

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24246161

研究課題名(和文) 創風および集風型のウインドソーラータワーに関する開発研究

研究課題名(英文) Development of Wind-Solar Tower Using a Diffuser Tower

研究代表者

大屋 裕二(OHYA, YUJI)

九州大学・応用力学研究所・教授

研究者番号：00150524

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：太陽光と風力を同時に利用するウインドソーラータワーと名付けた複合型発電装置を研究開発した。基部に風車を持つタワーの形状を従来の単純円筒型から4°の開き角を持つディフューザ型に変えることによってタワー内誘導風速が1.5倍以上になった。室内・風洞実験および数値計算で主な二つの発電メカニズム、熱上昇風および上空風による吸込み効果それぞれで発電効果の増加を確認した。これらの知見を野外10mタワーで検証。日照により温められた地表付近の空温とタワー上部付近の外気の温度との差とタワー内風速の間に強い関連性が認められた。また、熱上昇流が起きにくい状態で上空風の引込み効果も確認し実証サイズでの可能性を確かめた。

研究成果の概要(英文)：We have developed and studied Wind-solar tower consisting of a chimney (tower) and a collector. A wind turbine is installed at the base of the tower. The wind-solar tower can generate electricity by updraft wind due to solar insolation just above the ground in the collector, and also by wind flow near the exit of the tower creating pressure difference. A set of scaled model experiment showed remarkable power enhancement with "diffuser shaped tower" (opening angle of 4 degrees) compared to the conventional simple cylindrical tower. The power enhancement is larger than 50%. For the up scaled field test, a 10m tower model was constructed for further investigation. Newly obtained data set shows power generation produced by both updraft wind and by the effect of wind flow near the tower exit as seen in the smaller models. This is an important step toward the future field test with more practical tower size.

研究分野：風工学、流体力学、気象学

キーワード：再生可能エネルギー 太陽熱発電 風力 コージェネレーション

1. 研究開始当初の背景

ソーラーアップドラフトタワー、通称ソーラータワーまたはソーラーチムニーは太陽光によって温められた地表付近の上昇流を集め風力発電装置に誘導して発電するものである(図1)。歴史的には1400年代の終わり頃に既にレオナルド・ダ・ビンチが煙突内上昇気流のエネルギーを利用するコンセプトスケッチを残している。もちろんこれは発電を目指したのではなく、上昇流を動力に変換するものであった。その後1900年代初頭に発電施設としてのソーラータワーコンセプトが現れた。これまでのソーラータワーの発展の歴史の中で特に有名な例としてはドイツのシュライヒ等によってスペインのマンザナーレスに1980年代に建設、実験運用されたパイロットプラントが挙げられるだろう¹。これはコレクタ部の平均半径が約122m、中央にある円筒タワーの高さが195mと大型のものであるが、最大出力は50kWとそれほど大きくない。ソーラータワーはそのシンプルな構造からメンテナンスが容易である為、運転・維持費が抑えられ堅牢な発電システムであり、広大な土地があり日射さえ強ければ他のエネルギー資源に乏しい土地でも有効な発電方式として期待される。しかしその反面、その物理的大きさに対して発電量が少ない。それもあってか1980年代のマンザナーレスプロトタイプ実験以降、世界的に大規模な研究が進んでいなかった。

