OS2-1 非定常流れ解析による縦軸風車の性能評価

Performance estimation of a vertical axis wind turbine with unsteady flow simulation

○ 加藤圭一（工学院大），正 飯田明由（工学院大），
正 水野明哲（工学院大），正 加藤千幸（東大生研）

Keiichi KATO, Kogakuin University, 2665-1 Nakanomachi, Hachioji-shi, Tokyo, 192-0015
Akiyoshi IIDA, Akisyato MIZUNO
Chisachi KATO, The University of Tokyo, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo, 153-8505

In order to improve the performance of vertical axis wind turbines, numerical investigation was carried out. Since the angles of attack of VAWT are widely changed during rotor rotation, unsteady flow simulations are necessary for this purpose. A large eddy simulation and unsteady RANS were tested to simulate the flow around a VAWT. The numerical results showed the large separated flow can be observed with LES. On the other hand, RANS was not suitable to simulate the flow around a VAWT. The torque coefficient of VAWT reduced at the upstream region. In this region, uniform flow hit on the suction side of the airfoil. To improve the aerodynamic performance of VAWT, control of the angle of attack is required in this region.

Key Words: *Wind turbine, Unsteady Flow, LES*

1. 緒言

近年，地球温暖化の抑制やエネルギー資源の問題から環境にやさしい，いわゆるクリーン・エネルギーの開発が求められている．クリーン・エネルギー資源として自然エネルギーある太陽光，水力，風力などが利用されている．風力をエネルギーとする風力発電は，二酸化炭素や硫化物，窒化物といった有害な排気ガスを排出しないため，環境負荷が小さいという特長を持つ．しかし，風力はエネルギー密度が小さいこと，風向や風速に出力が依存するため，安定したエネルギー供給が難しいという問題がある．そのため，洋上風車を中心に大規模な風力発電ファームの開発が世界各国で進められている．環境負荷を軽減するには大規模なクリーン・エネルギーシステムだけでなく，生活空間に密着した小型・都市型の風力発電システムの開発も重要である．

現在，風力発電で使用される風車は大きく分けて，水平軸と縦軸の2つに分けられる．プロペラ型に代表される水平軸風車は，航空機用プロペラの技術を活用し，実用化され商用電源として広く利用されている．しかし，風車の回転面をつねに風向にあわせる必要があるため，風向調整機能が必要なこと，発電機，伝達機構，制御機構などの重量物を風車の上部に設置しなければならないことなど改善すべき点が残されている．小型風車の場合，これらの問題はコスト増などにつながり，普及の妨げになっている．ダリウス風車やジャイロミルに代表される揚力型の縦軸風車（以下，この論文では断りのない限り，直線翼縦軸風車を単に縦軸風車と呼ぶ）は風向に依存しない運転が可能なこと，騒音が小さいこと，重量物を地上に設置できるという利点があり，小型・都市型に適した性質を持っている⁽¹⁾⁽²⁾．その一方，縦軸風車は自己起動が悪いこと，出力効率の良い周速比範囲が狭いため，発電システムとしての尤度が低いこと，理論性能に比べて実際の効率があまり良くないなどの問題が残されている．縦軸風車は構造上の問題からブレードの迎え角が一回転の間に大きく変化し，上流側ではく離れた流れが下流側のブレードと干渉するという流体力学的な問題も残されている．縦軸風車は構造が簡単な装置の割に流れ場が複雑なため，性能評価法についても十分研究されているとは言えない状況である．

本研究では縦軸風車の性能を改善するため，非定常流れ解析を行い，風車周りの流れ場と流体性能の評価を試みた．数値解析には大規模な離れを伴う非定常解析に適した LES を用いた．ただし，一般に LES 解析は解析規模が大きくなるため，コンピュータのリソースと解析時間が増大するとい

う問題がある．設計業務において風車を開発する場合，LES 解析では規模が大きくなりすぎる可能性がある．そこで，従来から用いられてきた運動量理論に基づく方法やレイノルズ応力平均モデル（RANS）解析を行った．これらの解析結果と LES 解析との比較を行うことにより，それぞれの手法のメリット，デメリットについても検討する．

