

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

集光型ソーラーアップドラフトタワー発電の提案と発電効率

に関する数值的・実験的研究

集光型ソーラーアップドラフトタ ワー発電の提案と発電効率 に関する数值的・実験的研究

張 蒙

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員：松島 亘志

2020年3月

概要

本研究では従来型のソーラーアップドラフトタワーを考察し、集光型ソーラーアップドラフトタワーを提案し、三次元モデルの数値計算を行い、2メートル高さの模型を作り、集光型タワーの風速分布と発電効率を分析する。

ソーラーアップドラフトタワ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。また、発電効率は風速に大きな関係があり、ソーラーアップドラフトタワーに対して、風速の増加の可能性が注目された。本研究では集光型ソーラーアップドラフトタワーを提案する。集光型ソーラーアップドラフトタワーは従来型のソーラーアップドラフトタワーのタワー部分の外壁に太陽光を集めて、上昇気流を再び加熱し、コレクター部分に作られた上昇気流を再加速できるタワーである。

この提案を確認するために、CFD ソフトウェアを使い、数値計算の対比を行なった。まず、タワーの高さが 300 メートル、コレクターの半径が 300 メートルのディフューザ型のソーラーアップドラフトタワーとタワーの高さが 300 メートル、コレクターの半径が 200 メートルの集光型ソーラーアップドラフトタワーの二次元の CFD モデルを作った。モデルは乱流計算の $k-\epsilon$ モデルとエネルギー方程式を用いて、流体の数値計算を行う。

本研究では、集光型ソーラーアップドラフトタワーを提案し、数値計算により、発電効率を上げるために、改善した集光型ソーラーアップドラフトタワーの案を提出し、2メートル高さの模型を作りました。集光型ソーラーアップドラフトタワーの風速分布を調べて、発電効率の改善を検討した。

論文概要(英語)

This paper examines the distribution of wind speed inside the solar tower. After analyzing the flow speed distribution inside the traditional solar power tower, it is found that when the updraft moves upward, the heat energy converts into potential energy, which causes the air temperature to decrease. In this paper, concentrated solar light is used to supplement the heat lost by the ascending airflow during the ascending motion, the density of the ascending airflow does not become larger, so that the buoyant force of the updraft is not reduced. The flow speed inside the various types of solar power towers is simulated by the CFD calculation method. A significant increase of flow speed inside the concentrating solar tower was confirmed. And made

a model of 2 meters high, and verified that the high efficiency of the new solar power tower comes from heating the wall of tower.

キーワード：ソーラーアップドラフトタワー 集光型 上昇気流 発電

目次

背景	.....	2
集光型アップドラフトタワーの提案	.....	4
研究方法	.....	5
数値計算	.....	5
集光型ソーラーアップドラフトタワーの改善	.....	10
発電効率についての分析	.....	10
実験の設計	.....	15
実験結果	.....	18
まとめ	.....	21
謝辞	.....	22
参考文献	.....	22

背景

資源埋蔵量の枯渇、環境汚染、化石エネルギーの使用で起こった生態学的な損傷により、新エネルギーの使用は、新時代のエネルギー開発の主流になりつつあり、徐々に化石エネルギーに取って代わって行く。世界中に、再生可能エネルギー、核エネルギー、その他のクリーンエネルギーの生産と消費における新世代のエネルギーシステムの開発が行なわれている。太陽エネルギーでは、無尽蔵で、クリーンの利点と特徴があり、太陽光発電技術は、現在の再生可能エネルギー発電技術の主要な形態の一つとなっている。異なる原理により、太陽光発電技術は、太陽光発電と太陽熱発電の2つのタイプに分けられる。太陽熱発電が太陽光発電より、エネルギー利用効率が高い。本研究では、集光型太陽熱発電に相似的な方法で従来型ソーラーアップドラフトタワーを改造し、集光型ソーラーアップドラフトタワー装置を提案し、発電効率に関する数値的・実験的研究である。

ソーラーアップドラフトタワ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。ソーラーアップドラフトタワーは砂漠地帯など豊富な太陽光資源を持っている地域に建設され、堅牢な発電システムである。ソーラーアップドラフトタワーが一般的にタワー、コレクター、タービン三つの部分で構成されている。このシステムにおいて、コレクターが太陽光エネルギーを集め、空気温度差によってタワーに上昇気流が生じて、誘導された空気がソーラータワーに設置された風力発電装置を動かして太陽光エネルギーを電気エネルギーに転換していく。1980年代にスペインに設置され実験的なソーラータワーでは、195m高さのタワーが建設され、コレクターの平均半径が122mであり、最大電力出力時約50kWであった。発電効率は風速に大きな関係があり、ソーラーアップドラフトタワーに対して、風速の増加の可能性が注目された。長井知幸教授の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。また、ソーラーアップドラフトタワーの効率が非常に低い問題が存在している。Mohammed¹がソーラーアップドラフトタワーの効率を計算し、最大値は0.25%未満の状態である。

¹ Mohammed Awwad Al-Dabba(2011) A PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR CHIMNEY THERMAL POWER SYSTEMS THERMAL SCIENCE, Year 2011, Vol. 15, No. 3, pp. 619-642

ソーラーアップドラフトタワー実例として、中国の科学技術部の支援のもと内モンゴル科学技術大学とマドリッド工科大学が共同で中国の内モンゴル自治区において 200kW スケールのソーラータワーの試験運転を 2010 年より開始しているようである。ソーラーアップドラフトタワーの集熱装置と違い、反射板などを利用し、高温動作流体を作って集光型太陽熱発電するシステムも太陽光資源以外のエネルギー資源を持たない地域に建設された。

集光型太陽熱発電の基本原理は、従来の火力発電の原理に似ている。主に大規模な反射板を使用して太陽熱エネルギーを収集し、熱交換デバイスを介して熱を生成した後、従来の蒸気タービン発電機を駆動して発電します。集光型太陽熱発電は、太陽光エネルギーの取り込みと変換プロセス、熱エネルギーの吸収と伝達プロセス、蓄熱と熱電変換プロセスに従って行ない、太陽光エネルギーから電力になることを実現する。太陽光発電と比べて、集光型太陽熱発電技術は高価な結晶シリコン光電変換技術の必要がない、発電効率が低い。今、主流の集光型太陽光発電技術は、太陽エネルギーの収集方法で区別され、トラフ型集光型太陽光発電、タワー型集光型太陽光発電、および皿型集光型太陽光発電の 3 つタイプがある。

タワー型集光型太陽光発電システムは、数千の追跡する反射板と集熱タワーという 2 つの部分で構成されている。集熱タワーの上部に熱吸収装置が設置されている。タワー周囲の反射板は、塔頂の熱吸収装置の空洞に太陽光エネルギーを集めて高温を生成する。そして、熱吸収装置内部の作動媒体(水、ガス、熔融塩など)が加熱され、高温蒸気が生じて蒸気タービンを駆動し、電気を生成する。すなわち、タワー型集光型太陽光発電システムは、集中された太陽光が熱媒体を加熱してタービン発電機を駆動し、太陽光エネルギーを電力に転換するということである。このシステムの中に、反射板の投資コストは約発電所の総投資コストの 50%を占め、光効率の損失は約 40%、および反射板の規模が大きくなると、光効率の損失も大きくなる。また、タワー型太陽熱発電では、夜間でも稼働できるために、太陽熱発電の蓄熱装置が存在し、蓄熱装置の放熱によるエネルギーの損失を無視できない。このような発電タワーのデメリットは毎日に再起動が必要、再起動の費用が高い。実例はアメリカの SolFocus プロジェクトも停止された。しかし、太陽光を追跡する反射板のシステムにより、平坦な敷地が必要ではない。山地域にも集光型太陽熱発電タワーが建設されることできる。

