

# ウインドソーラータワー内部に発生する熱上昇風の数値計算 Numerical Simulation of Thermal Updraft Generated by a Wind Solar Tower

- 渡邊 康一, 九大エネ機構, 福岡県春日市春日公園 6-1, koichi-watanabe@riam.kyushu-u.ac.jp
- 大屋 裕二, 九大応力研, 福岡県春日市春日公園 6-1, ohya@riam.kyushu-u.ac.jp
- Halawa Amr, 九大応力研, 福岡県春日市春日公園 6-1, amrhalawa@riam.kyushu-u.ac.jp
- 内田 孝紀, 九大応力研, 福岡県春日市春日公園 6-1, takanori@riam.kyushu-u.ac.jp
- Koichi Watanabe, Kyushu University, 6-1, Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, Japan
- Yuji Ohya, Kyushu University, 6-1, Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, Japan
- Amr Halawa, Kyushu University, 6-1, Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, Japan
- Takanori Uchida, Kyushu University, 6-1, Kasuga-koen, Kasuga-shi, Fukuoka, Japan

A wind solar tower is one of the renewable energy power plant. The tower utilizes solar energy and crosswind energy simultaneously to create updraft inside the tower. Strong updraft is preferable because it leads to high power output of a turbine inside the tower. The updraft generated by the tower was numerically simulated in this research. The result showed that a diffuser-shaped tower generates the updraft efficiently. It was due to the low pressure loss of the diffuser-shaped tower.

## 1. はじめに

ウインドソーラータワーは、再生可能エネルギーを利用する風力発電プラントの1種である(Fig. 1)。著者らの研究グループが開発したこのプラントは、太陽エネルギーのみを利用するソーラーアップドラフトタワー<sup>(4)</sup>と呼ばれる機器に、風力エネルギーを利用する機能を付加したものである。一般に再生可能エネルギーはエネルギー密度が低いいため、発電量の増加やコストの低減が課題である。ウインドソーラータワーは、太陽エネルギーと風力エネルギーを1つの機器で同時に利用することができるため、再生可能エネルギー取得密度向上に大きく貢献する可能性がある。これまでタワー形状をディフューザ型にしたり、タワーの上に渦生成板を設置したりすることで、タワー内部に発生する風を強める工夫を施してきた<sup>(3,6)</sup>。本研究では数値計算によってタワーまわりの流れ場を模擬し解析した。タワー最適形状の追求や実用機設計を目的として、今後タワー発電性能の理論予測手法の確立を目指していく。



Fig. 1 The wind solar tower prototype (Kyushu Univ.).

## 2. ウインドソーラータワーのメカニズム

Fig. 2 にウインドソーラータワーの2つのメカニズムを示す。太陽エネルギー利用(Fig. 2a)の場合、太陽光が集熱部地面に入射し、暖められた内部空気が膨張して密度が低下する。その結果、浮力により内部空気はタワー内で熱上昇風となり、風力タービンを回転させる。風力エネルギー利用(Fig. 2b)の場合、タワー上部を横切る風がタワー出口近くに渦を形成し、圧力を低下させることでタワー内に吸い上げ風を発生させる。これが風力タービンを回転さ

せる。今回は熱利用の場合について数値解析を行った。

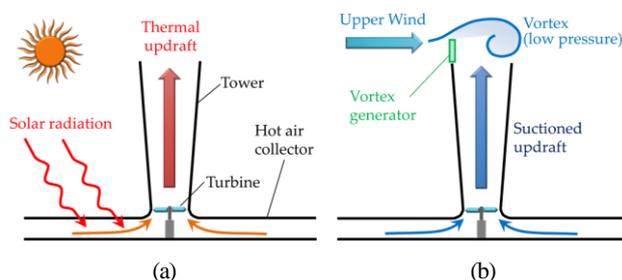


Fig. 2 Mechanisms of the wind solar tower; (a) Solar power utilization (b) Wind power utilization

