

上空風によるウインドソーラータワーの集風性能に タワー縦横比が与える影響

渡邊, 康一
九州大学エネルギー研究教育機構

河原, 信太郎
九州大学大学院工学府航空宇宙工学専攻

大屋, 裕二
九州大学応用力学研究所

<https://hdl.handle.net/2324/2327990>

出版情報 : 風工学シンポジウム論文集. 25, pp.109-114, 2018-12. 日本風工学会
バージョン :
権利関係 :



上空風によるウインドソーラータワーの集風性能にタワー縦横比が与える影響

INFLUENCE OF ASPECT RATIO OF WIND SOLAR TOWER TO ITS WIND COLLECTION PERFORMANCE

渡邊康一¹⁾河原信太郎²⁾大屋裕二³⁾Koichi WATANABE¹⁾, Shintaro KAWAHARA²⁾ and Yuji OHYA³⁾

ABSTRACT

We focused on the shape of a solar tower and modified the structure from a cylindrical type to a diffuser-type tower to improve the efficiency of power production by the tower. This modification aimed to combine two mechanisms. The first mechanism is “wind generation” which becomes effective when solar thermal energy is available, and the second mechanism is “wind converging” which becomes effective when wind passes the top of the diffuser tower even if solar thermal energy was not available. We named the tower “Wind Solar Tower (WST)” because it can utilize wind energy and solar energy simultaneously. We investigated the wind converging effect in this study. Influence of aspect ratio of WST to its performance was examined.

Key Words: Wind Solar Tower, Hybrid power generation, Wind converging

1. はじめに

ウインドソーラータワー (Wind Solar Tower, 以下 WST と書く) は, 地表近くに高さの低い集熱部, その中央にタワー, タワー内の下部に風車をもつ発電プラントである¹⁻³⁾ (図 1 参照). 類似なものとしてソーラーチムニーと呼ばれるプラントがある^{4, 5)}. 太陽光が得られるとき, 日射による地面の加熱を通じて温室内の空気が暖められ, 浮力によってタワー内に熱上昇風が創風される. ソーラーチムニーはこの熱上昇風により風力発電しており, WST もこの原理を利用している (図 2 (a) 参照). 一方で, WST はこの熱上昇風とは別種の内部上昇風も発生させることができる. それはタワー上部付近に横風が吹いたとき, 上空風がタワー上部付近に低圧領域を生成することによりタワー内部の風を集めて吸い上げることによって上昇風を発生させるという, 熱とは無縁の集風原理を用いることによるものであり (図 2 (b) 参照), 著者らの研究グループではこれら 2 つの上昇風を同時利用することによって WST でハイブリッド発電する研究を進めてきた^{1-3, 6)}. 効果的に内部上昇風を生成するタワー形状についても研究を続けており, 過去の研究により, 円筒型と比較して,

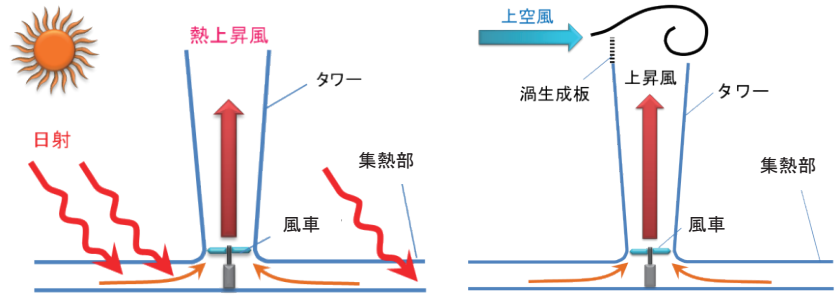
¹⁾ 九州大学エネルギー研究教育機構 准教授 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

²⁾ 九州大学工学府航空宇宙工学専攻 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)

³⁾ 九州大学応用力学研究所 特任教授 (〒816-8580 春日市春日公園6-1)



図1 WST 野外実証試験機



(a) 熱上昇風の創風

(b) 上空風による集風

図2 WST の発電メカニズム

ディフューザ型のタワーとした方が効率的に速い内部上昇風速が得られることが分かっている。また、上空風を利用する場合は、タワー上部に渦生成板を設置すると上空風に匹敵する内部上昇風速が得られることも分かった。本論文ではこれらの知見のもと、タワー縦横比を変化させた場合に、上空風の吸い上げ効果に与える影響についての研究結果を報告する。同じタワー高さでも、集風効率を維持したままタワーを太くできれば大きなブレード面積を確保することができ、スケール効果により発電量の増加が見込まれる。本研究では風洞実験にて縦横比の影響を検証した。

