

# 風車ロータの空気力分布と乱流混合の影響を考慮した新しいダブルガウシアンウェイクモデルの提案\*

A novel double-Gaussian wake model considering the load distribution on rotor and turbulence mixing effects

石原 孟\*\* 銭 国偉\*\*\*  
Takeshi ISHIHARA Guo-Wei QIAN

## 1. はじめに

風車後流が後方の風車の発電量を低下させ、疲労荷重を増大させるという問題をもたらすため、大規模ウィンドファームの発電量予測及び最適化には高速かつ高精度に後流を評価できる解析モデルの開発が重要である。これまでに風車後流の予測は主に遠方の風速場を対象としてきたが、ウィンドファームの更新などのために既存のウィンドファーム内の風速を計測する必要がある。その際には、風況観測タワーに設置した風速計が近傍の風車後流の影響を受けるため、正確な風況を評価するには近傍後流を含めた高精度な解析モデルが必要である。既往研究<sup>1,2)</sup>では風車の予測にシングルガウシアンモデルが提案され、遠方の風速分布を精度よく予測できるが、風車近傍の2ピーク速度欠損を再現できない。そのため、最近 Schreiber et al.<sup>3)</sup> と Keane<sup>4)</sup> はダブルガウシアンモデルを提案したが、極近傍の領域で発散し、モデルパラメータが定数となっているため、広範な風況および運転条件下で上手く適応できないという問題がある。

そこで、本研究では、まず、大気の流れ強度とロータのスラスト係数を系統的に変化させて LES による数値流体解析を行い、これらの支配パラメータが風車後流に与える影響を明らかにする。そして、風車ロータの空気力分布と乱流混合の影響を考慮した新しいダブルガウシアンウェイクモデルを提案する。最後、数値流体解析の結果と比較することにより、新しい提案モデルの予測精度の検証を行う。

## 2. 数値流体解析

### 2.1 支配方程式

本研究では、数値流体解析手法として LES を用いた。非圧縮流体の Navier-Stokes 方程式に対して空間フィルタをかけることにより次式が得られる。

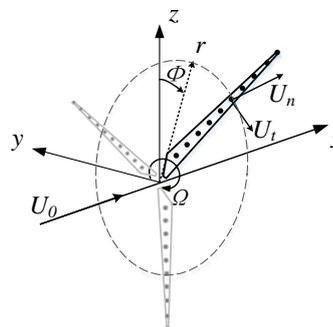
$$\frac{\partial \rho \tilde{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_i \tilde{u}_j) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \left( \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \right) - \frac{\partial \tilde{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_{rot,i}$$

ここで、 $\tilde{u}_i$ 、 $\tilde{p}$  はフィルタ平均化された速度と圧力であり、 $\rho$  は空気密度、 $\mu$  は粘性係数を表す。 $f_{rot,i}$  は風車のロータが流れ場にもたらす外力を再現するためのソース項である。また、 $\tau_{ij}$  はサブグリッドスケールのレイノルズ応力であり、Smagorinsky-Lilly モデルによりモデル化した。

(a)



(b)

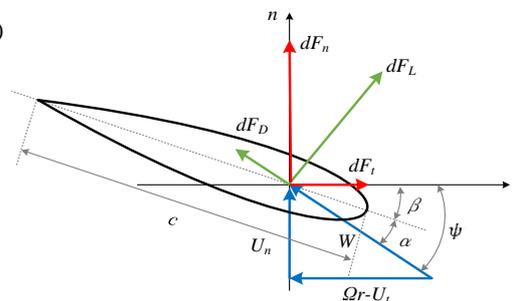


図1 ALMモデルの模式図：(a)ロータと回転要素の軸系、(b)ブレード要素に作用する力

\*第43回風力エネルギー利用シンポジウムにて講演

\*\*会員 東京大学大学院工学系研究科

\*\*\*会員 中山大学海洋工程と技術学院

本解析では ALM を用いて、風車ブレードの回転が乱流場に及ぼす影響を再現した。ALM モデルでは、計算格子に離散化された 3 本の回転する線により風車ブレードを表現し、翼素理論に基づき抗力と揚力が計算される。図 1(a)は ALM における回転要素の軸系を示す。ロータ中心からの距離が $r$ 、幅 $dr$ をもつ翼素に作用する流体力と風速の関係を図 1(b)に示す。

