

# 急冷過程における冷却曲線の予測法に関する研究—第1報—

## —静止サブクール蒸留水中での小物体の急冷—

Study on Prediction Technique for Cooling Curve in Quenching  
—1st Report, Quenching of Small Objects in Subcooled Pool Distilled-Water—

西尾茂文\*・上村光宏\*

Shigefumi NISHIO and Mitsuhiro UEMURA

### 1. はじめに

物体を急冷する急冷技術は、

- (1) 鋼材の焼入
- (2) 軽水炉 LOCA 時の ECCS
- (3) 非晶質金属あるいは非平衡相合金の作成
- (4) 強化ガラスの作成
- (5) 低温機器系の起動時

などに関連して、古くかつ新しい熱技術である。

ところで、一般に急冷効果を検討するためには、現実の物体について冷却曲線を知る必要があるが、沸騰熱伝達に関する多くの研究にもかかわらず、静止水中での冷却曲線すら数値予測が困難であるのが現状である。すなわち、冷却曲線の計算には少なくとも膜沸騰熱伝達率  $h_f$ 、極小熱流束 (MHF) 点  $[\Delta T_M, q_M]$  および限界熱流束 (CHF) 点  $[\Delta T_C, q_c]$  がすべて、液体流速、液体サブクール度  $\Delta T_{sub}$  および物体形状に対して定量化されている必要があるが、 $q_c$  を除いて他の特性量に関する信頼性のある定量化の報告は少ない。

そこで本報告では、静止したサブクール蒸留水中に浸没された高温金属物体の冷却曲線を計算することを目的とした場合の、沸騰曲線の模式化法および各特性量の整理法について検討する。

### 2. 沸騰曲線の模式化およびその整理法

沸騰曲線は一般に、図1に示した沸騰開始 (INB) 点、CHF 点、MHF 点で区切られる3つの温度領域つまり核沸騰域、遷移沸騰域、膜沸騰域により構成される。本報告ではこの3つの領域に対し、高サブクール水では CHF に近い熱流束  $q_w$  が維持される温度領域が拡大される傾向<sup>1)</sup>にあることに注目し、核沸騰域と遷移沸騰域との間に熱流束が一定である限界熱流束域を設け、沸騰曲線を図1の一点鎖線で示したとき4温度領域で近似する。

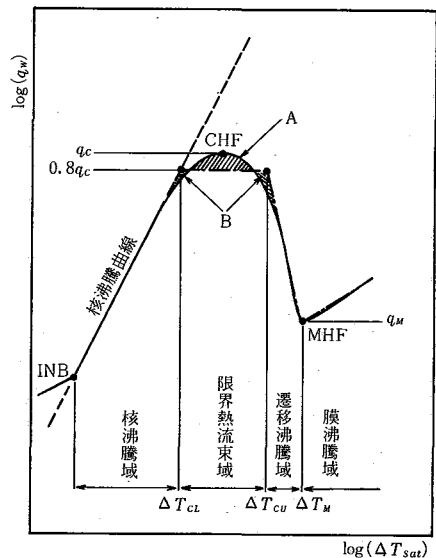


図1 沸騰曲線

この4温度領域で構成される沸騰曲線は、各温度領域において以下のように表現される。

(i) 核沸騰域：核沸騰熱伝達の多くの実験<sup>2)</sup>を参考にすれば、 $q_w = a \cdot (\Delta T_{sat})^b$  と表現される。

(ii) 限界熱流束域：急冷実験において得られる沸騰曲線の経験則より、 $q_w = 0.8q_c$  とする。定数 0.8 は、図1の A 部、B 部の面積を等しくするように経験的に定められたものである。

(iii) 遷移沸騰域：遷移沸騰熱伝達の実験<sup>3)</sup>を参考にすれば、 $q_w = d(\Delta T_{sat})^e$  で与えられる。

(iv) 膜沸騰域：サブクール膜沸騰熱伝達率の簡易整理式はほとんど報告されていないので、ここでも  $q_w = f \cdot (\Delta T_{sat})^g$  と表現する。

