

研究成果報告書

研 究 題 目	ラージエディシミュレーションによる大気境界層の		実 施 年 度
	陸から海への遷移が沿岸近傍の洋上風力発電に及ぼす影響の評価		2021 年度～ 2022 年度
代 表 研 究 者	所 属	近畿大学 工学部 機械工学科	
	氏 名	Goit Jay Prakash	印

1. 研究の目的・背景

背景：洋上では陸地に比べて、風速が強く、風の乱れが小さいため、洋上風力発電の設備利用率は高く、風車が受ける疲労荷重は低いと言ったメリットがある。そのため、日本を含め世界的に大型洋上風力発電の開発が進められている。しかしながら、洋上風力発電の多くは水深の浅い沿岸から数十メートルから数十キロ沖合に開発されるため、風車の発電電力量及び風車にかかる荷重に沿岸域の地形が及ぼす影響が重要になる。沿岸近傍域では、風速が比較的弱く、且つ乱流強度の高いことが特徴となっている。陸上及び洋上ウィンドファームに関する多くの先行研究(Calaf et al. 2010、Porté-Agel et al. 2013)では、風車の発電出力に支配的な役割を果たす運動量輸送現象に関する重要な知見が得られたものの、大気境界層の陸から海への遷移を考慮したウィンドファームの発電電力量に関する既存研究はみられない。図 1 に示すように、大気境界層が陸から海に移る遷移過程では、表面粗度のステップ変化に伴い内部境界層が形成され、大気境界層及び洋上ウィンドファーム間の相互作用が複雑になる。

目的：本研究の目的は厳密な数値計算手法であるラージエディシミュレーションを用いて沿岸域の大気境界層内に形成する内部境界層の発達過程、及びそれが洋上ウィンドファームの発電電力量に与える影響について評価することである。研究の最終目標は、「あらゆる沿岸域の地形、海表面、大気安定度（温度による熱フラクス及び流れの輸送）、そしてウィンドファームサイトの年間風況」を考慮した洋上ウィンドファームのラージエディシミュレーションによる流体計算手法を開発することであるが、本研究期間中は以下 4 つの項目を対象に研究を進めた：

- ① 地形モデル：地形変動及び海面は応力モデルを用いて、乱流粘性として導入した。
- ② 大気安定度：大気中の温度勾配の鉛直分布により生じる現象で、1) 安定(地表面の温度が大気温度より低い)、2) 中立安定(地表面と大気温度が同じ)、3) 不安定(地表面の温度が大気温度より高い)成層に分類される。今回は、地形乱流のみに着目し、中立安定成層の条件下で内部境界層の発達過程が風速と発電電力量に与える影響を評価した。
- ③ 風車モデル：アクチュエータ・ディスクモデルを用いて開発した。
- ④ 流入風：前駆解析で風速場を求め、ウィンドファーム解析では時空間変動風として実装した。

