

# 洋上風速の鉛直分布における低・高層の大気成層の影響に関する研究\*

A study of vertical profile of offshore wind speeds considering effects of atmospheric stratifications in lower and upper layers

宋 云鵬\*\*      山口 敦\*\*      菊地 由佳\*\*      石原 孟\*\*  
Yun-Peng Song    Atsushi Yamaguchi    Yuka Kikuchi    Takeshi Ishihara

## 1. はじめに

風車の大型化に伴い、洋上風力発電所におけるウェイクの正確な予測には、流入風の鉛直分布を正確に評価する必要がある。このため、大気の成層が流入風の鉛直分布に与える影響を定量的に評価する必要がある。IEC 61400-1<sup>1)</sup>には、洋上風車設計に用いられる風速のべき指数 $\alpha = 0.14$ として定められているが、Kaimal and Finnigan<sup>2)</sup>では、風速のべき指数が大気境界層の成層状態によって大きく変化することが示されている。この変化は、上層大気の成層（自由大気の温位減率）および下層大気の安定度によるものであり、風速の鉛直分布およびウェイクの予測において重要である。

既往研究では上層大気の成層を考慮した解析解は、大気が不安定の時の解が示されていない。また、モニン・オブコフ相似則は、接地層内の風速の鉛直分布の予測に広く用いられるが、高度が100mを超えると、特に安定成層状態では風速が過大評価される問題がある。

本研究はWRF（Weather Research and Forecasting）シミュレーションにより得られた日本近海の気象予測のデータ<sup>3)</sup>を利用して、洋上の大気成層状態を調べるとともに、大気境界層の諸パラメータが低層大気の風速の鉛直分布に与える影響を明らかにする。

## 2. 大気の温位分布の評価

### 2.1 大気の温位分布の同定方法

大気の温位は主に4層に分類される。100mの高さまでは「接地層」と呼ばれ、その上の層は空気がよく混合され、「混合層」を呼ばれている。この層の温位が一定と仮定されている。混合層の上部には強い「逆転層」が存在し、高度が増加するにつれ温位が大きくなる。逆転層の上には「自由大気」と呼ばれる層があり、高度とともに温位が一定の割合で増加する。

本研究では、Rampanelli ら<sup>4)</sup>(2004)が提案した3層温位モデルを用いて大気の温位分布を同定する。接地層を除いた3層構造は、式(1)と式(2)を組み合わせた式(3)により温位の鉛直分布 $\theta(z)$ を表す。

$$f(\eta) = \frac{\tanh(\eta) + 1}{2} \quad (1)$$

$$g(\eta) = \frac{\ln[2 \cosh(\eta)] + \eta}{2} \quad (2)$$

$$\theta(z) = \theta_m + af(\eta) + bg(\eta) \quad (3)$$
$$\eta = 3(z - h)/(\Delta h)$$

ここで、 $h$ は逆転層の高さ、 $\Delta h$ は逆転層の厚さを表す。関数 $f(\eta)$ は逆転層を表し（図1(a)）、関数 $g(\eta)$ は混合層および自由大気の温位分布を表す（図1(b)）。

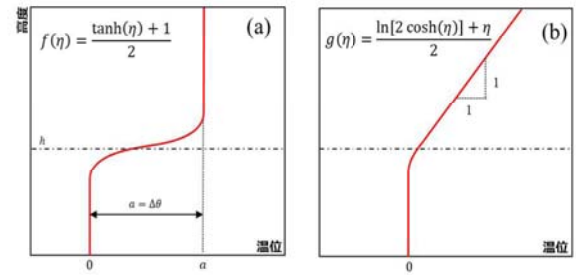


図1 (a)逆転層を表す関数 $f(\eta)$  (b)混合層と自由大気の温位分布を表す関数 $g(\eta)$ 。

式(3)における $\theta_m$ は混合層の温位、 $a$ は逆転層における温位差 $\Delta\theta$ を表す。また、自由大気の温位減率 $\gamma$ は式(4)によりパラメータ $b$ と $\Delta h$ から算出される。

