

建物に融合する都市型 風力発電装置の開発

丸 山 勇 祐

志 村 正 幸

義 江 龍一郎

佐 竹 晃

要 旨

近年、資源の枯渇・地球温暖化等の環境問題が顕在化しており、自然エネルギー活用が注目されるようになってきている。自然エネルギーの中でも風力エネルギーは無尽蔵でクリーンなエネルギーとしてその活用がますます進んでいくものと考えられる。一般に市街地の風は風力発電に適さないと考えられてきたが、建物の高層化が進んだ市街地ではビル風等の強風災害が問題となっている。また、環境共生のシンボルとして、風力発電装置の建物への導入も増えてきている。これらのことから市街地の風を有効に利用し建物に融合する風力発電装置の開発が必要である。市街地や建物近傍での風向変化が激しい地域では、風向に依存せず作動する垂直軸型風車が有効であり、その中でもプロペラ型風車同様に高効率の発電が可能な揚力型の直線翼風車は市街地型風力発電装置として有効な風車だと考えられる。本報では、直線翼垂直軸型風車が建物周りで有効に機能することを調べた風洞実験結果を記すとともに、試作機として実建物に設置した風力発電システムの詳細及びその性能について説明する。

キーワード 風力エネルギー／風力発電／直線翼垂直軸型風車／サボニウス／風車効率／周速比

目 次

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. はじめに | 4. 直線翼垂直軸型風車の実施例 |
| 2. 直線翼垂直軸型風車の利点 | 5. まとめ |
| 3. 建物周辺及び近傍での風車の作動状況 | |

DEVELOPMENT OF VERTICAL AXIS WIND TURBINES WITH STRAIGHT BLADES SUITABLE FOR BUILDINGS IN URBAN AREA

Yusuke MARUYAMA
Ryuichiro YOSHIE

Masayuki SHIMURA
Akira SATAKE

Synopsis:

Recently, clean-energies which do not cause pollution and global warming has attracted considerable attention. Wind power is an ideal one among the clean-energies. To make use of strong wind around high-rise buildings in urban area, we have developed wind generation system suitable for buildings by using the vertical axis wind turbines with straight blades (VAWT-SB). This paper presents the results of wind tunnel experiments for investigating the availability of the VAWT-SB generation system in urban area, and the introduction of the first and second practical wind turbine systems which were put as a piece of buildings.

1. はじめに

自然エネルギー活用という点において風力エネルギーが注目されるようになり、売電を目的とした大型風車から一般家庭でも取り付けられる小型風車まで広範囲にわたって開発されるようになってきた。

特に小型風車では大量の発電量が見込めるわけではなく、使用用途としては非常用電源程度のものであるので、自然エネルギー活用・環境共生のシンボルとして設置されることも多い。このような風車は、市街地など、人の住空間に近いところに設置されることとなり、それに適した装置でなければならない。

一方、建物の高層化が進む近年、市街地においてビル風などの強風災害が問題となってきた。また、100mを越えるクラスの高層ビル屋上などでは年間平均風速が風力発電に有効な6m/sを越える地点もある。化石燃料が減りつつある現在、市街地に設置する風車であっても、将来的にはこれらの強風を活用して有効な発電が可能な装置として開発を進めて行くべきである。

上記の2点を満たす風車として直線翼垂直軸型風車を採用し、それをを用いた風力発電システムの開発を進めている。ここでは直線翼垂直軸型風車が建物周りで有効に機能することを調べた風洞実験結果を記すとともに、試作機として実建物に設置した風力発電システムの詳細及びその性能について説明する。

2. 直線翼垂直軸型風車の利点

風力発電を行うためには安定した強い風が必要であり、風の強いところが望まれるため市街地等での風力発電はあまり考えられてこなかった。しかし、市街地においても建物の高層化が進められ、ビル風などの強風災害が問題となっている。このような建物周りの強い風をうまく利用すれば、効率よく発電することが可能となり、単なるシンボルではない風力発電システムを構築することができると考えられる。

市街地に風力発電システムを設置する場合には、次のようなことが問題となる。

- ・ 市街地では風向変化が激しく安定した風が得にくい
- ・ 風車の回転に伴う騒音及び振動
- ・ 風車の意匠が建物にあわせにくい

現在、建物用・市街地用として市販されている小型風車の多くは売電用の大型風車と同じ形状のプロペラ型のものである。プロペラ型の風車は風向に対して正対する必要があるが、風向変化の著しい市街地では不利である。また、吹き上げる風に対しても有利でないとの報告もあり建物近傍や屋上に設置するのに適さない。一方、垂直軸型風車は風向に依存せずに回転するので、風向変化に関わらず発電が可能な風車である。その中でもダリウス

