

風レンズ風車の開発と今後の展望

Development of a highly efficient wind turbine and its future

大屋 裕二*

Yuji OHYA

*工博 九州大学教授, 応用力学研究所 (〒816-8580 福岡県春日市春日公園 6-1)

We have developed a new wind turbine system that consists of a diffuser shroud with a broad-ring brim at the exit periphery and a wind turbine inside it. The shrouded wind turbine with a brimmed diffuser has demonstrated power augmentation for a given turbine diameter and wind speed by a factor of about 2-5 compared with a bare wind turbine. This is because a low-pressure region due to a strong vortex formation behind the broad brim draws more mass flow to the wind turbine inside the diffuser shroud. For the application to a mid-size wind turbine, we have been developing a compact-type brimmed diffuser. A couple of research projects related to the wind-lens turbines are introduced. Finally, a numerical prediction method of wind system based on LES, called RIAM-COMPACT, is explained.

Key words: Wind turbine, Flanged diffuser shroud, Power augmentation, Wind tunnel experiment

1. はじめに

再生可能でクリーンな風力エネルギーは、地球温暖化や化石燃料の枯渇問題を背景に現在飛躍的な発展を遂げ、新エネルギー分野の大きな役割を担おうとしている。九州大学風レンズ研究グループでは、比較的低風速の地域でも十分な発電を可能にし、風況が良い地域ではさらに大きな発電を可能とする新しい風力発電システム「つば付きディフューザ風車：風レンズ風車と呼ぶ」を開発してきた。本稿では、その内容と開発過程を紹介する。

1998 年、大型境界層風洞(幅 3.6m x 高さ 2m x 長さ 15m)の竣工とほぼ時を同じくして、九大学工学研究院のほうから風力エネルギーに関する研究の話が持ち込まれた。私たちの研究室としても今まで、強風災害、耐風工学、風環境、大気境界層の性質に関する研究が主流であったが、風の恩恵を受けたいという、風力エネルギーの利用に関する研究の興味も次第に強くなっていった時期でもあった。我々内部からの問いかけと外部からの働きかけが、まさにタイミングよく、啐啄の機として生まれ、発展していったのが以下に紹介する研究である。

風力エネルギーの有効利用で最たるものは風力発電であろう。私たちは従来にない高出力の風車発電システムが実現できないのか話し合った。このためにいかにしたら風車に風を集められるか、強い風をあてられるかなどをブレインストーミング的に発案し合った。また、他に同好の士を募って学内で横断的な研究グループへと発展させることにした。現在は、航空宇宙工学部門の諸グループをはじめ、機械工学部門のグループ、船舶海洋システム工学部門、総合理工学研究院、人間環境学研究院などの研究者が集まって総勢 20 名ほどの風レンズ研究グループを形

成している。風レンズ研究グループの目指すものは以下である。

- ・ 何らかのしかけで風を集めて速くする：集風装置の開発
- ・ 地形や地物の増速効果を予測し利用する：局地的風況予測法の開発
- ・ 他の原理による風力エネルギーの変換：フラッタ発電など
- ・ 熱による風の発生を利用したハイブリッド風力発電：太陽熱による上昇風の生成利用など
- ・ 風車騒音の軽減による設置可能地域の拡大
- ・ 風車発電の最適な制御方法の研究
- ・ 発電した電気の効率的な貯蔵法の研究

2. 高出力風レンズ風車の開発

2.1 風レンズとは

風車による発電量は風速の 3 乗に比例する。水力発電がダムによって水のエネルギーを集中させることによって成立するように、風力発電においても地形や構造物の流体力学的性質をうまく利用して風を増速させ、風エネルギーを局所的に集中することができれば、発電量は飛躍的に増加し、発電適地は拡大し、発電可能日数も増えることが予想される。このように積極的に風のエネルギーを集めることは、従来ほとんど研究の対象とされてこなかった。本研究は、風のエネルギーを効果的に集めるにはどのようにすればよいか、集められた風から有効にエネルギーを取り出すには、どのような風車にすればよいかということを研究目的とするものである。「風レンズ」とは、風を集めるという意味をこめて新しい研究の目的を

象徴するように与えた名前である。

2.2 集風体の考案と風レンズ風車の開発

(1) ディフューザタイプの集風体

実用化を考えると、単純な構造体で集風効果を生み出したいと考えた。図-1のようにノズル部、ディフューザ部を基本形として一様流中に置き、中心軸上の速度変化を調べた。その結果、ディフューザ部の入口近くで大きく増速されることがわかった。一般に風を集めようとするときノズル形状の出口付近が最も速い流れが作られるような常識にとらわれるが、結果はディフューザの入口付近で最も増速できることが分かった。しかし、これは「車輪の再発見」であった¹⁾。

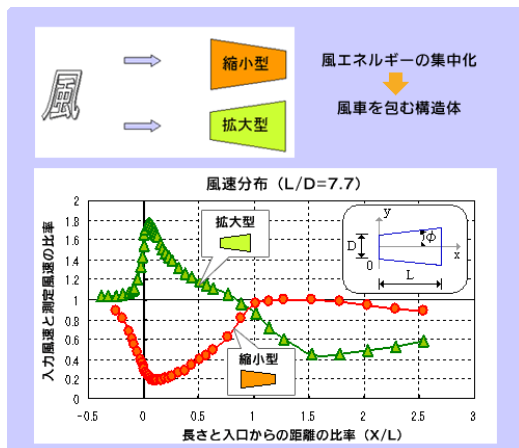


図-1 集風構造体としてのディフューザの選択

(2) 「つば」という渦形成板のアイデア

ディフューザ部の長さを長くすると入口付近の風速はさらに速くなるが、短いディフューザで速い流れを作りたいと考えた。そこでディフューザ出口周囲に「つば」と称して、渦形成板を取り付けてみた。普通、物体周囲流を考える場合、主流に対して妨害物となるようなものはつけないのが常識であるが、「つば」の設置はまさに逆転の発想であった。「つば」という渦形成板は、その強い渦形成のため、背後に低圧部を生成し、風は低圧部をめがけて流れ込んでくる。そのためにディフューザ入口付近ではさらに大きな増速効果が得られる。図-2にその概念をスケッチしている。このようにして集風加速体としての「つば付きディフューザ」（風レンズ）が生まれた^{2,3)}。

