

複雑地形における気象庁局地数値予報モデルデータ(LFM) を用いた簡易風況推定法の試み —串木野れいめい風力発電所を例として—

川島 泰史* 内田 孝紀**

(2015年8月28日受理)

Practical Use of Weather LFM Data to Wind Power Field in the Complex Terrain —In the case of the kushikinoreimei wind farm—

Yasushi KAWASHIMA and Takanori UCHIDA

E-mail of corresponding author: y-kawashima@wjec.co.jp

Abstract

In this report, we explain the outline of the weather GPV data such as GSM, MSM and LFM. Next, the comparison between the actual measurement data (observed value) and the weather LFM data is reported in the Complex Terrain .

Key words : *Weather GPV data, GSM, MSM, LFM, Wind energy, Complex terrain*

1. 緒言

我々の研究グループでは、各国の政府機関(日本の場合は気象庁である)が提供する種々の気象GPV(Grid Point Value)データを、風力発電分野へ適用するための基礎研究を実施している¹⁾。気象GPVデータはそのデータフォーマットの複雑さやデータ転送の遅延問題などから、これまで一部の研究者しか利用できない状況にあった。

その一方で、気象GPVデータは地球全体を網羅するものから、局所的な地域を密にカバーするものまで多岐にわたる。よって、これらのデータを有効活用できれば、国内のみならず世界規模で風力発電の普及に大いに貢献できると考えられる。本報では、気象GPVデータの概要などを説明するとともに、特に山間部(標高400m~500m程度)で利用する際の注意点とその改善方法について報告する。

2. 気象GPVデータの概要

数値予報とは、物理学の種々の支配方程式に基づき、風や気温などの時間変化をコンピュータで計算して将来の大気の状態を予測する方法である²⁾。

気象庁JMA(Japan Meteorological Agency)は、昭和34年(1959年)に我が国の官公庁として初めて科学計算用の大型コンピュータシステムを導入し、数値予報業務を開始した。その後、数値予報モデルの進歩とコンピュータの飛躍的な性能向上に伴って、数値予報は予報業務の根幹を形成してきた。

数値予報では、規則正しく並んだ格子点(Grid Point)で大気層を細かく覆い、その格子点上の風速、気圧、気温などの物理量を世界中から送られてくる観測データに基づいてコンピュータでシミュレーションする。これらの計算プログラムは数値予報モデルと呼ばれる。数値予報モデルでは、大気の流れ(風)や、降雨など種々の流動現象・波動現象・気象現象が考慮されている。

数値予報モデルの計算結果が、数値予報GPV(気象GPVデータ)と呼ばれる。これらの気象GPVデータは、民間の気象会社や報道機関に提供されている他、外国の気象機関でも幅広く利用されている。

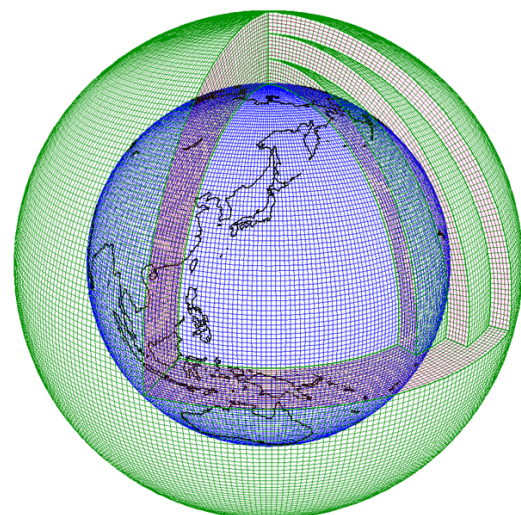


図1 数値予報に用いる全球の計算格子図

*西日本技術開発㈱(航空宇宙工学専攻社会人博士課程在籍), **九州大学応用力学研究所

2.1 全球数値予報モデルGPV(GSM)

全球数値予報モデルGSM(Global Spectral Model)は、全球スペクトルモデルとも呼ばれ、地球全体の大気を対象とした気象庁の数値予報モデルのことである。運用回数は1日4回(00, 06, 12, 18UTC, UTCは協定世界時)である。

気象庁は、平成19年11月21日、全球数値予報モデルGSMの空間解像度を大幅に向上した。地球全体の大気を予報するGSMの結果は、気象庁が発表する台風予報や天気予報などのための基礎資料に活用される。従来のGSMは地球全体の大気を水平60km格子、鉛直方向に40層に区切っていた(図1を参照)。新しいGSMでは、地球大気を水平20km格子、鉛直方向には60層に区切って計算を実施している。地球全体を水平20km格子で計算する気象庁のGSMは、天気予報などに用いられている全球数値予報モデルとしては、世界一緻密なモデルである。この変更に伴い、領域数値予報モデルRSM(Regional Spectral Model)は廃止され、GSM(全球域)のデータから日本域に対応したデータを作成し、これをGSM(日本域)として新たに提供が開始された。現在のGPV(GSM)の概要を下記に再掲する。

- 水平格子解像度 約20km
- 鉛直60層
- 1日4回実行
 - ・ 00, 06, 18時(UTC)から84時間予報
 - ・ 12時(UTC)から216時間予報
 - ・ 時間解像度は1~12時間
- 用途
 - ・ 天気予報支援(今日, 明日~週間予報)
 - ・ 台風予報支援(進路, 強度)
 - ・ メソモデルの側面境界条件

2.2 メソ数値予報モデルGPV(MSM)

メソ数値予報モデルMSM(Meso Scale Model)は、日本およびその近海を対象とした気象庁の数値予報モデルのことである。

1998年3月に試験運用が開始され、2001年3月に本運用が開始された。当時の水平解像度は10km、1日4回、18時間先までの予報が実施された。2002年3月には4次元変分法が導入され、2004年9月に非静力学モデルが導入された。2006年3月にはスーパーコンピュータシステムが更新され、これに伴いMSMも改善が施された。水平解像度が10kmから5kmに高解像度化した。同時に、予報時間が18時間から15時間と短くなる一方で、予報回数が1日4回から1日8回(00, 03, 06, 12, 15, 18, 21UTC)に倍増した。2007年5月16日より1日8回の予報のうち、4回の予報期間が33時間に延長された。2013年5月27日より予報期間が39時間に延長された。現在のGPV(MSM)の概要を下記に再掲する。

- 水平格子解像度 約5km
- 鉛直50層
- 1日8回実行
 - ・ 00, 03, 06, 09, 12, 18, 21時(UTC)
 - ・ 39時間予報
 - ・ MSM-S(地上)の時間解像度は1時間
 - ・ MSM-P(気圧面)の時間解像度は3時間
- 用途
 - ・ 防災気象情報支援
 - ・ 降水短時間予報への利用
 - ・ 航空予報支援

