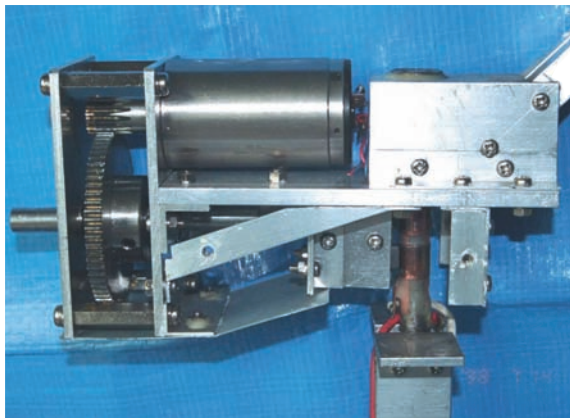


カラーアルバム 写真で見る手作り風力発電機

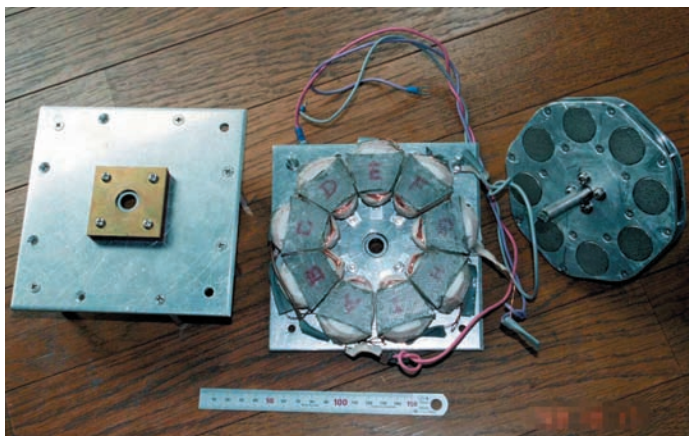


(a) 内部のようす

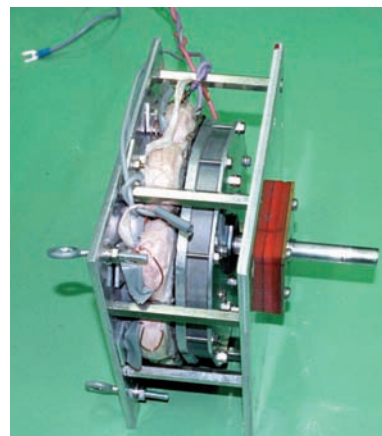


(b) 稼働中のようす

〈写真1〉 コアレスDCモータを使った風力発電機(第2章)



(a) 構成部品



(b) 完成した発電機

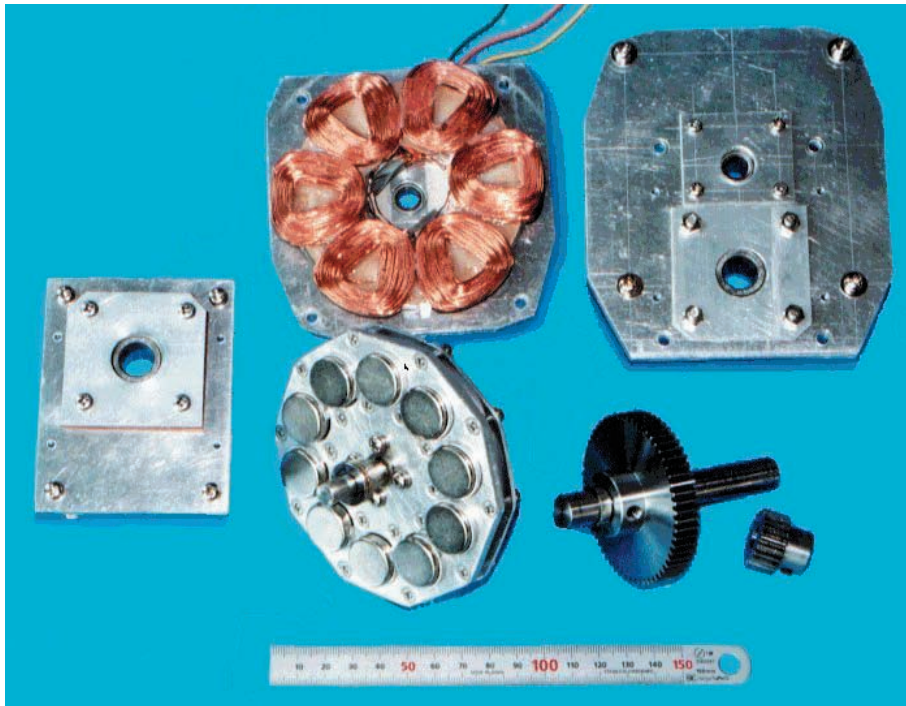
〈写真2〉 試作第1号発電機(第2章)

