

簡易熱流動解析チュートリアル Ver.2.0

東北大学名誉教授 圓山重直

2025.04.01. 作成

2025.07.15. 改訂

はじめに

技術者や研究者が新しい機器の開発を行う場合や、現在のトラブル等を解決するために、機器の熱流動解析は不可欠です。流体力学や伝熱工学の教科書やハンドブックには、各種の問題の解き方や経験式が記載されていますが、簡単に答えを導き出すことは大変なのが現状です。特に、流体の熱物性値を資料から探し出して、解析条件の温度での値を得ることや、多くは無次元数で表記されている複雑な経験式の答えを、実際の伝熱量や流体抵抗に変換することも簡単ではありません。そのために、パラメータを色々変えて最適形状や流れ場などの値を、瞬時に計算して、新規の機器開発や不具合の解明に使用することは難しいのが現状です。精緻なコンピュータ解析モデルや汎用熱流体解析ソフトが市販されていますが、それらを使いこなすにはそれなりのスキルと時間が必要です。また、多くのパラメータを計算するには計算時間が長い場合もあります。

本解析ソフトは、その様な問題を解決するために開発されました。つまり、単純形状の物体の熱伝達や流体力学的特性をその形状のシートに数値を入れるだけで瞬時に答えを得ることができます。流体は各種選んでプログラムが適切な熱物性値を補間計算します。その時の、流れ場の状態や経験式の適用範囲などが、解析結果と連動した図として表示されますので理解できます。企業等で使用している熱流動解析ソフトの結果が正しいのかを確認するために、形状を単純化して本ソフトによって流れ場や伝熱現象を検証することが可能です。

このチュートリアルは、強制対流および自然対流の対流熱伝達を簡易的に計算するエクセルプログラムの使用方法を学ぶため問題集です。与えられた問題を添付のエクセルプログラムで解くことによって、簡易プログラムの使用方法を学んでいただきます。また、例題にはコメント欄を付けてあり、問題の物理的背景や、熱流動解析の勘所などに触れています。

後半の問題は、すでに発表してある 1 次元熱伝導の定常[1]および非定常[2]解析エクセルプログラム（プログラムは本ホルダーに添付）と本対流伝熱プログラムを組み合わせることによって、広範囲な技術的問題解決が可能であることを示しています。これらのプログラムを利用して、皆さんが直面する技術上・研究上の問題を解決してください。

[1] 圓山重直, Excel に対応した 3 重対角行列アルゴリズム (TDMA) を用いた多層媒体の汎用 1 次元定常熱伝導の厳密解 (対称平板, 中実円柱, 球, 両面平板, 円管, 球殻解析の工学応用), 機械学会論文集, Vol.89, No.928, (2023).

[2] 圓山重直, Excel に対応した 3 重対角行列アルゴリズムを用いた汎用 1 次元熱伝導解析 (平板・円筒・球の陰解法非定常熱伝導の統一解析), 機械学会論文集, Vol.88, No.911, (2022).

問題を解く前に

下記の問題を解く前に、「技術者や研究者のための強制対流熱流動解析ソフト Ver.2.0」および「技術者や研究者のための自然対流熱伝熱解析ソフト Ver.2.0」の「ソフトの使い方」シートをご覧ください。使い方の概要は以下の通りです。

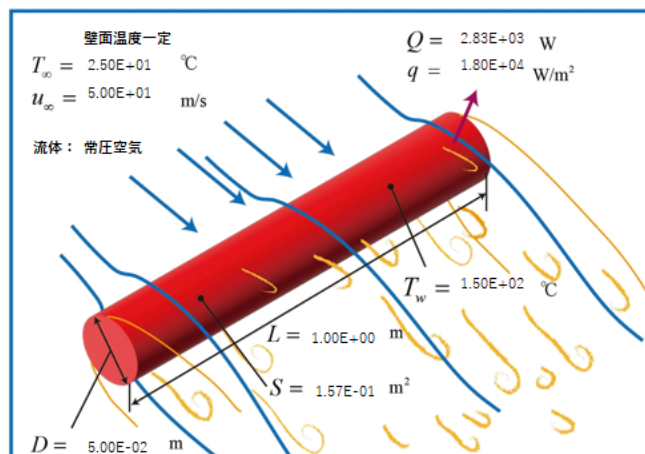
- (1) 問題に応じて強制対流のブックまたは自然対流のブックから伝熱現象のシートを選んでください。
- (2) 利用者は各シート C 列の赤字部分のみ数値や条件を入力できます。加熱条件、流体の種類はプルダウンで選択してください。
- (3) 流体は、常圧空気、常圧水、水素、メタン、高温蒸気、メタノール、エタノール、オクタン（ガソリンと類似）、エンジンオイル、グリセリン、その他の流体、から選択可能です。「その他の流体」はユーザーが数値を自分で入れることによって、任意の熱物性を指定できます。物性値は評価温度の値をプログラムが線形補間で自動的に算出します。任意の物性は「その他の流体」シートの表に温度と該当熱物性を入れてください。2 個以上の温度とその温度に対応する物性値を入れると、その温度範囲で補間値を計算します。
- (4) 流体が気体の場合は、表面の放射率からふく射熱伝達率を計算し、伝熱量に反映されます。代表的な物質表面の放射率は「ソフトの使い方」シートのグラフおよび表を参照してください。
- (5) 計算シートには 3 次元と 2 次元の模式図があり、入力データや計算値が自動的に表示されます。
- (6) 実験式・経験式はなるべく教科書等で採用されているものを使用しました。経験式の選定で計算結果が大きく異なる場合がありますので注意してください。
- (7) 流動状態（強制対流のみ）と対流熱伝達の状態、局所熱伝達や境界層厚さ（平板強制対流）が表示されます。図には、実験データも表記されていますので、実験式等の精度が理解できます。
- (8) 必要に応じて文献や付帯情報もシート下部に記載されています。
- (9) 本解析プログラムは、現象の大まかな値を求めるものです。物性値や経験式が異なる問題では、答えの数値に若干の差異が生じる場合があります。

例 題 集

1. 円柱強制対流-1

[問題] 1 気圧 25℃の空気が、直径 5 cm の円柱に直交して 50m/s で流れている。円柱表面は 150℃ に保たれている。円柱単位長さ当たりの伝熱量と抵抗力を計算せよ。ただし、ふく射伝熱は無視する。

[解答] 下記を C 列に入力します。



円柱の直径 $D=5.000\text{E-}02$ (m)

加熱条件: 壁面温度一定

壁面放射率 $\varepsilon = 0.000\text{E}+00$ (-)

流速 $u_\infty=5.000\text{E}+01$ (m/s)

下記の結果が得られます。

レイノルズ数 $Re = 1.144\text{E}+05$ (-)

総括熱伝達率 $h_t=1.440\text{E}+02$ (W/(m²・K))

伝熱量 $Q=2.827\text{E}+03$ (W/m)

円柱長さ $L=1.000\text{E}+00$ (m)

壁面温度 $T_w=1.500\text{E}+02$ (°C)

流体の種類: 常圧空気

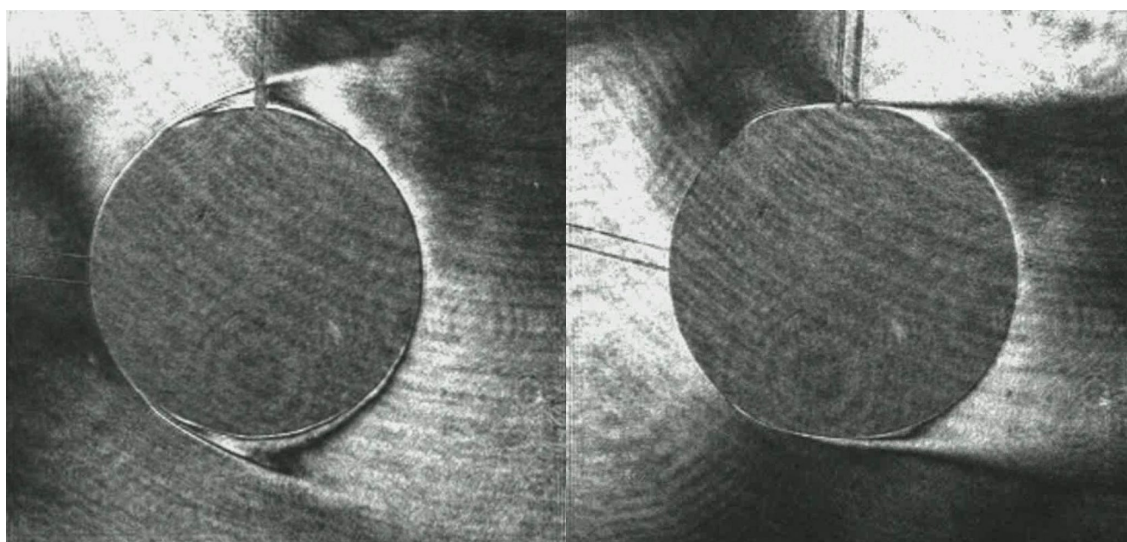
流体温度 $T_\infty=2.500\text{E}+01$ (°C)

ヌセルト数 $Nu=2.354\text{E}+02$ (-)

抵抗係数 $C_D=1.621\text{E}+00$ (-)

抗力 $F_D = 1.200\text{E}+02$ (N/m)

[コメント] このレイノルズ数の流れは、層流剥離領域で「結果と無次元量」図に示す通り剥離点は前方にあります。しかし、同シートの「レイノルズ数による粗面円柱の抵抗変化」図に示すように、粗面では比較的低いレイノルズ数で乱流遷移を起こし、抵抗係数が減少する可能性があります。剥離の遷移領域では流れが不安定になりますので、流体振動など注意が必要です。



