

# 沿岸部における 気象GPVデータを用いた簡易風況推定法の試み —鹿児島県内の風力発電所を例として—

内田 孝紀\* 川島 泰史\*\*

(2014年7月31日受理)

## Practical Use of Weather GPV Data to Wind Power Field in the Coastal Area —In the case of the wind farm in the Kagoshima prefecture—

Takanori UCHIDA and Yasushi KAWASHIMA

E-mail of corresponding author: [takanori@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:takanori@riam.kyushu-u.ac.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 GPV data is reported in the coastal area.

**Key words :** Weather GPV data, GSM, MSM, LFM, Wind energy, Coastal area

## 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<sup>1)</sup>。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、特に沿岸部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<sup>2)</sup>。

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。

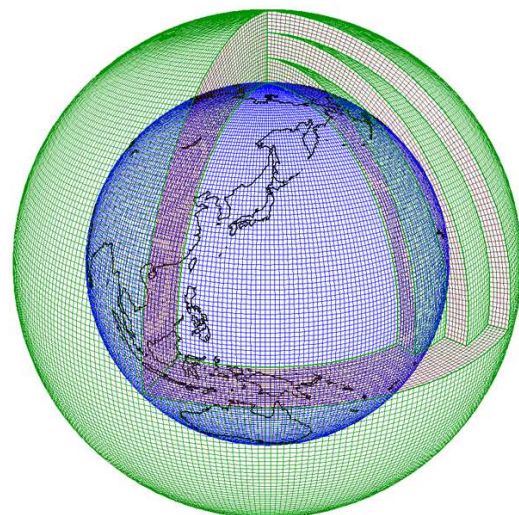


図1 数値予報に用いる全球の計算格子図

\*九州大学応用力学研究所, \*\*西日本技術開発(株)

## 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

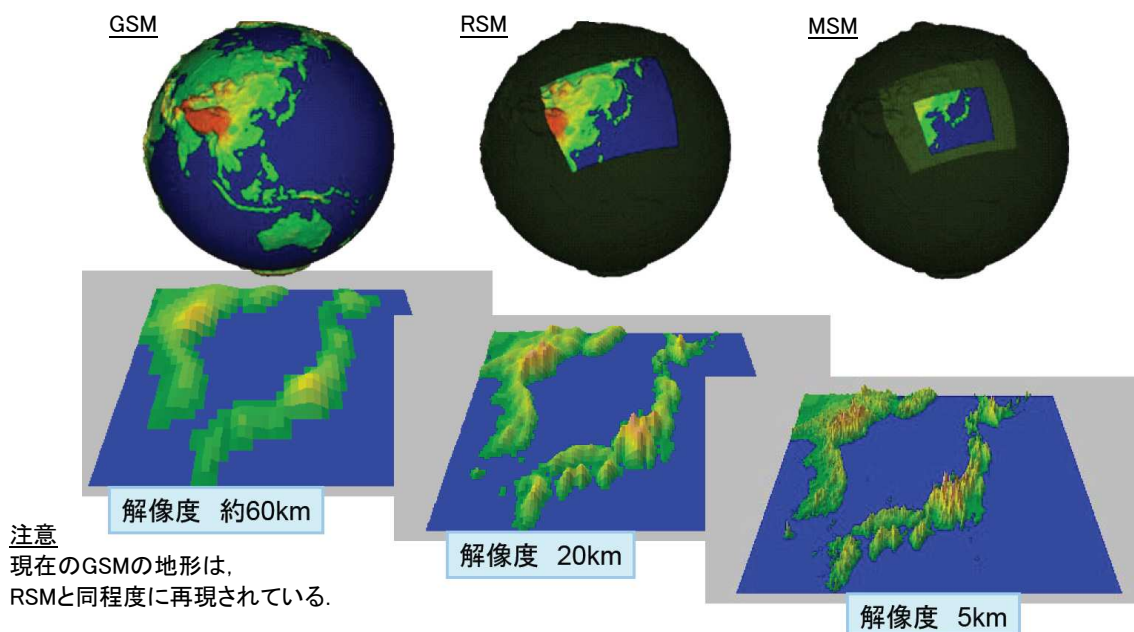


図2 数値予報モデルGSM, RSM, MSMにおける計算領域と地形解像度の比較。  
地形データの計算には、米国地質調査所(USGS)のGTOPO30の約1km解像度(緯・経度30秒)のデータが利用されている。

### 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ている高分解能モデルである。水平解像度は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(MSM-S)の検証地点概要

本研究では、前報<sup>1)</sup>で記載した鹿児島県内に位置する三ヶ所の風力発電所(便宜上、A風力発電所、B風力発電所、C風力発電所と呼ぶ)の内、B風力発電所を対象に、気象GPVデータ(MSM-S、地上10mデータ)と風車のナセル風速値(実測データ)との比較を行った(図4～図7、表1および2を参照)。A風力発電所(総出力50,400kW)は、鹿児島県の最北端、薩摩半島北西部の長島町に位置する(図5(a)を参照)。四方を東シナ海、八代海および長島海峡に囲まれており、