## 3. 数値解析手法

発電性能予測のためには、まずタワー内に発生する上昇風を正確に予測することが必要であるため、今回は風車を設置せずに解析した。3次元非圧縮計算とし、ブシネスク近似を用いた。Fig. 3 に解析したタワーモデルを示す。今後、室内実験の結果と比較することを想定し、タワー高さ2mのスケールモデルを対象とした。円筒型タワーと開き角 $4^\circ$ のディフューザ型タワーについて解析した。

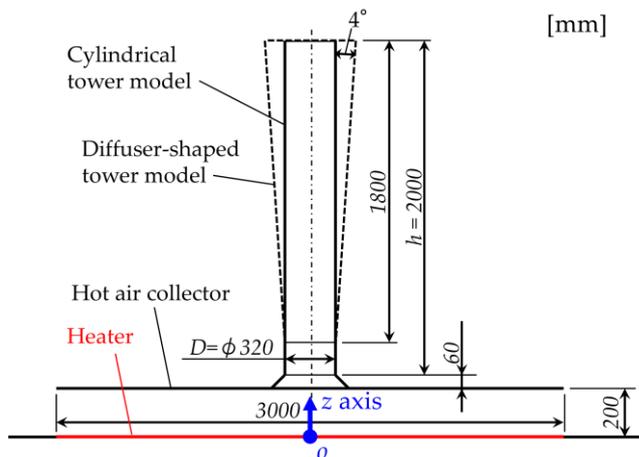


Fig. 3 Scale models of the wind solar tower.

Fig. 4 に計算領域を示す。タワーの風車設置部直径を  $D$  として、水平方向に  $100D$ 、鉛直方向に  $60D$  とした。境界条件は底面を粘着条件、上面をすべり条件、側面を周期境界条件とした。室内気温は  $17^{\circ}\text{C}$ 、集熱部地面は  $100^{\circ}\text{C}$  に加熱、物体壁面は断熱条件とした。Fig. 5 にはタワー付近の計算格子を示す、デカルト座標系不等間隔スタガード格子を用い、物体は矩形格子近似した。最小格子幅は  $0.01\text{m}$  である。計算は有限差分法に基づいた直接数値計算とし、オイラー陽解法による部分段階法を用いた。対流項の離散化には、梶島が提案する対流型補間法を採用した。

最初に  $30[\text{s}]$  計算し、定常状態を得た。続く  $5[\text{s}]$  を時間平均した値を用いて、以下の考察を行った。

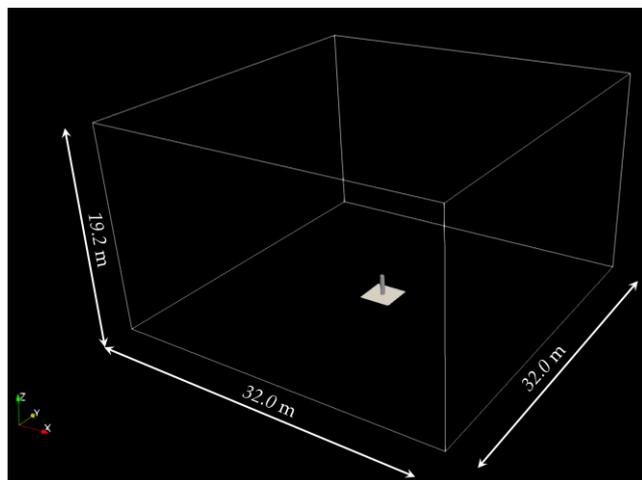


Fig. 4 The computational domain.

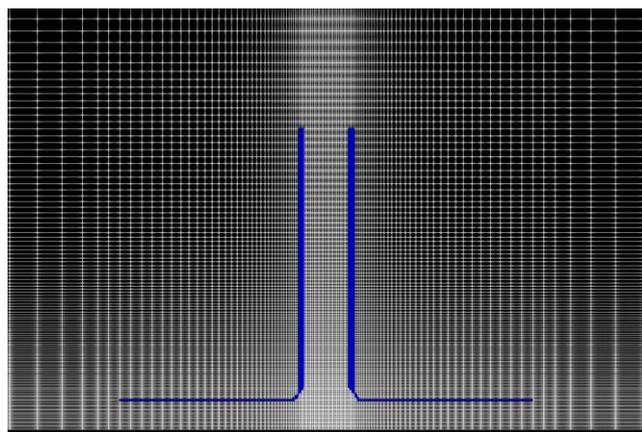


Fig. 5 The computational grid pattern on the cylindrical model.

