

実風車模型を用いた風車後流風速の定量的評価手法の開発

課題責任者

谷山賀浩 株式会社 東芝

著者

谷山賀浩*1、内田孝紀*2、中野三知子*1

*1 株式会社 東芝

*2 九州大学応用力学研究所

技術支援者

国立研究開発法人 海洋研究開発機構 : 浅野俊幸、廣川雄一、西川憲明

国立大学法人 九州大学応用力学研究所 : 渡辺公彦、杉谷賢一郎、渡辺康一、松島啓二

株式会社 東芝 : 猪亦麻子、橋場豊、高橋則雄、田中翔一

利用施設： 国立大学法人九州大学 応用力学研究所 地球大気動態シミュレーション装置
国立研究開発法人海洋研究開発機構 地球シミュレータ

利用期間： 平成 28 年 12 月 27 日～平成 29 年 3 月 31 日

アブストラクト

国内のように複雑地形が多く、風車設置適地の少ない環境にウィンドファームを建設する場合、風車後流における風速欠損や風荷重を考慮した上で、配置検討を行うことが事業成立性評価には非常に重要である。しかしながら、現状は経験則に基づき、一定の抵抗係数を与えるにとどまり、地形との相互影響をはじめ、流体力学的な評価が行われておらず、計画発電量未達や風車破損事故が散見される。そこで本開発では、九州大学応用力学研究所の内田孝紀研究室の技術支援を受けて、実風車形状の模型を用いた風洞試験を実施し、実際に即した風車後流の流れ場を詳細に計測・評価する。また同時に、地球シミュレータを活用した急峻な孤立地形の高レイノルズ数 CFD 解析を実施し、地形背後の複雑乱流場の気流性状を明らかにする。今回得られる風車後流および地形剥離流の新たな知見を弊社の風力事業へ反映することにより、より精度の高い発電量予測が可能となり、国内における風力発電の導入・拡大へ寄与することが大いに期待できる。

キーワード： 風車後流、ウィンドファーム、風況解析、風洞実験、大規模シミュレーション、孤立地形、複雑乱流場、発電量予測

1. 背景

風力発電の導入拡大には、発電事業者における事業性確保も課題の一つで、より多くの発電量確保と、故障リスクを低減する設置・配置提案が重要となる。特に山岳・丘陵などの複雑地形が多い国内においては、事前の風況解析による風況評価・診断をより高い精度にて行うことがポイントとなる。例えば、図1は、平均風速と標準的な2MW風車における年間発電量の関係を示したもので、平均風速6.5m/sの立地地点に対し、0.1m/s平均風速の高い6.6m/sの立地地点では、年間発電量が約2.5%向上、売電収入にして約286万円/年の増加につながる（固定価格買取制度による22円/kWhで計算）。このことから、立地地点の検討を行う風況解析においては、精度向上が求められ、これまでも数多くの研究開発が進められている。

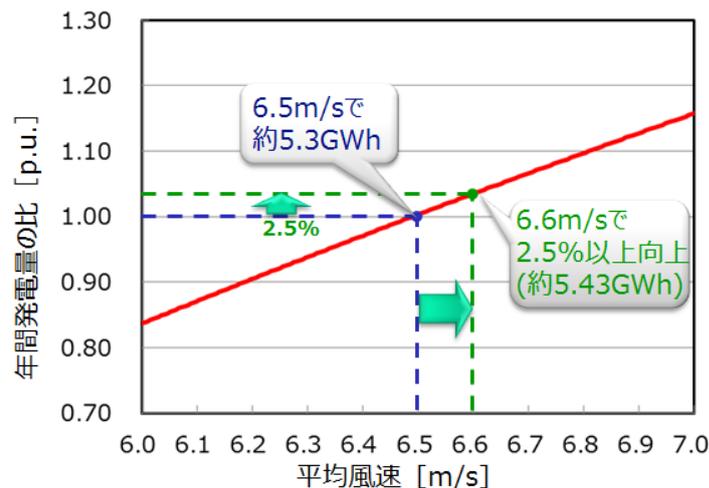


図1 平均風速と年間発電量の関係（標準的な2MW機）

株式会社 東芝では、九州大学 応用力学研究所と共同で、風況解析の精度向上や高度化を目指し、実地形模型を用いた解析検証（図2）や、実サイトでの風況測定を実施、精度検証を進めてきた（図3）。

