

【整番】 HE-02-TM-004	【標題】 1次元的な熱流れの簡易定常伝熱計算について
分類：熱(熱伝達)／種別： 技術メモ	作成年月：H25.11／改訂：Ver0.0 (H26.5) 作成者：N.Miyamoto

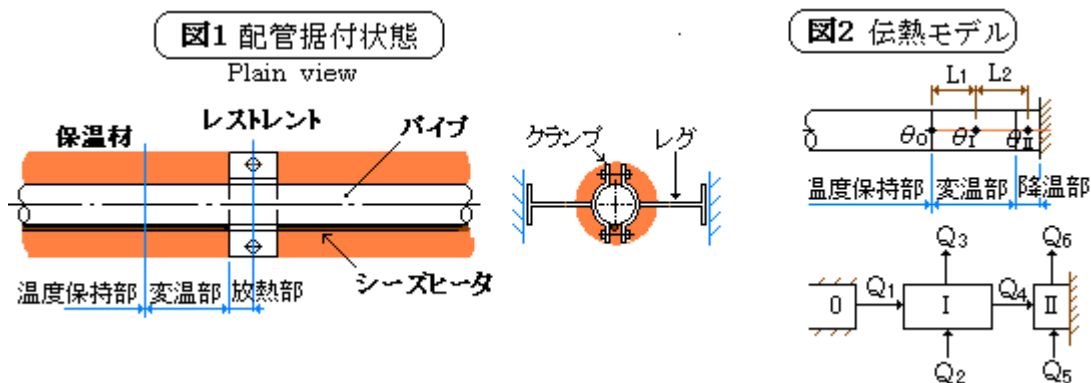
全9枚

伝熱計算では、伝熱構造が2次元、3次元になると解析ソフト(例えば Trump)によらざるを得ないが、熱流れが1次元流れやその組み合わせでモデル化できる場合は必ずしもそうではなく、簡単な行列式計算でもそこそこの答えを得ることができる。ここでは TS 作成者の検討例をひいて1次元的な熱流れの伝熱計算方法を紹介してみる。内容的には公式を運用したもので決してレベルの高いものではないが、以下の検討例は手元にコンピュータソフトがないとき、モデル化/入力に不馴れするとき、あるいは熱解析の実施に踏ん切りがつかないときなどに、解決の糸口を与えることもあるのではないかと思う。

1. サポートからの放熱による温度降下(検討例)

(1) 配管サポート部分はいくら保温しても大気に露出する部分があり、大なり小なり熱損失が起きる。運転中は圧倒的な流体熱量があって、熱損失もこれに伴う温度降下も全然気にならないが、流体が停頓すると、保温表面やサポート部分からの熱流出で内部流体や管壁の温度が降下する。停頓時も流体温度を維持したい場合、あるいは流体の凝固によるトラブルを嫌う場合は、加熱装置、例えばトレースやヒータの類いを配管に巻きつけて加熱する必要がある。

図1は、このような温度保持を必要とする配管の例であるが、シーズヒータによる温度維持にも拘わらず、停頓時に流体が凝固し再起動してもなかなか閉塞が解除できないという事態が起きた。このとき、注目されたのは、耐震レストレント(耐震サポート)部分の放熱であった。レストレントはかなり外部に突出しており一種の放熱フィンになっており停頓した液の凝固を誘起した疑いがある。



この場合、配管系全体を検討対象にするのは大変なので、レストレント廻りに着目してその片側部分を図2のようにモデル化した。このモデルは次の3つの要素が連結したものである。

①温度保持部→要素0、 ②変温部→要素I、 ③降温部→要素II

①は配管スパン区間であるが、この部分は表面温度計によって監視されコントロールされており運転記録からも温度変化は殆どないので管体温度を θ_0 (一定)とする。②は①から③への熱の流れが起きる部分で、区間長を適宜仮定するとともに管体温度を θ_I として、①からの流入熱 Q_1 とシーズヒータからの入熱 Q_2 及び保温表面からの放熱 Q_3 を考える。③はレストレントのクランプ部分を被った部分で、管体温度 θ_{II} として②からの流入熱 Q_1 とシーズヒータからの入熱 Q_4 及び保温/レガ露出部分からの放熱 Q_6 を考える。このモデルの計算では、

- ① レストレント廻りの内部液体には温度差(密度差)による軽微(?)な対流伝熱が予想されるが、煩雑なので熱伝導のみを考える、また、
- ② 管ークランプは接触伝熱となるが、影響は少ないとみて直接伝熱とする、また
- ③ 放熱表面の境膜係数(熱伝達係数)は 10~20Kcal/m²hr°Cとする。
- ①②の仮定は、よりきつい温度降下を見積るので、配管の熱効率を問う場合、安全側になる。

