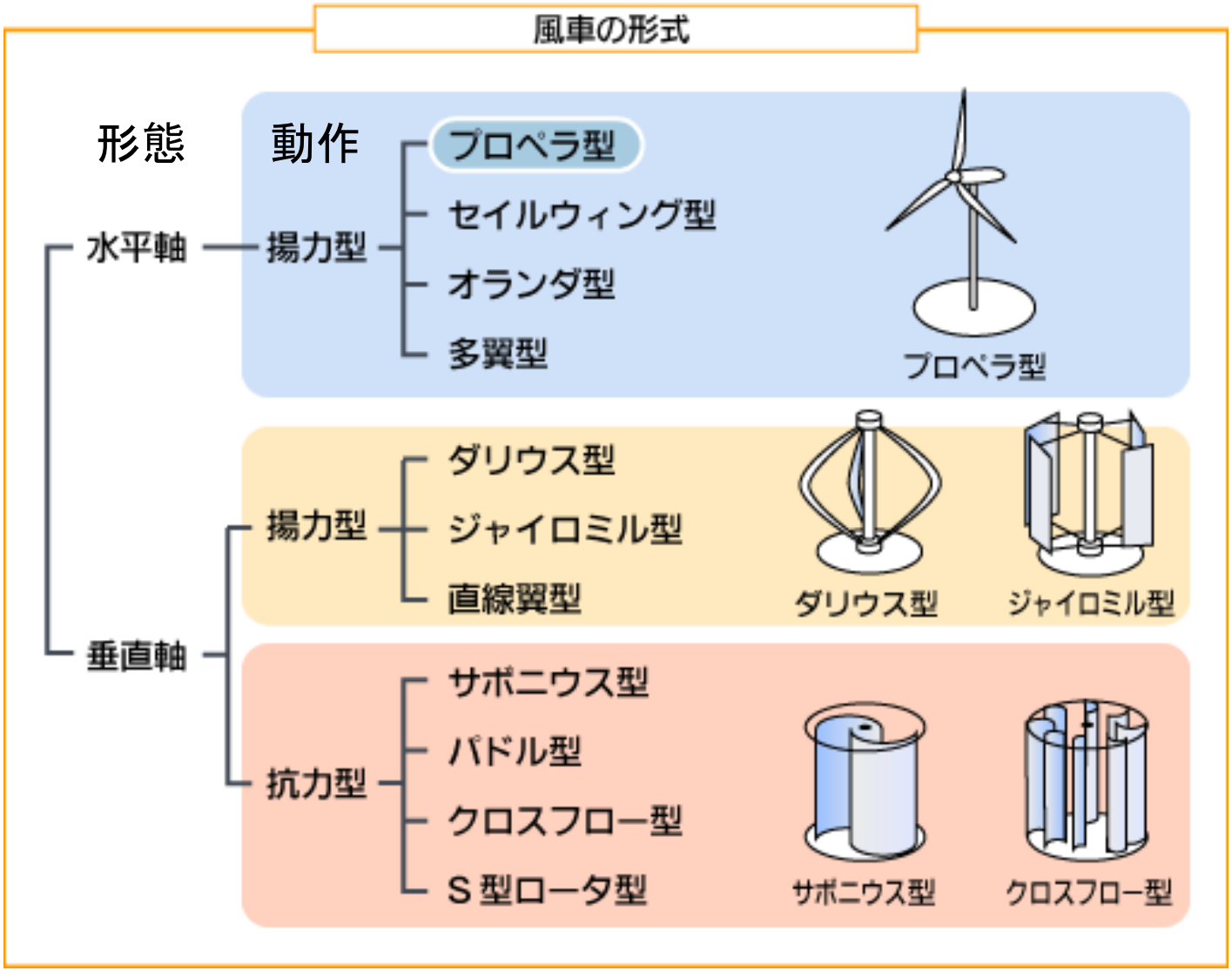
エネルギーシステム・要素論
第三回　風力発電

2026年6月12日

風車の形式

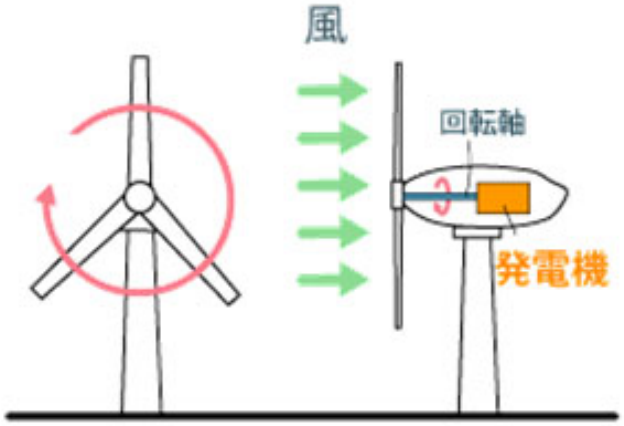

風車の形式
形態
動作
水平軸
揚力型
プロペラ型
セイルウィング型
オランダ型
多翼型
プロペラ型
垂直軸
揚力型
ダリウス型
ジャイロミル型
直線翼型
ダリウス型
ジャイロミル型
抗力型
サボニウス型
パドル型
クロスフロー型
S 型ロータ型
サボニウス型
クロスフロー型