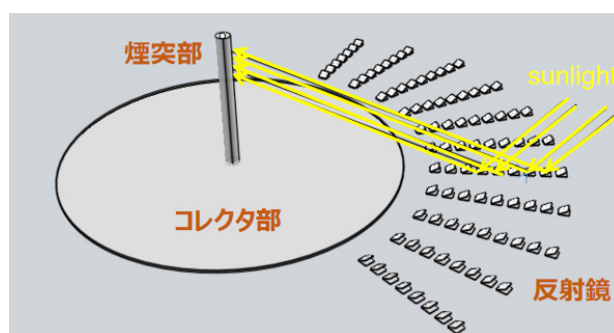
本研究では、タワー型集光型太陽光発電技術の集光方法をソーラーアップドラフトタワ

一に移植し、集光型アップドラフトタワーを提案し、三次元モデルの数値計算をやり、2m 高さのタワーモデルを作り、新たなアップドラフトタワーで生じる上昇気流の最大風速を分析し、発電効率の対比を検討する研究であり。

集光型アップドラフトタワーの提案

従来の研究に基づいて、ソーラーアップドラフトタワーの煙突内部の風速分布は底部の風速が一番速い、高さが増すにつれ、上昇気流の温度が低くなり、熱エネルギーが位置エネルギーに転換する状況がある。しかし、空気の温度が低くなるに連れて、空気の密度が大きくなり、上昇気流の浮力が小さくなることもある。

本研究では、タワー型集光型太陽光発電技術の集光方法を利用して、従来型ソーラーアップドラフトタワーの周辺に反射鏡を設置し、タワーに加熱装置を置き、太陽光エネルギーを反射板でタワーの加熱部に集めて、タワーの下で生じる上昇気流が加熱部に再加熱され、上昇気流の密度を大きくならない、上昇気流の浮力が大きくなることを目指している。また、新たなソーラーアップドラフトタワーは従来型のタワー型集光型太陽光発電技術と比べて、伝熱流体が空気なので、建設費用を減らすことができると考えている。以下は集光型アップドラフトタワーの想像図である。

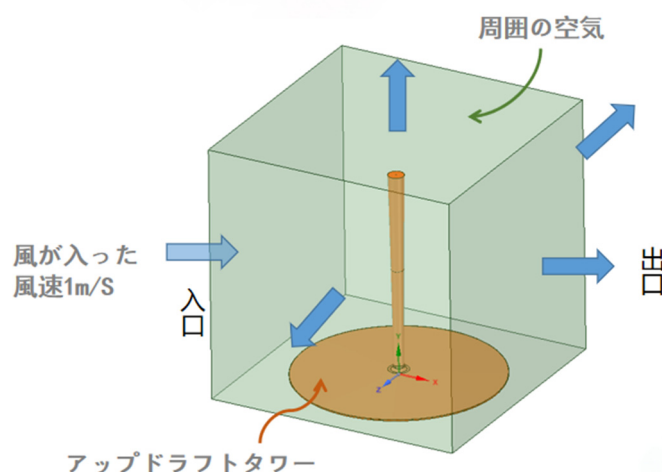


研究方法

本研究は、集光型ソーラーアップドラフトタワーの発電効率を検討するために、このシステム内部の流れの流速分布と温度分布を分析しなければならない。研究のアプローチについて説明しよう。まず、有限要素法で三次元の数値計算モデルを作り、計算結果を分析し、集光型ソーラーアップドラフトタワーの発電能力を検討する。次に、2メートル高さのモデルを作り、モデル内部の流れの風速と温度を記録し、集光型ソーラーアップドラフトタワーの熱効率を検討する。

数値計算

タワー周辺の気流の影響を考慮して、数値計算モデルの流れが二つの部分で構成される。一つは集光型ソーラーアップドラフトタワー内部の流れ、もう一つは周辺気流の流れである。以下図は数値計算モデルである。真ん中に黄色の部分が集光型タワーであり、周辺気流が 1 m/s の風速で左側から入り、他の四つの面に出ることを設定した。

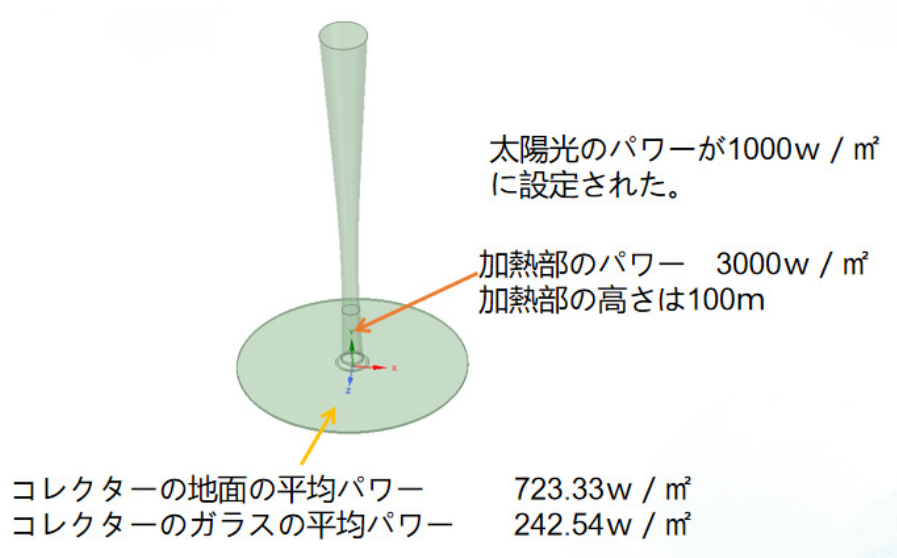


現実中に、集光型ソーラーアップドラフトタワーの建設問題を考慮して、タワーの外壁が双曲面になることを設定する。壁の安定性を増加するために、双曲面はタワーのような建物に使用されている。例えば、中国の広州タワー(600mの高さ)、発電所の冷却タワーの外壁が双曲面になっている。そして、本研究の集光型ソーラーアップドラフトタワーの外壁が双曲面を利用し、100m高さの加熱部を設定し、作られた。まず、高さがタワー内部風速にどのような影響を与えることを分析するために、高さ 500m、600m、700m の三つのモデルを作った。全部のモデルのコレクターの半径が 200m(コレクターの面積は 125600 m²)、加熱部の高さが 100m と設定した。タワー双曲面の対称面は加熱部の頂上に設定した。

太陽光エネルギーのパワーについては、本研究の数値計算モデルに、従来の研究に基づいて、1 kW/m²に仮定する²。Fluent の輻射モデルでコレクターの地面とガラス部が受けた太陽光エネルギーのパワーは別々に 723.33w/m²と 242.54w/m²である。また、タワーの加熱部が受けた太陽光エネルギーのパワーは 3 kW/m²と設定して、反射板の反射効率は

² 西村 啓道(2012)集光型太陽熱発電(csp)方式とその現状 THE CHEMICAL TIMES 2012 No. 4(通巻 226号)

0.63³に仮定する。従って、反射板の面積は 44857 m²。



数値モデル

本研究では、システム内の空気の熱伝達を分析するために、ソーラーアップドラフトタワーの流体モデルが次の仮定に従って行なわれる。

- ①流体は圧縮可能のニュートン流体である。
- ②三次元で乱流の存在を考えている。
- ③非対称流れが想定される。
- ④粘性散逸と圧縮率の効果無視できると想定される。