図 2 の伝熱モデルにおける熱バランスは、次の通り。

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4, \quad Q_4 + Q_5 = Q_6 \quad \text{-----(1a),(1b)}$$

Q_1 と Q_4 は熱伝導、 Q_3 は円管伝熱、 Q_6 は平板伝熱によるもの(*1)で、 Q_2 と Q_5 は直接伝熱によるものである。従って上式は次のようになる。

$$\{(\lambda_p A_p + \lambda_s A_s)/L_1\}(\theta_o - \theta_I) + q_s H_I = 2\pi [\sum \ln\{(r_{i+1}/r_i)/\lambda_i\} + 1/(h_{ark})]^{-1} H_I (\theta_I - \theta_a) \\ + \{(\lambda_p A_p + \lambda_s A_s)/L_2\}(\theta_I - \theta_{II}) \quad \text{-----(2a)}$$

$$\{(\lambda_p A_p + \lambda_s A_s)/L_2\}(\theta_I - \theta_{II}) + q_s H_{II} = Q_6 \quad \text{-----(2b)}$$

ここで θ = 管体温度(°C)、 A = 熱流れ断面積(m²)、 L_1, L_2 = 図 2 の伝達長さ(m)、 H = 要素長さ(m)、
 λ = 熱伝導率(Kcal/mhr°C)、 q_s = シーズヒータ単位発熱量(Kcal/mhr)、
 h = 境膜係数(Kcal/m²hr°C)、 r = 保温各層の半径(m)、 Q_6 = レストレントからの放熱(Kcal/hr)
 サフィックス) 0, I, II → 要素番号、 a, s, p → それぞれ”外気”, ”内部液体”, ”管”
 i, k = 保温の各層番号、最外層番号、

なお $E_0 = \{(\lambda_p A_p + \lambda_s A_s)/L_1\}$ 、 $E_I = 2\pi [\sum \ln\{(r_{i+1}/r_i)/\lambda_i\} + 1/(h_{ark})]^{-1} H_I$ 、 $E_{II} = \{(\lambda_p A_p + \lambda_s A_s)/L_2\}$ とすれば、上式は次のように表わせる。

$$E_0(\theta_o - \theta_I) + q_s H_I = E_I(\theta_I - \theta_a) + E_{II}(\theta_I - \theta_{II})$$

$$E_{II}(\theta_I - \theta_{II}) + q_s H_{II} = Q_6$$

この連立式から、

$$\theta_I = \{1/(E_0 + E_I)\} \{E_0 \theta_o + E_I \theta_a - Q_6 + q_s(H_I + H_{II})\} \quad \text{-----(3a)}$$

$$\theta_{II} = \{(E_0 \theta_o + E_I \theta_a)/(E_0 + E_I)\} - \{1/(E_0 + E_I) + (1/E_{II})\} Q_6 \\ + \{(H_I + H_{II})/(E_0 + E_I) - (H_{II}/E_{II})\} q_s \quad \text{-----(3b)}$$

式の右辺のパラメータ $E_0, E_I, E_{II}, H_I, H_{II}, \theta_a, q_s$ が通常、既知であるから、レストレントからの放熱量 Q_6 がわかれば、(3a)と(3b)式から管体温度 θ_I, θ_{II} (特に θ_{II}) を知ることができる。

- (2) レストレント部分からの放熱量 Q_6 は、図 3 のような平板構造モデルから得られる。

モデルとしては 1/4 モデル、7 要素に分割している。要素中心に節点があり、要素番号と節点番号は同じになる(重複する)。各要素は入熱境界/放熱境界/断熱境界に囲われている。任意要素の熱バランスは次の通り。

$$Q_{n-1} + Q_{in} = Q_{n+1} + Q_{on} \quad \text{-----(4)}$$

但し Q_{n-1} = 要素 n ~ 要素(n-1)の熱移動量(Kcal/hr)、 Q_{n+1} = 要素 n ~ 要素(n+1)の熱移動量(Kcal/hr)

Q_{in} = 入熱境界 → 要素 n の熱移動量(Kcal/hr)、 Q_{on} = 要素 n → 放熱境界の熱移動量(Kcal/hr)

