

## 風速変動を考慮した九州地区の潜在的風力エネルギーの評価

野方, 香里  
九州大学大学院人間環境学府都市共生デザイン専攻 : 修士課程

友清, 衣利子  
九州大学大学院人間環境学府都市・建築部門

前田, 潤滋  
九州大学大学院人間環境学府都市・建築部門

<https://doi.org/10.15017/1456082>

---

出版情報 : 都市・建築学研究. 24, pp.43-48, 2013-07-15. 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門  
バージョン :  
権利関係 :

# 風速変動を考慮した九州地区の潜在的風力エネルギーの評価

## Evaluation of Potential Wind Power Energy in Consideration of Wind Speed Fluctuations

野方香里\*, 友清衣利子\*\*, 前田潤滋\*\*

Kaori NOGATA, Eriko TOMOKIYO and Junji MAEDA

This study focused on the effects of wind fluctuation on output performance of wind power facility. In general a windmill provides original output performance under a wind of less intensities of turbulence. According to our statistical analysis of NeWMeK data in 2007 at two representative observation points in Kyushu area, the occurrence frequency of wind of 0.2 or less intensities of turbulence at both observation points increased with mean wind speed. The wind power energy densities and annual productions of electrical energy from 500kW class windmills were estimated using those results. It was found that potential wind energy estimated using only wind records with small intensities of turbulence was smaller than those estimated using annual mean wind speed record.

**Keywords:** Wind power energy, Annual mean wind speed, Intensity of turbulence, NeWMeK  
風力発電, 年平均風速, 乱れの強さ, NeWMeK

### 1. 序

風力エネルギーの利用が注目されているが、日本は台風や山岳地形の影響で平地の多いヨーロッパとは異なる乱れの強い風が吹くため、現在導入されているヨーロッパ仕様の風力発電機器では、風車の安定駆動が容易でなく、ブレード破損などの事故が誘発されることがある<sup>1)</sup>。風力発電開発の適地策定に最も重要な項目は定常的な高風速発現地域の選定<sup>2,3)</sup>であるが、風速や風向変動の大きさによって、設計された風車の発電性能よりも実際の発電量が低下することが指摘されている<sup>4,7)</sup>。風洞実験や風況シミュレーションに基づく平均風速から推定した風力エネルギー量よりも実測エネルギーは20~30%程度小さく<sup>6)</sup>、設置する発電機器によっては乱れの強さが0.2を超えると発電電力が約50%低下する<sup>7)</sup>との報告もあり、風力発電開発適地策定には平均的な風向風速情報だけでなく、変動情報を含む風観測情報の整備が必要である。

既報<sup>8)</sup>では、2006年8月から蓄積しているNeWMeK<sup>9)</sup>(九州電力(株)広域高密度風観測システム)の1秒平均風向風速記録から1年分(2007年)を選び、九州地区でのより詳細な風の乱れ特性を分析し、風力発電開発に有用となる風の乱れ特性を考慮した風情報を整理するとともに、NEDOの提供する局所風況マップ<sup>10)</sup>との比較を行

った。その結果、九州地区では10分間での乱れの強さが年平均で0.3~0.5の地域が多く、NEDOが提供していた局所風況マップの平均風速値はNeWMeK観測点での観測記録より高いことが分かった。

本論では、既報<sup>8)</sup>での分析で特徴的であった特定の観測点での風況に着目し、特に風力発電量推定に重要となる平均風速別の発生頻度の特性を考察する。また、小型風力発電装置の設置を想定した潜在的風力エネルギーの推算を行い、風の乱れの大きさと潜在的風力エネルギーの減少率との関係を検証する。

### 2. 観測点及び観測記録の概要

本論では、前報<sup>8)</sup>と同様に台風などによる顕著な強風の発生が少ない年として2007年のNeWMeKの1秒平均風向風速記録を利用した。1秒平均風向風速記録から観測点ごとに算出した10分間の平均風速、最大瞬間風速、乱れの強さ、最頻風向を基本的な風情報とする。風速はべき指数則を用いて、基準高度30mに高さ補正を行った。べき指数は平均風速で $1/7$ <sup>11)</sup>とする。また平均風速に比べ風速の標準偏差の鉛直方向分布はあまり変化しない<sup>12)</sup>ので、高度補正を行わない10分間での1秒平均風速の標準偏差を高度補正済みの10分間平均風速で除した値を乱れの強さとした。