#### 4. 結果と考察

Fig. 6 にそれぞれのタワー内体積流量の鉛直方向分布を示す。ディフューザ型タワーでは、円筒型タワーの 1.3 倍の体積流量が得られた。この傾向は過去の実験結果<sup>9)</sup>と一致する。両方のケースにおいてタワー内鉛直方向の流量は保存されており、質量保存則を満たしている。Fig. 7 と Fig. 8 には鉛直方向速度  $w[\text{m/s}]$  のシェーディング分布を示す。いずれもタワー中央断面を可視化している。円筒型タワーでは鉛直方向に様な速度が得られるのに対し、ディフューザ型タワーでは、タワー断面積が最小となる高さで最も速い流速が得られる様子が見て取れる。

Fig. 9 から Fig. 11 には、円筒型タワー内部の鉛直方向速度、圧力、気温をそれぞれ示している。同様に Fig. 12 から Fig. 14 は、ディフューザ型タワーの結果である。各物理量が鉛直方向にどの

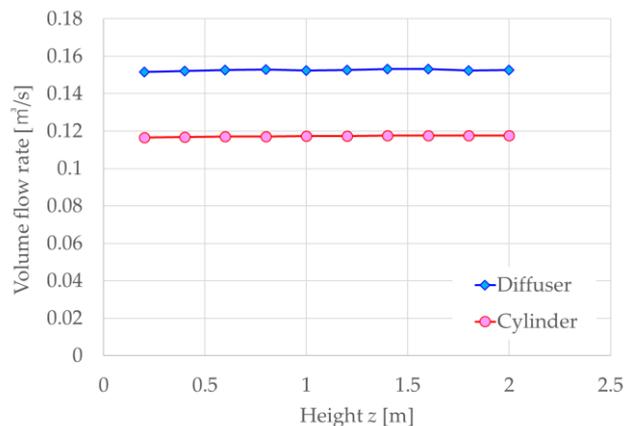


Fig. 6 Volume flow rates inside the towers.

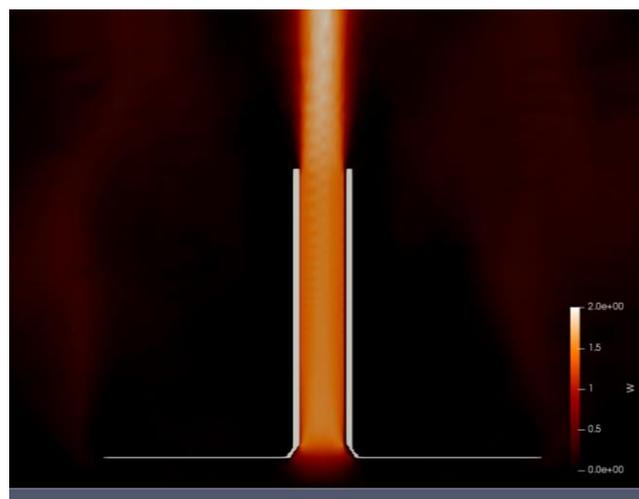


Fig. 7 Vertical wind speed visualization of the cylindrical tower.

