

# エネルギーシステム・要素論

## 第二回 風力発電

平成23年11月18日

### 風力(パワー)

- 風が持つ単位時間当たりの運動エネルギー


$$K = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(\rho V)V^2 = \frac{1}{2}\rho V^3 [J / m^2 s]$$

- 風速 $V$ [m/s],  $1m^2$ を一秒に通過する空気の質量 $m$ [kg],  
空気の密度 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>],  $m = \rho V$

- プロペラ半径 $R$ [m]の理想風車の出力 $W$ [W]

$$W = \frac{1}{2}\rho AV^3 = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho V^3 [J / s]$$

面積に比例  
風速の3乗に比例

- 風車の後ろでは風速 $0m/s$   ブラックホールみたいなもの  
 $Mgh = Kgm s^{-2} m = Kgm^2 s^{-2}$
- 受風面積 $A$ [m<sup>2</sup>]  
 $0.5mv^2 = Kgm^2 s^{-2}$

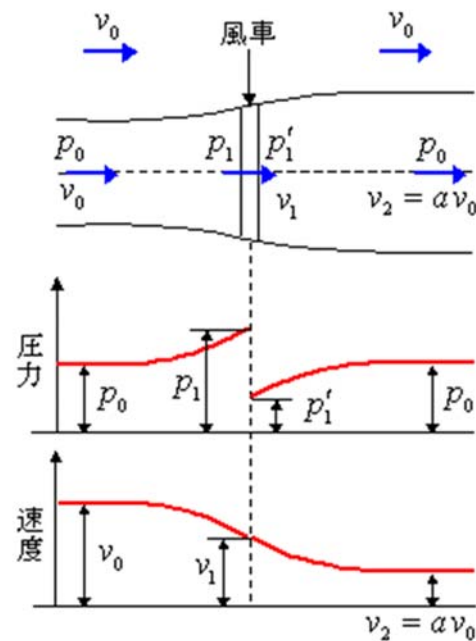
# 風車におけるベルヌーイの定理

- 風車の前後に対するベルヌーイの定理

$$\begin{cases} p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 \\ p_0 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p'_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 \end{cases}$$

- 風車前後の圧力差と速度の関係

$$p_1 - p'_1 = \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2)$$



## 風車に作用する力

- 圧力差により風車の受ける力F

$$F = \pi R^2 (p_1 - p'_1) [N]$$

- 運動量の時間変化より風車の受ける力F

$$F = \pi R^2 \rho v_1 \Delta t \frac{v_0 - v_2}{\Delta t} = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

- 両者は等しい

$$F = \pi R^2 (p_1 - p'_1) = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) = \pi R^2 \rho v_1 (v_0 - v_2) [N]$$

$$\frac{1}{2} (v_0 + v_2) (v_0 - v_2) = v_1 (v_0 - v_2)$$

- 風車を通過する風速は前後の風速の平均となる  $v_1 = \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$

# 風車の出力

- 理想風車の出力L

$$\begin{aligned} L &= Fv_1 = \pi R^2 (p_1 - p_1') v_1 = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) \frac{1}{2} (v_0 + v_2) \\ &= \frac{\pi R^2 \rho (v_0 - v_2) (v_0 + v_2)^2}{4} [J/s] \\ &= \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4} [J/s] \end{aligned}$$

減速比  $a(0 < a < 1)$       $a = \frac{v_2}{v_0}$

風車の出力は減速比aの関数となる

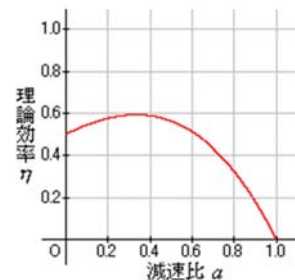
# 風車の効率

- 風力の出力W      $W = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 = \frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3 [J/s]$

- 理想風車の出力L      $L = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4} [J/s]$

- 風車の効率 $\eta$

$$\eta = \frac{L}{W} = \frac{\frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1-a)(1+a)^2}{4}}{\frac{1}{2} \pi R^2 \rho v_0^3} = \frac{(1-a)(1+a)^2}{2}$$



# ベッツの限界

## • 風車の最大効率(出力)となる条件

$$\begin{aligned} \frac{d}{da} \eta &= \frac{d}{da} \frac{(1-a)(1+a)^2}{2} = \frac{1}{2} \frac{d}{da} [(1-a)(1+a)^2] \\ &= \frac{1}{2} [-(1+a)^2 + (1-a)2(1+a)] = \frac{1}{2} (1+a) [-(1+a) + (1-a)2] \\ &= \frac{1}{2} (1+a) [1-3a] = 0 \quad \longrightarrow \quad a = \frac{1}{3} \end{aligned}$$