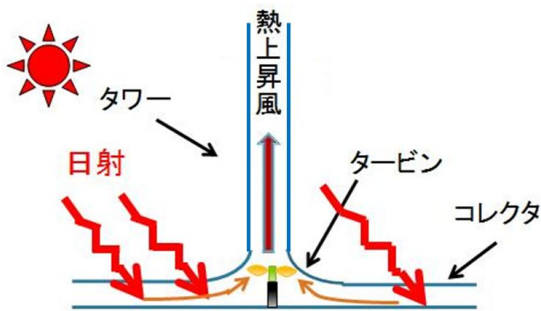


図1. ソーラータワーの仕組み

2. 研究の目的

設備体積当たりの発電量が少ないとはいえそのロバスト性は魅力である。特に太陽光以外にエネルギー資源に乏しい地域にとっては、広大な土地と豊かな日照さえあれば24時間発電可能なこのシステムは大変可能性を秘めたシステムである。本研究は、このロバストな再生可能エネルギー変換装置の可能性を追求すべく、従来の垂直円柱型タワー部の形状を流体力学的見地から改良することによりタワー内風速を加速させ発電量の増加を目指している。また、将来的にはソーラーパネルを併設して与えられた体積から最大限自然エネルギーを変換するコジェネレーションシステムも目指している。

3. 研究の方法

我々研究チームはこれまで集風シュラウドを備えた「レンズ風車」と呼ばれる新型風車の開発においてディフューザ型(風路の出口径が入り口の径より拡大している形状)構造の集風効果に着目してきた²。その知見を活かし、ソーラータワーのタワー部にディフューザ型形状を採用するアイデアを得た^{3,4,5}。従来のソーラータワーは単純な円筒形状のタワーを有している。卓上サイズのモデルと数値計算によってディフューザ型が有効なことを突き止めた。それをもとに高さ2mのモデルを製作して試験を行った。

(1) 我々はタワー下部の径に比べ上部の径を広げ、ディフューザ形状とすることによってタワー内に圧力勾配を生じさせる改良を行った⁶。この形状ではタワー内の流れが上昇するにしたがって圧力回復が起こる。これによってタワー下部をさらに低圧にすることができコレクタ部の空気を誘引する効果を高めて発電量を上昇させることができる。図2にタワー形状の比較を示す。



図2. (a)円筒型 (b) ディフューザ型

図2、3に示すようにタワーは透明なアクリル板で製作され円筒型は直径320mm、コレクタ部上面からタワー出口先端までが2000mmである。ディフューザ型は同じ直径の下部から上方出口に向かって側面が鉛直方向から4°開く形状である(片側が4°であるため総開き角は8°)。コレクタ部は正方形で一辺が3000mm、ヒーター板を敷き詰めた底面と透明なアクリル天板のギャップが200mmである。底面のヒーター板が日射によって温まった地面を模擬している。タワー下部には小型風車が設置してあり発電量を計測する。実験は無風状態の室内で行われるためコレクタ部床面付近の気温とタワー出口の気温の差が支配的な上昇流発生メカニズムである。

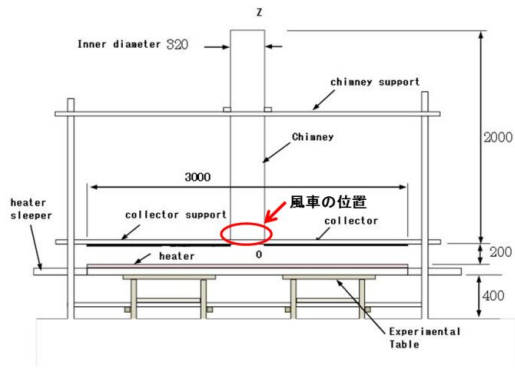


図3. ソーラータワー室内実験装置の概略図

(2) 次にタワー出口の気流による吸込み効果を測定する実験の概要を示す。この実験では応用力学研究所の大型風洞を使った気流による吸込み効果を測定した。前章のタワーを使ってタワー上部を風洞の流路内に突出し、下部は風洞下外側に引き出して外部の風の流れない状態にした。タワー上部に風が吹くと出口周りの気圧がさがる。タワーの縁にあたって渦を形成する気流がさらに気圧降下に寄与しタワー下部の圧力との差が発生する。この圧力差がタワー内に上昇気流を発生させる。これをここではタワー出口周辺の風の流れによる吸込み効果と呼んでいる。この実験では風車をタワー内に設置しない状態でのタワー内風速のみを計測した。設置の様子を図4、5、6に示す。風洞による近寄り風速を1m/sから9m/sまで変化させタワー内の空気の流速を計り、円筒型とディフューザ型でどのような差が出るか実験を行った。風洞内の気温と風洞外側の温度はほぼ同じで温度差による上昇流は発生しにくく、タワー内流れの発生は吸込み効果が支配的なメカニズムであるといえる。

