

〔特別講演〕

風レンズ技術(集風)を用いた流体エネルギーの高効率取得 に関する研究について

*九州大学 応用力学研究所

大 屋 裕 二†

Highly Efficient Harnessing System of Fluid Energies Using Wind-Lens Technology

Yuji Ohya, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University

1 はじめに

九州大学応用力学研究所を中心に風力エネルギーの有効利用に関する研究を行っている。特色は、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(風車ロータが集風体で覆われる、つば付きディフューザ風車、レンズ風車と名付けた)と、数値風況予測の高精度シミュレータ(リアムコンパクトと名付けた)にある。数年に亘る研究の結果、従来の風車と比べ、2-5 倍の発電出力の増加を達成し、小型(1-3kW 機)、中型(100kW 機)のレンズ風車を開発した。最近、レンズ風車を基本ユニットとしてクラスタ化し、静粛性を維持して大出力化を図る、3 基-7 基構成の集合風車、マルチロータシステム (MRS) の研究を開始した。また風力エネルギーのより大きな獲得のため、海上展開を図った。福岡市博多湾に直径 18m の六角形浮体を浮かべ、3kW レンズ風車 2 基と 2kW 太陽光パネルを搭載した世界で初めての浮体プラットフォーム式の再生可能エネルギーファームを実現した。ここ数年、研究開発の基本コンセプトは「小は大を兼ねる」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・中スケールの浮体構造物を用いる。環境影響・社会受容性に配慮し、これらを適切規模へクラスタ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。最後にウインドソーラータワーを紹介する。従来のソーラーチムニーにいくつかの改良を加え、太陽光のみならず、風力エネルギーを同時利用できる新し

い再生可能エネルギー機器として研究開発している。

2 レンズ風車とは

風車による発電量は風速の 3 乗に比例する。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する。本研究では、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した。「レンズ風車」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。

2.1 「つば」という渦形成板のアイデア

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、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1a,bにそのメカニズムを示す。このように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^{1,3)}。レンズ風車の長所をあげると、

- ① 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)。数倍という出力はディフューザの長さ、および「つば」高さに依存する。

*〒816-8580 春日市春日公園 6-1

† E-mail: ohya@riam.kyushu-u.ac.jp

- ② 「つば」によるヨー制御（出口端の「つば」は風向きの変動に応じて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なる）。
- ③ 風車騒音の大幅低減（翼先端渦がディフューザ内壁の存在で反対向きの誘導渦を生成し干渉して弱まる．騒音源の渦が抑制されるので空力音が大幅に低減する^{4,5)}）．**図2**に数値計算により検討した結果を示す．この場合、風車モデルはActuator-Disc modelを用いた。
- ④ 鳥が風車に衝突するバードストライクを減じる（鳥は風レンズと呼ぶ集風体「輪っか」が見える．その中に飛び込まない）．
- ⑤ 優れた景観性（丸い「輪」が「和」を呼ぶ）．
 - ① ③のメカニズムは空気中も水中も同様に働き、「レンズ水車」として、河川、潮流発電にも応用することができる．従来水車の2－5倍の出力が獲得できる．

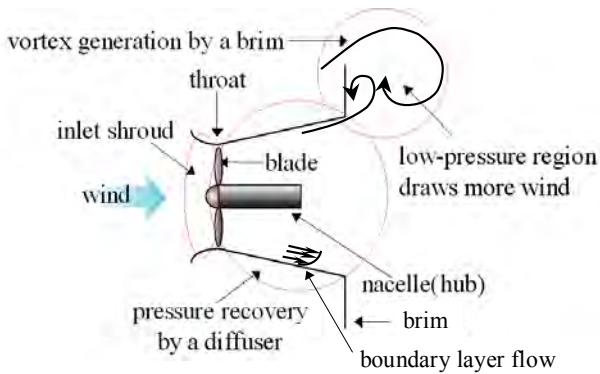


図 1a ディフューザ付き風車システム（レンズ風車）とその集風メカニズム

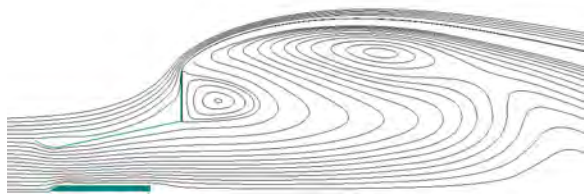


図 1b ブレード装着のディフューザ風車周囲流（時間平均流線図）（周速比 $\lambda=4.5$ ），Actuator-Disc Method.

2.2 コンパクトなレンズ風車の開発

現在、小型風車(図3)においては軽量化、あるいは中型風車(2.3節)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レンズ集風体になる）の最適形状を検討している．**図3**にロータ直径2.5mのコンパクトレンズ風車とその野外発電性能結果の一例を示す．定格風速10m/sで3kWの発電性能を示している．

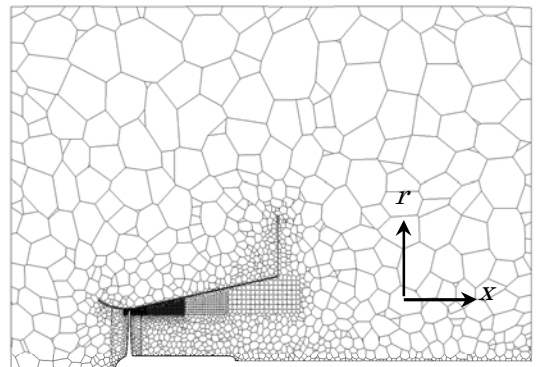
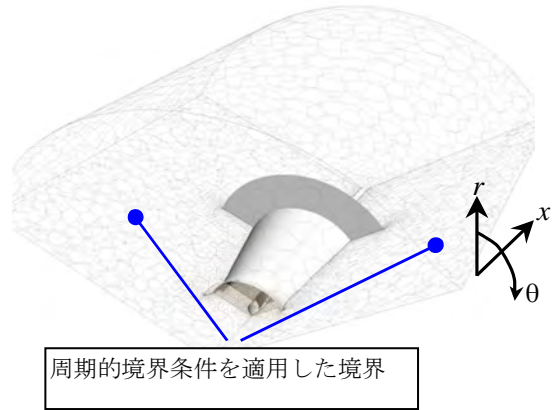