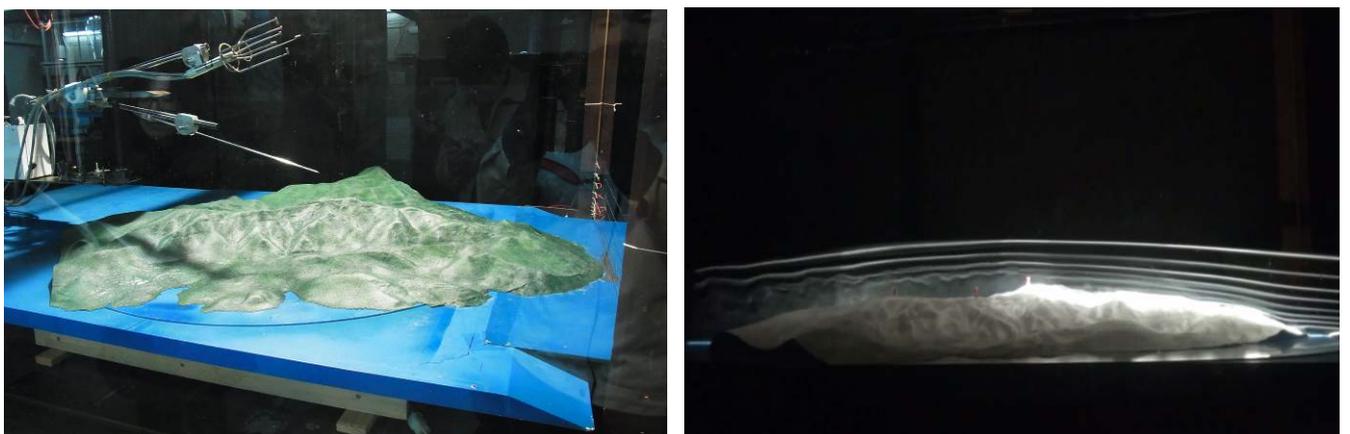


図2 九州大学における実地形模型を用いた風洞実験と風況解析検証

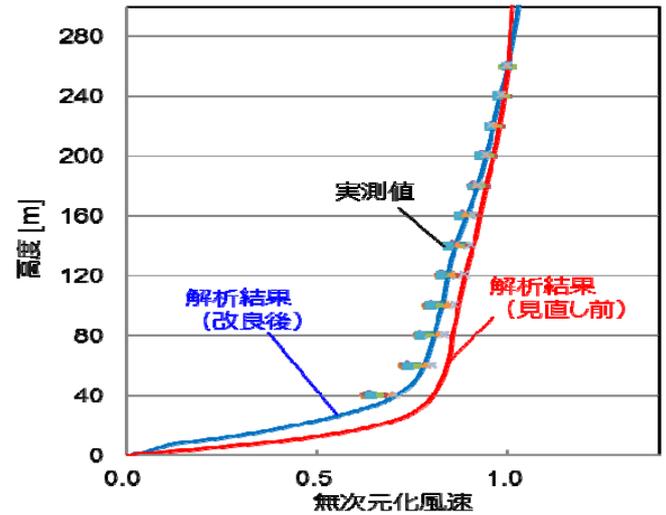
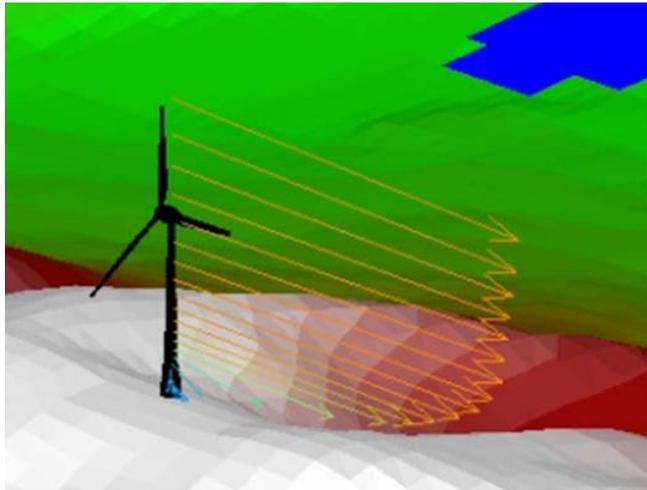


図3 風況解析と風況実測の比較結果

一方、複数の風車を設置するウィンドファームにおいては、隣接する風車が干渉し、風向きによっては、風上に風車が位置することがある。この場合、風上風車通過後の風速が欠損した状態の風を受けることから、風況解析で評価する地形影響評価を主とした風車設置前の風況解析結果よりも平均風速が減少、売電量の低下につながる。さらに風下風車の受風面での風荷重アンバランスが、風車健全性に影響を与えるリスクが生じる。

図4は、実サイトにおける風車建設前後の実測風速平均値を比較したもので、風車受風面（高度約40～120m）において、上流側に建設された風車後流の影響を受けた風速欠損を確認することができる。しかしながら、この風車後流影響については、実計測や模型試験が困難なことから、現状は経験則に基づき、一定の抵抗係数を与えることが主流で、流体力学的な評価を行っていないことが一般的である。