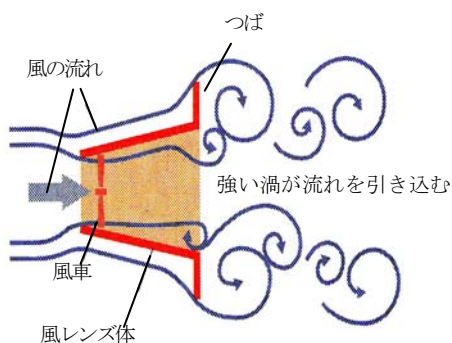


図-2 風速増加のメカニズム

(3) つば付きディフューザ風車の簡易理論

つば付きディフューザの最適形状を求めて種々のパラメータの検討を行った。ディフューザの効率としてふつう片開き角は4度前後が最適であるが、風車を入口に設置するともっと大きな開き角の設定が可能になることがわかった。このため、ディフューザの圧力回復係数が大幅に向上する。つば付きディフューザの周辺流れに関して、風車を設置しない場合の流れと、設置した場合の流れの変化は数値計算モデルとして参考文献⁴⁾に見られる。

風レンズ研究グループの中で、つば付きディフューザ風車に関する簡易理論と設計法を開発した^{5,6)}。この理論によると、つば付きディフューザ風車の性能を決定づけるパラメータは、ディフューザ背後の静圧とディフューザの圧力回復係数の二つである。したがってディフューザの開き角を大きくとることの有利さ、およびつばによる背圧低下の効果が実証される。この簡易理論より設計され製作した風車翼を使用し、発電出力実験を行うと大きな出力増加を得た。

(4) つば付きディフューザ体（風レンズ体）の最適形状のさらなる検討

ディフューザ入口にインレット部を設け、風が流入しやすい形状とした。インレット部とディフューザ部を全体形状としてみると、ベンチュリタイプの構造体の出口につばが付随しているものとなる。この他、センターボディの検討、ハブ比の検討、そしてインレット部の改良を重ねて、つば付きディフューザ体の最適形状は固まっていっていった。図-3に示すように、風車単独の場合の出力係数 C_w （発電量 $P/(0.5\rho U^3 A)$ で定義する。ここで ρ は空気密度、 U は風速、 A はロータの回転面積）と比較して、つば付きディフューザ風車（風レンズ風車）は、同じ風速、同じロータ径で、5倍強の出力増加が達成され、 C_w は 1.4 を記録した。図-3の横軸は周速比 $\lambda (= \omega r/U)$ である（ ω は角速度、 r はロータ半径）。図-4に風レンズ風車 1 号機（定格 500W、ロータ直径 0.7m）を示す。この試作機はディフューザ入り口（スロート部）直径 D に対して、ディフューザ長さ $L=1.25D$ の大きさ（片開き角 12 度）を有し、つば高さは $0.5D$ としている。

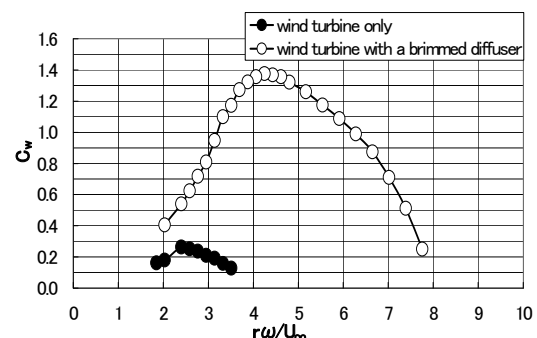


図-3 風レンズ風車の発電出力性能実験

風レンズマイクロ風車の長所をあげると、

- 1) 5倍の高出力を達成（風エネルギーの集中「風レンズ

効果」を利用)。

2) 「つば」によるヨー制御 (出口端の「つば」は、風見鳥のように、風向きの変動に応じて風レンズ風車を回転させ、常に風車が風向きに正対する配置に制御する)。

3) 風車騒音の大幅低減 (基本的には低周速比翼の採用、および翼先端からの渦がディフューザ内部境界層と干渉し抑制されるという流体力学的メカニズムで⁷⁾、空力音が大幅に低減して騒音はほとんど気になることはない)。

4) 安全性の向上 (高速で回転する風車が構造体で覆われている)。

(5) プロトタイプ機のフィールド実験

ロータ直径 0.7m (定格 500W) (図-4) のプロトタイプ機を製作し、応用力学研究所の空き地に実験タワーを建設し、風速、風向、発電出力のデータを取得した。実験タワーの設置場所として周囲の建物等の影響で風は弱く、決して風況に恵まれた場所ではないが、風レンズ風車は風速 2m/s くらいからでもよく回っている。また、頻繁に変動する風向に追従して風車は風の吹いてくる向きに自動的にヨー回転している。風レンズ風車が回っている様子は (<http://www.windlens.kyushu-u.ac.jp/>) で見る事ができる。図-4に示すように自然風中においても風車単体に比べ約 5 倍の発電出力が得られている。

