

日本域における大気安定度分布の地域特性

静居, 竜大
株式会社ユーラスエネルギーホールディングス

内田, 孝紀
九州大学応用力学研究所 : 准教授

田中, 鉄平
株式会社ユーラスエネルギーホールディングス

市川, 弘人
株式会社ユーラスエネルギーホールディングス

他

<https://hdl.handle.net/2324/6789520>

出版情報 : Journal of Wind Energy, JWEA. 46(144) (4), pp.38-49, 2023-02. Japan Wind Energy Association
バージョン :
権利関係 :



日本域における大気安定度分布の地域特性

Regional characteristics of the atmospheric stability distribution in Japan

静居 竜大^{*1} 内田 孝紀^{*2} 田中 鉄平^{*1}
市川 弘人^{*1} 高山 糧^{*1} 矢作 和臣^{*1}

Ryuta SHIZUI, Takanori UCHIDA, Teppei TANAKA,
Hiroto ICHIKAWA, Ryo TAKAYAMA, Kazuomi YAHAGI

^{*1}Eurus Energy Holdings Corporation, Hulec Kamiyacho Building 7F 3-13 Toranomom 4-Chome, Minato-ku, Tokyo, 105-0001, Japan, E-mail: ryuta.shizui@eurus-energy.com

^{*2}Associate professor, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, 6-1 Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka 816-8580, Japan.

Abstract

To improve the forecast accuracy of the annual energy production from wind power, the characteristics of the atmospheric stability distribution are summarized using data from wind observation towers at ten sites in Japan. The bulk Richardson numbers indicate that stable conditions prevailed at seven out of ten locations.

An analysis of each met mast indicated that the prevailing stability varied by season and differed not only according to the area but also according to the wind farm scale. These differences are thought to result from the distance to the sea and the wind shear. In addition, we compared the results according to the observational data and the bulk Richardson number calculated using the Weather Research and Forecasting model (WRF) during each season. The prevailing atmospheric stability at the observation points is affected by the atmospheric stability of the land and the surrounding ocean.

The results of previous research and this study indicate that considering the atmospheric stability enables more correct estimations of the annual wind power energy production. If possible, seasonal and local differences in the atmospheric stability should be considered to better estimate the wind power generation.

キーワード：大気安定度，リチャードソン数，WRF

Key Words：Atmospheric stability, Richardson number, Weather Research and Forecasting model

1 はじめに

日本の風力発電事業では、FIT 制度により風力発電所が増加しつつある。しかし、FIT 制度の終了ならびに FIP 制度の開始や島国固有の系統制約問題により、蓄電池の設置や系統増強によるコスト増加が見込まれる。また、系統面でも風速の変動を予測する必要があるため、今後風力発電事業を実施する際は、より高精度な風況予測技術が必要となる。

風力発電事業実施の際に行われる風況予測は、サイトの風況観測データを用いた実測値と適切な数値モデルを用いる必要がある¹⁾。

平坦地形の風力資源を評価する際に、線形モデルが使われてきた。伝統的なモデルとしては Jackson-Hunt Type wind flow models²⁾があげられる。当モデルを基に発展したモデルが WAsP³⁾である。しかし、近年は計算資源の増加と共に非定常・非線形流体解析が可能となっており、乱流モデルに LES を使用した複雑地形

の風況解析事例⁴⁾⁵⁾も多数実施されている。これらのモデルは中立状態の大気安定度を仮定しているが、実際の天気においては大気安定度が完全に中立なことは稀である⁶⁾。大気境界層中の大気安定度を変化させる要因としては、日射による気温・温位の鉛直プロファイルの変化が一つの要因としてあげられる⁸⁾。

また、大気安定度は風速の鉛直プロファイルや複雑地形上の風速の増速率・流れに影響を与える。接地層の風速の鉛直プロファイルに関しては、中立の風速の鉛直プロファイルの推定式を拡張し、安定度を考慮した場合の推定式が考案されてきた⁷⁾¹⁰⁾。複雑地形においては、尾根の幅と高さにより風速の増速率が決定される。Bradley (1983) は風速の増速率が安定度に依存することを明らかにした¹¹⁾。Frank *et al.* (1993) は風速の増速率は安定度が増加するにつれ大きくなり、不安定になるにつれ減少することを明らかにした¹²⁾。

これらの先行研究から、風力発電の事業性評価なら

^{*1} 会員 (株) ユーラスエナジーホールディングス
(〒105-0001 東京都港区虎ノ門 4-3-13 ヒューリック神谷ビル 7 階)
E-mail: ryuta.shizui@eurus-energy.com

^{*2} 会員 九州大学 応用力学研究所 准教授
(原稿受付：2021 年 11 月 17 日)

びに新規事業開発のためには安定度を考慮することが重要であると考える。

大気安定度の頻度分布を調査した研究は、ノルウェーの中部沿岸部で 3 km 離れたマスト同士で比較した研究¹³⁾や、欧州の陸上・洋上の 5 サイトで比較した研究¹⁴⁾があげられる。日本においては、気象庁の 12 地点の観測データを用いて調査した研究¹⁵⁾や洋上の風況観測データを用いて、年間の大気安定度出現頻度分布を調査した研究がある^{16)・18)}。複雑地形上の大気安定度の出現頻度を調査した研究は、嶋田 (2014)¹⁹⁾があげられる。この研究では複雑地形上の 1 本の風況観測塔を用いて、大気安定度の調査を実施している。しかしながら、日本域において、複雑地形ならびに沿岸地域を含む複数地点の大気安定度の出現頻度分布を調査した研究は少ない。

本研究では、風力発電量予測精度の向上を視野に入れて、複数の風況観測塔データを用いて、大気安定度の分布を地方と同一サイト内の風況観測塔ごとに比較し、その地域特性を整理した。

