

# 建物屋上用マイクロ風力発電システムの開発（その1）

## Development of a Small Wind Turbine Installed on the Rooftop of Buildings (Part 1)

佐々木 亮治\*

Ryoji Sasaki

長谷部 廣行\*\*

Hiroyuki Hasebe

### 要 約

地球温暖化防止に向けて風力に代表される自然エネルギーの利用が進んでおり、新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法の制定などでその関心はさらに高まっている。従来の小型風力発電は高コストで発電量が小さいためモニュメント的な要素が強い。しかしながら、建物屋上の風上側角部では流れが剥離して風速が増加しており、大きな風力エネルギーが期待できる。このエネルギーを利用するために、建物屋上への設置を念頭におき低コストで高効率のマイクロ風力発電システムを開発している。風車の縮尺模型を用いた風洞実験を通して、高効率のブレード形状やブレード枚数に関して検討し、さらにブレードに実際に加わる風力測定や風車による風速低減効果の確認も行った。また、試験的な発電量測定も行い、実用化を目指した検討も行った。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 風車の特長
- § 3. 風洞実験概要
- § 4. 風車の回転特性把握実験
- § 5. ブレードの風力特性把握実験
- § 6. 風車による風速低減効果把握実験
- § 7. 発電量測定実験
- § 8. おわりに

### § 1. はじめに

温室効果ガスによる地球温暖化の現象は世界各国で進んでおり、2005年2月には温室効果ガスの削減に向けた京都議定書が発効された。温室効果ガス削減のために、自然エネルギーの利用が進められており、特に風力発電の導入が世界各国で進んでいる。日本国内でも大規模なウインドファームが数多く建設されてきている。しかしながら、高風速地域の減少や系統連携の問題など大規模ウインドファームの建設は頭打ちの様相も呈している。

一方、小型風力発電は高コストや低発電量の問題もあり、大型に比べて普及が遅れている。また建物等が多い都市内部では、地表面粗度が大きいと風速が減速し、風力発電に適する風速が得られにくい傾向にある。その

ため、都市内の小型風力発電は発電よりもモニュメント的な要素が強い場合が多い。

しかしながら、地上からの高さが高いほど風速は増加するため、高層建物などの屋上では一般的に風速は地上よりも高くなる。さらに、建物屋上の風上側隅角部では流れが剥離することにより風速が増加するため、これらの位置では、高い風力エネルギーを得ることができる。このエネルギーを利用して、当社では東北大学らと共同で建物屋上での高風速域を対象としたマイクロ風力発電システムを開発している。本開発風車は水平軸のダリウス型であり、安定性や荷重の面で、建物屋上への設置に適している。また従来のプロペラ型よりも低コスト化が期待でき発電量も大きくできるため、発電コストを低くすることができる。本報では、縮尺模型を用いて風車の基礎的な風洞実験を行い、風車の特性を把握した結果について報告する。

### § 2. 風車の特長

現在、小型風車はプロペラ型や垂直軸型が主流となっているが、本風車は水平軸のストレートダリウス型風車である。本風車の特長を表-1に示す。

一方、どの風向でも対応できる垂直型とは異なり、水平軸では風力を得やすい風向が限定される問題がある。しかしながら、各地域で卓越風向が限定されることが多く、その風向を考慮して風車を配置することで十分に対応できると考えられる。

