

陸上ウィンドファームにおける風車ハブ高さ風速の 高精度数値予測手法の研究開発 バルクリチャードソン数の入力値の決定手法

ユーラスエナジーホールディングス 静居 竜大, 高山 糧, 矢作 和臣
大久保 諒也, 岡山 芙有子, 松平 陽
九州大学 応用力学研究所 内田 孝紀

1 本研究の概要

著者らは2020年に日本の10本の風況観測塔の観測データを用いて、大気安定度(バルクリチャードソン数)の地域特性を調査した¹⁾。その研究の続きとして、安定度を考慮したCFDにおいて、適切なバルクリチャードソン数の入力値を決定するための研究を実施している。また、2022年にはウェイクの影響を受けない4本の風況観測塔のデータを用いて、RIX値と後述する力学的効果に相関があることを示した²⁾。そこで、本研究では20本の風況観測塔データについてRIX値と力学的効果とバルクリチャードソン数 Ri_b の関係を調査し、RIX値とバルクリチャードソン数の中央値の回帰式を調査した。

2 背景

勾配リチャードソン数は、浮力による乱流生成・消散と力学的なシアによる生成・消散の比である。一方、バルクリチャードソン数は勾配リチャードソン数を離散化仮定した簡易的な式である。バルクリチャードソン数は定義式より、熱力学的な効果と力学的な効果の2つに影響すると考えられる。

国内外の風力発電事業では、リプレース案件など新設予定風力発電機や風況観測塔の近くに既設の風力発電機が存在することがある。事業を取り巻く状況とバルクリチャードソン数の式を照合すると、熱力学的効果は既設の風力発電機の影響を受けることがあることが先行研究で示されており¹⁾、力学的効果は既設の風力発電機のウェイクの影響を受ける。

そのため、安定度を考慮したCFDを実行する際、観測値から得られたバルクリチャードソン数をそのまま入力する、もしくは、除外風向のみを定めて、季節変化を除外したデータセットから得られた、バルクリチャードソン数を用いると、適切な入力値にならないことがあり得る。

3 理論

Stull(1988)⁴⁾によると、フラックスリチャードソン数 R_f は、乱流運動エネルギーの方程式から、浮力によるフラックスと、シアによるフラックスの比として以下の式で表される。

$$R_f = \frac{\left(\frac{g}{\theta_v}\right) (\overline{w'\theta_v'})}{(\overline{u'w'}) \frac{\partial \bar{U}}{\partial z} + (\overline{v'w'}) \frac{\partial \bar{V}}{\partial z}} \quad (1)$$

ここで g は重力加速度、 θ_v は仮温位、 $\overline{w'\theta_v'}$ は鉛直方向の浮力のフラックスの平均値、 $\overline{u'w'}$ は U 方向の鉛直運動量フラックスの平均値、 $\frac{\partial \bar{U}}{\partial z}$ は U 方向の風速のシア、 $\overline{v'w'}$ は V 方向の鉛直運動量フラックス、 $\frac{\partial \bar{V}}{\partial z}$ は V 方向の風速のシアである。

フラックスリチャードソン数 R_f にK-theoryと渦拡散の理論から、勾配リチャードソン数が求められ、さらに離散化の仮定を用いることで、バルクリチャードソン数 Ri_b が定義される。

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

ここで 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の差分、 ΔU は温度計の高度差における風速の差分である。

いずれのリチャードソン数も浮力による乱流生成・消散と、シアによる乱流生成・消散の比であるため、1章で述べた通り、熱力学的効果と力学的効果の2つに大まかに分類することができる。 (2)式より定数項である g と Δz を除外すると、熱力学的効果 $Thermo_eff$ は(3)式で、力学的効果 $dynamic_eff$ は(4)式で表される。

$$Thermo_eff = \frac{\Delta \theta}{\bar{\theta}} \quad (3)$$

$$dynamic_eff = \frac{1}{\Delta U^2} \quad (4)$$

$Thermo_eff$ は安定度により、正負の値どちらとも取り得るが、 $dynamic_eff$ は必ず正の値を示す。 g と Δz は必ず正の値となることから、 $Thermo_eff$ が R_b の正負と絶対値を、 $dynamic_eff$ は R_b の絶対値のみを決定すると考えられる。

