

# 金属物体の過渡冷却に対する表面熱抵抗層の影響 (第2報)

Effect of Surface Thermal-Resistance Layer on Transient Cooling of Metal (2nd Report)

西尾茂文\*

Shigefumi NISHIO

## 1. はじめに

物体を過渡的に冷却する際に液体の沸騰現象を用いる方法は、高い冷却速度が得られ急冷が実現されるため、鋼材の焼入れや軽水炉緊急炉心冷却系などに用いられている。

液体の沸騰を利用した過渡冷却では、冷却速度が被冷却物体表面温度により大きく変化し、高温側から一般に徐冷・急冷・徐冷の3段階を経る。この場合、急冷開始点(ここでは冷却速度の極小点と定義する)や急冷中心点(冷却速度の極大点と定義する)の温度や急冷温度幅などの量が問題となり、特に急冷について関心が払われる場合が多いが、現実の過渡冷却に際し、これらの諸量を自在に変化させ目的に応じた冷却特性を得る手法を確立しておくことは重要である。

現在、冷却速度の調節に用いられている方法は、沸騰液体・液温・流動状態の選択といった液体側の条件を変化させる方法である。これに対し、前報<sup>1)</sup>において、急冷など過渡冷却特性の促進に対し、被冷却物体表面に熱抵抗層を付加する方法が有効であることを示した。

本報告では、水平平板浸漬冷却系について前報と同様の実験を行い、前報の結果を確認するとともに、表面熱抵抗層の沸騰曲線への影響について検討した。

## 2. 実験装置および実験方法

実験装置および実験方法については、被冷却面をのぞき前報と同一であるので省略し、被冷却面の構成についてのみ述べる。

図1は、本実験で用いた(水平平板)被冷却面の構成を示したものである。被冷却面本体は、厚さ2mm・一辺50mmの銅平板である。この銅平板は図1に示したベークライトブロック表面に埋めこまれており、銅平板裏面には前報と同様に平板の対角線上に50 $\mu$ mクロメル・アルメル熱電対が3組ハンダ付けされている。表面付加層として、厚さ0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.5mm,

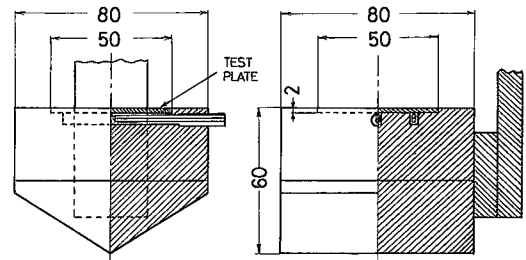


図1 被冷却面

1.0mmのテフロン膜(板)を用意した。

前報の実験は被冷却物体表面が鉛直方向である鉛直平板浸漬冷却系について行われたが、本報では図1の被冷却面の表面を水平に保ったまま液体窒素中へ浸漬する水平平板浸漬冷却系について実験を行った。

## 3. 実験結果

水平平板浸漬冷却系における代表的実験結果を、図2～図4に示した。

図2は冷却曲線(銅板裏面温度 $T_w^b$ を冷却時間 $\tau$ に対して示したものを)、図3は冷却速度曲線(冷却速度 $V_w$ を $T_w^b$ に対して示したものを)をそれぞれ(銅板表面に付加した)テフロン層厚さ $\delta_f$ をパラメータとして示したものである。ただし、冷却速度 $V_w$ は次式で定義した。

$$V_w = (\rho C \delta)_w \left( \frac{dT_w^b}{d\tau} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\rho_w$ : 銅の密度、 $C_w$ : 銅の比熱、 $\delta_w$ : 銅板厚さである。 $\delta_f = 0$ mmの場合は、 $V_w$ は表面熱流束 $q_w$ に等しい。

図2, 図3より、鉛直平板浸漬冷却系とほぼ同様に、急冷に関して以下の結果が得られる。まず、テフロン層の厚さ $\delta_f$ が0.3mm程度に至るまでは、 $\delta_f$ の増大とともに、

