P34-02 風力エネルギー賦存量推定のための基礎研究 (竜飛ウィンドパークにおける流れの精査)

Fundamental Study for Estimation of Wind Energy Resources (Wind measurement at Tappi Wind Park)

正 菊山 功嗣 (名大院) 正 長谷川 豊 (名大院)
正 今村 博 (横国大院) 正 猪俣 登 (東北電力)
○ 正 鈴木 一司 (名大院) 学 石川 尚 (名大院)

Koji Kikuyama Graduate school of Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603
Yutaka Hasegawa Graduate school of Nagoya University
Hiroshi Imamura Graduate School of Yokohama National University, Tokiwadai, Hodogaya, Yokohama 240
Noboru Inomata Tohoku Electric Power Co., Inc., Nakayama, Aoba-ku, Sendai, 981-0952
Hitoshi Suzuki Graduate School of Nagoya University
Hisashi Ishikawa Graduate School of Nagoya University

In order to introduce wind turbine generator system (WTGS), an assessment of the wind energy resources is inevitable. While the use of WTGS expands over the world, complex terrain has become important as the site proposed for a WTGS. In those region contribution of local effects on the wind energy resources is quite large and intensity of wind turbulence, which brings about complicated aerodynamics loads on the wind turbine, is much larger than that over the flat terrain.

This paper presents the measurement results of wind flow over mountainous terrain located in Tappi Wind Park, in order to evaluate the influence of the mountainous terrain on the atmospheric boundary layer flow.

Key Words: Boundary layer, Turbulence, Complex terrain, Wind Measurement, Wind energy resource

1. はじめに

風力発電設備(WTGS)を設置する場合、設置予定地点(以降サイト)における風力発電量を予測する必要がある、通常はサイトにおいて風況観測を数年行い、それをもとに風力発電量を予測する。欧米では WASP や AVENUE に代表されるような風況予測シミュレーションソフトが開発されており、実績を残している。欧米のように安定した風が吹く平坦な地が多く存在する地域では比較的容易に予測ができ、これらのソフトの予測精度も非常に良い。

WTGS の利用が世界的に広がりを見せている現在、丘陵・山岳地に代表される複雑地形が WTGS 設置サイトの候補地として注目されつつある。しかしながら複雑地形においてはわずかな位置の違いにより風況が大きく変化するため最適な風車設置位置を決定することが困難であり、サイトにおいて風況観測を行う方法では多くの時間と費用を浪費することとなる。そのためシミュレーションによってサイトを決定する手法が有効となるが、WASP を複雑地形に適用した例⁽¹⁾によると、起伏の大きい所で予測精度が悪くなるという報告がある。また複雑地形において風車に流入する風は乱れを多く含んでおり、出力係数などの風車特性値を変化させるとともに風車翼などの疲労破壊を引き起こす原因となる。

従って複雑地形において WTGS の導入を進めるにあたり、平均風速や乱れ強度に関して詳細な風況調査が必要であるが、限られた観測データより地域全体の風況を明らかにするためには、複雑地形に適応した高精度の風況予測システムが必要となる。

本研究では、大気境界層に影響をおよぼすパラメータとして地形起伏に着目し、さまざまな地形における風の流れについて調査・検証する。丘陵を越える流れに関する実験方法としては丘陵モデルを用いた風洞実験が一般的であるが、スケールや境界条件の違いにより、これらの結果をそのまま実在の地形に適用するには問題がある。従って本報では実在する複雑地形において風況観測を行い、特に平均風速および乱れについて調査・検証を行った。

Fig.1 Location of Tappi Wind Park

2. 観測地

観測地点の位置を図1に示す。観測は青森県津軽半島の先端にある竜飛ウィンドパーク(青森県東津軽郡三厩村)内にて2001年8月22日より同年11月6日まで実施した。竜飛ウィンドパークは日本有数の集合型風力発電施設であり、1992年に青函トンネル工事跡地に東北電力により三菱重工製の275kW風車5台が最初に建設された。1995年には300kW機が5台追加され、その後さらに500kW機が1台設置されており、現在11台の風車が稼動中である。竜飛岬は年間平均風速が約10m/sと風力エネルギーに恵まれており、卓越風向も夏季に東、冬季に西と安定している。また竜飛ウィンドパークにおいては過去に今村ら⁽²⁾により風況観測が行われており、東風に比べて西風の乱れが大きくなるという報告がされている。