図1に既報で報告した九州全域での年平均風速を示すが、NeWMeK観測点での年平均風速は平均すると約

\* 都市共生デザイン専攻修士課程

\*\* 都市・建築学部門

3.4m/sとなった。図1では119観測点での風況特性をまとめたが、そのうち年平均風速値が高く乱れの強さの小さい観測点No.43と、後述するように九州での平均的な風況である観測点No.11に着目して分析を行う。表1に観測点No.43とNo.11での年平均風速と乱れの強さおよび風軸上の風向出現頻度と主風向を示す。ここで、風軸とは16方位の風向を対象にして、主風向とその隣にある2風向とこれらの風向と対称となる風向の合計6方向であり、欠測値などを除いた有効な全風向記録に対する風軸上の風向記録の割合を出現頻度とする。年平均風速および乱れの強さの年平均値は、有効記録値の和を記録数で除した値である。No.43の年平均風速値は5.4m/sで、乱れの強さは0.22である。NEDOの風況精査マニュアル<sup>2)</sup>によれば、平均風速は地上高10mで年平均風速5m/s以上、乱れ強度は地上高20mで0.3以下、風軸上の風向出現率60%以上が風力発電開発有望性の目安とされる。本論で用いた基準高度30mに換算すると、風力発電開発有望性の目安とされる年平均風速は5.3m/s以上、乱れの強さは0.28以下となるが、観測点No.43はその条件を概ね満たしている。一方、No.11観測点は、年平均風速値が3.7m/s、乱れの強さは0.32であ

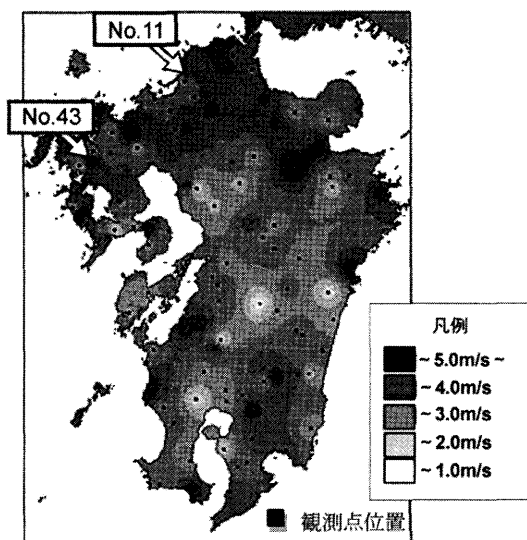
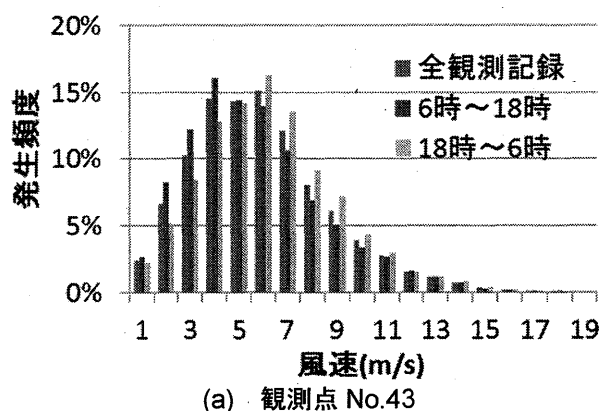


図1 九州全域での年平均風速(2007年)<sup>6)</sup>



(a) 観測点 No.43

る。風速は九州全体での平均値よりやや大きく、乱れの強さはやや小さいが、九州地区でのほぼ平均的な風況である。以降では、2観測点に着目して平均風速別の発生頻度の特性をまとめる。

