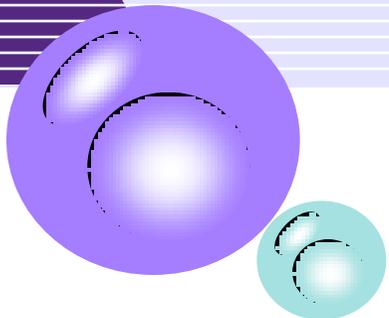


新エネルギー利用(1) 風力発電

山口大学大学院技術経営研究科 福代和宏



講義の概要

- 風車の歴史
- 風力発電の目的
- 風況に関する知識
- 風車設計の基礎
- 風力発電装置の制御

風車と風力発電の歴史

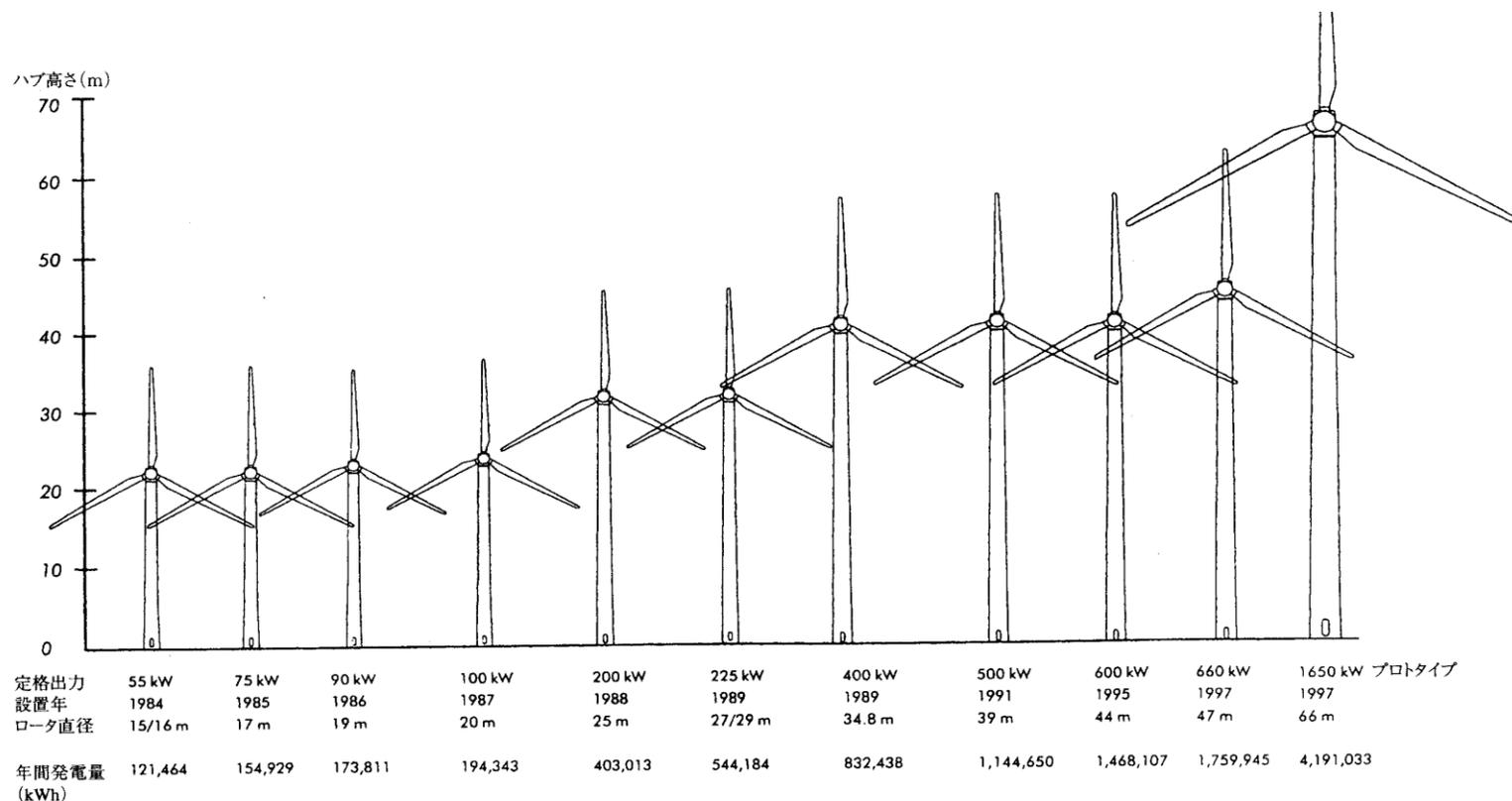
- 風車:ヨーロッパにおける製粉、揚水
 - 1105年フランス、1191年イギリス 文章
 - 1500年ころレオナルド・ダビンチのスケッチ
 - オランダ型風車の普及(10,000台以上)
- 風力発電:電力の利用(19世紀末)
 - ラクール教授(デンマーク)研究所- 1891年
 - ヨーロッパにおける風量発電発展の中心

オランダ型風車



20世紀における風車:大型化

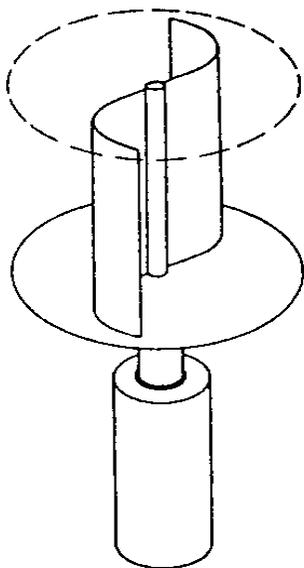
- 100kW(1931年) - ソ連、黒海沿岸
- 1,250kW(1941年) - 米国
-



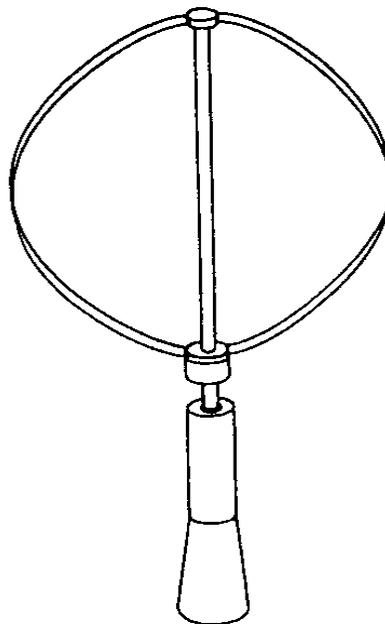
20世紀における風車:新型風車

■ 新しい風車

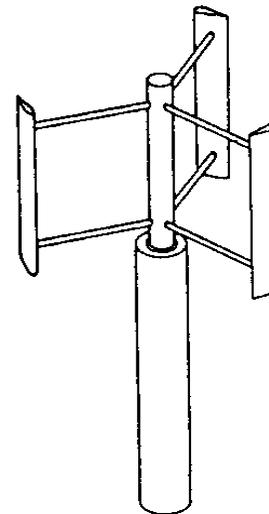
サボニウス形風車



ダリウス形風車



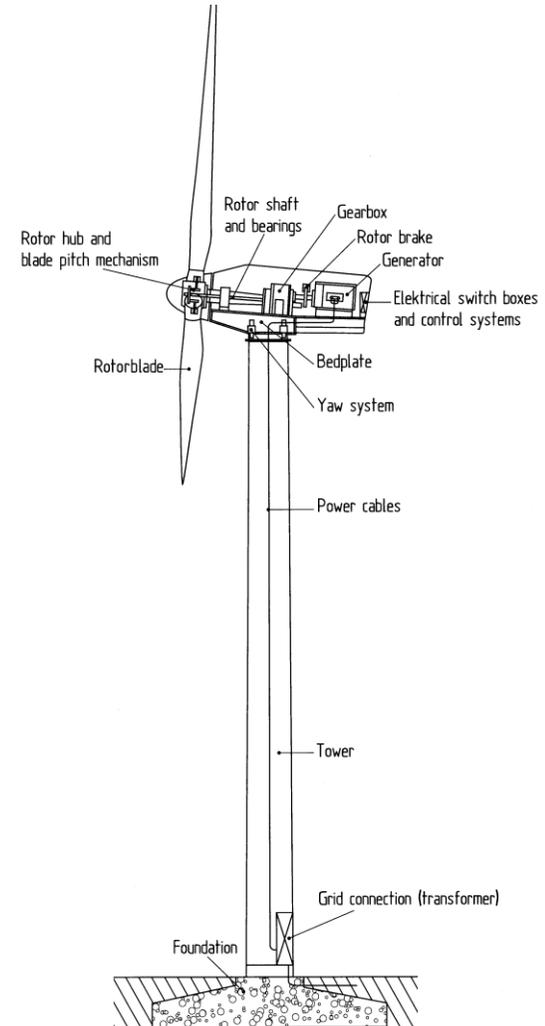
直線翼垂直軸風車
(H-ダリウス形風車)