〈写真3〉

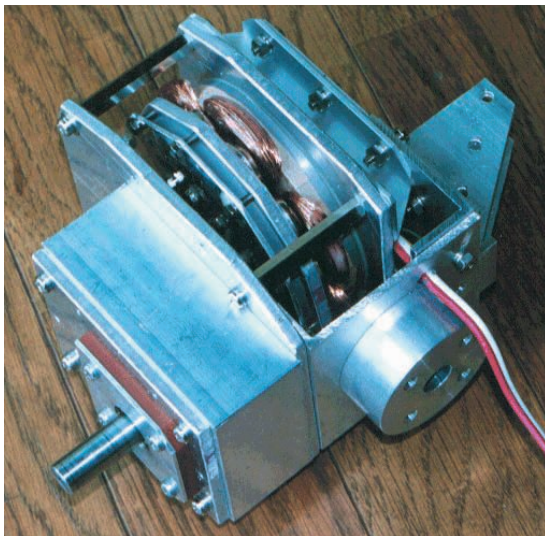
発電機の製作に使ったオリエントコア(電磁銅板)



見本



(a) 構成部品



(b) 完成した発電機



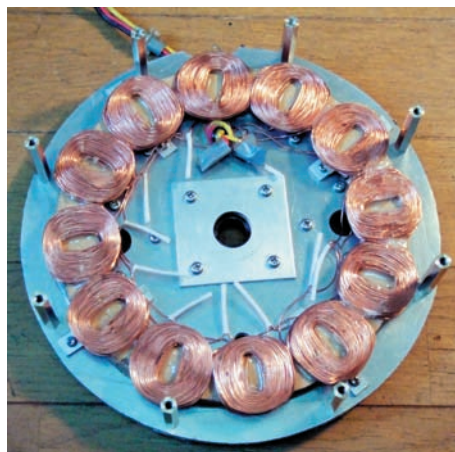
(c) 稼働中のようす (左下は自作のプロペラ型風速計)

〈写真4〉ギヤによる増速型発電機(第2章)

見本



(a) ロータ



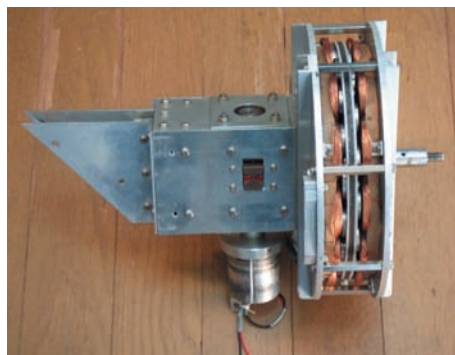
(b) コイル



(c) スリップ・リング付きのシャフト

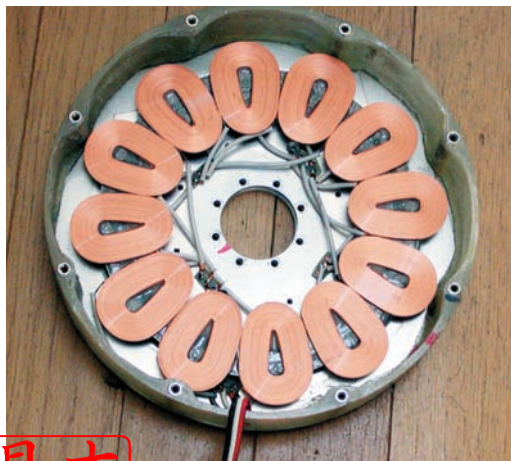


〈写真6〉平角線による巻き線(第3章)

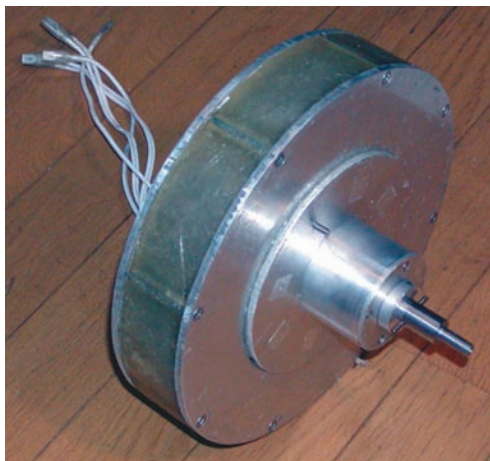


(d) 完成した発電機

〈写真5〉500W級発電機(第2章)



(a) 内部のようす



(b) 完成した発電機

見本

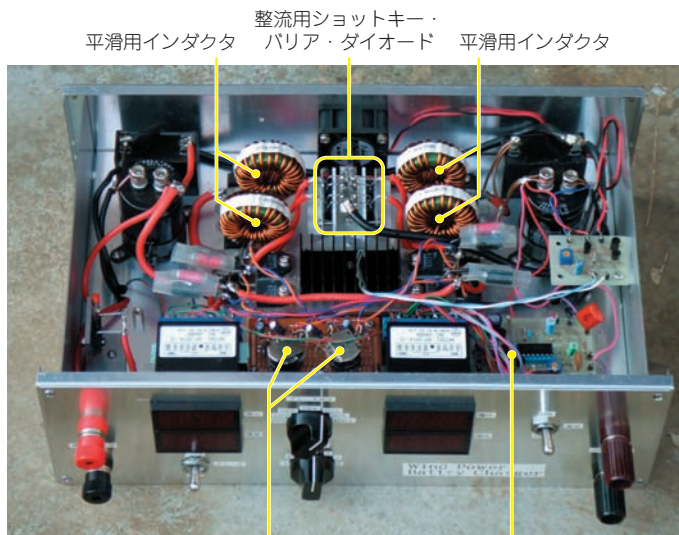
〈写真7〉700W級発電機(第3章)



〈写真8〉 製作した発泡スチロール製1.2m ブレードを取り付けた風力発電機(第5章)



