

1. 風力発電の ABC

1.1. はじめに

2003 年 3 月, 東京お台場に東京臨海風力発電所『東京風ぐるま』が完成したこともあり, 風力発電は一般の人々の関心を集めている. また, 風力発電は次の理由から児童・生徒の興味を引く科学・技術のテーマである.

- ① 自然エネルギーである.
- ② 風車は目で見て直感的に理解でき, その動作を実感できる.
- ③ 電力は毎日の生活に利用されている.

そして, 風力発電を利用して, 次のような分野の知識を具体的に指導できる. また, 科学技術に関する興味を持たせることができる.

- ① 気象に関する興味と理解の増大.
 - ・ 気象と風
 - ・ 風のエネルギー
 - ・ 日本の風と世界の風
- ② 電気・機械技術への興味と理解の増大.
 - ・ モーターと発電機
 - ・ 電力と電力消費
 - ・ 発電所と電力供給
 - ・ 生活と電気
- ③ 科学と社会の理解の増大.
 - ・ 風力発電と地球環境
 - ・ 風力発電と経済 (ビジネス)

このような知識を教え, 科学技術に対する興味を増大させるのには, 風力発電システムに関して次の点を特徴とする教材を用意することが有効であると考ええる.

① 電気関連の基礎知識

風力発電の基礎知識では羽根や制御機構だけでなく, 発電やその電力利用の電気回路に関する内容を盛り込む. 通常, 電気関連の知識は物理で学習する. しかし, その内容は基礎的であり, 高校生が普段利用しているパソコンや携帯電話などの電気・電子技術とは大きく乖離している. そのため, 多くの高校生にとって, 高等学校「物理」における「電気」に関する学習内容は, 身近ではなく興味を持ち難い. 風力発電は, 発電や応用電子回路の体験をする良い機会を与える.

② インターネット利用の調査分析

風力発電の環境への貢献や, Wind Firm 会社の投資・回収ビジネス計画などを課題として生徒に与え, インターネット上に豊富にある関連基礎データを利用して, レポートとしてまとめさせる. これらは, 地球環境や経済・ビジネスに興味を持っている生徒にとって, 取り組み甲斐がある課題と考えられる.

③風力発電の工作・利用体験

ペットボトルや模型用モータを使って風力発電機を実際に作る体験は面白く，遊び感覚で風力発電の原理を理解できる．また，小型風力発電機を学校又は自宅で利用し，結果を分析する体験は，風力発電の有効性の判断，利用用途の発案などに関連付けられる．

1.2. 風力発電の基礎知識

1.2.1. 電気と電力

生徒は環境問題，とくに地球温暖化や CO_2 ガスに関しては関心が高い．そこで，日本全体では，どのくらい発電し，発電のためにどのくらい CO_2 ガスを排出しているかを知ってもらう．普段，無意識に使っている電力量を知り，その電力量が如何に大きいかを身体的に理解してもらう．

Step 1. 電力の単位や定義を説明する．

表 1-1. 電気の学習の復習

身近な電力	ちょっと復習
瞬間電力	$W[\text{W}] = V[\text{V}] \times I[\text{A}]$
電力	$P[\text{Wh}] = W[\text{W}] \times t[\text{h}]$
1 ワット	$1[\text{W}] = 1[\text{J/s}]$
1 カロリー	$1[\text{cal}] = 4.2[\text{J}] = 1[\text{Ws}]$
接頭語	k: 10^3 , M: 10^6 , G: 10^9 , T: 10^{12}

Step 2. 日本の発電総量とそれがどのくらい環境に負荷をかけているか．

日本の発電総量は 8000 億 kWh=800TWh である．電力の使用端 CO_2 排出原単位が $0.37\text{kg-CO}_2/\text{kWh}$ である．これは，日本の CO_2 総排出量の 23%に当たり，大きな環境負荷である．

表 1-2. 基礎知識：発電と二酸化炭素

発電と CO_2 (1999 年度)	
日本の総発電量	8000 億 kWh = 800 TWh
使用端 CO_2 排出原単位	0.37 kg CO_2/kWh
CO_2 総排出量	3.02 億 t- CO_2 (23%)
自然エネルギーによる発電	風力，水力，太陽，地熱，波，バイオマス

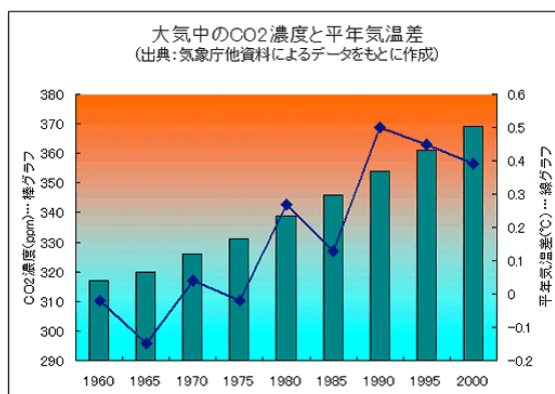


図 1-1. CO_2 と気温の関係 (<http://www.jccca.org/>)

Step-3 身近な電力使用.

32インチTVは,待機電力2W,使用時220Wである.このテレビを毎日4時間見ると0.44kWhの電力消費となり,0.33kgのCO₂を排出していることとなる.二酸化炭素排出量は,0.37[kg-CO₂/kWh]であり,家庭電力料金は,21円/kWhである.年間消費電力は5000kWh=1850 kg-CO₂となる.

表 1-3. 身近な電力：家電品

	待機電力[W]	消費電力[W]
32 インチ TV	2	220
デスクトップ PC	1	123
PS2	—	50

Step-5 人力発電機の体験.

手回し発電機と自転車発電機の発電量は,それぞれ0.1W,50W程度である.これらの体験から32インチTVの電力消費量がいかに大きいか,身体的に理解できる.



図 1-2. 人力発電機の例（左：手回し発電機，右：自転車発電機）

1.2.2. 風力発電システム

風力発電の記事やカタログを理解するのに必要な基礎知識を紹介する.

Step-1 風力発電システムの概要・部位名

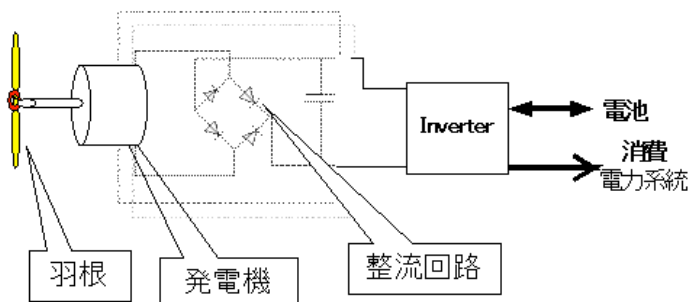


図 1-3. 風力発電のシステム



図 1-4. 風力発電機の部位の名称

Step-2 風車の種類

垂直軸型（ダリウス型）は風向に依存しない．そして，点検も容易である．水平軸型（プロペラ型）は安定した風の場合，発電容量が大きい．また，羽根は抵抗型と揚力型に分類することもできる．

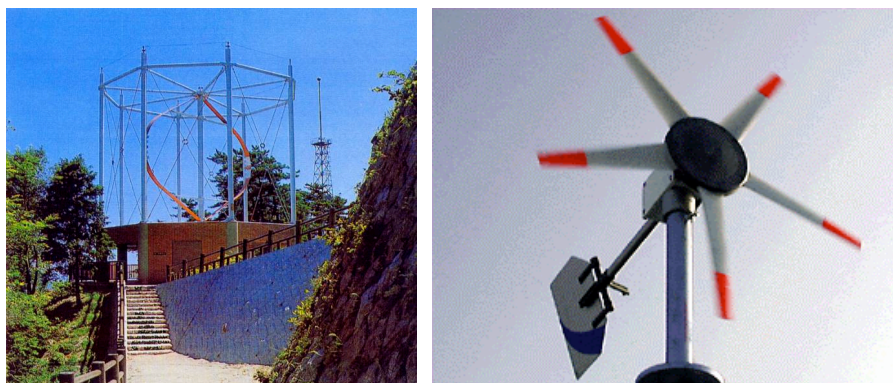


図 1-5. 風車の形（左：ダリウス型，右：プロペラ型）

風力発電機から取り出される風エネルギーは次式で表現できる．

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \times A \times \eta$$

ここで， ρ は空気の密度で $1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ， V は風速（m/s）， A は受風面積（ m^2 ）， η は効率であり最大で 60% である．