揚力型と抗力型

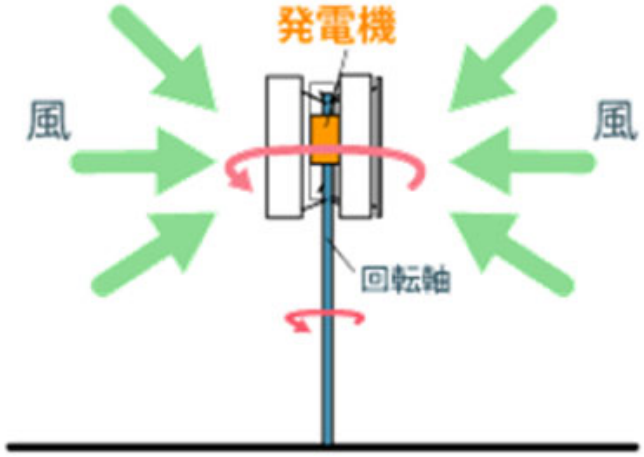


揚力
気流の進行方向に対して飛行機の翼のような形状が、
上下の圧力差により受ける垂直方向の力
抗力
気流の進行方向の物体に当たる力

水平軸型と垂直軸型



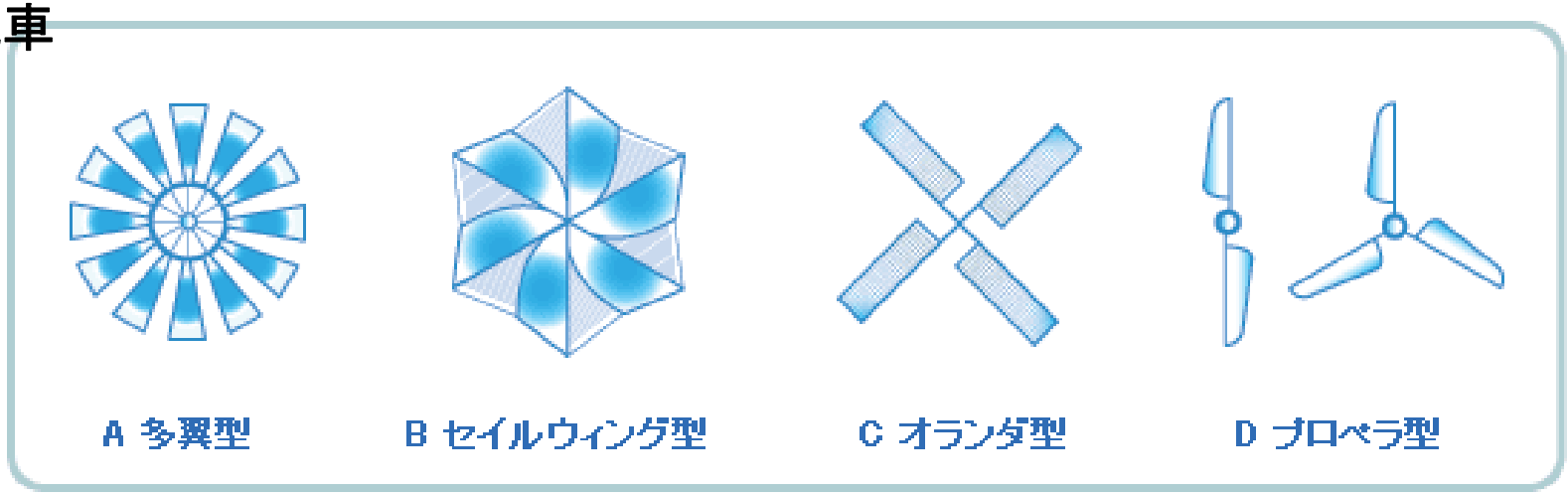
水平軸型
回転軸が地面に対して水平
効率が良く大型化が容易
重量物を風車上部に取り付けなければならないとい(設置・メンテナンス時の操作性の問題)
風車の回転面を常に風の方向に向ける必要あり



