

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630465

研究課題名(和文) 持続可能な太陽光エネルギーによる人工空気流の誘起法に関する研究

研究課題名(英文) Study on heated air flow for solar updraft power generation

研究代表者

杉浦 邦征 (SUGIURA, KUNITOMO)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70216307

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、風力発電に着目し、中でもソーラーアップドラフトタワー、もしくはソーラーチムニー(以下、SUPG)と呼ばれる膜の下で暖めた空気を煙突に導いて上昇気流を起こし、煙突内部の風力発電機を回すなど、太陽熱(もしくは気象状態差によって能動的に空気流を起こす)と風力のハイブリッド型発電について検証し、地上に存在する気象条件を活用し、『安定的な風力発電実現のための人工空気流の誘起法』に関する調査を行った。さらに、発電効率を考えると巨大な施設を構築する必要があり、空気流を誘導する煙突構造の実現性、ならびに洋上での構築に関する調査を行った。

研究成果の概要(英文)：The Manzanares prototype for Solar Updraft Power Plant(abbr. SUPG) is examined by scaled model test in the laboratory as well as outside. A theoretical model for calculating the steady inviscid airflow subjected to solar radiation at the collector of a solar updraft power plant is developed, and the numerical simulation method as incompressible fluid flow is also assessed. A comparison of simulation results is satisfactory; however, it is concluded that the further refinement is necessary.

The structural assessment on 1000m height tower for 200MW class SUPG in marine environment is assessed. It is feasible by steel shell structures, but the weight can not be reduced compared by that of concrete shell structures. However, steel truss structures can contribute to reduce the total weight drastically. Furthermore, it is understood that the dynamic response by wave faces might be relatively small because of its huge weight.

研究分野：鋼・複合構造

キーワード：ソーラーアップドラフト発電 空気流 空気誘導構造

## 1. 研究開始当初の背景

人類の経済や生活は、化石エネルギーに依存しており、化石燃料は何億年もかかってつくられた有限の資源であり、あと数十年で枯渇すると言われている。しかし年々消費が増加し、途上国も経済拡大をめざし、枯渇がさらに早まることは確実である。このような中、地球環境に配慮して、再生可能エネルギーの開発が積極的に行われている。太陽光、太陽熱、水力、風力、地熱、波力、温度差、バイオマスなどが挙げられる。

このような選択肢の中で、風任せである現行の風力発電を、ソーラーアップドラフトタワー、もしくはソーラーチムニーと呼ばれる膜の下で暖めた空気を煙突に導いて上昇気流を起こし、煙突内部の風力発電機を回すような、太陽熱を利用して能動的に空気流を生じさせ、それによって風力発電を行うハイブリッド型発電が期待されている。特に、気象学的に、気圧差、気温差などを主要因として風が生じることを考え、現存する各種気象条件を活用することで、積極的な人口空気流を発生させる技術の開発が望まれている。

そこで、地球上の気象状態を具体的に調査し、地表環境・海洋環境と比較し、気圧差・気温差で誘起させることができる人工的な空気流について考察する必要がある。その一例として、ソーラーチムニーの基本概念であるコレクター部の空気を太陽光で熱することで、人工的に上昇気流を発生させる方法と比較し、気象条件もしくは太陽熱により能動的に風を起こし、それによって発電する技術を検証しようとするものである。

## 2. 研究の目的

世界風力エネルギー協会によると、2011年に世界全体で新たに導入された風力発電の設備容量は4100万kW(前年比約21%増加)で、そのうち、2010年にアメリカやドイツを抜いてトップに立った中国が約44%(1800万kW)を占めている。世界第2位のアメリカの割合は約17%(約680万kW)であり、国土の広い国での普及が急速に進んでいる。一方で、低周波振動、野鳥の衝突などの問題が認識され、自然との共生の観点から疑問視されるところが多い。特に、我が国では、年間平均風速5.0m/s以上の風が吹く地域は限定され、電力を必要としている大都市からは遠く離れていることが多く、送電網などの整備も課題として挙げられる。

