

## 平成29年度講義予定

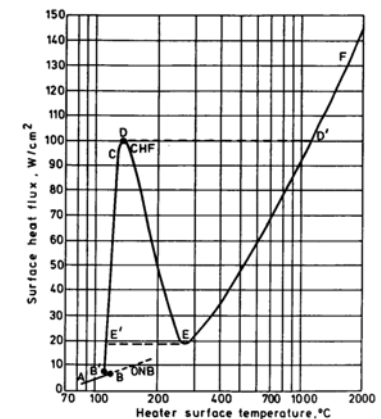
1. (10/ 4) 伝熱の応用と伝熱機器
2. (10/11) 輻射伝熱
3. (10/18) 相変化を伴う伝熱
4. (10/25) 沸騰伝熱
5. (11/ 8) 流動沸騰
6. (11/15) 凝縮を伴う伝熱
7. (11/22) 熱交換器の基礎
8. (11/27(月)) [水曜日課] 物質伝達
9. (12/ 6) 蒸気タービン・ガスタービン複合発電
10. (12/13) 冷凍・空調・コジェネレーション
11. (12/20) 定期試験

## エネルギー機器学 - 沸騰伝熱 -

### 沸騰曲線

### 沸騰曲線-拔山曲線-

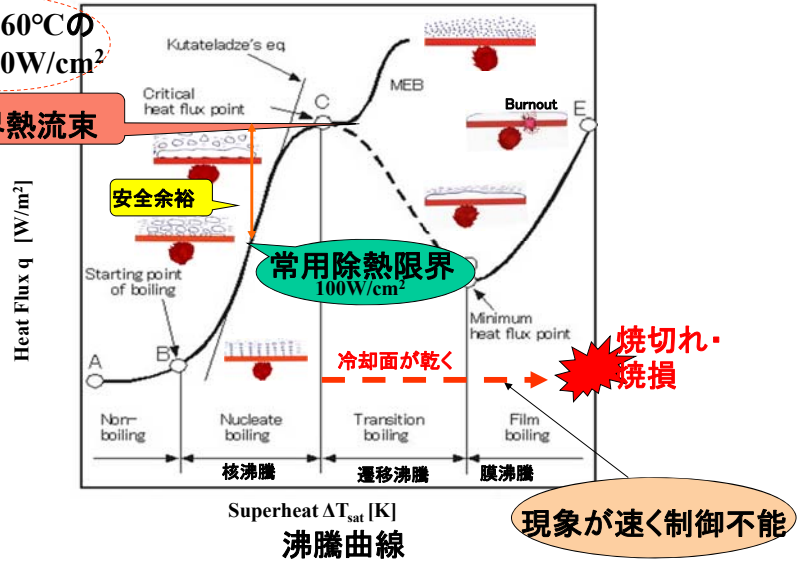
- A B natural convection
- B'C nucleate boiling (核沸騰)
- ONB onset of nucleate boiling
- CHF critical heat flux
- DE transition boiling (遷移沸騰)
- EF film boiling (膜沸騰)



# 沸騰熱伝達 核沸騰・遷移沸騰・膜沸騰

1気圧 60°Cの水で 300W/cm<sup>2</sup>

限界熱流束



## 核沸騰

### Nucleate boiling (核沸騰)

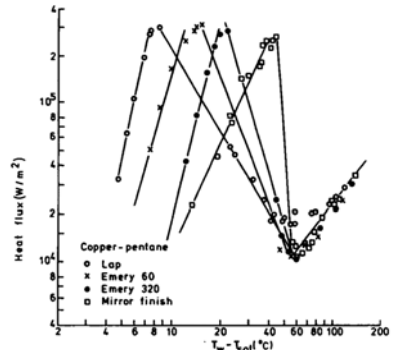


Figure 3 Effect of surface finish on boiling curve. From Berenson [4].

Fig.3 shows experimental data taken by Berenson.

$$T_w = T_{sat} + \psi q^m \quad (5)$$

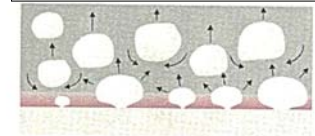
$\Psi$  and  $m$  are constants depending on the physical properties of the liquid and vapor and on the nucleation properties of the surface.

$$h = \frac{1}{\psi} q^{(1-m)} = Aq^n \quad (6)$$

$h$  is a heat transfer coefficient.  $A$  is a function of liquid and vapor physical properties and surface condition.

