

土木学会第 70 回年次学術講演会

数値流体解析を利用した風車後流における乱流特性の解明

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○吉澤 佑太  
 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 正会員 石原 孟

1. はじめに

ウィンドファーム内の風車後流は後方風車の発電量の減少や疲労荷重の増大をもたらすため、ウィンドファームを設計する際にはその影響を正しく評価することが不可欠である。風車後流の乱流特性を調べる手法としては風洞実験<sup>[1]</sup>などが用いられてきたが、風車後流の乱流構造を詳細に調べた例は少ない。一方近年では乱流場の詳細な構造を把握するために数値流体解析が用いられるようになってきたものの、大気の流れ強度と風車の運転状態を考慮し、風車後流の支配パラメータを系統的に変化させて解析を行った例が限られている。また、風車の空力特性に影響するレイノルズ数やピッチ角が風車の後流場に与える影響についても不明な点が残されている。

そこで本研究では、大気の流れ強度と風車ローターのスラスト係数を系統的に変化させ、LES モデルを用いた数値流体解析を行うことで、風車後流の乱流特性を明らかにするとともに、大気の流れ強度およびスラスト係数が風車後流場に与える影響を明らかにする。

2. 数値解析手法と解析条件

本研究では、空間平均した非圧縮性流体の Navier-Stokes (NS) 方程式を用い、乱流モデルとしては LES モデルを使用した。風車ローターの回転運動が乱流場に与える影響は、ADM-R (Actuator Disk Model with Rotation) によって流体力として NS 方程式に与え、ローターに作用する荷重分布は翼素理論 (Blade Element Momentum Theory) から求めた。タワーとナセルについても流体力を NS 方程式に与えることで、その影響を再現した。

本研究では、石原ら<sup>[1]</sup>の風洞実験と同様に、スパイヤーとフェンスを用いて大気境界層を作成した (図 1)。数値風洞については風洞実験を忠実に再現することで作成し、水平方向と鉛直方向の最小格子幅は

それぞれ 1cm および 0.2cm とした。

数値風車モデルは、石原らの風洞実験で用いた三菱重工業の 1000kW 風車の 1/100 スケール模型に加え、銚子沖に設置した三菱重工業の 2400kW 洋上風車に対しても行った。模型風車のブレードモデルには低レイノルズ数に対応した空気力係数を用い、運転状況については風洞実験のデータに合わせて設定した。実風車のブレードの特性および運転制御については、山口ら<sup>[2]</sup>によって構築されたモデルを用いた。

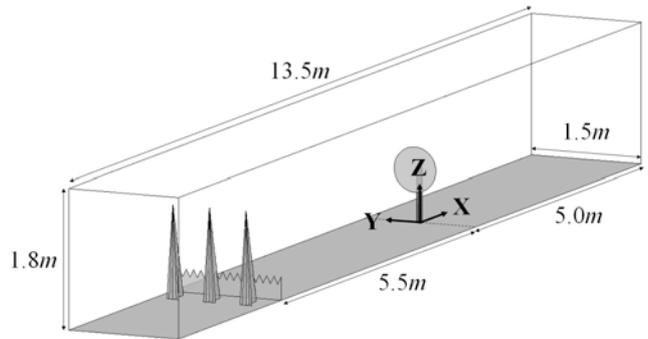


図 1 数値風洞の全景

解析対象としては、定格出力後 ( $C_T \approx 0.35$ ) と定格出力前 ( $C_T \approx 0.8$ ) に対応する 2 種類の運転状況と、洋上と陸上に対応する 2 つの大気状態を選んだ。各ケースの解析条件は表 1 に示すとおりである。TSR, Pitch はそれぞれ周速比 (Tip Speed Ratio) およびピッチ角度であり、 $C_{D,t}$  と  $C_{D,n}$  はそれぞれタワーおよびナセルの抗力係数を表す。

表 1 各ケースの解析条件

Case	乱れ	WT-Type	TSR	Pitch	$C_{D,t}$	$C_{D,n}$	$C_T$
1	Low	風車なし	-	-	-	-	-
2	High	風車なし	-	-	-	-	-
3	Low	模型風車	5.52	0	1.0	0.74	0.37
4	Low	模型風車	9.69	0	1.0	0.74	0.81
5	High	模型風車	5.52	0	1.0	0.74	0.37
6	High	模型風車	9.69	0	1.0	0.74	0.81
7	Low	実風車	5.66	7.4	0.6	0.74	0.36
8	Low	実風車	8.89	0	0.6	0.74	0.84
9	High	実風車	5.66	7.4	0.6	0.74	0.36
10	High	実風車	8.89	0	0.6	0.74	0.84

キーワード LES, 風車後流, スラスト係数, 大気の流れ, 風速欠損, 乱流強度増加量

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 橋梁研究室 03-5841-1146

土木学会第70回年次学術講演会

4. 解析結果

図2に平均風速および変動風速の解析結果を示す。各風速成分はハブ高さでの平均風速  $U_{hub}$  で無次元化した。白丸は風洞実験の結果を表し、点線と実線はそれぞれ模型風車と実風車に対応する。

模型風車に対する解析結果は風洞実験の結果とよく一致しており、構築した数値風洞および数値風車モデルが高い精度を有することが示された。また、模型風車と実風車を対象とした解析結果を比較すると、両者の間に大きな差がなく、風車のスケールや制御の詳細によらずスラスト係数を風車後流の支配パラメータとして用いることの妥当性が示された。

