A201 設計教育用マイクロ垂直軸風車周りの低レイノルズ数流れ解析

Numerical analysis of a rotating micro VAWT model for engineering design educations

○正 若嶋 振一郎(一関高専)
正 高橋 勉(長岡技科大)

正 宮下 幸雄(長岡技科大)
正 大塚 雄市(長岡技科大)

正 山田 昇(長岡技科大)
正 山崎 渉(長岡技科大)

Shin-ichiro WAKASHIMA, Yukio MIYASHITA, Noboru YAMADA,
Tsutomu TAKAHASHI and Yuichi OTSUKA, Wataru YAMAZAKI
Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology,
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, 940-2188, Japan

Abstract

In this report, numerical analyses of performances of prototype Mg-alloy micro vertical axis wind turbine were conducted. It has 3 wings with usual NACA0018 wing section. Typical Reynolds number based on the wind speed and the wing chord length were set around 3.3×10^4 with consideration for using as a portable-type micro VAWT system for engineering educations. In such low Reynolds number cases, somewhat different way of design would be required. We also examined a torque variation generated from the wings using 3-D unsteady CFD analysis and compared the results and flow patterns for higher performance in case of such low Reynolds number flow.

Key Words: Numerical Simulation, Micro Vertical Axis Wind Turbine, Engineering Educations

1. 緒言

2011年3月の東日本大震災は、近年にない大規模・広域停電となり、津波などの直接的被害に加え、原発停止に伴う放射能事故や、国内原発の停止など、エネルギーの観点からも大きな影響をもたらすことになった。

このため、固定価格買い取り制度の導入にも後押しされた形となるが、とくにエネルギーセキュリティの観点から、太陽光、風力（地上・洋上）、地熱（バイナリー発電等）、小水力発電などの再生可能エネルギー利用促進と普及に大きな関心が集まっている。これらの状況は今後も続くと考えられることから、この新しい市場に対する人材供給が、これまで以上に高等教育機関に求められていると考えられる。

我々のグループでは、このようなニーズに対応できる仕組み作りの試みとして、全国に散らばる工業高等専門学校（以下、高専）と、高専と関連の深い長岡技術科学大学の広域連携ネットワークの構築を最終的な目標としつつ、昨年度から設計教育教材としてのマイクロ風力発電システムの開発プロジェクト「異分野融合・地域連携によるマイクロ風力発電装置の研究開発プロジェクト」を進めており⁽¹⁾⁽²⁾、昨年度末に試行的に学生による風車設計コンテストを実施するなどの活動を始めている。

この活動の中では、学生は風車を題材（「ランドマーク」）とし、長岡技科大や参加高専の異分野を専門とする教員の連携指導を受けつつ、学生同士や企業との交流を図っていくことを想定している。また、材料、強度、接合、発電、流体などの分野の各種要素技術の開発を通じた教育に加え、各種データの修得・評価、試作機の機能性・安全性・環境適合性の設計と評価など、包括的に

「ものづくり」を学ぶことができる。

これまで、このプロジェクト開始に先立ち、教材用として用いるマグネシウム(Mg)合金を用いたマイクロ垂直軸揚力型風車の開発⁽³⁾⁽⁴⁾を進め、風洞での特性測定や数値計算によるトルク性能評価などを行ってきた。

この教材用風車開発における技術的な検討課題としては、2点存在すると考えられる。

まず1点目は、非常に小型であるため、もともとの発生トルクが一般的な市販風車に比べて小さく、発電機特性（始動トルク等）とのマッチング、あるいは適切な発電機の選択が大きな問題となっている点である。適切な発電機を選択は、充電コントローラーなどの価格全体にも影響すると考えられる。

また、2点目として、設計教育教材としてのマイクロ垂直軸風車を考えた場合、製作・設置・移動の手間やそれらに関わるコストが問題となり、あまり大きなものは作れない。従って、概ね1m以下程度の寸法となり、このとき用いる翼は $O(1 \sim 4 \times 10^4)$ 程度の低レイノルズ数領域（翼弦長基準）の回転流れ場にある。このような低レイノルズ数領域では、とくに回り始めの初期では流れの剥離・再付着が発生し、層流剥離気泡の存在など、それよりも高いレイノルズ数領域（ $10^5 \sim 10^6$ ）の場合とは、別の設計方針⁽⁵⁾が必要になる可能性がある。