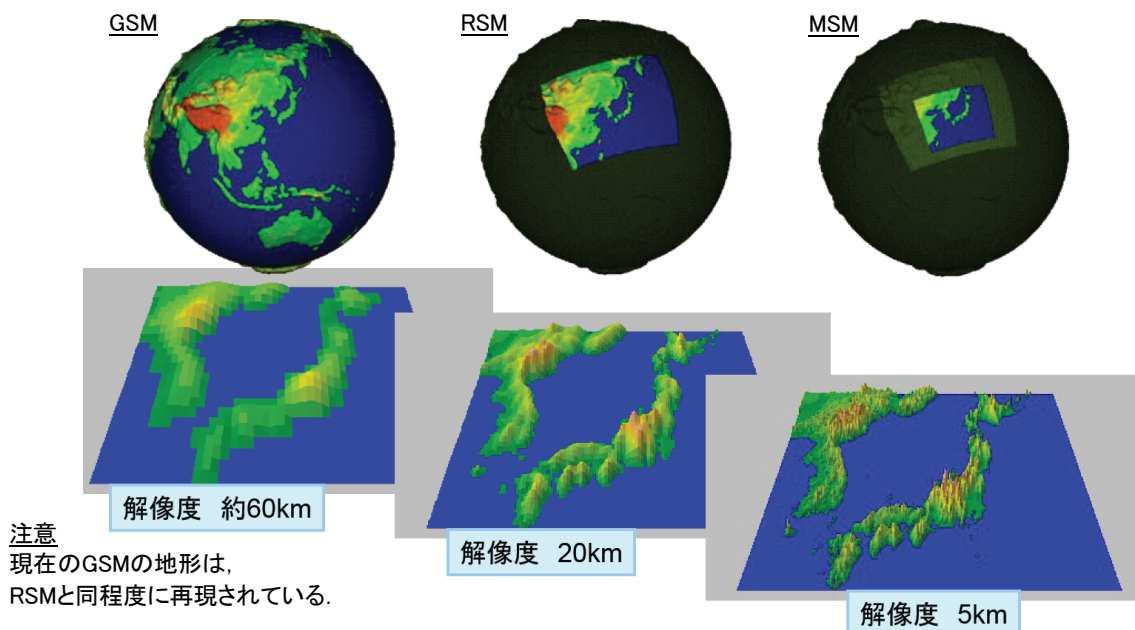


図2 数値予報モデルGSM, RSM, MSMにおける計算領域と地形解像度の比較。
地形データの計算には、米国地質調査所(USGS)のGTOPO30の約1km解像度(緯・経度30秒)のデータが利用されている。

2.3 局地数値予報モデルGPV(LFM)

局地数値予報モデルLFM(Local Forecast Model)は、2012年6月のスーパーコンピュータシステムの更新に伴い、同年8月から試験運用が開始され、2015年3月から本運用が開始された高分解能モデルである。水平解像度は約2km、鉛直60層、9時間予報が現在の仕様である。図3にはMSMとLFMの地形解像度の比較を示す。現在のGPV(LFM)の仕様を下記に再掲する。

- 水平格子解像度 約2km
- 鉛直60層
- 1日24回実行
 - ・ 毎正時、9時間予報
 - ・ 地上の時間解像度は30分
 - ・ 気圧面の時間解像度は1時間
 - ・ 2014年3月27日から日本全体を対象に運用開始

3. 気象GPVデータ(LFM-S)の検証地点概要

九電工新エネルギー(株)の協力の下、串木野れいめい風力発電所9号機(平成24年11月より運転を開始)を気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の検証地点とした(表1, 図4, 図5を参照)。