型や直線翼垂直軸型の風車はプロペラ型風車と同様に揚力型風車であり高効率の発電が可能である。

図1に代表的な風車の形状及び各種風車の風車効率¹⁾を示す。ここで風車の出力について簡単に説明する。風のエネルギーは式[1]に示すように風速の3乗に比例する。風車による出力を風のエネルギーで除したものが、風車効率である（式[2]）。

$$P_W = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad [1]$$

$$C_P = \frac{P_G}{P_W A} \quad [2]$$

$$\beta = U / V \quad [3]$$

P_W : 単位面積あたりの風のエネルギー

P_G : 風車出力 U : 風車翼の周速 V : 風速

A : 風車面積 β : 周速比 ρ : 空気密度

図中の横軸は式[3]に示す周速比であり、風車翼の回転速度を風速で無次元化したものとなっている。図中には直線翼垂直軸型風車は掲載していないが、ほぼダリウス型風車と同等の性能を有する。直線翼垂直軸型風車では断面が単一の簡単な形状をしており、設計条件に併せて出力及び周速比を調整することが容易である。

風車で取り出すことのできるエネルギーは風下にも流れるが必要となるため理論的に最大約60% (Betzの理論²⁾)

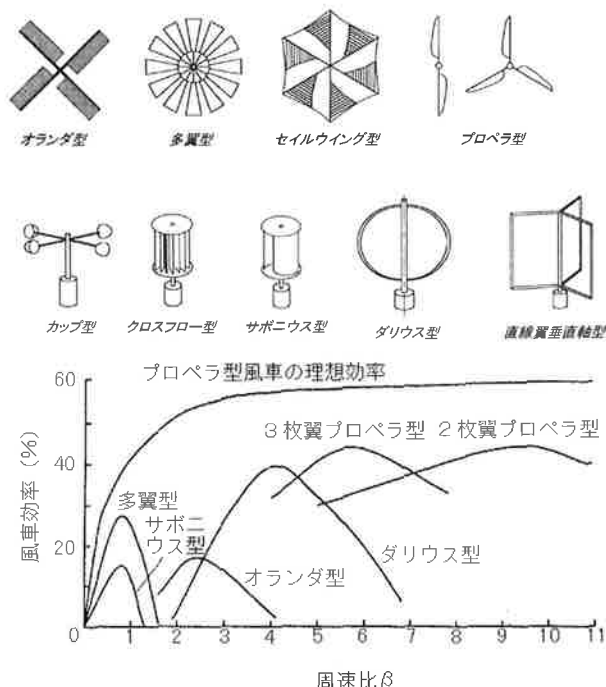


図-1 各種風車と風車効率¹⁾

であるが、空気力学的・機械的損失を考慮すると 30～40% の効率が得られれば高性能の風車といえる。

筆者等は市街地に適する風車として直線翼垂直軸型風車を採用し、それをを用いた風力発電システムの開発を進めている。直線翼垂直軸型風車をを用いた場合の利点をあげると以下ようになる。

- ・ 風向に関わらず回転する→風向変化の激しい市街地に適する
- ・ 回転時に騒音・振動がでない→人が住む建物近傍に設置が可能
- ・ 揚力型風車である→強風時には高効率の発電が可能
- ・ 垂直軸と直線翼の形状→円形が立面にせず、建物の意匠に合わせ易い

このように直線翼垂直軸型風車では、先に述べた市街地で風力発電を行う際の問題点をクリアし、かつ高効率の発電が可能である。このタイプの風車の欠点はダリウス型と同様に自分で回転し始める機構を持っていないということであるが、初速用モーターを取り付ける・翼を大きくする・他の抗力型風車と組み合わせる等の手法により解決することが可能である。

3. 建物周辺及び近傍での風車の作動状況

市街地において発電を行うためには、高層建物周りのビル風などの強い風を有効に利用することが必要となる。ここでは、直線翼垂直軸型風車を建物近傍や街路沿いに設置した場合に作動するのかどうかを確認するための模型を用いた風洞実験結果について説明する。

