

第 I 部門

CFD による SUPG 内の流れの再現及び効率化に関する検討

京都大学工学部地球工学科 ○山岡 大樹
 京都大学大学院工学研究科 白土 博通
 京都大学大学院工学研究科 湯井 大貴

1. 要旨 近年, 世界のエネルギー事情が変化してきており, 従来の発電方法にとって代わる, 再生可能な資源を用いた環境に優しい発電方法が求められている. 本研究においては, 太陽放射の熱により発生する上昇流のエネルギーを用いたソーラーアップドラフト発電(SUPG)に注目した. まず, 実際の観測データをもとに CFD 解析を行い, タワー内部の上昇流速を算出することでその妥当性について検討した. その上で, 発電効率改善を図るため, SUPG 内部の構造を変化させ, 自然条件を考慮した同様の解析により結果の比較を行った.

2. CFD による SUPG 内部の流れ場解析 SUPG 内部の流れを調べるためにまずスペインの Manzanares にある実験施設(以下 Manzanares)における観測データをもとに CFD による定常熱流体解析を行い, その後上昇流速の観測値と解析値を比較することでその妥当性について確認した.

解析ソフトウェアに OpenFOAM(ver.4.0)を用い, 乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデルを適用した. 解析領域は十分な広さを持つ円柱領域に Manzanares と同等のスケールの SUPG を挿入する形で作成し, 地表面および SUPG 周辺に観測当時の温度データを入力することでその再現を試みた. Fig.1 に解析領域の詳細図を示す. また熱流体解析の支配方程式を以下に示す.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right\} + \{1 - \beta(\bar{T} - T_0)\} g_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\bar{T} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = (\alpha + \alpha_t) \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

(1)は連続式, (2)はRANS 方程式, (3)はエネルギー方程式を表す. $\beta[1/K]$ は体積膨張率を表す. また, 乱流エネルギー k および乱流エネルギー消失率 ϵ の輸送方程式を用いた. 境界条件は SUPG 壁面においては風速 $U=0(\text{m/s})$, 圧

力 p , k , ϵ , 熱拡散率 α_t , 動粘性係数 ν_t には適当な壁関数を用い, 温度 T においてはコレクター直下の壁面に地表面温度の観測データを入力した. 解析領域の側面および上部では U , k , ϵ , α_t , ν_t は勾配 0, p は 0, T においては気温の観測データを入力した.

以上の条件を適用し計算を行ったところ, SUPG 内部の流れは軸対象となり一様性が確認できた. 観測データと同じ水平断面におけるタワー内部の上昇流速の計算結果を Fig.2 に示す. Fig.2 によると, タワー中央付近で観測データの 15 m/s と近い値をとっていることが分かり, 概ね一致していることが確認できた. 以上から今回の CFD 解析の妥当性は得られたと考えられる.

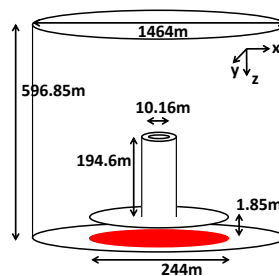


Fig.1 解析領域

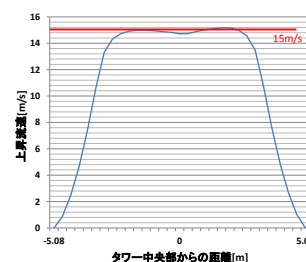


Fig.2 タワー内上昇流速

3. 導流壁付き SUPG 内部の流れ場解析 SUPG のコレクター下部に空気の流れを制御する導流壁という仕切り板を導入することで, 安定した上昇流が得られることが室内実験により確認されている. 本研究では Fig.3 のように 4 ケースの導流壁を用意し, 導流壁がないケースとの比較を行った. 解析領域の条件は前項の導流壁がない場合との比較を行うため, 同条件で定常熱流体解析を行った. その結果, カーブ型導流壁付き SUPG(以下 curve) では螺旋流, ストレート型導流壁付き SUPG(以下 straight) では直線流となり, 両者でタワー内部の流れが異なる結果となった. Fig.4 に各ケースのタワー内部の流線の様子を可視化した図を示す. この結果を踏まえ, 自然条件下における SUPG の効率化の指標に上昇流速を適用することは困難であると判断し, 次項ではタワー断面の通過流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$ で比較することとした.