\* 技術研究所技術研究部環境技術研究課

\*\*技術研究所技術研究部建築技術研究課

表一 本開発風車の特長

①高風速域対応	高風速でも風車が安定しているため、カットアウト風速も従来のプロペラ型風車よりも高く設定でき、高風速域の高い風力エネルギーを有効に利用できる。
②低コスト	高エネルギーを利用することで得られるエネルギーが大きく、発電コストを下げる事が可能である。また構成部材の簡素化に努め、kW 当りの販売コストも従来よりも下げられる。
③低振動・低騒音	従来のプロペラ型風車は片持梁形式で構造的に不安定であるが、水平軸の場合は2点以上で支えるため単純梁形式となり構造的に安定する。その安定性から振動が低減され、建物内への振動伝播も減少する。また、本風車では直線タイプのブレードを採用しているため、従来のプロペラ型風車のように風切り音が生じにくい。従って、市街地に風力発電を設置する上で最大の懸案事項の1つである騒音に関して、問題はほとんどないといえる。
④低い風車高さ	水平軸の利点として、出力を大きくしても設置高さを2.0~3.0mと低く抑えられる。そのため、既存建物への設置時の高さ制限、都市景観上の問題にも大きな影響を与えない。
⑤屋上の有効利用	屋上に吹く風のエネルギーを利用することで、屋上の風車背面において風速が1~2割に低下する。屋上の風速低下は、屋上緑化などの屋上の有効利用にもつながる。

§ 3. 風洞実験概要

3-1 風洞設備

風洞実験は、東北大学大学院工学研究科所有のエッフェル型風洞を用いて行われた。風洞の測定胴は、高さ1.0m、幅1.4m、長さ6.5mである。気流は一樣流（乱れ強度約1%）と格子乱流を用いたが、本報では一樣流の結果を中心に報告する。

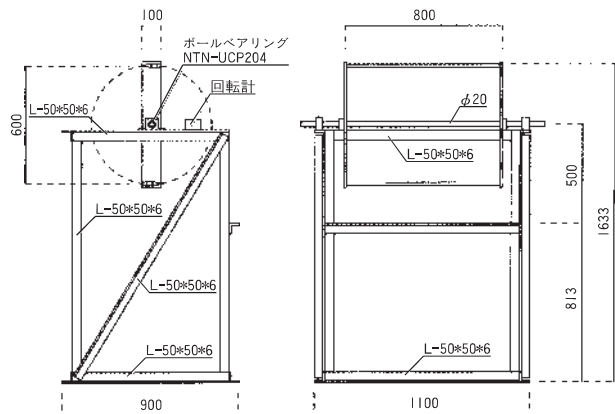
3-2 実験模型

縮尺模型は表一2に示す2種類を用いており、モデルAの実験架台を図一1および写真一1に示す。風車ブレードは図一2に示すNACA0015とNACA0012の2種類を用いており、ブレード素材は樫である。ダリウス型

表一2 実験模型概要

モデル	A		B	
翼弦長 $c$ (mm)	100		100	
ブレード長 $l$ (mm)	800		200	
アスペクト比	8		2	
風車直径 (mm)	600		300	
ブレード数	2	2	3	4
ソリディティ*	0.106	0.213	0.319	0.426

\*風車の掃過面積に対するロータ・ブレードの全投影面積の比



図一1 モデル A 実験用架台 (mm)

風車は自己起動性が低いために、回転初期にはモーターにより風車軸に強制的に回転力を与えている。

§ 4. 風車の回転特性把握実験

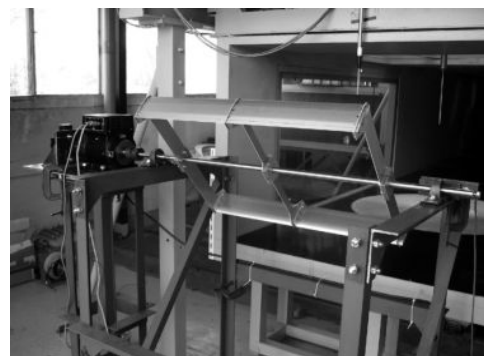
4-1 実験方法

3-2で述べたように、実験時にある風速  $U$  において回転数  $N$  となるように風車に強制的に回転力を与えている。風速  $U$  において、回転数  $N$  が回転に必要な閾値である起動回転数  $N_{th}$  未満であれば風車の回転数は徐々に低下し、やがて回転が止まる。一方、回転数  $N$  が起動回転数  $N_{th}$  以上であれば、回転力を与え続けなくても回転数は徐々に増加し、定常回転数  $N_{st}$  に達する。これらの回転数を非接触型の回転計で測定し、風速と回転数の関係を把握する。ブレード形状の影響はモデルAを、ブレード枚数の影響はモデルBを用いる。