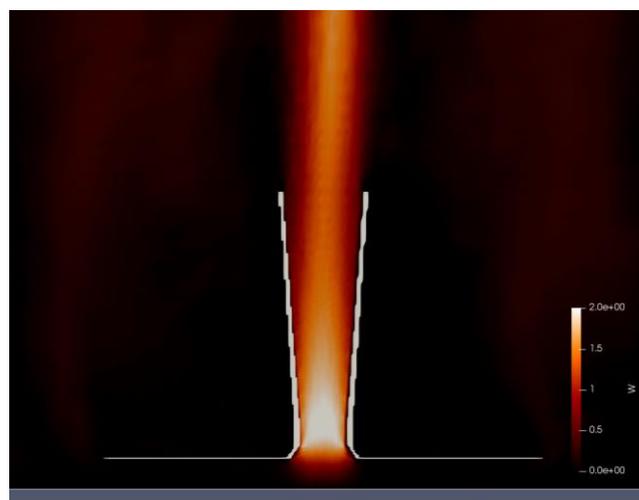


Fig. 8 Vertical wind speed visualization of the diffuser-shaped tower.

ように変化するかをみるために、高さの異なる 5 つの断面での分布を示した。各グラフの横軸はタワー中心軸からの半径方向距離を示す。いずれのケースにおいても、内部上昇風に旋回方向成分は見られなかったため、各物理量は円周方向に平均し Bin 処理した。

円筒型タワーの場合、流速と温度は鉛直方向にほとんど変化し

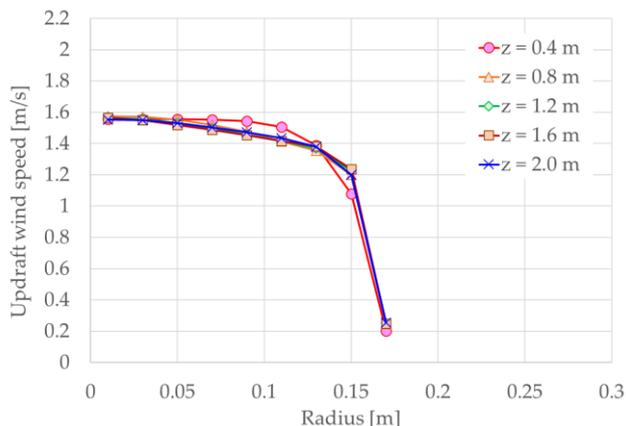


Fig. 9 Vertical wind speed distributions in the cylindrical tower.

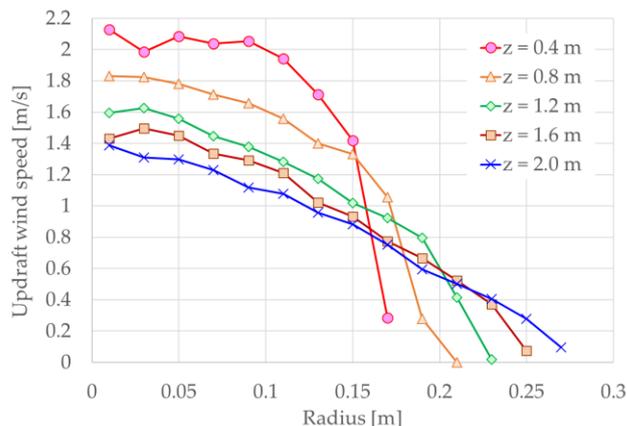


Fig. 12 Vertical wind speed distributions in the diffuser-shaped tower.

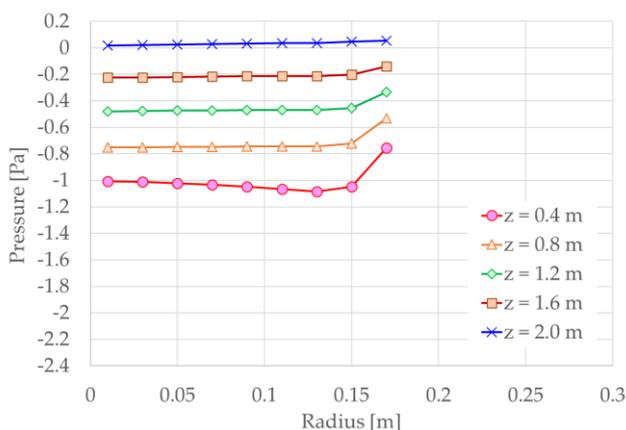


Fig. 10 Static pressure distributions in the cylindrical tower.