極座標において、検討し、 v_r 、 v_θ と v_z を仮定する⁴。

連続方程式

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(v_z)}{\partial z} = 0$$

運動方程式

$$V \cdot \nabla = v_r \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} v_\theta \frac{\partial}{\partial \theta} + v_z \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

³ 魏秀东 卢振武(2010)「塔式太阳能热发电站镜场的优化设计」ACAT OPTICA SINICA Vol. 30, No. 9 2010

⁴ A. Dhahri A. Omri and J. Orfi 「Numerical Study of a Solar Chimney Power Plant」 Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(18): 1953-1965, 2014

r 一運動方程式

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_r - \frac{1}{r}v_\theta^2 = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{F_r}{\rho} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr}) + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}\right)$$

θ 一運動方程式

$$\frac{\partial v_\theta}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_\theta + \frac{1}{r}v_r v_\theta = -\frac{1}{\rho r}\frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{F_\theta}{\rho} - \frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\tau_{r\theta}) + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}\right)$$

z 一運動方程式

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + (V \cdot \nabla)v_z = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{F_z}{\rho} + \frac{1}{\rho}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz}) + \frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right)$$

エネルギー方程式

$$\rho c_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (V \cdot \nabla)T \right] = k \nabla^2 T + \mu \left[2(\varepsilon_{rr}^2 + \varepsilon_{\theta\theta}^2 + \varepsilon_{zz}^2) + \varepsilon_{\theta z}^2 + \varepsilon_{rz}^2 + \varepsilon_{r\theta}^2 \right]$$

の中に、

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} & \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_r \right) \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial v_z}{\partial z} & \varepsilon_{\theta z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial \theta} + \frac{\partial v_\theta}{\partial z} \\ \varepsilon_{rz} &= \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} & \varepsilon_{r\theta} &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_r}{\partial \theta} - v_\theta \right) + \frac{\partial v_\theta}{\partial r} \end{aligned}$$

粘性応力について

$$\begin{aligned} \tau_{rr} &= 2\mu\varepsilon_{rr} & \tau_{\theta\theta} &= 2\mu\varepsilon_{\theta\theta} & \tau_{zz} &= 2\mu\varepsilon_{zz} \\ \tau_{r\theta} &= \mu\varepsilon_{r\theta} & \tau_{\theta z} &= \mu\varepsilon_{\theta z} & \tau_{rz} &= \mu\varepsilon_{rz} \end{aligned}$$

乱流が発生しているので、k - ε 方程式を利用する。

k - ε 方程式

k は乱流のエネルギー方程式

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon$$

$$\text{乱流エネルギー係数 } G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$

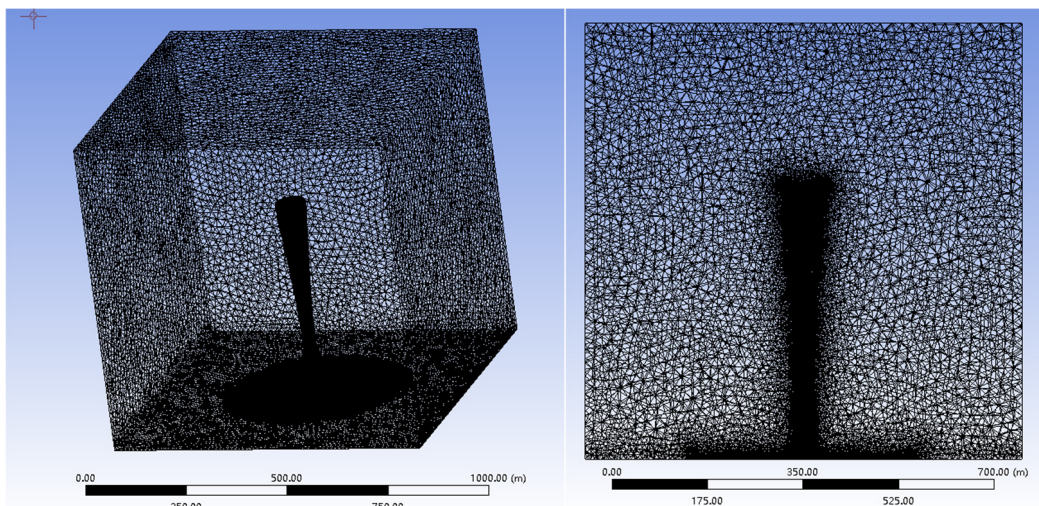
乱流消失率 ε の方程式

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\text{これは浮力からの乱流エネルギー係数 } G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

メッシュの設計

次に、数値計算のメッシュの設計を説明しよう。本研究の数値計算モデルの中に、二つの流れ区域があるので、計算量を減らすために、二つの部分にメッシュの最大サイズが違い、周辺空気のメッシュの最大サイズが 10m に設定し、タワー内部気流のメッシュの最大サイズが 2m に設定した。二つの部分の接続面のメッシュの最大サイズが 1m に小さくなった。

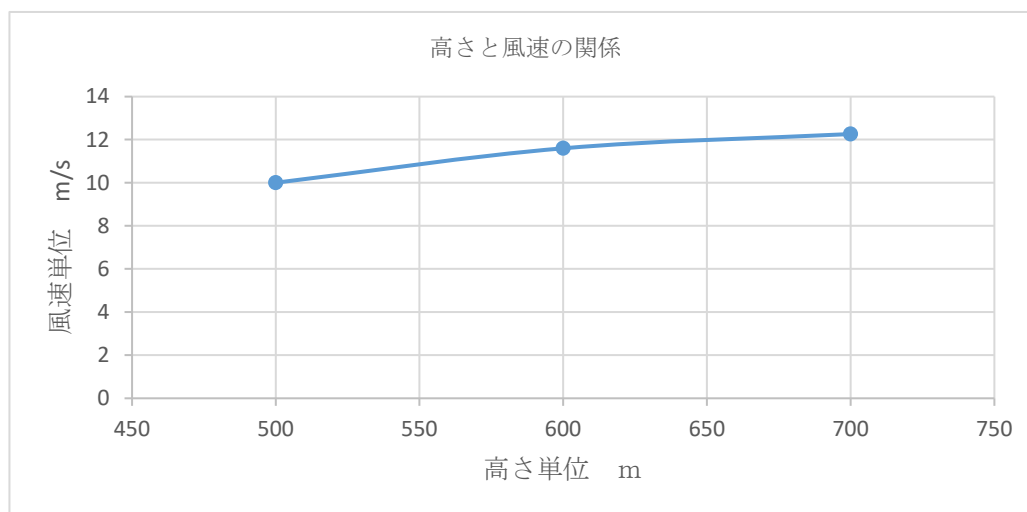


三次元モデルのメッシュ

Skewness の平均値は 0.23~0.25 である。

風速に対してタワー高さの影響の検討

Fluent で simple モデルで集光型ソーラーアップドラフトタワーが 120 秒で運転する場合を計算し、三つのモデルの計算残差が 0.001 の程度以下をコントロールできた。計算結果については、500m 高さのタワーに対して、150m 高さの断面の平均風速が 10.1 m/s である。600m、700m のタワーに対して、同じ時間と位置の平均風速は 11.6 m/s と 12.2 m/s である。そして、高さで風速の関係を得た。高さが大きくなるにつれて、タワー内部の風速が大きくなる。しかし、高さに対して風速の二階微分がマイナスである。