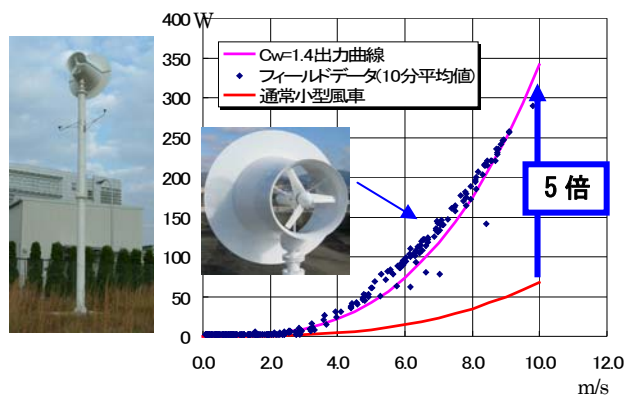


図-4 500W 風レンズ風車の野外実験結果

3. コンパクト風レンズ風車の開発—中型・大型風車への適用を目指して

我々は現在、この風レンズ風車をより大型化することを考えている。しかし、この 500W 風レンズ風車に取り付けられた集風体は集風体内径 D に対して、集風体長さ L_t が $L_t=1.47D$ と比較的長い (ここで集風体内径 D とは、集風体スロート部の内径を意味する。図-5 参照)。そのため、風レンズ風車を大型化するにあたって、構造重量と風荷重が問題となる。そこで、我々は集風体内径 D に対して集風体長さ L_t が極めて短い、すなわち上記の問題を

克服可能なコンパクトな集風体 ($L_t < 0.4D$) を提案する⁸⁾。

比較的コンパクトな集風体からほとんどリング状の集風体まで、数種類の集風体 (つば付きディフューザ) を製作し、コンパクト風レンズ風車としての発電出力性能を風洞実験において検討し、更に野外実験においても検証した。

3.1 風洞実験法

(1) 風洞および集風体モデル

実験に用いた風洞は九州大学応用力学研究所の大型境界層風洞である。

3.6m 幅 $\times$ 2m 高さ $\times$ 15m 長さの測定部を有し、最大風速は 30m/s である。

実験ではブロッキングの影響を避けるため、風洞測定部の天井壁、側壁を取り外し、開放測定部として実験を行った。今回実験で用いた集風体の大きさは集風体内径 $D=1020\text{mm}$ で、これにロータ直径 1m の風車翼が入る。コンパクト風レンズ風車の

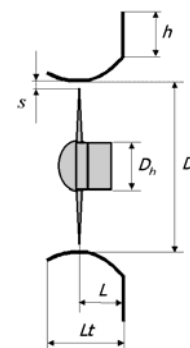


図-5 風レンズ風車のスケッチ

概要を図-5に示す。A 型、B 型、C 型、S 型と名づけられた断面形状の異なる 4 つの集風体を製作した。表-1 は、それぞれの集風体内径 D に対する集風体長さ L_t の比 L_t/D と、集風体出口面積と集風体スロート部面積の比 μ を表したものである。4 種類の集風体は長さ L_t がほぼ等しく (表-1 では $L_t=0.22D$ の集風体長さを ii 型と記述している)、異なる点は集風体出口付近の曲率である。S 型集風体は 500W 機の直線ディフューザを短くしたもので、スロート部から 12° の片開き角を持った直線型集風体である。これに対し、出口面積をほぼ等しくして曲率をつけた曲面集風体が A 型集風体である。A 型、S 型集風体よりも出口面積を大きくし、より曲率をつけた曲面集風体が B 型、C 型集風体である。C 型の曲面はサイクロイド曲線を採用している。図-6 はそれぞれの集風体の断面形状を表したものである。ここでハブ比は全て $D_h/D=13\%$ である。チップクリアランス s は 10mm である。

表-1 Parameters of wind-lens shapes

Diffuser	prototype	A ii	B ii	C ii	S ii
L_t/D	1.470	0.225	0.221	0.221	0.225
μ	2.345	1.173	1.288	1.294	1.119

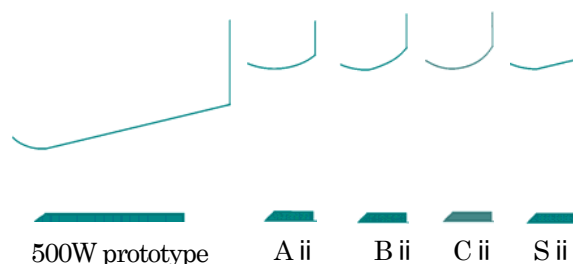


図-6 種々の風レンズ形状

(2) 発電性能実験

実験方法は風車後方にトルク計を接続し、負荷としては AC トルクモーターをその後方に設置し、無負荷から徐々に負荷をかけた状態で風車のトルク $Q[N \cdot m]$ および回転数 $n[Hz]$ を計測した。発電量 $P[W] = 2\pi n \cdot Q$ を算出し、発電性能曲線を求めた。風車出力係数は $C_w = P / (0.5 \rho A U_0^3)$ で定義し、周速比は $\lambda = r\omega / U_0$ で定義する。A はロータ回転面積、 $\omega = 2\pi n$ 、 r はロータ回転半径、 ρ は空気密度である。風レンズ風車モデルは後方に設置したトルク計とトルクモーターの取り付けベッドから長い距離の片もち支持で測定部中央に設置した。図-7 に実験概要を示す。 U_0 は上流の近寄り風速である。実験風速は $U_0 = 8m/s$ である。