20世紀における風車:新技術

- 出力制御: 失速制御からピッチ制御へ
- 可変速ロータ: 高効率化
- ダイレクトドライブ: 機構の簡素化
- 理論的性能解析: 理論、数値シミュレーション
- 風車専用翼型: 低レイノルズ数と厚翼
- オフショア風力発電: よりよい風況

最新型風車の構造



風力発電設備の例(富士重工)



設備概要

名称: スバル小型風力発電システム

ロータ直径: 15m

高さ: 22m

低格出力: 40kW

ホームページ:

http://www.fhi.co.jp/news/00_10_12/11_11_1.htm

備考: 2001年度グッドデザイン賞



Good Design Award

新エネルギーにおける風力発電

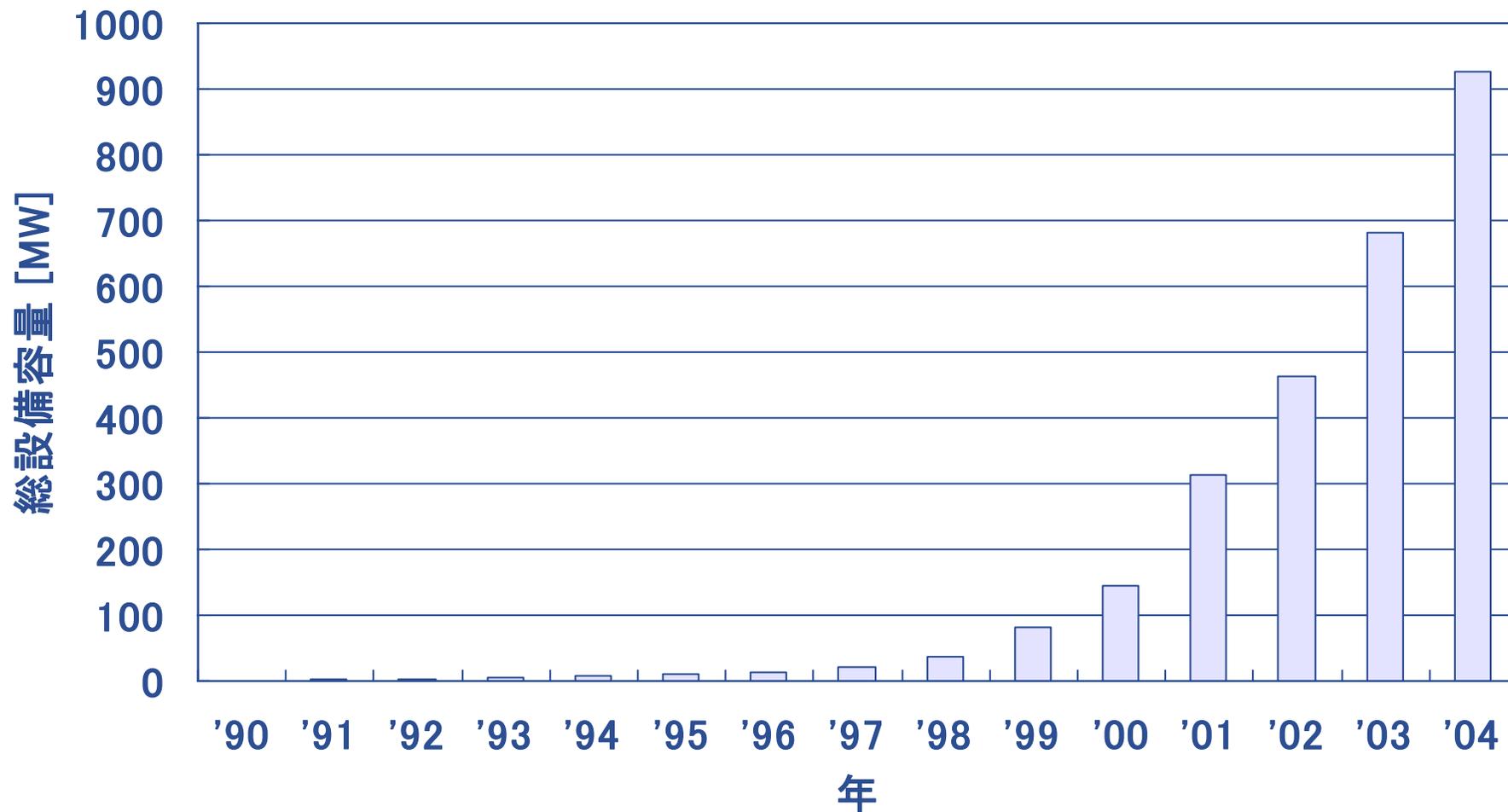
	2001年度	2010年度
■ 太陽光発電	45万	482万
■ 風力発電	31万	300万
■ 廃棄物発電	111万	417万
■ バイオマス発電	7万	33万

(単位: kW)