以上において、限界熱流束域上限界過熱度を  $\Delta T_{CU}$  とすると、定数  $d, e$  は限界熱流束域上限界点  $[\Delta T_{CU}, 0.8q_c]$ 、MHF 点  $[\Delta T_M, q_M]$  を用いて次のように決定される。

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

$$e = \left\{ \frac{\ln(q_M/0.8q_C)}{\ln(\Delta T_M/\Delta T_{CU})} \right\} \quad (1)$$

$$d = q_M / (\Delta T_M)^e$$

また膜沸騰域においても MHF 点  $[\Delta T_M, q_M]$  を境界条件として用いると、

$$q_W = q_M (\Delta T_{sat} / \Delta T_M)^g \quad (2)$$

したがって、定数  $a, b, g$ , 過熱度  $\Delta T_{CL}, \Delta T_{CU}, \Delta T_M$ , 熱流束  $q_C, q_M$  が定量化されると図 1 の 1 点鎖線で模式化された沸騰曲線が計算でき、冷却曲線の計算が可能となる。

### 3. 実験装置および実験方法

前章で述べた各量を定量化するため、銀製円柱を初期温度  $T_{wi}$  まで赤外線加熱器で昇温し、その後これを静止サブクール水中で水平に浸没させる実験を行った。

図 2 は、銀製円柱の詳細図である。銀製円柱は外径 6 mm、長さ 50 mm であり、端面より中心軸に沿って長さ方向中央位置まで外径 0.5 mm の CA シース熱電対が挿入されている。シース熱電対の取り付け方法は以下のとおりである。長さ 25 mm の M 2 銀製ビスの中心軸に  $\phi 0.5$  mm の穴を設け、これにシース熱電対を挿入し他端で銀溶接する。このビスを銀製円柱にねじこみ、再び銀溶接する。

この銀製円柱は、外径 2 mm の薄肉ステンレス鋼管により水平に支持され、850~900°C まで昇温された後、所定のサブクール度に保たれた静止蒸留水中に浸没される。実験に際し、円柱表面はアセトン洗浄を施した。

急冷中の温度履歴  $T_w(t)$  をもとに、銀製円柱を集中定数系近似し、次式により物体過熱度  $\Delta T_{sat}$ , 熱流束  $q_W$  を計算した。

$$\Delta T_{sat} = [T_w(t) + T_w(t + \Delta t)] / 2 - T_{sat} \quad (3)$$

$$q_W = [T_w(t) - T_w(t + \Delta t)] (\rho_w C_w V_w / A_w \cdot \Delta t) \quad (4)$$

ここで、 $\rho_w, C_w, V_w, A_w$  はそれぞれ銀の密度、比熱、銀製円柱の体積、伝熱面積である。集中定数系近似の精度はビオ数  $B_i$  により評価できるが、冷却曲線の予測上重要な  $\Delta T_{sat} > \Delta T_{CU}$  では  $B_i < 0.15$  であり、本研究の目的においては十分よい近似であると判断した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 沸騰曲線

図 3 に、測定された沸騰曲線の代表例を示した。サブクール度  $\Delta T_{sub}$  が 46.8 K 以下の 3 種類の沸騰曲線においては、膜沸騰域が明瞭に観察される (図中の 1 点鎖線は、Bromley<sup>4)</sup> の水平円柱まわりの飽和膜沸騰熱伝達解析による値である)。図よりわかるように、沸騰曲線は  $\Delta T_{sub}$  の増大とともに高過熱度側へシフトするが、核沸

