

建築物を利用した風力発電技術の開発

DEVELOPMENT OF WIND POWER GENERATOR SYSTEM MAKING USE OF WIND FLOW AROUND THE BUILDING

野々村善民 —*1 平原裕行 —*2
小林信行 —*3

Yoshitami NONOMURA —*1 Hiroyuki HIRAHARA —*2
Nobuyuki KOBAYASHI —*3

キーワード：
風洞実験, 風力発電, 制風システム, 気流性状

Keywords:
Wind tunnel test, Wind power generation, Wind speed control system, Air flow

Since the wind power generator system making use of wind flow around the building may be used effectively in an urban area, we developed such system that is assembled with a micro wind turbine of 500mm diameter and small generator. The basic performance of the element of the turbine was tested and installed at the field near a building for 13 months. The wind power generator system showed the following properties that could have high power coefficient. When the fixed directions of each micro wind turbine were optimized based on the predicted result of the wind environmental assessment at the installation site, it was confirmed that the amount of power generation for a micro wind turbine was 7% of the total wind energy on site through one year practical running.

1 はじめに

風力エネルギーの密度は小さく、不安定である。そのために、事業として成り立っている風力発電は、翼直径を出来る限り大きくし、発電量の増大およびランニングコストの低減が図られており、一極集中型の発電システムになっている。大型風力発電の事業は、電力会社への売電で成り立っている。

電力事業の自由化に伴って、電力入札が導入されたため、売電事業は厳しい状況になっている。一部の大型風力発電は、①メンテナンス、②風の弱い時期、③入札による売電単価の低下などの理由により、稼働率が計画当初に比べ、極端に低くなっている例もある。大都市部から離れた地方の風力発電は、送電ロスもあり、大型風力発電のメリットはさらに小さくなる。一方、新エネルギーを用いた分散型発電システムは、税制上の優遇処置などがあるため、市街地における必要性は高まっている。

風力エネルギーの欠点を補うために、筆者らは、建築物の配置および形状を利用した風力発電技術を開発している¹⁾。風力発電が建築物に問題なく導入できるために、風車の直径は500mmとした（以下、マイクロ風車）。そのために発電量は小さくなり、風車から発生する騒音と振動も低くなっている。量産によるコスト低下が実現すれば、マイクロ風車の普及は拡大するものと思われる。マイクロ風車単体の出力は僅かであるが、今後広く普及すれば、省エネルギー効果はかなり大きくなる可能性がある。

マイクロ風車が普及する上で必要となる基礎データを取得するために、筆者らは、風洞実験と実測を通じて、マイクロ風車の出力特性に関して調査した。また、制風効果を兼ねた発電システム（以下、発電

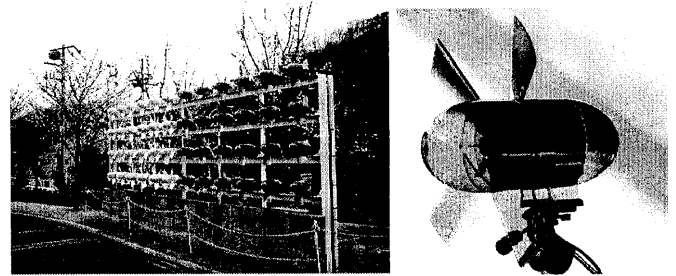


写真1 48個のマイクロ風車を用いた発電制風システム

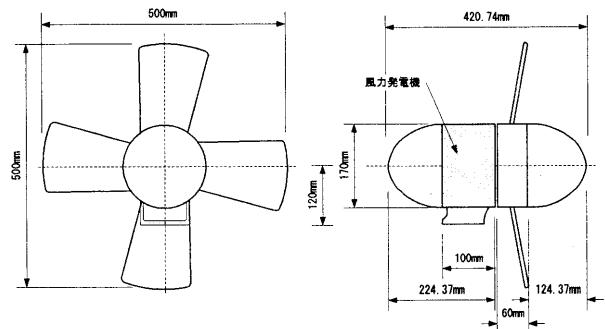


図1 マイクロ風車の形状

制風システム、写真1)を設置して、実測により発電量を計測した。

本報告は、①マイクロ風車単体の出力特性に関する風洞実験結果、②建築物の横に柵状に設置した48台のマイクロ風車（発電制風システム）の1年間に及ぶ発電量の実測結果について、報告する。

*1 東京工芸大学大学院 大学院生(協フジタ技術センター)
(〒243-0297 神奈川県厚木市飯山1583)

*2 埼玉大学工学部機械工学科 助教授・工博

*3 東京工芸大学 工博

*1 Graduate Student, Tokyo Polytechnic University, (Technology Development Division, Fujita Corporation)

*2 Assoc. Prof., Dept. of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Saitama University, Dr. Eng.