Q_{n-1} と Q_{n+1} は熱伝導、 Q_{in} は熱伝導また Q_{on} は平板伝熱による熱移動量である。故に(3)式は

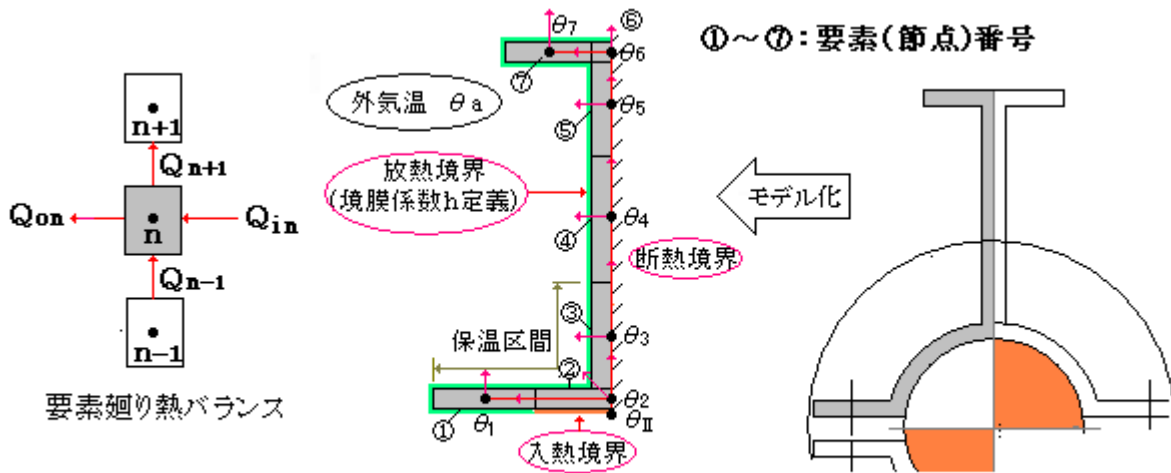


図3 レスト部分の伝熱モデル

$$\{\lambda_{n-1} \cdot A_{n-1} / L_{n-1}\} (\theta_{n-1} - \theta_n) + (\lambda_n A_{in} / L_{in}) (\theta_i - \theta_n) = \{\lambda_n \cdot A_n / L_n\} (\theta_n - \theta_{n+1}) + \{\sum (t_j / \lambda_j)_n + 1/h_{on}\}^{-1} A_{on} (\theta_n - \theta_a)$$

この式を変形して、

$$-R_{n-1} \theta_{n-1} + (R_n + R_{in} + R_{on}) \theta_n - R_n \theta_{n+1} = R_{in} \theta_i + R_{on} \theta_a \quad \text{-----(5a)}$$

但し $R_{n-1} = \{\lambda_{n-1} \cdot A_{n-1} / L_{n-1}\}$ 、 $R_n = \{\lambda_n \cdot A_n / L_n\}$ 、

$R_{in} = (\lambda_n A_{in} / L_{in})$ 、 $R_{on} = \{\sum (t_j / \lambda_j)_n + 1/h_{on}\}^{-1} A_{on}$

- ここで θ = 要素中央の節点温度(要素平均温度)(°C)、 θ_i = 入熱境界の温度(°C)
- θ_a = 放熱境界の温度(大気温)(°C)、 h_{on} = 要素 n 放熱面の境膜係数(Kcal/m²hr°C) (*2)
- R_{n-1} = 節点(n-1) ~ 節点 n の伝達係数(Kcal/hr°C)、
- R_n = 節点 n ~ 節点(n+1) の伝達係数(Kcal/hr°C)、
- R_{in} = 入熱境界の伝達係数(Kcal/hr°C)、 R_{on} = 放熱境界の伝達係数(Kcal/hr°C)、
- λ_n = 要素 n の熱伝導率(Kcal/mhr°C)、 λ_j = 平板要素 j の熱伝導率(Kcal/hr°C)、
- λ_{n-1} = 節点(n-1) ~ 節点 n の平均熱伝導率(Kcal/mhr°C)
- λ_n = 節点 n ~ 節点(n+1) の平均熱伝導率(Kcal/mhr°C)、
- L_{in} = 入熱境界 ~ 節点 n の距離(m)、 L_n = 節点 n ~ 節点(n+1) の距離(m)、
- L_{n-1} = 節点(n-1) ~ 節点 n の距離(m)、 A_{on} = 要素 n の放熱面積(m²)、
- A_{in} = 要素 n の入熱面積(m²)、 A_{n-1} = 節点(n-1) ~ 節点 n の平均断面積(m)、
- A_n = 節点 n ~ 節点(n+1) の平均断面積(m)、 t_j = 平板要素 j の厚さ(m)
- サフィックス : n → 要素ないし節点番号(=1,2,3,4,...)、j → 平板要素番号(=1,2,3,...)

