

# “クラスタ” レンズ風車じわり普及

大屋 裕 二

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（レンズ風車）を開発してきた。同径ロータの通常風車と比べ、2-5倍の発電出力の増加を達成し、1kW-20kWの小型と100kW中型のレンズ風車を開発した。風力エネルギーのより大きな獲得のため海上展開を図り、福岡市博多湾に直径18mの六角形浮体を浮かべ、レンズ風車と太陽光パネルを搭載した浮体式再生可能エネルギーファームを実現した。最近ではレンズ風車のマルチ化（クラスタ化）を試み、さらに発電性能が向上した。中型機のマルチレンズでMW級も実現できる。また、風力と太陽光を同時利用できる再生エネ機器「ウィンドソーラータワー」も開発中である。

キーワード：風力発電，分散型エネルギー，レンズ風車，マルチレンズ風車，浮体式エネルギーファーム，ウィンドソーラータワー

## 1. 日本における風力産業の現状

日本の大型風車製造は三菱重工業，日立製作所が相次いで撤退し，大きな風力市場が広がる日本のポテンシャルに対し，外国製風車の導入しかない。それでも最近，洋上風力には注目が集まっている。2020年秋，菅内閣の2050年カーボンニュートラル宣言，2020年12月の洋上風力産業ビジョンで，2030年目標10GW，2040年30-40GW導入という大胆な数値が謳われる。これにより，洋上風力産業は，風車本体の輸入，サプライチェーンへの波及，作業船の建造，港の整備，電気設備，送電設備の強化，全国の電力系統強化など活気づいてきた。洋上風力の産業形成は，脱炭素化のエース，エネルギー安全保障，製造業の活性化や地方創生をけん引する主力産業としての期待が大きい。海外メーカーは自前のサプライチェーンを伴って日本に進出する。これに対抗して国内部品メーカーの参入，さらに風車の再国産化は産業形成に欠かせない。

昨今，洋上風力は日本の再エネ比率を引き上げるキーテクノロジーとも言われる。しかし，上記のように，そこに建つ風車はすべて外国製ロゴである。小型風車も同じである。小型ではさらにたちが悪いことに外国製風車は壊れやすい。強風が吹くたびに起こる日本各地で報告される事故は外国製風車がほとんどである（というか小型風車市場も外国製風車に席卷されている）。なぜか？日本の風況と外国の風況は明らかに

違う。平野部が少ない日本では山の中，丘の上，海岸に迫る崖の上など複雑な地形の上に建てられる。その風は荒々しい。風速も風向も頻繁に変動する。欧米の広大な平野，緩やかな起伏地で決まった方向から風速変化も少なく吹く風の性質とは大きく異なる。大型から小型風車まで，日本の厳しい風況に耐える性能と価格競争力に優れた次世代風車とはどういう技術を持つべきか？新しい風車システムの登場は実現するのだろうか？これからは人材育成も非常に重要である。風力産業の再形成は製造業や地方経済を元気にする数少ない好機と言える。

## 2. 研究開発内容とその理念

1990年頃から世界は変化し始めていた。1962年に出版されたレイチェル・カーソンの「沈黙の春」による環境汚染への警鐘に始まり，2006年のアル・ゴアの「不都合な真実」などによる地球環境の保全意識の高まり，さらに世界のフラット化，人口増加におけるエネルギー供給の問題が，2009年のトーマス・フリードマンの著書「グリーン革命」に詳述されている。世界の環境・エネルギー問題は，理工学，農林水産，社会経済，政治，倫理を通して人々に意識の変換を迫り始めていた。現代は再生可能エネルギーへの大転換というエポックメイキング的な時代に突入しているが，それには30年ほどの時間を要したと言える。

本稿では、新しい集風タイプの風車システムとそのマルチ化、洋上浮体式エネルギーファーム、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った発想である。

### 3. レンズ風車

風車ロータをディフューザで覆う風車を考案した(Diffuser Augmented Wind Turbine, DAWT)。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」(風レンズ技術)が生まれた<sup>1), 2)</sup>。レンズ風車の長所をあげると、