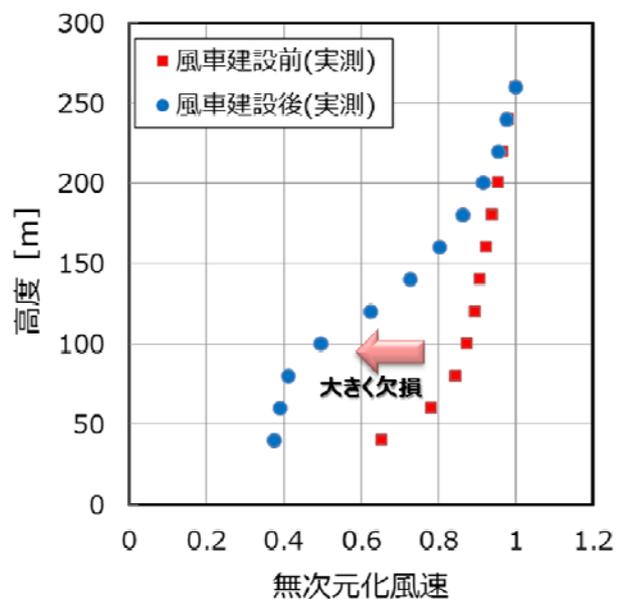
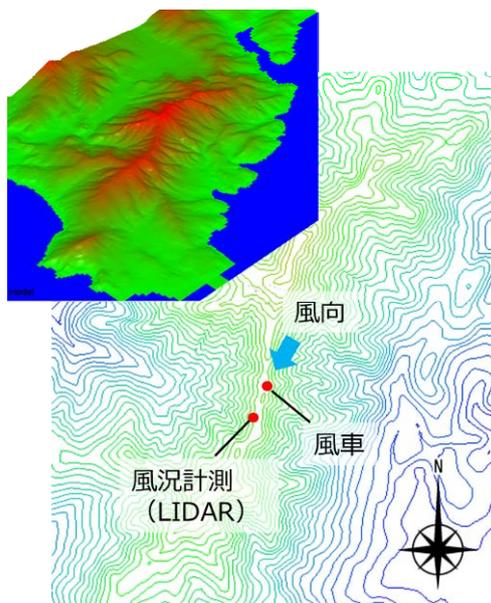


図4 風車建設前後での風況計測結果例

2. 目的

本プロジェクトでは、「風と流れのプラットフォーム」における特定利用課題の枠組みを活用、図5の体制にて、実風車形状の模型を用いた風洞試験を実施、実際に即した風車後流の流れ場を詳細に計測、風況解析へ組込むためのデータベースを構築する。さらに、地球シミュレータの活用により、孤立地形を対象にした高レイノルズ数 ($Re=10^7$) 流れ場の解析を試み、地形背後の剥離域の有無、乱流統計量を評価する。



図5 特定利用課題の体制

3. 実風車形状の模型を用いた風洞試験

風洞試験に用いる風車模型は、東芝製 U88E (2MW 機) の 1/88 縮小模型とし、ロータ直径は 1.0m、回転数制御システムにより運転制御を行うブレード単体モデル (図6) と、ナセル部やタワー形状までを忠実にモデル化し、自由回転する風車全体モデル (図7) の2種類を準備した。いずれも、ピッチ角やヨー角を可変とする構造を採用した。

風洞試験は、風洞により所定流速の上流風を模擬、風車後流の流れ場を再現し、図6に示すブレード模型に接続したモータにて回転数を制御、発生するトルクを計測するとともに、風車後流の風速を熱線流速計にて測定。測定位置は、図6に示す風速測定面内を半径方向、および軸方向にトラバースし測定、その一例を図8に示す。



図6 ブレード単体モデル



図7 風車全体モデル



図8 風車後流の流速測定点の例

試験では、まずピッチ角を順次変化させ、上流風速と回転試験をパラメータに、ブレード特性として図9に示す周速比 λ と圧力係数 C_p の関係を評価、 C_p が最大となる条件を確認した。次に特定した C_p 最大条件にて試験条件を固定、各後流位置において流速測定を実施した。

図10は、ロータ直径 D に対し、 $0.5D$ 、 $1.0D$ 後流位置における流速の測定結果を示しており、横軸は流入風速にて、縦軸はブレード回転軸からの距離をロータ直径にて、それぞれ規格化している。この結果より、模型風車後流の流速欠損量を半径方向、軸方向ともに定量的に評価できたことを確認できる。なお、本模型は縮小モデルであるため、全体的に欠損量は小さくなり、またレイノルズ数差から実機スケールの解析結果とも異なる傾向となっているが、解析精度の検証には十分なデータが収集できた。