2002年度末発電総量

日本	風力35万kW	太陽光45万kW
ドイツ	風力1090万kW	太陽光19万kW

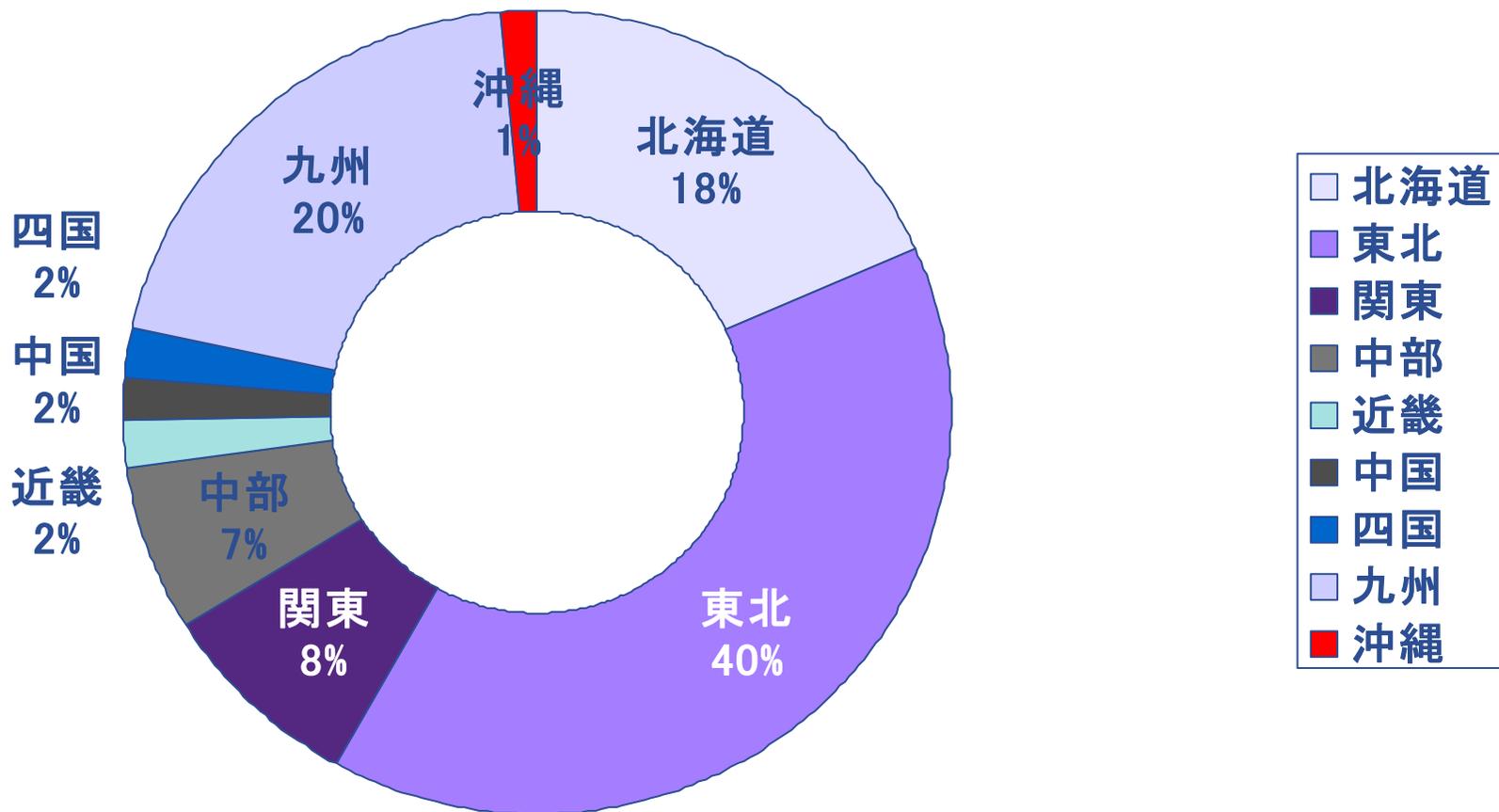
風力発電の導入実績



都道府県別風量発電量

- 2004年度末の設備容量
 - 1位 青森県 約180MW
 - 2位 北海道 約170MW
 - 3位 秋田県 約95MW
 - 4位 鹿児島県 約105MW
 - 5位 岩手県 約70MW
-
- この5県だけで全体の2/3を占める

地方別風量発電量



2004年度 総設備容量 927MW

風力発電の課題

- **精確な風況マップ**
 - 電力見積り、リスクマップ
- **稼働率アップ**
 - 故障とその対策(雷、台風、着氷)
- **支援事業の充実**
 - NEDO、環境省
- **技術開発(効率、安定性、耐久性)**

風況に関する知識：風速分布

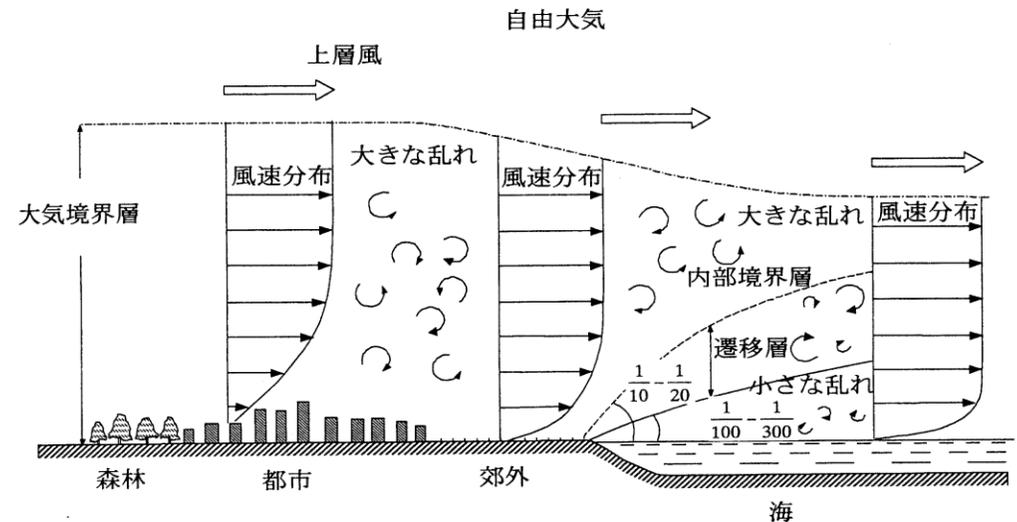
- 地上高さとも風速

$$V_z = V_h \left(z/h \right)^{1/n}$$

V_z : 高さ z における風速

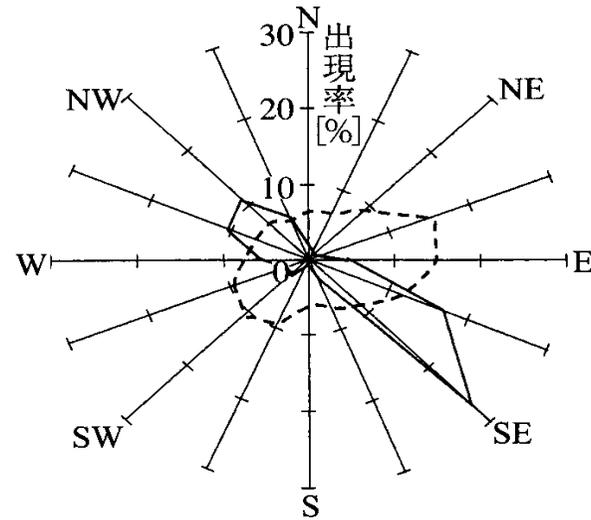
V_h : 高さ h における風速

- 海面 $n=10$
- 平原、草原 $n=7$
- 都市郊外 $n=3$
- 都心部 $n=2$



風況に関する知識：風速風向変動

- 風向変動



- 突風率と乱れ強度

- 平均風速

$$\sigma = \sqrt{(V - \bar{V})^2}$$

変動強さ (RMS値)

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt$$

風況解析: ワイブル分布

■ 風速の頻度分布

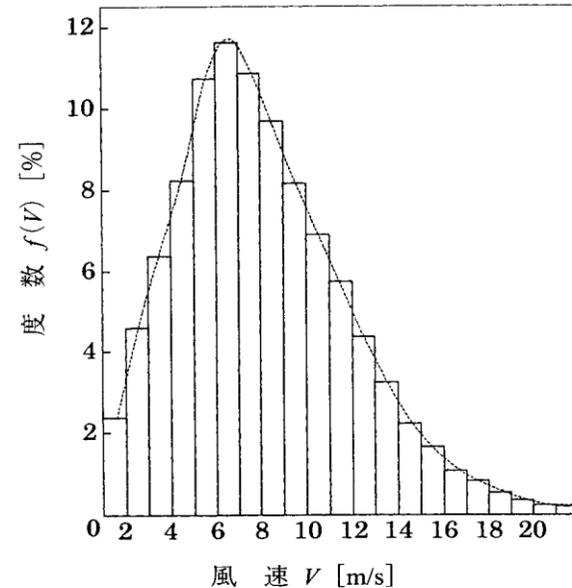
$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right]$$

■ 平均

$$\bar{V} = \int_0^{\infty} V f(V) dV$$

■ 確率

$$P(V \geq V_a) = \exp \left[- \left(\frac{V_a}{c} \right)^k \right]$$



風況解析: レイリー分布

- 形状係数 $k=2$ のワイブル分布: 便利

$$f(V) = \frac{2}{c} \left(\frac{V}{c} \right) \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^2 \right]$$

- 風速 V が V_a 以上になる確率(平均風速から計算可)

$$P(V \geq V_a) = \exp \left[- \frac{\pi}{4} \left(\frac{V_a}{\bar{V}} \right)^2 \right]$$