遷移前

乱流遷移後

直径 50 mm、長さ 250 mmの加熱円柱に円柱に空気を流した時の光干渉縞画像
(東北大学流体科学研究所の位相シフト大型光干渉装置により撮影)

2. 円柱強制対流-2

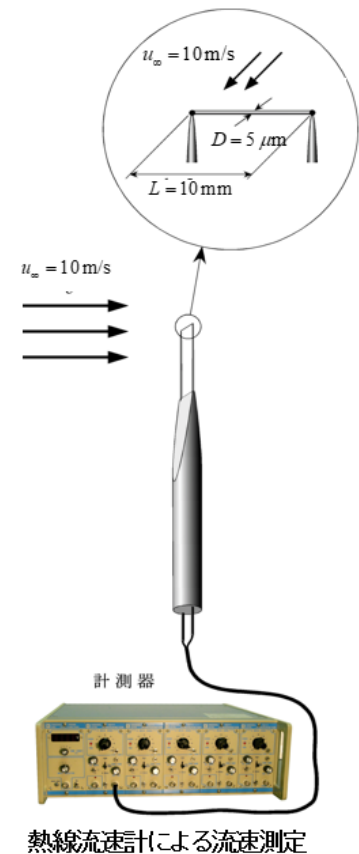
[問題] 長さ 10 mm、直径 $5\mu\text{m}$ の細いタングステンワイヤーに直交して 25°C 、20m/s の常圧空気が流れている。ワイヤーに電流を流して表面温度を 50°C まで上昇させるときの必要電力を求めよ。ワイヤーの放射率は 0.3 とする。

[解答] 下記を C 列に入力します。

円柱の直径 $D=5.000\text{E-}06\text{ (m)}$ 円柱長さ $L=1.000\text{E-}02\text{ (m)}$
 加熱条件: 壁面温度一定 壁面温度 $T_w=5.000\text{E+}01\text{ (}^\circ\text{C)}$
 壁面放射率 $\varepsilon=3.000\text{E-}01\text{ (-)}$ 流体の種類: 常圧空気
 流速 $u_\infty=2.000\text{E+}01\text{ (m/s)}$ 流体温度 $T_\infty=2.500\text{E+}01\text{ (}^\circ\text{C)}$

下記が得られます。

レイノルズ数 $Re=5.961\text{E+}00\text{ (-)}$ ヌセルト数 $Nu=1.488\text{E+}00\text{ (-)}$
 平均対流熱伝達率 $h_c=8.039\text{E+}03\text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$
 ふく射熱伝達率 $h_r=2.043\text{E+}00\text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$
 総括熱伝達率 $h_t=8.041\text{E+}03\text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$
 伝熱量 $Q=3.158\text{E-}02\text{ (W)}$



[コメント] このレイノルズ数の領域は、粘性支配で剥離領域が小さくなります。しかし、線径が小さいため、対流熱伝達率が大きくなり、ふく射伝熱の寄与は相対的に小さくなるのが分かります。

3. 球強制対流

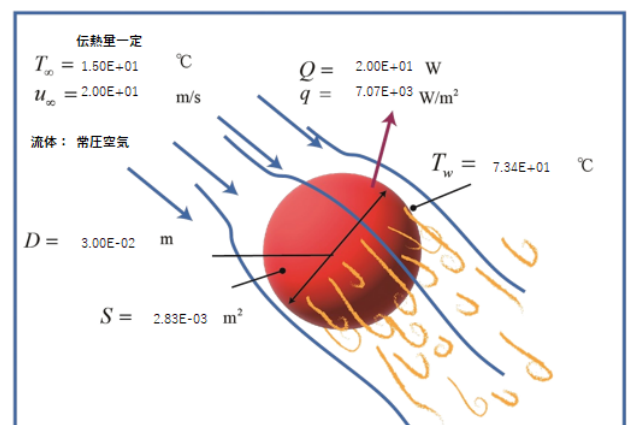
[問題] 電気ヒーターを内蔵した直径 3cm のアルミニウム製球が温度 15°C 、流速 20m/s の空気にさらされている。ヒーターを 20W で加熱した時、球の表面温度を計算せよ。ただし、球の表面は白ペイントで塗られており、その放射率は 0.96 である。

[解答] 下記を C 列に入力します。

球の直径 $D=3.000\text{E-}02\text{ (m)}$
 加熱条件: 伝熱量一定
 加熱量 $Q=2.000\text{E+}01\text{ (W)}$
 流体の種類: 常圧空気
 流体温度 $T_\infty=1.500\text{E+}01\text{ (}^\circ\text{C)}$

下記の結果が得られます。

レイノルズ数 $Re=4.090\text{E+}04\text{ (-)}$ ヌセルト数 $Nu=1.217\text{E+}02\text{ (-)}$
 平均対流熱伝達率 $h_c=1.101\text{E+}02\text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$ ふく射熱伝達率 $h_r=7.019\text{E+}00\text{ (W/(m}^2\cdot\text{K))}$



壁面放射率 $\varepsilon=9.600\text{E-}01\text{ (-)}$

流速 $u_\infty=2.000\text{E+}01\text{ (m/s)}$

総括熱伝達率 $h_t=1.171\text{E}+02(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

壁面温度 $T_w=7.343\text{E}+01(^{\circ}\text{C})$

[コメント] このレイノルズ数域では、層流剥離で剥離点が前方にあります。総括熱伝達率とアルミニウムの熱伝導率を用いてビオ数を計算すると 0.007 となり、十分小さいので球内部や表面の温度分布は無視できるほど小さいことが分かります。

4. 平板強制対流-1

[問題] 20°C のエンジンオイルが 20cm 角の正方形平板上を 1.2m/s で流れている。平板の温度が 100°C のとき、平板の放熱量を求めよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

平板の長さ $L=2.000\text{E}-01(\text{m})$

平板の幅 $b=2.000\text{E}-01(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=1.000\text{E}+02(^{\circ}\text{C})$

流体の種類: エンジンオイル

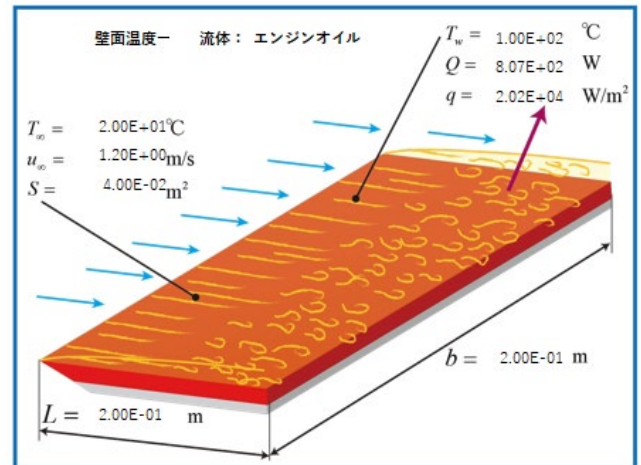
流速 $u_{\infty}=1.200\text{E}+00(\text{m/s})$

下記の結果が得られます。

レイノルズ数 $Re_L=2.785\text{E}+03(-)$

プラントル数 $Pr=1.086\text{E}+03(-)$

伝熱量 $Q=8.066\text{E}+02(\text{W})$



流体温度 $T_{\infty}=2.000\text{E}+01(^{\circ}\text{C})$

平均ヌセルト数 $Nu_L=3.591\text{E}+02(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=2.521\text{E}+02(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

[コメント] 流れは層流ですが、レイノルズ数が小さいためシートの図に計算値が表示されていません。液体の場合、常温の熱ふく射は流体内を伝播しないので、表面放射率は考慮する必要がありません。エンジンオイルは高粘度流体であり、プラントル数が大きい場合です。また、温度によって粘性が大きく変化するので物性値の評価温度は注意が必要です。物性値の温度変化は「エンジンオイル」シートの表と図をご覧ください。

5. 平板強制対流-2

[問題] 幅 1m 、流れ方向の長さ 0.75m の平板上を 20°C 常圧の空気が 35m/s で流れている。平板は 60°C で均一温度に加熱されている。下記の質問に答えよ。

- (1) 前縁からの距離が $x=18\text{cm}$ と 75cm における境界層厚さを計算せよ。
- (2) この平板に作用する抗力はいくらか。
- (3) $x=18\text{cm}$ と 75cm における局所対流熱伝達率を計算せよ。
- (4) 平板表面が放射率 0.9 の塗料で塗られているとき、平板の放熱量はいくらか。

[解答] 下記を C 列に入力します。

平板の長さ $L=7.500\text{E-}01(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面放射率 $\varepsilon=9.000\text{E-}01(-)$

流速 $u_{\infty}=3.500\text{E+}01(\text{m/s})$

平板の幅 $b=1.000\text{E+}00(\text{m})$

壁面温度 $T_w=6.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=2.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

