

平成 30 年 8 月 31 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14299

研究課題名(和文)ソーラーアップドラフト発電施設における超高層煙突構造および洋上構築法に関する研究

研究課題名(英文)Structural Design of High-Rise Chimney of Floating Solar Updraft Power Generator

研究代表者

杉浦 邦征(SUGIURA, KUNITOMO)

京都大学・地球環境学堂・教授

研究者番号：70216307

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文):本調査研究では、はじめに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状の煙突構造体の概略設計を行った。次に、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。ここでは、二つの構造形式に対して、限界傾斜角を仮定し、自重ならびに風荷重による構造体の応力解析を実施し、その安全性を検証した。

研究成果の概要(英文):In this study, referring to the main structure of RC tower with height of 1000m designed by Schlaich for 200MW class Solar Updraft Power Generator, whose weight is about 530,000ton, the chimney structures by Steel Shell and Steel Truss are considered and their feasibility was assessed. In addition, the floating structure which supports the 1000m chimney structure is also discussed from viewpoint of stress response and inclined angle due to wind and wave forces for the safe operation.

研究分野：複合構造

キーワード：鋼構造 煙突構造 浮体構造 風荷重 波浪動揺

1. 研究開始当初の背景

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4,100万kW(前年比約21%増加)で、特に、国土の広いアメリカや中国など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。また、年間平均風速5.0m/s以上の風が吹く地域が限定されている我が国では、風力発電による安定的な電力供給が課題として挙げられる。

これに対し、ソーラーアップドラフト発電(以降、SUPGと呼ぶ)では、コレクターと呼ばれる膜構造の温室で太陽熱により暖めた空気をソーラーアップドラフトタワー、もしくはソーラーchimニーと呼ばれる煙突に導いて上昇気流を誘起させ、煙突内部の風力発電機を回すことで発電するものであり、1980年代にスペインのマンサナーレスで実施された検証実験では、煙突直径10m、煙突高さ194.6m、コレクター直径244mで、最大出力約50kW程度であれば発電が可能であることが確認されている。更に、申請者らは、これまでに発電の効率化を目指した検討(科研・研究種目:挑戦的萌芽研究,研究課題番号:26630465,研究課題名: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)を行っており、コレクター部の形状を最適化するとともに、高さ1,000m、直径120mの煙突を構築できれば、最大出力約200,000kWの発電が可能であることが示唆された(図1参照)。

地震が多発する我が国において、限られた国土にこのような超高層の煙突を建設するためには、洋上で浮体構造物として構築することが望ましいが、洋上に1,000m級の超高層構造物が構築された例はこれまでにない。

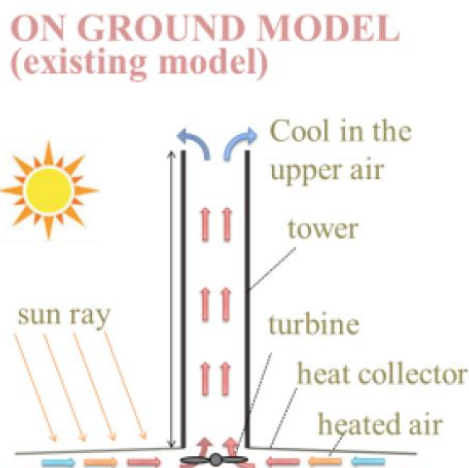


図1:ソーラーアップドラフトタワーの概要

2. 研究の目的

人類の経済や生活は、化石エネルギーに依存しているが、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。一方で、その消費量は年々増加し、途上国も経済拡大をめざし、化石燃料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、太陽光、太陽熱、水力、風力、地熱、波力、温度差、バイオマスなどの再生可能エネルギーの開発が積極的に行われている。特に、ソーラーアップドラフト発電は、コレクターと呼ばれる膜構造の温室で暖めた空気をソーラーアップドラフトタワー、もしくはソーラーchimニーと呼ばれる煙突に導いて上昇気流を誘起させ、煙突内部の風力発電機を回すことで安定的な発電を実現し得る発電方法であり、その実現が期待されている。

