

金属物体の過渡冷却に対する表面熱抵抗層の影響 (第1報)

Effects of Surface Thermal-Resistance Layer on Transient Cooling of Metal (1st 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、焼き入れや軽水炉の緊急炉心冷却系などに用いられている。こうした過渡冷却現象はそのほか、低温機器の起動時に系が定常温度に下がるまでの過程においてもみられる。

熱の不良導性物質は一般に保温効果を有するが、液体の沸騰を利用した過渡冷却過程に対し、被冷却物体表面に熱の不良導性物質を表面熱抵抗層として付加すると逆に裸面の場合より高い冷却速度が得られ急冷が促進されることが、Cowleyら⁽¹⁾により報告されている。その後、この過渡冷却過程に対する表面熱抵抗層の影響についていくつかの研究⁽²⁾⁻⁽⁵⁾が報告されているが、「表面付加層の役割の評価」や「最適な付加層厚さの決定法」などに関して未解決の問題が多い。これは、従来、表面付加層として熱的性質や液体との親和性などの明確でない物質が選ばれていたため付加層が熱抵抗層としてのみ作用していたか否かの点で不明確であったと同時に、付加層を有する系の伝熱特性の検討が冷却速度曲線(被冷却金属温度 T_w と冷却速度 dT_w/dt との関係を示す曲線)の段階にとどまっておき、より普遍的⁽⁶⁾な沸騰曲線(被冷却系表面温度 T_w^* と表面熱流束 q_w との関係を示す曲線)にまで至っていないことに起因していると考えられる。

これらの点を鑑み、本報告では、熱的性質等が明確なテフロン膜により付加層を金属表面に形成し、冷却曲線および冷却速度曲線に対する付加層の役割を定量的に検討し得るデータを得る。さらに、この付加層の影響が(ぬれ性等の表面条件の変化によるものでなく)表面熱抵抗層の効果であり、表面熱抵抗層の付加により沸騰曲線が高温側にシフトすることを指摘し、次報ではこの沸騰曲線の変化に対する定量的検討を行う。

2. 実験装置および実験方法

本実験では、銅平板を液体窒素プール中に鉛直に漬け

*東京大学生産技術研究所 第2部

る鉛直平板浸漬冷却を対象とする。

図1に被冷却面を、図2に実験系の概略を示した。被冷却物体は厚さ2mmの銅板(50mm²)であり、銅板裏面には50 μ CA熱電対が(図1中の)A・B・Cの位置にそれぞれハンダ付けされている。この銅板は厚さ30mmのベークライト板に埋めこまれシリコン系接着剤で接着されており、銅板裏面は断熱条件となっている。

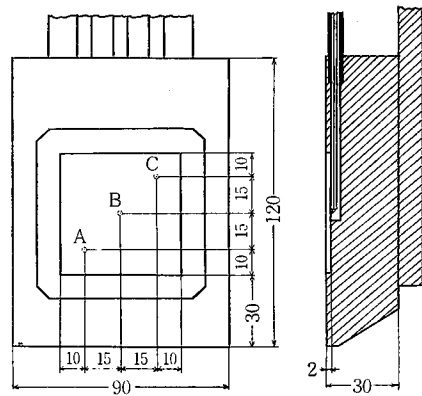


図1 被冷却面

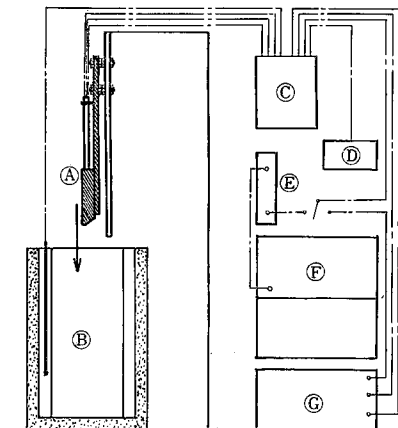


図2 実験装置概要 (A: 被冷却面, B: 液体窒素, C: 冷接点, D: デジボル, E: 直流アンプ, F: デジタルメモリ, G: ペンレコーダ)