この式は一般形であって図3の②に該当する。図3の①では R_{n-1} 、 θ_{n-1} 、 R_{in} 、 θ_i を無視して

$$R_{on} \theta_n - R_n \theta_{n+1} = R_{on} \theta_a \quad \text{-----(5b)}$$

図3の⑦では R_n 、 θ_{n+1} 、 R_{in} 、 θ_i を無視して

$$-R_{n-1} \theta_{n-1} + R_{on} \theta_n = R_{on} \theta_a \quad \text{-----(5c)}$$

また図3の③④⑤⑥では、

$$-R_{n-1} \theta_{n-1} + (R_n + R_{on}) \theta_n - R_n \theta_{n+1} = R_{on} \theta_a \quad \text{-----(5d)}$$

図3の場合、(4)式を連立させてマトリックス式を得る。

$$\begin{bmatrix} R_{o1}, & -R_1, & 0, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ -R_1, & (R_2+R_{i2}+R_{o2}), & -R_2, & 0, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & -R_2, & (R_3+R_{o3}), & -R_3, & 0, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & -R_3, & (R_4+R_{o4}), & -R_4, & 0, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & -R_4, & (R_5+R_{o5}), & -R_5, & 0 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & -R_5, & (R_6+R_{o6}), & -R_6 \\ 0, & 0, & 0, & 0, & 0, & -R_6, & R_{o7} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{o1} \theta_a \\ R_{i2} \theta_i + R_{o2} \theta_a \\ R_{o3} \theta_a \\ R_{o4} \theta_a \\ R_{o5} \theta_a \\ R_{o6} \theta_a \\ R_{o7} \theta_a \end{bmatrix} \quad \text{-----(6)}$$

各節点温度($\theta_1 \sim \theta_7$)はこの連立1次式を解いて得られる。保温/レグ露出部分からの全放熱量 Q_6 は要素1への入熱量の4倍(図3は1/4モデルの故)に等しいので、次式から容易に得られる。

$$Q_6 = 4(\lambda_1 A_{i1}/L_{i1})(\theta_i - \theta_1) \quad \text{-----(7)}$$

(3) 未知の管体温度(θ_{II})の計算手順は次のようになる。

ステップ1 モデルのパラメータ(寸法/物性/ヒータ発熱量/境界温度など)の設定

ステップ2 レストレント部の各要素及び各境界の伝達係数の算定

ステップ3 (6)式の連立1次方程式から、各要素の節点温度を求める。

ステップ4 (7)式からレストレントからの放熱量 Q_6 を求める。

ステップ5 (3a)(3b)式の伝達係数 E_o, E_I, E_{II} の算定

ステップ6 (3b)式からレストレント部分の管体温度 θ_{II} を計算。

ステップ3,4の節点温度と放熱量は θ_{II} の関数形になる。本ケースでは要素数は7個なので、連立1次式を代数で解いてもそれほど手間ではない。しかし要素数が多ければ、マトリックス演算によってもよい(*3)。ステップ6では、ごく簡単な θ_{II} の1次式を解くことになる。

(4) 25A Liq.Na 配管 x 保温厚さ 30mm に関する計算例を以下に示す。計算条件は煩雑になるので、結果のみを記す。なお θ_{II} と θ_0 を未知としている。

$$\text{レストレントの温度分布: } \theta_1 = 0.945 \theta_{II} + 1.6135, \quad \theta_2 = 0.9918 \theta_{II} + 0.245$$

$$\theta_3 = 0.836 \theta_{II} + 5.05, \quad \theta_4 = 0.474 \theta_{II} + 15.8$$

$$\theta_5 = 0.242 \theta_{II} + 22.7, \quad \theta_6 = 0.1774 \theta_{II} + 24.6$$

$$\theta_7 = 0.156 \theta_{II} + 25.2$$

$$\text{レストレントの放熱量: } Q_6 = 0.1223 \theta_{II} - 3.68$$

$$\text{レストレント部分の管体温度: } \theta_{II} = 0.8644 \theta_0 + 8.8 \quad \leftarrow \text{(3b)式の結果}$$

実際の制御温度 θ_0 は 200°C 程度であった。その場合、

$$\theta_{II} = 0.8644 \times 200 + 8.8 = 182^\circ\text{C}$$

レストレントの温度分布 [$\theta_1 \leftarrow \theta_2 \rightarrow \theta_3 \rightarrow \theta_4 \rightarrow \theta_5 \rightarrow \theta_6 \rightarrow \theta_7$] は、次の通り。

$$174 \leftarrow 181 \rightarrow 157 \rightarrow 103 \rightarrow 66.7 \rightarrow 57 \rightarrow 54(^\circ\text{C}) \text{-----保温がなくなった要素4から急激に降下}$$

管体温度は 200°C から 182°C まで、18°C ダウンしている。ただ凝固点が 170°C なのでまだ間がある。

[この手計算に併行して、顧客はコンピュータ解析を行ったが、5°Cぐらいの差で良好に一致していた。結論としては停頓時もヒータ加熱が効いて凝固には至らないということになった。その後、上流にある顧客支給の特殊トラップにもともと酸化Naが付着していることが判明した。]