### – 理論最大効率(ベッツの限界)

実際には40%ぐらいが限度  
空気抵抗, 粘性による損失

$$\eta_{\max} = \frac{(1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{2} = \frac{\frac{2}{3}(\frac{4}{3})^2}{2} = \frac{16}{27} = 0.593$$

### – 風車の最大出力 $L_{\max}$

増速ギヤ, 発電機損失  
で30%ぐらいになる

$$L_{\max} = \frac{\pi R^2 \rho V^3 (1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{4} = \frac{8}{27} \pi R^2 \rho V^3 [J/s]$$

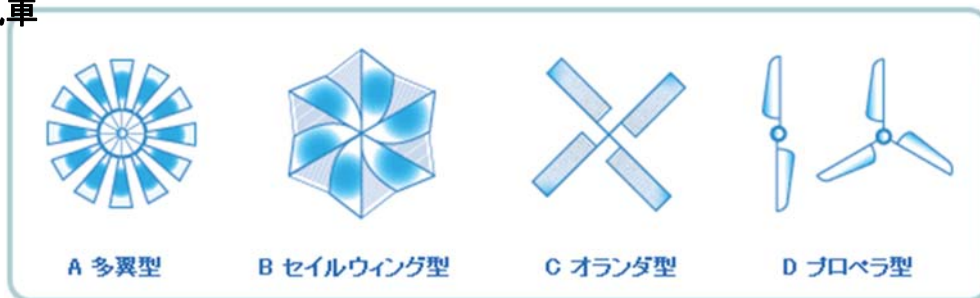
2011/11/18

エネルギーシステム・要素論

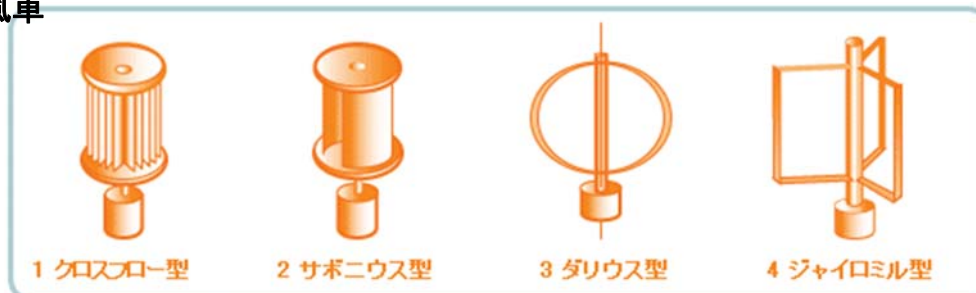
7

# 風力発電

## 水平軸風車



## 垂直軸風車



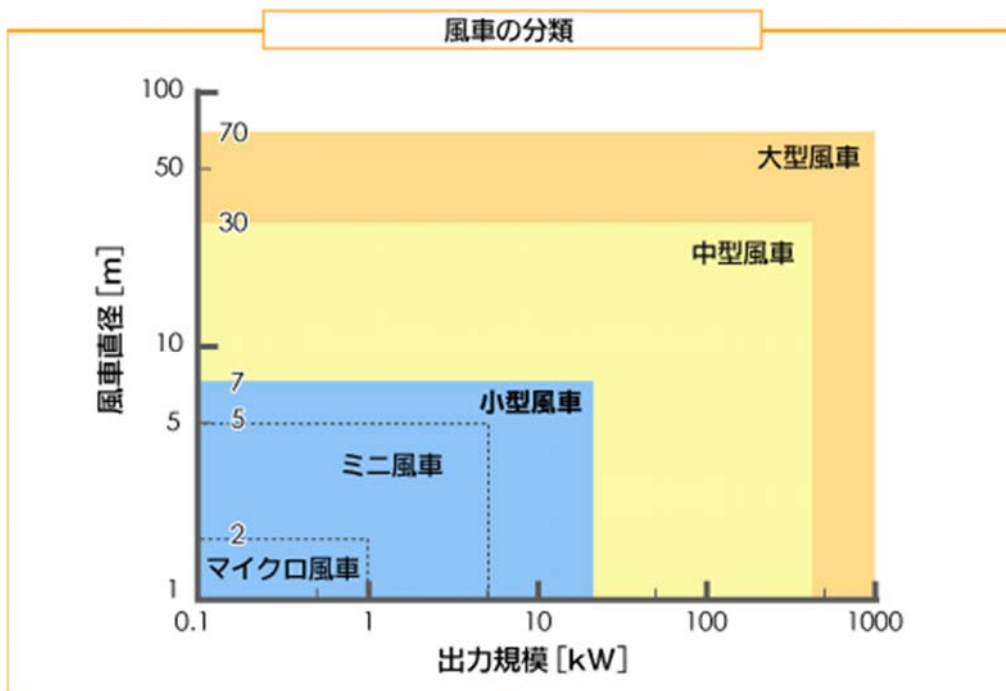
2011/11/18

エネルギーシステム・要素論