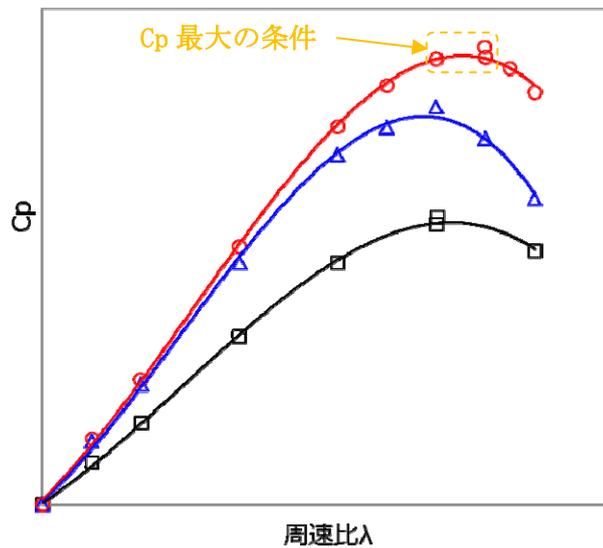


図9 風車模型ブレードにおける周速比 λ と圧力係数 C_p の関係

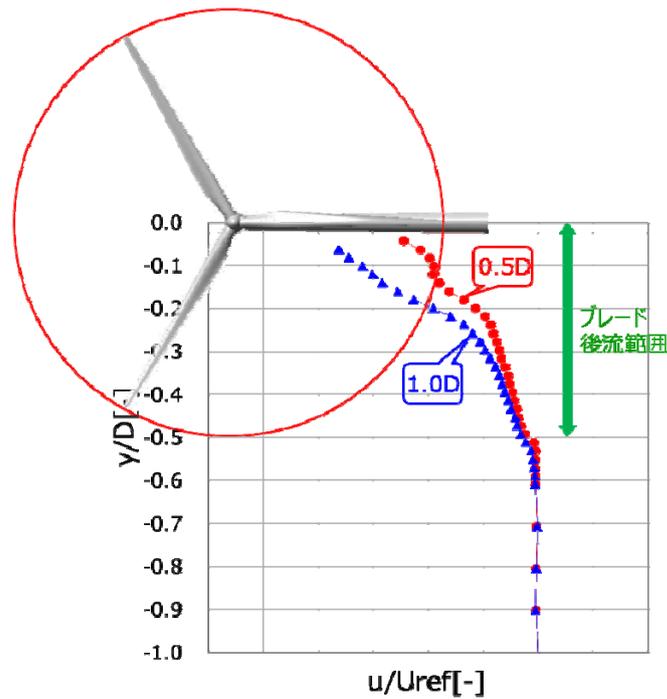


図 10 風車後流の欠損量評価結果

次に、同一条件でブレードの回転時と静止時の後流風速の比較評価を実施した結果を図 11 に示す。図 10 同様、横軸は流入風速にて、縦軸はブレード回転軸からの距離をロータ直径にて、それぞれ規格化しており、タワー同様、ブレードも静止時にも風速の欠損が発生することが確認される。また、いずれも回転時の方が欠損量は大きいことから、回転時はブレードハブやナセル部にて発生する剥離した流れが合算されることが推定される。