3.1 模型概要

写真-1 に風洞実験で用いた直線翼垂直軸型風車の縮小模型を示す。風車模型の詳細は図-2 に示す通りである。翼型には NACA0015 の断面形状を用い、翼の縦長さは翼弦長の 4 倍とした。翼の回転円周に対する翼の占める割合を示すソリディティは式[4]で表され、この模型では 1.5 である。

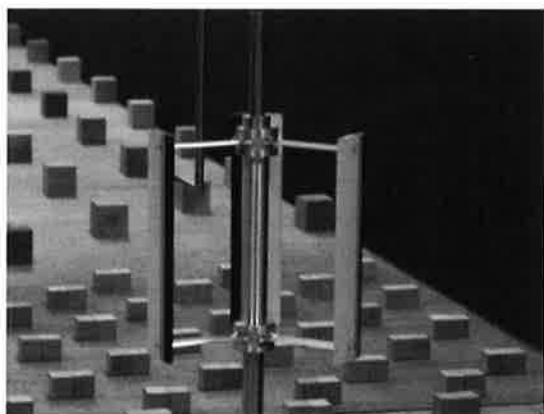


写真-1 風車模型

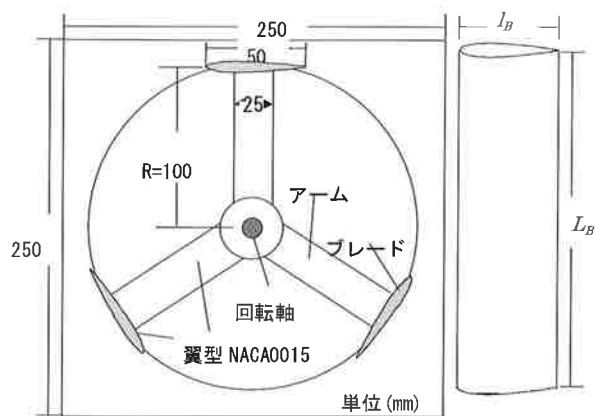


図-2 風車模型の平面図及び翼型

$$\lambda = n l_B / R$$

[4]

λ : ソリディティ (=1.5)

n : 翼枚数 (=3)

R : 回転半径 (=100mm)

l_B : 翼弦長 (=50mm)

L_B : 翼の長さ (=200mm)

今回の実験では建物周りでの作動状態を確認することを目的としているため、模型には発電機構等の負荷は与えず自由に回転できるようにした。

3.2 接近流の乱れの影響

風車模型単体を風洞に設置し、接近流を変えて測定を行った。測定は風速と模型の回転速度（翼部分）について調べた。ここで用いた模型には、発電付加をつけていないため発電量で評価できないが、回転数が高い場合ほど風から多くのエネルギーを得ているものと考えて話を進める。用いた接近流は表-1 に示す 3 種類である。

表-1 実験気流

接近流	風洞状況
一様流	風洞床面のみ
乱流 1	スパイヤー
乱流 2	スパイヤー+ラフネスブロック

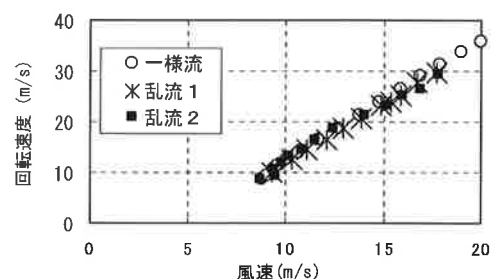


図-3 乱れの違いによる風速と回転数の関係

スパイヤーで作られる乱れは風車模型と同等のスケールであり、ラフネスブロックで作られる乱れはそれより小さなスケールの乱れである。スパイヤーで作られる乱れは、建物角部からの剥離に伴う渦等の乱れのスケールに一致する。図-3にそれぞれの接近流に対して風速と模型風車回転速度の関係を示す。風速と回転速度の関係は接近流の乱れに関係なくほぼ同一直線上に分布している。このことから建物近傍の乱れた流れに関係なく、風速が同じであれば風車は同じように作動すると考えられる。また、風洞内に人が入ったり、模型の前に手をかざして接近流を乱すと低い風速から動き始めることから、剥離に伴う渦などの乱れがあれば回転し始めやすくなっていることがわかった。

3.3 建物周辺での作動状況

風車模型の周りに箱形の建物模型を設置し、建物周辺及び近傍での風車の回転状況を調べた。建物模型の設置パターンは図-4に示す通りである。実験に用いた接近流は前述の乱流2である。