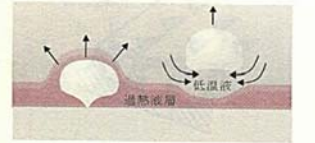
### 核沸騰伝熱のメカニズム

核沸騰伝熱のメカニズムとしては大別して下に示す三つが考えられている



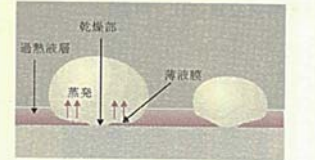
(a)気泡攪乱機構

(a) 気泡の成長、離脱、上昇に伴い発砲点周辺の過熱液層が押しつけられかく乱されることにより伝熱が促進されるモデル。Rohsenowの伝熱整理式の基礎となるモデル。



(b)顕熱輸送機構

(b) 気泡の成長、離脱によって気泡の体積に相当する液体を周囲に押しつけ、さらに伝熱面を離脱する際に上昇する気泡の後流に過熱液が同伴されて上方へ運ばれるのと入れ替わりに周囲の低温液が伝熱面近傍に入り込むことによって大量の熱が輸送されるとするモデル。



(c)薄液膜蒸発機構

(c) 潜熱輸送機構。伝熱面上で成長する気泡の底部に存在する薄液膜の蒸発により熱が輸送されるとするモデル。この薄液膜はマイクロ液膜と呼ばれており、厚さはおよそ1-10 μmと推定されている。

低熱流束域の核沸騰は(a), (b)が支配的  
高熱流束域になると(c)の機構になる、と考えられている

# 核沸騰伝熱の整理式

核沸騰の伝熱特性は一般に下式で整理できる

$$q = C' \Delta T_{sat}^m \quad (1)$$

ここに、 $q$ は熱流束、 $C'$ および $m$ は定数である  
熱伝達率を

$$h = Cq^n \quad (2)$$

で定義すると、(1)式を次の形で表すことができる

$$h = \frac{q}{\Delta T_{sat}} \quad (3)$$

式(1),(3)を比較することにより、 $C = (C')^{1/m}$   
、 $n = (m-1)/m$ となる

一般に、 $n=0.6-0.8$ 程度の値をとる。定数 $C$ は流体の熱物性値、伝熱面の表面性状、ぬれ性などに依存する

数多くの研究者が(3)形式の整理式を提案  
代表的なものを次に示す

Kutateladzeの式

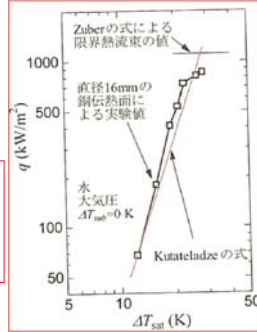
$$\frac{hl_a}{k_l} = 7.0 \times 10^{-4} \cdot Pr_l^{0.35} \cdot \left( \frac{ql_a}{\rho_v L_h \nu_l} \right)^{0.7} \left( \frac{\rho_l}{\sigma} \right)^{0.7}$$

(ここで $L_h$ は蒸発潜熱である)

$l_a$ はラプラス係数で  
次式で与えられる

$$l_a = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

Kutateladzeの式  
により計算される  
の関係と実験値  
を右図に示す



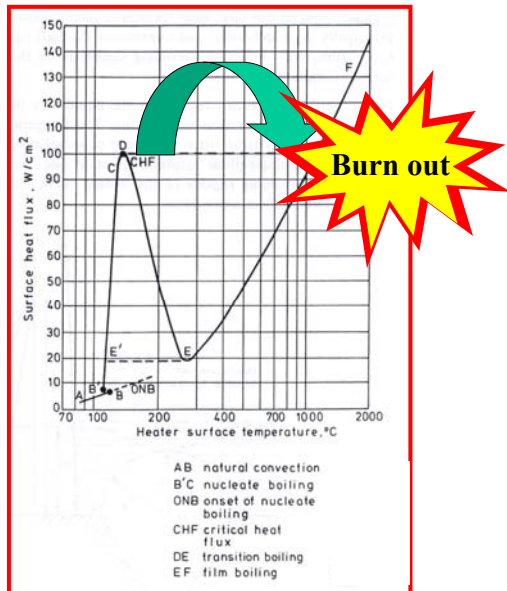
Rohsenowの式

$$\frac{hl_a}{k_l} = \frac{Pr_l^{-0.7}}{C_{sf}} \left( \frac{ql_a}{\rho_v L_h \nu_l} \right)^{0.67} \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0.67}$$