- ①同じロータ径で2-5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。発電出力は風速の3乗に比例)(図-1)。増加率はディフューザの長さか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小さくなった)<sup>3)</sup>。
- ③優れた社会受容性: 静かであり、バードストライクなし、景観性に富む(丸い「輪」が「和」を呼ぶ)。図-2は3kW レンズ風車の野外実験結果を示す。

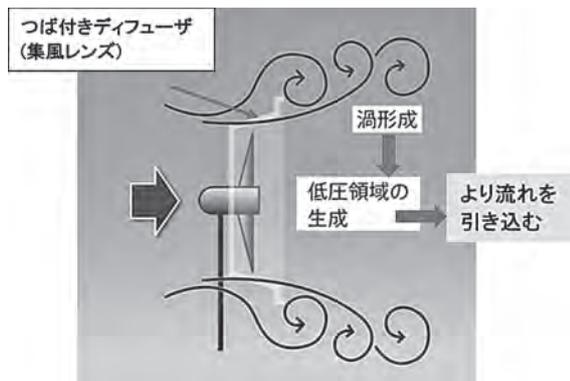


図-1 風レンズのメカニズム(集風型風車)。つば背後の渦形成で低圧部を生じ、風はその低圧部に向かって流れこむ。

$C_w$  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。写真-1は九大伊都キャンパスの3kW レンズ風車群である。

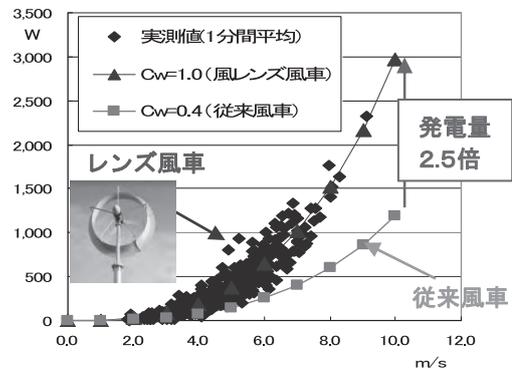


図-2 3kW レンズ風車の野外試験結果、ロータ径2.5m、レンズ径3.4m。図中、◆はレンズ風車の野外実測値、▲はレンズ風車の風洞実験値、■は風レンズなしの通常風車の風洞実験値。



写真-1 3kW レンズ風車群(九大伊都キャンパス)2018

### 4. 浮体式洋上エネルギーファーム

(1) 博多湾における浮体式風力発電施設の実証試験  
2011年12月4日、博多湾に直径18m程度、排水量140トンのコンクリート製浮体を浮かべ、3kW レンズ風車2基および太陽光パネル2kWを搭載した浮体式複合エネルギーファームを実現した(写真-2)。風力、波浪、浮体動揺など種々のデータを取得すると同時に、この博多湾浮体サイトから東に約3km離れた海岸線に同型のレンズ風車を設置した。この海岸線サイトの風車に比べ、沖合約700m離れた海域での海上風は陸上に比べ1-2割強く、浮体上の風車では海岸線立地の同型風車と比べ、1年間の総発電量が2倍を超した(2012年11月~2013年10月計測)。この浮体は漁礁にもなっている。今後、海でのエネルギー利用は漁業協調のコンセプトのもと、漁業組合と共同で浮体を利用した牡蛎の養殖も開始している。

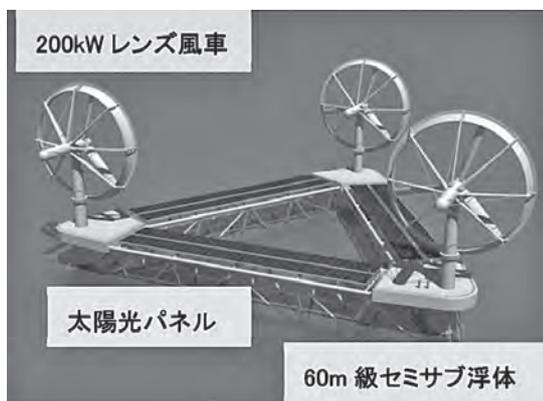


写真一2 博多湾プロジェクト(ステージI)18m直径の六角形コンクリート浮体。3kW レンズ風車2基と2kW 太陽光パネル搭載で計8kWのエネルギーファーム, 2011年12月。