1) 冷却速度がより高温から増大するようになり、 $V_w$

\* 東京大学生産技術研究所 第2部

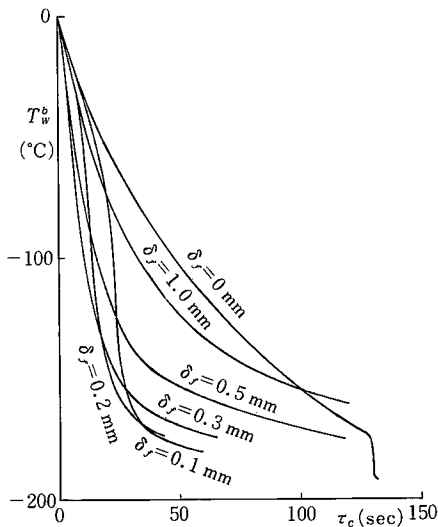


図2 冷却曲線の変化

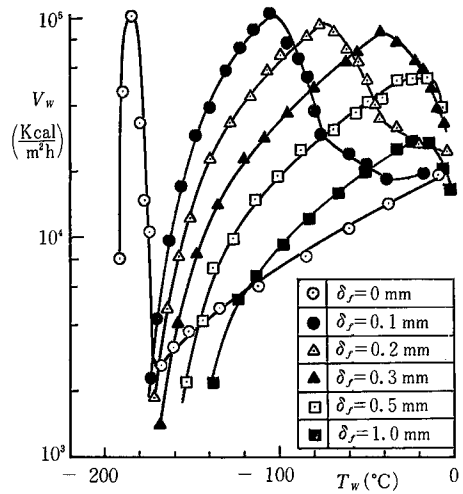


図3 冷却速度曲線の変化

が極大値  $V_{wmax}$  となる急冷中心点の被冷却物体(銅板)温度は高温側に移行し、

2)  $V_{wmax}$  の値は裸面 ( $\delta_f=0$ ) での限界熱流束(CHF)に近い値をとり、

3)  $V_w$  が  $V_{wmax}$  に近い値(例えば  $V_w \geq 0.8 V_{wmax}$ )をとる温度範囲(これは急冷温度幅と関係する)が広くなり、

急冷がより高温で起こり、急冷温度幅も増大し、保温・断熱材であるテフロン膜の厚さの増大とともに、逆に急冷が促進されるようになっている。一方、 $\delta_f$  が 0.3 mm 程度を超えて増大すると、 $\delta_f$  の増大とともに

4) 急冷中心点の被冷却物体(銅板)温度はより高温側に移行するが、

5)  $V_{wmax}$  の値は裸面 ( $\delta_f=0$ ) での CHF より顕著に減少し、

6)  $V_w$  が  $V_{wmax}$  に近い値をとる温度範囲も狭くなるようになり、

急冷中心点は高温側に移行するが、テフロン層はその保温層としての効果を強め、しだいに急冷が起こりにくくなることが確認される。ただし、本実験範囲では、

7) 急冷中心点より低温側では、 $\delta_f$  の増大とともに一様に冷却速度  $V_w$  が低くなる

傾向を示している。

図4は、各テフロン層厚さ  $\delta_f$  における冷却所要時間  $\tau_c$  を、温度区間 ( $[0^\circ\text{C}, -50^\circ\text{C}]$ ,  $[0^\circ\text{C}, -100^\circ\text{C}]$ ,  $[0^\circ\text{C}, -150^\circ\text{C}]$ ,  $[0^\circ\text{C}, -175^\circ\text{C}]$ ) をパラメータとして示したものである。この図から判るように、銅板表面に付加することにより銅板自身の冷却所要時間が最も短縮され