表1 串木野れいめい風力発電所の概要

	1号機～10号機
風車メーカー、出力	日立製作所 HTW2.0-80 2,000kW
風車の高さ (地面～ハブ中心)	60m
翼(ブレード)の直径	80m

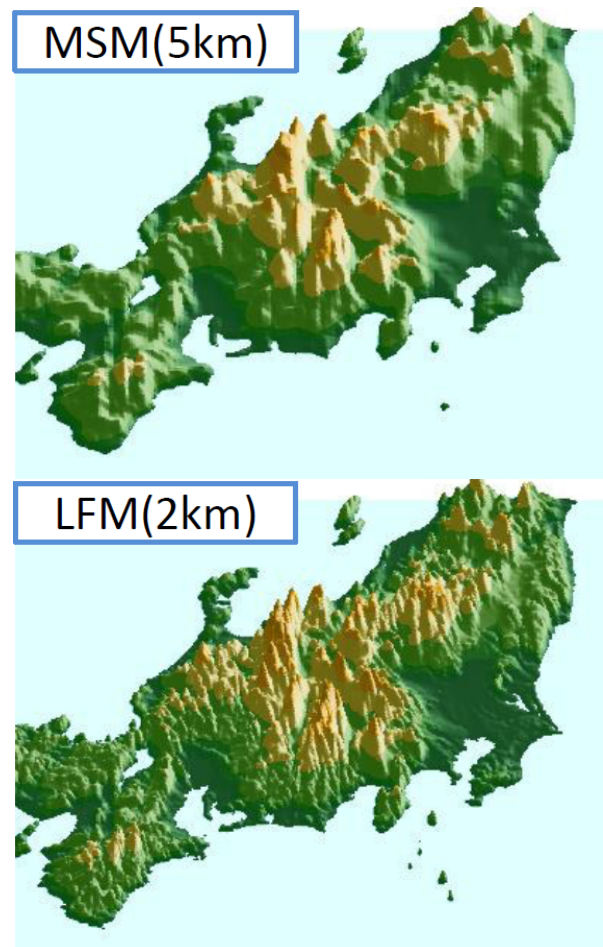


図3 MSMとLFMの地形解像度の比較

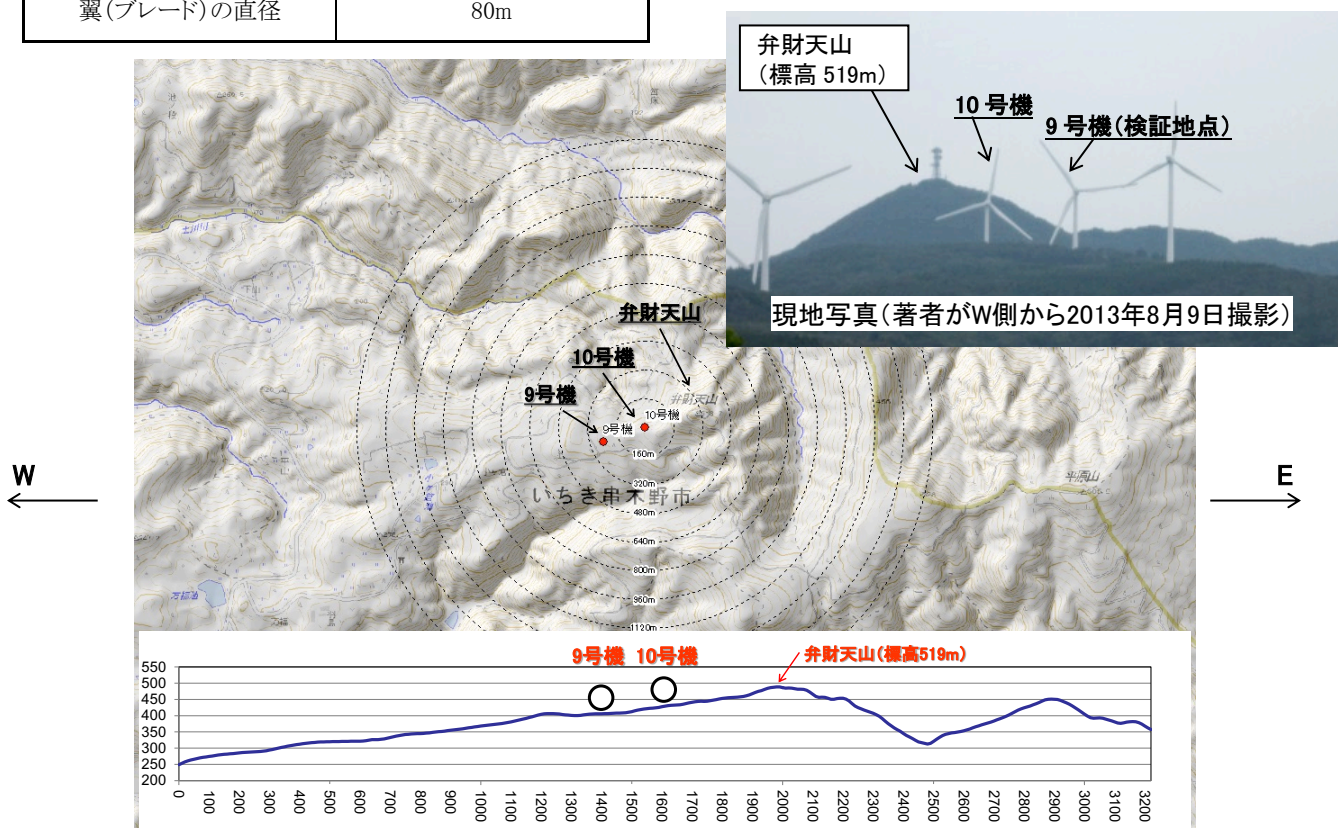


図4 串木野れいめい風力発電所9号機(含10号機)周辺地形(数値データ)、東西方向の地形断面と現地写真

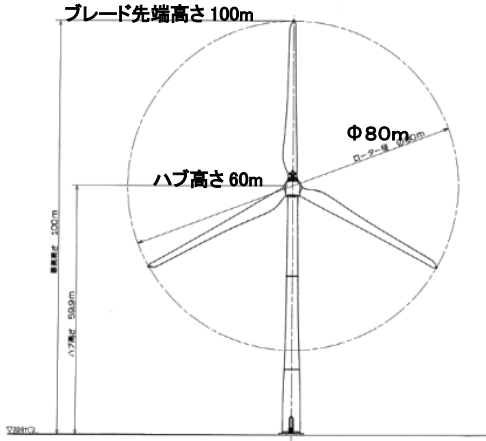


図5 風車の仕様

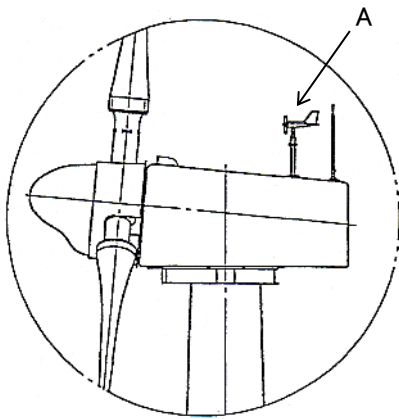


図6 風車ナセルに搭載された風向・風速計(図中のA)

本研究では、串木野れいめい風力発電所の風車9号機を対象として、気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の検証を行った。実測データ(野外観測データ)は、図6に示すように、風車ナセル搭載の風向・風速の出力値を用いた。図7



図7 風車位置と気象GPVデータの取得位置の関係 (風車9号機とGPV2の水平距離:0.18km)

には、気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の取得位置と風車9号機の位置関係を示す。本研究では、LFM2の位置で取得した気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)を用いて風車9号機の実測データとの比較および検証を行った。

4. 串木野れいめい風力発電所の風況(2014年度)

最初に、風車9号機に関して、図6の矢印Aで取得された風向・風速のデータを整理したので、その結果を示す(表2～表4, 図8～図10を参照)。実測データの取得期間は2014年度の1年間(8,760h)であり、データの時間間隔は1時間である。これらの結果を観察すると、串木野れいめい風力発電所における風況は、卓越風向が明確に存在し、卓越風向(NNW)の風速も約7.0m/sと高く、年間平均風速も約6.0m/sあり、風力発電には適した地域であることが分かる。

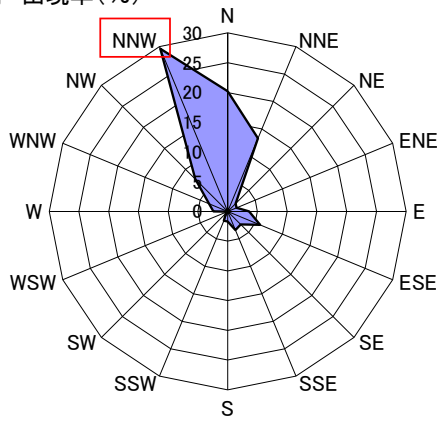
表2 2014年4月～2015年3月の風況特性, 方位別の出現率, 風車9号機, 実測データ(地上高60m)

(単位: %)

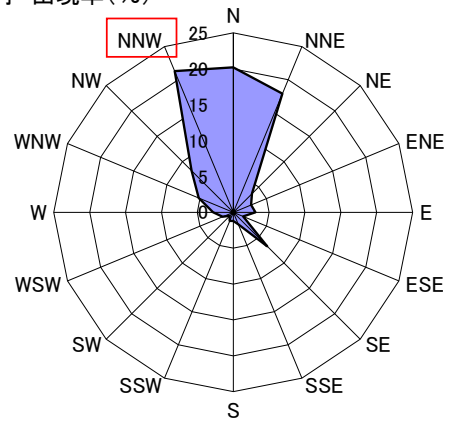
年	月	静穏	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
2015	1	0.0	20.2	13.3	1.9	1.6	3.6	5.9	3.1	3.4	1.7	1.7	0.4	0.1	2.4	3.4	7.7	29.6	100.0
	2	0.0	20.2	17.9	3.7	2.7	3.1	1.5	6.7	1.8	1.2	1.3	0.7	1.6	2.8	5.2	8.2	21.3	100.0
	3	0.0	15.2	9.1	4.4	4.8	2.7	3.8	8.2	7.1	5.6	3.6	3.8	0.9	1.3	0.7	8.1	20.6	100.0
2014	4	0.0	8.6	5.7	4.3	5.8	9.2	7.6	8.1	2.5	3.6	3.8	5.3	5.3	3.6	3.5	9.7	13.5	100.0
	5	0.0	13.9	6.1	1.7	2.0	3.8	4.7	7.5	6.8	8.4	8.1	5.4	2.1	2.5	4.5	9.2	13.3	100.0
	6	0.0	6.9	4.3	2.9	3.3	9.7	9.7	8.3	5.0	3.6	6.0	5.8	3.5	2.4	5.8	9.6	13.1	100.0
	7	0.0	3.6	2.6	1.1	1.1	4.2	3.6	8.3	7.0	10.6	20.6	11.6	2.7	3.2	5.4	7.4	7.1	100.0
	8	0.0	3.9	1.9	3.1	1.2	1.7	3.4	5.8	8.3	16.7	29.2	4.2	2.8	2.6	3.0	7.7	4.7	100.0
	9	0.0	8.2	5.6	7.1	10.3	11.3	6.9	9.7	7.2	7.5	6.1	3.8	1.3	2.1	2.1	4.6	6.4	100.0
	10	0.0	12.2	16.1	13.8	5.6	8.1	8.9	10.8	3.5	3.9	4.2	2.3	0.9	0.7	0.7	3.2	5.1	100.0
	11	0.0	15.1	17.4	7.6	7.1	4.0	6.0	10.3	3.8	2.4	1.9	1.7	1.3	2.6	2.9	5.8	10.1	100.0
	12	0.0	21.6	23.0	2.8	1.1	0.9	6.0	4.8	1.1	1.5	0.9	0.5	1.3	1.3	1.5	10.3	21.1	100.0
	年間		0.0	12.4	10.2	4.6	3.9	5.2	5.7	7.6	4.8	5.6	7.4	3.8	2.0	2.3	3.2	7.6	13.8

注) : 月別卓越風向

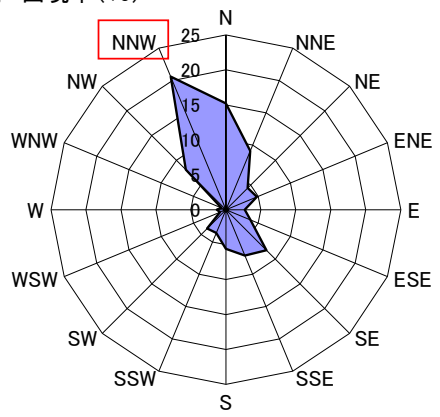
2015年1月 出現率(%)