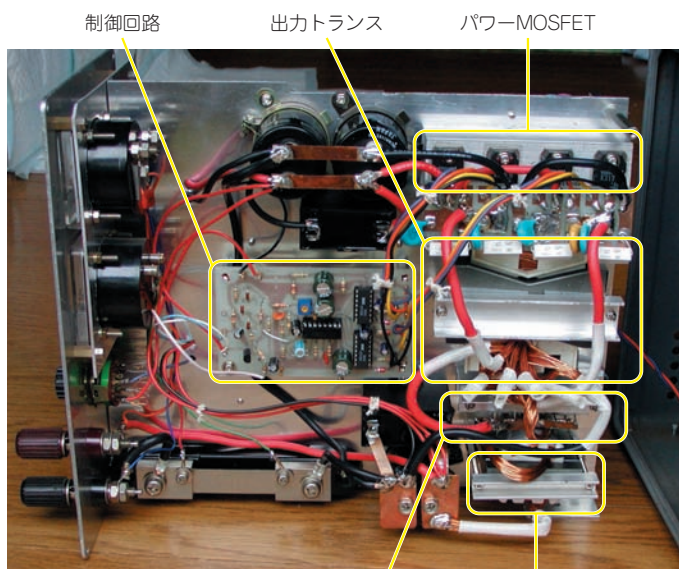
〈写真9〉 製作したFRP製ブレード(第5章)



平滑用インダクタ 整流用ショットキー・バリア・ダイオード 平滑用インダクタ

パワー-MOSFETドライブ・トランス 制御回路

〈写真10〉 製作した300W級充電制御機の内部(第7章)



制御回路 出力トランス パワー-MOSFET

整流用ショットキー・バリア・ダイオード 平滑用インダクタ

〈写真11〉 製作した700W級充電制御機の内部(第7章)

種類と特徴，原理と用語， 取り出しているエネルギーなど

◆ 第1章

風力発電の基礎

1-1 風力発電機の種類と特徴

風を利用した風車の歴史は古く、数千年前には利用されていたといわれます。風車の機械的動力は、製粉や揚水に利用されてきました。しかし、現在ではそのほとんどが発電に使われています。風のエネルギーを電気エネルギーに変換することにより、揚水や製粉のように限られた用途と違って、加工して多方面で活用できるようになったといえます。

このようなことから風車は「風力発電」、「風力タービン発電」などと呼ばれるようになっていきます。

■ 風力発電機の種類

風力発電機といってもいろいろな種類があります。まずは羽根の形態ですが、プロペラ型、オランダ風車型、多翼型、ダリウス型、サボニウス型など、いろいろな形があります。

風車の種類は、風車の回転軸が水平に置かれているか、垂直に置かれているかによって「水平軸型風車」と「垂直軸型風車」に大きく分類されます。

垂直軸型風車は、風車の回転面を風向に追尾させる方向制御機構が不要になる点が大きな特徴といえます。

● プロペラ型風車

風力発電に使用される最もポピュラなタイプは、写真1-1と図1-1のようなプロペラ型風車です。プロペラ型は、羽根の回転軸が水平になるため水平軸型風車と呼ばれますが、ブレードは飛行機のプロペラと同じ断面をもっていて高速回転をします。

流体力学的には風車の翼数が少ないほど高速回転するとされ、中には高速に回転させるため1枚羽根や2枚羽根の風車もありますが、一般的にバランスが優れている3枚羽根が圧倒的に多く使われています。回転数より、むしろトルクを大きくするため5～6枚羽根が使われることもあります。

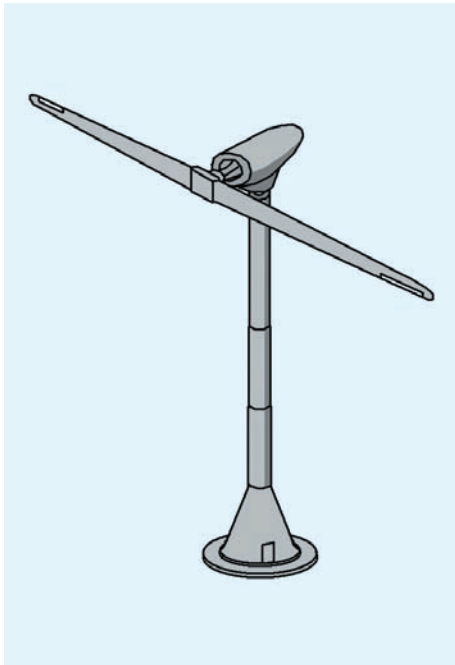
プロペラ型は高速回転に優れた特性をもっていますが、反面で騒音が大きいとか、首振り運動による

低率ロスを抱え、カットイン風速(3～4 m/s)がやや高くなるという問題があります。

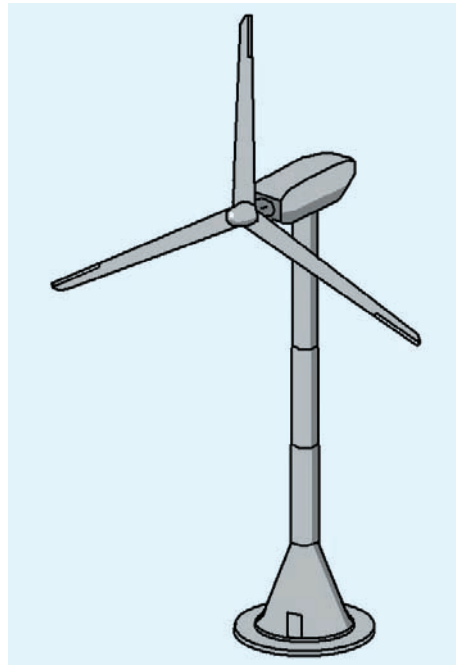
しかし、プロペラ型風車は、風力発電機において最もポピュラな存在で、マイクロ風車から大型風車まで多用され、最近ではブレードの直径が70 m以上あるものも登場しています。今後、大型風車は時