$C_{sf}$ は液体と伝熱面の組み合わせによって  
決まる係数である。

# 限界熱流束

## 臨界熱流束



## プール沸騰の限界熱流束

核沸騰は伝熱面からの発泡により生じる沸騰形式であるから、核沸騰状態を維持するには、蒸気泡が伝熱面から離脱するのと入れ替わりに液体が供給されなければならない。

高熱流束域において蒸発と伝熱面への液体供給のバランスが崩れた時に膜沸騰への遷移が生じる。

限界熱流束は沸騰伝熱を利用する機器の熱負荷の上限を与えるため実用上非常に重要であり、特に限界熱流束の予測に関し、今日までに数多くの研究がなされている。

以下は、流体力学的不安定モデルに基づく Zuberの式である。

$$q_c = 0.131 \rho_v L_h \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4}$$

限界熱流束の値はサブクール度、伝熱面の材質や形状、系の圧力、重力加速度などにより変化する

# 遷移沸騰

# 遷移沸騰

液体と加熱表面での周期的接触

➡ 大量の蒸気の生成により、蒸気膜が生成  
蒸気膜が崩壊する過程で再接触が可能となる

Sakurai, Shirotu

遷移沸騰領域でヒステリシス効果があることを明らかにした

温度上昇過程での最大熱流束 > 温度下降過程での最大熱流束

熱流束と温度は加熱時間と加熱位置で変化が大きい

## 最小熱流束

蒸気膜を安定に維持できる蒸気の生成率が最小値

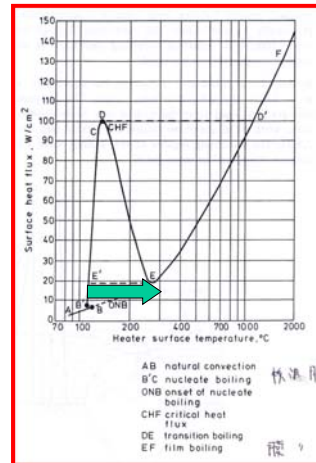
➡ 最小熱流束  $q_{min}$

以下では蒸気膜崩壊

➡ 核沸騰状態

水平プレートに対してZuberが提唱

$$q_{min,F} = const \rho_g \Delta h_v \left[ \frac{\sigma g_n (\rho_l - \rho_g)}{(\rho_l + \rho_g)^2} \right]^{1/4}$$



## 最小熱流束の実験式

最小熱流束点における壁面温度 (Berensonの式)

$$T_w - T_{sat} = 0.127 \frac{\rho_g \Delta h_v}{\lambda_g} \left[ \frac{g_n (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l + \rho_g} \right]^{2/3} \times \left[ \frac{\sigma}{g_n (\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/2} \left[ \frac{\eta_g}{g_n (\rho_l - \rho_g)} \right]^{1/3}$$

円筒体系に対する最小熱流束 (LienhardとWongが提唱)

$$q_{min} = 0.057 \frac{\rho_g \Delta h_v}{R} \left[ \frac{2 g_n (\rho_l - \rho_g)}{\rho_l + \rho_g} + \frac{\sigma}{R^2 (\rho_l + \rho_g)} \right]^{1/2} \times \left[ \frac{g_n (\rho_l - \rho_g)}{\sigma} + \frac{1}{2 R^2} \right]^{-3/4}$$

# 膜沸騰

# 膜沸騰

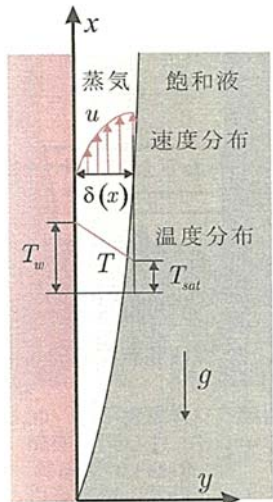
伝熱面が高温になると固体表面は完全に蒸気に覆われ、液体との間に連続した蒸気膜が形成される。膜沸騰状態では、主に蒸気膜内の熱伝導により固体面からの熱が気液界面に輸送され、そこで蒸発が生じる。蒸気の熱伝導率は液体に比べて小さいので、蒸気膜内部では大きな温度差が生じている。

しかし、実際の膜沸騰では気液界面は不安定に波打っており、膜沸騰状態においても間欠的な固液接触が生じていることが実験的に明らかにされている。また高温域ではふく射の影響も無視できない。