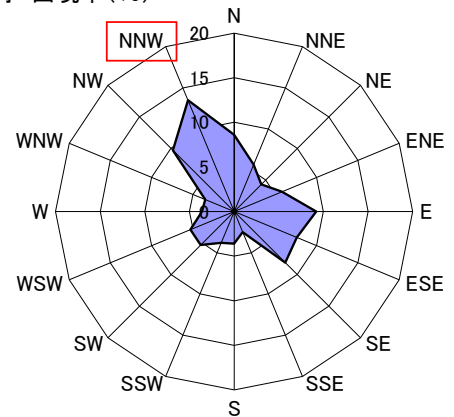
2015年2月 出現率(%)



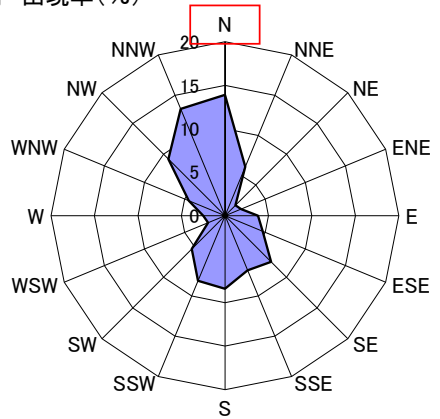
2015年3月 出現率(%)



2014年4月 出現率(%)



2014年5月 出現率(%)



2014年6月 出現率(%)

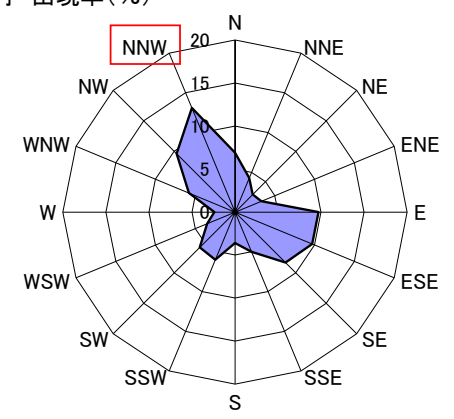
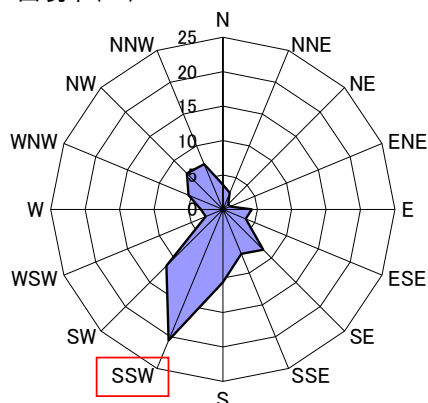
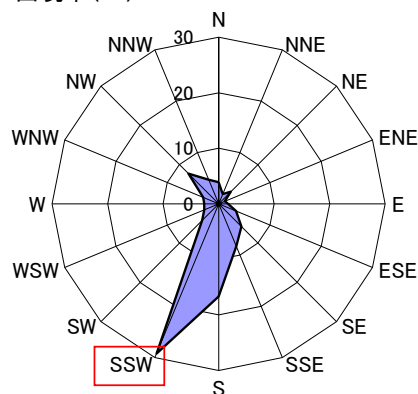


図8 月別の出現率(%), 風車9号機, 実測データ(地上高60m), 2014年度
図中の赤枠は、卓越風向を示す。

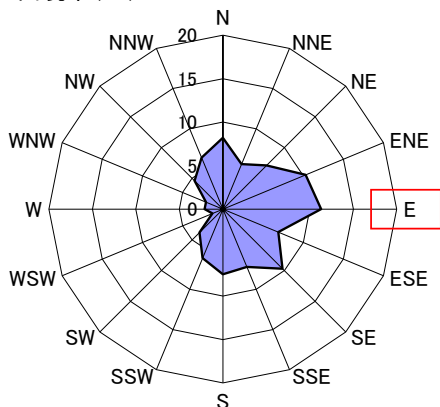
2014年7月 出現率(%)



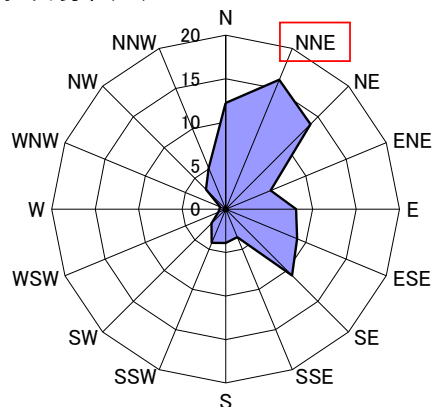
2014年8月 出現率(%)



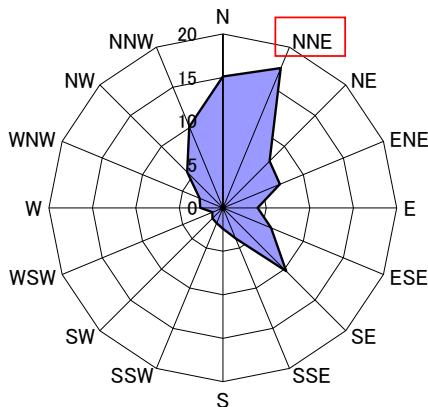
2014年9月 出現率(%)



2014年10月 出現率(%)



2014年11月 出現率(%)



2014年12月 出現率(%)

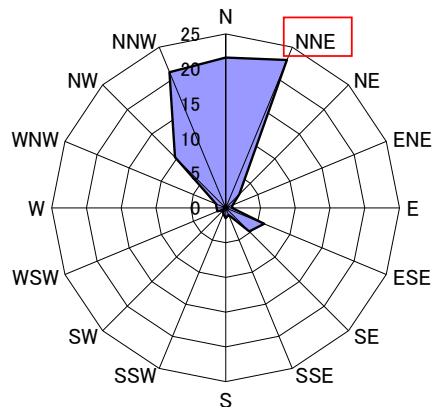


図8(続き) 月別の出現率(%), 風車9号機, 実測データ(地上高60m), 2014年度
図中の赤枠は、卓越風向を示す。

表3 2014年度の風況特性, 月別および年間の平均風速(m/s), 風車9号機, 実測データ(地上高60m)

(単位:m/s)

地上高	2015年			2014年									平均
	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	
60m	6.9	6.2	5.8	5.2	5.1	4.6	5.4	6.1	4.4	6.0	5.4	7.1	5.7

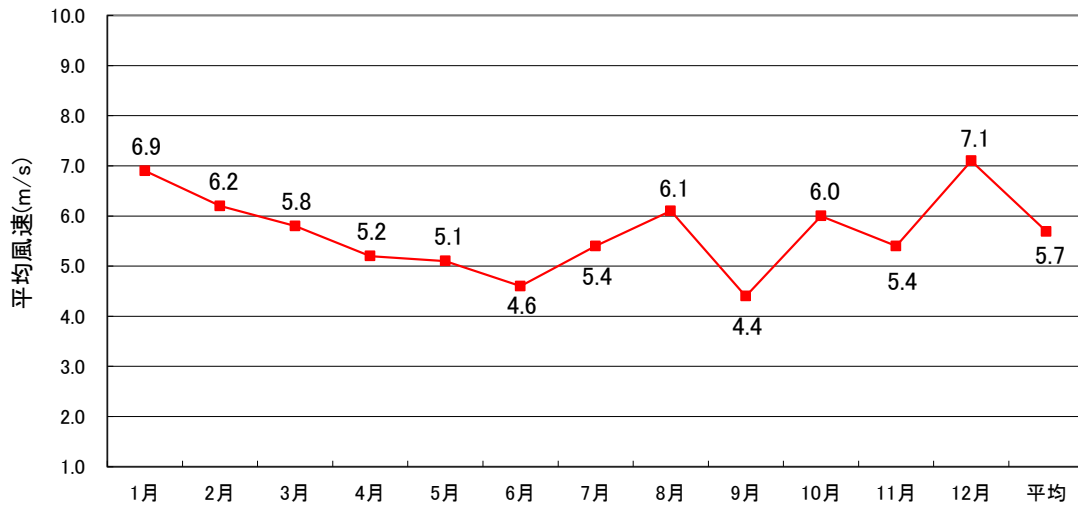


図9 月別および年間の平均風速(m/s), 風車9号機, 実測データ(地上高60m), 2014年度

表4 2014年度の風況特性, 年間の方位別の出現率(%)および平均風速(m/s), 風車9号機, 実測データ(地上高60m)