本調査研究では、そのようなソーラーアップドラフト発電施設の実現に向けて、高さ1000mの超高層煙突構造物の構造形式ならびにその構造安全性、さらにはこのような巨大構造物の洋上での構築法(図2参照)について検討を行った。

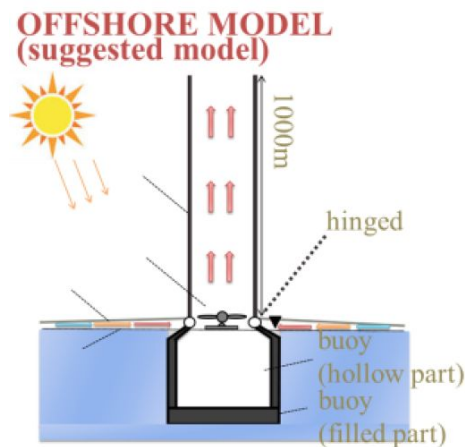


図2:洋上の煙突構造例

3. 研究の方法

これまでに建設されたことのない高さ1,000m級の超高層煙突構造物を洋上で構築するための技術的課題を解決することを目指し、まず、現行の煙突構造設計基準を用いて、地上に突出する対象構造部位の試設計を行う。そして試設計した数パターンの超高層煙突を対象とした有限要素解析を通じて、耐力特性および構造安定性について検討するとともに、超高層での風況状況に応じて、塔状構造物の耐風安定性について検討した。

さらに、これらの静的力学に関する検討結果を踏まえ、超高層煙突構造物と浮体による支持形式について検討するとともに、提案する洋上超高層煙突構造物の波浪による動揺特性について検討した。

平成28年の初年度は、既存の研究成果として従来の建設材料である鋼およびコンクリートを使用した高さ1,000m級の煙突構造物を中心として、現行の設計基準等を参考にした円筒状の構造体の試設計案の作成を行った。また、煙突構造の軽量化のために鋼管構造を用いたトラス構造を採用し、重量低減

効果についても同様の試設計により検討を行った。これらをまとめて、本研究で対象とする超高層煙突構造物の実現可能性について検討した。

平成 29 年度では、船舶に対する安定計算を参考として、煙突構造物・浮体構造物の一体構造物を対象に、波浪による耐転覆安定性について検討するとともに、数値シミュレーションにより、超高層浮体構造物の耐風安定性について検討した。さらに、現存する海洋構造物の構築方法を参考に、超高層煙突構造物を洋上で構築するための方法を検討した。

4. 研究成果

既存の SUPG 用の 1000m 煙突構造体を図 3 に示す。この煙突構造体は、RC 構造で構成され、200MW の出力を得るため、煙突高さ 1000m、煙突半径 120m として設計されている [1]。本調査研究では、鋼製シェルタワーおよび、鋼製トラスタワーの設計を行った。なお断面算定のために、シェルタワーに関しては煙突構造設計指針 [2] を、鋼製トラスタワーに関しては座屈設計ガイドライン [3] を参照した。

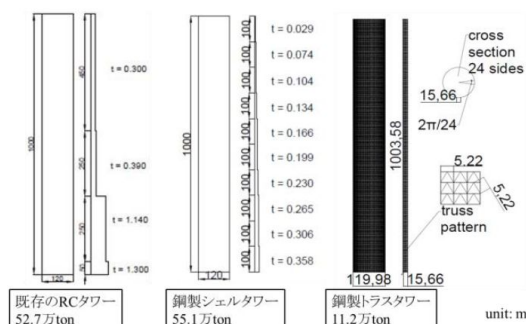


図 3 高さ 1000m の煙突構造の試設計例

ここで、図 3 に中央に示すモデルは、鋼製のシェル構造での試設計結果である。また、図 3 に右に示すモデルは、鋼製トラス構造での試設計結果である。

1000m の塔状構造物に対して、風荷重による最大許容傾斜角を 10 度と仮定することで、シェル構造による煙突構造体の質量が 52.7 万 ton となった。一方、鋼製トラスで構成され煙突構造体では、重量が低減するため、最大許容傾斜角は 5 度と小さくなるものの、煙突構造体の質量が 11.2 万 ton と大幅に低減できることが分かった。

