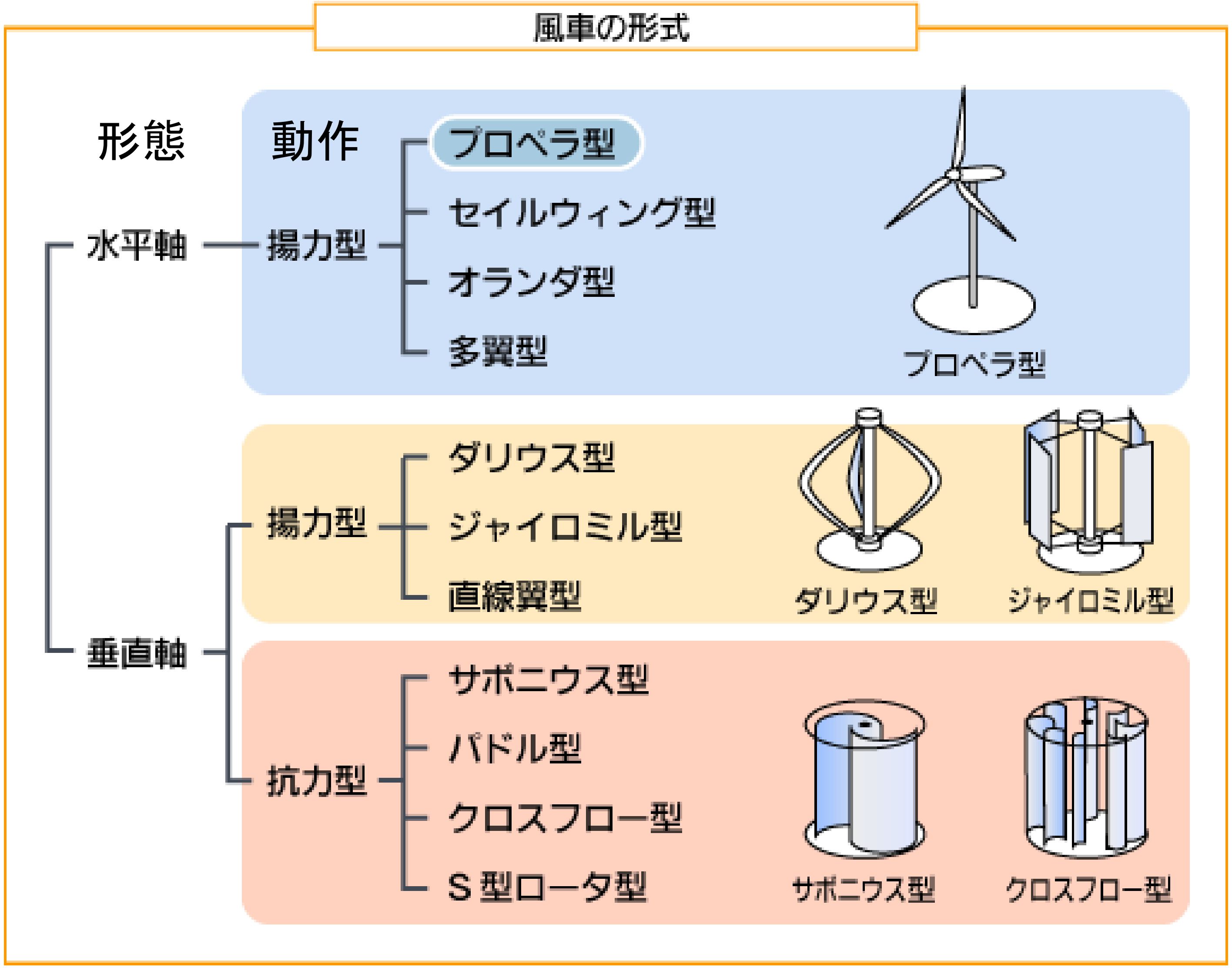
エネルギーシステム・要素論
第二回　風力発電

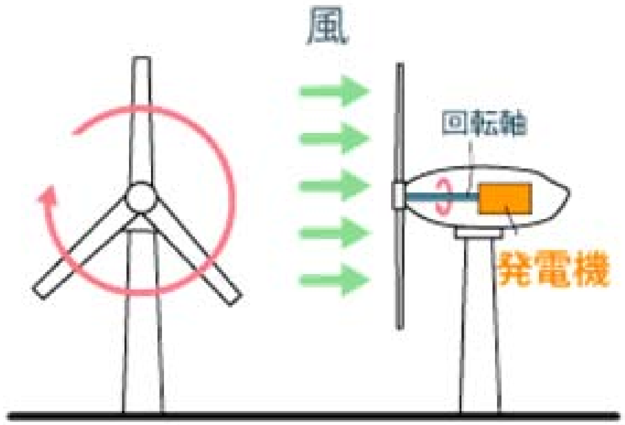
平成29年6月9日

風車の形式

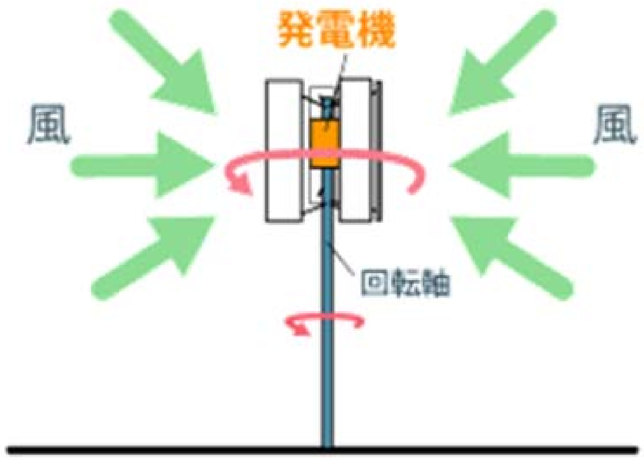


NEDO HPより

水平軸型と垂直軸型