そこで、本研究では、再生可能エネルギーに着目し、図1に示すようなソーラーアップドラフトタワー、もしくはソーラーチムニー(以下、SUPG)と呼ばれる膜の下で暖めた空気を煙突に導いて上昇気流を起こし、煙突内部の風力発電機を回すなど、太陽熱(もしくは気象状態差によって能動的に空気流を起こす)と風力のハイブリッド型発電について

検証し、地上に存在する気象条件を活用し、『安定的な空気流による発電実現のための人工空気流の誘起法』に関する調査を行った。さらに、人工的空気流による発電効率を考えると巨大な施設を構築する必要があり、空気流を誘導するコレクター部の実現性、ならびに洋上での煙突構造の構築に関する調査を行った。

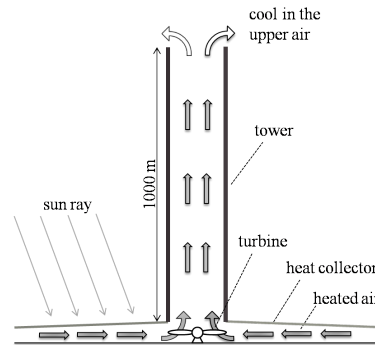


図1: ソーラーアップドラフトタワーの概要

## 3. 研究の方法

まず、図2に示す1980年代初頭にスペインで試験的に建設された高さ195メートルのタワーと4万平方メートルを超える集光面積を持ち、最大50kW程程の出力を得たManzanares計画(8年間発電を行い、1989年に閉鎖された)で用いられたSUPGプロトタイプを参考にして、室内ならびに室外での模型実験を行った。煙突直径とコレクター高さを設計変数として模型を作製し、日射量、外気温、プレートとコレクターの表面温度、コレクター内気流温度、コレクター基部の上昇流速などを計測対象とした。また、SUPGは、太陽光(熱)によってもたらされる熱エネルギーを空気流の運動エネルギーに変換するシステムと考えることができるため、SUPG内の熱流動の簡単な数理モデルを構築し、その解析値と実験値と比べることで数理モデルとの整合性を考察した。



図2: Manzanaresにおける試験プラント

[Jörg Schlaich, Rufolf Bergemann, Wolfgang Schiel, Gerhard Weinreb: Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems, Journal of Solar Energy Engineering, Vol.127, pp.117-124, 2005.2.]

なお、図3のSUPGの熱計算モデルに基づきその熱変換効率は、周辺大気と内部空気の熱力学的相互作用に依存するため、流路形状および温度分布を工夫することでSUPGの発電効率を向上させることが期待できると考え、SUPGの煙突内外の流速分布を、圧縮性流体の数値計算によって求めることで、現象の解明を進めた。しかし、数値流体力学におけるひとつの課題は、移流項および圧力項に起因する計算不安定性であるので、これらの解決策を検証した。

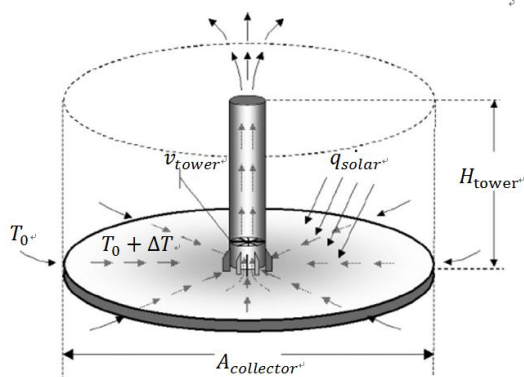


図3：SUPGにおける熱計算モデル

一方、200MW程度のSUPGの出力を得るには、熱収集部の直径は7000mにも及び、その発電効率を上げるためには、高さ1000mに及ぶ巨大な煙突を構築する必要があり、我が国における制約条件（土地利用、地震・台風などの外力環境）から、図4に示すようなSUPGの洋上構築の可能性を構造学的観点から検討した。

