

■受領No.1363

高精度数値流体シミュレーションと最適化手法による ウィンドファームの風車配置の最適化

代表研究者

Goit Jay Prakash 近畿大学工学部機械工学科 助教



1. 研究目的

近年多数の風車を一ヶ所に設置し、集中的に発電する大型陸上・洋上ウィンドファームが増加している。世界最大級の洋上風力発電所はイギリスの London Array (175基の風車)と Walney Extension (87基の大型風車)ウィンドファームで、それぞれ 630MWと659MWの発電を行う。日本でも2019年に政府が洋上風力発電に適した11の「促進区域」を指定したことから大型洋上風力発電の開発が進んでいる。しかし、このような大型ウィンドファームでは、風車間の後流の相互作用により発電出力が低下し、単独の風車に比べて出力が40%まで低くなるケースもある(Barthelmieら, J. Phys: Conf. Ser. 2007)。ウィンドファーム内の風車の配置を決めるとき、一般的には簡易的なウェークモデル (Jensen, Ris-M-2411 1983) が使用される。しかし、このようなウェークモデルではウィンドファーム内の複雑な流れを考慮することが出来ないため、効果が大きいに問われる。従って、ウェークの相互作用を考慮し、ウィンドファームの風車配置の改善により、ファーム全体の発電出力の向上を目的とし、以下3点に着目した。

- (1) ドップラーライダーによるウィンドファーム開発サイトでの風況計測技術の開発
- (2) ウィンドファーム内の風車の再現と風の計算用の数値流体シミュレーションツールの開発
- (3) ウィンドファーム内の風車配置改善による発電出力の向上

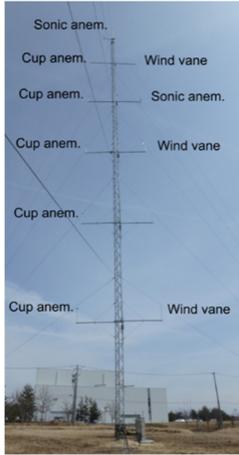
2. 研究内容

上記の目的にしたがい、本助成期間に以下3点に着目し研究を実施した。

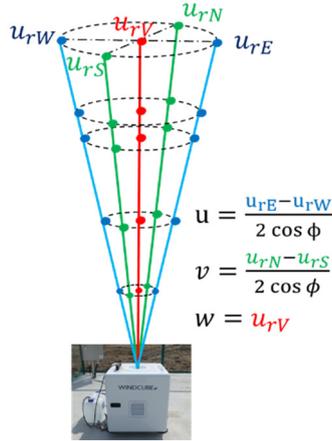
2.1 ドップラーライダーによるウィンドファーム開発サイトでの風況計測技術の開発

研究に必要な実測データはドップラーライダーを用いて収集する予定であった。ドップラーライダーは、高高度および幅広い範囲での風速の計測が可能であるという利点があるものの、従来の超音波風速計やカップ風速計と同程度計測精度が得られるかは明確ではなかった。本研究では、鉛直ライダー (Windcube V2)により計測を行い、隣接する観測タワーに設置した風速・風向計と検証を行った。ライダーと観測タワーは図1 (a) と (b)に示す、産総研福島再生可能エネルギー研究所のものを使用した。ドップラーライダーの計測から風速を算出するために DBS (Doppler Beam Swinging) 法を用いた。

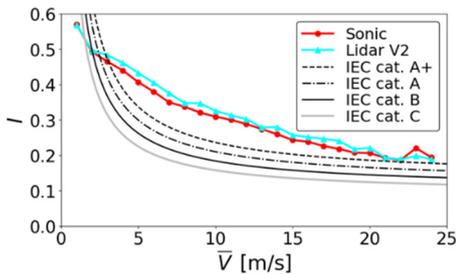
図1(c)はドップラーライダーによる計測した10分間の平均風速と標準偏差を高度 57 m に設置された超音波風速計の計測値との比較を示す。ドップラーライダーの平均風速は超音波風速計の平均風速と精度良く一致しており、決定係数 (R^2)は0.995と回帰線の傾きは1.0である。しかし、標準偏差の場合バラツキが大きく、決定係数は0.977である。図1(d)は乱流強度を風速の関数として示している。計測したサイトでは、ドップラーライダーから得られた乱流強度は超音波風速計の乱流強度に比べて約2%高



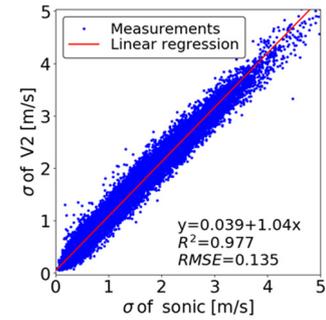
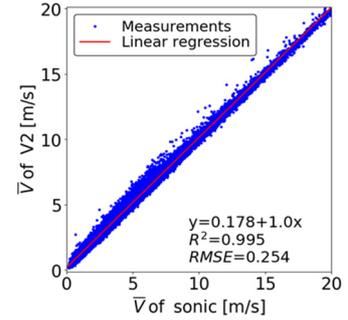
(a) 観測タワー



