

# 特集

## 回転翼にまつわる最新技術動向

発電機器におけるタービン、航空機におけるプロペラとして用いられる回転翼は、流体の力を動力に変える非常に重要な役割を持つ。流体としては、空気、水だけでなく、水蒸気や燃焼ガスまで多種多様であり、その解析においては、移動現象論においても重要な流体力学の活躍の場となる。古くから利用されている技術ではあるが、ドローンに代表されるように、近年も成長を遂げている分野でもある。回転翼にまつわる最新技術動向を紹介する。  
(編集担当：梅本 賢)†

### マルチロータ風車システムと風力・太陽光 同時利用のウィンドソーラータワー

大屋 裕二

#### 1. はじめに

九州大学応用力学研究所とその大学発ベンチャーであるリウムwind社を中心に風力エネルギー、太陽光エネルギー、海洋エネルギーなどの有効利用に関する研究をおこなっている。風力の特徴は、風エネルギーを集中させて風力発電の効率を飛躍的に高めた新しいタイプの風力発電システムの開発（レンズ風車と名付けた）とそのクラスタ化である。その水流バージョンであるレンズ水車は長崎県五島沖で潮流発電として実験開始されようとしている。また、過去に風力エネルギーのより大きな獲得のため、海上浮体式エネルギーファームを研究開発し海上展開を図った。最近はこの浮体を用いて博多湾漁業組合が牡蠣の養殖を始めた。自然エネルギー利用と一次産業の密接な連携の例である。本稿では、最近、集中研究しているレンズ風車のマルチロータシステムと、太陽光と風力を同時利用できる「ウィンドソーラータワー」と呼ぶ画期的な再生エネ機器を紹介する。

ここ数年、研究開発の基本コンセプトは「小は大を兼ねる」および「統合利用」というキーワードである。基本的には小・中スケールの風車を用いる。小・中スケールの浮体でよい。社会受容性に配慮し、これらを適切規模へクラスタ化し、あるいは統合化して、必要なスケール、必要な発電容量へ組み合わせるという発想である。



Multi Rotor Wind Turbine System and Wind Solar Tower Using Wind Energy and Solar Energy  
Yuji OHYA

1981年 九州大学大学院工学研究科応用力学専攻博士課程中途退学

現在 九州大学応用力学研究所 特任教授  
連絡先：〒816-8580 福岡県春日市春日公園6-1 九州大学応用力学研究所

E-mail ohya@riam.kyushu-u.ac.jp

2019年3月11日受理

#### 2. レンズ風車のクラスタ化—マルチロータシステム

##### 2.1 レンズ風車—「つば」という渦形成板のアイデア

風車ロータをディフューザで覆う風車を考案した。ディフューザとは、入口から出口に向かって拡大する管である。さらに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。「つば」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大きな増速効果が得られる。図1にそのメカニズムをスケッチする。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<sup>1,2)</sup>。レンズ風車の長所をあげると、  
①2～5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）（図2）。倍率はディフューザの長さ、および「つば」高さに依存する。

②風車騒音の大幅低減（ブレード先端渦がディフューザ内部境界層と干渉し抑制される。空力音が大幅に低減して騒音は気になる

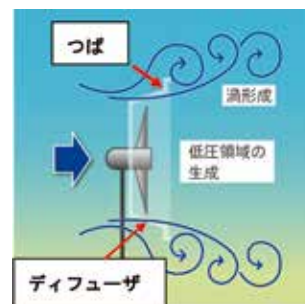


図1 風レンズのメカニズム（集風型風車）。つば背後の渦形成で低圧部を生じ、風はその低圧部に向かって流れ込む。風を集める

† Umemoto, S. 令和元, 2年度化工誌編集委員(6号特集主査)  
(一財)電力中央研究所 エネルギー技術研究所

ことはない。

③優れた景観性(丸い「輪」が「和」を呼ぶ)。

## 2.2 マルチレンズ風車

超大型機へ向かう風力産業主流とは異なる方向を模索し、風力発電システムの新しい姿を開拓する。高効率、静粛なレンズ風車を適用し、レンズ風車を基本ユニットとしたマルチロータシステム (Multi Rotor System : MRS, クラスタ風車) の可能性を研究する(マルチレンズ風車と呼ぶ)。図3~図6に示すようにマルチロータシステムとは基本ユニットの風車を複数個、同じ垂直面内にタワーで支持した集合風車システムで数十kWからMW級の大きな出力を得るものである。理論的には、同じ定格出力の単体風車に比べ、重量比、発電コスト比で $1/\sqrt{n}$  (nはロータの個数) になる。風荷重変動が平滑化され、強風による局部疲労破壊が起りにくくなると期待される<sup>3)</sup>。2016年、大手風車メーカーのVestasが225 kW機×4基のマルチロータ風車を試作している<sup>3)</sup>。