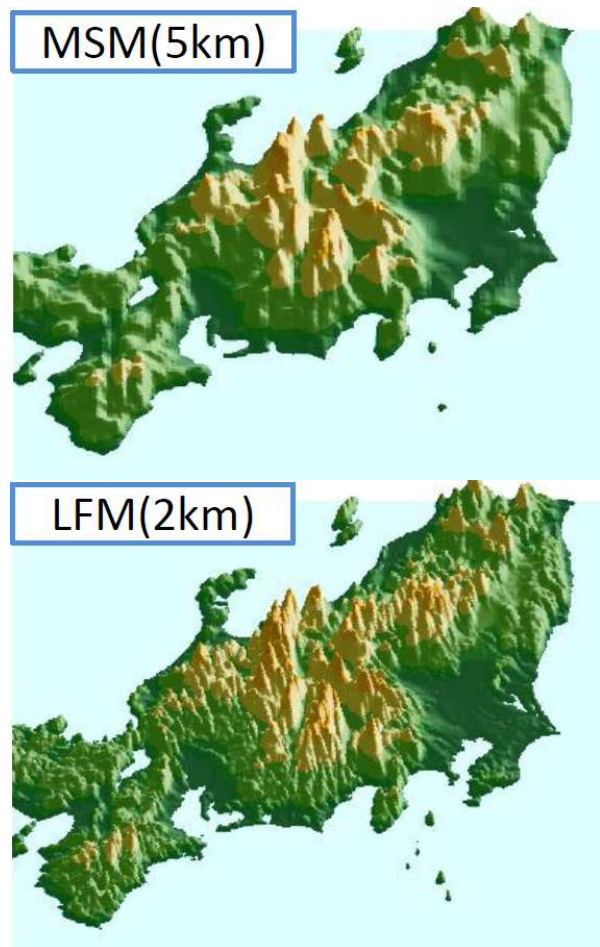


図3 MSMとLFMの地形解像度の比較

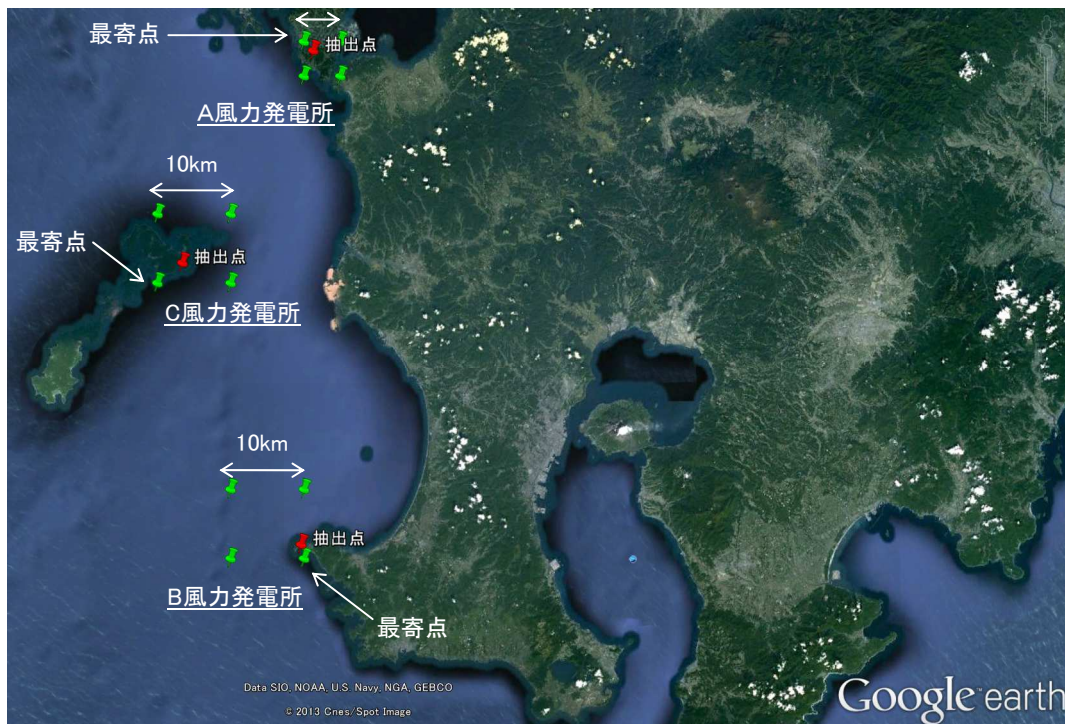


図4 本研究において気象GPVデータの検証に用いた風力発電所の位置、図中の「抽出点」は風車位置を意味する。



(a)A風力発電所



(b)B風力発電所



(c)C風力発電所

図5 図4に示す風力発電所の写真

行人岳(394m), 大中岳(403m), 矢岳(402m)などの山々が点在するなど, 平坦な地形が少ない場所である. 本発電所の21基の風車(ブレード直径92m, ハブ高さ70m, 出力2,400kW, 総出力50,400kW)は, 長島町中央部の標高250mから400mの山地尾根上および斜面に設置されている. 風車が位置する周辺は, 東西に伸びる陵線と谷地形が連続している複雑地形である. 本発電所は2008年10月に運開した.

B風力発電所は, 鹿児島県南さつま市笠沙町の野間岬(野間半島)に位置する(図5(b)を参照). 最大標高は143mである. 本発電所には, 10基の風車(ブレード直径29mと30m, ハブ高さ30mと45m, 出力300kW, 総出力3,000kW)が設置されている. 本発電所は1997年に2基, 1998年に3基, 2002年に5基が設置された.

C風力発電所は, 鹿児島県薩摩川内市里町(上甕島)に位置する(図5(c)を参照). ここには, 1基の風車(ブレード直径28m, ハブ高さ30m, 出力250kW, 総出力250kW)が設置されている. 本発電所は1990年に運転が開始された. 日本国内における商用風車のさきがけであり, 最古参の現役風車として現在でも発電を続けている.

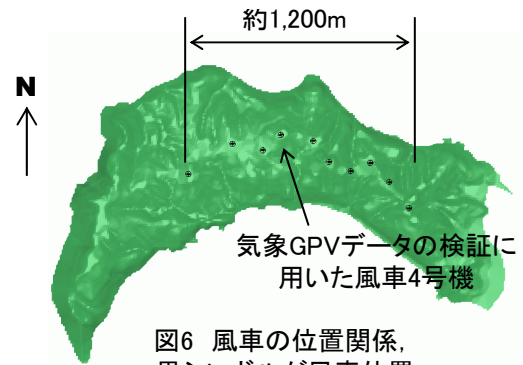


図6 風車の位置関係, 黒シンボルが風車位置

表1 B風力発電所の概要

	第1～第5発電所	第6～第10発電所
出力	300kW/発電所	
発電機型式	誘導発電機	同期発電機
カットイン風速	3.5m/s	2.5m/s
定格風速	14.4m/s	14.0m/s
カットアウト風速	24.0m/s	25.0m/s
ロータ径	29m	30m
ハブ高さ	30m (第4: 45m)	30m (第6: 45m)

表2 B風力発電所における  
風車ハブ高さと設置点標高

	風車ハブ高さ	設置点標高
1号機	30m	100m
2号機		92m
3号機		109m
4号機	45m	122m
5号機	30m	102m
6号機	45m	117m
7号機	30m	88m
8号機		95m
9号機		92m
10号機		109m

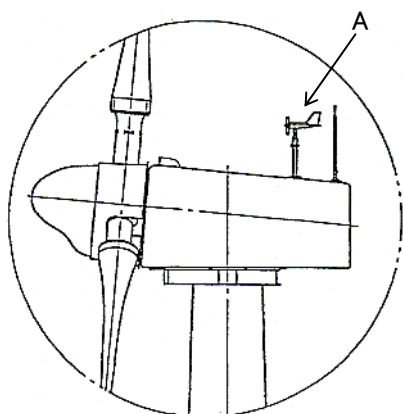


図7 風車ナセルに搭載された風向・風速計(図中のA)

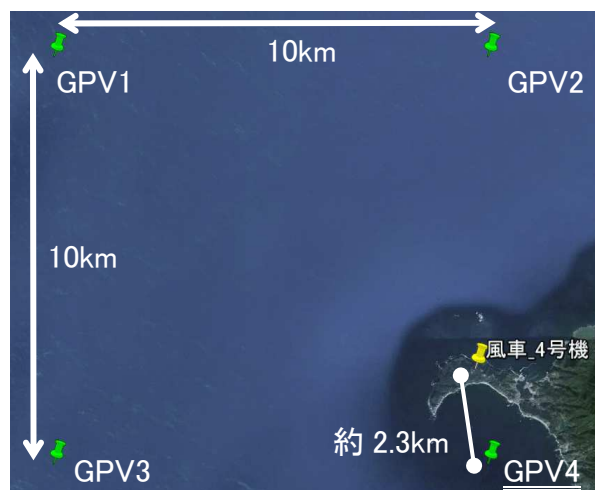


図8 風車位置と気象GPVデータの取得位置の関係

図8には、気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の取得位置と、B風力発電所における風車4号機の位置関係を示す。本研究では、風車4号機に最も近いGPV4の位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)を用いて実測データとの比較および検証を行った。検証期間は2004年4月～2005年3月の一年間(時間間隔は1時間)である。