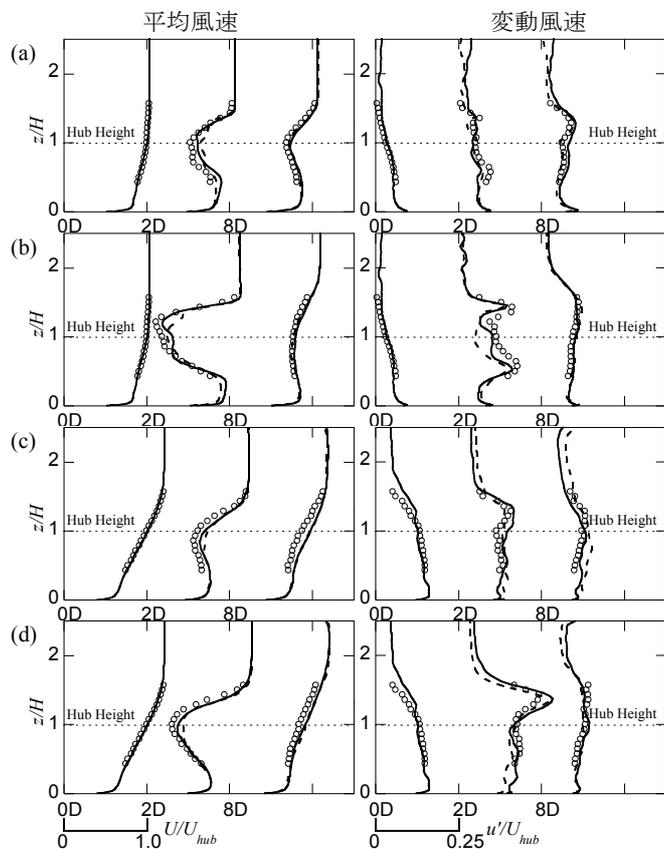


図2 平均風速と乱流強度鉛直方向分布：(a)-Case3,7 (b)-Case4,8 (c)-Case5,9 (d)-Case6,10.

流入風  $U_0$  に対して、風車後流内の風速欠損  $\Delta U$  は式(1)で定義される。

$$\Delta U = U_0 - U \quad (1)$$

ここで、 $U$  は風車後流内の風速である。また風車により生じる乱流強度の増加量  $\Delta I$  は次式で表す。

$$\Delta I = \sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (2)$$

ここで、 $\Delta I$  は風車後流内の主流方向の乱流強度、 $I_1$  は風車を設置しない際の主流方向の乱流強度を表す。図3には各ケースの風速欠損と乱流強度増加量を表

し、縦軸を半値幅で標準化してある。風速欠損  $\Delta U$  はガウス分布で近似可能であり、自己相似則を満足している。 $\Delta I$  についても両翼端の外側ではガウス分布で近似され、自己相似則に従うことを示した。

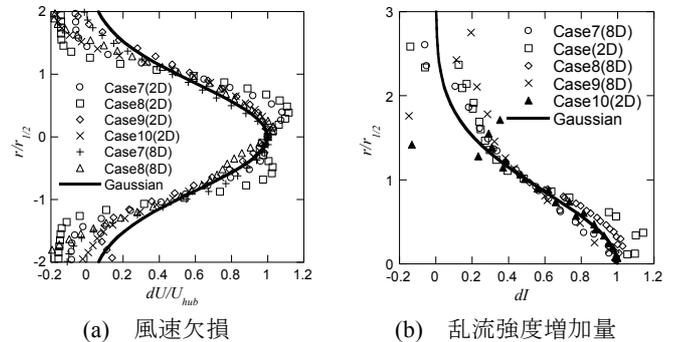


図3 各ケースの風速欠損と乱流強度増加量

図4には風速欠損と乱流強度増加量の距離方向変化を示す。従来の風洞実験では2Dと8Dの2地点でのデータしか存在しなかったが、数値流体解析により後流の乱流場の詳細なデータが得られた。これをもとに今後風車後流のモデル化を行う予定である。

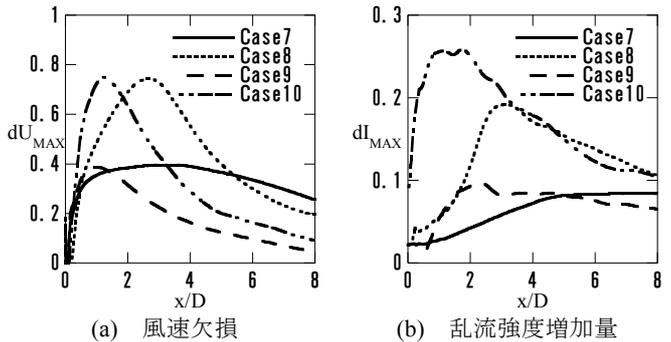


図4 風速欠損と乱流強度増加量の距離方向変化

5. 結論

本研究では、大気の流れと風車ローターのスラスト係数を系統的に変化させて、LESモデルを用いた数値流体解析を行うことで、以下の結論を得た。

- 1) 本研究で構築した数値風洞および数値風車モデルが高い予測精度を有し、解析結果が風洞実験の結果とよく一致することを示した。
- 2) 大気の流れと風車のスラスト係数が風車後流の乱流特性に与える影響を明らかにした。

参考文献

[1] Ishihara T., Yamaguchi A., Fujino Y., "Development of a new wake model based on a wind tunnel experiment", CD-ROM, Global Wind Power, (2004)  
 [2] 山口敦, プラサンティ ウィディヤシ サリ, 石原孟, 「風力発電設備支持物に作用する発電時の荷重予測と実測による検証」, 第23回風工学シンポジウム論文集, pp.133-138, (2014)