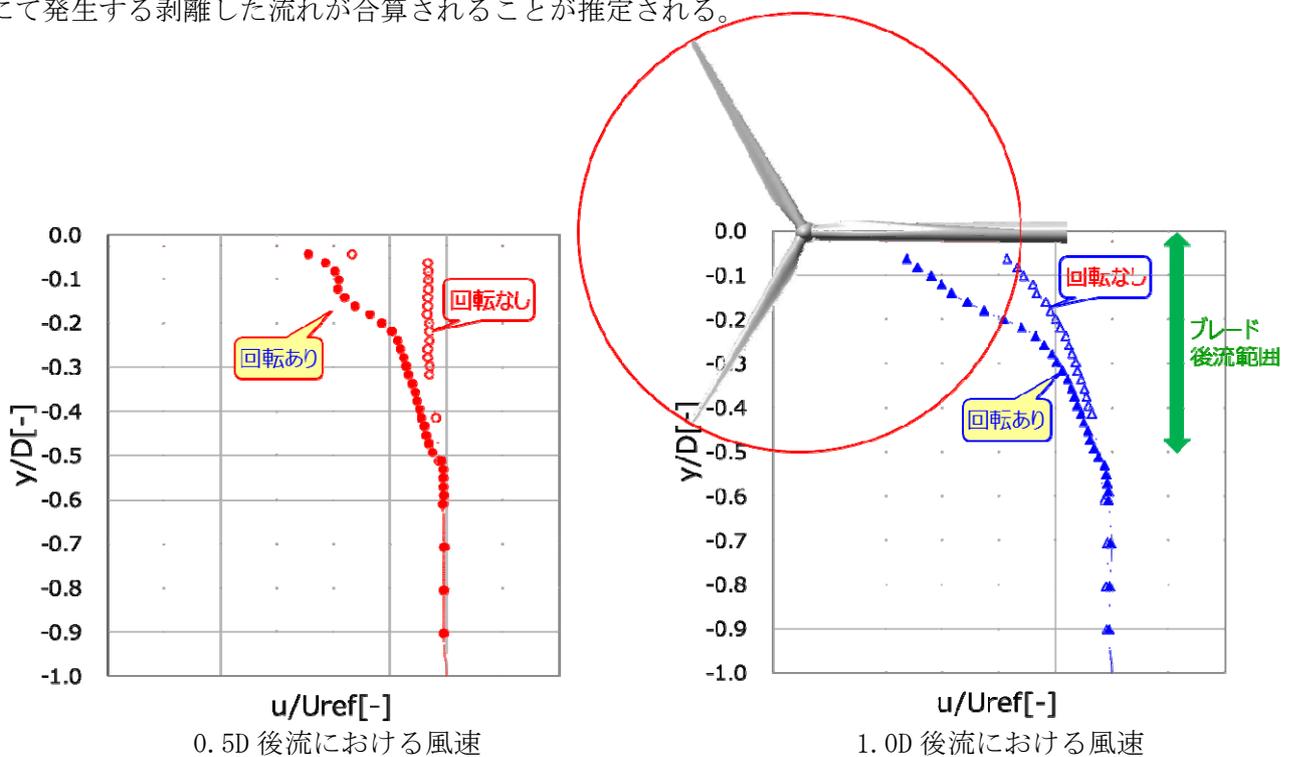


図 11 風車回転時と静止時の後流における風速欠損の比較

以上より、実風車 1/88 スケールの模型を製作、九州大学応用力学研究所の地球大気動態シミュレーション装置(大型境界層風洞)にて風車の後流影響評価試験を実施し、 C_p 特性等はレイノルズ数差により実風車とは一致しないものの、風車後流の欠損量の定量的評価に成功した。

また、本結果を活用し、別途実施した大規模 CFD による風洞試験の再現解析の結果、最大でも 4%程度の誤差で風速欠損量を再現できたことから、これまで同等の解析手法にて実施してきた実スケール風車の後流影響評価の妥当性が確認できたものと考えられ、本成果を風況解析へ反映していくことで、風況解析の精度向上が期待される。

4. 孤立地形における高レイノルズ数流れ場の解析評価

本研究では、数値不安定を回避し、複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測するため、一般曲線座標系のコロケート格子に基づいた実地形版”RIAM-COMPACT”ソフトウェアを用いた。ここでコロケート格子とは、計算格子のセル中心に物理速度成分と圧力を定義し、セル界面に反変速度成分にヤコビアンを乗じた変数を定義する格子系である。数値計算法は差分法(FDM; Finite-Difference Method)に基づき、乱流モデルとしてLES(Large-Eddy Simulation)を採用する。LESでは流れ場に空間フィルタを施し、大小様々なスケールの乱流渦を計算格子よりも大きなGS(Grid Scale)成分の渦と、それよりも小さなSGS(Sub-Grid Scale)成分の渦に分離する。GS成分の大規模渦はモデルに頼らず直接数値シミュレーションを行う。一方で、SGS成分の小規模渦が担う、主としてエネルギー消散作用はSGS応力を物理的考察に基づいてモデル化される。

流れの支配方程式は、フィルタ操作を施された非圧縮流体の連続の式(式(1))とナビエ・ストークス方程式(式(2))である。本研究では、平均風速6m/s以上の強風を対象にしているので、大気がある高度方向の温度成層の効果は省略した。また、地表面粗度の影響は地形表面の凹凸を高解像度に再現することで取り入れた。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad -(1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad -(2)$$

$$\tau_{ij} \approx \overline{u'_i u'_j} \approx \frac{1}{3} \overline{u'_k u'_k} \delta_{ij} - 2\nu_{SGS} \bar{S}_{ij} \quad -(3)$$

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 |\bar{S}| \quad -(4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2} \quad -(5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad -(6)$$

$$f_s = 1 - \exp(-z^+ / 25) \quad -(7)$$

$$\Delta = (h_x h_y h_z)^{1/3} \quad -(8)$$

計算アルゴリズムは部分段階法(F-S法)に準じ、時間進行法はオイラー陽解法に基づく。圧力に関するポアソン方程式は逐次過緩和法(SOR法)により解く。空間項の離散化は式(2)の対流項を除いて全て2次精度中心差分とし、対流項は3次精度風上差分とする。ここで、対流項を構成する4次精度中心差分は、梶島による4点差分と4点補間に基づいた補間法を用いる。3次精度風上差分の数値拡散項の重みは、通常使用される河村-桑原スキームタイプの $\alpha=3$ に対して、 $\alpha=0.5$ とし、そ

