

静圧固定法を用いた SUPG システムの評価

筑波大学大学院システム情報工学研究科 学生会員 ○高橋 悠太
筑波大学システム情報系 正会員 山本 亨輔

1. 背景

再生可能エネルギーは、需要に対し発電量が不安定である。ただし、太陽熱発電のような安定性の高い電源を見出すことができる。この中で SUPG (ソーラーチムニー発電: Solar Updraft-tower Power Generator) システムは、運用コストも低く、ベースロード電源として期待される。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。タービンをタワー内部に配し、発電することができる。ただし、SUPG システムも太陽光発電や風力発電などと同様、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 システムが検討されている。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。形状を工夫することで、空気流れや温度分布を制御し、より高効率な形状を考案できると考える。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。特に周辺大気との相互作用に着目したものは少なかった。周辺大気との影響に関する検証は過去、本研究と同型のモデルにおいて、数値計算を行ったものがある³⁾。本研究で用いる静圧固定法は静圧分布を用いて計算に必要な圧力を導出する。一般的に数値計算に用いられる圧力と比べ、密度に対し値が大きいため、計算誤差の影響を大きく受ける。本研究では静圧分布を状態方程式に代入、あるいは連立させることによって静圧を導出し、その差異を検証した。

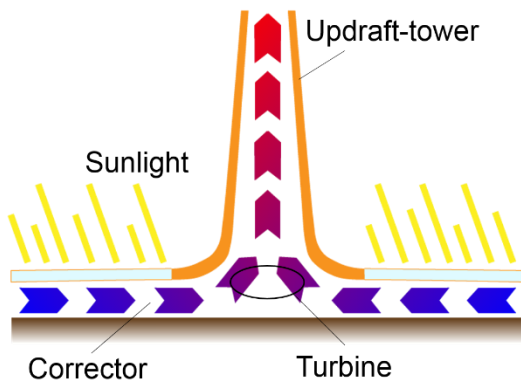


図 - 1 SUPG の概念図

2. 流体モデルの定義

2.1 支配方程式

本研究では、流体の構成則は以下のように仮定する。

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

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から、運動方程式, エネルギー方程式は以下のように導かれる。

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

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

また状態方程式および静圧分布は以下の通り。

$$p = \rho RT \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (5)$$

ここで、 u_i : 流速, 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), (5)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。

また、質量保存則を明示的に満たすよう求めていることから、計算中に質量の誤差が発生する。これを以下の式にて修正した。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \Delta}{\partial x_j} = 0 \quad (6)$$

すなわち、 $\Delta = 1$ で質量保存則が満たされるよう、速度を修正する。

2.2 静圧の導出方法

本研究では状態方程式と静圧分布を用いて ρ と p について解く手法を、連立して解く連立法と、以下のように入力して解く代入法について比較を行った。

$$\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{g}{R'T} p = 0 \quad (7)$$