2. 一次元熱流れのそのほかの検討例

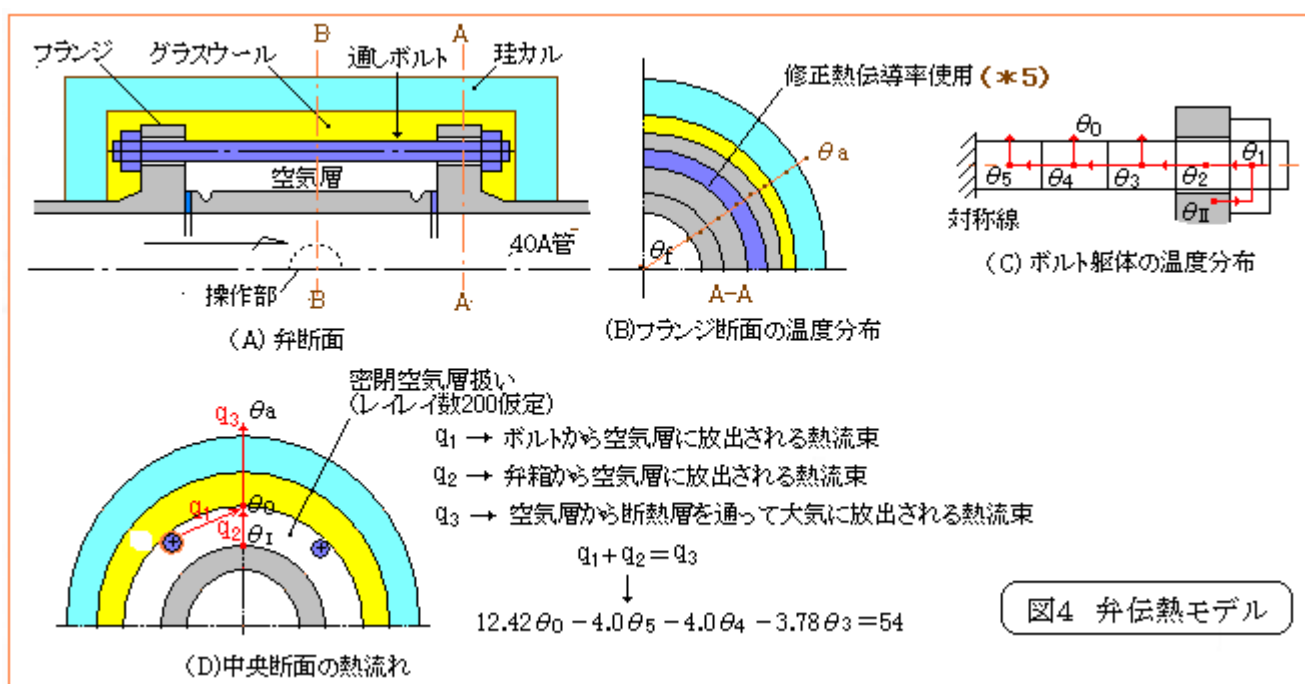
設備設計では、運転面から上記のような外部放熱に伴う温度降下が検討(チェック)対象になるほか、強度に絡んで部材内の温度差や材料の温度状態が検討対象になることが多い。これらは特に断熱構造廻りで議論されることが多い。下記に二つの例を示す。

(1) バタフライ弁に似た構造の制御弁で破損トラブルがあったが、口径の割りに通しボルトが長くて管体

ボルトの間に温度差があるのではという懸念が出された。断熱材に囲われているので問題になるような温度差があるとは思えないが、一応確認のため1次元的な扱いで検討を行った。図4に検討モデルを示す。熱はフランジに接触したナットの座面から入りボルト廻りの空気層に抜けたと仮定し、

- ・まず A-A 断面の熱流れを円管伝熱で扱って座面温度を予測し、
- ・ボルト躯体について座面温度を起点にした5つの温度分布式を設定するとともに
- ・フランジにはさまれた区間に下図(D)のような熱流れを想定して1つの温度分布式を設定し
- ・これら6つの連立1次式から、ボルト廻り温度 θ_0 、ボルト要素温度 $\theta_1 \sim \theta_5$ を求め、
- ・ $\theta_1 \sim \theta_5$ から得られるボルト平均温度と弁箱温度との差を求める。