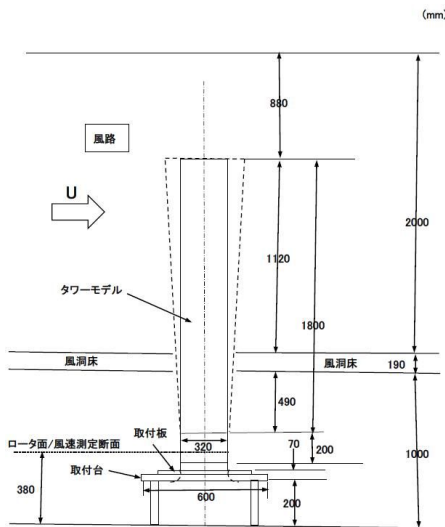


図4. 吸込み効果実験の為風洞に設置したタワーの概略図

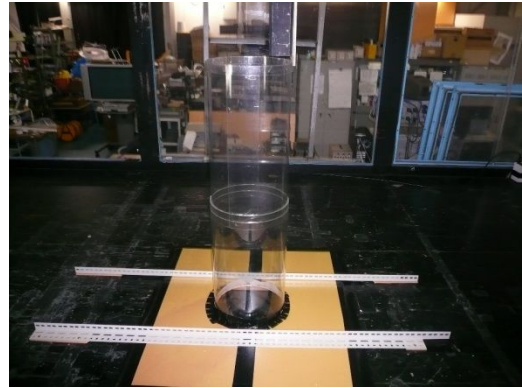


図5. 風洞内に露出させたタワー上部



図6. 風洞下部外側にタワー下端部が出ている

またこの実験では筒の出口付近に渦の生成による低圧発生装置、「渦生成板」(図7)を設置して吸込み風速が変化する割合を調べた。これは板によって出口付近の上空風が剥離・渦形成をすることによって出口付近の気圧を下げてタワー内風速を増速させるアイデアである。

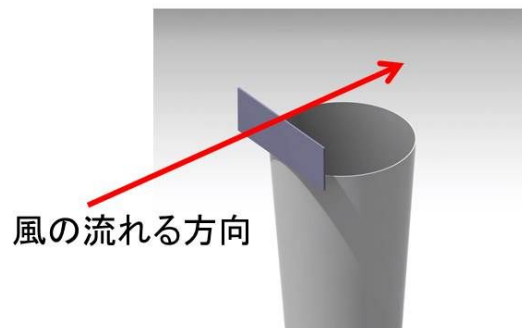


図7. 長方形の単純な渦生成板の例

(3) 上記の実験の結果を踏まえて我々は応用力学研究所の敷地内に図8に示した屋外試験タワーを2014年12月末に建設した。これ

はタワー高さ 10m、コレクタ部の一辺の長さが 15m の規模である。タワー形状はディフューザ型とし、開き角も両側それぞれ 4° で室内実験のものと同形状とした。コレクタ部上部とタワー側面にはビニールシートを隙間なく張り、圧力が反対側に抜けないようにした。地面はアスファルトを粉砕したクラッシュランを敷き詰め日射による集熱効果をも高めるよう工夫してある。コレクタ部の側面にはシートを張り一部を開放とした。これは暖められた空気のコレクタ部から外部への拡散を防止している。