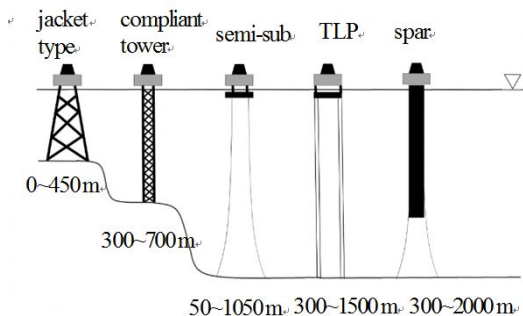


図4：洋上構築における浮体構造の選択肢

#### 4. 研究成果

模型実験では、タワー下部すなわちタービン設置部の風速が最大となるコレクター形状を探索し、SUPGを建設する際の最適な形状（コレクター高さが、中央の煙突部に向けて低くなる構造が望ましい）を特定することができた。また、簡単な数理モデルによる解析では、コレクターの形状やコレクター外周部から流出する熱を考慮することで、温度、風速の時間的な変動傾向を概ね予測することができたが、室外実験では絶対量としての風速などが予測において隔たりがあり、今後の

数理モデル改良が求められる。

一方、圧縮性流体としての数値解法においては、圧力に関する仮定がUPGの効率計算に及ぼす影響を検討するため、圧力を静圧とおく数値計算コードを作成した。得られた結果より、本手法により流速の計算が安定して行えることが分かった。これは、Stokes Conditionを仮定しないことで、数値解の不安定化を防ぐことができたためによる。ただし、得られた流速分布が連続の式を満たさないことから、図5に示すようにタワー中心部で速い流速が生じているものの、周辺大気ではほとんど流速が生じず、タワーに沿って下向きの流れを生じ、再びコレクター入り口へと流れこんでいく様子が確認できる。タワー上部のモデル上縁部に下向きの流れが生じており、流速計算の結果に悪影響を与えている可能性があり、計算結果の精度はそれほど高くなく、本手法の適用性と圧力の定義方法については、今後の課題である。

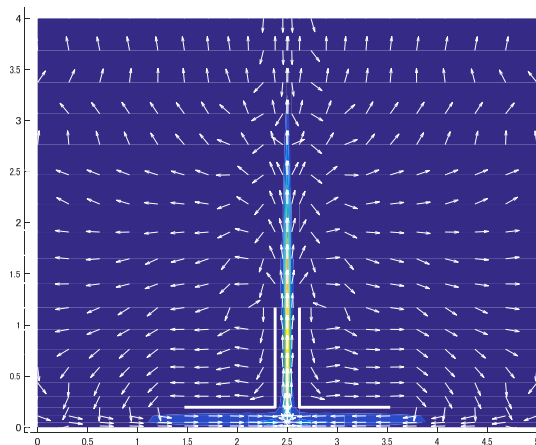


図5：流速分布の計算結果の一例

200MW級SUPGの主要構造としてSchlaichらによる高さ1000mのコンクリート製円筒タワー（総重量は、約53万トン）の試設計を参考に、鋼製シェルおよび鋼製トラスの二つの構造形式による円筒タワーの概略設計を行い、洋上でこのような大型鋼製タワーを支持することができる浮体基礎構造について検証し、二つの浮体式SUPGの構造実現性を検討した結果、1)瞬間最大風速40(m/秒)時の鋼製タワーの限界傾斜角を5度もしくは10度と仮定し、風荷重ならびに死荷重による鋼製タワー基部、および浮体基礎構造の円筒シェルの座屈破壊を限界状態として設定し、既存の検討結果（コンクリート製円筒では53万トン）と比較して、鋼製シェル構造によるタワー構造では、約55万トンと重量の低減は見込めないが、鋼製トラス構造を採用することでタワー構造の総重量は、約12万トンに抑えることができた。2)鋼製タワーを支持する浮体基礎構造としては、タワーと同じ直径の円筒浮体を想定すると没水部高さが約440mとなるが、直径250mの円筒浮体を採用することで、没水部高さを約

