

# エネルギーシステム・要素論

## 第二回 風力発電

平成25年10月11日

### 風力発電

- 枯渴がない無尽蔵の純国産エネルギー
- CO<sub>2</sub>を排出しないクリーンな発電
- 風力の電力変換効率約40%  
→ベッツの限界
- 設置コストの低下, 経済性の向上
- 地域のシンボル・町おこし

# 風力発電の導入量

- 2011年末 239GW(約20万台)
  - 中63GW,米47GW,独29GW,...,日2.5GW(13位)
- 新規導入量 全世界38GW/年(約2万台)
  - 成長率19%, 年商5兆円
  - 中19GW,米6GW,...,日0.17GW(21位)
- 電力に占める風力発電比率 世界3%
  - EU6%,デンマーク,ポルトガル,スペイン,アイルランドは15%以上,日0.5%,EU・米・中の目標は20%

# ベルヌーイの定理

- 完全流体・定常流の流管(流線)の任意の場所で次式が成り立つ。

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g z + p = const$$

ただし,流速 $v$ [m/s],重力加速度 $g$ [m/s<sup>2</sup>],高さ $z$ [m],圧力 $p$ [Pa],流体の密度 $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]

- 完全流体  
粘性のない理想化された流体。ずれによる摩擦が生じない。
- 流線・流管  
流体中の各位置において流れの方向を向くようにひいた曲線。流線の束を流管。
- 定常流  
流線, 圧力, 密度が時間によって変化しない流れ。

# 風力(パワー)

- 風が持つ単位時間当たりの運動エネルギー

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

- 風速  $V$  [m/s],  $1\text{m}^2$  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]

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

面積に比例  
風速の3乗に比例

- 仮定: 風車の後ろでは風速  $0\text{m/s}$  ブラックホールみたいなものありえへん
- 受風面積  $A$  [m<sup>2</sup>]

$$Mgh = Kgm s^{-2} m = Kgm^2 s^{-2}$$

$$0.5mv^2 = Kgm^2 s^{-2}$$

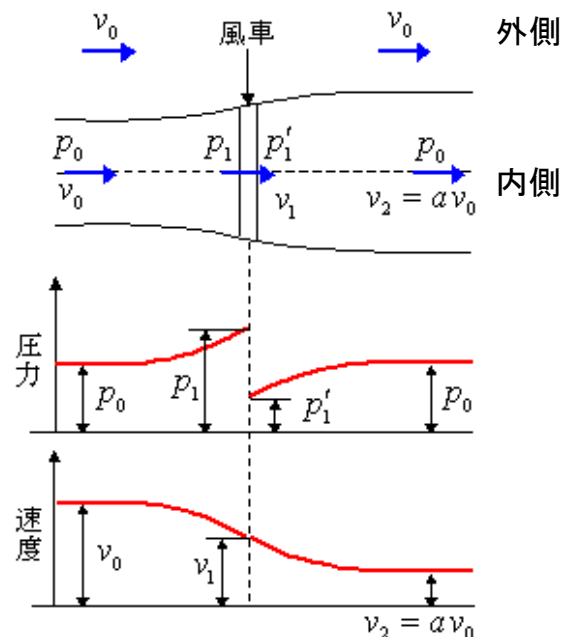
## 風車におけるベルヌーイの定理

- 風車の前後に対するベルヌーイの定理

$$\begin{cases} \text{前} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_0^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 \\ \text{後} & p_0 + \frac{\rho}{2} v_2^2 = p_1' + \frac{\rho}{2} v_1'^2 \end{cases}$$

- 風車前後の圧力差と速度の関係

$$\text{前-後} \quad p_1 - p_1' = \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2)$$



# 風車に作用する力

- 圧力差により風車の受ける力F[N]

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

- 運動量の時間変化より風車の受ける力F[N]

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

- 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[J/s]

$$L = F v_1 = \pi R^2 (p_1 - p_1') v_1 = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$$

$$= \frac{\pi R^2 \rho (v_0 - v_2) (v_0 + v_2)^2}{4} [J/s]$$

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

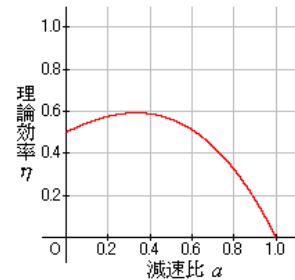
$$= \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right) \left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho v_0^3 (1 - a)(1 + a)^2}{4} [J/s]$$