例題

- K=2、c=5m/sのワイブル分布において風速が12m/sを超える確率

$$P(V \geq 12) = \exp\left[-\left(\frac{12}{5}\right)^2\right] = 0.0032$$

$$0.0032 \times 8760 = 28 \text{時間}$$

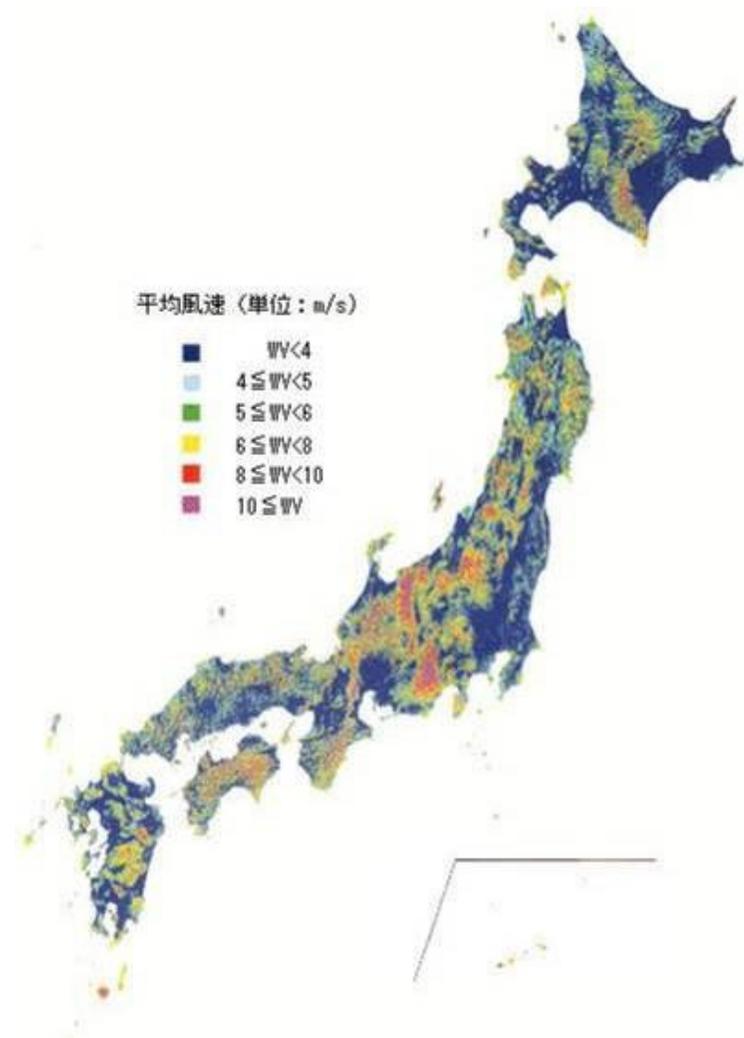
- 平均風速10m/sのサイトで16m/sの強風の確率

$$P(V \geq 16) = \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{16}{10}\right)^2\right] = 0.13$$

$$0.13 \times 8760 = 1139 \text{時間}$$

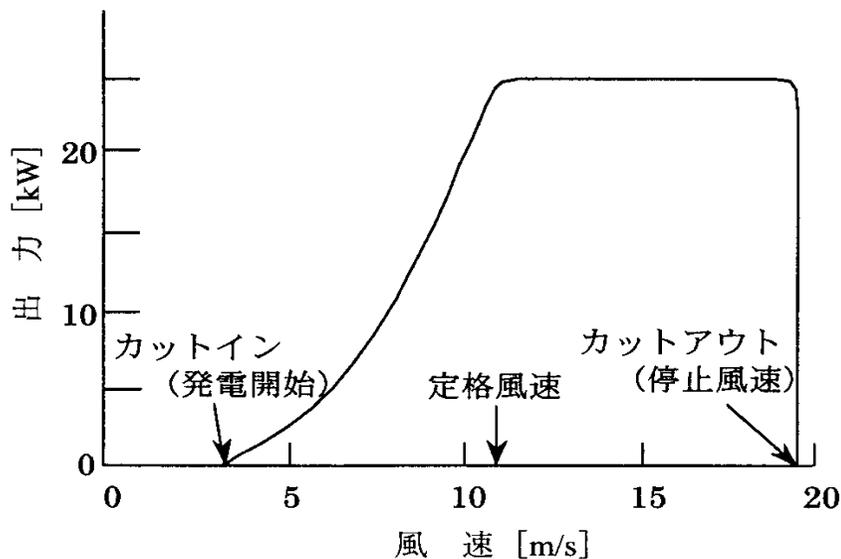
全国風況マップ

- 左はNEDOの作成した日本の風況マップである
- 山頂、岬などにおいて高い平均風速(赤系統の色で示す)を示している。



風力発電システムの評価

- 時間稼働率(%)=年間発電時間h/8760h × 100(%)
- 設備利用率(%)
=年間発電量kWh/定格出力 × 8760h × 100(%)