地上高	項目	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	計
60m	出現頻度(%)	12.4	10.2	4.6	3.9	5.2	5.7	7.6	4.8	5.6	7.4	3.8	2.0	2.3	3.2	7.6	13.8	100.0
	平均風速(m/s)	5.8	5.7	4.7	4.8	6.5	6.1	6.7	5.6	5.1	5.5	4.1	3.3	3.5	3.8	5.9	6.9	5.7

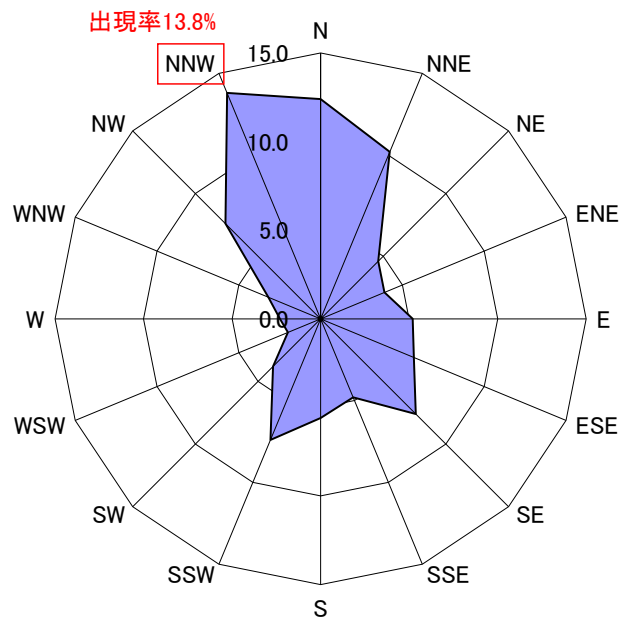


図10 年間の出現率(%), 風車9号機, 実測データ(地上高60m), 2014年度

図中の赤枠は、卓越風向を示す。

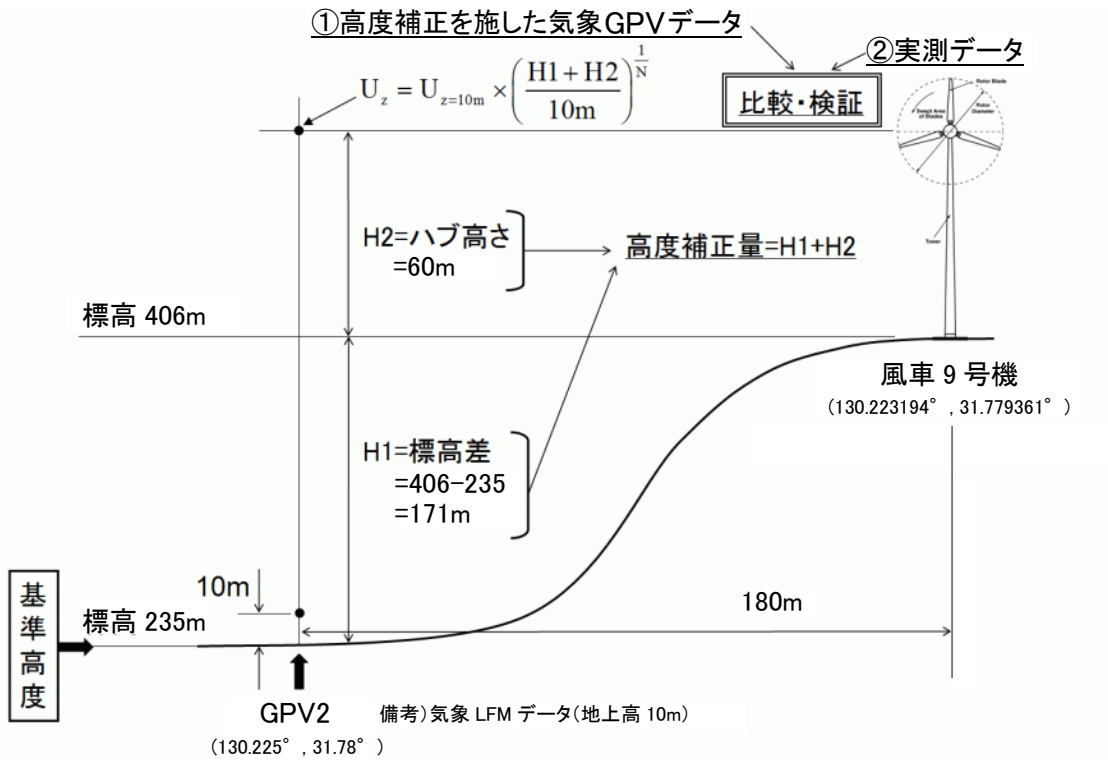


図11 気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)に基づいた簡易風況推定法の概念図

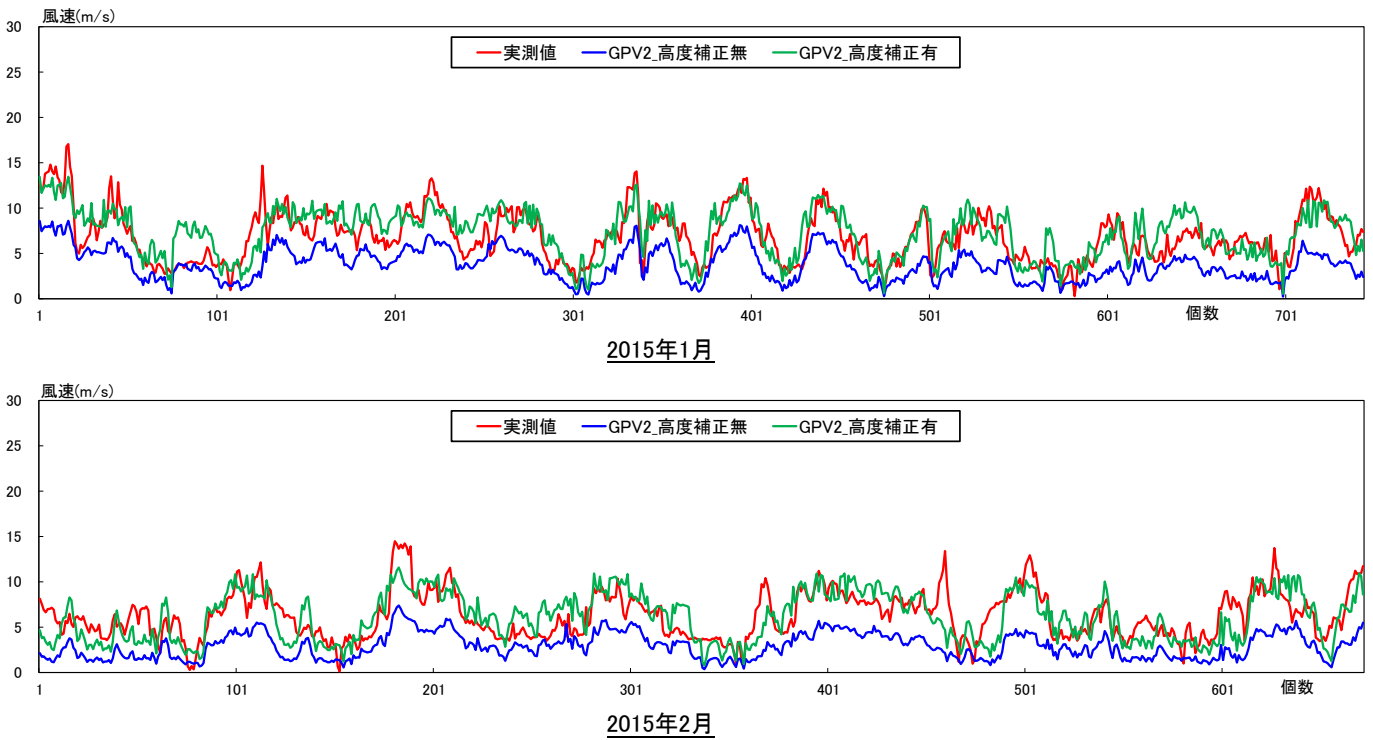


図12 実測データと気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の時系列データの比較, 図7に示すGPV2位置で取得したデータ, 風車9号機, 2014年度