## 2.2 解析設定

風車モデルとしては、銚子沖のロータ径 92 m、ハブ高さ 80 m の 2.4MW 洋上風車を用いた。解析対象は、定格出力後 ( $C_T=0.36$ ) と定格出力前 ( $C_T=0.84$ ) の 2 種類の運転状態および洋上 ( $I_a=0.037$ ) と陸上 ( $I_a=0.135$ ) の 2 つの入流風を選んだ。

図 2 に示すように、計算領域は流れ方向 22D、流れ直角方向 4.4D、高さ 3.2D とした。ここで、 $D$ はロータ径である。上流側では、風洞実験と同様にスパイヤとフェンスを用いて、大気境界層を作成した。風車モデルは風洞の中心に設置し、スパイヤから 10D の位置に設定している。風車ロータ領域( $x = -0.25D \sim 0.25D$  &  $y = -0.75D \sim 0.75D$ )、構造メッシュによる  $D/64$  の均一な間隔に分割されている。時間ステップサイズはロータ翼端が時間ステップ毎にメッシュ要素以上に移動しないように設定した。

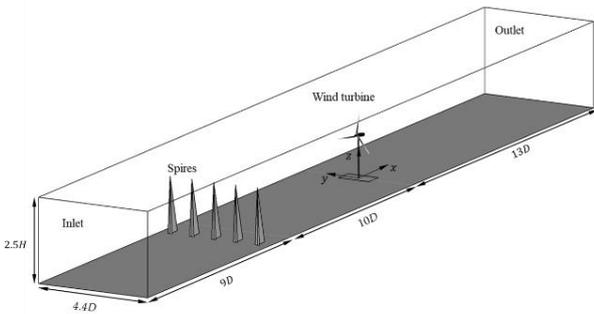


図 2 数値風洞の全体像

## 2.3 解析結果

図 3 には、風車のハブ高さにおける平均風速のコンターを示す。それぞれの値はハブ高さでの入流風速 $U_h$ で無次元化した。速度欠損のピークは風車近傍では 2 つあるものの、遠方に行くにつれ徐々に縮まり 1 つのピークに収束しているが分かった。また、乱流強度が大きいほど、2 つのピークが一つに収束することが早くとなっている。図 4 には、 $C_T=0.36$  と  $C_T=0.84$  の 2 つのケースに対しロータの空気力の分布を示す。ロータの空気力はブレードの中央付近では大きい、翼端と根