2 実サイトにおける大気安定度の把握の手法

本章では、風況観測塔で得られた観測データ (10 分間平均値) よりバルクリチャードソン数 Ri_b を求め、大気安定度分類の特徴を把握した。バルクリチャードソン数は以下の式で求められる²⁰⁾。

$$Ri_b = \frac{g}{\bar{\theta}} \cdot \frac{\Delta z \cdot \Delta \theta}{\Delta U^2} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 Δz は温度計の高度差、 $\bar{\theta}$ は二層間の平均温位、 $\Delta \theta$ は温度計の高度差における温位差分、 ΔU は温度計の高度差における風速の差分である。

式(1)からバルクリチャードソン数を求めるために、株式会社ユーラスエナジーホールディングスが所有する風況観測塔で、2 高度の風速・気温・気圧を測定している風況観測塔を抽出した。なお、2 高度の風速計、気温計、気圧計はマスト頭頂部と最低高度の風速計の測器を利用している。次に、観測対象期間を 2019 年 1 月 1 日～2019 年 12 月 31 日の 1 年間とし、抽出した風況観測塔のデータの各要素に半月以上の欠損が無い風況観測塔を抽出した。抽出した風況観測塔について、異常値除去を実施した。

この条件で得られた風況観測塔は Table 1 に示される通り、北海道地方 2 本、東北地方 4 本、九州地方 3 本、沿岸地方が 1 本の計 10 本である。すべての風況観

測塔は陸地にあり、Coast の風況観測塔以外は複雑地形上に建設されている。また、風況観測塔は 3 高度以上の観測を実施している。それぞれの風況観測塔のおおまかな位置の概要を以下に記す。北海道地方の Hokkaido Sea of Okhotsk はオホーツク海沿岸に近い複雑地形上にある風況観測塔であり、Hokkaido Sea of Japan は日本海に近い複雑地形上にある風況観測塔である。東北地方の 4 本の風況観測塔は 2 つのグループに分類される。1 つ目のグループは Tohoku Sea of Japan 1 と Tohoku Sea of Japan 2 である。いずれも、東北地方の日本海側のサイトに設置されている風況観測塔である。もう一つのグループは、Tohoku Pacific 2, Tohoku Pacific 3 の 2 本の風況観測塔であり、いずれも東北地方太平洋側の山間部に設置されている風況観測塔である。九州地方も 2 つのグループに分類される。Kyusyu East China Sea が九州地方の東シナ海側近傍の複雑地形上にある風況観測塔であり、Kyusyu East 1 と Kyusyu East 2 は九州地方東部の複雑地形の同一サイト上に設置されている風況観測塔である。Coast は関東地方の太平洋側沿岸部に設置されている風況観測塔である。

Table 1. List of meteorological masts.

Region	Mast name
Hokkaido	Hokkaido Sea of Okhotsk
	Hokkaido Sea of Japan
Tohoku	Tohoku Sea of Japan 1
	Tohoku Sea of Japan 2
	Tohoku Pacific 2
	Tohoku Pacific 3
Kyusyu	Kyusyu East China Sea
	Kyusyu East 1
	Kyusyu East 2
Coast	Coast

式(1)を用いてバルクリチャードソン数 Ri_b を求める際に、風速について条件を課した。具体的には、日本国内において現時点で運用中のハブ高である 80 m 高の平均風速の範囲内において、大気安定度分類の把握を実施することを目的として、以下の条件を満たす時刻を解析対象とした。

$$\begin{aligned} 5 \text{ m/s} \leq \text{最高高度の風速} \leq 10 \text{ m/s} & \quad \text{かつ} \\ 5 \text{ m/s} \leq \text{最低高度の風速} \leq 10 \text{ m/s} \end{aligned} \quad (2)$$

なお、 Ri_b の絶対値が10以下を解析対象とする。

ここで得られたバルクリチャードソン数 Ri_b について、安定度の分類を実施する。安定の閾値としてよく知られているのは臨界リチャードソン数である。しかし本研究では、詳細な安定度分類をすることを目的とするために異なる指標を用いた。具体的には、Leelosy *et al.* (2014)²¹⁾に示されるパスキル安定度分類とリチャードソン数の対応をもとにし、Table 2のように大気安定度の分類を実施した。本分類を用いることで、安達 (1981)²²⁾や Irwin (1979)²³⁾に示されている、粗度長とパスキル安定度別のべき指数の理論値などを参考にし、発電量推定のためのべき指数を決定することができると考えられる。

Table 2. Correspondence of the Pasquill stability class to the bulk Richardson number (Leelosy *et al.* 2014).

Stability classification	Bulk Richardson number
Strongly unstable	$Ri_b < -0.86$
Unstable	$-0.86 \leq Ri_b < -0.37$
Slightly unstable	$-0.37 \leq Ri_b < -0.10$
Neutral	$-0.10 \leq Ri_b < 0.053$
Slightly stable	$0.053 \leq Ri_b < 0.134$
Stable	$0.134 \leq Ri_b$

Table 2 に従って分類し、地域ごとの安定度分類の特徴を把握した。なお、風速計の高度差は、約 30m である。ただし、沿岸地方の風況観測塔のみ高低差は約 20m である。

3 結果

3.1 風況観測塔から得られた大気安定度分類

10 本の風況観測塔の観測データ (10 分間平均値) について、安定度分類を実施した結果を Fig. 1 に示す。各風況観測塔について算出した結果、10 サイト中 7 サイトで安定の頻度が最も高くなる結果を得た。

地域別に見ると、北海道地方の 2 本の風況観測塔と九州地方の 3 本の風況観測塔で安定の頻度が最も高くなる結果となった。しかし、北海道地方と九州地方では安定度の出現頻度の傾向が異なる。北海道地方では、年間の 50%以上が安定である。一方、九州地方では、Kyusyu East 1 を除き、安定の出現頻度が 50%を下回る結果となった。Kyusyu East 1 では、ほぼ全期間を通じて大気安定度が安定であった。水平解像度 100m の WRF-LES を用いた計算で頻度分布を作成し、検証した結果も全期間を通じて安定が卓越する結果となった。Kyusyu East 1 と Kyusyu East 2 の同一サイト内でも卓越する安定度が異なる特徴が得られた。東北地方では、安定の出現頻度が最も高くなる風況観測塔は 4 本中 1 本のみで、それ以外の地点では安定以外の大気安定度が卓越する結果となった。Coast は安定が最も卓越するが、他の風況観測塔と異なり、不安定～弱安定状態の出現頻度が低い結果となった。