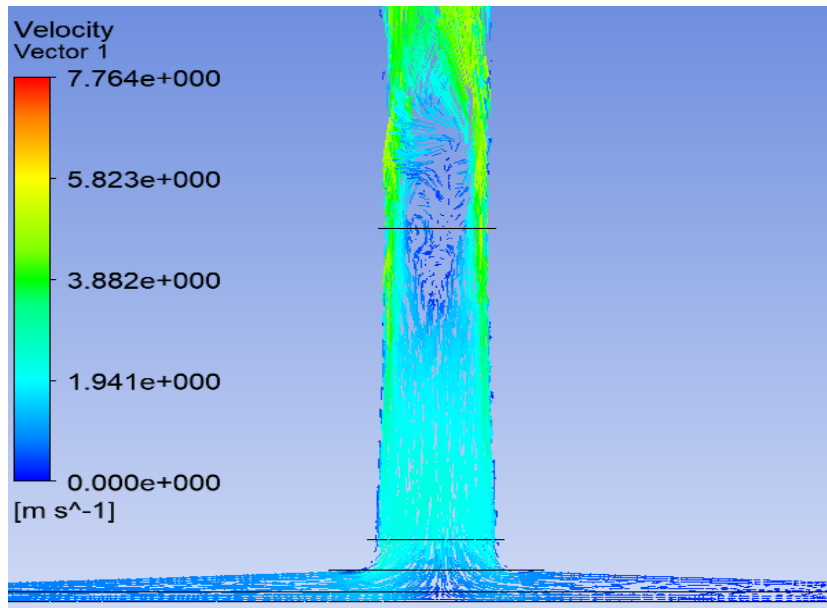
集光型ソーラーアップドラフトタワーの改善

数値計算の結果により、集光型ソーラーアップドラフトタワーにおける問題を見つけた。

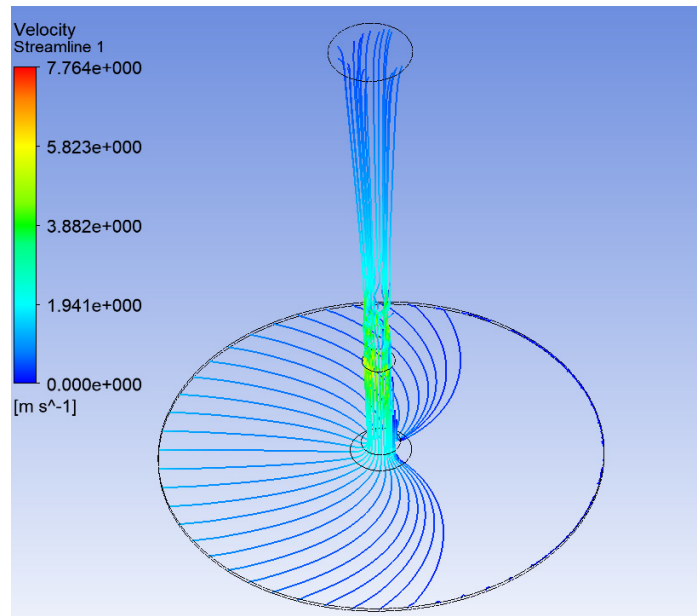
問題が以下の三点である。

- ①タワー内部で気流の対流が存在している
- ②タワーの底部の弾性衝突ので運動エネルギーの損失がある
- ③周辺気流の存在のでコレクター部の熱量の損失が発生する。

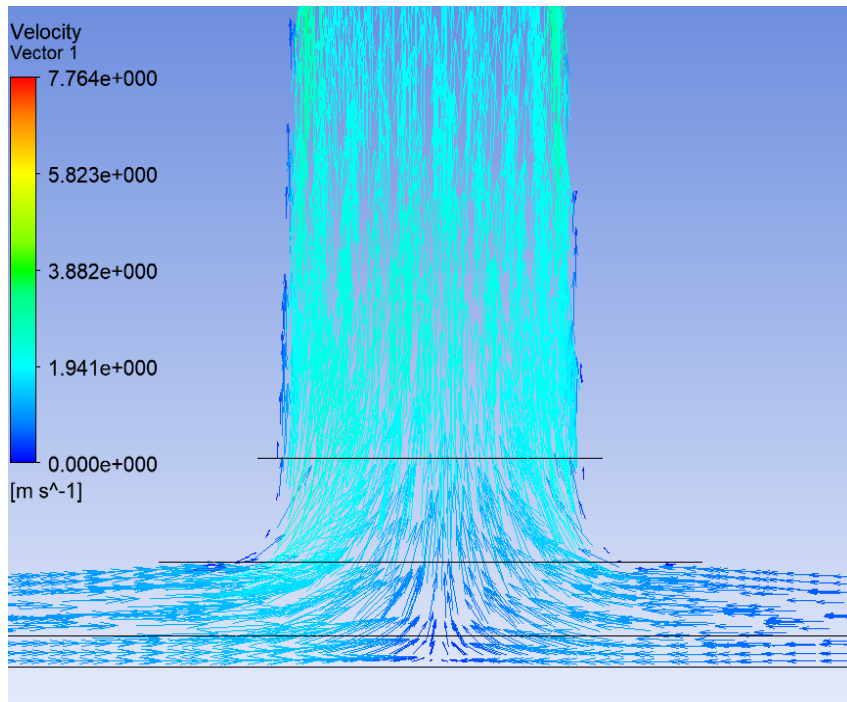
以下は三つの問題に対応する数値計算の図である。



タワー内部の対流



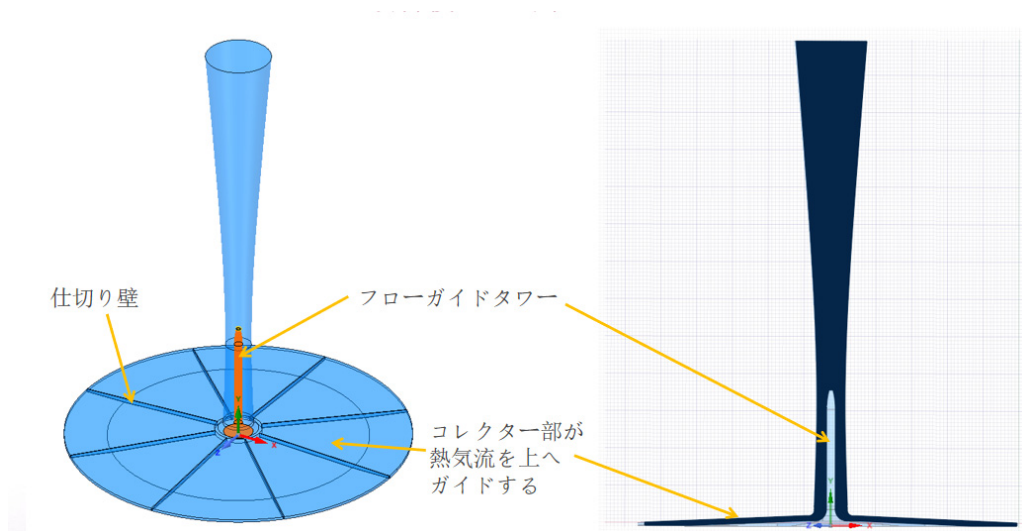
コレクター部の熱量の損失



運動エネルギーの損失

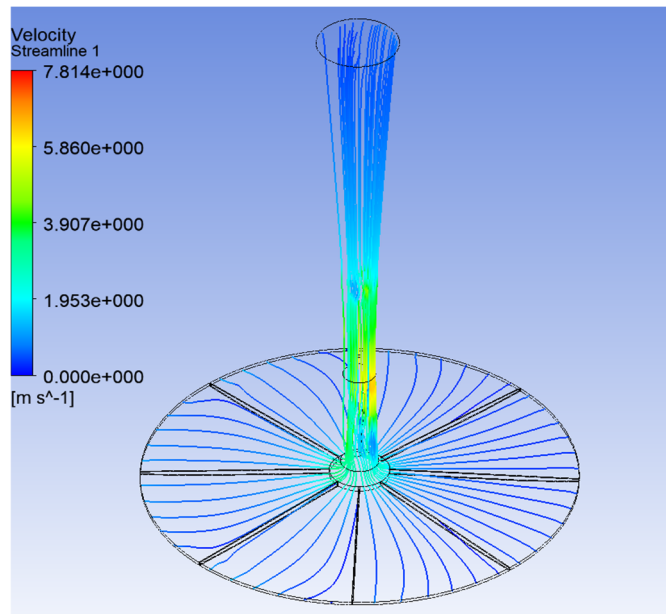
以上の問題を解決するために、以下の方式でモデルを改善する。

- ①タワー内部で気流の対流が存在している—フローガイドタワーを設置する
- ②タワーの底部の弾性衝突なので運動エネルギーの損失がある—コレクターの地面が気流を誘導する
- ③周辺気流の存在なのでコレクター部の熱量の損失が発生する—仕切り壁を設置する

