

建築物に融合する都市型風力発電装置の開発 (その2) フィールドテスト装置の発電実績

丸 山 勇 祐 志 村 正 幸
義 江 龍一郎

要 旨

直線翼垂直軸型風車は以下のような特徴を持つ。

- ・ 風向変化や風の乱れに依存せず作動する
- ・ 揚力型風車でありプロペラ型風車と同等の発電性能を有する
- ・ 作動時に騒音・振動がほとんどでない
- ・ 回転軸が垂直で円形が立面にでず、建物の意匠と調和しやすい

上記のような点から、この風車を用いた市街地型風力発電システムの開発に取り組んできた。前報¹⁾では、風洞実験により直線翼垂直軸型風車の有効性・性能について報告した。実際の市街地における本システムの発電性能を検証するために、実在建物に3つのフィールドテスト装置を設置した。3つの装置はそれぞれ、東京都文京区に建つ環境共生住宅屋上、宮城県仙台市のオフィスビルのバルコニー、東京都練馬区の高層建物（高さ100m）に設置されている。本報では、これらの装置の観測結果を報告するとともに、自然風中での発電性能を明らかにしている。本報告で示す発電実績は、今後増えていくと考えられる市街地への風力発電システムの導入に対する参考資料となると考えられる。

キーワード 風力発電 / 直線翼垂直軸型風車 / サボニウス / 発電効率 / 周速比 / フィールドテスト

目 次

- | | |
|-------------|-----------|
| 1. はじめに | 4. 高層建物装置 |
| 2. 環境共生住宅装置 | 5. まとめ |
| 3. オフィスビル装置 | |

DEVELOPMENT OF VAWT-SW SUITABLE FOR BUILDINGS IN URBAN AREAS PART2. RESULTS OF WIND POWER GENERATION OF FIELD TEST INSTRUMENTS

Yusuke MARUYAMA Masayuki SHIMURA
Ryuichiro YOSHIE

Synopsis:

We have developed wind generation systems suitable for buildings in urban area by using vertical axis wind turbines with straight wings (VAWT-SW), which are independent of wind directions and make little noise. We installed three wind generation systems on practical buildings for field test. This paper presents the observation results of wind power generation of field test instruments for investigating the availability of the VAWT-SW systems installed in urban areas. From these results, we can furnish fundamental data for installing wind power generation systems in urban areas.

1. はじめに

筆者らは、「建築物に融合する風力発電システム」として直線翼垂直軸型風車を用いた市街地型風力発電システムの開発に取り組んでいる。前報¹⁾では、風車模型による風洞実験で直線翼垂直軸型風車が建物近傍でも有効に機能することを確認し、その発電性能を風洞において検証した。次の段階として、フィールドテスト装置を実在する建築物に取り付け、その発電量を観測し、市街地における風力発電装置の性能を確認している。本報では、環境共生住宅屋上設置装置・オフィスビルバルコニー設置装置・超高層ビル屋上設置装置の3つのフィールドテスト装置の観測結果について報告する。



写真-1 春日マンション建物全景

2. 環境共生住宅装置

2.1 装置概要

東京都文京区春日に建つ、当社グループで設計・施工・販売を行った「レックスハイツ文京春日」（本報では春日マンションと表記）の屋上に風力発電システムを設置している。春日マンションは、種々の環境配慮型技術を導入した分譲共同住宅で、（財）建築環境・省エネルギー機構より共同住宅としては初めて環境共生住宅に認定された。屋上に設置された風車は環境共生のシンボリックな存在となっている。写真-1に建物全景、写真-2に風車本体を示す。建物は地上6階建てで、軒高さ19mである。

風車は直径1m、翼の長さ1mの3枚直線翼垂直軸型風車を2段に重ね、頂部に起動補助用サボニウスを取り付けた構造となっている。低風速時には抗力型風車であるサボニウスによって回転するが、直線翼風車の回転が上がってくるとサボニウスと切り離される。起動開始は風速2m/sで、発電開始は4m/sである。安全のため、風速20m/sを超えた場合と、風車回転数が500rpmを超えた場合には自動的にブレーキが作動する。受風面積は2m²であり、定格出力180W（風速10m/s）である。