$$\gamma = 2b/\Delta h \quad (4)$$

図2にはパラメータ $a, b, h, \Delta h, \theta_m$ の関係を示す。

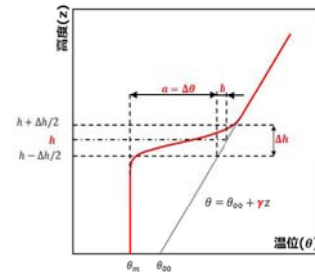


図2 温位分布の3層構造の概念図

本研究では、Kikuchi ら<sup>3)</sup>(2022)による銚子沖における2013年2月1日から2014年1月31日までの1年間のWRF（Weather Research and Forecasting）シミュレーション結果を利用し、日平均温位の鉛直分布から上述した5つパラメータの同定を行った。パラメータの同定にあたり、探索領域を以下のように設定した。

1.  $\Delta h/2 \leq h$  ( $a > 2b$ の場合に逆転層範囲は地面まで)
2.  $h \leq 2500\text{m}$  (逆転層高さ $h$ は2500m以下)
3.  $\Delta h \leq 1500\text{m}$  (逆転層厚さ $\Delta h$ は1500m以下)

図3と図4から、大気の温位分布は主に2つのパターンに分類される。自由大気の温位減率は $2b/\Delta h$ により計算され、逆転層の温位減率は $a/\Delta h$ により算出されるため、この2つのパターンは図2に示すように $a$ と $2b$ の大小関係により、逆転層の有無を判断できる。

\*令和6年11月29日 第46回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\*会員 東京大学工学系研究科 〒113-8656 東京都文京区 7-3-1

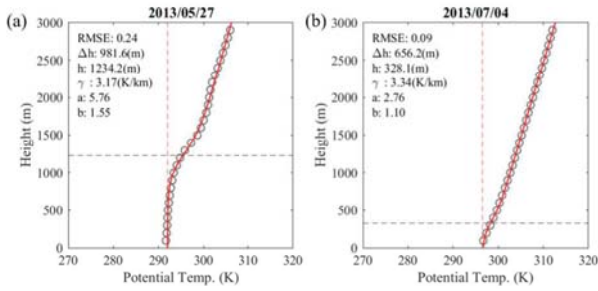


図3  $a > 2b$  の場合の温位分布, (a)明確な逆転層と混合層あり, (b)  $h < 500m$ かつ明確な混合層なし

図3に示すように,  $a > 2b$  の場合、逆転層の温位減率が上層より高く、明確な逆転層が現れる(図3a)。逆転層の高さが  $h < 500m$  の場合に、明確な混合層が無くなる(図3b)。これらのパターンは主に夏季に現れる。

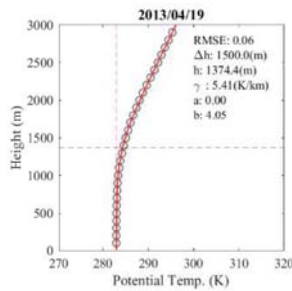


図4  $a \leq 2b$  の場合の温位分布

図4には,  $a \leq 2b$  の場合の温位分布を示す。逆転層の温位減率が上層の温位減率より小さく、明確な逆転層がなくなる。このパターンは主に冬季に見られる。

表1には各パターンの出現頻度を示す。夏季に明確な逆転層と混合層が確認された割合は全体の約15.6%にとどまる一方、逆転層はあるが、明確な混合層が観測されないケースが約32%に達した。さらに冬季に明確な逆転層が見られないが、明確な混合層が形成されているケースは全体の50%以上を占めている。

表1 大気境界層内の温位分布の分類と出現頻度

| 分類          | 逆転層高さ         | 温位分布の特徴     | 出現頻度  |
|-------------|---------------|-------------|-------|
| $a > 2b$    | $h \geq 500m$ | 逆転層あり・混合層あり | 15.6% |
|             | $h < 500m$    | 逆転層あり・混合層なし | 32.3% |
| $a \leq 2b$ | -             | 逆転層なし・混合層あり | 52.1% |

