

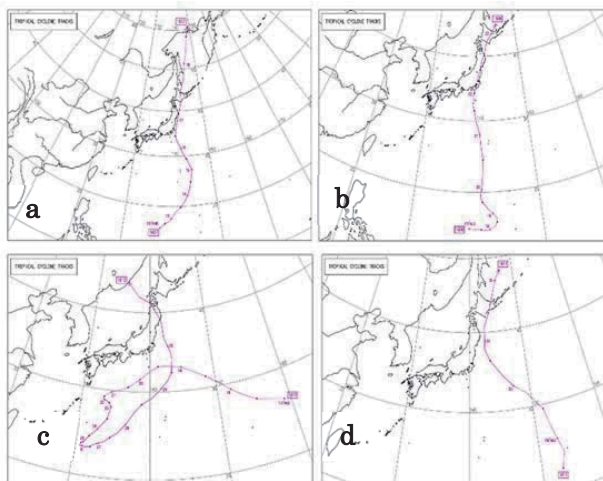
大気下層の強風特性*

福島大学 渡邊 明

1. はじめに

再生可能エネルギーの振興に伴い、風力発電システムの設置に関わる風況特性が重要な課題になっている。特に、プロペラ型風車は、稼働率に関する平均風速だけではなく、ヨー制御やピッチ制御に伴う、風向変動量や風速変動量が風力発電システムの設置場所の選定や、安全確保の観点から重要になっている。数秒以内の風速変動はピッチ制御が間に合わず、抵抗が拡大し、タワーの振動を通して劣化や倒壊に関与する。また、短時間の風向変動はヨー制御が間に合わず、発電効率の低減だけではなく、タワー等の負荷になる。こうした観点から、複雑地形域での風向・風速特性を理解することは重要な課題になっている。渡邊、佐藤(2014)は台風時の突風特性を2秒毎の風速観測から解析し、おおよそ突風率はこれまで指摘されてきた1.5から2.0付近に収束することを示した。また、Watanabe and Takahashi (2014)は、1秒ごとの1年間の風速変動を地上4.22m, 7.12m, 10.02mの3高度で観測し、1秒間の風速変動の標準偏差が下層2高度で0.5m/s, 10.02mで0.2m/sと小さくなること、及び風向変動では、逆に下層から6.5°, 9.5°, 11.5°と大きくなることを示した。風速計の設置場所にも依存すると考えられるが1秒以内で10度以上の風向変動があることは、発電効率を低下させることになる。こうした観点から、特に強風が発生する台風通過時の強風特性について解析を行った。

