

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 13 日現在

機関番号：13301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820455

研究課題名(和文) 風車タワーが風車後流及び風下側風車に与える影響の解明とそのモデル化に関する研究

研究課題名(英文) Numerical Investigations and Modelling of Wind Turbine Tower Effects on Wake and Aerodynamic Forces

研究代表者

河野 孝昭 (Kono, Takaaki)

金沢大学・サステナブルエネルギー研究センター・助教

研究者番号：90630921

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、風車タワーがある場合と無い場合について、様々な周速比で、風車まわりの流れのCFDシミュレーションを実施し、風車タワーが風車後流に与える影響を明らかにした。さらに、風車タワーを陽的に解像したCFDシミュレーションにより、風車タワーの抗力係数及び揚力係数の鉛直分布を算出した。そして、風車タワーが存在する計算格子において、Navier-Stokes方程式にこれらの空力係数を用いたシンク項を付加し、風車タワーをモデル化した。

研究成果の概要(英文)：This study investigated the influence of a wind turbine tower on wind velocity distribution in the wake of a wind turbine. Large-eddy simulations of the wind flow around the wind turbine were performed for cases in which a wind turbine tower was explicitly resolved and cases in which the tower was neglected. In addition, the aerodynamic force on the tower was analyzed. Moreover, the tower was modelled by adding sink terms that include the aerodynamic force coefficients to the Navier-Stokes equations.

Results confirmed that the effects of the tower on the wind velocity distribution were significant and changed with tip-speed ratio. It was also confirmed that the local drag and lift coefficients of the tower changed drastically in the vertical direction. Regarding the simulation using the tower model, the asymmetric distribution of the wind velocity at the height of the hub height was not regenerated.

研究分野：風車工学

キーワード：風車 後流 風力発電 流体 CFD 乱流 風荷重

1. 研究開始当初の背景

風力発電機の風車を複数台導入する際、風上側に配置される風車の後流が風下側に配置される風車へ及ぼす次の2つの影響を把握することが重要となる。一つは、後流の風速減衰に起因する発電量の低下であり、もう一つは後流の乱れの増加に起因する風荷重の増大である。近年のコンピュータ能力の向上に伴い、これらの影響を予測・評価するツールとして、風車後流の数値流体力学(CFD)シミュレーション技術の開発が世界各国で精力的に取り組まれてきている。

風車周りの流れの CFD シミュレーションは、風車のブレードを陽的に解像するものと、ブレードに作用する力を流体の運動量方程式の外力項で取り扱うものの2つに大別できる。前者は膨大な計算コストを要する為、風車後流解析への適用事例は極めて限られている。一方、後者は、ローターの形状を円盤で近似したアクチュエータ・ディスク(AD)モデルや、ブレードの形状を線で近似したアクチュエータ・ライン(AL)モデル等の開発が進められてきており、風車単体だけでなく、ウィンドファームを対象としたシミュレーションへの適用事例も増えてきている。

ADモデルやALモデルを用いた CFD シミュレーションの風車後流風速の再現性について風洞実験結果と比較検証した既往の主な研究としては、申請者の研究を除くと、Cabezon et al. (Wind Energy, Vol. 14, 2011)、Porte-Agel et al. (J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., Vol. 99, 2011)、Uchida et al. (Modelling and Simulation in Engineering, Vol. 2011, 2011)、Troldborg et al. (Wind Energy, Vol. 13, 2010)が挙げられる。これらの研究は全て、アップウィンド型の水平軸風車を対象にしている。更に、これらの文献では共通して、風洞実験結果のハブ高さにおける風車後流風速の主流直角方向分布に、大きな非対称性が存在していることが確認できる。これまで、この非対称性については全く議論・言及されていないが、Uchida et al. (2011)のみは CFD 解析で定性的な傾向を再現出来ている。Uchida et al. (2011)の CFD 解析では、ハブ及びナセルと風車タワーを陽的に解像しているところに特徴がある。Porte-Agel et al. (2011)は、ナセルと風車タワーから受ける力を流体の運動量方程式の外力項に反映させているが、ナセルとタワーの影響を考慮していないその他の文献同様、上述の非対称性を再現できていない。これらの文献を踏まえ、申請者は、風車後流風速の主流直角方向の顕著な非対称分布は、風車タワーの存在により生じているものと推測した。そして AD モデルを用いた CFD シミュレーションを風車タワーを陽的に解像した場合と風車タワーの影響を無視した場合について実施し、風車タワーが風車後流風速の水平分布に大きな影響を与えていることを初めて明らかにした。