風車により発電した電気はバッテリーに蓄電され、建物中庭の夜間照明に使用されている。バッテリーの放電を防ぐため太陽光パネルとのハイブリッドシステムとなっている。

観測項目は、風車位置における風速（3杯風速計による）、風車回転数、バッテリー電圧、及びバッテリーへの充電電流（風力発電分のみ）とし、10分平均値を記録する。観測期間は2001年7月～2002年10月である。

2.2 観測結果

観測期間中よく発電した日（2001.1.27）の時刻歴波形を図-1に示す。観測値は全て10分間平均値である。発電電力は、電圧及び電流平均値の積で求めている。風速が2m/sを超えると風車が回転し、4～5m/sで風車回転数が100rpmを超え発電し始める。最大発電量は風速8m/s時に、110Wであった。



写真-2 春日マンション屋上の風車

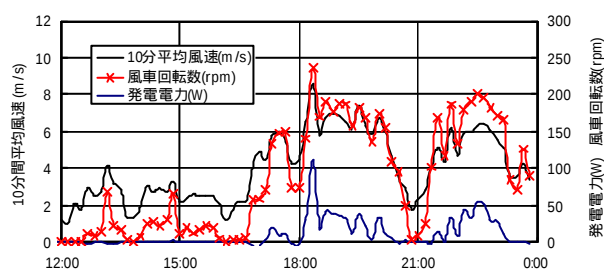


図-1 観測値の時刻歴（春日）

図-2に観測期間中の月別積算発電量及び月平均風速を示す。月平均風速が1m/s未満の場合にはほとんど発電しない。発電量の最も多かったのは2002年7月で、積算発電量0.67kWh、月平均風速が1.49m/sであった。測定期間（2001年7月～2002年10月）の総積算発電量は3.6kWh、平均風速は1.2m/sであった。2001年と2002年の同じ月

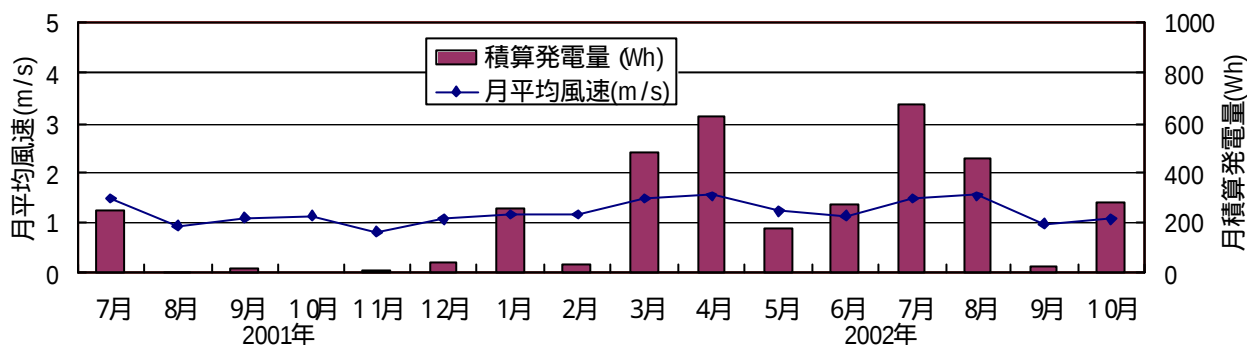


図-2 月別積算発電量及び平均風速（春日）

のデータを比較しても、発電量に違いが見られ定性的な傾向があまり見られない。風車設置位置が建物屋上の東端に位置するため、南東の風が多い夏場に発電量が増えると考えられる。台風などが通過するときには1日で1月の発電量の半分以上を発電することもあり、これも明確な傾向がない一因と考えられる。

図-3 に設置場所で観測した風速の発生状況を示す。また、風速の発生頻度を基に風のエネルギー密度を算定した結果も示す。参考のため、文京区におけるワイブル係数²⁾を基に推定したものを図中に示す。システム導入計画時に推定していた風速より、風車部分で得られた風は弱く、発電する4m/s以上の風の発生頻度は2%程度である。風車は建物屋上の端部に設置しているが、屋上スラブから高さ3m程度であり、建物の影響で風が弱められていると考えられる。

