

第 2 問. 煙突の物理

導入

図 1 のように、燃焼の際に生成された気体が、断面積 A 、高さ h の高い煙突を通して温度 T_{Air} の大気中に放出される。固体が燃やされる炉の中の温度は T_{Smoke} であり、炉の中で単位時間あたりに生成される気体の体積は B である。

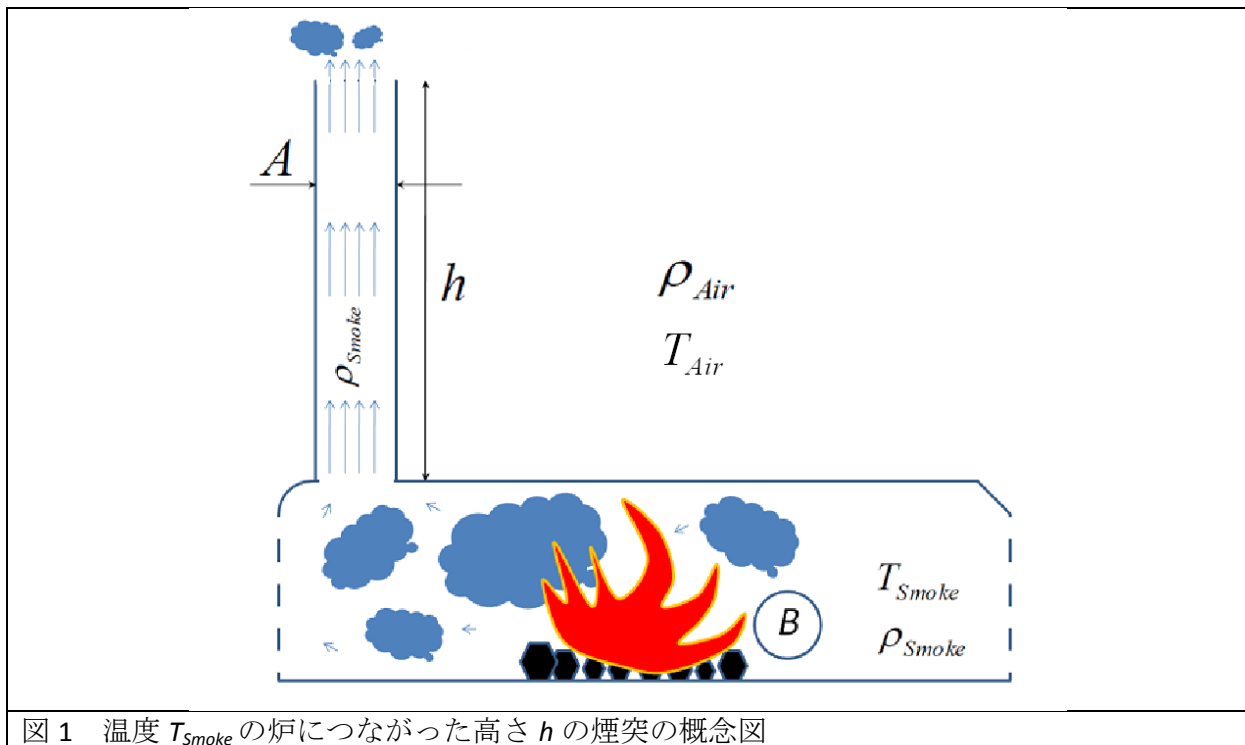
次のことを仮定する。

- 炉の中の気体の速度は無視できるほど小さい。
- 気体（煙）の密度は、同じ温度と圧力の下での大気の密度とかわらない。気体は理想気体とする。
- 空気の圧力は、静水圧の法則にしたがって変化する。高度による空気密度の変化は無視する。
- 気体の流れは、ベルヌーイの定理に従うとする。ベルヌーイの定理は、

$$\frac{1}{2}\rho v^2(z) + \rho g z + p(z) = \text{定数},$$

で表され、この左辺の値が流れの全ての位置で保存される。ここで、 ρ は気体密度、 $v(z)$ は気体の速度、 $p(z)$ は圧力、 z は高度を示している。

- 煙突を通る気体密度の変化は無視できるほど小さい。



問 1

- a) 煙突が十分に機能する（炉で生成された気体がすべて煙突から排出される）ための煙突の高さの最小値の表式を求めよ。結果は B , A , T_{Air} , $g=9.81\text{m/s}^2$, $\Delta T=T_{\text{Smoke}}-T_{\text{Air}}$ を用いて表せ。