2. 台風通過時の上層風の特徴

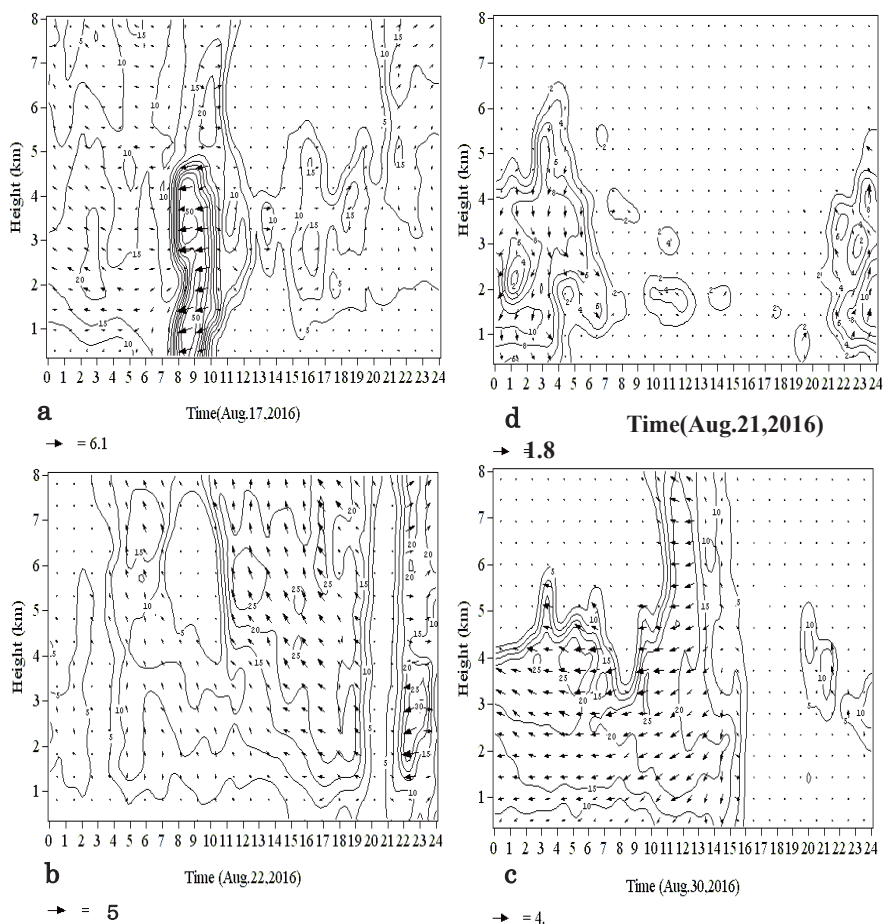


第1図 2016年8月の台風経路 a:201607号, b:201609号, c:201610号, d:201611号

2016年8月は4つの台風が本州に上陸または接近し、暴風雨災害をもたらした。特に、台風10号のように、北緯30°付近で台風になり、発達をして東北地方に上陸するなど、これまで観測されなかった経路や発達状況を示した。第1図は2016年の8月に本州に接近または上陸した台風7号, 9号, 10号, 11号の経路を示したものである。台風201607号が最も観測地点に接近したのは17日8時ごろで、中心気圧が980hPa、また、台風201609号は8月22日20

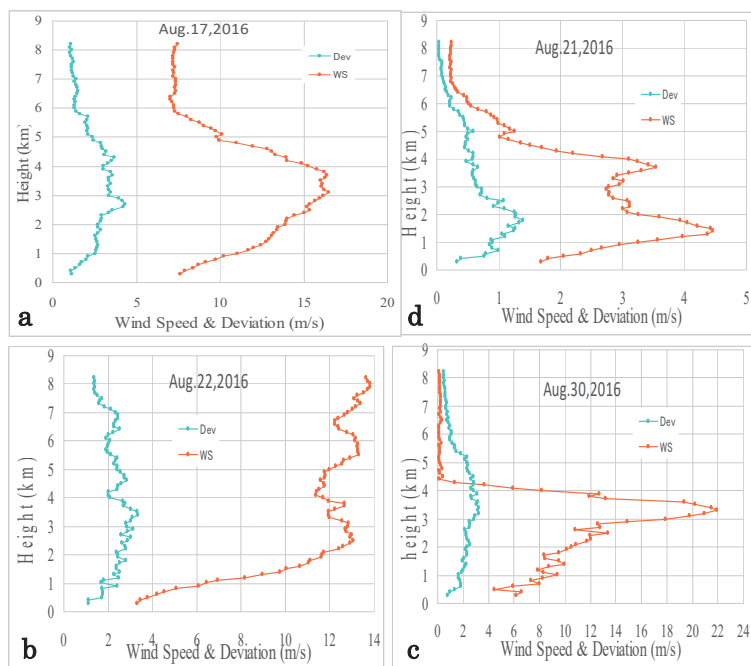
* Characteristics of strong wind in the lower atmosphere
by Akira Watanabe