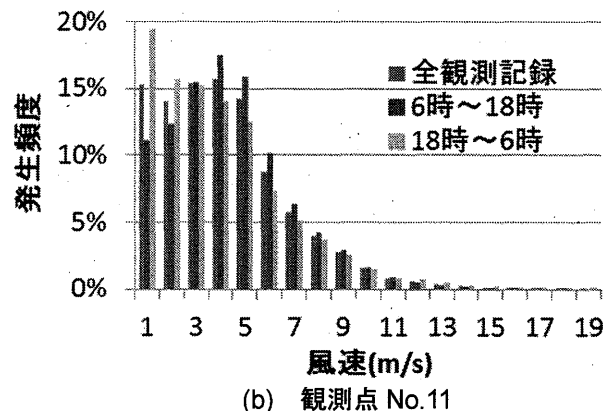
### 3. 観測点での平均風速別の発生頻度の特性

#### 3.1. 風向と乱れの強さを考慮しない場合

図2に全風向記録による風速別発生頻度分布を示す。風速の日変動特性を見るため、昼間(6時から18時)及び夜間(18時から6時)の風速発生頻度をあわせて示す。図3には季節変動を確認するため、夏季(5月から10月)と冬季(11月から4月)の風速別発生頻度を、全記録の発生頻度とあわせて示す。(a)は観測点No.43、(b)は観測点No.11での記録である。図2(a)と(b)および表1から、全記録に着目すると年平均風速の高い観測点No.43の方が高い風速値の割合が高い。No.43の最大風速は16m/sで観測点No.11での15m/sとほぼ同じであるが、平均風速3m/s以下の記録の発生頻度が小さい。一方、No.11は1m/sに満たない風速が約15%を占め、低風速の割合が高いために平均風速が小さくなった。図2より、観測点No.43では夜間の平均風速値が高く、観測点No.11では昼間の平均風速値が高い。海岸地域では海風の影響によって日中の平均風速が大きくなる場合がある<sup>2)</sup>が、観測点No.11は海岸から約5kmと近いいため、日中の平均風速値が高くなると考えられる。No.43は海岸から15km以上離れているため、海陸風による日変化の影響をあまり受けていない。図3より観測点No.43およびNo.11ともに夏季よ

表1 NeWMeK 観測点別の年平均風速及び乱れの強さの年平均、風軸上の風向出現頻度、主風向

	NeWMeK	
	No.43	No.11
年平均風速(m/s)	5.4	3.7
乱れの強さの年平均	0.22	0.32
風軸上の風向出現頻度(%)	61.3	44.5
主風向	WNW	S



(b) 観測点 No.11

図2 昼間(6~18時)及び夜間(18~6時)の観測点別の風速の発生頻度

りも冬季の平均風速値が高い傾向がある。検討対象とした大きな台風が接近していない2007年のような年は、冬季の季節風の方が高風速になりやすいためと考えられる。

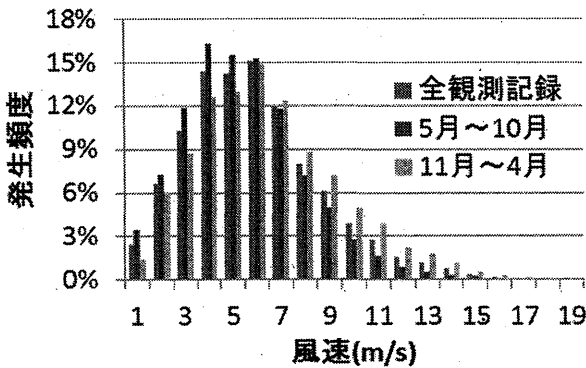
### 3.2. 最頻風向の記録に着目した場合

図4に風軸上にある6風向と主風向およびその対称風向に限定した2風向に着目した場合の平均風速の発生数を観測点別に示す。比較のために全風向の発生記録数もあわせて示した。既報<sup>8)</sup>で示したように風軸上の平均風速は高くなる傾向があることから、図4に示すように観測点No.43及びNo.11ともに、風軸上の風向に着目すると高風速記録の発生頻度が大きい。特に観測点No.11では、風軸上の記録に着目すると低風速記録の発生数が大きく減り、高風速記録の占める割合が高くなる。

