

問題 2-1-1 セラミック管の熱応力

ごみ焼却炉におけるごみ燃焼熱を利用する気体熱交換器として SiC 製セラミック管が図 1 のように使用されている。実使用における割れ問題を理解するためには、発生する各種の応力を解析する必要がある。セラミック管の材料特性は以下の通りである。

ヤング率：370MPa

ポアソン比：0.18

密度： 3.17 g/cm^3

熱伝導率： $56 \text{ W/m} \cdot \text{K}$

熱膨張率： $5.24 \times 10^{-6} / \text{K}$

破壊強度：400MPa

セラミック管は 1300K の炉に設置され、その外部では環境の輻射とごみ燃焼ガス上昇気の熱伝達を受け、その内部では、温度材 300K の熱交換空気により熱伝達で冷却される。セラミック管の内外面の熱伝達係数は $40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ と推定された。また、炉壁に固定されるセラミック管の開口端の温度は 573K と実測された。

- (1) 炉壁の保持において、セラミック管の自重による応力を確認せよ。
- (2) セラミック管に主に軸方向の温度分布を生じる場合の熱応力を考察せよ。
- (3) セラミック管に主に周方向の温度分布を生じる場合の熱応力を考察せよ。ただし、周方向の温度分布は、図 2 に示すようにセラミック管の横断面の上下の外表面に堆積する灰に起因する。灰の熱伝導率は $1.0 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 、外表面の熱伝達係数はセラミックス管と同じ $40 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ であることを推定した。灰はセラミック管の弾性変形に影響しないとする。また、これらの設定されている熱伝達係数が適正かどうか考察せよ。
- (4) セラミック管の開口端の固定による熱応力を計算せよ。

注：すべての計算には一定の近似を使ってもよいが、注釈する必要がある。

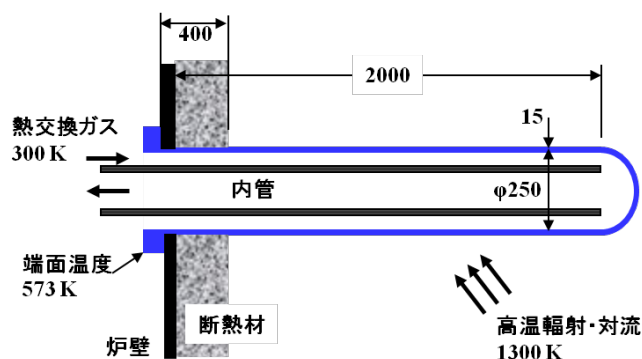


図 1 セラミック管の熱交換器

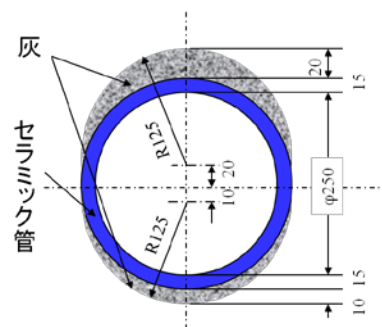


図 2 灰がセラミック管の表面に堆積する状況

略解)

解析ソフトウェアは ANSYS

(1) 炉壁の保持において、セラミック管の自重による応力を確認しよう。

セラミック管は炉壁に固定されている片持ち梁として応力を計算する。炉壁内側の断熱材は通常剛性が低いため、セラミック管への支持作用を無視した。また、梁の断面を均一の円筒とした。

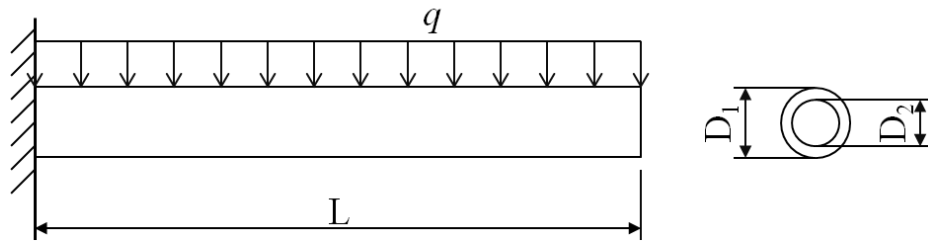


図3 片持ち梁による自重応力計算モデル

$$\sigma_{grav} = \frac{M}{I} \frac{D_1}{2} \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{2} q L^2 = \frac{1}{2} \rho g \cdot \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) L^2$$

$$I = \frac{1}{32} (D_1^4 - D_2^4)$$

$L=2000\text{mm}$, $D_1=280\text{mm}$, $D_2=250$ および他の値を式(1)に代入すると、 $\sigma_{grav} = 1.0 \text{ MPa}$ を得ることができる。