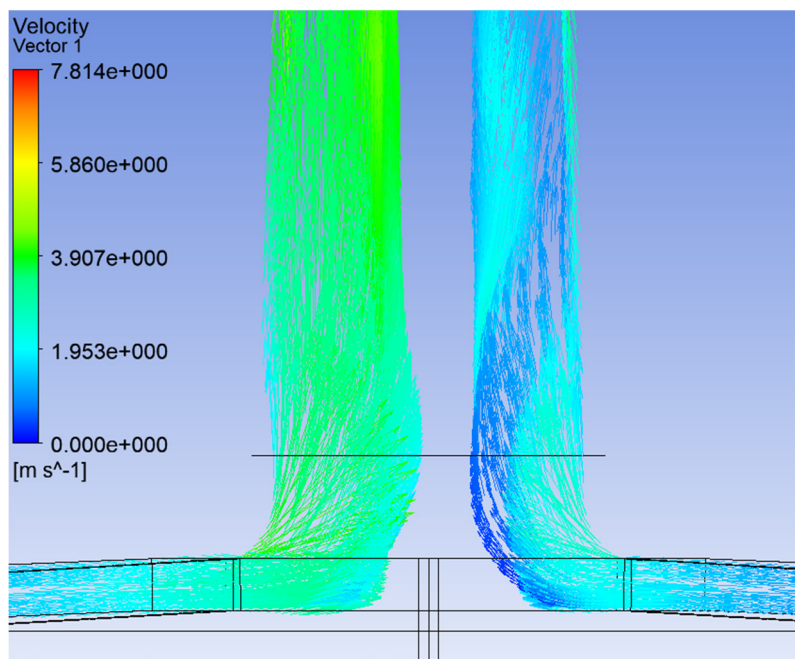


改善した 500m 高さのタワー

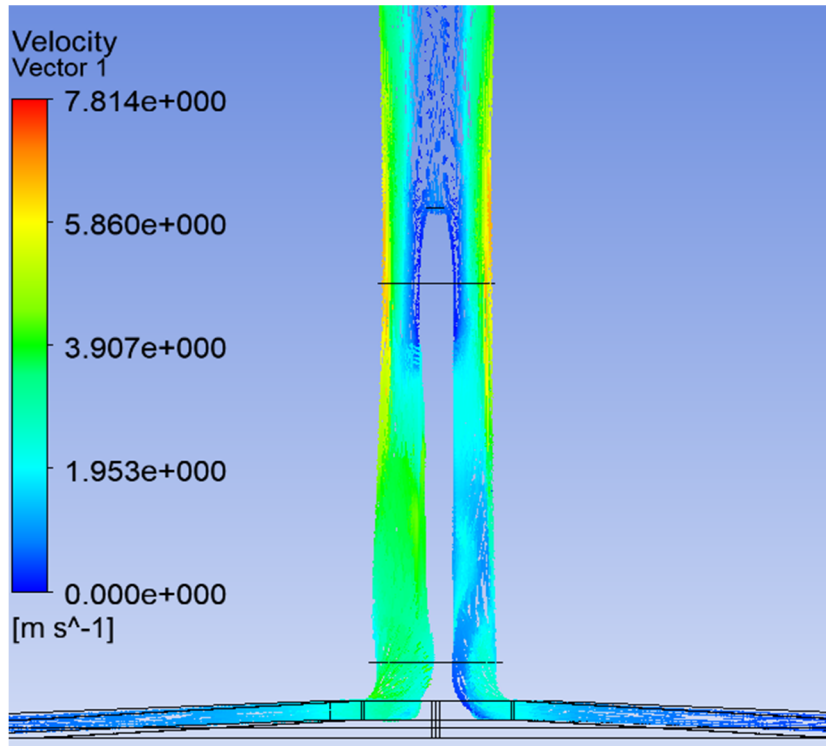
改善した 500m 高さのタワーのモデルを作り、fluent で計算し、以下の結果を得る。



