

小型ドップラーソーダを用いた相関法による風況予測

岡山大学 正会員 比江島 慎二
岡山大学 学生会員 ○樋吉 佑一

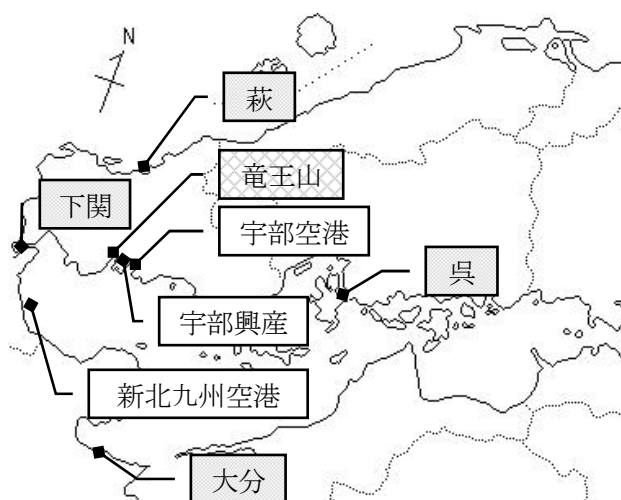
1. 緒言

現在、世界的な温暖化・化石燃料の枯渇危惧などによって新エネルギー技術の確立がもてられている。風力発電はその有力候補であるが導入には精密な風況データの解析・評価が必要であり風車の大型化も伴って風況観測に必要なコスト・期間が増加している¹⁾。

通常の風況観測は 30m ～ 50m 程度の観測塔に風速計を設置して行われるが、そのような高さの塔の建設は大がかりである上、複数地点の風況観測には多大なコストがかかる。一方、可搬性の高い小型ドップラーソーダを用いれば、場所を容易に変えながら様々な地点の風況観測が行えるとともに、任意高度の風況測定も可能である。しかし、ドップラーソーダは高い消費電力のため、一般の風速計のような長期観測は困難である。

本研究では、短期間に小型ドップラーソーダで観測した風速データとそれと同時刻の周辺の気象官署等における風速・気温・気圧などの気象データとの相関関係から風速推定式を求め、その推定式に周辺気象官署の長期間の気象データを当てはめることによってドップラーソーダ地点の長期間の風況特性や風力発電量を推定する手法について検討した。

2. 風速推定地点とその周辺の気象データ地点



図－1 風速推定地点と周辺の気象データ地点

図－1 に示す山口県山陽小野田市の竜王山山頂の風速の推定を目的として、同地にて 2007 年 4 月～6 月の各月

3 日ずつ昼間 8 時間程度のドップラーソーダ観測を行い、地上高さ 30m で 558 個、70m で 521 個の 10 分間平均風速観測データを得た。観測に用いた小型ドップラーソーダは写真－1 に示す Scintec 社製 SFAS64 である。同時に、竜王山山頂には風速推定値を評価するための基準となる風速計も設置している。また、竜王山から 6km 程度離れた宇部興産コンビナートに竜王山山頂の風速推定に用いる風速計を設置するとともに、同じく推定に用いる観測データとして気象庁アメダス観測所である宇部空港、新北九州空港の風速・気温、下関・呉・大分・萩の気圧の各データを用意した。



写真－1 ドップラーソーダ

3. 昼夜の風況特性について

表－1 各地点の昼夜の平均風速

昼6:00～18:00 夜18:00～6:00	竜王山 風速計	宇部興産 風速計	アメダス 宇部空港	アメダス新 北九州空港
昼 風速(m/s)	4.3	5.2	4.8	5.0
夜 風速(m/s)	4.2	4.4	3.8	4.3
昼・夜の差(%)	2.4	18.2	26.3	16.3

瀬戸内海沿岸に位置する竜王山・宇部一帯は規則的な海陸風が吹くことが予想され、昼（6:00～18:00）と夜（18:00～6:00）の平均風速の違いについて、2007 年 4 月 25 日～6 月 30 日の期間の各地点の風速計データにより調べた。表－1 に示すように、竜王山以外では昼夜で 2 割程度の風速差があるのに対し、竜王山は昼夜の差が小さい。竜王山は標高 136m であり、平地の他地点よりも高い位置にあることが原因と考えられる。