〈写真1-1〉 プロペラ型風力発電機の実例(神奈川県三浦岬)



(a) 2枚羽根



(b) 3枚羽根

見本

〈図1-1〉^Kプロペラ型風力発電機

代の要請に応じて大型化するとともに、山上、海洋上にも設置されていくと思われます。

● オランダ型風車

よく知られている風車としては、写真1-2のようなオランダ型風車があります。

中世以降から田園風景の中で、風車小屋に取り付けられた4～6枚羽根を風の力で回し、その力是小屋の内部に設置された揚水ポンプを駆動したり、穀類の脱穀・製粉処理に使われてきました。羽根は木製で、障子の格子のようになっており、そこに布を巻いて風を受ける構造になっています。季節ごとの風向きが変わりますが、当時は人力により風の来る方向に羽根を向けていました。もちろん、風が強くなるときは布を外せばよいわけです。歴史的に古くから実用化されており、現在でも観光用として活躍しています。

回転速度は遅いものの、トルクが大きく、電気時代以前に風の力を物理的回転エネルギーに変換して利用しようとした英知がうかがえます。

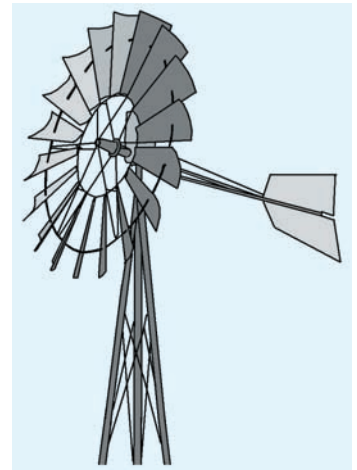
● 多翼型風車

アメリカの西部劇に登場する図1-2のような多翼型風車があります。この風車は羽根が沢山付いており、約20枚の羽根をもつ風車で、主としてアメリカ中西部の農家や牧場を中心に揚水用として使用されてきました。この風車は羽根が多いため回転数は低くなりますが、比較的トルクが大きくなるという特徴があります。したがって、揚水用に適しているといえます。今でもアメリカの田舎を旅行すると見かけることがあります。

回転力が強く、音は静かであり、アマチュアでも容易に風車を取り付けたり、修理もできることから、海外ではボランティア活動において中小型の揚水動力源として活用されています。

● サボニウス型風車

垂直軸型風車の代表としてサボニウス型風車があります。発明者であるフィンランド人の名前を取ったもので、図1-3のように、半円筒型の羽根2枚で構成され、左右の羽根を互い違いに円周方向に多少



〈図1-2〉^K多翼型風車

見本

〈写真1-2〉オランダ型風車の実例

重なり合う部分を残し、ずらして組み合わせたものです。したがって、二つのバケット(半分割された円筒)の間を通り抜ける風が、反対側バケットの裏面に流れ込むようにすることにより、回転方向に押す作用と向かい風の抵抗を抑える力となり、回転効率を上げています。写真1-3は足利工業大学構内に設置されている風車で、サボニウス風車を3段に分け、 60° ずつずらして配置されています。

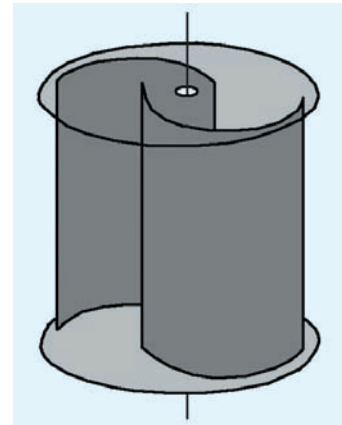
この風車はプロペラ型などの風の「揚力」を利用するのとは違って「抗力」が主体となっている点が大きく違います。したがって、後述しますが、周速比はほぼ1となり、回転数は低くなり、音は静かで、トルクが比較的大きく、揚水などに適しています。特徴は、風向に関係なく回転させられることです。

● ダリウス型風車

同じく垂直軸型風車としてダリウス型風車(図1-4、写真1-4)があります。これも発明者の名前を採



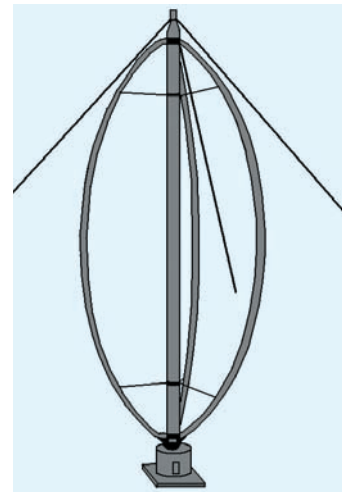
〈写真1-3〉
サボニウス型風車の実例
(足利工業大学)