3.2 各風況観測塔の月別安定度

Fig. 2 に北海道地方と九州地方の地図を記載する。これらの風況観測塔について Fig. 3 のように、月別のバルクリチャードソン数の積み上げヒストグラムを作成した結果、北海道地方は年間を通して安定以上となる傾向が見られた。

次に九州地方について述べる。Kyusyu East China sea では、冬季にバルクリチャードソン数が小さくなる傾向が見られ、夏季に安定になる傾向が明らかになった。しかし、同じ九州地方においても、Kyusyu East 2 では夏季に安定ではなく、中立が卓越するが、冬季は不安定が卓越する傾向が得られた。

東北地方においては、同一サイト内でも大気安定度分類の分布が異なる結果が得られた。Fig. 4, Fig. 5 に東北地方のサイトの地図を示す。東北地方太平洋側サイトは Tohoku Pacific 2 と Tohoku Pacific 3 が同一の尾根上 (風況観測塔間距離は約 1 km) にあるサイトである。東北地方日本海側サイトは海に近いサイトであり、Tohoku Sea of Japan 1 は海までの距離が約 1 km, Tohoku Sea of Japan 2 は海までの距離が約 2 km である。

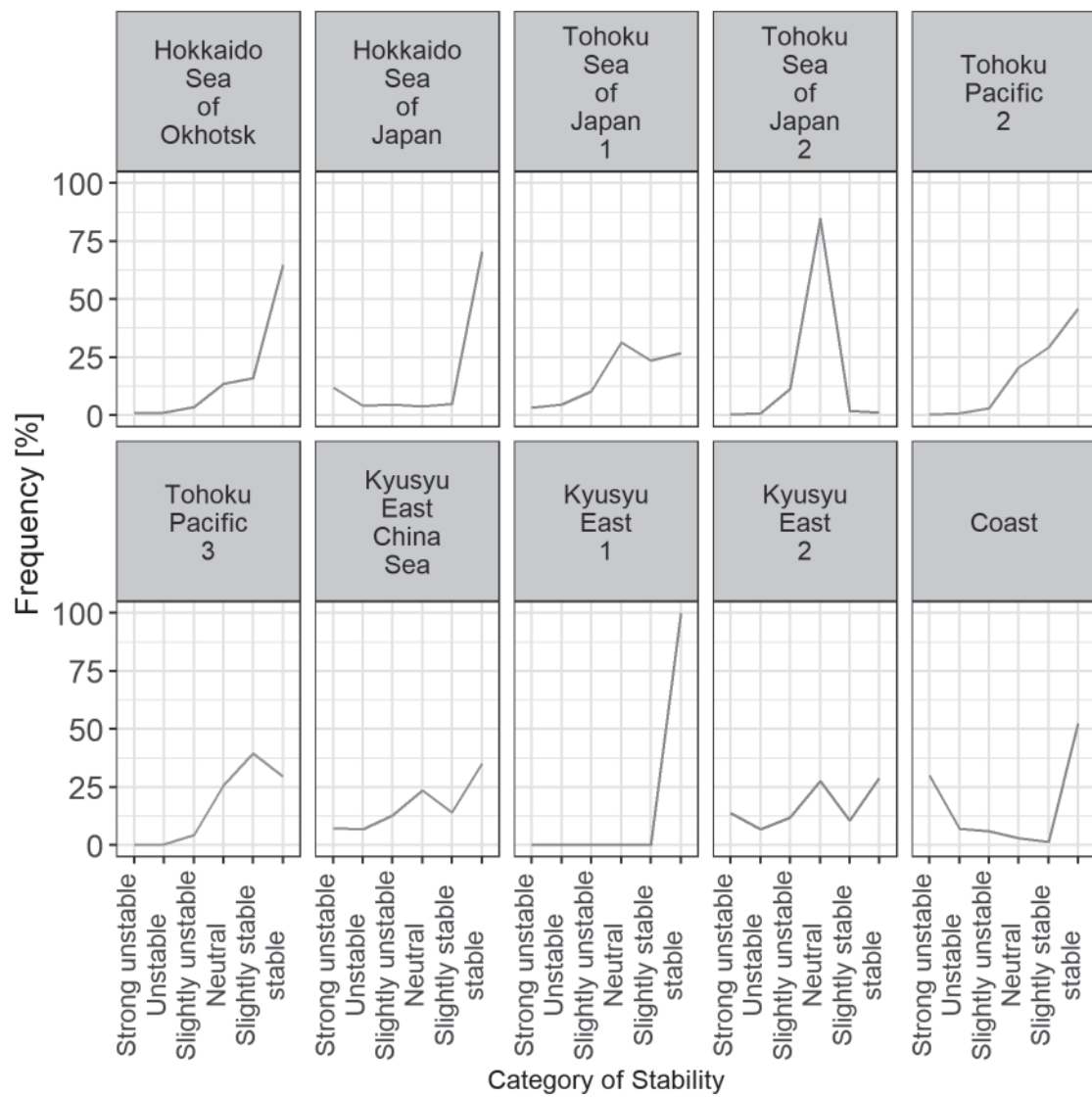


Fig. 1. Stability classes at the ten sites.

The vertical axis indicates the frequency [%] and the horizontal axis indicates the stability class: strongly unstable, unstable, slightly unstable, neutral, slightly stable, and stable from left to right.



Fig. 2. Observation points in the Hokkaido and Kyusyu regions. Yellow circles indicate the observation points. The scale unit is in meters.