熱量損失の改善



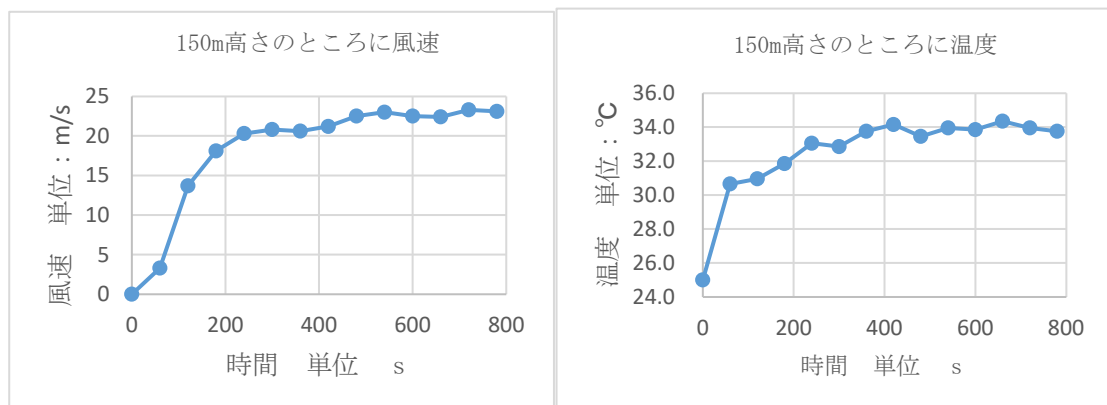
気流を誘導して、運動エネルギーの損失を防止する



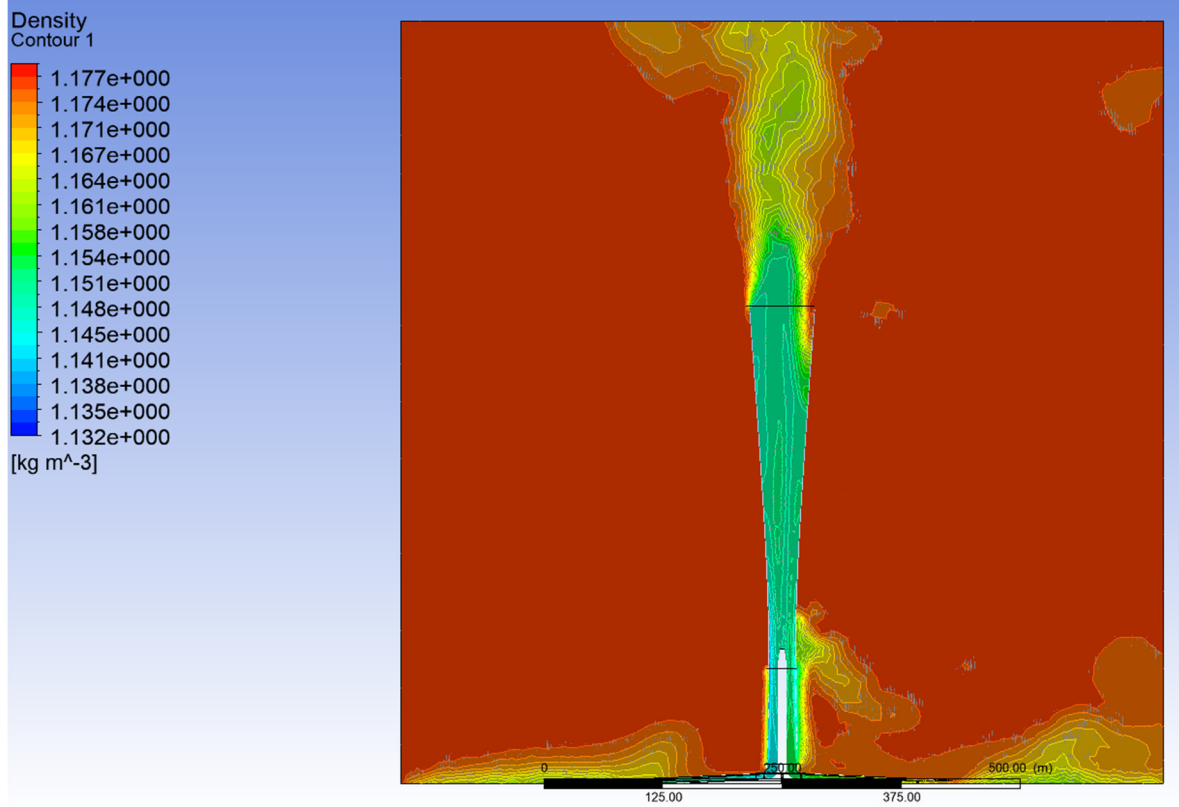
タワー内部の対流を防止するフローガイドタワー

そして、改善した 500m 高さのモデルが 13 分で運転することを計算し、以下の結果を得た。

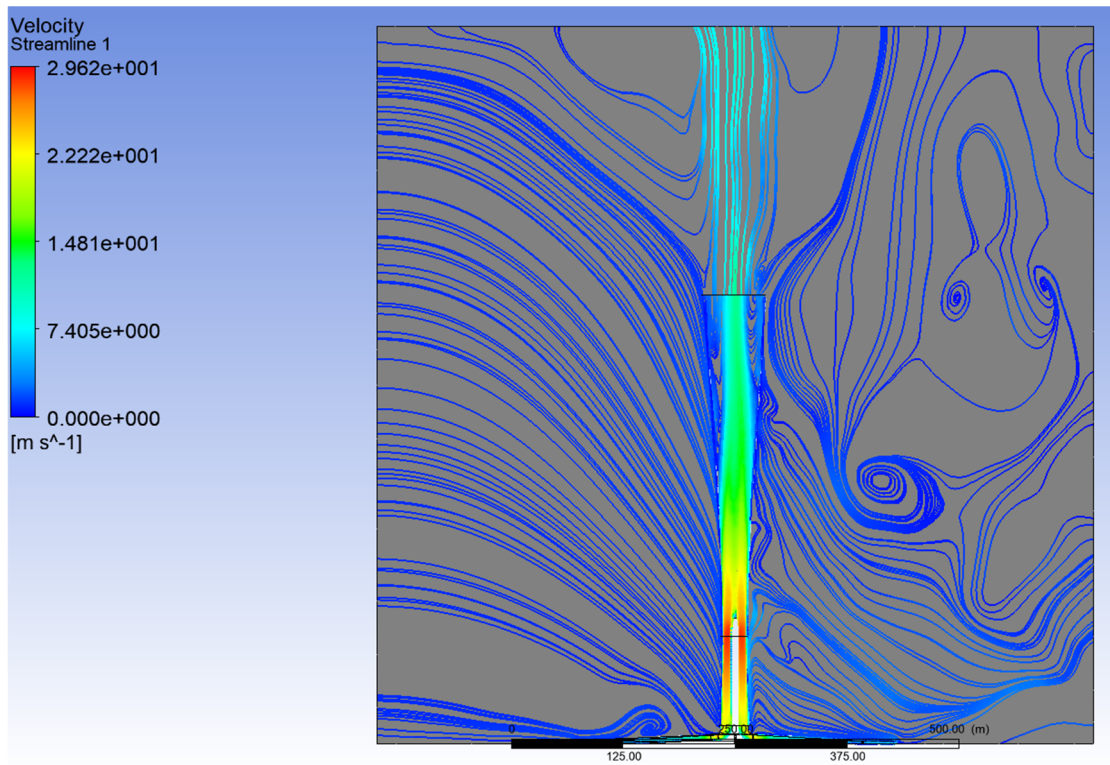
- ①タワー内部に 150m 高さところの最大風速は 23.3m/s
- ②運転した 10 分後、タワー内部に 150m 高さところの気流温度の範囲が 33.2～34.4℃
- ③運転した 5 分後、風速があまり高くない



以下は集光型ソーラーアップドラフトタワーが 13 分で運転した後、流れの流速分布と密度分布である。



13分で運転した時に流れの密度分布



13分で運転した時に流れの風速分布

発電効率についての分析

集光型ソーラーアップドラフトタワーの発電設備は発電タービンので、流れの運動エネルギーだけ利用する。タワー内部の 150m 高さところに半径 15m のタービン発電機を設置し、この発電機の効率が 0.5 に仮定する。そして、一つの発電機の発電効率は

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{sun}}$$

$$\text{運動エネルギー } E = 0.5\rho\pi R^2 v^3 = 5138.64kJ$$

$$P_{out} = 0.5\eta\rho\pi R^2 v^3 = 2569.32kW$$

$$\text{空気密度 } \rho = 1.15kg/m^3 \quad \text{タービン半径 } R = 15m \quad \text{風速 } v = 23.3m/s$$

$$P_{sun} = P_0(A_{coll} + A_{mirror}) = 170457kW$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{sun}} = 1.507\%$$

太陽光エネルギーから運動エネルギーに転換する効率

$$\eta_E = \frac{E}{P_{sun}} = 3.146\%$$

この効率が従来型のソーラータワーの効率 (0.25%) と比べて、非常に大きくなることを確認した。

実験の設計

実験模型のサイズのは数値計算の 500m 高さの集光型ソーラーアップドラフトタワーの 0.004 倍である。実験模型の高さが 2m、コレクターの半径が 0.8m、コレクターの面積が 2.0096 m²、反射板の面積が 0.68 m²である。天井高さが 3m 以上の実験室に実験を行って行った。実験が室内で進むので、模型周辺気流の風速が 0 である。

実験材料：1 mm厚の透明塩ビ板、0.5 mm厚の透明塩ビ板、0.5 mm厚の黒い塩ビ板、フォームボード、3 mm厚の透明塩ビ板、500w 投射ライト、ミラー塩ビ板、0.5 mm厚のアルミ板を利用した。

タワー部：1 mm厚の透明塩ビ板、0.5 mm厚の透明塩ビ板

加熱部：0.5 mm厚のアルミ板

コレクター部：1 mm厚の透明塩ビ板、0.5 mm厚の黒い塩ビ板、フォームボード

フレーム：3 mm厚の透明塩ビ板、フォームボード

太陽光模型：四つの 500w 投射ライト

反射板(32 個)：フォームボード、ミラー塩ビ板

風速の測量：

2m高さの模型として、タービン式風速計の体積が大きすぎ、タワー内部の空間が複雑ので、タワー内部の風速を測るために、熱線式風速計を利用して実験を行なった。熱線式風速計が