時ごろで、中心気圧は 990hPa、台風 201610 号は 8 月 30 日 11 時ごろで、中心気圧は 965hPa、そして台風 201611 号は 8 月 21 日 3 時ごろで、中心気圧が 996hPa と推定される。各台風の中心は基本的に観測地点の東側を北上しており、観測地点付近を通過した時、最も中心気圧が低かったのは台風 201610 号で、次いで 201607 号、201609 号、201611 号の順になっている。第 2 図は、福島大学に設置した L-band Doppler radar で観測した高度 0.3km から 8km までの風の高度—時間断面を示したものである。4 事例の台風で最も強風が出現したのは、台風 201607 号で、地上付近から高度 3km 付近まで 50m/s の風速が出現している。また、台風 201609 号でも地上 1.5km 付近から 3km までの間に 30m/s の風速が出現している。他の 2 事例では 10m/s から 20m/s の強風域が出現している。これらの強風域は、いずれの事例でも上空ではなく、高度 4km 以下の下層域に出現している共通点を有している。また、風向・風速の時間変動特性を理解する観点から、これらの観測値から 10

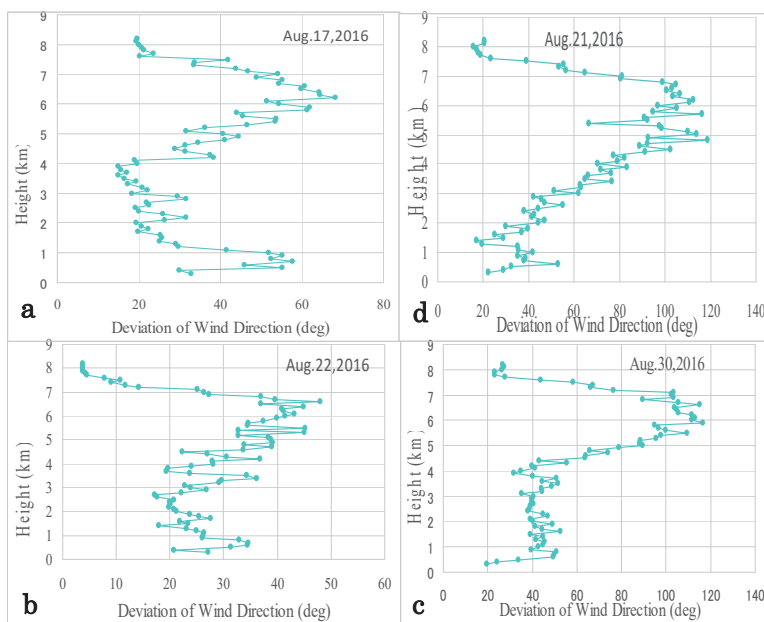


第 2 図台風通過時の L-band Doppler radar による上層の風向・風速分布

コンターは風速(m/s)を示す。a:201607号, b:201609号, c:201610号, d: 201611号



第3図 台風通過時のL-band Doppler radarによる上層の平均風速(ws)と偏差(Dev)の鉛直分布 a:201607号, b:201609号, c:201610号, d:201611号



第4図 台風通過時のL-band Doppler radarによる上層の平均風向偏差の鉛直分布 a:201607号, b:201609号, c:201610号, d:201611号