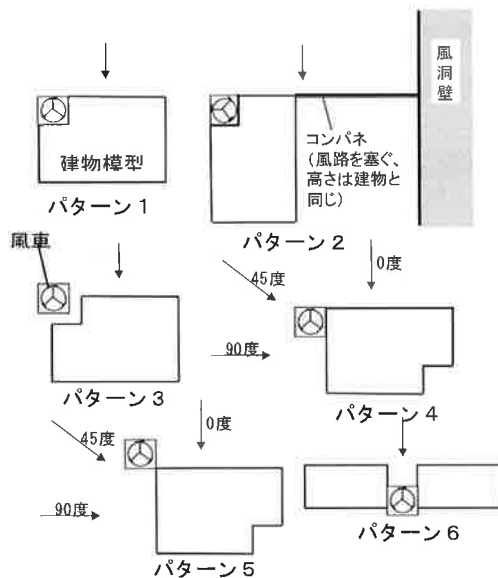


図-4 周辺建物模型の設置パターン

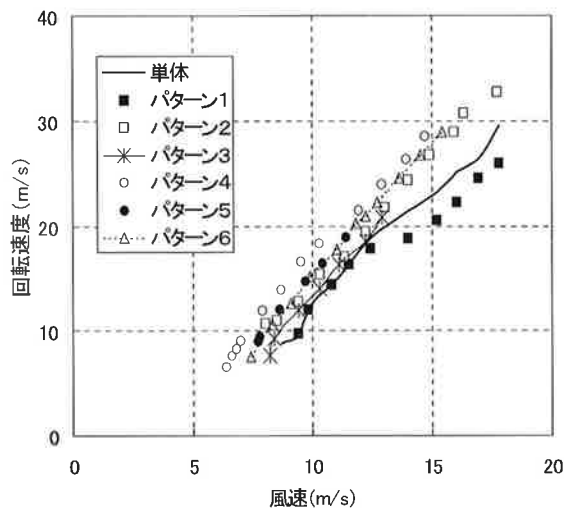


図-5 周辺建物の影響による風速と回転速度の関係

図-5はそれぞれのパターンの風速と回転速度の関係を示す。ただしパターン4,5については0度の角度について示す。また比較用に乱流2の単体の結果も示す。パターン1のように建物の隅欠き部分に設置した場合は、単体の場合より回転数が低くなっているが、パターン3～5のように建物角部でも少し外に設置すれば単体よりも回転数が高くなっている。パターン1では、建物の見付け面積に対して風車部分の隅欠きが大きくなっており、パターン2のように建物と風洞壁面をつないで見かけ上、見付け面積を大きくした場合には単体の場合より回転数が高くなった。このことから実際の建物の隅欠き部分等に設置した場合には、単体で設置するよりも回転数が上がると考えられる。最も回転数が高くなったのはパターン4のように建物角部側面に設置した場合で、風上側角部からの増速された剥離流を利用している結果だと考えられる。建物の谷間においたパターン6でも単体より回転速度が高くなっている。

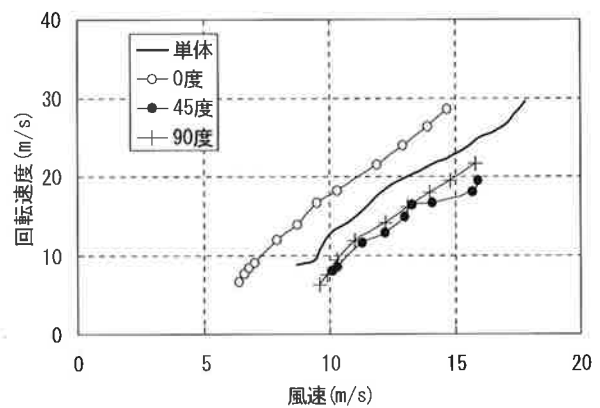


図-6 風向角による変化 (パターン4)

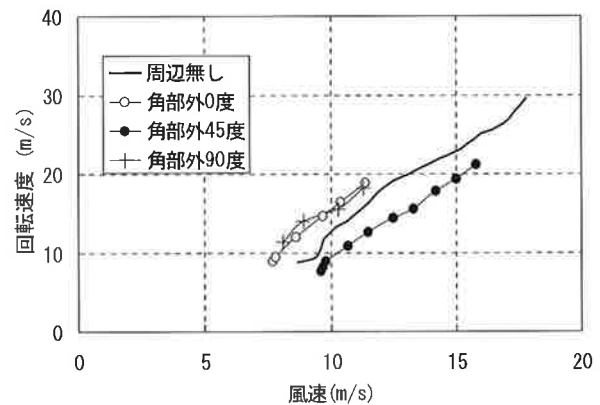


図-7 風向角による変化 (パターン5)