即ち、自重による応力はセラミック管の破壊強度 400 MPa よりも遥かに小さいことが分かる。さらに、後述する他の応力に相対的に比べても小さいことが分かる。

(2) セラミック管に主に軸方向の温度分布を生じる場合の熱応力を考察しよう。

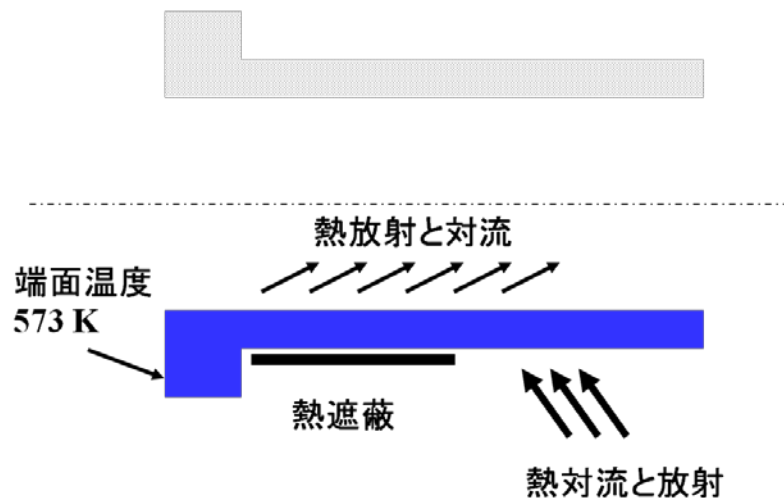


図 4 セラミック管の軸方向の温度計算モデル

セラミック管の外側に環境の熱輻射とごみ燃焼ガスの熱対流により熱を受け、その内側から低温の熱交換空気により熱を放出するのみを考慮するならば、セラミック管の軸方向の温度勾配が存在しない。開口端の低温領域および断熱材付近の外側の熱遮断の影響により軸方向の温度勾配が発生される。図 4 は軸方向の温度変化を計算するモデルを示す。開口端の端面を固定温度、断熱材に接する外表面の領域を断熱、外表面を環境温度 1300K の熱輻射とガス熱伝達、内表面を温度 700K の内管への熱輻射と温度 300K の空気への熱伝達の境界条件とした。周方向の変化を考慮に入れていないため、計算は 2D 軸対称モデルとすることができる。

計算は FEM を使う必要がある。図 4 の下半分の断面に対して要素を分割する。

図 5 は温度分布の計算結果である。計算は軸対称モデルで行ったが、結果の表示は分かりやすいため、3D の温度コンターを使った。管の長さは適当に選んだが、条件の解析条件では炉内の部分をさらに長くしても、軸方向の温度勾配は非常に小さくなり、径方向の温度勾配しか存在しなくなる。断熱材に接する領域から炉内側の方向に向けて、温度勾配が大きい部分が存在する。この部分で、約 300mm 長さでは温度変化は約 800K となることが分かった。

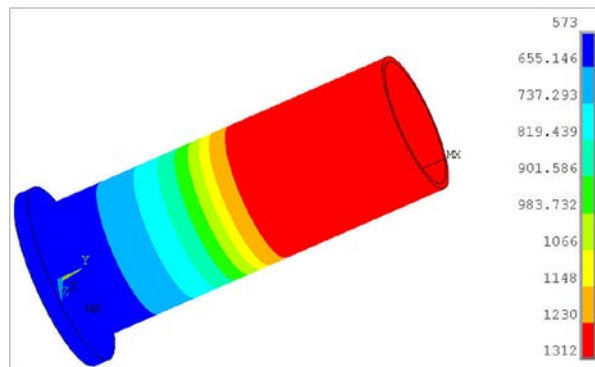


図5 セラミック管の軸方向温度の計算結果

図5の温度条件におけるセラミック管の熱応力を同じくFEMで計算した。熱応力FEM解析では伝熱解析モデルと同じメッシュが使われた。図6に示したように、最大応力は約40MPaであることが分かった。この応力値はセラミック管の破壊強度に比べてやはり小さいことが分かった。