このような昼夜の風速特性を考慮すると、竜王山におけるドップラーソーダ観測は昼間のみであり、他地点の風速データとの昼間だけの相関関係から得られた風速推定式を用いた場合、当然、夜間の風速に対する推定精度は低下する。したがって、本研究では、昼間 6:00～18:00 に限定して風速推定および推定精度の評価を行った。

4. 風速の推定方法

竜王山におけるドップラーソーダ観測による風速と、同時刻の他地点における風速・気温・気圧傾度との重回帰分析により、竜王山ドップラーソーダ地点における風速推定式を導いた。竜王山のドップラーソーダと宇部興産に設置した風速計データは 0.1m/s 階級ごとの 10 分間平均風速だが、アメダスデータである宇部空港と新北九州空港の風速は 1.0m/s 階級ごとの 10 分間平均風速である。気圧傾度は、東西方向の気圧傾度と南北方向の気圧傾度を重回帰分析において別々の独立変数として扱い、東西気圧傾度として図－1 に示す呉～下関間、南北気圧傾度として萩～大分間の気圧差から求めた気圧傾度を用いる。気圧データは 1 時間平均値しか得られなかったため 10 分ごとの値に線形補間した。気温データは、1 日ごとの日最低気温からの気温差を重回帰分析における独立変数として用いた。気温データも 10 分間ごとのデータである。竜王山の風速推定に用いる気象データの組み合わせにより、表－2 に示す 21 通りについて解析した。

表－2 風速推定のケース

Case No	推定に用いたデータ
1	宇部興産(風速)
2	宇部興産(風速)・宇部空港(気温)
3	宇部興産(風速)・気圧傾度
4	宇部興産(風速)・宇部空港(気温)・気圧傾度
5	宇部空港(風速)
6	宇部空港(風速)・宇部空港(気温)
7	宇部空港(風速)・気圧傾度
8	宇部空港(風速)・宇部空港(気温)・気圧傾度
9	新北九州空港(風速)
10	新北九州空港(風速)・新北九州空港(気温)
11	新北九州空港(風速)・気圧傾度
12	新北九州空港(風速)・新北九州空港(気温)・気圧傾度
13	宇部興産(風速)・宇部空港(風速)
14	宇部興産(風速)・新北九州空港(風速)
15	宇部空港(風速)・新北九州空港(風速)
16	宇部興産(風速)・宇部空港(風速)・新北九州空港(風速)
18	宇部空港(気温)・気圧傾度
19	新北九州空港(気温)・気圧傾度
20	宇部空港(気温)・新北九州空港(気温)・気圧傾度
21	宇部空港(風速・気温)・新北九州空港(風速・気温)・気圧傾度

5. 推定結果と精度検証

表－2 の各ケースで得られる推定式から求めた竜王山の推定風速の精度を検証するため、竜王山ドップラーソーダ観測地点とほぼ同地点で観測した風速計の実測値との比較を行った。本研究では、通常の風況精査²⁾などで観測される地上高さ 30m と風車のハブ高さを想定した地上高さ 70m の 2 高度で比較する。風速計実測値は、ドップラーソーダによる観測値との相関関係から、30m と 70m の高さの値に換算し、これを参照風速と呼ぶことにする。竜王山における 30m と 70m の参照風速はそれぞれ 5.3m/s および 7.1m/s である。

2007 年 4 月 25 日～2007 年 6 月 30 日の竜王山周辺の気象観測データから推定した竜王山の推定風速と参照風速の比較を表－3, 4 に示す。表には、推定風速と参照風速の平均風速比のほか、次式の変動係数比、相関係数、RMSE が示してある。

$$\text{変動係数の定義式} : \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}} \right) / \left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}} \right) = \left(\frac{\sqrt{\sum u_{yi}^2}}{\bar{y}} \right) / \left(\frac{\sqrt{\sum u_{xi}^2}}{\bar{x}} \right)$$

$$\text{相関係数の定義式} : \rho_{xy} = \frac{\sum u_{xi} u_{yi}}{\sqrt{\sum u_{xi}^2} \sqrt{\sum u_{yi}^2}}$$