パターン4、パターン5については3つの風向について調べた結果を図-6、図-7に示す。パターン4では0度のときは回転数が高いが、45度、90度では風車の後ろに建物がくるため単体の場合より回転数が落ちている。パターン5では45度で回転数が下がるが、0度、90度で単体より回転数が高くなっている。先に述べたように隅欠き部分に対して充分な見付け面積をもつ建物であれば、

隅欠き部分に風車を設置（パターン1）してもパターン5と同等の効果が得られるので、風向が変化しやすい地域ではパターン1のような設置方法がよく、卓越風向が1風向に限定できるような場合には建物側面に設置するパターン4のような設置が良いのではないかと考えられる。

建物の影になりやすい周辺模型設置パターンに対して、風速を一定のまま風向を変化させた。得られた結果を図-8に示す。接近流は同じく乱流2を用い、実験風速は15.2(m/s)で一定とした。

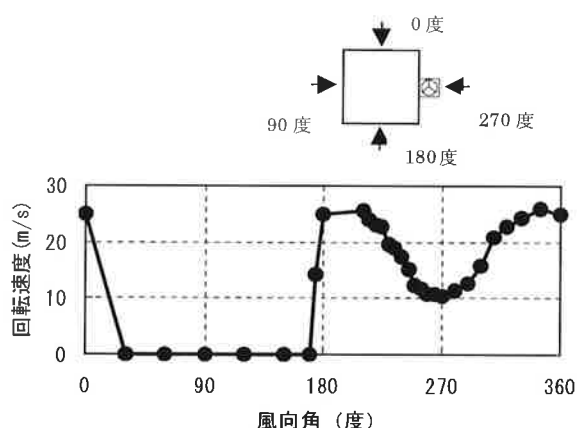


図-8 風向角による回転状態の変化

建物の影となる裏半分では回転が止まってしまう、175度～5度（365度）の約190度の範囲において回転することがわかった。建物が風車の背後に来て風が弱まる270度付近においても回転を続ける。建物周辺において風速が弱くなる場所でも回転可能な風速が得られるならば風向にかかわらず回転すると考えられる。風向345度付近では0度や180度の場合より回転速度が速くなっている。この実験の結果から、直線翼垂直軸型風車は風向にかかわらず風車を通過する風速に応じて回転するものと考えられる。

3.4 作動状況確認実験のまとめ

直線翼垂直軸型風車の模型を用いて風洞実験を行い、市街地における建物周辺での風車の回転状況を調べた。実験結果をまとめると以下ようになる

- ・ 建物角部からの剥離に伴う渦等による乱れは、風車の回転数に影響を与えない。
- ・ 建物角部からの剥離流が通過する建物側面や、建物角部に設置した風車は、単体の場合よりも回転数が高くなることが実験結果から分かり、高層建築物近傍でのビル風を利用した風力発電が可能であることを示した。
- ・ 建物近傍に設置する風車は約190度の風向範囲で作動する。

4. 直線翼垂直軸型風車の実施例

直線翼垂直軸型風車が市街地において有効な装置であることを確認するため、実在建物に風車を設置し、その発電量を観測している。この章では現在までに設置した2つのシステムについて紹介する。

4.1 建物屋上への設置

(1) 設置場所

第1号機は、東京都文京区春日に建つ当社が設計施工した環境共生型集合住宅の屋上に設置した。この建物には、太陽光発電・屋上緑化・高耐久コンクリート等の環境配慮の技術が取り込まれており、その中において風力発電システムは環境共生のシンボリックな存在となっている。建物は6階建てで、軒高さ19mである。

図-9に実測データに基づいたワイブル分布³⁾から求めた文京区における10分平均風速の発生頻度及び超過確率を示す。風速5m/sを超える確率は約18%、10m/sを超えるのは約0.6%である。しかし、この建物は高台の上に位置し、図よりも良い風況にあると考えられる。

