間のデータを海上 30m と 15m の風速比でビンにわけビンごとの鉛直

分布とその発生割合 (%) を整理しています。横軸が海上 15m の風速に対する風速比、縦軸は海上高さです。大気安定度と風速比は一対一の対応関係がありますから、このグラフでは右に行くほど安定度が強くなっていると考えます。気象状況により鉛直分布が驚くほど幅広く変化していることが読み取れると思います。このグラフでは一番右側の線で N 値を逆算すると、3 程度になります。

先ほど中立時にべき乗則がどの程度対数則を近似できるかをグラフで示しました。非中立の状態では次の図の様になります。

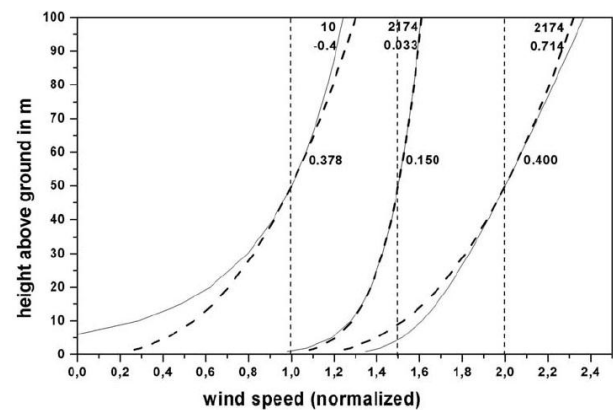


図3 べき乗則分布と対数則分布の比較

(出典 : S. Emeis, "How Well Does a Power Law Fit to a Diabatic Boundary-Layer Wind Profile?", DEWI Magazin Nr. 26, Feb 2005, p62 Fig4)

左から、大都会で大気不安定の場合、広大な農場で弱不安定および強安定の場合に相当します。真ん中の状態では近似は良好ですが、他の二つはそれほど良くありません。べき乗則近似に対する一般的な傾向を整理すると次のようになります。

- ① 中立時は地表粗度が小さければ、実際の分布を比較的良く近似できる。
- ② 安定時は、地表粗度によっては、非常に良く近似できる場合がある。
- ③ べき乗則近似が最悪なのは地表粗度が大きく大気不安定なとき。

このように平坦地形であっても大気安定度と地表粗度の組み合わせによってべき乗則が風速の鉛直分布を良く近似できないことがあることに注意が必要です。

大気安定度を決定する物理的要因

大気の流れ鉛直分布は上下間の運動量交換の大小によって決まるわけですが、この要因として熱的な要因と機械的な要因があります。熱的な要因とは、上に述べた、大気の上下の温度差で誘起される対流による攪乱効果、機械的な要因とは、上下の風速差によって粘性から生ずる攪乱効果です。大気の大気安定度はこの両効果の大小関係によって決まってくる。機械的な要因が卓越する場合、つまり強風の場合は「中立」となります。熱的な要因が卓越する場合は上下の温度勾配が負の場合、つまり、上空のほうが温度が低い場合「不安定」、正の場合は「安定」となります。

これらの大気安定度の発生割合はどの程度になっているのでしょうか。陸上の状況については良く調べていないので判らないのですが、年間平均風速が 7m/s~10m/s 以上という欧州の北海やバルト海では、「安定」「中立」「不安定」の発生比率がそれぞれ数十パーセント以上という洋上の観測結果が複数例報告されています（陸上と洋上では風況を決定する要因が異なってくるのでこの結果から陸上の割合を云々するわけにはいきませんが）。その中の一つ、先ほどの Horns Rev の観測値を整理したグラフを紹介します。

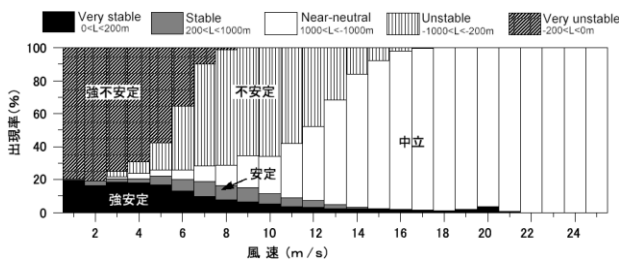


図 4 Horns Rev における安定度別出現割合

(出典：Barthrmie et al., Comparison of corrections to site wind speeds in the offshore environment_value for shortterm forecasting, EWEC2004, 22-25 Nov.を編集)

風速が 15m/s 程度以上になれば殆ど中立とみなして良い様ですが、それ以下になると、不安定、安定の発生割合が増えてくるのが判ります。北海、バルト海の洋上では他の場所でも似た様な傾向が見られます。（大気安定度の発生要因は気候によって大きく支配されます。我が国洋上においても同じような傾向になることは予想されますが、各安定度ケースの発生割合がどのようになるかは、現在のところ観測データが全く無いため、判っていません。）

先に中立状態を仮定した対数則の式を紹介しましたが、安定、不安定を含めた対数則は次のようになります。

$$[\text{風速}] \propto [\text{摩擦速度}] \times \log_e \left(\frac{[\text{地上高さ}]}{[\text{地表粗度}]} - \phi \right)$$

ϕ は大気安定度に対する補正項で、モニン・オブコフ長という、長さの単位を持つ安定度スケール L の関数として表されます。上の関係は数学的に表現すると次のようになります。

$$u(z) = \frac{u_{*0}}{\kappa} \left\{ \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) \right\}$$

地表粗度が一様でない場合

対数則は一様な地表粗度を仮定しているといいました。我が国の立地では、畑あり、林あり、民家ありと、いろいろな土地利用が混在しており、一様粗度というような条件は非常に稀です。対数則からわかるように地表粗度は風速の鉛直分布を決定する大きな要因ですが、実際に影響するのは上流側の地表粗度分布です。線形理論では、粗度の大きく異なる境界から新しい境界層 (IBL; 内部境界層) が成長し始める、そして、対象地点の風速鉛直分布は上流側の複数の粗度境界で発生する内部境界層の鉛直分布を累積したものであると考えます。内部境界層の厚さは、陸上では大雑把に言って成長起点からの距離の 100 分の一程度が目安となります。従って、地表面からハブ高さまでの風速の鉛直分布は、例えばハブ高さを 60m とすると、上流側 6km 程度離れた地点までの粗度変化の影響を受けることとなります。ただし、海岸線のように非常に大きな粗度変化についてはその倍程度の距離まで影響すると考えたほうが無難です。

風況精査の観測高さ

低高度の観測データから、ハブ高さの風速を推定する場合、どの程度の高さの観測値だと信頼できる推定値が得られるのでしょうか。現在最も手軽に使える風況シミュレータの WAsP では地形起伏の影響も考慮に入れていますし、大気安定度の影響も考慮しています（熱流速のバイアス、RMS をパラメータとして入力し、これを統計的に処理する）が、それでも、極端に低い値での観測値からハブ高さの風速を推定するのは危険です。風況精査の観測高さは出来ればハブ高さの 70% 以上とりたいものです。