風速、風車回転数、発電電力の相関関係を図-4に示す。

a)は風速と風車回転数の関係を表したものである。周速比とは風車回転速度を風速で無次元化したものであり、この風車では概ね周速比1～2の範囲で回転している。

b)は風車回転数と発電電力の関係を表している。発電機の実機特性曲線もあわせて示す。ほぼ発電機の実機通りの発電をしているが、発電量の少ないデータも見られる。

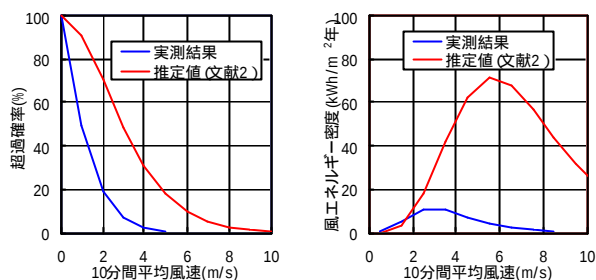
c)は風速と発電電力の関係である。発電効率とは風の持つエネルギーのうち電気に変換した割合を表す。効率のいいときで約30%であるが、効率の悪いデータも見られる。

d)は発電効率と周速比の関係である。最も効率のよいのが周速比2付近で25%～30%であるが、風洞実験結果¹⁾では、周速比1.5付近で効率がよくなっていた。ただし、この観測で用いた風速計は、場所の関係で風車より風の弱い場所に設置されているため、発電効率・周速比が若干高くなっている。

3. オフィスビル装置

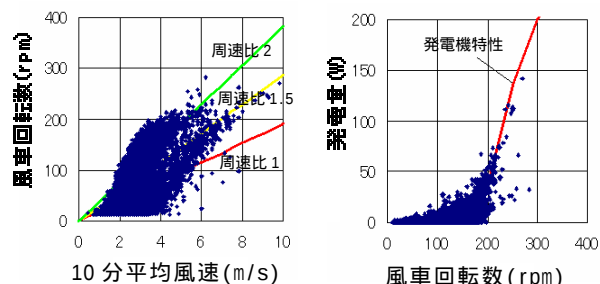
3.1 装置概要

宮城県仙台市青葉区に建つ当社東北支店ビル（Wind Eco Power：以後青葉ビルと表記する）最上階バルコニー角に設置している。写真-3に建物全景、写真-4に風車本体を示す。



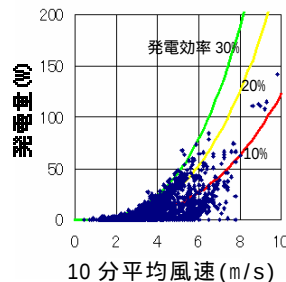
a) 風速超過確率 b) 風エネルギー密度分布

図-3 風車設置場所における風況（春日）

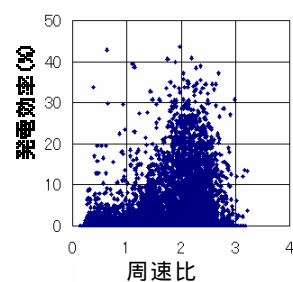


a) 風速 - 回転数

b) 回転数 - 発電電力



c) 風速 - 発電電力



d) 発電効率

図-4 観測値の相関関係（春日）

このビルは軒高さ34m・8階建てで、8階の通りに面する側（西側）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と屋根の間に風車を設置している。

風車は下段に3枚翼の直線翼垂直軸型風車、上段に変形サボニウス風車を組み合わせた構造となっている。回転直径は両風車とも1.7mであり、直線翼の長さは1.7mである。