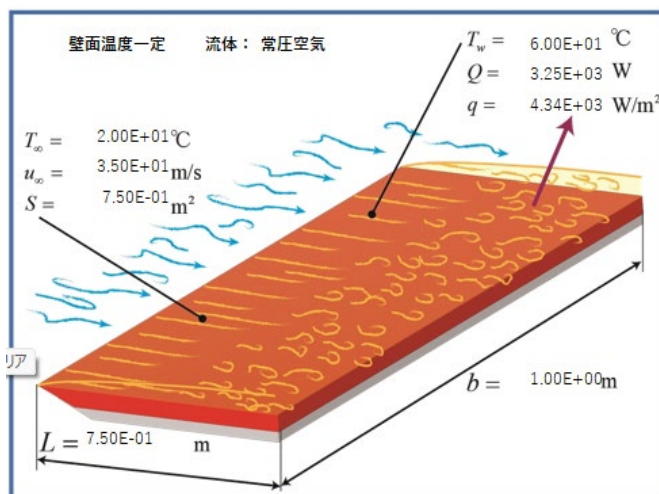
- (1) シート BY-CF 列に局所熱伝達率や境界層厚さが計算されています。その「CC31」セルと「CC107」セルの値から、 $\delta(x=0.18\text{m})=1.479\text{E-}03(\text{m})$ 、 $\delta(x=0.75\text{m})=1.240\text{E-}02(\text{m})$ が計算されます。
- (2) 「C30」セルの摩擦係数 $C_f=3.022\text{E-}03(-)$ より、抗力 $F_D=1.673\text{E+}00(\text{N})$ が求められます。
- (3) 局所熱伝達率は「CE31」と「CE107」セルの値より、 $h_x(x=0.18\text{m})=2.724\text{E+}01(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ 、 $h_x(x=0.75\text{m})=6.514\text{E+}01(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ が計算されます。
- (4) 放熱量は、平均対流熱伝達率 $h_c=5.028\text{E+}01$ 、ふく射熱伝達率 $h_r=6.294\text{E+}00(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ より、**伝熱量 $Q=1.697\text{E+}03(\text{W})$** で与えられます。

[コメント] レイノルズ数 $Re_L=1.543\text{E+}06$ の場合、「平板の摩擦係数」図に示すように、流れは遷移域に相当し、層流と乱流が共存する領域です。「局所対流熱伝達率と境界層厚さ」図を見ると、流れは、 $x/L=0.33$ 近傍で遷移しています。したがって $x=18\text{cm}(x/L=0.24)$ では層流、 $x=75\text{cm}(x/L=1.0)$ では遷移域となっていることがわかります。

6. 乱流平板強制対流

[問題] 前記「平板強制対流-2」と同様に、幅 1m、流れ方向の長さ 0.75mの平板上を 20°C 常圧の空気が 35m/s で流れている。平板は 60°C で均一温度に加熱されている。ただし、空気流は、送風機からの気流のように、大きな乱れのある乱流とする。下記の質問に答えよ。

- (1) 前縁からの距離が $x=18\text{cm}$ と 75cm における境界層厚さを計算せよ
- (2) 平板が受ける抗力を求めよ。
- (3) $x=18\text{cm}$ と 75cm における局所対流熱伝達率を計算せよ。
- (4) 平板表面が放射率 0.9 の塗料で塗られているとき、平板の放熱量はいくらか。



[解答] 下記を C 列に入力します。

平板の長さ $L=7.500\text{E-}01(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面放射率 $\varepsilon=9.000\text{E-}01(-)$

流速 $u_{\infty}=3.500\text{E+}01(\text{m/s})$

平板の幅 $b=1.000\text{E+}00(\text{m})$

壁面温度 $T_w=6.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=2.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

- (1) シート BY-CF 列に局所熱伝達率や境界層厚さが計算されています。その「CC31」セルと「CC107」セルの値から、 $\delta(x=0.18\text{m})=5.126\text{E-}03(\text{m})$ 、 $\delta(x=0.75\text{m})=1.606\text{E-}02(\text{m})$ が計算され、乱れのな

い一様流に比べて 1.7～1.4 倍の値となります。

- (2) 「C30」セルの摩擦係数 $C_f = 3.959E-03$ (-) より、**抗力 $F_D = 2.192E+00$ (N)**が求められます。
- (3) 局所熱伝達率は「CE31」と「CE107」セルの値より、 **$h_x(x=0.18m) = 1.138E+02$ (W/(m²・K))**、 **$h_x(x=0.75m) = 8.551E+01$ (W/(m²・K))**が計算されます。
- (4) 放熱量は、平均対流熱伝達率 $h_c = 1.022E+02$ 、ふく射熱伝達率 $h_r = 6.294E+00$ (W/(m²・K))より、**伝熱量 $Q = 3.255E+03$ (W)**で与えられます。乱れのない一様流に比べて伝熱量は 1.9 倍となります。

[コメント] 「局所対流熱伝達率と境界層厚さ」図を見ると、流れは、前縁近傍を除き、ほとんどの領域で乱流となっており、境界層厚さと局所熱伝達率が、乱れのない一様流に比べて、大きくなっています。それに伴い、抗力と伝熱量が増加しています。この計算は、平面が平滑である条件なので、壁面に突起等があると、さらに熱伝達と抵抗が増加します。

7. 平滑管内強制対流-1

[問題] 直径 1 インチ(2.54cm)の平滑管に 100℃の飽和蒸気を 10m/s で流入させ、電気ヒーターで加熱して過熱蒸気としたい。管長さが 3m、管 1m あたりの電気ヒーターの電力を 200W とすると、管出口における管壁温度と蒸気の混合平均温度、圧力損失を計算せよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

円管の内径 $D = 2.540E-02$ (m)

円管の長さ $L = 3.000E+00$ (m)

加熱条件： 熱流束一定

流体の種類： 高温水蒸気

入口流体温度 $T(0) = 1.000E+02$ (°C)

計算は質量流量で行われますので「C7」セルに流速(m/s)=1.000E+01 を入力します。それに相当する質量流量が「D8」セルに 3.027E-03 と表示されますので、その値をコピーして「値の貼り付け」で「C20」セルに値のみを張り付けます。「C21」セルに計算された流速が記載されますので、「C7」セルと同じになっていることを確認してください。3m の管の加熱量は 600W なので、その値を「C14」セルに入力します。

「C23」の仮流体平均温度は、最初は入り口流体温度 (100℃) を入れて、次に「C25」の流体平均温度をコピーし「値の貼り付け」で「C23」に入れます。それを、数回繰り返します。一般には 2～3 回の繰り返しで十分です。

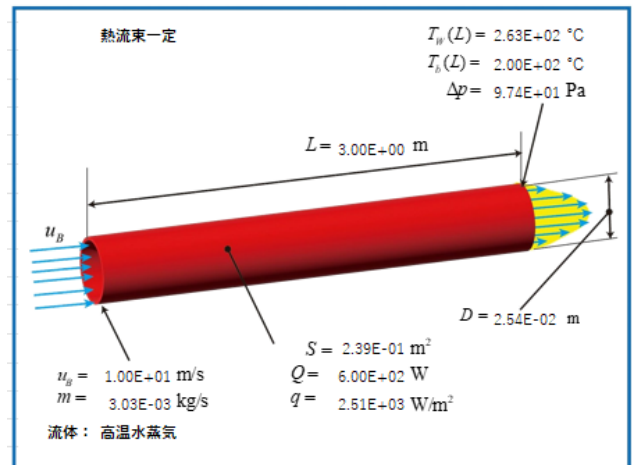
上記の手順で下記が得られます。

レイノルズ数 $Re_D = 8.971E+03$ (-)

平均対流熱伝達率 $h = 3.846E+01$ (W/(m²・K))

出口管壁温度 $= 2.817E+02$ (°C)

圧力損失 $\Delta P = 9.652E+01$ (Pa)



管入口流速 $u_B = 1.00E+01$ (m/s)

平均温度初期値 $= 1.000E+02$ (°C)

平均ヌセルト数 $Nu = 3.302E+01$ (-)

出口流体温度 $T_w(L) = 2.165E+02$ (°C)

管摩擦係数 $\lambda = 3.187E-02$ (-)

[コメント] 管路内の流れでは、管壁温度一様の場合は出口の流体温度、熱流束一様の場合は出口の管壁温度が重要となります。このケースでは、出口流体温度は熱収支から計算できますから、出口の管壁温度が許容温度以上にならないことが重要です。このレイノルズ数域は乱流と考えられます。流体の熱物性は入口と出口の流体温度の平均温度 $T_m=1.583E+02$ (°C) で評価しています。管壁温度と流体温度の差が大きくなる場合は物性値の扱いには注意が必要です。

8. 平滑管内強制対流-2

[問題] 氷水中に内径 5mm、長さ 50cm のガラス管を設置し、管内に 50°C のエタノールを流して冷却する。ガラス管の壁温が 0°C、流入流量を 1g/s とするとき、管出口のエタノール温度を計算せよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

円管の内径 $D=5.000E-03$ (m)

円管の長さ $L=5.000E-01$ (m)

加熱条件 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=0.000E+00$ (°C)

流体の種類 エタノール

質量流量 $m=1.000E-03$ (kg/s)

入口流体温度 $T(0)=5.000E+01$ (°C)

仮想平均温度については、例題 7 と同様にすると、流体平均温度 $T_m=3.768E+01$ (°C) となります。

上記の手順で下記が得られます。

レイノルズ数 $ReD=2.951E+02$ (-)

平均ヌセルト数 $Nu=6.874E+00$ (-)

伝熱量 $Q=-6.380E+01$ (W)

出口流体温度 $T_w(L)=2.535E+01$ (°C)

[コメント] この管内流れは層流となります。 $1/Gz=4.049E+01$ であり小さい値ではないので、助走区間内の熱伝達となります。そのため、平均ヌセルト数は発達した層流流れの値である $Nu=3.66$ に比べて大きな値となっています。

9. 粗面円管強制対流

[問題] 直径 1 インチ(2.54cm)の長さ 5m の亜鉛引き鉄管に温度 10°C の水を 1m/s で流す。管壁温度を 80°C とするとき、管出口の水温と必要最小ポンプ動力を求めよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

円管の内径 $D=2.540E-02$ (m)