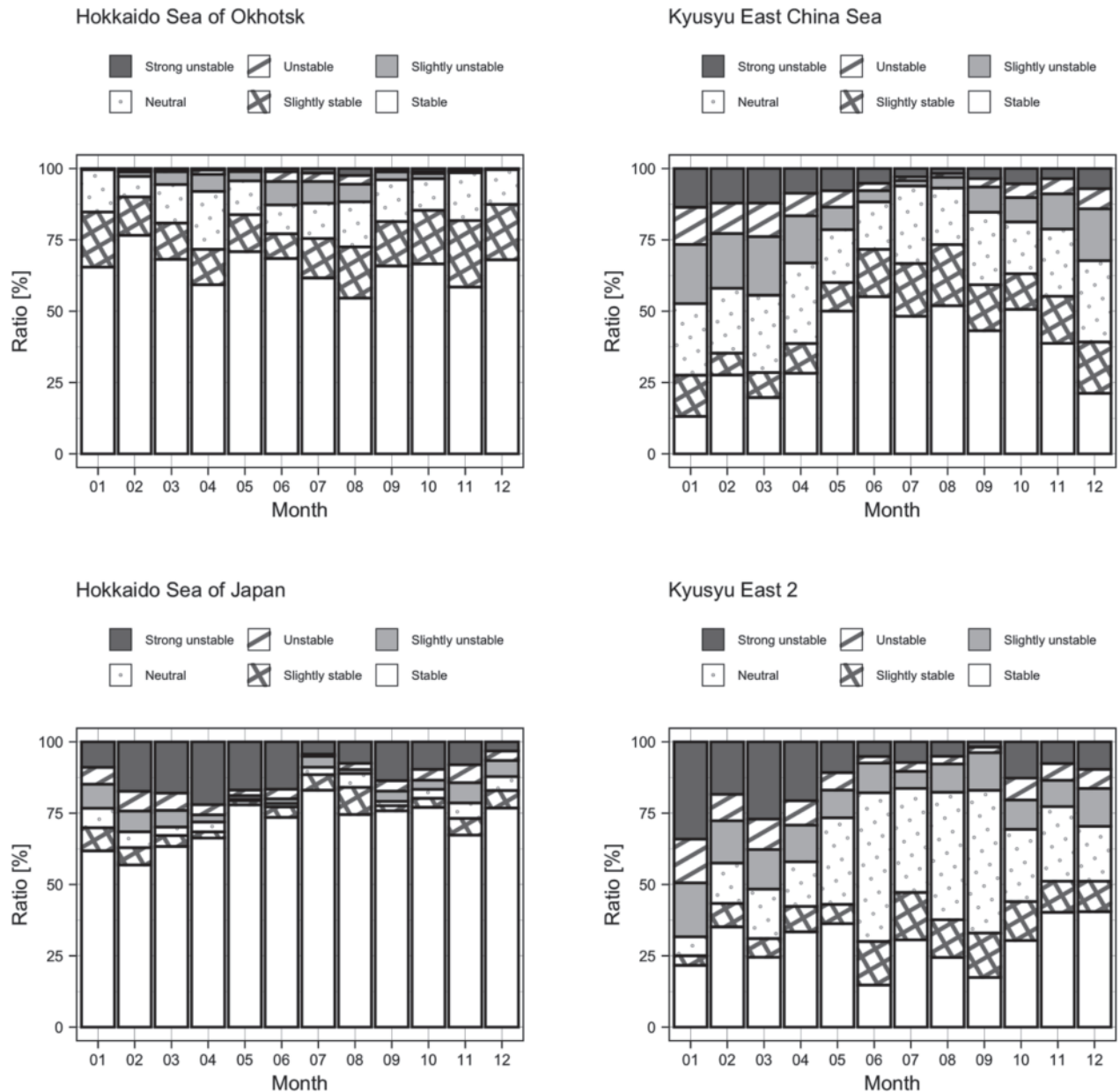


Fig. 3. Monthly stability frequency in the Hokkaido (left) and Kyusyu (right) regions.
The horizontal axis indicates the month and the vertical axis indicates the stability frequency.

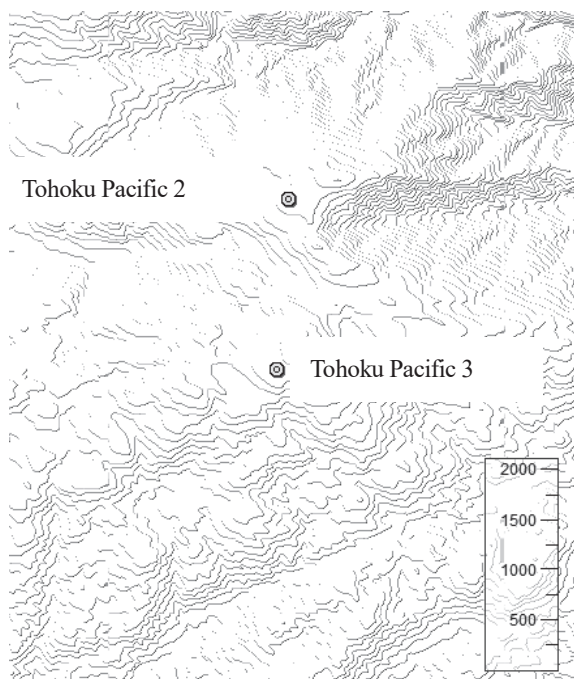


Fig. 4. Observation points at the Tohoku Pacific site. The yellow circles indicate the observation points. The scale unit is in meters.

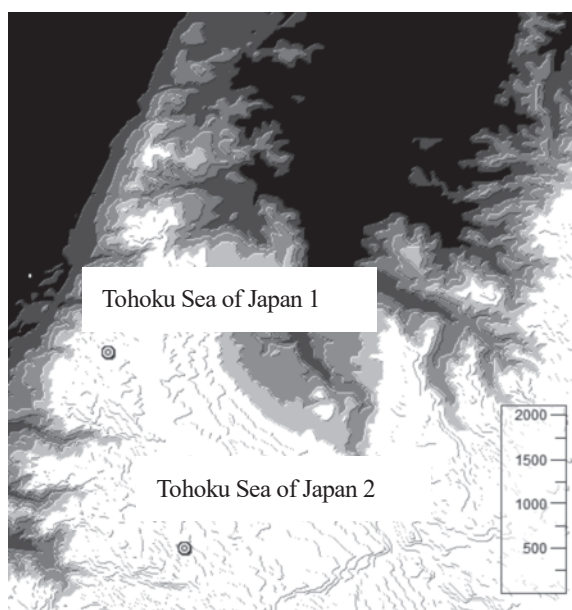


Fig. 5. Observation points at the Tohoku Sea of Japan site. The yellow circles indicate the observation points. The scale unit is in meters.

