

## 風車後流を求めるための新しい解析モデルの提案

新日本製鐵(株) 正会員 山内雅也  
 東京大学大学院 正会員 石原 孟  
 東京大学大学院 フェロー 藤野陽三

## 1. はじめに

限られたスペースに複数の風車を密に配置するウインドファームにおいては,風車が風向き方向に重なる際に,風下に位置する風車が風速損失など風上側の風車の影響を受ける.風車の発電量は風速の3乗に比例するため,少しの風速損失が大きな発電ロスにつながる.そのため,ウインドファームにおける最適な配置間隔を考える際には風車後流の損失量の予測が不可欠である.しかし,従来の予測モデル<sup>[1]</sup>は,陸上または洋上のどちらか一方のウインドファームの予測のために開発されており,モデルとしての普遍性に欠ける.

そこで本研究では,大気の流れの違い,風車のスラスト係数,風車からの距離を考慮し,陸上,洋上いかなるケースについても予測可能なモデルを提案する.

## 2. 風洞実験

後流モデルを提案するために,風車模型を用いた風洞実験を行い,大気の流れ $I_a$ ,風車のスラスト係数 $C_t$ を変えた4ケースについて風車後流の風速分布を計測した.

本実験は,東京大学工学部風工学実験室の強風シミュレーション風洞(長さ11m,幅1.5m,高さ1.8m)において行った.風車模型は,三菱重工の実風車(MWT-1000)を1/100の縮尺で再現したモデル(タワー高さ69.5cm,風車直径57cm)を用いた.この風車模型はナセル部にモーターを内蔵しており,回転数を促進することができ,従来の自然回転では得られなかった高い周速比における実験を可能とした.



図1 風車模型

この実験から,後流風速の損失量は風車のスラスト係数が大きいほど多くなり,その回復の早さは後流の流れが大きいほど早いという傾向にあることが確認できた.また,後流の流れは大気の流れと風車から生じる流れの和であり,風車から生じる流れの大きさは風車のスラスト係数に比例し,大気の流れに反比例する傾向にあることを見出した.

## 3. 後流風速予測提案モデル

従来,2次元の流れの中に置かれた円柱,球などの不透過性の静止物体に対しては,その後流を表すモデル<sup>[2]</sup>がいくつか提案されている.しかし,これらのモデルは回転体である風車の後流までも満たしているとはいえない.特に,風速損失の回復,後流幅の広がりを示すパラメータが一定値であり,乱れが異なるケースでの違いを組み込んでいない.そこで本研究ではこれらのモデルをベースに改良し,風車後流モデルを提案する.

まず,風車の後流は,風車の中心から半径方向に様に分布していると考えられるので,風車中心位置を原点として軸対称モデルで表わすことができる.そこで風車から風向き方向に遠ざかる距離を $x$ 成分,風車中心から半径方向の距離を $r$ 成分とすると,ある地点での風速は $u(x,r)$ と表すことができる.

軸対称での後流の流れ場の運動方程式は,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial r} = \nu_t \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

であり,流入風速 $U_0$ に対して欠損風速を,

$$u_1(x,r) = U_0 - u(x,r) \quad (2)$$

で表す.これに対し,2次の微小項を無視して近似すると,式(1)は

$$U_0 \frac{\partial u_1}{\partial x} = \frac{\nu_t}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial u_1}{\partial r} \right) \quad (3)$$

と表せる.

また,風車に働く抗力と運動量束との関係から

$$D = 2\pi\rho U_0 \int_{r=0}^{\infty} u_1 \cdot r dr \quad (4)$$

である.ここで,後流の相似形により欠損風速を以下の様に仮定する.

$$u_1 = CU_0 f(\eta) x^{-p} \quad (5)$$

このとき,

$$\eta = \frac{y}{b}, \quad b = 2 \left( \frac{\nu_t}{U_0} \right)^{1-\frac{p}{2}} \cdot x^{\frac{p}{2}} \quad (6)$$

であり, $b$ は後流幅を表している.

これらの式を運動方程式に代入し,更に $p=1$ と仮定した時

の後流の相似形は

$$f(\eta) = \exp(-\eta^2) \quad (7)$$

となる. $p$ は後流の欠損風速の回復の程度を示すパラメータであり,一般的な後流分布において常に $p \approx 1$ であるから,後流の相似形は近似的に式(7)を用いることができる.

これを用いて式(5)を式(4)に代入すると,比例定数 $C$ はスラス

キーワード: 風車後流, ウインドファーム, 大気の流れ, スラスト係数, 解析モデル

連絡先 : 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL 03-5841-6099 FAX 03-5841-7454

ト係数  $C_t$  との関係として以下の様に得られる．

$$C = \frac{1}{32} C_t d^2 \left( \frac{U_0}{v_t} \right)^{2-p} \quad (8)$$

ここで，

$$C_t = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \left( \frac{d}{2} \right)^2 \pi} \quad (9)$$

