

<第6章 沸騰熱伝達>

6.1 大気圧下で 30℃の水を入れた水槽の底部を 110℃に加熱して水を沸騰させた。サブクール度はいくらか。また、伝熱面の過熱度はいくらか。

解) 水の飽和温度（沸点）は 100℃なので、定義から、サブクール度 ΔT_{sub} [K] は、

$$\Delta T_{sub} = 100 - 30 = 70 \text{ K}$$

同じく定義から、伝熱面の過熱度 ΔT_s [K] は、

$$\Delta T_s = 110 - 100 = 10 \text{ K}$$

6.2 500 W で底を加熱している底面積 400 cm² の鍋で沸騰が起きるとき、最初に気泡を発する可能性のあるくぼみサイズを求めよ。

解) 関連する値を全て S I 単位系の基本単位で表しておく。

$$\text{表面張力 } \sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

$$\text{飽和温度 } T_s = 100 + 273.15 = 373.15 \text{ K}$$

$$\text{蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{液体の熱伝導率 } \lambda_l = 6.82 \times 10^{-1} \text{ W/m K}$$

$$\text{気体定数 } R = 8.31 \text{ J/mol K}$$

$$\text{圧力 } P = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{水の分子量 } M = 0.018 \text{ kg/mol}$$

$$\text{液体の密度 } \rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$$

伝熱量 $Q = 500 \text{ W}$

底面積 $S = 400 \text{ cm}^2 = 4 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

飽和状態における蒸気の比体積は

$$v_v = \frac{RT_s}{pM} = \frac{(8.31)(373.15)}{(1.013 \times 10^5)(0.018)} = 1.70 \text{ m}^3/\text{kg}$$

飽和状態における液体の比体積は

$$v_l = \frac{1}{\rho_l} = \frac{1}{(958.4)} = 1.04 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$$

熱流束は

$$q = \frac{Q}{S} = \frac{(500)}{(4 \times 10^{-2})} = 1.25 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

最小伝熱面過熱度は式(6.10)を用いて、

$$T_w - T_s = \sqrt{\frac{(8)(5.88 \times 10^{-2})(1.70 - 1.04 \times 10^{-3})(1.25 \times 10^4)}{(2.22 \times 10^6)(6.82 \times 10^{-1})}} = 1.57 \text{ K}$$

最初に気泡を発生する可能性のあるくぼみサイズは、式(6.11)により、

$$r_c = \frac{(6.82 \times 10^{-1})(1.57)}{(2)(1.25 \times 10^4)} = 4.28 \times 10^{-5} \text{ m} = 42.8 \text{ } \mu\text{m}$$

6.3 サブクール度が増すと限界熱流束はどうなるか。

解) 限界熱流束は大きくなる。

6.4 底面積 400 cm^2 の鍋の底面を 110°C に保ったら、飽和沸騰となった。伝熱量を求めよ。

解) 関連する値を全て S I 単位系の基本単位で表しておく。

底面積 $S = 400 \times 10^{-4} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$

伝熱面温度 $T_w = 110 + 273.15 = 383.15 \text{ K}$

飽和温度 $T_s = 100 + 273.15 = 373.15 \text{ K}$

伝熱面の過熱度 $\Delta T_s = 383.15 - 373.15 = 10 \text{ K}$

Kutateladze の式 (式(6.14)) を使う。熱流束はわかっていないので、これを熱伝達率と伝熱面加熱度の積で表し、整理しておく。

$$\begin{aligned}\frac{hD_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{hD_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{h\Delta T_s D_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{hD_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} h^{0.7} \left(\frac{\Delta T_s D_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{h^{0.3} D_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{\Delta T_s D_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \left(\frac{hD_L}{\lambda_l} \right)^{0.3} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{\lambda_l}{D_L} \right)^{0.7} \left(\frac{\Delta T_s D_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \left(\frac{hD_L}{\lambda_l} \right)^{0.3} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{hD_L}{\lambda_l} &= \left(7.0 \times 10^{-4} \right)^{1/0.3} Pr_l^{0.35/0.3} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7/0.3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7/0.3} \\ \frac{hD_L}{\lambda_l} &= \left(7.0 \times 10^{-4} \right)^{10/3} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{7/3} \\ \frac{hD_L}{\lambda_l} &= 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{7/3}\end{aligned}$$

計算に必要な値を整理する。

プラントル数 $Pr_l = 1.76$

液相熱伝導率 $\lambda_l = 0.682 \text{ W/m K}$

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$

水蒸気密度 $\rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$

水の粘度 $\nu_l = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

圧力 $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

表面張力 $\sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$

水の密度 $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$

式(6.15)のパラメータ D_L は、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{(5.88 \times 10^{-2})}{(9.81)(958.4 - 0.578)}} = 2.502 \times 10^{-3} \text{ m}$$

よって修正した Kutateladze の式から、

$$\begin{aligned} Nu &= 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{p D_L}{\sigma} \right)^{7/3} \\ &= 3.046 \times 10^{-11} (1.76)^{7/6} \left(\frac{(10)(0.682)}{(2.22 \times 10^6)(0.578)(2.97 \times 10^{-7})} \right)^{7/3} \left(\frac{(1.013 \times 10^5)(2.502 \times 10^{-3})}{(5.88 \times 10^{-2})} \right)^{7/3} \\ &= 14.91 \end{aligned}$$