*3 Tokyo Polytechnic University, Dr. Eng.

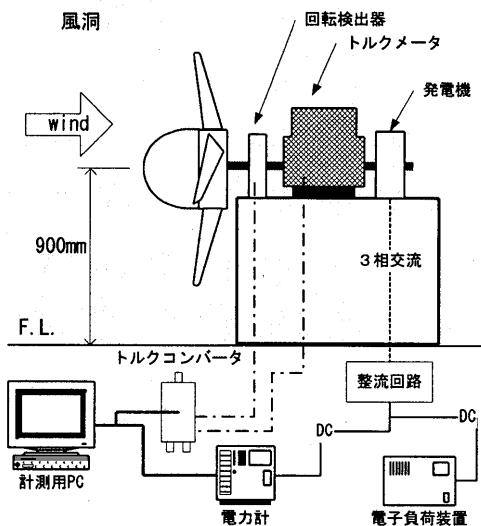


図2 単体マイクロ風車の出力特性の計測システム（風洞実験）

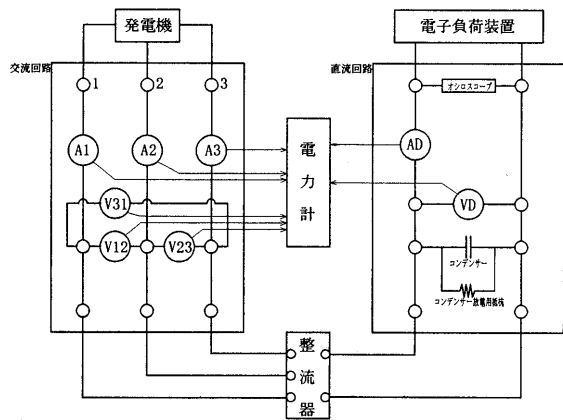


図3 出力電力の計測回路

2 マイクロ風車の概要

図1に示すように、マイクロ風車は直径50cmの風車と小型発電機（直径17cm）から構成される。ステータとコアを格納するための発電機の外装ケース部分は、風車と同様、プラスチック製（バイエル（株）、マクロロンNo. 3208、金型による一体成形）である。製造コストを抑えるために、風車の風向追従機能は省いている。

3 風洞実験の概要（マイクロ風車の出力特性）

図2に単体のマイクロ風車の出力特性を計測するシステムを示す。風車の発生トルクは、トルク検出器（小野測器SS-010）とトルクコンバーター（小野測器 TS-2100）を用いて計測した。回転数は、回転検出器（小野測器 MP-981）を用いて計測した。風洞装置は株式会社フジタ技術センターのゲッチングン型風洞である。測定胴の断面は、高さ1.8m×幅3mである。単体のマイクロ風車を設置した場合の閉塞率は、3.6%である。

図3に発電した電気を計測するための回路を示す。発電機から3相交流電流が出力され、整流器により、直流に変換される。直流電圧と電流は、電力計（HIOKI POWER HITESTER 1301）を用いて計測した。発電した電力は、電子負荷装置（KIKUSUI PLZ303WH）を用いて消費した。風洞内気流の鉛直プロファイルは、熱線風速計（I型、500Hz、