$$\text{RMSE の定義式} : \sqrt{\frac{(E1^2 + E2^2 + \dots + En^2)}{n}}$$

ここに、

En : 各誤差

ρ_{xy} : 風況精査シミュレーションの相関係数

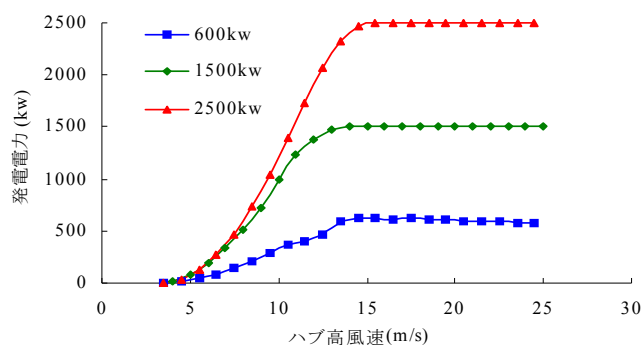
$\bar{U}_x, \bar{U}_y$: 風況精査及びシミュレーションの観測期間内平均風速(m/s)

σ_x, σ_y : 風況精査及びシミュレーションの観測期間内標準偏差(m/s)

u_{xi} : 風況精査による 1 時間平均風速(m/s)

u_{yi} : シミュレーションによる 1 時間値(m/s)

また、表－3, 4 には、図－2 の出力曲線に示す 600kw, 1500kw, 2500kw の各風車を想定して、推定風速と参照風速それぞれから算出した風力発電量の差による発電量の推定誤差も示している。



図－２ 風車の出力曲線

表－３ 推定風速の精度検証（地上高さ 30m）

Case No	平均風速推定値	平均風速の比	変動係数の比	相関係数	RMSE	発電量の推定誤差(%)		
	(m/s)	(-)	(-)	(-)	(m/s)	600kw	1500kw	2500kw
1	4.9	0.94	1.00	0.96	1.6	-13.4	-11.1	-15.2
2	5.3	1.00	0.98	0.96	1.6	-3.8	-1.5	-6.3
3	5.0	0.94	1.01	0.97	1.5	-10.9	-8.9	-11.9
4	5.3	1.01	0.99	0.97	1.5	0.3	2.0	-1.2
5	5.1	0.97	0.98	0.95	1.9	-25.2	-21.3	-27.8
6	5.3	1.00	0.96	0.95	1.8	-12.3	-8.6	-16.6
7	5.1	0.97	0.98	0.96	1.7	-13.2	-10.6	-15.7
8	5.4	1.01	0.97	0.96	1.7	-4.5	-2.0	-7.6
9	5.2	0.98	1.00	0.95	1.9	-9.4	-8.4	-10.3
10	5.7	1.07	0.98	0.94	2.0	15.8	16.2	15.3
11	5.2	0.98	1.01	0.95	1.8	-0.6	-1.9	0.2
12	5.6	1.06	0.98	0.95	1.9	15.0	13.7	15.4
13	5.0	0.95	0.99	0.96	1.6	-14.6	-11.5	-16.8
14	5.0	0.96	0.99	0.97	1.5	-12.3	-9.7	-14.2
15	5.2	0.99	0.97	0.96	1.6	-12.5	-9.0	-15.3
16	5.1	0.97	0.98	0.97	1.5	-13.9	-10.7	-16.1
18	5.4	1.03	1.01	0.92	2.5	11.5	9.9	13.8
19	5.5	1.05	1.00	0.92	2.5	15.4	13.3	18.0
20	5.5	1.05	1.00	0.92	2.5	15.0	13.1	17.7
21	5.5	1.04	0.97	0.96	1.6	3.4	4.3	1.5