2. タワー縦横比を変化させた場合の集風性能比較

風洞実験ではタワー模型の上部だけを床から風路に突き出し、上空風を模擬することでタワー内部に上昇風を発生させた。WST の集風原理はタワー上開口部における剥離せん断層または渦生成板が生成する渦による低圧領域の生成であるため⁶⁾、今回の実験で風洞床が性能に与える影響は小さい。まず、タワー模型の縦横比を変化させてそれぞれの内部上昇風速を測定することで、タワー縦横比が WST の集風性能に与える影響を評価した。次に、タワー上部に効果的に低圧部を生成するために、渦生成板を設置して同様の実験を行った。加えて、タワー内部の流れ場の考察のために、タワー内部の鉛直方向圧力分布を測定した。風洞実験には九州大学応用力学研究所の大型大気境界層風洞を用いた。風路寸法は $3.6 \times 2.0 \times 15\text{m}$ であり、最大風速は 30m/s である。ブロッキング効果を取り除くために、試験部の側壁と天井を取り外して実験した。なお、これらの実験は風車を設置せずに行った。

2. 1 内部上昇風速測定実験

タワー模型の形状を図3に、渦生成板を設置した実験の様子を図4に、実験条件を表1に示す。タワー

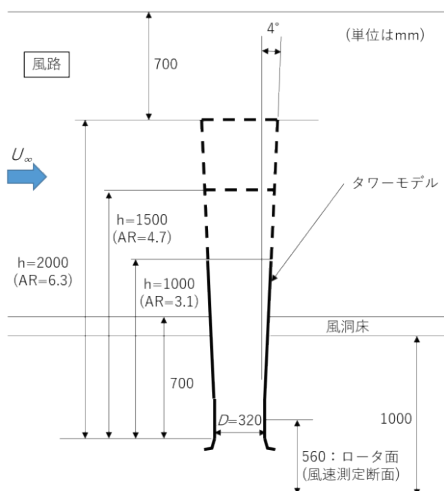


図3 タワーモデル

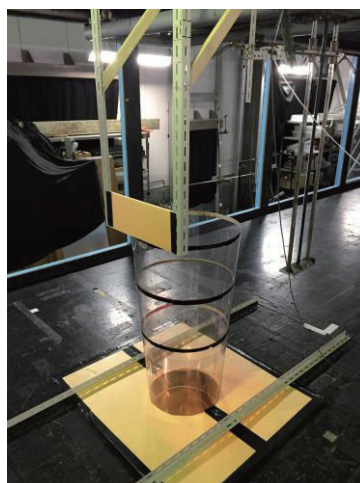


図4 実験の様子(渦生成板あり)

表1 実験条件

実験風速	4, 6, 8 [m/s]
計測時間	180 [s]
サンプリング 周波数	1 [kHz]
タワー下部直径 D	0.32[m]
タワー高さ	1, 1.5, 2 [m]
縦横比(AR)	3.1, 4.7, 6.3
渦生成板高さ	$0.5D$
渦生成板の幅	タワー上部直径と同じ

表2 実験機器

風速計	本田工業 標準型 多点半導体 風速計 GeY-400A
圧力変換器	TOYO CONTROLS DIGITAL MANOMETER TO-3300D
アンプ	エフエヌ回路ブロック P-61
フィルタ	エフエヌ回路ブロック P-83