元では小さくなっていることが分かる。ロータの空気力が風車近傍後流に直接影響を与えるため、速度欠損は 2 つのピークとなっている。

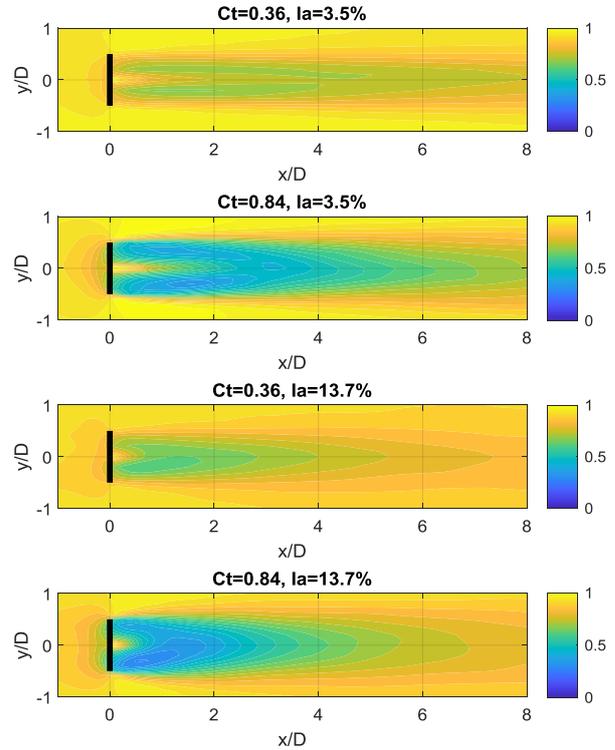


図 3 ハブ高さにおける無次元化した平均風速の分布

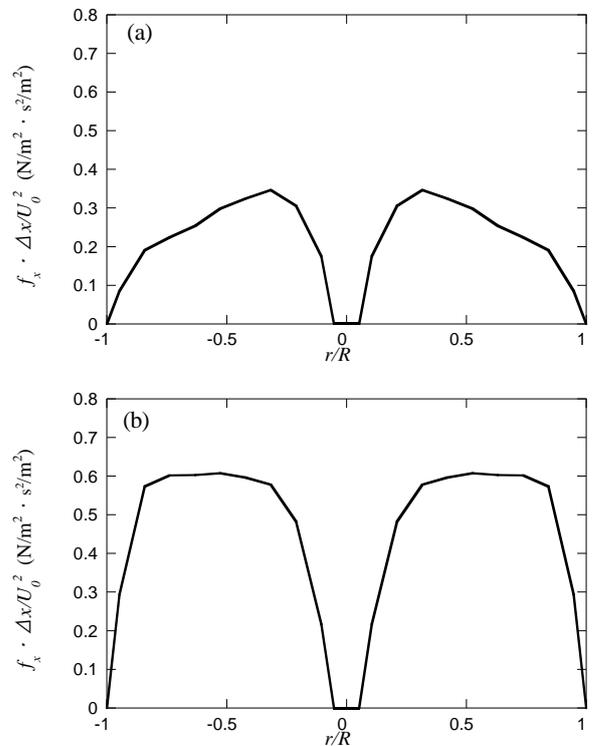


図 4 ブレード軸方向の空気力分布：

(a)  $C_T=0.36$ 、(b)  $C_T=0.84$

### 3. 解析モデル

#### 3.1 新しいダブルガウシアンウェイクモデルの提案

図5は風車を含めたコントロールボリュームを示す。本研究では、風車ロータにより生じる後流の速度欠損をロータの回転軸に対し軸対称と仮定した。後流内の各位置における平均風速 $U(x, y, z)$ は、風車位置における入流風の平均風速 $U_0(y, z)$ と風車による速度欠損 $\Delta U(x, y, z)$ を用いて、次式により表す。

$$U_w(x, y, z) = U_0(y, z) - \Delta U(x, y, z) \quad (3)$$

図5に示すコントロールボリュームに対し質量保存則を用いて次式が得られる。

$$\rho U_0 A_0 - \rho \int U_w dA_w = 0 \quad (4)$$

また、軸方向の運動量保存則において粘性項を無視することにより、

$$\rho U_0^2 A_0 - \rho \int U_w^2 dA_w = T \quad (5)$$

が得られる。ここで、 $T$ はロータにはたらく推力であり、次式により表せる。

$$T = \frac{1}{2} \rho U_0^2 A_R C_T \quad (6)$$

ここで、 $A_R$ はロータの面積 ( $A_R = \pi D^2/4$ )、 $D$ はロータの直径、 $C_T$ は推力係数である。式(4)と式(6)を式(5)に代入し、次式が得られる。

$$\int \Delta U (U_0 - \Delta U) dA_w = \frac{1}{8} C_T U_0^2 \pi D^2 \quad (7)$$

各断面における速度欠損の分布は Ishihara & Qian<sup>1)</sup>と同様に相似であると仮定し、軸方向位置の関数で表す最大値 $F(x)$ と半径方向位置の関数で表す分布関数 $\phi(r)$ の積として、次式により表す。

$$\Delta U(x, r)/U_h = F(x)\phi(r) \quad (8)$$

本研究では、分布関数は次式に示すダブルガウシアン分布を用いた。

$$\phi(r) = \frac{1}{2} \left\{ \exp\left(-\frac{(r+r_{min})^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(r-r_{min})^2}{2\sigma^2}\right) \right\} \quad (9)$$