#### 4. 気象GPVデータを用いた簡易風況推定法

図9に本研究で検討した簡易風況推定法の概念図を示す。図8に示すように、気象GPVデータ(MSM-S, 地上高

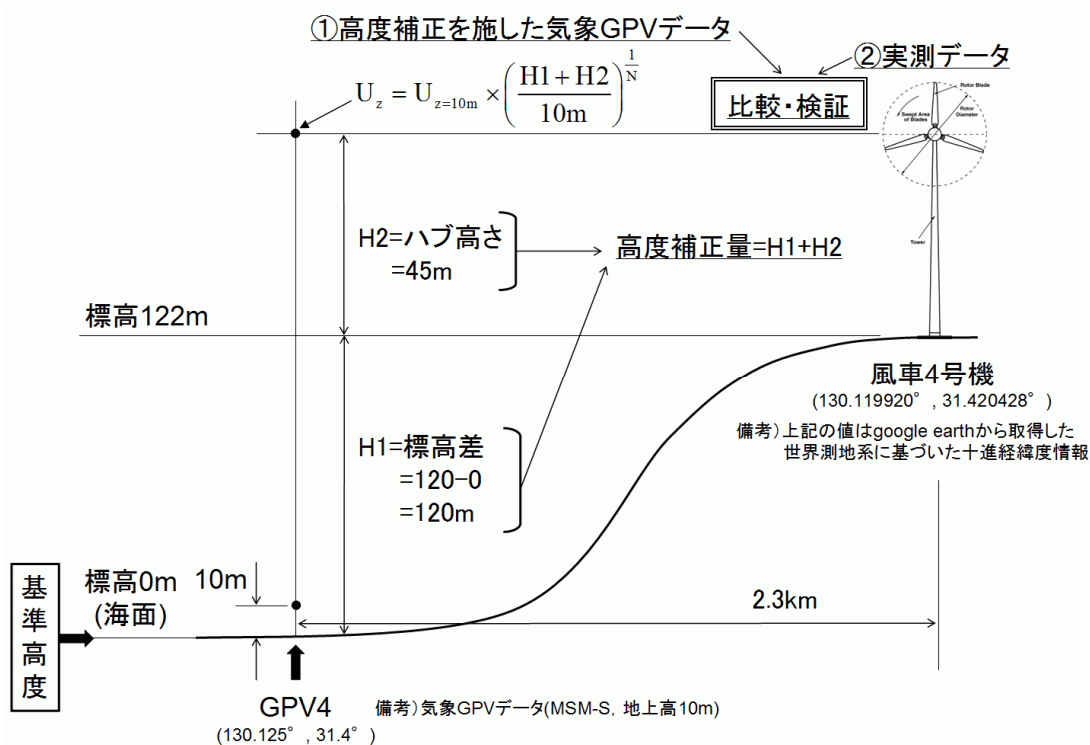


図9 気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)に基づいた簡易風況推定法の概念図, B風力発電所を例として

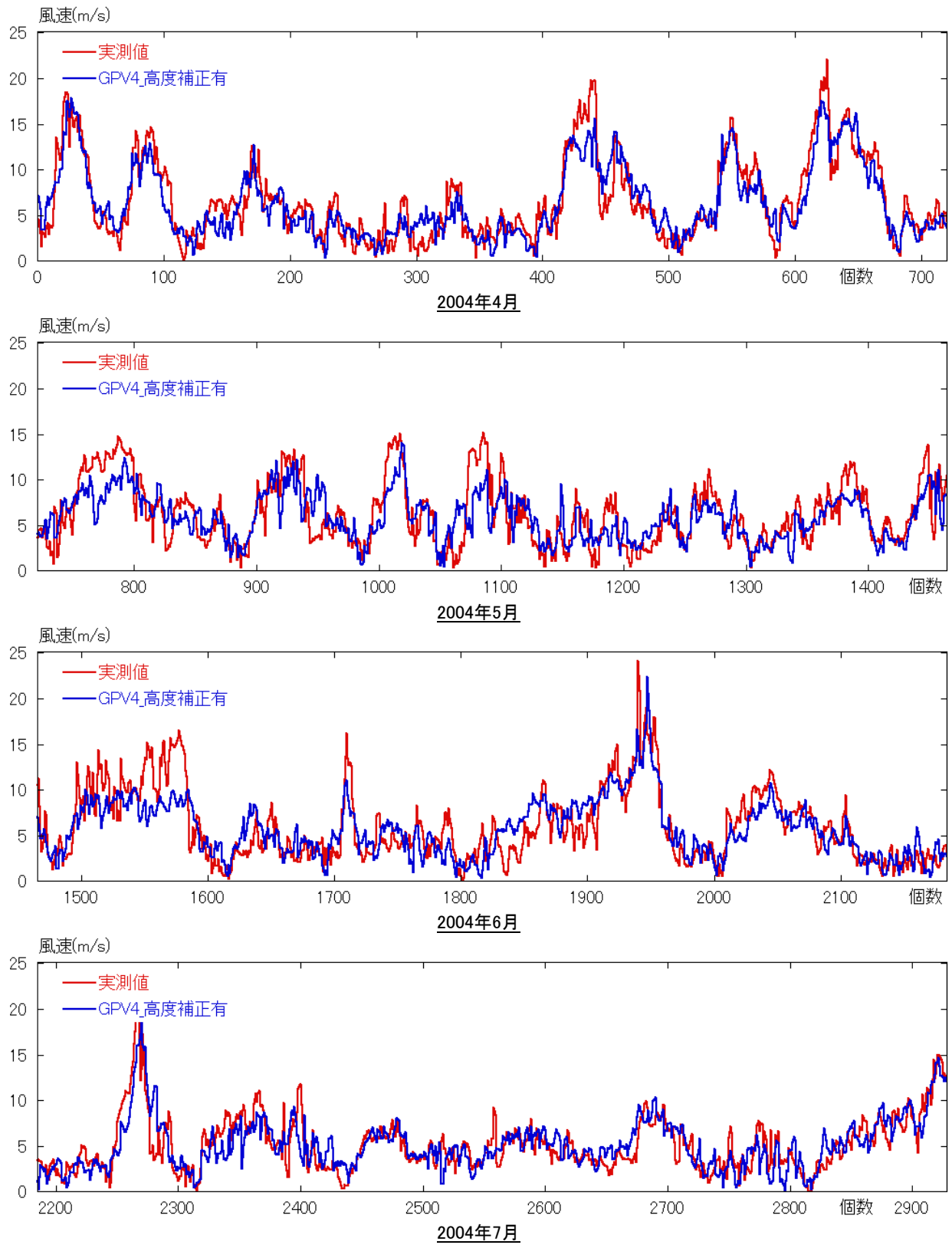


図10 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,  
 図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月~2005年3月の1年間

