

金属物体の過渡冷却に対する表面熱抵抗層の影響 (第3報)

Effect of Surface Thermal-Resistance Layer on Transient Cooling of Metal (3rd Report)

西尾 茂文*
Shigefumi NISHIO

1. はじめに

第1報¹⁾・第2報²⁾において、金属物体浸漬冷却における急冷特性に及ぼす表面熱抵抗層の影響について、液体窒素-テフロン被覆銅板系に対し実験的に検討し、

- ① 液体の沸騰を用いて金属物体を急冷する場合に、金属物体表面に適当な厚さの熱抵抗層を付加すると、逆に急冷が促進されること(この現象を本報告では、「保温材のパラドックス」と仮称する)、
 - ② この現象は、表面熱抵抗層の付加により沸騰曲線自体が大きく変化することと関係すること
- を報告した。

しかし、これらの報告では、冷却開始温度が室温であったことと0.1mm以下のテフロン層が得られなかったため、

- ③ 熱抵抗層を付加した被冷却面では、冷却初期において蒸気膜が確保されず、冷却が遷移沸騰域から始まり、このため冷却が膜沸騰域の十分高温部から始まる場合でも「保温材のパラドックス」現象が存在し得るか否かについて明らかにできなかった、
 - ④ 冷却能曲線(前報まででは冷却速度曲線と呼んだ)上の諸特性値に対する δ_f の影響について詳細に議論できなかった
- など、残された問題があった。

そこで、これら残された問題について、本報では冷却能曲線の点から、次報では沸騰曲線の点から検討する。

2. 実験装置

実験装置および実験方法は、第1報とはほぼ同様であるので、重要な点・改良点のみについて述べる。

被冷却面(図1)は、第1報と全く同様、一辺50mmの正方形表面をもつ厚さ2mmの銅板である。

銅板表面に設ける熱抵抗層材質は、①熱物性値が明確であること、②(表面条件としては沸騰熱伝達を劣化させる)濡れ性が悪いこと、③被覆層ごとに表面粗さなど

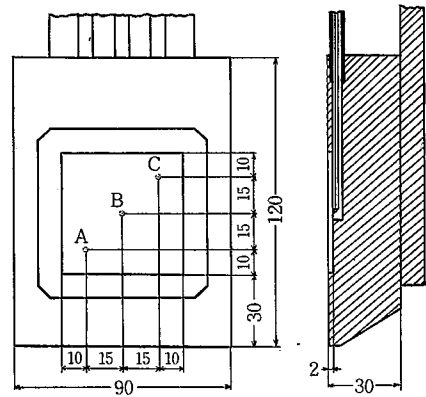


図1 被冷却面系

が顕著な変化を示さぬことを考慮し、ポリテトラフルオロエチレン(テフロン)を選んだ。熱抵抗層の厚さ δ_f が0.1mm以上の場合は市販テフロンシートをシアノアクリレート系接着剤で接着し、 $\delta_f=6\sim 95\mu\text{m}$ についてはテフロンエマルジョン(三井フロロケミカル:30J)を焼き付けることにより、銅板表面にテフロン層を形成した。後者については実験後に剥して膜厚を測定したが、場所による膜厚不均一は最大5%であった。

実験手順は以下のとおり。テフロン層が付加されている銅板でも効果的な均一加熱が期待できる赤外線加熱器により被冷却面系を所定の温度 T_w^0 まで加熱し、これを液体窒素(テフロンの耐熱温度との関連で選んだ)プール中に浸漬する。この浸漬冷却時の銅板温度変化をペンレコーダにより記録する。

3. 実験結果

3.1 用語 : 実験結果を整理する前に、以下に用いる用語の定義を行っておきたい。まず、銅板の温度、密度、比熱、厚さをそれぞれ T_w^0 、 ρ_w 、 C_w 、 δ_w とすると、次式で与えられる V_w を冷却能(Cooling Power)と定義する。