図 2a 長いディフューザを用いたレンズ風車周囲流の計算に用いた格子， $x-r$ 断面（ x ：主流方向， r ：動径方向）

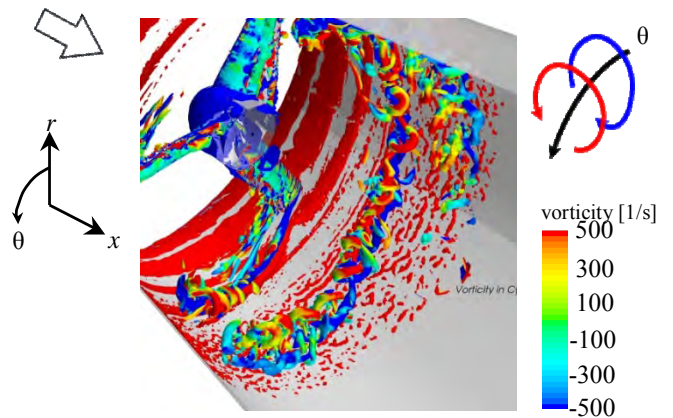


図 2b 長いディフューザを用いたレンズ風車の内壁に生じる渦の θ 成分(x ：主流方向， r ：ブレード長さ方向， θ ：周方向)

図3の $C_w=1.0$ はロータ回転面積を基準にしている． C_w とは近づいてくる風の運動エネルギーのうち、風車がどの程度を回転エネルギーに取り込めるかを示す割合である．これには物理量として、発電量、風速、ロータ回転面積、空気密度が係わってくる．レンズ構造体の外径をとって面積基準(*)にすると $C_w^*=0.54$ になる．高性能な大型風車でも $C_w=0.45$ くらいなので20%ほど大きい値となる．これが意味することは普通の風車をそのまま大きくし、風レンズの外径まで大きくしてもレンズ風車の出力に追いつくことはできないということである．

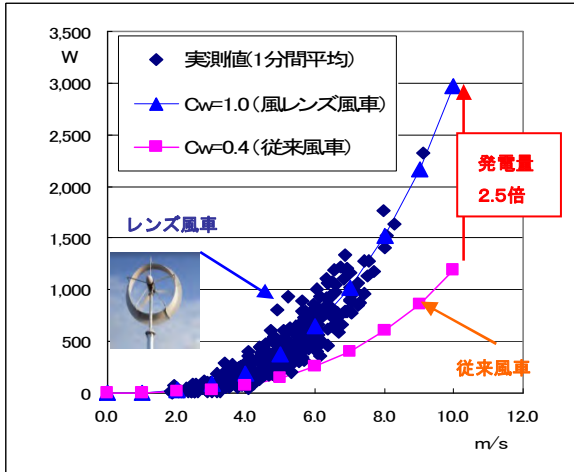


図 3 3kW レンズ風車. ロータ直径 2.5m, レンズ外径 3.2m. 発電出力 (W) vs. 風速(m/s), 野外実験

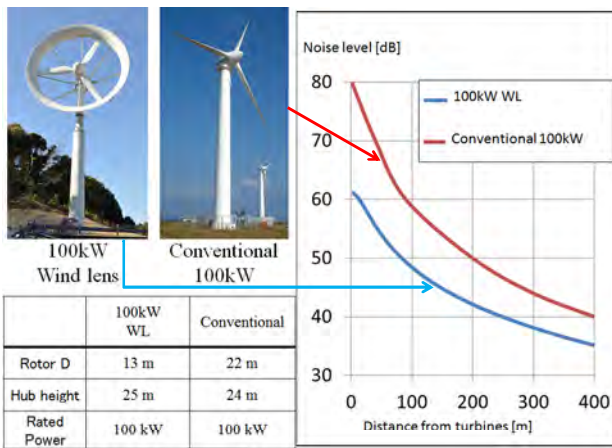


図 4 100kW レンズ風車, 2011.3.11 (ロータ直径 12.8m, レンズ外径 15.4m, 定格風速 12m/s), 右は騒音測定結果

2.3 中型 100kW レンズ風車—九州大学次世代エネルギープロジェクト

九州大学伊都キャンパスにおいて、水素生成のためのクリーンエネルギー源としてレンズ風車の有効利用プロジェクトが進んでいる。水素は2次のキャリアである。この水素を風力や太陽光などのクリーンなエネルギーで生成し、エネルギーの生成から消費までの全体システムについてCO₂等、温暖化ガスをなるべく排出しないエネルギー循環システムの構築の試験が始まっている。図4に示すように次世代エネルギー実証施設として100kW レンズ風車を開発中である。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、さらに2.1節の長所③(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。高風速運転中でも風切り音がほとんどしない。これらの研究から得られた知

見はレンズ風車の次のステージといえる数百kW 風車にとって有用なものとなる。また、バードストライクの経験も一度もない。

平行して発電性能データも取得中であるが、ほぼ期待通りの出力性能曲線が得られつつある。残る問題は、強風時(風速10m/s-20m/s)の安全運転がいかに安定に行えるかであり、継続して実証試験中である。100kW-300kWの中型規模のレンズ風車になるとレンズ構造体を支えるアームとブレードの干渉、ダウンウインド風車としてタワーとブレード回転の干渉問題が起こる。これを検討するために数値計算で解析した結果を図5に示す。図5の上図は計算メッシュと主流方向速度分布(U成分)である。増速している部分とタワー背後の減速している部分がわかる。図5の下図は3軸成分のモーメントである。x軸回りのローリング、y軸回りのピッチングには、ブレードがタワー背後を通過するときの変化が現れている。疲労破壊等につながるので注意が必要である。