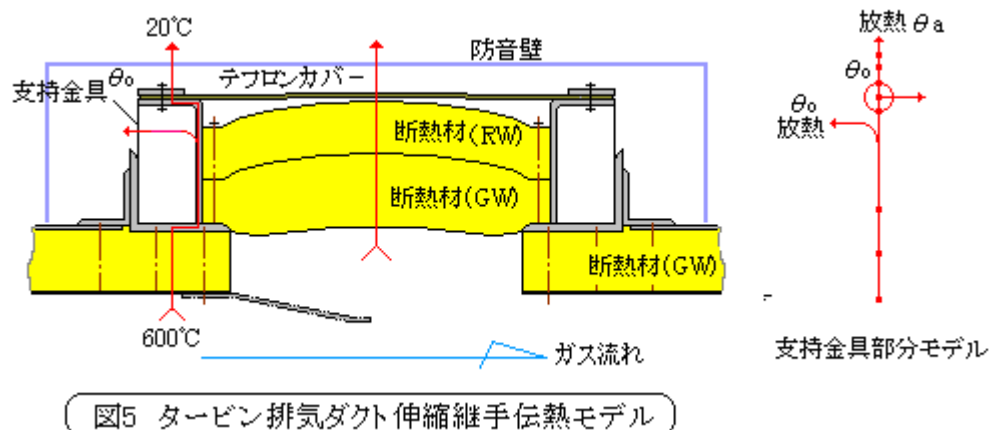
検討結果は予想通りわずか 1.1°C であり、温度差についての疑いは解消された。



なお、図4のモデルでは密閉空気層を見掛けの熱伝導率を用い処理している(*4)。設備における伝熱構造ではこの種の空気層の介在が多い(次項でも然り)ので、情報を整理しておく必要があるようだ。

(2) タービン排気ダクトの断熱材を用いた伸縮継手の支持金具やテフロンカバーで亀裂や劣化が起きた。

そこで図5のような熱流れを想定して大雑把に温度分布を検討した。結果的に、支持金具に50°Cを越える温度分布があること、テフロンカバーの温度が耐用を越えること、防音囲いの中で温度成層化が大きくなっていることが予想された。正式には実測温度をベースにして熱応力解析が実施されている。



【 補足説明 】

(*1) 1次元熱流れでは、これら3つの伝熱関係は頻繁にでてくる。テキスト⁽¹⁾によれば、

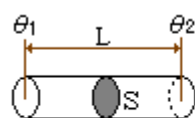
(a)一次元熱伝導： $Q = \lambda S(\theta_1 - \theta_2)/L$ (フーリエ則)

(b)平板伝熱： $Q = (\theta_1 - \theta_{n+1})S / \{1/h + \sum(t_i/\lambda_i)\}$

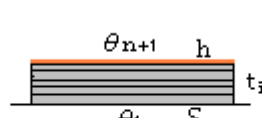
(c)円管伝熱： $Q = 2\pi L(\theta_1 - \theta_{n+1}) / \{1/(h_1 r_1) + \sum \ln(r_{i+1}/r_i)/\lambda_i + 1/(h_2 r_n)\}$

ここで、 λ = 熱伝導率、 h = 熱伝達率(境膜係数)、 θ = 温度、 Q = 熱流束(Kcal/hr)

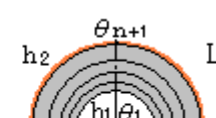
S = 伝熱面積、 L = 長さ、 t = 層厚さ、 r = 半径



(a) 1次元熱伝導



(b) 平板伝熱



(b) 円管伝熱

(*2) 放熱面の境膜係数(熱伝達係数)は、**輻射伝熱**と**対流伝熱**からなっており、「保温等の表面温度と大気温度の表面温度差」、「大気の状態(風など)」及び「放熱表面の状態(平滑度)」によって決まってくる。問題は**表面温度差**で、保温計算などでは表面温度差をある程度見越して決めているが、表面温度差が見切れないときは、表面温度差を仮定して温度分布計算を行い、もし仮定とマッチしないときはリセットして再計算するといった手続きが必要になる。この場合、多少の設定誤差は影響が少ないが、温度差が大きいと輻射伝熱分の誤差が大きくなるので注意する必要がある。具体的な表面熱伝達係数の設定については、

BS 5970 ; 1981 Thermal insulation of pipe-work and equipment

(in the temperature range -100°C to $+870^{\circ}\text{C}$)

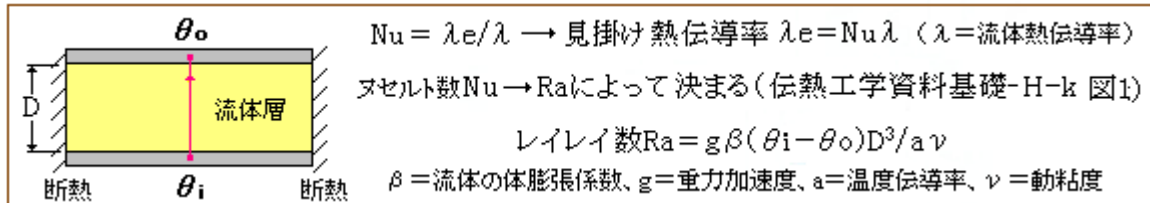
の 34.5 Surface coefficient に詳しい。この内容は、下記の TS で紹介している。

[HE-02-TM-002 BS5970 による外表面熱伝達係数の算定]