研究速報

表面付加層は、裏面を化学処理により接着性をもたせたテフロン薄膜をシアノアクリレート系接着剤で銅表面に接着して形成した。テフロン膜厚 δ_f は、0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 1.0 mm を用意し、また接着剤厚さは約 2/100 mm であった。

図2に示したように、この被冷却面はガードレールに取り付けられ鉛直方向に移動できる。液体窒素はステンレス製の2重円筒容器に溜められており、容器外周はアスベストウールにより保温されている。

実験は、被冷却面をアセトン洗浄したのち液体窒素プール中へ浸漬し、銅板(裏面)温度 T_w^b が液体窒素の沸点 T_{sat} 近くになるまでの温度履歴をペンレコーダあるいはデジタルメモリに記録することにより行った。

裸銅板の場合、表面熱流束 q_w を次式により求めた。

$$q_w = (\rho_w C_w) (dT_w^b / d\tau) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ_w : 銅の密度、 C_w : 銅の化熱、 δ_w : 銅板厚さ、 T_w^b : 銅板裏面温度、 τ : 時間である。

この計算法の精度は通常 Biot 数 B_i で評価される⁽⁷⁾が、本実験系の場合、液体窒素プール沸騰で実現される最も高い熱伝達率⁽⁸⁾に対しても $B_i = (h\delta_w / \lambda_w) \div 0.05$ であり、銅板内の温度勾配は小さく、この方法で十分な精度が期待できる。

被冷却面作成時に生ずる個体差の影響を小さくするため、実験回数 4 ~ 5 回毎に被冷却面を作りかえ、またテフロン膜は実験毎にはりかえた。

3. 冷却曲線・冷却速度曲線

図3に、銅板の温度履歴(裏面中央温度 T_w^b) の代表例をテフロン膜厚 δ_f をパラメータとして示した(冷却曲線)。実際の冷却は銅板初期温度が約 10°C の状態から行ったが時間軸を統一するため $T_w^b = 0^\circ\text{C}$ の状態を時間軸の原点にした。また、図4に次式で定義した銅板の冷却速度 v_w を T_w^b に対して示した(冷却速度曲線)。

$$v_w = (\rho_w C_w) (dT_w^b / d\tau) \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 $\delta_f = 0$ mm の場合、 $v_w = q_w$ である。

$\delta_f = 0$ mm の場合を例に冷却曲線の形を説明すると、水による鋼材焼き入れと同様に、まず冷却初期に冷却速度の低い状態が存在し、次に冷却速度が急増し急冷が起り、続いて冷却速度が減少する状態が出現する。

$\delta_f = 0.1$ mm の場合の冷却特性は $\delta_f = 0$ mm の場合のそれに比べ次の特徴を有する。

- [i] 冷却初期の段階では、前者($\delta_f = 0.1$ mm) の冷却速度は後者($\delta_f = 0$ mm) のそれより低いが、前者の方が、急冷が早く起り冷却速度 v_w が極大となる温度 T_w^b が高温である。
- [ii] 冷却速度の極大値 v_{wmax} には差がない。