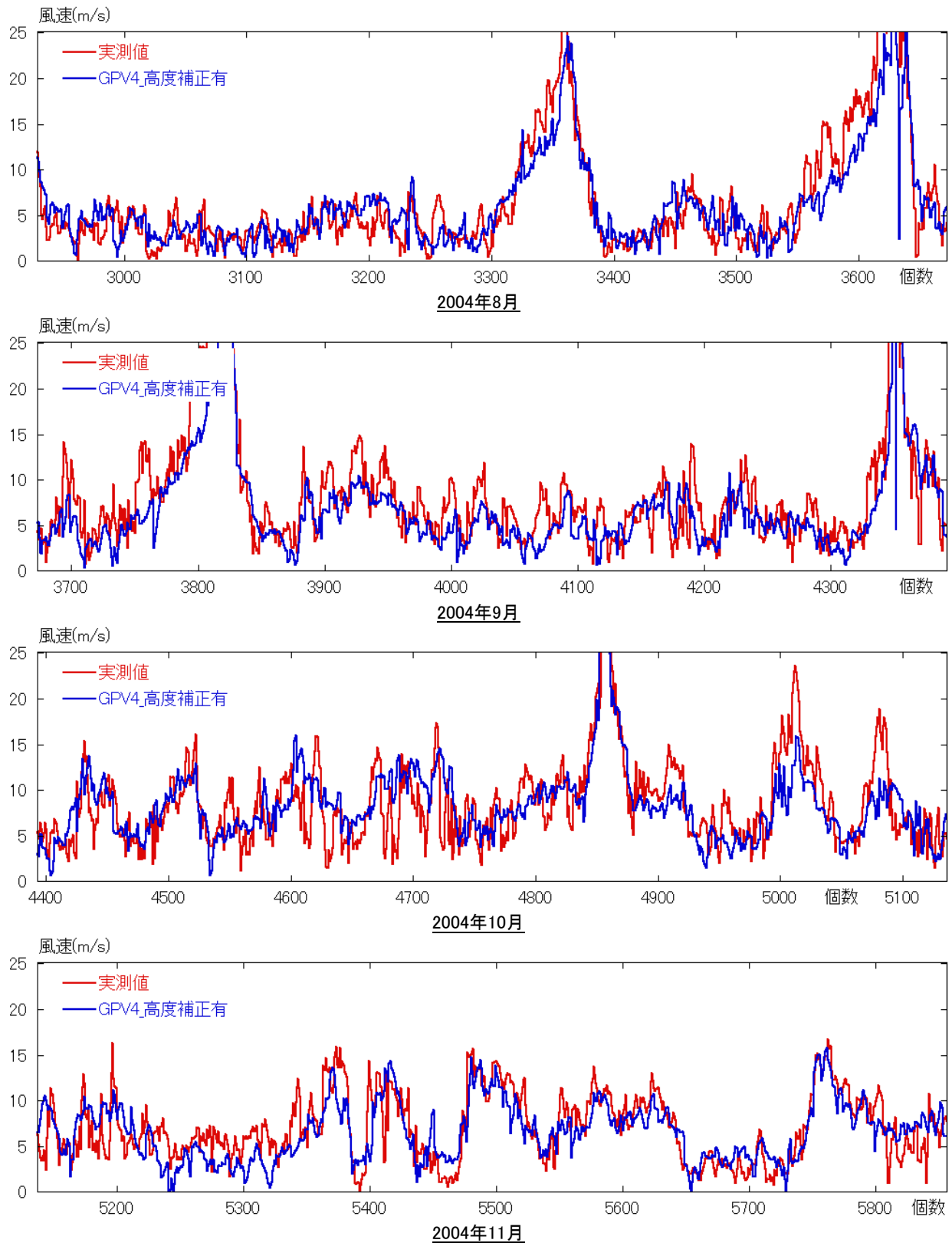


図10(続き) 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,  
図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月~2005年3月の1年間

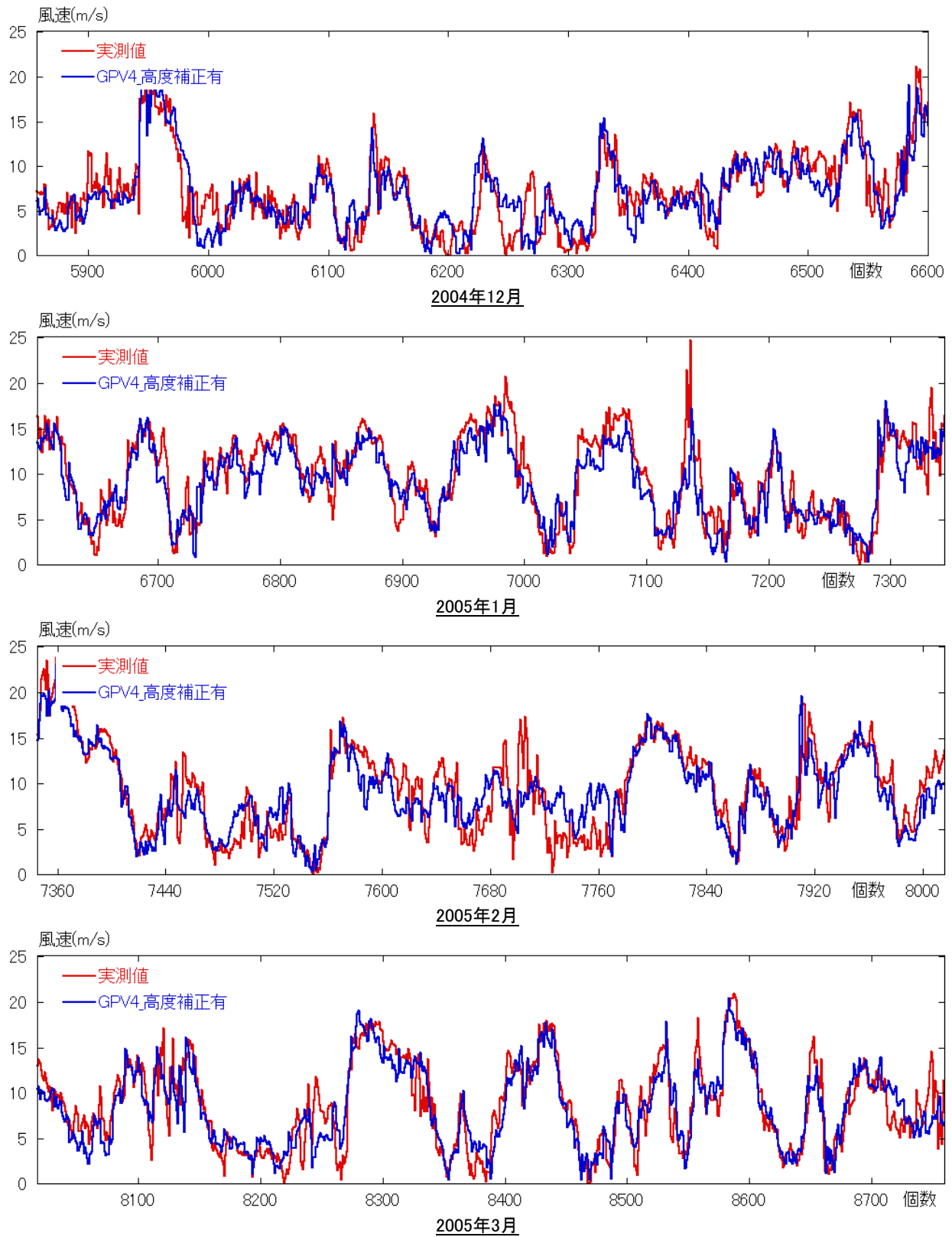


図10(続き) 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,  
 図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月~2005年3月の1年間