図 8. 九州大学のソーラータワー野外試験モデル

4. 研究成果

(1) タワー形状改良による室内実験結果を示す。温度差とタワー内風速の関係は円筒タワーに比べてディフューザタワーのほうが 1.5 倍以上高い結果となり、それに伴う風車発電量はディフューザ形状で円筒タワーの 3~5 倍となった(図 9、10)。風車の出力はロータにあたる風速の 3 乗に比例するためこれは妥当な結果といえる。このようにタワーをディフューザ型にすることによって上昇流の速度を増加させその結果風車の出力が大幅にアップできることが示された。またこの実験の結果を以前に行った卓上スケールの実験(寸法比 1/5)結果と比較して、同じ温度差に対してのタワー内流速が $U \propto (L/l)$ のスケール則を持つことが分かった。ここで U は風速、 L は対象のスケール、そして l は既知の実験のスケールである。言い換えると実験スケールを n 倍すると、同じ温度差では管内風速が元の実験での値の n 倍になるということである。

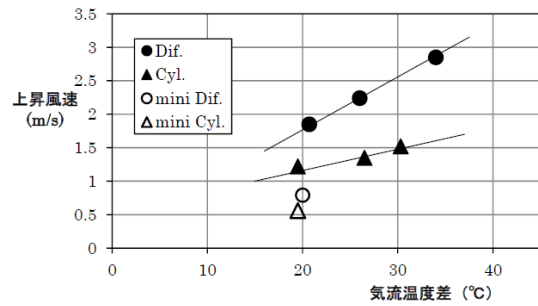
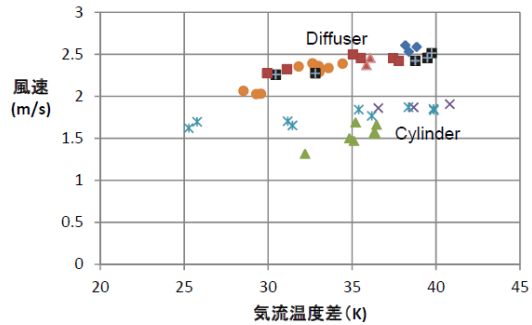
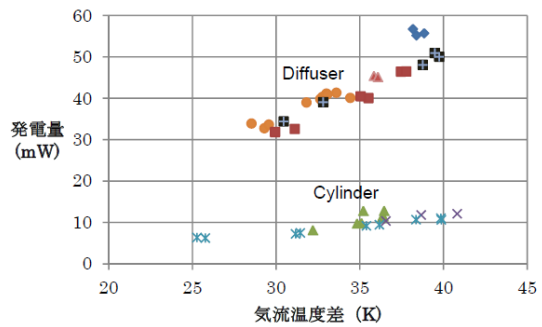


図 9. 円筒タワーとディフューザタワーの温度差に対するタワー内風速の比較(風車なし)

(2) 吸込み効果に関する風洞実験の結果を示す。図 11 に円筒タワーとディフューザタワーの風洞内風速とタワー内風速との関係を示す。明らかにディフューザ型のタワー内流速が高い。風洞内風速 9m/s ではその比



a) 風車後流の風速



b) 風車の発電量

図 10. 円筒タワーとディフューザタワーの温度差に対するタワー内風速と発電量の比較(風車あり)

率は 2.1 倍となった。これは発電量にすると約 9 倍に相当する。実際にはタワー内に抵抗物となる風車を設置するのでこの値より若干小さくなる。このように上空風速による吸込み効果でも円筒タワーに比べ、ディフューザ型のタワーで大きなタワー内流速増加が見られた。さらにこの実験ではタワー出口に風洞の風の剥離と渦形成を利用して低圧を発生させる実験も行ったが、単純な長方形渦生成板をタワー出口の風上側に設置することにより管内風速を円筒型では 80%、ディ