〈図1-3〉^Kサボニウス型風車



〈写真1-4〉ダリウス型風車の実例



〈図1-4〉^Kダリウス型風車

見本

ったもので、比較的新しい風車です。羽根は2～3枚が使用され、サボニウス型の抗力を利用するのと違って揚力型であるため、回転数が非常に大きくなるという特徴があります。

また、風向に無関係なため方向舵が不必要ですが、停止状態で風から得られるトルク(起動トルク)は極めて小さいため、自力での回転開始が難しいという問題があります。そのためモータで起動したり、サボニウス型風車と組み合わせて起動性能を向上させるなど、さまざまな工夫が試されています。

形がスマートで珍しく、人目を引くことからモニュメントなどに適していますが、施工上の難しさがあ、安全面や安定支持のため外枠囲みを設ける必要があるなど今一歩です。

● ジャイロ・ミル型風車

ダリウス型の改良型といわれ、飛行機の翼と同じ断面をもつ垂直翼型風車です。ダリウス型と同様に起動トルクは極めて小さく、サボニウス型風車と組み合わせて起動性能を向上させるなどの工夫が必要ですが、回り始めると周速比は高く、回転トルクも高く、注目度が高い風車です。

図1-5のように構造がやや複雑であり、高速回転することから人間の出入りが予想される場所や手狭な作業環境での設置は安全面から問題があります。また、乱流や強風時における過回転などへの危険対策やカットアウト装置など、コスト面の課題が残されています。今後の「強風対策」への一層の改善が望まれています。

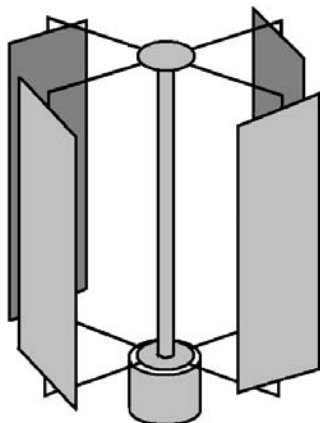
● クロス・フロー型風車

細長い湾曲状の羽根を、上下の円板外周縁部に適度な角度を付けて等間隔に多数設け、外部の風が羽根の隙間から内部空洞部を貫流して、反対側(風下)の羽根の隙間から外部へ排出しつつ、一定方向に回転する風車です。

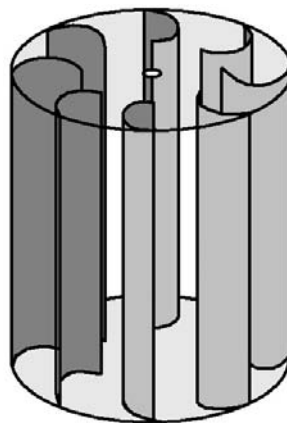
風に対しては無指向性で、全方位からの風を受けて回転します。図1-6において前方から風が来たとき、左半分は風車を回転する方向に有効作用しますが、右半分は回転方向運動に抵抗作用となり、起動トルクが大きいという特徴をもちますが、回転速度は大きくなりません。回転速度が低いので、トルクは高く、騒音は極めて静かであり、エアコンなどの送風用に多用されています。

以上のように、風力利用の羽根の形状によっていろいろな方式がありますが、効率は何とんでも水

見本



〈図1-5〉^Kジャイロミル型風車



〈図1-6〉^Kクロス・フロー型風車

平軸プロペラ型風車が最も大きく、またポピュラです。したがって、この方式の風力発電機の製作に挑戦しました。

1-2 プロペラ型風力発電の原理と用語

プロペラ型風力発電機に使われる「風車」は、風車以外にもプロペラ、風力タービン、回転羽根車、翼車、ロータなどいろいろな呼び方がありますが、個人によって抱くイメージが違うだろうと思います。一般にプロペラは航空機のような原動力によって風を起こして推進力を得る場合に使用され、風車はその逆で、風の運動エネルギーを機械的エネルギーに変換する場合に使われます。また、海外では風車タービン(wind turbine)という場合が多いようです。

さらに、風車を構成する羽根のことを「ブレード」とか、「風車ブレード」といいます。つまり、風車とは回転軸に複数枚の羽根を取り付けたものをいうわけです。航空機でブレードに相当する部分は翼といい、翼型、翼幅、翼面積、翼弦などという用語が使われますが、風車の場合にも理論的には同じであり、航空機の用語がしばしば出てきます。本書では「風車またはロータ」と「ブレードまたは羽根」と呼ぶことにします。

プロペラ型マイクロ風力発電は、図1-7のように、風を受けるプロペラ型風車、回転エネルギーで発電するための発電機、風車を風の吹いて来る方向に向けるための方向翼(尾翼)、さらに、これらを風力の強い高所に設置するための支柱(タワー)から構成されています。

■ 風力発電機の基本用語

このような風力発電機を設計・製作する際に使用される主な用語を以下に示します。

● ブレード(羽根)

プロペラ型風車の羽根のことで、この大きさ(直径)によって得られるエネルギーが決まります。「タービン・ブレード」ともいわれ、最近の風車では高速で回転します。

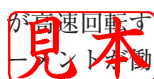
通常はハブに近い部分は幅が広く、先端が狭い構造です。また、ブレード断面形状は、風の当たる前面は風に対して傾斜をもっており、その角度はハブに近い中心部が大きく、先端部を小さくするという「ひねり」をもたせています。ブレードは風があれば常に回転しており、風が強くなると高速で回転します。したがって、機械的に耐久性があり、できるだけ軽量にする必要があります。従来、マイクロ風力発電のブレードには木材がよく使用されていましたが、最近ではFRPが多用されています。