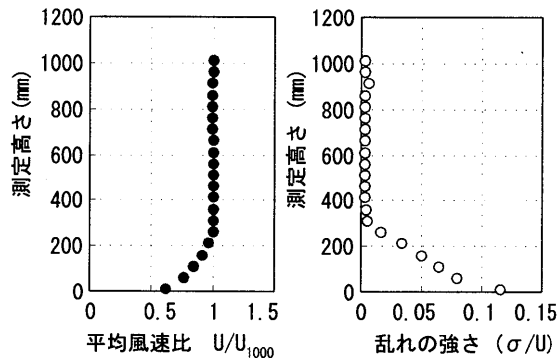


図4 風洞内気流の鉛直プロファイル

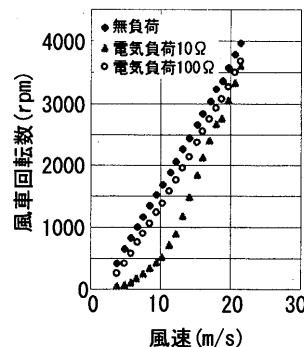


図5 マイクロ風車の回転数

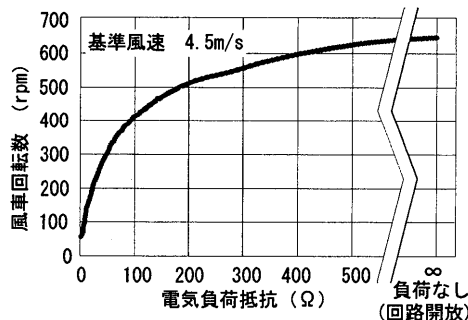


図6 負荷抵抗とプロペラの回転数

30sec）により計測した。

図4に風洞内の鉛直プロファイルを示す。境界層厚さは、約300mmある。マイクロ風車の中心高さは、風洞床面から900mmである。マイクロ風車を通過する気流は、乱れの少ない一様流である。

4 風洞実験によるマイクロ風車の出力特性の結果

4.1 風車の回転数

図5に、電気負荷の違いによる風車の回転数を示す。風速が20m/s以下となる状況では、電気負荷抵抗の違いが、風車の回転数に影響を与える。風速が20m/sを超えた場合、電気負荷の有無に関係なく風車の回転数はほぼ同じになる。

図6に風速4.5m/s時において、電気負荷を変化させた場合の風車の回転数を示す。電気負荷50 Ohm時の風車回転数は、305rpmになり、無負荷の場合は、606rpmである。風速が弱い状況では、比較的小さい電気負荷（1~5 Ohm）を発電機に接続すると、風車の回転数は抑えられる（以下、電気ブレーキ）。電気ブレーキの効果が及ぶ風速の範囲は、図5に示すように、概ね20m/sまでとなっている。

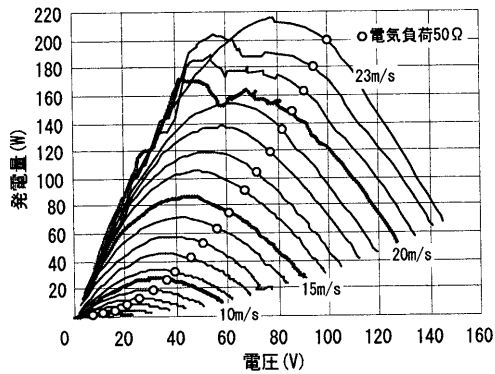


図7 マイクロ風車の出力特性（風洞実験）

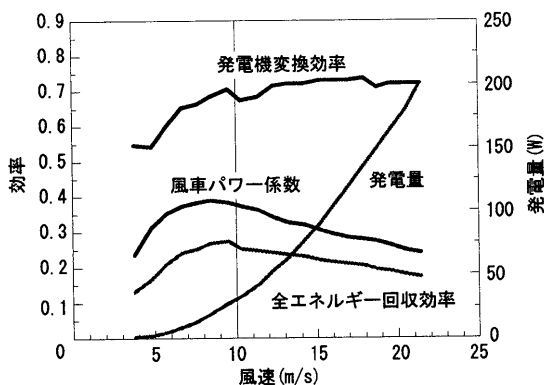


図8 マイクロ風車の出力特性（風洞実験，電気負荷50Ω）

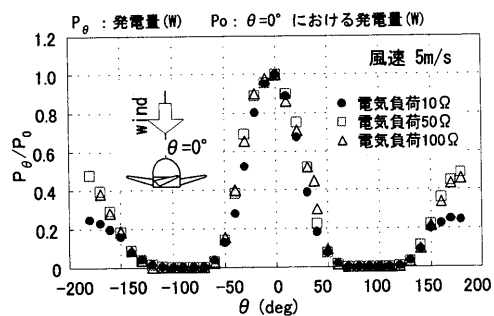


図9 マイクロ風車の発電量の指向性（風洞実験，風速5m/s）

4.2 マイクロ風車の出力特性

図7に、風速と電気負荷を変化させた場合におけるマイクロ風車の出力特性を示す。電気負荷抵抗50Ωを接続した出力特性もプロットしている。起動風速は約3.0m/sである。発電可能風速は4.0m/sであり、発電量は約0.9W(DC9.3V, 0.1A)である。風速12m/s時の最大発電量は、約50W(DC38.5V, 1.3A)に達する。

4.3 電気負荷50Ω時の風車の特性

図8に電気負荷抵抗50Ω時の風車の効率を示す。風速10m/s時の全エネルギー回収率は0.25である。この時の回転数に対する発電機変換効率(C_g)は0.67、風車パワー係数(C_p)は0.37である。参考のために比較すると、市販の太陽電池のモジュール変換効率は、約0.17程度である²⁾。