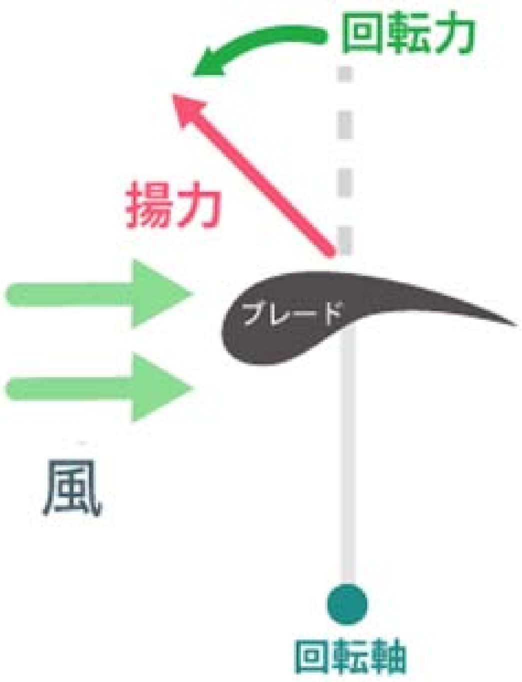


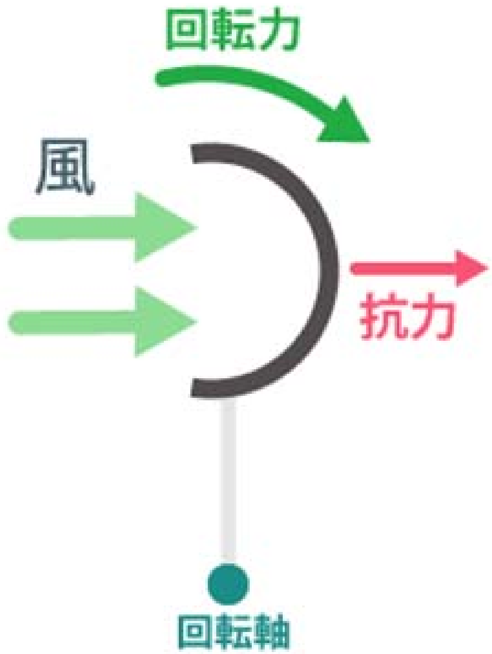
水平軸型
回転軸が地面に対して水平
効率が良く大型化が容易
重量物を風車上部に取り付けなければならないとい(設置・メンテナンス時の操作性の問題)
風車の回転面を常に風の方向に向ける必要あり