フューザ型では 40% 程増加させることが分かった (図 12)。これは風洞内近寄り流れよりタワー管内流れのほうが大きな流速となっている。

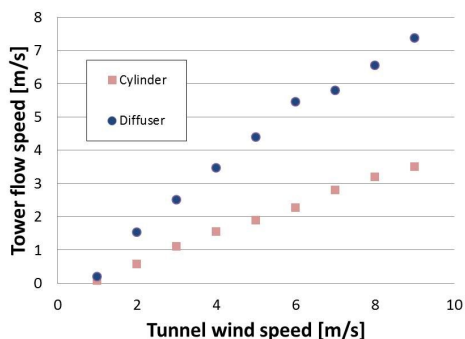


図 11. タワー形状の違いによる吸込み効果の差

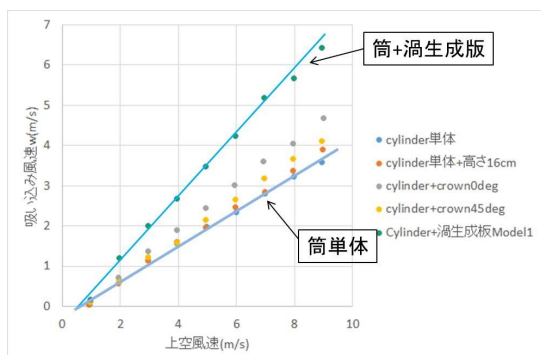


図 12. 単純渦生成板による吸込み効果の違い

(3) 10m モデル屋外実験の結果を示す。屋外の設置であるため日射による温度差と上空風の吸込み効果を明確に分けて効果を測定するのは困難であるが、比較的無風で日射の強い時間のデータと、夜間で日射がなく、かつ比較的風速が高い時間のデータを検証することによってそれぞれ効果が出ているか検証は可能である。現在 (2015 年 5 月) まだ運転を開始して間もないためデータが少なく定性的な評価であるが結果を示す。

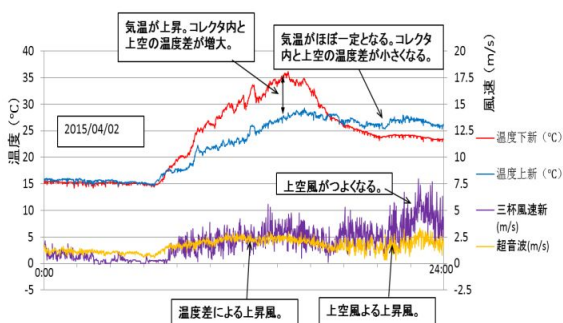


図 13. ソーラータワー時系列データの例

図 13 に示す通り、風速が低い時間のデータで日射に伴って生じた温度差と上昇流速度

に相関関係が見て取れる。一方、夕方から夜間の温度差がほとんどない時間のデータからは上空風速と上昇流速度に強い相関関係が表れている。

ソーラータワーのタワー形状を従来の単純な円筒形状からディフューザ形状にすることによってタワー内の上昇流速度を増加させる試みを室内実験で行った。ソーラータワーの上昇流発生メカニズムの主な二つである温度差による上昇流、および上空風による吸込み効果による上昇流がともに増加することが確かめられた。これはソーラータワーの実用化に重要な体積当たりの発電量を増加させる有効な手段として期待できる。また単純な形状の渦生成板でもタワー内の風速をさらに高められることが分かった。室内実験をスケールアップした屋外試験のデータから二つのメカニズムがそれぞれ有効に作用している様子がわかってきた。今後データをさらに蓄え大型のソーラータワープラントでも同様に有効であるかを検証してゆく。

< 引用文献 >

Jörg Schlaich, Rudolf Bergemann, Wolfgang Schiel and Gerhard Weinrebe, Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems — Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation, J. Sol. Energy Eng. 127(1), 117-124 (Feb 07 2005)

Y. Ohya and T. Karasudani, A Shrouded Wind Turbine Generating High Output Power with Wind-lens Technology. Energies, 3, 634-649, 2010
Okada, S., Ohya, Y., Uchida, T. and Karasudani, T., Wind Convergence Performance Evaluation of VT-WCONVS. Proceedings of 19th Wind Engineering Symposium, Tokyo, 29 November 2006, 145-150, 2006 (in Japanese)