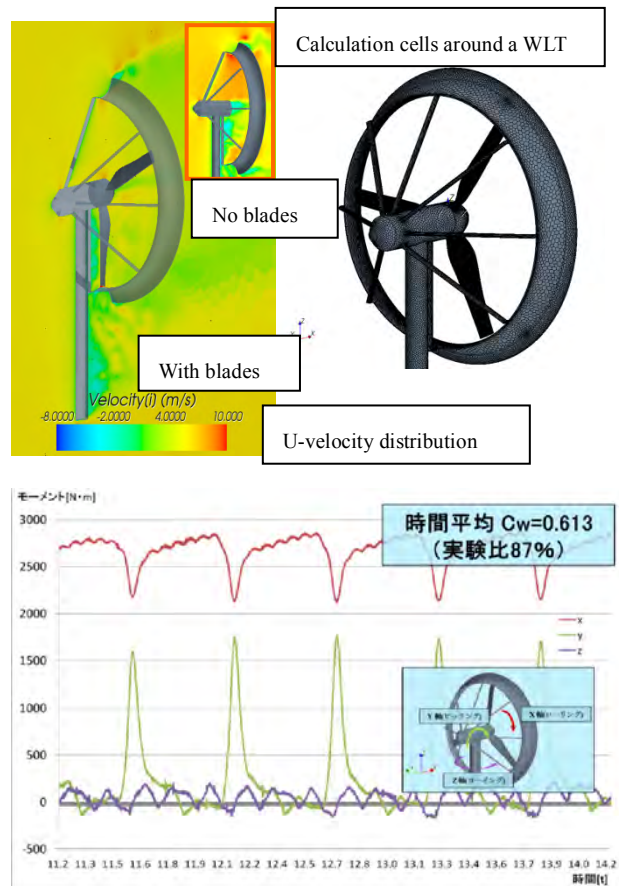


図 5 上図：中型レンズ風車(300kW)の周囲流(ブレード有り無しの場合)、下図：3成分モーメントの時系列変化, Actuator-line method.

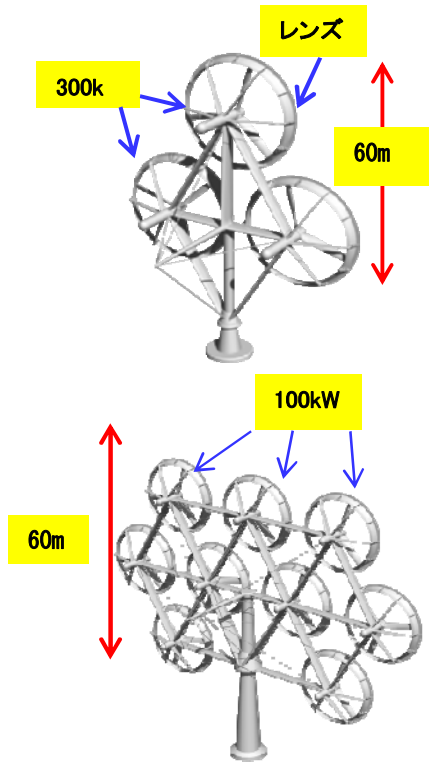


図 6 3 基の 300kW レンズ風車からなる 1MW MRS (上図) ,10 基の 100kW レンズ風車からなる 1MW の MRS (下図)

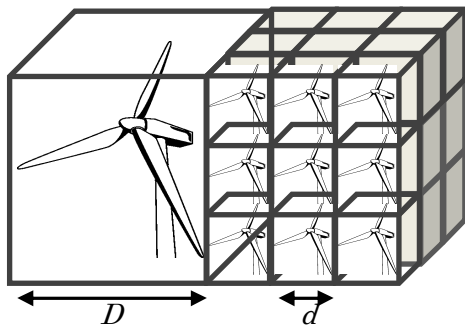


図 7 ロータ直径 D のシングル風車とロータ直径 d のマルチロータシステム MRS (シングル風車代表面積 $D^2 \sim$ MRS 代表面積 $n \cdot d^2$)

表 1 シングルロータ風車とマルチロータ風車 (MRS) の質量とコストの比較, ただし, 全発電量は $D^2=n \cdot d^2$ とする. すなわち $d=D/\sqrt{n}$

	シングルロータ	マルチロータ
ロータ数	1	n
ロータ直径	D	d
全風車質量	$\propto D^3$	$\propto n \cdot d^3 \propto D^3/\sqrt{n}$
全風車コスト	$\propto D^3$	$\propto n \cdot d^3 \propto D^3/\sqrt{n}$
全発電量	$\propto D^3$	$\propto n \cdot d^3$
発電コスト	$\propto D$	$\propto d \propto D/\sqrt{n}$

3 レンズ風車のクラスタ化による大きな発電出力へ (マルチロータシステム, MRS)

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, 数百 kW の中型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. 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, MW 級の大きな出力を得るものである. 図 7 および表 1 に示すように, 理論的には MW 定格の単体風車に比べ重量比, コスト比で $1/\sqrt{n}$ (n はロータの個数) になり⁶⁾, かつ風荷重変動が平滑化され, 強風による局部疲労破壊に強くなる.

レンズ風車を基本ユニットとしたマルチロータ化は次の点で有利である. 1) 最初からリング (レンズ構造体) が装着されており, 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根本原理 (リングの渦形成で低圧化し流れを引き込む) がマルチロータ化でさらに強化され, 全体出力が向上する (図 8)⁷⁻⁹⁾. 図 8 では 3 角形配置の MRS について風洞実験で発電性能評価を行っている. 3 個を隙間なく密接させると全体出力は 3 個独立に計測して合計した値 (Stand alone) と比べマイナスである. しかし, ある程度すきま間隔 s が確保されると最大 9% も全体出力が増加した.

この増加の程度は, 使用するディフューザの流れ方向の幅, つば高さに依存する. また複数の 3 次元物体の後流干渉なので非常に複雑で非定常である. 現在, CFD にて 2 個配置, 3 個配置の流れ解析を行っているが, 風洞実験と同様に個々の風車は発電性能, 風荷重が異なってくる. これは過去の後流干渉問題と同様である^{10,11)}. 騒音面では, 従来の単体 MW 風車と比べ格段と静かなマルチ MW 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. 以上より, 中型レンズ風車で MW 級の高出力化への新しい可能性を追求する.

経済産業省 NEDO のプロジェクトで, 図 9 のような小型 3kW レンズ風車を用いた 10kW MRS を試作した. 現在, 3kW 機を基本ユニットとして 15kW マルチ, 20kW マルチを開発中である. 将来は MW 機スケールで図 10 のような風景が現れることを期待する.