NEFのHPより

8

# 風車の分類

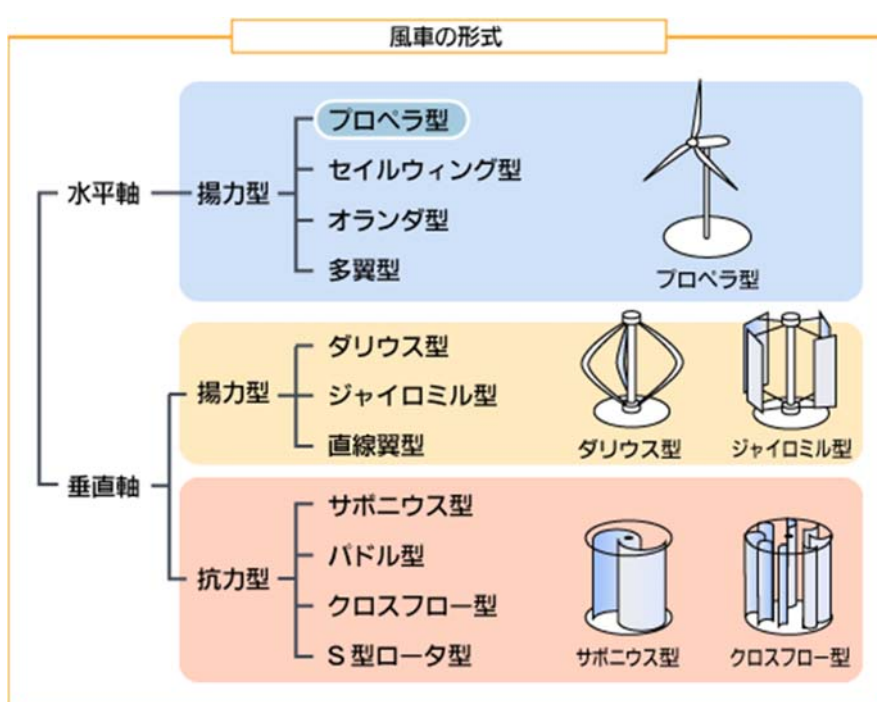


2011/11/18

エネルギーシステム・要素論  
NEDO HPより

9

# 風車の形式

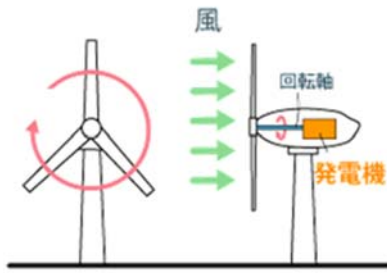


2011/11/18

エネルギーシステム・要素論  
NEDO HPより

10

# 水平軸型と垂直軸型



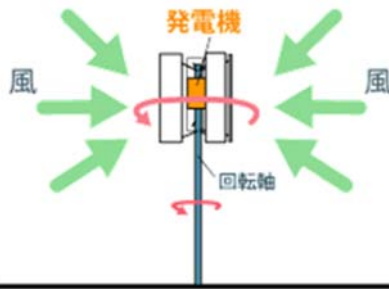
## 水平軸型

回転軸が地面に対して水平

効率が良く大型化が容易

重量物を風車上部に取り付けなければならないとい(設置・メンテナンス時の操作性の問題)

風車の回転面を常に風の方角に向ける必要あり



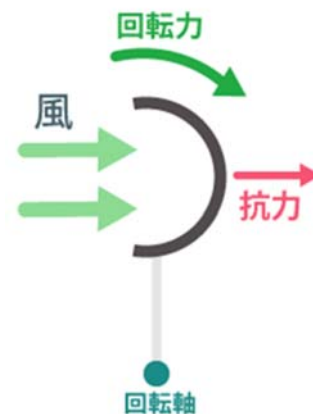
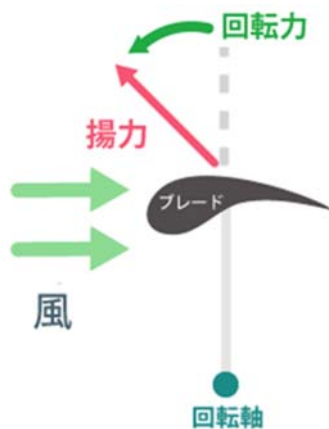
## 垂直軸型

風車の回転軸が地面に対して垂直

重量物は地上に設置できるので、設置・メンテナンス時の扱いが容易

風向きに対する依存性がなし

# 揚力型と抗力型



## 揚力

気流の進行方向に対して飛行機の翼のような形状が、上下の圧力差により受ける垂直方向の力

## 抗力

気流の進行方向の物体に与える要素論