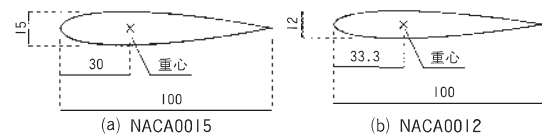
4-2 実験結果

(1) ブレード形状の影響

NACA0015とNACA0012のブレードにおける起動



写真一1 縮尺模型概要 (モデル A)



図一2 ブレード断面 (mm)

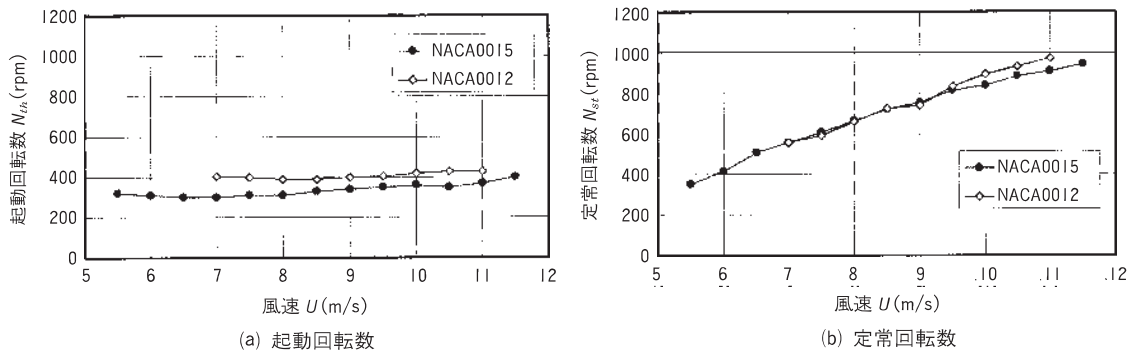


図-3 ブレード形状と回転特性の関係

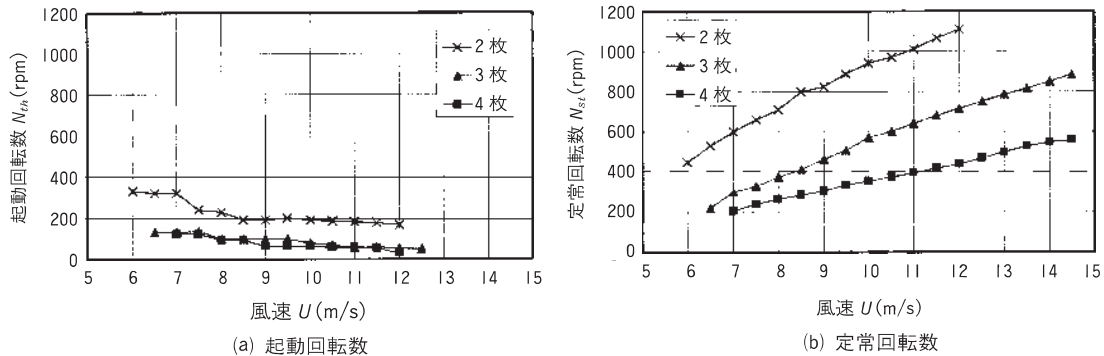


図-4 ブレード枚数と回転特性の関係

回転数  $N_{th}$  と風速  $U$  との関係を図-3(a)に示す。NACA 0015では風速 5.5 m/s 以上で回転しているが、NACA 0012では風速 7.0 m/s 以上で回転している。従って、NACA0015はNACA0012よりも低風速で回転できる。起動回転数  $N_{th}$  はNACA0015の方がNACA 0012よりも低い。両ブレードとも風速が変化しても、起動回転数  $N_{th}$  に大きな変化は見られない。

一方、定常回転数  $N_{st}$  と風速  $U$  との関係を図-3(b)に示す。定常回転数  $N_{st}$  は風速とともに増加する傾向を示しており、ブレードによる差はあまり見られない。両図よりNACA0015は風速 10 m/s の状態では起動回転数である 380 rpm の回転力を与えると回転を開始し、その後は回転力を与えなくても回転数が上昇して定常回転数である 820 rpm で定常状態に達することが分かる。