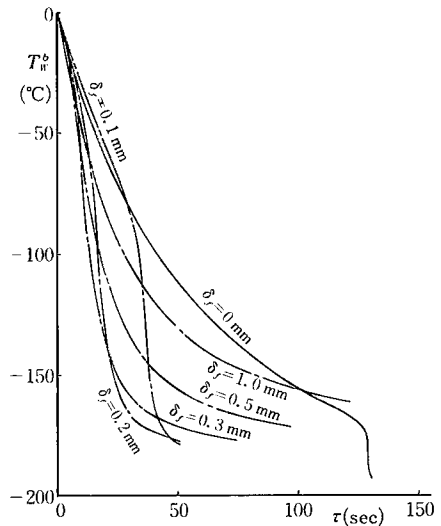


図3 冷却曲線の変化

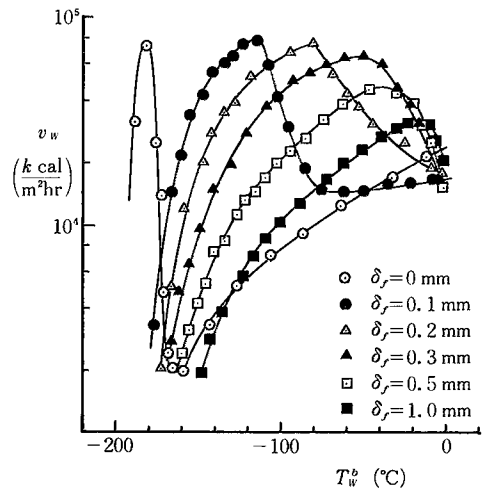


図4 冷却速度曲線の変化

(iii) 冷却速度が極大値に近い値をとる温度範囲は前者の方が広い(たとえば $v_w > 0.8 v_{wmax}$ である領域の温度幅は前者では 27 degC, 後者では約 8 degC である)。

こうした特徴は、 $\delta_f = 0.2$ mm あるいは 0.3 mm となるとさらに顕著となり、かなり早く急冷が発生するようになる。

しかし、テフロン膜厚をさらに増大すると、

[a] 冷却速度が極大となる温度 T_w^b はより高温となるが、

[b] 冷却速度の極大値は低下するようになり、
 [c] 冷却速度が極大値に近い値をとる温度範囲が狭くなり、
 冷却時間が再び増大するようになる。

図5は、銅板温度 T_w^0 が温度区間 $[0^\circ\text{C}, -50^\circ\text{C}]$, $[0, -100]$, $[0, -150]$, $[0, -175]$ を通過するのに要する時間 T_c を各テフロン膜厚さに対して示したものである。各膜厚において実測値にある程度分散がみられるが、主な原因は接着剤厚さの不均一にあると考えられる。なお、図中の実線は各所要時間の平均線である。図5から判るように、銅板表面に付加することより銅板自体の冷却時間が短縮されるようなテフロン膜厚が確実に存在する。冷却所要時間 τ_c は δ_f のある値 δ_{fo} で最小となり δ_f

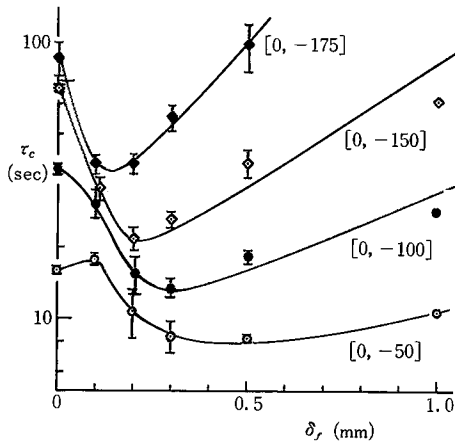


図5 冷却所要時間の変化

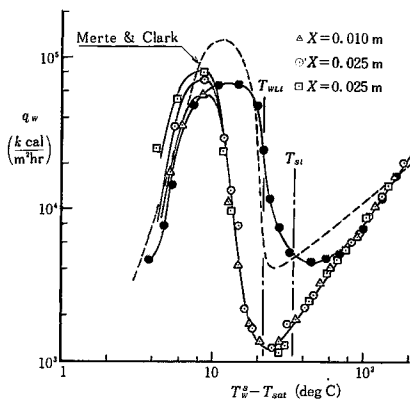


図6 沸騰曲線 (裸銅面)

$> \delta_{fo}$ では δ_f の増加とともに増加し、やがて表面熱抵抗層の保温効果が顕著となる。 δ_{fo} の値は冷却温度範囲により異なり、冷却の目的に応じて図4, 5により最適な膜厚を選ぶ必要がある。