まず、東北地方太平洋側サイトの大気安定度に着目する。Fig. 1 に示した通り、本サイトでは、Tohoku Pacific 2 と Tohoku Pacific 3 で安定度の出現頻度が異なる結果が得られた。

月別のバルクリチャードソン数を調査した結果が Fig. 6 である。Tohoku Pacific 2 では4月～7月に安定の

出現頻度が 50%を上回っている。これが安定の年間出現頻度が最大となることに寄与していると考えられる。一方で、Tohoku Pacific 3 では、5月～9月に安定の出現頻度が増加する。弱安定の出現頻度は年間を通じて高いが、5・6月と9月は低くなる傾向が見られた。

東北地方太平洋側サイトは海から離れた、山の中のサイトのため、同一尾根上で大気安定度が異なるのは、熱力学的な影響よりも力学的影響が寄与していると考えられる。

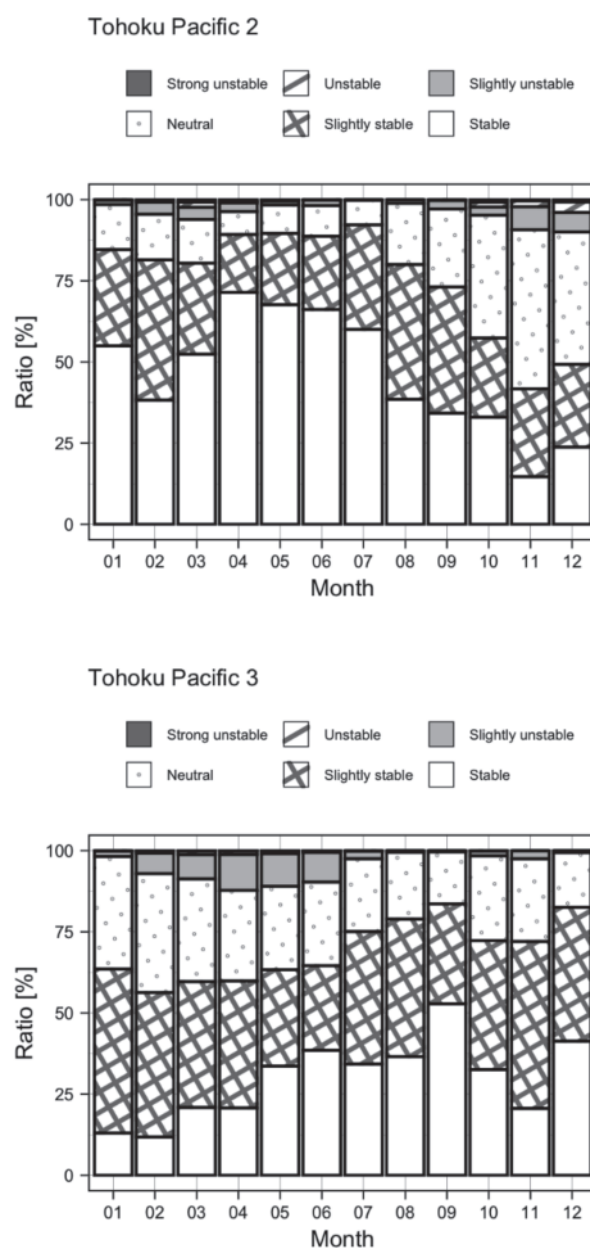


Fig. 6. Monthly stability frequency at the Tohoku Pacific sites. The horizontal axis indicates the month and the vertical axis indicates the stability frequency.

東北地方日本海側サイトは、いずれも年間を通じて中立が卓越するサイトである。風況観測塔の離隔が約 2 km であるが、Fig. 7 に示す通り、Tohoku Sea of Japan 1 と Tohoku Sea of Japan 2 では月別の安定度の特徴が異なる。

Tohoku Sea of Japan 1 では 9～12 月にかけて安定の出現頻度が増加するが、離岸距離が大きい Tohoku Sea of Japan 2 では、季節によらず中立が卓越する結果となった。

東北地方日本海側サイトは日本海から近いサイトであるため、風況観測塔の局地的な安定度変化は、東北地方太平洋サイトと異なり、熱力学的な寄与が大きいと考えられる。

Coast の年間の大気安定度は Fig. 1 に示す通り、強不安定と安定の出現頻度がほぼ等しい結果が得られた。Coast の風況観測塔は Fig. 8 に示す通り、関東地方の離岸距離がほぼ無い沿岸部に設置された風況観測塔である。

パルクリチャードソン数の月変化を Fig. 9 に示す。Coast では、冬季に安定が卓越し、4 月～7 月ならびに 9 月に不安定になる傾向が見られた。

本章で明らかになったことは、地方単位でも、安定度分類の差が生じること、また、同一サイト内においても尾根の違いや数 km の距離の差で大気安定度分類に違いが存在することである。

Tohoku Sea of Japan 2

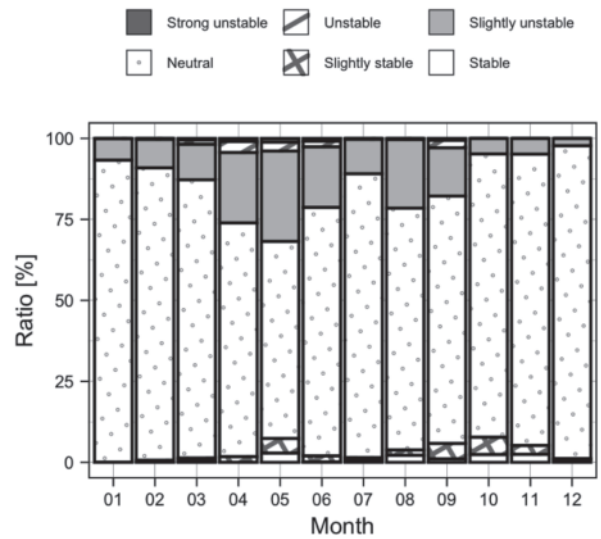


Fig. 7. Monthly stability frequency at the Tohoku Sea of Japan sites. The horizontal axis indicates the month and the vertical axis indicates the stability frequency.