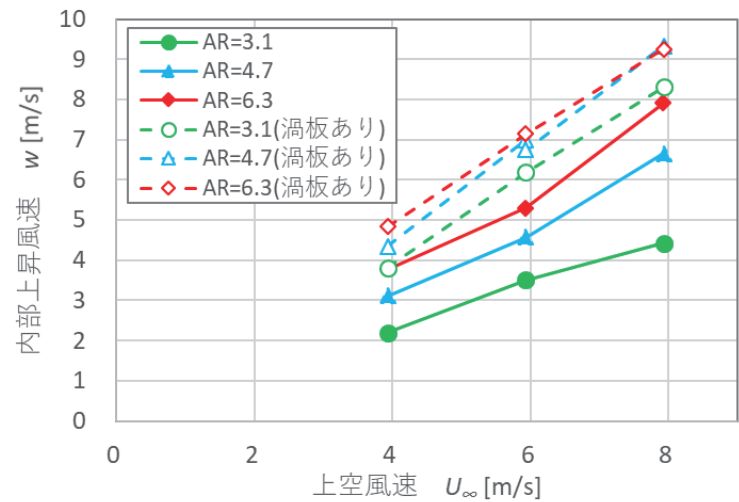


図5 内部上昇風速測定結果

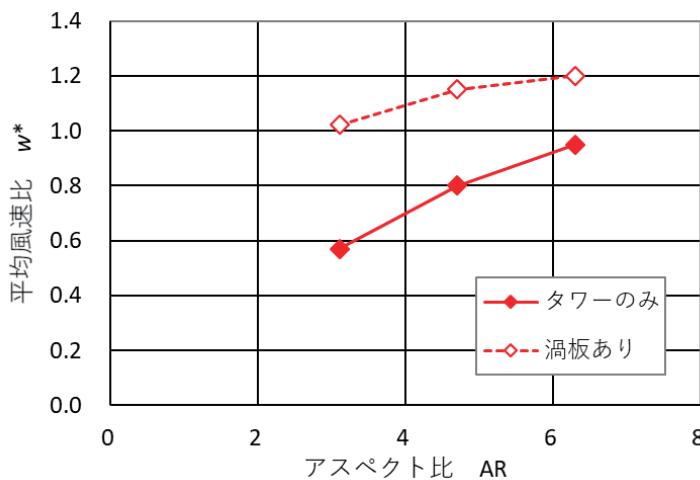


図6 各タワー形状における風速比

表3 実験条件

実験風速	8 [m/s]
計測時間	60 [s]
サンプリング周波数	1 [kHz]
タワー下部直径 D	0.32, 0.55[m]
タワー高さ	2 [m]
縦横比(AR)	3.4, 6.3
渦生成板高さ	$0.5D$
渦生成板の幅	タワー上部直径と同じ

モデルは、3種類の縦横比 $AR (=h/D)$ を設定した。ここで、 h はタワー高さ、 D は風車設置高さにおけるタワーの内径である。測定には熱球流速計を用いた。用いた機材を表2に示す。タワー上方から鉛直下向きに熱球流速計をタワー内に差し込み、通常風車を設置する高さに測定部（熱球）を固定し、タワー中心における鉛直方向の流速を測定した。熱球流速計からの信号はAD変換ボードでアナログ／デジタル変換を行い、データ取り込みを行った。

図5にそれぞれの縦横比のタワーモデルを用いた場合の内部上昇風速測定結果をまとめて示す。実線はタワーのみの場合の結果を、点線はタワー上部に渦生成板を取り付けた場合の結果を示している。全ての場合において、内部上昇風速は上空風速にほぼ比例して増加する傾向が見てとれるが、風速の絶対値はARの大きさにより異なることが分かる。まずタワーのみの場合の結果に着目すると、 $AR=3.1$ の場合では平均で上空風の0.57倍の内部上昇風速が発生し、 AR が4.7, 6.3と増加するにつれて、0.80倍、0.95倍と大きくなる。一方で渦生成板を取り付けた場合は、 $AR=3.1$ のとき1.02倍と既に上空風速を超える風速が生じる。ただし、 $AR=4.7, 6.3$ のとき1.15倍、1.20倍と、縦横比が大きくなった時の増加率は小さいことが分かる。以上の結果をまとめたものが図6である。縦軸は平均風速比で、各上空風速における風速比 $w^*=w/U_\infty$ を平均した値を示している。ここで w は内部上昇風速、 U_∞ は上空風速である。図6から、上空風によるWSTの集風性能は渦生成板を取り付けた場合の方が高く、かつ渦生成板を取り付けた場合はタワーの縦横比による影響が小さい、と言える。

2. 2 圧力分布測定実験

高さが等しく、直径の異なる 2 種類のタワーに対して前項と同様に上空風を模擬して風洞実験を行い、タワー内部圧力の鉛直方向分布を測定した。タワーの縦横比は $AR=3.4, 6.3$ とし、タワーのみの場合と、渦生成板を取り付けた場合についてそれぞれ測定を行った。実験条件を表 3 に、実験機材を表 2 に示す。タワー上方から鉛直下向きに静圧管をタワー内に差し込み、タワー中心軸上を鉛直方向に 0.2m 移動させる毎に測定した。ただし、圧力変化が大きい位置では、測定間隔距離を狭めて測定した。