4.4 発電量の指向性

図9に、マイクロ風車の発電量の指向性を示す。電気負荷は、10Ω、50Ωおよび100Ωの3種類である。風車正面に風が当たる場合($\theta=0^\circ$)、発電量は最も大きくなる。風向の変化とともに発電量は変化し、

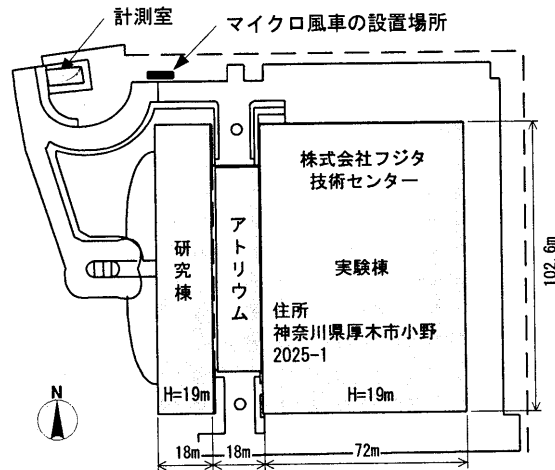


図10 発電制風システムの設置場所

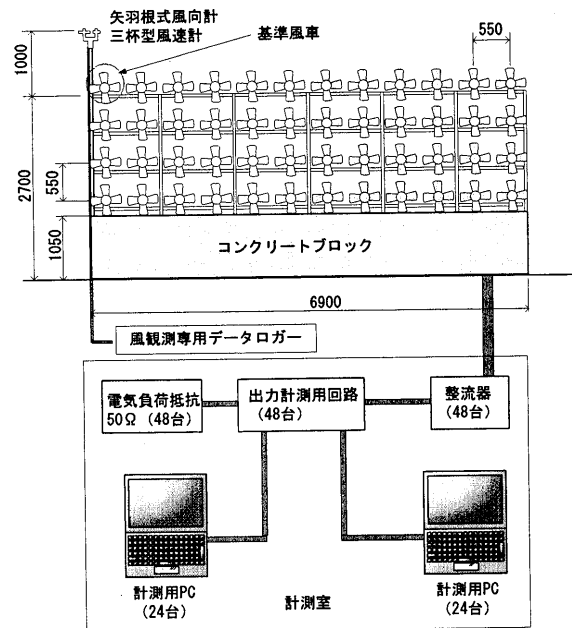


図11 実証試験の計測システム

$\theta=0^\circ$ を中心に左右対称になっている。 $\theta=22.5^\circ$ の指向性の発電量補正係数は、 $R=0.67$ である。

5 実測の概要（制風システムの出力特性）

図10に、発電制風システムの設置場所を示す。発電制風システムの設置場所の選定に当たっては、地上面が平坦であり、建築物によりビル風が生じる場所を考慮した。設置場所の北側に小高い丘があり、南東側に建築物（高さ19m）がある。周辺の地形は起伏に富み、南東側に大きな建物があるために、南側の風が吹いた場合のみ、発電制風システムは発電する。

図11に、実証試験の計測システムを示す。48台のマイクロ風車には、個々に電気負荷（50Ω）が接続されている。各発電機の直流電圧と直流電流は、電圧信号に変換してノートパソコンとデータ収集システム（KEYENCE NR-250）を用いて計測している。サンプリング周波数は、0.5Hzである。制風システムの接近風は、地上から3.7mの高さの位置に矢羽根式風向計（牧野応用測器研究所 VF-016）と三杯型風速計（AF-750）を取付けた。風向と風速データは2秒毎に出力され、専

表1 10分間平均風速の風向別相対発生頻度 (2003年1月~2003年12月)

ランク風速 (m/s)	風向															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	934	1007	853	1009	2064	3343	924	245	226	2183	2104	170	56	82	340	1246
2	467	521	491	674	2035	1362	260	44	82	1794	818	27	5	11	78	334
3	66	114	133	218	1012	162	21	6	19	1630	241	11	1	0	6	25
4	18	41	37	30	187	17	2	1	4	704	71	4	0	0	0	6
5	2	8	4	12	15	2	0	0	4	350	19	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	0	0	2	236	10	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	131	3	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	76	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
Total	1487	1691	1518	1943	5313	4886	1207	296	337	7141	3266	212	62	93	424	1612
風配	0.05	0.05	0.05	0.06	0.17	0.16	0.04	0.01	0.01	0.23	0.10	0.01	0.00	0.00	0.01	0.05

※ランク風速の10m/sは9.5m/s以上10.5m/s未満

表2 風車 (直径500mm) を通過する風の全エネルギー
(2003年1月~2003年12月, 空気密度1.2kg/m³)