写真-3 青葉ビル（晩翠通りより）



写真-4 青葉ビルバルコニーの風車

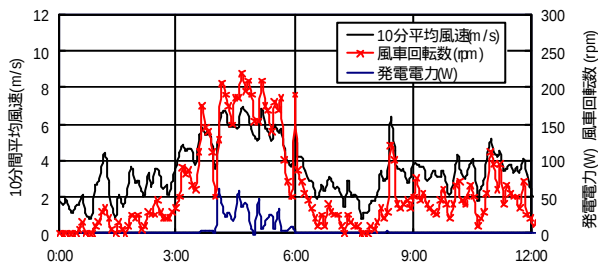


図-5 観測値の時刻歴（青葉）

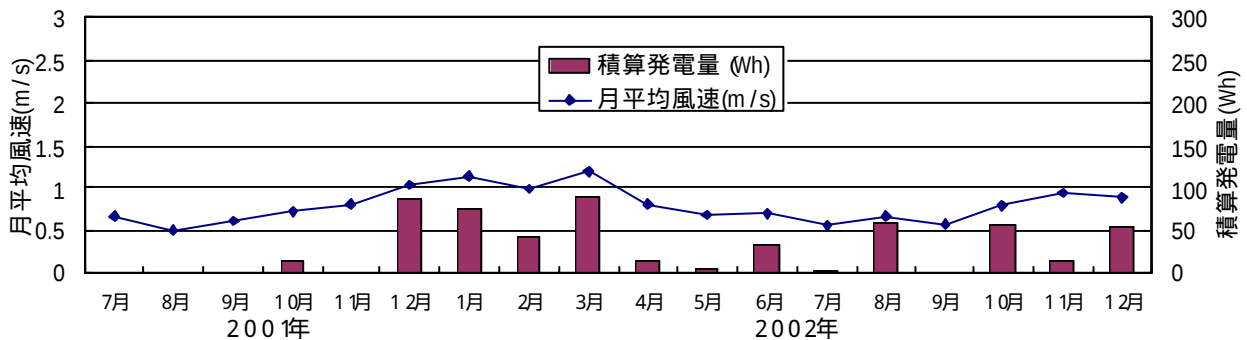


図-6 月別積算発電量及び平均風速（青葉ビル）

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、春日装置と同様にサボニウスと切り離される機構となっており、発電に寄与するのは直線翼風車の部分である。受風面積は 2.89m^2 である。風速 2m/s で回り始め、風速 5m/s で発電し始める。安全のために高風速側は風速 20m/s を超えるとブレーキが作動し、また風車回転数が 360rpm を越える場合にもブレーキが作動する。

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

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している。本システムにおいても太陽電池とのハイブリッド化を行っており、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。

観測項目は、風車位置における風速（3杯風速計による）、風車回転数、バッテリー電圧、及びバッテリーへの充電電流（風力発電分のみ）とし、平均値を記録している。観測期間は2001年7月～2002年12月である。

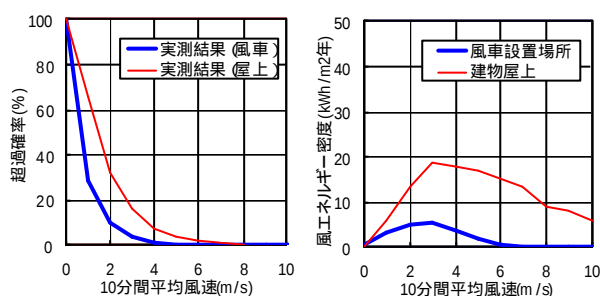
3.2 観測結果

観測期間中よく発電した日（2002.3.20）の時刻歴波形を図-5に示す。観測値は全て10分間平均値である。風速が 2m/s を超えると風車が回転し、 5m/s を超えると風車回転数が 100rpm を超え発電し始める。最大発電量は風速 6m/s 時に、約 60W であった。

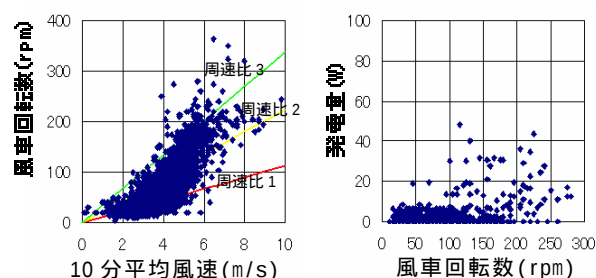
図-6に観測期間中の月別積算発電量及び月平均風速を示す。月平均風速が 1m/s を超えることがほとんど無く、発電量は少ない。発電量の最も多かったのは2002年3月で、積算発電量 87Wh 、月平均風速が 1.2m/s であった。測定期間（2001年7月～2002年12月）の総積算発電量は 0.53kWh 、平均風速は 0.8m/s であった。風車はバルコニーの角に設置されているために、風車の東側には建物の壁があり、また南側には他の建物が建っているためかなり風が弱くなっている。北～北東の風が吹く場合にのみ風車部分を風が通るため、北風の頻度が高くなる冬場に発電量が増えている。