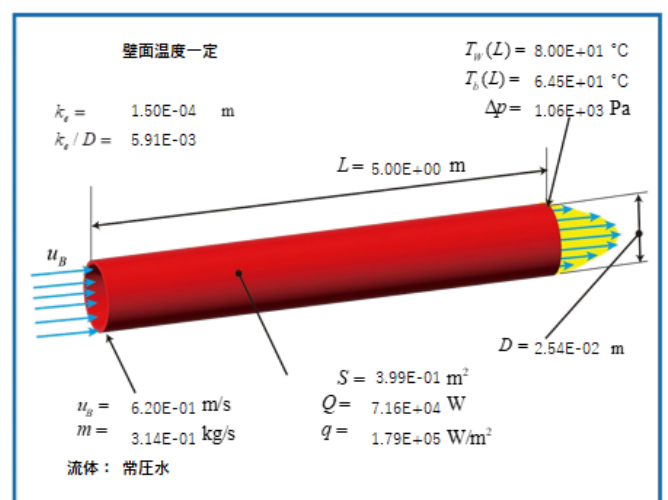
円管の長さ $L=5.000E+00$ (m)

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=8.000E+01$ (°C)

流体の種類: 常圧水

入口流体温度 $T(0)=1.000E+01$ (°C)



「C7」のセルに流速 1m/s をいれると質量流量がでますので、質量流量 $m = 5.037\text{E-}01$ (kg/s)を「C22」セルにコピー・ペースト（値のみ）します。

シートの「種々な実用管に対する等価粗さ」図を参照して亜鉛引き鉄管は等価粗さ 0.15mm なので、等価粗さ $k_e = 1.500\text{E-}04$ (m)を入ると、等価相対粗さ $k_e/D = 5.906\text{E-}03$ (-)が計算されます。仮想平均温度については、例題 7 と同様にします。

上記の手続きをすると下記が得られます。

レイノルズ数 $Re_D = 3.362\text{E+}04$ (-)

平均ヌセルト数 $Nu = 2.358\text{E+}02$ (-)

平均対流熱伝達率 $h = 5.758\text{E+}03$ (W/(m²・K))

伝熱量 $Q = 9.790\text{E+}04$ (W)

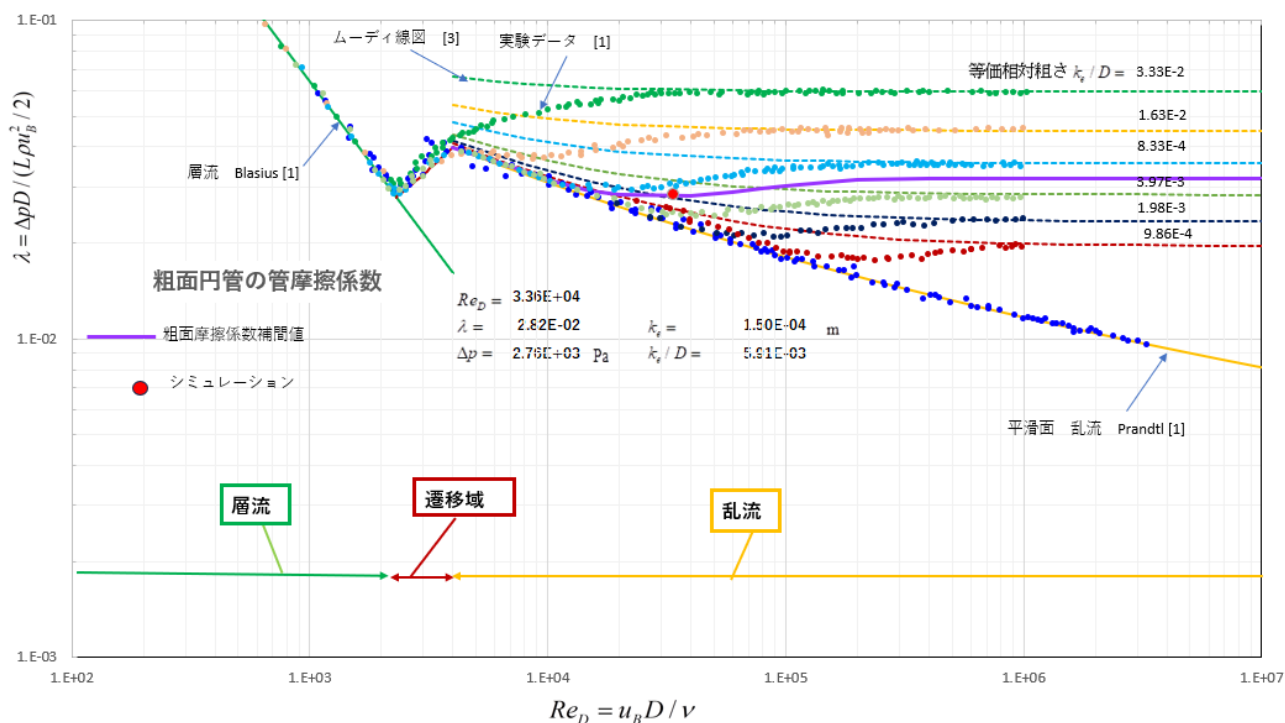
出口流体温度 $T_w(L) = 5.648\text{E+}01$ (°C)

管摩擦係数 $\lambda = 2.822\text{E-}02$ (-)

圧力損失 $\Delta P = 2.762\text{E+}03$ (Pa)

最小ポンプ動力は 圧力損失×質量流量/密度=1.41(W) となり、比較的少ない動力でパイプに水を流すことができます。

[コメント] 粗面管の熱流動の経験式は乱流状態のみで適用できます。層流の場合は平滑管と同じ計算です。経験式は実験値を 2 パラメータ補間で計算しています。教科書等ではムーディ線図が多用されていますが、シートの「粗面円管の管摩擦係数」図に示すように、発達した粗面抵抗に遷移する領域ではムーディ線図は実験値を記述できません。本例題のように、ムーディ線図では圧力損失を 50%以上過大に見積もることもあります。管内伝熱の経験式は管摩擦係数を用いていますので、管摩擦係数の推定は熱伝達にも影響を与えます。



10. 円柱自然対流

[問題] 直径 2cm、長さ 30cm の電気ヒーターが温度 20°C の水槽の中に水平に設置されている。ヒーターの温度が 38°C の時、ヒーターの必要電力を求めよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

円柱の直径 $D=2.000\text{E-}02(\text{m})$

円柱長さ $L=3.000\text{E-}01(\text{m})$

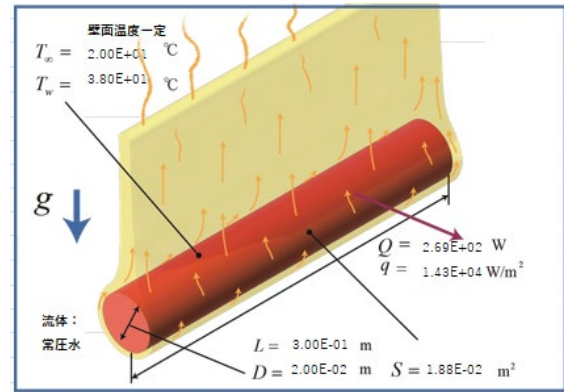
加熱条件: 壁面温度一定

流体の種類: 常圧水

を入力すると下記が得られます。

レイリー数 $Ra=3.721\text{E+}06(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=7.928\text{E+}02(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$



壁面温度 $T_w=3.800\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

流体温度 $T_{\infty}=2.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

ヌセルト数 $Nu=2.5846\text{E+}01(-)$

伝熱量 $Q=2.690\text{E+}02(\text{W})$

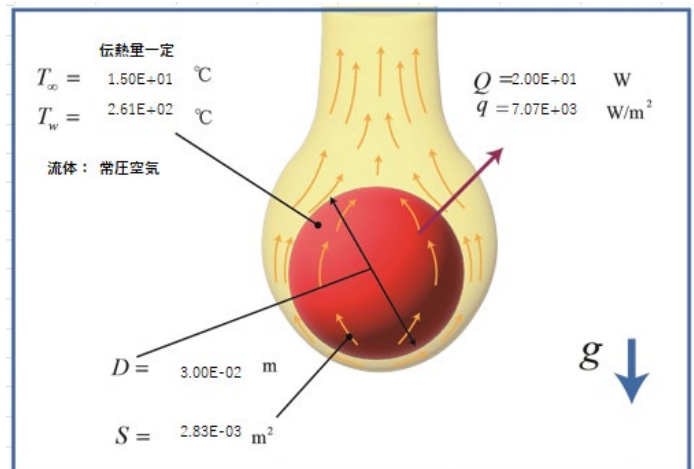
[コメント] 流体が液体の場合は、ふく射伝熱がないので物体の放射率に関わらず自動的にふく射熱伝達率は 0 となります。

11. 球自然対流

[問題] 前出「3. 球強制対流」と同様に、電気ヒーターを内蔵した直径 3cm のアルミニウム製球が温度 15°C の静止空気中に置かれている。ヒーターを 20W で加熱した時、球の表面温度を計算せよ。ただし、球の表面は白ペイントで塗られており、その放射率は 0.96 である。

[解答] 下記を C 列に入力します。

球の直径 $D=3.000\text{E-}02(\text{m})$



加熱条件: 伝熱量一定

加熱量 $Q=2.000E+01(W)$

壁面放射率 $\varepsilon=9.600E-01(-)$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=1.500E+01(^{\circ}C)$

下記の結果が得られます。

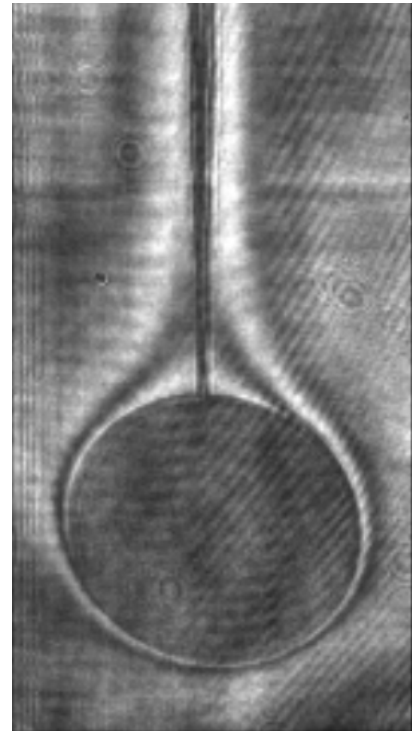
レイリー数 $Ra=1.394E+05(-)$ ヌセルト数 $Nu=1.0861E+01(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=1.231E+01(W/(m^2 \cdot K))$