起動回転数や定常回転数と風速との関係を踏まえると、NACA0015の方がNACA0012よりも風車の回転特性が良いといえる。

(2) ブレード枚数の影響

NACA0015のブレードを用いて、ブレード枚数を2, 3, 4枚と変えて傾向を調べた。前節と同様に、起動回転数  $N_{th}$  と風速  $U$  との関係を図-4(a)に、定常回転数  $N_{st}$  との関係を図-4(b)に示す。図-4(a)よりブレード枚数が増加すると、起動風速が若干上昇していることが分かる。3枚ブレードと4枚ブレードは同様の傾向を示し、両ブレードとも2枚ブレードの回転数よりも低い。また風速の上昇とともに起動回転数が減少している。これは桂・野澤らの結果と同様の傾向である。一般的に

ブレード枚数が多いほど低風速から回転する傾向が示されているが、本実験の結果は異なる。この原因として、本実験ではブレード長に対する風車直径が小さいこと、風車全体に占めるブレードの重量が大きいことなどが考えられる。

一方、定常回転数  $N_{st}$  はどのブレード枚数でも風速の増加とともに上昇しているが、定常回転数は枚数が多いほど低い傾向にある。例えば風速 11 m/s では、2枚ブレードの定常回転数  $N_{st}$  は 1,000 rpm であり、4枚ブレードでは 400 rpm と半分以下の回転数である。

以上の結果を踏まえると、2枚ブレードは3枚および4枚ブレードよりも、低風速で回転し定常回転数も高いことが分かる。

§ 5. ブレードの風力特性把握実験

5-1 実験方法

NACA0015とNACA0012のブレードに加わる風力の測定を行い、風力係数を求め、ブレードの回転力を比較した。測定概要を写真-2に示す。翼弦長  $c$  とブレード長  $l$  は、それぞれ 0.1 m と 0.2 m であり、ブレードはアルミニウム製である。 $x, y$  の座標系と迎角  $\alpha$  を図-5のように定義し、迎角は風洞床面に設置しているターンテーブルを回転させることで変化させている。測定範囲は図-6に示すように、風力の変化が大きいのと考えられる  $-2 \sim 20^\circ$  の範囲では間隔を細かく設定している。 $x$  方向と  $y$  方向の風力である  $F_x$  と  $F_y$  はブレード下部の