基本ユニットにレンズ風車を適用すると、3基構成マルチレンズでは全体発電出力が単独時の合計値よりさらに10%増加(図3)<sup>4)</sup>、5基構成で20%増加することがわかった(図4)<sup>4)</sup>。レンズ風車とマルチロータのシナジー効果である。北九州市響灘に平成28年3月、世界初のマルチレンズ風車(定格10kW機)が設置され、様々な実証試験がなされつつある(図

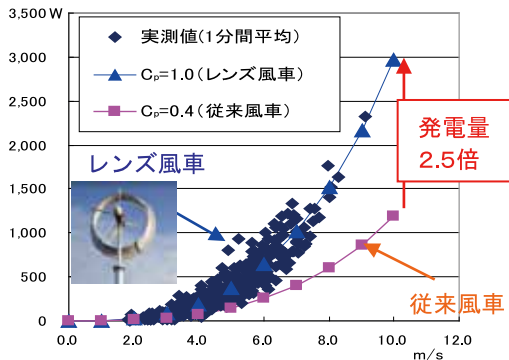


図2 3 kW レンズ風車の野外試験結果 (横軸は風速, 縦軸は発電出力), ロータ径2.5 m, レンズ径3.4 m。図中、◆はレンズ風車の野外実測値, ▲はレンズ風車の風洞実験値, ■は風レンズなしの通常風車の風洞実験値,  $C_p$  はパワー係数であり、近づいてくる風の運動エネルギーの何%を回転エネルギーとして取り込めるかという指標である。レンズ風車では通常風車と同じロータ掃引面積を基準としている

5)。多数ユニットのマルチレンズ風車のコンセプトは「風を集める木」である(図6)。

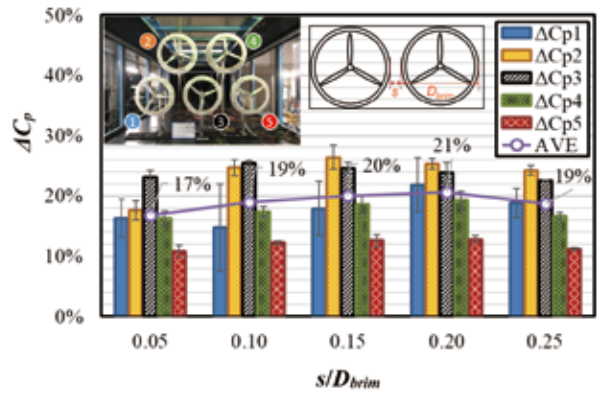


図4 5基マルチレンズ風車の風洞実験結果, すき間比 $s/D_{brim}=0.2$ で全体発電出力が20%増加。凡例 $\Delta C_p(i)$ のiは図中の風車①~⑤に対応。風車②, ③, ④の出力増加が顕著



図5 北九州市響灘, 3 kW×3基の10 kWマルチレンズ風車(H28.3月導入)

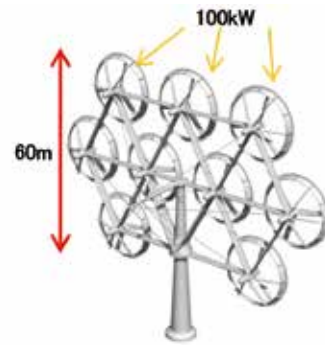


図6 9基の100 kWレンズ風車によるクラスタ化(1 MW機)(CG)