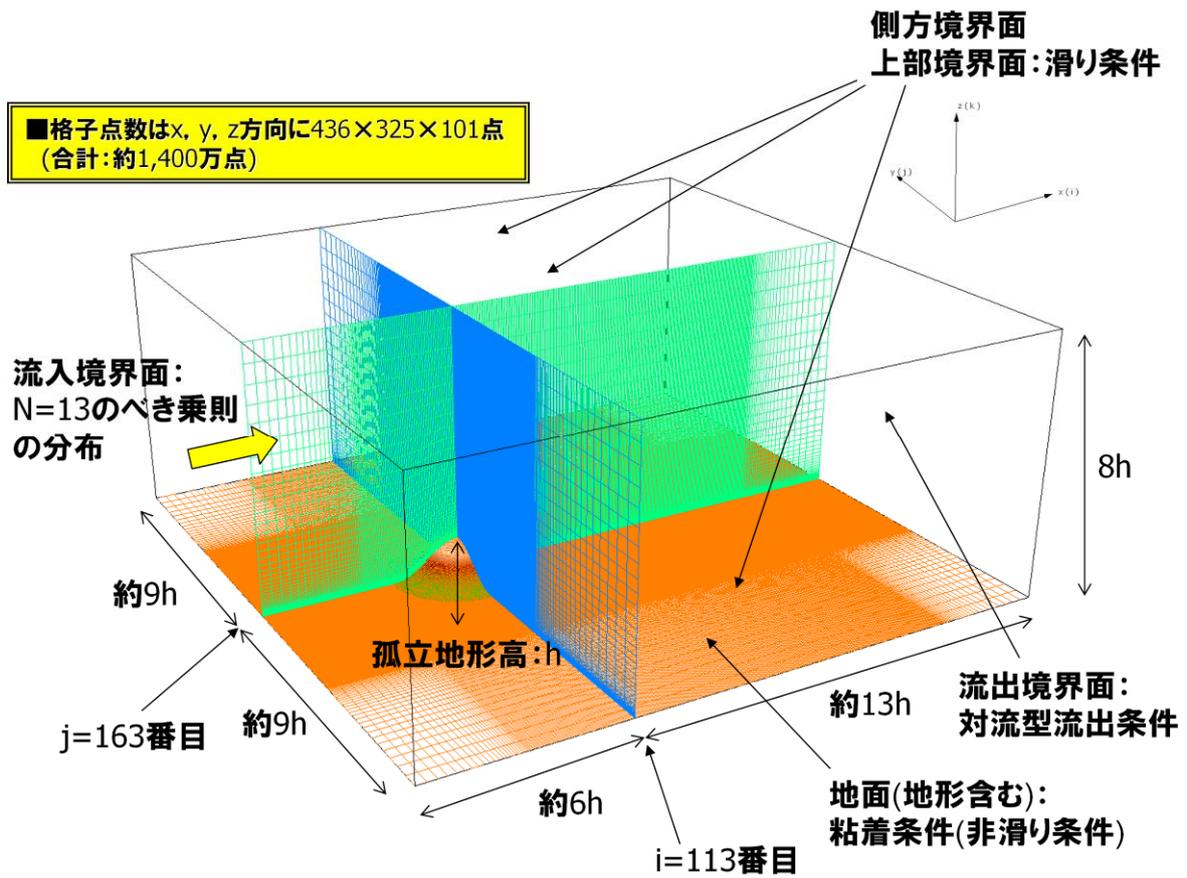


図12 計算領域と境界条件

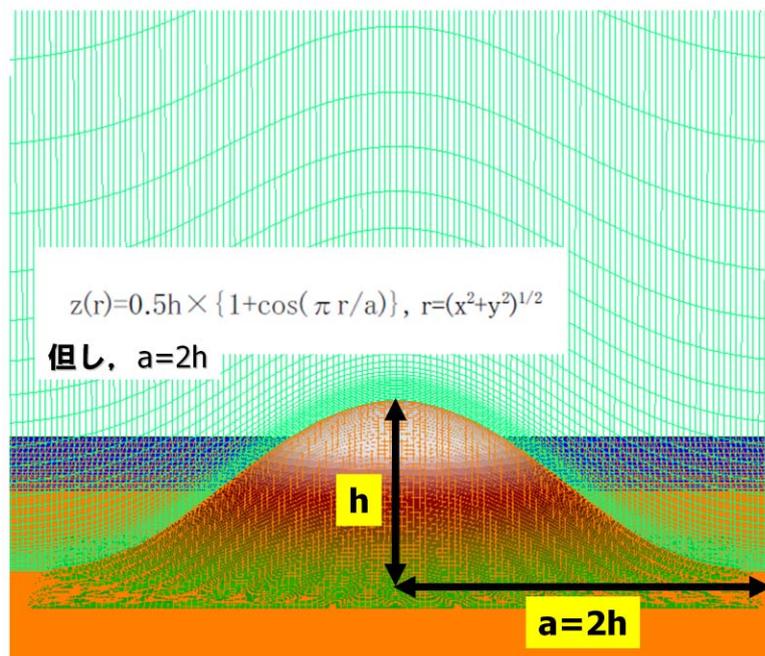
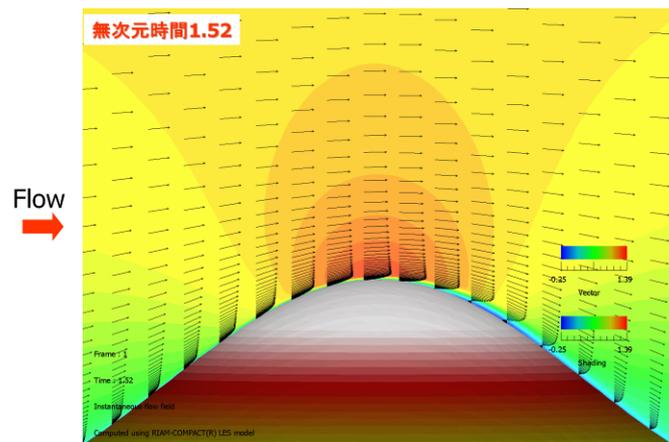