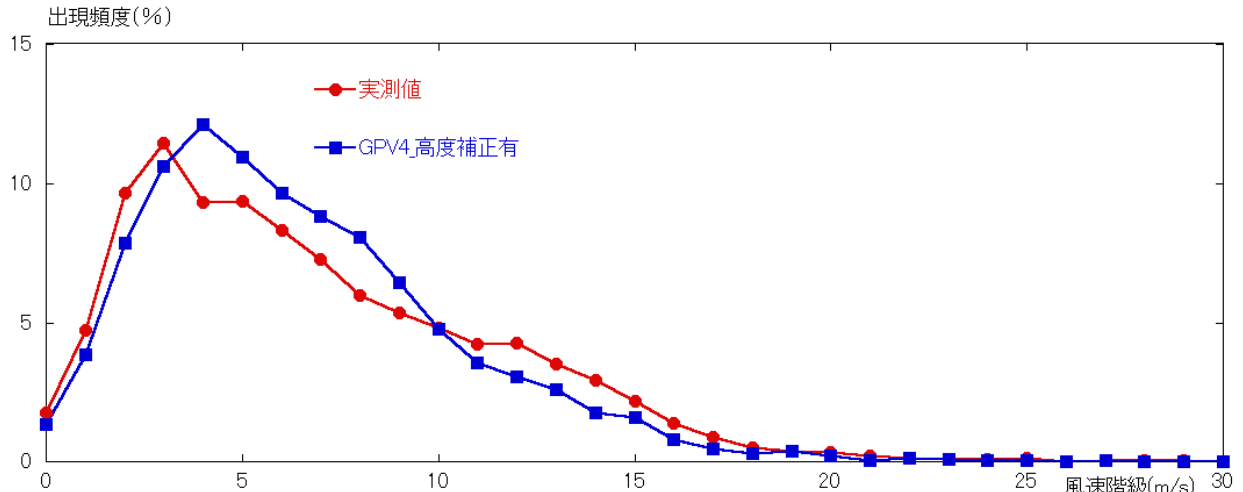


図11 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の風速階級別(m/s)の出現頻度(%)の比較, 図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月~2005年3月の1年間

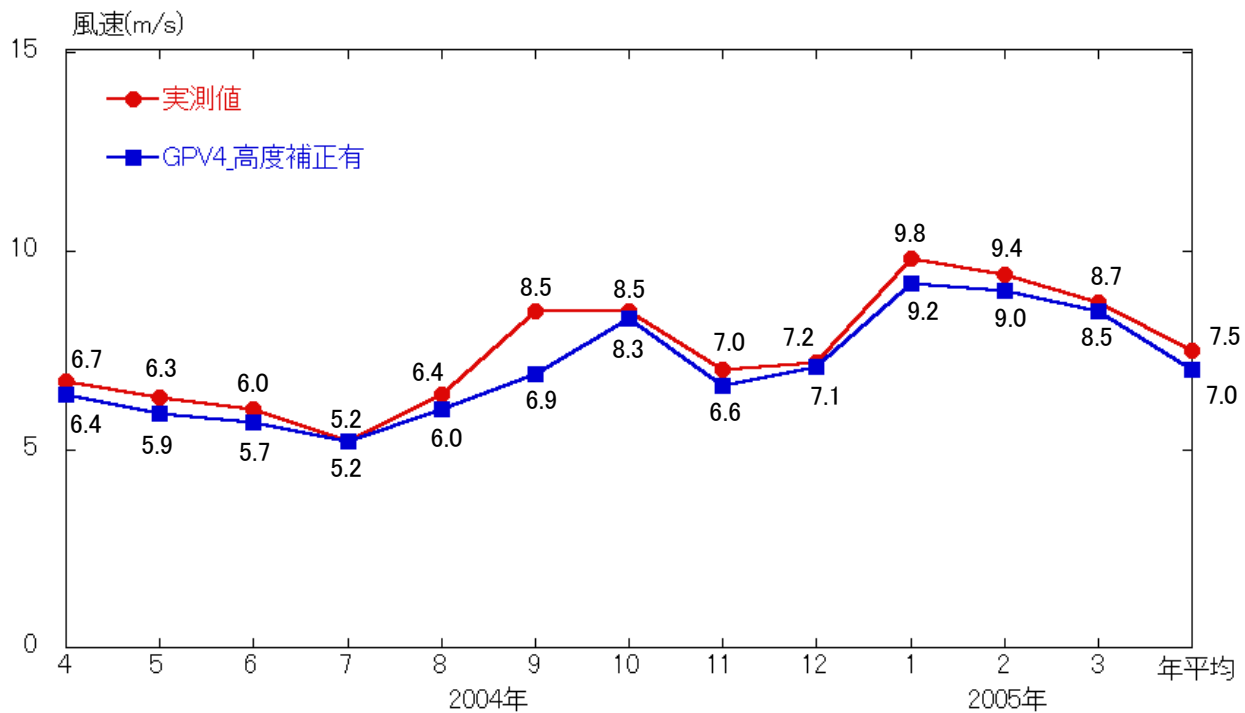


図12 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の月別および年間平均風速(m/s)の比較, 図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月~2005年3月の1年間

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(MSM-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(MSM-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점에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, 高度補正にはべき指数(N値=20)を適

用する. 得られた結果を図10~図13に示す.

まず注目して頂きたいのは, 本研究の場合, 図8に示すように実測データとGPV4の取得位置は, 直線距離で約2.3kmの隔離があるにも関わらず, 図10で示した実測データと気象GPVデータ(高さ補正有)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(相関係数0.848). 気象GPVデータ(高さ補正有)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B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。各々の時刻で実測データと気象GPVデータ(高さ補正有)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。図11～図13

に示す結果においても、実測データと気象GPVデータ(高さ補正有)は良好な一致を得た。

本研究では、別の期間においても実測データと気象GPVデータ(高さ補正有)の比較を実施した。ここでは、紙面の都

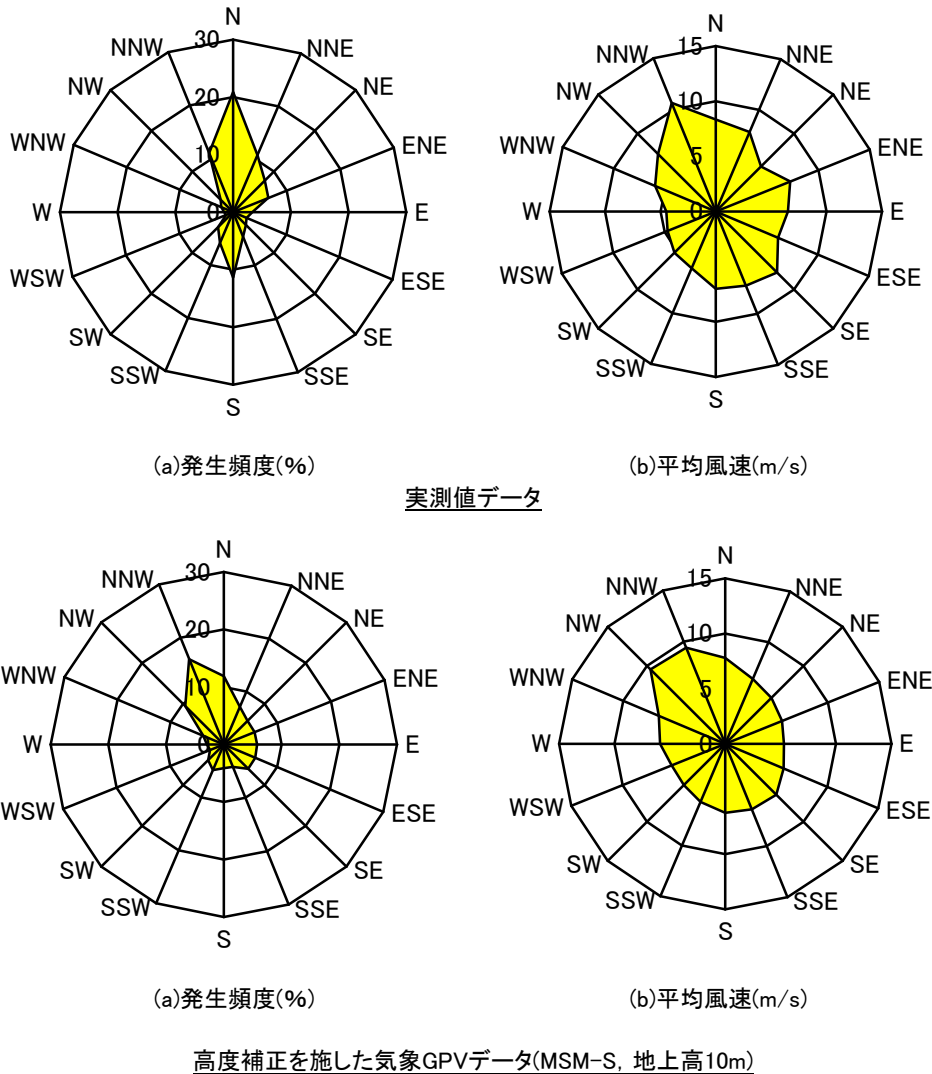


図13 風配図の比較, 図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2004年4月～2005年3月の1年間