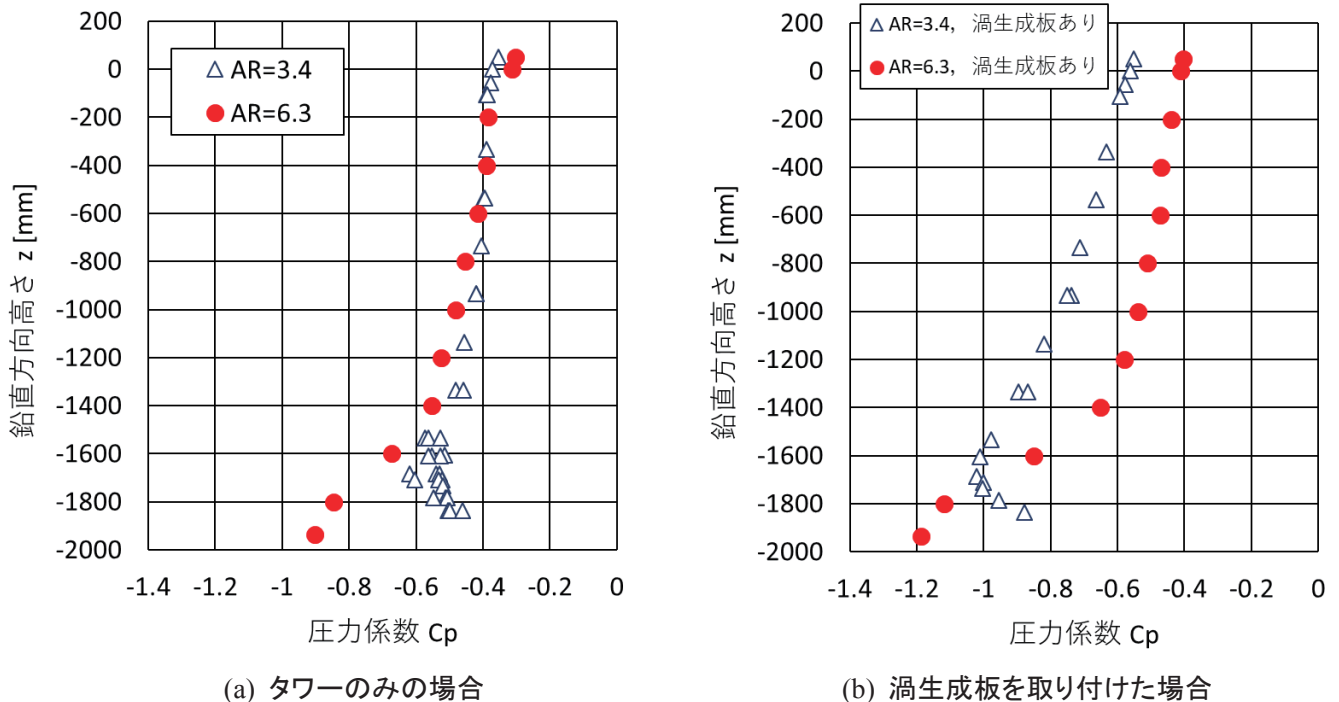


図7 タワー内部圧力の鉛直方向分布

圧力分布の測定結果を図 7 に示す。縦軸は鉛直方向高さ z で、タワー頂部を原点とした。横軸は圧力係数 $C_p = p / \rho U_\infty^2$ で、 p は静圧、 ρ は密度、 U_∞ は上空風速である。まず、図 7(a) のタワーのみの場合に注目すると、タワー上部から中央部 ($-1400 < z$) では圧力分布に大きな差は見られないのに対し、タワー下部 ($z < -1400$) では圧力に大きな差異が見られる。具体的には、縦横比の大きい $AR=6.3$ の場合には、タワー下部で大きな圧力低下が見られるのに対し、 $AR=3.4$ の場合には圧力は不安定に変動し、大きな圧力低下は見られない。一方で、図 7(b) の渦生成板を取り付けた場合は、逆にタワー上部から中央部にかけて圧力分布に大きな差が見られ、 AR が小さいタワーの方が圧力は低い。この 2 つのモデルの圧力差はタワー下部で小さくなり、最終的には AR が大きいタワーの方が低い圧力となっている。