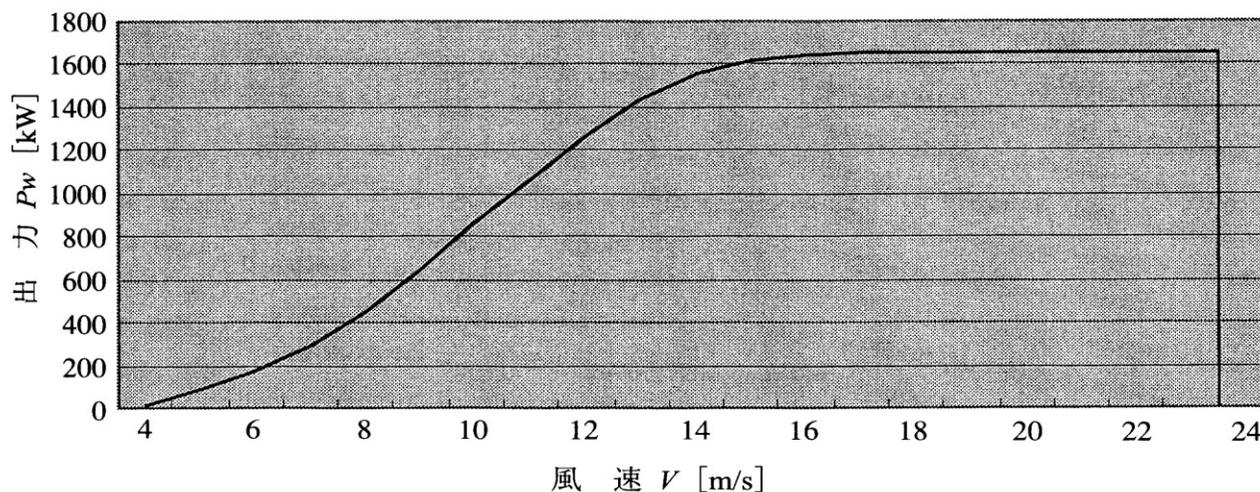
事例:1650kW級、タワー高60m、ロータ径66m

- 平均風速

- $h=20\text{m}$ で $V_h=6\text{m/s}$ から
- 実測があればさらによい

$$V_z = 6(60/20)^{1/7} = 7.02\text{m/s}$$

- 出力曲線 → $P(V)$: 風速 V における発生電力



事例:1650kW級、タワー高60m、ロータ径66m

- 年間発電量

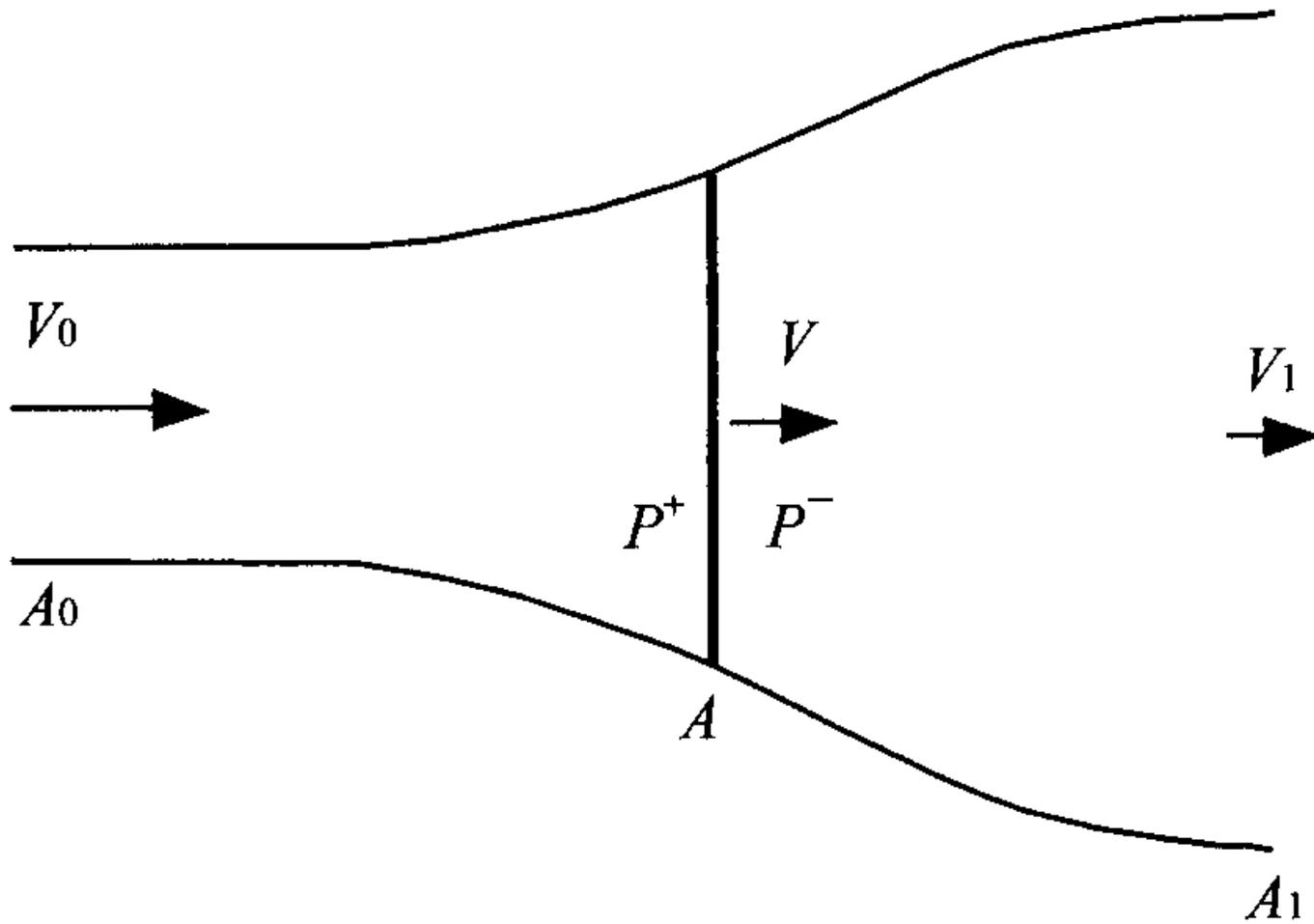
$$P_w = \int_{V_{in}}^{V_{out}} [P(V)f(V) \times 8760] dV (kWh)$$

- カットイン - カットアウト風速範囲の和

- 年間発電量3,729,630kWhの場合

- 年間設備利用率
- $= 3,729,630 / (1,650 \times 8,760) \times 100 = 25.6(\%)$

風車設計の基礎



風車設計の基礎

- 質量流量

$$\dot{m} = \rho A_0 V_0 = \rho A_1 V_1$$

- 運動エネルギー/単位体積

$$E_0 = \frac{1}{2} V_0^2, E_1 = \frac{1}{2} V_1^2$$

- 断面積Aを通過する動力

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (W)$$

- 風車で得る動力=前後の動力差

$$P = \frac{1}{2} \rho A_0 V_0^3 - \frac{1}{2} \rho A_1 V_1^3 = \frac{1}{2} \dot{m} (V_0^2 - V_1^2) \quad (W)$$

風車設計の基礎

- 風車に作用する力(運動量理論)

$$F = \dot{m}(V_0 - V_1) \quad (N)$$

- 動力の関係

$$P = \frac{1}{2} \dot{m}(V_0^2 - V_1^2) = FV = \dot{m}(V_0 - V_1)V \quad (W)$$

- これより

$$V = \frac{1}{2}(V_0 + V_1)$$

- したがって

$$P = \frac{1}{4} \rho A (V_0^2 - V_1^2) (V_0 + V_1) \quad (W)$$

風車設計の基礎

- 流れのもつ全動力

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho V_0^3 A \quad (W)$$

- パワー係数

$$c_P = \frac{P}{P_0} = \frac{\frac{1}{4} \rho A (V_0^2 - V_1^2) (V_0 + V_1)}{\frac{1}{2} \rho A V_0^3} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left(\frac{V_1}{V_0} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{V_1}{V_0} \right|$$

- \

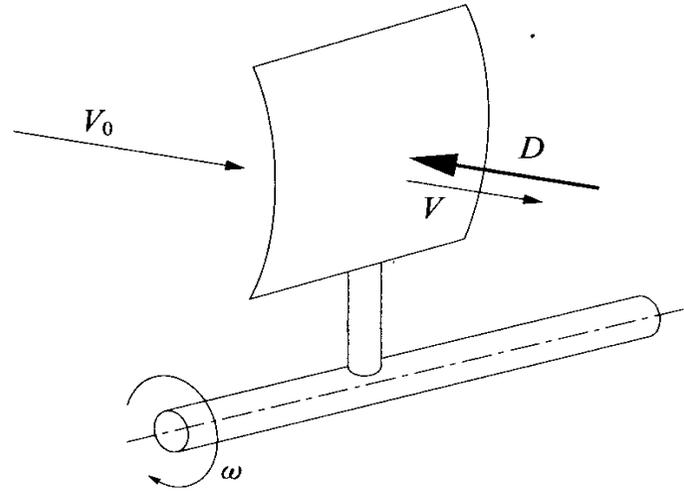
- ベッツ係数

風車設計の基礎 – 抗力型

■ 作用する力/単位面積

$$\frac{F}{A} = C_D \frac{1}{2} \rho V_0^2 \quad (N/m^2)$$

- 円柱 $C_D=1$
- 角柱 $C_D=2$



風車設計の基礎 – 抗力型

- 動力/単位面積

$$\frac{P}{A} = \frac{FV}{A} = C_D \frac{1}{2} \rho V_r^2 V = C_D \frac{1}{2} \rho (V_0 - V)^2 V$$