株式会社エスコの EA739AH-2 熱線式風速計を購入した。仕様についての説明⁵：

測定範囲 風速：0～10m/s(0～+50℃) 分解能 風速：0.01m/s、温度：0.1℃

⁵ 株式会社エスコの EA739AH-2 熱線式風速計の説明
<https://www.esco-net.com/wcs/escort/items/ItemDetail/EA739AH-2>



タワー底部

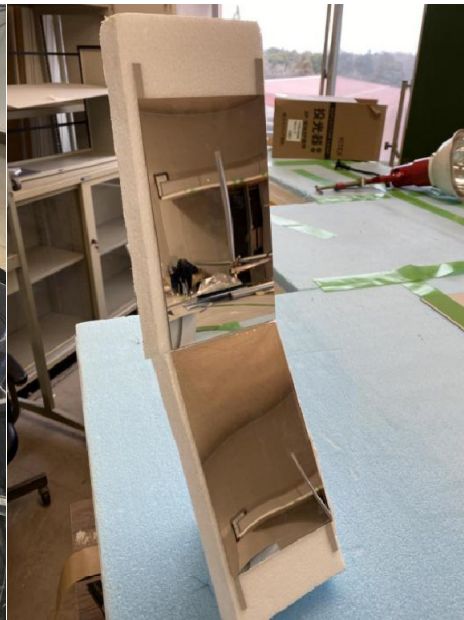


60cm 高さの所

タワー底部と 60cm 高さの所(500m 高さのタワーに対して、150m 高さの所)に穴を開けて風速を測る。



模型加熱部(アルミ板)



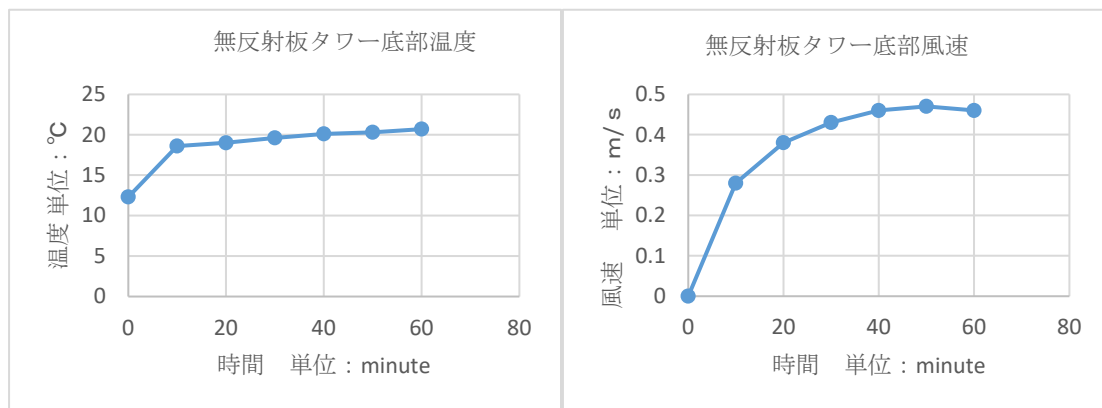
反射板

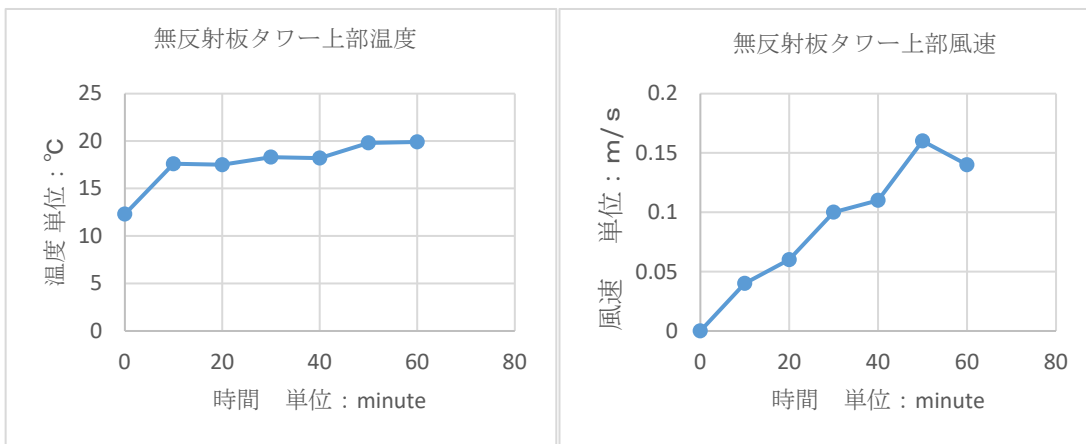
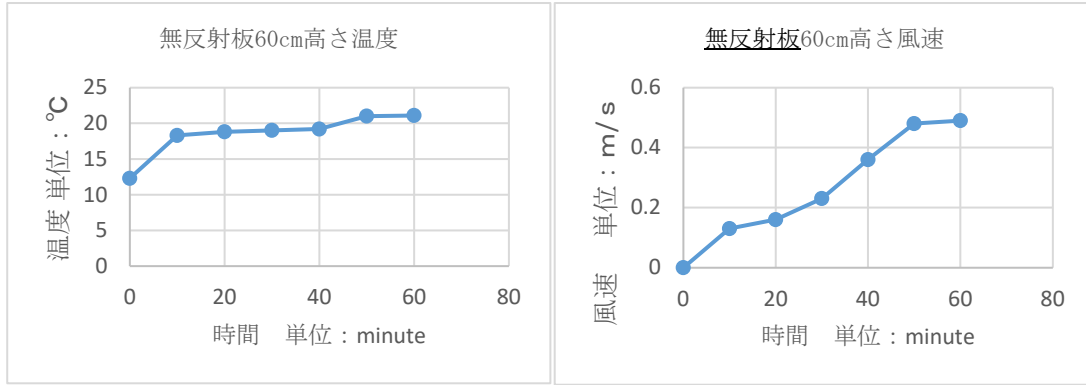


模型の全体

実験結果

まず、反射板がない場合に、従来型のソーラーアップドラフトタワーの状況を考えて、風速と温度を測る。以下は一時間にタワー底部、60cm 高さの所(500m 高さのタワーに対して、150m 高さの所)、タワー上部の温度と風速である。