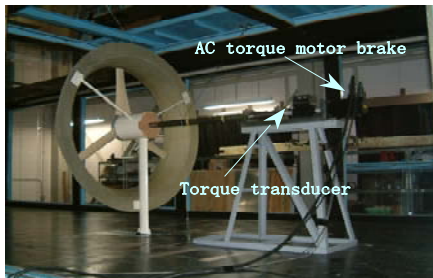


図-7 風レンズ風車の出力性能試験

本研究で用いた風車翼は、産業技術研究所によって開発された MEL 翼形を基本形状としている。MEL 翼の各断面の翼形には、翼根断面から翼端に向けて順に MEL20M01, MEL18M31, MEL12M84 と呼ばれる 3 種類の翼形を配した。MEL 翼形は失速特性が穏やかであるという特徴を持ち、風車用の翼形として有効である。風車負荷係数 C_T (後述) は、つば付きディフューザ風車の簡易理論⁶⁾に基づき、 $C_T = 1.2$ として翼の設計を行った。

(3) 流速および静圧測定

集風体内部のスロート部、すなわち風車位置付近で翼根から翼先端方向に x 方向平均流速 U_1 、および静圧 P の半径方向分布を測定した。流速の測定には I 型プローブを装着した熱線流速計で、静圧の測定には管直径 3mm の銅管静圧管 (静圧孔 0.5mm) をトラバース装置で移動させた。

3.2 実験結果

(1) 集風体形状の検討

図-8 は、つば高さ $h = 0.1D$ とし、A ii, B ii, C ii, S ii 集風体のすべてに関して出力性能試験を行った結果である。どの出力曲線も高周速側から低周速比 ($\lambda = 3.0$) まで良好な出力を保ち、失速前までなだらかな曲線を描き、MEL 翼形の性能が十分に現れている。図-8 を見ると、出口面積が S ii 集風体とほぼ等しい A ii 集風体の出力が S ii 集風体を上回っている。すなわち、集風体のディフューザ部を直線から曲線に変えたことにより出力の増加が認められた。さらに A ii 集風体の出口面積を大きくし、より曲率をつけた B ii および C ii 集風体では、さらなる出力増加が認められた。

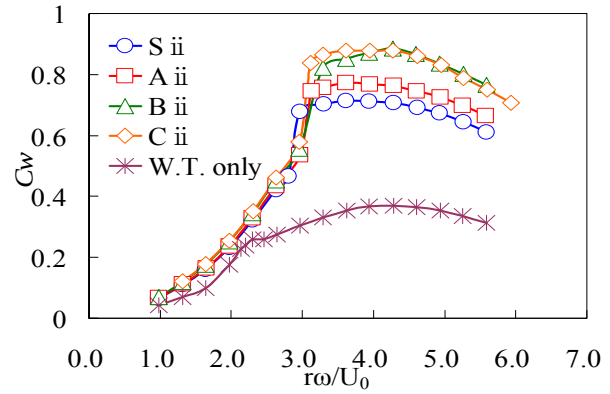


図-8 様々な風レンズ形状の発電出力係数

この出力差を詳細に検討するために、出力差が最もあった B ii 集風体と S ii 集風体で流速・静圧測定実験を行った。すなわち、集風体スロート部での平均流速と、翼前面と後面との圧力差を測定し、B ii 集風体と S ii 集風体の集風加速率 $K (= U_1 / U_0)$ と負荷係数 $C_T (= 2(P_1 - P_2) / (\rho U_1^2))$ の比較を行った。ここで P_1 は風車翼前面の圧力、 P_2 は風車翼後面の圧力である。図-9 はその結果である。図-9 の縦軸の値は集風体内径 D で半径方向を割ったもので、 $r/D = 0.5$ の位置が集風体のスロート部の内壁である。図-9 を見ると、集風加速率 K は B ii 集風体、S ii 集風体であまり変化は見られない。しかし、負荷係数 C_T で明確な違いが現れている。風車の出力は風車入力係数 C_p

$$C_p = \frac{\int_A (P_1 - P_2) U_1 dA}{\frac{1}{2} \rho U_0^3 A} = \int_A C_T K^3 \frac{dA}{A} \quad (1)$$

に依存する ($C_w = \eta C_p$, η は風車効率)。そのため、 C_p を評価することで風車出力を評価することができる。 C_p は式(1)のように集風加速率 K の 3 乗と負荷係数 C_T の積で

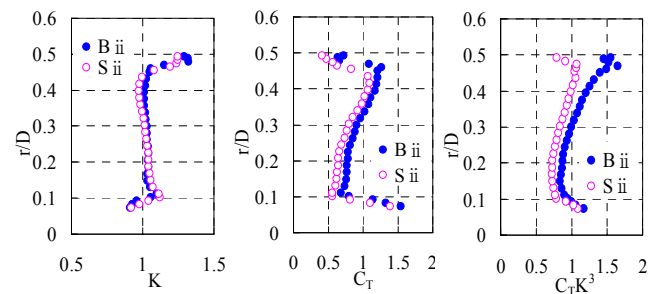


図-9 風レンズ形状 B ii と S ii における集風加速率 K 、負荷係数 C_T 、入力係数 $C_T K^3$ の比較

表すことができる。各半径位置での集風加速率 K の 3 乗と負荷係数 C_T の積の分布は図-9 のようになる。このため、出力は集風体 B ii の方が、集風体 S ii よりも高出力ということが分かる。よって、集風体の形状として B ii あるいは C ii を採用し、引き続き集風体長さの検討を行った。

