

逆テーパ型のブレードについては、等弦長型ブレードに準ずる傾向を示します。

私は、いろいろな形状のブレードを製作しましたが、できるだけ軽く、丈夫に作るという点ではテーパ型のブレードが作りやすく、また動作も安定しているようです。

4-2 ロータ・ブレードの設計

■ ブレードの設計

● 風車ブレードの設計とレイノルズ数

実際に風車ブレードを設計する際は、正確なブレードの翼型データが必要になります。そして、与えられたブレード翼長に対し、ブレード先端の周速比、ブレード各位置の設定角度、翼弦長を求める必要があります。

ブレードの設定角度は、ブレードの任意の位置における周速比 λ の関数となります。また、与えられた翼型の揚力係数と抗力係数は実測データが公表されています。その代表的な例としてClark-Y型の翼型データを表4-1に、特性を図4-9にそれぞれ示します。図(b)は、迎角と揚力係数の関係、図(c)は、揚力係数と抗力係数の関係を示したものです。

この図からわかるように、レイノルズ数 N_{Re} の値によって大きく変化しています。レイノルズ数(Reynolds number)は、流体力学分野において使用される慣性力と粘性による摩擦力との比で定義される無次元数です。レイノルズ数が小さいことは相対的に粘性作用が強い流れであり、レイノルズ数が大きいことは相対的に慣性作用が強い流れだということになります。

このレイノルズ数は、風車ブレードでは次式で定義されます。

〈表4-1〉 Clark-Y型の翼型データ

X座標	Y座標	
	上側	下側
0.00	3.50	3.50
1.25	5.45	1.93
2.50	6.50	1.47
5.00	7.90	0.93
7.50	8.85	0.63
10.00	9.60	0.42
15.00	10.68	0.15
20.00	11.36	0.03
30.00	11.70	0.00
40.00	11.40	0.00
50.00	10.52	0.00
60.00	9.15	0.00
70.00	7.35	0.00
80.00	5.22	0.00
90.00	2.80	0.00
95.00	1.49	0.00
100.00	0.12	0.00

$$N_{Re} = \frac{V_w C}{\nu} = 66225 VC \dots\dots\dots (4-3)$$

ここで、 N_{Re} ：レイノルズ数、 V_w ：風の相対速度 [m/s]、 C ：ブレードの弦長 [m]、
 ν ：動粘性係数 [m²/s] (1気圧20℃の空気では 1.51×10^{-5})

例えば、弦長 $C = 10$ cmで、周速比 $\lambda = 5$ のブレードが風速5 m/sで回っている場合、ブレード先端の速度は25 m/sとなります。したがって、上式から、

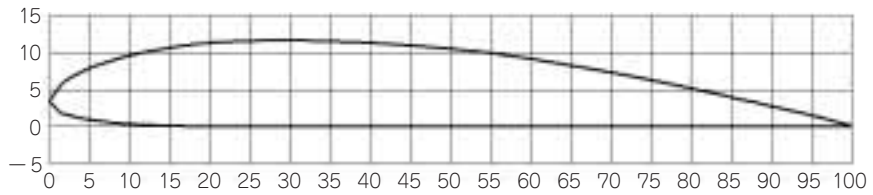
$$N_{Re} = 66225 \times 25 \times 0.1 = 165560$$

となります。

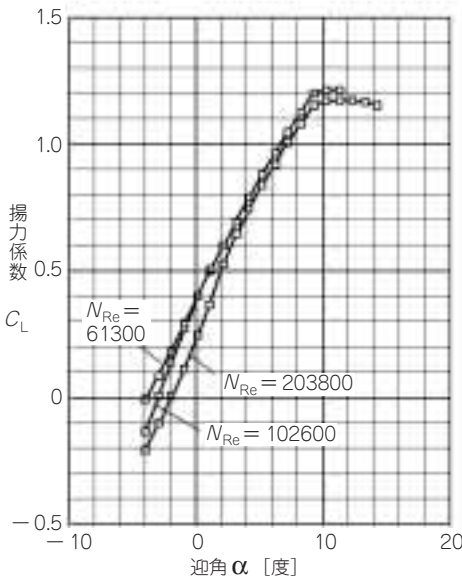
図4-9の特性図からわかるように、レイノルズ数が小さいと揚力に大きな変化はありませんが、抗力が大きくなるのがわかります。ブレードの回転速度が小さいと、レイノルズ数は小さくなりますから、抗力が大きくなり、回転起動が弱くなるわけです。