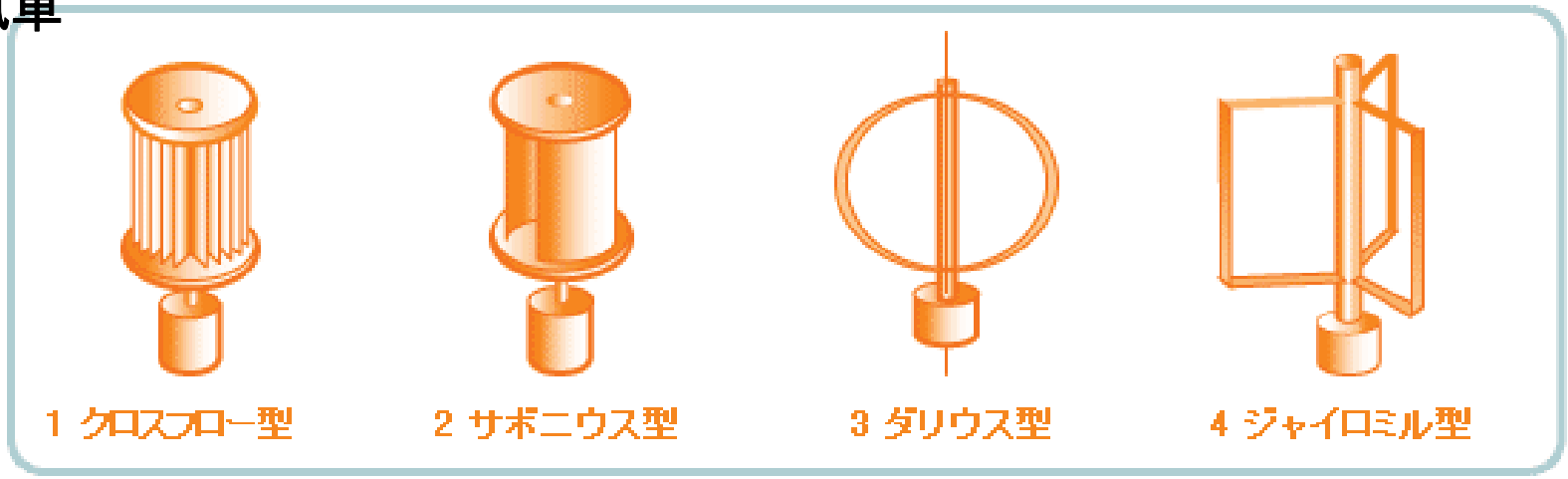
垂直軸型
風車の回転軸が地面に対して垂直
重量物は地上に設置できるので、設置・メンテナンス時の扱いが容易
風向きに対する依存性がなし