Step-3 風力発電システムの性能

風速に対する発電量の出力特性グラフを用いて，Cut-in 風速，Cut-out 風速，定格出力などの定義を説明する．

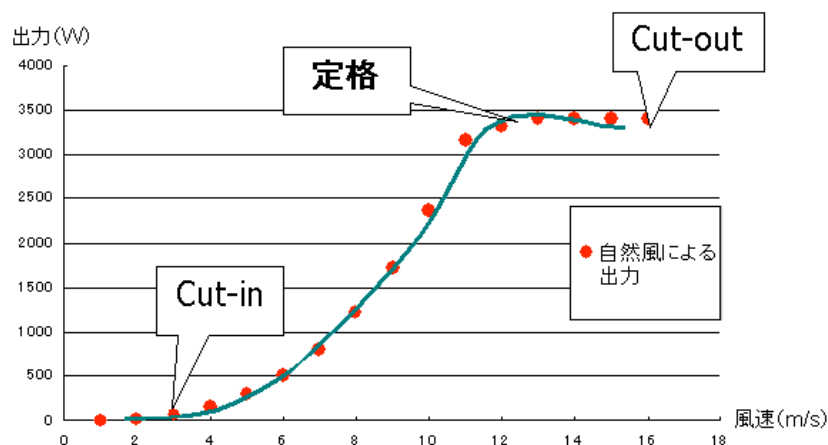


図 1-6. 風力発電機の出力特性グラフ

Step-4 日本の風況と風力発電立地

年間平均風速 5m/s 以上の地域が風力発電に適していると言われる．風況マップを示し，どのような場所で風が強いのか，また，それはなぜかを説明する．さらに現状の Wind Firm を紹介する．最後に，身近な場所の何処が，風力発電立地として適しているかを考えさせる．例えば，NEDO の風況マップを利用して，「どこに作ろうか?」「高さは?」などの演習を行う．

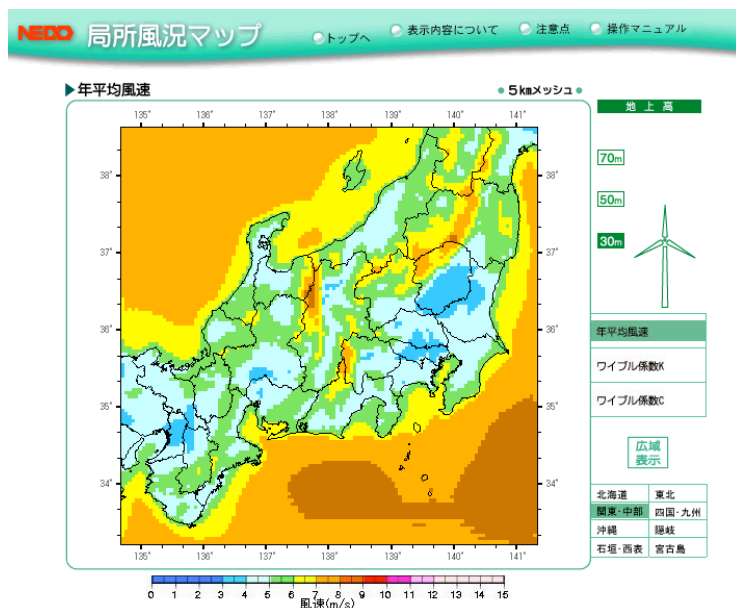


図 1-7. NEDO の風況マップ (<http://www2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>)

1.2.3. 電磁誘導と発電

風力発電関連の本などでは、羽根や風力特性などについて詳しく述べられているが、発電機や電力回路部分に関する情報は少ない。そこで、発電機や電力回路部分に関する基礎知識を、高校物理程度の知識を前提に説明する。

Step-1 電磁誘導と発電機の仕組み

Step-2 発電機の種類

誘導発電機と直流発電機

Step-3 直流発電機から電力を取り出す

模型用直流モータは直流発電機として利用できる。これを用いて、豆電球を点灯したり充電する電子回路を紹介する。これら回路は簡単に作成できるので、教室で作らせることも可能である。

1.3. 課題研究

インターネットに関連基礎データは豊富に存在する。情報が豊富な Web Site を紹介し、そこから得られるデータを加工することにより、次のような課題に対して回答・提案を考えさせる。

① 風力発電は、環境問題へ貢献するか？

発電による CO₂ 排出を削減するには、風力発電だけでなく、太陽光、地熱、水力などの自然エネルギー利用や原子力発電が考えられる。また、節電の実行も必要である。このような事を説明し、発電 CO₂ 削減のための方策を調査、立案させる。

② 風力発電は、何処で使えるか？

日本では風力発電は、Wind Firm や離島発電、および、非常用発電機として利用されている。その実態を調査させ、自分たちの身近ではどのように利用するのが良いか提案させる。

③ 儲かる風力発電システムの経営

東京臨海風力発電所『東京風ぐるま』級の Wind Firm を作る場合，投資・回収の経営が成り立つかどうかを検証させる．また，Wind Firm が経済的に成り立つためには，どのような技術開発，コスト低減あるいは法律が有効か考えさせる．

1.4. 風力発電の製作と利用

1.4.1. さまざまな風車を作ってみよう

ケント紙やスタイロフォームを使って各種羽根を作り比較体験させる．定量的な実験は困難であるが，回転具合や風向の変化への対応などの得失は容易に体験できる．例えば，風向の変化に対して，サボウスやダリウスなど縦型は強い．そして，ダリウスやプロペラの羽根は揚力断面を持つ必要があるなど体感できる．

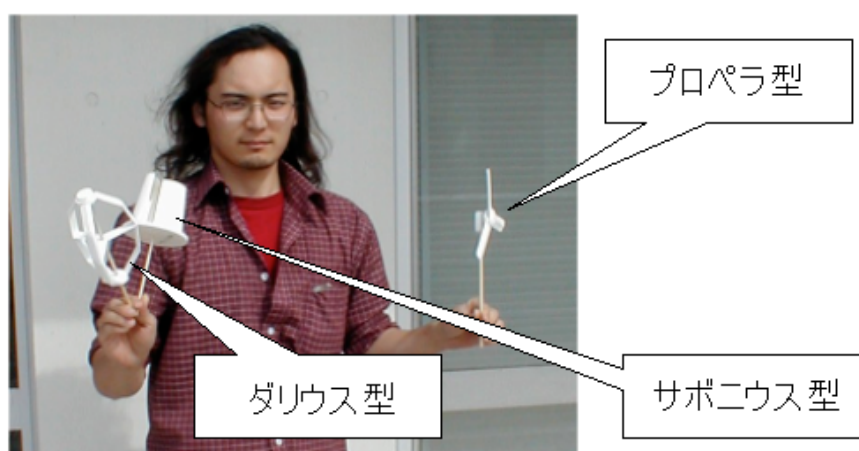


図 1-8. 手作り風力発電機のいろいろ

1.4.2. 発電機回生回路の体験

風車に回生回路をつけるとどの程度のブレーキ効果がでるか試してみる．回生回路で回生抵抗を変え，一定の速度で回したときに停止するまでの時間を測定した．ここでは，人手で回しているので，物理実験としてはいい加減である．しかし，回生抵抗の働きが感覚的に理解でき，よい体験であった．



図 1-9. 回生抵抗器を利用した実験

表 1-4. 回生回路の実験結果

回生抵抗値	停止までの時間	回したときの感想
0 Ω	54[秒]	重い. 電流 2A, 電圧 4V 位.
5 Ω	72[秒]	
∞ (オープン)	104[秒]	軽い. 電流 0 A, 電圧 8 V 位.

1.4.3. 小型縦型風力発電機を自宅で使ってみよう

マンションのベランダにも設置できる縦型風力発電機を使って，自分たちの生活の場でどのくらい風力発電が可能か体験してみる．その時，風向風速計も一緒に設置する．次のような課題が考えられる．

① 一週間か一ヶ月ぐらい，風力・風向および発電量を計測して，発電効率をグラフにする．このデータから発電機の特性と改良箇所を考察する．

② 実際に得られた発電量から利用方法を考える．

例えば，「庭木への水やり装置」，「イルミネーション電源」などが考えれる．生徒の発案に対し，生徒自身では困難な電子回路設計や機械加工などは，大学生や学校が支援する体制が必要であろう．この自分の発想が具体的製品になると，発案者の生徒の満足度は高く，また，科学技術への関心と自信を持つことが出来る．過去の風力発電に関する講演でも，夜間照明などを発想した生徒がいた．彼らの思いつきを具体化できる体制が用意されれば，非常に有意義な教育となるであろう．

1.5. 参考文献

- 1) NEDO 風力発電導入ガイドブック 1996 (<http://www.nedo.go.jp/index.html>)
- 2) 松宮 “ここまできた風力発電” 工業調査会 1994.
- 3) 全国地球温暖化防止活動推進センター (<http://www.jccca.org/ondankan/>)
- 4) ものづくり大学堀研究室
(<http://www.iot.ac.jp/manu/HORI.html>)
- 5) NEDO 風況マップ (<http://www2.infoc.nedo.go.jp/nedo/index.html>)

堀聡（ものづくり大学製造技能工芸学科）

2. 気象と風力発電

2.1. 風のエネルギーと発電量

風のエネルギーは物理で学習する運動エネルギーであり、空気の質量 (M) と風速 (V) の 2 乗の積に比例する。ここで空気の質量は単位時間に風力発電機を吹き抜ける空気の質量と定義でき、風力発電機の断面積 (S) と風速 (V) と空気の密度 (ρ) の積となる。その結果、風のエネルギーは風速の 3 乗に比例し、次式で表される。

$$E = (1/2) \cdot M \cdot V^2 = (1/2) \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot V^2 = (1/2) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (1) \text{ 式}$$

また、風車のブレードの半径を r とし、発電効率を e とすると、風車から取り出せる風のエネルギーは次式で表される。

$$E = e \cdot (1/2) \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot V^3 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}] \quad (2) \text{ 式}$$

ここで、発電効率はだいたい $e=30\sim40\%$ の範囲である。

空気の密度は温度 T ($^{\circ}\text{C}$) と気圧 P (hPa) の関数であり、次式で表される。

$$\rho(T, P) = 1.293 / (1 + 0.00367T) \cdot P / 1013.25 \quad [\text{kgm}^{-3}] \quad (3) \text{ 式}$$

