

発電用大型風車の累積疲労損傷評価 ～流体構造連成振動解析を用いて～

研究・開発機関 : [東京大学大学院 工学系研究科 システム創成学専攻](#)、[豊橋技術科学大学](#)
 利用施設 : スーパーコンピュータ「富岳」
 計算規模 : CFDメッシュ 約18億要素、ブレード構造メッシュ 約100万自由度
 利用ソフトウェア : FFB、ADVENTURE_Solid2、REVOCAP_Coupler

Before

- 従来の大型風車周りの流体解析では、風車に翼素運動量理論に基づくActuator Line Model等を用いたLES解析(乱流モデルの解析手法)が広く用いられてきましたが、回転翼周りの流れ場が再現できず、より詳細な設計や解析を行うには限界がありました。
- 風車ブレードの疲労損傷解析は、構造をはりのFEM(有限要素法)モデルや機構モデルを用いた簡易解析が主で、風の乱れおよび流体構造連成振動が風車の疲労荷重に与える影響まで反映されていませんでした。

After

- 高忠実(High-Fidelity)風車モデルをOverset法で組み込み、風車の詳細形状や回転運動を精密にモデル化し、並列LES乱流解析コードFFBを用いることにより精緻な流体解析が可能となりました。
- FFB計算結果から得られた風車ブレードに作用する流体力分布の時刻歴データをデータ変換し、それを入力として動的振動応答や疲労損傷を解析する詳細な一連の連成計算が「富岳」によって可能となりました。

背景と目的

日本では、2030年までに6GW(ギガワット:電力量単位)、2050年までに45GWの洋上wind farm(集合型風力発電所)開発が計画されています。

1基あたりの発電設備容量が5MW~20MWに及ぶ大型発電用風車は、高さは東京都庁並みの243m、プロペラ型のローター重量は最大離陸重量247tonの旅客機777-200並みで、それが毎分12回転、20年間では10⁸回も回転する巨大な動的可動式機械です。

風車の大型化により構造自体が相対的に軽量化し、柔構造となるため、上流側に位置する風車の後ろ側に回り込む流れに起因して、下流側に位置する風車の発電量低下や風車内外の故障などが生じる可能性が出てきます。そのため、上流側に位置する風車によって形成される風車後流の挙動を正しく評価して対応することが不可欠となります。

そこで、洋上wind farmのように荷重条件、稼働条件が大きく不規則に変動したり、自然ハザードに直接晒されるようなものづくり課題においては、簡易工学モデルの活用にも固執するよりも、発展著しい最新の高速計算HPCに基づく高精度計算力学シミュレーションを活用することが望まれてきました。

利用成果

本研究では、風車ブレード(羽根の部分)構造などについて詳細な情報が公開されている米国再生可能エネルギー研究所NRELの5MWモデルを対象として解析を行いました。

大型風車周りの大規模乱流解析には、有限要素法ベースの並列LES(Large Eddy Simulation)解析コードのFFB(FrontFlow/blue)を用いて行い、風車1基の解析や2基ないし3基をタンデム(直列)配置したモデルの解析を実施し、風車の発電性能及び風車後流の影響を受ける後方配置風車の発電性能低下を高精度に評価しました。

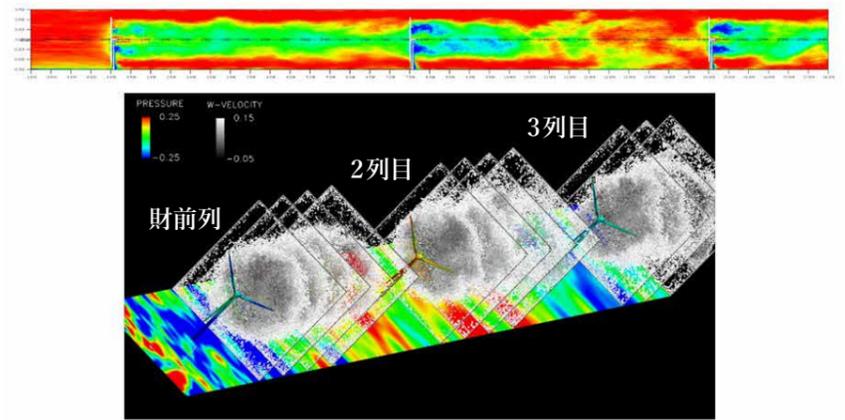


図1 NREL5MW風車3機のタンデム配置のLES乱流解析例

流れ場の可視化結果では、下流側に設置された風車から形成されている翼先端渦に、上流側に設置された風車からの翼先端渦が干渉し、それらが合体しながら流下している様子が観察されました。

図1に3機のタンデム配置風車の解析結果(離間距離7.5D、Dはローター直径)、(18億要素、100回転、600万時間ステップ、富岳2,048ノード[98,306コア])を示します。さらに、FFBの解析から得られる風車ブレードに作用する流体力分布の時刻歴データを、並列カプラー REVOCAP_Couplerを介して風車ブレードの構造解析モデル(直交異方性の6面体積層要素、100万自由度、数千時間ステップ、富岳50ノード[1,200コア])に入力し、並列構造解析コードADVENTURE_Solid2を用いて動的振動応答解析を実施しました。

そこから得られたブレード内に生じる応力分布の時刻歴データを元にADVENTURE_Fatigueを用いてブレード内に生じる累積疲労損傷分布を定量的に評価しました。

図2に、TSR=7の一様乱流が20年間流入し続けると仮定した場合の、ブレード内部に生じた累積疲労損傷分布を示します。この解析システムにより、風車周りの流体場が巨大風車の構造にどのような疲労損傷を及ぼすかを詳細かつ定量的に議論できるようになります。

なお、本格的に特定のサイトにおける20年超の運転期間の累積疲労損傷を評価するには、サイトの年間の風況情報(各方位からの風向の頻度や風速の頻度)を考慮し、様々な風向や風速に対する単位時間の累積疲労損傷を計算しておき、年間風況情報を用いて積分することが必要となります。

今後、洋上wind farmを対象に、それぞれのマルチフィジクス・マルチスケール統合シミュレーション(スーパーシミュレーション)の高度化を図り、それとAI技術を連携活用し、デジタルツインの構築を進めていきます。

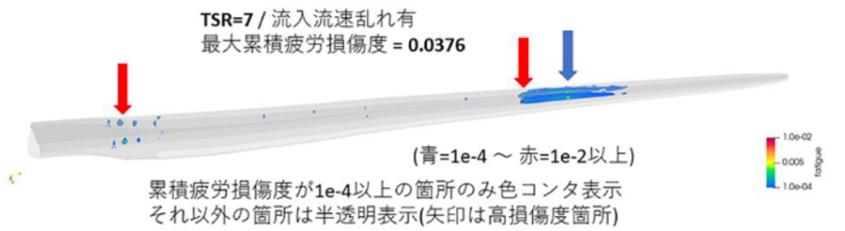


図2 TSR=7の一様乱流が20年間継続すると仮定した際のNREL5MW風車ブレード内に発生した累積疲労損傷分布の解析例