● ロータ

ブレードを組み合わせた風車はロータともいわれ、回転面はいわば風のエネルギーの収集器の働きをします。ロータの直径が大きくなればなるほど、風を受ける面積(受風面積)も大きくなります。受風面積から、特定風速の風のエネルギーは計算できます。それに風車のもっている固有のエネルギー変換効率を掛けることで、発生する電気エネルギー量を計算できます。

● ハブ

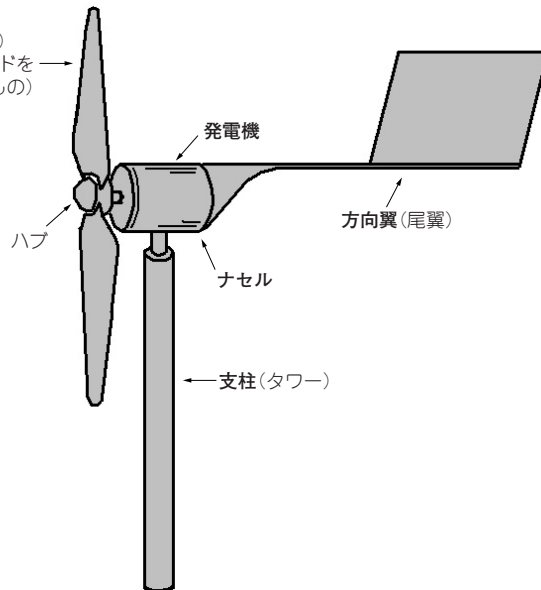
図1-7のように、風車をロータ軸に取り付ける部分をいいます。風車が回転しているとき、ブレードが高速回転することで大きな遠心力が働きます。また、風向が急に変わると、その回転軸には回転モーメントが働き、回転軸の方向を保持しようとする大きな力がかかりますが、これらはハブ部に作用します。ハブ部はロータの回転によって、このような力が掛かる部分で、これに耐えられる十分な強度が



〈図1-7〉K

プロペラ型風力発電機の構成

ブレード(羽根)
ロータ(ブレードを
組み合わせたもの)



要求されます。

また、強風時の対策として、ブレードの取り付け角度(ピッチ角度)を変化するピッチ制御が行われますが、その場合はハブ内部に制御機構を設けます。

● 発電機

風力発電機の最も重要なパーツで、ロータ・ブレードで得られる機械的エネルギーを電気的エネルギーに変換するものです。とくに、風力発電機では低回転数で効率の良い発電機が必要になりますが、これについては次章以降で詳しく述べます。

● ナセル

ロータ軸、発電機、ヨー機構などを収納する部分です。

大型風車では、この部分に増速器をはじめ、発電機、制御機構などを収納します。マイクロ風力発電機では、この部分に電気出力を取り出すためのスリップ・リングや整流器、または強風時のブレーキ装置などを収納します。

● アップ・ウインド型と方向翼(尾翼)

水平軸型風力発電では、ブレードの受風面を常に風の流れに直角にする必要があります。そのために、風車後部に尾翼を付け、常にブレード面を風に向けます。このような風の吹く前面にブレードを設置する図1-8(a)のような方式を「アップ・ウインド型風車」といいます。

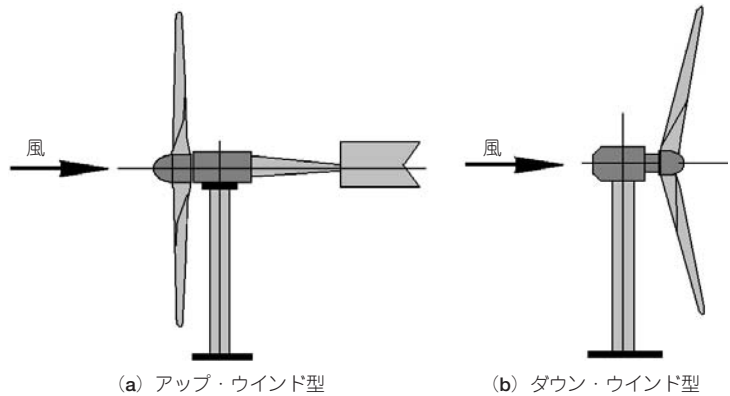
● ダウン・ウインド型

アップ・ウインド型に対し、図1-8(b)のように風のブレードに作用する抗力を利用して、風向制御。図1-8(b)の後方にブレードを設置する方法を「ダウン・ウインド型風車」といいます。この方式は方向翼が不要で構造が簡単になりますが、風車が支柱塔の後方にあるので、風の流れが乱され、ブレードの振動や騒音の原因になることがあります。

見本

＜図1-8＞^K

アップ・ウインド型とダウン・ウインド型風車



● 周速比(λ)

周速比は、プロペラ・ブレードを設計するときに最も重要な性能パラメータで、ブレードの任意の位置の回転方向の速度 V_b [m/s] と、風速 V_w [m/s] の比(V_b/V_w)で定義されます。

