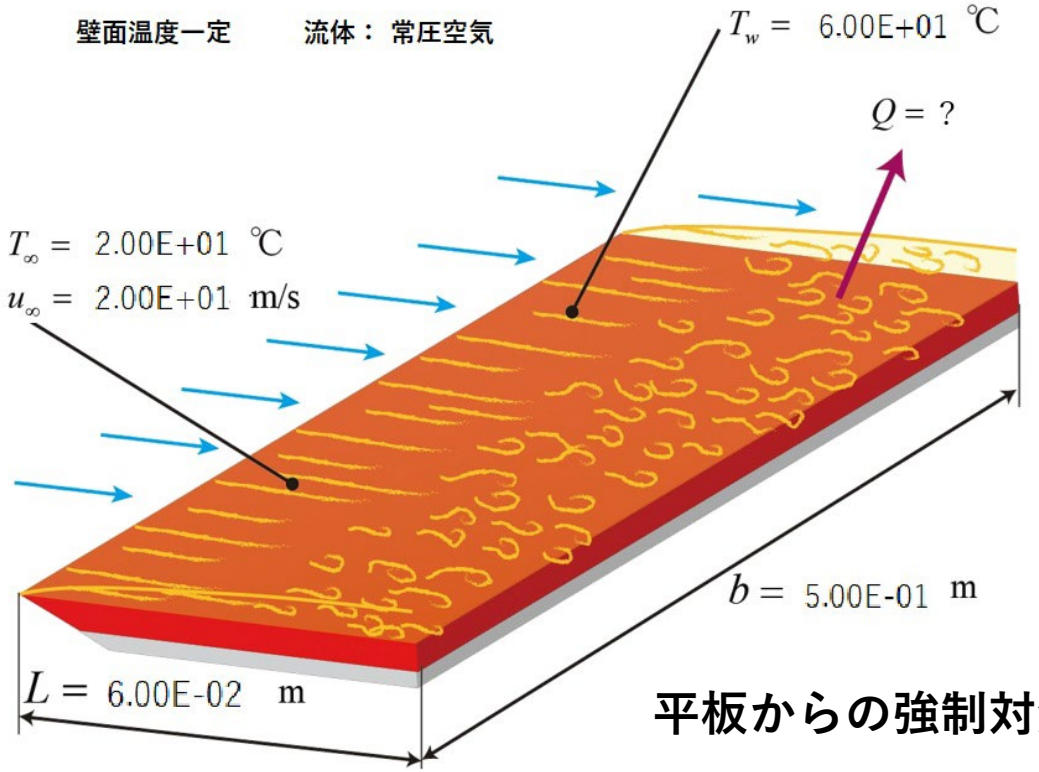
第3章　対流熱伝達　⑦

3-7.　解析ソフトを使った伝熱計算

下図に示すように、長さ6cmで幅50cmの平板上を温度20℃の空気が20m/sで流れている。平板表面が一様な温度60℃に保たれているとき、その表面（片面）からの放熱量はいくらか。



平板からの強制対流熱伝達

計算データの入力と結果

形状データ	平板の長さ L	6.000E-02	(m)
	平板の幅 b	5.000E-01	(m)
	平板表面積 S	3.000E-02	(m^2)
熱条件	加熱条件	壁面温度一定	
	壁面温度 Tw	6.000E+01	(°C)
	壁面放射率 ε	0.000E+00	(-)
	壁面平均温度 Tw	6.000E+01	(°C)
	壁面後端温度	6.000E+01	(°C)
	伝熱量 Q	**8.539E+01**	(W)
	壁面熱流束 q	2.846E+03	(W/(m^2))
流体	流体の種類	常圧空気	気体
	流速 u_∞	2.000E+01	(m/s)
	流体温度 T_∞	2.000E+01	(°C)
	膜温度 T_f	4.000E+01	(°C)

技術者と研究者のための伝熱工学の基礎と応用

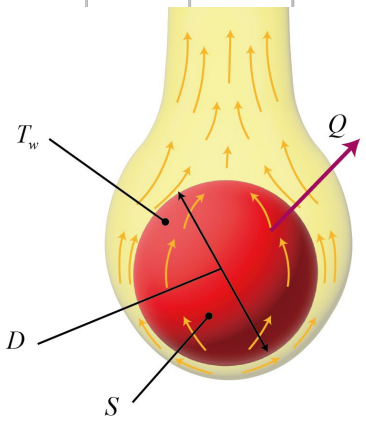
第3章　対流熱伝達　⑥　　3-6.　自然対流熱伝達の定式化

前回の内容

球の自然対流熱伝達

$$Nu = 2 + \frac{0.589 Ra^{1/4}}{\left[1+(0.43/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \times \left(1 + \frac{7.44\times10^{-8} Ra^{1/4}}{\left[1+(0.43/Pr)^{9/16}\right]^{16/9}}\right) \quad [1]$$

$$Nu = f\left(Ra, Pr\right)$$



$Nu = hD/k$

1.E+01
1.E+00

1.E-04 1.E-03 1.E-02 1.E-01 1.E+00 1.E+01 1.E+02 1.E+03 1.E+04 1.E+05 1.E+06 1.E+07 1.E+08 1.E+09 1.E+10 1.E+11 1.E+12 1.E+13

球の自然対流熱伝達の無次元表記

$$Ra = g\beta(T_W - T_\infty)D^3/(\alpha\nu)$$

第3章　対流熱伝達

3-1.　対流熱伝達の概要
3-2.　強制対流熱伝達と流動の様相
3-3.　自然対流熱伝達の様相
3-4.　熱流動の無次元表記
3-5.　強制対流の流動と伝熱の定式化
3-6.　自然対流熱伝達の定式化
3-7.　解析ソフトを使った伝熱計算



管内流れの無次元数と流れの判定



直径1cm、長さ1mの円形パイプの中を、入り口温度20°C
の水が速度10cm/sで流れている。

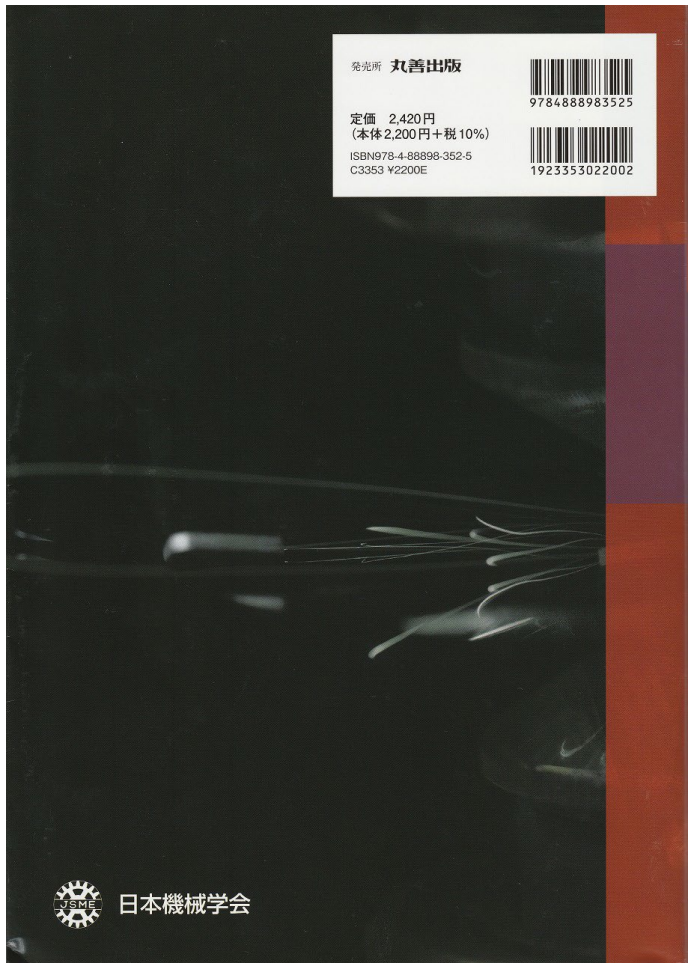
(1)　この時、管内のレイノルズ数を計算せよ。

(2)　流れは層流か乱流か。

だだし、水の物性値は教科書「JSEME　演習　伝熱工学」の
巻末の表を使用すること。

ここでビデオを止めて電卓を使って計算してみましょう。

伝熱工学クイズ3　物性値表の使い方



テキスト　JSME　演習　伝熱工学（第2版）の裏表紙

大気圧における水の熱物性値

圧縮液					
温度 T (°C)	密度 ρ (kg/m^3)	定圧比熱 c_p (kJ/(kg・K))	粘度 μ (μPa・s)	熱伝導率 k (mW/(m・K))	プラントル数 Pr
0	999.8	4.219	1792	562.0	13.45
10	999.7	4.195	1306	582.0	9.414
20	998.2	4.185	1002	599.5	6.991
30	995.7	4.180	797.3	615.0	5.419
40	992.2	4.179	653.0	628.6	4.341
50	988.0	4.180	546.9	640.5	3.568
60	983.2	4.183	466.4	650.8	2.998
70	977.8	4.188	403.9	659.6	2.565
80	971.8	4.196	354.4	667.0	2.229
90	965.3	4.205	314.4	673.0	1.964
100	958.4	4.217	281.8	677.7	1.753