ふく射熱伝達率 $h_r=1.647E+01(W/(m^2 \cdot K))$

総括熱伝達率 $h_t=2.878E+01(W/(m^2 \cdot K))$

壁面温度 $T_w=2.608E+02(^{\circ}C)$



[コメント] ガス中の自然対流の場合、ふく射の影響が大きくなります。この例題では、ふく射熱伝達率が対流熱伝達率より大きくなります。前出「3. 球強制対流」の計算で流速を $0.4m/s$ とした場合の対流熱伝達が、自然対流熱伝達とほぼ同じ値となります。 $(Ra/Pr)/Re^2 \approx 1$ の場合、自然対流と強制対流が共存する複合対流熱伝達となります。このケースでは、 $(Ra/Pr)/Re^2 \approx 1$ に相当するのは流速が約 $0.22m/s$ に相当します。

直径 50 mm の球周りの自然対流の光干渉計画像
(東北大学流体科学研究所の位相シフト大型光干渉装置により撮影)

12. 垂直平板自然対流

[問題] 高さ 70 cm、幅 50 cm のオイルヒーターが温度 $20^{\circ}C$ の室内に置かれている。ヒーター表面が $60^{\circ}C$ に保たれているとき、ヒーターの必要電力を計算せよ。表面は放射率 0.97 の黒色塗料が塗られている。

ただし、ヒーターは両面を加熱しているものとする。

[解答] 下記を C 列に入力します。

平板の長さ $L=7.000E-01(m)$

平板の幅 $b=1.000E+00(m)$

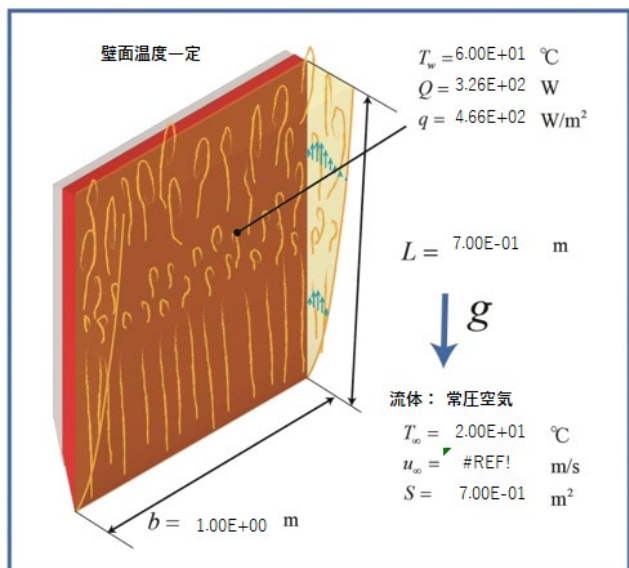
加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=6.000E+01(^{\circ}C)$

壁面放射率 $\varepsilon=9.700E-01(-)$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=2.000E+01(^{\circ}C)$



ここで、ヒーターの両面が加熱されるので平板の幅は 2 倍になっています。上記の値を入力すると下

記が得られます。

レイリー数 $Ra=1.070E+09(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=4.875E+00$ (W/(m²・K))

総括熱伝達率 $h_t=1.166E+01$ (W/(m²・K))

平均ヌセルト数 $Nu_L=1.255E+02(-)$

ふく射熱伝達率 $h_r=6.783E+00$ (W/(m²・K))

伝熱量 $Q=3.264E+02$ (W)

[コメント] このレイリー数の領域は層流と乱流の境目にあります。自然対流ではふく射伝熱の影響が大きく、本例題ではふく射伝熱が対流伝熱より大きくなっています。実際のオイルヒーターは内部がダクト状になっていて空気が通る構造になっており、本計算例より対流伝熱が大きくなっているのが一般的です。

13. 矩形容器内自然対流

[問題] 50 cm四方の正方形板が2 cmの間隔で垂直に立っている。空間には空気が満たされており、上下の隙間は断熱材で封止されている。2枚の板の温度がそれぞれ100℃と40℃のとき、板を通過する伝熱量を計算せよ。なお、向かい合う壁面の放射率を0.2とする。

[解答] 下記をC列に入力します。

矩形容器の隙間 $L=2.000E-02$ (m)

矩形容器の高さ $H=5.000E-01$ (m)

伝熱面の幅 $W=5.000E-01$ (m)

低温面温度 $T_2=4.000E+01$ (℃)

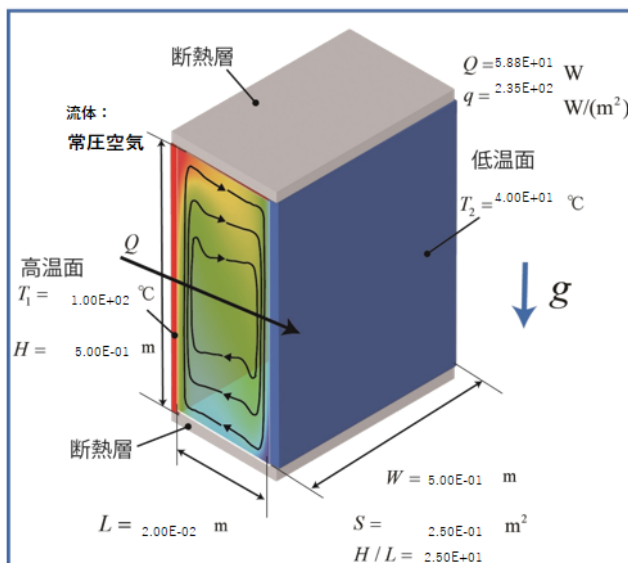
流体の種類: 常圧空気

を入力すると下記が得られます。

レイリー数 $Ra=2.350E+04(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=2.894E+00$ (W/(m²・K))

総括熱伝達率 $h_t=3.920E+00$ (W/(m²・K))



高温面温度 $T_1=1.000E+02$ (℃)

壁面放射率 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2=2.000E-01$ (-)

ヌセルト数 $Nu=1.9716E+00(-)$

ふく射熱伝達率 $h_r=1.026E+00$ (W/(m²・K))

伝熱量 $Q=5.881E+01$ (W)

[コメント] 対向する鉛直2平板空間の対流では、矩形容器の隙間を基準長さとしています。そのため、対流が存在せず熱伝導のみのヌセルト数は1となります。つまり、このヌセルト数は熱伝導のみの伝熱に比べて対流伝熱が何倍大きいかの指標として使用されます。「矩形容器内の自然対流熱伝達」図に示されている流線と等温線で示されるように、鉛直平板距離が大きくなりレイリー数が大きくなると、対流伝熱様式は単独の鉛直平板熱伝達と同じになります。

14. 水平平板間自然対流

[問題] 50 cm四方の正方形板 2 枚を水平に置き、その間隔を 1 cm とした。板の隅を断熱材で塞いで隙間に水を入れた。下側の板が 100°C、上側の板が 80°C に保たれているとき、2 枚の板を通過する熱量を求めよ。

[解答] 下記を C 列に入力します。

平板間の隙間 $L=1.000\text{E-}02(\text{m})$

平板の奥行さ $D=5.000\text{E-}01(\text{m})$

平板の幅 $W=5.000\text{E-}01(\text{m})$

低温面温度 $T_2=8.000\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

高温面温度 $T_1=1.000\text{E+}02(^{\circ}\text{C})$

流体の種類: 常圧水

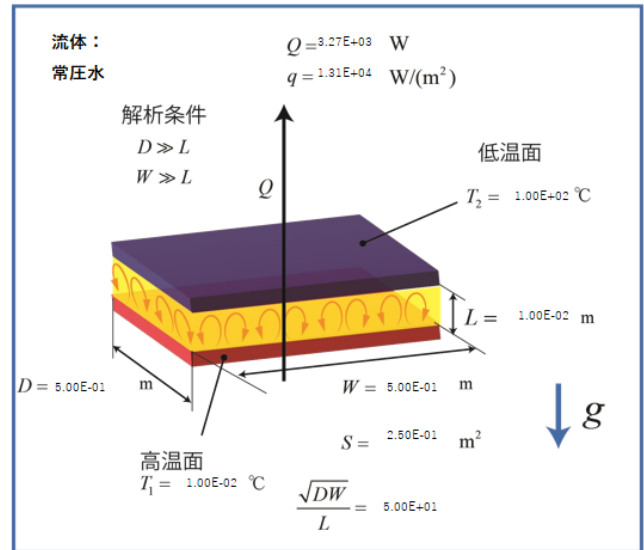
を入力すると下記が得られます。

レイリー数 $Ra_L=2.548\text{E+}06(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=6.548\text{E+}02(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