(2) 集風体長さの検討

3.2 節の(1)項の実験結果より、集風体形状としてC型を選択し、集風体長さの検討を行う。C型集風体は $D=1020\text{mm}$ でハブ比は13%のままであるが、表-2に示すように、集風体長さは0タイプからiiiタイプまでの4種類の長さについて検討した。図-10に4種類の長さのC型集風体についての発電性能試験の結果を示す。つば高さは $h=0.1D$ である。図-11には最大出力係数 $C_{W\max}$ の集風体長さ L_t に対する変化を各つば高さに対して示している。予想通り集風体長さが短くなるにつれ、風車出力は小さくなった。しかしながら、つば高さを $h=0.1D$ 以上にとれば、C0タイプでも風車単体の2.0倍、Ciiiタイプでは2.5倍の出力増加が得られる。このように非常にコンパクトな集風体でも2倍以上の出力増加が期待される。

表-2 Parameters of C-type wind-lens

Diffuser	Ciii	C ii	C i	C0
L_t/D	0.371	0.221	0.137	0.100
μ	1.555	1.294	1.193	1.138

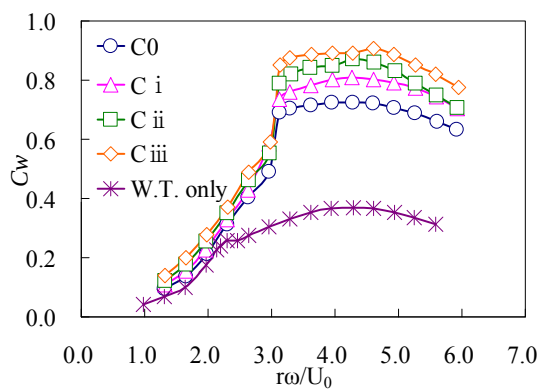


図-10 C型風レンズ形状に関する出力係数 ($h=0.1D$)

(3) コンパクトタイプにおける出力増加の理由

C0タイプはほとんどリング状というべき、超コンパクトなつば付きディフューザである。このような集風体でも図-10、図-11に示したように約2倍の出力増加が達成される。その理由を議論する。500W機のような十分長いディフューザの場合には、集風体スロート部（風車位置）で断面内様な増速（ $K=1.3$ 程度）が得られた。しかし、非常に短いディフューザの場合、図-9に示すように風車翼の先端付近での増速が大きい。このため、風車入力係数 C_p の半径方向分布も翼先端付近で局所的に大きくなる。ディフューザが極端に短いコンパクト風レンズ風車では、集風体の効果は風車翼先端付近で特に大きなものになることが分かる。

3.3 フィールド試験

(1) 1kW ダウンウィンド型風レンズ風車の開発

風レンズ風車の長所はその大幅な出力増加とともに、つばの存在による風見効果がある。集風体そのものが風見鶏の役割をなし、風に正対するように受動的に首を振る。しかし、コンパクトな集風体にするアップウィンド型では風見効果は機能しなかった。そこでダウンウィンド型として風レンズ風車を製作することにした。この場合、図-12

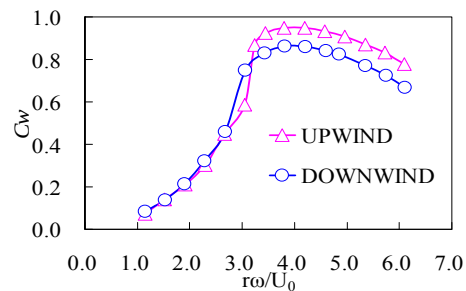


図-12 Upwind型とDownwind型の出力係数の比較 (B_{ii} , $D=1200\text{mm}$, $h=0.1D$)

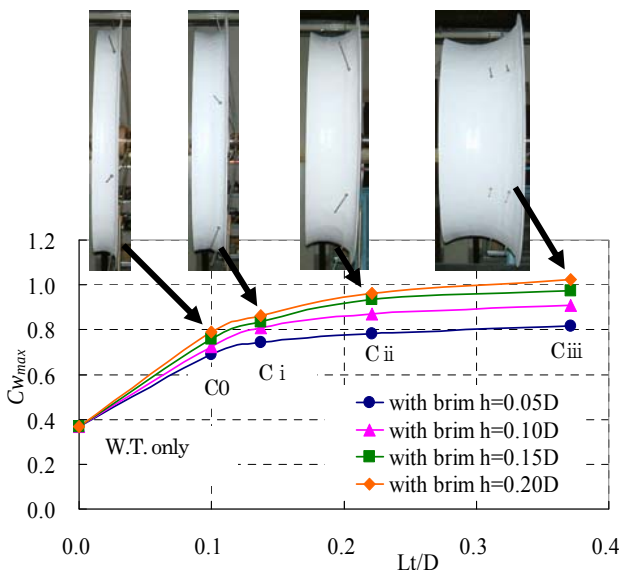


図-11 C型風レンズ形状の長さ L_t に対する最大出力係数 $C_{W\max}$ の変化

に見られるように上流側の支柱および支持リブによって少々性能が劣化するがコンパクト性は生かされる⁹⁾。実用化を目指して1kWタイプのダウンウィンド風レンズ風車を試作した。

集風体形状はBiii形状（ $L_t=0.37D$ ）を採用し、集風体内径 $D=1200\text{mm}$ （ロータ径 1160mm ），つば高さは

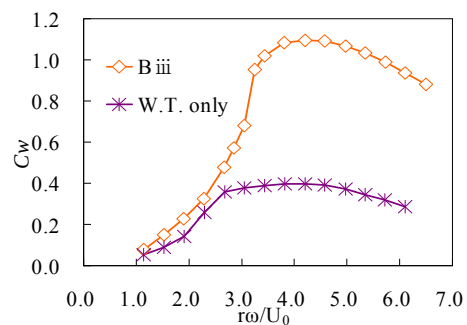


図-13 1kW 風レンズ風車のパワー係数 ($h=0.2D$)