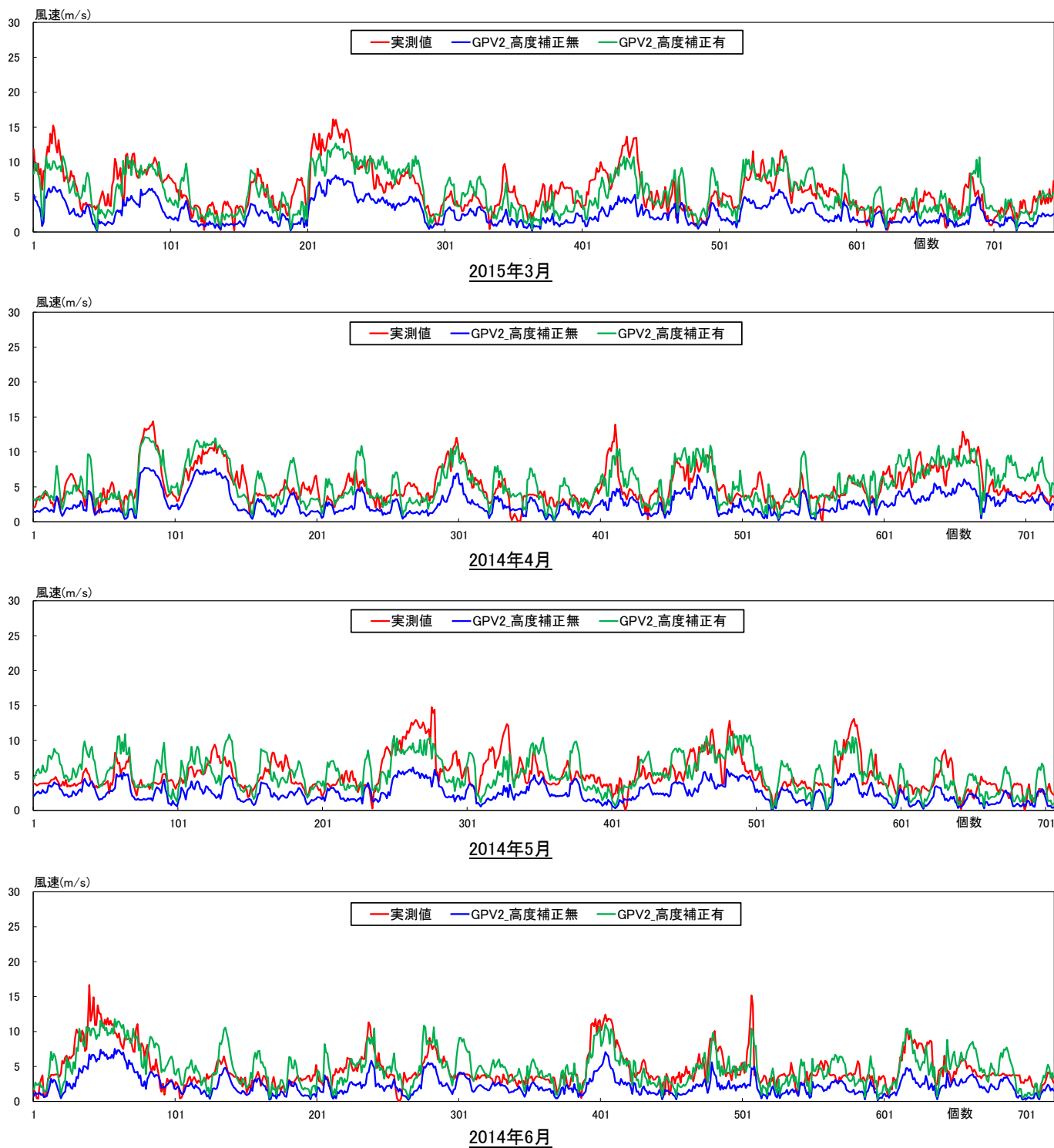


図12(続き) 実測データと気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,
図7に示すGPV2位置で取得したデータ, 風車9号機, 2014年度