それぞれ試設計では、製作例のない断面や構造となっているが、既存の高さ 1000m の RC 煙突構造体の設計例では、質量が 52.7 万 ton であること、現存する 828m と世界一高い超高層ビル「ブルジハリファ（骨組構造）」の総質量が 50 万 ton であることを考慮すると、少なくとも鋼製シェルのモデルは質量の観点からは、概ね正しいと考えられる。

浮体形状は単純円筒であるとし、1000m のタワーを支えるためにこれを浮体空洞部及

び、浮体のおもり部に分けている。また限界状態として瞬間最大風速 40m/s を想定する。浮体空洞部の高さ h_b 、浮体重り部の高さ h_w を未知変数と置いたとき、一つ目の条件として浮体の重力に対する浮力のつり合い式、二つ目の条件として、風のした仕事に対する浮力のした仕事によるつりあい式の二つの条件を解くことにより浮体の大きさが求められる。これを式(1)に示す。ただし W_{wind} を風のした仕事、 W_{buoy} を浮体のした仕事、 M_{total} をシステム全体の重量、 ρ_w を水の密度、 V を没水部の体積とする。これは、図 4 に示すように重心位置 G が回転中心：メタセンター M より下に位置する必要があることを意味する。ここでは、浮体半径を 60~125m、最大傾斜角を 1~10°まで変化させ、式(1)の計算を反復解法した。

$$\begin{cases} W_{wind} - W_{buoy} = 0 \\ M_{total} \times g - \rho_w V \times g = 0 \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $GM > 0$

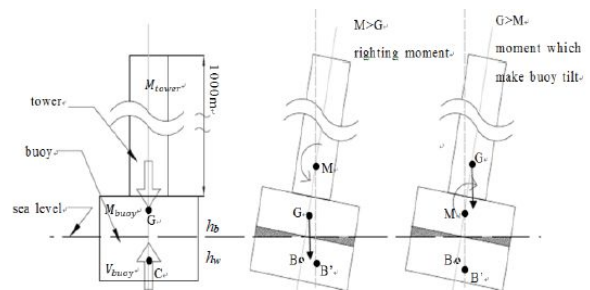


図 4 浮体構造の安定性評価

計算の結果、浮体の諸元について以下の関係性が得られた。

- 1) 浮体半径が増加するとき浮体高さは減少する。
 - 2) 浮体半径と浮体の質量の関係は重心位置 G と浮心位置 B の関係性から決まる。 G と B が一致するとき極大となる。
 - 3) 浮体高さと浮体質量は正の相関を持つ。
- 以上の結果を踏まえ、浮体構造モデルを二つ選定した：浮体半径とタワー半径が一致するモデル、計算結果の範囲内で最も軽いモデルを選定した。これらを図 5 に示す。

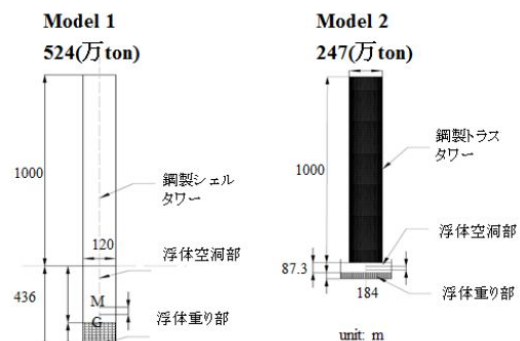
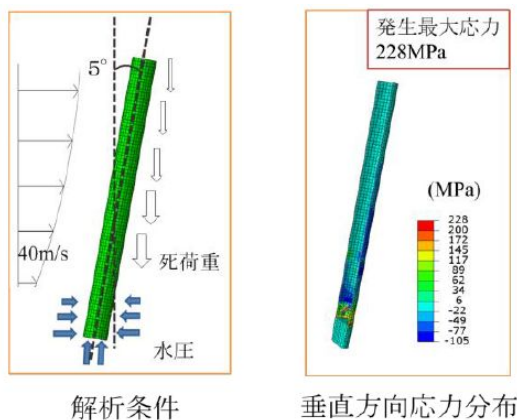