式(8)と式(9)を式(7)に代入し、次式が得られる。

$$NF^2 - MF + \frac{1}{8} C_T D^2 = 0 \quad (10)$$

$M$ と $N$ は次式で表す。

$$M = 2\sigma^2 \exp\left(-\frac{r_{min}^2}{2\sigma^2}\right) + \sqrt{2\pi} r_{min} \sigma \operatorname{erf}\left(\frac{r_{min}}{\sqrt{2}\sigma}\right) \quad (11)$$

$$N = \sigma^2 \exp\left(-\frac{r_{min}^2}{\sigma^2}\right) + \frac{\sqrt{\pi}}{2} r_{min} \sigma \operatorname{erf}\left(\frac{r_{min}}{\sigma}\right) \quad (12)$$

ここで、 $\sigma$ は各断面におけるガウシアン関数の標準偏差、 $r_{min}$ はガウシアン関数の極値の半径方向位置である。 $F$ は式(10)の解であるが、風車背後で発散しないようにテーラー展開を行い、次式により近似した。

$$F = \frac{M - \sqrt{M^2 - 1/2N C_T D^2}}{2N} \cong \frac{C_T D^2}{8M} + \frac{N C_T^2 D^4}{64M^3} \quad (13)$$

また、近傍の二つのガウシアン分布が遠方まで一つに収束するようになるため、半径方向のピーク位置 $r_{min}$ は次式を用いてモデル化した。

$$\frac{r_{min}}{R} = \frac{r_0}{2R} \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x-x_0}{\sqrt{2mD}}\right)\right) \quad (14)$$

ここで、 $R$ はロータの半径、 $\sigma$ は線形的に広がると仮定し、次式により表す。

$$\frac{\sigma}{D} = k^* \frac{x}{D} + \varepsilon \quad (15)$$

ここで、 $\varepsilon = (1/2 - r_0/D)/3$ 、 $k^*$ は $C_T$ と $I_a$ の関数としてモデル化した。

提案式にあるパラメータは数値流体解析の結果に基づきGA手法を用いて同定し、次式に示した。

$$r_0 = 0.52R \quad (16)$$

$$m = 4.0 \quad (17)$$

$$x_0 = 3C_T^{0.65} I_a^{-0.31} D \quad (18)$$

$$k^* = 0.11C_T^{0.65} I_a^{0.27} \quad (19)$$

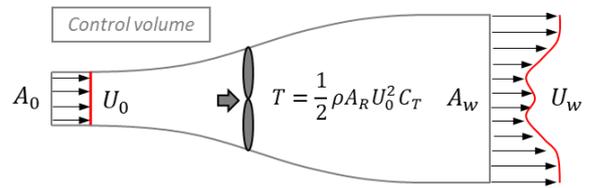


図5 風車を含むコントロールボリューム

#### 3.2 解析モデルの検証

本研究の各ケースのハブ高さにおける平均風速の水分布を図6に示す。白丸は数値流体解析から得られた結果、青実線はIshihara & Qian<sup>1)</sup>により提案したシングルガウシアンモデルの結果、赤実線は本研究で提案し