膜沸騰は核沸騰に比べると理論的な取り扱いが容易であり、たとえばBromleyの理論的研究に代表されるように、これまでに垂直平板および水平平板周りの自然対流あるいは強制対流膜沸騰がプロファイル法や数値計算によって解かれている。

## 垂直平板に対する層流自然対流膜沸騰

左図に解析モデルを示す。解析を容易にするために以下の仮定を用いる



- (1) 壁温は $T_w$ で垂直方向に一様であり、かつ気液界面の温度は飽和温度 $T_{sat}$ である
  - (2) 蒸気膜内の流れは層流で、蒸気の流動による粘性力と浮力が釣り合う。慣性力は小さいとして無視する。
  - (3) 伝熱面からの熱は蒸気膜内の熱伝導により気液界面に輸送され、すべて蒸発のために使用される。よって蒸気膜内の温度分布は直線的である。
  - (4) 気液界面はなめらかであり、曲率は無視できるものとする。またせん断力は働かず、蒸気側速度勾配はゼロである。
- 現時点ではふく射は考慮せず、蒸気内の熱伝導のみによる熱伝達率を求める。

以上の仮定から、蒸気膜内の流動に対する基礎式および境界条件は次のようになる。

基礎式	境界条件
$\frac{d^2 u}{dy^2} = -\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\mu_v} \quad (1)$	$y = 0: u = 0 \quad (2)$
	$y = \delta: \frac{du}{dy} = 0 \quad (3)$

水平平板に対する層流自然対流膜沸騰の解析モデル

## 解析モデルの計算

基礎式                      境界条件

$\frac{d^2 u}{dy^2} = -\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\mu_v} \quad (1)$	$y = 0: u = 0 \quad (2)$
	$y = \delta: \frac{du}{dy} = 0 \quad (3)$

式(1)を二回積分し、式(2),(3)を適用すると、蒸気膜内の速度分布として次式が得られる

$$u(y) = \frac{g(\rho_l - \rho_v)\delta^2}{\mu_v} \left[ \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right] \quad (4)$$

伝熱面単位は場当たりの蒸気流量を $m_v$ とすると、

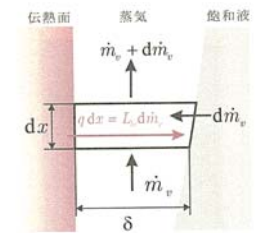
$$m_v = \int_0^\delta \rho_v u(y) dy = \frac{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_v} \quad (5)$$

となる。

ここで右図を用いて垂直方向の $dx$ 区間の気液界面における質量バランスを考える。 $dx$ 区間で $q dx$ の熱量が気液界面に入ってくるので、その熱がすべて蒸発に使われるとすると蒸気流量は $dm_v$ だけ増加する。したがって

$$q dx = L_v dm_v \quad (6)$$

な関係があることがわかる



気液界面の質量バランス

仮定(3)より、

$$q = \frac{k_v \Delta T_{sat}}{\delta} \quad (7)$$

で与えられるから、(5),(6),(7)から次の微分方程式が導かれる

$$\delta^3 d\delta = \frac{k_v \mu_v \Delta T_{sat}}{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)L_v} \cdot dx \quad (8)$$

これを $x = 0 \rightarrow x, \delta = 0 \rightarrow \delta$ まで積分すれば、垂直方向位置 $x$ における蒸気膜厚さが求まる。

$$\delta = \left[ \frac{4k_v \mu_v \Delta T_{sat} x}{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)L_v} \right]^{1/4} \quad (9)$$



## 解析モデルでの熱伝達率の導出

よって局所熱伝達率  $h_{co,x}$  は、

$$h_{co,x} = \frac{k_v}{\delta} = \left[ \frac{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)k_v^3 L'_{lv}}{4\mu_v \Delta T_{sat} l} \right] \quad (10)$$

となり高さ  $l$  までの平均熱伝達率  $\bar{h}_{co}$  は等温面であることを考慮して、

$$\bar{h}_{co} = \frac{1}{l} \int_0^l h_{co,x} dx = \frac{4}{3} [h_{co,x}]_{x=l} \quad (11)$$

となる。Bromleyは蒸気潜熱  $L'_{lv}$  の代わりに過熱蒸気の顕熱を含んだ修正潜熱  $L'_h$  を用いて、最終的に平均熱伝達率を次式で与えた。

$$\bar{h}_{co} = 0.943 \left[ \frac{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)k_v^3 L'_h}{\mu_v \Delta T_{sat} l} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (12) \quad \text{ただし} \quad \frac{L'_h}{L'_{lv}} = 1 + \frac{c_{pv} \Delta T_{sat}}{2L'_{lv}} \quad (13)$$