87m 程度に抑えることができることが分かった(図6を参照)。いずれの場合においても、浮体基礎構造には、タワーの重量の約10~20倍の質量が必要であることが分かった。なお、タワーの最大傾斜5度の状態を想定した静的応力解析では、浮体空洞部と浮体おもり部との接合位置において、それぞれ164MPa、228MPa程度の応力発生を得た。

また、総質量500万トンとなる浮体式SUPGの動揺特性は、その大質量により1次の横揺れ振動モードが支配的であり、その固有周波数は0.001(Hz)程度と小さく、動的な応答量は非常に小さいことが分かった。しかし、風や波浪のパワースペクトル特性を考えると、振動数0.001(Hz)および0.2(Hz)近傍で共振により動的応答量が漸増する可能性があり、共振時においても造波減衰等による動的応答の低減効果を精査する必要がある。これらを検証することが今後の課題である。特に、浮体基礎構造はタワーの質量の10倍の巨大構造であり、必要な浮力を確保しつつ、安定性に寄与する復原力を確保できる合理的な浮体構造形式を検討する必要がある。

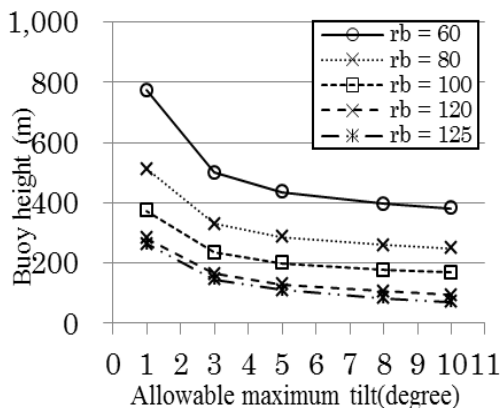


図6：傾斜角と没水部の高さの関係

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Hafizh, H. and Shirato, H.: Aerothermal simulation and power potential of a solar updraft power plant, J. of Structural Engineering, JSCE, Vol.61A, pp.388-399, 2015.

〔学会発表〕(計 5 件)

湯井大貴, Hadyan Hafizh, 白土博通: ソーラーアップドラフト発電の効率化に関する研究, 平成 27 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-49, 2015.

Sato, H., Suzuki, Y. and Sugiura, K.: FEASIBILITY STUDY ON OFFSHORE SOLAR UPDRAFT TOWER POWER PLANT, Proc. of 5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering,

pp.3412-3418, 2015.

山崎健登, 湯井大貴, Hadyan Hafizh, 白土博通: 日射による上昇流発生に関する実験的研究, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, I-28, 2016.

高橋悠太, 山本亨輔: 静圧を用いた SUPG システムと周辺大気の力学的相互作用の基礎的検討, 第 19 回応用力学シンポジウム, 札幌, 2016.

高橋悠太, 山本亨輔: SUPG システムと周辺大気の力学的相互作用に関する基礎的検討, 第 43 回土木学会関東支部技術研究発表会, I-49, 2016.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

研究室 HP での研究概要など

<http://strmech.kuciv.kyoto-u.ac.jp/temp/1.home.htm>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

杉浦 邦征 (SUGIURA, Kunitomo)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70216307

### (2) 研究分担者

白土 博通 (SHIRATO, Hiromichi)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 70150323

八木 知己 (YAGI, Tomomi)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 30293905

金 哲佑 (KIM, Chul-woo)  
京都大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 80379484

橋本 国太郎 (HASHIMOTO, Kunitaro)  
神戸大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号: 40467452

山本 亨輔 (YAMAMOTO, Kyosuke)  
筑波大学・大学院システム情報工学研究科・助教  
研究者番号: 80635392

### (3) 連携研究者

無し