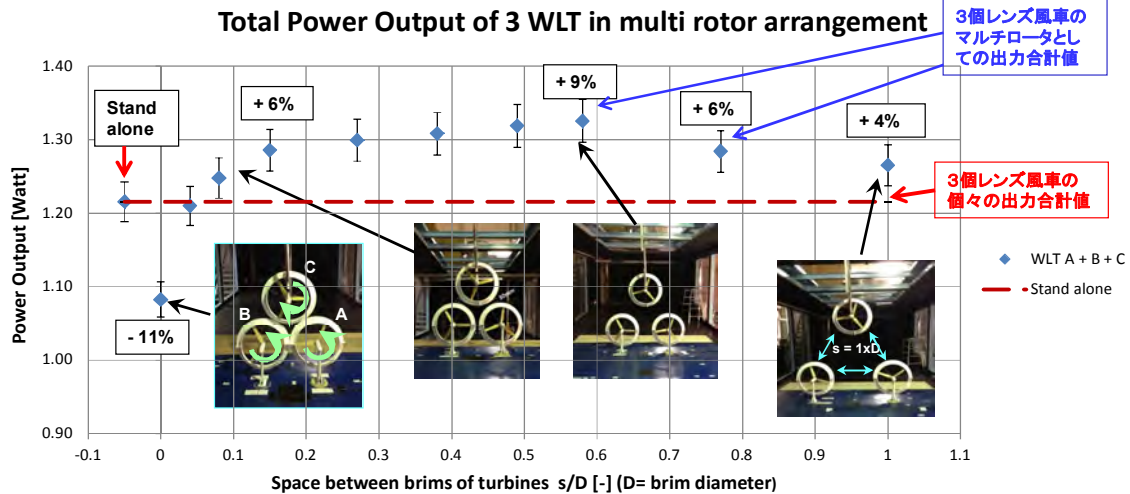


図8 正三角形配置における3基構成のマルチレンズ風車(MRS)の全体発電出力(風洞実験), すきま間隔 $s=0-1D$, D はつば付きディフューザの外径(レンズ風車の外径)



図9 3基の3kW レンズ風車を用いた10kW マルチロータシステム, 九州大学筑紫キャンパス, H27.12.8



図10 MWクラスのマルチレンズ風車が並ぶ風景(CG)

4 浮き島式洋上エネルギーファームを目指して

4.1 浮き島のコンセプト

すぐに深くなる近海を有する日本では, ヨーロッパのような着床式の洋上風力発電は限定される. そこで浮体式風力発電が計画されている. ここで紹介するように本格的な浮体をプラットフォームとして浮かべ, この上に風車, 太陽光発電, 海面で波力, 海中で潮流発電など装備し, 複合再生可能エネルギーファームとして使う. また, 浮き島を利用して, 海洋牧場, 水産加工場, 電気船の充電基地などの漁業協調型の多目的利用を考える. 「浮き島」構想による分散型独立電源としての確立である. この発電定格は数 MW クラスになる.

4.2 博多湾における浮き島式風力発電施設の実証試験

本格的な洋上浮体式複合再生可能エネルギーファーム実現のため, ステージ I を計画し実行した. 環境省支援のプロジェクトにおいて2011年12月4日, 博多湾に直径 18m 程度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 を搭載した浮体式小型複合エネルギーファームを実現した(図11)^{12,13}.

現在, 風力, 波浪, 浮体動揺など種々のデータを取得中である. 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ている(図12). 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(H24年11月~H25年10月計測)(図13). この浮体は漁礁にもなっている.

4.3 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14に示すように一つの浮体規模は約 70m 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. この3角形トラス構造物は半没式(セミサブ)で, 波浪が通過しやすいように半分沈め, 波が当たる部分はトラスの柱状構造になるように設計する. 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.



図 11 浮島式エネルギーファーム（博多湾プロジェクト、ステージ I）、18m 浮体、3kW レンズ風車 2 基、2kW 太陽光パネルの合計 8kW エネルギーステーション、2011.12.4.



図 12 3kW レンズ風車が置かれた博多湾浮体サイトとみなと 100 年公園サイト、両者の距離は約 3km.

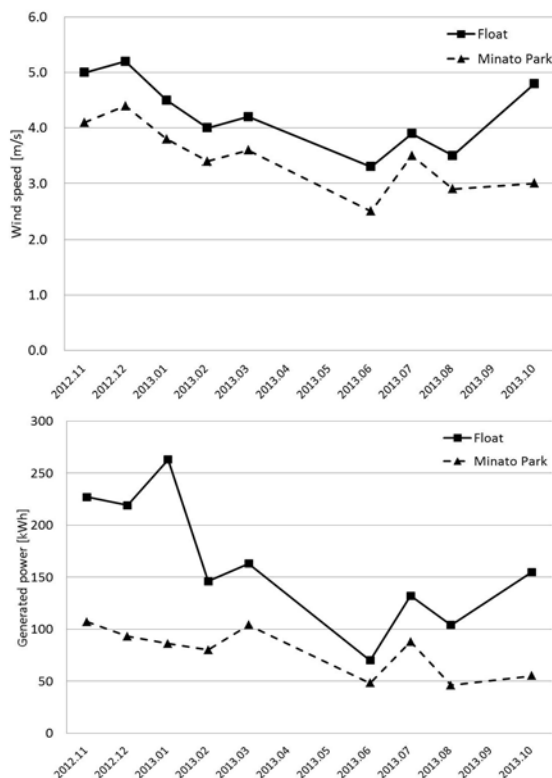


図 13 図 12 の両サイトにおける月平均風速 (m/s) と発電量 (kWh)

このセミサブ式トラス構造物浮体に関して、大型水槽を用いて風波実験を実施し、同時に図 15 の例のように、海上の風の流れ、海面での波の挙動、および海中での水流をすべて取り扱える計算法 (RIAM-CMEN) を開発し、設計に利用している¹⁴⁾。

この 3 角形浮体に 300kW クラスのレンズ風車 3 基、200kW の太陽光パネルを設備し、1.1MW の浮体式エネルギーファームとする。300kW 単体レンズ風車の代わりに 100kW レンズ風車を 3 基マルチロータ化し、300kW マルチ風車として搭載することも検討中である。再生エネルギーでは与えられた面積（土地）で最大限の自然エネルギーを効率的、統合的に取得したい。希薄なエネルギー密度をできるだけ高め、自然の不安定さを減じる。この洋上浮体では、周りに存在する自然エネルギー、風力、太陽光、波力、潮力等を一つのプラットフォーム（浮き島）で取得し、単位面積当たりの取得効率を大幅に高める。