観測に用いたマスト周辺の地形図を図2に示す。観測マストはウィンドパーク内の南に位置しており、マストを中心として半径約50mの範囲に3基、半径約150mの範囲にさらに2基の風車が稼動している。最も近接している風車はマストの東南東に位置しており、風車とマスト間の距離は約46m(風車ロータ直径の約1.2倍)である。またマス

Fig. 2 Topography map of test site

ト近傍の地形は西側では斜度が約 50%の大きな勾配を持つ斜面となり、その他の方角は斜度が 10%前後のなだらかな斜面となっている。

3. 観測方法

3.1 観測装置 図 3 に観測装置の概略図を示す。観測マストは高さ約 38m で、底部の直径が約 812mm、頂上部直径が約 260mm であるテーパ形状を有している。今村らは同一のマストにて、高さ約 38m において風速の水平成分について観測を行った⁽²⁾。本研究では流れの高さ方向の分布および風速の鉛直成分について調べるために、高さ約 38m の頂部、約 24m の中間部および約 14m の下部の 3 点にそれぞれ風速の 3 成分 (u, v, w) が計測できる観測機器を設置した。これらの各地点を上段、中段および下段と呼ぶことにする。上段には風速の 3 成分 (u, v, w) を計測する 3 成分超音波風向風速計を設置し、中段および下段には風速の鉛直成分 w を計測するために 2 成分超音波風向風速計を横向きに取り付け、さらに風速の水平成分 (u, v) を計測するために三杯型風速計およびベーン型風向計を取り付けた。三杯型風速計は起動風速が約 1.0m/s であるのに対し、超音波風向風速計は 0m/s からの計測が可能である。

マスト近傍の流れはマストの存在により影響を受けるため、観測機器を設置する場合マストから離して設置しなければならない。本研究では IEC (国際電気標準会議) の指針⁽³⁾に従い、各位置でのマスト直径の約 7 倍の長さを持つブームを横に取り付け、ブーム先端に各観測機器を設置した。中段および下段はブームの長さを約 2.5m および約 3.7m としたが、上段に関してはマスト頂上部に取り付けてある避雷針の保護範囲内に機器が入るように約 1.2m とした。またこの地域では卓越風向が東と西であることから各地点のブームをマストの南側に設置することにより東風および西風についてマストおよびブームによる流れへの影響を低減させるようにした。電源は近接する風車から電源ケーブルを引き、ケーブル途中にアレスタおよびブレーカを設置することにより、落雷事故による観測装置および風車双方の被害が低減するよう対策を施した。

3.2 データ収集システム 観測データのサンプリング方法は、高さ方向 3 点 (上段、中段および下段) に設置された各観測機器からの風速および風向の 11 個の信号を同時計測した。三杯型風速計およびベーン型風向計からの信号は 2Hz で発信されるが、超音波風向風速計からの信号は 20Hz で発信されるため、前半期間 (2001 年 8 月 22 日～10

Fig. 3 Schematic diagram of measurement system

月 18 日) はサンプリング周波数を 20Hz としたが、後半期間 (2001 年 10 月 18 日～11 月 6 日) はより詳細なデータを得るために 40Hz とした。サンプリング時間は最短で 7 時間、最長で一週間であり、総観測時間は 1517.7 時間となった。

本報では得られたデータは基本的に 10 分間の平均処理を施し、適宜 Bin の方法を用いて整理した。また、風向については European Wind Atlas と同様に北を 0° として 12 方位に分けて整理した。

4. 結果および考察

4.1 風速別データ 図 4 に上段、中段および下段における風速別発生頻度分布図を示す。これ以降上段、中段および下段を図中では Top, Middle および Bottom と表記する。図中の曲線は風速の出現率分布を近似する曲線として広く用いられているワイブル分布曲線であり、式(1)により表される。形状係数および尺度係数は最小二乗法を用いて求めた。各地点ともに 5～7m/s の風速が最も多く発生している。また形状係数 k は日本の場合 0.5～2.2 程度であり、 k が大きいほど強風型であることが報告⁽⁴⁾されていることから、本観測においてもこの地域が風力エネルギーに恵まれていることが確認できる。

$$F(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

c : scale factor k : shape factor

4.2 風向別データ 図 5 に風向別の、(a)風速発生頻度、(b)平均風速および(c)rms 値を上段、中段および下段について重ねて示す。図 5(a)より風向は西から北西にかけてと、南東から東にかけての方向が突出しており、本風況観測においても東および西が卓越風向であることが確認できる。また図 5(b)より上段・中段・下段すべてにおいて卓越風向での平均速度が約 7～8m/s と他の方位に比べて大きくなって