ヌセルト数 $Nu=9.6976\text{E+}00(-)$

伝熱量 $Q=3.274\text{E+}03(\text{W})$

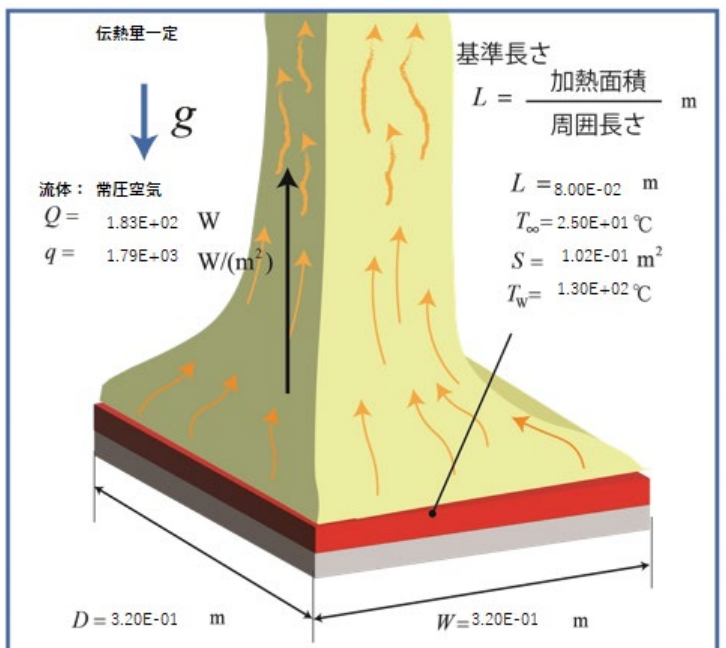


[コメント] 前問と同様に、対向する水平 2 板空間の対流では、2 板空間の隙間を基準長さとしているため、対流が存在せず熱伝導のみのヌセルト数は 1 となります。つまり、このヌセルト数は熱伝導のみの伝熱に比べて対流伝熱が何倍大きいかの指標として使用されます。ただし、下面の温度が上面より高いことが前提となります。本問題の場合、条件によってはベルナールセルと呼ばれるハチの巣状の対流が発生する場合があります。下面の温度が上面より低い場合、流体は温度成層を形成し対流が発生せず対流伝熱量は熱伝導のみとなります。

15. 単独水平平板自然対流

[問題] 直径 32 cm のホットプレート調理器が温度 25°C の室内に置かれている。ホットプレートの温度が 130°C に保たれているとき、必要電力を求めよ。ただし、プレート表面の放射率は 0.9 とし、食材は置かれていない。ホットプレート以外からの調理器の放熱は無視する。

[解答] この場合には、基準長さ L として（面積/周長）が使われています。そこで、円形加熱板を正方形平板に置き換えます。つまり、1 辺 a の正方形は、 $L = a^2 / (4a)$ で、直径 D の円では、 $L = \pi D^2 / 4 / (\pi D)$ ですから、円と等価の正方形は



1 辺がDの正方形となります。そこで、下記を C 列に入力します。

平板の奥行 $D=3.200\text{E-}01(\text{m})$

平板の幅 $W=3.200\text{E-}01(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=1.300\text{E+}02(^{\circ}\text{C})$

壁面放射率 $\varepsilon=9.000\text{E-}01(-)$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=2.500\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

を入力すると下記が得られます。

レイリー数 $Ra_L=2.492\text{E+}06(-)$

平均ヌセルト数 $Nu_L=2.145\text{E+}01(-)$

平均対流熱伝達率 $h_c=8.015\text{E+}00(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

ふく射熱伝達率 $h_r=8.998\text{E+}00(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

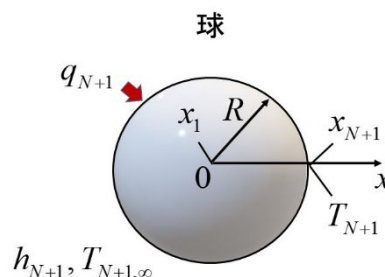
総括熱伝達率 $h_t=1.704\text{E+}01(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

伝熱量 $Q=1.829\text{E+}02(\text{W})$

[コメント] 単独水平平板の場合は、上向き加熱と下向き冷却が同様に計算できます。つまり、流体温度に比べて温度が低い下向き平板の自然対流が同じ式で計算可能です。

16. 自然対流と非定常熱伝導の複合問題

[問題] 直径 30 cmのステンレス球の内部ひずみを取るために熱処理(焼鈍)をする。ステンレス球を 500°C の炉内で均一に加熱した後、 25°C の静止空気中に取り出して冷却する。球中心部が 300°C に冷却するまでの時間を計算せよ。なお、球表面の放射率は 0.5 とする。



[解答] まず、静止空気中におかれた球の熱伝達率を見積もります。

球の温度が刻々変わるので、厳密には球の表面温度に対する熱伝達率を計算しなければなりません。この場合は近似的に 500°C と 300°C の中間温度である球表面が 400°C とした場合の熱伝達率を「球自然対流」シートから求めます。つまり、

球の直径 $D=3.000\text{E-}01(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=4.000\text{E+}02(^{\circ}\text{C})$

壁面放射率 $\varepsilon=5.000\text{E-}01(-)$

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_{\infty}=2.500\text{E+}01(^{\circ}\text{C})$

を入力すると、下記が得られます。

平均対流熱伝達率 $h_c=7.132\text{E+}00(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

ふく射熱伝達率 $h_r=1.493\text{E+}00(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

総括熱伝達率 $h_t=2.206\text{E+}01(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$

次に、ホルダーに添付されている「汎用[非定常]熱伝導解析」プログラムを開き、下記を入力します。形状は「球」を選択します。ステンレスの熱物性値は「JSME テキストシリーズ 伝熱工学」から引用しました。

解析形状 (Pull Down) 球,

$x_1=0$

$x_{N+1}=0.15$

解析時間 (s)=7200

初期温度 $T_i (^{\circ}\text{C}, \text{K})=500$

熱伝導率($\text{W}/(\text{mK})$)=16

密度(kg/m^3)=7920

比熱 ($\text{J}/(\text{kgK})$)=499

体積当たり発熱量(W/m^3)=0

外側境界条件

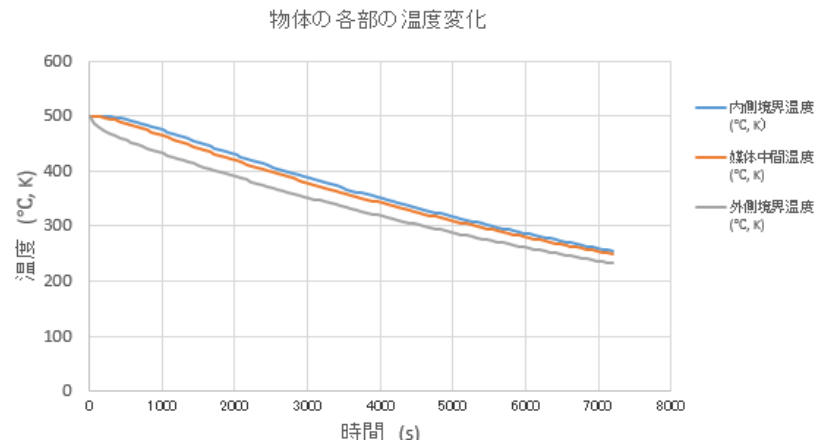
第? 種境界条件: 3

熱伝達率($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$)=22.06

外部流体温度 ($^{\circ}\text{C}$) =25

ここで、熱伝達率は「自然対流伝熱解析」ソフトの総括熱伝達率をコピーし、値の貼り付けでペーストします。

右図に「非定常熱伝導解析」プログラムで計算した冷却時の各部の温度変化を示します。球中心部（内側境界温度）が 300℃になる時間は 5540 秒（約 1 時間半）かかることがわかります。同プログラムで球内温度分布の変化を見ると、冷却ごく初期を除き、球内はほぼ均一に冷却していることが分かります。



[コメント] ガス中の自然対流はふく射伝熱の影響が大きく、この例題ではふく射伝熱が対流伝熱の約 2 倍になっています。ふく射熱伝達率はガスと物体温度の平均温度（絶対温度 K）の 3 乗に比例しますから、高温物体では総括熱伝達率が大きく変化します。この場合では、500℃と 300℃の総括熱伝達率はそれぞれ $2.793\text{E}+0$ と $1.722\text{E}+01(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ となり大きく異なります。しかし、両者の平均値は $2.258\text{E}+01$ と推定した総括熱伝達率と大きく変わりませんので、比較的良い近似と考えることができます。

17. 強制対流と非定常熱伝導の複合問題

[問題] 強化ガラスは 650℃以上に加熱したガラスを急冷して約 550℃の歪み点まで急冷することによって製造される。1 辺が 1 m、厚さ 5 mm の正方形板ガラスを 650℃に加熱し、25℃の空気流中で急冷する。50m/s、25℃の空気を送風機で板に沿って流した時、板ガラスの冷却状態を計算せよ。ただし、ガラスの熱物性値は「JSME テキストシリーズ 伝熱工学」の値を使用する。ガラス表面の放射率は 0.85 とする。

[解答] まず、高速空気流中に置かれたガラスの熱伝達率を見積もります。送風機からの高速空気は乱れが大きいと考えられるので、「強制対流熱流動解析」ソフトの「乱流平板強制対流」シートで計算します。ガラスの温度としては、初期温度と歪み点温度の中間の 600℃に設定し、下記を C 列に入力します。

平板の長さ $L=1.000\text{E}+00(\text{m})$

平板の幅 $b=1.000\text{E}+00(\text{m})$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=6.000\text{E}+02(^{\circ}\text{C})$