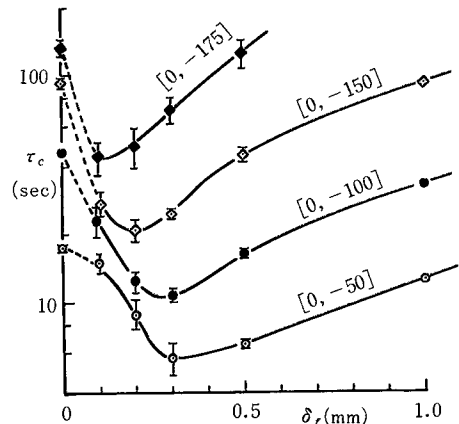


図4 冷却所要時間の変化

るようなテフロン層厚さ  $\delta_{fc}$  が各温度区間に対して存在し、テフロン層の効果は急冷促進効果と保温効果という矛盾した2側面をもつことがわかる。また、この  $\delta_{fc}$  の値は温度区間の下限値が低くなるほど小さくなる。これは主として前述した7)の特徴によるものである。

以上のように、液体側の条件を固定した状態でも過渡冷却速度を変化させることができ、この表面付加層の効果と液体側の条件とを組み合わせることにより、多様な冷却特性を得ることができると考えられる。

#### 4. 沸騰曲線に関する検討

以上の議論では、被冷却物体(銅板)温度  $T_w^b$  と冷却速度  $V_w$  の関係(冷却速度曲線)について取り扱ってきた。過渡冷却法の特性を議論する場合には、この冷却速

研究速報

度曲線が重要な情報を与えるが、表面付加層の効果をより一般的に詳細に考察するためには、被冷却物体表面温度  $T_w^b$  と表面熱流束  $q_w$  との関係(沸騰曲線)に対する表面付加層の影響を知っておく必要がある。ただし、本実験では  $T_w^b \cdot q_w$  とともに実測していないので、熱伝導の逆問題により  $T_w^b$  の実測値からこれらの量を計算することにする。

図5は、前報および本報で対象とした被冷却物体系を模式化したものである。図5の系について、簡単のためにテフロン・銅の物性値の温度依存性を無視すると、 $(M-1)\Delta\tau < \tau \leq M\Delta\tau$ , ( $M=1, 2, \dots$ ) における表面熱流束  $q_w[M\Delta\tau]$  は、実測値  $T_w^b[M\Delta\tau] \cdot T_w^b[(M+1)\Delta\tau] \cdot T_w^b[(M+2)\Delta\tau]$  をもとに、J. V. Beck<sup>2)</sup> と同様の方法により次式で計算できる。

$$q_w[M\Delta\tau] = \frac{C_1 C_5 - C_2 C_4}{C_0 C_4 - C_1 C_3} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{aligned} C_0 &= \Delta\phi_0^2 + (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1)^2 + (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2)^2 \\ C_1 &= \Delta\phi_0(\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) + (2\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1)(\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2) \\ C_2 &= \Delta\phi_0 \left( \sum_{n=0}^{M-1} q_w(n\Delta\tau) \Delta\phi_{M-n} \right) \\ &\quad + (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) \left( \sum_{n=0}^{M-1} q_w(n\Delta\tau) \Delta\phi_{M-n-1} \right) \\ &\quad + (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2) \left( \sum_{n=0}^{M-1} q_w(n\Delta\tau) \Delta\phi_{M-n-2} \right) \\ &\quad - T_w^b[M\Delta\tau] \Delta\phi_0 - T_w^b[(M+1)\Delta\tau] (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) \\ &\quad - T_w^b[(M+2)\Delta\tau] (\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2) \\ C_3 &= \Delta\phi_0(\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) \\ &\quad + (2\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1)(\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2) \\ C_4 &= \Delta\phi_0^2 + (2\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1)^2 \\ C_5 &= \Delta\phi_0 \left( \sum_{n=0}^{M-1} q_w[n\Delta\tau] \Delta\phi_{M-n+1} \right) \\ &\quad + (2\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) \left( \sum_{n=0}^{M-1} q_w[n\Delta\tau] \Delta\phi_{M-n+2} \right) \\ &\quad - T_w^b[(M+1)\Delta\tau] \Delta\phi_0 \\ &\quad - T_w^b[(M+2)\Delta\tau] (2\Delta\phi_0 + \Delta\phi_1) \end{aligned} \quad (3)$$