表の値より、水の動粘度は

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.002\times10^{-3}}{998.2} = 1.004\times10^{-6}\ \mathrm{m^2/s} \qquad (1)$$

伝熱工学クイズ3　解答

直径1cm、長さ1mの円形パイプの中を、入り口温度20℃の水が速度10cm/sで流れている。

(1)　管内のレイノルズ数を計算せよ。

(2)　流れは層流か乱流か

テキストの表より、水の動粘度は

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{1.002\times10^{-3}}{998.2} = 1.004\times10^{-6}\ \mathrm{m^2/s} \qquad (1)$$

平均流速 u , 管直径を D とすると

（1）　レイノルズ数は

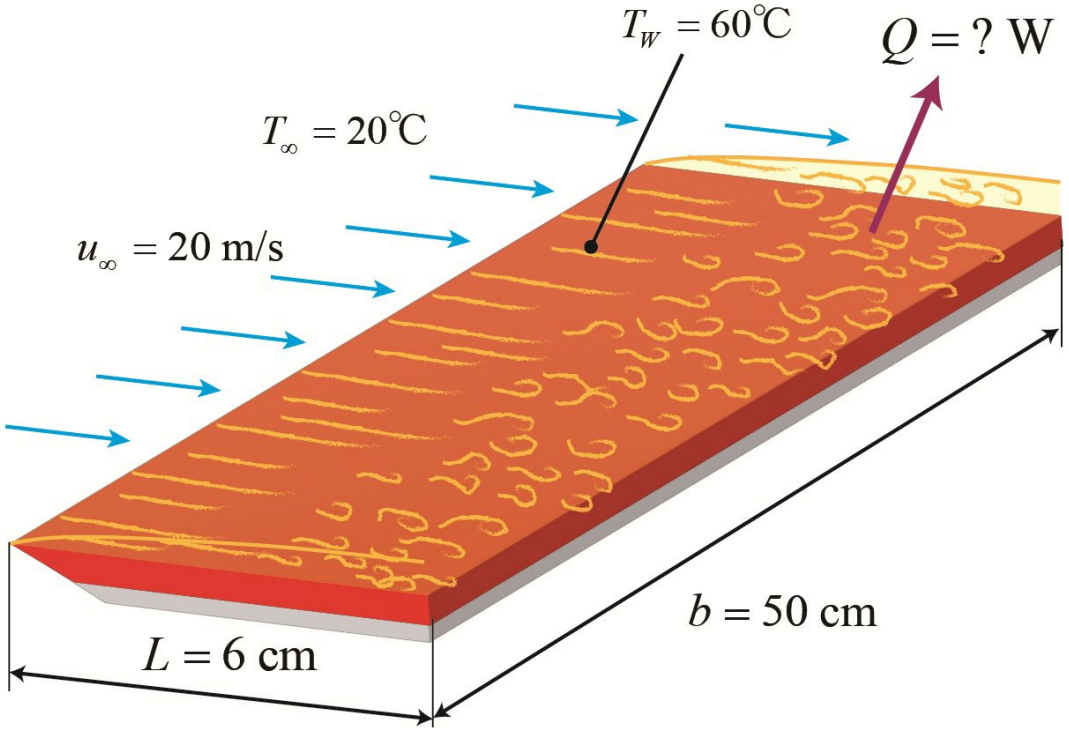
$$Re = \frac{uD}{\nu} = \frac{0.1\times0.01}{1.004\times10^{-6}} = 996.0 \qquad (2)$$

（2）　996<2300（臨界レイノルズ数）であるから

流れは層流である

例題1　平板の強制対流熱伝達

図に示すように、長さ6 cmで幅50 cmの平板上を温度20℃の空気が速度20m/sで流れている。平板表面が一様な温度60℃に保たれる時、その表面（片面）からの放熱量はいくらか。



テキスト　JSMEテキストシリーズ　演習
伝熱工学　p.40　【例3.10】

対流熱伝達の汎用解析プログラムの導入

【フリーソフトの導入】

講師が開発した、対流熱伝達汎用解析ソフトを導入する。

この画像下の説明文の「もっと見る」をクリックし、下記のアドレスのホームページを開く。

技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用

https://www.ifs.tohoku.ac.jp/komiya/maru/lecture/index.html

そのホームページにある**汎用伝熱解析ソフト**をクリックし、プログラムのZipフォルダーをダウンロードし、その中のフォルダーを自分のコンピュータにコピーする。

このフォルダーには、このレクチャーシリーズで使う、熱流動の汎用ソフトが収納されている。実際の機器開発にも使用できるソフトが多いので、大いに活用していただきたい。

フォルダーの中に**強制対流熱流動解析**が収納されている。今回は、このプログラムを使用するので、そのエクセルファイルを開ける。



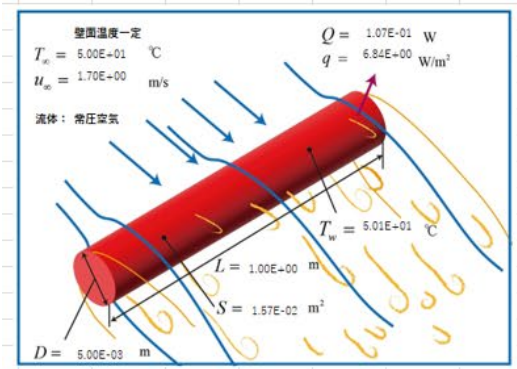
他の汎用プログラムについては、このレクシャーシリーズで使い方を順次説明する。

強制対流熱流動解析Ver.2.0　表紙

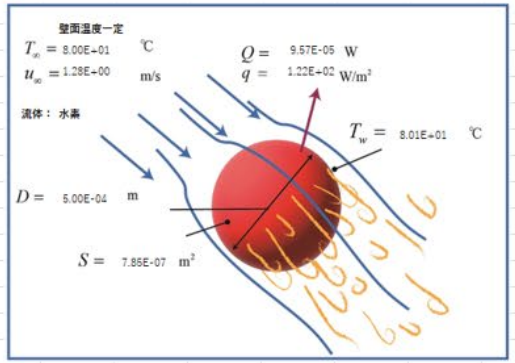
技術者や研究者のための強制対流熱流動解析ソフト Ver.2.0

本ソフトは、強制対流熱流動解析ついて熱伝達と流体抵抗等を計算することが可能。
加熱条件は、壁面温度一定と加熱量一定の条件を選ぶことができる。

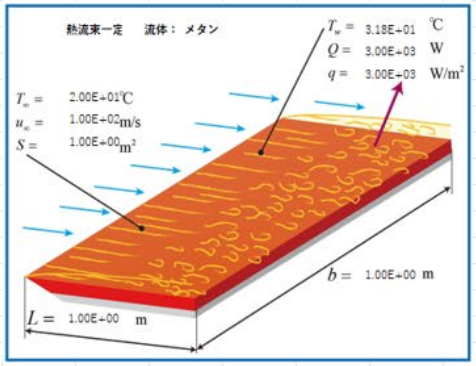
解析可能な流体は常圧空気、常圧水、または常圧の水素、メタン、高温水蒸気、メタノール、エタノール、オクタン、エンジンオイル、グリセリン、その他　をプルダウンで選ぶことができる。