$$V_w = (\rho C \delta)_w (dT_w^0 / d\tau) \quad (1)$$

* 東京大学生産技術研究所 第2部

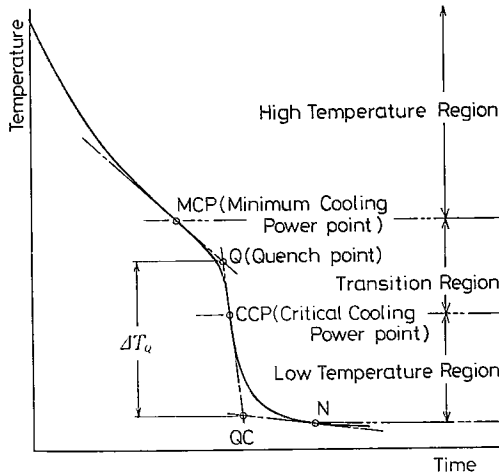


図2 急冷に関する諸量

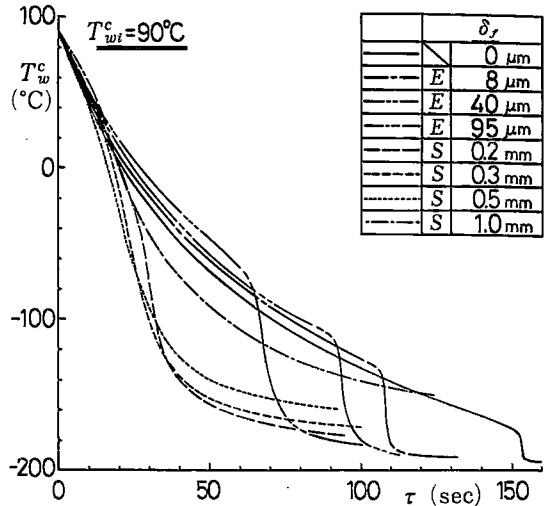


図3 冷却曲線 ($T_{wi} = 90^\circ\text{C}$)

V_w を銅板過熱度 ($T_w^i - T_{sat}$) に対して示した冷却能曲線は、前報・前々報で示したように、沸騰曲線と類似した2つの極値をもつ曲線となる。冷却能が極大 ($V_w = V_c$) となる点をここでは CCP (Critical Cooling Power) 点、極小 ($V_w = V_M$) となる点を MCP (Minimum Cooling Power) 点と呼ぶ。さらに、この2点により区切られる3つの温度領域を低温側より、低温域・遷移域・高温域と呼ぶ。これらを冷却曲線上に示すと図2のようになる。

冷却曲線に対する MCP 点・CCP 点での接点の交点 Q をクエンチ点、CCP 点・N 点 (沸騰曲線における沸騰開始点に相当) での接線の交点 QC をクエンチ終了点、クエンチ温度とクエンチ終了温度との差 ΔT_q をクエンチ温度差と呼ぶことにする。

3.2 冷却曲線 : 冷却開始温度 $T_{wi} = 90^\circ\text{C}$ 、 20°C の場合の冷却曲線 (銅板温度履歴) を、図3・図4にテフロン層厚さ δ_f をパラメータとして示した。 $T_{wi} = 140^\circ\text{C}$ の場合についても実験を行ったが、加熱途中でテフロンシート ($\delta_f \geq 0.1\text{mm}$) が剥離することが多く、今回は参考データにとどめる。また図中の記号 E はエマルジョン、S はシートを意味する。

図3・図4から判るように、熱抵抗層の付加により銅板の急冷が促進される現象は、初期温度によらず存在する。特に前報までに得られていなかった $\delta_f = 8 \sim 95 \mu\text{m}$ の場合の冷却曲線の追加により、 δ_f の増大につれて、クエンチ点が高温側に移行しクエンチ温度差が増大し急冷が促進されてゆく様子がよく判る。一方、 δ_f が1mmにも達すると、クエンチ終了温度がかなり高くなり、銅板の冷え方は悪くなっている。

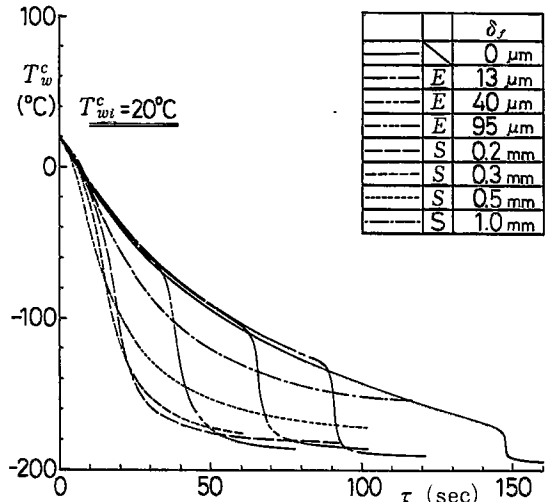


図4 冷却曲線 ($T_{wi} = 20^\circ\text{C}$)