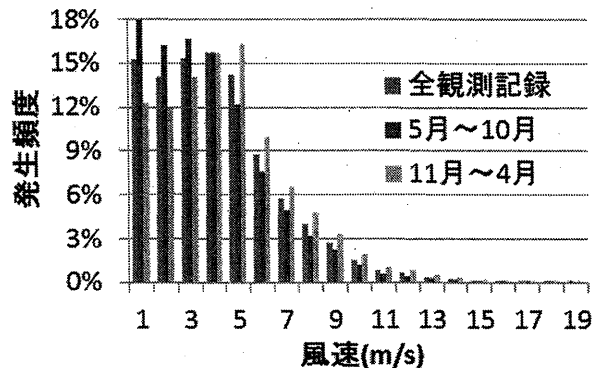
### 3.3. 乱れの強さが小さい場合

前報<sup>8)</sup>に示しているように九州地区の観測点での乱れ

の強さは0.3より大きい場合が多いが、風車性能を十分に発揮するためには乱れの強さが0.2以下であることが望ましい<sup>6,7)</sup>と考えられる。乱れの強さの小さい風の発生状況を把握するため、図5には乱れの強さが0.3以下と0.2以下の場合の平均風速の発生記録数を観測点別に示す。図5より観測点No.43およびNo.11ともに高風速では乱れの強さの小さい記録が占める割合が高く、観測点No.11では特に、低風速域で乱れの強さが小さい記録の占める割合が低下している。乱れの強さは風速の標準偏差を平均風速で除した値であるため、平均風速が小さいと乱れの強さは大きくなりやすく、低風速では乱れの強さが小さい記録が少なくなる一般的傾向を示している。図5(a)と(b)より、乱れの強さが0.2以下と0.3以下の場合を比較すると、発生記録数の違いはあるが発生頻度分布形状には目立った違いは表れなかった。風軸上の記録に