風力発電

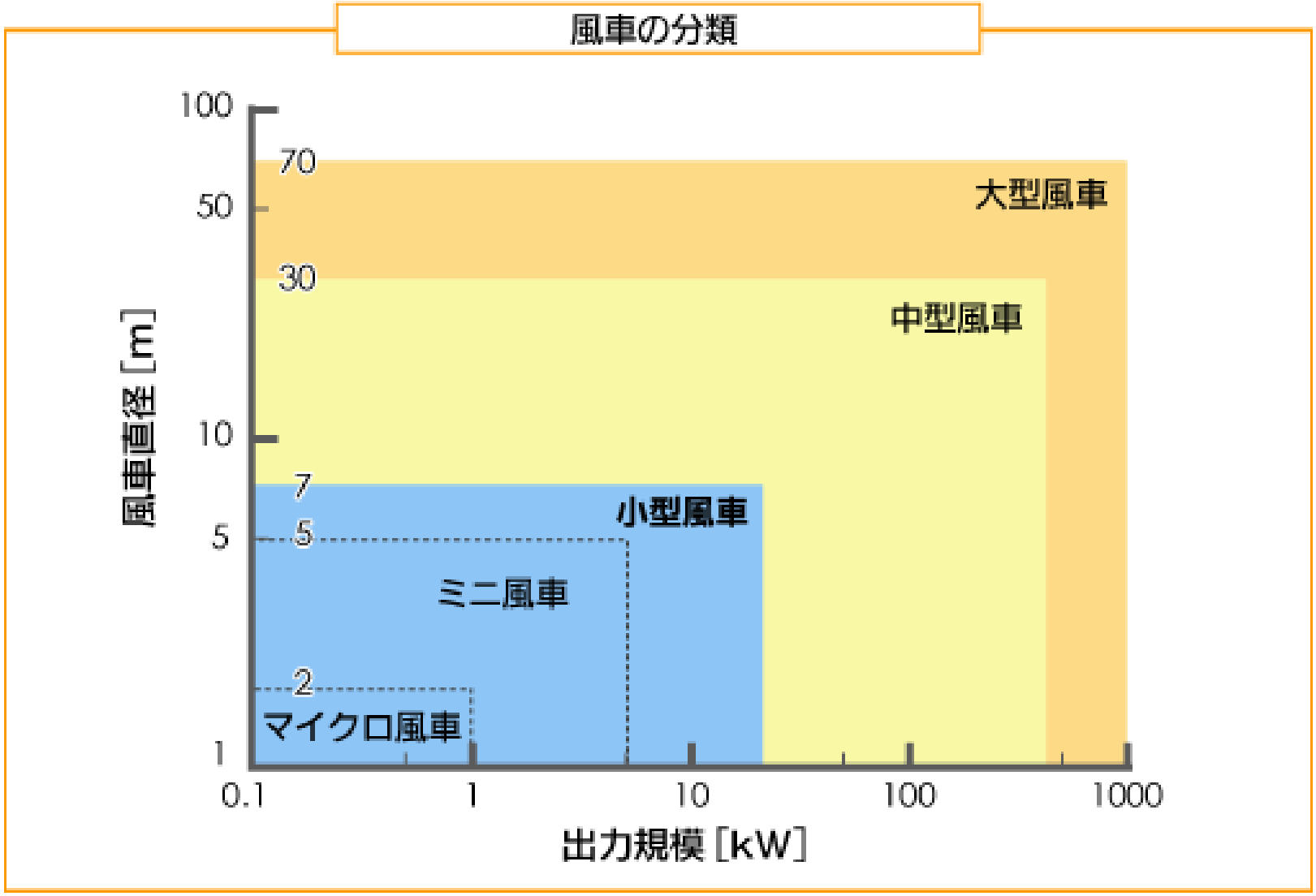
水平軸風車



垂直軸風車



風車の分類



NEDO 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
  - 受風面積A[m^2]