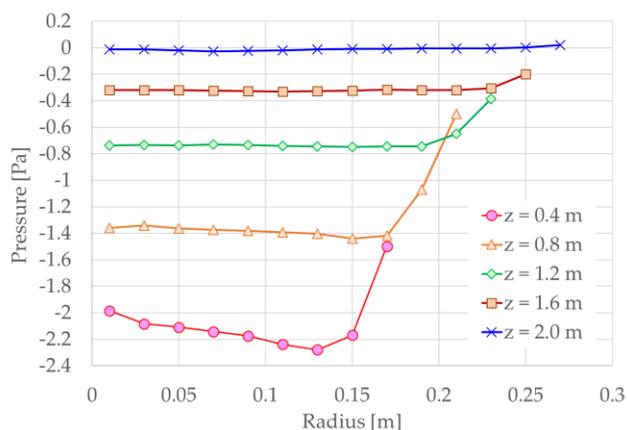


Fig. 13 Static pressure distributions in the diffuser-shaped tower.

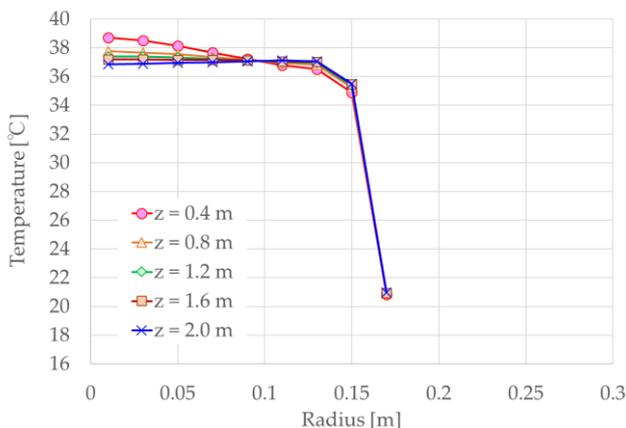


Fig. 11 Temperature distributions in the cylindrical tower.

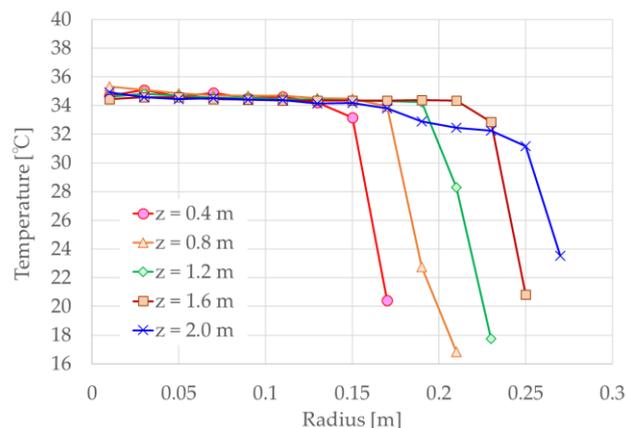


Fig. 14 Temperature distributions in the diffuser-shaped tower.

ない。一方、静圧は気流が上方に向かうほど上昇する。これは粘性の作用による圧力損失であると考えられる。ディフューザ型タワーの場合、同じく温度は鉛直方向に変化しないが、流速がタワー断面積の変化に伴って変化するため、静圧もそれに応じて変化する。そのため、Fig. 13 のみで圧力損失の大きさを見極めることはできない。そこで、Fig. 15 と Fig. 16 に両タワー内の静圧、動圧、および全圧の鉛直方向分布を示した。プロットした値は、各高さ断面における平均値である。円筒型タワーでは圧力損失  $\Delta p$  は約 1.08[Pa]であったのに対し、ディフューザ型タワーでは約 0.75[Pa]と小さい。ディフューザ型タワーでは、円筒型では発生しない拡

大損失が起こるはずであるが、開き角が小さいためにその寄与は小さく、むしろ出口流速が低下したために出口損失を低減できたと考えられる。この圧力損失の低減が、円筒形よりも大きなタワー内流量を達成できた理由であると考えられる。

## 5. まとめ

太陽光の熱エネルギーと自然風の風エネルギーを同時に利用して風力発電するウインドソーラータワーの数値解析を行い、以下の結果を得た。

➤ タワー壁面が断熱条件の場合、タワー内の鉛直方向温度分布

Wind Generates More Electricity - A Solar Updraft Tower to a Wind Solar Tower -,” *Int. J. Photoenerg.*, (submitted).

