

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

筑波大学 学生会員 ○高橋 悠太
筑波大学 正会員 山本 亨輔

1. 研究背景・目的

一般に、再生可能エネルギーは、発電量が不安定である。ただし、再生可能エネルギーの中にも、たとえば、太陽熱発電のように安定性の高い電源を見出すことができる。中でも、SUPG (ソーラーチムニー発電: Solar Updraft-tower Power Generator) [1] システムは、運用コストも低く、ベースロード電源の選択肢の一つといえる。SUPG システムは、コレクタと呼ばれる巨大な温室とアップドラフトタワーと呼ばれる巨大な煙突からなる。図 1 に示すように、コレクタで温められた空気は、タワー内部に上昇気流を生み出す。発電はタービンをタワー周辺部に配することで行う。ただし、SUPG システムも他の太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーと同様、広大な用地を必要とする。そこで、わが国の国土状況を鑑み、メガフロート[2]上に建造する洋上 SUPG システムの検討が進められている。本研究では、洋上 SUPG システムの形状自由度が高いことに着目する。

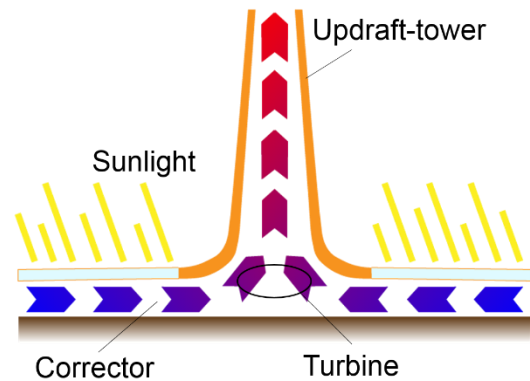


図 1 SUPG の概念図

形状を工夫することで、コレクタ内部の空気流れや温度分布を制御し、より高効率な形状が考案できる可能性がある。しかし、SUPG システムの設計は、単純化された伝熱計算が主で、熱流体シミュレーションに基づくものは少ない。特に、計算負荷の観点から周辺大気の影響は考慮されてこなかった。SUPG システムに生じる上昇気流は、熱対流現象で説明できるが、同時に、静的な大気も再現できる数値計算コードが必要である。そこで、本研究では、静的な大気の内側に熱対流現象を統一的に再現できる新しい計算コードを作成し、その有効性を検証する。

形状を工夫することで、コレクタ内部の空気流れや温度分布を制御し、より高効率な形状が考案できる可能性がある。しかし、SUPG システムの設計は、単純化された伝熱計算が主で、熱流体シミュレーションに基づくものは少ない。特に、計算負荷の観点から周辺大気の影響は考慮されてこなかった。SUPG システムに生じる上昇気流は、熱対流現象で説明できるが、同時に、静的な大気も再現できる数値計算コードが必要である。そこで、本研究では、静的な大気の内側に熱対流現象を統一的に再現できる新しい計算コードを作成し、その有効性を検証する。

2. 流体のモデル化

本研究では、流体の構成則は以下のように仮定する。

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} + \lambda\epsilon_{kk} \quad (1)$$

ここで、 p : 静圧、 ϵ_{ij} : ひずみ速度、 μ : 粘性係数、 λ : 第二粘性係数である。熱流体は、理想気体の状態方程式に従う。質量保存則、運動量保存則、熱力学的エネルギー保存則、状態方程式および静圧分布から、運動方程式、エネルギー方程式、静圧の式が以下のように導かれる。

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\rho b_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} - \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} = \frac{\partial Q}{\partial t} + \sigma_{ij}\epsilon_{ij} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{g}{R'T} p = 0 \quad (4)$$