ここで、対流圏における国際標準大気における気温の標準気温減率が0.65 K/100mであることを考慮すると、風況観測塔のスケールにおいては、 $\Delta \theta$ は 10^{-1} のオ

オーダーになる。また $\bar{\theta}$ は 10^2 のオーダーになることから、(3)式より、*Thermo_eff*のオーダーは 10^{-3} になると概算される。一方で*dynamic_eff*のオーダーは風速の鉛直プロファイルのベキ指数にもよるが、測器の高度差が 30 m、下側の風速が 3~20 m/s と仮定したとき、ベキ指数が 0.1 で $10^{-1} \sim 10^1$ となり、同条件でベキ指数が 0.3 の場合には $10^{-2} \sim 10^0$ となるため、 $10^{-2} \sim 10^1$ のオーダーとなる。

以上から、 Ri_b の絶対値に寄与するのは *dynamic_eff*であり、これを正しく推定することがシミュレーションに入力する Ri_b の絶対値を適切に設定することに極めて重要であると考えられる。

本研究では RIX 値と力学的効果とバルクリチャードソン数の絶対値との関係を調査した。

4 手法

*dynamic_eff*は 2 高度の風速の差であることから、観測条件によっては、ウェイクの影響を受けることになる。ウェイクの影響を除外するために、IEC 規格⁵⁾で定められた、既設の風力発電機から 20D 以上離れた風況観測塔を使うことにする。そこで、本研究では、既設の風力発電機から 20D 以上離れた 20 本の風況観測塔を解析対象とした。20 本の内訳は、北海道 6 本、東北地方 9 本、関東地方 1 本、九州地方 4 本の陸上の風況観測塔である。なお、解析対象期間はそれぞれの風況観測塔においてデータセットが揃っている 1 年間である。それぞれの風況観測塔について異常値除去を施し、本研究に用いた。

Ri_b の算出には式(2)を用いた。本研究では、ハブ高 80 m の年間平均風速帯の大気安定度の出現頻度を把

握することを目的とし、 Ri_b を求める際に風速に以下の条件を課した。

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

この条件は日本国内におけるハブ高 80 m の年間平均風速を想定している。

安定度の分類には、Leelosy et al. (2014)に示されているパスキル安定度分類とリチャードソン数の対応を参考にし、表 1 の通り分類した。

T

表 1 バルクリチャードソン数と大気安定度分類の対応 (Leelosy et al. 2014).

大気安定度分類	バルクリチャードソン数
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	$0.134 \leq Ri_b$

5 結果

まず、先行研究の続きとして 20 本の風況観測塔の年間の卓越安定度¹⁾を調査した。その結果 20 サイト中 18 サイトで安定が卓越する結果となった (図 1, 図 2)