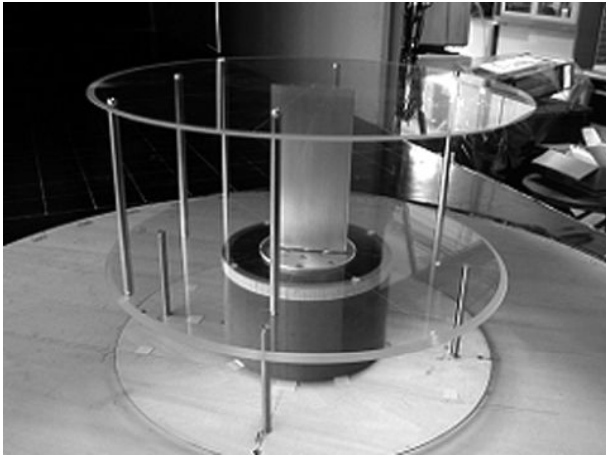


写真-2 風力係数測定概要

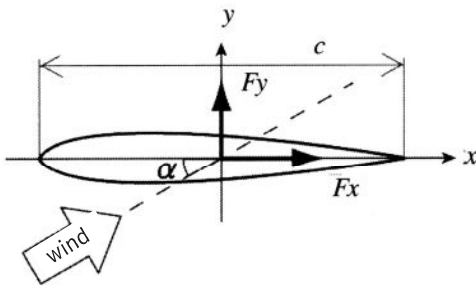


図-5 迎角および座標軸の定義

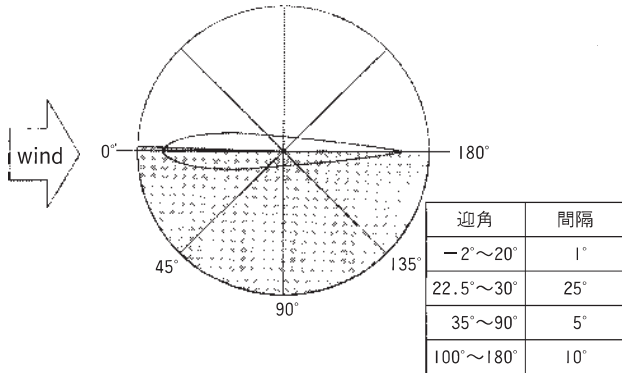


図-6 測定範囲

天秤で測定しており、次式により風力係数  $C_{Fx}$  と  $C_{Fy}$  が求められる。

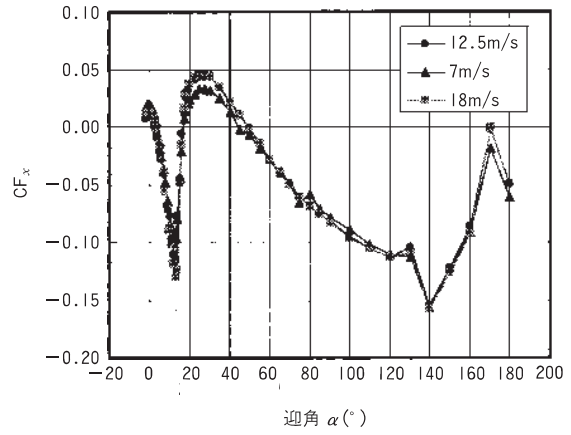
$$C_{Fx} = Fx / (q \cdot c \cdot l) \quad (1)$$

$$C_{Fy} = Fy / (q \cdot c \cdot l) \quad (2)$$

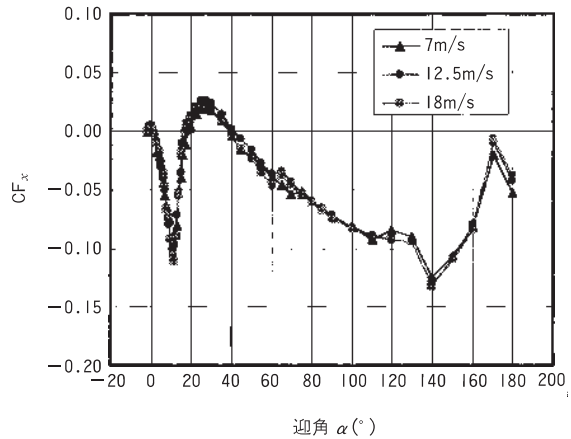
ここで、 $q$ : 速度圧 ( $=0.5 \rho U^2$ ,  $\rho$ : 空気密度)  
 測定時の風速は 7, 12.5, 18 m/s とし、レイノルズ数はそれぞれ  $5.0 \times 10^4$ ,  $8.9 \times 10^4$ ,  $1.3 \times 10^5$  に相当する。

5-2 実験結果

図-7 に迎角  $\alpha$  と  $C_{Fx}$  との関係を示す。 $C_{Fx}$  は風車の回転特性に大きく影響する要素であり、 $C_{Fx}$  が 0 未満のときに  $Fx$  はブレードの回転力となる。 $C_{Fx}$  は 18~40° 付近を除いて負の値であり、約 13° と 140° で負のピーク



(a) NACA0015



(b) NACA0012

図-7 迎角と風力係数  $C_{Fx}$  の関係

を示している。2種類のブレードを比較すると、全体的な傾向は同じであるが、NACA0015の方がNACA0012よりも  $C_{Fx}$  の値が大きい。風速による差は両ブレードともあまり見られなかった。また  $C_{Fy}$  の図は省略するが、基本的な傾向は両ブレードでほとんど差が見られていない。従って、風力で比較した場合もNACA0015の方がNACA0012よりも回転特性が優れているといえる。なお、これらの風力係数を利用して、今後風車の回転特性の数値シミュレーションモデルを構築する予定である。