ブラックホールみたいなもの
ありえへん

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

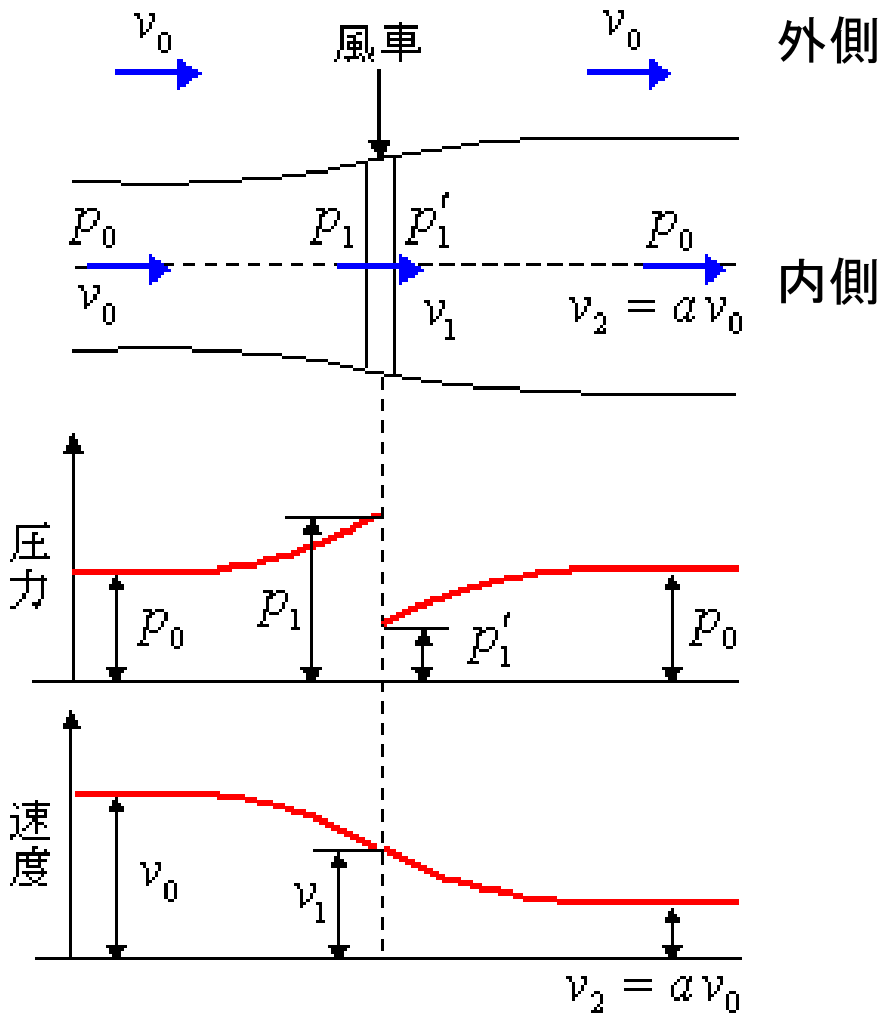
- 風車の前後に対するベルヌーイの定理

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)　$a = \frac{v_2}{v_0}$

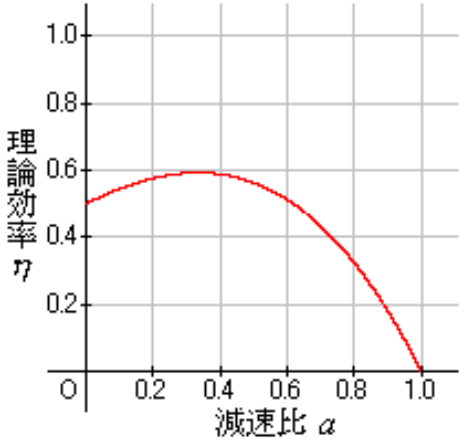
$$= \frac{\pi R^2 \rho {v_0}^3 \left(1 - \frac{v_2}{v_0}\right)\left(1 + \frac{v_2}{v_0}\right)^2}{4} = \frac{\pi R^2 \rho {v_0}^3 (1-a)(1+a)^2}{4}[J/s]$$

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 $$W = \frac{1}{2}\rho A v_0^{\,3} = \frac{1}{2}\pi R^2 \rho v_0^{\,3}\left[J/s\right]$$
- 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