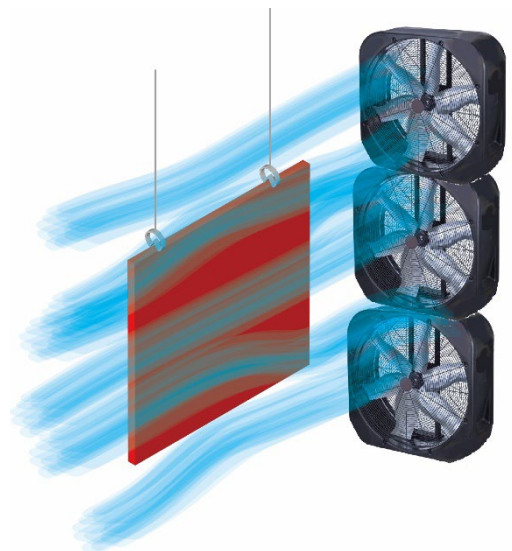
壁面放射率 $\varepsilon=8.500\text{E}-01(-)$

流体の種類: 常圧空気

流速 $u_{\infty}=5.000\text{E}+01(\text{m}/\text{s})$

流体温度 $T_{\infty}=2.500\text{E}+01(^{\circ}\text{C})$

ふく射も考慮した総括熱伝達率が $h_t=1.356\text{E}+02(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$ となります。



次に、ホルダーに添付されている「汎用[非定常]熱伝導解析」プログラムを開き、下記を入力します。
形状は「対称平板」を選択します。

解析形状 (Pull Down) : 対称平板

$x_1=0$

$x_{N+1}=0.0025$

解析時間 (s)=10

初期温度 T_i (°C, K) =650

熱伝導率(W/(mK))=1.03

密度(kg/m³)=2520

比熱 (J/(kgK))=800

体積当たり発熱量(W/m³)=0

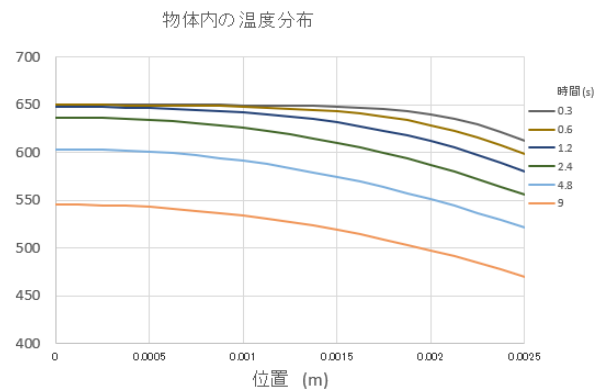
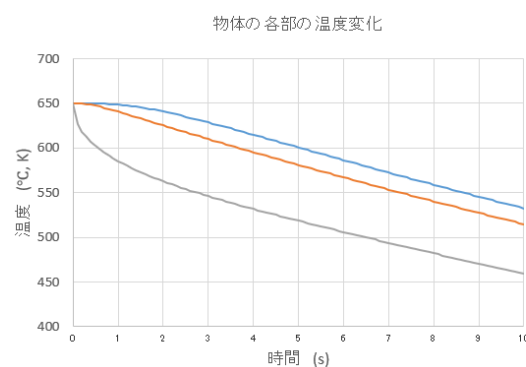
外側境界条件

第?種境界条件: 3

熱伝達率(W/(m²K))=135.56

外部流体温度 (°C) =25

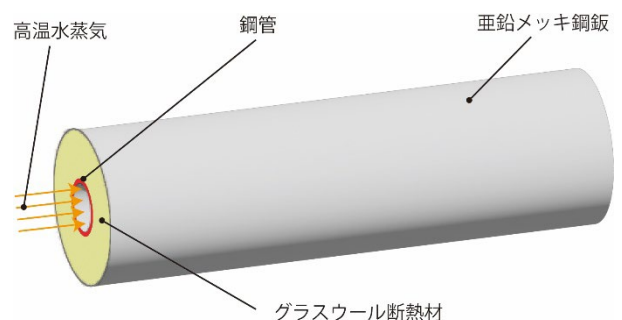
ここで、熱伝達率は「強制対流熱流動解析」ソフトで「乱流平板強制対流」シートの総括熱伝達率をコピーし、値の貼り付けでペーストします。



[コメント] 上図の「物体各部の温度変化」図を見ると、ガラス表面は約 3 秒で 550°Cに冷却されるのに対して、ガラス中心は 8 秒以上かかります。この間、「物体内部温度分布」図に示すようにガラス内には温度分布が生じ、その熱応力で強化ガラスが作られることが分かります。熱応力は別途応力計算を行うことによって詳細が明らかとなります。

18. 強制対流・自然対流と定常熱伝導の複合問題-1

[問題] 内径 50 mm、厚さ 3 mmの鋼管に 200°Cの高温蒸気が流速 30m/s で流入する。鋼管はグラスウールで断熱されており、断熱層表面は厚さ 0.5 mmの亜鉛メッキ鋼板でおおわれている。この断熱パイプの外径は 300 mmである。このパイプが温度 20°Cの静止空気中に置かれているとき、パイプ単位長さ当たりの蒸気の温度低下を計算せよ。ただし、鋼管、グラスウール断熱材および亜鉛メッキ鋼板の熱伝導率はそれぞれ、43.0、0.051、43.0 W/(m・K)とする。また、鋼管内面の等価粗さは 0.15 mm、亜鉛メッキ鋼板表面の放射率は 0.2 とする。



[解答] まず、管内の熱伝達率の近似値を計算します。「強制対流熱流動解析」ソフトで「粗面円管強制対流」シートで熱伝達率の計算をします。物性値変化を考慮しない熱伝達率を計算するとき、流体とは

ば同じ壁面温度を入力します。つまり、

円管の内径 $D=5.000E-02(m)$

等価粗さ $k_e=1.500E-04(m)$

壁面温度 $T_w=2.001E+02(^{\circ}C)$

入口流体温度 $T(0)=2.000E+02(^{\circ}C)$

円管の長さ $L=1.000E+00(m)$

加熱条件： 壁面温度一定

流体の種類： 高温水蒸気

仮流体平均温度 $2.000E+02(^{\circ}C)$

このシートは質量流量を与えるので、「C7」セルに 30 を入れて、「D7」セルの質量流量をコピーし「C22」セルに数値をペーストします。質量流量 $m=2.747E-02(kg/s)$ となります。「C23」セルの流速が 30 となっていることを確認します。この手順で近似的な熱伝達率が**平均対流熱伝達率 $h=8.205E+01(W/(m^2 \cdot K))$** として求められます。

次に、「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムを開きます。解析形状は「円管」を選択します。円管の内側境界の半径を「 $x_1=0.025$ 」とします。本問題の断熱パイプは 3 層構造ですが、計算ツールは 5 層で設定されているので、層の厚さが 5 層となるように分割します。つまり、入力データの一例は下記となります。

領域番号	1	2	3	4	5
領域厚さ $\Delta x_i (m)$	0.003	0.022	0.02	0.0795	0.0005
熱伝導率 $k_i (W/mK)$	43	0.051	0.051	0.051	43
発熱量 $q_{v,i} (W/m^3)$	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

下記の境界条件を与えます。

内側境界条件

第？種境界条件： 3

熱伝達率 $(W/(m^2K))=82.05$

外部流体温度 $(^{\circ}C)=200$

外側境界条件

第？種境界条件： 3

熱伝達率 $(W/(m^2K))=10$

外部流体温度 $(^{\circ}C)=20$

ここで、内側境界条件の熱伝達率は「粗面円管強制対流」のシートの「平均対流熱伝達率 h 」をコピーして値の貼り付けでペーストします。外側境界の自然対流熱伝達はふく射を含む総括熱伝達率の代表値 10 を入力します。

次に断熱パイプ外表面の熱伝達率を推定します。「自然対流伝熱解析」プログラムの「円柱自然対流」シートを開き「C 列」に下記を入力します。

円柱の直径 $D=3.000E-01(m)$

加熱条件： 壁面温度一定

壁面放射率 $\varepsilon=2.000E-01(-)$

流体温度 $T_{\infty}=2.000E+01(^{\circ}C)$

円柱長さ $L=1.000E+00(m)$

壁面温度 $T_w=2.3352E+01(^{\circ}C)$

流体の種類： 常圧空気

表面温度は「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「O12」セルの管内面の表面温度をコピーし値のペーストで入力します。その結果、総括熱伝達率 $h_t=3.842E+00(W/(m^2 \cdot K))$ が得られるので、それを「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「D21」セルにコピーします。その結果として、「O12」のセルの「円柱自然対流」シートの表面温度にコピーします。このプロセスを数回繰り返すと、断熱パイプ外表面温度が $28.05^{\circ}C$ と求まります。「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「J12」セルにパイプ内面温度が表記されていますので、「粗面円管強制対流」シートの「C16」セルに壁面温度 $T_w=1.975E+02(^{\circ}C)$ をペーストすると、伝熱量 $Q=-2.893E+01(W)$ が求められます。また、「C32」セルに**出口流体温度**

$T_w(L)=1.995E+02(^{\circ}C)$ が表記されているので、入口流体温度と $200^{\circ}C$ と比較して、単位長さ当たり $0.5^{\circ}C$ 蒸気温度が低下していることが分かります。

[コメント] この例題では、断熱パイプ 100m 当たり約 $50^{\circ}C$ 蒸気温度が低下します。蒸気の温度低下が大きい場合は、単位長さ当たりの熱損失量が変わるので、同じ質量流量で蒸気温度を変化させた熱損失の計算を行う必要があります。

断熱パイプ内外の熱伝達率の計算は「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの熱伝導解析との繰り返し計算で算出しますが、内側の強制対流熱伝達の値 $8.209E+01(W/(m^2\cdot K))$ は、最初の近似値とほぼ同じなので、繰り返し計算は必要ありません。外側の自然対流熱伝達は壁面と流体の温度差が熱伝達の駆動力となるために、熱伝導計算と対流計算の反復計算が必要となります。

もし、このパイプに断熱材をつけないで、表面放射率 0.6 の裸パイプとした場合、同様な計算で単位長さ当たりの蒸気温度低下は $21^{\circ}C$ となります。この計算は皆さんで行ってください。この結果からも断熱材の使用は省エネのために重要であることが分かります。