(*3) n 元連立 1 次方程式の N88-Basic プログラムは末尾の通り⁽²⁾。N88-Basic は旧弊になったがこのロジックは変わらないはず。運用例としては、

- まず θ_{ii} を仮定し、このプログラムを用いて各要素節点温度 θ を求める。
- 次に放熱量 Q_6 を計算し、その結果を(3b)式に代入して θ_{ii} を求める。
- もしその結果が仮定と合致しないなら合致するまで以上の手順を繰り返す。

(*4) 水平の密閉流体層は、層の厚さが薄いと静止流体で扱えるが、厚くなると対流が起きて伝熱がよくなる。その場合、層の伝熱は流体熱伝導率 λ にヌセルト数 Nu で割り増しされた見掛けの熱伝導率 λe を用いて扱える⁽³⁾。即ち $q = (\lambda e/D)A_{io}(\theta_i - \theta_o)$ 。

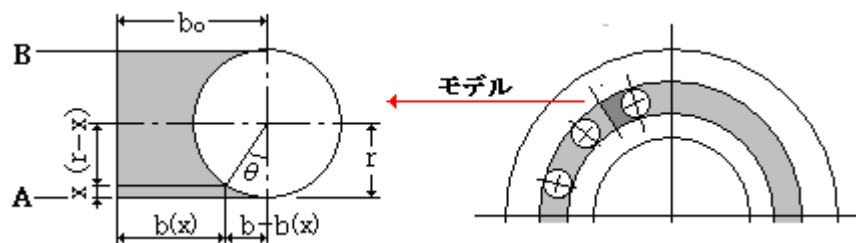


この場合、 Nu の値は流体の種類によらず無次元数レイレイ数 Ra で決まるが、温度差 $(\theta_i - \theta_o)$ を含むので、繰り返しによって Nu を確定することになる。即ち

- ① 見込みによって λe 値を仮定し系全体の温度分布を求めた上で、
- ② 得られた層間温度差 $(\theta_i - \theta_o)$ を用いてレイレイ数 Ra を計算し、
- ③ $Nu-Ra$ 相関図の Nu 値から λe 値を求める。そして
- ④ これを仮定した λe 値と比べほぼ同じであれば終了、差異が大きければ λe 値をリセットして①-③を繰り返す。

当り計算では正確を追求する必要はないので 3、4 回の反復で済むと思う。

(*5) ボルト穴のサークルに沿った円環は、ボルト穴の介在で見掛けの熱伝導率がダウンする⁽⁴⁾。この見掛けの熱伝導率(修正熱伝導率)の求め方を以下に示す。



ボルトサークルのリング要素部分(着色部分)はカーブしているが、孔数が多いと、上図左のような直線モデル(ボルト孔ハーフモデル)で近似できる。図の着色部が熱の通過部分である。

着色部の伝熱量 Q は、

$$Q = b(x) \cdot \lambda \cdot (dT/dx) \rightarrow T_A - T_B = (Q/\lambda) \int_0^{2r} [1/b(x)] dx \quad (\text{但し } T = \text{温度})$$

ボルト孔のない場合の幅 b_o での伝熱量は $Q^* = b_o \lambda^* / (2r) (T_A - T_B)$ であるから、 $Q = Q^*$ とおいて

$$\lambda^* = (2r/b_o) \lambda [1 / \int_0^{2r} [1/b(x)] dx]$$

λ^* は孔がないとした時の熱伝導率(修正熱伝導率)で、孔の存在を気にせずに円環伝熱モデルに使用できる。ここで $b(x) = b_o - r \sin \theta$ 、 $x = r(1 - \cos \theta)$ 、 $dx/d\theta = r \sin \theta$ であるから、

$$\begin{aligned} \int_0^{2r} [1/b(x)] dx &= r \int_0^{\pi/2} [\sin \theta / (b_o - r \sin \theta)] dx = r \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [\sin \theta / (b_o - r \sin \theta)] dx \\ &= r [-z + \{2 b_o / (b_o^2 - r^2)^{0.5}\} \tan^{-1} \{(b_o^2 - r^2)^{0.5} \tan(Z/2) / (b_o - r)\}] \cdot \pi/2 \end{aligned}$$

$$= -\pi + \{4 b_0 / (b_0^2 - r^2)^{0.5}\} \tan^{-1}\{(b_0^2 - r^2)^{0.5} / (b_0 - r)\}$$

例えば $b_0 = 37\text{mm}$ 、 $r = 14.5\text{mm}$ の場合、

$$\int_0^{2r} [1/b(x)] dx = -\pi + 2.18 \times 1.97 = 1.155 \rightarrow \lambda^* = (2 \times 14.5 / 37) \times (1 / 1.155) \lambda = 0.68 \lambda$$