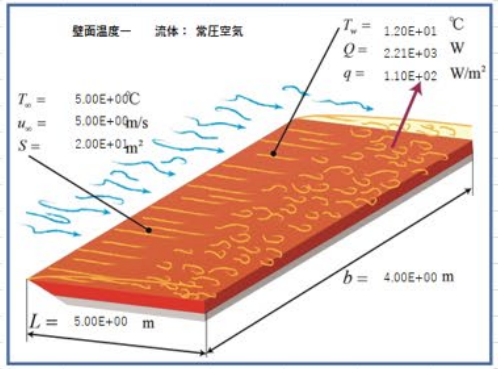
円柱強制対流



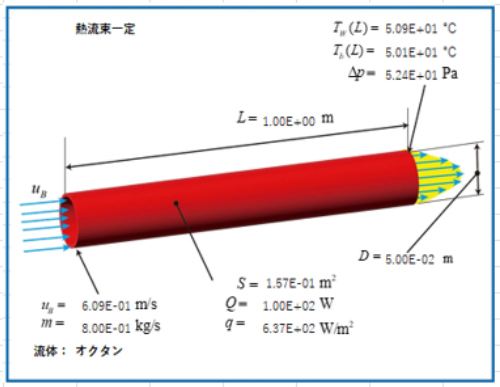
球強制対流



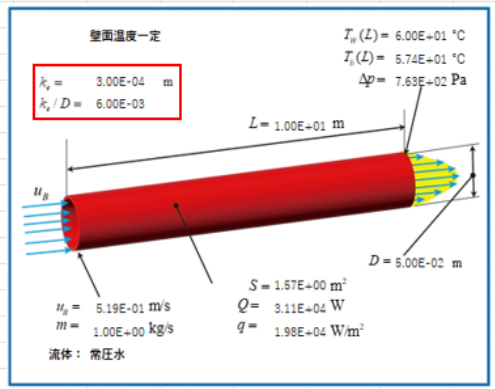
平板強制対流



乱流平板強制対流

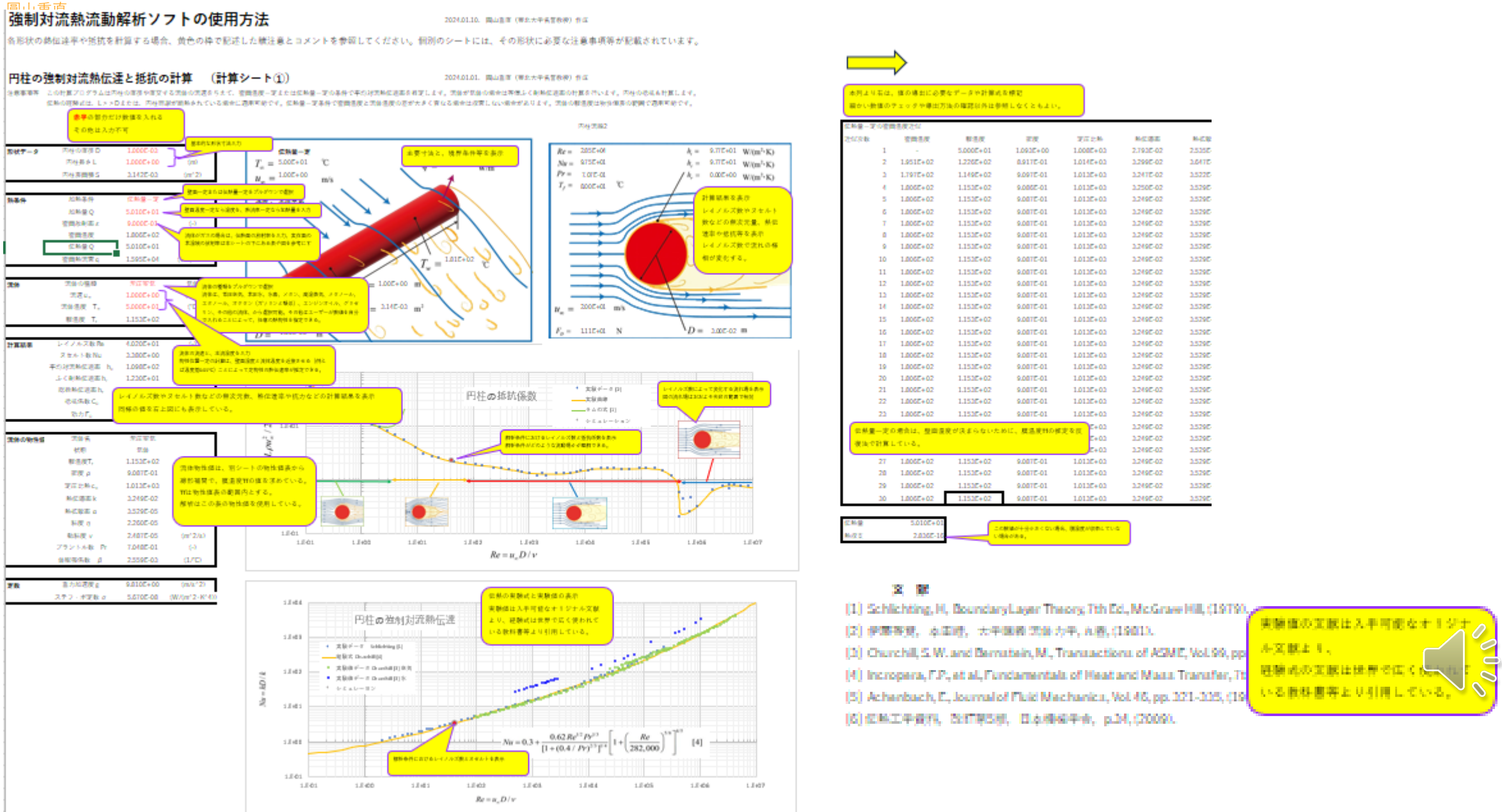


平滑円管内強制対流



粗面円管内強制対流

強制対流熱流動解析Ver.2.0　ソフトの使い方

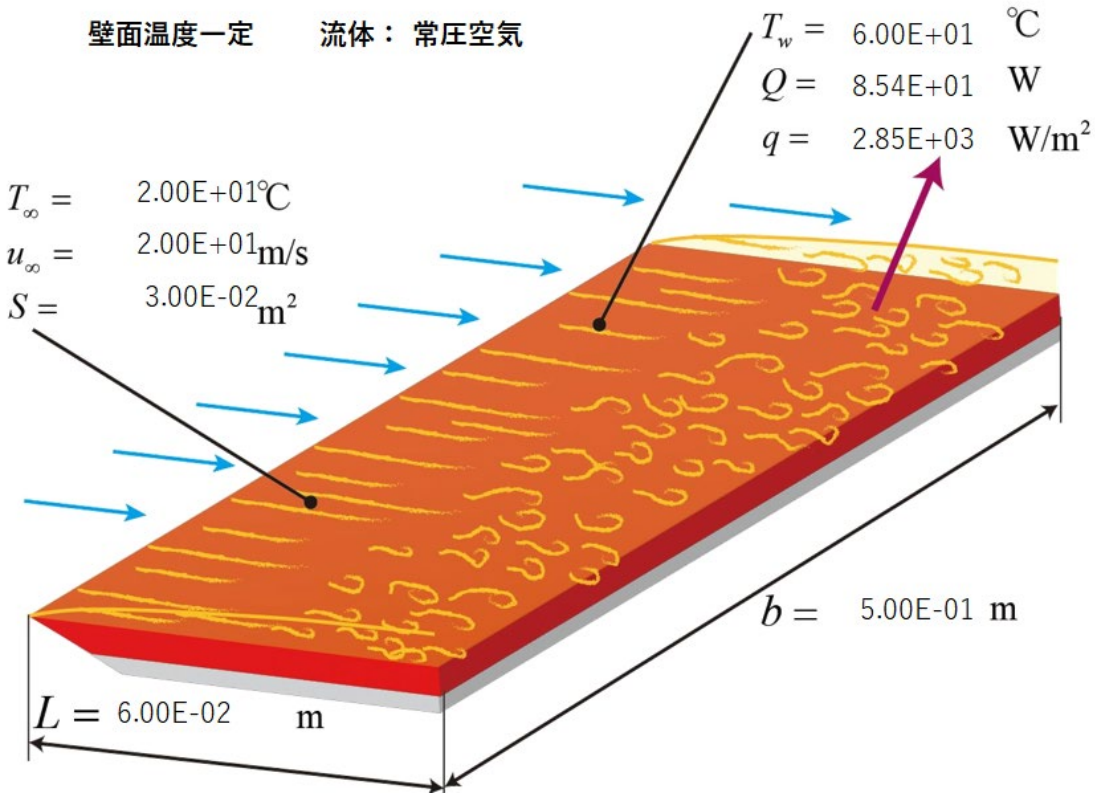


解析条件のデータ入力

平板周りの強制対流熱伝達解析なので、「平板強制対流」のシートを開く。

形状データ	平板の長さ L	6.000E-02	(m)
	平板の幅 b	5.000E-01	(m)
	平板表面積 S	3.000E-02	(m^2)
熱条件	加熱条件	壁面温度一定	
	壁面温度 Tw	6.000E+01	(°C)
	壁面放射率 ε	0.000E+00	(-)
	壁面平均温度 Tw	6.000E+01	(°C)
	壁面後端温度	6.000E+01	(°C)
	伝熱量 Q	**8.539E+01**	(W)
	壁面熱流束 q	2.846E+03	(W/(m^2))
流体	流体の種類	常圧空気	気体
	流速 u_∞	2.000E+01	(m/s)
	流体温度 T_∞	2.000E+01	(°C)
	膜温度 T_f	4.000E+01	(°C)