(b) 鉛直ドップラーライダーと DBS 法の概要



(d) 乱流強度と平均風速の関係



(c) 鉛直ドップラーライダーと超音波風速計の 10 分平均風速及び標準偏差の比較

図 1. 鉛直ドップラーライダーによる風況計測精度の評価

い結果が得られた。この差はあんまり大きくないものの、本サイトに設置する風車の疲労荷重の予測に影響与えると思われる。さらに、計測した乱流強度分布は IEC (International Electrotechnical Commission) 規格に定義されている全ての乱流カテゴリーより高いため、サイトの乱流強度を考慮した ‘class S’ 風車が必要となる。日本及びアジア諸国の場合、乱流強度が高い地域が多く存在する。ここでは示していないが、風車に作用する極値荷重評価に必要なピーク風速の比較、研究に良く用いられる NREL-5MW 風車を対象にドップラーライダーと超音波風速計を用いた場合の発電量分布と荷重を評価した。

2.2 数値流体シミュレーションツールの開発

流体シミュレーションでは OpenFOAM というオープンソースツールを使用した。対象とした風車はロータ直径 100m の大型風車であるため、大気境界層

全体をシミュレーションする必要があった。流体シミュレーションはラージエディシミュレーション (LES) を用いて行った。その支配方程式はフィルターされたナビエ-ストークス方程式である：

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

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

$$F_i = \frac{1}{2} C_T \rho u_a^2 A_d \quad (3)$$

$$f_i = \frac{1}{2 dx} C_T \rho u_a^2 \quad (4)$$

ここで $\tilde{u}_i = [\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3]$ 速度、 \tilde{p} は圧力、 ρ は空気密度、 ν は動粘性係数、 τ_{ij} はサブグリッドスケール (SGS) モデルである。 f_i は風車が流れに与える力を示す。後で説明するように、本研究ではこの力は actuator-disk model (ADM) によりモデル化した。

大気境界を数値計算で正確に再現する際、精度の高い流入境界条件が課題である。本研究では流入風を生成するために風車無しの領域で主流方向に周期境界条件を設けて計算を行った。そして、スパン-鉛直方向の断面の各時間ステップの風速データを保存した。実際の風車やウィンドファームの流体計算時に保存していた断面のデータを流入風の境界条件として使用した。

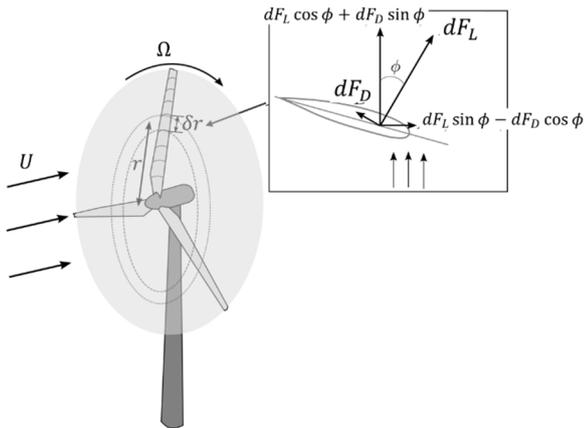


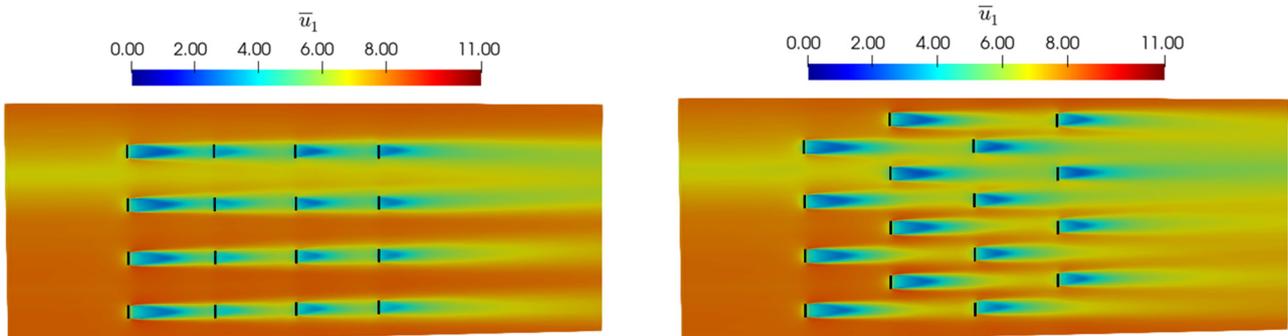
図 2. Actuator disk モデルの概要

風車周りの流れのシミュレーションでは、風車の適切なモデリングが大きな課題となる。しかし、羽根上に細かい格子を生成し解析するのは実用的ではない。そこで、本研究では風車のロータのモデリングをactuator diskモデル (図2を参照)を用いて行った。Actuator disk モデルの力は式 (3) のように定義し、式 (2) の単位質量当たりの力 f_i は式 (4)から求めた。ここで、 C_T は推力係数、 u_d は風車上流側におけるロータと同じ面積での平均風速、 A_d はロータ面積である。