第 2 ステージでは、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、数 MW の浮体式エネルギーファームとして確立する。同時に日本の漁業の一助となるように浮体式エネルギーファームを利用した養殖施設を考案する(図 16)。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（養殖は一般に海中、海底に近い方がよい）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、洋上プラットフォームの建設、漁業との確かな協調である。余剰分は島や漁港の各世帯への電気とする。エネルギーの地産地消である。

第 3 ステージでは、数 MW-数 10MW の移動式浮体式エネルギーファームとしての実現である(図 17)。多目的洋上プラットフォームとしての設置、海上と海中（レンズ水車）の自然エネルギー取得を行う。海上の移動式浮体として、気象・海象データを参考にしながら自然エネルギーの採取へ向かい、洋上で水素生成などを行う。

5 ウィンドソーラータワー — 風と太陽と地熱と —

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、図 18 に図示するように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¹⁵⁾。

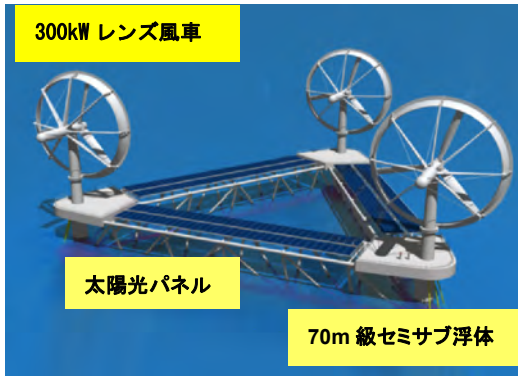


図14 浮島式エネルギーファーム（半没式トラス構造，一边は70mで3角形へ接続）．各頂点に300kWのレンズ風車を配置，甲板に200kW太陽光パネルで合計1.1MWのエネルギーファーム．

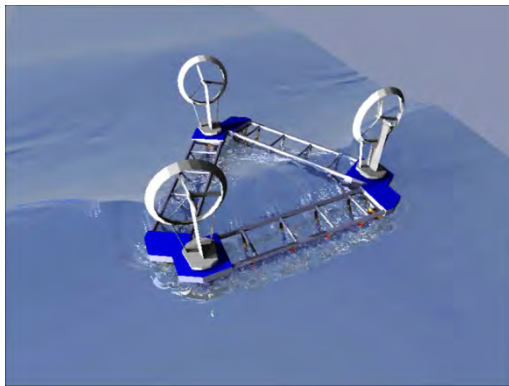


図15 厳しい風波中での半没式トラス構造浮体の応答シミュレーション，CIP法に基づくRIAM-CMENプログラム（九大応力研 胡長洪）



図16 漁業協調の浮体エネルギーファーム．浮沈式生け簀と自動給餌器がエネルギーファームの周囲に配置される．

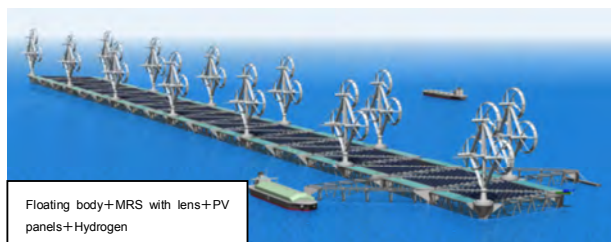


図17 3角形要素で接続拡張された移動式浮体エネルギーファーム．

太陽エネルギーが豊富で広大な土地利用が可能な地域に適している再生エネルギーシステムとして注目されているが、この従来技術の問題点は以下にある。非常に低効率な発電，太陽光を利用するので夜間は上昇気流が得られない，高いタワーが必要，などである。長所は，シンプルな装置，メンテナンスが容易，などが挙げられる。

この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。昼間は主に太陽光，夜間は風力発電ができるとした発想で，ウインドソーラータワーと称する自然エネルギー機器を提案する¹⁶⁻¹⁹⁾。特徴として，

- 1) 従来のソーラータワーのタワー形状を上空に向かうディフューザ型に新しくデザインする。
- 2) 上空のディフューザ出口に低圧生成装置（渦生成装置）を設置し出口周辺の大気圧を低下させる。地上面近くから風を吸い込み，タワー入口部に集めて風エネルギーを集中させ，夜間など太陽熱がなくても発電できる垂直型集風構造体とした。
- 3) 集熱部内部に太陽光パネルを設置し，ハイブリッド発電を行う。太陽光パネルの効率が10%程度なので残りの熱の90%程度は集熱部内部に放出され，蓄積されて熱上昇風が起こる。
- 4) 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しタービンが回る。