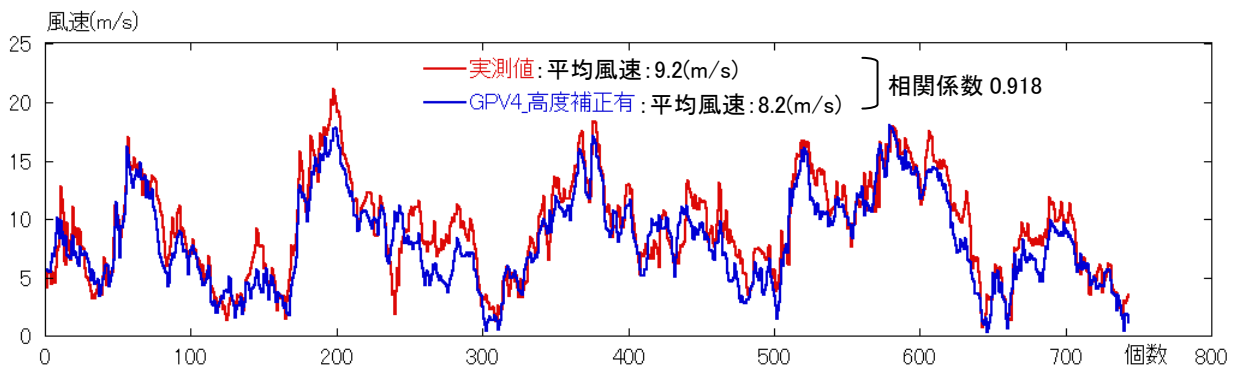


図14 実測データと高度補正を施した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の時系列データの比較,

図8に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ, 風車4号機, 2011年12月の1ヶ月間

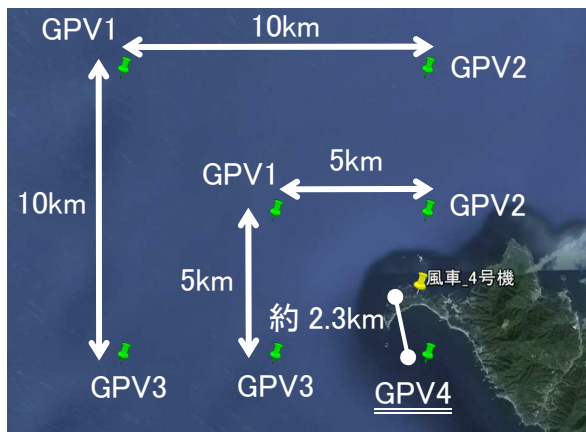


図15 風車位置と気象GPVデータの取得位置の関係

合上, 2011年の12月の1ヶ月間の結果を図14に示す. ここで, 先に述べたようにメソ数値予報モデルMSMは, 2006年3月のスーパーコンピュータシステムの更新に伴い, 水平解像度が10kmから5kmに高解像度化した(図15を参照). 検討期間が異なる図14においても, 実測データと気象GPVデータ(高さ補正有)には良好な一致が見られた.

表5には, 図10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. 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,  $\pm$  (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

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

#### 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

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

さらに本研究では, 図8および図15に示す風車4号機に最も近いGPV4の位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)を用いて, 過去10年間分における風況特性の経年変化を調べた. ここでは, 高度補正は行わず, 地上高10mのデータに基づいて解析を行った. 得られた結果を図16~図18に示す. これらの結果を観察すると, この地域では有意な経年変化は見られないことが示された.

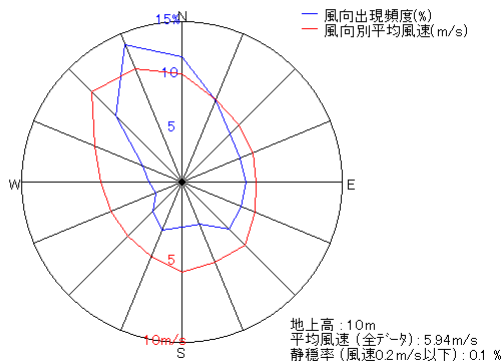
表5 実測データと高度補正有(N値=20)の気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)との比較

平均風速 (m/s) (実測データ)	7.5
平均風速 (m/s) (気象GPVデータ)	7.0
ME (m/s)	-0.4
RMSE (m/s)	2.6
相対ME (%)	-5.6
相対誤差 (%)	5.6
相対RMSE (%)	35.4
相関係数	0.848

## 6. 結言

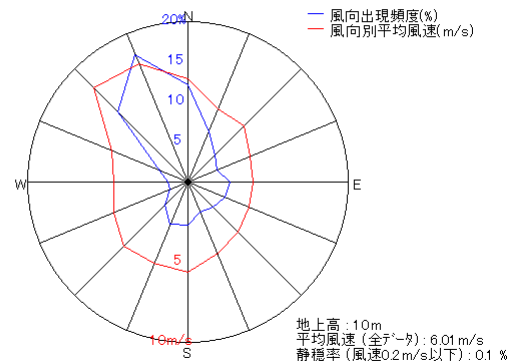
本研究では、最初に気象庁が提供する数値予報モデル(GSM, MSM, LFM)の概要を説明した。次に、沿岸部に位置する鹿児島県内の風力発電所を対象に、気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)の検証を行った。本研究では、評価地点の最寄り点に位置する気象GPVデータ1点を用い、これに標高差に基づいた高度補正を施す方法を試みた。高度補正にはべき指数(N値=20)を適用した。その結果、本研究で提案した簡易的な高度補正を施すのみで、実測データと気象GPVデータの誤差は大幅に減少することが示された。気象GPVデータは実測値に見られる日変化の挙動や、強風が発生する時間帯(ピーク位置)などを良好に再現していることが示された。さらに、風況特性の経年的な変化を調査する上でも気象GPVデータは有効であることを示した。

風配図 (データ期間: 2004年1月1日0時 ~ 2004年12月31日23時)



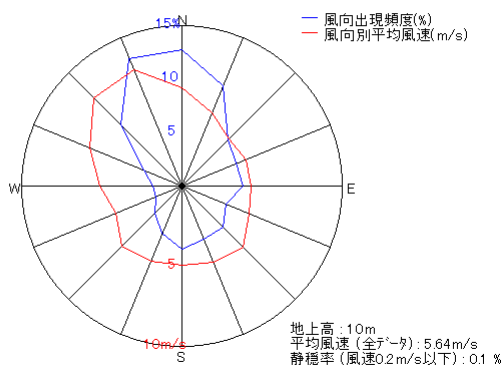
2004年

風配図 (データ期間: 2005年1月1日0時 ~ 2005年12月31日23時)