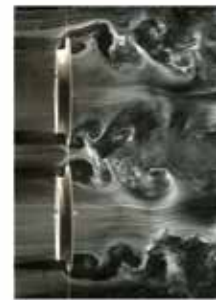
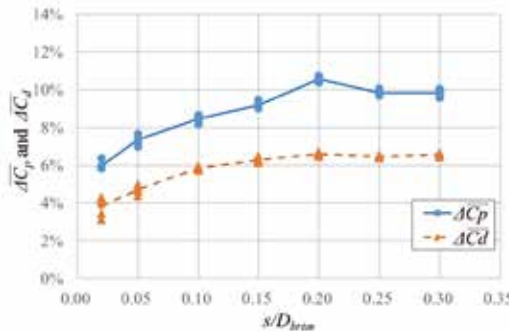


図3 正三角形配置の3基マルチレンズ風車。全体の発電出力増加率(3基マルチ配置の全体発電出力と1基ずつ個別の発電出力の合計との差)は $\Delta C_p$ で示し, 最大10%の増加を示している。全体の抵抗増加率は $\Delta C_d$ で示している。 $C_p$ はパワー係数。 $D_{brim}$ はレンズ風車直径,  $s$ はすき間隔

レンズ風車でのマルチロータ化は次の点で有利である。  
1) 同じサイズのユニット基で構成され、量産化向きで、個々のレンズ風車は集合接続が容易、2) レンズ風車の高効率メカニズムの基本原理（リングの渦形成で低圧化し、流れを引き込む）がマルチロータによるすき間流れの加速（図3の右写真）で向上し、全体発電出力がさらに増加する（図3、4）。

数百kW規模の中型レンズ風車を基本ユニットにしたMW級マルチレンズ風車では、騒音面で、通常シングルMW風車と比べ、格段と静かなクラスタMW風車が期待できる（図6）。大型機に伴う低周波騒音の問題からも解放される。以上より、中型レンズ風車のクラスタ化でMW級の大出力化への新しい可能性を追求する。

### 3. ウィンドソーラータワー（風力と太陽光を同時利用する自然エネルギー機器）

#### 3.1 ウィンドソーラータワー(WST)の原理

従来のソーラータワーと称する自然エネルギー利用装置は、地上に集熱部となる上面を閉じた大規模空間を設置し、その中央に円筒状のタワーを設ける。この大規模空間内において太陽光で暖められた空気は、中央に設置したタワー内に収束し、熱上昇気流となる。その上昇気流中に風力タービンを設置し発電しようとするものである（図7左図）。単純でメンテナンスが楽であるが非常に低効率である。また高いタワーが必要である。

ソーラータワーに対する新しい試みは、次の2点にある。

1) 風レンズの原理を垂直構造体として適用する。すなわち、ディフューザ型タワーを採用し、熱上昇風の増速を図

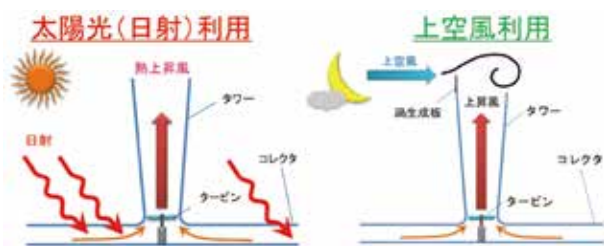


図7 WSTが上昇風を発生するメカニズム、左図：熱上昇風、右図：上空風による吸い上げ

る<sup>5)</sup>。2) 上空風の吸い上げ効果を利用する（図7右図）<sup>6)</sup>。1) のディフューザ型タワーは図9の野外タワーでわかるように片開き4°で上方出口に向かって拡大している<sup>5)</sup>。2) の上空風の吸い上げに関して基本メカニズムを風洞実験で確かめた<sup>6)</sup>。その結果、タワー出口に風レンズ原理と同様に低圧域生成のため渦形成板をつけると、直円筒タワーの10倍の発電出力増加を得た（図8）<sup>6)</sup>。昼間は太陽光と風力の同時利用、夜間は風力発電ができるという発想でウィンドソーラータワー（WST）と称する。太陽光と風力を共に利用できる世界で初めての自然エネルギー機器を提案する。数種のアイデアを盛り込んだ野外実験（図9）において、もし、スペインのソーラータワーと同規模の200m級タワーで建設すれば、効率50倍、発電量260倍のデータが得られつつある。上空風吸い上げの効果はまだ定量化していないが、この効果を加えるとさらに増加する。