2.3 ウィンドファーム内の風車配置改善による発電出力の向上

開発した数値流体シミュレーションツールを用いてウィンドファーム内の流体解析を行った。本研究では、2種類配置 (格子型とスタaggerド型) のウィンドファームを対象とした。両ウィンドファームには直径 $D=100\text{m}$ の 16 台の風車がある。風車間距離は流れ方向に $S_x = 7D$ 、スパン方向に $S_y = 4.5D$ とした。スタaggerド配置の場合、各風車は上流と下流の風車よりスパン方向に $2.25D$ ずらして設置した。計算領域は流れ方向、鉛直方向、スパン方向にそれぞれ 5.1 km , 1 km , 2 km をとり、格子数は $850, 200$ と 400 にした。合計格子点数は $68,000,000$ と大型計算になったため、東京大学が運営する Oakforest-PACS スーパーコンピュータを使用した。最大で 544 のプロセッサを使用し、並列計算を行った。

流入風に関しては、洋上ウィンドファームの建設が予定されているサイトの年間平均風速 (7.5 m/s) になるように流入風を生成した。図 3 はウィンドファーム内の風車ハブ高さでの水平面の平均風速を示す。ここで黒い縦線が風車の位置を示す。格子型ウィンドファームでは、列毎に風速の低い後流が出来ていることが観察される。その結果下流にある風車位置での風速がウィンドファーム上流の風速に比べ大幅に低くなる。一方、スタaggerドでは流れ方向の風車間距離が 2 倍になり、上流の風車の後流がある程度回復し、下流の風車の位置での風速が比較的に高い。



(a) 格子型配置 (Rectangular)

(b) スタaggerド配置 (Staggered)

図 3. ウィンドファーム内の平均風速場。ハブ高さでの水平面を示している

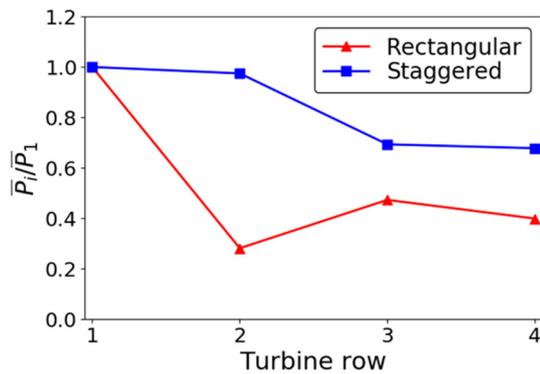


図 4. 時間平均及び横列平均発電出力の比較

この 2 種類の配置の発電出力の時間平均及び横列平均を風車列の関数として図 4 に示す。結果は横一列目の平均発電出力で正規化している。格子型配置の場合、下流の列では発電出力が急に低下している。一方、格子型配置に比べスタaggerド配置の場合、下流の列の発電出力は高い。今回の計算のウィンドファームの大きさでは、配置改善による発電出力向上率は 51% である。したがって、ウィンドファームの配置の最適化は発電出力の向上につながると思われる。しかし、ウィンドファームが大きくなればなるほど、最適化の効果が低下する。そして、最適な配置を算出することも難しくなると思われる。

3. 発表 (研究成果の発表)

- (1) Goit, J. P., Shimada, S., Kogaki, T., “Can LiDARs Replace Meteorological Masts in Wind Energy?”, *Energies*, Vol. 12 (3680), pp. 1-24, September 2019.
- (2) Jay Prakash Goit, 嶋田進, 小垣哲也, “ドップラーライダーによる長期間の風速及び乱流計測の評価”, 日本機械学会 第97期 流体工学部門 講演会 豊橋 2019年11月
- (3) Goit, J. P., Shimada, S., Kogaki, T., “Reliability of long-term Lidar-based wind measurements for various wind energy applications”, 72nd Annual Meeting of the APS DFD, Seattle, WA, USA, November 2019
- (4) Goit, J. P., Shimada, S., Kogaki, T., “Accuracy of wind turbine power and loads estimation

from LiDAR-measured wind speeds”, 41st Wind Energy Symposium of JWEA, Tokyo, December 2019.