表－４ 推定風速の精度検証（地上高さ 70m）

Case No	平均風速推定値	平均風速の比	変動係数の比	相関係数	RMSE	発電量の推定誤差(%)		
	(m/s)	(-)	(-)	(-)	(m/s)	600kw	1500kw	2500kw
1	6.5	0.91	1.00	0.96	2.2	-15.1	-13.1	-16.4
2	6.9	0.97	0.98	0.96	2.1	-6.5	-4.0	-7.6
3	6.5	0.92	1.00	0.97	2.0	-14.2	-12.5	-15.3
4	6.9	0.98	0.98	0.97	2.0	-4.6	-3.2	-5.2
5	6.7	0.94	0.98	0.95	2.5	-14.6	-11.4	-17.3
6	6.9	0.97	0.96	0.95	2.5	-9.8	-5.4	-12.5
7	6.7	0.94	0.98	0.96	2.3	-13.1	-10.0	-15.4
8	6.9	0.98	0.97	0.96	2.2	-7.4	-3.8	-9.3
9	6.9	0.97	1.00	0.95	2.6	-4.5	-4.2	-3.8
10	7.4	1.05	0.98	0.95	2.6	9.6	9.2	10.6
11	6.9	0.97	1.01	0.95	2.4	-5.8	-6.3	-6.1
12	7.4	1.04	0.98	0.95	2.4	5.9	5.6	7.0
13	6.6	0.93	0.98	0.96	2.1	-13.8	-10.9	-16.3
14	6.7	0.95	0.99	0.97	1.9	-10.5	-8.6	-12.0
15	6.9	0.98	0.97	0.96	2.1	-8.6	-5.8	-11.8
16	6.8	0.96	0.98	0.97	1.9	-10.0	-7.3	-12.5
18	7.0	0.99	1.01	0.92	3.2	-2.2	-4.0	-1.5
19	7.2	1.02	1.00	0.92	3.3	1.8	-0.8	2.6
20	7.2	1.02	1.00	0.91	3.3	2.9	-0.2	3.8
21	7.2	1.02	0.97	0.97	2.0	0.7	2.7	-0.1

NEDOの「風力発電システム導入のための風況予測手法に関する検討」³⁾によれば、推定誤差の許容範囲として、 $0.85 \leq \text{平均風速比} \leq 1.15$ 、 $0.85 \leq \text{変動係数比} \leq 1.15$ 、相関係数 ≥ 0.8 が示されているが、表－3,4のいずれもこれらの条件を十分に満たしており、高い推定精度が得られていると判断できる。

表－3, 4によれば、宇部興産風速を用いた Case1～4、あるいは宇部空港風速を用いた Case5～8 の発電量推定誤差で見ると、風速パラメータに加えて気温と気圧傾度のパラメータの導入により推定精度が向上するのが分かる。特に気温パラメータの効果が高い。ただし、新北九州空港風速を用いた Case9～12 では気温パラメータの効果はあまり現れていない。新北九州空港は、宇部興産や宇部空港に比べて、竜王山からの距離が遠いため、特に竜王山風速に対する新北九州空港気温の相関性が低いのが原因と思われる。しかし、発電量の推定精度自体は、いずれの地点のケースでも同等な精度が得られている。

複数地点の風速パラメータのみを用いた結果が Case13～16 である。単独地点の風速から推定した Case1, 5, 9 に比べると、複数地点の風速を用いても、必ずしも推定精度の顕著な改善につながらないのが分かる。むしろこの場合、新北九州空港の風速パラメータを用いたときに発電量等の推定精度が高くなる傾向が見られる。Case1, 5, 9 で見ると、RMSE では宇部興産風速を用いた推定が優れているものの、平均風速比では新北九州空港風速を用いた場合に 1.0 に近い値が得られていることから、バイアスが小さい分、個々の風速のエネルギー和としての発電量において、新北九州空港風速を用いた推定が良い結果を示したと考えられる。また、Case13～16 を風速・気温・気圧を用いた Case4, 8, 12 と比べると、発電量では Case4, 8, 12 の方が良好な推定結果が得られる傾向が見られる。

風速パラメータを用いずに、気温と気圧傾度のパラメータのみで推定した結果が表－3,4 の Case18～20 である。発電量推定において、風速パラメータを用いるよりも非常に高い精度で推定できているのが分かる。しかし、相関係数と RMSE において他ケースよりも劣っており、個々の風速の推定精度は低いことが示唆される。例として、地上高さ 70m の Case16 と 20 における推定風速と参照風速の個々の風速の関係をプロットしたのが図－3, 4 である。Case20 は風速パラメータだけで推定した Case16 に比べて個々の風速のばらつきが大きいことが

分かる。しかし、個々の風速のばらつきは大きいものの、Case18～20 はいずれも平均風速比が 1.0 に近いことから、バイアスは小さく、個々の風速のエネルギー和としての発電量は誤差が小さくなったと考えられる。

宇部興産風速以外のデータはすべてアメダス気象観測値であるが、アメダスデータだけを用いた推定でも、高い精度が得られているのが表-3, 4 からうかがえる。Case21 は近隣のアメダスの風速、気温、気圧を用いたケースであるが、非常に良好な推定結果が得られている。このことから、必ずしも長期風況観測用の風速計を設置しなくても、ドップラーソーダさえあれば、近隣のアメダス気象データを基準にして高い精度でドップラーソーダ地点の風況を推定可能であると言える。