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

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

- 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

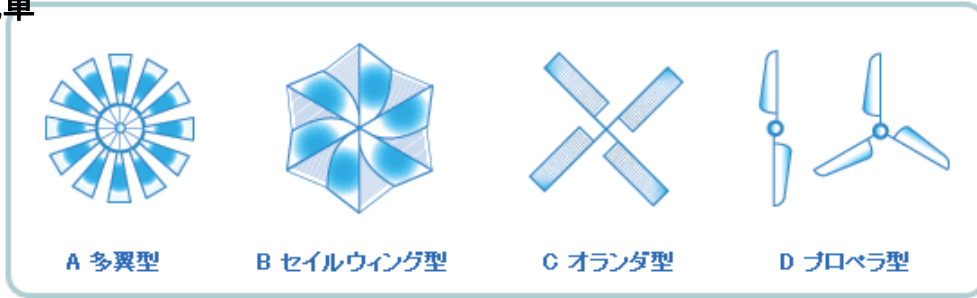
$$\eta_{\max} = \frac{(1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{2} = \frac{\frac{2}{3}(\frac{4}{3})^2}{2} = \frac{16}{27} = 0.593$$

- 風車の最大出力L<sub>max</sub> 増速ギヤ, 発電機損失  
で30%ぐらいになる

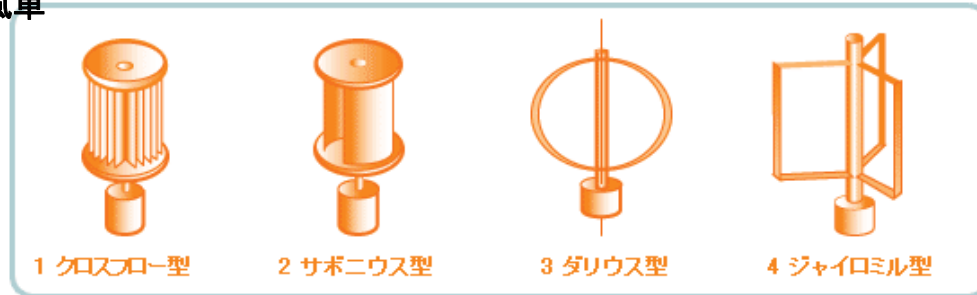
$$L_{\max} = \frac{\pi R^2 \rho V^3 (1-\frac{1}{3})(1+\frac{1}{3})^2}{4} = \frac{8}{27} \pi R^2 \rho V^3 [J/s]$$