4. 検 討

過渡冷却の効果を検討する上では冷却曲線や冷却速度曲線が重要であるが、過渡冷却特性をより普遍的に考察するためには沸騰曲線の形に直して検討する必要がある⁽⁶⁾

まず比較の基準となる裸銅面での沸騰曲線を(1)式により計算し、図6に示した。図中に open symbol で示した測定値は本実験で最も急冷が遅れた場合の沸騰曲線である。Xの値は銅板下端から測温点までの距離である。また、Merte and Clark⁽⁸⁾ の測定値(直径25.4 mmの銅球)を併記した。過渡冷却の際問題となるライデンフロスト温度 T_{wLi} と液体窒素の過熱限界温度 T_{st} の計算値を図中に示したが、この場合の極小熱流速(MHF)点温度は T_{wLi} に近い値を示す。ただし、 T_{st} は(液体窒素の測定値がないので)炭化水素系に対する実験整理式⁽⁹⁾

$$T'_{st} = 0.89 + 0.11 (P/P_{cr}) \dots\dots\dots(3)$$

で計算し、 T_{wLi} は実験整理式⁽⁹⁾

$$T'_{wLi} = T'_{sat} + (0.00877 T'_{cx} / \sigma_n)^{0.6} (1 - T'_{sat} / T'_{cr})^{1.2} \dots\dots\dots(4)$$

により求めた。ここで、 T' : 絶対温度、 P_{cr} : 臨界圧力、 T_{cr} : 臨界温度、 σ_n : 標準沸点での表面張力(kgf/m)である。

しかし、裸銅面の場合でも銅板周辺部の汚れ等の表面条件の相違により沸騰曲線は若干変化し、最も早く急冷が起こった場合、沸騰曲線は図6の solid symbol で示した曲線にまで変化している。図7の沸騰曲線④はこの沸騰曲線を模式化したもので、沸騰曲線④を境界条件として裸銅面($\delta_w = 2 \text{ mm}$, $\delta_f = 0 \text{ mm}$)の冷却過程を(銅面内の熱伝導を定物性・一次元として)数値計算すると図8の曲線①となり、実測の冷却曲線④をよく再現している。

同様に、この沸騰曲線④を境界条件としてテフロン膜付加系($\delta_w = 2 \text{ mm}$, $\delta_f = 0.1 \text{ mm}$)について銅板裏面温度履歴を数値計算すると図8の曲線②となり、この場合の冷却時間は各温度で裸銅板の場合の計算値(曲線①)より長くなっており、テフロン膜は通常の意味の保温層として作用している。しかし、この冷却曲線②は同条件の実測冷却曲線③と大きく異っており、裸面で最も早く急冷が起こる沸騰曲線④を仮定してもテフロン膜付加による急冷促進効果は説明できていない。このテフロン膜付加による冷却曲線の変化を数値計算により再現するためには、沸騰曲線④をテフロン膜($\delta_f = 0.1 \text{ mm}$)付加