これらのパターンを考察すると、冬季には下層大気が不安定であるため、夏季と比べ、大気の混合が活発となり、下層の温かい空気と上層の冷たい空気が混合することにより、混合層内の温位が全体的に上昇し、その結果、逆転層がなくなる。一方、夏季には上空の大気が暖かく、水温が低い場合、逆転層が形成されやすく、風速が低い場合には逆転層の高さが低くなり、明確な混合層が見られなくなる。

## 2.2 上空温位パラメータと地衡風風速の確率分布

図5には同定された上層大気のパラメータの時系列変化を示す。上層の温位減率 $\gamma$ に関しては、年間を通じてほぼ一定の値を示しており、季節変化は見られない。これは、上層大気の温位勾配が安定していることを示唆している。一方、逆転層の高さ $h$ に関しては、夏季には低く、冬季には高くなる傾向が示されている。また、逆転層の温位差 $\Delta\theta$ に関しては、夏季には大きく、冬季には小さくなる傾向が示されている。この現象は、季節による大気の混合度合の違いを反映していると考えられる。さらに、上層の風速は夏季に弱く、冬季に強くなる傾向が見られる。

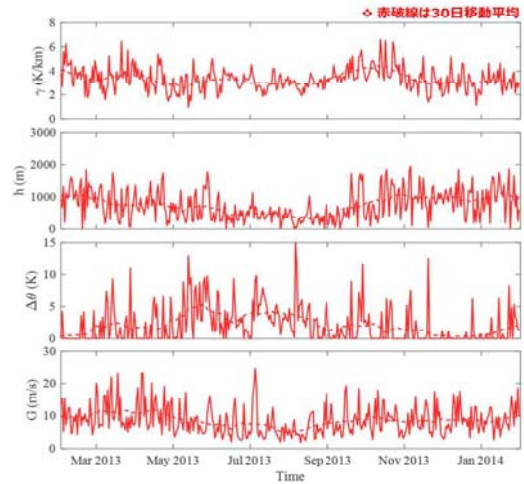


図5 同定された上層大気のパラメータの時系列変化

上層大気のパラメータの統計的性質を明らかにするために、式(5)に示すベータ分布を用いて求めた。

$$f(\hat{x}, \alpha, \beta) = \frac{\hat{x}^{\alpha-1}(1-\hat{x})^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \hat{x} = x / \max(x) \quad (5)$$

ここで、 $\hat{x}$ は各パラメータの最大値 $\max(x)$ を用いて無次元化した値を表す。

図6には銚子沖における大気境界層の各パラメータの確率分布を示す。比較のために、Lanzilaoら<sup>5)</sup>(2024)により北海を対象に、ERA5の再解析結果を用いて各パラメータの確率分布を示した。銚子沖は北海に比べ、いくつかの顕著な違いがあることが分かる。

地衡風風速に関しては、銚子と北海との間に顕著な差は見られないが、逆転層の高さについては、北海では比較的低い値が観察される一方、銚子では逆転層が高いところまで広がりを持っている。温位減率については、北海ではブロードな分布を示すのに対し、銚子では集中した分布を示している。また、逆転層の温位差 $\Delta\theta$ に関しては、明確な逆転層が存在しないケースが銚子で比較的多く見られるが、北海においては、明確な逆転層が観察されることが多い。以上の結果から、日本の大気境界層の構造は欧州のそれと違うことを示唆している。