$h=0.2D$ とした。このときの発電性能曲線は図-13 のようになり、約 3 倍の出力増加が見込まれる。この野外試験を九大伊都キャンパスで実施した。図-14 に風車タワーの様子、図-15 に強風時の試験結果を示す。10 分平均データは風洞で得られた $C_w=1.0$ の発電曲線に沿うようにプロットされ、通常の約 3 倍の出力増加が実証された。



図-14 1kW 風レンズ風車 (ロータ直径 1.16m), downwind type

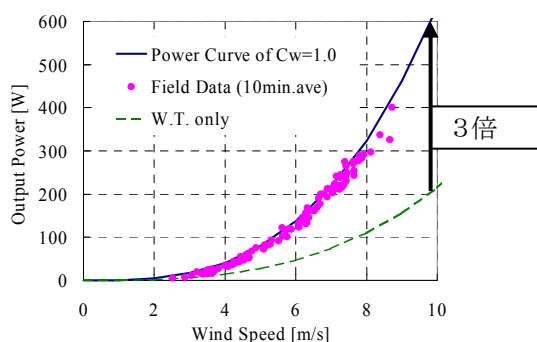


図-15 1kW 風レンズ風車の野外試験 (2006/4/20)

3.4 コンパクト風レンズ風車のまとめ

風レンズ風車のより大型化のために、集風体の最適形状と集風体長さを検討し、非常にコンパクトな集風体を装着した風レンズ風車の発電性能特性を風洞実験によって調べた結果、以下のようなことが分かった。

- ・ コンパクト風レンズ風車の場合、集風体長さが非常に短くなっても 2~3 倍の出力増加が得られた。
- ・ コンパクトな集風体の場合、集風体形状としては曲面形状の方が直線形状よりも優れている。集風体内部壁に沿う流れのはく離が生じないならば、出口面積を大きくすれば、風車の出力は向上する。
- ・ 集風体長さを短くするにつれ、風レンズ風車の出力は低下した。集風体長さに対する最大出力係数 C_{wmax} の変化の傾向はリニアではなく、 $Lt=0.1$ 付近から急速に低下する傾向にある。
- ・ 集風体長さが $Lt=0.1D$ ($B0$, $C0$ タイプ) のほとんどリング状でも、風車単体と比べると約 2 倍の出力増加を示した。さらにロータ直径が 10m 以上となる数十 kW、数百 kW 級風レンズ風車への大型化を考える場合、 $B0$, $C0$ タイプの採用が考えられる。この場合、集風体の構造重量と集風体への風荷重の影響を大幅に軽減できることを考えれば十分に有用

と考えられる。

- ・ 1kW タイプのダウンウィンド型のコンパクト風レンズ風車 (ロータ直径 1.16m) を試作し、野外試験を実施した結果、通常風車と比較して約 3 倍の出力増加が得られることを実証した。

ちなみに、つばの直径を代表長とした出力係数 $C_w^* (=P/0.5\rho A^*U_0^3)$, A^* はつば径面積) を評価すると、このコンパクト風レンズ風車の場合では、 $C_w^*=0.45\sim0.52$ で風車単体の値 ($C_w=0.37$) よりも高い。つまり、風レンズ風車はつば外径までロータ径を大きくする場合より出力が高い。

上記に紹介した風レンズ風車の研究は、最近では経済産業省、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) ホームページ、「よくわかる！技術解説」、新エネルギー・省エネルギー技術分野、小型風力発電関連プロジェクト「画期的な小型風力発電を家庭でも可能に」, [URL:http://www1.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/egy/index.html](http://www1.infoc.nedo.go.jp/kaisetsu/egy/index.html) に紹介され、また 2006 年末には TIME 誌の 11 月 20 日号に紹介された。

4. 最近の動向

4.1 より大型化を目指して

現在、実際に 100kW 級の中型風車への適用を目指してよりコンパクトなつば付きディフューザ (極端な場合、ほとんどリング状のつば付きディフューザになる) の最適形状を検討中である。風洞試験において非常に短いディフューザにしてもその最適形状と適切なつば



図-16 5kW 風レンズ風車

高さを選定すれば 2 倍程度の出力増加が得られている。図-16 に、その前段階として、ロータ直径 2.5m のコンパクト風レンズ風車の試作機を示す。風レンズは C_{ii} 形状で、つば高さは $h=0.1D$ で 10% とした。これは定格風速 12m/s で 5kW の発電性能を示している。図-17 に野外