3.3 冷却能曲線 (MCP点・CCP点): 図5に、図3に示した各冷却曲線から得られる冷却能 V_w を銅板過熱度 ($T_w^i - T_{sat}$) に対して示した。図5から判ることをまとめると、以下のようになる。

- ㊶ $\delta_f \leq 0.2\text{mm}$ の場合、冷却は高温域から始っており、このことと図3の結果より、冷却初期において被冷却面が蒸気膜に覆われている場合にも、熱抵抗層の付加により急冷促進が実現されることが判る。
- ㊷ 高温域での冷却能は、 δ_f の増大とともに劣化するが、その程度は顕著でない。
- ㊸ MCP点は、 δ_f の増大とともに、高温・高冷却能側へ顕著に移行する。図6に MCP 点温度、図7に MCP (V_M) の δ_f に対する変化を示した。それぞれ T_w^i 、

研究速報

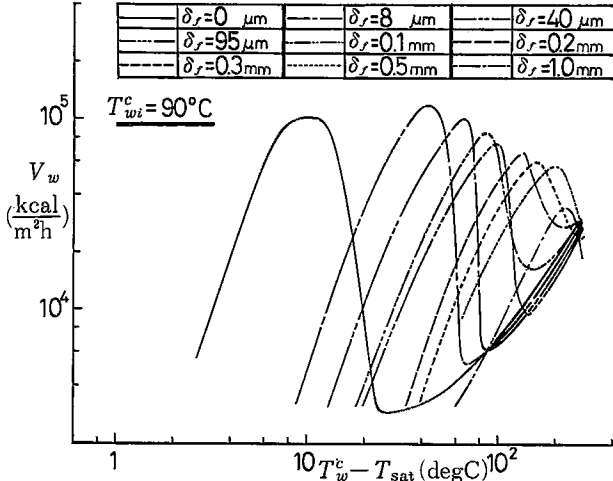


図5 冷却能曲線 ($T_{wi}^c = 90^\circ\text{C}$)