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

揚力型と抗力型

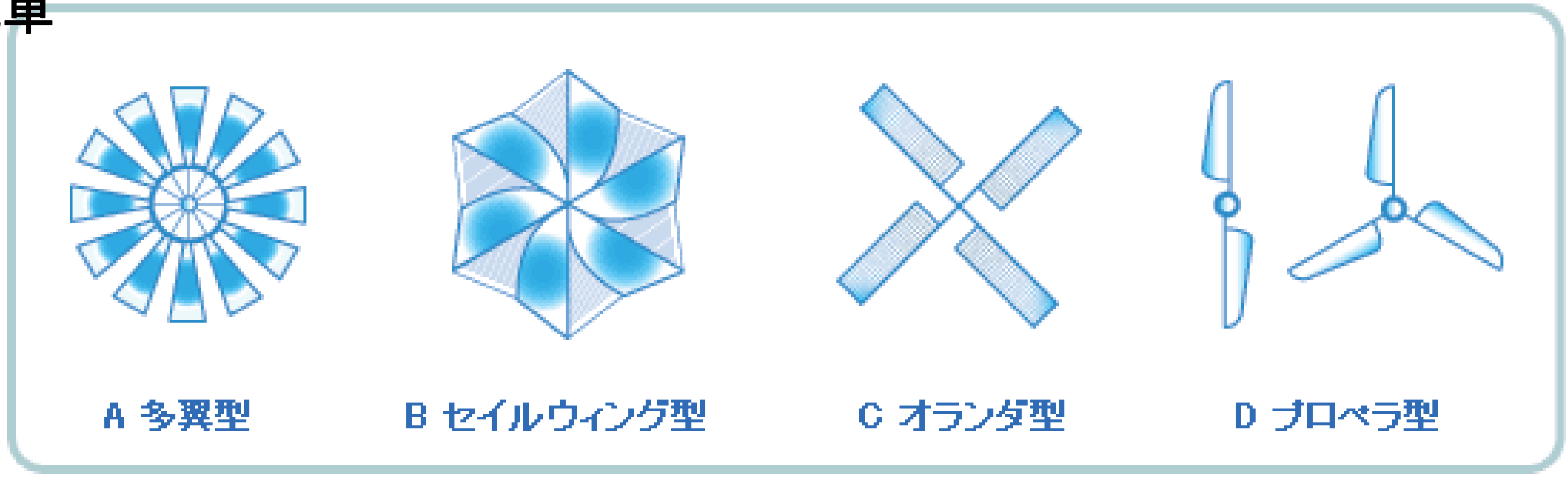




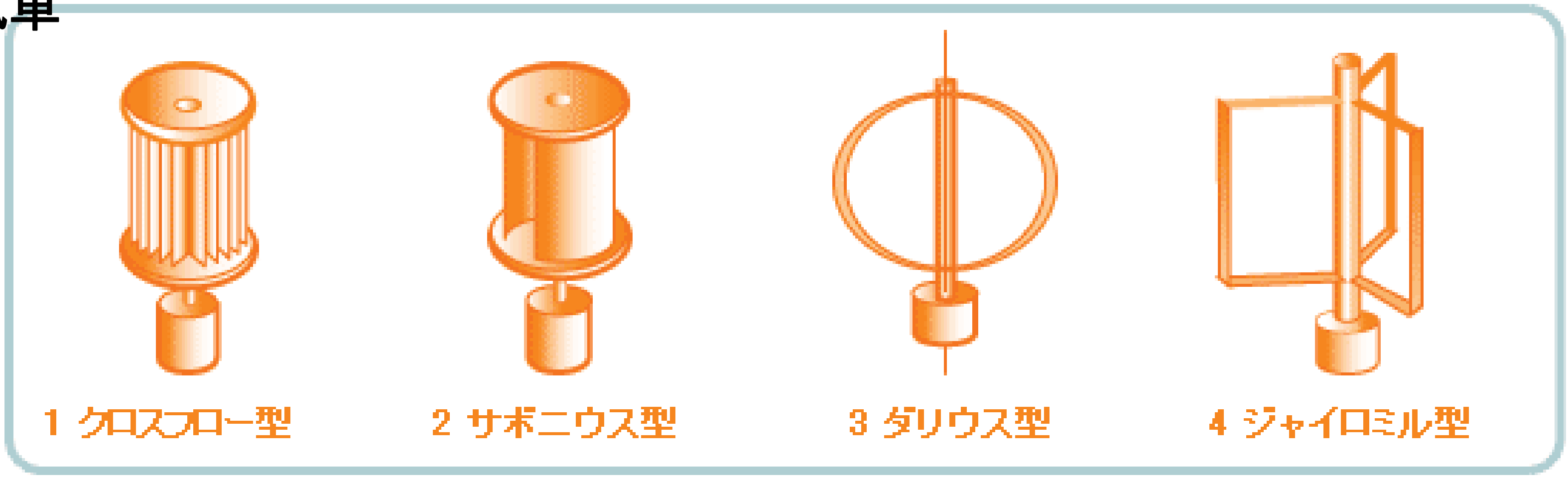
揚力
気流の進行方向に対して飛行機の翼のような形状が、
上下の圧力差により受ける垂直方向の力
抗力
気流の進行方向の物体に当たる力

