

マイクロ風車の最適設計およびその成形法に関する研究

日大生産工(院) ○稲付祐介 日大生産工(院) 染宮聖人
日大生産工 平山紀夫

1. 緒言

化石燃料の大量消費をはじめとする環境問題は社会問題となっており、再生エネルギーの供給需要は年々高まっている。中でも小型の風車は、設置面積が小さく場所を取らないことや、容易に設置できることから注目が集まっている。一般的に、風車の性能はパワー係数 $P_c(-)$ という風車効率で表され、その最大値はベッツの限界(Betz's limit)と呼ばれる $P_c = 0.593$ である。また、発電量を増加させるためには、風車の回転数を上げる必要があるが、回転数は風車が発生するトルクと、風車自身の抵抗と発電機の抵抗の合計値が釣り合う点で決定される。したがって、風車の性能を向上させるためには、パワー係数を低下させずに発生トルクを増大させることが必要となる。

大型風車の場合、直径が大きく、それに伴い周速比が高いため翼端付近のレイノルズ数が大きくなり、翼端付近の翼弦長によらずトルクを発生させることができる。したがって、翼端付近では翼弦長を小さくし、抗力を削減することが設計として正しいと言える。それに対し、マイクロ風車のような小型の風車では、直径や周速比が小さいため、翼端付近の翼弦長を小さくして抗力の削減を図るよりも、翼弦長を大きくしてトルクを増大させるべきであると考えられる。

そこで本研究では、マイクロ風車の性能向上を目的として、風力発電コンペ「WINCOM」の規格¹⁾に準拠して一般的なプロペラの設計に用いられているLarrabeeの理論²⁾を用いて、翼形状の最適設計について検討を行った。そして、得られた結果に基づいてFRP製の風車の製作を行い、製作した風車の性能評価を行った。

2. 設計モデル

「WINCOM」における規格は、高さ、幅、奥行きが各800mm以内、発電機は自転車用を使用することである。風速については2m/sから6m/sの範囲を1m/s刻みで上昇させていく。風車の発生するエネルギーは風速の3乗に比例するため、今回は送風機の風速分布を考慮し、中心での風速を6m/s、ロータ半径370mm、

ブレード枚数6枚、設計回転数300rpmとして設計を行った。

今回の翼弦長 $C(m)$ の決定には(1)式³⁾を用い、Prandtlの翼端損失係数 $F(-)$ の有無で性能の違いを評価した。

$$C = \frac{4\pi r F \cos \varphi \sin \varphi V \zeta}{W C_l B} \quad (1)$$

ここで $\varphi(\text{deg.})$ は流入角、 $W(\text{m/s})$ は合成速度、 $C_l(-)$ は揚力係数、 $B(-)$ はブレード枚数、 $r(\text{m})$ は半径方向の距離、 $V(\text{m/s})$ は風速、 $\zeta(-)$ は無次元渦面移動速度を表す。

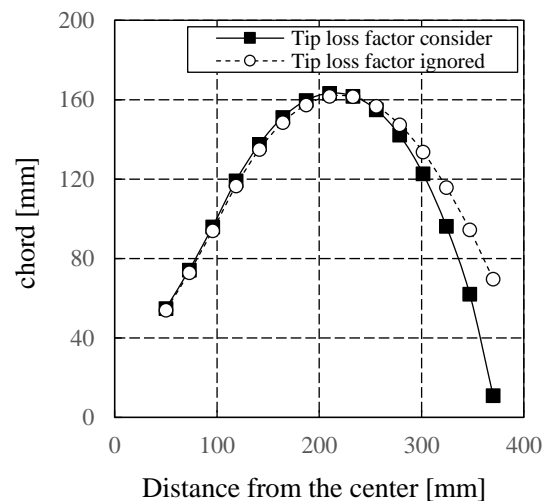


Fig.1 Relationship between Distance and Chord.

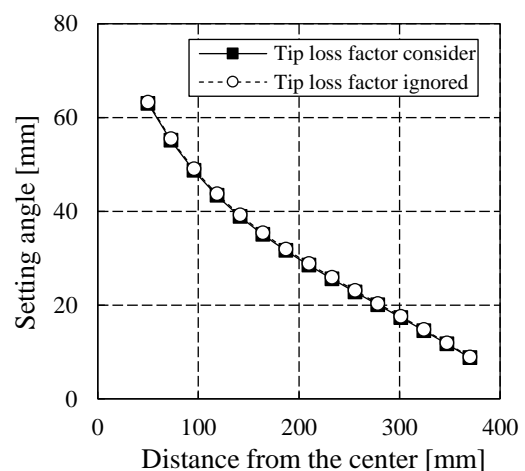


Fig.2 Relationship between Distance and Setting angle.