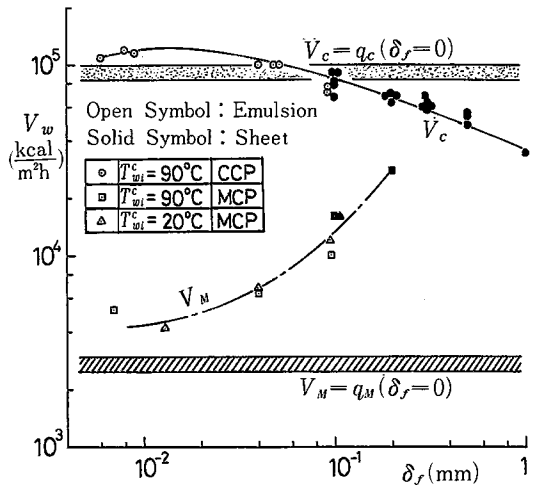


図7 MCP・CCP

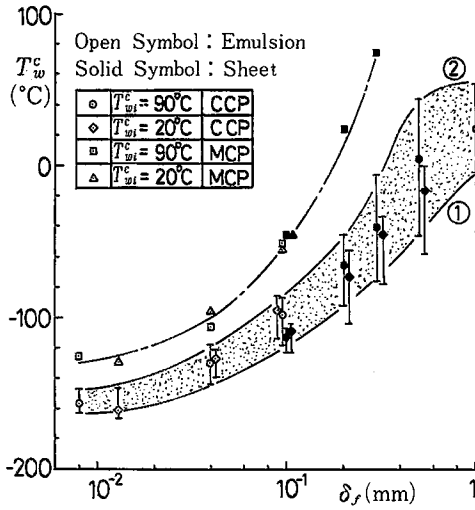


図6 MCP点温度・CCP点温度

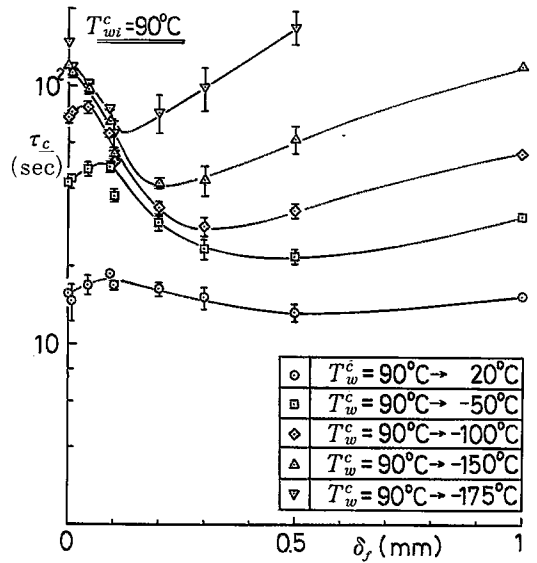


図8 冷却所要時間 ($T_{wi}^c = 90^\circ\text{C}$)

= 90°C, 20°Cのデータについて示したが、双方の一致はよく、MCP点温度・MCPは δ_f の増大とともに急速に増大する。 $\delta_f = 0.1\text{mm}$ をはさんでテフロン層の作製方法が異なるが、 $\delta_f = 0.1\text{mm}$ でのデータの接続は、MCP点温度ではよいがMCPには若干の差が生じている。

㉖ CCP点は、 δ_f の増大とともに高温側に移行する。図6に、CCP点温度および $V_w \geq 0.8 V_c$ である温度領域(曲線①・②)にはさまれた領域、この温度幅はクエンチ温度差の大きさの目安となる)を、 δ_f に対して示した。CCP点温度および上述の温度幅は δ_f の増大とともに顕著に増大し、クエンチ温度差が増大していることを示すが、 $\delta_f \geq 0.3\text{mm}$ での傾向には初期温度 T_{wi}^c による差が生じている。また、 $\delta_f = 0.1\text{mm}$ でのデータ

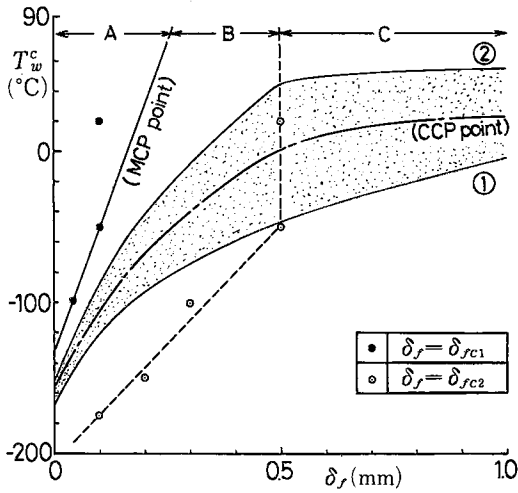
の接続は若干良くない。

㉗ 図7に、CCP (V_c)の δ_f に対する依存性を、 $T_{wi}^c = 90^\circ\text{C}$ の場合について示した。CCPは、 δ_f の増大とともに急速に増大するのではなく、いったん増大し極大に至った後に漸減する傾向を示した。 $T_{wi}^c = 20^\circ\text{C}$ の場合もほぼ同様の結果を得ている。

㉘ 低温域での冷却能は、 δ_f の増大に対し、顕著な劣化を示す。

以上、表面熱抵抗層の付加による高温域の冷却能・MCP点・CCP点の変化の概略を知ることができた。

3.4 冷却所要時間 : 図8に、 $T_{wi}^c = 90^\circ\text{C}$ の場合における各温度領域 [T_{wi}^c, T_{we}^c]の冷却所要時間 τ_c を、



平均値と標準偏差について示した。この図から以下のことが判る。

- ① $T_w^c \geq -100^\circ\text{C}$ の場合、各温度区間において τ_c が極大となる δ_f ($\equiv \delta_{fc1}$) が存在し、 $\delta_f \leq \delta_{fc1}$ では τ_c は δ_f とともに増大し、表面熱抵抗層は通常の保温断熱効果を示すのみである。また δ_{fc1} は T_w^c の低下とともに減少する。
- ② $T_w^c = -175^\circ\text{C}$ の場合、 $\delta_f = 0$ での τ_c と、 $\delta_f \rightarrow 0$ での τ_c とは一致しない。
- ③ 各温度区間において、 τ_c が極小となる δ_f ($\equiv \delta_{fc2}$) が存在し、 $\delta_{fc1} \leq \delta_f \leq \delta_{fc2}$ では τ_c は δ_f の増大とともに減少する。また δ_{fc2} は T_w^c の低下とともに減少する。
- ④ $\delta_f = 0.1\text{mm}$ でのデータの接続は若干悪いが、接着剤層の存在を考えると、本現象の性質を本質的に左右する差とは思われない。

