



CHAM Limited
Pioneering CFD Software for Education & Industry

移動運動量ソースを使った PHOENICS による 風力タービンのモデリング

by Dr R P Hornby

はじめに

イギリス（英国）は、世界の中の風力発電最適地の一つであり、ヨーロッパでも最高の場所であると考えられています。ロンドン・アレイ（図1）は、630メガワット（MW）の発電量を持つ世界最大の洋上風力発電ファームですが、これはイングランド南部沖に35億ポンドの風力発電ファームとして英国政府に計画書が出されている（ナビタスベイウインドパーク、発電能力900MW）にもうすぐに追い越されることとなります。このウインドパーク計画が進めば、ドーセットとハンプシャー海岸沖およびワイト島の西海域に、218もの高さ200mの高風力タービンが配置されることとなります。計画が承認された場合、建設は2015年に開始される予定です。

イギリスにおける風力発電は、5276機の風力タービン（合計発電量10ギガワット以上）を持ち、そのうち6831MWは陸上、3653MWは洋上に設置されています。イギリスは最近、フランスとイタリアを抜き、世界第6位の風力発電国としてランクされています。2012年には、エネルギーのうちの19.4テラワット時（TWh）は風力発電によって生成されました。これはイギリスの電力使用量の5.3%を占めます。



図1 ロンドン・アレイは、英国のテムズ川河口での洋上風力発電所です。630メガワットの発電量は世界最大規模を誇ります。



風力発電所の性能は大気境界層と風力タービン伴流相互作用（顕著な環境影響については図2を参照）の状態によって大きく影響されます。数値流体力学（CFD）は、現在、陸上および洋上両方の風力発電所⁽¹⁾のための風の場の詳細な空間的変動をモデル化する統合的なアプローチを提供するために使用されています。これらのモデルでは、タービンロータブレードの掃引ディスクは、タービンによって誘発される流れの摂動が影響する領域をロータ性能特性（例えば、その推力性能曲線）に応じて定義します。これは、ディスク内の摂動⁽²⁾を固定するか、必要な推力変動（e.g. PHOENICSをベースにした WindSim モデル⁽³⁾）を模擬してディスクにポロシティ分布を割り当てることによって達成できます。しかし、ここで考慮される、より直接的なアプローチは、各動作するロータに付随する運動量のソースを使用して各ロータに効果を与えるモデルです。これらの運動量ソースは、ロータの揚力と抗力の特性に基づいていて、ロータを比較的粗いグリッド上に表現し、加えて（前の2つのモデリング手法で表現されていない）誘発された流体の回転運動を計算することができます。



図2 ホーン Rev1 は、80 基の風力タービンを持ち 2002 年に稼働を始めた発電量 160MW のデンマーク西海岸沖にある風力発電ファームです。上の写真は、風力タービンの下流の乱流場を示します。2008 年 2 月 12 日の特殊な気象条件は、非常に湿った空気の凝縮（すなわち雲）を引き起こし、結果として風力タービンの後ろの乱流パターンが見えるようになりました。

PHOENICS でのモデル化

シングル 3 ローター風力タービンは、3D 直交座標（x:水平方向、y:垂直方向、z:軸方向）を用いてモデル化されています。グリッドはタービン回りを細分化するようにアレンジして配置されています。速度 3 成分及びポテンシャル温度は、理想気体の状態方程式から得られる密度と一緒に（KOREN ソルバーを用いて）解かれます。フルの浮力項は、鉛直方向運動方程式に含まれています。標準 k-ε 乱流モデルを使いますが、大気境界層で使用される適合定数も採用されています⁽³⁾⁽⁴⁾。層流プラントル数は、対応する乱流プラントル数の使用において可変性を可能にする方法でユーザサブルーチン Ground で計算されています。これはまた乱流の浮力による生産項が Ground に明示的なコーディングを必要とすることを意味します。

流入境界条件はモナン-オブホフ（MO）タイプの類似機能を用いて設定します⁽²⁾⁽⁵⁾。流出境界には高さによる密度変化による圧力分布を最初に使用し、計算中の指定された時間に、この圧力分布が変更され、流出面近傍で計算された実際の圧力に対応するように規定されます。これは、滑らかな流出を保証するために行われます。