よって平均熱伝達率は、

$$h = \frac{Nu \lambda_l}{D_L} = \frac{(14.91)(0.682)}{2.502 \times 10^{-3}} = 4.065 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

平均熱流束は、

$$q = h \Delta T_s = (4.065 \times 10^3)(10) = 4.065 \times 10^4 \text{ W m}^{-2}$$

求める伝熱量は、

$$Q = qA = (4.065 \times 10^4)(4 \times 10^{-2}) = 1.63 \times 10^3 \text{ W}$$

6.5 温度 115℃の加熱面に接し、大気圧の水が核沸騰をしている。このとき、加熱面の伝熱量はいくらか。ただし、クタテラッゼの式を用いて計算せよ。

解) 関連する値を全て S I 単位系の基本単位で表しておく。

$$\text{伝熱面温度 } T_w = 115 + 273.15 = 388.15 \text{ K}$$

$$\text{飽和温度 } T_s = 100 + 273.15 = 373.15 \text{ K}$$

$$\text{伝熱面の過熱度 } \Delta T_s = 388.15 - 373.15 = 15 \text{ K}$$

熱流束はわかっていないので、Kutateladze の式 (式(6.14)) を熱伝達率と伝熱面加熱度の積で表し、整理をした

$$\frac{hD_L}{\lambda_l} = 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{7/3}$$

を用いる。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{プラントル数 } Pr_l = 1.76$$

$$\text{液相熱伝導率 } \lambda_l = 0.682 \text{ W/m K}$$

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の粘度 } \nu_l = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{圧力 } p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{表面張力 } \sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$$

式(6.15)のパラメータ D_L は、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{(5.88 \times 10^{-2})}{(9.81)(958.4 - 0.578)}} = 2.502 \times 10^{-3} \text{ m}$$

よって修正した Kutateladze の式から、

$$\begin{aligned} Nu &= 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{7/3} \\ &= 3.046 \times 10^{-11} (1.76)^{7/6} \left(\frac{(15)(0.682)}{(2.22 \times 10^6)(0.578)(2.97 \times 10^{-7})} \right)^{7/3} \left(\frac{(1.013 \times 10^5)(2.502 \times 10^{-3})}{(5.88 \times 10^{-2})} \right)^{7/3} \\ &= 38.43 \end{aligned}$$

よって平均熱伝達率は、

$$h = \frac{Nu \lambda_l}{D_L} = \frac{(38.43)(0.682)}{2.502 \times 10^{-3}} = 1.048 \times 10^4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

求める伝熱量は平均熱流束として、

$$q = h \Delta T_s = (1.048 \times 10^4)(15) = 1.572 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} = 157 \text{ kW m}^{-2}$$

6.6 大気圧下で純水を金属容器に入れ、下面より加熱し、プール飽和核沸騰を生じさせた。加熱面温度は 120℃であった。このときの熱流束を求めよ。

解) 関連する値を全て S I 単位系の基本単位で表しておく。

$$\text{底面積 } S = 400 \times 10^{-4} = 4.0 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

$$\text{伝熱面温度 } T_w = 120 + 273.15 = 393.15 \text{ K}$$

$$\text{飽和温度 } T_s = 100 + 273.15 = 373.15 \text{ K}$$

$$\text{伝熱面の過熱度 } \Delta T_s = 393.15 - 373.15 = 20 \text{ K}$$

Kutateladze の式 (式(6.14)) を使う。熱流束はわかっていないので、これを熱伝達率と伝熱面加熱度の積で表し、整理をした式

$$\frac{hD_L}{\lambda_l} = 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{7/3}$$

を用いる。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{プラントル数 } Pr_l = 1.76$$

$$\text{液相熱伝導率 } \lambda_l = 0.682 \text{ W/m K}$$

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の粘度 } \nu_l = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{圧力 } p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$\text{表面張力 } \sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$$

式(6.15)のパラメータ D_L は、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{(5.88 \times 10^{-2})}{(9.81)(958.4 - 0.578)}} = 2.502 \times 10^{-3} \text{ m}$$

よって修正した Kutateladze の式から、

$$\begin{aligned} Nu &= 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{p D_L}{\sigma} \right)^{7/3} \\ &= 3.046 \times 10^{-11} (1.76)^{7/6} \left(\frac{(20)(0.682)}{(2.22 \times 10^6)(0.578)(2.97 \times 10^{-7})} \right)^{7/3} \left(\frac{(1.013 \times 10^5)(2.502 \times 10^{-3})}{(5.88 \times 10^{-2})} \right)^{7/3} \\ &= 75.19 \end{aligned}$$

よって平均熱伝達率は、

$$h = \frac{Nu \lambda_l}{D_L} = \frac{(75.19)(0.682)}{2.502 \times 10^{-3}} = 2.050 \times 10^4 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

求める熱流束は、

$$q = h \Delta T_s = (2.050 \times 10^4)(20) = 4.100 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} = 410 \text{ kW m}^{-2}$$

6.7 冷媒として用いられるフロン 11(フロン 11)の沸点は、大気圧において 24℃で、他の物性値は次の通りである。 $\nu_l = 0.27 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\lambda_l = 0.091 \text{ W/(m K)}$, $Pr_l = 3.9$,

$\rho_l = 1,478 \text{ kg/m}^3$, $\rho_v = 5.88 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = 0.018 \text{ N/m}$, $\gamma = 1.82 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 。ステファン・アブデルサラムの式を用いて、壁面温度が 35℃のときの熱流束を求めよ。

解) 式(6.17)を用いて代表寸法を決定する。

$$D_b = 0.51 \sqrt{\frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = (0.51) \sqrt{\frac{(2)(1.8 \times 10^{-2})}{(9.81)(1478 - 5.88)}} = 8.052 \times 10^{-4} \text{ m}$$

式(6.16)で熱流束はわかっていないので、これを熱伝達率と伝熱面加熱度の積で表し、整理しておく。

$$\begin{aligned} \frac{h D_b}{\lambda_l} &= 207 Pr_l^{0.533} \left(\frac{q D_b}{\lambda_l T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \\ \frac{h D_b}{\lambda_l} &= 207 Pr_l^{0.533} \left(\frac{h \Delta T_s D_b}{\lambda_l T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \\ \frac{h D_b}{\lambda_l} &= 207 Pr_l^{0.533} h^{0.745} \left(\frac{\Delta T_s D_b}{\lambda_l T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{h^{0.255} D_b}{\lambda_l} &= 207 Pr_l^{0.533} \left(\frac{\Delta T_s D_b}{\lambda_l T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \\
\left(\frac{h D_b}{\lambda_l} \right)^{0.255} &= 207 Pr_l^{0.533} \left(\frac{\lambda_l}{D_b} \right)^{0.745} \left(\frac{\Delta T_s D_b}{\lambda_l T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \\
\left(\frac{h D_b}{\lambda_l} \right)^{0.255} &= 207 Pr_l^{0.533} \left(\frac{\Delta T_s}{T_s} \right)^{0.745} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581} \\
\frac{h D_b}{\lambda_l} &= (207)^{1/0.255} Pr_l^{0.533/0.255} \left(\frac{\Delta T_s}{T_s} \right)^{0.745/0.255} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.581/0.255} \\
\frac{h D_b}{\lambda_l} &= (1.208 \times 10^9) Pr_l^{2.09} \left(\frac{\Delta T_s}{T_s} \right)^{2.92} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{2.28}
\end{aligned}$$

よって

$$Nu \equiv \frac{h D_b}{\lambda_l} = (1.208 \times 10^9) (3.9)^{2.09} \left(\frac{35 - 24}{24 + 273.15} \right)^{2.92} \left(\frac{5.88}{1478} \right)^{2.28} = 4.618$$

平均熱伝達率は、

$$h = \frac{Nu \lambda_l}{D_b} = \frac{(4.618)(0.091)}{8.052 \times 10^{-4}} = 5.219 \times 10^2 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

求める熱流束は、

$$q = h \Delta T_s = (5.219 \times 10^2) (11) = 5.74 \times 10^3 \text{ W m}^{-2} = 5.74 \text{ kW m}^{-2}$$

6.8 長さ 5 cm、直径 1 cm の円柱ヒータを水平に水中に入れて加熱するとき、バーンアウト熱流束はいくらか。また、膜沸騰に移行する直前の表面温度はいくらか。

解) Rohsenow-Griffith の式 (式(6.22)) を用いて、バーンアウト熱流束を求める。

関連する値を全て S I 単位系の基本単位で表しておく。

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

よって、求めるバーンアウト熱流束は、

$$\begin{aligned}
q_{BO} &= \gamma \rho_v \left\{ 0.0121 \left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right)^{0.6} \right\} \\
&= (2.22 \times 10^6) (0.578) \left\{ (0.0121) \left(\frac{958.4 - 0.578}{0.578} \right)^{0.6} \right\} = 1.33 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 1.33 \text{ MW/m}^2
\end{aligned}$$

膜沸騰に移行する直前の表面温度は、飽和沸騰でこの熱流束となる伝熱面の過熱度をクタテラッゼの式 (式(6.14)) を用いて決定すればよい。

熱伝達率はわかっていないので、これを熱流束を伝熱面加熱度で割った商で表し、整理をしておく。

$$\begin{aligned}\frac{hD_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{(q/\Delta T_s)D_L}{\lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{qD_L}{\Delta T_s \lambda_l} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \frac{1}{\Delta T_s} &= 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{\lambda_l}{qD_L} \right) \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ \Delta T_s &= \frac{1}{7.0 \times 10^{-4}} Pr_l^{-0.35} \left(\frac{\lambda_l}{qD_L} \right)^{-1} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{-0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{-0.7} \\ \Delta T_s &= 1430 Pr_l^{-0.35} \left(\frac{qD_L}{\lambda_l} \right) \left(\frac{\gamma \rho_v \nu_l}{qD_L} \right)^{0.7} \left(\frac{\sigma}{pD_L} \right)^{0.7}\end{aligned}$$

計算に必要な値を整理する。

プラントル数 $Pr_l = 1.76$

液相熱伝導率 $\lambda_l = 0.682 \text{ W/m K}$

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$

水蒸気密度 $\rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$

水の粘度 $\nu_l = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

圧力 $p = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

表面張力 $\sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$

水の密度 $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$

式(6.15)よりパラメータ D_L は、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{(5.88 \times 10^{-2})}{(9.81)(958.4 - 0.578)}} = 2.502 \times 10^{-3} \text{ m}$$

よって

$$\begin{aligned} \Delta T_s &= (1430)(1.76)^{-0.35} \left(\frac{(1.33 \times 10^6)(2.502 \times 10^{-3})}{(0.682)} \right) \\ &\quad \times \left(\frac{(2.22 \times 10^6)(0.578)(2.97 \times 10^{-7})}{(1.33 \times 10^6)(2.502 \times 10^{-3})} \right)^{0.7} \left(\frac{(5.88 \times 10^{-2})}{(1.013 \times 10^5)(2.502 \times 10^{-3})} \right)^{0.7} = 28.5 \text{ K} \end{aligned}$$

よって、膜沸騰に移行する直前の表面温度は、

$$T_w = T_s + \Delta T_s = 100 + 28.5 = 128.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

6.9 直径 0.2 mm のヒータ線を水平に水中に入れて加熱するとき、線が切れずに膜沸騰に移行した直後の表面温度はいくらか。

解) 粗い近似であるが、水蒸気の物性値は 100°C の値として概算する。また、放射熱伝達も無視する。ブルムレイの式 (式(6.18)) を用いる。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{加熱円柱直径 } d = 2 \times 10^{-4} \text{ m}$$

$$\text{蒸気の熱伝導率 } \lambda_v = 24.78 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$$

$$\text{重力加速度 } g = 9.81 \text{ m/s}^{-2}$$

$$\text{蒸気の粘性係数 } \mu_v = 12.27 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$$

$$\text{蒸気の定圧比熱 } c_{pv} = 2.074 \times 10^3 \text{ J/kg K}$$

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{蒸気のプラントル数 } Pr_v = 1.027$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の飽和温度 } T_s = 373.15 \text{ K}$$

式(6.18)に各パラメータを代入して整理する。

$$Nu_{co} = 0.62(Gr / Sp^*)^{1/4}$$

$$\frac{h_{co}d}{\lambda_v} = 0.62 \left(\frac{\rho_v(\rho_l - \rho_v)gd^3}{\mu_v^2} \left/ \frac{c_{pv}(T_w - T_s)}{\gamma^* Pr_v} \right. \right)^{1/4}$$

よって

$$h_{co} = 0.62 \left(\frac{\lambda_v}{d} \right) \left(\frac{\rho_v(\rho_l - \rho_v)gd^3}{\mu_v^2} \left/ \frac{c_{pv}(T_w - T_s)}{\gamma^* Pr_v} \right. \right)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{\rho_v(\rho_l - \rho_v)gd^3}{\mu_v^2} \left/ \frac{c_{pv}(T_w - T_s)}{\gamma \left(1 + \frac{c_{pv}(T_w - T_s)}{2\gamma} \right) Pr_v} \right. \right)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{\rho_v(\rho_l - \rho_v)gd^3(\gamma + c_{pv}(T_w - T_s)/2)Pr_v}{\mu_v^2 c_{pv}(T_w - T_s)} \right)^{1/4}$$

$$= 0.62$$

$$\times \left(\frac{(0.578)(958.4 - 0.578)(9.81)(2 \times 10^{-4})^3 (2.22 \times 10^6 + (2.074 \times 10^3)(T_w - 373.15)/2)(1.027)}{(12.27 \times 10^{-6})^2 (2.074 \times 10^3)(T_w - 373.15)} \right)^{1/4}$$

$$= (0.3832) \left(\frac{(2.22 \times 10^6 + (1.037 \times 10^3)(T_w - 373.15))}{(T_w - 373.15)} \right)^{1/4}$$

また、放射熱伝達率は、ヒータ線と水の放射率を 1 と仮定し、ステファン・ボルツマン定数

を σ_{SB} で表せば、

$$\begin{aligned} h_r &= \frac{\sigma_{SB}(T_w^4 - T_s^4)}{T_w - T_s} \\ &= \frac{5.67 \times 10^{-8}(T_w^4 - 373.15^4)}{T_w - 373.15} \end{aligned}$$

これらから、表面温度 T_w が決まれば、総括熱伝達率を式(6.19)

$$h = h_{co} \left(\frac{h_{co}}{h} \right)^{1/3} + h_r$$

によって決定することができる。

移行した直後の熱流束はバーンアウト熱流束 q_{BO} に等しいとおけるので、

$$q_{BO} = h(T_w - T_s)$$

より、

$$h = q_{BO} / (T_w - T_s)$$

これを式(6.19)に代入すれば、

$$\begin{aligned} q_{BO} / (T_w - T_s) &= h_{co} \left(\frac{h_{co}}{q_{BO} / (T_w - T_s)} \right)^{1/3} + h_r \\ q_{BO} / (T_w - T_s) &= h_{co}^{4/3} (q_{BO} / (T_w - T_s))^{-1/3} + h_r \\ q_{BO} / (T_w - T_s) &= h_{co}^{4/3} ((T_w - T_s) / q_{BO})^{1/3} + h_r \\ q_{BO} &= h_{co}^{4/3} q_{BO}^{-1/3} (T_w - T_s)^{4/3} + h_r (T_w - T_s) \\ q_{BO} &= \left\{ (0.3832) \left(\frac{(2.22 \times 10^6 + (1.037 \times 10^3)(T_w - 373.15))}{(T_w - 373.15)} \right)^{1/4} \right\}^{4/3} q_{BO}^{-1/3} (T_w - 373.15)^{4/3} \\ &\quad + \frac{5.67 \times 10^{-8} (T_w^4 - 373.15^4)}{T_w - 373.15} (T_w - 373.15) \\ q_{BO} &= (0.2783) \left(\frac{(2.22 \times 10^6 + (1.037 \times 10^3)(T_w - 373.15))}{(T_w - 373.15)} \right)^{1/3} q_{BO}^{-1/3} (T_w - 373.15)^{4/3} \\ &\quad + \frac{5.67 \times 10^{-8} (T_w^4 - 373.15^4)}{T_w - 373.15} (T_w - 373.15) \\ q_{BO} &= (0.2783) \left((2.22 \times 10^6 + (1.037 \times 10^3)(T_w - 373.15)) \right)^{1/3} q_{BO}^{-1/3} (T_w - 373.15) \\ &\quad + 5.67 \times 10^{-8} (T_w^4 - 373.15^4) \end{aligned}$$

前問より $q_{BO} = 1.33 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ において、試行錯誤法によってこの方程式を解けば、

$$T_w = 2201 \text{ K}$$

6.10 直径 0.2 mm のヒータ線を水平に水中に入れて加熱し、膜沸騰を生じさせてから冷却を行った。膜沸騰を保つ最低温度を推算せよ。

解) 式(6.25)を用いる。粗い近似であるが、水蒸気の物性値は 100°C の値として概算する。計算に必要な値を整理する。

蒸気の熱伝導率 $\lambda_v = 24.78 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$

水蒸気密度 $\rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$

重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

水の密度 $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$

表面張力 $\sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$

蒸気の粘性係数 $\mu_v = 12.27 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$

$$\begin{aligned}\Delta T_{\min} &= 0.127 \left(\frac{\gamma \rho_{vm}}{\lambda_{vm}} \right) \left\{ \frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l + \rho_v} \right\}^{2/3} \left\{ \frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right\}^{1/2} \left\{ \frac{\mu_{vm}}{g(\rho_l - \rho_v)} \right\}^{1/3} \\ &= 0.127 \left(\frac{\gamma \rho_{vm}}{\lambda_{vm}} \right) \frac{\sigma^{1/2} \mu_{vm}^{1/3}}{(\rho_l + \rho_v)^{2/3} \{g(\rho_l - \rho_v)\}^{1/6}} \\ &= 0.127 \left(\frac{\gamma \rho_{vm}}{\lambda_{vm}} \right) \left\{ \frac{\sigma^3 \mu_{vm}^2}{g(\rho_l - \rho_v)(\rho_l + \rho_v)^4} \right\}^{1/6} \\ &= (0.127) \frac{(2.22 \times 10^6)(0.578)}{24.78 \times 10^{-3}} \left\{ \frac{(5.88 \times 10^{-2})^3 (12.27 \times 10^{-6})^2}{(9.81)(958.4 - 0.578)(958.4 + 0.578)^4} \right\}^{1/6}\end{aligned}$$

$$= 82.34 \text{ K}$$

よって、膜沸騰を保つ最低の表面温度は、

$$T_w = T_s + \Delta T_{\min} = 100 + 82.3 = 182.3^\circ \text{C}$$

6.1.1 大気圧下の純水のプール飽和沸騰において、バーンアウト熱流束を求めよ。また、圧力が 1MPa ではいくらになるか。

解) 大気圧下の物性値は、以下の通り。

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$

水蒸気密度 $\rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$

水の密度 $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$

これより、ローゼナウ・グリフィスの式 (式(6.22)) を用いて

$$q_{BO} = 0.0121\gamma\rho_v\left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}\right)^{0.6} = 0.0121(2.22 \times 10^6)(0.578)\left(\frac{958.4 - 0.578}{0.578}\right)^{0.6} = 1.33 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$= 1.33 \text{ MW/m}^2$$

1 MPa の物性値は蒸気表などを確認して、

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.01 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 5.145 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 887.1 \text{ kg/m}^3$$

これより、ローゼナウ・グリフィスの式 (式(6.22)) を用いて

$$q_{BO} = 0.0121\gamma\rho_v\left(\frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v}\right)^{0.6} = 0.0121(2.01 \times 10^6)(5.145)\left(\frac{887.1 - 5.145}{5.145}\right)^{0.6} = 2.74 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$= 2.74 \text{ MW/m}^2$$

6.1 2 100℃、大気圧の水の中に円柱状電気ヒータを入れ加熱している。ヒータの外径 15 mm、単位長さあたりの発熱量 1 kW/m のとき、ヒータの表面温度を求めよ。ただし、クタテラッゼの式を用いて計算せよ。

解) クタテラッゼの式で用いる値 (物性値は 100℃の値) を S I 単位系の基本単位で表しておく。

$$\text{表面張力 } \sigma = 5.88 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

$$\text{重力加速度 } g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$\text{液体水密度 } \rho_l = 958 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{プラントル数 } Pr_l = 1.76$$

$$\text{水の蒸発潜熱 } \gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{水の動粘性係数 } \nu_l = 2.97 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{大気圧 } p = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$$

以上より、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{5.88 \times 10^{-2}}{(9.81)(958 - 0.578)}} = 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}$$

また、熱流束 q は

ヒータ外径 $d = 1.5 \times 10^{-2} \text{ m}$

単位長さあたりの発熱量 $Q = 1.0 \times 10^3 \text{ W}$
より、

$$q = \frac{Q}{\pi d} = \frac{1.0 \times 10^3}{(3.14)(1.5 \times 10^{-2})} = 2.11 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

よって、

$$\begin{aligned} Nu &= \frac{hD_L}{\lambda_l} = 7.0 \times 10^{-4} Pr_l^{0.35} \left(\frac{qD_L}{\gamma \rho_V \nu_l} \right)^{0.7} \left(\frac{pD_L}{\sigma} \right)^{0.7} \\ &= (7.0 \times 10^{-4})(1.76)^{0.35} \left(\frac{(2.11 \times 10^4)(2.50 \times 10^{-3})}{(2.22 \times 10^6)(0.578)(2.97 \times 10^{-7})} \right)^{0.7} \left(\frac{(1.01 \times 10^5)(2.50 \times 10^{-3})}{(5.88 \times 10^{-2})} \right)^{0.7} = 9.46 \end{aligned}$$

水の熱伝導率 $\lambda_l = 0.682 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

なので、熱伝達率 h は

$$h = \frac{Nu\lambda}{D_L} = \frac{(9.46)(0.682)}{2.50 \times 10^{-3}} = 2.58 \times 10^3 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$$

表面過熱度 ΔT_s は

$$\Delta T_s = \frac{Q}{h} = \frac{(2.11 \times 10^4)}{(2.58 \times 10^3)} = 8.23 \text{ K}$$

よって求める表面温度は、

$$T_w = T_s + \Delta T_s = 373.15 + 8.23 = 381.4 \text{ K} = 108.2^\circ\text{C}$$

6.13 大気圧、 100°C の水の中に直径 $d = 5 \text{ mm}$ の丸棒を入れ、膜沸騰を実現してから表面温度を 900°C に保つ。丸棒の表面熱流束を求めよ。ただし、丸棒の放射率は 0.9 で、蒸

気と水の界面は黒体と考える。蒸気の物性値として 500°C の値を用い、放射熱伝達率 h_r は

以下の式を用いて求めよ。

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_w^4 - T_s^4)}{T_w - T_s}$$

ここで、 ε :放射率 σ :ステファン・ボルツマン定数($=5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)である。

解) ブロムレイの式 (式(6.18)) を用いる。

計算に必要な値を整理する。

加熱円柱直径 $d = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$

蒸気の熱伝導率 $\lambda_v = 66.90 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$

重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

蒸気の粘性係数 $\mu_v = 28.57 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$

蒸気の定圧比熱 $c_{pv} = 2.135 \times 10^3 \text{ J/kg K}$

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.22 \times 10^6 \text{ J/kg}$

蒸気のプラントル数 $Pr_v = 0.9118$

水蒸気密度 $\rho_v = 0.2805 \text{ kg/m}^3$

水の密度 $\rho_l = 958.4 \text{ kg/m}^3$

水の飽和温度 $T_s = 373.15 \text{ K}$

表面温度 $T_w = 900 + 273.15 = 1173.15 \text{ K}$

$\Delta T_s = T_w - T_s = 1173.15 - 373.15 = 800 \text{ K}$

式(6.18)に各パラメータを代入して整理する。

$$Nu_{co} = 0.62 (Gr / Sp^*)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{\rho_v (\rho_l - \rho_v) g d^3}{\mu_v^2} \right) \left(\frac{c_{pv} \Delta T_s}{\gamma^* Pr_v} \right)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{\rho_v (\rho_l - \rho_v) g d^3}{\mu_v^2} \right) \left(\frac{c_{pv} \Delta T_s}{\gamma \left(1 + \frac{c_{pv} \Delta T_s}{2\gamma} \right) Pr_v} \right)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{\rho_v (\rho_l - \rho_v) g d^3 (\gamma + c_{pv} \Delta T_s / 2) Pr_v}{\mu_v^2 c_{pv} \Delta T_s} \right)^{1/4}$$

$$= 0.62 \left(\frac{(0.2805)(958.4 - 0.2805)(9.81)(5 \times 10^{-3})^3 (2.22 \times 10^6 + (2.135 \times 10^3)(800)/2)(0.9118)}{(28.57 \times 10^{-6})^2 (2.135 \times 10^3)(800)} \right)^{1/4}$$

$$=17.69$$

よって、

$$h_{co} = Nu_{co} \lambda_v / d = (17.69)(66.90 \times 10^{-3}) / (5 \times 10^{-3}) = 236.7 \text{ W/m}^2\text{K}$$

また、

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_w^4 - T_s^4)}{T_w - T_s} = \frac{(0.9)(5.67 \times 10^{-8})(1173.15^4 - 373.15^4)}{1173.15 - 373.15} = 119.6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

式(6.19)より

$$h = h_{co} \left(\frac{h_{co}}{h} \right)^{1/3} + h_r$$

$$h = 236.7 \left(\frac{236.7}{h} \right)^{1/3} + 119.6$$

これを試行錯誤法で解いて、 $h = 331.2 \text{ W/m}^2\text{K}$

よって求める表面熱流束は、

$$q = h \Delta T_s = (331.2)(800) = 2.65 \times 10^5 \text{ W/m}^2 = 2.65 \text{ MW/m}^2$$

6.14 50 atm の水のバーンアウト熱流束をズーバーの整理式を用いて求めよ。ただし、

50 atm の水の飽和温度は 265°C で、このとき $\rho_l = 776 \text{ kg/m}^3$, $\rho_v = 25.7 \text{ kg/m}^3$, $\sigma = 0.0216$

N/m, $\gamma = 1.64 \times 10^6 \text{ J/kg}$ である。また、定数 $K = 0.16$ として求めよ。

解) 式(6.23)より

$$q_{BO} = K \gamma \rho_v \left\{ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v} \right\}^{1/4} = (0.16)(1.64 \times 10^6)(25.7) \left\{ \frac{(0.0216)(9.81)(776 - 25.7)}{25.7} \right\}^{1/4} = 1.06 \times 10^7 \text{ W/m}^2$$

$$= 10.6 \text{ MW/m}^2$$

6.15 圧力 1MPa に保たれた円管内を水が流れている。壁温は 210°C で、発達した核沸騰域になっている。このときの熱流束を求めよ。

解) ジェンス・ロットスの式 (式(6.28)) を用いる。

計算に必要な値を整理する。

水の飽和温度 $T_s = 453.04 \text{ K}$

$$\text{表面温度 } T_w = 210 + 273.15 = 483.15 \text{ K}$$

$$\Delta T_s = T_w - T_s = 483.15 - 453.04 = 30.11 \text{ K}$$

$$\text{圧力 } p = 1 \text{ MPa}$$

$$q = 2.57 \Delta T_s^4 e^{0.648 p} = (2.57)(30.11)^4 e^{(0.648)(1)} = 4.04 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 4.04 \text{ MW/m}^2$$

別) トムらの式 (式(6.29)) を用いる。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{水の飽和温度 } T_s = 453.04 \text{ K}$$

$$\text{表面温度 } T_w = 210 + 273.15 = 483.15 \text{ K}$$

$$\Delta T_s = T_w - T_s = 483.15 - 453.04 = 30.11 \text{ K}$$

$$\text{圧力 } p = 1 \text{ MPa}$$

$$q = 2019 \Delta T_s^2 e^{0.232 p} = (2019)(30.11)^2 e^{(0.232)(1)} = 2.31 \times 10^6 \text{ W/m}^2 = 2.31 \text{ MW/m}^2$$

6.16 内径 40mm、内壁温度 200℃の円管内を圧力 1MPa の飽和水が入口流速 0.2 m/s で流れており、壁面では核沸騰が生じている。この場合の熱流束を求めよ。なお、部分沸騰域とする。

解) クラークらの式 (式(6.26)) を用いる。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{管内径 } d = 4 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{内壁温度 } T_w = 473.15 \text{ K}$$

$$\text{水の密度 } \rho_l = 887.1 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{液速度 } u = 2 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

$$\text{液粘性率 } \mu_l = 150.1 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$$

液相プラントル数 $Pr_l = 0.9805$

液相熱伝導率 $\lambda_l = 674.6 \times 10^{-3} \text{ W/m K}$

水の蒸発潜熱 $\gamma = 2.01 \times 10^6 \text{ J/kg}$

水蒸気密度 $\rho_v = 5.145 \text{ kg/m}^3$

水の動粘性率 $\nu_l = 1.693 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$

圧力 $p = 1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$

表面張力 $\sigma = 4.219 \times 10^{-2} \text{ N/m}$

重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

圧力 1MPa の飽和温度は、 $180^\circ\text{C} = 453 \text{ K}$ 。

$$\Delta T_s = T_w - T_s = 473.15 - 453 = 20 \text{ K}$$

まず、式(4.168)を用いて液体のみが流れている時の対流による熱流束を求める。指定がないので液相は飽和水とする。

$$Re_d = \frac{u \rho_l d}{\mu_l} = \frac{(2 \times 10^{-1})(887.1)(4 \times 10^{-2})}{(150.1 \times 10^{-6})} = 47280$$

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{4/5} Pr^{0.4} = 0.023(47280)^{4/5} (0.9805)^{0.4} = 125.3$$

$$h_c = \frac{Nu_d \lambda_l}{d} = \frac{(125.3)(674.6 \times 10^{-3})}{4 \times 10^{-2}} = 2113 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$q_c = h_c (T_w - T_l) = (2113)(473.15 - 453) = 4.258 \times 10^4 \text{ W/m}^2$$

次に、式(6.14)を用いて対流のないプール核沸騰による熱流束を求める。熱流束はわかっていないので、これを熱伝達率と伝熱面加熱度の積で表し、整理をした式

$$\frac{h D_L}{\lambda_l} = 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{p D_L}{\sigma} \right)^{7/3}$$

を用いる。

式(6.15)のパラメータ D_L は、

$$D_L = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} = \sqrt{\frac{(4.219 \times 10^{-2})}{(9.81)(887.1 - 5.145)}} = 2.208 \times 10^{-3} \text{ m}$$

よって修正した Kutateladze の式から、

$$\begin{aligned} Nu &= 3.046 \times 10^{-11} Pr_l^{7/6} \left(\frac{\Delta T_s \lambda_l}{\gamma \rho_v \nu_l} \right)^{7/3} \left(\frac{p D_L}{\sigma} \right)^{7/3} \\ &= 3.046 \times 10^{-11} (0.9805)^{7/6} \left(\frac{(20)(674.6 \times 10^{-3})}{(2.01 \times 10^6)(5.145)(1.693 \times 10^{-7})} \right)^{7/3} \left(\frac{(1.0 \times 10^6)(2.208 \times 10^{-3})}{(4.219 \times 10^{-2})} \right)^{7/3} \\ &= 359.6 \end{aligned}$$

平均熱伝達率は、

$$h = \frac{Nu \lambda_l}{D_L} = \frac{(359.6)(674.6 \times 10^{-3})}{2.208 \times 10^{-3}} = 1.099 \times 10^5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

プール核沸騰による熱流束は、

$$q_b = h \Delta T_s = (1.099 \times 10^5)(20) = 2.198 \times 10^6 \text{ W m}^{-2}$$

よって、求める熱流束は、

$$q = q_c + q_b = 4.258 \times 10^4 + 2.198 \times 10^6 = 2.24 \times 10^6 \text{ W m}^{-2} = 2.24 \text{ MW m}^{-2}$$

6.17 問題 6.16において、入口に圧力 1MPa の飽和水を送ると出口のクオリティが 0.2 になるには管長はいくら必要であるか。

解) クオリティが 0 から 0.2 になるために必要な熱量を求める。1 MPa の蒸発潜熱は

$2.01 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 、飽和状態の液相密度は 887.1 kg/m^3 である。質量流量は、

$$w = u \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \rho_l = (2 \times 10^{-1}) \left(\frac{(3.1416)(4 \times 10^{-2})^2}{4} \right) (887.1) = 0.2230 \text{ kg/s}$$

なので、クオリティが 0 から 0.2 となるために必要な熱量は

$$\dot{Q} = w(x_f - x_i)\gamma = (0.2230)(0.2 - 0.0)(2.01 \times 10^6) = 8.965 \times 10^4 \text{ W}$$

これを前問で求めた壁からの熱流束で供給する必要があるので、求める長さを l とすると

$$\dot{Q} = q(\pi d l)$$

より、

$$l = \frac{\dot{Q}}{q \pi d} = \frac{8.965 \times 10^4}{(2.24 \times 10^6)(3.1416)(4 \times 10^{-2})} = 0.318 \text{ m} = 31.8 \text{ cm}$$

6.18 壁温 110°C 、内径 5 cm の管を 50 g/s で流れる水の流動沸騰で、環状流となって

いるとき、クオリティが 0.5 の時の熱流束を求めよ。

解) デングラー・アドムスの式 (式(6.32)) を用いる。特に指示がないので大気圧での計算を行う。

計算に必要な値を整理する。

$$\text{管内径 } d = 5 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\text{質量流量 } w = 5 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

$$\text{内壁温度 } T_w = 110 + 273.15 = 383.15 \text{ K}$$

$$\text{飽和温度 } T_s = 100 + 273.15 = 373.15 \text{ K}$$

$$\text{伝熱面の過熱度 } \Delta T_s = T_w - T_s = 383.15 - 373.15 = 10 \text{ K}$$

$$\text{液体水密度 } \rho_l = 958 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{水蒸気密度 } \rho_v = 0.578 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{クオリティ } x = 0.2$$

$$\text{液体水粘性率 } \mu_l = 0.2817 \times 10^{-3} \text{ Pa s}$$

$$\text{水蒸気粘性率 } \mu_v = 12.27 \times 10^{-6} \text{ Pa s}$$

$$\text{プラントル数 } Pr_l = 1.753$$

$$\text{液相熱伝導率 } \lambda_l = 0.6778 \text{ W/m K}$$

式(6.31)で二相流パラメータ X_u を決定する。

$$X_u = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_l}{\mu_v} \right)^{0.1} = \left(\frac{1-0.2}{0.2} \right)^{0.9} \left(\frac{0.578}{958} \right)^{0.5} \left(\frac{0.2817 \times 10^{-3}}{12.27 \times 10^{-6}} \right)^{0.1} = 0.03360$$

レイノルズ数を求めるのに必要な質量速度は、

$$G = \frac{w}{\pi d^2/4} = \frac{4w}{\pi d^2} = \frac{(4)(5 \times 10^{-2})}{(3.1416)(5 \times 10^{-2})^2} = 25.46 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$Re_G = \frac{Gd}{\mu_l} = \frac{(25.46)(5 \times 10^{-2})}{0.2817 \times 10^{-3}} = 4519$$

よって、デングラー・アドムスの式 (式(6.32)) より、

$$Nu \equiv \frac{hd}{\lambda_l} = 8.05 \times 10^{-2} X_u Re_G^{0.8} Pr_l^{0.4} = (8.05 \times 10^{-2})(0.03360)(4519)^{0.8}(1.753)^{0.4} = 2.842$$

$$h = \frac{Nu\lambda_l}{d} = \frac{(2.842)(0.6778)}{5 \times 10^{-2}} = 38.53 \text{ W/m}^2\text{K}$$

求める熱流束は

$$q = h\Delta T_s = (38.53)(10) = 385 \text{ W/m}^2$$