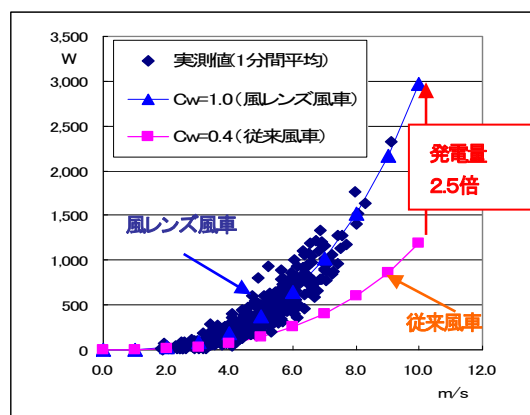


図-17 5kW 風レンズ風車の野外試験

での発電性能結果の一例を示す。

4.2 中国の砂漠域への設置

風レンズ風車の技術開発とその応用に関連した国際共同研究も進行している¹⁰⁾。これはNEDOの提案公募型開発支援研究協力事業で、事業名は「中国における灌漑用の分散型安定電源として活用するための風レンズ風車技術の開発」である。共同研究コンソーシアムの構成メンバーとしては（日本側）：九州大学、（中国側）：清華大学、国家エネルギー実験施設(INET)、甘肅自然エネルギー研究所である。事業内容は、中国の西北部地域に潜在する膨大な風力エネルギーを有効利用して、地球環境に多大な影響を及ぼす中国の広大な砂漠域の緑化事業の第一歩を踏み出す。これらを分散型電源のネットワークとして構成し、バッテリー等を用いた電力貯蔵技術と組み合わせてマイクログリッドとしての電力の安定供給を図り、地下水汲み上げ灌漑システムのミニプラントを構築する。このプラントによって砂漠域の植林・緑化に着手し、その有効性を検証する、というものである。図-18に清華大学・国家エネルギー実験施設に建設した1kW風レンズ風車ウィンドファームの様子を示す。図-19には、中国甘肅省の武威郊外の砂漠域に、図-16に示したロータ直径2.5m、定格発電出力5kWの風レンズ風車を6台規模で砂漠域にグリッド配置した風景を示す。



図-18 中国の清華大学 (INET) に建設した1kW風レンズ風車のウィンドファーム



図-19 中国甘肅省の砂漠に灌漑目的で建設した5kW風レンズ風車ウィンドファーム

4.3 福岡市との共同研究 - 海に面した都市における風力エネルギーの利用

海に面した福岡市は(図-20), その海岸沿いでは、小型風車のハブ高さの12mにおいても、年平均風速が4m/s程度を期待できる場所がある。



図-20 大きな河口(室見川)がある海岸線(福岡市, 百道浜海浜公園)

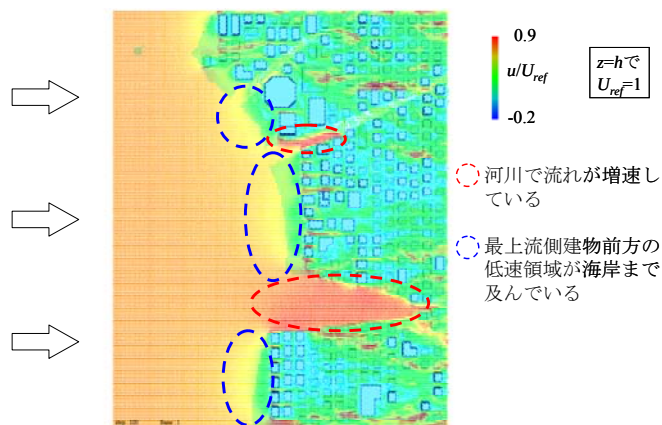


図-21 図-20の実地形に対してリアム・コンパクトで風況解析した結果.この図では左が北で、図-20が左90度回転している。



図-22 風況観測のための風向・風速計ポール設置

図-20 の実地形を GIS を利用したリアム・コンパクト（後述 5 章）で風況解析した結果が図-21 である。図-20 で見られる室見川河口付近では、風が収束し、風車立地には良い風況になっていることがわかる。このような小型風車建設可能な場所を数カ所ほど選定し、小型分散電源として風力エネルギーの利用を図る計画である。設置する予定の風車は図-16 に示した 5kW 風レンズ風車である。さらに博多湾、玄海灘の島々、および福岡市近郊の山間にも設置していく予定である。

5. 局地的風況予測法の開発

風車の適地選定を考える場合、あるいは風車立地後の日々の発電量予測を行う上で、高精度な風況予測が必要である。欧米とは著しく異なる複雑で急峻な地形を有する日本では、欧米で採用されているなだらかな丘陵地形を対象とした線形数値モデルでは不十分である。日本の複雑地形に適するより高い精度で周辺風況を予測できる数値計算システムの確立が望まれている。本章では当研究室の内田孝紀氏によって主導的に開発された LES を用いた局地的風況予測法を紹介する^{11, 12)}。

5.1 計算コードの開発

本研究では、空間スケールが数百 m ～数十 km 程度の小規模から中規模の地形周りの大気流れに関して、地形効果を精度良く反映する数値計算コードの開発を行った。本計算コードの特徴は以下の通りである。

- ・ 複雑地形の表現に国土地理院などの数値地図-データ（水平 50m 分解能）に基づいて、計算格子を生成する。
- ・ さらに地理情報システム（GIS）を用いて紙地図-や CAD データから 10m 以下の高解像度標高データを作成し、これを入力データとして利用する。
- ・ 高いレイノルズ数の乱流場を非定常に計算するため、Smagorinsky モデルに基づく LES (Large-Eddy Simulation) を採用する。

この計算コードを RIAM-COMPACT (Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Computational Prediction of Airflow over Complex Terrain, リアムコンパクト) と呼び、GIS (地理情報システム) と連繋させ、実用化に成功した。

5.2 適用例

最近では、風車近傍の地形起伏や粗度の影響による風の乱れが、風車の発電出力に影響を与えているとの報告もある。今後の風力発電施設は、山間部などのより厳しい場所に設置せざるを得ない。よって、日本国内で風力エネルギーが有効に利用されていくためには、風車のハブ中心高さにおける気流性状を今まで以上に高い精度で予測

する必要がある。同時に、稼働中のウィンドファームにおいても定期的な風況評価が必要であると考えられる。そこで我々の研究グループで提案するのは、リアムコンパクトによるウィンドファーム風況診断である。これには、最新の土地造成状況を反映した、10m 以下の高解像度標高データが不可欠である。具体的には、既存のウィンドファームに対して精緻な風況シミュレーションを実施し、風車配置が現状維持で良いのか、あるいは、運転状況の悪い風車は移動が必要なのか、コスト面からみて停止させるべきなのかといったウィンドファーム内の風車再配置問題を支援するものである。図-23 は(株)ユーラスエナジーと共同で行なったウィンドファーム風況診断の一例である¹²⁾。風車の適切な立地点と、不適切な立地点が計算結果から明らかになった。