東西の境界は、摩擦なしの固体面を想定しています。南側境界地面付近の速度と乱流量はMOタイプ類似度関数を使用して規定されます。異なる大気安定度の条件を表現するために、南側境界の熱流束は北側境界の熱流束に対応して課することができます。風力タービンロータによる流れに対する摂動は、ロータの揚力、抗力係数を用いてモデル化されます。各ロータの表面は、パネル空間と局所的な揚力および抗力係数に応じて運動量ソース項に寄与する各々の2Dパネルのセットに分割されます。ロータは回転するので、これらの運動量ソースは、特定のパネルが属するPHOENICSのセル毎に加えられます。これは流体に抵抗の効果だけでなく、旋回運動を生成します。代表的な例としてロータ1回転のサイクルを50時間ステップで表しています。数サイクル後には準定常状態に達しました。現時点では、ロータ速度を指定していますが、タービンの慣性と摩擦のモーメントが分かれば計算でだすことができます。

図3は代表的な3ロータタービンの速度ベクトルを含む速度コンター図です。流体の回転運動が生じています。

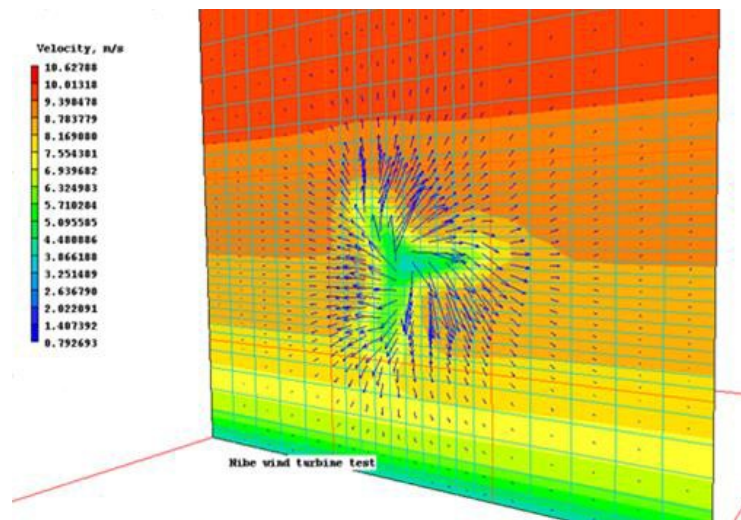


図3. モデルのタービン内断面における速度ベクトルを含み速度コンター図

結果と実験との比較

1990年にデンマークで行われた、直径40メートル、ハブ高さ45メートルでその5倍の距離におかれた2基のNibe風力タービンの実験と比較してみます。この特別な計算のために、X、Y、Zそれぞれ120m、200m、800mの空間を20、41、60のセルに分割しました。また大気の状態は中立と仮定しました。実験の結果によるPHOENICSモデルへ入力する表面粗さと摩擦速度は参考文献⁽²⁾から得られます。

軸方向速度をPHOENICSの結果と比較したものを図4に示します。表面粗さを0.08mに、摩擦速度は0.56m/sに設定しました。上流側ではPHOENICSの結果は類似度関数（中立大気のための対数分布）と非常によく一致しています。タービン下流側でも、1Dおよび2.5Dでの実験の速度と合理的な一致が得られています。