図-7 に設置場所で観測した風速の発生状況を示す。風車設置場所と同時に建物屋上においても風速を計測しているため、その結果についても示す。風車部分の風は屋上と比較して弱くなっており、建物の影響を強く受けていることがわかる。発電する 5m/s 以上の風は 0.3% の確率しかない。屋上においても風のエネルギー密度のピークが 3m/s であるので、仙台の風そのものが弱いといえる。

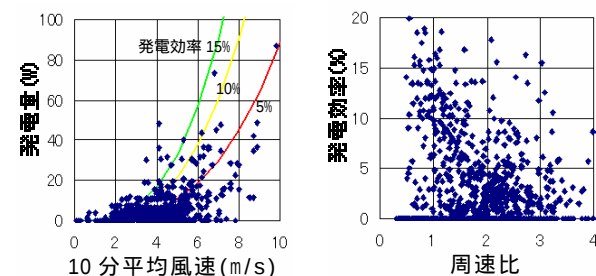
図-8 に、風速・風車回転数・発電電力の相関関係を示す。図中の値は全て 10 分平均値である。発電するほどの風が吹く頻度が少ないため、発電電力・発電効率に関する統計量にはかなりばらつきがあり明確な傾向がとらえられていない。風速と回転数の関係では、周速比 1~2 の間で回転しているが風速の増加とともに周速比が大きくなっている。回転数が 150rpm 以上になっても発電量がほとんど増えていないことから考えると、風速が増えても風車が空回りし発電にほとんど寄与していないと考えられる。この原因として考えられるのはハイブリット蓄電システムとしているため、バッテリーが太陽光発電で満充電となり、風力ではほとんど発電できていないものと考えられる。



a) 風速超過確率 b) 風エネルギー密度分布
図-7 風車設置場所における風況（青葉）



a) 風速 - 回転数 b) 回転数 - 発電電力



c) 風速 - 発電電力 d) 発電効率

図-8 観測値の相関関係（青葉）

4. 高層建物装置

4.1 装置概要

東京都練馬区光が丘に建つ前田建設第 2 本社ビル（J-city：写真 5）の屋上に設置した。建物の高さはペントハウス頂部で 100m であり、このペントハウスの上に風車を設置した。

設置した風車を写真 6 に示す。直線翼（ブレード）3 枚をアルミ板のアームでつなぎ、固定の支柱の周りをアルミ製の外環（ローター部分）が回転する構造となっている。翼は、長さ 1.7m、翼弦長 0.43m の CFRP（カーボン繊維補強プラスチック）製で、1 枚約 5kg である。春日装置、青葉装置に使用した GFRP（ガラス繊維補強プラスチック）製の翼と比較して重さが 1/2~1/3 となっており起動特性に改善が見られ、サボニウス等の抗力型風車の補助無しに回転し始める。回転開始風速は約 3m/s である。アームと翼の取付にはヒンジ構造を用いており、回転翼のたわみによる曲げモーメントがアーム部分に伝わらないようになっている。回転直径は 1.7m であり、受風面積は 2.89m² である。安全のために風速 20m/s 及び風車回転数 360rpm を越えるとブレーキが働く。



写真-5 J-city ビル外観



写真-6 J-city 屋上装置

4.2 観測結果

今回の装置は、市街地に建つ高層建物屋上における風力発電の性能を確認するために設置しているの、発電した電気はすべて電子負荷装置で消費するようにしている。これから示す観測結果はそのシステムで得られたものである。

図-9 によく発電した日（2003 年 3 月 4 日）の時刻歴波形を示す。風速の変動にあわせて風車回転数・発電量も変動している。風速が 5m/s を超えると風車が 100rpm 以上で回転し発電を開始する。風速が 10m/s で約 200W、風速 15m/s で約 400W の発電となっている。8 時頃及び 16 時頃には風速 20m/s を超えブレーキが作動したため、風速が上がっているにもかかわらず、発電量が下がっている。

図-10 に観測期間 8 ヶ月（2002 年 10 月～2003 年 5 月）の日別積算発電量及び日平均風速の観測結果を示す。日平均風速が 10m/s を超えた日は発電量が 4kWh を超えており、日平均風速が 3m/s 以下の時にはほとんど発電をしていない。最も発電量の多かったのは 2 月 27 日で、日平均風速 11.5m/s、日積算発電量は 5.3kWh であった。