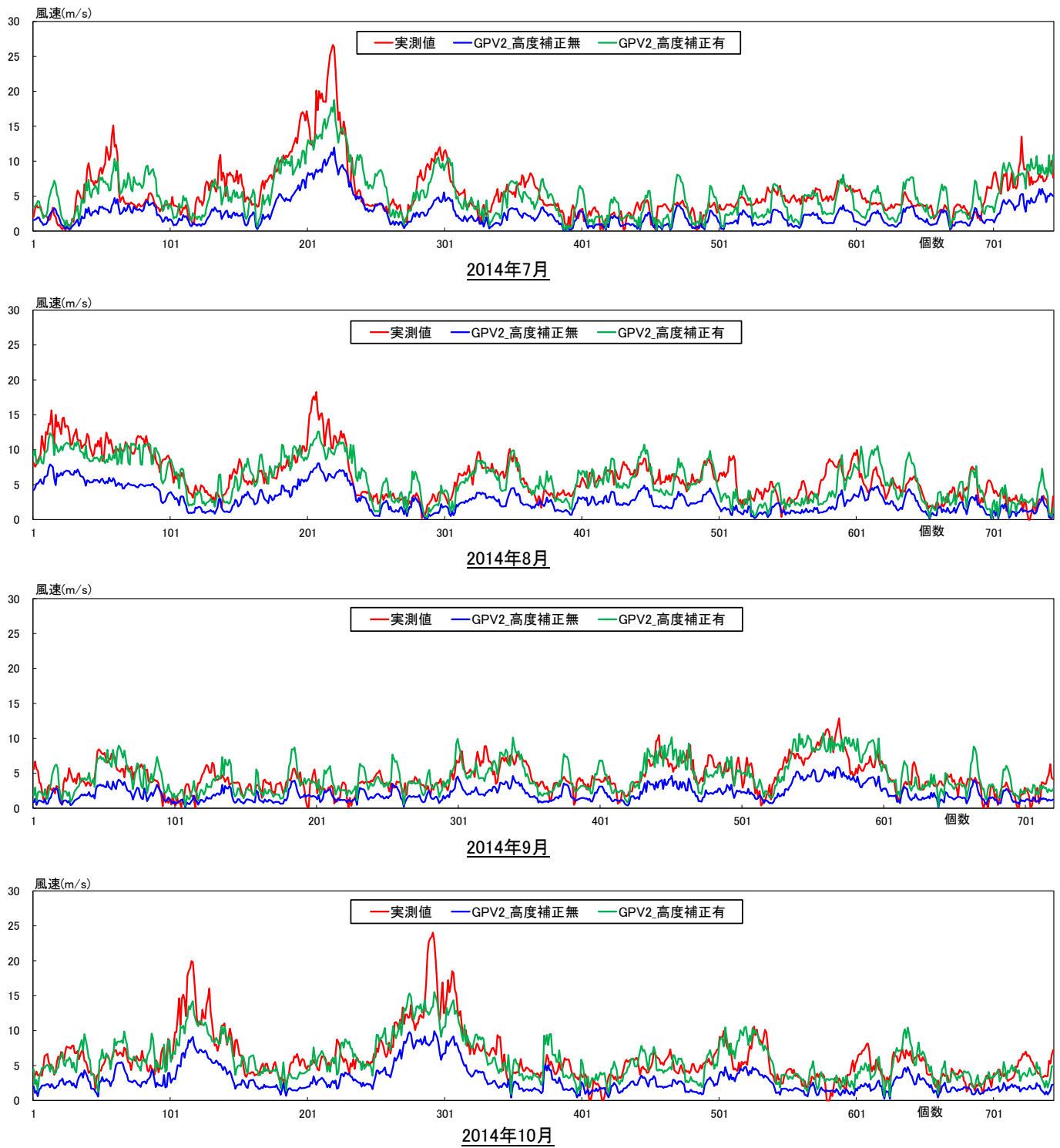


図12(続き) 実測データと気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,
図7に示すGPV2位置で取得したデータ, 風車9号機, 2014年度

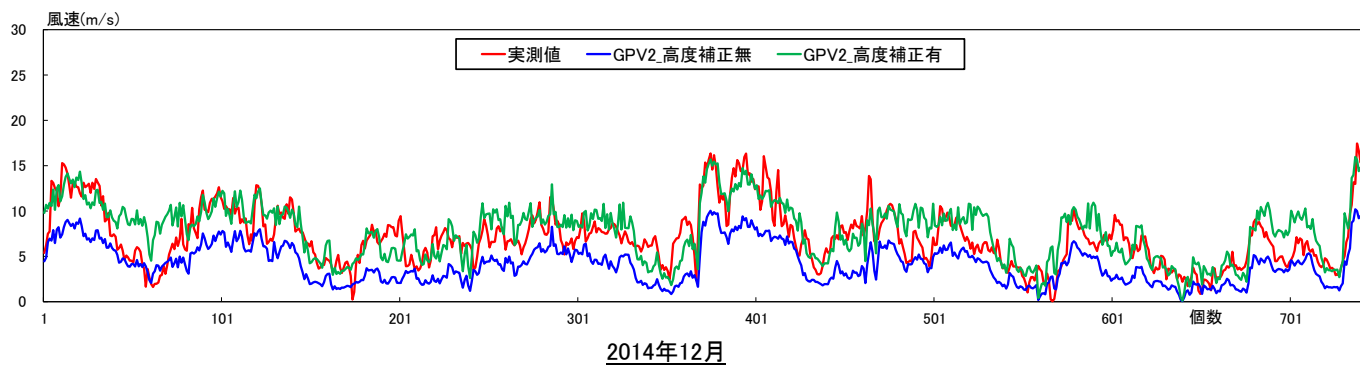
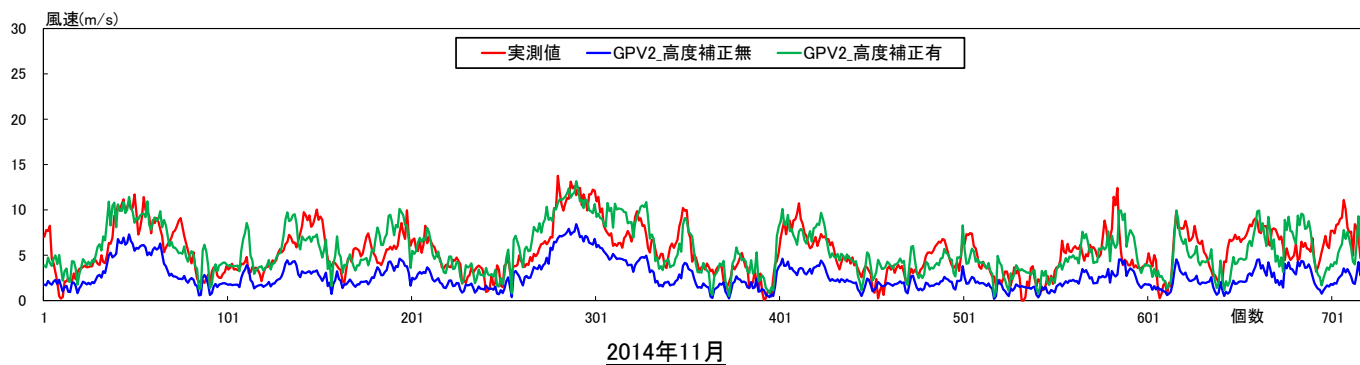


図12(続き) 実測データと気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,
図7に示すGPV2位置で取得したデータ, 風車9号機, 2014年度

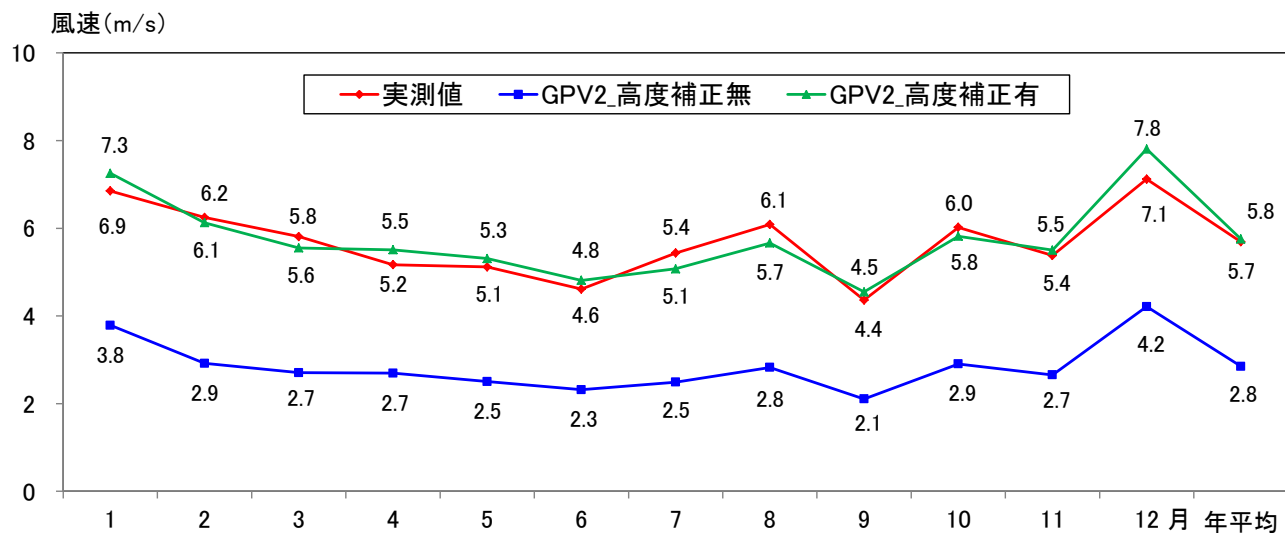


図13 実測データと気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の月別および年間における平均風速(m/s)の比較,
図7に示すGPV2位置で取得したデータ, 風車9号機, 2014年度

5. 気象GPVデータを用いた簡易風況推定法

図11に本研究で検討した簡易風況推定法概念図を示す。図7に示すように、気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)を用いて任意地点(評価地点)のデータを抽出する際、評価地点の周辺には4点の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)が存在する。一般的には、これら4点の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)をすべて用いて空間補正や高度補正を施し、評価地点のデータを作成する。しかしながら、この方法では内在する誤差や誤差要因を特定するのが極めて困難である。そこで本研究では、上述の空間補正は行わず、評価地点の最寄り点に位置する気象GPVデータ1点のみを用い、これに標高差に基づいた高度補正を施す方法を試みる。ここで、高度補正には風速5m/s未満の値にべき指数(N=4)、風速5m/s以上の値にべき指数(N=7)を適用する。得られた結果を図12および図13に示す。