これまで火星探査や無人小型飛行機の研究として低レイノルズ数翼の研究は報告⁽⁶⁾されているが、回転中の翼の低レイノルズ数流れの研究はごく少ない。そこで、本報告では、前報⁽⁴⁾に引き続き、そのような低レイノルズ数の範囲で、NACA0018翼型に対する数値解析を実施し、検討を行ったので報告する。

2. 数値計算モデルおよび計算手法

2.1 計算モデルおよび計算格子

本報告での解析は基本的に、前報⁽⁴⁾と同様であり、回転中の3枚翼垂直軸揚力型風車のNACA0018翼回りの3次元数値解析を実施した。簡単のため、軸および翼支持部は無視し、翼のみ回転しているとする。翼枚数 $N=3$ 、翼弦長 $c=0.1\text{m}$ 、翼幅 $L=0.42\text{m}$ 、ローター直径 $D=0.5\text{m}$ 、主風速 $U_0=5\text{m/s}$ であり、主風速と翼弦長に基づくレイノルズ数 $Re_c=3.33\times 10^4$ 、ソリディティ $\sigma=0.191$ である。この設計に基づく垂直軸風車は、図1(a)に示すように実際にMg合金により製作しており、今後、トルク計測実験や回転中の翼回りの可視化実験を行い、数値計算結果との比較・評価を行う計画である。

さらに、図1(b)には風車ローターの計算モデルを示す。翼周辺の計算格子および計算領域については前報⁽⁴⁾と同様のものを用いた(図2)。計算格子については、低レイノルズ数での計算となるため、翼表面から第1層を 0.1mm とした境界層メッシュを生成し、さらに翼回りにテトラ要素メッシュを生成している。全メッシュ数は約290万メッシュである。計算領域は、ローター中心から上流側に $5D$ 、下流側に $15D$ とり、ローター上下左右には、 $\pm 2.5D$ ずつの計算領域とした。

2.2 数値計算および計算条件

数値計算には、オープンCFDソフトウェアであるOpenFOAM1.6-extを用い、非圧縮非定常計算を実施した。乱流モデルは $k-\omega$ SSTモデルを採用した。計算は、当初、周速比 $\lambda=1/3(64\text{rpm})$, $1(191\text{rpm})$, $2(382\text{rpm})$, $3(573\text{rpm})$ として計算を行ったが、 $\lambda=3$ として計算した場合は、平均トルクが負となったため、 $\lambda=1/3, 1, 2$ の3つについて報告する。与えた境界条件は、表1の通りであり、初期条件は、まずポテンシャル流れを計算し、その結果から速度場、圧力場を計算して与えた。

Table 1 Computational conditions

Conditions	Values
Inlet	$U_0=5\text{m/s}$ 5% turbulent intensity zero gradient for pressure
Outlet	Free outlet (zero gradient for velocity, zero for pressure)
Side walls	Slip wall
Wing surfaces	Wall function for velocity zero gradient for pressure
Initial conditions	Calculated from potential flow
Wing section	NACA0018
TSR	1/3, 1, 2
Solver	OpenFOAM 1.6-ext PimpleDyMFoam + $k-\omega$ SST turbulent model

(a) Mg-alloy model developed

(b) Numerical model

Fig.1 A schematic of 3D-VAWT model for educations

(a) Mesh around wing

(b) Computational domain around VAWT rotor
Fig.2 Computational mesh and domain

(a) Torque variations

Time = 3.655

(b) Surface pressure and streamlines

Fig.3 Snapshots of flow around the rotor ($\lambda=1/3$)

(a) Torque variations

Time = 1.40

(b) Surface pressure and streamlines

Fig.4 Snapshots of flow around the rotor ($\lambda=1$)

3.3 次元非定常数値解析結果および考察

3.1 ローター発生トルクの時間変化

図3～5の各図(a)に、各周速比における発生トルクの時間変化を比較して示す。周速比 $\lambda=1/3$ の場合、3枚の翼が、どの時間でも概ね平均的にトルク発生に寄与(平均トルク 0.11Nm)していることが分かる。しかし、1枚あたりのトルク発生がそもそも小さく、全体的なトルクはごく小さい値になっている。 $\lambda=1$ になると、平均トルクは0.17Nmに増加するが、回転中に特定の翼1枚だけが、全体のトルクに寄与しており、一部の範囲ではマイナスの寄与となることがわかる。さらに、 $\lambda=2$ になると、特定の翼がトルクに寄与している状態は変わらないが、残