Fig.4 Frequency of the wind occurrence

(a) Frequency of the wind occurrence

(b) Average wind speed

(c) rms value

Fig.5 Sectorwise distribution of average wind data

おり卓越風向と平均風速が大きくなる風向が一致している。rms 値の分布についても平均風速が大きくなる西から北西にかけての範囲と南東から東にかけての範囲で大きくなっている。西から北西にかけての範囲で rms 値が大きくなる要因としては上流側斜面の影響が考えられるが、南東から東にかけての範囲では上流側斜面は西側に比べてなだらかであることから、マストの東南東および南に位置する風車の後流による影響が考えられる。

4.3 時系列データ 図 6 に風向が東(75°~105°)で安定していた 12 時間について風速の水平成分および鉛直成分の時間変化の様子を示す。ただし東風の場合マスト近くの風車後流の影響を受けると考えられるため、風車が(a)稼動中および(b)停止中について分けて示す。東風の場合、水平成分は風車停止中には上段、中段および下段ともに同程度の大きさであり変動の様子も同様の形状であるが、風車が稼動中である場合は上段の風速が中段および下段よりも小さくなっている。ウィンドシアを考えた場合、風速は高さ方向に増加するため、このような現象は風車後流を捉えているものと考えられる。鉛直成分については稼動中および停止中ともに上段および中段でわずかな変動が見られるが、下段はいずれの場合もほぼ一定の値をとっている。また水平成分および鉛直成分ともに停止中よりも稼動中のほうが高さ方向の速度差が大きい。

図 7 に風向が西(255°~285°)で安定していた一日について風速の水平成分および鉛直成分の時間変化を示す。西風の場合、風速の水平成分は上段、中段および下段ともに同程度の大きさであり変動の様子も同形状であるが、鉛直成分は大きさおよび変動の様子が高さ方向に異なる。特に水平成分が小さい場合、上段では鉛直上向き、中段と下段では下向きであるという流れが存在しており、逆に水平成分が大きい場合は、下段から上段にかけて鉛直上向きの風速が減少することが確認できる。観測マストの位置が西側斜面の頂上付近に位置していることから、風速が小さい場合流れは斜面に沿って流れていると考えられ、逆に風速が大きい場合はマスト近傍で剥離している可能性が考えられる。

(a) In operation

(b) out of operation

Fig.6 Time-series of wind speed in case of east wind

Fig.7 Time-series of wind speed in case of west wind

4.4 乱れ度 上段、中段および下段における風速の水平成分および鉛直成分の乱れ度 TI ($=100 \times \sigma/U$; σ : 標準偏差) の分布を東風と西風の場合に分けて図 8(a), 図 8(b)にそれぞれ示す。ただし東風については近接する風車の稼働時と停止時の乱れについて区別して表示する。図中の実線は IEC により定義されている乱れ強度モデル⁽⁵⁾で式(2)により表される。

$$TI = TI_{15}(15/U_{hub} + a)/(1+a) \quad (2)$$

$$TI_{15}: TI \text{ at } U_{hub} = 15\text{m/s}$$

Class A: $a=2$, $TI_{15}=18(\%)$, Class B: $a=3$, $TI_{15}=16(\%)$

水平成分および鉛直成分ともに西風の乱れは、風車が停止している場合の東風の乱れと比較して、高さ方向全体には渡り大きくなっており、上流側斜面が急勾配である場合乱れが増加することが分かる。また中段および下段における風車後流の乱れは停止中と同程度であるが、風車ハブ高さに相当する上段では停止中に比べて乱れは大きくなっており、特に水平成分は西風と同程度にまで増加している。

5. おわりに

竜飛ウィンドパークにおいて風況観測を行った結果、上流側斜面が急勾配である流れや風車の後流において、水平成分および鉛直成分ともに乱れが大きくなることが分かった。従ってサイト選定時には風速の3成分について詳細な観測を行う必要がある。

6. 参考文献

- (1) 土屋・松坂, ウィンドパークにおける風車取得エネルギー量予測手法の実用性評価, 機論, 61-590, (1995-10), 3735-3740.
- (2) 今村ら他3名, 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, 機論, 64-626, (1998), 3323-3329.
- (3) IEC/TC88/WG6, Wind Turbine Generator Systems Part12-Power Performance Measurement Techniques, 1995
- (4) 本間琢也, 風力エネルギー読本, オーム社, 1979.8.
- (5) IEC 61400-1, Wind turbine generator systems-Part1:Safety requirements, second edition, 1999-02.

(a) Distribution of TI for horizontal component

(b) Distribution of TI for vertical component

Fig.9 Distribution of Turbulent Intensity