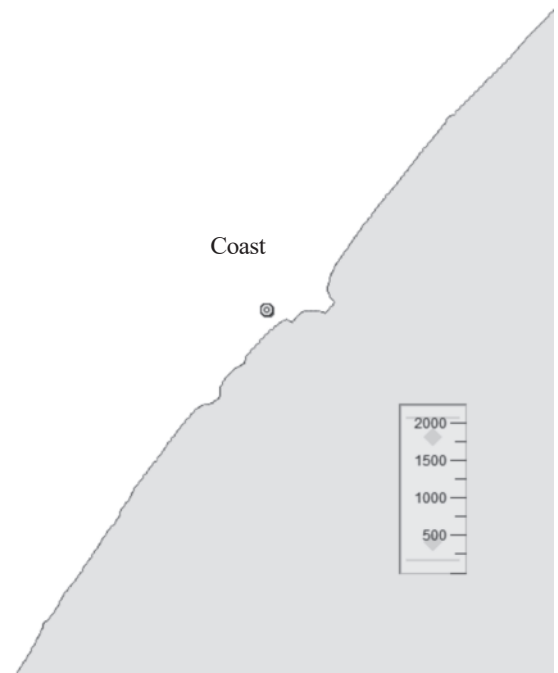
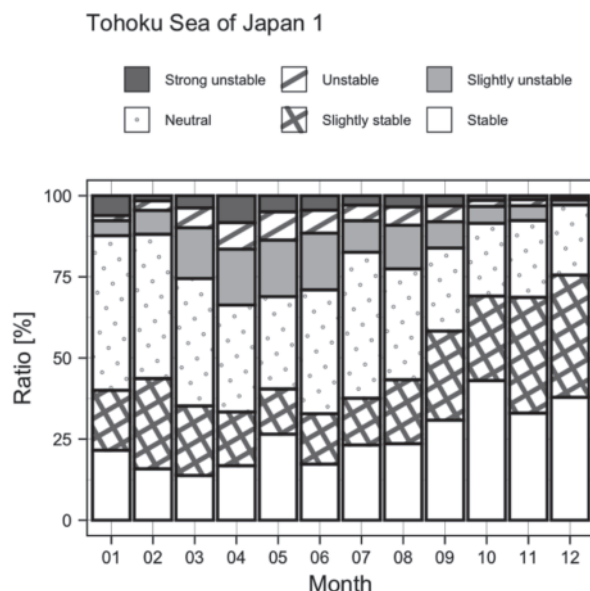


Fig. 8. Observation point at the Coast site. The yellow circle indicates the observation point. The scale unit is in meters.

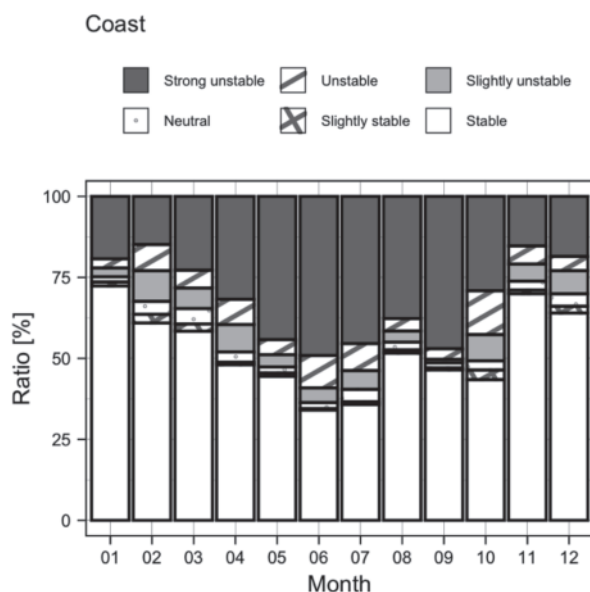


Fig. 9. Monthly bulk Richardson numbers at the Coast sites. The horizontal axis indicates the month and the vertical axis indicates the stability frequency.

4 考察

実測による大気安定度の妥当性の検証と大気安定度の季節変化の要因を明らかにすることを目的とし、領域気象モデル WRF (Weather Research and Forecasting model) を用いて、2019/1/1～2019/12/1 のシミュレーションを実行し、季節ごとの日本域のバルクリチャードソン数の分布を求めた。

計算設定について以下に示す。WRF の水平解像度は $5\text{ km} \times 5\text{ km}$ であり、鉛直総数は 40 層である。初期値を作成するにあたり、標高データは英国地質調査所 (USGS) の GTOPO30 (水平解像度 $30'' \times 30''$) を、土地利用データは USGS の 24 種別土地利用データ (水平解像度 $30'' \times 30''$) を入力した。また、境界値として、気象・土壌要素については、ERA5 (水平解像度 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，時間間隔 6 時間)，海面水温については、英国気象庁の OSTIA (水平解像度 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ ，時間間隔 1 日) を用いている。物理スキームは、雲微物理モデルが Eta (Ferrier) Scheme，長波放射モデルは RRTM Longwave scheme，短波放射モデルは Dudhia Shortwave Scheme，接地層モデルは Eta Similarity Scheme，地表面モデルは Unified Noah Land Surface Model 境界層モデルは Mellor–Yamada–Janjic Scheme (MYJ) Scheme，積雲パラメタリゼーションは第一ドメインが Moisture–advection–based Trigger for Kain–Fritsch Cumulus Scheme，また、海面水温はシミュレーション

時間とともに変化する設定 (sst_update=1) にしている。さらに、計算結果に対して、大気境界層上端高度以上で、風速・気温・混合比の 4 次元データ同化を施している。