通常、ブレード最先端の周速比は、TSR(Tip Speed Ratio) と呼ばれ、高速型ブレードの場合は7～10の値となります。

周速比λは次式で表されます。

$$\lambda = \frac{\omega r}{V_w} = \frac{\pi n r}{30 V_w} \dots\dots\dots (1-1)$$

ここで、 ω ：角速度 [rad/s]、 V_w ：風速 [m/s]、 n ：風車の回転数 [rpm]、 r ：風車ブレードの半径 [m]

上式から、例えば風速が10 m/s、ブレードの半径が1 mで、ブレードが1000 rpmで回転すると、周速比λは約10.5になります。そのときのブレード先端の速度は、105 m/sということになり、非常に高速であることがわかります。ブレードが高速で回転すると、騒音を発生したり、浮遊物との衝突で破損するなどの問題が発生します。したがって、一般にはブレードの先端周速は50～60 m/s程度に抑える必要があります。

● ソリディティ比(σ)

受風面積とブレード面積を図1-9の各面積で表すとき、ソリディティ比(solidity ratio)は、次のように定義されます。

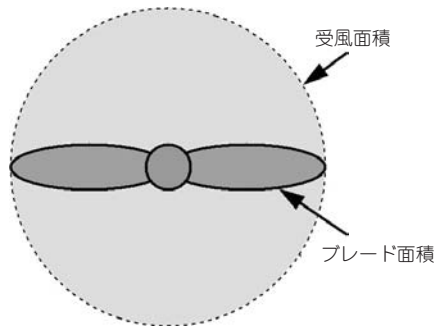
$$\sigma = \frac{A_b}{A_t} \dots\dots\dots (1-2)$$

ここでσ：ソリディティ比、 A_b ：ブレード面積 [m²]、 A_t ：風車受風面積 [m²]

つまり、風車の回転面積と全翼面積の比、または風車直径と翼弦長の和の比として定義されます。

ソリディティ比が1ということは、ブレードの面積と風車の受風面積が等しいことを意味し、多翼形風車はソリディティ比が1に近いといえます。一方、最近の高速型風車では、ソリディティ比が0.05～0.1の小さい値です。

一般的に、ブレードの周速比はソリディティと強い相関があり、ソリディティが小さい風車は周速比が大きくなり、高速回転型の風車になります。逆に、ソリディティ比の大きな風車は、周速比が小さく、



〈図1-9〉 λ ソリディティ比

多翼型風車のように低回転で、トルクが大きくなります。

● カットイン風速，カットアウト風速，定格風速

風力発電機において、風速と出力の関係は図1-10のようになります。つまり、風が強くなると風車が回り始め、発電を開始しますが、この発電を開始するときの風速を「カットイン風速」といいます。

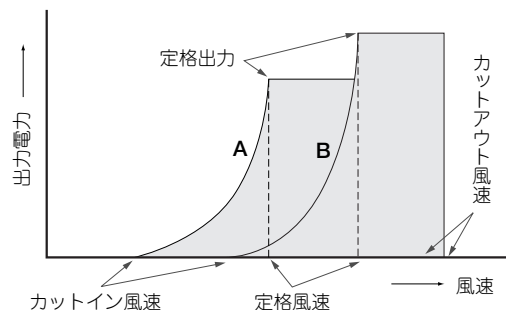
図は2種類の発電機の出力特性を示しました。曲線Aはカットイン風速が小さく、定格出力も小さい例、曲線Bの発電機はカットイン風速が大きく、定格出力も大きい例です。

一般的にカットイン風速は小さいほうが良いのですが、風車発電機を設置する場所の風況(平均風速や最大風速)によって最適化が図られます。

図1-11は内外のマイクロ風力発電機130機種を調べたカットイン風速の定格分布です。カットイン風速はだいたい3～3.5 m/s程度になっています。また、図1-12は同様に最大定格風速の分布で、9～12 m/sでした。

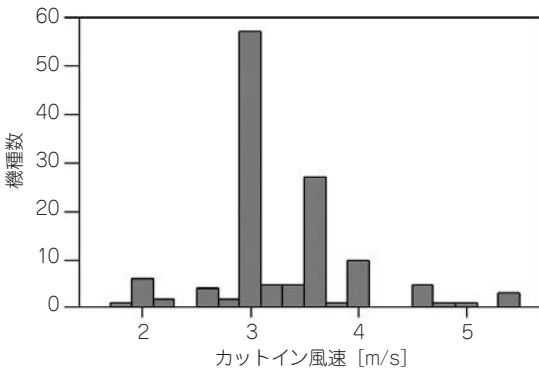
それぞれの風車は、強風時に破損から守るために、何らかの発電終了最大風速の値をもちます。風から得られるエネルギーは後述するように風速の3乗に比例します。したがって、上限である定格出力は発電機の最大許容値で決められます。図1-10のように定格風速、定格出力に達して、さらに風速が大きくなったとき、何らかの方法でそれ以上の出力が出ないように停止させますが、発電を停止する風速を「カットアウト風速」といいます。

