A202 CFD によるキャンバー翼の空力特性計算と 小型垂直軸風車特性予測への応用

CFD Calculation on Aerodynamic Data of Cambered Airfoils and Application to Performance Prediction of Small Vertical Axis Wind Turbine

○正 原 豊 (鳥取大) 住 隆博 (鳥取大)
井上 尚子 (鳥取大) 田中 華奈 (鳥取大)

Yutaka HARA, Takahiro SUMI, Naoko INOUE and Kana TANAKA,
Tottori University, 4-101, Minami, Koyama-cho, Tottori-shi, Tottori

This study carried out CFD analyses to build up a database of aerodynamic characteristics of cambered blades like NACA 2518, NACA 4518, and NACA 6518 in order to use it for performance prediction of vertical axis wind turbines (VAWTs). Dependence of the increase in lift coefficient on the Reynolds number is shown as well as dependence of the decrease in moment coefficient, and the approximate equations for these dependences are proposed. Using the aerodynamic database, performances of virtual small VAWTs with cambered blades were predicted by Blade Element Momentum method. Increase in usual camber extends the power curve toward high tip speed ratio region although the maximum power decreases.

Key Words: CFD, Wind Turbine, VAWT, Airfoil, BEM

1. 緒言

近年、風向依存性がないなどの観点から垂直軸風車が注目されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。風車の設計においては、計算コストが低い翼素運動量理論 (BEM : Blade Element Momentum theory) が有用であるが、風車性能を高い信頼性で予測するためには、精度の高い翼の空力特性データが必要となる。特に垂直軸風車の場合、様々な運転状態を計算するためには広迎角範囲かつ種々のレイノルズ数における空力特性データが必要となる。しかし、失速状態まで含めた大迎角範囲に対して、かつ広範囲なレイノルズ数について空力特性が公表されている翼型はごく限られたものしか存在しない。

本研究では、数値流体解析 (CFD: Computational Fluid Dynamics) によって種々の翼型の空力特性データベースを構築することを目指としている。これまでに、広範囲の条件にわたる既存データが公表されている対称翼型の NACA 0018 を対象として空力係数 (抗力係数, 揚力係数) の低コスト計算を行い⁽⁵⁾, $1.0 \times 10^4 \sim 1.6 \times 10^5$ の比較的低いレイノルズ数では文献値⁽⁶⁾と同程度の値を得ている。本報告では、NACA 0018 に 2%, 4%, 6% のキャンバーを付けた翼型 NACA 2518, NACA 4518, NACA 6518 について既報⁽⁵⁾と同様の CFD 解析を実行し、低レイノルズ数領域におけるキャンバー翼型の空力特性データベースを作成した。空力特性に対するキャンバー (反り) の影響を示すとともに、作成した空力データベースを用いて、キャンバー翼を持つ仮想垂直軸風車の特性予測を実施した。

2. 計算方法

2.1 計算条件

本研究では、汎用 CFD コードである STAR-CCM+ ver.7.0 を用いて翼型の空力特性 (揚力係数 Cl , 抗力係数 Cd , 翼弦長 25% 位置におけるモーメント係数 Cm) を計算した。NACA 0018 に関しては、以前の計算ですでに Cl , Cd を求めているが、本報告では Cm を追加計算している。1つの状態における計算時間を短くし、より多くの条件における結果を得るため、RANS を用いた 2 次元定常計算を行った。乱流モデルには 1 方程式モデルである Spalart - Allmaras モ

Fig.1 Airfoil sections

デルを用いた。計算対象となる翼型 (NACA 0018, NACA 2518, NACA 4518, NACA 6518) は全て翼弦長 $c=1\text{m}$ とし、6つのレイノルズ数 Re の値 (1.0×10^4 , 2.0×10^4 , 4.0×10^4 , 8.0×10^4 , 1.6×10^5 , 3.6×10^5) について計算を行った。図 1 に計算対象の翼型を示す。

風車の特性予測において特に重要となる迎角 -20° から 30° の低迎角範囲では 2° 間隔において計算を行った。高迎角範囲の計算は $Re=1.0 \times 10^4$ についてのみ行い、各翼型について迎角 -180° から 180° まで 10° 間隔とした。風車特性計算に用いるデータベースとする際には、スプライン補間を用いて 1° 間隔のデータに変換している。なお、 $Re=1.0 \times 10^4$ 以外の高迎角範囲データは $Re=1.0 \times 10^4$ のデータで代用している。

本研究では Intel Xeon CPU 2.67GHz (4 コア), 12GB RAM の PC を用いた。ただし、並列計算は行っておらず、1 計算条件につき 1 コアを使用した。1 つの条件にかかる計算時間は長いもので約 1 時間であった。

2.2 計算メッシュ

本計算では、半径を翼弦長の 20 倍とする円形領域を計算領域 (図 2 参照) としボリヘドラルメッシュを採用した。また翼近傍および後流においては、メッシュサイズが翼弦長 c の 4% 程度となるよう設定している。図 3 に作成したメッシュを示す (全要素数は約 35000)。なお、図 3(c) に示すよう