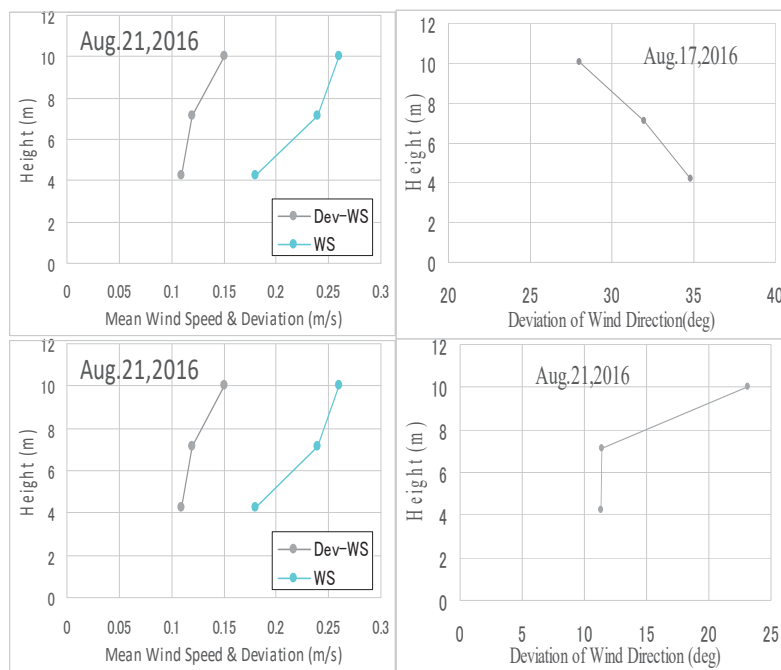
分間毎の平均風向・風速の時間偏差の平均値の鉛直分布を求めた。第3図は10分間毎の平均風速の鉛直分布と風速偏差の分布を示したものである。台風201607号では高度3km付近に最大値が出現しており、10分間平均風速の偏差の最大値はその直下に出現している。この層では10分間毎に平均4.3m/s程度の風速変動が出現していたものと考えられる。また、台風201609号では最大風速出現高度の直上で3.5m/sの平均風速偏差が出現しており、さらに、台風201610号も高度3.2km付

近に最大風速が出現し、その直下で 3.5m/s 程度の最大風速偏差が、台風 201611 号では、高度 1.3km の下層で最大風速が出現し、その直上で 1.3m/s 程度の最大風速偏差が出現している。すなわち、平均風速の強弱に関係せず、風速偏差の最大値は最大風速出現付近で出現していることが分かる。最大風速が出現している上下層では鉛直 shear が大きくなることは当然のことであるが、その近傍で時間的変動も大きいことは、鉛直 shear が大きいことで乱流が形成され、時間偏差も大きくなることを示している。

第 4 図は各事例の 10 分間ごとの風向偏差の鉛直分布を示したものである。10 分毎の風向の平均偏差は、相対的に強風域で小さく、弱風域で大きくなっている。その極大値は台風 201607 号で高度 1 km 以下と 6km 付近に出現し、凡そ 60° と大きな値になっている。また、台風 201609 号でも同じ構造を示し、高度 1km 以下と 7km 付近で最大を示し、その値は 40° 程度となっている。さらに、台風 201610 号では、下層の極大値は出現していないが、高度 6km 付近で 120° という大きな平均偏差を示している。台風 201611 号では下層 500m 付近に平均偏差 55° 程度の領域が出現しているが、前述と同様に最大値は 5km 付近で 120° と大きくなっている。これらの例では比較的低風速の上空で風向変化が大きいことを示し、地上付近の摩擦層や接地層では比較的风向偏差が小さいことを示している。

3. 台風通過時の接地層内での風の特徴

一般に接地層内での風速分布は指数法則に従い、風向は上層の風向と一致することが知られている（竹内，近藤：1981，近藤：1999）。従って接地層では鉛直方向に指数関数的な



第 5 図 平均風速 (ws) と風速偏差 (Dev-WS) , 風向偏差の鉛直分布

上段が 201607 号, 下段が 201611 号

風速変動はあっても、風向変動は理論的に小さいと考えられる。ここでは垂直軸風車に設置した、高度 4.22m, 7.12 m, 10.02m の 3 段の 1 秒毎の風向・風速偏差を求め、台風通過時の接地境界層の風向・風速変動特性を解析した。