上記の試み 1),2)に関して以下の結果を得つつある。

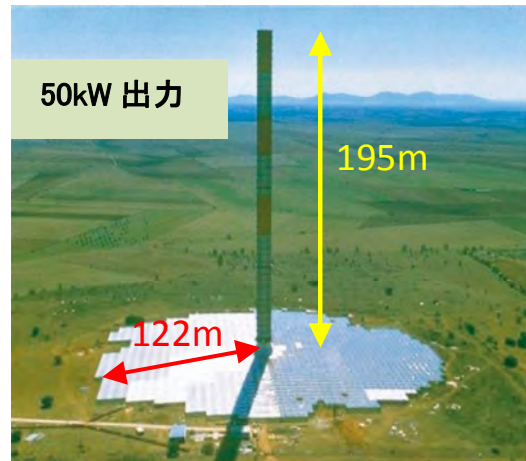


図18 ソーラーチムニー（100kW），マンザナーレス（スペイン）

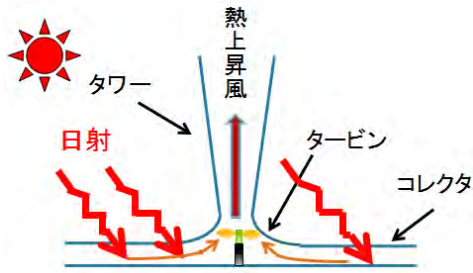


図 19 中央タワーをディフューザタイプにしたソーラータワー



図 20a 円筒型タワー



図 20b ディフューザ型タワー

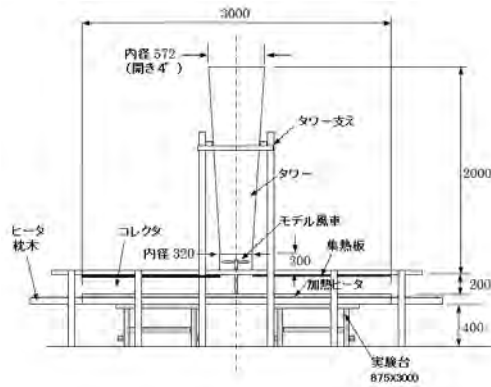


図 21 ウィンドソーラータワーの室内実験アレンジメント

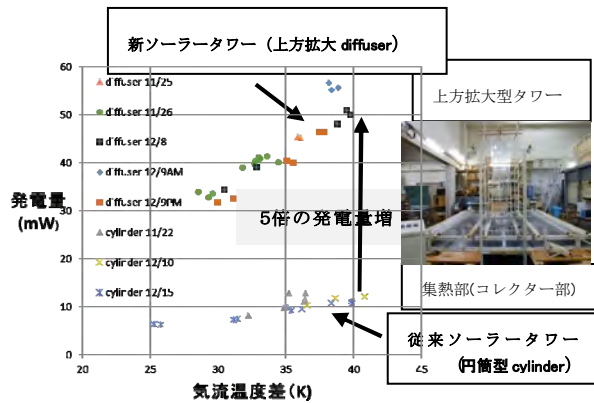


図 22 円筒型タワーとディフューザ型タワーを用いた発電出力実験（室内実験）

5.1 ソーラータワーとしての創風特性

図 20 のように円筒型タワーからディフューザ型のタワー形状にすると風車タービン部において熱上昇風の速度が 1.5-2.0 倍へ増速した。その結果、発電量は同じ高さの円筒型タワーに比べ約 4-5 倍の増加を達成した (図 21, 図 22)。

スケールの違うソーラータワーにおける熱上昇風の速度比は、浮力を含む Navier-Stokes 式の考察により、以下の式になる。

$$U = u \sqrt{\frac{L}{l} \cdot \frac{\Delta\theta/\theta}{\Delta\theta/\theta_0}} \tag{1}$$

L, l : 代表長さ, U, u : 代表速度, $\Delta\theta, \Delta\theta_0$: 代表温度差, θ_0, θ_0 : 参照温度である。このため、タワー高さ、ディフューザ開き角、集熱部に広さ対するタワー高さの比など種々のパラメータの検討を行っている。

図 23 は集熱部と上空温度の差 $\Delta\theta$ に対する上昇風速の変化を示す。式(1)で表現されるように温度差の平方根に比例する。またタワー高さによる上昇風速の変化もわかるが、これも平方根に比例する。図 24 は数値計算によるディフューザの上方開き角に対するタワー内流れの変化の様子である。開き角が 6 度を超えると内部で流れがはく離し圧力損失が大きくなる。

5.2 ウィンドソーラータワーとしての集風特性

タワー出口に風を当てると上昇風が発生することに気づいた (図 25)。さらに低圧生成装置(例えば渦形成板)によりタワー出口を低圧化すると、上昇風速度が大きく増加した。その風洞実験結果と CFD 結果をまとめて図 26 に示す。太陽光で空気を暖めなくても、上空に一般風があれば上空出口で低圧部が形成され、地表面近くの風を集風させタワーを通して風エネルギーを集中させることができ、スロート部で十分な風速を得た。いわば垂直型集風構造体である。図 27 に CFD 計算の一例を示す。タワー出口に風が当たり、タワー下部の周辺で風を集めて吸い上げている様子わかる。タワー出口の上流側に渦形成版を設置しているが、大きな渦形成を行って、低圧域を形成しているのが分かる。

以上から、一日中、ほとんどの気象条件で風エネルギーを集中させ、タワー根元の風力タービンを回して発電が可能となる装置である。

まとめると、

- ・ タワー形状を上方拡大型にするだけで従来のソーラータワーに比べ、5 倍程度発電量が増加。
 - ・ 夜間風を利用できる場所では昼間と同等の発電量が期待される。
 - ・ 太陽光パネルも合体、地熱も合体できると与えられた面積でソーラー基地基準で推定 2 倍程度の総発電量となる (ハイブリッド発電)。
- 超高効率な自然エネルギーの統合利用を実現する。

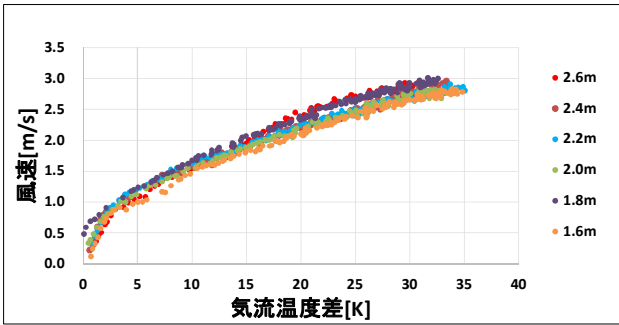


図 23 温度差に対する上昇風速. 式 (1) から予測されるように上昇風速は温度差の平方根に比例する.

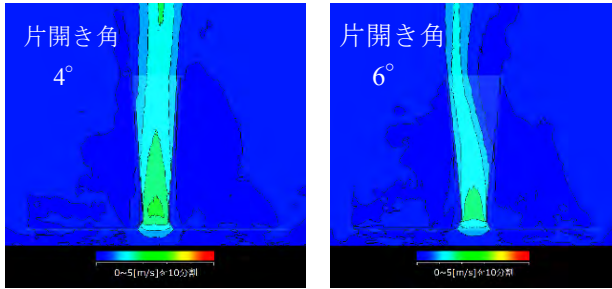


図 24 ディフューザ型タワーにおける内部流れの可視化, 瞬間速度場, 左:片開き角 4度; 右: 6度.