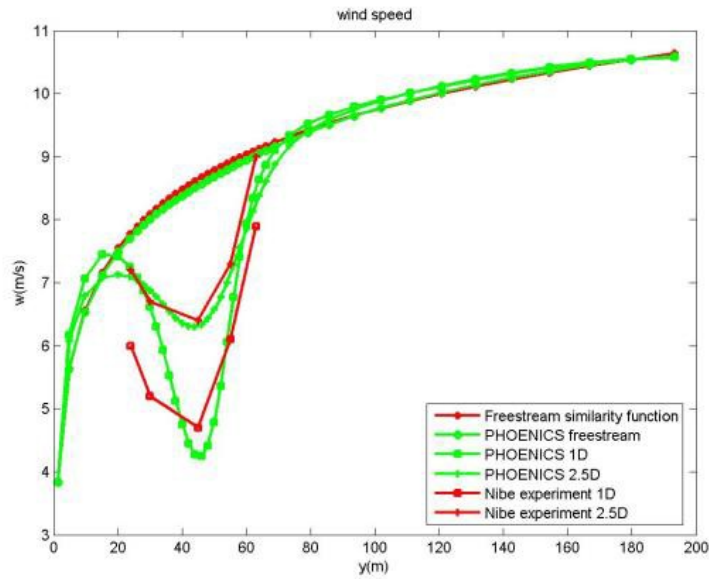


図4. PHOENICSの結果とNibe風力タービンの実験との比較（軸方向風速、表面粗さは0.08 m、摩擦速度0.56m/sの時）

図5は乱流強度（乱流エネルギーの三分の二乗の平方根）と2.5Dの実験とを比較したものです。このテストでは風速が遅く、摩擦速度は0.46 m/sの設定です。このことは、この方法の実行可能性を確立する上で十分であることを示し、さらに拡張して、この方法論をテストして行く励みにもなります。

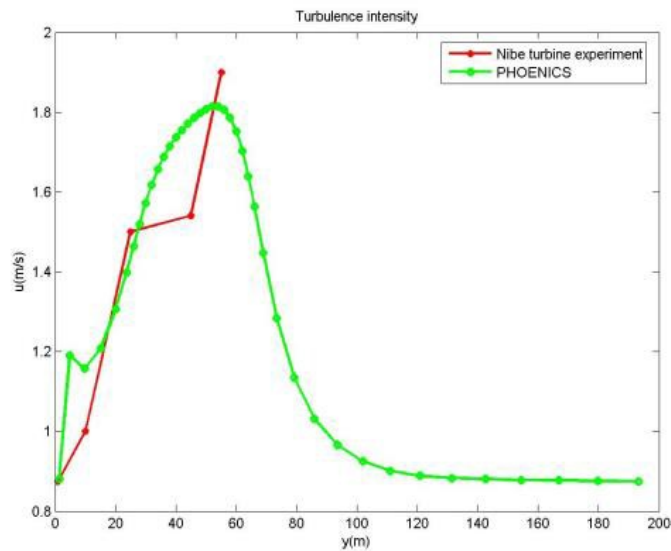


図5. PHOENICSの結果とNibe風力タービンの実験との比較（乱流強度、表面粗さは0.08m、摩擦速度0.46m/sの時）

結論

今回の解析の動機は、CFD風力タービンモデルにタービンロータによって必然的に生成される旋回流を組み込み、比較的粗いグリッド上で表現できるようにすることでした。

筆者が利用できる（制限あり）実験データとモデルの結果を比較すると、軸方向速度と下流のタービンの乱流強度とが良好な一致を示しています。しかしながら、スワールを生成するモデル能力の比較は、利用可能な実験データがないために行われていません。



参考文献

1. Barthelmie R J, Frandsen S T, Hansen K, Schepers J G, Rados K, Schlez W, Neubert A, Jensen L E, Neckelmann S. Modelling the Impact of Wakes on Power Output at Nysted and Horns Rev. EWEC '09 Proc., Marseille 2009.
 2. Hernandez J, Crespo A. Wind Turbine Wakes in the Atmospheric Surface Layer. PHOENICS Journal Vol.3, No.3 1990.
 3. Crasto G, Gravdahl A R, Castellani F, Piccioni E. Wake Modelling with the Actuator Disc Concept. Energy Procedia 24, 385-392, 2012
 4. Prospathopoulos J M, Politis E S, Chaviaropoulos P K. Modelling Wind Turbines in Complex Terrain. EWEC '08 Proceedings, Brussels 2008.
 5. Panofsky H and Dutton J. Atmospheric Turbulence. John Wiley & Sons 1984.
- Dr R. P. Hornby e-mail: bob@hornby007.wanadoo.co.uk