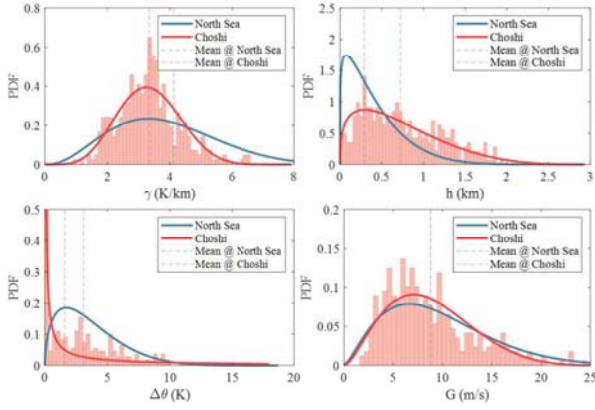


図6 銚子沖と北海における各パラメータの確率密度分布の比較

### 3. 低層大気境界層の評価

#### 3.1 低層大気の安定度の評価

低層大気の安定度は、モニン・オブコフ長さスケール  $L$  またはその逆数  $1/L$  により定義される。  $1/L$  は 0 より大きい場合は安定であり、0 より小さい場合は不安定である。また 0 に近い場合は中立であることを示す。

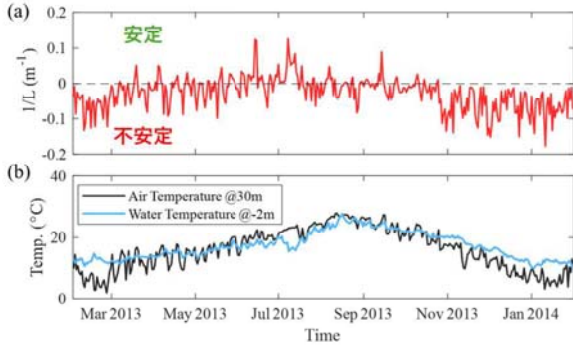


図7 低層大気の(a)モニン・オブコフ長さスケールの逆数と(b)海水温と海面付近の気温

図7には WRF から求めた低層大気のパラメータの時系列を示す。冬季には気温に比べ、水温が相対的に高くなるため、低層大気は不安定になる。一方、夏季には気温に比べ、水温が相対的に低くなるため、低層大気が安定になり、図7に示す大気の安定度に対応している。

#### 3.2 低層大気の流れの鉛直分布の評価

低層大気の安定度が風速鉛直分布に与える影響を評価するため、Yamaguchi ら<sup>6)</sup>(2024)が低層大気の安定度を表すモニン・オブコフ長さスケールを考慮した風速の予測式を提案した。

$$U_{target}^{pred}(\mathbf{X}, t) = U_{ref}^{obs}(t) \times C_U^b(\mathbf{X}, t) \times C_U^s(\mathbf{X}, t) \quad (6)$$

式(6)に示すように、このモデルでは地形効果と大気安定度の影響を補正係数  $C_U^b(\mathbf{X}, t)$  と  $C_U^s(\mathbf{X}, t)$  を用いる。観測された1高度の風速(例えば、ハブ高さの風速)か

ら低層大気の流れの鉛直分布を予測する。地形効果の補正係数  $C_U^b(\mathbf{X}, t)$  は CFD により求めることができ、安定度の補正係数  $C_U^s(\mathbf{X}, t)$  は次式により、海面や地表面粗度とモニン・オブコフ長さを用いて計算される。

$$C_U^s(\mathbf{x}, t) = \frac{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z}{L(x, y, t)}\right) \right] / \left[ \ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) - \psi\left(\frac{z_{ref}}{L(x, y, t)}\right) \right]}{\left[ \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right] / \left[ \ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right) \right]} \quad (7)$$

本研究は洋上風速の鉛直分布を対象とするため、地形効果の補正係数を1とし、安定度の影響を式(7)により考慮した。図8には、推定された風速の鉛直分布とWRFの予測値との比較を示す。不安定および中立の場合には、モニン・オブコフ長さを考慮して予測された風速の鉛直分布はWRFの結果とよく一致した。しかし、安定成層の場合に、高さ100m以下の予測値はWRFの結果と一致するものの、100m以上における予測値はWRFの結果を過大に評価することが分かる。同様な傾向は洋上風速の観測値との比較でも見られた。Kaimal and Finnigan<sup>2)</sup>から指摘されたように、モニン・オブコフ相似則の適用範囲は100mまでであり、それ以上の高度に関して、上層大気の温位減率の影響を考慮した新たな予測式が必要となる。