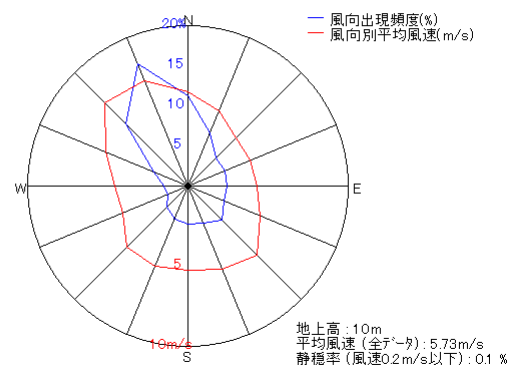
2005年

風配図 (データ期間: 2006年1月1日0時 ~ 2006年12月31日23時)



2006年

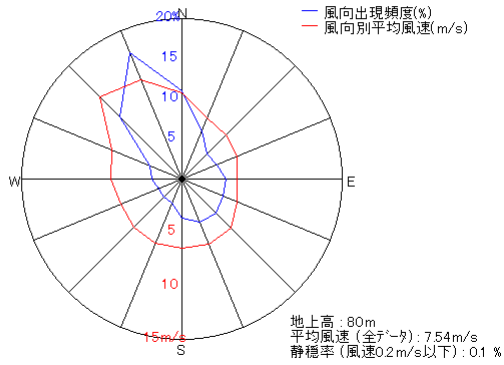
風配図 (データ期間: 2007年1月1日0時 ~ 2007年12月31日23時)



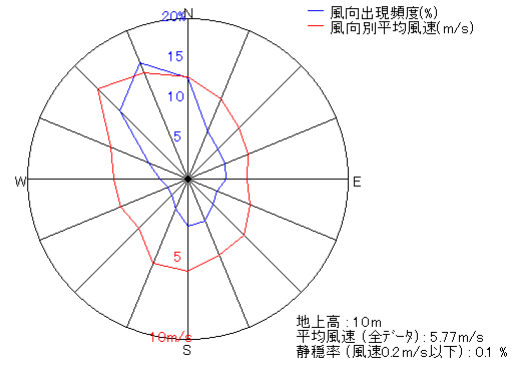
2007年

図16 図8および図15に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)から得られた風配図, 高度補正無し

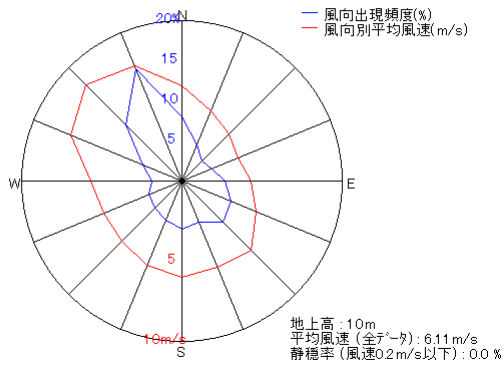
風配図 (データ期間: 2008年1月1日0時 ~ 2008年12月31日23時)

**2008年**

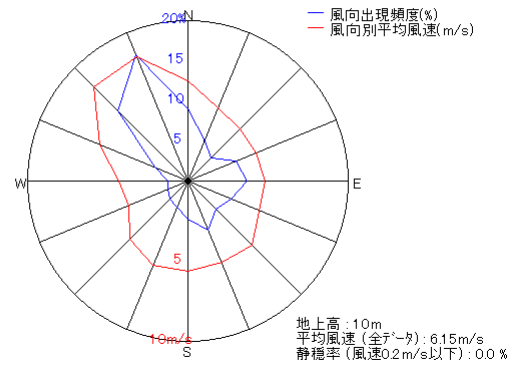
風配図 (データ期間: 2009年1月1日0時 ~ 2009年12月31日23時)

**2009年**

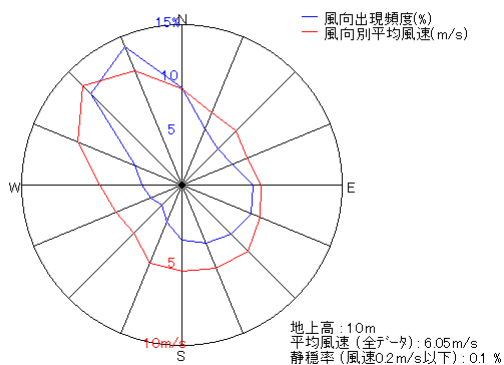
風配図 (データ期間: 2010年1月1日0時 ~ 2010年12月31日23時)

**2010年**

風配図 (データ期間: 2011年1月1日0時 ~ 2011年12月31日23時)

**2011年**

風配図 (データ期間: 2012年1月1日0時 ~ 2012年12月31日23時)

**2012年**

風配図 (データ期間: 2013年1月1日0時 ~ 2013年12月31日23時)

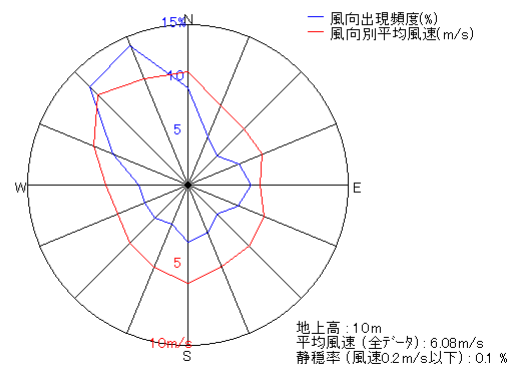
**2013年**

図16(続き) 図8および図15に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)から得られた風配図, 高度補正無し

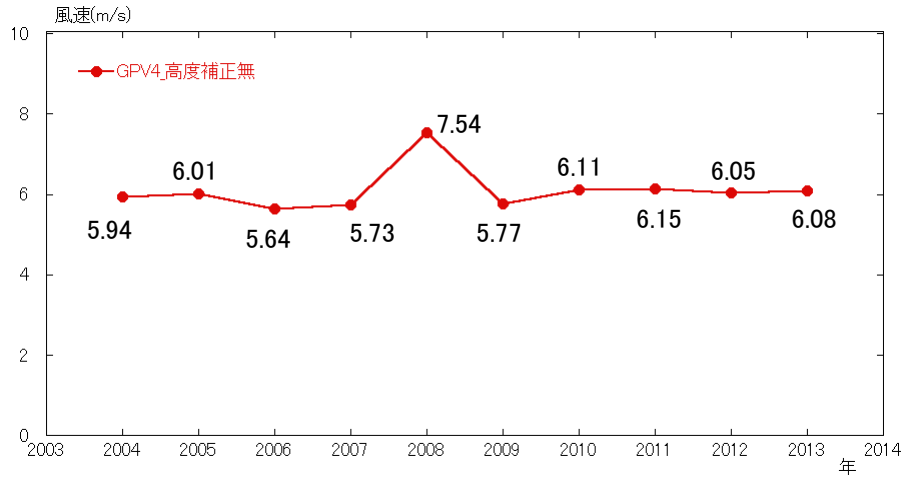


図17 図8および図15に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)から得られた年間平均風速(m/s)の経年変化, 高度補正無し