§ 6. 風車による風速低減効果把握実験

6-1 実験方法

風車後方における風速低減効果を確認するために、NACA0015の2枚ブレードとモデルAを用いて風車後方の風速を測定した。図-8に測定の概要と座標軸を示す。風車前方の基準風速  $U$  と風車後方の平均風速  $U^*$  は、サーミスタ風速計による180秒の平均値としている。測定位置は、風車中心位置から、Z方向に-0.4~0.4 mに0.5 m間隔で、X方向に0.5, 0.9, 1.3 mの位置とした。測定に用いた基準風速  $U$  は、6 m/s と 10 m/s であり、そのときの風車の回転数はそれぞれ約 430 rpm と

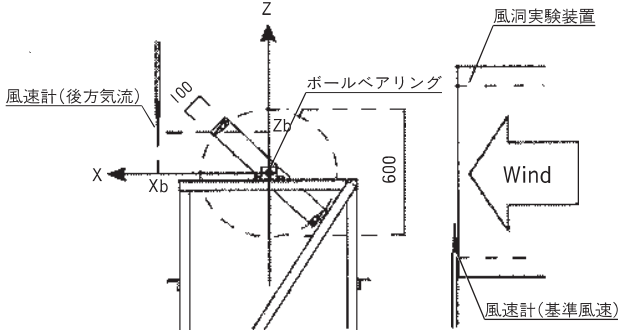


図-8 風車後方風速測定概要

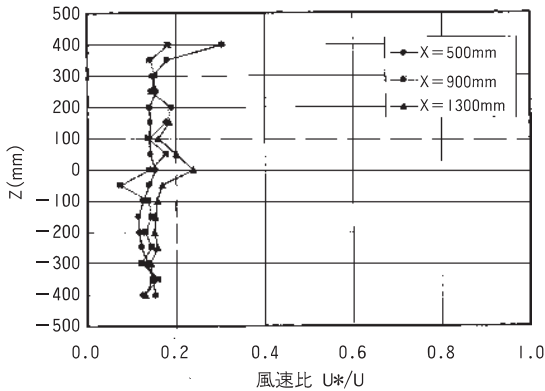


図-9 風車後方の風速比 (風速 10 m/s)

840 rpm である。

6-2 実験結果

風車前後の風速比  $U^*/U$  の分布を図-9 に示す。風車風下では風速比が 0.2 以下であり、減速効果が大いことが分かる。風車中心からの距離  $x=500\text{ mm}$  と  $x=1,300\text{ mm}$  における風速比は同じような傾向を示しており、風速の急激な回復は見られていない。従って、風車は屋上の強風を低減し、屋上環境の改善に有効であることが分かる。

§ 7. 発電量測定実験

7-1 実験方法

前章までの風車の基礎的な実験を通して、効率の良い風車ブレードを検討した。次の段階として、風車の回転軸に発電機を取り付け、実際の風車回転時の発電量を測定していく。発電量測定の概要を図-10 に示す。風車の回転軸の一方にトルク計を取付け、その先に三相交流発電機を取付ける。発電機は可変抵抗器と接続されており、発電時に電圧を調整して抵抗値を変えることが出来る。実験には NACA0015 のブレードとモデル A を用い、ブレード枚数は 2 枚と 3 枚の 2 種類とした。また本実験では、回転性能の向上を目指して、前章までの実験模型から以下の 3 点を改良している。

- ① ブレード素材の変更による剛性増加 (樫→アルミ

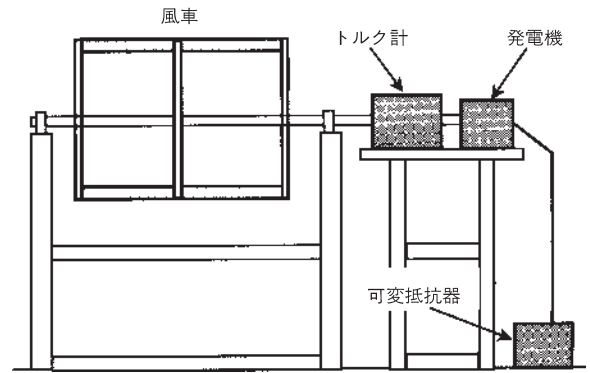


図-10 発電量測定実験概要

ニウム)