図-11 に月別積算発電量及び平均風速を示す。平均風速の増加とともに発電量が増えている。風車は屋上に設置しているため剥離流の影響を強く受け、ウエイクの中に入る場合がある。北風に対しては建物の影響をあまり受けないが、南風の場合にはウエイクに入り風が当たりにくくなっている。12 月～3 月の冬場は北風が多く、発電量が増えているが、南風の多くなる夏場は発電量が減ると考えられる。昨年の夏場は計測システムが整っていないためデータがとれていないが、南風に対しては風車の回りが悪いことは確認されている。2002 年 10 月～2003 年 5 月までの 8 ヶ月間の総積算発電量は 128kWh で、平均風速は 4.1m/s である。

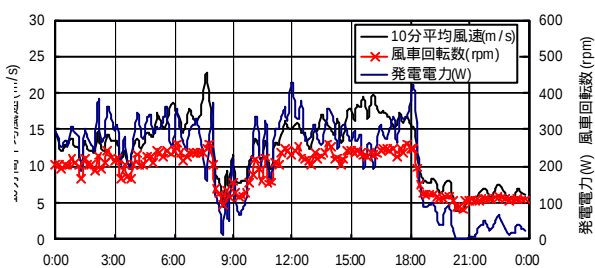


図-9 観測値の時刻歴（J-city）

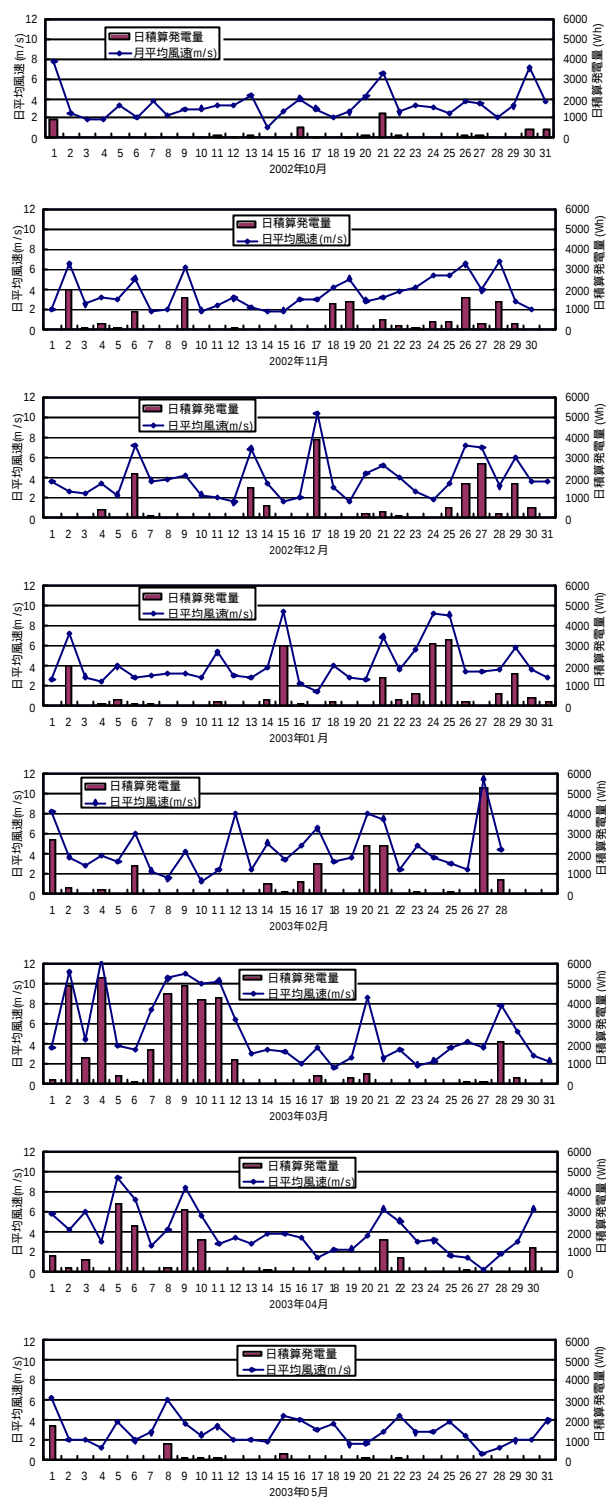


図-10 日積算発電量及び平均風速（J-city）

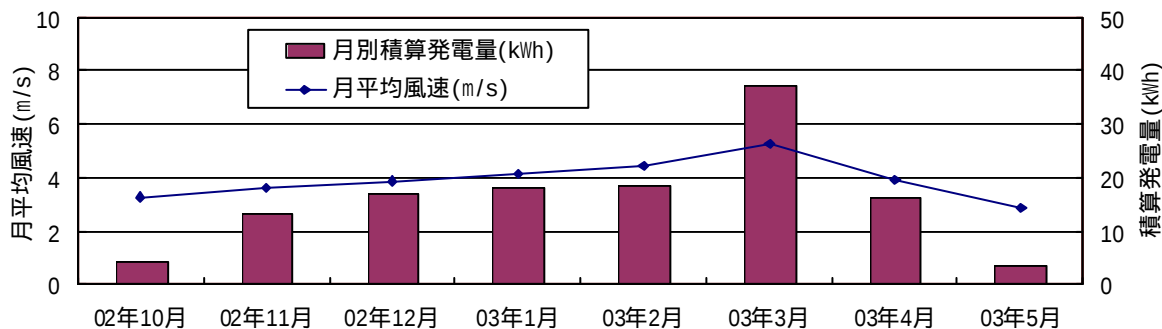


図-11 月積算発電量及び平均風速（J-city）

図-12 に風車位置で計測した風速データから求めた超過確率と、風のエネルギー密度を示す。夏の観測結果がないため、明確なことは言いえないが風のエネルギー密度のピークが10m/sを超えたところに来ており、風力発電を行うのにはいい風況だと考えられる。

図-13 に、風速・風車回転数・発電電力の相関関係を示す。図中の値は全て10分平均値である。