風力発電

水平軸風車



垂直軸風車



NEFのHPより

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。
  - 定常流
    流線，圧力，密度が時間によって変化しない流れ。
  - 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。

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],1m^{2}を一秒に通過する空気の質量m[kg], 空気の密度ρ[kg/m^3],m=ρV
- プロペラ半径R[m]の理想風車の出力W[W]

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

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[m^2]

Mgh=Kgms^{-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

前

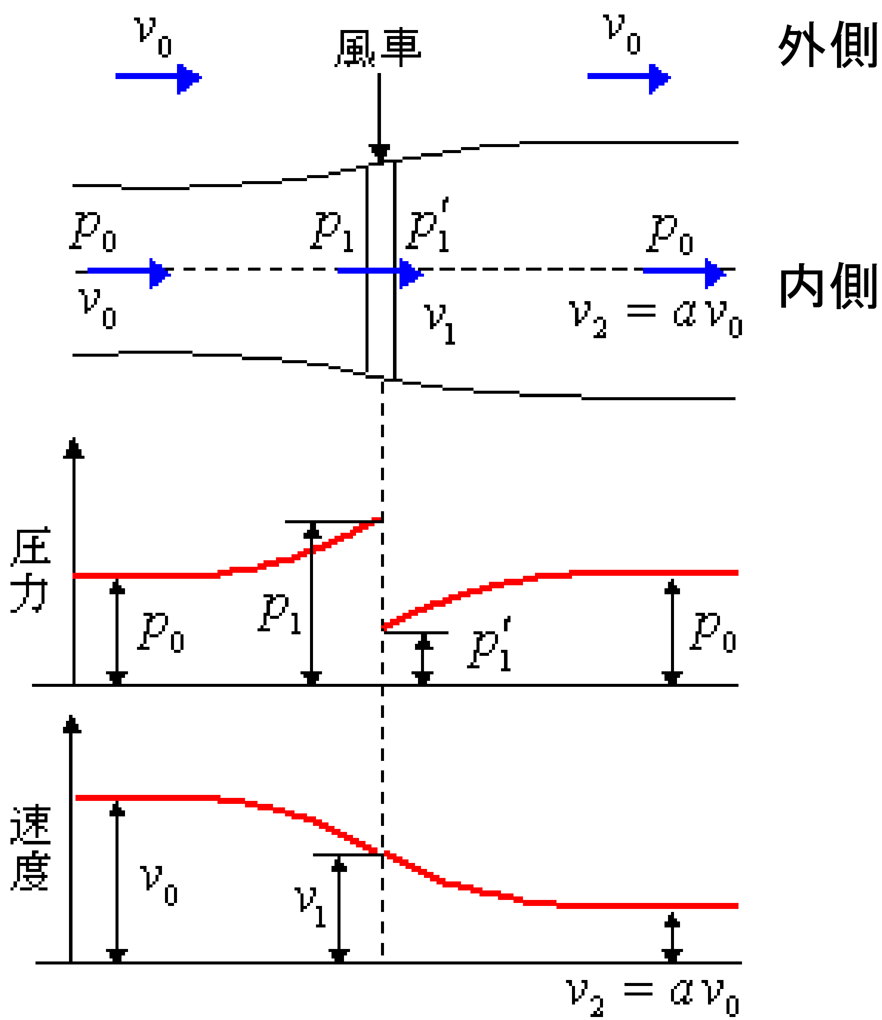
$$p_0 + \frac{\rho}{2} {v_0}^2 = p_1 + \frac{\rho}{2} {v_1}^2$$

後

$$p_0 + \frac{\rho}{2} {v_2}^2 = p_1' + \frac{\rho}{2} {v_1}^2$$

- 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]

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

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

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

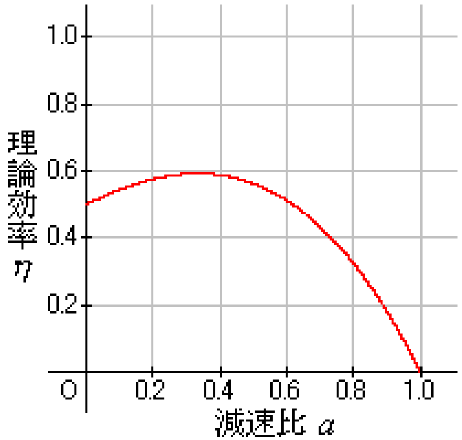
風車の効率

- 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

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

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

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

- 理論最大効率(ベッツの限界)

実際には40%ぐらいが限度
空気抵抗，粘性による損失

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

- 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

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