ここで、気圧を 1013.25hPa とすると、気温 20°C と 0°C における密度はそれぞれ 1.2046kgm^{-3} (20°C) 1.293kgm^{-3} (0°C) であり、約 7% の違いがある。つまり、風速が同じ場合には気温が 0°C における発電量は気温が 20°C の場合と比較して 7% 多いことを意味する。

例題 1. 海面レベルに設置されたブレード半径 30m の風車が、風速 10m/s、効率 40% で発電する時の理論的な発電量を推定せよ。

解答 $\rho = 1.225\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $r = 30\text{m}$, $V = 10\text{m/s}$, $e = 0.4$

(2) 式にこれらの値を代入して計算する。

$$E = (0.4) \cdot (1/2) \cdot (1.225\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot \pi \cdot (30\text{m})^2 \cdot (10\text{m/s})^3 = 6.93105\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} = 693\text{kW}$$

ただし、 $1\text{W} = 1\text{J/s} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$

問題 1. ブレード半径が 20m、効率が 30% の風車がある。海面レベルにおける、理論的な発電量を次の a~d の風速を仮定して推定せよ。

- a. 2 m/s b. 8 m/s c. 15m/s d. 40 m/s

2.2. 風と風車の管理

風は総観規模やメソスケール、境界層スケールの気象により決まり、風力発電に影響を与える。風のエネルギーは風速の 3 乗と空気の密度（つまり温度）に依存するが、風力発電は単に風が強ければよいだけではない。風を観測し、様々な制御が必要となる。

風力発電機が風のエネルギーを取り出すために、風車は風向の変化に合わせて、向きを変化させなければならない。大型の風力発電機では風の力だけでは風向の変化に合わせてその向きを変えることはないので、風向を検知して風車の向きを制御している。これをヨー制御と呼んでいる。

風車が風の向きに向いた時、最大のエネルギーを取り出すことができるが、大きな風（例えば、約 10m/s よりも大きな風速）により発電機が壊れることを防ぐために、風車のブレードは風速の増加に伴って、風向に対する角度を徐々に変化するように（アタックアングルを小さくする）設計されている。このメカニズムにより、風車は風速に関係なく一定の速さで回転し、理論的に予想される風のエネルギー（その絶対量は風車の効率に依存する）

を取り出している．ただし，強風（例えば，約 30m/s 以上の風速）に対しては，ブレードを風向に対して完全に平行にして，発電を停止する．このような制御をピッチ制御と呼んでいる．

議論：風車のブレードの大きさには物理的な限界があるので，よりたくさんの電力を得るためにはたくさんの風車を建設する必要がある．この時，どのようなことを考慮する必要があるか？

2.3. 地表付近の風

対流圏は地球表面の影響を受ける大気境界層と自由大気に分けられる．大気境界層の厚さは 1km ほどであり， $2\sim 50\text{m}$ ほどの厚さの地表層とその上の混合層に分けることができる．混合層の厚さは，1日を周期として変化する．大気境界層の最下部 10%ほどの地表層の風は地球表面の影響を受け，ミクروسケールの様々な乱れがある．

風力発電機の高さは高いものでも 100m 程度であり，大気境界層内の風を受けている．従って，風力発電量の見積もりには，大気境界層内の風速の分布や強さを知る必要がある．地表付近の風速は一般的に高度と共に増大する．

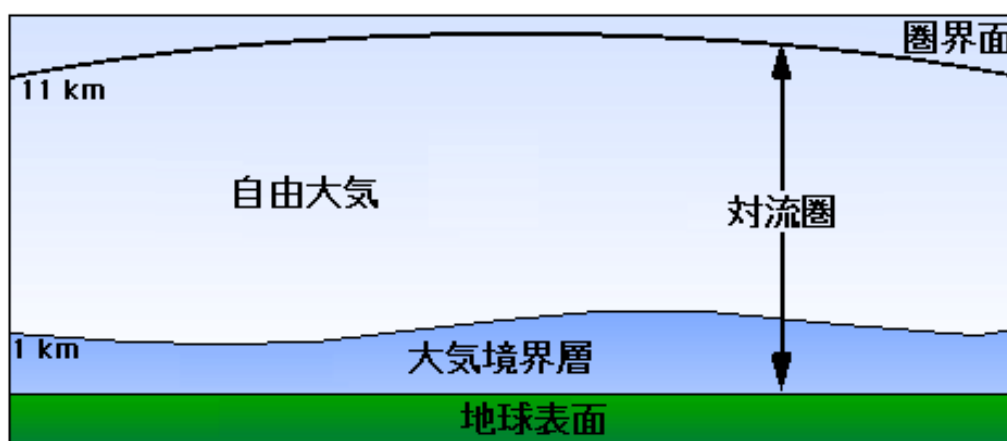


図 2-1. 対流圏の構造

2.3.1. 粗度長 (roughness length)

地表面付近における風速は基本的にゼロであり，この風速がゼロになる高さは地表面の様子によって決まる．専門的な表現では，表面における風の抗力は表面粗度に強く依存する．まばらな森林は雪に覆われたなだらかな表面よりもより強い抵抗となる．粗度長 z_0 はこの効果を定量化した値で，様々な表面に対する典型的な粗度長を表 1 に示した．この表の粗度長は家や木々，その他の障害物の実際の高とは異なる．『風力発電導入ガイドブック』（NEDO：2005 年 1 月改訂第 7 版）の定義によれば，風速の高度分布が対数則（次節参照）に従うとした時の平均風速が零となる外挿高である．つまり，粗度長が長いほど，表面が凸凹していることを意味する．表 1 に『Daveport-Wieringa』の粗度長分類を示した．

表 2-1. Daveport-Wieringa の粗度長分類

z_0 (m)	分類	地表面状態
0.0002	海面	海，舗装された地面，平らな雪原，tide flat，なめらかな砂漠
0.005	滑らか	砂浜，流水（パックアイス），沼地，雪原
0.03	開けた	草の大草原，農場，ツンドラ，飛行場，荒野（heather）
0.1	ほぼ開けた	背の低い穀物が栽培される地域で灌木が点在する．
0.25	凸凹した	背の高い穀物や様々な高さの穀物が栽培され，木々や生垣，ぶどう園などが点在する．
0.5	非常に凸凹した	いろいろな種類の農地と森林藪，果樹園，建物が点在する．
1.0	閉じた	大きな障害物で覆われた地域で，開けた広さは，障害物の高さにほぼ等しい．郊外の住宅，村，成熟した森林
≥ 2	でたらめな	大都市や市街地の中心部，開拓地を伴うまばらな森林

2.3.2. 風速の対数則（Log wind profile）

風速 V は地表面（より正確には空力学的粗度長に等しい高さ）でゼロと定義できる．風速は高さと共に，だいたい対数関数的に増加するが，その分布曲線は表面粗度に依存し，次式で表現できる．

$$V_2 = V_1 \cdot \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad (4) \text{ 式}$$

この関係から，ある高さ z_1 における風速 V_1 を測定できれば，他の高さ z_2 における風速 V_2 を推定することができる．多くの気象観測所は風速を標準の高さ 10m で測定している．そこで，アメダス観測データから任意の高さの風速を推定できる．

風の対数則分布の例を図 2 に示した．このような完全な風の対数則分布は均一な表面の上で，大気が中立な状態の時だけに期待できる．その他の静的安定度の場合は，風の鉛直分布は対数分布からわずかにずれている．

片対数グラフ用紙の上では風の対数則分布は直線となって現れる．この関係から，異なる二つ以上の高さで風速を測定し，片対数グラフ用紙にプロットし，直線を風速ゼロを切る所まで外挿することで，粗度長を推定することができる．つまり， z 軸の切片が粗度長を与える．