横 (値) 軸 補助目盛線



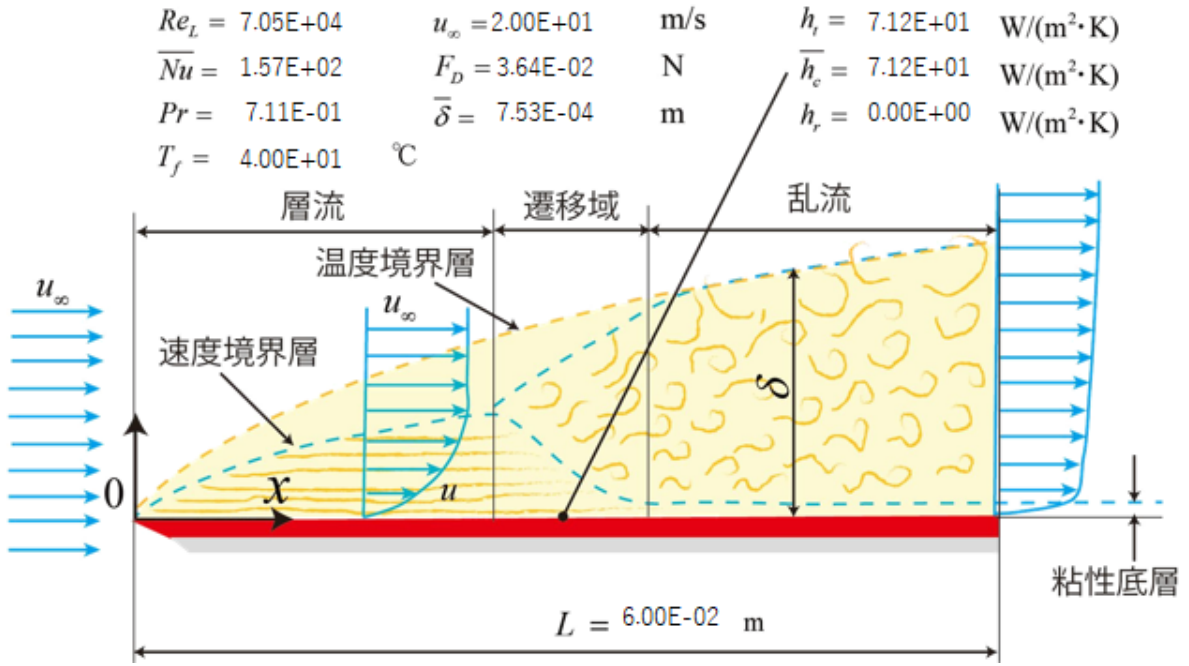
解析結果の詳細

計算結果			
	レイノルズ数 Re_L	7.052E+04	(-)
	平均ヌセルト数 Nu_L	1.570E+02	(-)
	平均対流熱伝達率 h_c	7.116E+01	(W/(m^2・K))
	ふく射熱伝達率 h_r	0.000E+00	(W/(m^2・K))
	総括熱伝達率 h_t	7.116E+01	(W/(m^2・K))
	平均境界層厚さ δ	7.529E-04	(m)
	摩擦係数 C_f	5.039E-03	(-)
	抗力 F_D	3.644E-02	(N)