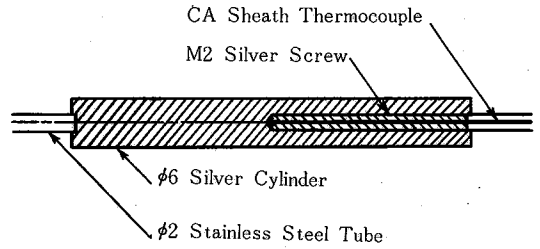


図 2 試験体の詳細図

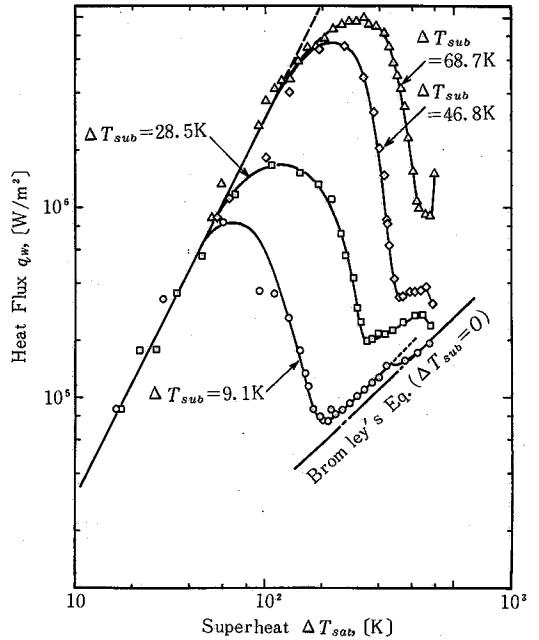


図 3 沸騰曲線の測定結果

騰曲線は従来報告<sup>2)</sup> されているように  $\Delta T_{sub}$  に対し鈍感である。

#### 4.2 特性量の整理

第 2 章で述べたように、模式化された沸騰曲線は、定数  $a, b, g$ , 過熱度  $\Delta T_{CL}, \Delta T_{CU}, \Delta T_M$ , 熱流束  $q_C, q_M$  を定量化すれば計算可能である。

まず、 $a, b$  については図 3 をもとに、

$$a = 300 [W/m^2 k^2], \quad b = 2 \quad (5)$$

と決定した。 $a, b$  は定常核沸騰式<sup>5)</sup> に比較してともに若干小さいが、核沸騰域は冷却曲線算出上において重要性が低いのでここではこれ以上議論しないことにする。

次に過熱度  $\Delta T_{CL}, \Delta T_{CU}, \Delta T_M$  は、実験値を  $\Delta T_{sub}$  に対して図示した図 4, 図 5 より、以下のように一次式で整理した。