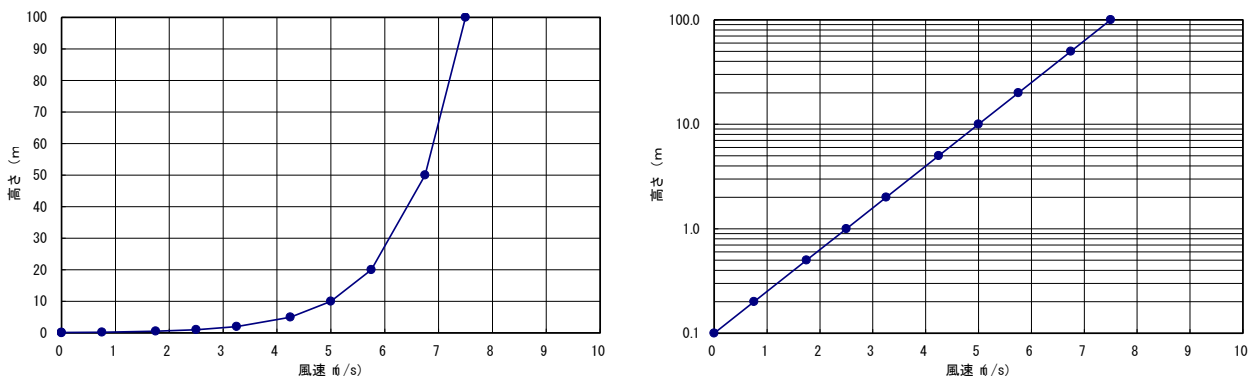


図 2-2. 安定度が中立な地表層内の風速分布（粗度長 10m），右：線形図，左：片対数図．

例題 2. 曇天の日に，果樹園内の地上高 10m に設置された風速計で 5m/s 風速が測定された．高さ 25m の煙突の噴出孔における風速を推定せよ．

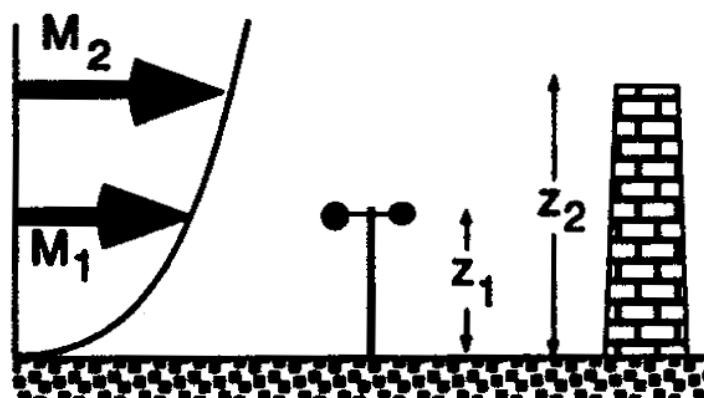


図 2-3. 例題 2 の概念図

解答 $z_1=10$ m, $V_1=5$ m/s, 曇天ということから大気は中立であり，粗度長は表 1 から $z_0=0.5$ m となる．これらの値を用いて， $z_2=25$ m における風速 V_2 を(4)式より求める．

$$V_2 = 5(m/s) \cdot \frac{\ln(25m/0.5m)}{\ln(10m/0.5m)} = 6.53m/s$$

議論：影響を受けない本当の風を測定できるように，風速計が煙突から十分に離れた場所に設置されていることが望まれる．

問題 2. 次の a～c に対する粗度長を調べよ．

- a. 都市域 b. 平穏な海面 c. 背丈の低い穀物畑

問題 3. 生垣がまばらに分布する地域に高さ 10m のマストの上に設置された風速計で 8m/s の風が測定された．次の a.～d. の高さ (m) における風速を推定せよ．

- a. 0.5 b. 2 c. 5 d. 30

問題 4. 地上 1m で風速 2m/s, 地上 10m で 5m/s であった．粗度長を推定せよ．

問題 5. $z=10$ m における風速 $V_1=5$ m/s が与えられた時， z_0 を a.～d. と仮定して，風速と高さの関係を図に示せ．

- a. 0.001 b. 0.01 c. 0.1 d. 2

2.4. 風速の確率分布

風速は絶えず変化している．1 年間では，図 4 に示したように暴風や強風の日は少なく，ほとんど風が弱い，穏やかな日である．この風速の分布は，次に示したワイブル (Weibull) 分布として知られている．

$$\text{Pr} = \frac{\alpha \cdot \Delta V \cdot V^{\alpha-1}}{V_0^\alpha} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \right] \quad (5) \text{ 式}$$

ここで，Pr は風速 V の確率である．このような風の変化は，総観規模，メソスケール，境界層などの過程で決まる．係数 V_0 は平均風速に比例し，場所 (location) 係数と呼ばれる．係数 α は分布幅 (spread) 係数であり， α が小さいと平均に対して，広く分布する．これらの係数とその結果の風速の確率分布は場所ごとに異なる．階級の幅または解像度は ΔV である．例えば，図 4 に示された風速 $V=3$ m/s に対する値は，風速が 2.5 m/s と 3.5 m/s

の間の確率を意味する．棒グラフのそれぞれの棒の幅は， $\Delta V = 1\text{m/s}$ である．

全ての風速階級の確率の和は 1 となり，風速ゼロから無限大までの確率が 100%になることを意味する．(4)式は近似式なので，確率の総和はほとんど 1 になるけれども，完全に 1 にはならない．これは分布の誤りを検査する上でも良い方法である．

風の風速分布は風力発電機がどの程度の発電能力があるかを推定するのに用いられる．また，暴風や強風の確率は建物や橋梁の設計にも使われる．

例題 3．平均風速 $V_0=5\text{ m/s}$ ， $\alpha=2$ とした場合，風速 $5.5\text{m/s}\sim 6.5\text{m/s}$ の確率を求めよ．

解答 $V_0=5\text{ m/s}$ ， $\alpha=2$ ， $\Delta V=1\text{m/s}$ ， $V=6\text{m/s}$ を(5)式に代入する．

$$\text{Pr} = \frac{2 \cdot (1\text{m/s}) \cdot (6\text{m/s})^{2-1}}{(5\text{m/s})^2} \cdot \exp\left[-\left(\frac{6\text{m/s}}{5\text{m/s}}\right)^2\right] = 0.114 = 11.4\%$$

議論：この値は同じ係数を用いた図 4 の $V=6\text{m/s}$ に一致する．確立の総和を 100%に非常に近い値とするためには，階級幅 (ΔV) を非常に小さくし，風速の大きな成分をきちんと計算することが必要である．

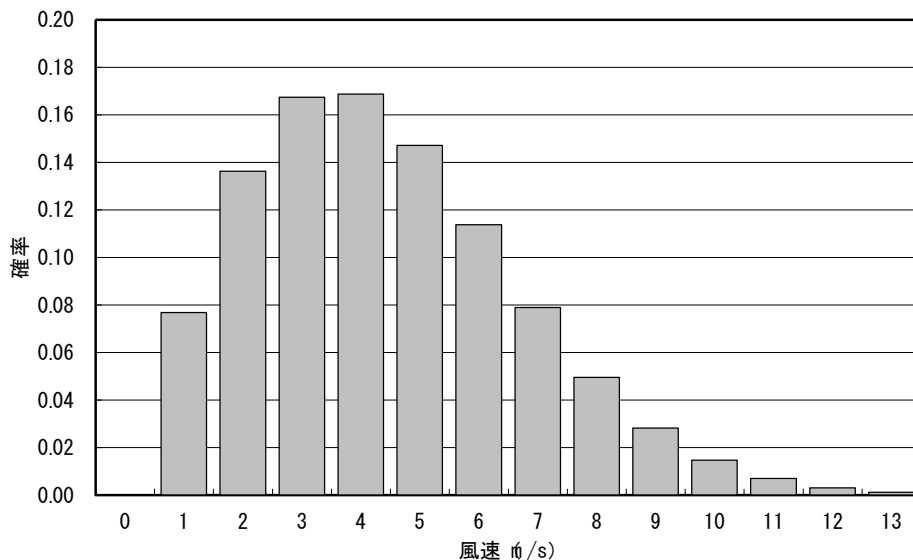


図 2.4. ワイブル分布による風速の確率分布 ($\alpha=2$ ， $V_0=5\text{m/s}$)

問題 6．ワイブル分布を用いて，階級幅 $\Delta V=0.5\text{m/s}$ ，平均風速 $V_0=8\text{m/s}$ とし， α を次の a ～d に変化させて，風速の確率分布を作図せよ．

- a. 1.5 b. 2 c. 3 d. 10

2.5. 風力発電の経済学

風力発電の経済性を考えるには、初期投資額とランニングコスト（維持経費）、発電量などの推定が必要となる。例えば、風車の寿命を20年として次のような試算を行うことができる。

風車1台の購入費用と設置費用（初期投資額）：約2億円

平均風速 7m/s（例えば、日本海沿海部）

年間発電量=約 250 万 kW 時

電力会社の買い取り価格（8円/1kW）

年間売り上げ収入=約 2000 万円/年 ⇒ 20 年では、4 億円

保守点検・管理費用（維持経費）=年間 500 万円

ただし、最初の2年間はメーカー保障（つまり、18年間は維持管理費用が必要）

500 万円/年×18 年分=9000 万円（20 年）

20 年間の純利益=4 億－2 億円－0.9 億＝1.1 億万円（約 550 万円/年）

ここで、風車の購入費用は機種や大きさにより定価があるが、設置費用は建設場所により大きく異なる。また、電力会社の買い取り価格は政府の施策により変動する。そして、維持経費に関しては、効率的な運営をすることで節約もできよう。

最終的な収益を大きく左右するのは年間の平均風速である。発電量が風速の3乗に比例することを考慮すると、風速が10%大きくなると、年間発電量は33%以上も増加する($1.1^3 \div 1.331$)。そして、この風速は地表面からの高さに依存し、風車を高くするほど大きな発電量が期待できる。また、平均風速を推定するためには、風速のワイブル分布を用いる必要がある。つまり、風力発電の経済性を吟味するためには気象学的な観測と知識が必要となるのである。

2.6. おわりに

本報告では気象学の立場から風力発電の教材化を試みた。つまり、風のエネルギーの推定に必要な風速が、地表面からの高さや地表面の様子（設置場所）に依存することを示した。また、風速の分布も一様でないことを示し、その推定方法を示した。本報告により堀（2004）が示した風力発電の課題研究をより具体的に実行できる。つまり、NEDOの風況マップを利用して、設置場所を決定し、アメダス観測点から地上風の測定結果を入手し、平均風速を推定する。その結果を用いて、風車の高さの風速を推定し、年間発電量を推定することができる。その結果から、風力発電の経済性を考察することがきよう。

2.7. 参考文献

- 1) 堀聡, 2004, 「風力発電の教材かに関して」, 平成15年度スーパーサイエンスハイスクール研究開発実施報告書, 慶應義塾高等学校。
- 2) Stull, Roland B., 1995, "Meteorology Today For Scientists and Engineers", West Publishing Company.