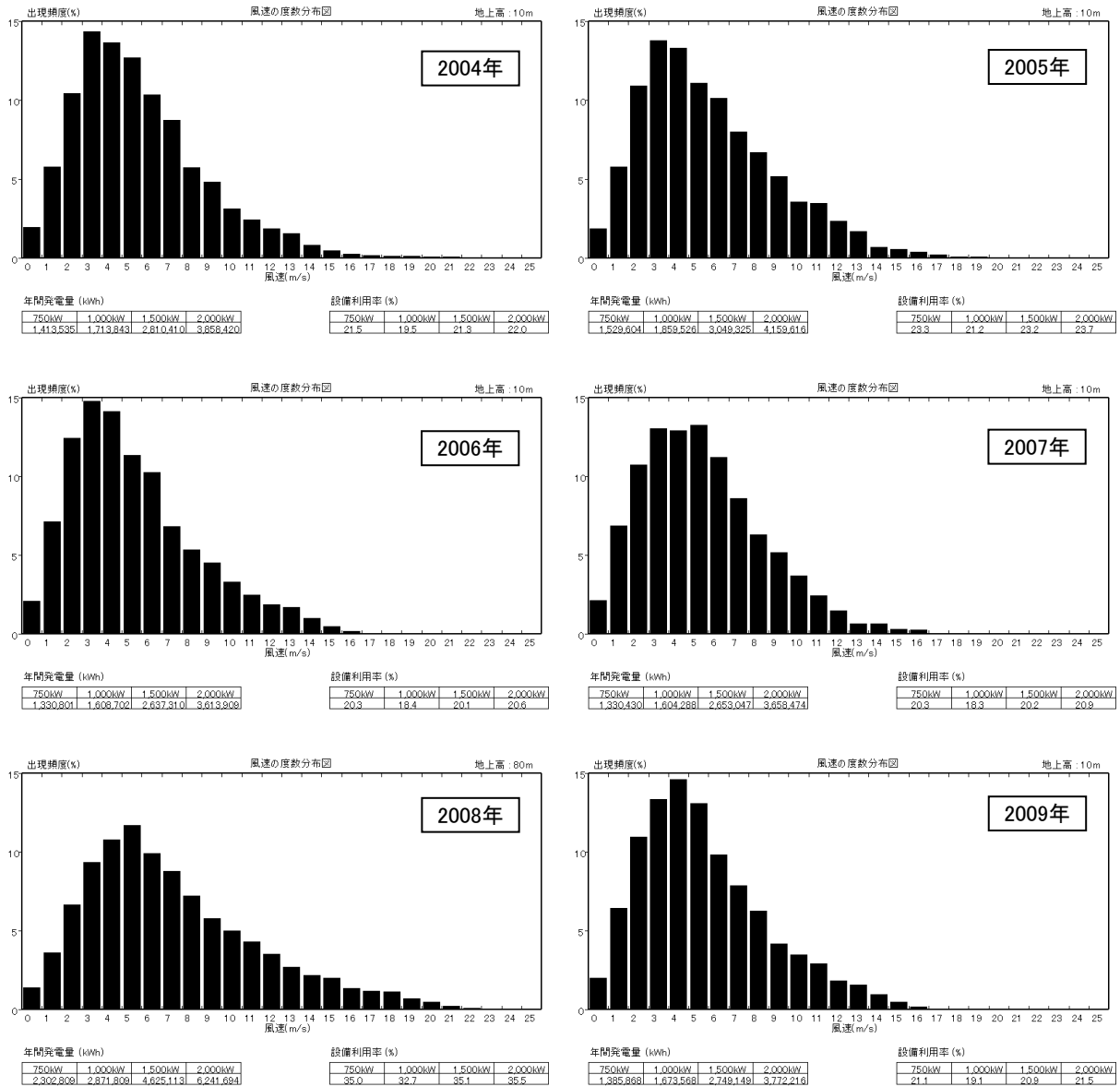


図18 図8および図15に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)から得られた風速階級別(m/s)の出現頻度(%), 高度補正無し

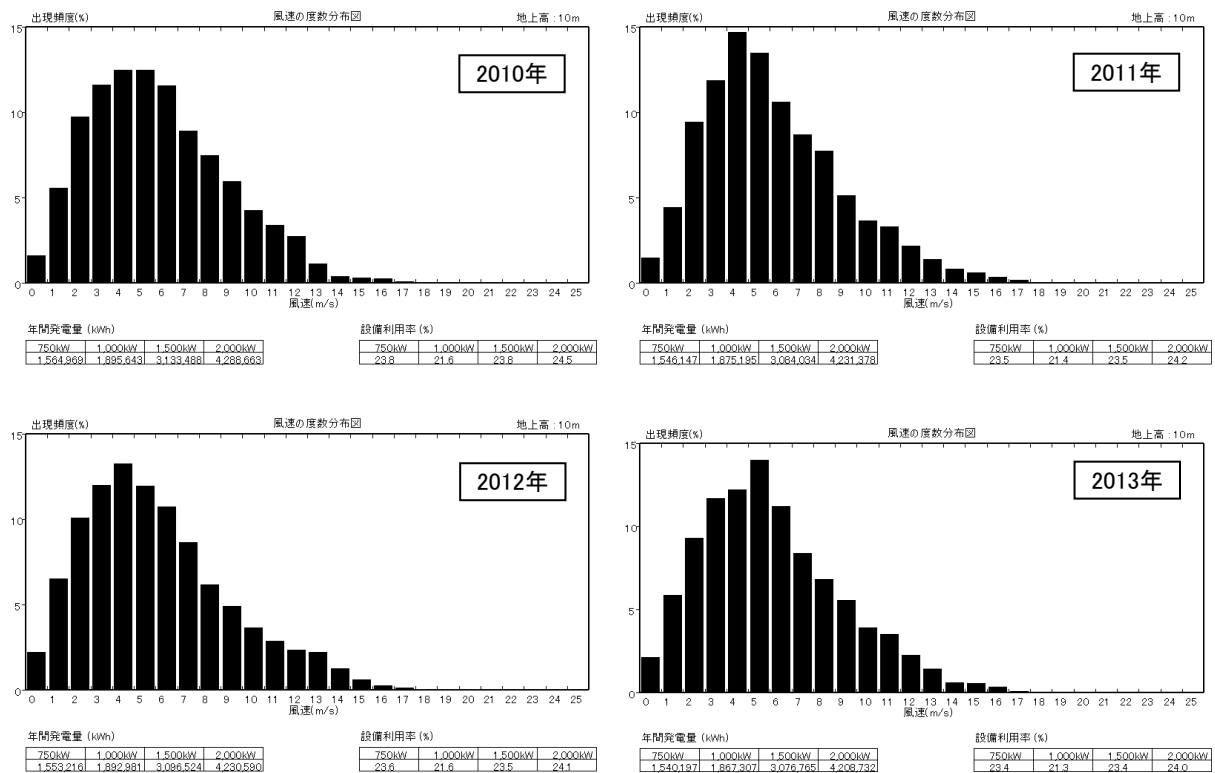


図18(続き) 図8および図15に示すGPV4位置で取得した気象GPVデータ(MSM-S, 地上高10m)から得られた風速階級別(m/s)の出現頻度(%), 高度補正無し

## 謝辞

本研究の一部は、(1)科学研究補助費, 基盤研究(B), 震災特区の大気環境改善と風力発電の適切な普及に資する狭域数値風況予測技術の開発(2012.4~2015.3), 研究課題番号:24310120, (2)科学研究補助費, 挑戦的萌芽研究, 数値風況予測技術リアムコンパクトをコア技術とした風車の安全運転に関する研究開発(2013.4~2015.3), 研究課題番号:25560166, (3)九州電力(株)および西日本技術開発(株)との共同研究, GPVデータを用いた風況予測手法の確立に関わる共同研究(2012.5~2013.3)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、九州電力(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] 気象庁ホームページ  
<http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/yohou.html>