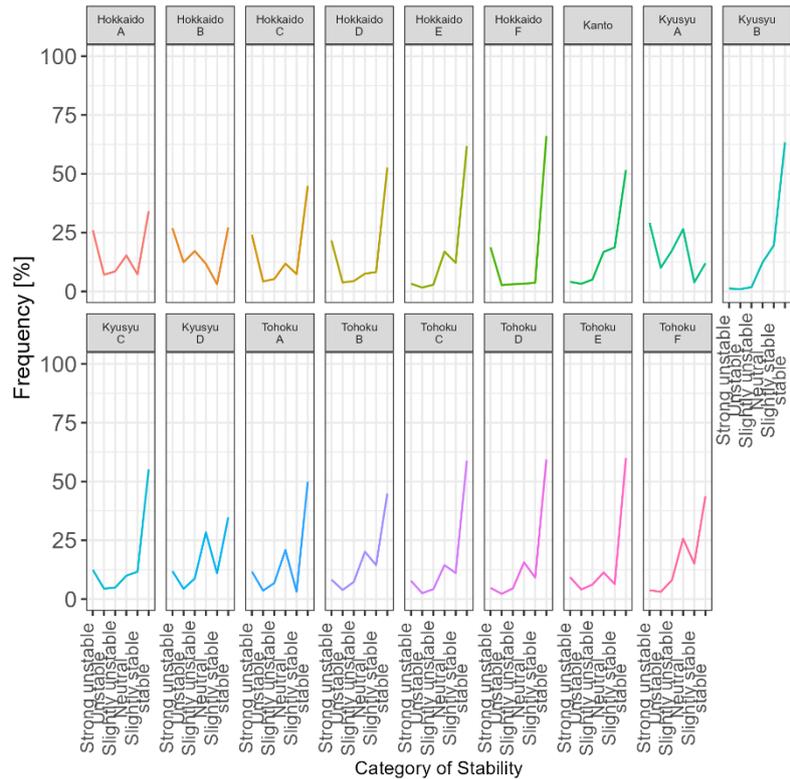


図 1 大気安定度の出現頻度分布(北海道 6 本, 関東 1 本, 九州 4 本, 東北 6 本, 縦軸:出現頻度, 横軸:大気安定度の分類(左から強不安定, 不安定, 弱不安定, 中立, 弱安定, 安定))

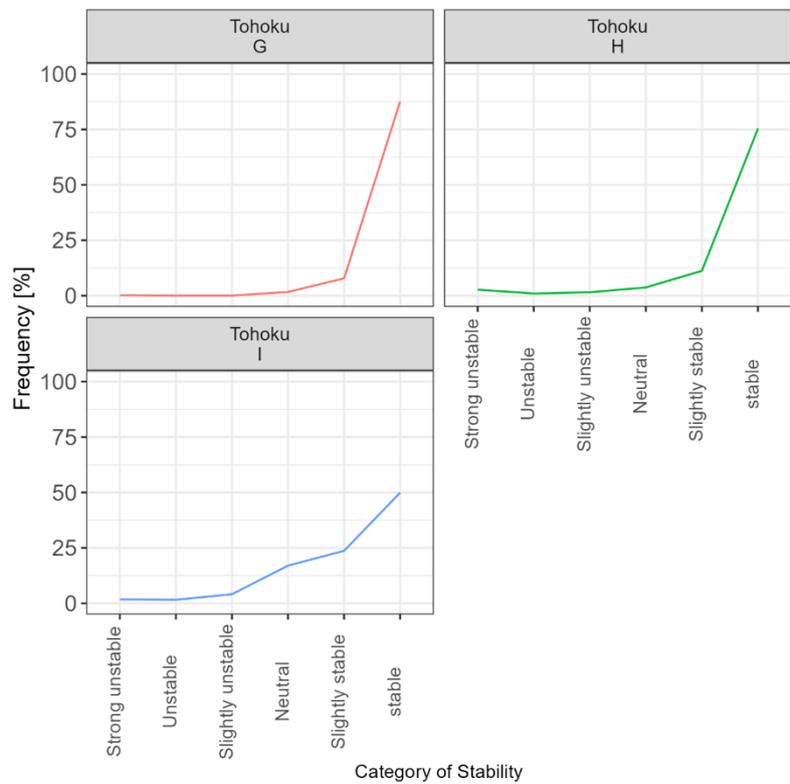


図 2 大気安定度の出現頻度分布(東北 3 本, 縦軸:出現頻度, 横軸:大気安定度の分類(左から強不安定, 不安定, 弱不安定, 中立, 弱安定, 安定))

次に 20 本の風況観測塔データを用いて, 力学的効果の 1 年平均値と RIX 値の関係の散布図を作成した

(図 3). 今回解析対象とした風況観測塔では, RIX 値と力学的効果の平均値に相関係数 0.63 の相関関係が見られた.

RIX 値と力学的効果には相関関係が見られたため、RIX 値と力学的効果を含む Ri_b の関係を調査し、相関係数と回帰式を調査した。図 4 は RIX 値と Ri_b の中央値の散布図である。ここで Ri_b について中央値を選択した理由は、そのサイトで卓越する安定度を決定する指標として、50%タイル値が使用できると考えたためである。図 4 より RIX 値と Ri_b の間には相関係数-0.4 の負の相関関係があることが明らかになった。