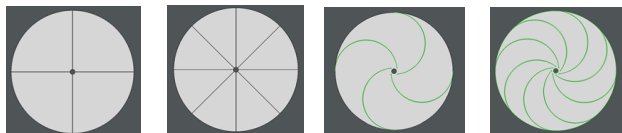


Fig.3 4 ケースの導流壁

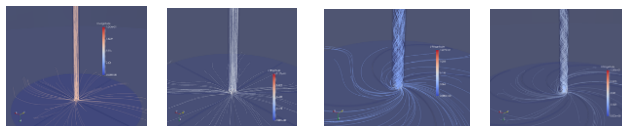


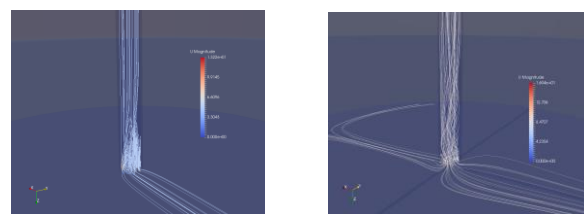
Fig.4 各ケースのタワー内部の流線図

4. 自然条件下の SUPG 内部の流れ場解析 自然条件の設定として SUPG に対し、一方向から一様な横風(1, 5, 10 m/s)が流入する状態を想定し、導流壁なし, curve, straight の各ケースについて前項同様の定常熱流体解析を行った。なお, straight については風向の偏角が 0° および 45° の 2 ケースの解析を行った。まず SUPG 内部の空気の挙動について調べた。

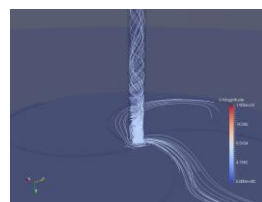
Fig.5 に示すのは導流壁なし, straight, curve における横風 10 m/s が作用した場合の SUPG 内部の空気の流線図である。Fig.5 によると、導流壁なしのケースにおいては横風がコレクター内部に流入し、タワー中心へ向かう流れを横風の下流側へと押し流している様子が捉えられた。一方で straight, curve においては、横風の上流側ではコレクター内部に流入してきた横風を導流壁によって遮断し、一部の横風をタワー内部へと送り込む様子も捉えることができた。下流側においても SUPG のメカニズム通りに外気を取り込み、タワー内部へと向かう流れが生じてい

る様子が確認された。

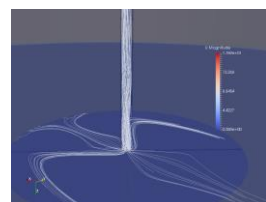
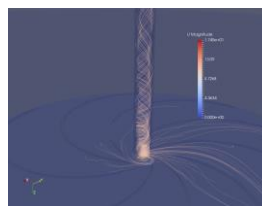
次に各ケースの比較を行うためにタワー断面の通過流量相対数をグラフにした結果、Fig.6 のようになった。なお、通過流量相対数とは各ケースの無風状態(横風 0 m/s)における流量を 1 とした場合に対する、横風を考慮した場合における流量の相対数を表している。Fig.6 によると straight において通過流量相対数が横風の値が増加しても安定しており、タワー内部に安定した空気の供給が行えていることが確認できた。特に偏角 45° の場合においては横風が作用した場合、通過流量相対数の値が 1 を超えていることから、横風を活用して流量を増加させることに成功したと言える。よって straight において SUPG の出力も安定し、効率化を図ることができると考えられる。



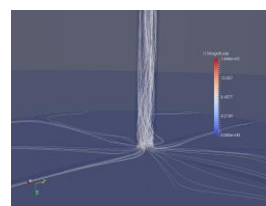
導流壁なし

4 枚 straight(偏角 0°)

4 枚 curve

4 枚 straight(偏角 45°)

8 枚 curve



8 枚 straight

Fig.5 横風が作用した場合のタワー内部の流線図

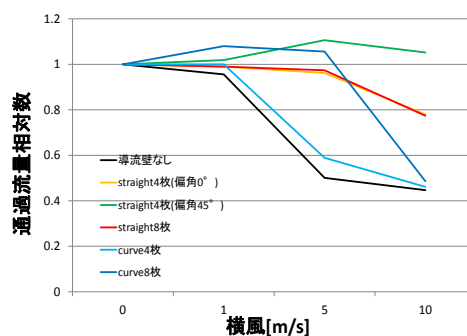


Fig.6 通過流量相対数グラフ

5. 結論

(1) CFD 解析によりタワー内部の上昇流速を算出し、Manzanares の実験施設における観測値と比較したところ、両方で値が概ね一致したため、SUPG 内部の流れの妥当性を得られたと考えられる。

(2) straight において SUPG 内部の流れに対する横風の影響を減少させることが CFD 解析により確認できたことから、straight 型導流壁を導入することで SUPG の効率向上が見込まれる。

参考文献

- (1) Haaf, W., Friedrich, K., Mayr, G., Schlaich, J., Solar Chimneys Part I: Principle & Construction of the Pilot Plant in Manzanares, *Int.J.Solar Energy*, Vol. 2, 3-20, 1983
- (2) Hadyan Hafizh - Theoretical Analysis and Experimental Optimization of Solar Updraft Power Generator, *Dissertation*, 2015