研究速報

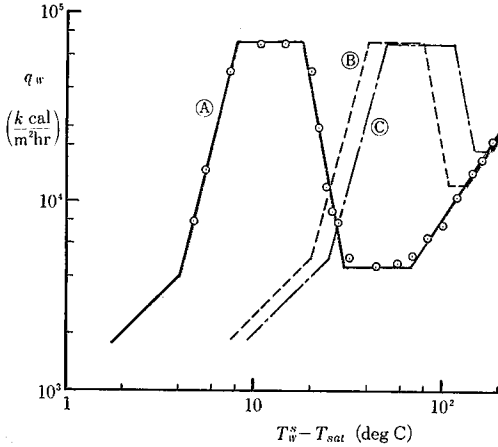


図7 沸騰曲線

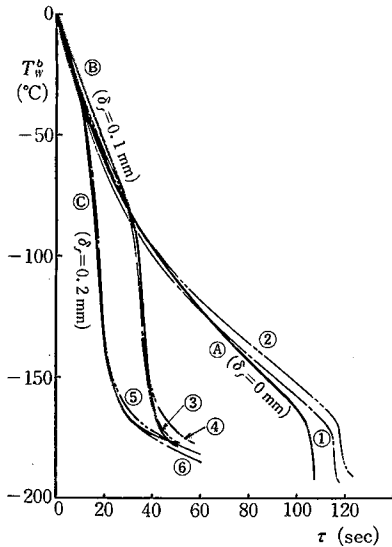


図8 冷却曲線

系に対して図7の曲線③程度までシフトさせる必要がある。図8の冷却曲線③は、沸騰曲線③を境界条件としたこのテフロン膜付加系の冷却曲線の数値解であるが、実測冷却曲線をよく再現している。

さらに、この沸騰曲線③を境界条件としてテフロン膜付加系 ($\delta_w = 2 \text{ mm}$, $\delta_f = 0.2 \text{ mm}$) について銅板表面温度履歴を数値計算すると図8の曲線④となり、これも実測冷却曲線③との対応はよくない。このテフロン膜厚の増大による実測冷却曲線③・④の変化を説明するためには、テフロン膜厚の0.1 mmから0.2 mmへの変化に対し、図7の沸騰曲線③を曲線③程度までシフトさせる必要がある。このテフロン付加系 ($\delta_f = 0.2 \text{ mm}$) について

沸騰曲線③を境界条件として冷却曲線を計算すると図8の曲線⑤となり実測冷却曲線③との対応は良い。但し同様の境界条件③でテフロン付加系 ($\delta_f = 0.1 \text{ mm}$) について計算すると図8の曲線⑥となり、実測冷却曲線③との一致が悪いことを付言しておく。このように、厚さの異なるテフロン膜 ($\delta_f = 0.1, 0.2 \text{ mm}$) を付加した銅板の実測冷却曲線は、異なる沸騰曲線の形を想定することにより説明される。この結果と双方のテフロン付加系においてぬれ性等の表面条件が同一であることを考え合わせると、本過渡冷却現象に対するテフロン膜の影響は、その表面熱抵抗層としての効果が大きく、表面熱抵抗層の付加により沸騰曲線自体が高温測へシフトすることによると考えられる。

4. まとめ

- (1) 液体の沸騰を利用した金属物体の過渡冷却に対し、適当な厚さの表面熱抵抗層を付加することにより、被冷却金属の急冷を促進することができる。
- (2) (2)式で定義される冷却速度 v_w が極大となる被冷却金属温度が δ_f の増加とともに高温測へシフトするため、対象とする冷却温度範囲により急冷に最も効果的な δ_f の値を選択する必要がある。
- (3) 液体窒素 - (テフロン+銅) 系の場合、極大冷却速度はテフロン膜厚が0.3 mm程度となっても裸銅板のそれと大差しない。
- (4) 表面熱抵抗層の付加により沸騰曲線は高温側にシフトする。

(1980年1月11日受理)

参考文献

- 1) C. W. Cowley et al., I&EC Process Design and Development, 1-2 (1962), 81.
- 2) J. P. Maddox and T. H. K. Frederking, Adv. Crgogen. Engng, 11 (1966), 536.
- 3) L. Manson, J. Heat Transfer, 89 (1967), 111.
- 4) L. Bewilogua and R. Knöner, J. Am. Chem. Soc., 90-12 (1968), 3086.
- 5) A. P. Bulter et al., Int. J. Heat Mass Transber, 13 (1970), 105
- 6) 橋・塩冶, 日本機械学会論文集, 38-309 (1972-5), 1056.
- 7) G. Stolz, J. Heat Transfer, 82 (1960), 20.
- 8) H. Merte, Jr. and J. A. Clank, J. Heat Transber, 86 (1964), 351.
- 9) 西尾, 東京大学生産技術研究所報告, 28-6 (1980)