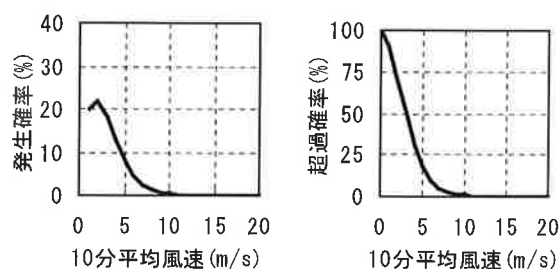


図-9 10分平均風速の発生と超過確率（文京）

(2) 風車概要

設置した風車は、写真-2に示すものである。風車は直線翼垂直軸型風車を2段取り付けた上にサボニウス風車（図-1参照）を組み合わせたものとなっている。また風車を含む建物全景を写真-3に示す。直線翼垂直軸型風車は、回転半径0.5m/s、翼の長さ1m/sのものを2段に重ねており風車面積は2m²である。直線翼の断面はNACA0018を基に回転軌道円周に沿って湾曲させた形状である。翼枚数は3枚、翼弦長は0.25m、ソリディティは1.5である。自己起動特性をよくするためソリディティの大きな翼を用いたが、慣性モーメントが大きいため高速回転するのに時間がかかるので、低風速時には抗力型風車であるサボニウスにより加速するようになっている。サボニウスと直線翼風車の間にはラチェット機構をもったクラッチを取り付けており、高回転時には切り離される機構となっている。低風速時にはサボニウスのトルクにより抗力型風車として機能し、高風速時には直線翼風車が高速回転することにより揚力型風車として高効率の発電ができる。風速3m/sで回り始め、風速5～6m/sでサボニウスと直線翼風車が切り離され高速回転するようになる。安全のた



写真-2 屋上設置型風車



写真-3 建物全景

め高風速側は風速 20m/s を超えるとブレーキをかけるようにし、また風車回転数が 500rpm (回転/分) を越えると回転数が 200rpm になるように制御している。

発電した電力はシステム内に設けた蓄電池に蓄電し、夜間（日没後 6 時間）に庭園灯の点灯に使用する。風が継続的に吹かないことも考えられるため、本システムでは太陽電池とのハイブリット化を行っており、太陽光発電でも蓄電されるようになっている。

(3) 風車の発電性能

風車の実設置に先立ち、同サイズの直線翼垂直軸型風車を風洞に組み立てその発電性能を調べた。図-10 に回転数と回転軸周りに発生するトルクの関係は風速を変えて測定した結果を示す。トルクの増加に伴い回転数が減少するが、トルクと回転数の関係は反比例していない。つまりトルクの増加率に比較して回転数の減少率は小さいので、発電量を増加するためにはトルクを大きく取るようにすればよい。

風車出力は回転数と軸トルクから式[6]で求めることができる。

$$P_G = 2\pi NT / 60 \quad (W) \quad [6]$$

N : 風車回転数 (rpm) T : 軸トルク (Nm)

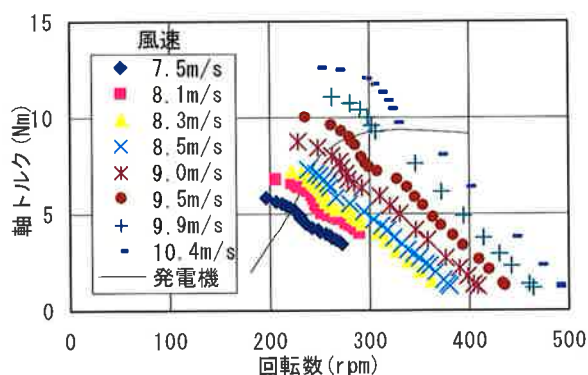


図-10 風車回転数と軸トルクの関係 (1号機)

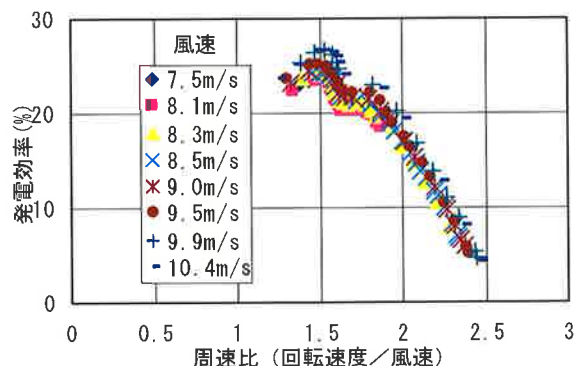


図-11 風車効率 (1号機)