以上のように、本研究で対象とする「風車

タワーが風車後流特性に与える影響」は、その影響の大きさにもかかわらず、既往の国内外の研究では全く注目されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、水平軸風車のタワーが風車後流特性及び風下側風車に与える影響を解明し、更にその影響を低解像度の計算格子で CFD シミュレーションに反映させるモデル化手法を開発して、近接した複数台の風車から構成されるウィンドファーム等の発電量予測ツールや各風車の風荷重評価ツールの高精度化に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

CFDソフトウェアFrontFlow/redにADモデルやALモデル等の風車モデルを組み込み、風車タワーの形状を忠実に細密な計算格子を用いて解像した場合とタワーの存在を無視した場合について CFD シミュレーションを実施する。そして、ブレード回転の周速比等を様々に変化させた条件下で、風車タワーの存在が、風車後流の風速・乱流特性に与える影響を解明する。さらに、風車タワーに働く流体力から、抗力係数と揚力係数の鉛直分布を算出する。そして、Navier-Stokes 方程式にこれらの空力係数を用いた Sink 項を付加することで、タワーの存在をモデル化する。

CFD シミュレーションは、Krogstad et al. (Wind Energy, Vol. 15, 2012)らの風洞実験(図1)の条件に合わせ、計算領域は、風洞の測定胴部全体を対象とする(図2)。乱流の計算には、Large-Eddy Simulation (LES)を用いる。

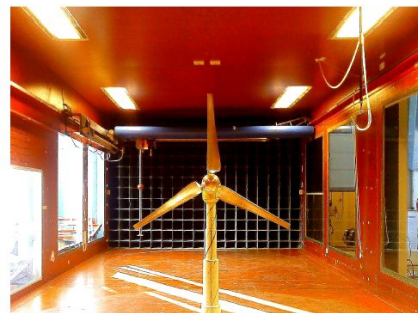


図1 風洞実験の様子

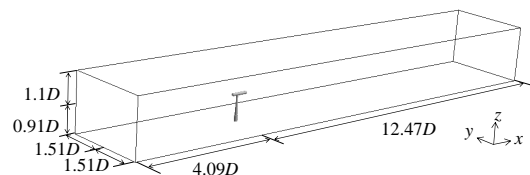


図2 計算領域 (D: ローター直径)

4. 研究成果

(1) 風車タワーが風車後流風速分布に与える影響

図3に、風車後流におけるハブ高さの時間

平均主流方向風速の  $y$  方向分布を示す。風洞実験結果の再現性は、全ての周速比  $\lambda$  において、「タワーあり」ケースの方が、「タワーなし」ケースよりも全体的に高いことが確認できる。

最適周速比  $\lambda = 5.79$  における「タワーあり」ケースと「タワーなし」ケースの顕著な差異の発生原因は、次のように考えられる。図3 (d) ~ (f) 中に  $D1 \sim D4$  で示した差異(差異)は、「タワーあり」ケースにおいて、「タワーなし」ケースには無い減速ピークが生じていることによるが、この減速ピークは、タワー後流の低下した運動量が、ローター後流に生じるローターと逆の回転方向 ( $-\theta$  方向)の風速成分により移流されたことにより発生する。一方、図3 (f) 中に、 $D5$  で示した差異(差異)は、「タワーあり」ケースにおいて、この周辺の乱流エネルギーが「タワーなし」ケースのものよりも著しく大きくなり、運動量の乱流拡散が促進されて回復することにより発生する。 $D5$  周辺の乱流エネルギーが大きくなるのは、タワー後流に発生した高い乱流エネルギーが、ローター外縁近傍の下流に形成される強いせん断層の乱流化を促進するのに加え、ローター後流の  $-\theta$  方向の風速成分により移流されることが原因である。

低周速比  $\lambda = 3.35$  においては、図3 (a) ~ (c) 中の「タワーあり」ケースと「タワーなし」ケースの顕著な差異は、 $x/D = 1$  で最も顕著であり、風下に行くほど減少している。 $x/D = 1$  の  $D6$  で示した顕著な差異は、上述の差異と同じ原因で発生する。図4は、図3 (a) の主流方向風速の減速ピーク  $D6$  近傍を通過する時間平均場の流線を描画したものであるが、この流線が、その風上において、タワーの近傍をタワーの両側を回り込むように通過しているのが確認できる。このことより、 $D6$  で示した差異の発生には、「タワーあり」ケースにおいて、タワー近傍の大きく減衰した運動量が、ローター後流の  $-\theta$  方向の風速成分によって移流されたことが大きく寄与しているものと考えられる。