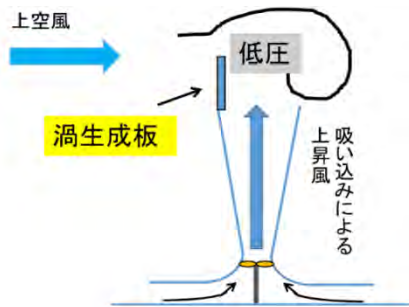


図 25 上空風によるタワー内の上昇風生成, タワー出口の上流側に渦形成板を設置すると, タワー出口上部により強い低圧域を誘導し上昇風が増速する.

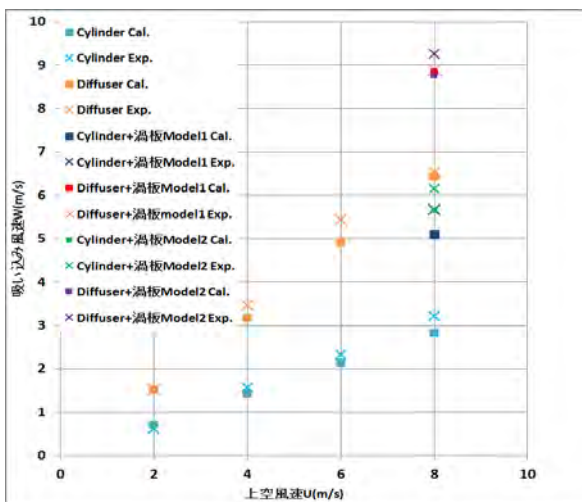


図 26 上空風速 U (m/s) に対するタワー内部上昇風速 (吸い込み風速) W (m/s) の関係. 風洞実験と CFD の比較

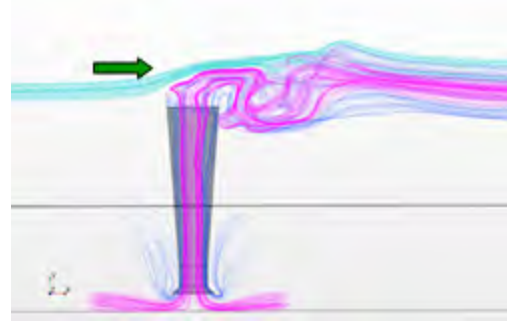


図 27 片開き角 4度のディフューザ型タワーに関する外部とタワー内部の流れの様子 (流線図).

5.3 ウィンドソーラータワー (WST) の野外実験

図 28 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 11m, 集熱部 15m 四方のウィンドソーラータワー (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. 現在, 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. 一例を図 29 に示す. この日は昼間は太陽熱があり (赤と青で示す, 集熱部と上空の温度の差), 夜間は上空風 (紫の三杯風速) が吹いた. 黄色ライン (超音波風速) で示されるように朝から夜間にかけて上昇風速が得られた.

6 農林水産業への寄与

風も水も流体なのでレンズ風車での成果はレンズ水車でも得られる. 日本にはたくさんの河川, 水路がある. 河川等では流れは一定で密度は空気の 840 倍, しかも年中流れている. 設備利用率は風車の数倍は達成できる. 水路中では台風など考慮しなくてよいのでレンズ風車開発時に採用した長いディフューザを使える. ロータのみの通常水車に比べ 5 倍の発電量は稼げる. すなわち, 直径 1 m 程度のレンズ水車で, 水流が 1.2m/s 程度あれば 1kW の水力発電が可能である. この規模で 1 世帯分の電気が賄える. あるいはビニールハウス等で使用する電力負担は大きく減じられる. 風況がよければレンズ風車も協力できる.

近未来に訪れるスマートコミュニティは地方の農村, 漁村等から実現していくものと考えている. 農林水産業の地方では豊かな自然エネルギーに囲まれている. これらをクリーンなエネルギーとして利用し, 化石燃料を一切使わない, エコな農業, エコな水産業が私たちのコンセプトであり, そのための研究開発に努力している (図 30-図 32).



図 28 プロトタイプウインドソーラータワー (WST) を用いた野外実験，タワー高さ 11m，集熱部 15m 四方。

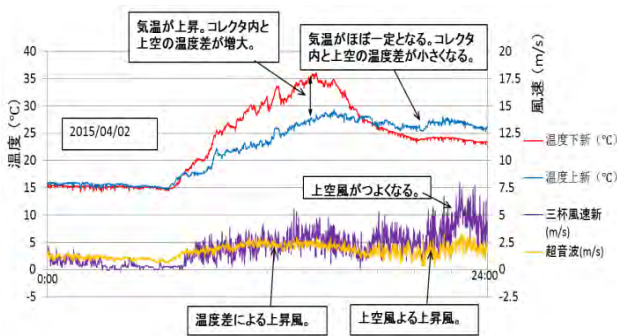


図 29 野外実験結果の一例。日中の太陽熱による熱上昇風の生成と夜間の上空風による上昇風の生成がともに観察される。

新しく開発したレンズ風車，レンズ水車というもの、この将来への可能性について論じてきたが、何よりも尖ったブレードが回る風景が周囲の風レンズの「輪」によって、より景観になじむ「和」が演出されると思う。日本の農業の風景，水産業の風景に環境にやさしく，調和をもたらす「和」の構造を演出したい。

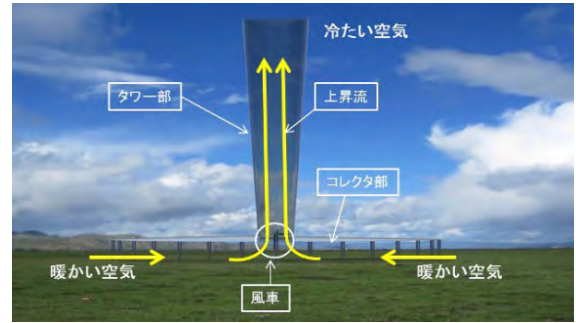


図 30 将来ウインドソーラータワー (CG)。



図 31 将来ウインドソーラータワー (CG)。

7 おわりに

以上、過去のプロジェクト、現在進行中のプロジェクト、将来プランなどを紹介してきたが、共通するコンセプトは「小は大を兼ねる、すなわち集合化（クラスタ化）」および「統合利用」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送り、変換し、蓄え、消費するかである。スマート社会の実現を期待する。