以上の結果より、表面熱抵抗層の効果を $[d\tau_c/d\delta_f]$ の符号により分類すると図9のようになる。領域A・Cで $[d\tau_c/d\delta_f] > 0$ 、領域Bで $[d\tau_c/d\delta_f] < 0$ であり、A・Bの境界が $\delta_f = \delta_{fc1}$ 、B・Cの境界が $\delta_f = \delta_{fc2}$ である。同図中には、図6のプロットの代表線も示した。

膜沸騰域の熱伝達率が熱抵抗層の有無に依存しないとすると、高温域での冷却能は、熱抵抗層内での温度降下分だけ裸面の場合より悪くなるはずである。この効果が現れるのが領域Aであり、ちなみに $\delta_f = \delta_{fc1}$ のプロットは MCP 点温度のプロットに近い。領域Bは、MCP 点と CCP 点の高温化・CCP 点付近の冷却能曲線の平坦化による冷却能の向上の度合が、高温域での冷却能の劣化と CCP および低温域での冷却能の低下を補っている領域であり急冷促進域である。 $\delta_f = \delta_{fc2}$ における $\tau_c (= \tau_c[\delta_{fc2}])$

表1 冷却所要時間の短縮率

$T_w^c \backslash T_{wi}^c$	20°C	-50°C	-100°C	-150°C	-175°C
90°C	0.85	0.52	0.38	0.35	0.44
20°C	—	0.51	0.34	0.27	0.36

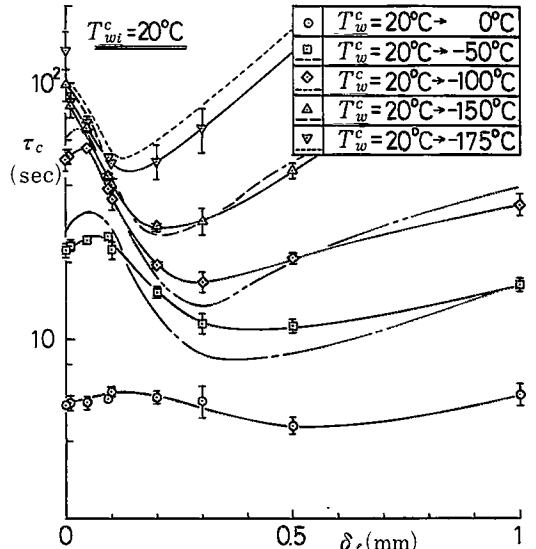


図10 冷却所要時間 ($T_{wi} = 20^\circ\text{C}$)

と $\delta_f = 0$ における $\tau_c (= \tau_c[0])$ との比を表1に示したが、本実験系での最小値は、 $\tau_c[\delta_{fc2}]/\tau_c[0] = 0.27$ であった。一方、領域Cは、CCP および低温域での冷却能の劣化が顕著な領域である。

図10に、 $T_{wi} = 20^\circ\text{C}$ の場合の冷却所要時間 τ_c を示した。この場合にも図8と同様の結果が確認できる。同図中には、 $T_{wi} = 90^\circ\text{C}$ の場合の同温度区間での τ_c の値を破線・鎖線で示したが、 $T_{wi} = 20^\circ\text{C}$ の場合との間に若干の差が存在する。これは、 $T_{wi} = 90^\circ\text{C}$ 、 20°C の場合の冷却能曲線の差に由来するが、詳細については次報で検討する。

4. ま と め

金属物体の過渡冷却に及ぼす表面熱抵抗層の影響を実験的に検討し、冷却初期において被冷却面が蒸気膜に覆われている場合にも表面熱抵抗層の付加により急冷促進が実現できること、MCP 点温度・CCP 点温度・CCP 点近くの温度領域および MCP は δ_f の増大とともに顕著に増大するが、CCP は δ_f に対し、いったん増大するもののその後漸減することを明らかにした。

(1981年2月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾, 生産研究, 32-5 (1980.5), pp. 247~250.
- 2) 西尾, 生産研究, 32-6 (1980.6), pp. 290~293.