である．

また，後流の半値幅は実験から

$$b_{1/2} = k_2 C_t^{1/4} d^{1-\frac{p}{2}} x^{\frac{p}{2}} \quad (10)$$

の形で求まり 本モデルの後流の相似形による半値幅と後流幅の関係は

$$b_{1/2} = 0.833 \cdot b \quad (11)$$

であるので

$$v_t = \left( \frac{k_2 C_t^{1/4}}{2 \times 0.833} \right)^{\frac{2}{2-p}} d U_0 \quad (12)$$

が求まる．

以上により，提案モデルは

$$\frac{u_1(x, y)}{U_0} = \frac{C_t^{1/2}}{32} \left( \frac{1.666}{k_2} \right)^2 \left( \frac{x}{d} \right)^{-p} \exp \left( -\frac{y^2}{b^2} \right) \quad (13)$$

$$b(x) = \frac{k_2 C_t^{1/4}}{0.833} d^{1-\frac{p}{2}} x^{\frac{p}{2}} \quad (14)$$

と決定される．

また， $p$  は後流の回復の早さ，後流幅の広がりを示すパラメータで後流の乱れに関するので

$$p = k_3 I \quad (15)$$

と表すことができる 後流の乱れは大気の流れと風車が生み出す乱れの和であるので

$$I = I_a + I_w \quad (16)$$

である．風車が生み出す乱れの大きさは， $C_t$  に比例し， $I_a$  に反比例すると考えられる．風車翼端で発生する大きな乱れは，風車近傍ですくには風車中心軸に達しておらず 距離とともに混合が進み，その影響が生じることになる．そこで，後流の乱れを求める際 風車が生み出す乱れが距離によって効いてくるように以下の様に勾配を与える．

$$p = k_3 (I_a + I_w) \quad (17)$$

$$I_w = k_1 \frac{C_t}{\max(I_a, 0.03)} \left( 1 - \exp \left( -4 \left( \frac{x}{10d} \right)^2 \right) \right) \quad (18)$$

そして，各比例係数は本研究における実験値から算定して

$$k_1 = 0.004, \quad k_2 = 0.27, \quad k_3 = 6.0$$

とした．

図2には 風車高さにおける欠損風速の流れ方向の分布を示す．いずれのケースにおいても本モデルは既存モデル(model 1<sup>[3]</sup>，model 2<sup>[4]</sup>)より実験結果に近い．図3には，風車後流における風

速の鉛直分布を示す 風車から下流に行くにつれ風速の欠損が小さくなっている 新しいモデルは実験結果をよく再現していることが分かる．

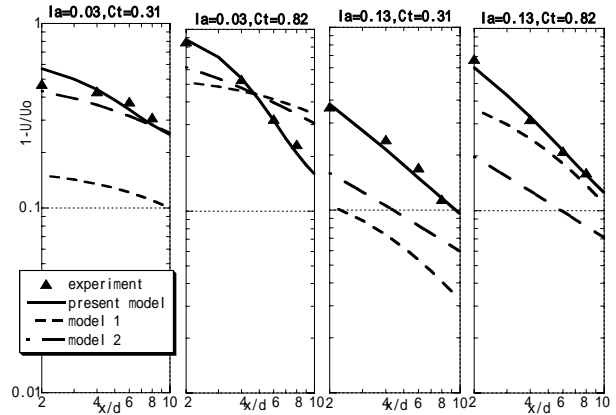


図2 風車高さにおける欠損風速の流れ方向分布

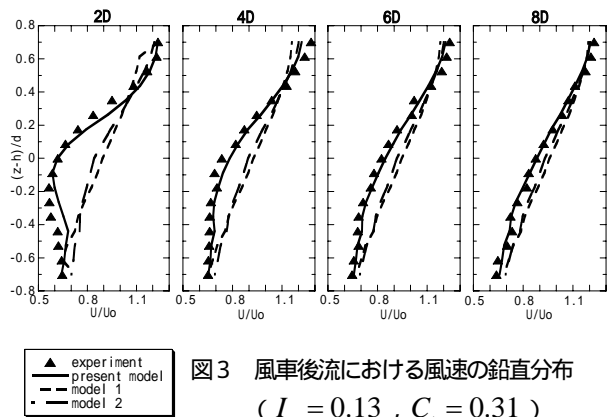


図3 風車後流における風速の鉛直分布 ( $I_a = 0.13, C_t = 0.31$ )

#### 4. まとめ

本研究では，風車後流風速の予測に関して，大気の流れ，風車のスラスト係数を考慮した新しい解析モデルを提案した．そして，風洞実験結果と比較することで 本モデルが既存モデルより予測精度が高いことを検証した．

#### 謝辞

本研究では，三菱重工株式の平井滋登氏に風車模型の作成並びに風洞実験に関して貴重な助言を頂いた．ここに記して謝意を表する．

#### 参考文献

- [1] Konstantinos Rados, et al. "Comparison of wake models with data" Endow Workshop Risoe, DK (2002)
- [2] Schlichting "Boundary-Layer Theory" McGraw Hill Book Company
- [3] I.Katic et al. "A Simple Model for Cluster Efficiency" European Wind Energy Association Conference and Exhibition, Italy (1986)
- [4] G. C. Larsen "Cookery Book for Wind Farm Load Calculations" Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (2002)
- [5] 山内雅也：風洞実験による風車後流の計測及びそのモデル化に関する研究，東京大学大学院修士論文 (2003)