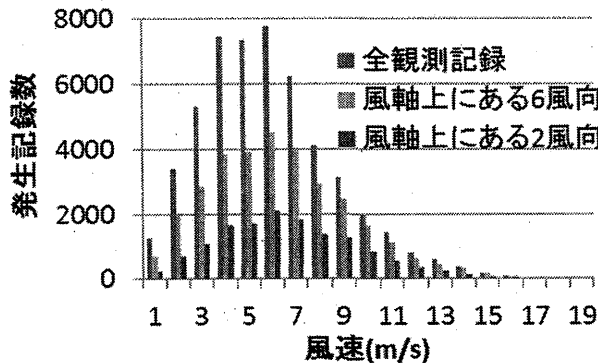


(a) 観測点 No.43

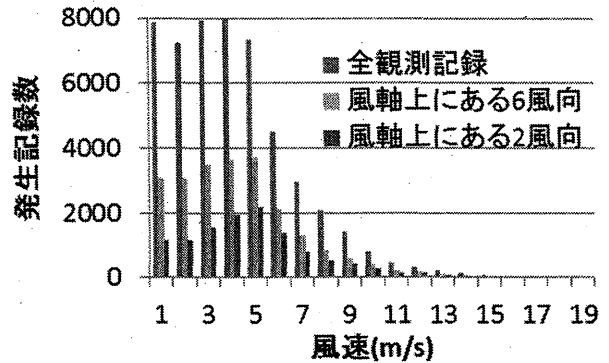


(b) 観測点 No.11

図3 夏季(5～10月)と冬季(11～4月)の観測点別の平均風速の発生頻度

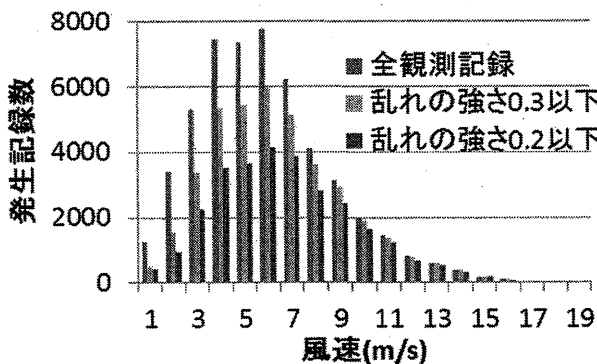


(a) 観測点 No.43

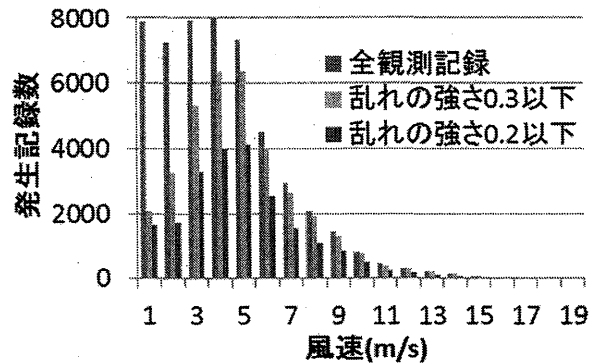


(b) 観測点 No.11

図4 最頻風向の記録に着目した観測点別の平均風速の発生頻度



(a) 観測点 No.43



(b) 観測点 No.11

図5 乱れの強さが小さい場合の観測点別の平均風速の発生頻度

着目した場合と乱れの強さが小さい場合とでは同様の平均風速分布を示すが、風軸上の平均風速値が高く、平均風速値が高いと乱れの強さが小さくなる傾向があるためである。

#### 4. 観測点位置での潜在的風力エネルギー特性の比較

##### 4.1. 風力エネルギー密度での比較

風況だけでなく、風力エネルギー取得量を考慮した評価を行うために風力エネルギー密度について検討を行う。年間風力エネルギー密度 $P_0$ は風力エネルギーの潜在的な量を評価するもので、以下の式で算出される<sup>3,13)</sup>。

$$P_0 = \frac{1}{2} \sum \rho * V^3 / n \quad (1)$$

ここで、 $\rho$ は空気密度( $\text{kg/m}^3$ )で、ここでは $15^\circ\text{C}$ 、1気圧での $\rho=1.226(\text{kg/m}^3)$ を用いた。また $V$ は10分間平均風速( $\text{m/s}$ )を用い、 $n$ は対象期間の基準時間(10分間)数(標準で52560個)とする。NEDO技術開発の風力発電導入ガイドブック<sup>3)</sup>によれば、エネルギー密度は地上高30mで $240\text{W/m}^2$ 以上であることが風力発電に適した風況の目安である。風力発電システムは一定風速以上になると発電を開始し、風速が一定風速を超えると危険防止のため発電を停止する。風車が発電し始めるときの風速をカットイン風速、風速が高く風車の安全を確保するため発電を停止するときの風速をカットアウト風速というが、一般的なカットイン風速は $3\sim 5\text{m/s}$ 、カットアウト風速は $20\sim 25\text{m/s}$ 程度である。ここではカットイン風速を $3\text{m/s}$ 、カットアウト風速を $20\text{m/s}$ に設定し、風車が発電可能な風速 $3\text{m/s}\sim 20\text{m/s}$ のエネルギー密度を求めた。以下では風力エネルギー密度の年間平均値に着目して検討を行い、最頻風向に着目した場合と乱れの強さが小さい場合での風力のエネルギー密度についても比較検証した。

図6にはNeWMeK観測点での2007年の全記録を用いた場合と風軸上の2方向および6方向に着目した場合、乱れの強さが0.3以下および0.2以下の場合で推算される年間平均風力のエネルギー密度を示す。表2には図6に示すそれぞれの場合での年間平均風力エネルギー密度の値と、全風速記録を用いて得られた年間平均風力エネルギー密度に対するそれぞれの場合での推算値の割合を示す。図6(b)と表2より、No.11観測点での風力エネルギー密度は約 $86\text{W/m}^2$ で風力発電に適した風況の目安とされる $240\text{W/m}^2$ の $1/3$ 程度であった。風力発電開発に有望であると考えられたNo.43でも風力エネルギー密度は約 $183\text{W/m}^2$ で目安となる $240\text{W/m}^2$ を超えることはなかった。観測点No.43の年平均風速値は観測点No.11の約1.5倍であるのに対し、風力エネルギー密度では約2.1倍となる。式(1)より、風力エネルギー密度は風速の3乗に比例するため、年平均風速値が高いとより高い風力エネルギー密度を得られるためである。

表1で示したように風軸上の風向出現頻度が61%と高い観測点No.43では、風軸上の6方向の風力エネルギー密度は全記録の約7割で、それほど低減しないが、風軸上の風向出現頻度が45%であるNo.11の風軸上のエネルギー密度は全記録の45%に大幅に減少する。しかし、風軸上の2方向のみに着目すると、どちらの観測点でも全記録に対して30~40%のエネルギー密度となり、それほど変わらない。観測点No.43では2風向のみの風向出現頻度が6方向に比べて大きく下がることから、風力エネルギー密度は観測点No.11とそれほど変わらない割合となったとみられる。また、観測点位置での平均的な乱れの強さ0.3以下の風記録に着目した場合は、観測点No.43とNo.11ともに全記録を用いた場合の風力エネルギー密度の約90%であったが、発電機器が十分に性能を発揮できる乱れの強さが0.2以下の記録に着目すると観測点No.43では約75%、No.11では約55%となり、観測点によってはエネルギー密度が大きく低下する。表1より観測点No.43は乱れの強さの年平均値が約0.2で、もともと乱れの強さが小さい記録が多いため、No.11に比べると風力エネルギー密度の低減が少なかったと考えられるが、風車の発電性能を十分に発揮することができる乱れの小さい風速記録での風力エネルギー密度は、年平均風速値で算定したエネルギー密度に比べて小さくなること分かった。