ブレードを設計する際には、ブレードの大きさや周速比などでレイノルズ数を配慮する必要がありますが、一般には無視して $N_{Re} = 100000$ 程度のデータを基に設計されています。

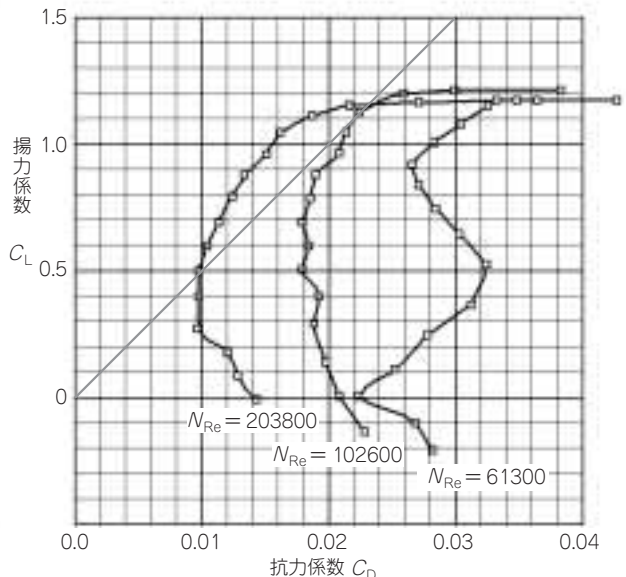
$N_{Re} = 100000$ とすれば、図4-9において、 C_L/C_D (揚抗比)が最大になる点は、図(c)の灰色の線と揚



(a) Clark-Y型の翼型



(b) 迎角 対 揚力係数



(c) 抗力係数 対 揚力係数

〈図4-9〉Clark-Y型の翼断面と揚力係数、抗力係数の特性

抗線が接触する箇所ですから、 $C_L \approx 1.1$, $C_D \approx 0.022$ となります。つまり $C_L/C_D = 50$ となります。 $C_L = 1.1$ における迎角 α を図(b)から求めると $\alpha = 8^\circ$ です。つまり、迎角を 8° に設定したときに最大出力が得られます。

これらの値は翼型によって異なりますが、通常は揚力係数 $C_L = 1$, 迎角 $\alpha = 4 \sim 6^\circ$ に設定すれば大きな誤差はないでしょう。

● 周速比 λ

ブレードを設計する際に、最も重要なパラメータとして周速比 λ があります。周速比 λ は、ブレードの回転方向の速度と風速の比で定義され、次式で求められます。

$$\lambda = \frac{\pi n r}{30 V_w} \dots\dots\dots (4-4)$$

ここで、 V_w : 風速 [m/s], n : 風車の回転数 [rpm], r : 風車ブレードの半径 [m]

上式から、周速比 λ が小さいブレードは、回転が遅く大きなトルクを発生するトルク型の風車となります。逆に、周速比が大きいブレードは、回転数が速く高速型の風車になります。

〈表4-2〉周速比の大小とメリット/デメリット

	周速比を小さくした場合 ($\lambda \leq 4$)	周速比を大きくした場合 ($\lambda \geq 7$)
メリット	(1) 風切り騒音が非常に小さい。 (2) 低風速時の起動性(カットイン)が良い。 (3) 振動が小さくなる。	(1) 高速であるため、発電機を小型化でき、軽量化しやすい。 (2) ブレードの製作が容易で軽量化できる。 (3) (1)と(2)のため風車全体を小型・軽量化できる。 (4) トルクが小さいので、電磁ブレーキが容易である。
デメリット	(1) 発電機直結の場合、低速であるため、低回転で高トルク型の発電機が必要になり、発電機の重量が大きくなる。 (2) ブレードの翼弦長が大きくなり、製作にやや難がある。 (3) 強風時に過回転を防ぐための対策が難しい。	(1) ブレードの風切り騒音が大きくなる。 (2) 低風速時に起動性(カットイン)が悪くなる。 (3) 2枚ブレードの場合、特に振動が大きくなる。 (4) 先端エッジが風食作用で削り取られる。 (5) パワー係数が低下する。