翼弦長の決定は、翼端損失係数の有無で場合分けを行い性能の比較を行った。翼端損失係数を含めた場合と、除いた場合($F=1$)で設計を行った半径方向の距離と翼弦長及び設定角度の関係をFig.1, Fig.2に示す。また、形状モデルをFig.3, Fig.4に示す。Fig.1に示すように、翼弦長については翼端損失係数の影響が生じる翼端付近で大きくなった。また、Fig.2に示すように翼端損失係数の有無によらず、ブレード設定角はほぼ等しい値になった。

Table 1には翼弦長の決定時に翼端損失の有無で場合分けを行ったそれぞれのモデルのパワー係数と発生トルクを(2)から(5)式に基づき導出し、その計算結果を比較して示す。設計した風車の性能を比較したところ、翼端損失係数を無視して設計を行った場合と、そうでない場合を比較して、パワー係数は変化せず、発生トルクは約7.5%増大することが確認された。Fig.5に今回の風車で使用した翼型の5degにおける揚抗比とレイノルズ数の関係を示す。図に示すように、翼型の二次元性能はレイノルズ数に強く依存し、レイノルズ数が重要であることがわかる。マイクロ風車は大型風車と比較し、その直径の小ささから周速比が低くなり、レイノルズ数が下がりやすいため、意図的に翼弦長を増大させ、レイノルズ数を確保することで性能の向上が可能であると考えられる。

これらのことから、マイクロ風車は、適切な設定角度でレイノルズ数を大きくし、翼型の性能を発揮させることが重要であることがわかる。

$$Q' = (L' \cos \varphi - D' \sin \varphi) dr \quad (2)$$

$$P_c = J_1 \zeta - J_2 \zeta^2 \quad (3)$$

$$J'_1 = 4 \xi F \frac{r \Omega}{V} \cos \varphi \sin \varphi \quad (4)$$

$$J'_2 = \frac{J'_1}{2} \cos^2 \varphi \quad (5)$$

ここで、 L' は局所揚力(N)、 D' は局所抗力(N)、 dr は環状の厚さ(m)、 Q' は局所トルク(Nm) P はパワー(W)、 Ω は角速度(rad/s)、 ζ は無次元局所半径(-)である。

3. フォーム材による二種類のブレードの製作

得られた設計結果より、翼端損失を考慮したモデルと無視したモデルの二種類の風車ブレードについて、フォーム材(スタイロフォーム)を用いて試作を行った。主軸には歪みが出ない

Table 1 Comparison of power coefficient and torque due to difference in chord determination method.

	Tip loss factor consider	Tip loss factor ignored
Power coefficient	0.39	0.39
Torque	1.34	1.44

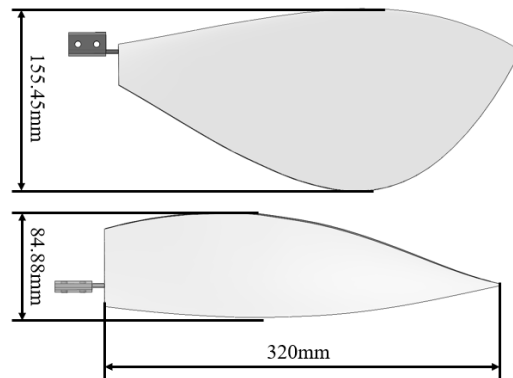


Fig.3 Model when considering the Tip loss factor.

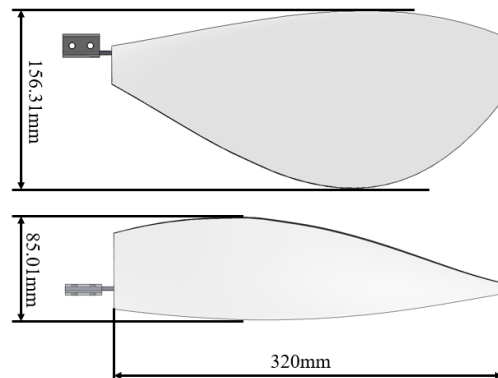


Fig.4 Model when the wing Tip loss factor is ignored.

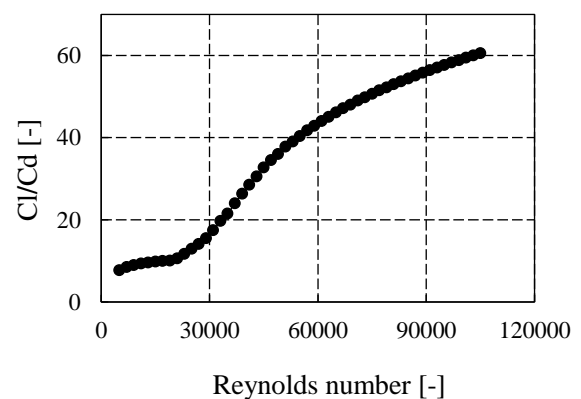


Fig.5 Reynolds number and lift-to-drag ratio

ようステンレス(SUS304)を使用し、その軸に電熱線でカットしたスタイロフォーム製のパーツを串刺しにすることで形状を製作した。さらに、表面をサンディングし、熱収縮フィルム(オラカバフィルム)をアイロンで貼り付け、完成させた。そのブレードをFig.6に示す。