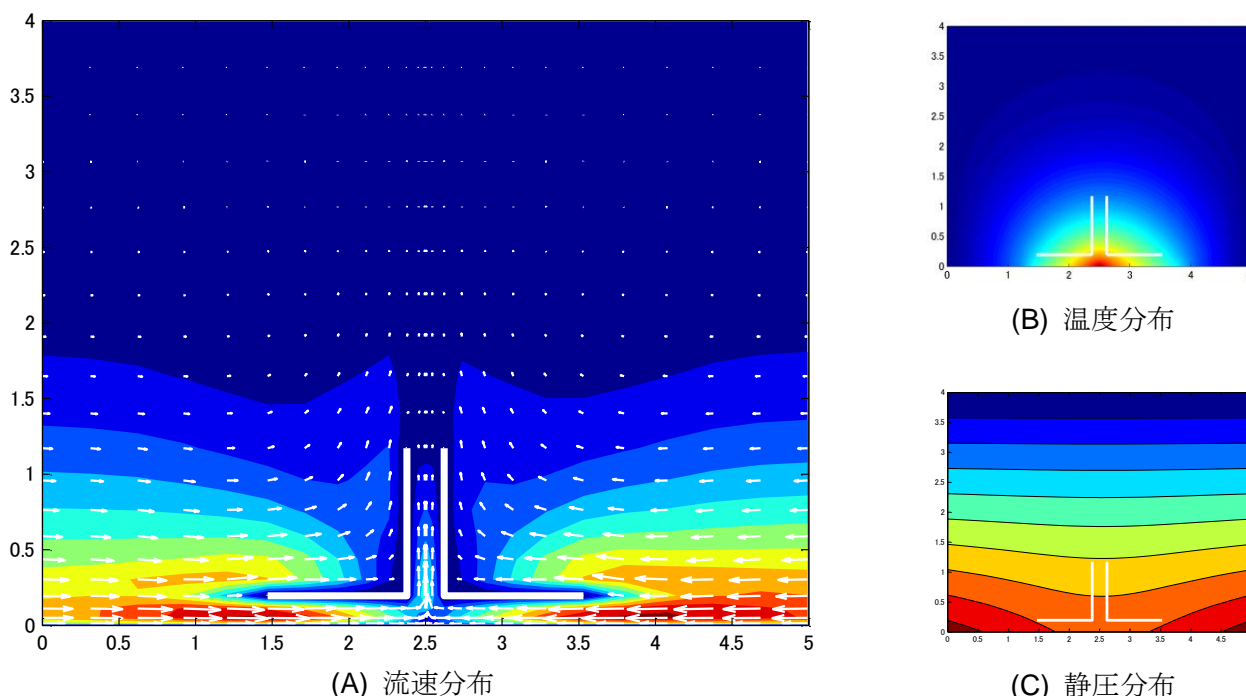
ここで、 ρ : 密度、 b_i : 体積力、 T : 温度、 κ : 熱伝達係数、 Q : 加熱量、 g : 重力加速度、 R' : 気体定数である。なお、式(1)を式(2)に代入すると静圧 p が出てくる。このとき、静圧 p は式(4)から求められているので、式(2)では既知として扱うことに注意する。表 1 には、対象モデルのパラメータを示す。

キーワード 再生可能エネルギー, SUPG, 熱流体, 有限要素法, 静圧

連絡先 〒305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1 E-mail: yamamoto_k@kz.tsukuba.ac.jp

表 1 SUPG モデルのパラメータ

分類	空気のパラメータ			構造・数値計算のパラメータ		
粘性係数	μ	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	1.004×10^{-3}	静的な大気 (幅×高さ)	m	5.0×4.0
第二粘性係数	λ	$\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$	3.09	コレクタ (半径×高さ)	m	1.0×0.2
定積質量比熱	C_v	$\text{J}/\text{kg}/\text{K}$	719	タワー部 (幅×高さ)	m	0.2×1.0
熱伝達係数	κ	$\text{J}/\text{s}/\text{m}/\text{K}$	2410	節点分割数 (横×縦)		21×26
熱量	Q	J/m^2	1.5×10^9	時刻	s	0.001
気体定数	R'	$\text{m}^2/\text{s}^2\cdot\text{K}$	287			

図 2 SUPG モデルの数値計算結果 ($t = 0.500\text{s}$)

3. 小型 SUPG モデルにおける数値計算結果・考察

数値計算の結果を図 2 に示す. 図 2(A), (B) および (C) はそれぞれ流速 $\{u \ v\}^T$, 温度 T , 静圧 p を表している. タワー下部において, 熱量 Q を与えると, 図 2(C) のようにコレクタ中心部の静圧が低下する. 結果, 中心方向に流れが生じる. 流れはタワー下部でぶつかり, タワー内部に上昇気流を生じていることも確認できる. 圧力を静圧と置くことで, 静的な大気が SUPG システムに影響されながら流れを生じている様子も確認できる.

4. 結論

鉛直方向の静圧変化が重力とつりあい, 水平方向の変化のみが熱対流現象を生じるようにモデル化した場合でも, 流体の挙動を定性的に正しく再現することができた. 今回は, 計算機性能の限界が理由で, 二次元での粗い要素で, 短いステップ数に限定した検討を行ったが, 今後は精緻な三次元モデルを構築し, 定常状態に至るまでを定量的に検討する予定である. また, 質量保存則の誤差などに基づいた精度分析も行いたい.

参考文献

- [1] Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., "Solar Chimneys Part I: Principle and Construction of the Pilot Plant in Manzanares", *Int. J. Solar Energy*, Vol. 2, pp. 3-20, 1983
- [2] "メガフロートの話: その技術的特徴と課題", 財団法人日本造船技術センター