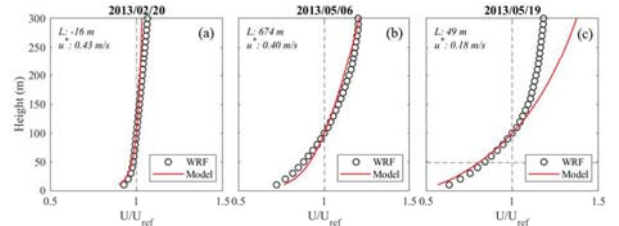


図8 推定された風速の鉛直分布とWRFの予測値との比較

(a) 不安定時 (b) 中立時 (c) 安定時

低層大気が安定の場合に、上層大気の成層が低層の流れ分布に強く影響するため、上層大気の成層を表すパラメータである温位減率を考慮する必要がある。本研究では、Narasimhan ら<sup>7)</sup>(2024)が提案した上層大気の成層を考慮した解析解を用い、低層大気が安定の場合の風速鉛直分布を予測した。東西と南北方向の風速成分は式(8)と式(9)により求める。

$$u(\xi) = \begin{cases} u^* \left( -g'(\xi) \left[ 1 - \frac{\xi}{h} \right]^{3/2} + g(\xi) \frac{3}{2h} \sqrt{1 - \frac{\xi}{h}} \right) + U_G, & \xi \geq \xi_m \\ u^* \left( \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\xi}{\xi_0} + (5\mu + 0.3\mu_N)(\xi - \xi_0) \right), & \xi < \xi_m \end{cases} \quad (8)$$

$$v(\xi) = u^* \left( \frac{g(\xi)g'(\xi)}{\sqrt{1-g^2(\xi)}} \left[ 1 - \frac{\xi}{h} \right]^{3/2} + \frac{3}{2h} \sqrt{1-g^2(\xi)} \left[ 1 - \frac{\xi}{h} \right]^{1/2} \right) + V_G \quad (9)$$

$$g(\xi) = c_g(1 - e^{-\xi/\Gamma h}), \quad g'(\xi) = \frac{c_g}{\Gamma h} e^{-\xi/\Gamma h}$$

$$\xi = z f_c / u^*, \mu = u^* / \kappa f_c L, \mu_N = \sqrt{\gamma(g/\theta_m)} / f_c, c_g = 1.43, \Gamma = 0.83$$

図9には大気成層を考慮した風速鉛直分布予測のフローチャートを示す。場所の変数であるコリオリスパ

ラメーターと表面粗度に加え、温位の3層モデルにより求めた上層の温位減率 $\gamma$ 、混合層の温位 $\theta_m$ 、地衡風 $G$ および低層の大気安定度を表すモニン・オブコフ長さスケール $L$ を入力値として用いる。

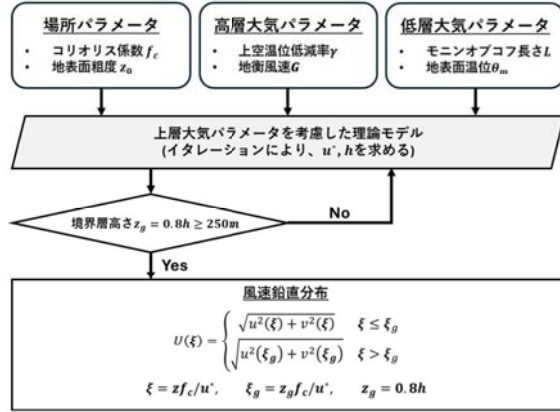


図9 大気成層を考慮した風速鉛直分布予測のフローチャート

図9に示すように、場所、高層大気と低層大気の6つのパラメータをNarasimhanらの解析解に入力して、反復計算により摩擦速度 $u^*$ と境界層高さ $h$ を求める。しかし、低層大気の大気安定度を表すモニン・オブコフ長さスケール $L$ が小さい場合には、境界層高さが非常に低くなることがあり、本研究では、建築物荷重指針<sup>8)</sup>を参考に洋上における傾度風高さ $z_g$ は250m以上と設定した。 $z_g$ が250m以下の場合、 $z_g = 0.8h$ の関係を利用し、上記の条件を満たすように反復計算により $h$ を求める手法を提案した。