たモデルの予測値である。従来のシングルガウシアンモデルは近傍後流の2つのピークを再現できないが、本研究で提案した新しいダブルガウシアンモデルは近

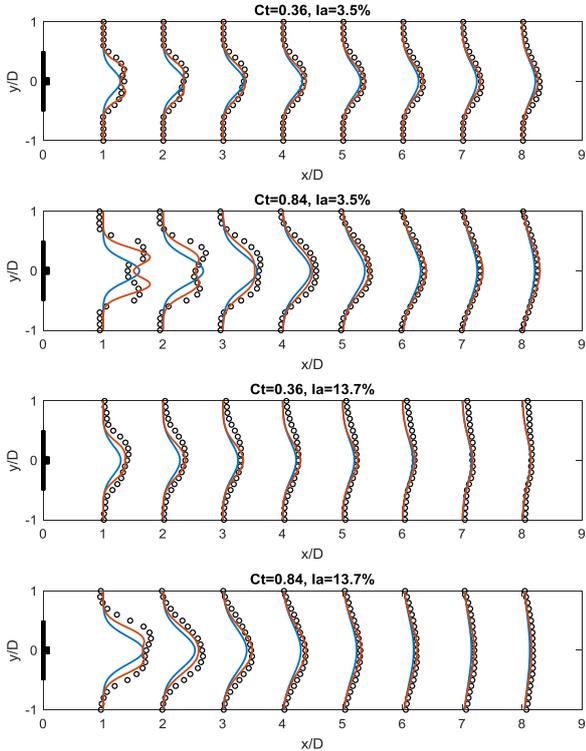


図6 ハブ高さにおける後流内の平均風速の水平分布の予測値と数値流体解析の値との比較

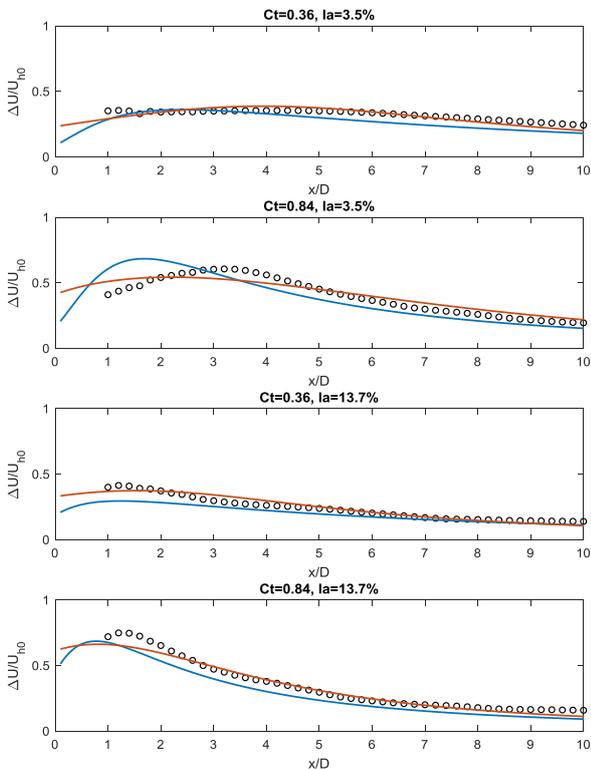


図7 後流中心軸における平均風速欠損の予測値と数値流体解析の値との比較

傍と遠方の両方とも数値流体解析の結果とよく一致していることが分かる。また、中心位置における速度欠損の結果も図7に示す。従来のモデルに比べ、提案したモデルの予測精度が向上したことが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、大気の流れ強度とロータのスラスト係数を系統的に変化させて LES による数値流体解析を行い、風車ロータの空気力分布と乱流混合の影響を考慮した新しいダブルガウシアンウェイクモデルを提案した。また数値流体解析の結果と比較することにより、新しく提案した解析モデルの精度検証を行い、以下の結論を得た。

1. ロータ空気力の分布の影響で速度欠損のピークは風車近傍では2つあり、ピーク間の距離は乱流混合により遠方において徐々に縮まり1つのピークに収束しているが分かった。
2. 風車近傍において既存モデルから得られた流れ方向の関数に対してテイラー展開を行い、風車背後で発散しない近似式を求めた。モデルパラメータが乱流強度とスラスト係数の関数とし、広範な風況と運転条件に適応可能になった。
3. 風車後流近傍から遠方までに適用可能な解析モデルを提案し、様々な大気の流れ強度と風車ロータのスラスト係数に対し、高い予測精度を示した。

#### 謝辞

本研究は「次世代エネルギーインフラの創成社会連携講座」の成果であり、ここで、関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- (1) Ishihara, T. and Qian, G.W., 2018. A new Gaussian-based analytical wake model for wind turbines considering ambient turbulence intensities and thrust coefficient effects. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177, pp.275-292.
- (2) Bastankhah, M. and Porté-Agel, F., 2014. A new analytical model for wind-turbine wakes. *Renewable energy*, 70, pp.116-123.
- (3) Schreiber, J., Balbaa, A. and Bottasso, C.L., 2020. Brief communication: A double-Gaussian wake model. *Wind Energy Science*, 5(1), pp.237-244..
- (4) Keane, A., 2021. Advancement of an analytical double-Gaussian full wind turbine wake model. *Renewable Energy*, 171, pp.687-708.