#### 3.2 WSTの野外実験

図9に野外実験の様子を示す。平成27年の春に九州大学筑紫キャンパスの空き地に高さ10m、集熱部15m四方のWSTを建設した。タワー根元の風車ロータは直径1.38mである。太陽光による創風特性、上空風による集風特性に関するデータを取得し解析している。

太陽光による発電例を図10に示す。この日の昼間は太陽熱があり、集熱部（上図、赤の気温）と上空（青の気温）の温度差（緑）により熱上昇風（オレンジ）（図中の凡例でUSA風速と称す）が発生し、これがロータを回転させて発電している（下図、赤）。日中の8～18時の間、安定に発電している。

上空風による発電例を図11に示す。この日は昼間の熱



図9 野外実験用の10m高さのWST(九大筑紫キャンパス)

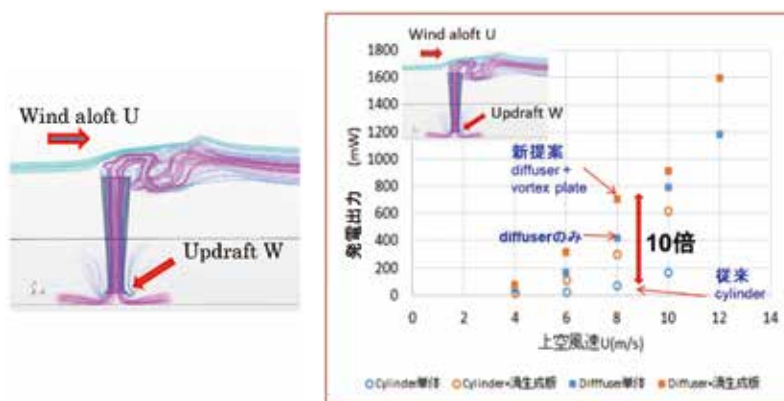


図8 WSTの吸い上げ効果のCFD(左図)と風洞実験結果(右図)、上方拡大タワーと出口の渦形成板で大幅な発電出力増加を示す

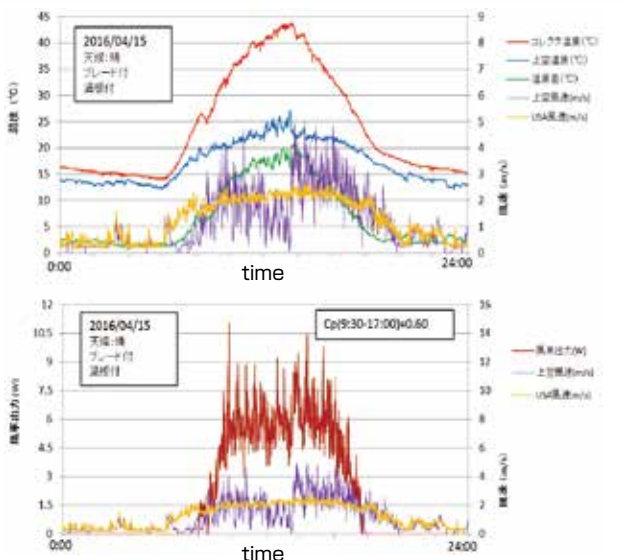


図10 WST野外実験, 太陽光による熱上昇風の発電は8:00-18:00に見られる

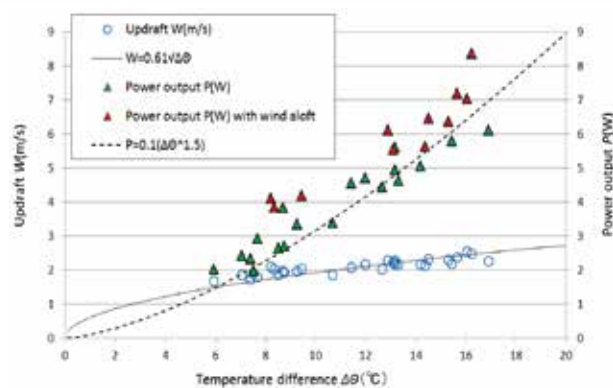


図12 WST野外実験結果のまとめ, 熱上昇風速W, 発電出力Pと温度差 $\Delta\theta$ の関係



図13 WST集熱部の広い空間を温室栽培へ

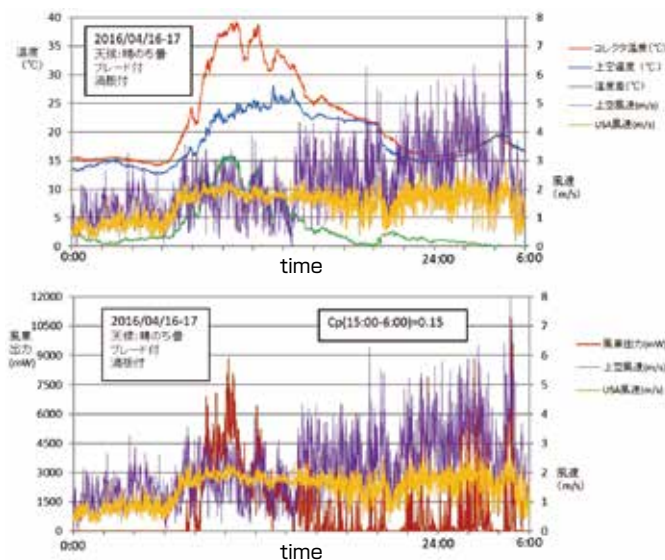


図11 WST野外実験, 上空風吸い上げによる上昇風の発電は16:00-24:00-6:00に見られる

上昇風による発電に加え、夜は上空風が強く(上下図、紫の風速変動、出口付近につけている三杯風速計からの出力)、その吸い上げ効果によって上昇風が発生し(オレンジ)、発電している様子がわかる(下図、赤は発電出力)。上空風による発電は不安定で通常の風力発電と同様な大きな出力変動を示している(下図)。