- ② ブレード支持材の形状変更による軽量化
- ③ ベアリングの変更による高回転対応

7-2 実験結果

設定したある風速において風が定常的に回転している状態で、可変抵抗器の電圧を調整し、抵抗値を変えながら発電量を測定した。2 枚ブレードにおける風速と発電量の関係を図-11 に示す。図中の丸印は各風速における最大電力を示しており、実線はそれらの点を結ぶように求めたパワーカーブを示している。丸印とパワーカーブがよく対応していることが分かる。3 枚ブレード (図は省略) も基本的な傾向は 2 枚ブレードと同様であるが、発電量は 3 枚ブレードの方が少ない。これは前章までの結果である 2 枚ブレードの方が効率が良いことと対応している。

風車の発電効率は、電力として得られるエネルギーと風車の受風面積で得られる風力エネルギーの比として求められる。なお、本風車の受風面積は  $0.48\text{ m}^2$  である。表-3 には 2 枚ブレードにおいて最大の発電量が得られた電圧での発電効率を、回転数やトルクなどと合わせて示す。風速が高くなるにつれ最大電力も大きくなり、風速  $16\text{ m/s}$  では最大電力約  $133\text{ W}$  となる。発電効率は約  $8\sim 12\%$  であり、市販製品の  $20\sim 30\%$  より低い値となっている。風力発電では発電機の選定が大きく影響するが、本実験で用いた発電機は発電容量が大きいため、本風車

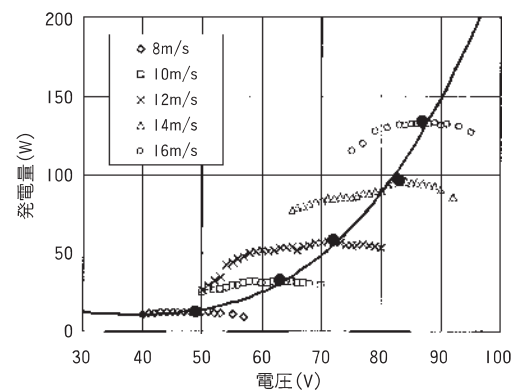


図-11 風速と発電量の関係 (2 枚ブレード)

表一3 最大電力を発生したときの発電効率

風速 (m/s)	電圧 (V)	風のパワー (W)	最大電力 (W)	発電効率 (%)	回転数 (rpm)	トルク (N・m)
8	49	154	12.3	8.0	494	0.34
10	63	300	32.2	10.7	648	0.59
12	72	518	57.6	11.1	757	0.87
14	83	823	96.4	11.7	895	1.19
16	87	1,229	133.3	10.8	964	1.53

サイズの回転特性と合致しなかった可能性が大きい。また、高風速域では実験用フレームが振動し、フレームの剛性不足も見られた。今後は、本風車の回転特性に合う発電機の選定や各部品の再設計などを検討し、さらなる効率の向上を図っていく。

§ 8. おわりに

建物屋上への設置を目的としたマイクロ風力発電システムの開発にあたり、風車ブレードの基本的特性を把握した。各実験の結果より、NACA0015の2枚ブレードが効率が良いことが明らかになった。

一方、試験的に発電量測定も実施したが十分な効率が得られず、実験用風車フレームの剛性不足も問題となった。今後は、システム全体としての効率向上に向けて、風車の軽量化や、発電機、蓄電池、風車フレームなどの構成部品に対する検討を行い、効率の良い風力発電システムを構築していく。

備考

本研究は2003年度から行われた東北大学未来科学技術共同研究センターの植松教授を中心とした「未来都市風力発電研究会」での成果に基づいている。また、本論文は2005年6月に開催されたAPCWE VI (The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering) への投稿論文<sup>2)</sup>を基に加筆修正したものである。

参考文献

- 1) S. Katsura and T. Nozawa, "Rotation characteristics of straight Darrieus type wind turbine with a horizontal", Global Windpower Proceedings, EWEA, 2002, (CD-ROM)
- 2) R. Sasaki et. al, "Development of a Small Wind Turbine of Straight Darrieus Type with Horizontal Axis Installed on the Rooftop of Buildings", APCWE, 2005