- パワー係数

$$C_P = \frac{4}{27} C_D$$

CD=1として、CP=0.15が最大

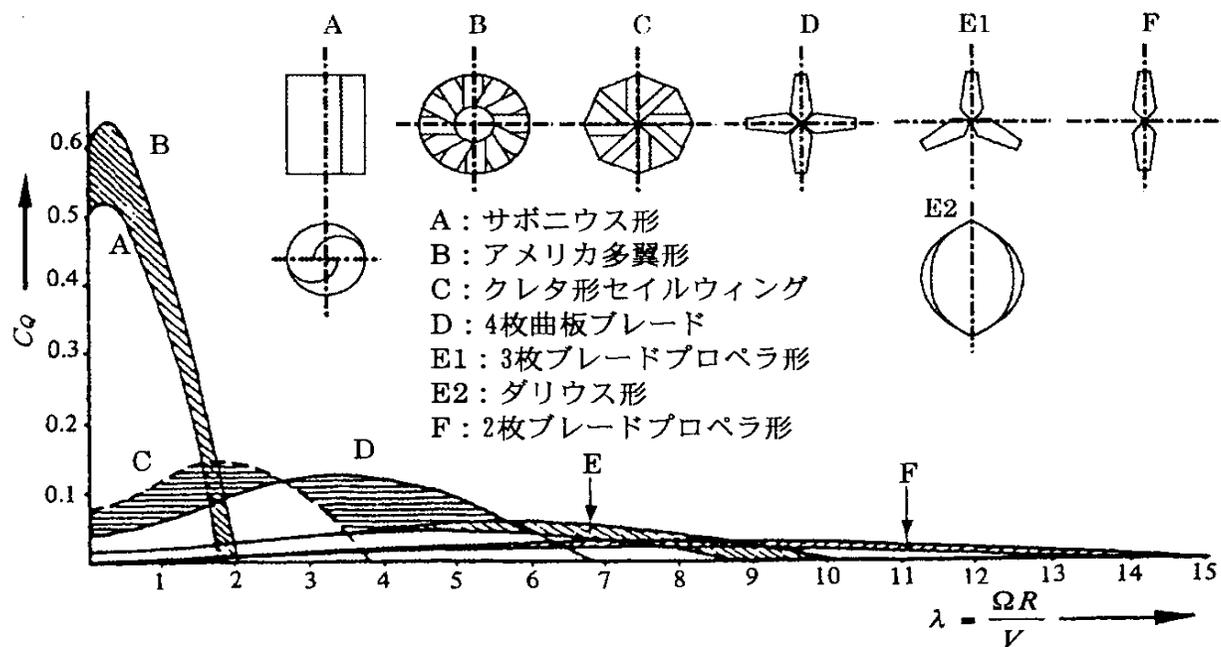
V=V0/3

風車の特性 - 形式とトルク

■ トルク係数

$$C_Q = \frac{Q_e}{1/2 \rho A R V_0^3}$$

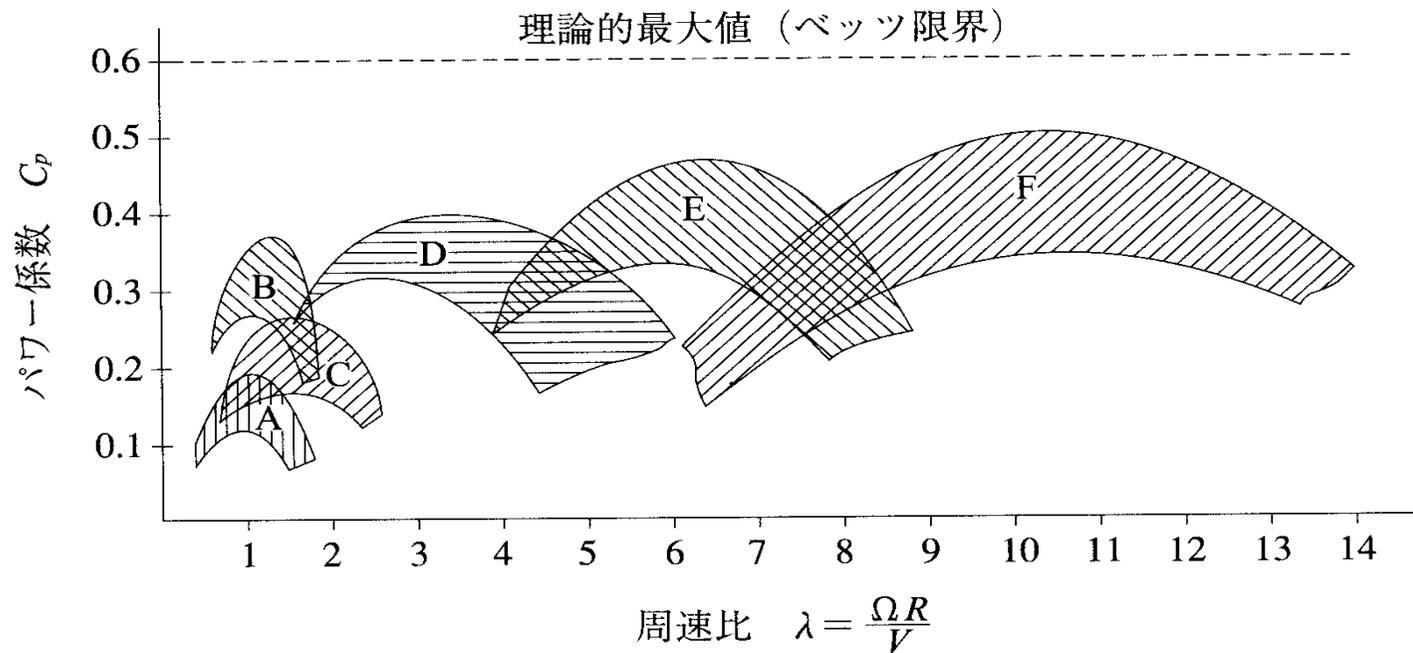
$$P = Q\omega \quad \omega : \text{角速度}$$



風車の特性 - 形式とパワー

■ パワー係数

$$C_P = \frac{P_e}{1/2 \rho A V_0^3}$$



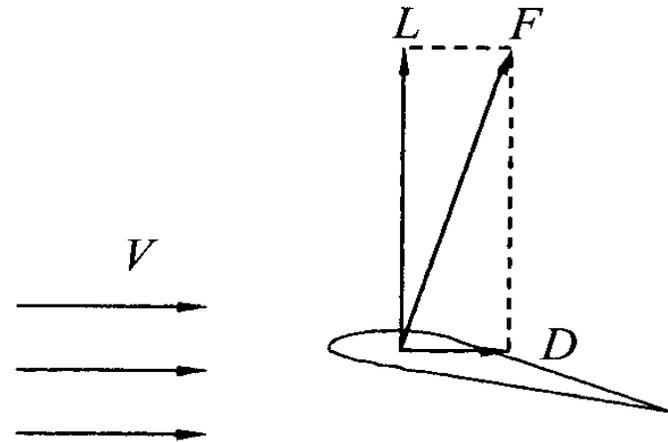
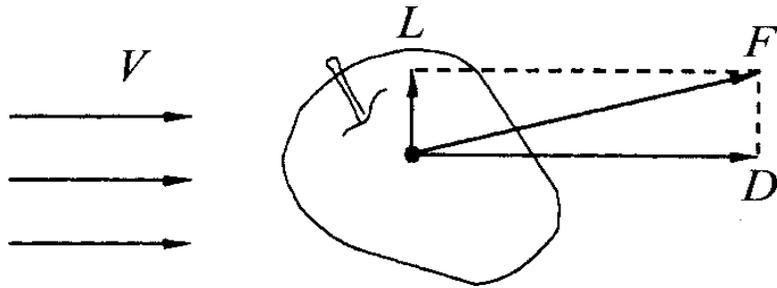
ブレード形状 — 翼型