風洞実験結果から風車出力を求め、式[2]及び[3]によって無次元化した結果を図-11 に示す。風車サイズが小さいため翼が受ける風力に対し装置の摩擦などが無視できるほど小さくないため、無次元化しているにもかかわらず風速により風車効率が変化している。しかし、ほぼ同一曲線上に分布しており、傾向は一致している。最大の効率が得られるのは周速比 1.5~1.6 付近であり、風速 10m/s 付近では風車効率は約 25% になっている。今回試作した風車では低風速での回転性をよくするため翼が大きくなっており、周速比があまり大きくならない。周速比を大きくすれば 30~40% の風車効率とすることも可能であり、翼断面の最適化を行えばさらに風車効率を上げることができる。

発電機（電気的な部分）の効率が約 60% とすると、この風車は風速 10m/s で約 180W の発電をすることになる。式[1]で求められる各風速のエネルギーに風車効率 25%、発電機の効率 60%（トータルの発電効率 15%）をかけたものを風車の発電量とし、図-9 に示した風速発生頻度から年間総発電量を推定すると約 90kWh となる。

4.2 バルコニーへの設置

(1) 設置場所

第 2 号機は当社の東北支店新社屋最上階のバルコニー部分に設置した。このビルは軒高さ 34m・8 階建てで、8 階の通りに面する側がバルコニーとなっている。このバルコニーの北西角のパラペット～屋根の間に風車を設置している。（写真-4 参照）

図-12 は前節と同様にワイブル分布³⁾から求めた仙台の

風速の発生頻度である。平均風速 5m/s を超える確率は約 10%、10m/s を超える確率は約 0.3% である。

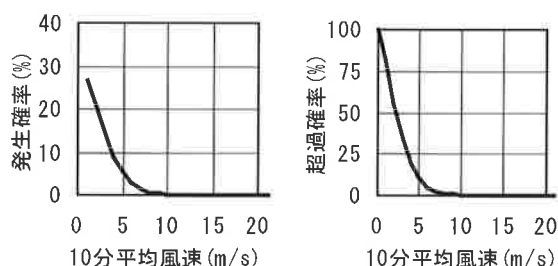


図-12 10分平均風速の発生と超過確率（仙台）

(2) 風車概要

設置した風車を写真-4～6に示す。写真-4はバルコニーからの写真である。写真-5は建物正面の大通りから見た絵となっており、また写真-6は建物竣工後のバルコニーのイメージCGである。

下段に直線翼垂直軸型風車、上段にサボニウス風車を組み合わせた構造としている。回転半径は両風車とも0.85mであり、直線翼の長さは1.7mである。図-12に示すように仙台の風は弱いので、低風速時の起動特性をよくするためサボニウス部分を大きくしている。直線翼風車が高速回転するときには、1号機同様にサボニウスと切り離される機構となっているため、発電に寄与するのは直線翼風車の部分である。この部分の風車面積は2.89m²である。直線翼部分は1号機と相似な形をしており、断面は同じ翼型を用いている。

風速 2m/s で回り始め、風速 5m/s で発電し始める。直線翼部分は翼の重量を重くしているため一度発電を始めると風速の変動（風の息吹）の影響をほとんど受けず回転を持続することが可能である。安全のために高風速側は風速 20m/s を超えるとブレーキをかけるようにし、また風車回転数が 360rpm を越える場合にもブレーキがかかる。2号機の回転半径は1号機より大きくなっているため、制御回転数は低くなっている。

この風車は、建物の正面立面の1部分として大通りから見えること、バルコニーの景観の1つとなることから意匠的な面で工夫をしている。本体の骨組みをトラス構造とすることにより軽快さを演出し、またサボニウスの形状を変形して、意匠性を高めている。サボニウスの変形による効果の低減がないことは風洞実験から確認している。

発電した電力はシステム内に設けた蓄電池に蓄電し、バルコニー部分の照明及び風車本体のライトアップ用電源として使用する。また風車が回転し発電するときには、風車の回転に併せて緑色のLED（発光ダイオード）が点滅するようにもなっている。風が継続的に吹かないことも考えられるため、本システムでは太陽電池とのハイブリット化を行っており、屋上に設置されている太陽光発電でも蓄電されるようになっている。