上記の手順で製作したブレードを発電用のダイナモにM5ボルトで取り付けた。翼端損失係数を考慮した風力発電機をFig.7, 無視した風力発電機をFig.8に示す。

4. 実験結果

製作した二種類の風力発電機の発電実験を行った。実験は、風食発電コンペ「WINCOM」の計測方法に準拠し、送風機からの中心風速が2m/sから6m/sになるように行い、5秒間の平均回転数と平均発電量を測定した。その結果をTable 2に示す。

測定の結果、翼端損失係数を無視して設計を行った風力発電機は翼端損失係数を考慮した風力発電機に対し、設計風速の6m/sにおいて約40rpm上回った。また、設計風速以外の領域でも翼端損失係数を無視した風力発電機の性能が高いことが明らかとなった。ただし、発電量に関しては、発電用ダイナモの上限出力値が約4000mWであり、発電量は回転数に対して対数関数的に増加するため、顕著な増加は確認できなかった。

5. CFRP製ブレードの成形

発電実験の結果から、ブレードの先端部の形状による性能の違いが解析および実験によって確認された。しかし、フォーム材を用いたブレードは製作精度が悪かったため、断面精度と表面性状を高め、性能向上とその性能評価を行うことを目的とし、炭素繊維強化プラスチック(Carbon Fiber Reinforced Plastics : CFRP)を用いて風車ブレードの成形を行った。CFRPは軽量かつ比強度・比剛性に優れ、型を用いることで複雑な形状の再現性にも優れる。CFRP製の風車ブレードの成形にはFig.9に示す型を用いた。この型は、切削性の良いワーカブルレジンをNCフライス加工し、その原型からGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)を積層したものである。今回はブレードを上下に2分割して成形し、後接着により一枚のブレードに組み立てた。完成したブレードをFig.10に示す。CFRP製風車ブレードの成形方法・手順は以下の通りである。



Fig.6 Foam blade



Fig.7 Wind turbine considering tip loss factor



Fig.8 Wind turbine ignoring Tip loss factor

- ① 型に離型剤を6回塗布する.
- ② エポキシ樹脂を塗布し, 平織炭素繊維に含浸させる.
- ③ 脱泡ローラーで気泡を抜く
- ④ 24時間の常温硬化を行う.
- ⑤ ブレードを脱型する
- ⑥ 接着剤を塗布し, ブレードの上下面を接着する
- ⑦ グライNDERを用いてトリミングを行う.
- ⑧ 硬化炉を用いて80°C, 2hで熱硬化させる.
- ⑨ 表面のサンディング

上記の手順で成形し, 完成したブレードをFig.9に示す.

6. 結言

今回の設計結果と実験結果から, 風速6m/sにおいて40rpm(約12.5%)の回転数の増加が確認された. この性能向上の理由としては, 翼端損失係数を無視して翼弦長を設計したことにより翼端付近でのレイノルズ数が向上し, 翼型の二次元性能(揚抗比)が増加したことで発生トルクが増大したことが挙げられる.

発電量はブレードの形状だけでなく, 発電機の性能にも依存するため, より実用的な風車を考える場合はその両方を検討する必要がある. そのため, 今後は, CFRP製の風車ブレードを発電機に取り付け, 実験とその評価を行い, 製作精度や表面性状の影響を調査する予定である.

参考文献

- 1) 日本大学生産工学部, 風力発電コンペ WINCOM 実行委員会, 第14回風力発電コンペ WINCOM 2021 開催・実施要項.
- 2) Larrabee, E. E, "Practical Design of Minimum Induced Loss Propellers".
- 3) 小池勝, 流体機械工学, コロナ社, PP.82-103 (2009).
- 4) 稲付祐介, マイクロ風車の最適設計に関する研究, 日本大学生産工学部第52学術講演概要, 2020-12-12, 6-1.
- 5) 牛山泉, 風車工学入門, 森北出版株式会社, 2013).

Table 2 Experimental result

wind speed [m/s]	Tip loss factor consider		Tip loss factor ignored	
	Rotation speed [rpm]	Electric-generating capacity [mW]	Rotation speed [rpm]	Electric-generating capacity [mW]
2.0	0.0	24.8	17.0	50.9
3.0	29.5	169.1	30.6	182.6
4.0	50.8	496.9	53.0	535.9
5.0	197.2	3042.9	213.7	3208.8
6.0	314.6	3896.5	354.0	3908.1



Fig.9 Molding mold



Fig.10 CFRP blade