##### 4.2. 500kW級風車を想定した発電量の推定

###### (a) 風車性能曲線の想定

ここでは、大型発電機器によるウィンドファーム構築ではなく、小型機器による分散型電力網の構築を想定し、定格出力500kWの小型風車による発生電力量を推算する。500kW級風車の性能曲線を図7に示す。ここではカットインを $3\text{m/s}$ 、カットアウト風速を $20\text{m/s}$ 、定格風速を $10\text{m/s}$ とした。定格風速とは、設計上の最大連続出力、すなわち定格出力が得られる風速で、一般に年間を通じ風力エネルギーを最も多く引き出すことのできる風速に設定され、通常は $10\sim 14\text{m/s}$ 程度である。簡単のため、カットイン風速から定格風速までの出力は風速に比例するものとする。

###### (b) 性能曲線に対する発電量の想定

発電電力量 $P_w$ は以下のように求められる<sup>3,13)</sup>。

$$P_w = \sum P(V) * f(V) * 8760[h] \quad (2)$$

ここで $P(V)$ は風速 $V$ での発生電力(kW)、 $f(V)$ は風速 $V$ の出現率とする。 $P(V)$ は図7より求め、 $f(V)$ は10分間平均風速 $V\text{m/s}$ の記録の1年間での出現数を6で割り1時間当たりの出現数に直したものをを用いる。ここでは風の乱れの強さを考慮せず全観測記録を用いた場合と乱れの強さ0.3以下、0.2以下の記録を用いた場合のそれぞれで電力量を算定する。

表3では小型風車 500kW 級風車を想定し、全観測記録を用いた場合の年間発電量と乱れの強さを0.3および0.2以下にした場合の年間発電量を示す。また、合わせて全観測記録を用いた場合の年間発電量に対するその他の場合の年間発電量の割合を示す。図8は各観測点での平均風速に対する2007年の全記録を用いた場合の年間発電量と乱れの強さを0.3および0.2以下にした場合の年間発電量の頻度分布である。表3より観測点 No.43 の発電量は観測点 No.11 の発電量の約1.8倍となり、風力エネルギー密度よりもその差が小さい。また表3より、観測点 No.43 で全観測記録での年間発電量に対する乱れの強さが0.3の場合での割合は0.86、乱れの強さ0.2の場合での割合は0.67となり、表2に示す年間風力エネルギー密度よりも低減割合が大きい。一方、観測点 No.11 では風力エネルギー密度と500kW級風車を想定した出力電力の低減割合はほぼ同じである。小型風車の性能曲線を考慮すると定格風速の風速出現率の割合が高いほど高い発電量が得られるが、風力エネルギー密度に着目すると10

分間平均風速値が高いほどその値が高くなるため、低減割合には違いが表れたと考えられる。図8より観測点 No.11 では、平均風速約5m/sでの年間発電量を最大として高風速域での発電量が減少するが、観測点 No.43 では平均風速約7m/sでの発電量を最大に、やや高風速域での年間発電量が大きく、観測点での全体的な発電量を比較すると大きな差が生じる。

4.1節でも示したとおり、風車の発電性能を十分に生か

表3 小型風車を想定した発電量と全観測記録を基準とする各ケースでの値の割合

	No.43		No.11	
	発電量 (MWh)	全観測記録を1としたときの割合	発電量 (MWh)	全観測記録を1としたときの割合
全観測記録	1770	1	972	1
乱れの強さ0.2以下	1191	0.67	531	0.55
乱れの強さ0.3以下	1522	0.86	867	0.89