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

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

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

- 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}

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

増速ギヤ，発電機損失
で30%ぐらいになる

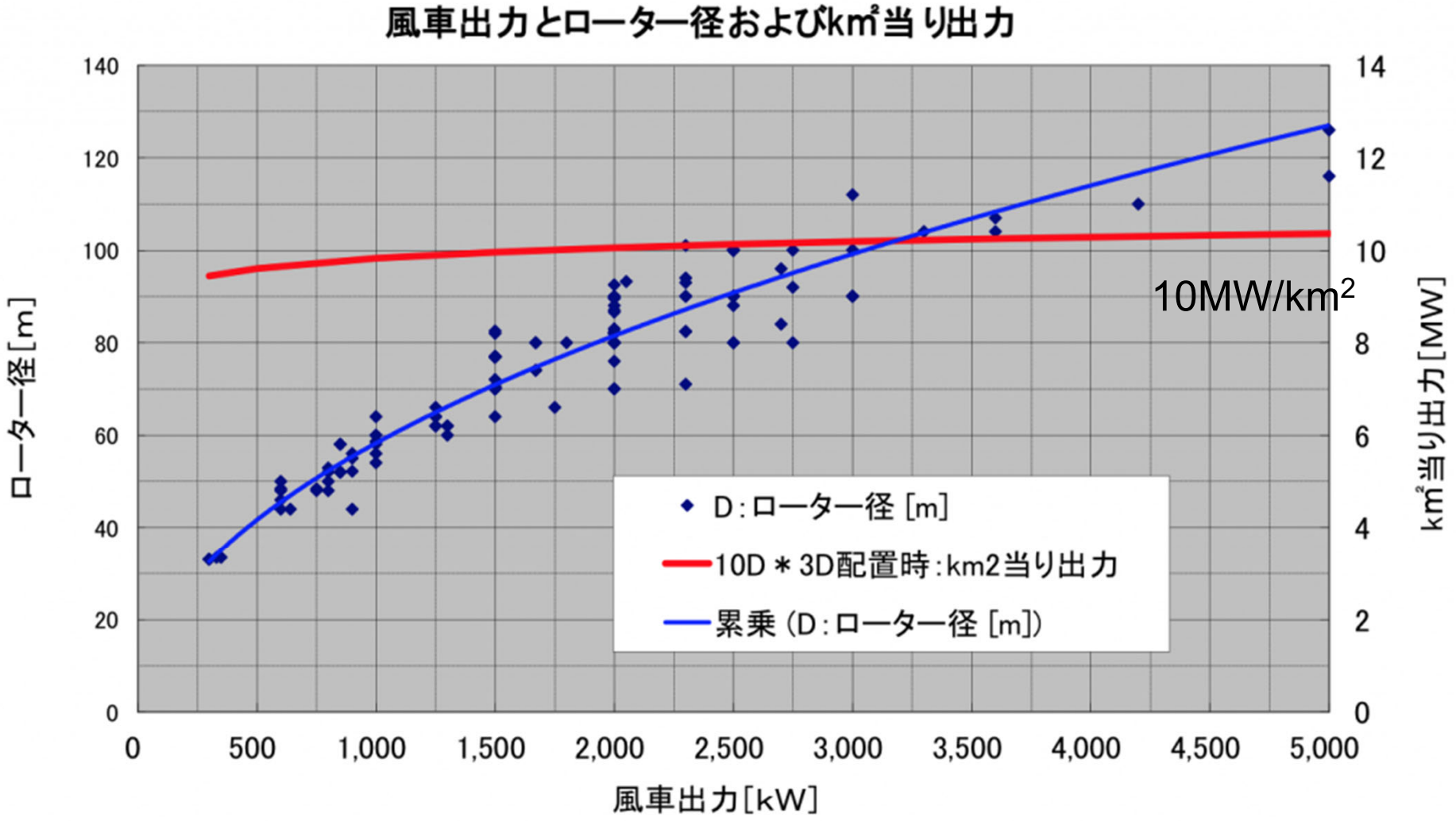
風車建設に必要なエリア面積

- 2,000kW級風車の据付維持に必要な専有面積は100m×100m（1ha）程度
  - 複数台の風車を建設する場合は主風向に対する風車列数により異なる
- 2,000kW機を30基設置する場合の、風車列数とエリヤ面積との関係
  - 30基×1列：約86ha≒7万kW/ ㎢
  - 15基×2列：約360ha≒1.7万kW/ ㎢
  - 10基×3列：約410ha≒1.5万kW/ ㎢

風力発電の面積当たり出力

- 現在は、単機出力2,000kW～3,000kWが主流
- 卓越風向がある場合の複数の風車配置推奨値（10D×3D）
  - NEDO風力発電導入ガイドブック（2008年2月改訂第9版）ローター径（D）
  - 風車の単機出力による差は小さい