水平円柱周りの膜沸騰についても、極座標で同様の解析をすることにより求めることができる。

## 層流自然対流膜沸騰熱伝達の理論と半理論式

層流自然対流膜沸騰熱伝達の理論と半理論式は以下の式で表すことができる。

$$\frac{\bar{h}_{co} l}{k_v} = C \left( \frac{Gr^*}{S_p^*} \right)$$

ここで

$$Gr^* = \frac{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)l^3}{\mu_v^2}$$

$$S_p^* = \frac{c_{pv} \Delta T_{sat}}{L'_{lv} Pr_v}$$

## ふく射伝熱

ふく射の効果について検討する。蒸気流量は蒸気膜厚さの3乗に比例する。熱伝達率は蒸気膜厚さの逆比例であることから言い換えると、熱伝達率は蒸気流量の1/3乗に逆比例することになる。

Bromelyは、この蒸気流量は総括的な熱伝達率  $h_f$  に比例するべきであると考え、次式を提案した。

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

ここに  $h_r$  は有効ふく射熱伝達率である。

上式は  $h_r$  に対して超越方程式になっていて使いにくい。

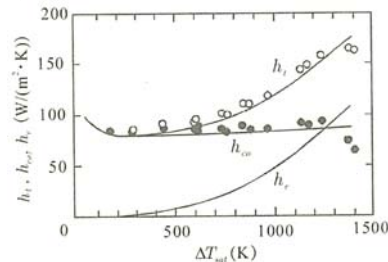
$(h_r / \bar{h}_{co})$  が小さい場合は、次の近似式が適用できる。

$$h_f = \bar{h}_{co} + \frac{3}{4} h_r$$

$h_r$  は次式で計算される。

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

右図はBromelyが液体窒素の飽和膜沸騰の実験データと上式を比較したものである。



水平円柱周りの膜沸騰特性  
(大気圧における液体窒素の飽和膜沸騰)

## 演習問題4-1

- 大気圧の飽和水を、 $250 \text{ (kW/m}^2\text{)}$  の熱流束で加熱するとき、壁面加熱度および熱伝達率がいくらになるか、Kutateladzeの式を用いて評価しなさい。

## 演習問題4-1 回答の方針

- 計算で使用する、大気圧での水の物性値などを示しておく

$$k_l = 0.6778 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k}) \quad \nu_l = 0.2944 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad Pr_l = 1.756 (-)$$

$$\rho_l = 958.3 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad \rho_v = 0.5977 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad L_{lv} = 2256.9 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$c_{pl} = 4.217 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad \sigma = 58.93 \text{ mN}/\text{m}$$

- まず、ラプラス係数を計算する

$$l_a = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} =$$

- よって、熱伝達率は、Kutateladzeの式より

$$Nu = \frac{hl_a}{k_l} = 7.0 \times 10^{-4} \cdot Pr_l^{0.35} \cdot \left( \frac{ql_a}{\rho_v L_{lv} \nu_l} \right)^{0.7} \left( \frac{pl_a}{\sigma} \right)^{0.7} =$$

$$h = Nu \cdot \frac{k_l}{l_a} = \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\Delta T_{sat} = \frac{q}{h} = \text{ (K)}$$

- 過熱度は

## 演習問題4-2

- 大気圧の飽和水が、壁面加熱度10 (K)でプール沸騰している。このときの熱流束と熱伝達率を、Rohsenowの式を用いて評価しなさい。

## 演習問題4-3

- 大気圧の水に対する限界熱流束を、Zuberの式を用いて評価しなさい。

$$q_c = 0.131 \rho_v L_{lv} \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} = \text{ kW}/\text{m}^2$$

$$k_l = 0.6778 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k}) \quad \nu_l = 0.2944 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad Pr_l = 1.756 (-)$$

$$\rho_l = 958.3 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad \rho_v = 0.5977 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad L_{lv} = 2256.9 \text{ kJ}/\text{kg}$$

$$c_{pl} = 4.217 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad \sigma = 58.93 \text{ mN}/\text{m}$$

## 演習問題4-4

- 大気圧の飽和水が、直径2(mm)の水平円柱の表面で膜沸騰している。伝熱面温度が800 (°C)の時の熱伝達率を評価しなさい。ただし、伝熱面の放射率は、0.73とし、輻射の影響も考慮しなさい。