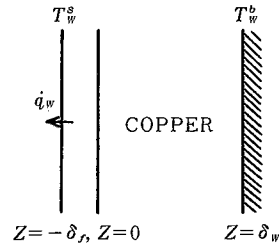


図5 被冷却面系

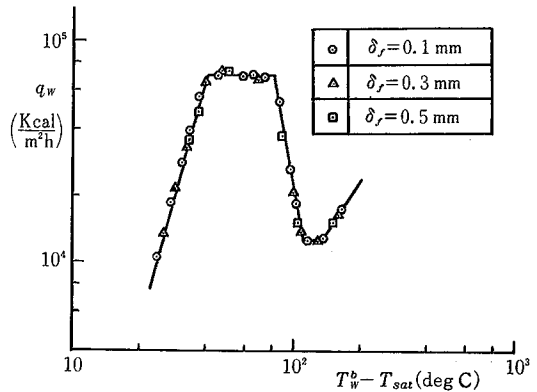


図6 沸騰曲線の計算精度

ここで  $\Delta\phi_i = \phi[(i+1)\Delta\tau] - \phi[i\Delta\tau]$

$\phi$ :  $x = \delta_w$  における単位表面熱流束ステップに対する温度応答関数

(2)・(3)式より計算された各時刻における表面熱流束を境界条件として図5の系について熱伝導計算を行えば、各時刻における被冷却物体系の表面温度  $T_w^b$  が計算される。

この方法の精度を検討するために、次のような計算を行った。図6の実線は、前報で示した沸騰曲線③であり、鉛直平板浸漬冷却における0.1mm厚テフロン被覆系での沸騰曲線に近いと思われるものである。この沸騰曲線を用いて、図5の系について  $\delta_f = 0.1 \text{ mm} \cdot 0.3 \text{ mm} \cdot 0.5 \text{ mm}$  の場合に対してそれぞれ銅板裏面温度  $T_w^b$  を計算し、この値をもとにして上述の方法により沸騰曲線を再現する計算を行った。沸騰曲線の再現結果を図6に比較して示した。 $\delta_f = 0.5 \text{ mm}$  の場合、CHF領域近くで若干振動する傾向を示すが、いずれの場合も実線の沸騰曲線をよく再現しており、この方法の計算精度は十分であると考えられる。

前報の鉛直平板浸漬冷却系と本報の水平平板浸漬冷却系それぞれにおける  $T_w^b$  の測定値をもとに、上述の方法により計算された沸騰曲線を、 $\delta_f$  をパラメータとして図7・図8に示した。いずれの系においても、テフロン層

厚さ  $\delta_f$  の変化に対して沸騰曲線自体が大きく変化していることがわかる。テフロン被覆銅板系については、 $\delta_f$  の値によらず表面がテフロンであるので、沸騰に対する表面条件（粗さ・濡れ性）が同一であることを考えると、この沸騰曲線の変化はテフロン層の熱抵抗の効果によるものと考えてよい。ただし、逆に  $\delta_f \rightarrow 0$  mm の場合に沸騰曲線が裸銅面のそれにどれほど近づくかについては、本実験では確認するに至っていない。

$\delta_f$  の増大ともなう沸騰曲線の変化は、上述した冷却速度曲線の変化と類似した特徴をもつ。その特徴をまとめると以下ようになる。

i) 膜沸騰域：本実験では  $\delta_f = 1.0$  mm の場合にのみ観察され、 $\delta_f$  の増大とともに高温部に限定されるようになる。

ii) 遷移沸騰域： $\delta_f$  の増大とともに高温側へ移行し、その熱伝達特性は向上するが、 $\delta_f$  が 0.3 mm 程度を超えると大差なくなる。

iii) 限界熱流束 (CHF)： $\delta_f$  が 0.3 mm 程度までは裸銅面のそれと大差ないが、 $\delta_f$  がこれ以上となると顕著に減少するようになる。