謝辞

この研究の一部は日産科学振興財団からの平成17年度理科・環境教育助成が使用された。

3. 演習教材

3.1. 実験 モーターと発電機

3.2. 実験 発電と負荷

3.3. 実験 風の観測

3.4. 実験 風速と発電

3.5. 風車のペーパークラフト型紙（直線翼型風車とプロペラ風車）

3.6. 風車のペーパークラフト型紙（抗力風車）

3.6. 風車の工作（ダリウス型風車）

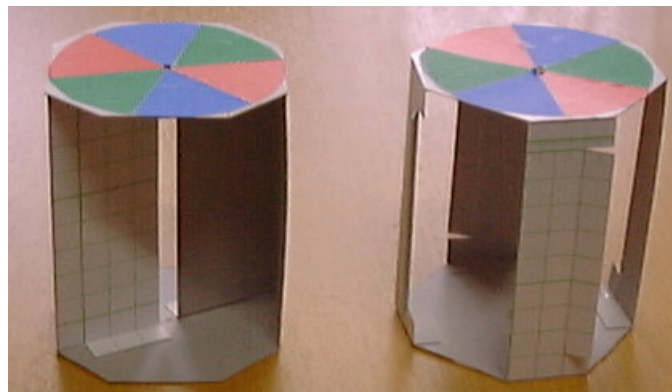


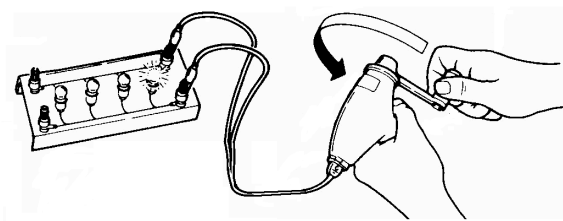
図 3-1. 抗力風車（左）と直線翼型風車（右）

実験 モーターと発電機

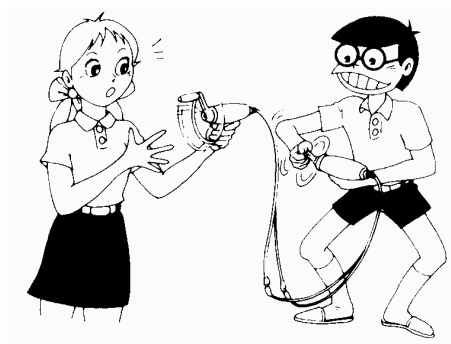
準備 手回し発電器 (2), 電球ソケット (1), 電球 (1)

手順

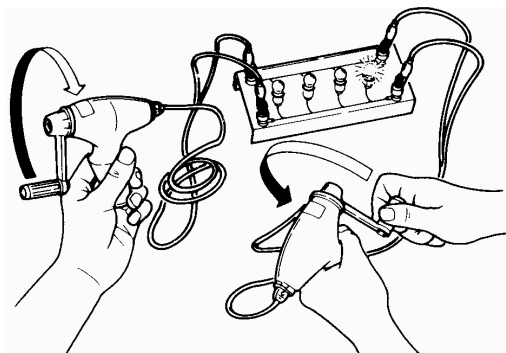
① 電球を付けた電球ソケット 1 個を手回し発電器に接続し，ハンドルを回転し，電球が点灯することで発電を確認する．



② 手回し発電器 2 台を接続し，一方のハンドルを自由にし，もう一方のハンドルを回転する．自由なハンドルの動きを観察する．特に二つのハンドルの回転速度に注意する．



③ 手回し発電器 2 台を接続し，電球を付けた電球ソケットも接続して，一方のハンドルを回転する．そして，二つのハンドルの回転速度に注意する．



考察

① 原理的にはモーターは発電機として使用できるが，実際にはそう簡単でない．手回し発電機の構造をよく観察し，発電に必要な条件を考えよ．

② 発電機は全てのエネルギーを電気に変えることが可能か？この実験結果を用いて説明せよ．

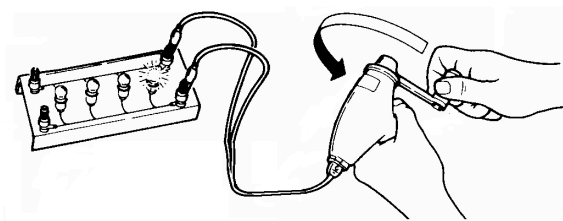
参考文献：中村理科工業製「セネコン（手回し発電器）」使用説明書

実験 発電と負荷

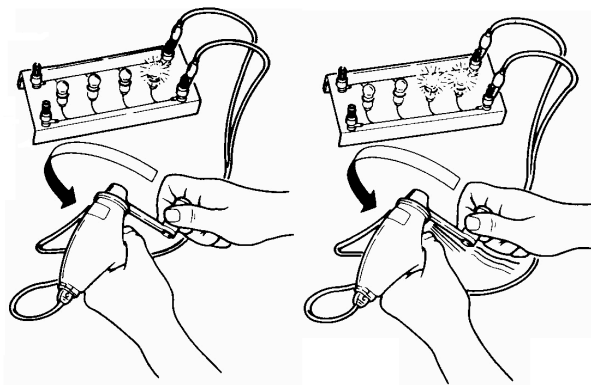
準備 手回し発電器，電球ソケット（3），電球（3）

手順

① 電球を付けた電球ソケット 1 個を手回し発電器に接続し，ハンドルを回転し，電球が点灯させる．



② 電球を付けた電球ソケット 2 個を手回し発電器に並列に接続し，ハンドルを回転し，電球が点灯することを確認する．そして，ハンドルを回転するのに必要な力の大きさを電球が 1 個の場合と比較せよ．



④ 電球を直列に接続した場合，ハンドルを回転するのに必要な力の大きさを並列の場合と比較せよ．

考察

- ① 風力発電のプロペラは風が弱くても回転すると考えられるか？
- ② 複数の電球を用いた実験で接続方法を並列から直列に変更すると，ハンドルを回転するために必要な力の大きさが変化した理由を考えなさい．

参考文献：中村理科工業製「セネコン（手回し発電器）」使用説明書

実験 風の観測

風向は風が吹いてくる方向をいい，北を基準に全周囲を 16 または 36 に分割して，16 方位または 36 方位で表す．風速は単位時間に大気が移動した距離をいい，測定値は 0.1m/s の位まで表す．風向・風速はたえず変化しているので，一般的には観測時刻の前 10 分間の測定値を平均し，その時刻の平均風向・平均風速とする（10 分間風程）．

表 1. 風向の 16 方位

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
北	北	東	東	東	南	南	南	南	南	西	西	西	北	北	北
北	東	北		南	東	南		南	西	南		北	西	北	
東		東	東	東		東		西		西		西		西	

瞬間風向・瞬間風速とはある時刻における風向・風速をあらわし，1 日の瞬間風速の最大値を日最大瞬間風速という．一方，10 分間平均風速の最大値を日最大風速という．

最大瞬間風速と最大風速の比を「突風率（Gust factor）」といい，突風に対する防災の指標となっている．突風率は 1.5～2 倍程度が一般的であり，例えば台風等で最大風速 20m/s と発表された場合，その 2 倍の 40m/s 程度の突風が吹く可能性がある．

○風速計の使い方

① 『MODE』キーを 4 秒間押すことで，電源のオン・オフとなる．この風速計は 34 分後に自動的に，電源がオフとなる．

② 風速モードには 3 種類あり，『+』キーを押すごとにモードが変換される．『WIND』モードは，現在の風速を示す．ただし，この現在の風速は，設定した時間当たりの平均風速であり，ここでは 2 秒間に設定してある．この実験ではこのモードを使用する．