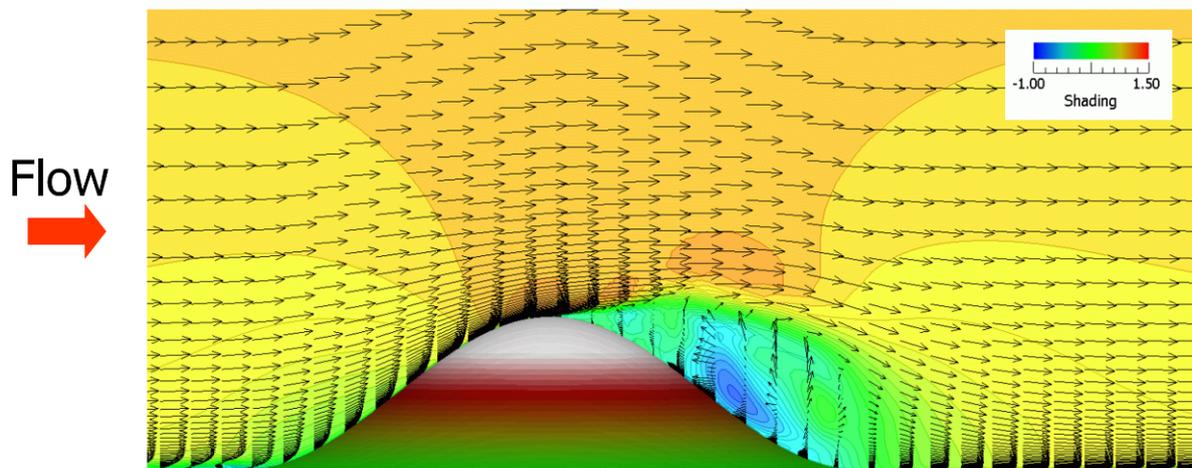
図13 地形近傍の計算格子図

の影響は十分に小さくする。LESのサブグリッドスケールモデルには標準スマゴリンスキーモデルを用いる。壁面減衰関数を併用し、モデル係数は0.1とした。

図12には、本研究で設定した計算領域と境界条件などを示す。本計算では、並列化の手段としてHigh Performance Fortran (HPF) を利用し、地球シミュレータのLキュー(32ノード128コア)を用いて実施した。図13には、地形近傍の計算格子図を示す。図14には、スパン中央面における主流方向風速成分の分布図(瞬間場、 $Re=10^7$)を示す。過去には例のない、高レイノルズを対象にした急峻な傾斜角度を有する孤立地形周囲流れのLES解析にチャレンジし、孤立地形背後に剥離領域が存在する可能性を示唆することに成功した。



(a) 無次元時間 1.52



(b) 無次元時間 7.0

図14 スパン中央面における主流方向風速成分の分布図、瞬間場、 $Re=10^7$

5. 今後の展望

本プロジェクトでは、第3章に示したとおり、風車後流における風速欠損量の定量化に向け、大規模CFD解析の妥当性を風洞試験にて検証するとともに、第4章にて報告したとおり、LESを用い複雑地形上の風の流れを高精度に数値予測する風況解析ソフトウェア”RIAM-COMPACT”にて、実風況のレイノルズ数域において孤立地形背後に剥離領域の存在可能性を示した。

今後、図15に示すとおり、前者の成果から、大規模CFD解析にてパラメータサーベイを実施、下流に配置された風車が上流風車から受ける風況変化を抵抗係数として記述し、さらにこの抵抗係数を、後者成果である風況解析ソフトウェア”RIAM-COMPACT”の基礎方程式系へ組み込むことを進めていきたい。

これにより、大規模なCFD解析を実施することなく、風車後流を考慮した、より精度の高い風況解析が可能となり、風車健全性の事前評価、および風力発電所の事業性評価の精度向上が期待でき、風力発電事業発展の一助として貢献していきたい。