揚力係数

$$C_L = \frac{L}{1/2\rho V^2 A}$$

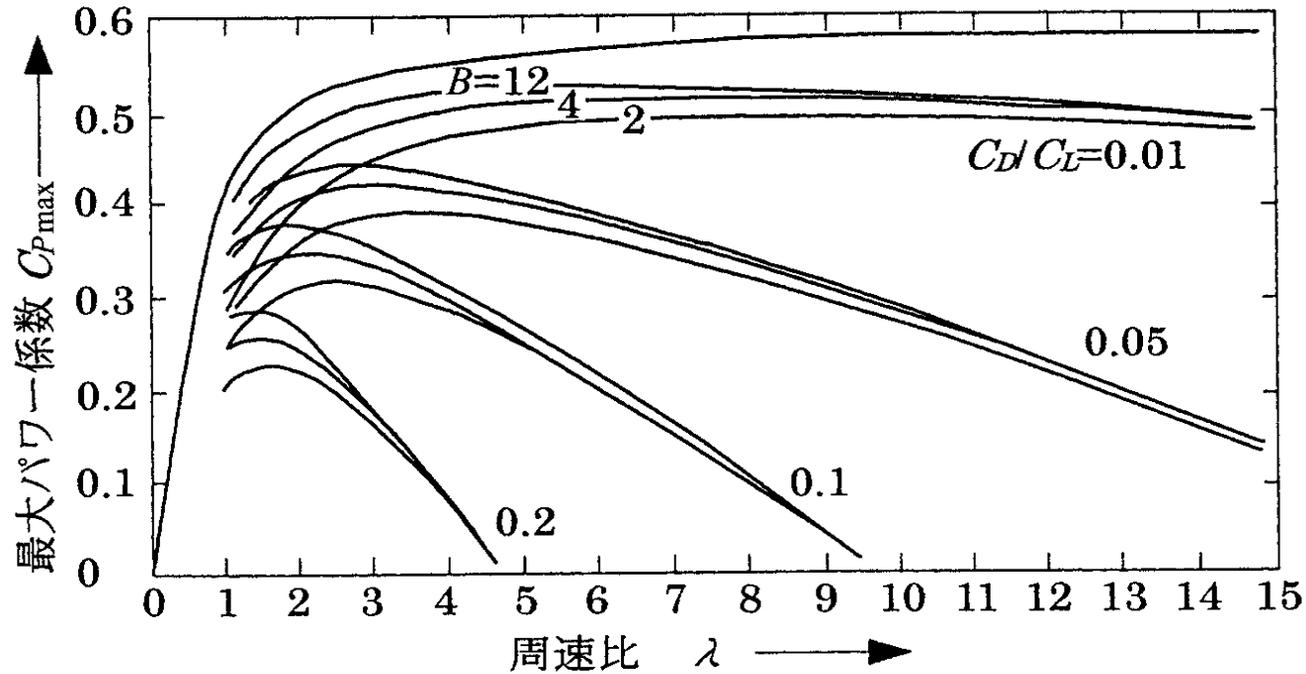
抗力係数

$$C_D = \frac{D}{1/2\rho V^2 A}$$



ブレード形状とパワー係数

- 最大パワー係数との関係



風力発電機の運転

- 最大出力を得るために
- 可変ピッチ
 - 最適、構造複雑
- 失速制御(固定ピッチ)
 - 低コスト

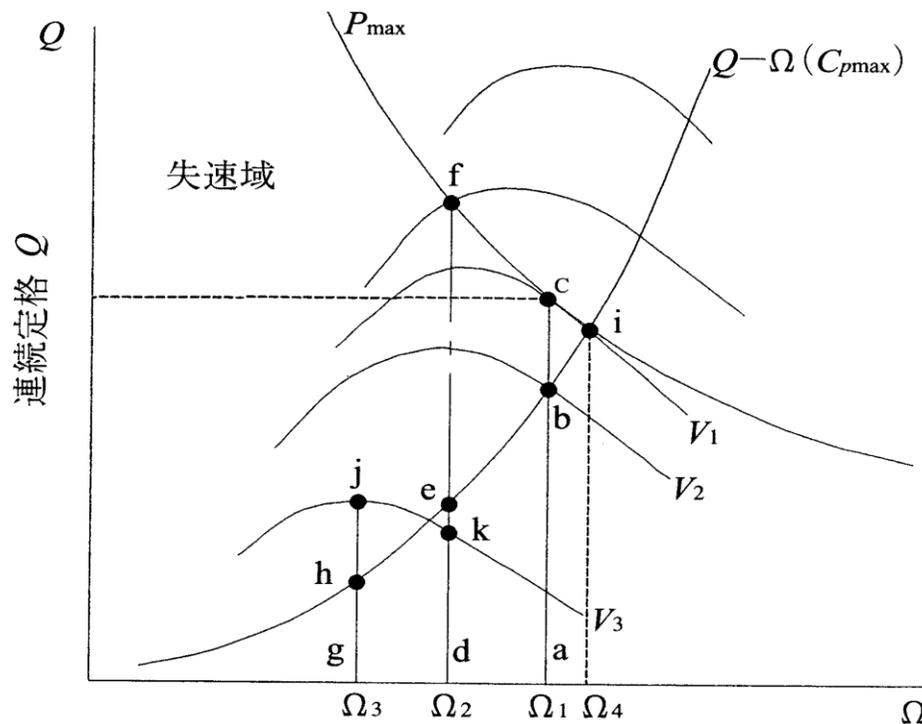
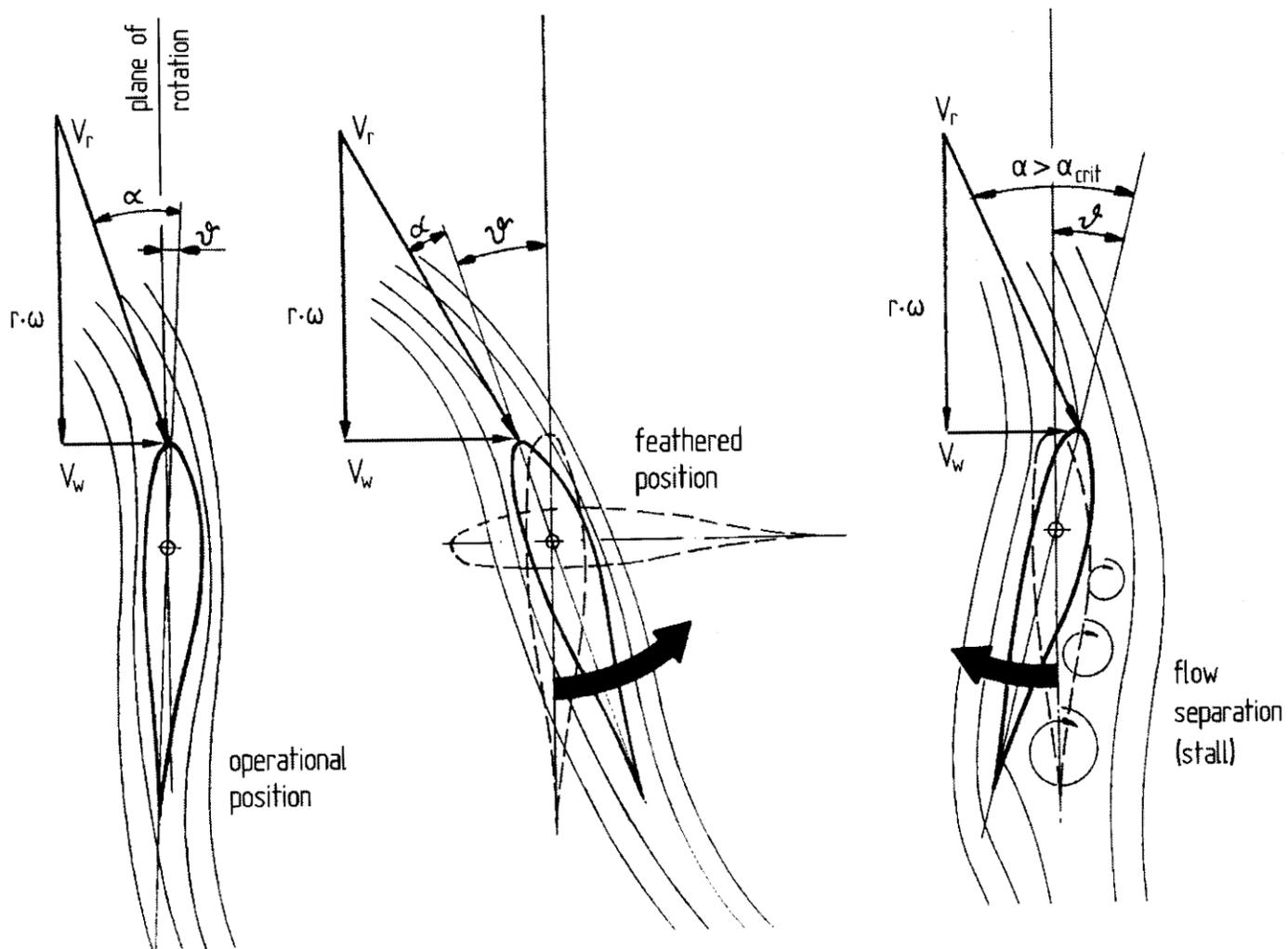
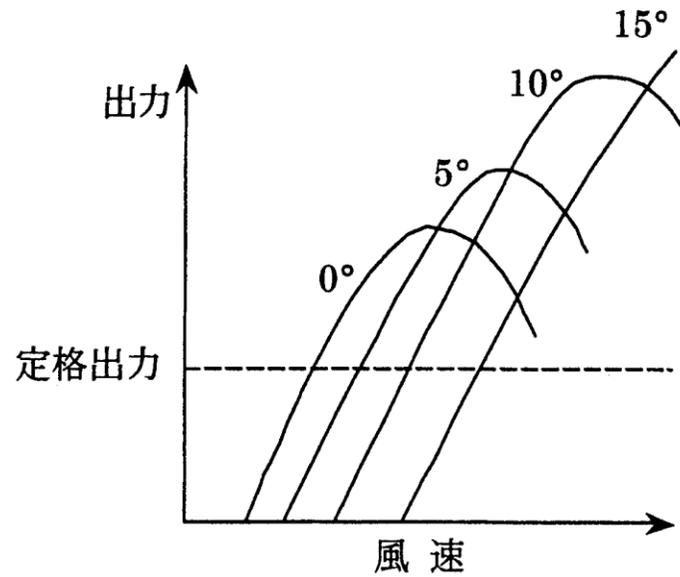
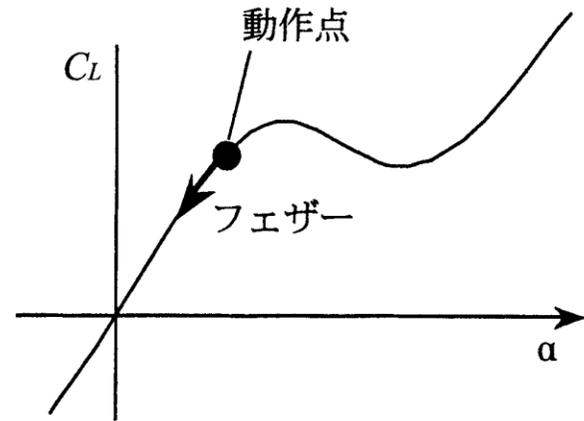
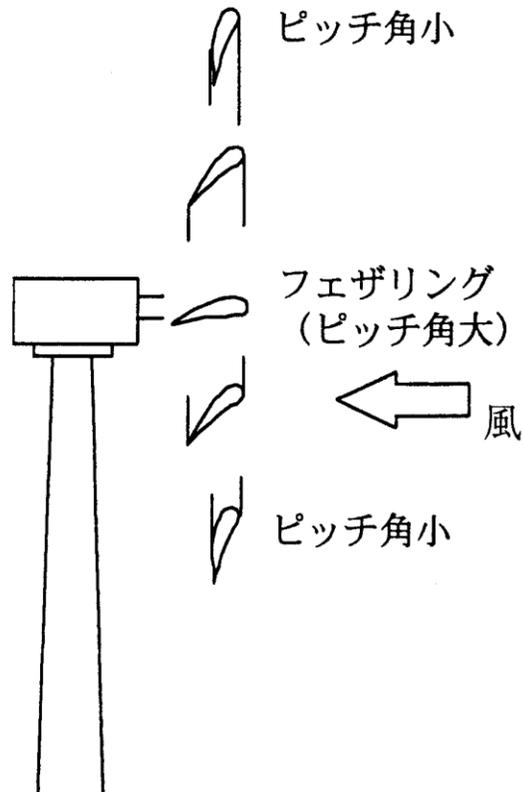