## (2) 第2ステージの浮体式洋上エネルギーファーム (漁業共存)

実用化規模の浮体式再生可能エネルギーファームを計画している。図一3に示すように一つの浮体規模は約60m長さのトラス構造物で連結された三角形を基本型とする。大きな多角形は3角形が基本要素となる。将来はこの3角形基本ユニットを複数連結し、大型浮体へ展開する。浮体に関しても「小は大を兼ねる」というコンセプトを適用する。この3角形浮体に200kWクラスのレンズ風車3基、200kWの太陽光パネルを設備し、0.8MWの浮体式エネルギーファームとする。

多目的洋上浮体として、その将来性、産業化への道筋を検証する。すなわち、MW程度の浮体エネルギーファームとして確立すると同時に、日本の漁業の一助となるように浮体エネルギーファームを利用した養殖施設を考案する。比較的沖合に設置した浮体周辺部に数10個規模の浮沈式生け簀を設備し、海洋牧場として漁業との共存を図る。自然エネルギー取得、洋上プ



図一3 浮き島式洋上エネルギーファーム

左図：浮体の一边が60mのトラス構造物で連結。200kW レンズ風車3基と200kW 太陽光パネルで約0.8MWエネルギーファーム。漁業協調として周辺に養殖施設を附設など。CG。

ラットホームの建設、そして漁業との確かな協調である。

## 5. レンズ風車のクラスタ化—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)。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こりにくくなると期待される<sup>4)</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%、5基構成で20%増加することがわかった<sup>5)</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2016年3月、世界初のマルチレンズ風車 (定格9kW機) が設置され、2020年には5輪のマルチレンズ風車が唐津市に設置され、様々な実証試験がなされつつある (写真一3)。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。



写真一3 唐津市、3kW×3基 (9kW)、および3kW×5基 (15kW) のマルチレンズ風車 (2020)

## 6. 中型レンズ風車とそのマルチ化でMW級へ

写真—4に示すようにレンズ風車のより大型化を目指してレンズ外径15.4mの100kWレンズ風車を開発した(2011年, 九大伊都キャンパス設置)。これはロータ直径が約13mで, 通常の100kW風車の3分の2の大きさである。したがって騒音源としての規模も小さく, レンズ集風体によるブレード先端渦の抑制とあいまって, 同出力の従来風車に比べ格段と低騒音になることが実証された。強風時の運転中에서도風切り音がほとんどしない。



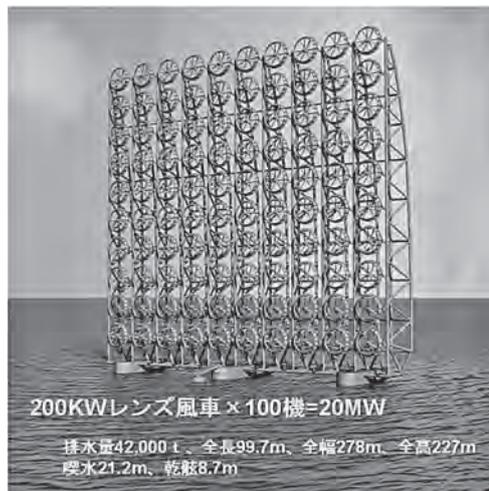
写真—4 100kW レンズ風車, 九大伊都キャンパス 2011年3月。

レンズという構造物を装着する関係でロータ径は30m程度が限度であろう。その30mロータ径では約200-300kW風車が可能になる。現在, 200kW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を開発中である。このマルチレンズMW機では, 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風車が期待できる。大型機に伴う低周波騒音の問題からも解放される(図—4)。



図—4 200kW レンズ×5基のMW級風車 (CG)

洋上風力においては, 九州大学筑紫キャンパスに洋上風力研究教育センター(RECOW)がこの2022年4月に発足した。そのセンターが目指す20MW級のクラスタレンズ風車の予想図を図—5に示す。