風車出力とローター径および10D×3D配置時のkm²当り出力



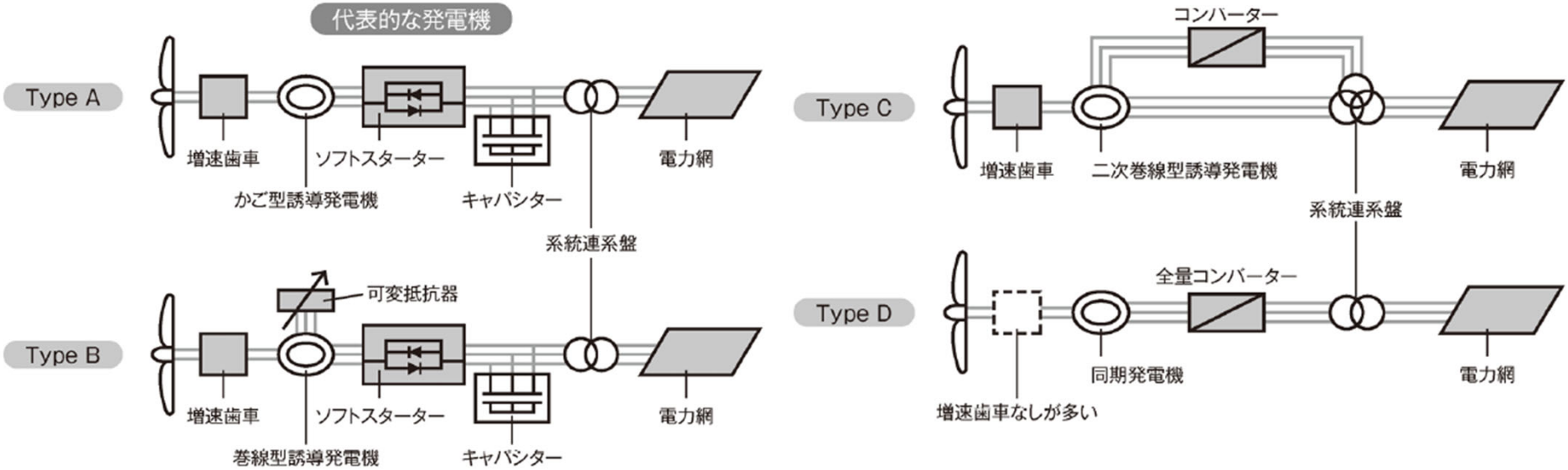
風車の大型化

- 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
  - 福島沖
    - 2013年11月　2MW
    - 2015年12月　7MW

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　(面積)
  - 重量・機器コスト・荷重はローター径の3乗(体積)
  - 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 (径の-1乗)
      - 発電機出力=回転数×トルク
      - 主軸トルク増加(径の3乗)
      - 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

代表的な風力発電方式

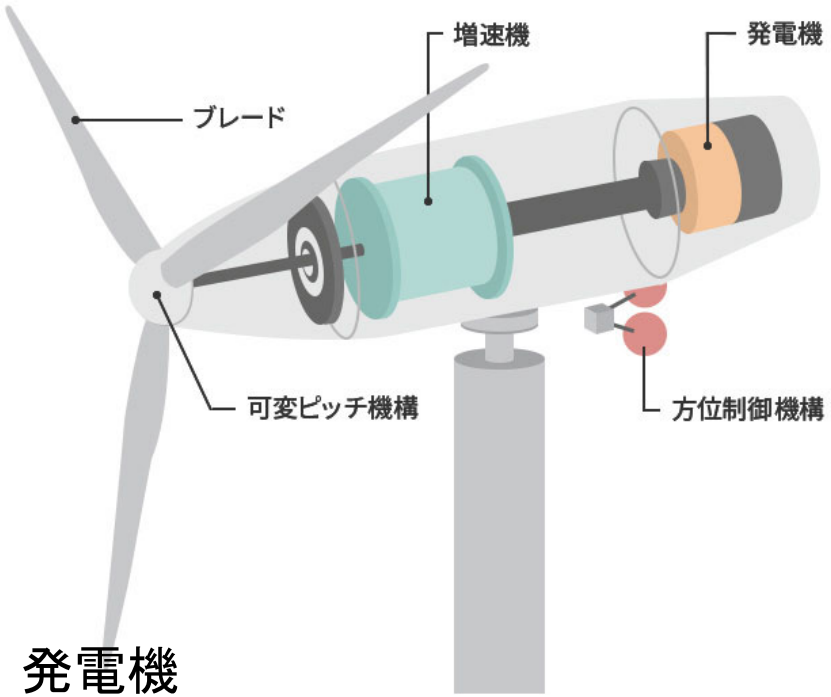


Type	変速システム		発電機	長所	短所
A	低速	増速機方式	かご型誘導発電機	安価，構造がシンプル，頑丈	フリッカ電圧，電力調整不可，抵抗率
B	可変速	増速機方式	巻線型誘導発電機	最適な出力調整可	コンバータサイズ，高価
C	可変速	増速機方式	二次巻線型誘導発電機	最適な出力調整可，コンバータがコンパクト	速度範囲の制限，高価
D	可変速	ダイレクトドライブ方式（ギアレス）が多い	同期発電機	電圧および出力調整可，ギアレス，高効率，頑丈，自己励磁	全量コンバータが必要，発電機構成が複雑，非常に高価