高周速比  $\lambda = 9.15$  においては、図3 (g) ~ (h) 中の「タワーあり」ケースと「タワーなし」ケースの顕著な差異は、 $x/D = 1$  では顕著ではなく、それよりも下流で顕著となっている。これらの顕著な差異は、図5より、上述の差異と同様に、「タワーあり」ケースの乱流エネルギーが「タワーなし」ケースの乱流エネルギーよりも高くなり、運動量の乱流拡散が促進されたことが原因であると考えられる。図中に  $D8 \sim D11$  で示したローター外縁近傍の下流の差異は、 $\lambda = 5.79$  の場合に比べて、かなり上流から顕著になっているのが確認できる。これらの差異は、 $x$  軸に対してほぼ対称となっていることから、ローター外縁近傍の下流の  $\lambda = 5.79$  の場合よりも強いせん断層が、タワー後流の高い乱流エネルギーによって乱流化が促進されたことにより、発生しているものと考えられる。一方、 $D12$

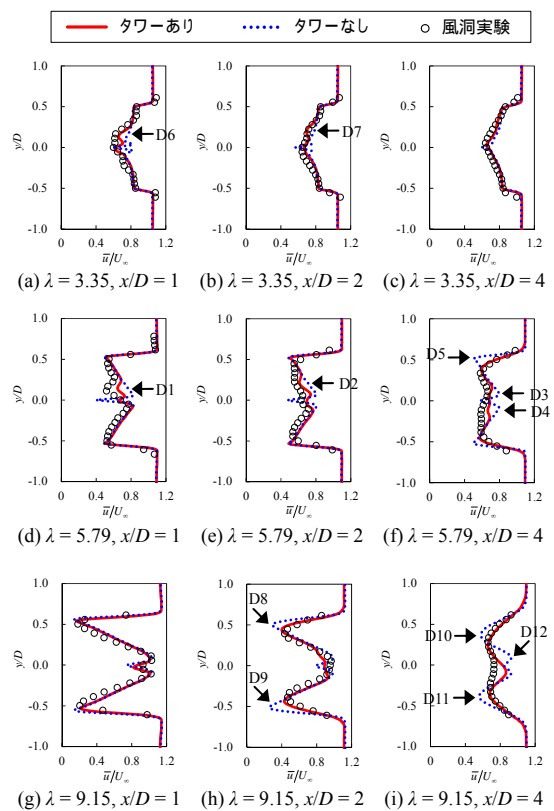


図3 時間平均主流方向風速のハブ高さの  $y$  方向分布

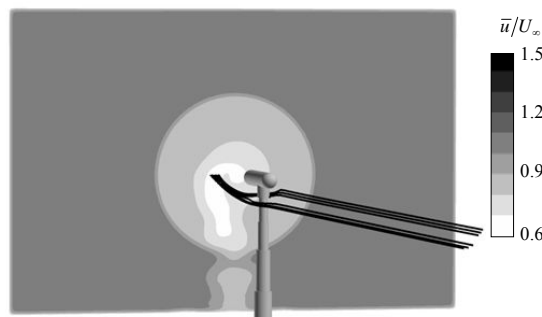


図4 時間平均場の流線と  $x/D = 1$  における風速分布 (流線は図3 (a)の減速ピーク  $D6$  近傍を通過するもの)

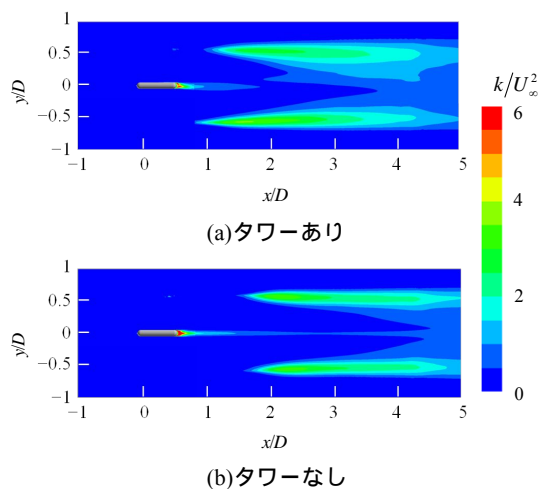


図5 ハブ高さの乱流エネルギー ( $\lambda = 9.15$ )

で示した差異は、図5の  $x/D = 4$  において、乱流エネルギーが  $x$  軸に対して非対称になっていることから、タワー後流の高い乱流エネルギーがローター後流の  $\theta$  方向の風速成分によって移流されたことが大きく寄与しているものと考えられる。