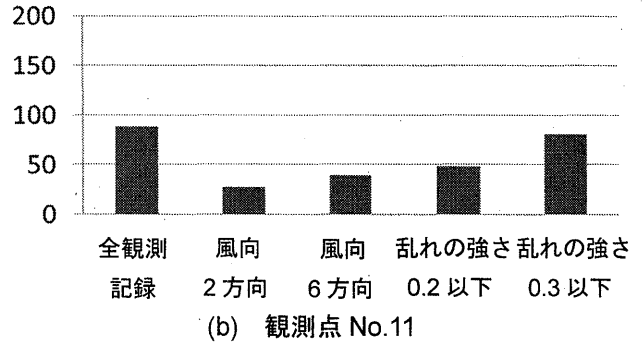
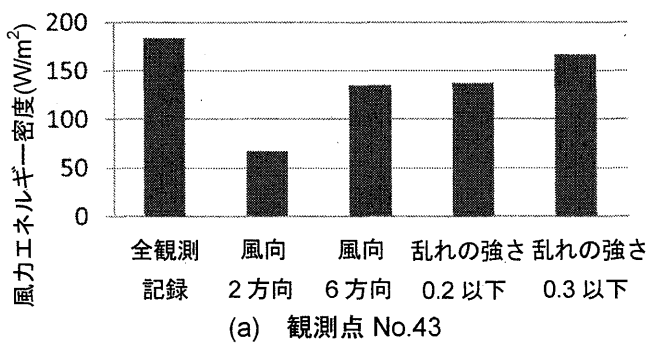


図6 風力エネルギー密度

表2 各検討ケースでの風力エネルギー密度および全観測記録を基準とする各ケースでの値の割合

	No.43		No.11	
	風力エネルギー密度 (W/m²)	全観測記録を1としたときの割合	風力エネルギー密度 (W/m²)	全観測記録を1としたときの割合
全観測記録	182.7	1	86.3	1
風向2風向	67.2	0.37	26.6	0.31
風向6方向	134.2	0.73	38.9	0.45
乱れの強さ0.2以下	137.0	0.75	47.4	0.55
乱れの強さ0.3以下	166.0	0.91	79.1	0.92

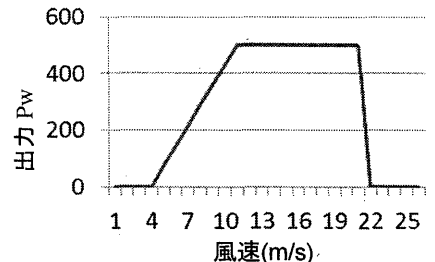


図7 500kW級風車を想定した性能曲線

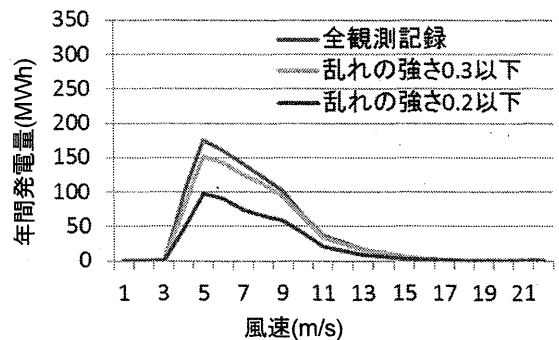
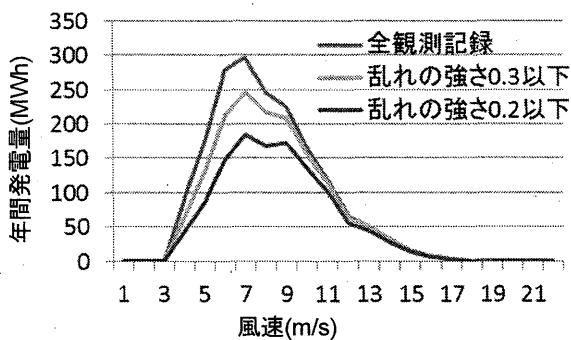


図8 全記録を使用した場合の年間発電量及び乱れの強さを限定した場合の年間発電量

すことのできる乱れの強さが 0.2 以下の風記録のみに着目すると、その発電量は No.43 でも全記録で算定した発電量の 7 割以下、No.11 では約半分になる。風力発電適地策定には、風の乱れ強さの特性を把握するとともに、乱れの強さが大きい状態での風車性能を正確に把握する必要があると言える。

## 5. まとめ

本論では、NeWMeK で観測した、台風の影響が少ない 2007 年の九州での 1 秒平均風速観測値を使用し、2 つの観測点に着目して平均風速の発生頻度の特性を調べるとともに、風力エネルギー密度と 500kW 級風車の設置を想定した年間発電量を推算して潜在的風力エネルギーを比較した。また、風速変動による風車の発電性能の低下を考慮し、特に発電性能の低下が少ない、乱れの強さが 0.2 以下の場合での潜在的風力エネルギーを算定し、エネルギーの低減率を検証した。得られた所見を以下に示す。