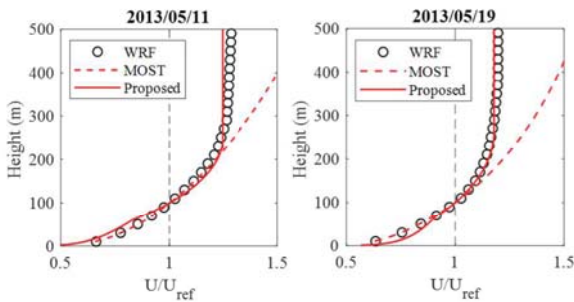


図10 提案手法により予測した安定時の風速の鉛直分布

図10には提案手法により予測した安定時の風速の鉛直分布を示す。提案手法により予測された300mまでの風速の鉛直分布はモニン・オブコフ相似則に比べ、100m以上の風速の過大評価が改善された。

#### 4. まとめ

本研究では、WRFシミュレーションを用いて日本近海の大気成層状態を調べるとともに、上層大気の温位減率を考慮した解析解を用いて、低層大気の大気安定度を表すモニン・オブコフ長さスケール $L$ を入力値として用いる。従来の手法に比べ、100m以上の高さにおける風速の過大評価を改善し、以下の結論を得た。

1. 大気の大気安定度を表す3層モデルのパラメータを同定し、銚子沖における大気の大気安定度を表す3層モデルのパラメータを求め、北海と比較した。その結果、日本は、北海に比べ、逆転層が広い範囲に分布していること、逆転層の大気安定度が非常に小さい割合が半分に分めることが分かった。
2. 低層大気の大気安定度を表すモニン・オブコフ相似則を用いることにより精度よく予測できるが、安定時には、高度100m以下では精度よく予測できるが、100m以上の風速を過大に評価することが分かった。
3. 下層大気が大気安定度の時に、上層大気の大気安定度を考慮した解析解を用いることにより、300mまでの低層大気の大気安定度を表すモニン・オブコフ相似則による100m以上の高さにおける風速の過大評価の問題を改善した。

#### 謝辞

本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務「洋上風況観測システム技術の開発」で得られた観測データの提供を受けた。ここで、関係者の皆様に謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) IEC 61400-1, Wind energy generation system part 1: Design requirements, fourth edition, 2019
- 2) Kaimal, J.C., Finnigan J.J., *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement* (New York, 1994)
- 3) Kikuchi Y., Fukushima M., Ishihara T., Assessment of a Coastal Offshore Wind Climate by Means of Mesoscale Model Simulations Considering High-Resolution Land Use and Sea Surface Temperature Data Sets. *Atmosphere*, 11, 379, 2020
- 4) Rampanelli, G., D. Zardi., A Method to Determine the Capping Inversion of the Convective Boundary Layer. *Journal of Applied Meteorology*, 43(6): 925–933 2004
- 5) Lanzilao L., Meyers J., A parametric large-eddy simulation study of wind-farm blockage and gravity waves in conventionally neutral boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics*. 979, 2024
- 6) Yamaguchi A., Tavana A., Ishihara T., Assessment of wind over complex terrain considering effects of topography, atmospheric stability and turbine wakes. *Atmosphere*, 15, 723, 2024
- 7) Narasimhan, G., Gayme, D.F., Meneveau, C., Analytical Model Coupling Ekman and Surface Layer Structure in Atmospheric Boundary Layer Flows. *Boundary-Layer Meteorol*, 190, 2024
- 8) 日本建築学会, 建築物荷重指針・同解説, 2015