図 8.3 発電用風車制御の考え方

ブレード周りの流れ



ピッチ制御と性能曲線



風力発電を巡る最近の問題(1)

- 出雲、揺れる風力発電、計画立ち往生——島根県、異例の景観審開催(中国レポート)
(2006/03/21, 日本経済新聞 地方経済面(中国B))
- 島根県出雲市の風力発電計画を巡り、賛否両論が渦巻いている。推進派が地球温暖化防止という錦の御旗を掲げる一方、反対派も歴史的景観の保全や野鳥などの自然保護を唱えて譲らない。板挟みとなった県は今夏にも裁定を下す見通しで、県の判断が計画の行方を大きく左右しそうだ。
- 「地球温暖化ガスの削減や地域振興に大きな効果が期待できる」——。出雲市議会は十七日、新出雲風力発電所(仮称)の建設促進に関する決議を賛成多数で可決した。西尾理弘市長も推進の立場を明確にしている。
- 同市で風力発電を計画しているのは新出雲ウインドファーム(出雲市、鶴田純一社長)。風力発電大手のユーラスエナジー・ジャパン(東京・港)と関西電力系の電気工事会社きんでんが共同出資で二月に設立した。市北部の島根半島に直径九十メートルの風車二十六基を建設し、二〇〇九年度の運転開始を目指す。総出力は七万八千キロワットと国内最大級だ。

風力発電を巡る最近の問題(2)

- 茨城・つくば市、風車「空回り」、発電事業頓挫
(2006/05/04, 日本経済新聞 朝刊, 26ページ)
- 売電収益で地域通貨を発行、二酸化炭素の排出量を削減し、環境教育にも役立てる——。こんな効果を狙い、小中学校に小型風力発電機を設置した茨城県つくば市では期待に反して風車は回らず、事業は頓挫している状態だ。
- 市は基本計画策定を委託した早稲田大に、設置費用約三億円の損害賠償を求め提訴したが、風況調査もせずに設置に踏み切るなど市の拙速ぶりも明らかに。元市議らが違法な公費支出として市長らを提訴する事態に発展している。
- 同市では二〇〇五年七月、市内の小中学校十九校に計二十三基の風車設置を終えた。ところがほとんどの風車は風をとらえられず、逆に強風で故障するケースも。累積発電量は早大試算の1%以下。風車の待機電力の消費量にも及ばなかった。

風力発電を巡る最近の問題(2)(つづき)

- つくば風車訴訟、早大側、争う姿勢——東京地裁初弁論
(2006/06/19, 日本経済新聞 夕刊, 22ページ)
- 茨城県つくば市の小中学校に設置された風力発電機が計画通りに発電しないとして、つくば市が計画を策定した早稲田大と風車を製造したイーアンドイー(大阪市)に計約二億九千八百万円の損害賠償を求めた訴訟の第一回口頭弁論が十九日、東京地裁(荒井勉裁判長)で開かれた。
- 早大側は「問題の原因はつくば市のずさんな事業計画と強引な進め方にある」として、全面的に争う姿勢を示した。
- 訴状によると、つくば市は二酸化炭素(CO2)排出削減のため、風力発電を計画。早大は二〇〇四年十月に市の業務委託を受け、風力発電機の機種や設置場所、台数などを策定した。
- 早大からの技術移転で設立されたイー社製造の風車二十三基が昨年七月までに、市内の小中学校計十九校に設置された。
- 市は環境省からの交付金も含め二億九千八百万円を支出したが、実際は計画を大幅に下回る発電量しか得られなかったという。

風力発電を巡る最近の問題(2)(つづき)

- 早大の賠償額を減額…風力発電訴訟2審判決(2010年1月20日、読売新聞)
 - 小・中学校に設置した風力発電機がほとんど発電しなかったとして、茨城県つくば市が業務委託先の早稲田大と発電機メーカーに計約3億円の損害賠償を求めた訴訟の控訴審判決が20日、東京高裁であった。
 - 小林克巳裁判長は、「事業が失敗したのは、つくば市にも重い過失がある」として、早大に約2億900万円の支払いを命じた1審・東京地裁判決を変更し、賠償額を約8958万円に減額した。
 - 判決によると、つくば市は、同市内の小・中学校に小型風力発電機を設置して電力を販売し、それを財源に地域通貨を発行する事業を計画。2005年7月までに、早大などが開発した発電機23基を設置したが、十分な発電量を得られず、事業は失敗に終わった。

風力発電を巡る最近の問題(3)

- 2003年9月の台風14号による宮古島の風力発電設備被害
- 平成15年9月11日に宮古島を直撃した台風14号によって、沖縄電力が保有する6機(2,900kW)の風力発電設備が全て被害を受けた(3基が倒壊、2基がブレード破損、1基がナセル損傷)



3号機



5号機



6号機

狩俣風力(宮古島)

沖縄電力株式会社資料「宮古島の風力発電設備被害の調査結果について」(平成16年11月30日)

参考文献およびホームページ

- 風車工学入門、森北出版、牛山泉著
- 手作り風車ガイド、パワー社、松本・牛山著
- 小型風車ハンドブック、パワー社、牛山・三野著
- Wind Turbines, Springer, Erich Hau
- 日本風力エネルギー協会
 - <http://ppd.jsf.or.jp/jwea/index.html>
- NEDO:<http://www.nedo.go.jp/>