$T_w =$ 6.00E+01 ℃

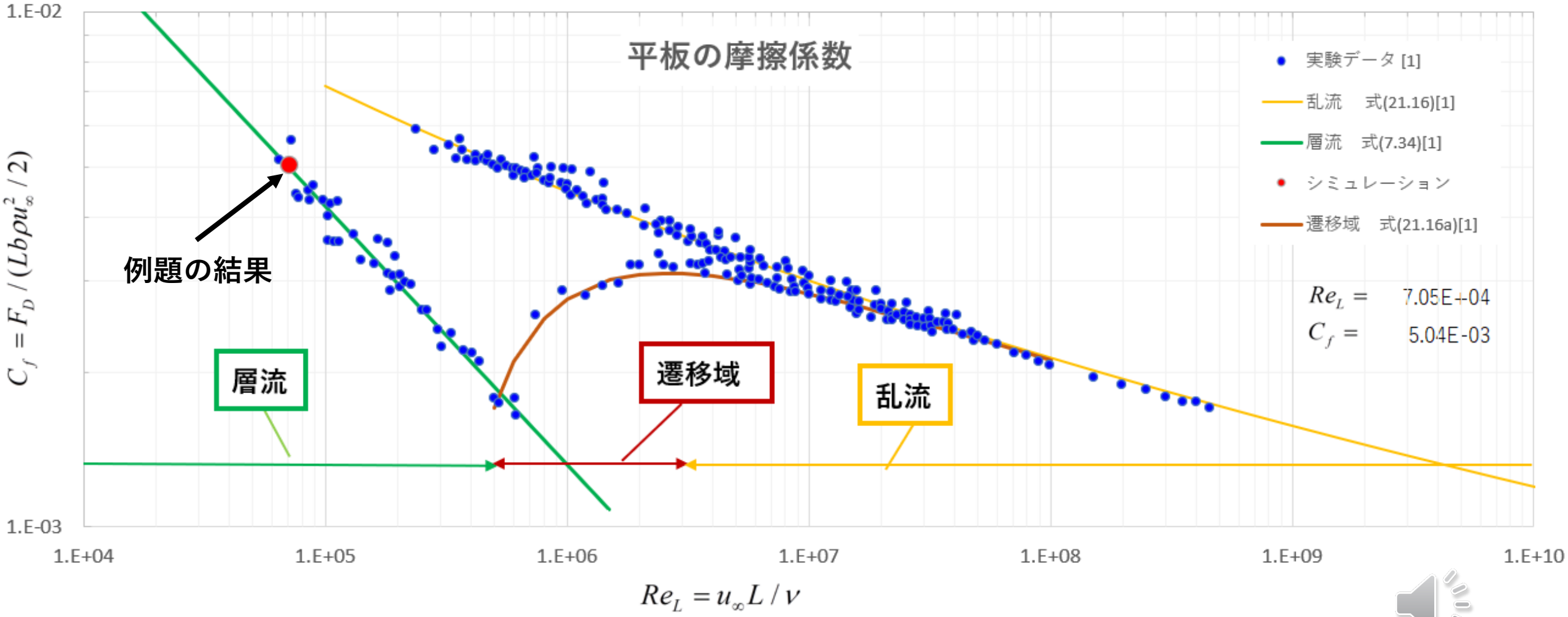
$Q =$ 8.54E+01 W

$q =$ 2.85E+03 W/m^2



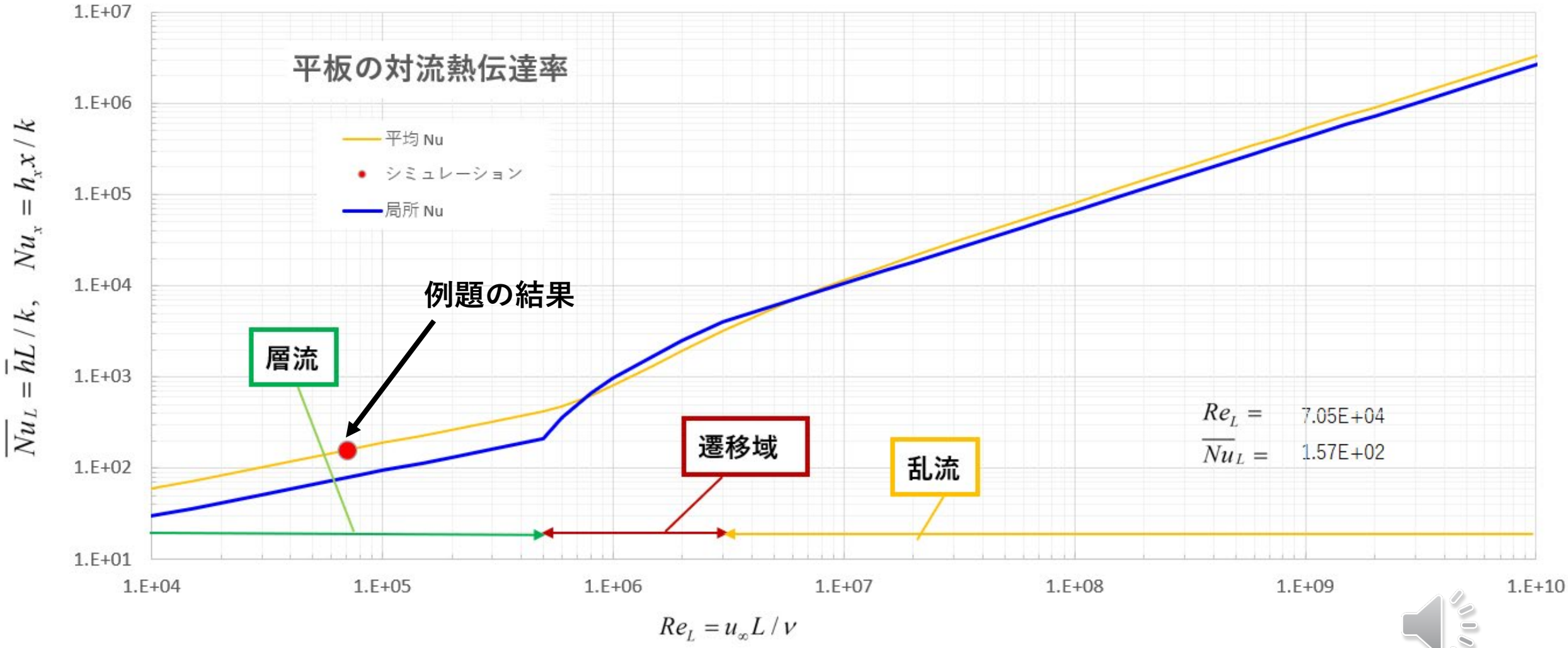
流体の物性値	流体名	常圧空気	
	状態	気体	
	膜温度T_f	4.000E+01	(°C)
	密度 ρ	1.128E+00	(kg/m^3)
	定圧比熱 c_p	1.008E+03	(J/(kg・K))
	熱伝導率 k	2.720E-02	(W/(m・K))
	熱拡散率 α	2.393E-05	(m^2/s)
	粘度 η	1.919E-05	(Pa・s)
	動粘度 ν	1.702E-05	(m^2/s)
	プラントル数 Pr	7.112E-01	(-)
	体膨張係数 β	3.236E-03	(1/°C)

平板の摩擦係数とレイノルズ数の関係



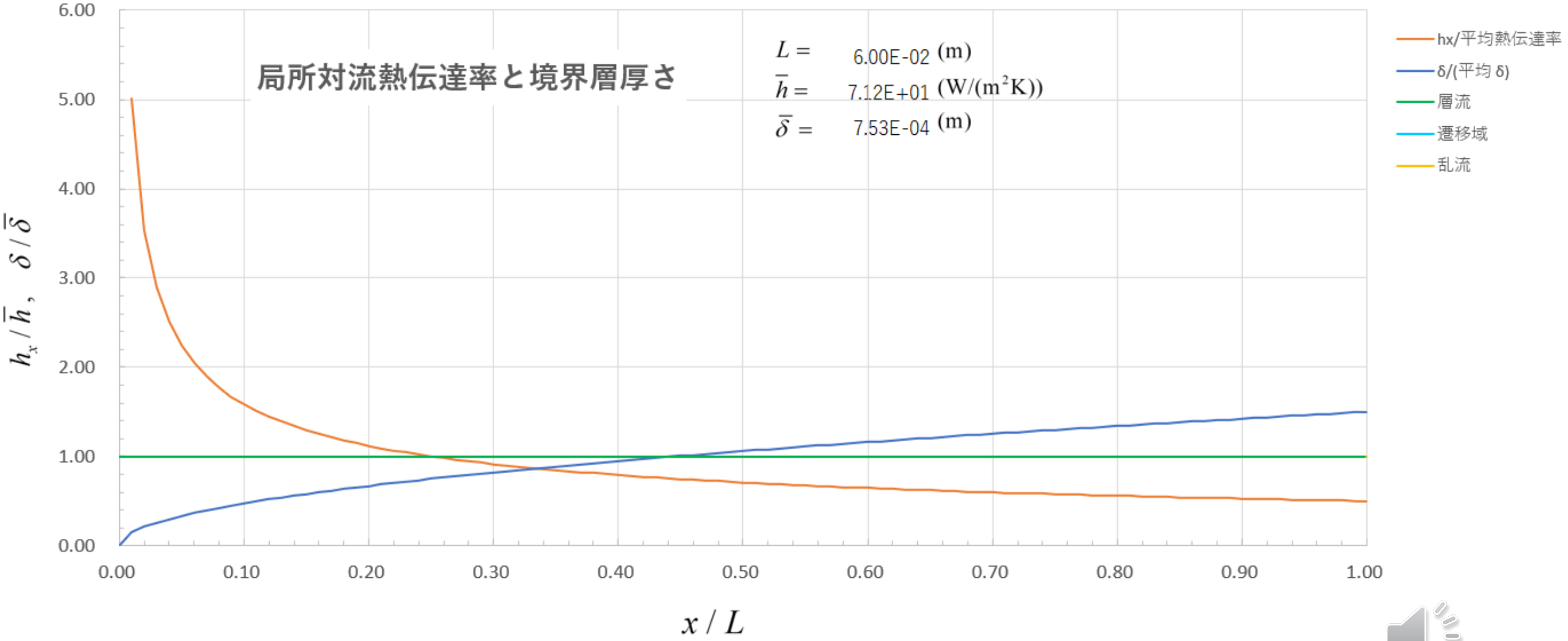
参考文献　Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).

レイノルズ数と局所および平均ヌセルト数の関係



参考文献　Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).

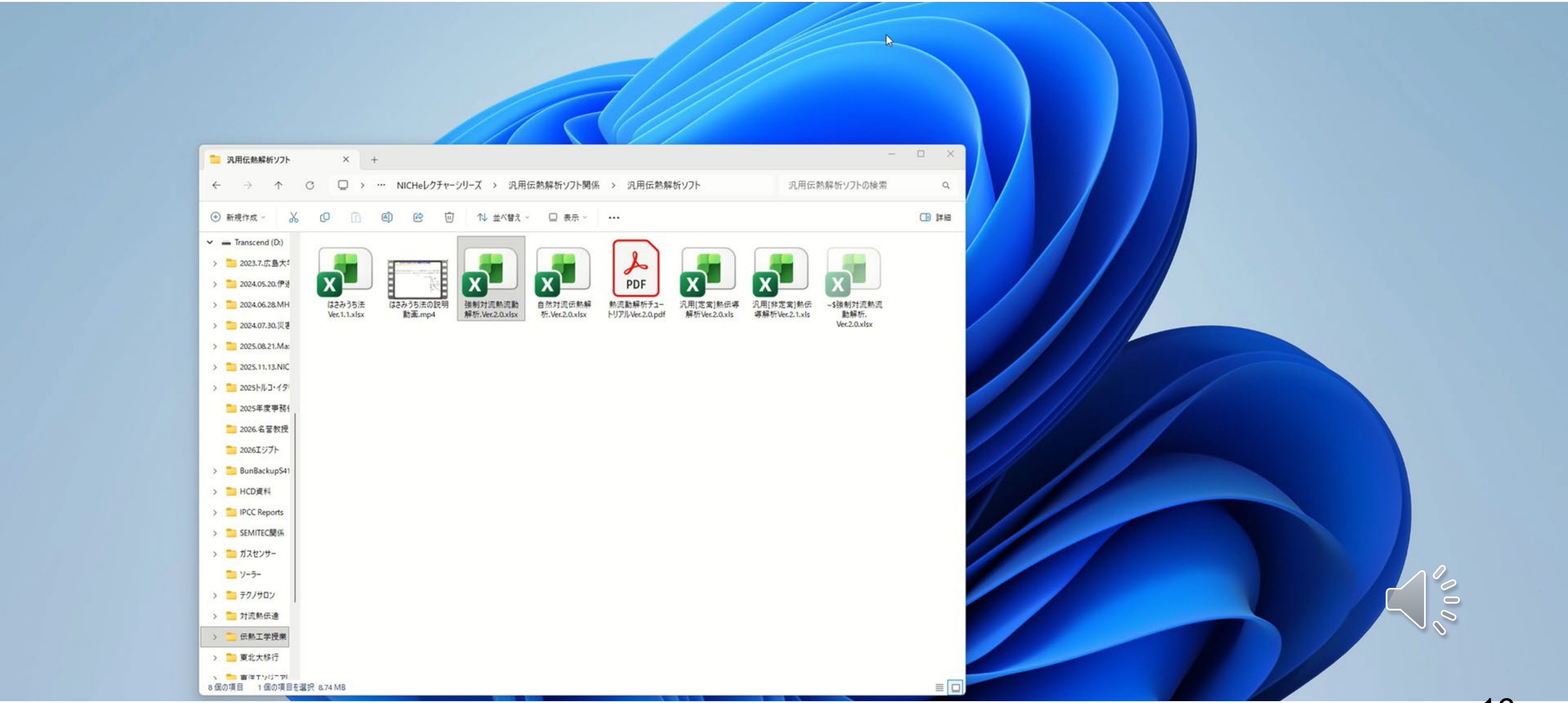
平板上の境界層厚さと局所熱伝達率の変化



参考文献　Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).

Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).

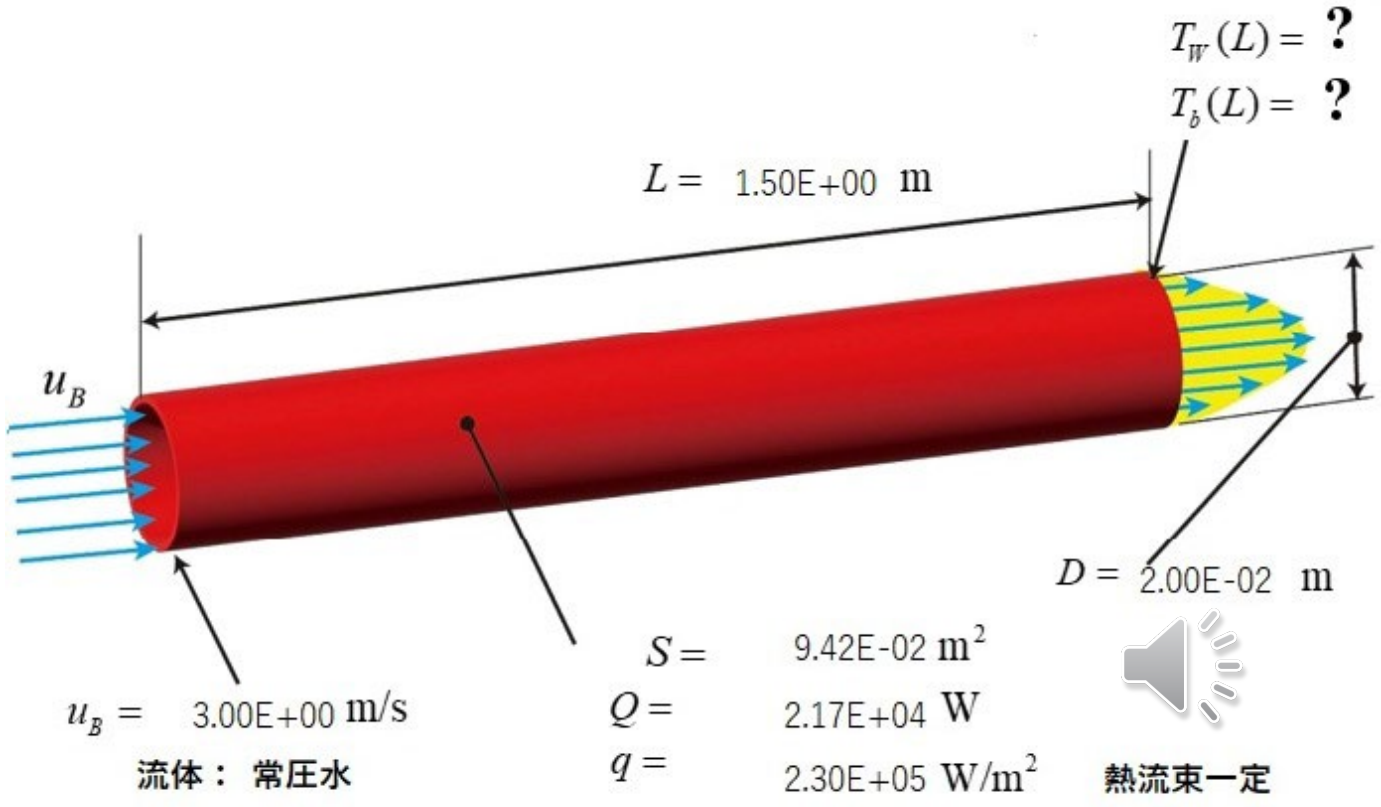
汎用熱流動プログラムの使用例（例題1）



例題2　平滑管内の強制対流熱伝達

20℃の水が、内径2 cmの長い円形管に、3 m/sの一定速度で流入する。管壁内部の電気加熱により、内壁表面から流れる水に向かって、230 kW/m^{2}の一定熱流束が供給される。管入り口から1.5 mの地点における流体の平均温度および壁面温度を求めよ。

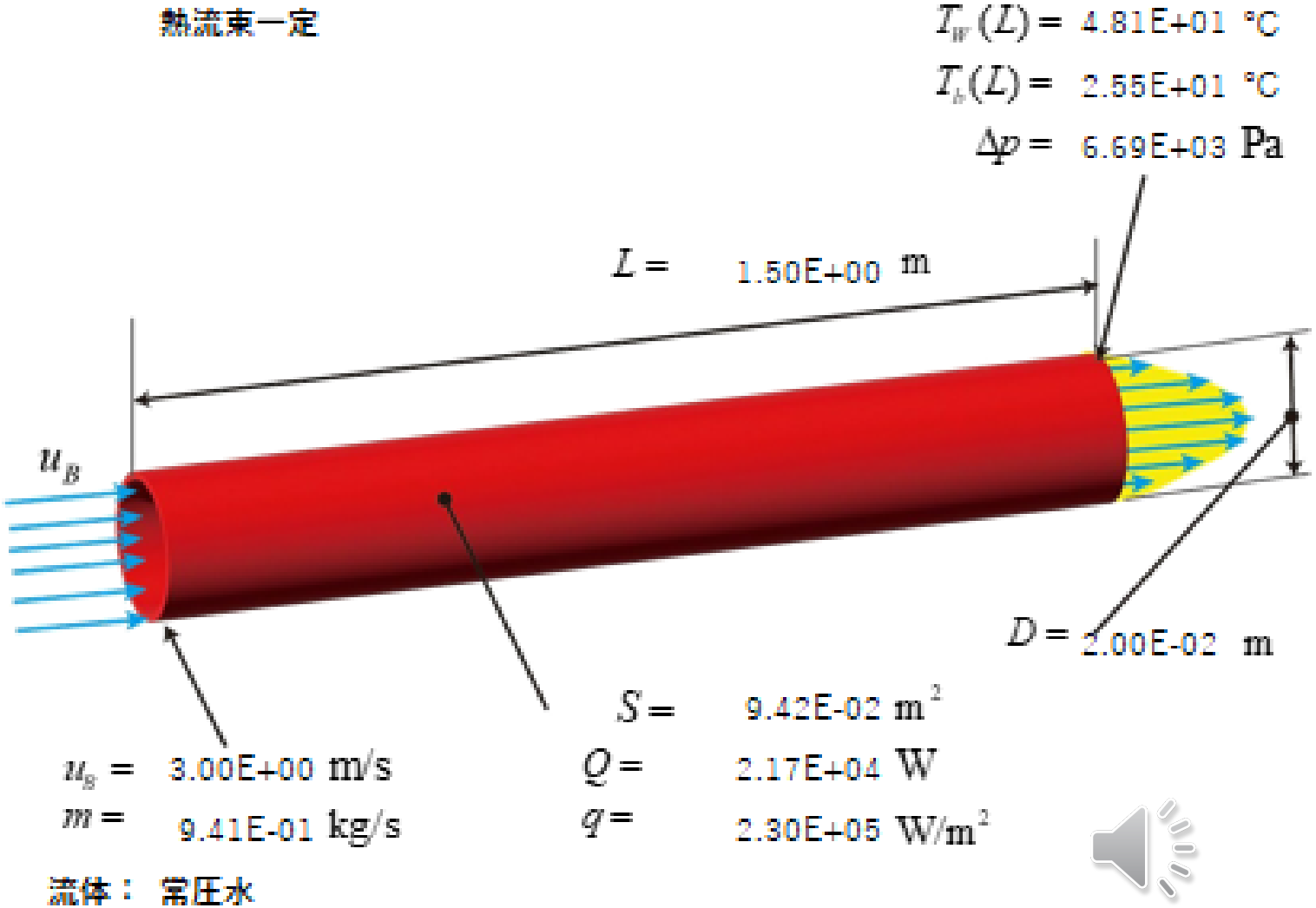
テキスト　JSMEテキストシリーズ　演習伝熱工学　p.52 演習問題【3･13】(英文和訳),
解答：pp. 142-143.