過去の研究から、タワー内の圧力分布が鉛直方向に変化するのはタワーをディフューザ型にしたときの特徴であることが分かっている⁵⁾。これは、ディフューザ内を流体が流れる際に、ディフューザ入り口付近で流れが加速し、圧力が低下するからである。この知見をもとに図 7 を見ると、渦生成板の有無にかかわらず、縦横比の大きい $AR=6.3$ のタワーの方が鉛直方向に圧力分布が大きく変化していることから、縦横比が大きいタワーの方がディフューザ型タワーによる流れの加速効果が得られていると考えられる。一方、タワー高さが同じで、縦横比が小さなタワーの場合、タワー上部の直径が相対的に大きく、大きな開口部形状となるため、低圧領域を生成する渦生成板の効果を、より効果的に得られたと考えられる。このことが、渦生成板を取り付けた場合はタワーの縦横比による影響が小さいことの理由であると考えられる。

なお、実験の都合上、 AR を変化させる際に 2. 1 節ではタワーの高さを、2. 2 節ではタワーの直径を変

化させた。しかしながら、AR が同じであればタワーの直径が変化しても、圧力分布は 2. 2 節の結果と同様の傾向を示すことを確認している。

3. 出力性能実験

縦横比が比較的小さい $AR=3.4$ のタワーモデルを用い、タワー内に風車を設置して出力性能実験を行った。出力性能試験における実験装置の概略図を図 8 に示す。風車の出力係数は $C_{power}=P/(0.5\rho AU_{\infty}^3)$ により算出した。ここで、 U_{∞} は流入風速、 P は風車出力、 ρ は密度、 A はロータ面積である。風車出力 P は、風車に非接触トルク計を接続し、負荷としては AC トルクモーターをその下方に設置し、高い負荷から徐々に負荷を下げた状態での風車のトルク Q 、および回転速度 n を計測し、 $P=Q\cdot 2\pi n$ として算出した。実験条件を表 4 に、使用した機器を表 5 に示す。実験はタワーのみの場合と渦板ありの場合について行った。

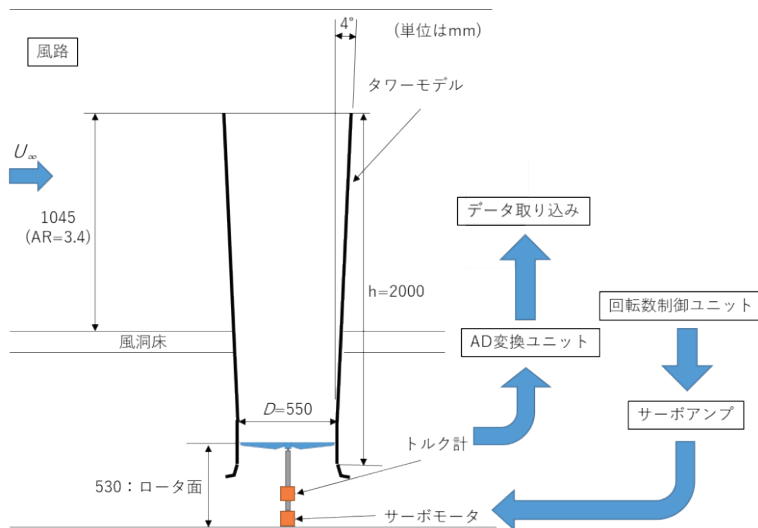


図8 出力性能実験概要

表4 実験条件

実験風速	14 [m/s]
計測時間	60 [s]
サンプリング周波数	1 [kHz]
タワー下部直径 D	0.55[m]
タワー高さ	2 [m]
縦横比(AR)	3.4
渦生成板高さ	0.5D
渦生成板の幅	タワー上部直径と同じ
風車翼	MT1013-081 ⁷⁾

表5 実験機器

トルク計	UNIPULSE UTMII-1Nm
AC サーボモーター	Oriental Motor NXM640A
アンプ	エフエヌ回路ブロック P-61
フィルタ	エフエヌ回路ブロック P-83