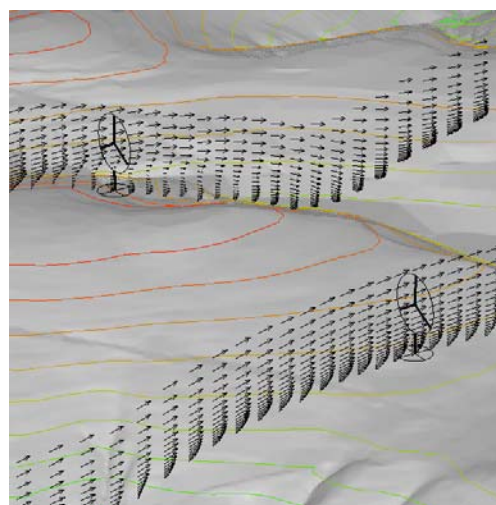


図-23 ウィンドファーム風況診断の一例

5.3 最近の動向

リアム・コンパクトは各種の新聞報道に取り上げられるなど、現在最も注目される風況シミュレータである。また、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の平成 17 年度産業技術研究助成事業 (2006 年 1 月 - 2008 年 12 月) に採択され、「空間解像度 10m 以下の詳細地形構築技術の開発とそれを用いた風力タービンハブ高さ周辺の風の乱れの視覚的評価」プロジェクト (研究代表者：内田孝紀) を実施した。現在は、独立行政法人科学技術振興機構のシーズ発掘試験研究において「風力発電普及のための各種 GPV データの有効活用」 (研究代表者：内田孝紀) を実施中である。

6. おわりに

風力エネルギー利用の研究に関しては、このような風レンズグループのプロジェクト研究、また国際共同研究へと発展していくとは当初は全く考えていなかった。最初は少人数の議論から始まり、メーリングリストでの自由な意見交換、研究集会での活発な議論が新しいアイデア

を生み、いろいろな専門分野の人が加わって、また実用化のために産学連携の意義を知り、共同研究がいかにも有効に機能していくか貴重な経験をしつつある。これも風力発電という研究が総合工学の端的な一例であるためと思われる。

最後にこのような研究紹介の機会を与えて頂いた実行委員会に感謝申し上げます。

謝辞 これらの研究は、九州電力(1999-2000年)、経済産業省 NEDO (平成 14-15 年度大学発事業創出実用化研究開発事業、2002-2003 年) から研究費の援助を受けている。また、日本学術振興会科学研究費補助金 (H14-16 年度、基盤研究 (A) No. 14205139)、九州大学 P & P 研究助成、原田記念財団流体機械自然科学研究、住友財団環境研究、NEDO 提案公募型開発支援研究協力事業(2006-2007 年)、および福岡市(2009 年)からの研究支援も頂いている。

参考文献

- 1) Gilbert, B. L., Foreman, K. M.: Experiments with a diffuser-augmented model wind turbine, Trans. ASME, J. Energy Resources Tech. 105, pp.46-53 1983.
- 2) 大屋裕二, 鳥谷 隆, 桜井 晃: つば付きディフューザ一風車による風力発電の高出力化, 日本航空宇宙学会論文集, 50-587, pp. 477-482, 2002. 第 2 報, 52-604, pp. 210-213, 2004.
- 3) 大屋裕二, 「新型風車あれこれ一風レンズ風車一」, ターボ機械, 33-7, pp. 59-62, 2005.
- 4) Abe, K., Ohya, Y.: An investigation of flow fields around flanged diffusers using CFD, J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 92, pp.315-330, 2004.
- 5) 井上雅弘, 桜井晃, 大屋裕二: つば付きディフューザ風車の簡易理論, ターボ機械, 30-8, pp. 46-51, 2002.
- 6) 谷野忠和, 井上雅弘, 大屋裕二, 鳥谷 隆, 茶木田浩, 桜井 晃: 簡易理論によるつば付きディフューザ風車の設計および性能評価, ターボ機械, 31-2, pp. 53-59, 2003.
- 7) Abe, K., Kihara, H., Sakurai, A., Nishida, M., Ohya, Y., et al.: An experimental study of tip-vortex structures behind a small wind turbine with a flanged diffuser, Wind and Structures, pp.413-417, 2006.
- 8) 大屋裕二, 伊庭周作, 鳥谷隆, 渡辺公彦: コンパクトな風レンズ風車 (つば付きディフューザ風車) の開発, 第 28 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.297-300, 2006.
- 9) 長谷川将, 大屋裕二, 鳥谷隆, 渡辺公彦: 風エネルギーの集中による風力発電の高出力化一第 4 報, 第 27 回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, pp.173-176, 2005.
- 10) Zhang, X., Xi, W. H., Ohya, Y., Karasudani, T., Li, S.: Development of a Highly Efficient Wind Turbine Farm with Wind-Lens Technology for an Irrigation System in a Desert Area in China, Proc. of Global Wind Energy Conference, Beijing, China, 2008.
- 11) 内田孝紀, 大屋裕二: 風況予測シミュレータ RIAM-COMPACT の開発一風況精査とリアルタイムシミュレーション一, 日本流体力学会誌, ながれ, 「特集」複雑地形上の風況予測法, 22 巻, 5 号, pp.417-428, 2003.
- 12) 内田孝紀, 大屋裕二, 諏訪部哲也, 李貫行: 非定常・非線形風況シミュレータ RIAM-COMPACT によるウィンドファーム風況診断の提案, 日本風力エネルギー協会誌, Vol.30, No.2, 通巻 78, pp.101-108, 2006.

(2009 年 6 月 2 日 受付)