マイクロ風車では、カットイン風速が2 m/s以下のものがありますが、一般的には図1-11のように3

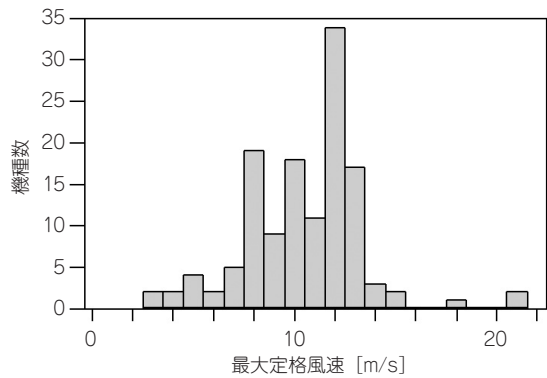


〈図1-10〉カットイン風速とカットアウト風速

見本



〈図1-11〉カットイン風速の定格分布(内外のマイクロ風力発電機130機種)



〈図1-12〉最大定格風速の分布

～3.5 m/s位が普通です。風況があまり良くない年間平均風速の小さい地域では、よりカットイン風速が低い風車が有効です。また、カットアウト風速は通常12～20 m/sで、強風時の発電システムの強度などによって決められます。

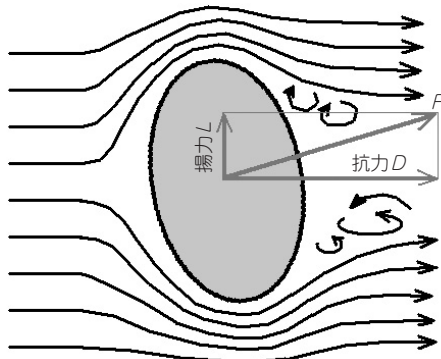
● 揚力と抗力

空気、つまり流体が物体に及ぼす力には「抗力」(drag)と「揚力」(lift)があります。図1-13に示すように一様に流れる流体の中に置かれた物体に対して、流れと同じ方向に作用する力を抗力といい、流れに対し直角に作用する力を揚力といいます。

やや左に傾いた楕円型ボールに流体(風)が当たると力 F が働きますが、その力は流体の流れと平行ではありません。流体の流れに平行な抗力 D と直角に作用する揚力 L の合成が力 F となるわけです。

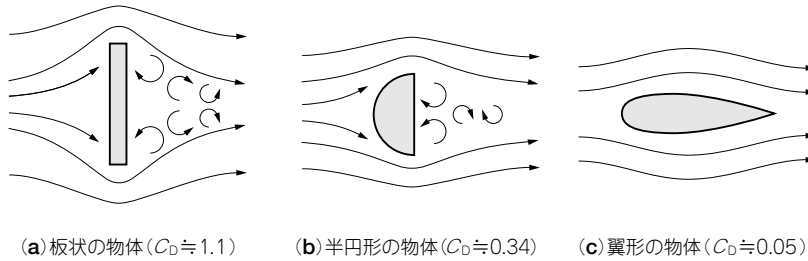
この揚力 L と抗力 D を無次元化して、次式のように揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D として定義されます。つまり、揚力と抗力の大きさを表す係数です。

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V_w^2 A_t} \dots\dots\dots (1-3)$$



〈図1-13〉^K揚力と抗力

見本



〈図1-14〉 抗力係数

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V_w^2 A_t} \dots\dots\dots (1-4)$$

ここで、 L ：揚力 [kgf]， D ：抗力 [kgf]， ρ ：空気密度 [kg/m³]， V_w ：風の相対速度 [m/s]， A_t ：風車受風面積 [m²] ($= \pi r^2$ ， r はブレード半径)

これらの係数 C_L と C_D の値は物体(翼)の形状によって値が違ってきますが、計算では求めることはできず、通常は与えられた翼型を風洞によって測定して求めます。

代表的な抗力係数を図1-14に示します。板状の物体の抗力係数が約1.1であるのに対し、図(c)のように風が流れやすいブレード形状では抗力係数が約0.1以下となり、抗力が非常に小さくなるのがわかります。

■ プロペラ型風力発電の原理

さて、風車はなぜ回るのでしょうか？まずは、その原理を簡単に説明します。プロペラ型風車は「揚力」から回転力を得ていますが、その内容をもう少し詳しく説明しましょう。

● 揚力と抗力

3枚羽根プロペラと、そのブレードの断面を図1-15と図1-16にそれぞれ示します。

ブレードは風を受けて回転していますから、相対的な風の方向は、図1-16のように斜め方向になります。相対的な風の方向に対して働く力は「抗力」で、相対的な風の方向とブレードは迎角をもっており、これによって相対的な風の方向に対し直角な力が働きます。これが「揚力」です。

今、図1-16のように相対的な風の方向に対してブレードの角度 α (迎角) を小さくすると、ブレードは風の抵抗が少なくなり抗力は小さくなりますが、揚力は非常に大きくなります。一般に抗力に対する揚力の比は10～50倍にもなります。

同図の揚力 L と抗力 D のブレード回転方向の力を分析すると、回転方向の力は揚力 L_t から抗力成分 D_t を差し引いた値です。つまり、抗力より揚力が大きいので、ブレードは回転方向の力を受けます。ブレードの設計では、この揚力をできるだけ大きくし、抗力を小さくする工夫がされています。

また、この揚力は相対的な風の流速の2乗に比例して発生するので、ブレードが速く回れば回るほど相対速度は大きくなり、より大きな揚力が発生します。この揚力を大きくするため、最近のプロペラ型風車は高速回転するように設計されているわけです。しかし、早く回れば回るほど抗力も増えますから、必ずしも早く回れば良いともいえなくなります。

見本