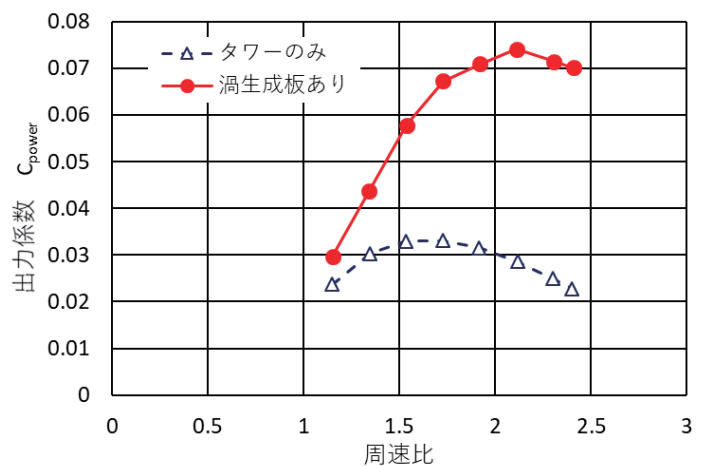


図9 出力性能曲線

図 9 に得られた出力性能曲線を示す。縦軸は出力係数、横軸は周速比である。まず、タワーのみの場合と渦生成板を取り付けた場合の最大出力係数を比較すると、渦生成板を取り付けた場合の方が 0.074 と高く、タワーのみの場合の約 2.2 倍であった。この結果から、高い出力を得るために渦生成板を取り付けることが効果的であることを確認した。しかしながら、図 5 に示したように、風車を設置しない場合には渦生成板の有無によって風速に倍近い差が確認されていた。通常の風車では風車の出力は近寄り風速の 3 乗に比例するが、近寄り風速を一度管内流れに変えてから利用する WST では、風車を設置していない状態の内部上昇風速から同様の考え方で出力性能を予測することはできないことが分かった。しかしながら、風車を設置しない

簡易な実験結果から、その出力性能を予測できれば有用であるため、今後、数値シミュレーションを用いて流れ場を詳細に解析しながら、性能予測手法の確立と最適な風車設計を進めていく予定である。また、タワーの縦横比を変化させたり渦生成板を設置したりすると、タワー内任意断面における単位時間当たりの体積流量が変化する。本稿では触れていないが、これにより集熱部での熱伝達効率や、外部との気流温度差が変化するため、設置環境の風況、及び日射量に合わせた最適設計手法の確立にも取り組んでいく。

4. まとめ

ウインドソーラータワーの上空風を模擬した風洞実験により、ウインドソーラータワーの集風性能にタワー縦横比が与える影響について検証した。その結果、下記の知見を得た。

- 上空風による WST の集風性能は、渦生成板を取り付けた場合の方が高い。渦生成板を取り付けた場合には、上空風以上の内部上昇風をタワー内に集風することができる。また、縦横比を変化させた場合には、渦生成板を取り付けた場合の方が縦横比の変化の影響を受けにくい。
- 渦生成板の有無にかかわらず、縦横比の大きいタワーの方が鉛直方向に圧力分布が大きく変化する。すなわち、縦横比が大きいタワーの方がディフューザ型タワーによる流れの加速効果が得られると考えられる。
- タワー高さが同じで、縦横比が小さなタワーの場合、タワー上部の直径が相対的に大きく、大きな開口部形状となるため、低圧領域を生成する渦生成板の効果を、より効果的に得られる。このことが、弱まったディフューザ型タワーによる流れの加速効果を補う。このことが、タワーの縦横比を変化させた場合にも渦生成板がある場合には性能への影響が小さいことの理由であると考えられる。
- 高い風車出力を得るためには、渦生成板を取り付けることが効果的である。しかしながら、風車を設置していない状態の内部上昇風速からの出力性能予測手法の確立や、最適な風車設計が今後望まれる。

参考文献

- 1) Ohya, Y., Wataka, M., Watanabe, K., Uchida, T., Laboratory Experiment and Numerical Analysis of a New Type of Solar Tower Efficiently Generating a Thermal Updraft, *Energies*, 9(12), 1077, 2016
- 2) Okada, S., Uchida, T., Karasudani, T., Ohya, Y., Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower, *Journal of Solar Energy Engineering, ASME*, 137(3), 031009-1, 2015
- 3) Motoyama, M., Sugitani, K., Ohya, Y., Karasudani, T., Nagai, T., Okada, S., Improving the Power Generation Performance of a Solar Tower Using Thermal Updraft Wind, *Energy and Power Engineering*, 6, pp.362-370, 2014
- 4) Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., Solar Chimneys —Part 1: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares, *International Journal of Solar Energy*, pp.3-20, 1983
- 5) Haaf, W., Solar Chimneys —Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant, *International Journal of Solar Energy*, pp.141-161, 1984
- 6) 渡邊康一, 上空風によって発生するウインドソーラータワー内部の上昇風に関する研究, 第 38 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.396-399, 2016
- 7) 杉田祐輔, 上田昌弘, 永津淳, 古川雅人, 大屋裕二, 風レンズ風車の空力性能に及ぼす翼素形状の影響, 日本機械学会年次大会講演論文集, pp.255-256, 2005.