### (2) 風車タワーの抗力係数及び揚力係数の鉛直分布

Wu and Porte-Age (Bound layer Meteor., Vol. 138, 2011)は、ADモデルを用いた風車周辺の流れのLES解析において、鉛直方向に一定の抗力係数  $C_D$  の外力項  $0.5\rho U^2 A C_D$  を Navier-Stokes 方程式に付加することにより、タワーの存在を考慮している。ここで、 $U$  は風車の影響を受けていない上流のハブ高さの風速、 $A$  はタワーの見つけ面積である。そこで、抗力係数や揚力係数が鉛直方向に一定であるという仮定の妥当性を調べるために、それぞれを鉛直方向  $z$  の関数として

$$C_D(z) = F_D(z) / 0.5\rho A(z)U_\infty^2 \quad (1)$$

$$C_L(z) = F_L(z) / 0.5\rho A(z)U_\infty^2 \quad (2)$$

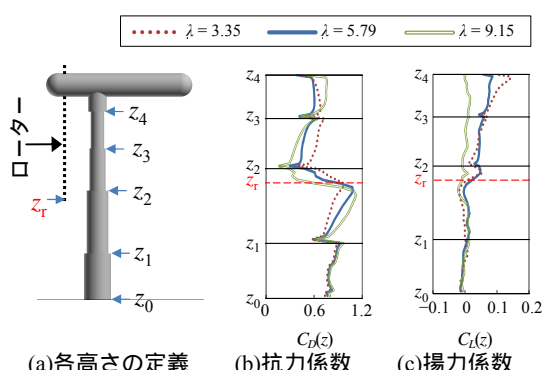
と定義する。ここで、 $F_D(z)$  と  $F_L(z)$  は、鉛直方向に分割したタワーの高さ  $z$  の部分に働く抗力と揚力、 $A(z)$  は分割したタワーの高さ  $z$  の部分の見つけ面積である。図6に、タワーを直径が同じ部分について、鉛直方向にそれぞれ20分割ずつした  $C_D(z)$  及び  $C_L(z)$  の鉛直分布を示す。

$C_D(z)$  は、タワーの下から2段目において、値が大きく変化しているのが確認できる。その変化量は、周速比が高いほど大きく、 $\lambda = 9.15$  では、約  $0.4 \sim 1.1$  と3倍近く変化している。これは、図3(a)(d)(g)からわかる通り、 $\lambda$  が高いほど、ローター外縁近傍の外側の下流で風速が増加し、内側の下流で風速が減少する為であると考えられる。なお、図中には、タワーの直径が異なる高さを示しているが、1～4段目の境から少し上の箇所と、4段目の上側から少し下の箇所では、流れの剥離により、タワーに衝突する流量が減少して、 $C_D(z)$  は小さくなっているものと考えられる。

一方、 $C_L(z)$  については、 $C_D(z)$  の高々15%の大きさと小さいが、 $\lambda$  が低いほど、その鉛直方向の変化量が大きく、 $C_D(z)$  とは、分布の傾向が異なっているのが確認できる。

### (3) 風車タワーのモデル化

風車タワーが存在する計算格子において、 $x$  及び  $y$  方向の Navier-Stokes 方程式に(1)式及び(2)式のシンク項を付加し、風車まわりの流れのCFDシミュレーションを実施した。その結果、風車タワーの後流の風速分布は、実験結果を過大評価し、さらに、風車ローター後流の風速の水平方向分布の非対称性については、再現されなかった。非対称性が再現されなかったのは、風車タワー後流の風速が過大評価され、乱れが過小評価されたことが原因であると考えられる。タワーのモデル化方法は、本方法の他に、タワーの壁面上で



(a)各高さの定義 (b)抗力係数 (c)揚力係数

図6 タワーの抗力係数と揚力係数の鉛直分布

流速を0に近似する Immersed Boundary 法を用いた方法を開発中であり、今後検証を進める予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1件)

河野孝昭, 木綿隆弘, 小垣哲也, 風車タワーの風車後流に与える影響と空気力のLES解析, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.139-144, 2014, 査読有  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/23/0/23\\_139/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/kazekosymp/23/0/23_139/_article/-char/ja/)

[学会発表](計 5件)

河野孝昭, 木綿隆弘, 小垣哲也, 風車タワーの風車後流に与える影響と空気力のLES解析, 第23回風工学シンポジウム, 2014年12月3日, 東京大学山上会館(東京都文京区)

河野孝昭, 風車タワーの風車後流に与える影響とタワーの空気力についてのCFD解析, 第53回北陸流体工学研究会, 2014年8月23日, 金沢大学(石川県金沢市)

Takaaki Kono, Takahiro Kiwata, Tetsuya Kogaki, LES analysis of the wake of a wind turbine and the aerodynamic force on the wind turbine tower, Grand Renewable Energy 2014, 2014年7月29日, 東京ビッグサイト(東京都江東区)

河野孝昭, 木綿隆弘, 小垣哲也, 風車タワーの空気力と風車後流に与える影響, 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会, 2014年3月8日, 富山県立大学(富山県斜水市)

河野孝昭, 風車後流の数値流体解析, 第2回RSET公開シンポジウム, 2013年11月26日, 香林坊プラザホール(石川県金沢市)

6 . 研究組織

(1)研究代表者

河野 孝昭 ( KONO, Takaaki )

金沢大学・理工研究域サステナブルエネルギー研究センター・助教

研究者番号：90630921