図中の数値の単位 (Wh)

ランク風速 (m/s)	風向															
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1	18.33	19.76	16.74	19.80	40.51	65.61	18.13	4.81	4.44	42.84	41.29	3.34	1.10	1.61	6.67	24.45
2	73.32	81.80	77.09	105.82	319.50	213.83	40.82	6.91	12.87	281.66	128.43	4.24	0.79	1.73	12.25	52.44
3	34.97	60.41	70.47	115.51	536.23	85.84	11.13	3.18	10.07	863.70	127.70	5.83	0.53	0.00	3.18	13.25
4	22.61	51.50	46.47	37.68	234.87	21.35	2.51	1.26	5.02	884.22	89.18	5.02	0.00	0.00	0.00	7.54
5	4.91	19.63	9.81	29.44	36.80	4.91	0.00	0.00	9.81	858.59	46.61	0.00	0.00	0.00	0.00	2.45
6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.48	1000.40	42.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	881.81	20.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	763.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	371.97	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	176.63	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	52.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	154.13	233.09	220.59	308.25	1167.90	391.54	72.59	16.15	50.69	6177.71	495.79	18.43	2.41	3.34	22.10	100.13
合計	9434.84															

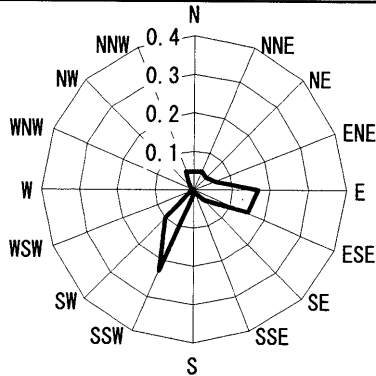


図12 風向別相対発生頻度 (10分間最多出現風向)
(2003年1月~2003年12月)

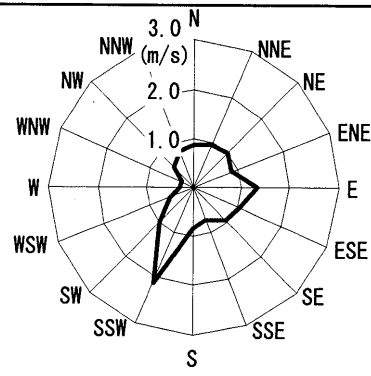


図13 風向別の10分間平均風速
(2003年1月~2003年12月)

用データロガー (MX-C131) で10分間の統計データを記録している。マイクロ風車の設置間隔は550mmであり、隣り合う翼の間隔は50mmである。実測結果の解析期間は、2003年1月~2004年1月までの13ヶ月間である。

6 実測による発電制風システムの出力特性の結果

6.1 発電制風システム設置場所における風況

表1に、発電制風システムの上部における風向別相対発生頻度 (以下、風配) を示す。解析期間は、2003年1月~12月である。ランク風速の最大値は、風向SSWの11m/sであり、発生した頻度は1年間で2回である。

図12に、発電制風システムの接近風の風向別相対発生頻度 (以下、風配図) を示す。設置場所周辺の地物の影響により、接近風の風向は、南側と東側の概ね4風向 (SSW, SW, ESE, E) になっている。

参考のために、神奈川県内の2つの風観測局における上空風の風配

を示す。図14に、横浜地方気象台 (神奈川県横浜市中区山手町99, H=39.6m) の風配図を示す。図15に、Nビル (神奈川県横浜市西区高島町2丁目, H=112m) の風配図を示す。神奈川県の上空風の卓越風向はNになっている³⁾。次に風配が高い風向は、南側 (SSW, SW) である。

図13に、接近風の風向別の10分間平均風速 (以下、平均風速) を示す。風向SSWの平均風速は、約2m/sになっている。上空風向が南側となる場合、隣接建物の影響を受け、接近風の風向は、SSWとSWになり、風速は加速しているものと思われる。

表2に、発電制風システム上部で計測した風観測データから直径500mmの風車を通過する風の全エネルギー (E, 以下、風の全エネルギー) を示す。風の全エネルギーを算出するための空気密度は1.2kg/m³とした。解析期間は、2003年1月~12月である。1年間のEの合計は、9434.84Whになる。風向SSWの風の全エネルギーは、6177.71Whとなり、全体の65%になる。