2. 解析手法

数値解析の対象とした直線翼縦軸風車を図 1 に示す．ブレードには翼弦長 0.3m の NACA0018 翼を 3 枚使用した．翼スパンは 2.4m，回転半径は 1.8m である．

Fig. 1 Picture of vertical axis wind turbine

流れ解析には汎用熱流体解析プログラム STAR-CD を使用した．縦軸風車周りの流れ解析では流体機械解析に広く使われている回転方向に対する周期境界条件が使えないため，風車の回転を模擬する手法としてスライディングメッシュを使用した．表 1 に風車の仕様を示す．

Table 1 Specification of VAWT

Type of Blades	NACA0018
Number of Blades	3
Chord Length	0.3 m
Span Length	2.4 m
Radius of Rotor	1.8 m
solidity	0.25

解析メッシュを図 2 に示す。回転直径 D を代表長さとして、流れ方向に $X/D=-10\sim 20$ 、流れと直角方向に $Y/D=-10\sim 10$ 、スパン方向長さ $Z=0.096$ の計算を行った。スパン方向の境界条件は周期境界を使用した。翼端の影響や翼のサポートの影響は考慮していない。ただし、回転軸については解析対象とした。

翼周辺と回転軸周辺にメッシュを集中させるため完全不連続カップリング機能を利用した。ただし、移動境界面付近では、完全不連続カップリングを使用せずに、タイムステップ毎にメッシュが連続的につながるようにした。このような処理により移動解析（回転運動）の際にメッシュによる影響がでないようにした。

解析メッシュの総数は約 30 万点である。風車周り部分のメッシュ数は約 25 万点であり、ブレード周囲にメッシュを集中させた。

(a) Grid around a turbine

(b) Whole region

Fig. 2 Computational grid for vertical axis wind turbine

流入主流速度 U_∞ を一定として、周速度 V_r を変えることにより周速比 $\lambda = V_r / U_\infty$ を変えて解析を行った。

解析には富士通 Prime SPARC64V（クロック周波数 1.89GHz、メモリ 32G）を使用した。LES 解析では、一つの周速比を解析するのに約 108 時間を要した。メッシュの作成には Gridgen、ポスト処理には FIELDVIEW を使用した。

LES 解析以外の解析手法としては翼素理論と運動量理論に基づく性能解析と乱流モデルに RANS を用いた解析を行った。RANS の使用メッシュは LES 解析と同じメッシュを使用した。

3. 解析結果

図 3(a)に RANS($k-\varepsilon$ モデル)解析、(b)に LES(スマゴリンスキーモデル)解析による風車周囲の速度成分 U の分布を示す。周速比が高い場合、RANS 解析と LES 解析では翼の周囲では流れ場に大きな違いは見られない。これは周速比 6 の場合、翼に対する迎え角が最大で 10 度程度のため、あまり大きなはく離が発生しないためと考えられる⁽³⁾。ただし、RANS では翼の後流では乱れがすぐに減衰してしまうことがわかる。LES では後流まで翼による影響が残っている。

Fig. 3 Velocity distribution of vertical axis wind turbine

Fig. 4 Comparison of relative velocity vectors calculated by RANS and LES ($\lambda=6.0$, angle of rotation = 210°)

Fig. 5 Comparison of relative velocity vectors calculated by RANS and LES ($\lambda=6.0$, angle of rotation = 330°)

(a) RANS: $\lambda=2.0$

(b) LES: $\lambda=2.0$

Fig. 5 Velocity distribution of vertical axis wind turbine

図4に回転角度 210° , 図5に回転角度 330° における翼周囲の相対速度ベクトルを示す。ここで翼の回転角度は下流側で翼が流れに対して垂直になった状態を0度とし、反時計回りに回転角度を定義した。RANSとLESで翼周囲の流れには大きな違いが見られないことがわかる。