まず注目して頂きたいのは、本研究の場合、図11に示すように実測データとGPV2の取得位置は、高度差で231m [171m(標高差)+60m(ハブ高さ)]の離隔があるにも関わらず、図12で示した実測データと気象GPVデータ(高さ補正無)の両者の波形(時間変化)には、高い相関性が見られるということである。具体的には、気象GPVデータ(高さ補正無)は、実測データに見られる日変化の挙動や、強風が発生する時間帯(ピーク位置)などを良好に再現している。これはメソスケール規模の気圧配置などが串木野れいめい風力発電所の上空における気流場(風況場)を決定していることを示唆している。但し、当然ながら実測データと気象GPVデータ(高さ補正無)の両者の平均値には有意な差異が見られる。また、各々の時刻で実測データと気象GPVデータ(高さ補正無)の両者を比較すると、波形の形そのものにも有意な違いが確認される。これは地形の凹凸などの局地的な状況の違いによると考えられる。上記の結果を踏まえ、気象GPVデータ(高さ補正無)に対して、何らかの(物理的な根拠に基づいた)補正を施し、年平均ベースの風速値を増加させることが出来ないかというのが本研究の試みである。本研究では、風速5m/s未満の値にべき指数(N=5)、風速5m/s以上の値にべき指数(N=7)を適用して高度補正を行った。

表5および表6には、図12に示す風速の時系列データ(時間解像度は1時間)から算出した統計的指標(下記を参照)を示す。また、表7および表8には、風速5m/sビン毎の相対誤差を示す。本研究で提案した簡易的な高度補正を施すのみで、実測データと気象GPVデータの誤差は大幅に減少することが示された。

■ 平均誤差(ME: Mean Error)

- 個々の予報値(計算値)の誤差を、そのまま期間内で平均したものを平均誤差(ME)と呼ぶ。またバイアス(偏

り)とも呼ばれる。

- 平均誤差は予報の系統的な偏りを示す指数である。平均誤差がゼロのとき、平均的に見て予報は正にも負にも偏っていないことを示している。また、平均誤差が正(負)になるときは、期間平均では予報値が実況値(実測値)よりも高かった(低かった)ことを意味する。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - A_i)}{N}$$

(F_i は予報値, A_i は実況値, N はデータ個数)

■ 2乗平均平方根誤差(RMSE: Root Mean Square Error)

- 個々の予報の誤差を、2乗して期間内で平均し、平方根を取ったものを2乗平均平方根誤差(RMSE)と呼ぶ。
- 2乗平均平方根誤差は常に正の値を示し、予報誤差の標準的な大きさを示す指数として利用される。値が小さくゼロに近いほど予報精度が高いことを意味し、個々の予報の誤差の60%~70%は、±(2乗平均平方根誤差)の間に収まる。

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (F_i - A_i)^2}{N}}$$

(F_i は予報値, A_i は実況値, N はデータ個数)

上記と合わせて、MEとRMSEを実測値の平均風速で割り、百分率で表現した相対MEと相対RMSEも評価指標として用いる。

■ 相対ME

$$\begin{aligned} \text{相対ME} &= \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - A_i) \right] \bigg/ \bar{A} \times 100 (\%) \\ &= \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{F_i}{N} - \frac{A_i}{N} \right) \right] \bigg/ \bar{A} \times 100 (\%) \\ &= \left[\bar{F} - \bar{A} \right] \bigg/ \bar{A} \times 100 (\%) \end{aligned}$$

注意

相対MEの分子を絶対値で表現したものは、相対誤差(Relative Error)と呼ばれる。

$$\text{相対誤差} = \left[\frac{|\bar{F} - \bar{A}|}{\bar{A}} \right] \times 100 (\%)$$

■ 相対RMSE

$$\text{相対RMSE} = \frac{RMSE}{A} \times 100 (\%)$$

表5 実測データと高度補正無の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)との比較

平均風速 (m/s) (実測データ)	5.7
平均風速 (m/s) (気象GPVデータ)	2.9
ME (m/s)	-2.8
RMSE (m/s)	3.4
相対ME (%)	-50.0
相対誤差 (%)	50.0
相対RMSE (%)	60.5
相関係数	0.804

表6 実測データと高度補正有(N値=5及び7)の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)との比較

平均風速 (m/s) (実測データ)	5.7
平均風速 (m/s) (気象GPVデータ)	5.8
ME (m/s)	0.1
RMSE (m/s)	2.1
相対ME (%)	-1.1
相対誤差 (%)	1.1
相対RMSE (%)	37.0
相関係数	0.754

表7 実測データと高度補正無の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)との比較

風速階級	平均風速 (m/s) (実測データ)	平均風速 (m/s) (気象GPVデータ)	相対誤差 (%)
全風速階級	5.7	2.8	49.9
5m/s未満	3.4	2.4	30.2
5m/s以上 10m/s未満	7.0	6.3	9.3
10m/s以上	12.4	10.6	14.1

表8 実測データと高度補正有(N値=5及び7)の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)との比較

風速階級	平均風速 (m/s) (実測データ)	平均風速 (m/s) (気象GPVデータ)	相対誤差 (%)
全風速階級	5.7	5.8	1.1
5m/s未満	3.4	3.2	5.5
5m/s以上 10m/s未満	7.0	7.4	5.2
10m/s以上	12.4	11.2	9.4

6. 結言

本研究では、最初に気象庁が提供する数値予報モデル(GSM, MSM, LFM)の概要を説明した。次に、九電工新エネルギー(株)の協力の下、串木野れいめい風力発電所9号機(平成24年11月より運転を開始)を対象にして、気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)の精度検証を行った。

一般に、気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)を用いて任意地点(評価地点)のデータを抽出する際、評価地点の周辺には4点の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)が存在する。一般的には、これら4点の気象GPVデータ(LFM-S, 地上高10m)をすべて用いて空間補正や高度補正を施し、評価地点のデータを作成する。しかしながら、この方法では内在する誤差や誤差要因を特定するのが極めて困難である。そこで本研究では、上述の空間補正は行わず、評価地点の最寄り点に位置する気象GPVデータ1点のみを用い、これに標高差に基づいた高度補正を施す方法を試みた。ここで、高度補正には風速5m/s未満の値にべき指数(N=4)、風速5m/s以上の値にべき指数(N=7)を適用した。その結果、本研究で提案した簡易的な高度補正を施すのみで、実測データと気象GPVデータの誤差は大幅に減少することが示された。気象GPVデータは実測値に見られる日変化の挙動や、強風が発生する時間帯(ピーク位置)などを良好に再現していることが示された。

今後は、メソ気象モデルおよび数値風況シミュレーション(CFD)との併用や高度補正のさらなる検討を行う予定である。

謝 辞

本研究の一部は、(1)西日本技術開発(株)との共同研究、局地数値予報モデルデータを用いた簡易風況推定法の試みに関わる共同研究(2014.9~2015.3)の支援を受けました。

気象GPVデータの概要などは、気象庁のホームページなどから引用させて頂きました(下記URLを参照)。

本研究で対象とした風力発電所の実測値データは、九電工新エネルギー(株)から提供頂きました。

ここに記して関係者に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- [1] 内田 孝紀, 川島 泰史, 荒屋 亮, 気象GPVデータの風力発電分野への活用に関する検討, 九州大学応用力学研究所所報, 第144号, pp.33-40, 2013
- [2] 内田 孝紀, 川島 泰史, 山間部における気象GPVデータを用いた簡易風況推定法の試み, 九州大学応用力学研究所所報, 第147号, pp.31-43, 2014
- [3] 気象庁ホームページ
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohou.html>