Okada, S., Ohya, Y., Uchida, T. and Karasudani, T., Convergence of Wind Using VT-WCONVS (Vertical Type Wind Convergence Structure). Proceedings of Renewable Energy, Yokohama, 2006

Shinsuke Okada, Takanori Uchida, Takashi Karasudani and Yuji Ohya, Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower, J. Sol. Energy Eng., 137(3), 031009 (Jun 01, 2015)

Masataka Motoyama, Kenichiro Sugitani, Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Tomoyuki Nagai, Shinsuke Okada, Improving the Power Generation Performance of a

Solar Tower Using Thermal Updraft Wind, Energy and Power Engineering, 6, 362-370, 2014

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 13 件)

Shinsuke Okada, Yuji Ohya, Takanori Uchida, Takashi Karasudani, Improvement in Solar Chimney Power Generation by Using a Diffuser Tower, Journal of Solar Energy Engineering, 査読有, Issue 3, Volume 137, 2015, 362-370

DOI: 10.4236/epe.2014.611031

Shinsuke Okada, Yuji Ohya, Takanori Uchida, Takashi Karasudani, Wind Generation and Convergence using Diffuser Type Tower Applied to Solar Chimney Type Structure, ASME Solar Energy, 査読有, Vol. 137(3), 2015

本山雅孝、杉谷賢一郎、大屋裕二、烏谷隆、長井知幸、岡田臣右、熱上昇風を利用するソーラータワーの発電力の改良、第 23 回風工学シンポジウム論文集、査読有、23 巻、2014 年、109-114

Masataka Motoyama, Kenichiro Sugitani, Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Tomoyuki Nagai, Shinsuke Okada, Improving the Power Generation Performance of a Solar Tower Using Thermal Updraft Wind, Open Journal of Energy and Power Engineering, 査読有, Vol. 6, 2014, 362-370

DOI: 10.4236/epe.2014.611031

Masataka Motoyama, Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Tomoyuki Nagai, Shinsuke Okada, Improving the Power Generation on Solar Tower by Thermal Updraft Wind, Grand Renewable Energy 2014 Proceedings, 査読有, NO.O-Th-2-3, 2014, 1-4
DOI: 10.4236/epe.2014.611031

Yuji Ohya, Takanori Uchida, Tomoyuki Nagai, Near Wake of a Horizontal Circular Cylinder in Stably Stratified Flows, Open Journal of Fluid Dynamics, 査読有, Vol. 3, 2013, pp. 311-320

[学会発表](計 7 件)

福富翔、大屋裕二、烏谷隆、内田孝紀、杉谷賢一郎、ソーラータワーにおける上

空風吸込みに関する研究、日本航空宇宙学会西部支部講演会、2014 年 11 月 28 日、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)

Sho Fukutomi, Yuji Ohya, Takashi Karasudani, Takanori Uchida, Kenichiro Sugitani, Augmentation of Wind Speed by Utilizing the Wind over Solar Tower, 8th International Symposium on the East Asian Environment Problems, 2014 年 12 月 09 日、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)

大屋 裕二、風レンズ技術を用いた再生可能エネルギーの高効率利用 浮島式洋上エネルギーファームとウインドソーラータワー、日本機械学会 第 91 期流体工学部門講演会(招待講演) 2013 年 11 月 10 日、九州大学伊都キャンパス総合学習プラザ 大講義室(福岡県福岡市)

本山 雅孝、ウインドソーラータワーにおける発電性能の研究、日本航空宇宙学会西部支部、2012 年 11 月 01 日、九州大学西新プラザ(福岡県福岡市)

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
該当なし

[その他]
ホームページ等
「風レンズ」と「レンズ風車」を開発した【九州大学 応用力学研究所 新エネルギー力学部門 風工学分野】
<http://www.riam.kyushu-u.ac.jp/windeng/index.php>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

大屋 裕二 (OHYA, Yuji)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号：00150524