6.2 発電制風システムの月間積算発電量

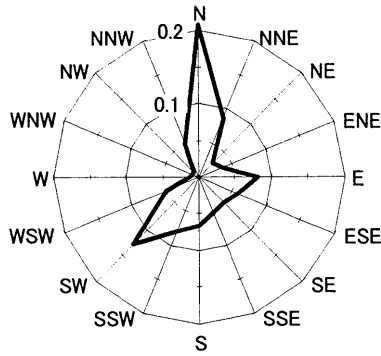


図14 横浜地方気象台の風向別相対発生頻度 (1995年1月～2003年12月, H=39.6m, 10分間平均風速)

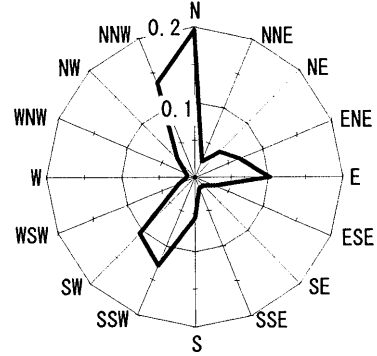


図15 横浜市の上空100mにおける風向別相対発生頻度 (1997年1月～1997年12月, Nビル, H=112m, 10分間平均風速)

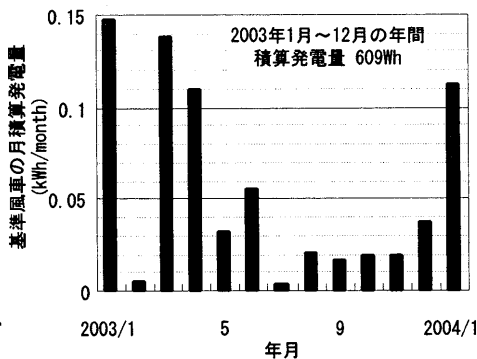


図16 基準風車の積算発電量 (毎月)

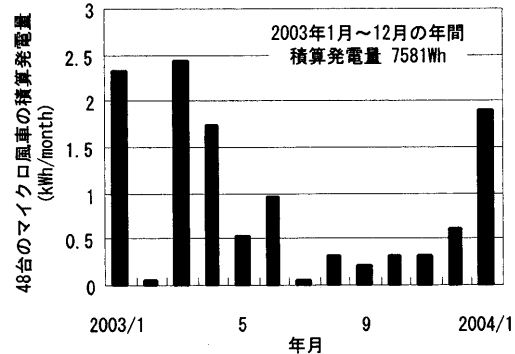


図17 48台のマイクロ風車の積算発電量 (毎月)

図16に、発電制風システムの上端部に位置する基準風車の月間積算発電量を示す。実測結果の計測期間は、2003年1月～2004年1月までの13ヶ月間である。2月の発電量は、ほとんどなく、1月、3月および4月の発電量が多くなる。発電制風システム北側に小高い丘があるために、北側の接近風の風速が弱くなっている。基準風車の年間発電量は、609Whである。

表2に示すように、1年間(2003年1月～12月)の風観測データから算出した風の全エネルギー(風車1台分, E=9434.84Wh)に対して、基準風車は7%を電気エネルギーとして回収できたことになる。

例えば、文献2)に示す横浜地方気象台の年間平均風速(4m/s、風速計の地上高さ:39.6m)を用いて、1台のマイクロ風車を通過する風の全エネルギーは約11000Wh/年になる。横浜地方気象台の周辺の建物屋上(高さ39.6m程度)において、マイクロ風車が設置した場合の発電量は、1台当たり、約770Wh/年になるものと考えられる。建物の屋上などにマイクロ風車を設置した場合、その受風面積(マイクロ風車の台数)に応じた発電量が得られる。

図17に、発電制風システム全体(48台のマイクロ風車)の月積算発電量を示す。発電制風システムの年間発電量は、7581Wh(2003年1月～12月)であった。

6.3 発電制風システムの発電量の分布

図18に、接近風の風向の変化を示す。解析年月日は、2003年3月27日である。解析日の風向は、午前9時頃から風向SSWの一定になっている。

図19に、接近風の平均風速と基準風車の10分間平均出力を示す。平均風速が4m/s以上になると、基準風車は平均風速に応じた発電をしている。基準風車の日積算発電量は107Whであった。風の全エネルギーは、821Whである。

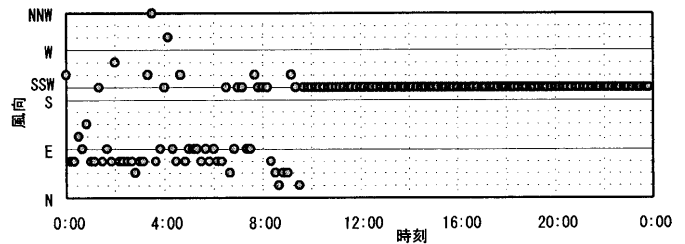


図18 接近風の風向変化 (2003年3月27日)