『▲WIND』モードは電源を入れてからの最大風速を示す．そして，『φWIND』モードは電源を入れてからの平均風速を示す．

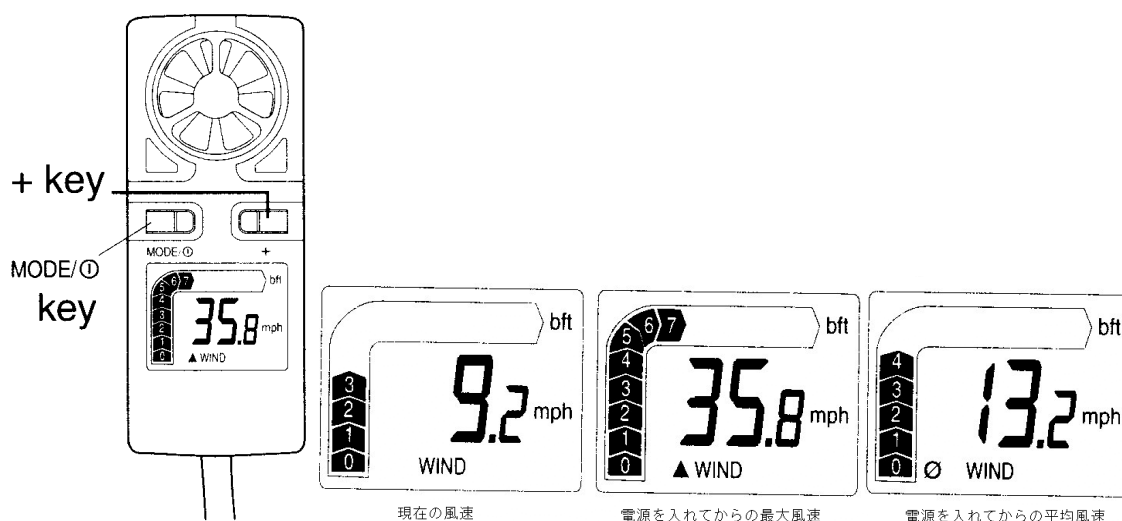


図 1. 風速計の操作画面（左）と 3 種類の計測モード（右）

③ ビューフォード風速階級（0～12）が表示画面のグラフ表示されている。

表 2. ビューフォード風力階級

階級	説明	Kts	m/s	km/h	mph
0	Calm（静穏）	0	0	0	0
1	Light Air（至軽風）	1	0.5	1.8	1.1
2	Light Breeze（軽風）	4	2.1	7.4	4.6
3	Gentle Breeze（軟風）	7	3.6	13.0	8.1
4	Moderate Breeze（和風）	11	5.7	20.4	12.7
5	Fresh Breeze（疾風）	17	8.8	31.5	19.6
6	Strong Breeze（雄風）	22	11.3	40.8	25.4
7	Near Gale（強風）	28	14.4	51.8	32.3
8	Gale（疾強風）	34	17.5	63.0	39.2
9	Strong Gale（大強風）	41	21.2	75.9	47.2
10	Strom（嵐）	48	24.7	88.9	55.3
11	Violent Strom（猛嵐）	56	28.8	103.7	64.5
12	Hurricane（ハリケーン）	64	32.9	118.5	73.7

④ EA-3010U 風速計は『MODE』キーを押すことで、温度計モードに替わる。温度計モードには、温度計測モード（Temperature）と体感温度モード（Wind chill）があり、『+』キーを押すごとに替わる。

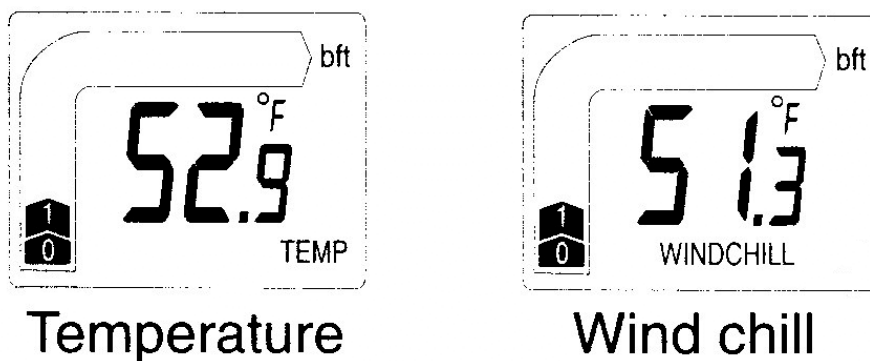


図 2. 温度の各モード

○各種設定の変更方法

風速（Km/h, mph, m/s, Kts）と温度（F と℃）の単位，現在風速の平均時間（2～10 秒）を設定することができる。

- ① 初めに電源を切る。
- ② 次に『MODE』キーを 6 秒間押し続けると，風速の単位が点滅を初め，設定モードにあることを示す。
- ③ 『+』キーを押すことで単位と時間の長さが変更でき，『MODE』キーで確定する。

実験 風速と発電

予備知識

パワー係数：風車により取り出されたエネルギー/風の全エネルギー

周速比：流入風速に対する翼先端での回転速度の比

ソリディティ (solidity)：翼の全面積/翼の回転面積

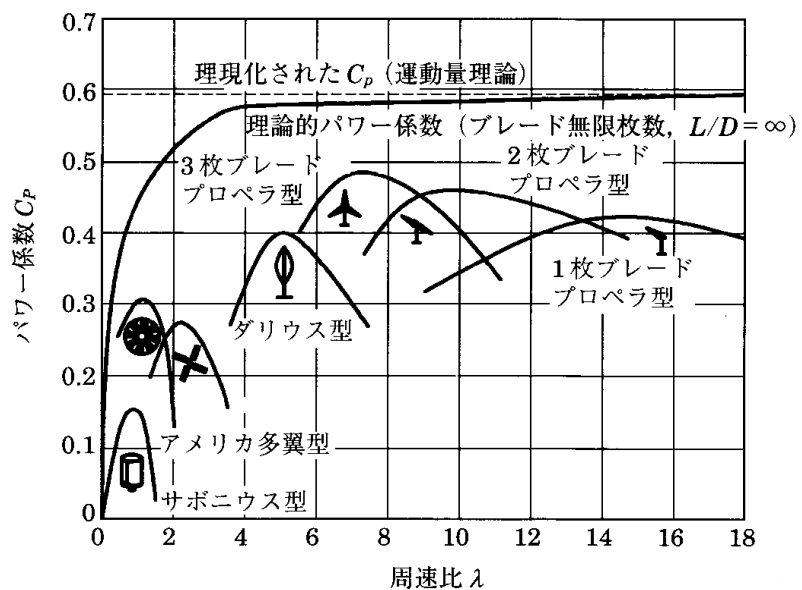


図 1. パワー係数と周速比

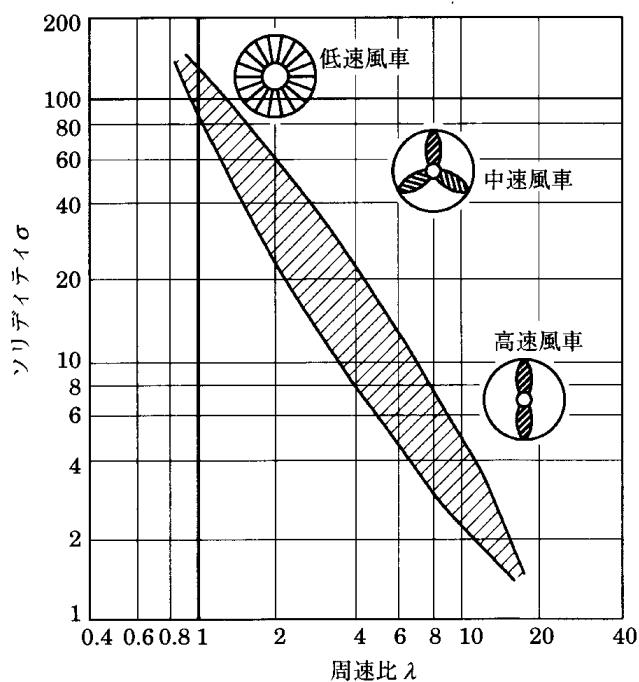


図 2. ソリディティと周速比

準備：送風機，風力発電機，風速計，電圧計，メジャー（1m）

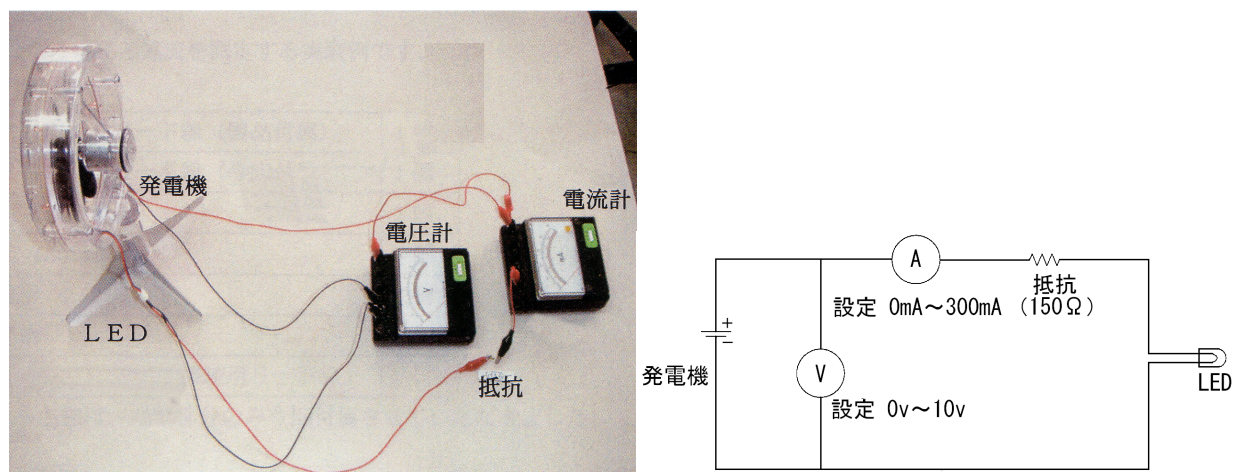


図 3. 実験回路

手順

- ① 送風機の風速を強にして，送風機からの距離と風速の関係を調べる．風速の値が安定しない場合は，数秒間の平均的な値を採用する．

距離 (cm)	10	20	30	40	50
風速 (m/s)					

- ② 送風機の風速を強にして，風力発電機の位置を 10 cm～100 cm まで変化させて，発電電圧の大きさを電圧計で調べる．電圧の値が安定しない場合は，数秒間の平均的な値を採用する．

距離 (cm)	10	20	30	40	50
電圧 (V)					
電力 (V^2/R)					