※NEDO再生可能エネルギー技術白書

風力発電機

- 可変ピッチ機構
  - 風の強さに応じて羽根の角度を自動的に変える。
  - 起動や風が弱いときには、風に対する羽根の角度を大きくして風を多く受ける
  - 風が強いときには、羽根の角度を小さくして必要なだけの風を受け、余分な風は受け流すことで、風車の損傷を防ぐ
- ブレード
  - 風車の羽根の部分。ブレードの数が少ないほど回転が速くなる
- 増速機
  - ギアを用いてブレードの回転を発電に必要な回転数まで増幅させる
  - 発電効率の向上

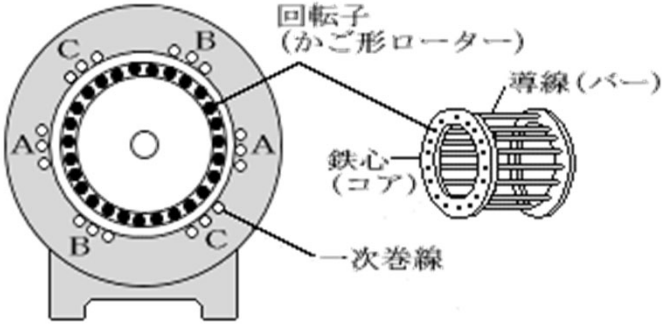


- 発電機
  - 2000kW以上が主流。ヨーロッパでは9500kWクラスの超大型機を開発・運用しています。
- 方位制御機構（ヨー制御）
  - 風を正面で受けるため、風向きに合わせてブレードを旋回させる装置。モーターで作動

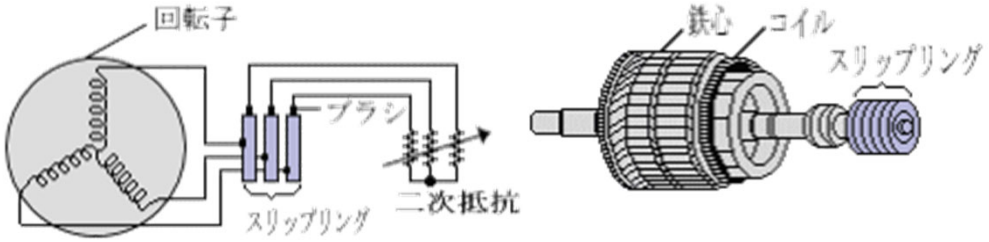
風力発電機

- 出力変動抑制
  - 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

DFIG

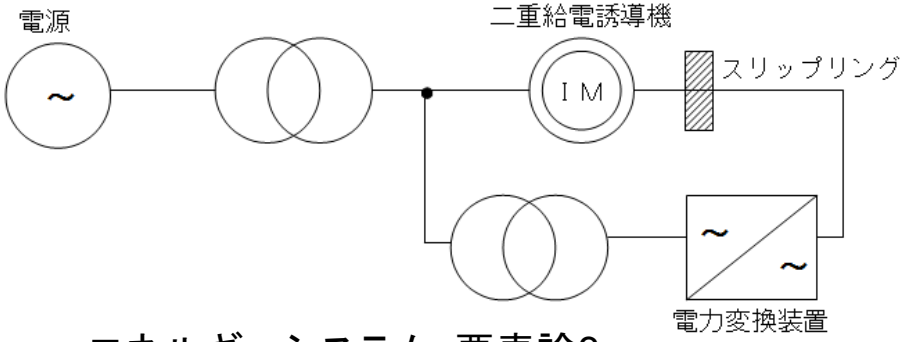


- 誘導電動機の種類
  - かご型
  - 巻線型
    - 回転子巻線はスリップリングを介して外部抵抗(二次抵抗)に接続される
    - 二次抵抗制御は、回転子に流れる電流の大きさを抵抗器によって制御する



DFIG

- 二重給電誘導発電機
  - 回転子の回転磁界の回転速度を制御することで，固定子の同期回転速度と異なる回転運転速度を可能とする
  - コンバータインバータ方式が発電機出力と同等の変換器容量を必要とするのに比べ，変換器容量を小さく抑えることが可能(25%程度)



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Φ6~8m，数十t)，多極化(数十極)
  - 増速機付(4極，1500~1800rpm，Φ1m，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

陸上風車は設置が大変

道路をつくるところから始まる









欧州風車メーカの
陸上大型風車の設置 畑の中



https://youtu.be/XXRAZI-ZCJU?si=5iIsP9xCQSElrdJj

米国の陸上風車

約100mのタービンブレードを持つ風力発電「ギガウィンド」
大型タービンブレードは分解できないので風力発電所に直接発着　※開発中