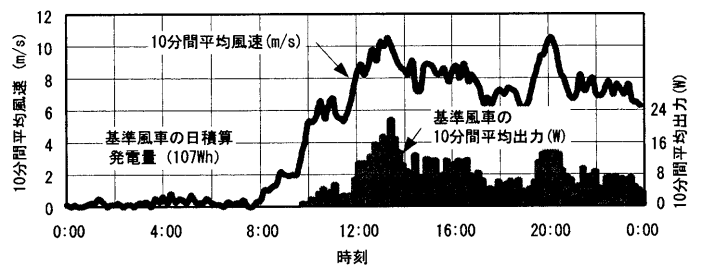


図19 接近風の風速変化と基準風車の10分間平均出力 (2003年3月27日)

図20に、発電制風システムを構成する48台のマイクロ風車の日積算発電量の分布を示す。図中の数値は、各マイクロ風車の日積算発電量を基準風車の日積算発電量で基準化している。発電制風システムに当たる接近風の風速は、地上から高く、西側に向かって、風速は強くなっている。発電制風システムの下部にコンクリートブロックがあるため、最下段のマイクロ風車の出力は低くなると考えられる。発電制風システムの日積算発電量は、2432Whであった。

6.4 基準風車の全エネルギー回収効率

図21に、風向がSSWとなる接近風の平均風速と基準風車の出力を示す。発電制風システムは東西方向に配置しているため、風向SSWの基

準風車の出力には、指向性（風向のずれ角度は、 22.5° ）の影響が出てくる。図中の①の実験値 ($P_{0i} = P_{500} \cdot R$) は、風洞実験による単体マイクロ風車の出力（図7）に指向性による補正係数（図9, $R=0.67$ ）を乗じたものである。図中の②計算値 ($P_{0i} = E \cdot C_A$) は、表1に示す風車を通過する全エネルギーに、 $C_A=0.13$ を乗じたものであり、相関係数は0.92になっている。①の実験値、②の計算値は実測値の分布に概ね一致している。

①の $R=0.67$ （指向性の発電量補正係数）を②に代入した場合、全エネルギー回収効率は $C_A=0.19$ ($=0.13/0.67$)になる。この実測結果から算出した C_A は風洞実験の場合（0.25, 図8）に比べ、小さくなっている。

表3の式(1)に、 $C_A=0.19$, $C_c=0.67$ （風速10m/s, 図8）を代入すると、風車パワー係数は $C_T=0.28$ になる。この実測結果から算出した C_T は、風洞実験の場合（0.36, 図8）に比べ、小さくなっている。

マイクロ風車の出力特性の風洞実験は、風車を風洞測定部に設置したため、周囲の壁（側壁、天井、床）に囲まれた状況である。そのために、風車を通過する風の風速は速くなり、風洞実験により計測した C_A と C_T は、実測の場合に比べ大きくなったものと思われる。

設置場所の風況に応じて、マイクロ風車の向きを決め、マイクロ風車の設置間隔が十分に広くした場合、全エネルギー回収効率 (C_A) は高くなる。マイクロ風車の設置間隔が狭まるほど、 C_A は小さくなり、接近風の流れ方向に対するマイクロ風車の見附面積が大きくなる。その結果、発電制風システム風下側における防風効果は大きくなるものと思われる^{4), 5)}。

5 まとめ

建築物を利用した風力発電を普及するために、筆者らは風車直径500mmと発電機で構成されるマイクロ風車を開発した。マイクロ風車の出力特性は風洞実験と実測により調査した。以下に得られた知見を示す。

- ①風洞実験によるマイクロ風車の C_A （全エネルギー回収効率、電気負荷抵抗50Ω、風速10m/s）は、0.25になり、実測によるマイクロ風車の C_A （電気負荷抵抗50Ω）は、0.19になっている。
- ②実測により風速10m/sの風車パワー係数は $C_T=0.28$ になり、風洞実験の場合（ $C_T=0.36$ ）に比べ、小さくなっている。
- ③マイクロ風車1台（基準風車）の年間発電量は、609Whであり、風の全エネルギー量 ($E=9434.84$ Wh) に対して、7%の電気エネルギーが回収できた。マイクロ風車1台当りの発電量は僅かであるが、建物の屋上などを利用した場合、受風面積（マイクロ風車の台数）に応じた発電量が得られる。
- ④風速が20m/sを超えた場合、電気負荷の有無に関係なく、マイクロ風車の回転数はほぼ同じである。
- ⑤設置場所の風況に応じて、個々のマイクロ風車の向きを決め、マイクロ風車の設置間隔を十分に広くした場合、発電制風システムの全エネルギー回収効率は高くなる。