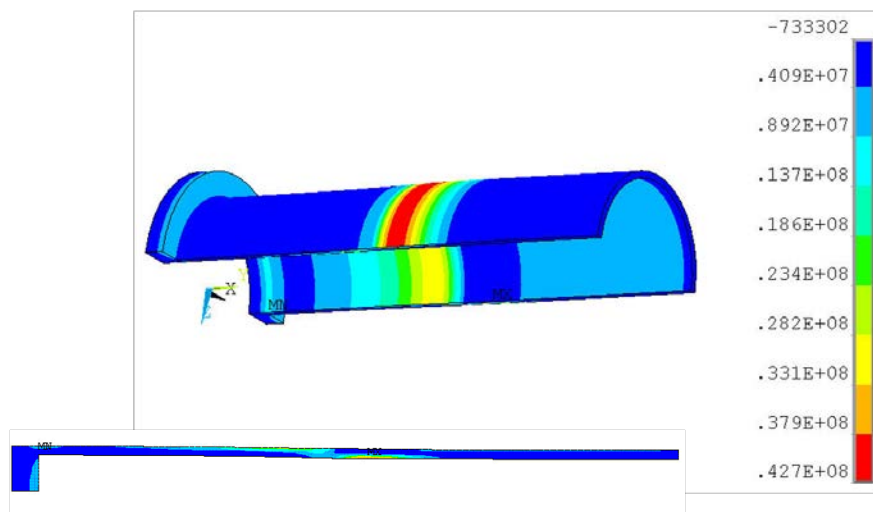


図6 主に軸方向温度分布に起因する熱応力(相当応力)のFEM解析結果
(下図は2D軸対称モデルの解析結果)

(3) セラミック管に主に周方向の温度分布を生じる場合の熱応力を考察しよう。

図2の断面を有する一定長さのセラミック管について、外表面を環境温度1300Kの熱輻射とガス熱伝達、内表面を温度700Kの内管への熱輻射と温度300Kの空気への熱伝達の境界条件とした3Dモデルで伝熱解析を行った。

図7は温度分布の解析結果を示す。管の温度は両側面で高く、上下面で低い。その最大差は約350Kとなった。

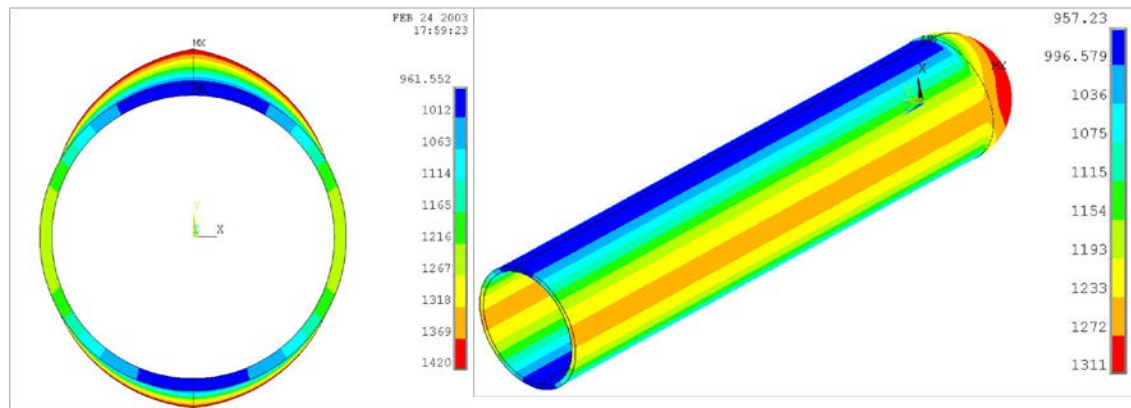


図7 堆積された灰によるセラミック管の周方向温度分布の解析結果

図7の温度条件におけるセラミック管の熱応力を同じく3DのFEMで計算した。図8に示したように、最大応力は約300MPaであることが分かった。この応力値はセラミック管の破壊強度に比べて大きい。この結果より、管内の温度勾配は軸方向より周方向の方が熱応力により大きく影響することが分かった。さらに、セラミック構造の安全設計、すなわち安全係数5以上とする場合、このセラミック管には割れ発生の可能性が十分あると判断される。