図 5 選定した浮体構造例

ここでは洋上の波や風を想定して図5の試設計モデルを対象に、4ケースの解析を行った。最初に行った解析では、浮体が瞬間最大風速40m/sの風を受けて傾斜したときの応力分布を計算した、これを図6に示す。これよりモデル1およびモデル2において発生最大応力が参考文献[1]および参考文献[2]の許容耐力を超過しないことが分かった。

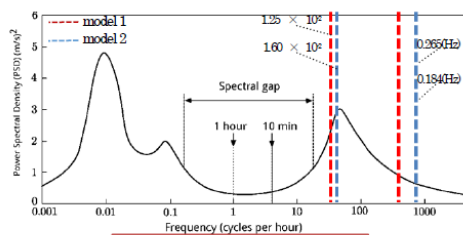
次に、固有振動解析を行った。その結果、モデル1およびモデル2のそれぞれ1次、2次モードの固有周波数は0.01~0.18程度であり、これをそれぞれ図7に示す風および波のパワースペクトル上に青と赤の破線で示した。共振の影響は小さいことが分かる。

さらに、波力による応答解析を行なった。ここでは、波力の評価はポテンシャル流理論を用いて付加質量、造波減衰係数、強制波浪強制力を算出し、これを浮体モデルに与えた。共振帯域を避けて入射波を与えたところ、最大傾斜は0.6°と、想定する風力による傾斜に比べて小さかった。また、算出された強制波浪力 6.42×10^6 (kN)と呼び径76mmの係留索の許容耐力4300kNを比較すると現行の係留索では位置保持は非常に難しく、DPSを用いた位置保持が行われるべきであることが分かった。

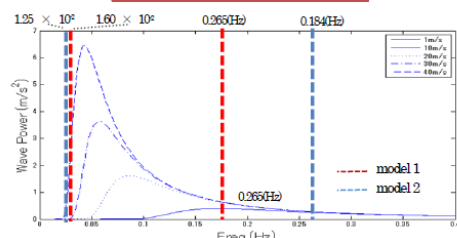


解析条件 垂直方向応力分布

図6 没水部における発生応力



変動風速のパワースペクトル



海洋波のパワースペクトル

図7 変動が外力のパワースペクトル

なお、洋上施工においては、円筒状構造物への注水・排水を繰り返し、架設済み構造体は海中部に留め置き、洋上直上での架設を繰り返し、高さ1000mの煙突構造は建設可能であることが分かった。

(参考文献)

- [1] Jörg Schlaich, Rufolf Bergemann, Wolfgang Schiel, Gerhard Weinreb: Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems, Journal of Solar Energy Engng., Vol.127, pp.117-124, 2005.2.
- [2] 日本建築学会：煙突構造設計指針，pp.792-805，2007.
- [3] 土木学会：座屈設計ガイドライン，pp.221-251，2005.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

Sato, H., Sugiura, K. and Suzuki, Y.: Feasibility study on Offshore Solar Updraft Tower Power Plant, Proceedings of the 27th KKHTCNN Symposium on Civil Engineering, (4pages, CD-ROM), Shanghai, 2015.11(申請時の関連する先行研究の発表).

〔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 での研究概要紹介

<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・大学院地球環境学堂・教授
研究者番号：70216307

(2)研究分担者

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

鈴木 康夫 (SUZUKI, Yasuo)
京都大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：50431698

(3)研究協力者

無し