このような修正熱伝導率の設定方法は固体の変則的な伝熱形態に適用できる。

<添付：連立1次方程式の計算プログラム>

```

10 ' ***** LEQ.ACC メイン *****
20 '
30 INPUT "元数nを入れてください";N
40 '
50 DIM A(N,N),L(N,N),U(N,N),B(N),X(N),Y(N)
60 '
70 PRINT "係数行列を入力します"
80 FOR I=1 TO N
90   FOR J=1 TO N
100     PRINT "A(";I;",";J;")=";
110     INPUT A(I,J)
120   NEXT J
130 NEXT I
140 '
150 PRINT
160 PRINT "A="
170 PRINT "r";SPC(12*N);"r"
180 FOR I=1 TO N
190   PRINT "|";
200   FOR J=1 TO N
210     PRINT USING "*****.***** ";A(I,J);
220   NEXT J
230   PRINT "|"
240 NEXT I
250 PRINT "┌";SPC(12*N);"┐"
260 PRINT
270 '
280 PRINT "定数項を入力します"
290 FOR I=1 TO N
300   PRINT "B(";I;")=";
310   INPUT B(I)
320 NEXT I
330 '
340 PRINT "B="
350 PRINT "r";SPC(12);"r"
360 FOR I=1 TO N
370   PRINT "|";
380   PRINT USING "*****.***** ";B(I);
390   PRINT "|"
400 NEXT I
410 PRINT "┌";SPC(12);"┐"
420 PRINT
430 '
440 GOSUB *LEQACC
450 '
460 PRINT "X="
470 PRINT "r";SPC(12);"r"
480 FOR I=1 TO N
490   PRINT "|";
500   PRINT USING "*****.*****
510   PRINT "|"
520 NEXT I
530 PRINT "┌";SPC(12);"┐"
540 PRINT
550 '
560 END
570 '
6000 ' <<<<<< LEQ.ACC >>>>>>
6010 '
6020 *LEQACC
6030 '
6040 DIM BB(N),QX(N)
6050 '
6060 FOR I=1 TO N
6070   BB(I)=B(I)
6080 NEXT I
6090 '
6100 GOSUB *DECOMP
6110 '
6120 FOR HANPK=1 TO 10
6130   '
6140   FOR I=1 TO N
6150     S#=BB(I)
6160     FOR J=1 TO N
6170       S#=S#-A(I,J)*X(J)
6180     NEXT J
6190     B(I)=S#
6200     QX(I)=X(I)
6210   NEXT I
6220   '
6230   GOSUB *SOLVE
6240   '
6250   FOR I=1 TO N
6260     X(I)=QX(I)+X(I)
6270   NEXT I
6280   '
6290 NEXT HANPK
6300 '
6310 RETURN
6320 '

```



```

7000 ' <<<<<<< 三角分解の計算 >>>>>>>
7010 '
7020 *DECOMP
7030 FOR I=1 TO N
7040     L(I,1)=A(I,1)
7050 NEXT I
7060 FOR J=2 TO N
7070     U(1,J)=A(1,J)/L(1,1)
7080 NEXT J
7090 FOR K=2 TO N
7100     FOR I=K TO N
7110         S=0
7120         FOR J=1 TO K-1
7130             S=L(I,J)*U(J,K)+S
7140         NEXT J
7150         L(I,K)=A(I,K)-S
7160     NEXT I
7170     FOR J=K+1 TO N
7180         S=0
7190         FOR I=1 TO K-1
7200             S=L(K,I)*U(I,J)+S
7210         NEXT I
7220         U(K,J)=(A(K,J)-S)/L(K,K)
7230     NEXT J
7240 NEXT K
7250 FOR I=1 TO N
7260     U(I,I)=1
7270 NEXT I
7280 RETURN

7290 '
7300 ' <<<<<<< 右辺の計算 >>>>>>>
7310 '
7320 *SOLVE
7330 Y(1)=B(1)/L(1,1)
7340 FOR I=2 TO N
7350     S=0
7360     FOR J=1 TO I-1
7370         S=L(I,J)*Y(J)+S
7380     NEXT J
7390     Y(I)=(B(I)-S)/L(I,I)
7400 NEXT I
7410 '
7420 X(N)=Y(N)
7430 FOR I=N-1 TO 1 STEP -1
7440     S=0
7450     FOR J=I+1 TO N
7460         S=U(I,J)*X(J)+S
7470     NEXT J
7480     X(I)=Y(I)-S
7490 NEXT I
7500 RETURN

```

引用文献テキスト)

- (1) 植田,山崎,前沢「伝熱工学演習」(学献社)
- (2) 戸川隼人「Basic 数値計算プログラム集」(サイエンス社)
- (3) JSME「伝熱工学資料(改訂第3版)」