図6に $\lambda=2$ の場合の速度成分Uの分布を示す。周速比が低い場合はRANS解析とLES解析の流れ場は大きく異なることがわかる。RANS解析でははく離が小さいが、LES解析では流れがはく離していることがわかる。

図7に低周速比における翼周りの流れ(回転角度 210°)を示す。LES解析では、はく離による渦が観察される。

図8に翼が下流側にある場合(回転角度 330°)の相対速度ベクトルを示す。RANS解析では流れが翼に沿っているが、LES解析でははく離を捉えていることがわかる。これらのことから、時間平均モデルであるRANSモデルの場合、大きなはく離を捉えることが難しいため、低周速比における縦軸風車の解析には適さないことがわかる。

Fig. 7 Comparison of velocity vectors calculated by RANS and LES ($\lambda=2.0$, angle of rotation = 210°)

Fig. 8 Comparison of relative velocity vectors calculated by RANS and LES ($\lambda=2.0$, angle of rotation = 330°)

図9に風車下流の平均速度分布を示す。測定位置は縦軸風車の回転軸を原点として、流れ方向距離 $X/D=2$ である。周速比の大きな $\lambda=6.0$ の場合のRANS解析結果では、 U/U_∞ において $Y/D=0$ 付近の風車の後流における減速が大きく、その周囲で流れが加速している。一方、LES解析では $Y/D=0$ 付近の大きな減速とその周囲の増速はみられない。このため、RANS解析のような極端な増速域は観察されない。

図10に翼に作用するトルクを示す。横軸は翼の回転角度であり、縦軸は1枚の翼に作用するトルク係数

$$C_t = \frac{T}{1/2 \rho U^2 A R} \quad (1)$$

ここで、 T は風車回転トルク、 ρ は空気密度、 A は翼面積、 R は風車の回転半径である。運動量理論とLES解析及びRANS解析を比較すると、数値解析では上流側の上半分(90° から 180°)においてトルクを得ているが、上流側下半分ではトルクが減少している。これに対して運動量理論では上流側下半分でも大きなトルクを得ていることがわかる。下流側では運動理論のほうがトルクがやや大きいものの、運

動量理論及び解析ともに大きなトルクが得られていない。したがって、翼のはく離の影響は主に主流が背面から翼に作用する回転角度 180° から 270° 付近で大きい。この付近の相対迎え角は約 -30° から 0° である。運動理論ではこの付近の性能が課題評価されていると考えられる。したがって、回転角 180° から 270° 付近の流れを改善することができれば、縦軸風車の性能を向上させることができると考えられる。また、下流側の出力の低下も大きいことから、下流側の翼の迎え角を制御するなどの対策が必要であると考えられる。

4. まとめ

直線翼縦軸風車周り流れを、移動境界を使用した RANS・LES 解析によって調べ、以下の知見を得た。

- (1) LES 解析を用いることにより、縦軸風車周りの流れ場における大規模なはく離流れを捉えることが可能である。
- (2) RANS 解析では流れの横方向の広がりを捉えることができないため、主流が大きく加速してしまう。
- (3) 数値解析によって得られたトルクは、回転角度 90° から 180° (上流部上側) 及び回転角度 270° から 90° (下流側) のトルク計算結果は、運動量理論と良く一致するが、回転角度 90° から 180° (上流部下側) では運動量理論に比べて小さいことがわかった。このことから、縦軸風車の性能を低下させる原因は上流部下側の流れにあることがわかった。

Fig. 9 Velocity distributions in the wake of VAWT

Fig. 10 Comparison of torque coefficients of VAWT predicted by momentum theory, RANS and LES

参考文献

- (1) 松宮輝, 「ここまできた風力発電」, 工業調査会 (2000)
- (2) 相良啓太, 関和司, 「直線翼垂直軸発電システムの開発研究」, p303-306, 第26回風力エネルギー利用シンポジウム (2004)
- (3) Keiko Fukudome, Masashi Watanabe, Akiyoshi Iida, Akisato Mizuno: Separation Control of High Angle of Attack Airfoil for Vertical Axis Wind Turbines *Proc. 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference on CD-ROM* (2005)