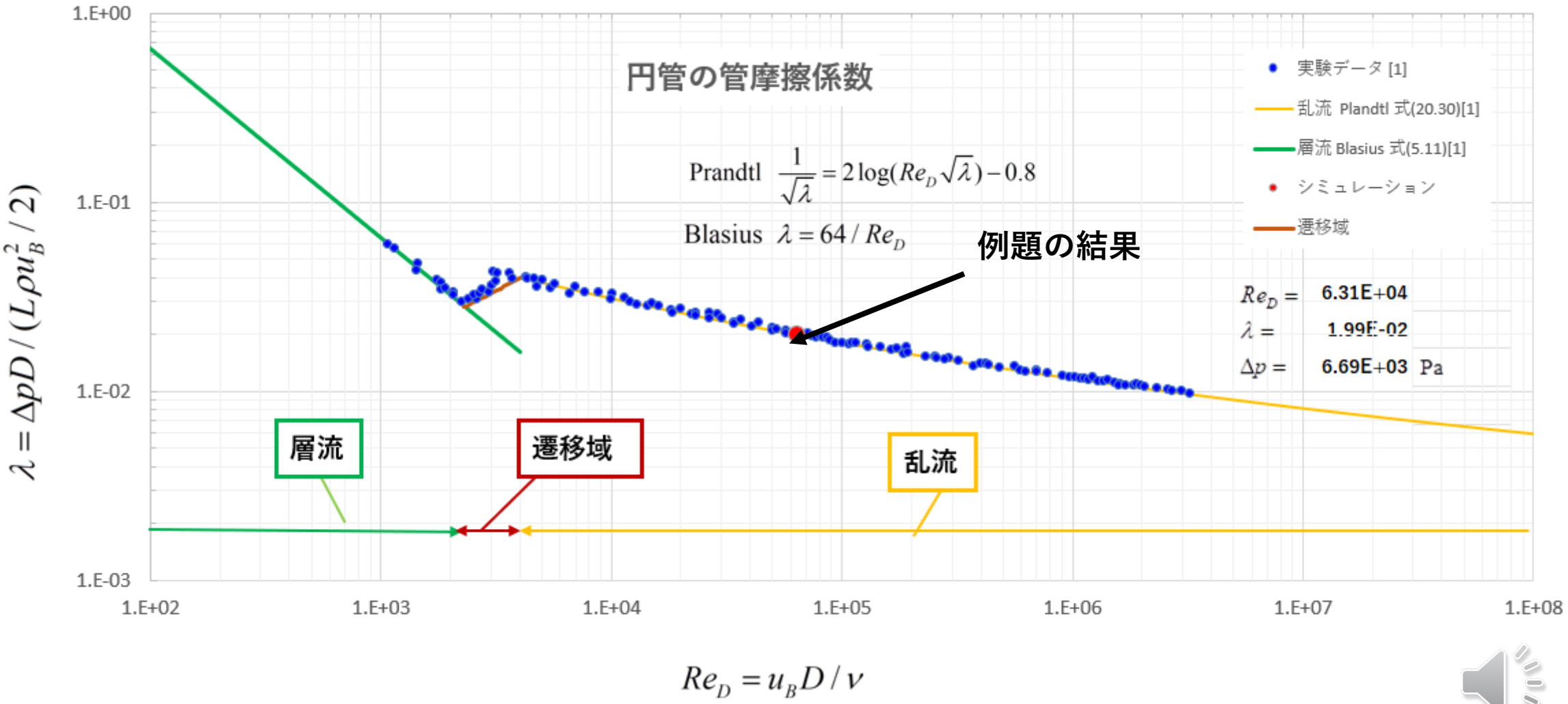
解析条件のデータ入力と計算結果

「平滑円管内強制対流」のシートを開く。

流量換算計算	他のセルには影響しません	流速(m/s)	質量流量(kg/s)
	質量流量・流速換算	3.000E+00	9.407E-01
形状データ	円管の内径 D	2.000E-02	(m)
	円管の長さ L	1.500E+00	(m)
	伝熱表面積 S	9.425E-02	(m^2)
熱条件	加熱条件	熱流束一定	
	加熱量 Q	2.168E+04	(W)
	出口壁面温度 Tw	4.809E+01	(°C)
	伝熱量 Q	2.168E+04	(W)
	壁面熱流束 q	2.300E+05	(W/(m^2))
流体	流体の種類	常圧水	液体
	質量流量 m	9.407E-01	(kg/s)
	管入口流速 u_B	3.000E+00	(m/s)
	入口流体温度 T(0)	2.000E+01	(°C)
	仮流体平均温度	2.276E+01	(°C)
計算結果	流体平均温度 T_m	2.276E+01	(°C)
	レイノルズ数 Re_D	6.313E+04	(-)
	平均ヌセルト数 Nu	3.378E+02	(-)
	$1/Gz = Re_D PrD/L$	(-)	(-)
	平均対流熱伝達率 h	1.019E+04	(W/(m^2·K))
	出口流体温度 $T_w(L)$	2.551E+01	(°C)
	出口管壁温度	4.809E+01	(°C)
	管摩擦係数 λ	1.988E-02	(-)
	圧力損失 ΔP	6.693E+03	(Pa)

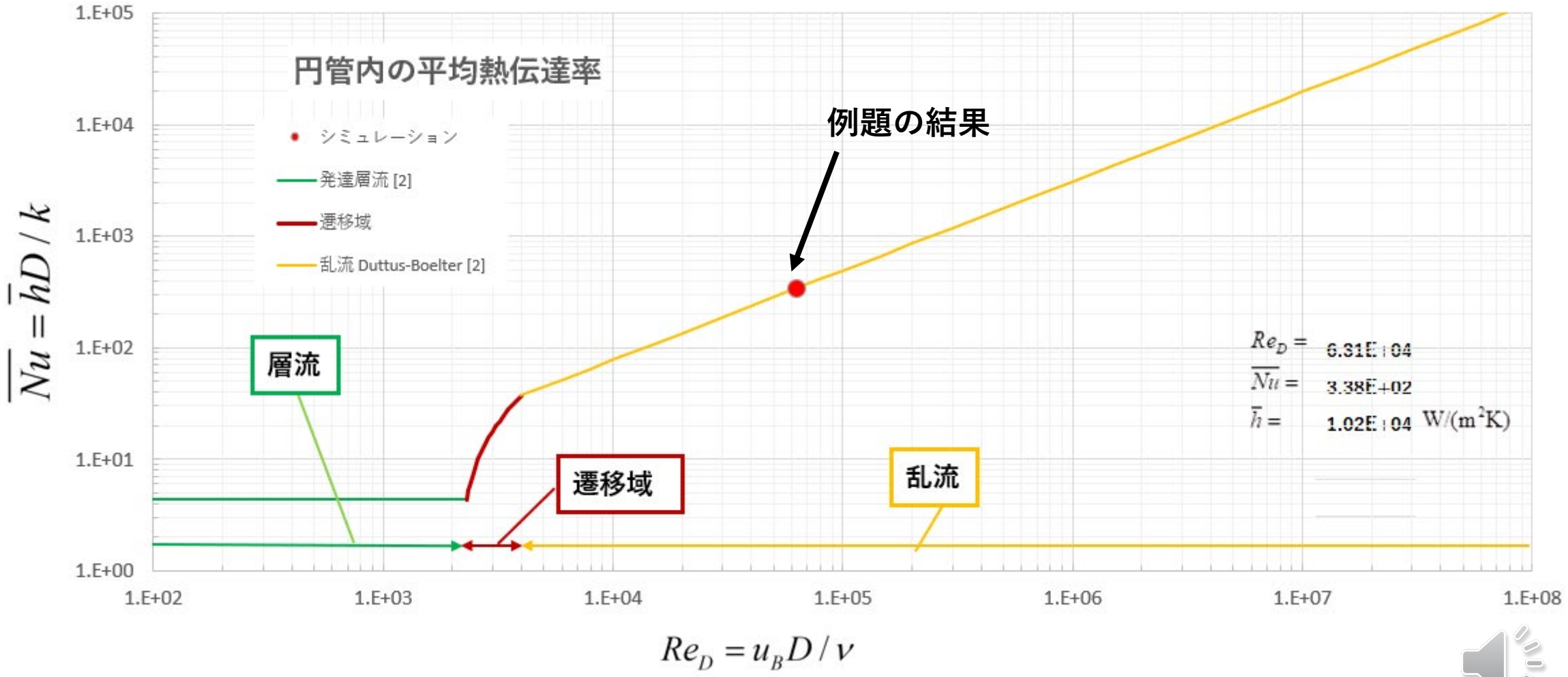


管摩擦係数λとレイノルズ数Reの関係



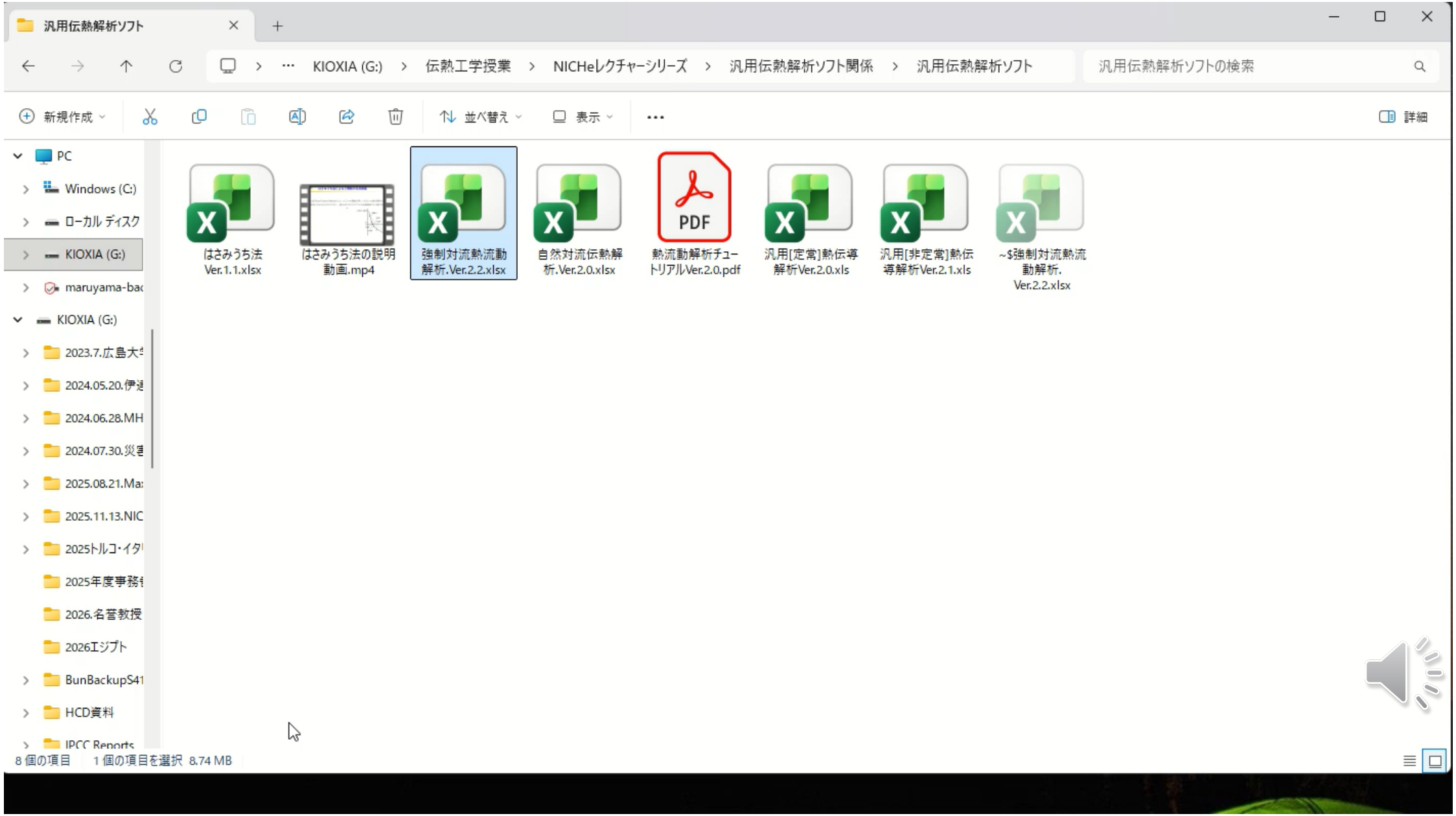
参考文献　Schlichting, H, Boundary Layer Theory, 7th Ed., McGraw Hill, (1979).

平均ヌセルト数とレイノルズ数の関係



参考文献　Incropera, F.P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7th Ed., John Wiley & Sons, (2007).

汎用熱流動プログラムの使用例（例題2）



熱流動解析チュートリアル

汎用伝熱解析ソフトのフォルダーには**熱流動解析チュートリアル**が収納されている。

このチュートリアルを使うことによって、熱伝導と対流熱伝達解析のソフトを使いこなすことができる。

簡易熱流動解析チュートリアル　目次

はじめに
問題を解く前に
例題集
1. 円柱強制対流-1
2. 円柱強制対流-2
3. 球強制対流
4. 平板強制対流-1
5. 平板強制対流-2
6. 乱流平板強制対流
7. 平滑管内強制対流-1
8. 平滑管内強制対流-2
9. 粗面円管強制対流
10. 円柱自然対流
11. 球自然対流
12. 垂直平板自然対流
13. 矩形容器内自然対流
14. 水平平板間自然対流
15. 単独水平平板自然対流
16. 自然対流と非定常熱伝導の複合問題
17. 強制対流と非定常熱伝導の複合問題
18. 強制対流・自然対流と定常熱伝導の複合問題-1
19. 強制対流・自然対流と定常熱伝導の複合問題-2

汎用伝熱解析ソフトを使いこなして、研究開発に役立ててください。

レクチャーシリーズの概要

シリーズの構成

第1部　伝熱工学の基礎

1. 伝熱工学の概要
2. 熱伝導（伝導伝熱）
3. 対流熱伝達
4. 相変化を伴う熱伝達（沸騰・凝縮）
5. ふく射伝熱
6. 熱交換器

第2部　熱流動解析ソフトを用いた実践的応用

7. 多層媒体の定常熱伝導
8. 非定常熱伝導
9. 強制対流熱伝達
10. 自然対流熱伝達
11. 熱伝導と対流複合伝熱
12. 機器開発を目指した伝熱現象のモデル化

次回予告

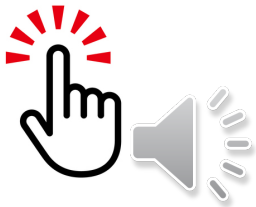
第4章　相変化を伴う熱伝達

4-1.　相変化と伝熱

4-2.　沸騰熱伝達

4-3.　凝縮を伴う伝熱

技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用



「もっと見る」欄に記載の今回の要約とホームページのpdf資料で理解を深めることができる。

技術者と研究者に向けた伝熱工学の基礎と応用

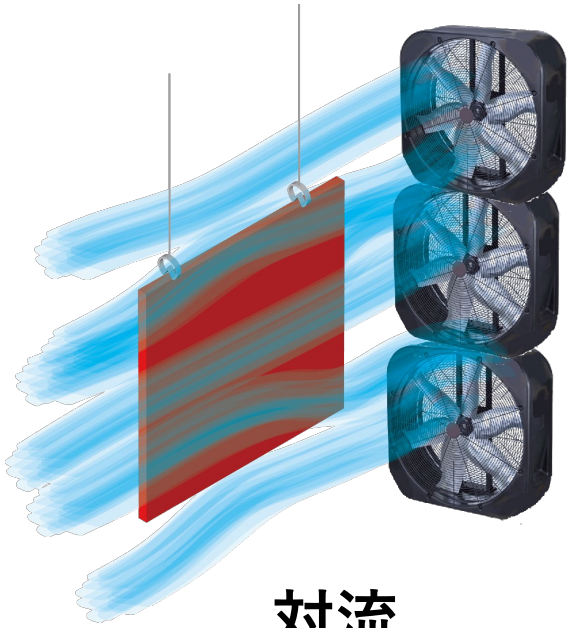
東北大学未来科学技術共同研究センター レクチャーシリーズ

― 熱プロセスを習得したい人のための入門と実践的応用 ―

伝熱現象



熱伝導



対流



熱ふく射

講師　圓山重直
東北大学未来科学技術センター　シニアリサーチ・フェロー
東北大学名誉教授・八戸高専名誉教授