重要：以下のすべての問では、煙突の高さはこの最小値とする。 (3.5 点)

- b) 2 つの煙突が、同じ目的に役立つように建てられている。この 2 つの煙突の断面積は等しいが、異なる地域で働くようにつくられている。1 つは、平均の外気温が $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ の寒い地域で働くように、他の 1 つは、平均の外気温が $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ の暖かい地域で働くようにつくられている。炉の温度は $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ である。寒い地域で働くように設計された煙突の高さが 100 m のとき、他の暖かい地域の煙突の高さを計算せよ。

(0.5 点)

- c) 寒い地域で働くように計算された煙突を考える。煙突の断面積が高さによって変化しないものとする。気体の速度は煙突に沿った高さによってどのように変化するか？ グラフの概略を描け。その際、煙突に気体が挿入された点を示せ。グラフの縦軸、横軸に、値を記入する必要はない。

(0.6 点)

- d) 気体の圧力は煙突に沿った高さによってどのように変化するか？ その圧力を煙突に沿った高さの関数として表せ。ただし、重力加速度の大きさを g とする。

(0.5 点)

太陽熱による発電所

煙突の中の気体の流れの物理は、太陽熱発電に発展させることができる。これを太陽煙突という。図 2 は、このアイデアを図示したものである。

太陽熱エネルギーが、図 2 にあるように、集熱部の下の領域 S で、外部から定常的に入ってくる空気を温める。この温められた空気は、煙突の中を上昇し（煙突内の矢印）、集熱部へ周囲から新しい冷たい空気が流れ込む（太い点線の矢印）。このように、空気は定常的に集熱部と煙突を流れることになる。この煙突を通過する空気の流れがタービンを動かし、それにより電気エネルギーをつくり出す。（水平面の）単位面積あたり、単位時間あたりの集熱部に届く太陽放射エネルギーを G とする。受けたエネルギーは集熱部の下にある空気を温めることにすべて使われるものとする。空気の比熱（単位質量の熱容量）を c とし、 c の温度依存は無視できるとする。太陽煙突の効率は、空気の流れによる力学的エネルギーと、煙突に新たに流入する空気が太陽熱によって熱として取り入れる太陽エネルギーとの比によって定義する。