風速と風車回転数の関係では、発電を開始する風速5m/sより低いところでは周速比2までの広い範囲にデータがばらついていますが、風速5m/sを超えると周速比1～1.5の範囲に収まるようになり、風速15m/s付近では周速比1.3～1.5の範囲で回転するようになっている。風速15m/sを超える高風速時に回転数の低いデータが見られるのは、ブレーキが作動して回転数が落ちるためである。風車の発電制御は、回転数が100rpmを超えると発電開始するため、風速5m/sを超えると風車の周速比が1～1.5で安定して回転する。

風車回転数と発電電力の関係では、回転数150rpm程度までは発電機の性能通りの発電をしているが、それより高回転になると発電機の性能の8割程度しか発電できていない。回転数が増加しているのに発電性能が上がらないのは、回転数が150rpmを超える場合には発電機との整合性がとれなくなっていると考えられる。風速7～10m/sの範囲では風速の増加に対する回転数の増加の傾きが緩くなっている領域が見られるが、風速と発電効率の関係においても風速8m/s付近が最も発電効率が高くなっている。これぐらいの風速の時に風車と発電機の整合が最もよくなっているものと考えられる。

発電電力は風速の増加とともに増え、風速15m/sで最大400Wの発電をする。風速10m/s付近までは10%前後の発電効率であるが、風速が高くなるにつれて発電効率が下がっている。

発電効率の最も高いのは周速比1.4付近で、約13%である。風洞実験の結果（トルク測定）では、周速比1.7付近で約30%の風車効率がでていた。発電機の効率が50～60%（試験室レベル）であることを考えると、概ね妥当な発電効率となっていると考えられる。また、周速比が低くなっているのも効率の下がった一因だと考えられる。

この地点において風のエネルギー密度が最も高いのは、10～12m/sであるが、今回観測した発電システムでは風速8m/s付近で最大の性能がでていた。風エネルギーがピークとなるとときに発電性能が最適となるように風車を改良すればさらに発電量を増やすことができると考えられる。