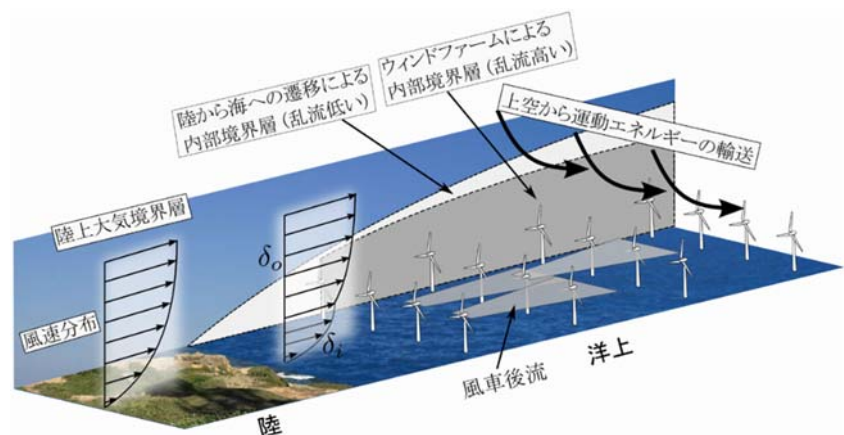


図 1. 沿岸近傍の洋上ウィンドファーム及び大気境界層間の相互作用で生じた様々な流れ現象。

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究計画の開発目標であった 4 つの項目:①地形の応力モデル, ②中立安定成層の大気境界層, ③風車のアクチュエータデスクモデル, ④流入風の前駆解析モデルの開発が概ね完成している. ラージエディシミュレーションによる流体計算ツールは, OpenFOAM で開発行った. 沿岸近傍の内部境界層の発達メカニズムの解明及びそれが洋上洋上ウィンドファームへ及ぼす影響の評価を行うため, 4 つのシミュレーションケースを定義した. ①大気境界層:海から陸への遷移, ②大気境界層:陸から海への遷移, ③ウィンドファーム:洋上のみ, ④ウィンドファーム:海から陸への遷移を考慮. 全ケースでは計算領域は長さ x 高さ z 幅 $y = 15 \times 1 \times 3 \text{ km}^3$ とした. シミュレーションケース③及び④では, 風車 50 基 (10x5 の整列配置) のウィンドファームを対象としている. また, ロータ直径 120 m の大型風車を用いた. ケース①と②の内部境界層の発達メカニズムに関する結果は成果の発表にまとめている. ここではケース③及び④の結果のみ報告する.

図 2 はケース④の大気境界層の陸から海への遷移を考慮したときの沿岸近傍の洋上ウィンドファーム内の瞬間風速場を示す. 風車後流では風速が低くなり, その後流が各風車列の最後まで伸びていること観察出来る. また, 後流の典型的なミアンダーリングが観察されている. 風車後流での典型的なミアンダーリングが観察されている. 図 3 は洋上のみ(ケース③) と陸から海への遷移を考慮した(ケース④)の行毎の平均発電出力量の比較を示す. 1 行目の発電出力量は洋上の方が高いが, 2 行目以降は, 陸から海への遷移のケースの発電出力量が高くなっている. ウィンドファームの総発電量を比較したところケース④の方が約 10~17%高かった.

ケース③と④の平均風速分布の違いは図 3 に示す. ウィンドファームへの流入風は洋上の方が高いのにも関わらず 3 行目まで両方のケースの風速分布は同程度で, それより下流側ではケース④の方が風速の回復が約 4~5%高い. 大気境界層上部からのエネルギーの輸送と関連のある運動エネルギーフラックスの比較は図 5 に示す. ケース④では, 流入風の乱流が高いため, ウィンドファーム内の運動エネルギーフラックスもケース③に比べて大きい. これによって, 陸から海への遷移の場合, 境界層上部からのエネルギーの輸送が高くなり, 結果として図 3 に示したように発電出力量も大きくなる.

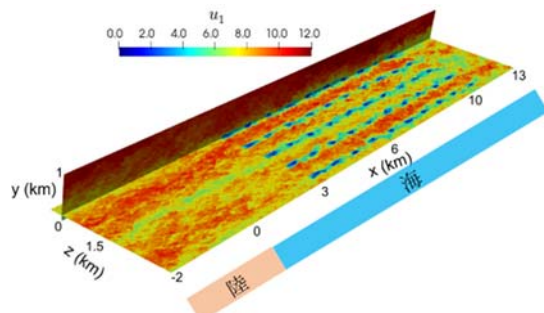


図 2. 陸から海への遷移を考慮したときのファーム内の風速場.

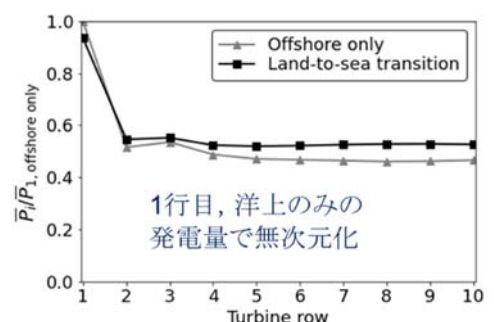


図 3. 陸から海への遷移及び洋上の方の場合の行毎の発電出力量の比較.

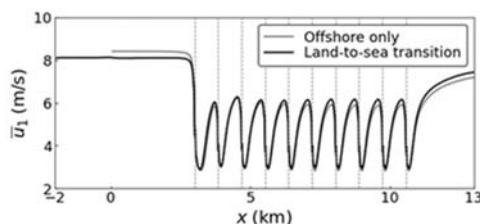


図 4. 陸から海への遷移及び洋上の方の場合のハブ高さでの平均風速の比較.