- 1) 最大風速が同じであっても、低風速の出現頻度が低い No.43 の方が、年平均風速が大きい。
- 2) 海岸に近い観測点 No.11 は、海陸風の影響で昼間の平均風速が高くなっていると考えられる。
- 3) 2 観測点とも台風の影響を除くと季節風が吹く冬季の平均風速値が高い。
- 4) 風軸上の風速記録や乱れの強さ 0.2 以下の記録のみに着目すると、2 観測点とも高い平均風速の割合が大きくなる。
- 5) 平均風速が大きい No.43 の方が、風車が十分な発電性能を発揮できると考えられる乱れの強さが 0.2 以下の風が発生する頻度が高い。
- 6) 年平均風速が大きいほど風力エネルギー密度が大きくなるが、年平均風速などの条件を満たしていても風力発電開発に有望な目安を超えるエネルギー密度を取得できない場合がある。
- 7) 風車が想定する発電性能を十分に発揮できる風の乱れの強さが 0.2 以下の風の発生頻度は低いいため、算定した風力エネルギー密度は全ての記録を用いた場合に比べると大きく低減する。
- 8) 500kW 級風車を想定して算定した出力発電量は、年平均風速値だけではなく、風車の定格風速の出現頻度の影響を受ける。
- 9) 観測点 No.43 では乱れの強さが 0.2 以下の風観測記録に着目した場合、全記録を用いた場合に対する出力発電量の低減割合は、風力エネルギー密度の低減割合よりも大きい。
- 10) 乱れの強さの小さい風記録から算定した潜在的風力エネルギーは、年平均風速値のみで算定したエネルギーによりもかなり小さく、乱れの強さが大きい状況での風車性能を把握する必要がある。

本論では特定地点での風速変動情報と潜在的風力エ

ネルギーを示したが、同様の手法を用いて風速変動情報を整理することで、広域的な潜在風力を推定し、風力発電適地策定に有用な情報を提供することができると考えられる。

## 謝辞

本研究の一部は科学研究費補助金「風力発電及び送電拠点の分散マイクログリッド構築の実現（挑戦的萌芽研究 24651190 代表：前田潤滋）の助成を受けました。

## 参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2007 年版]、丸善、2007。
- 2) 新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー導入部、風況精査マニュアル（概要版）、1997.12。
- 3) 新エネルギー・産業技術総合開発機構 エネルギー対策推進部：風力発電導入ガイドブック、2008.2。
- 4) 田中太、川口清司、富岡政裕：風況測定と小型ダリウス型風車の年間発電量に関する研究、日本機械学会論文集(B 編)p111-117、2007.11。
- 5) 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)、pp.3323-3329、1998。
- 6) 土屋圭一、松坂知行：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、竜飛ウィンドパークにおける検証、日本機械学会論文集 B 編、61(590)、pp.337-342、1995。
- 7) 今村博、妻沼朋己、黒川淳一、松宮輝、猪俣登：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 2 報、風況特性および乱れ度の影響、日本機械学会論文集 B 編、70(693)、pp.1223-1229、2004。
- 8) 野方香里、友清衣利子、前田潤滋：風力発電のための風の乱れ特性に着目した九州地区の風況、都市・建築学研究 九州大学大学院人間環境学研究院紀要 第 23 号、pp.15-20、2013.1。
- 9) Eriko Tomokiyo, Junji Maeda et al.:Typhoon Damage Analysis of Transmission Towers in Mountainous Regions of Kyushu, Japan, Wind&Structures An International Journal, Vol.7, No5, pp.345-357, 2004.6
- 10) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)：局所風況マップ（18 年度改訂版）、<http://app8.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>、2012-11-22 参照。
- 11) 前田潤滋（代表）：広域送電線網を利用した潜在的風力エネルギー開発のための風速マップ作成、平成 14-15 年度科学研究費補助金（萌芽研究）研究報告書、2004。
- 12) 大熊武司、神田順、田村幸雄：建築物の耐風設計、鹿島出版会、1996.3。
- 13) 牛山泉：風車工学入門、森北出版株式会社、2002.8。

（受理：平成 25 年 5 月 23 日）