

エネルギーシステム・要素論

第二回 風力発電

平成26年11月25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。

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

ただし,流速 v [m/s],重力加速度 g [m/s²],高さ z [m],圧力 p [Pa],
流体の密度 ρ [kg/m³]

- 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

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

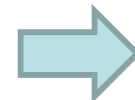
- 風速 V [m/s], $1m^2$ を一秒に通過する空気の質量 m [kg],
空気の密度 ρ [kg/m³], $m = \rho V$

- プロペラ半径 R [m]の理想風車の出力 W [W]

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

- 仮定: 風車の後ろでは風速 $0m/s$
- 受風面積 A [m²]

面積に比例
風速の3乗に比例



ブラックホールみたいなもの
ありえへん

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

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

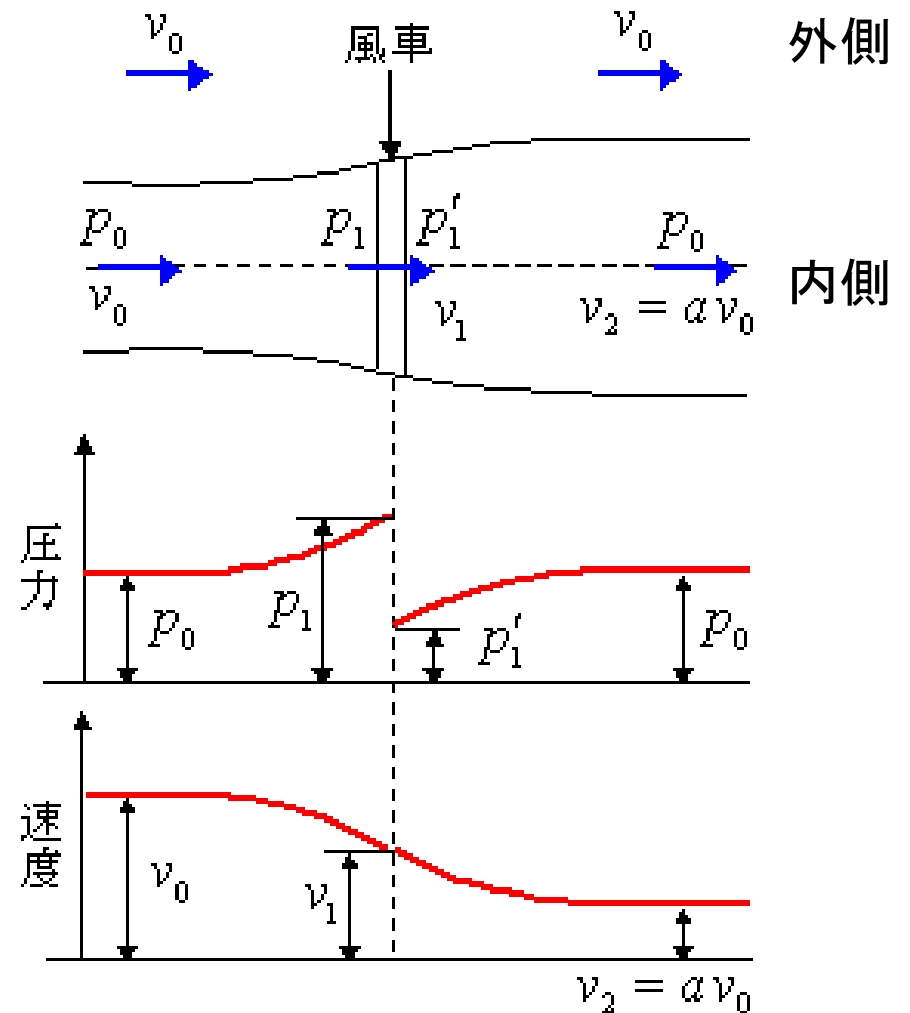
風車におけるベルヌーイの定理

- 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

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

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

- 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]

$$L = Fv_1 = \pi R^2 (p_1 - p_1') v_1 = \pi R^2 \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_2^2) \frac{1}{2} (v_0 + v_2)$$

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

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

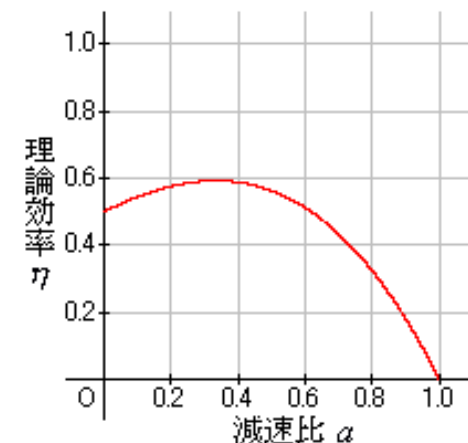
風車の効率

- 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 η

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



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

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

風車の分類