WRF の計算結果について、2 章で示した通り地上から 30m 高と 60m 高風速がともに 5 m/s 以上 10 m/s 以下である期間を抽出して、(1) 式に従ってバルクリチャードソン数を算出し、1～3 月，4～6 月，7～9 月，10～12 月の期間の 3 ヶ月平均値の水平分布図を作成した。その結果が Fig. 10 である。

WRF によるシミュレーションの結果、年間を通じて日本列島ではバルクリチャードソン数が正，すなわち中立，弱安定，安定であることが示された。

北海道地方について、オホーツク海は年間を通して安定である一方で、日本海側は 10 月～3 月の期間が不安定である。Hokkaido Sea of Okhotsk が年間を通じて中立，弱安定，安定が卓越するのは、陸面のみならず近傍の海面の大気安定度も中立，弱安定，安定であることが要因の一つとして考えられる。

Hokkaido Sea Of Japan の 1 月～3 月に弱不安定，不安定と強不安定の比率が増加するのは、日本海の影響を受けている可能性がある。

しかし、4 月～6 月に強不安定の頻度が増加する要因については、本シミュレーションの結果では要因を明らかにできなかった。

東北地方では、太平洋側の Tohoku Pacific 2 と Tohoku Pacific 3 では中立，弱安定，安定が年間を通じて卓越することに対して、日本海側の Tohoku Sea of Japan 1 と Tohoku Sea of Japan 2 では 4～6 月に弱不安定，不安定，強不安定の頻度が増加する。太平洋側で中立，弱安定，安定が年間を通じて卓越するのは、1～3 月に東北地方の太平洋側の海上のバルクリチャードソン数が正，すなわち中立，弱安定，安定であることも一つの要因であると考えられる。東北地方の日本海側の 2 本の風況観測塔で 4～6 月に弱不安定，不安定，強不安定の頻度が増加する要因については、北海道の日本海側と同様、本シミュレーション結果から要因を明らかにできなかった。

九州地方の 2 本の風況観測塔は 1～3 月に弱不安定，不安定，強不安定の頻度が増加している。これは九州地方に隣接する東シナ海と太平洋側近海ともに 1～3 月にバルクリチャードソン数が負，すなわち，中立，弱不安定，不安定，強不安定であることが一つの要因であると考えられる。

Coast は 4～7 月と 9 月に弱不安定，不安定，強不安

定の頻度が増加するが、シミュレーションと夏季の季節風が南東であることを考慮すると、黒潮に沿った不安定域の空気塊が影響を及ぼしている可能性があることが示唆された。

今回調査した範囲では、日本列島の大気安定度は、中立、弱安定、安定が卓越することが実測とシミュレーションで示された。また、季節変化には周囲の海の大気安定度や、今回の水平解像度 5 km のシミュレーション未満の局所的な境界層気象学の効果などが影響していると考えられる。

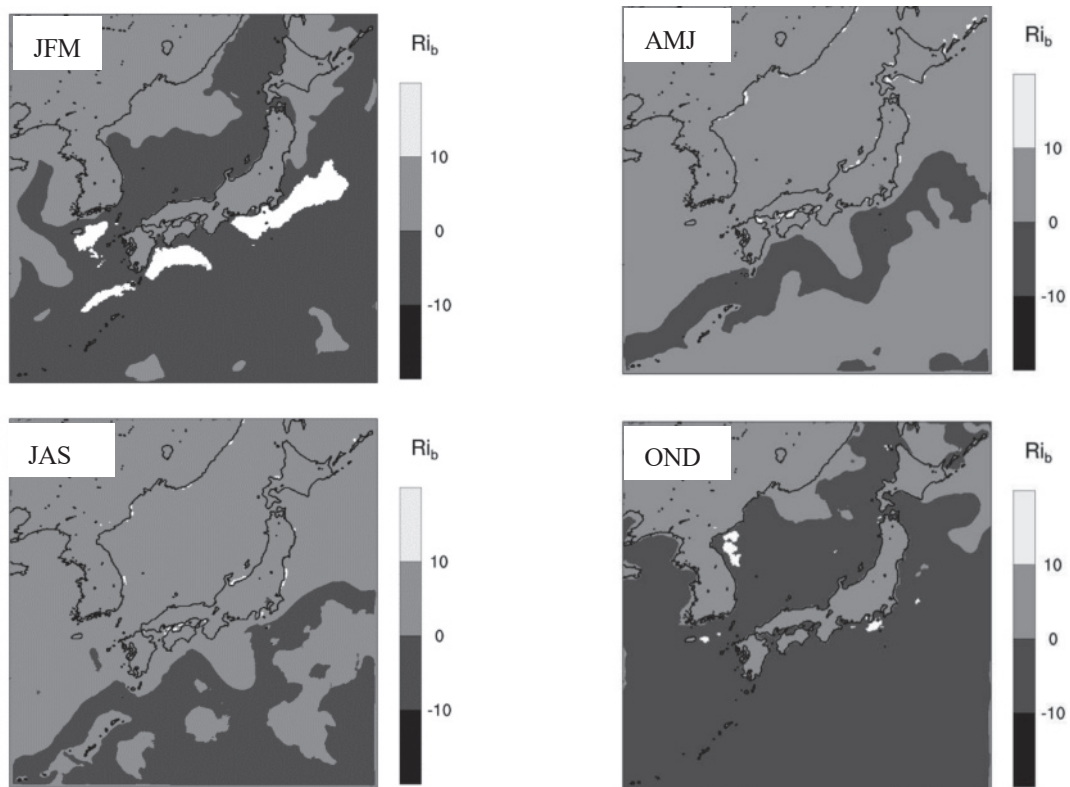


Fig. 10. Distribution of the bulk Richardson number in Japan: January–March (upper left), April–June (upper right), July–September (lower left), and October–December (lower right). The white contour on the maps indicates that the bulk Richardson number is greater than 10 or less than -10 .