り2枚の翼の発生トルクは負になっており、全体トルクは0.067Nmまで低下した。これらの結果から、周速比が小さい(1以下)の場合には、翼全てがトルク発生に寄与するが、周速比が大きくなると特定の翼1枚がトルクに寄与し、さらに周速比が大きくなると残り2枚がトルクを減らす方向に働くことが分かった。

また、発生トルク・回転数・主風速・ローター断面積などから、パワー係数 c_p を算出すると図6のようになり、 $\lambda=1$ が最大となり、 $c_p=0.21$ であった。

3.2 発生トルクと圧力場・流れ場の関係

次に、各周速比において全トルクが最大となる時刻と最小になる時刻(いずれも図中に記載)を調査した。図3～5の各図(b)に翼表面圧力分布と、翼断面($z=1.25$)およびエッジ附近($z=1.48$)から発生させた流線を示す。

(a) Torque variations

(b) Surface pressure and streamlines

Fig.5 Snapshots of flow around the rotor ($\lambda=2$)

Fig.6 TSR and power coefficients

$\lambda=1/3$ では、最高トルク発生時に、翼2が気流に対して一定の迎え角を持つ位置にあり、主に揚力がトルクに寄与している。また、弱い翼端渦が確認できる。しかし、

翼3はほぼ気流と並行であり、翼1は気流を横切る位置になり高迎え角となっている。一方、最低トルク発生時には、翼1は流れにほぼ並行で抗力がトルクを減らす方向に働き、翼2は気流に押されて僅かにトルクを増やしている。翼3は翼2の後流の影響を受けているものの、後縁附近から気流に押される形になっている。

$\lambda=1$ になると、最高トルク発生時には、翼1が気流に対して一定の迎え角を持つ位置にあり、揚力がトルクに寄与しているが、翼2はほぼ気流と並行で相対速度が小さく、翼3も、流れの剥離が発生しており抗力が発生してもトルクに寄与できる角度にないことが分かる。さらに最低トルク時には、翼3は、相対速度は大きいものの、気流角度から、揚力・抗力がトルクに寄与するほど発生していない。また、翼2は、前方の翼1の剥離領域に入ってしまう、有効な仕事が出来ていない。

さらに、 $\lambda=2$ では、最高トルク発生時には、翼1だけが抗力によるトルクを発生しているが、翼2は上流側の翼1の剥離領域に入っており、翼3も気流角度から、トルクにはマイナスの働きとなっている。さらに最低トルク発生時にも様子はほぼ同じである。

4.結言および今後の課題

本報告では、NACA0018翼型を有するマイクロ垂直軸風車の低レイノルズ数3次元非定常解析を実施した。今後の課題としては、可視化実験などによる剥離や乱流遷移などの詳細な過程について調査を実施する。さらに、それらの結果を踏まえ、低レイノルズ数回転流れにおける、発生トルク増加に向けた翼形状や翼表面の工夫について検討を進める。

参考文献

- (1) 宮下 幸雄 他 4 名, マグネシウム合金を用いた軽量小型垂直軸風車の開発, 太陽/風力エネルギー協会合同講演会論文集 (2010), pp.153-154.
- (2) 若嶋 振一郎 他 7 名, マグネシウム合金製軽量小型垂直軸風車の基本性能評価, 太陽/風力エネルギー講演論文集 (2011), pp.211-214.
- (3) 若嶋 振一郎 他 7 名, マグネシウム合金製軽量小型垂直軸風車の基本性能評価, 風力エネルギー, Vol.36, No.102(2012), pp.32-39.
- (4) 若嶋 他 5 名, プロトタイプ Mg 合金製小型垂直軸風車の設計および性能評価, 第 17 回動力・エネルギーシンポジウム (2012), pp.11-14.
- (5) 高木 亮治, 低レイノルズ数流れにおける NACA4402 翼の空力特性解析, 日本航空宇宙学会論文集, Vol.54, No. 631 (2006), pp.367-373.
- (6) 関 和子, 牛山 泉, 垂直軸風車, パワー社 (2008)