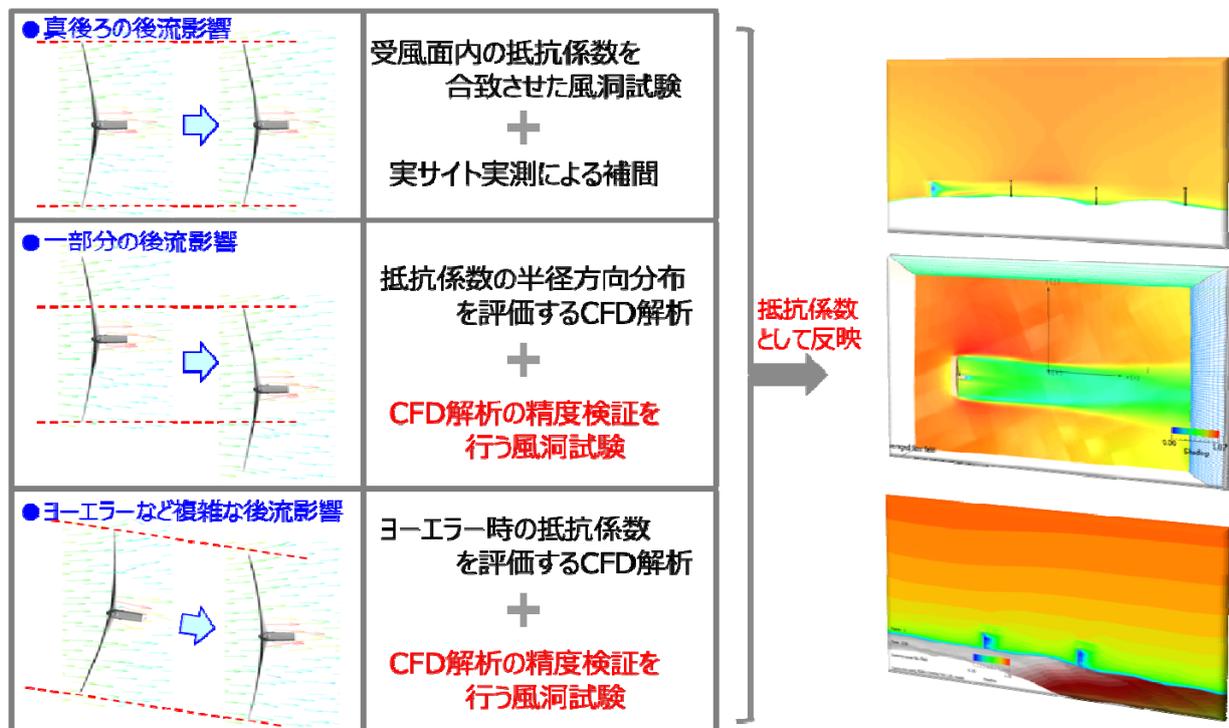


図15 風車後流影響の風況解析への組み込み

6. 本プロジェクト成果の対外PR

本プロジェクトへの取組み、および成果については、著者らが所属する機関よりそれぞれプレス発表を実施するとともに、このプレス発表に関して取材を受けた結果、計4件の新聞記事となり掲載された。また、関連学会にて成果報告を1件実施済みで、引き続き、本プロジェクトの最終成果、および本プロジェクトから派生する成果について2017年度下期に学会発表を計画している。以上、これら対外PRについて、表1に一覧とする。

表1 対外PRの一覧

●プレスリリース

(株) 東芝 ニュース&トピックス	文部科学省 先端研究基盤共用促進事業における特定利用課題に採択 - 風力発電の効率向上を実現する、新たな評価手法の開発を開始 -	2016年12月27日
九州大学 プレスリリース	文部科学省「風と流れのプラットフォーム」および「ポスト京」課題6Cの合同シンポジウムを九州大学応用力学研究所にて開催	2017年2月10日

●新聞記事等への掲載

電力時事通信社	新たな風況評価手法で風力の事業性向上へ	2017年1月16日
新エネルギー新聞	東芝、新たなウェイク評価手法開発指導 風車の最適配置や設計目指す	2017年1月23日
日本経済新聞	風車への風向 精密解析 東芝、九大などと 発電量を最大化	2017年2月28日
日経産業新聞	風向解析し発電拡大 乱流で風車停止 最小限に 東芝と九大	2017年3月2日

●学会等での発表

文部科学省「風と流れのプラットフォーム」および「ポスト京」課題6Cの合同シンポジウム	実風車模型を用いた風車後流風速の定量的評価	2017年2月27日
--	-----------------------	------------

参考文献

- 1) 内田 孝紀, 「LESによる数値風況診断に基づいた風車制御とその経済効果」, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol. 39, No. 4, 通巻116, pp. 61-68, 2016

註：本資料に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります