エネルギーシステム･要素論
第二回　風力発電

平成27年12月1日

風力発電

- 枯渇がない無尽蔵の純国産エネルギー
- CO2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^2],高さz[m],圧力p[Pa],流体の密度ρ[kg/m^3]

- 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

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

  – 風速V[m/s],1m²を一秒に通過する空気の質量m[kg], 空気の密度ρ[kg/m³],m=ρV

- プロペラ半径R[m]の理想風車の出力W[W]

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

面積に比例
風速の3乗に比例

  – 仮定:風車の後ろでは風速0m/s

ブラックホールみたいなもの
ありえへん

  – 受風面積A[m²]

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

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

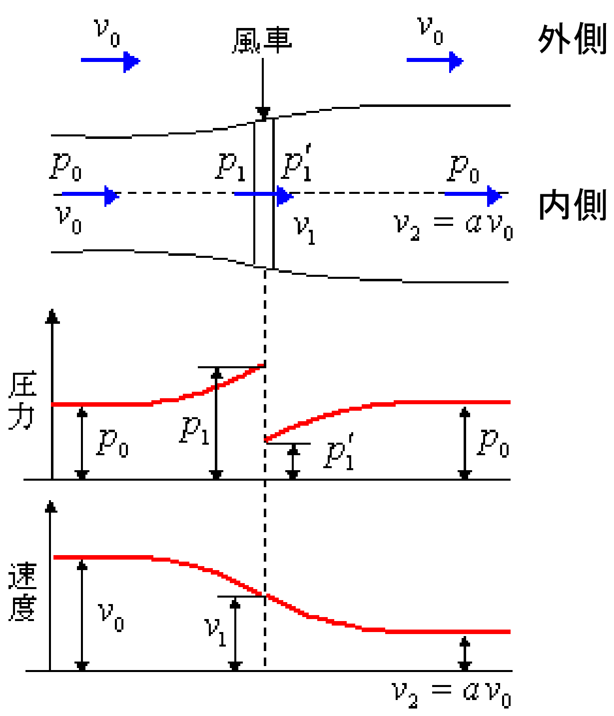
風車におけるベルヌーイの定理

- 風車の前後に対する ベルヌーイの定理

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

- 風車前後の圧力差と 速度の関係

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



風車に作用する力

- 圧力差により風車の受ける力F[N]

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

- 運動量の時間変化より風車の受ける力F'[N]

$$F' = \pi R^2 \rho v_1 \Delta t \frac{v_0 - v_2}{\Delta t} = \pi R^2 \rho v_1 \left(v_0 - v_2\right)[N]$$

- 両者は等しい

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

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

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

風車の出力

- 理想風車の出力L[J/s]

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

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

減速比a(0<a<1)　$a = \frac{v_2}{v_0}$

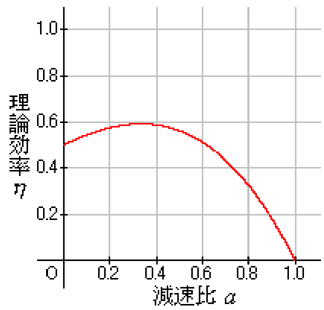
$$= \frac{\pi R^2 \rho {v_0}^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right)\left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho {v_0}^3 \left(1 - a\right)\left(1 + a\right)^2}{4}[J/s]$$

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

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



ベッツの限界

- 風車の最大効率(出力)となる条件

$$\frac{d}{da}\eta = \frac{d}{da}\frac{(1-a)(1+a)^2}{2} = \frac{1}{2}\frac{d}{da}\left[(1-a)(1+a)^2\right]$$

$$= \frac{1}{2}\left[-(1+a)^2 + (1-a)2(1+a)\right] = \frac{1}{2}(1+a)\left[-(1+a)+(1-a)2\right]$$

$$= \frac{1}{2}(1+a)\left[1-3a\right] = 0 \longrightarrow a = \frac{1}{3}$$

  - 理論最大効率(ベッツの限界)

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

実際には40%ぐらいが限度
空気抵抗，粘性による損失

  - 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

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