Fig. 2 Calculation regions and boundary conditions

Fig. 3 Details of computational mesh

に翼面近傍には層状の格子（プリズムレイヤーメッシュ）を使用している。最小格子幅は 4×10^{-5} m である。図 2 に示すように左側半円の遠方境界から、周方向位置に関係なく水平方向一様流 U_∞ が流入すると仮定し、右側半円の遠方境界ではゲージ圧力 0 を仮定した。計算領域の中心に設置した翼の傾きを変化させ迎角 α を設定した。

2.3 計算結果の処理

本計算では、はく離が起これ本質的に非定常な流れ場に対しても定常計算を行っている。このような場合、計算される空力係数は収束せず、計算結果は一定振幅の振動状態となった。最も非定常性が強くなると考えられる迎角 $\alpha=90^\circ$ では、レイノルズ数が 3.6×10^5 以上となると Spalart - Allmaras モデル内の乱流動粘性係数(SA_nut)の残差が 1 以上となった。本研究では、このように明らかに収束解が得られない場合は、一定の振幅が十分に長く継続した時点において、一定振幅振動状態の最後の 1000 ステップの算術平均をとって、その計算条件における空力係数とした。

3. 計算結果と考察

3.1 高迎角範囲の空力特性

図 4(a)-(c)に $Re=1.0 \times 10^4$ において計算した 4 種類の翼型 (4 つの反り比)の高迎角範囲における各空力特性を示す。 Cl では $-60^\circ < \alpha < 50^\circ$, $-170^\circ < \alpha < -110^\circ$, および $120^\circ < \alpha < 170^\circ$ の範囲でキャンバーによる特性の差異が大きくなっている。 Cd については -90° 近辺で差が目立っている。 Cm に関しては際立って差が目立つ箇所はないが、 $-170^\circ < \alpha < 70^\circ$ の広い範囲でキャンバー翼と対称翼の差が現れて

Fig. 4 Aerodynamic characteristics in wide AoA range

($Re=1.0 \times 10^4$)

いる。なお、本研究では、 Cm の符号は頭上げを正として定義している。

3.2 低迎角範囲の空力特性

図 5(a),(b)にレイノルズ数がそれぞれ 2.0×10^4 , 1.6×10^5 の場合の低迎角範囲 ($-20^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$) における揚力係数を示す。 Cl は対称翼に対してキャンバーが大きくなると増加し、 $\alpha=0^\circ$ 近傍ではキャンバーに対しほぼ一定の割合で増加している。この Cl のほぼ一定の増加割合は、レイノルズ数の増加に伴い増える傾向がある。

図 6(a), (b)にレイノルズ数がそれぞれ 2.0×10^4 , 1.6×10^5 の場合の低迎角範囲におけるモーメント係数を示す。 Cm は対称翼に対してキャンバーが大きくなると減少し、 $\alpha=0^\circ$ 近傍ではキャンバーの増加に対しほぼ一定の割合で減少している。 Cm のほぼ一定の減少割合は、レイノルズ数の増加に伴い増える傾向がある。抗力係数について図は割愛するが、 Cl や Cm で見られたようなキャンバー増加に

Fig. 5 Lift coefficients in small AoA range

伴う一定割合による単純な増加や減少ではなく、もっと複雑な依存性が見られた。ここで図は示さないが、揚抗比 Cl/Cd の最大値はキャンバーの増加に伴い、低迎角方向にシフトする傾向が見られた⁽⁷⁾。

図 7(a),(b)に $\alpha=0^\circ$ におけるキャンバー1%増加当りの Cl の増加率および Cm の減少率のレイノルズ数依存性を赤い丸印で示す。これら変化率は、本研究で計算対象とした3種類のキャンバー翼の各々の空力係数の対称翼に対する変化率を平均して求めたものである。図7の各図にはレイノルズ数をパラメータとした指数関数を用いた近似を青の破線で示している。式(1), (2)に本研究で求めた Cl および Cm のキャンバー1%当りの増加率 Y_{Cl} および減少率 Y_{Cm} の近似式を示す。

$$Y_{Cl} = 0.102 \times \{1 - \exp(-Re^{0.91}/12400)\} \quad (1)$$

$$Y_{Cm} = 0.0259 \times \{1 - \exp(-Re^{0.53}/160)\} \quad (2)$$

図 7(a)および式(1)より、 Cl の増加率は $Re=2 \times 10^5$ あたりで約 0.1 に収束することがわかる。 Cm についても同様であり、図 7(b)および式(2)より、 $Re=2 \times 10^5$ 以上でキャンバーの 1% 増加当り約 0.026 モーメント係数は減少する。

4. 垂直軸風車特性予測への応用

本研究で作成したキャンバー翼の空力データベースを用いて、翼のキャンバーが垂直軸風車の特性に与える効果を、翼素運動量理論(BEM)を用いて検討した。仮想的な風車として、直径 $D=0.6m$ 、翼弦長 $c=0.047m$ の2次元垂直軸風車(3枚翼)を仮定した。翼の仮想アーム(存在しない)との取付位置は翼弦長の50%、この位置における取付角度は 0° と設定した。この仮想風車の場合、翼の中立線を翼軌