5. まとめ

直線翼垂直軸型風車を用いた市街地型風力発電システムのフィールドテスト装置を実在建物に設置し、その観測結果をまとめた。得られた知見及び今後の課題を記す。

- ・ 中低層建物の屋上やバルコニーでは、風が弱く風力

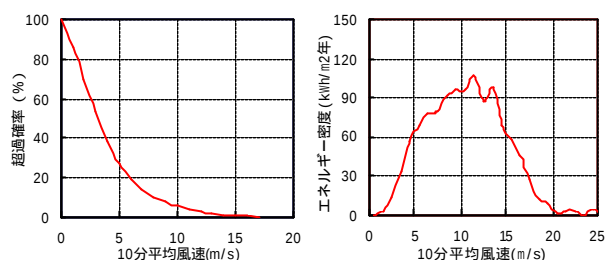


図-12 風車設置場所における風況（J-city）

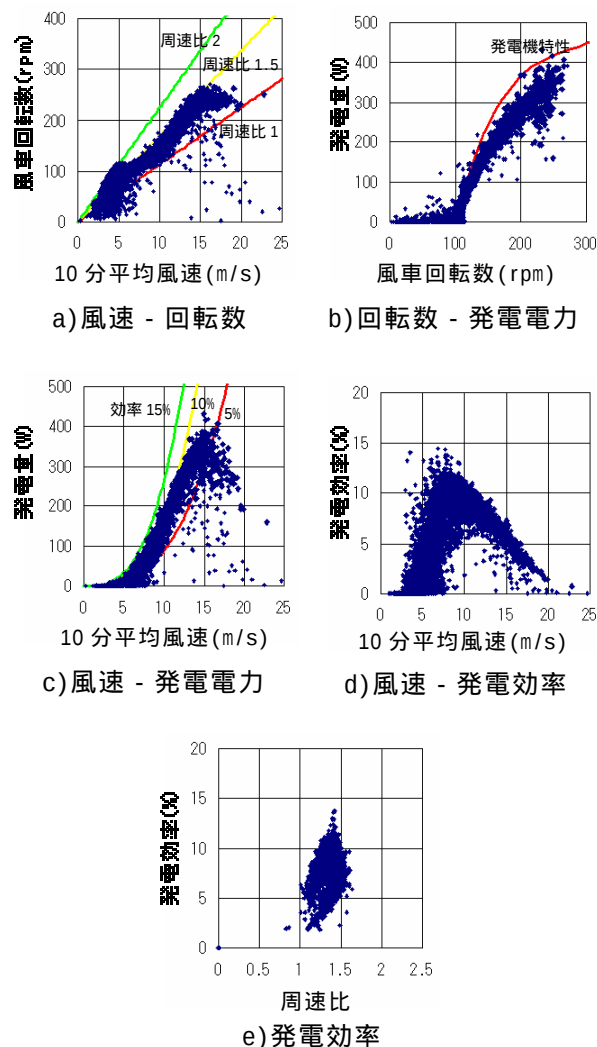


図-13 観測値の相関関係（J-city）

発電量は微量であった。建物の影響も受けるため気象データ等から推定されるものよりも風車に働く風エネルギーは少ない。

- ・ 高さ100mの高層建物屋上では、風エネルギー密度のピークが風速10m/s以上であり、風力発電に適した風エネルギーが得られる。このような平均風速が5m/sを超える頻度の高い場所では、揚力型風車である直線翼垂直軸型が機能すると考えられる。
- ・ J-city 屋上装置では、観測期間8ヶ月の積算発電量は128kWhであり、最大発電効率が13%であった。今後は蓄電システムを構築し、蓄電システムとした場合

の発電量についても調べる必要がある。

- ・ 建物近傍への風車導入にあたっては、風車設置場所の風況をよく調べる必要がある。その結果から、風車の目的、発電特性を考慮してシステムを構築しなければならない。
- ・ 市街地への風車の導入が進んでいるが、その発電実績を系統立ててまとめたものは希である。本報で報告する観測データは、風車の市街地導入に対しての一種の参考資料になると考えられる。

なお、春日マンション屋上装置の観測結果の一部は、
昨年³⁾の所報³⁾に発表したものである。

参考文献

- 1) 丸山勇祐，志村正幸，義江龍一郎，佐竹晃：建物に融合する風力発電装置の開発，前田建設技術研究所報 vol.42，pp.63-70，2001
- 2) 風工学研究所編：新・ビル風の知識，鹿島出版会，1989
- 3) 佐竹晃，丸山勇祐，志村正幸，義江龍一郎：環境共生共同住宅レックスハイツ文京春日 環境配慮技術の導入効果に関する実測調査，前田建設技術研究所報 vol.43，pp.75-82，2002

このページを削除すると 1 ページの書式が乱れます .