(4) セラミック管の開口端の固定による熱応力を計算しよう。

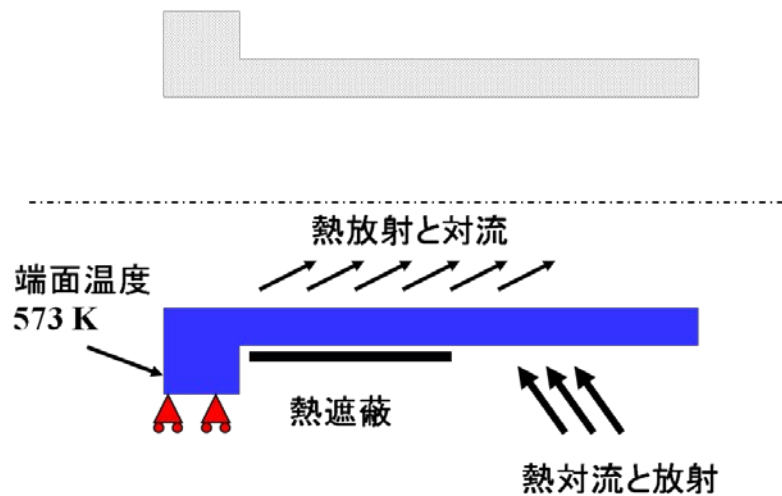


図8 セラミック管の開口端が拘束される熱応力解析モデル

セラミック管の開口端は何らかのジグで固定されるので、その変位が完全に拘束されることがたまたま考えられる。ここで、おまけに開口端を完全に拘束したモデルでの熱応力を解析してみた。

図8は図4と同じ伝熱モデルであるが、熱応力解析モデルでは、開口端の径方向変位が拘束された。この時の熱応力は開口端に近い直管で最大となり、その大きさは約 600MPa となった。例えば、このような拘束が行われる場合、確実にセラミック管が割れる。実は、このような拘束が実際になかなか実現されにくい。このような大きな応力を得るために、大きな拘束力も必要からである。

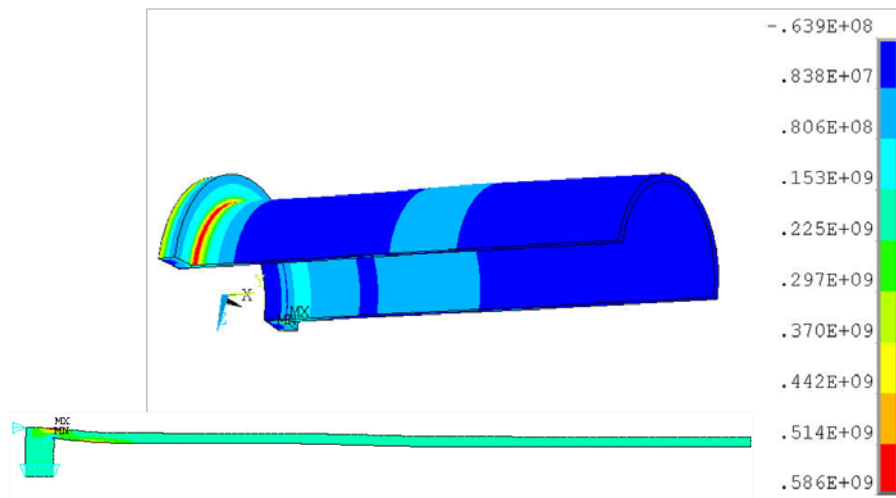


図9 セラミック管の開口端が拘束された場合の熱応力の解析結果
(下図は 2D 軸対称モデルの解析結果)

以上