iv) 核沸騰域： $\delta_f$  の増大とともに、高温側へ移行し、その伝熱特性は劣化する。

ii), iv) の点に関しては、沸騰サイクルと同期した表面温度変動サイクルの表面熱抵抗による増幅が、固液接触割合や核生成密度・気泡離脱周期などをいかに変化させるかにより説明されると思われるが、詳細を議論する段階にない。ただし、固液の急接触により自発核生成が起こる下限温度  $T_{wsn}^{3)}$

$$T_{wsn} = \left( 1 + \sqrt{\frac{(\lambda \rho C)_l}{(\lambda \rho C)_w}} \right) (T_{sn} - T_{sat}) + T_{sat} \quad (4)$$

$$T_{sn} = T_c [0.89 + 0.11(P/P_c)] \quad (5)$$

ただし、 $P_c \cdot T_c$  はそれぞれ液体の臨界圧力・臨界温度である。

より高温側でも、図7・図8に示したように良好な伝熱が得られていることを考えると、固液接触サイクル<sup>3)</sup>に同期する温度変動サイクルに対し、固液急接触時の温度変動のみでなく固液接近時の温度変動についても考慮する必要があると考えられる。

### 5. ま と め

水平平板浸漬冷却に関し、被冷却物体表面に付加したテフロン膜の効果を実験的に検討し、適当な厚さのテフロン層が急冷促進に効果があることを示し、この効果がテフロン層の熱抵抗に起因し、表面熱抵抗層の付加により沸騰曲線は一般に高温側に移行する様相を示した。

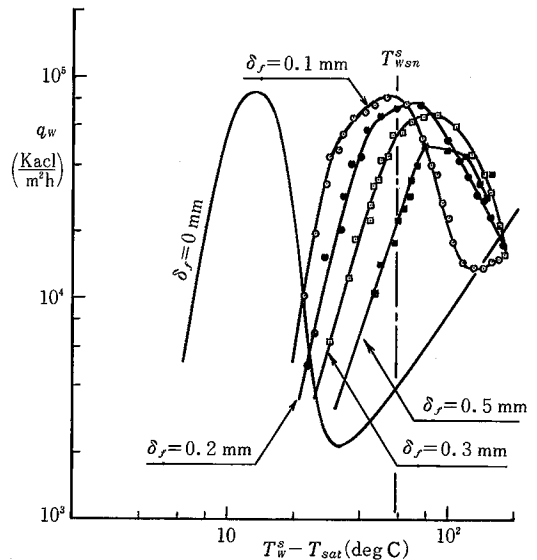


図7 沸騰曲線 (鉛直平板浸漬冷却系)

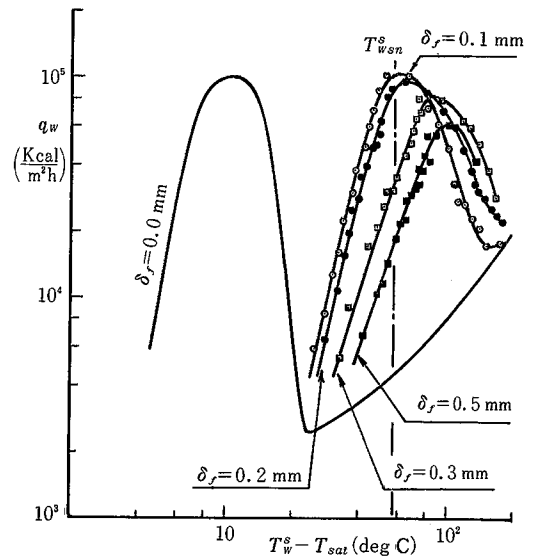


図8 沸騰曲線 (水平平板浸漬冷却系)

〔付言〕 本報告の実験は、大倉康君（東海大学学生）の協力により行われたものである。

(1980年3月3日受理)

### 参 考 文 献

- 1) 西尾, 生産研究, 32-5 (1980-5)
- 2) J. V. Beck, Nuclear Engineering and Design, 7 (1968), pp. 170-178
- 3) 西尾, 生研報告, 28-6 (1980-3)