連立する手法と異なり、式から静圧 p を導出し、これを状態方程式に導入して密度 ρ を導出する。

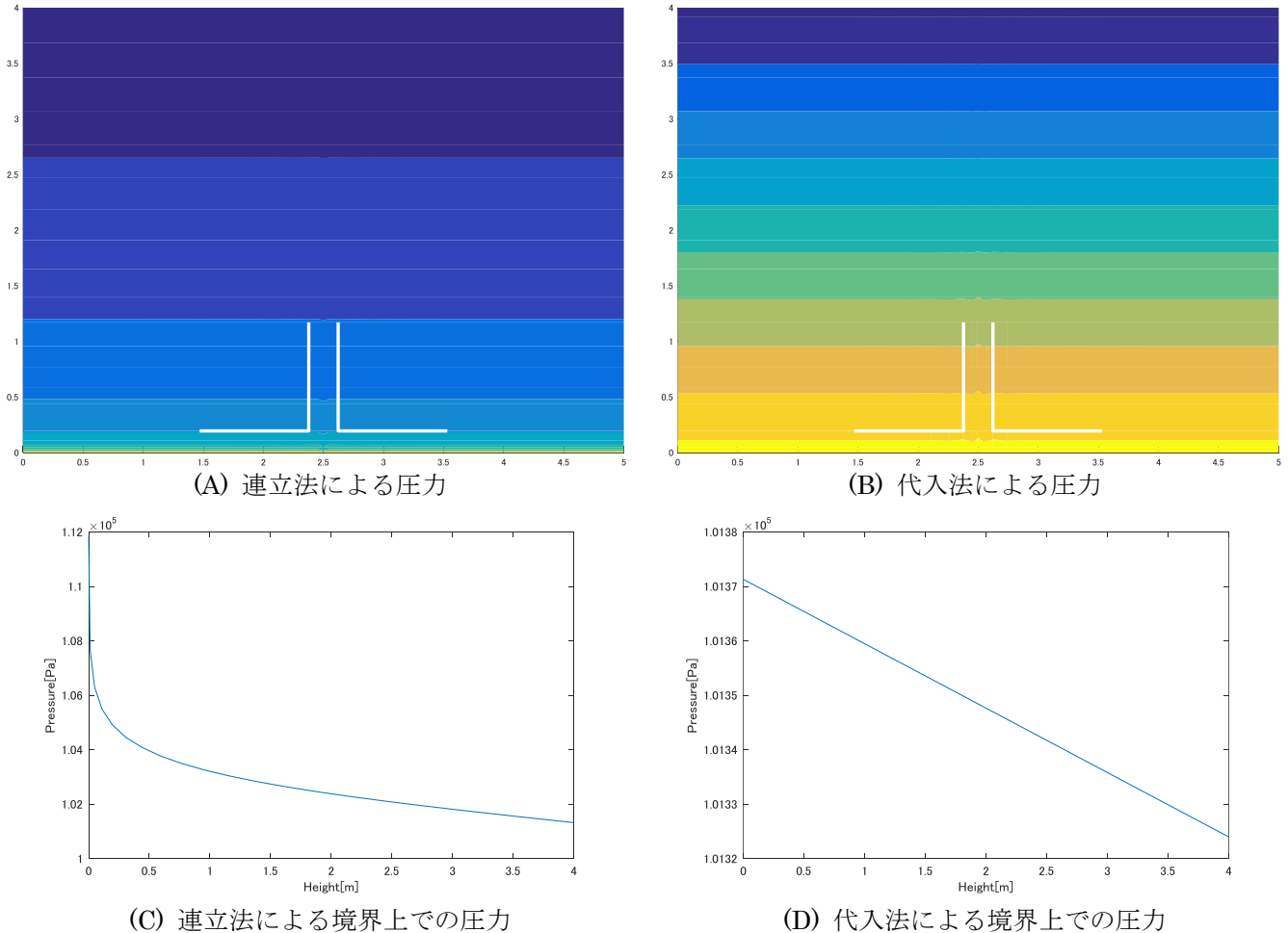
キーワード 再生可能エネルギー, SUPG, 熱流体, 有限要素法, 静圧

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 | $\text{J}/\text{s}/\text{m}/\text{K}$ | 0.0241 | 節点分割数 (横×縦) | | 21×26 |
| 熱量 | Q | J/m^2 | 1.5×10^3 | 時間刻み | s | 0.01 |
| 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 ($t = 2.500\text{s}$)



3. 小型 SUPG モデルでの検証結果と考察

数値計算に用いたパラメータを表 1 に、数値計算によって求めた結果を図 2 の(A)~(D)に示す。(A)、(B)はそれぞれ連立法、代入法によって導出した静圧 p を表している。タワー下部において、熱量 Q を与えると、図のようにコレクタ中心部周辺の静圧が低下する。(C)、(D)はそれぞれの方法で導出した左端部の圧力を示す。連立法の場合、指数曲線となり、実際の圧力分布と定性的に一致したが、値は大きくずれたものとなった。代入法の場合、値は実際の圧力分布に近い値を示した。圧力分布が線形となったが、国際標準大気⁴⁾などでも 1000m 以下を見た場合、線形と考えられるため、実用上問題ないと言える。

4. 結論

鉛直方向の静圧変化を状態方程式と静圧分布を連立、あるいは代入し導出した。それらを比較し、代入法がより定量的に実際の圧力変化と一致した。今後は代入法を用いてより長時間、高精度の数値計算を行う。

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
- 3) 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
- 4) ISO/TC 20/SC 6 Standard atmosphere