上記の1年間分の観測結果は図12のようにまとめられる。熱上昇風速  $W$  (m/s) は温度差  $\Delta\theta$  の平方根に比例して増加し、伴う発電出力  $P$  (w) は  $3/2$  乗則で増加する。また、熱上昇風速はタワー高さに関しても平方根に比例して増加する<sup>3)</sup>。

以上、WSTの2つのメカニズムを実証してきたが、温度差を設ける方法は他にもある。近くに地熱源があれば、その排熱を積極的に利用する。現在、地熱発電では大量の熱が地下に戻される。その熱水や空気熱を集熱部のビニールハウスへ送り込む。太陽光の集熱と同じで熱上昇風が発生

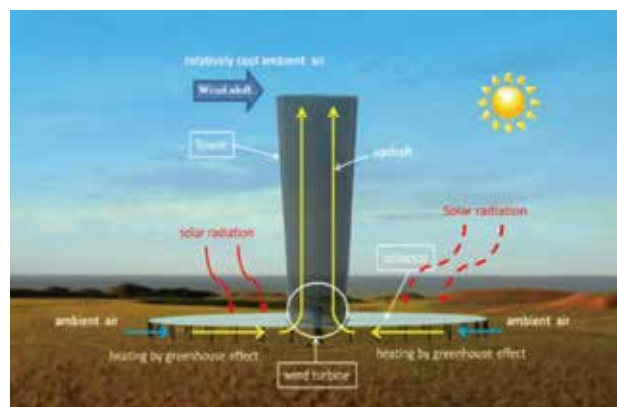


図14 将来のWST(CG)

しタービンが回る。他の熱排気風でもよい。図13に示すように広い集熱部は温暖な空間として温室栽培に利用できる。農業と協調した再生エネ取得が可能である。また、大都市の大気汚染問題が深刻であるが、このWSTは大規模な低層汚染大気の換気装置にもなる。一石三鳥である。

図14に予想される将来のウインドソーラータワーの形状をスケッチする。タワー高さ100 m以上で実用化の目途が立ち、タワーをどのように製作するかが最重要課題となる。

参考文献

- 1) 大屋裕二：ターボ機械, 33(7), 59-62(2005)
- 2) Ohya, Y. and T. Karasudani : *Energies*, 3, 634-649(2010)
- 3) Jamieson, P. : John Wiley & Sons, Ltd, ISBN : 978-1-119-13790-0(2018)
- 4) Ohya, Y. and K. Watanabe : *ASME JERT* 141/051203-1(2018)
- 5) Ohya, Y. *et al.* : *Energies*, 9, 1077(2016)
- 6) Watanabe, K. and Y. Ohya : *Grand Renewable Energy* 2018, Yokohama (2018)