# 風力発電

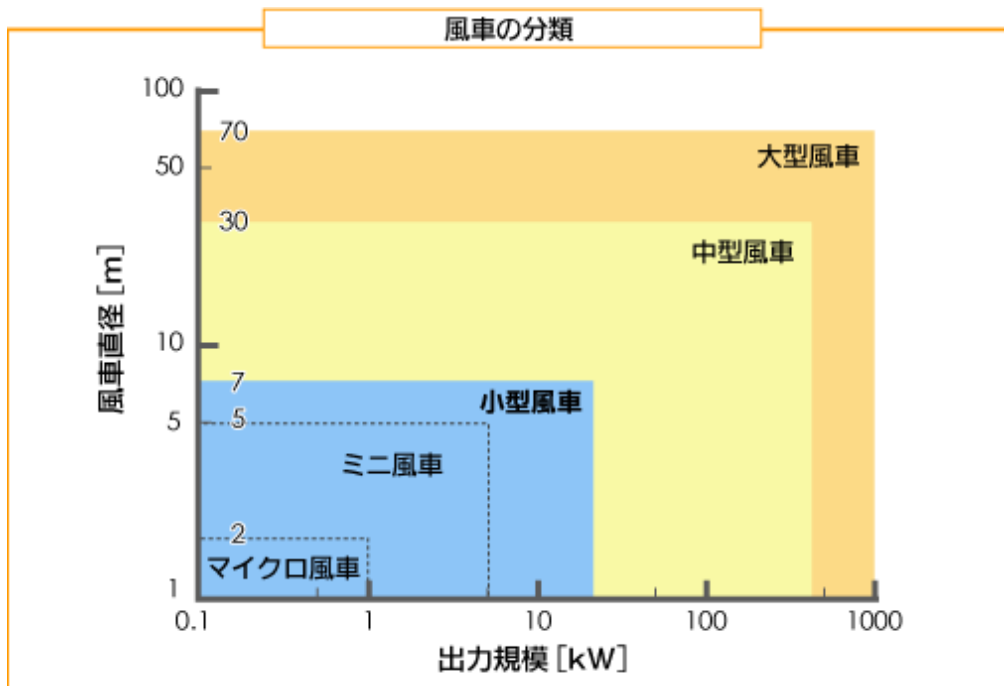
## 水平軸風車



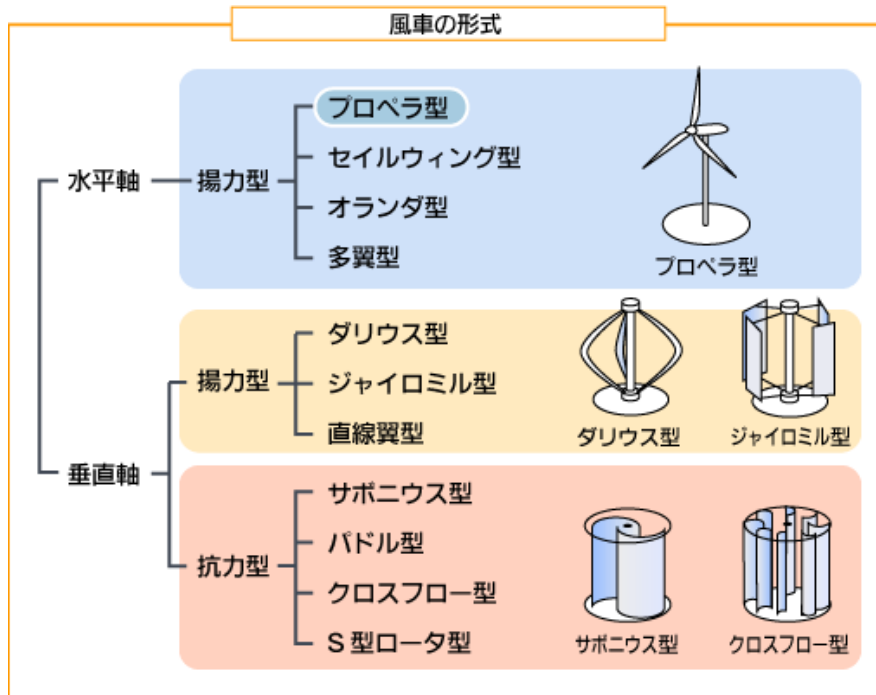
## 垂直軸風車



# 風車の分類



# 風車の形式

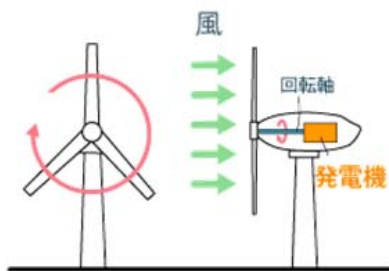


2013/10/11

エネルギーシステム・要素論  
NEDO HPより

13

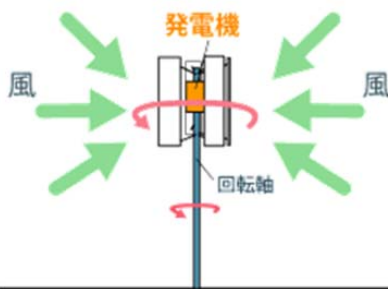
## 水平軸型と垂直軸型



### 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向に向ける必要あり



### 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

2013/10/11

エネルギーシステム・要素論

14

# 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当たる力

# 風車の大型化

- 規模の経済性 → 風車の大型化
  - 陸上用 定格2~3MW(直径100m)
  - 洋上風車 定格3~6MW(120m)欧,  
7~10MW(160m)も開発中
    - 建設コスト低減



# 風車の大型化

- 大型化の制約要因
  - 出力はローター径の2乗
  - 重量・機器コスト・荷重はローター径の3乗
  - 風切り音の音圧レベルは相対速度の5乗
    - 翼先端速度は80～90m/sに制約
    - 大型化すると回転数を下げる必要あり
      - 発電機出力=回転数×トルク
      - 主軸トルク増加
      - 歯車式増速機の増速比率の増加
        - » 増速機+DFIGの強度限界→ギヤレス, 油圧ドライブ

2013/10/11

エネルギーシステム・要素論

17

# 風力発電機

- 出力変動対策
  - ピッチ制御
  - 可変速運転
    - 増速機+DFIG+巻線用インバータ 新設の79%
- 電圧変動対策
  - 電力変換器による無効電力制御
  - 同期発電機と定格容量の電力変換器

2013/10/11

エネルギーシステム・要素論

18

# ギアレス同期風車

- 構造簡単・信頼性・保守性向上
- 低速回転 → 発電機の大直径(2MWクラスで $\Phi 6\sim 8\text{m}$ , 数十t), 多極化(数十極)
  - 増速機付(4極, 1500~1800rpm,  $\Phi 1\text{m}$ , 数t)
  - 永久磁石同期発電機
    - ナセル重量は増速機付DFIGと同程度
    - ブラシレス化による保守性の向上
    - 回転数上昇に伴う発電電圧の上昇による過電圧に注意する必要あり