〈図4-10〉^Kゼファー社が発売している500W級風力発電機の外観

周速比の小さい低速型のブレードは、騒音も小さく、カットイン風速が良くなるものの、発電機が低速回転で発電する必要があり、したがって、発電機のロータ径を大きくする必要があり、重量が大きくなるなどの問題があります。もちろん、ギアやベルトで増速する方法もありますが、構造的に複雑となり、重量増となります。一方、周速比を大きく取ると、発電機やブレードの設計・製作が容易になりますが、騒音が大きくなり、カットイン風速が大きくなるという問題があります。

通常、水平軸風車の周速比は、4～7に設計されています。表4-2は周速比を小さくした場合と、大きくした場合のメリット、デメリットを列挙したもので、周速比 λ の値を設定する上での要点です。

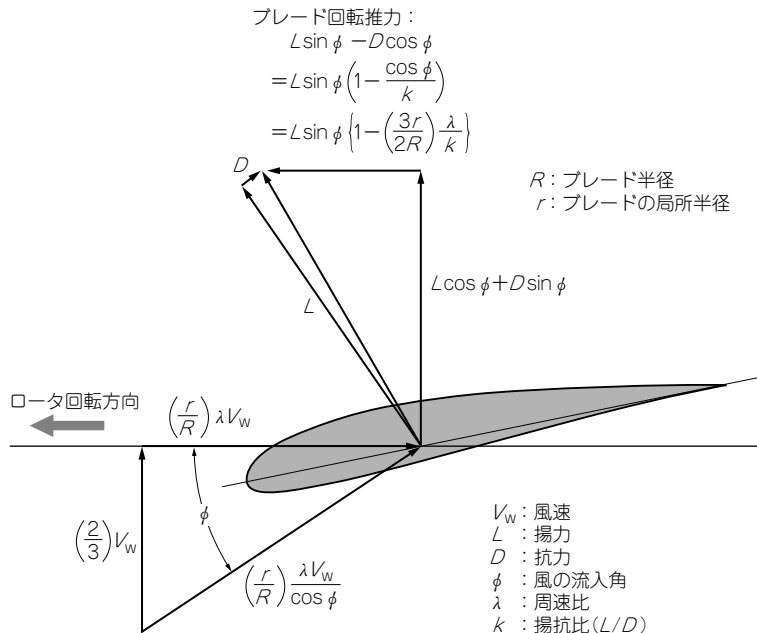
図4-10は、ゼファー(Zephyr)社が発売している500W級の風力発電機です。この風力発電機はブレードの周速比を極端に大きく設計した例です。周速比を大きく取ることによって、ブレードの軽量化ができることや、比較的小型の発電機が使用できる点でメリットがあります。しかし、表4-2のように、風切り音が大きく、カットイン風速が大きくなるという弱点もあります。

● ブレードの各位置における設定角度

風のもっているエネルギーをロータ・ブレードによって取り出すことは、風の速度を減少させることになりますが、風のもっているエネルギーをすべて取り出すわけにはいきません。この理論は、有名なベッツ(A. Betz)によって明らかにされています。

風車に流入する風速 V_w の風が、風車の後方で $(1/3)V_w$ になったとき風車からは最大の出力が得られます。そのときブレード近傍の速度は $(2/3)V_w$ となることがベッツの理論から知られています。

つまり、ブレードに流入する風は、ブレードが回転しているので、相対的に図4-11のようになりますが、ブレードからエネルギーを抽出するため、 $(2/3)V$ となります。その結果、風の流入角 ϕ は、次式で求められます。



〈図4-11〉 ブレードに働く力