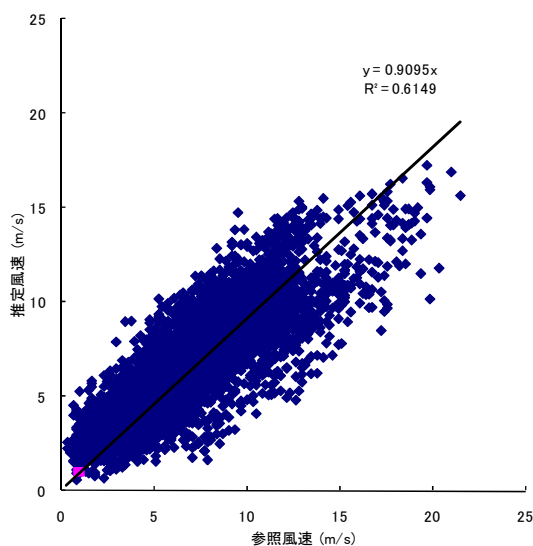


図-3 推定風速と参照風速の関係
(地上高さ 70m, Case16)

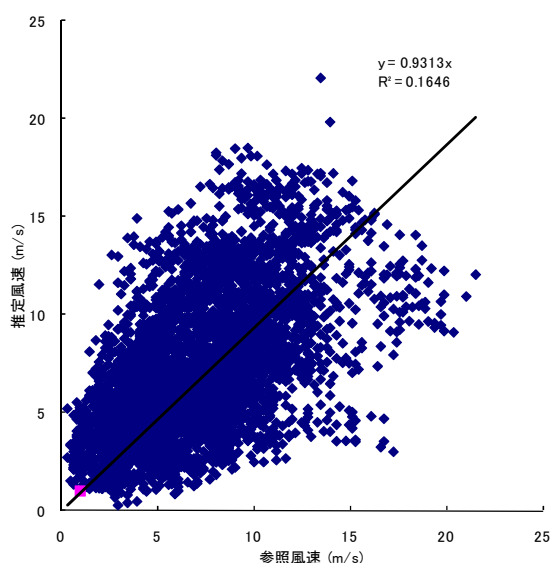


図-4 推定風速と参照風速の関係
(地上高さ 70m, Case20)

6. まとめ

本研究では、小型ドップラーソーダにより風速推定地点における短期観測を行い、近隣の気象官署等の気象データとの相関関係から風速推定式を求め、その推定式に気象官署の長期観測データを当てはめることによってドップラーソーダ地点の長期間の風況特性や風力発電量を推定する手法について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(1) ドップラーソーダ短期観測値と近隣の気象データとの連携により、任意地点・任意高度の風況を高い精度で推定可能であり、この手法により機動性に富んだ風況観測が実現できる。

(2) 風況を推定するための近隣の気象データとして、風速に加えて気温や気圧傾度を用いることにより、風速や発電量の推定精度が大きく改善される。

(3) 単独地点の風速に代わり、複数地点の風速を用いて推定しても、必ずしも推定精度の顕著な改善にはつながらなかった。また、複数地点の風速を用いるよりも、風速、気温、気圧の組み合わせで推定する方が良好な推定結果が得られる傾向が見られた。

(4) 風速データを用いずに気温と気圧傾度で推定した場合、発電量推定では良好な結果が得られたが、個々の風速推定については高い精度は得られなかった。

(5) 近隣のアメダス気象データだけを用いた推定であっても、ドップラーソーダ地点の高精度な風況推定が可能である。したがって、近隣に気象官署等があれば、必ずしも連携用の風速計を設置する必要はない。

(6) 風速推定地点と周辺の気象官署等の観測地点では、昼と夜の風況特性がかなり異なることがある。風況特性が推定地点と類似した周辺観測地点の観測データを用いるか、あるいは昼と夜で別々に推定を行うのが望ましい。

参考文献

- 1)牛山泉(2002)：「風車工学入門」 森北出版
- 2)NEDO(2005)：風力発電導入ガイドブック
- 3)NEDO(2003)：風力発電システム導入のための風況予測手法に関する検討