19. 強制対流・自然対流と定常熱伝導の複合問題-2

[問題] 高さ 1.8m、幅 0.9m のベランダ用窓ガラスが幅 10m、高さ 3m の壁の中央に取り付けられている。窓ガラスは複層ガラスで、2 枚のガラスの厚さは 3 mm、空気層の厚さは 30 mm である。窓ガラスの外気温度は $-5^{\circ}C$ で、6m/s の風が壁に平行に吹いている。室内温度は $20^{\circ}C$ である。窓ガラスを通過する熱流束 $W/(m^2\cdot K)$ を計算せよ。複層ガラスの外表面の放射率は 0.85、内面（ガラスが向かい合っている面）の放射率は 0.125 とする。

[解答] まず、窓と外気との熱伝達率の近似値を計算します。「強制対流熱流動解析」ソフトで「乱流平板強制対流」シートで窓を含む壁全体の熱伝達率の計算をします。物性値変化を考慮しない熱伝達率を計算するときは、流体とほぼ同じ壁面温度を入力します。つまり、

平板の長さ $L=1.000E+01(m)$

平板の幅 $b=3.000E+00 (m)$

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=-4.999E+00(^{\circ}C)$

壁面放射率 $\varepsilon=8.500E-01(-)$

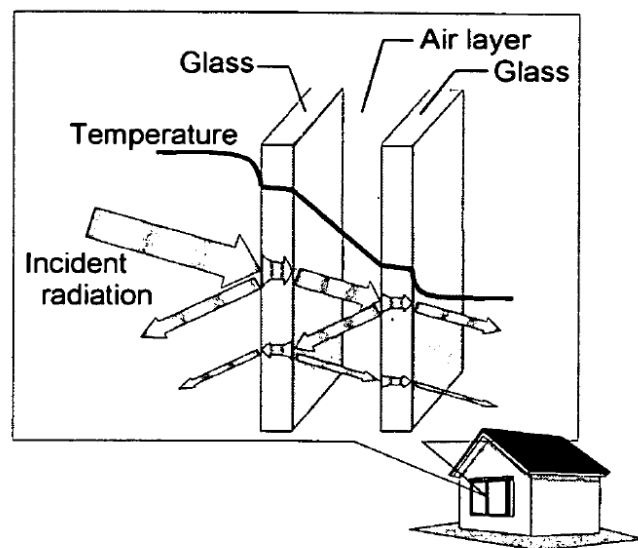
流体の種類: 常圧空気

流速 $u_{\infty}=6.000E+00(m/s)$

流体温度 $T_{\infty}=-5.000E+00(^{\circ}C)$

この手順で近似的な熱伝達率が総括熱伝達率 $h_t=2.030E+01(W/(m^2\cdot K))$ として求められます。

次に、「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムを開きます。解析形状は「両面平板」を選択します。平板の内側境界の座標を「 $x_1=0$ 」とします。本問題の複層ガラスは 2 枚のガラスと空気層の 3 層構造です



円山ほか、日本機械学会論文集(B), Vol. 68, No.676, (2002).より引用

が、計算ツールは 5 層で設定されているので、層の厚さが 5 層となるように分割します。つまり、入力データの一例は下記となります。

領域番号	1	2	3	4	5
領域厚さ Δx_i (m)	0.003	0.005	0.02	0.005	0.003
熱伝導率 k_i (W/mK)	1.03	0.026	0.026	0.026	1.03
発熱量 $q_{v,i}$ (W/m ³)	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00

下記の境界条件を与えます。ここで、空気層の熱伝導率は静止空気の値を入れておきます。

内側境界条件

第?種境界条件: 3

熱伝達率(W/(m²K))=10

外部流体温度 (°C) =20

外側境界条件

第?種境界条件: 3

熱伝達率(W/(m²K))= 20.30

外部流体温度 (°C) =-5

ここで、外側境界条件の熱伝達率は、「乱流平板強制対流」シートの「総括熱伝達率 h_t 」をコピーして値の貼り付けでペーストします。内側境界の自然対流熱伝達は、ふく射を含む総括熱伝達率の代表値 10 を入力します。

次に空気層の伝熱を計算します。「自然対流伝熱解析」プログラムの「矩形容器内自然対流」シートを開きます。この計算にはガラスの内側面の温度が必要ですが、「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの接点温度「K12」セルと「N12」セルにその温度が記載されています。つまり、「矩形容器内自然対流」シート「C 列」に下記を入力します。

矩形容器の隙間 $L=3.000E-02$ (m)

矩形容器の高さ $H=1.900E+00$ (m)

伝熱面の幅 $W=9.000E-01$ (m)

高温面温度 $T_1=1.803E+01$ (°C)

低温面温度 $T_2=-4.003E+00$ (°C)

壁面放射率 $\varepsilon_1=\varepsilon_2=1.250E-01$ (-)

流体の種類: 常圧空気

結果として下記の値が求められます。

レイリー数 $Ra_L=7.231E+04$ (-)

ヌセルト数 $Nu=2.2682E+00$ (-)

総括熱伝達率 $h_t=2.204E+00$ (W/(m²·K))

熱伝達が総括熱伝達と等しくなる、仮想の等価熱伝導率を計算します。「矩形容器内自然対流」シートでは、複層ガラスを通過する熱流束は、 $q=h_t(T_1-T_2)$ で表されます。隙間 L の空間を等価熱伝導率 k_t で通過する熱流束は $q=k_t(T_1-T_2)/L$ で表されますから、等価熱伝導率は $k_t=h_tL$ で表されます。この場合 $k_t=0.0661$ (W/(m·K))となります。この値を、「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「K7」、「L7」、「M7」セルに入れます。この計算で、内側ガラス面の温度が「J12」に 15.89°Cと表記されます。

次にガラス窓の内側表面の熱伝達率を推定します「鉛直平板自然対流」シートを開き「C 列」に下記を入力します。壁面温度には、先ほどの内側ガラス面温度を入れます。

平板の長さ $L=1.800E+00$ (m)

平板の幅 $b=9.000E-01$ (m)

加熱条件: 壁面温度一定

壁面温度 $T_w=1.589E+01$ (°C)

壁面放射率 $\varepsilon=8.500E-01$ (-)

流体の種類: 常圧空気

流体温度 $T_\infty=2.000E+01$ (°C)

表面温度は「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「J12」セルの窓内側の表面温度をコピーし、値のペーストで入力します。その結果、総括熱伝達率 $h_t=7.114E+00$ (W/(m²·K))が得られるので、それを「汎

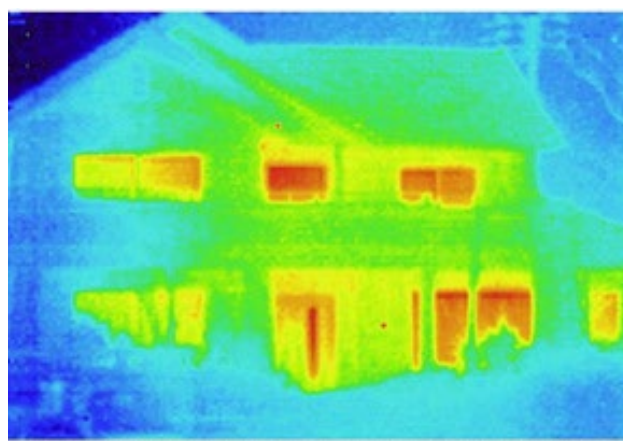
用[定常]熱伝導解析」プログラムの「D14」セルにコピーします。その結果として、「J12」セルの値を「鉛直平板自然対流」シートの表面温度にコピーします。このプロセスを数回繰り返すと、窓ガラス内側表面温度が 14.69℃と求まります。「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムの「O12」セルにガラス外表面温度が表記されていますので、「乱流平板強制対流」シートの「C12」セルに壁面温度 $T_w = -3.093E+00$ (°C) をペーストすると、ガラス面を通過する**壁面熱流束** $q = 3.870E+01$ (W/(m²・K)) が求められます。この反復手順を数回繰り返すと**壁面熱流束** $q = 3.755E+01$ (W/(m²・K)) が求められます。実用的には、ここまでの反復計算は必要ありません。

なお、上記の数値は反復の回数や手順で若干異なる場合があります。

〔コメント〕この例題では求めた窓ガラスを透過する熱流束を内外の温度差 25℃で除すると、建築で用いられる U A 値（外皮平均熱還流率）が計算できます。この場合、U A 値は 1.5 となり、窓の値としては高水準です。しかし、最近の高断熱住宅では家全体の U A 値は、0.6 以下が求められているので、窓からの熱損失は相対的に大きくなります。「汎用[定常]熱伝導解析」プログラムは、より高性能な 3 層窓ガラスの計算が可能です。詳しくは本チュートリアル 1 頁の文献[1]をご覧ください。

この例題と同様な手法で、単層ガラス窓の伝熱計算も可能です。この場合、壁面熱流束 $q = 1.431E+02$ (W/(m²・K)) となり、U A 値は 5.7 となり、複層ガラスに比べて大きくなります。この時の内側ガラス面温度は 2.5℃となり、室内温度 20℃相対湿度 50%の場合、露点温度以下となり窓ガラス内側に結露が生じます。なお、複層ガラスの表面温度では結露は生じません。

室内側の自然対流は「鉛直平板自然対流」シートの図と逆方向の対流が発生しています。冷却された空気は床面を流れてコールドドラフトとなります。この流れが隙間風として感じられます。



住宅の可視光写真と夜間に撮影した長波長赤外線写真（サーモカメラ写真）

サーモカメラの温度分布を比較すると、壁面からの熱流出に比べて窓（複層ガラス）や玄関ドアからの放熱が大きいことが分かる。