図 5 は 3 高度に接地した

台風 201607 号通過時と台風 201611 号通過時の平均風速、平均風速偏差および平均風向偏差を示したものである。台風 201607 号では平均風速が下層の 4.22m で 1.7m/s、中層で 1.9m/s、上層で 2.0m/s と上層ほど風速が大きくなっている。風向・風速計の設置場所にも依存するが、風速は基本的に指数分布をしていると考えられる。この分布に対数法則

$$U = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)$$

を適応すると、摩擦速度 u_* は 0.14m/s から 0.15m/s、疎度定数 Z_0 は 0.033m から 0.045m となり、誤差はあるものの凡そ対数分布をしていることが分かる。なお、 k は Kármán 定数で 0.40 である。また、台風 201611 号ではやや観測点から遠いところを台風が通過したこともあり、平均風速が下層で 0.18m/s、中層で 0.24m/s、上層で 0.26m/s と非常に弱い風速になっている。この場合の摩擦速度 u_* は 0.04m/s から 0.05m/s、疎度定数 Z_0 は 0.60m から 0.88m となり、同じ場所での測定結果としては大きな差が生じている。原理的には摩擦速度は安定度に依存するが、疎度定数は測定場所で一定のはずであるが、観測場所には観測小屋や観測鉄塔があるため、風向によって疎度定数が異なっているものと考えられる。台風 201607 号では北西方向が主体であるが、台風 201611 号では南東から北西まで変化をしており、南東方向にある森林などによる影響と考えられる。

また、同図に示した風速偏差では、台風 201607 号で 0.4m/s 前後、台風 201611 号で 0.1m/s から 0.15m/s と小さいことが分かった。

さらに、風向変化を 1 秒間の平均偏差で見ると、台風 201607 号で 35° から 28°、台風 201611 号で 11° から 23° となっている。台風 201607 号では上空ほど平均風速偏差は小さく、台風 201611 号では特に上空で大きくなっている。風向偏差は風力発電システムにとってヨー制御に関連して発電量に直結し、層流で評価しているパワー係数などの値と異なってくる。従って、風力発電システムの設置場所の選定には風速による評価に併せて、ピッチ制御やヨー制御の時定数を考慮して、風速偏差や風向偏差の評価をすることが重要である。ここで示した風力発電システムは垂直軸風車のため、これらの変動特性を考慮する必要が無いが、プロペラ型風力発電システムでは最大の 35° の偏差で約 20% 効率が減少することになる。

4. まとめ

特に強風をもたらす台風時に L-band Doppler radar を用いて、10 分間ごとの高度 300m から 8km までの風向・風速を観測し、その変動を観測時間ごとの偏差を解析することによって特徴を調べた。その結果、時間的な風速偏差は、風速の極値が出現している上下層で極大を示していること、また、風向偏差は上層弱風域で出現していることが明らかになった。

さらに、気象観測露場に設置した垂直軸風力発電システムの 3 高度の超音波風向・風速計から 1 秒ごとの風向偏差、風速偏差を求め、風向・風速偏差の特徴を解析した。その結果、接地境界層内の風速分布は凡そ対数法則に従うものの、風向変化が大きく、1 秒間に 20° から 30° あることが分かった。Watanabe and Takahasgi(2014)は同様な解析を 1 年

間のデータをもとに実施しているが、風速偏差が 0.5m/s 以下、風向偏差が約 10° 以下となっていて、今回対象とした台風通過時に比べて風速変動は類似しているが、風向変化は台風通過時の方が大きく約 3 倍になっていることが分かった。近年台風などでプロペラ型風力発電システムが倒壊することが報告されているが、台風時の強風と合わせて、風向偏差が予想以上に大きく、抗力としてタワーの負荷になっている可能性を示した。

引用文献

- 近藤純正, 1999 : 大気境界層の気象, 天気, Vol.46, No.9 585-594.
- 竹内清秀, 近藤純正, 1981 : エクマン層の構造, 地表に近い大気, 東京大学出版会, 42-70.
- 渡邊 明, 佐藤彩花, 2014 : 台風時の突風特性について, 東北地域災害科学研究, Vol.50, 1-6.
- Watanabe.A and Takahashi, M., 2014: Development of Small Size Wind Power Generation System and Characteristics of Wind Situation at the Living Environment in Fukushima, Grand Renewable Energy 2014, CD, OP-Pv-2.