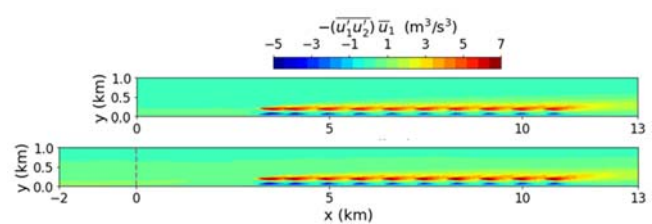


図 5. 運動エネルギーフラックス.
上: 洋上のみ, 下: 陸から海への遷移

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

経費は会計報告書に記載しているとおりの申請時と同様に 120 万円を使用した。内容に関しては一部変更がある。

申請時に消耗品「検証試験用模型風車の製作」として 16 万円を計上していたが、他の研究で製作した風車の実験に使用できたため、風速計測用「X 型サポート」の購入及び「熱線流速計点検・修理」に予算を使用した。また、2022 年度に消耗品の計上がなかったが、実験に必要なデジタルハンディタコメータ及び上流型プローブ（風速計測用）を購入した。

借料損料については、「スーパーコンピューターシステム利用担金」は 2021 年度に申請時の 33 万円に対して 325,920 円及び 2022 年度に申請時の 33 万円に対して 30 万円となった。

謝礼金に関しては、実験やデータ解析の補助用アルバイト料として 2021 年度に（980 円 x 100 時間 x 1 人）7 万円を計上していたが、解析データが多かったため、104,280 円を使用した。2022 年度には申請時とほぼ同じアルバイト料を使用した。

その他、一般管理費及び振込手数料として使用されている。

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

本研究から、陸の地形が沿岸近傍の洋上ウィンドファーム内流れ構造及び発電出力量に大きく影響を及ぼす事が明確になった。洋上風力発電の導入拡大が進んでいる日本や他の国々でも建設や運用を考慮したら、離岸距離の数十キロいないにウィンドファームの開発が進んでいる傾向である。従って、沿岸域の地形、海面及び大気境界層の高い精度での再現がウィンドファームの正確な発電出力量予測及び風車配置最適化に繋がると思われる。本研究を以下の項目での展開を予定している。

①地形及び海面のモデル：地形の大スケールの変動を格子解像による再現し、細かい地形変動は今回導入した壁面応力モデルによりモデル化する。なお、表面粗度は国土地理院が公開している計測データから抽出する。海面は壁面応力モデルから波浪などを考慮したモデルに変更する。

②大気安定度：今回中立安定成層の限定した解析を行ったが、実サイトのデータを確認したところ、安定及び不安定成層の割合が大幅に大きかった。今後、大気境界層のどの安定条件でも解析できるようにシミュレーションモデルの改善を行う。沿岸近傍ですと陸と海で安定成層が反転する確率が高いため、あんまり評価されてない複雑な流れ現象が観察されることを期待する。

③風車モデル：今後、精度の高いアクチュエータラインモデルを用いて風車モデルを開発する。これによって、本研究では、考察しなかった、風車主要部品への荷重についても評価が可能となる。

④風車配置最適化：本研究の最終目標は洋上ウィンドファーム内風車の配置最適化である。上の項目の開発が済んだら、数値流体シミュレーションツールと最適化手法を連携し、発電出力量の向上を目的に配置最適化を行う。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

学術論文

1. Jay Prakash Goit, Asim Önder, “The Effect of Coastal Terrain on Nearshore Offshore Wind Farms: A Large-eddy Simulation Study”, *J. Renewable Sustainable Energy*, **Vol. 14**, pp. 043304, August 2022. [本論文は Featured Article として論文の表紙に選ばれ、米国物理学協会(AIP: American Institute of Physics)の Scilight でもハイライトされた]
2. Jay Prakash Goit, Asim Önder, “The Effect of Wind Turbine Sitting on the Power Output and Flow Fields of Offshore Wind Farms”, *Journal of Japan Wind Energy Association*. [採択]

国際学会

1. Jay Prakash Goit, Asim Önder, “The effect of Wind Turbine Layout on the performance of Offshore Wind Farms”, *23rd Australasian Fluid Mechanics Conference 23AFMC, Sydney, Australia*, 4-8 December 2022.
2. Jay Prakash Goit, Asim Önder, “Relation between Wind Turbine Layout and Performance of Offshore Wind Farms”, *Grand Renewable Energy International Conference (GRE2022)*, 13-20 December, 2022.

国内学会・講演会

1. Jay Prakash Goit, Asim Önder, “風車配置が洋上ウィンドファームの発電出力と流れ場へ及ぼす影響”, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム 2021 年 11 月 18 日～19 日.
2. 田口 誠景, ゴイト ジェイ プラカス, 嶋田 進, 亀田 孝嗣, “LES を用いたライダーによる風速場計測の再現と評価”, 第 43 回風力エネルギー利用シンポジウム 2021 年 11 月 18 日～19 日.

招待講演

1. Jay Prakash Goit, “風力発電を対象とした風洞実験及び数値流体シミュレーション”, 27 回 日本流体力学会 中四国・九州支部講演会 2021 年 6 月 5 日