- ③ 送風機の風速を強にして，風力発電機を 10 cm の位置から次第に遠ざけていき，プロペラが止る位置を確認し，その場所の位置と風速を測定せよ．

送風機からの位置 () cm，風速 () m/s

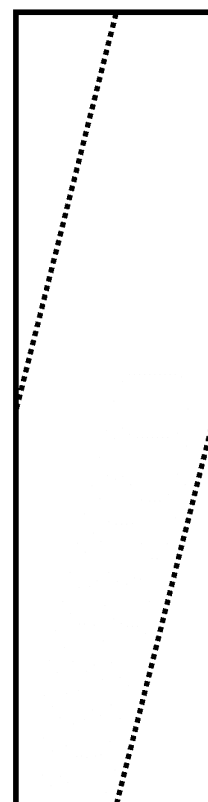
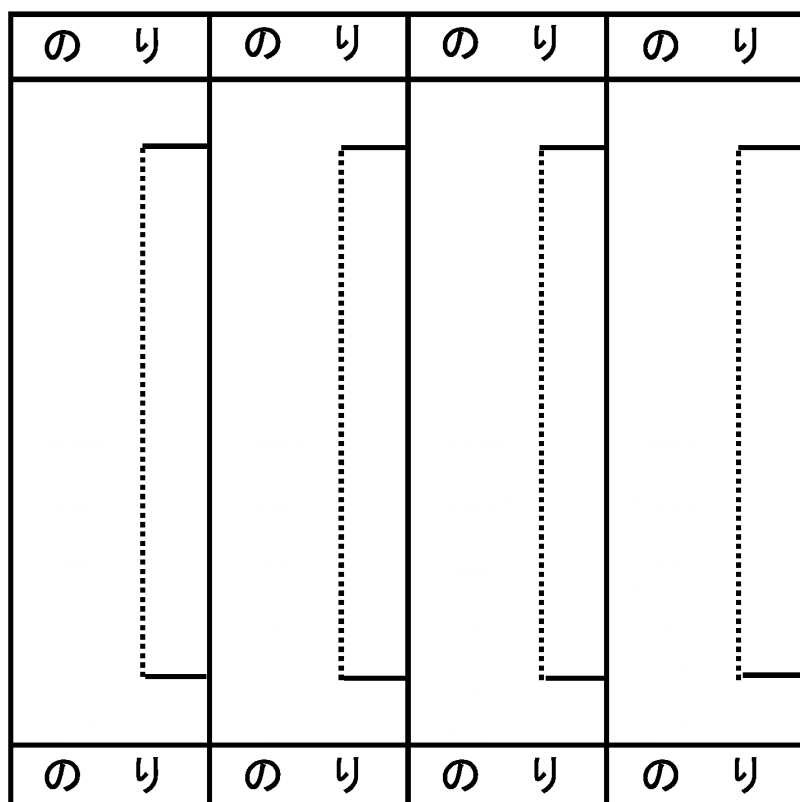
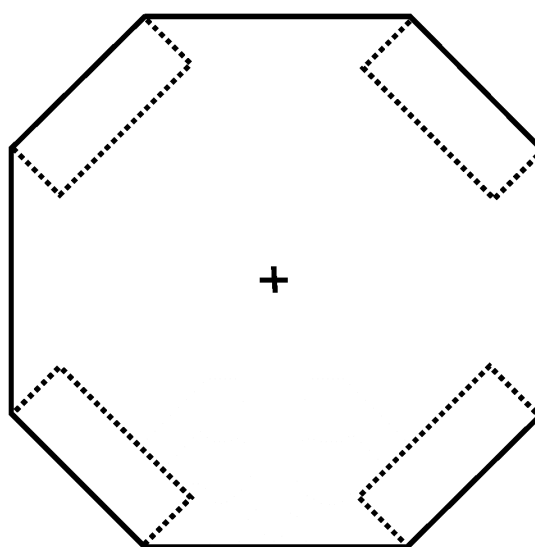
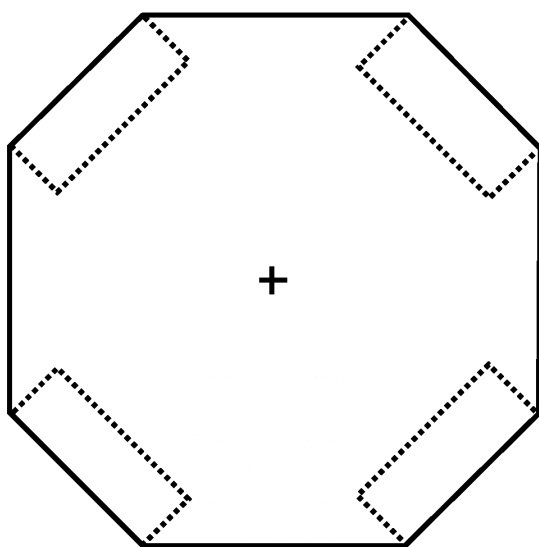
- ④ 送風機の風速を強にして，風力発電機を遠くから送風機に近づけていき，プロペラが回転し始める位置を確認し，その場所の位置と風速を測定せよ．

送風機からの位置 () cm，風速 () m/s

考察

- ①と②の結果を用いて，風速を横軸，電力を縦軸に取り，グラフを作成せよ．
- この風力発電機の発電可能な最低風速を決定せよ．
- プロペラの数 が 8 枚と 4 枚の場合を比較して，それぞれの特徴をまとめなさい．

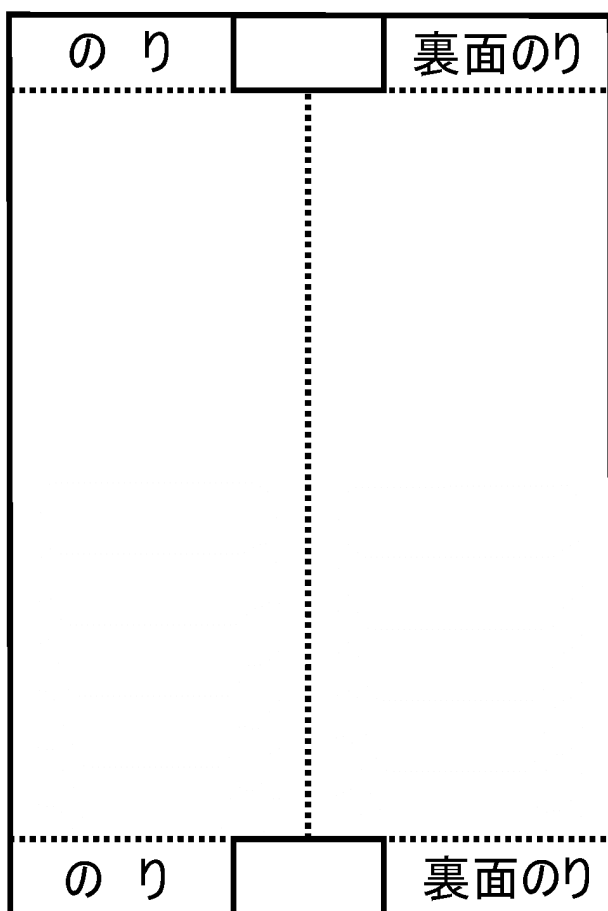
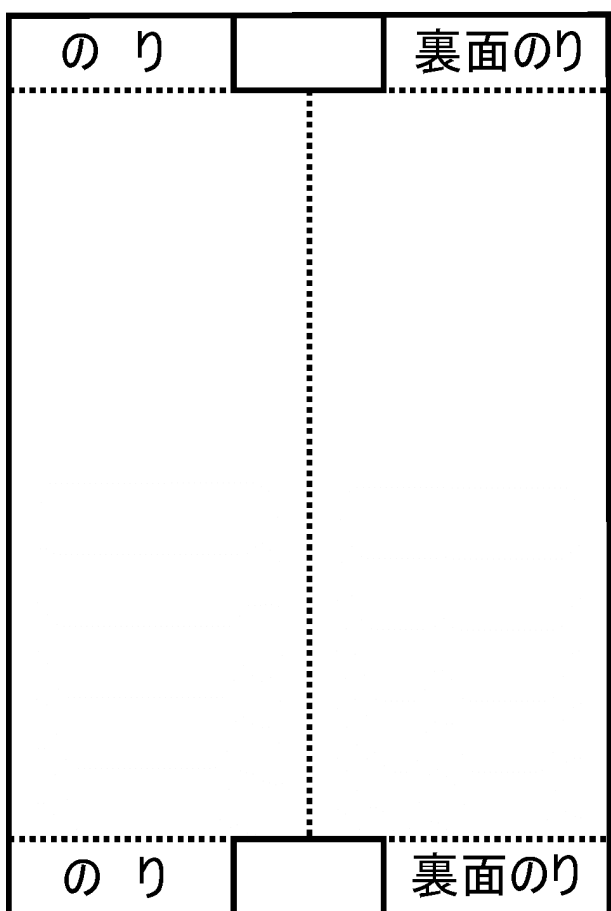
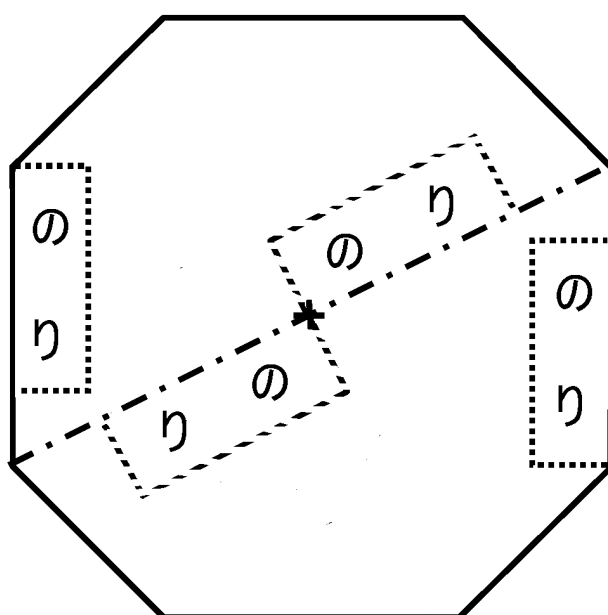
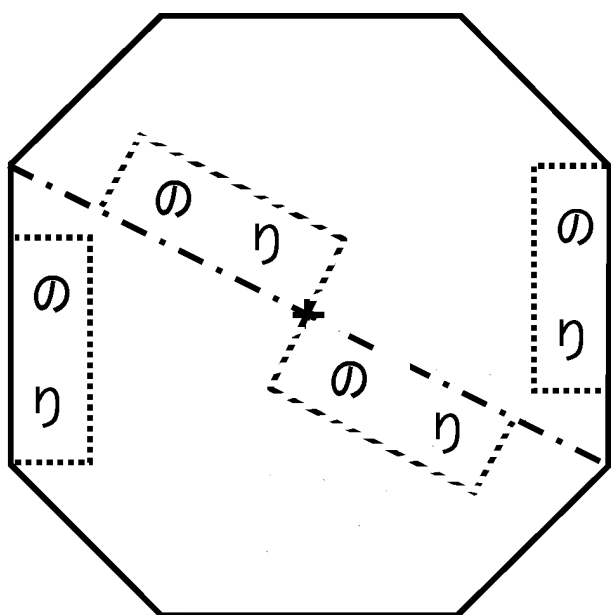
直線翼型風車とプロペラ風車