- (7) 梶島, "対流項の差分形式とその保存性," *日本機械学会論文集(B 編)*, 60 (1994), pp. 186-191.

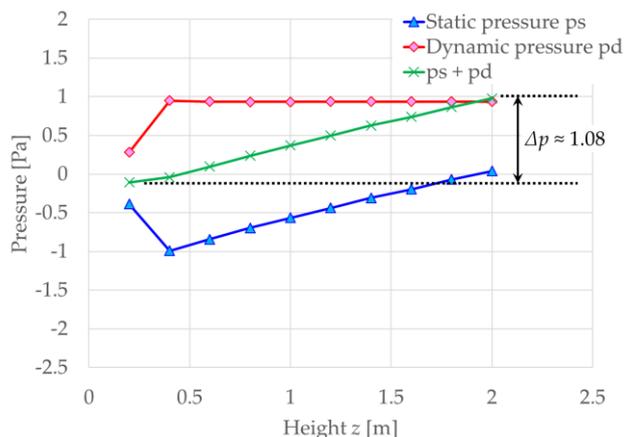


Fig. 15 Pressure distributions in the cylindrical tower.

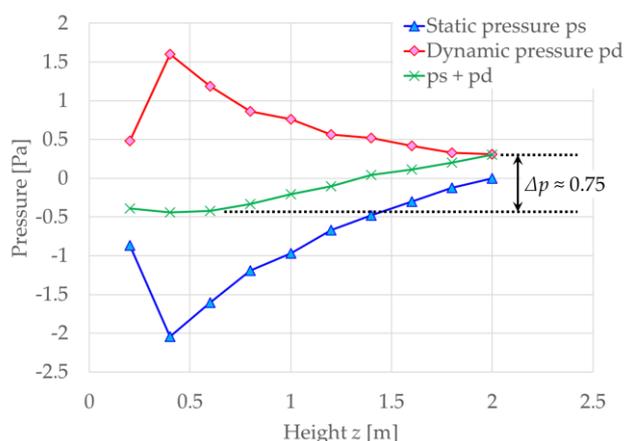


Fig. 16 Pressure distributions in the diffuser-shaped tower.

は変化しない。

- タワー内に速度変化がなくても、圧力損失によりタワー内圧力分布は変化する。
- ディフューザ型タワーを用いると、円筒型タワーと比較して圧力損失を小さく抑えることができる。結果として、同じ加熱条件下で、より大きな流量をタワー内に生み出すことができる。

#### 参考文献

- (1) Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G. and Schlaich, J., "Solar Chimneys - Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares," *Int. J. Sol. Energ.*, (1983), pp.3-20.
- (2) Haaf, W., "Solar Chimneys - Part II: Preliminary Test Results from the Manzanares Pilot Plant," *Int. J. Sol. Energ.*, (1984), pp.141-161.
- (3) Ohya, Y., Wataka, M., Watanabe, K. and Uchida, T., "Laboratory Experiment and Numerical Analysis of a New Type of Solar Tower Efficiently Generating a Thermal Updraft," *Energies*, 9 (2016), 1077.
- (4) Okada, S., Uchida, T., Karasudani, T. and Ohya, Y., "Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower," *J. Sol. Energ. Eng.*, 137 (2015), 031009-1.
- (5) Motoyama, M., Sugitani, K., Ohya, Y., Karasudani, T., Nagai, T. and Okada, S., "Improving the Power Generation Performance of a Solar Tower Using Thermal Updraft Wind," *Energ. and Power Eng.*, 6 (2014), pp.362-370.
- (6) Watanabe, K., Fukutomi, S., Ohya, Y. and Uchida, T., "An Ignored