謝辞

本研究の一部は、平成12年度革新的技術開発研究推進費補助金（環境分野）、「建築物を利用した風力発電技術に関する研究」（代表者 川橋正昭教授 埼玉大学工学部機械工学科）によるものである。研究実施に当たって、埼玉大学大学院生の藤原 徹君、藤浪 賢君に多大な協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

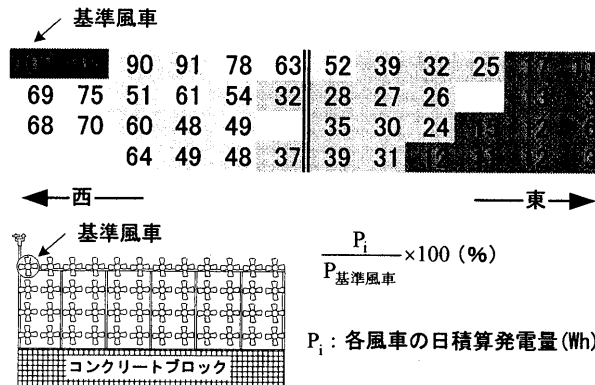


図20 マイクロ風車の日積算発電量の分布 (2003年3月27日)

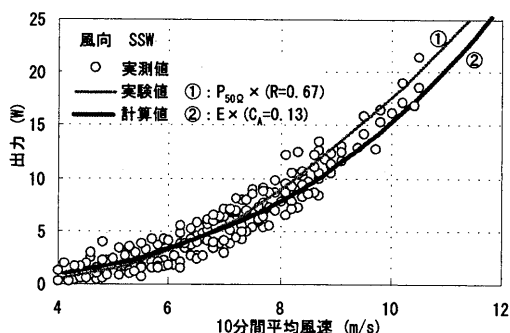


図21 基準風車の出力特性（風向SSW）

表3 記号表

T : 軸トルク (N·m)、(m ² ·kg/s ²)	u : 風速(m/s)
N : 回転数(rpm)	A : プロペラの受風面積(m ²)
W : 軸出力 (W)、(m ² ·kg/s ³)	D : プロペラの直径(m)
ρ : 空気密度(kg/m ³)	E : 風車を通過する風の全エネルギー (W)、(m ² ·kg/s ³)
P : 発電量(W)	C _T : 風車パワー係数
η _p : 風車パワー係数	C _G : 発電機変換効率
R : 指向性の発電量補正係数 P _{0i} /P ₅₀₀	C _A : 全エネルギー回収効率

$$W = T \cdot 2\pi \cdot \frac{N}{60}$$

$$\eta_p = \frac{W}{E}$$

$$E = (\text{単位体積当たりの風のエネルギー}) \times (\text{単位時間当たりに風車を通過する風量})$$

$$C_T = \frac{W}{E} = \frac{C_A}{C_G} \dots (1)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^3 \cdot A$$

$$C_G = \frac{P}{W}$$

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot D^2$$

$$C_A = \frac{P}{E}$$

参考文献

- 1) 野々村善民：マイクロ風車を用いた制風システム、月刊エコインダストリー7月号、pp.13～21、株式会社シーエムシー出版、2003年6月25日
- 2) 株式会社シャープのHP：単結晶太陽電池モジュールのニュースリリース、<http://www.sharp.co.jp/corporate/news/030421.html>、2003年、4月21日
- 3) 野々村善民、中山昌尚、小林信行、平原裕行、田組 潤：関東地方における上空風の気流性状、第16回風工学シンポジウム、pp1～6、2000年12月
- 4) 野々村善民、中山昌尚、平原裕行、小林信行：建築物を利用した風力発電技術に関する研究（その6）プロペラ後流域の気流性状、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.697～698、2003年9月
- 5) 川村成彦、野々村善民、平原裕行、小林信行：建築物を利用した風力発電技術に関する研究（その7）、複数のマイクロ風車による出力特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp699～700、2003年9月
- 6) 野々村善民、平原裕行、小林信行：建築物を利用した風力発電技術に関する研究（その9）、複数の風車の周辺における気流性状、日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道）、2004年8月（投稿中）
- 7) 野々村善民、中山昌尚、小林信行：建築物を利用した風力発電技術に関する研究（その5）、マイクロ風力発電システムの出力特性、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、pp513～514、2002年8月

[2004年4月20日原稿受理 2004年7月29日採用決定]