5 結論

本研究では、風力発電量予測精度の向上を視野に目的とし、日本国内に設置されている複数の風況観測塔を用いて、大気安定度の分布の地域特性を整理した。

大気安定度の分類手法はリチャードソン数とパスキル安定度の対応を参考にし、閾値を決定後に分類を実施した。その結果、対象となる風況観測塔 10 本の内 7 本の風況観測塔で安定の出現頻度が最も高くなった。なお、本研究では 5~10 m/s の風速帯を対象としたが、この風速帯の制限を無くし、全風速帯の解析を実施した場合、Tohoku Pacific 3 で安定が卓越し、安定の出現頻度が最も高くなる風況観測塔の本数は 1 本増加した。

地方単位で安定度を整理すると、北海道地方と九州地方のすべての風況観測塔で安定の出現頻度が高くなる結果が得られた。しかしながら、北海道地方と九州地方で安定度の月別出現頻度に差が見られた。具体的には、北海道地方では年間を通じて安定である。しかし、九州地方では 1 本の風況観測塔を除き、冬季に不安定となり、夏季に安定ないしは中立が卓越する結果となった。東北地方では、同一サイト内でも卓越する安定度が異なる結果が得られた。この結果から、海から風況観測塔の距離が異なる場合や、同一尾根上の数 km 離れている風況観測塔間でも、卓越する安定度が異なることが示唆される。沿岸地方では、強不安定と安定の出現頻度がほぼ等しい結果が得られた。月別変化に着目すると、冬季に安定になり、春季と夏季に不安定になる傾向が見られた。

また、WRF によるシミュレーションの結果から、日本陸域では、中立、弱安定、安定が季節平均で年間を通じて卓越することが示され、大気安定度の季節変化は周囲の海の大気安定度の季節変化の影響を受けている可能性が示唆された。

先行研究と本研究の結果から、風力発電量の精緻な推定を実行するためには、安定度を考慮したシミュレーションを実行することが重要と考える。また、可能であれば、安定度の月別変化や局所的変化を考慮する。これを実行することにより、より精緻な風力発電量推定が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) MEASNET Procedure, Evaluation of Site-Specific Wind Conditions Version 2, April 2016, pp.35.
- 2) Jackson, P. S. and Hunt, J. C. R. , Turbulent wind flow over a low hill, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol.101, No.430, 1975, pp.929–955.
- 3) Troen, I. and Petersen, E. L. , European wind atlas, Riso National Laboratory, 1989, pp.587.
- 4) 内田孝紀, 大屋裕二, 李貫行, 風車立地点近傍に発生する地形乱流の高解像度 LES, *風力エネルギー学会誌*, Vol.34, No.1, 2010, pp.121–126.
- 5) Uchida, T. and Ohya, Y. , Micro-siting Technique for Wind Turbine Generators by Using Large-Eddy Simulation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.96, No.10-11, 2008, pp.2121–2138.
- 6) Emeis, S. , Wind energy meteorology second edition: *atmospheric physics for wind power generation*, Springer, 2018, pp.254.
- 7) Paulson, C. A. , The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Vol.9, No.6, 1970, pp.857–861.
- 8) Stull, R. B. , An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988, pp.9–18.
- 9) Businger, J. A. , Wyngaard, J. C. , Izumi, Y. and Bradley, E. F. , Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer, *The Journal of Atmospheric Sciences*, Vol.28, No.2, 1971, pp.181–189.
- 10) Dyer, A. , A review of flux-profile relationships, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.7, No.3, 1974, pp.363–372.
- 11) Bradley, E. F. , The influence of thermal stability and angle of incidence on the acceleration of wind up a slope, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.15, No.1-3, 1983, pp.231–242.
- 12) Frank, H. , Heldt, K. , Emeis, S. and Fiedler, F. , Flow over an embankment: speed-up and pressure perturbation, *Boundary-layer meteorology*, Vol.63, No.1, 1993, pp.163–182.
- 13) Bardal, L. M. , Onstad, A. E. , Sætran, L. R. and Lund, J. A. , Evaluation of methods for estimating atmospheric stability at two coastal sites, *Wind Engineering*, Vol.42, No.6, 2018, pp.561–575.
- 14) Møller, M. , Domagalski, P. and Sætran, L. R. Comparing abnormalities in onshore and offshore vertical wind profiles, *Wind Energy Science*, Vol.5, No.1, 2020, pp.391–411.
- 15) 近藤裕昭, 4 季各 1 週間の測定からの年間の大気安定度出現頻度の推定とその利用について, *大気環境学会誌*, Vol.55, No.4, 2020, pp.182–190.
- 16) 山中徹, 大窪一正, 福本幸成, 石原孟, 銚子沖における洋上風況観測 その 3 ~風況における大気安定度の影響~, 日本風工学会年次研究発表会・梗概集 平成 27 年度 日本風工学会年次研究発表会, 2015, pp.105–106.

- 17) 青木功, 吉村豊, 北九州市沖洋上風況観測システム実証研究による洋上風況特性解析, *風力エネルギー利用シンポジウム*, Vol.35, 2013, pp.482–485.
- 18) 嶋田進, 大澤輝夫, 芹澤重厚, 米田格, 白浜海象観測所における洋上風況特性について, *風力エネルギー利用シンポジウム*, Vol.30, 2008, pp.233–236.
- 19) 嶋田進, 竹山優子, 小垣哲也, 大澤輝夫, 複雑地形における大気安定度と風速の鉛直プロファイルの関係, *風力エネルギー利用シンポジウム*, Vol.36, 2014, pp.209–212.
- 20) 神尾武史, 飯田誠, 荒川忠一, 複雑地形上の乱流風況シミュレーションにおける大気安定度の影響, *風力エネルギー利用シンポジウム*, Vol.36, 2014, pp.189–192.
- 21) Leelőssy, Á. , Molnár, F. , Izsák, F. , Havasi, Á. , Lagzi, I. and Mészáros, R. , Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review, *Central European Journal of Geosciences*, Vol.6, No.3, 2014, pp.257–278.
- 22) 安達隆史, べき法則による 150m 高度以下の風速推定法の基礎研究, *天気*, Vol.28, No.4, 1981, pp.42–50.
- 23) Irwin, J. S. , A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability, *Atmospheric Environment*, Vol.13, No.1, 1967, pp.191–194.