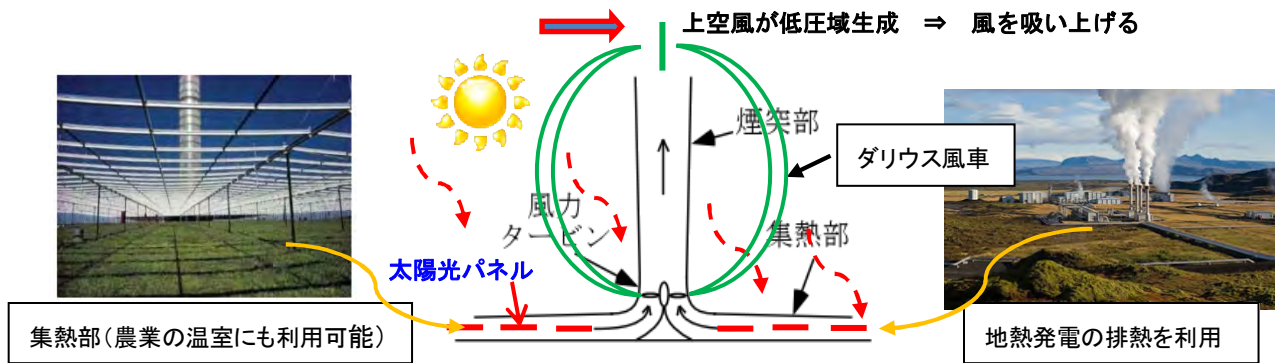


図 32 農業協調ウインドソーラータワー (WST)

謝辞

本研究に参加して頂いた研究スタッフ、九州大学応用力学研究所の鳥谷隆、内田孝紀、吉田茂雄、汪文学、胡長洪、末吉誠の各先生、松島啓二技術職員、長井知幸学術研究員、渡邊公彦、杉谷賢一郎、小野裕子のテクニカルスタッフの方々、学生諸氏にここに記してお礼申し上げます。本研究は、レンズ風車と博多湾浮体ファーム関係が科研費基盤研究（A）課題番号 14205139 と課題番号 21246130、環境省地球温暖化対策技術開発事業(H22-H24 年度)、マルチロータ風車関係が新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の新エネルギーベンチャー技術革新事業（H26-H27 年度）、ウインドソーラータワー関係が科研費基盤研究（A）課題番号 24246161、挑戦的萌芽研究課題番号 22656218 により支援されました。ここに謝意を表します。

引用文献

- 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) 59-62.
- 2) Ohya, Y., Karasudani, T.: A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology, *Energies* 3 (2010) 634-649.
- 3) 九州大学応用力学研究所 新エネルギー力学部門 風工学部分野WEBサイト：
http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/aboutus_detail03.html
- 4) Abe, K., et al. : An experimental study of tip-vortex structures behind a small wind turbine with a flanged diffuser, *Wind and Structures*, (2006) 413-417.
- 5) Takahashi, S., Hata, Y., Ohya, Y., et al. : Behavior of the blade tip vortices of a wind turbine equipped with a brimmed-diffuser shroud, *Energies* 5 (2012) 5229-5242.
- 6) Jamieson, P., et al. : Multi-Rotors: A solution to 20 MW and Beyond?, *DeepWind*, 19-20 (2012 Jan) Trondheim, Norway.
- 7) 鳥谷隆, GOELTENBOTT ULI, 大屋裕二：レンズ風車を用いたマルチロータ風車の開発, 日本風力エネルギー協会誌, 39, 113 (2015.05) 11-13.
- 8) GÖLTENBOTT, U. et al. : Wind lens turbines in multi rotor arrangement, 第 23 回風工学シンポジウム論文集 (2014) 121-126.
- 9) GÖLTENBOTT, U. et al. : Aerodynamic analysis of clustered, diffuser-augmented turbines, *Proc. ICOPE-15, Intl Conference on Power Engineering*, Yokohama, 2015.
- 10) Ohya Y., Okajima A., and Hayashi M. : Wake Interference and Vortex Shedding, *Encyclopedia of Fluid Mechanics* 8, Ch. 10, (1986) 324-338.
- 11) Ohya, Y. : Bluff body flow and vortex - its application to wind turbine, IUTAM symposium, Fukuoka 2013, *Fluid Dyn. Res.* 46-6 (2014) 061423-1-12.
- 12) 大屋裕二：平成 23 年度環境省委託業務：地球温暖化対策技術開発事業「風レンズ技術を核とする革新的中型・小型風車システム導入に関する技術開発」成果報告書, 業務 7, 158-197.
- 13) Kyojuka, Y., Sueyoshi, M., Hu, C., Ohya, Y. : Demonstration experiment of offshore wind power generation by a hexagonal floating platform in Hakata Bay, 2nd Asian Wave and Tidal Energy Conference (AWTEC-2014), Tokyo, 2014.
- 14) Hu, C., Sueyoshi, M., Kyojuka, Y., Yoshida, S., Ohya, Y. : Development of new floating platform for multiple ocean renewable energy, *Proc. GRE2014*, Tokyo, 2014.
- 15) Schlaich, J. : The Solar Chimney, Axel Menges. (1996).
- 16) Okada, S., Ohya, Y., et al. : Wind Generation Improvement Using Diffuser Type Tower, *ASME, Journal of Solar Energy Engineering*, 137 (2015) 031009-1-8.
- 17) 長井知幸, GOELTENBOTT ULI, 大屋裕二：ソーラーアップドラフトタワーとその発電効率を増加させる研究の紹介, 日本風力エネルギー協会誌, 39, 113, (2015.05) 34-37.
- 18) M. Motoyama, K. Sugitani, Y. Ohya, T. Karasudani, T. Nagai, S. Okada : Improvement of the Power Generation Performance of a Solar Tower Using Thermal Updraft Wind, *Energy and Power Engineering*, 6-11, (2014.10) 362-370. *Energy and Power Engineering*, (2015.07) 255-257.
- 19) Wataka, M., Ohya, Y. et al. : Improvement of Power Generation of the Wind Solar Tower, *Proceedings of ICOPE (Power Engineering、国際動力学会)*, Yokohama, 2015.