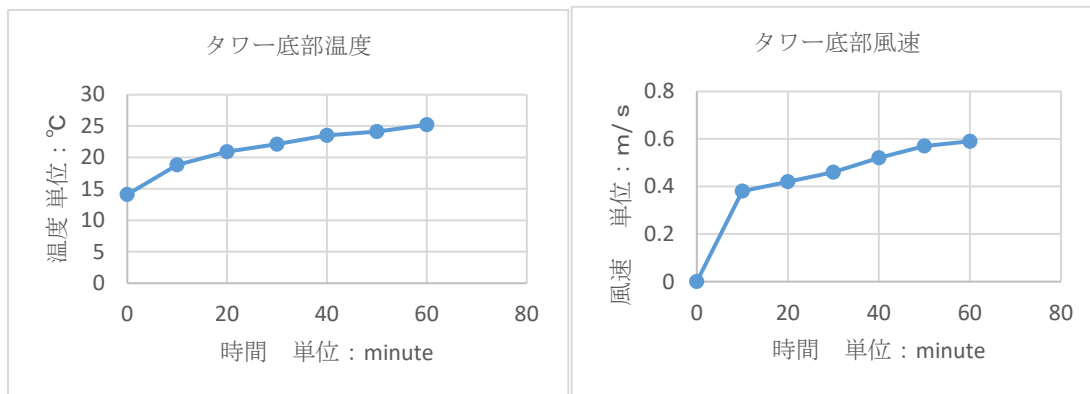


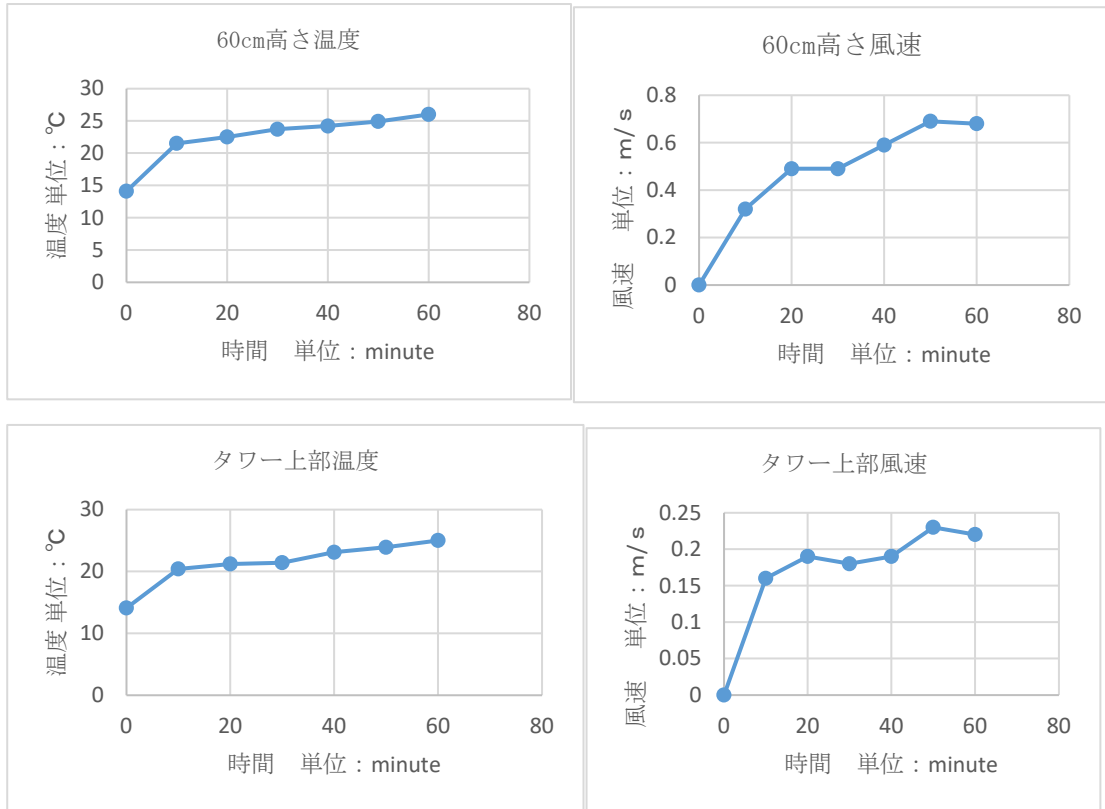


無反射板の場合に、実験結果：

最大温度：21.1°C 最大風速：0.49m/s 発生ところ：60cm 高さところ

次に、集光型アップドラフトタワーの反射板を設置し、実験を行なう。同様に、タワー底部、60cm 高さの所、タワー上部の温度と風速を測る。





無反射板の場合に、実験結果：

最大温度：26°C 最大風速：0.69m/s 発生ところ：60cm 高さところ



光線が加熱部に集熱

集光型ソーラーアップドラフトタワーの模型と無反射板の模型と比べて最大風速値が40.8%の増加を確認した。しかし、集光型ソーラタワーの模型における光線のエネルギー

を受け面積は

$$A_s = (A_{coll} + \beta A_{mirror}) = 2.4856 \text{ m}^2$$

A_{coll} コレクターの面積は 2.0096 m²

A_{mirror} 反射板の面積は 0.68 m²

β 投射比率 0.7

無反射板の模型における光線のエネルギーを受け面積は

$$A_{ms} = A_{coll} = 2.0096$$

$$\frac{A_s}{A_{ms}} \cong 1.237 \quad \text{に対する風速の比較} \quad \frac{v_s}{v_{ms}} \cong 1.408$$

従って、集光型ソーラーアップドラフトタワーにおける反射板が提供したエネルギーがコレクターより、有効的に上昇気流の運動エネルギーに転換した結論を得た。

まとめ

本研究では、ソーラーアップドラフトタワーの発電効率を高めるために、集光型ソーラーアップドラフトタワーを提案した。三次元の数値計算モデルを作り、タワー内部上昇気流の風速分布を調べて発電効率を計算し、集光型ソーラーアップドラフトタワーが従来型のタワーと比べて効率が非常に高くなる結論を得た。さらに、2m 高さの模型を作成した。タワー内部で上昇気流が生じることを観察した。無反射板模型と集光型ソーラータワーの最大風速と光線を受け面積を比較し、集光型ソーラータワーの反射板がコレクターより、有効的に上昇気流の運動エネルギーに転換した結論を得た。この結論により、アップドラフトタワーのような建物で生じる上昇気流がタワー壁に設置した熱源からのエネルギーを運動エネルギーに転換の能力はコレクターの熱源より高い。したがって、アップドラフトタワーの壁に熱源を設置すれば、発電効率が高い建物を創造できる結論を得た。

謝辞

筑波大学システム情報工学研究科の松島亘志教授、山本亨輔先生、金川哲也先生のご指導、学術的なご協力に心から感謝いたします。そして私の実験を手伝ってくれた研究室の皆様、心から感謝している。そして私が実験している間に助けてくれた研究室の皆様。また、私の友達 LIU BIN さんが fluent に関することを支援しました。本当に感謝いたします。

筑波大学の先生方、世界中の研究者の皆様、生活の幸せ、研究の順調をお祈りします。

2020年3月

張 蒙

参考文献(References)

- [1] A. Dhahri, A. Omri and J. Orfi 「Numerical Study of a Solar Chimney Power Plant」 Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 8(18): 1953-1965, 2014
- [2] Koonsrisuk Atit, Chitsomboon Tawit(2009) 「Accuracy of theoretical models in the prediction of solar chimney performance」 [J]. Solar Energy, 2009, 83 (10) : 1764-1771
- [3] Mohammed Awwad Al-Dabba(2011) A PERFORMANCE ANALYSIS OF SOLAR CHIMNEY THERMAL POWER SYSTEMS
THERMAL SCIENCE, Year 2011, Vol. 15, No. 3, pp. 619-642
- [4] 長井 知幸, 烏谷 隆, 杉谷 賢一郎, 松島 啓二, 大屋 裕二(2015) 「ソーラーアップドラフトタワーとその発電効率を増加させる研究の紹介」 Wind Energy 39(1), 34-37, 2015
- [5] 株式会社エスコの EA739AH-2 熱線式風速計の説明
<https://www.esco-net.com/wcs/escort/items/ItemDetail/EA739AH-2>
- [6] 西村 啓道(2012) 「集光型太陽熱発電(csp)方式とその現状」 THE CHEMICAL TIMES 2012 No. 4(通巻 226 号)
- [7] 魏秀东 卢振武(2010) 「塔式太阳能热发电站镜场的优化设计」 ACAT OPTICA SINICA Vol. 30, No. 9 2010