写真-4 バルコニー設置用風力発電装置



写真-5 風車及び建物正面



写真-6 バルコニーのイメージCG

(3) 風車の発電性能

1号機同様に、下部の直線翼垂直軸型風車を風洞に組み立て、その発電性能を調べた。図-13に回転数と回転軸周りに発生するトルクの関係を変えて測定した結果を示す。またこの結果から選定した発電機の回転数と必要軸トルクの関係を図中に示している。この発電機では風速 5～10m/s の範囲で効率よく発電できるようになっている。

前節と同様に、回転数と軸トルクの関係から風車効率を求めた結果を図-14に示す。今回の風車は風洞断面に対して大きすぎるため、風速計で測定した値より実際の風車部分の風速は増速されていたと考えられるため、風車

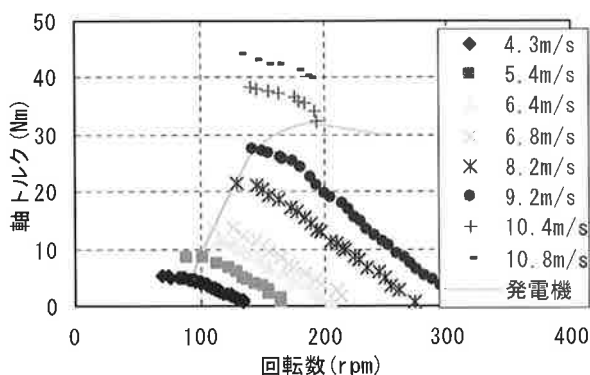


図-13 風車回転数と軸トルクの関係（2号機）

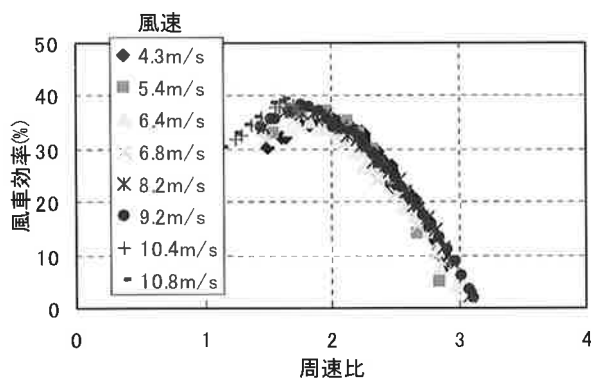


図-14 風車効率（2号機）

効率は実際よりもやや高めにしている。

風速の違いに関わらずほぼ同一曲線上に分布している。最大の効率が得られるのは周速比 1.7～1.9 付近であり、最大風車効率は約 40% になっている。断面積の広い風洞実験室の結果との比較から推定される風車部分での増速率は約 1.1 倍であったが、それを考慮しても約 30% の風車効率がこの風車では得られていると考えられる。翼を大きくし、風車面積を大きくしたことにより発電効率が上がり、また低風速から起動しやすくなったことも風洞実験から確認できた。

この風車は風速 10m/s で約 400W の発電をすることになる。この発電効率と図-11 に示した風速発生頻度から年間総発電量を推定すると約 100kWh となる。

5. まとめ

市街地に建つ建物近傍に設置する風力発電装置として直線翼垂直軸型風車を採用し、開発を進めてきた。風車の特性を風洞実験で調べ、その結果に基づき実建物にこのタイプの風車を設置した。風洞実験及び実機の開発から得られた知見を以下に記す。

- ・ 直線翼垂直軸型風車は風向の変化、接近流の乱れの影響を受けず作動し、建物近傍で有効に働く風車である。
- ・ 起動特性の悪い直線翼垂直軸型風車では、サボニウス等の抗力型風車と組み合わせることにより起動特性を改善することができる。
- ・ 建物に取り付けた風車は、風車効率が 30% 前後であり、揚力型風車としての性能を発揮している。

建物に設置した風力発電装置には発電量の観測システムが設けてあり、今後計測を続けていく予定である。このデータから実市街地における直線翼垂直軸型風車の有用性を検証していく予定である。

謝辞

直線翼垂直軸型風車の開発にあたって、東海大学関和市教授に多大なご指導・ご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。また、風車実機の設計・製作にあたっては、（株）前田製作所の笠井靖夫部長及び矢沢次男課長に御尽力いただきました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) 新エネルギー・産業技術総合開発機構編：風力発電導入ブック, 1996.
- 2) Betz, A.: Windenergie und ihre Ausnutzung durch, Vandenhoek und Ruprecht, 1926.
- 3) 風工学研究所編：新・ビル風の知識, 鹿島出版会, 1989.