直線翼型風車

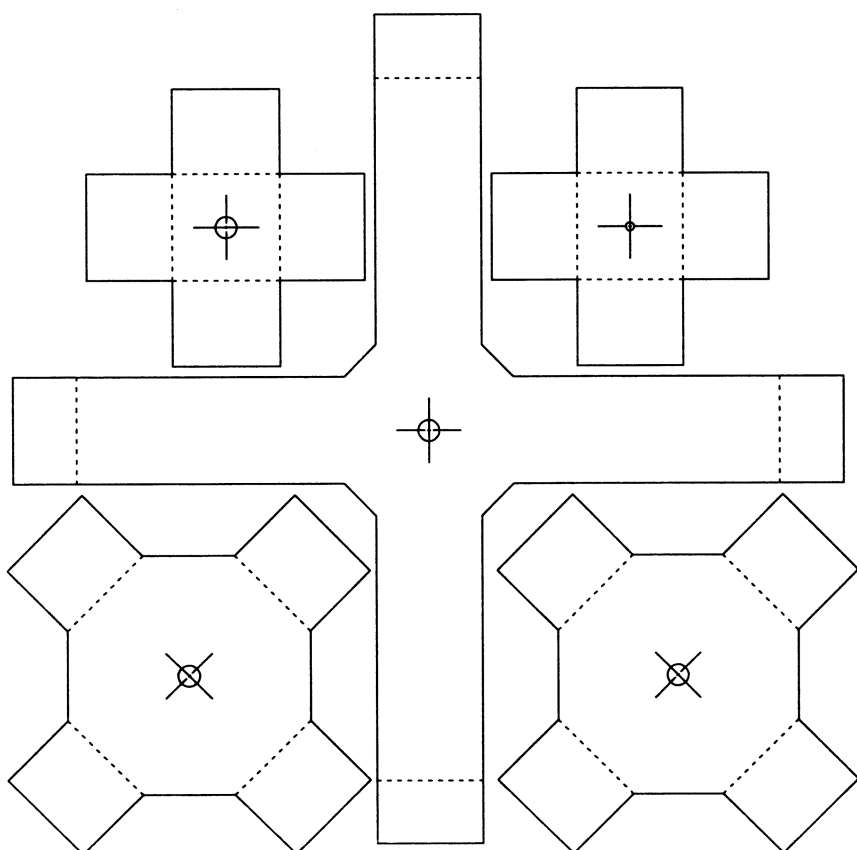
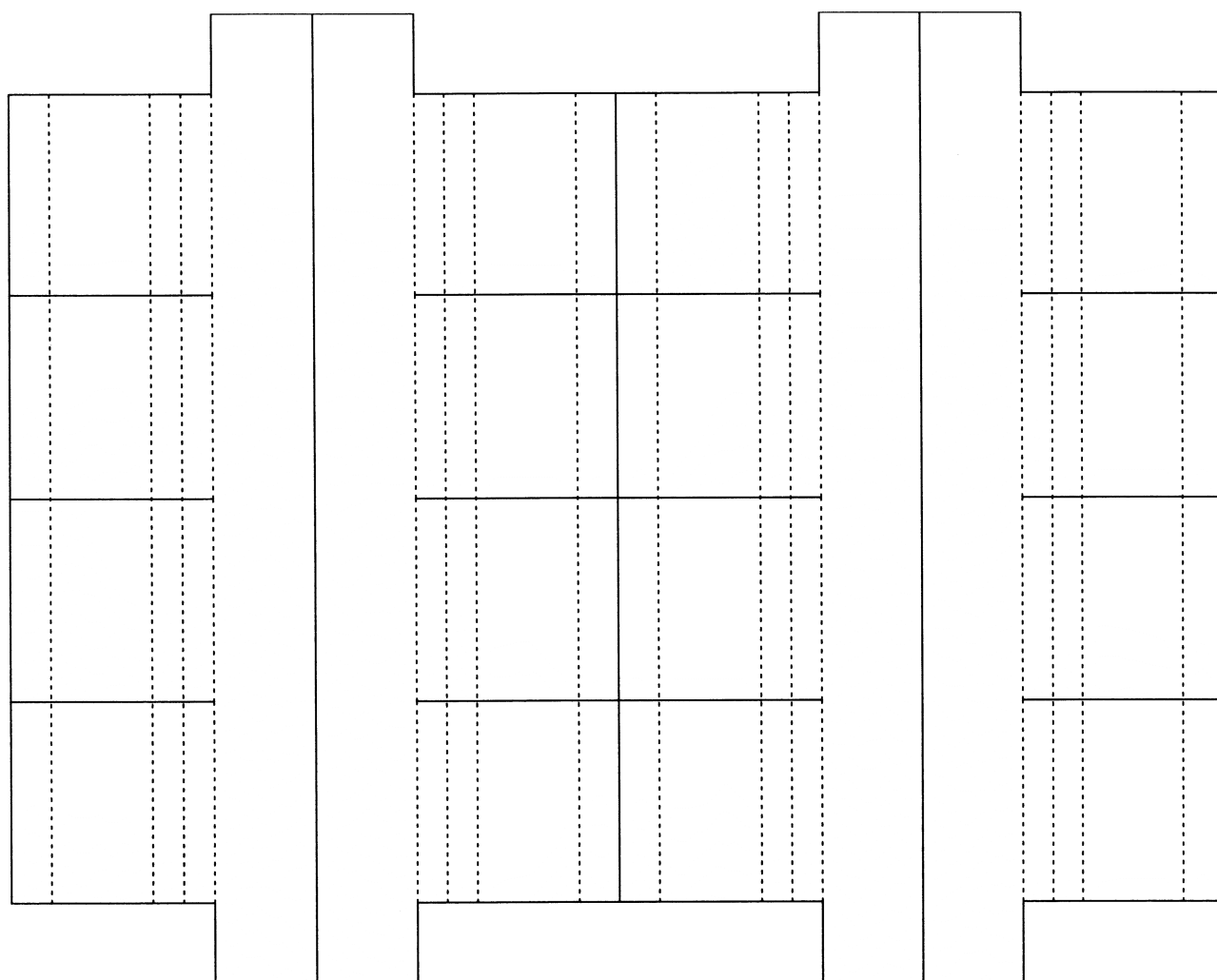
- ①実線にそって、切り抜く.
- ②点線にそって、折る.
- ③のりで貼って、風車を組み立てる.
- ④きりで軸木を通す穴を開け、軸木を通す.

桜美林大学大気環境研究室



サボニウス型風車

- ①実線にそって、切り抜く。
- ②点線にそって、折る。
- ③のりで貼って、風車を組み立てる。
- ④きりで軸木を通す穴を開け、軸木を通す。



ものつくり大学 堀研究室
ペーパークラフト
ドライバー型風車

制作
堀研究室 近藤 亮介

文部科学省所管科学技術振興機構「理数系教員指導力向上研修」事業
教員研修用テキストⅢ 『風と風力発電』

2008 年 8 月 7 日 発行

発行 エネルギーと環境教育プロジェクト
桜美林大学自然科学系
〒194-0294 東京都町田市常盤町 3758
電話：042-797-8563
印刷 桜美林学園消費生活協同組合
〒194-0294 東京都町田市常盤町 3758

(本テキストの内容を無断で転載することはできません.)