本結果を踏まえ、より相関の良い回帰式を作成することを目的とし、海辺に近い風況観測塔と海から離れた風況観測塔の 2 つのグループに分けて回帰式と相関係数を調査した。その結果、相関係数は約 0.1 上昇した。しかし、回帰式が 2 本出てくると、グループ分けの閾値を適切に設定することが難しいことが課題としてあげられる。

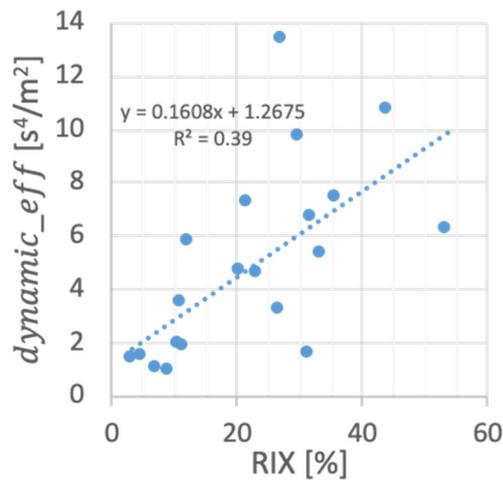


図 3 RIX 値と力学的効果の 1 年平均値の関係

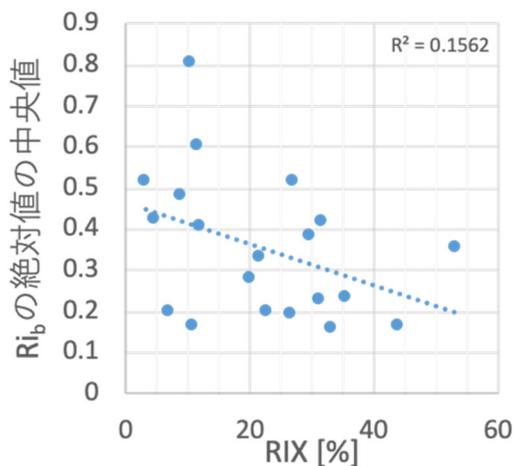


図 4 RIX 値と Ri_b の絶対値の 1 年中央値の関係

6 まとめと今後の展望

本研究では、日本の陸上の 20 本の風況観測塔を用いて卓越大気安定度を調査し、RIX 値と Ri_b の絶対値の回帰式を作成した。

20 サイト中 18 サイトで安定が卓越する結果となった。

本回帰式を用いることで、陸上においては風況観測塔が設置される前に、地形複雑度の指標である RIX 値を用いて大気安定度の適切な入力値を決定することができると考えられる。

しかし、2022 年度の研究より、沿岸部や洋上のように RIX 値がほぼゼロになるサイトでは本回帰式は適さないと考えられる。また、卓越安定度が安定を前提としてシミュレーションに Ri_b を入力するため、安定が卓越しないサイトなどに対しても不適であると考えられる。そのため、回帰式に対して適切な束縛条件を与えることも必要である。

今後の展望としては、卓越風向については RIAM COMPACT を用いて、中立・安定(デフォルト値)・安定(本研究の回帰式より得られた値)の 3 パターンのシミュレーションを 20 サイトで実施後に精度検証をし、その過程で束縛条件を定める予定である。また、実際の発電量に合う手法を模索する予定である。

参考文献

- 1) 静居竜大, 内田孝紀, 田中鉄平, 市川弘人, 高山糧, 矢作和臣., 日本域における大気安定度分布の地域特性. 風力エネルギー学会論文集, Vol46, No.4, pp.38-49, 2022.
- 2) 静居竜大, 内田孝紀, 田中鉄平, 市川弘人, 高山糧, 矢作和臣, 松平陽., 陸上ウインドファームにおける風車ハブ高さ風速の高精度数値予測手法の研究開発 その 1. 大気安定度の地域特性. 風力エネルギー利用シンポジウム, Vol.44, pp.192-194. 2022.
- 3) Baidya, Roy, S., Pacala, S. W. and Walko, R. L., Can large wind farms affect local meteorology?, Journal of Geophysical Research; Atmospheres, Vol.109, No.D19, 2004.
- 4) Stull, R. B., An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988, pp.152-177.
- 5) IEC, Wind energy generation systems - Part 12-1: Power performance measurements of electricity producing wind turbines.