Fig. 6 Moment coefficients in small AoA range

Fig. 7 Increase rate of Cl and decrease rate of Cm at $\alpha = 0$

道の円弧に沿わせることは、翼に約2%のキャンバーをつけることに相当する。風車性能予測には、流れ場モデルとして2重多流管モデル(DMS)を用いた翼素運動量理論に基づく計算を行い、動的失速モデルとして修正 Gormont モデル⁽⁸⁾ ($A_M=6.0$ を仮定)を使用した。風速は一様流 $U_\infty=6m/s$ を仮定した。本計算条件では先端周速比が $\lambda=4$ の場合、局所

Fig. 8 BEM predictions for power characteristics of 2D virtual wind turbines with usual or inverse camber

($D=0.6\text{m}$, $c=0.047\text{m}$, $U_{\infty}=6\text{m/s}$, $Re \approx 1 \times 10^5$ at $\lambda=4$)

レイノルズ数は約 1×10^5 である。

図 8(a)に各キャンパー翼を通常の外凸取付けとした場合の風車出力係数 C_p を対称翼の場合と比較して示す。同様に、図 8(b)には内凸取付けとした場合の C_p を示す。なお、ここでの C_p は単位高さ(1m)当りのロータを仮定して定義した。外凸キャンパー翼の場合、キャンパーが大きくなると C_p のピーク値が下がるが、ピーク幅は広がり、高い周速比領域においても出力を発生する特性になる。これは高速回転時には迎角が小さくなることから、キャンパーが増加することによる低迎角範囲での Cl の増加(図 5 参照)が影響していると考えられる(C_m のキャンパー増加に伴う減少は、 $C_m < 0$ であるため、上流側では回転力への寄与としては逆効果)。ただし、軌道円弧から大きく外れた 6% のキャンパー翼では明らかに大きな出力劣化が予想される。

一方、通常とは逆の内凸キャンパー翼の場合、2%キャンパー翼では、出力ピーク幅が狭くなるが、最大の C_p が対称翼とほぼ同じになっている。少し内凸のキャンパーを付けることにより、上流側におけるエネルギー効率が上がっている可能性がある。しかし、本 BEM 計算では、流線の曲率効果を考慮していないため、微妙な C_p の大小関係を議論してもあまり意味はない。図 8 において対称翼が最大出力を与える結果となっているが、前述のように流線の曲率を考えるならば、外凸 2% のキャンパー翼(NACA 2518)が湾曲流線に沿うことが期待され、この仮想風車において最適な翼になることが予想されるが、ここでは推測に過ぎない。少なくとも、図 8(b)からは、内凸キャンパー翼を採用すると、対称翼に比べて出力ピーク幅が狭まる特性になるといえる。本研究では仮想風車の取付位置や取付角度は

固定した。これらの設定やその他のパラメータによって風車特性は変わるため、今後は作成した空力データベースを利用した BEM 予測と、実験や CFD で得られる結果との比較を行い、垂直軸風車の特性をより詳しく調べていく予定である。

5. 結言

3 種類のキャンパー翼型について二次元定常 CFD 計算を用いて空力データベースを作成し、以下の知見を得た。
(1) 低迎角範囲では Cl , Cm の値はキャンパーの増加に伴い一定の割合でそれぞれ増加、減少する。その変化率のレイノルズ数依存性を示す近似式を示した。
(2) 揚抗比 Cl/Cd のピークはキャンパーの増加に伴い低迎角側にシフトする。
(3) 本研究で得られた空力データを用いて翼素運動量理論による仮想小型垂直軸風車の性能予測を行った結果、キャンパーが大きいほど出力係数のピーク値は下がること、外凸キャンパーの場合はピーク幅が広がり高周速比範囲で出力が発生すること、一方、内凸キャンパーの場合はピーク幅が狭くなることを示した。

謝辞

本研究は、平成 23 年度科学研究費(基盤研究(C)23561031)、平成 24 年度鳥取県環境学術研究等振興事業、および平成 24 年度鳥取大学学長経費の補助により実施した。ここに記し謝意を表す。

参考文献

- (1) 原 豊, 風力エネルギー, 35-2 (2011), 134.
- (2) 秋元博路ら, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2012), 323.
- (3) 原 豊ら, 第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム, (2012), 413.
- (4) 原 豊ら, ターボ機械, 41-4 (2013), 209.
- (5) 井上尚子ら, ターボ機械, 41-2 (2013), 103.
- (6) Kumar, V. et al., Wind Engineering, 34-4 (2010), 461.
- (7) 井上尚子ら, 日本機械学会中国四国支部第 51 期総会・講演会講演論文集, 135-1(2013), No.1202.
- (8) Paraschivoiu, I., Wind Turbine Design with Emphasis on Darrieus Concept, Polytechnic International Press (2002), 201.