$$\Delta T_{CL} = 30 + 1.75 \Delta T_{sub} \quad (6)$$

$$\Delta T_{CU} = 50 + 6.50 \Delta T_{sub} \quad (7)$$

研究 速 報

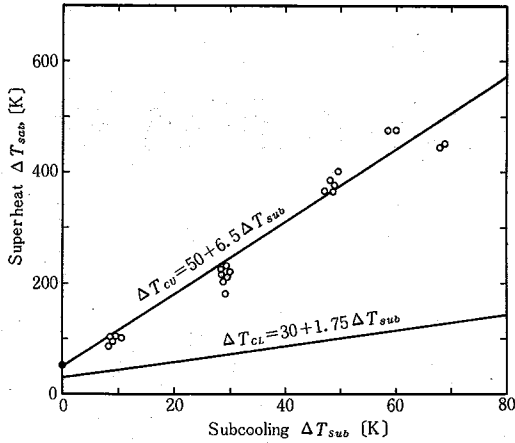


図 4 限界熱流束域境界過熱度

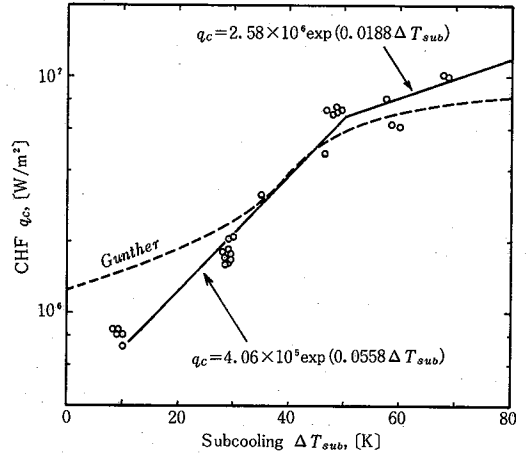


図 6 限界熱流束

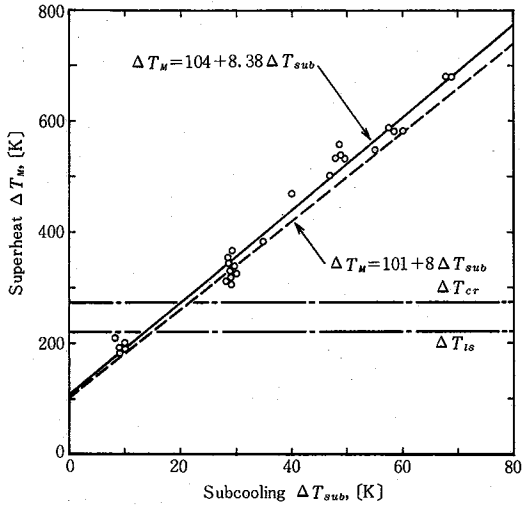


図 5 極小熱流束点過熱度

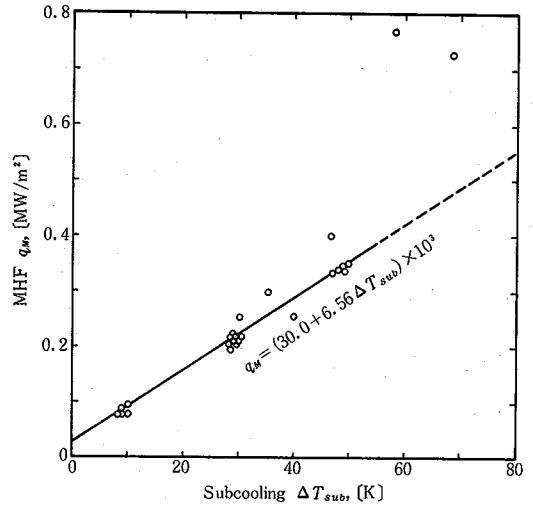


図 7 極小熱流束

$$\Delta T_M = 104 + 8.38 \Delta T_{sub} \quad (8)$$

ただし、図 4 中の黒印は飽和沸騰<sup>9)~8)</sup>での値であり、図 5 中の破線は Dhir and Purohit<sup>9)</sup>の球における  $\Delta T_M$  の整理式であるが、この整理式は形状の異なる物体の (8) 式と極めて近いことが注目される。また図 5 中には、一点鎖線で水の臨界過熱度  $\Delta T_{cr}$ 、過熱限界過熱度  $\Delta T_{is}$  を示したが、高サブクール水における  $\Delta T_M$  はこれらの値をはるかに超えている。

また、熱流束  $q_c$ ,  $q_m$  は、実験値を  $\Delta T_{sub}$  に対して図示した図 6, 図 7 より、以下のように整理した。

$$\Delta T_{sub} \leq 50, q_c = 4.06 \times 10^5 \exp(0.0558 \Delta T_{sub}), \quad [W/m^2] \quad (9)$$

$$\Delta T_{sub} \geq 50, q_c = 2.58 \times 10^6 \exp(0.0188 \Delta T_{sub}), \quad [W/m^2] \quad (10)$$

$$q_m = (30.0 + 6.56 \Delta T_{sub}) \times 10^3, [W/m^2] \quad (11)$$

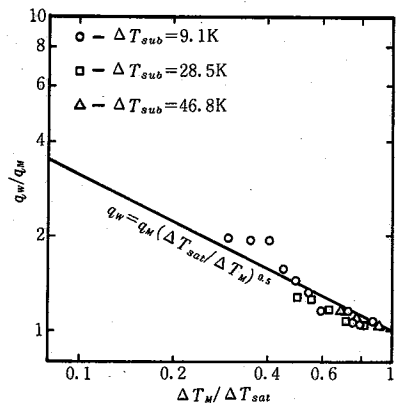


図 8 膜沸騰域熱流束

ただし、図 6 中の破線は、Gunther and Kreith<sup>10)</sup> の結果である。また図 7 中  $\Delta T_{sub} > 60K$  で実測値が (11) 式より高くなっているのは、初期温度が十分高くなく膜沸騰が十分発達する以前に蒸気膜が崩壊していることに起因すると考える。