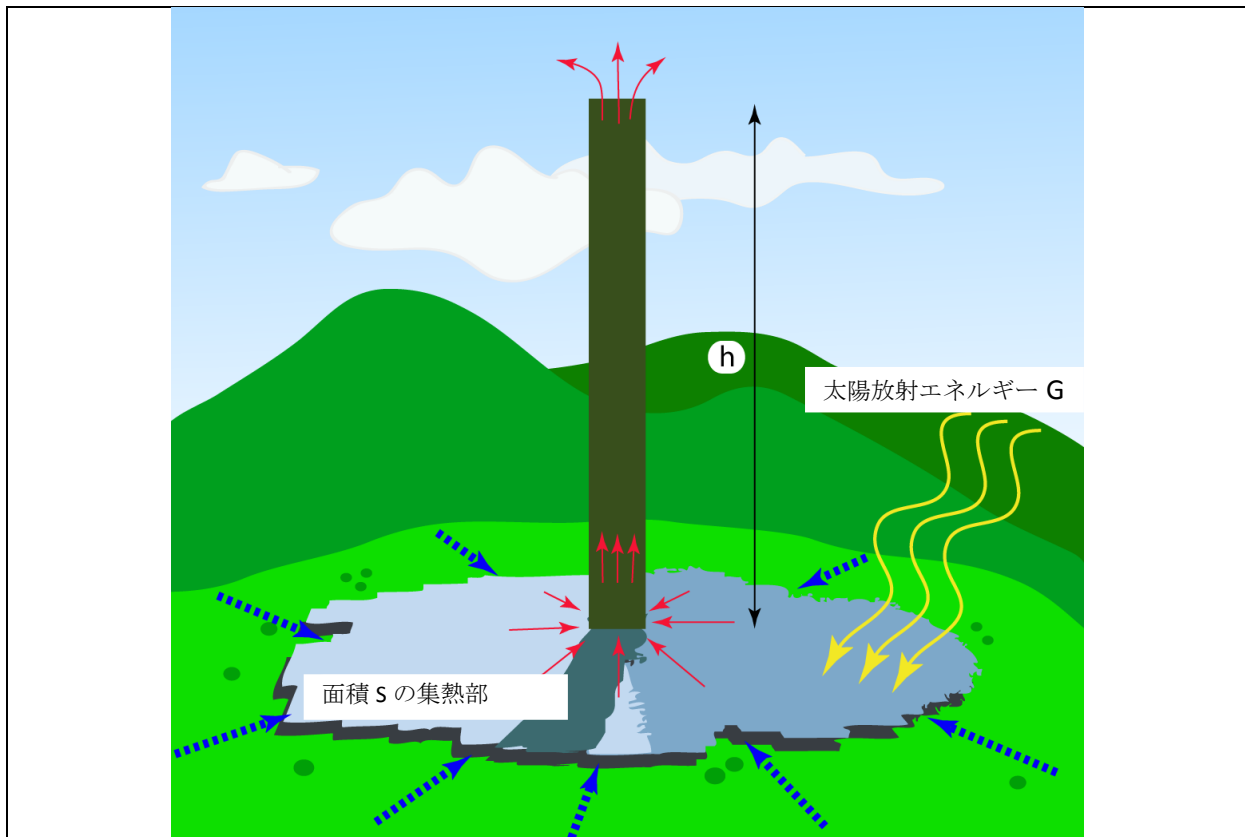


図 2 太陽煙突発電の概念図

問 2

- a) 太陽煙突の効率を与える表式を求めよ。 (2.0 点)
- b) 煙突の高さによって変換効率がどのように変化するか、グラフの概略を描け。グラフの縦軸，横軸に値を記入する必要はない。 (0.4 点)

マンザニラの実験煙突

スペインのマンザニラに建設された，太陽実験煙突は，高さが 195m，半径 5m である。その集熱部は直径 244m の円形である。この太陽煙突の運転中での空気の比熱は $1012 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ で，その熱い空気の密度は約 $0.9 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，その大気の大気温度は $T_{\text{Air}} = 295 \text{ K}$ である。マンザニラでの晴れた昼間における，水平面の単位面積あたりの太陽光の強さは $150 \text{ W}/\text{m}^2$ である。

問 3

- a) 太陽実験煙突の発電効率は何のくらいか。その数値を求めよ。 (0.3 点)
- b) どのくらいの電力が実験煙突では生み出されているか。その電力の数値を求めよ。 (0.4 点)
- c) 晴れた日には，実験煙突ではどの位のエネルギーを生み出すことができるだろうか。1日8時間晴れているとして，kWh の単位で求めよ。ただし，1kWh のエネルギーとは，1kW の電力で1時間に発熱するエネルギーのことである。 (0.3 点)

問 4

- a) 周囲の冷たい空気が煙突内に流れ込むとき，空気の温度はどの程度上昇するか。太陽煙突に対する一般的な表式を求め，その数値の概数を求めよ。 (1.0 点)
- b) この系に，単位時間あたり流れ込む空気の質量を数値で求めよ。 (0.5 点)