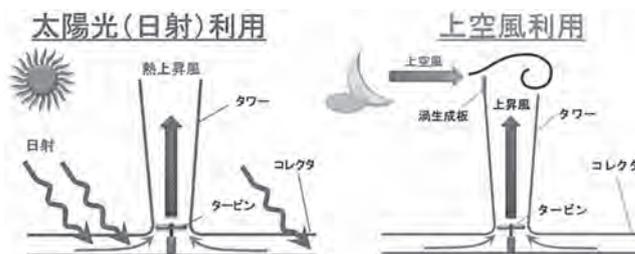


図—5 200kW×100基の20MW 洋上クラスタレンズ風車 (CG)

## 7. ウイ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: WST)

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—6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<sup>6)</sup>。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る。2) 上空風の吸い上げ効果を利用する(図—6右図)。1)のディフューザ型タワーは写真—5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。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。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—6 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



写真-5 野外実験用の12m高さのWST (九大筑紫キャンパス, 2022)

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イ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となる。数種のアイディアを盛り込んだ野外実験 (写真-5) 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。

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。近くに地熱源や工場排熱があれば, その排熱を積極的に利用する。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が発生しタービンが回る。他の熱排気風でもよい。24時間稼働の再エネ機器となる。

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。タワーをどのように製作するかが最重要課題となる。

## 8. おわりに

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アムウインド社における風力エネルギー研究を紹介してきた。小型風力の役割を認識し, その有用さを社会にアピールするため必要な技術開発は, 風況予測の精度向上, ブレークスルーとなる技術革新の両輪が必要である。それは一般の技術改良の延長線上には

ない。柔軟な発想とそれをすぐに具現化し, 失敗を重ねて乗り越える物作りの心であろう。

最近の共通するコンセプトは「小は大を兼ねる」, および「農林水産業との協調」である。基本的には小・中スケールの風車を用いる。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。

再生可能エネルギーはエネルギー密度が希薄である。ある面積エリアを与えられたら, そこにある種々の自然エネルギーを効率的, 統合的に使いたい。そうすれば分散型エネルギー社会に近づく。あとはいかに有効に変換し, 蓄え, 送り, 消費するかのシステムである。自然と融和した再生可能エネルギー社会の実現を期待する。

## 謝辞

ここで紹介した研究は文科省機能強化経費「機能強化促進分等」「自然エネルギーの次世代取得技術とその統合的利用に関する事業」(2016-2021年度), NEDO新エネルギーベンチャー技術革新事業/新エネルギーベンチャー技術革新事業 (フェーズB:2014年度と2015年度), およびフェーズD(2018-2020年度)の支援を受けた。ここに記して謝意を表します。

JCMA

## 《参考文献》

- 1) 大屋裕二, 新型風車あれこれ-風レンズ風車-, ターボ機械, 33 (7) (2005), 59.
- 2) Ohya Y., Karasudani T., A shrouded wind turbine generating high output power with wind-lens technology Energies 3 (2010), 634.
- 3) Takahashi S.・他4名, Behavior of the blade tip vortices of a wind turbine equipped with a brimmed-diffuser shroud, Energies 5 (12) (2012), 5229.
- 4) Jamieson P., Innovation in Wind Turbine Design, 2<sup>nd</sup> edition, John Wiley & Sons, Ltd, ISBN: 978-1-119-13790-0 (2018).
- 5) Ohya Y., Watanabe K., A New Approach Towards Power Output Enhancement using Multi-Rotor Systems with Shrouded Wind Turbines, ASME J. Energy Resour. Technol. Vol. 141 (2019), 051203-1.
- 6) Watanabe K., et al. An ignored wind generates more electricity -A solar updraft tower to a wind solar tower-, Int. J. Photoenergy, 2020, Article ID 4065359.

## 【筆者紹介】

大屋 裕二 (おおや ゆうじ)  
九州大学名誉教授,  
応用力学研究所元所長,  
㈱リアムウインド代表取締役