最後に、定数  $g$  については、(2) 式にもとづき、 $(q_w/q_M)$  を  $(\Delta T_M/\Delta T_{sat})$  に対して図示した図 8 より

$$g = 0.5 \quad (12)$$

と決定したが、(2) 式の整理法でかなりよく整理されている。

### 4.3 冷却曲線の予測

(5)~(12) 式を用いれば、静止サブクール水中の沸騰曲線が計算でき、したがって冷却曲線が算出できる。ここでは、本実験で用いた水平銀製円柱および三塚・福田<sup>11)</sup> の水道水中に浸没した鉛直銀製円柱 ( $\phi 10 \times L 30$ ) の冷却曲線を算出し、図 9 に実測値と比較した。

まず、水平円柱については、計算値と実測値はかなりよく一致しており、本研究で提案した沸騰曲線の模式化法、整理法が妥当であることがわかる。ただし、 $\Delta T_{sub} = 68.7K$  の場合に若干の相違がみられるが、これは実験における初期温度が十分高くなかったことを示していると考えられる。また、計算値がすべて  $100^\circ C$  に漸近しているのは、本計算において未沸騰域を考慮していないためである。一方、鉛直円柱の  $\Delta T_{sub} = 40.0K$  については、計算の方がクエンチがおくれる傾向を示しているが、これは冷却液が水道水であるため、汚損の影響が無視できないことを示していると考えられる。したがって、物体形状、姿勢の影響とともに汚損の影響についても今後検討する必要がある。

## 5. おわりに

静止サブクール蒸留水中に浸没された金属物体の冷却曲線を算出することを目的として、沸騰曲線の模式化法、整理法について検討し以下の結論を得た。

(1) 提案した沸騰曲線の 4 温度領域模式化法は冷却曲線算出上有効である。

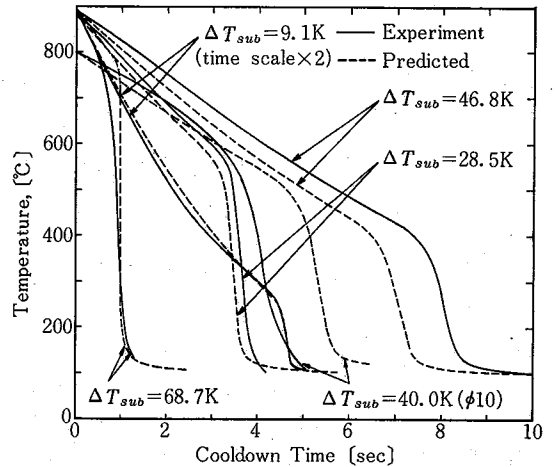


図 9 冷却曲線の予測結果

(2) 冷却曲線算出上重要な量は、膜沸騰域熱流束、極小流束点であり、後者について  $\Delta T_M$ 、 $q_M$  とともに  $\Delta T_{sub}$  の一次式として整理でき、また前者については  $\Delta T_M$ 、 $q_M$  を用いた整理法により十分整理可能である。

(1983 年 4 月 6 日受理)

### 参 考 文 献

- 1) W. S. Bradfield, J. Heat Transfer, 89 (1967), p. 269
- 2) 西川・藤田, 伝熱工学の進展 2 (養賢堂), (1974)
- 3) P. J. Berenson, Intern. J. Heat Mass Transfer, 5 (1962), p. 985
- 4) L. A. Bromley, Chem. Engng Progr., 46 (1950), p. 221
- 5) K. Nishikawa and K. Yamagata, Intern. J. Heat Mass Transfer, 1 (1960), p. 219
- 6) 石谷・久野, 日機論, 31 (1965), p. 1251
- 7) 甲藤・横谷, 日機論, 34 (1968), p. 345
- 8) 本田・西川, 日機論, 38 (1972), p. 177
- 9) V. K. Dhir and G. P. Purohit, Nucl. Engng Des., 47 (1978), p. 49
- 10) F. C. Gunther and F. Kreith, Proc. Heat Transfer and Fluid Mechanics Institute, (1949), p. 113
- 11) 三塚・福田, 鉄と鋼, 61 (1974), p. 2079