

表面付加層の熱伝導性を利用した極小熱流束点温度の制御

Control of Minimum-Heat-Flux Point Temperature by Thermal Conductance of
Additional Layers Coated on Boiling Surface

西 尾 茂 文*・芹 沢 良 洋*
Shigefumi NISHIO and Yoshihiro SERIZAWA

1. は じ め に

冷却材の沸騰により物体を急冷する「沸騰冷却過程」はさまざまなシステムにおいてみられるが、特に最近、沸騰冷却過程に対する要求が「精密化」あるいは「超急冷化」の方向に向かっており、沸騰冷却過程を高度に促進・制御する技術が要求されている。

さて、こうした沸騰冷却過程の中には、超電導体クエンチ事故や低温機器起動時などにみられるように、冷却材の種類・温度・速度などが所与的条件として定まっているために、沸騰冷却過程の促進・制御を冷却材条件以外の条件により実現する必要がある系が存在する。

このような事情を背景に、著者の一人は、以前に、高熱伝導性材料の冷却面に低熱伝導性材料の表面付加層を適切な厚さで設けることにより、極小熱流束点温度の伝熱面熱伝導性への依存性を利用して逆に冷却時間を顕著に短縮できることを報告した¹⁾²⁾。本現象の解明およびモデル^{3)~6)}の検証には、少なくとも低熱伝導性材料の伝熱面における極小熱流束点温度の信頼性の高い測定値が不可欠である。しかし、特に低熱伝導性伝熱面では蒸気膜の伝播的崩壊⁷⁾の影響が顕著である²⁾ため、極小熱流束点温度（および膜沸騰熱伝達）に関する信頼性の高い測定値が十分にある状況とはいえない。

そこで、本報では、伝熱面にさまざまな熱伝導性の表面付加層を設け、膜沸騰熱伝達および極小熱流束点温度と伝熱面熱伝導性の関係に関する信頼性の高い測定値を提供し、伝熱面母材と熱伝導性の異なる表面層の付加による沸騰冷却速度促進・制御法の開発・解明の一助としたい。

2. 実験装置および実験方法

図1に伝熱面系の概略図を示した。伝熱面本体は、直径30mm、長さ40mmの銅円柱端面で、円柱内部にはCA熱電対が埋め込まれている。この伝熱面本体外側には、

外径60mm、長さ90mmの銅円筒が図のように配置されており、伝熱面本体裏面および伝熱面本体・銅円筒間は発泡スチロールにより断熱されている。

実験は、この伝熱面系を大気圧の液体窒素プール中で浸没冷却する非正常実験である。低熱伝導性材料の伝熱面での膜沸騰熱伝達および極小熱流束点条件に対し影響が顕著と思われる伝熱面周囲部からの蒸気膜先行崩壊については、厚さ3mmの銅リングを銅円筒表面に設置することおよび銅円筒の冷却期間中の温度を伝熱面本体より約10Kだけ高く制御することにより阻止した。誤差計算によれば、銅円筒から伝熱面本体への熱侵入による表面熱流束の測定誤差は、10%以下であった。

実験で使用した（低熱伝導性表面層を付加した）伝熱面は、以下の二種類の伝熱面である。ただし、ここでいう「熱伝導性」とは、膜沸騰熱伝達率の擾乱（蒸気膜厚さの変動や短寿命の固液接触の発生）に起因した伝熱面表面温度変動を抑制する（伝熱面内部から表面への）熱供給能力のことである。

第一の伝熱面は、銅製伝熱面本体表面に、石英ガラス（厚さ $\delta_1=0.3\sim 2\text{mm}$ ）、パイレックスガラス（ $\delta_1=1\sim 3$

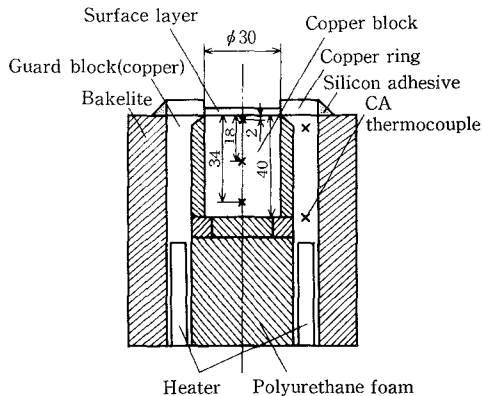


図1 実験装置の概略図

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

mm)あるいはポリテトラフルオロエチレン(以後PTFEと略記, $\delta_1=0.01\sim 0.5\text{mm}$)層をシアノアクリレート系接着剤あるいは焼付により付加した「一層表面層伝熱面」である。この伝熱面は、表面層材料の熱伝導率が低いために上述の熱供給能力が制限されるという意味で、熱伝導性が低い。

第二の伝熱面は、厚さ $\delta_1=0.3\text{mm}$ のPTFE表面層の上にさらに銅あるいはSUS-304層($\delta_2=0.002\sim 0.3\text{mm}$)を付加した「二層表面層伝熱面」である。このPTFE層厚さは後述する図4に示されているように、液体窒素の極小熱流束点条件に対してはPTFE材料伝熱面とみなせる厚さである。したがって、この二層表面層伝熱面は、その熱供給能力がほぼ二層目表面層(最表面層)厚さにより支配されており、いわば伝熱面厚さが薄いことによりこの熱供給能力が制限されるという意味で、熱伝導性が低い。

上述のいずれの伝熱面についても、伝熱面表面熱流束 q_w は銅製伝熱面本体を集中熱容量系近似して求め、伝熱面表面温度 T_w (付加層のある場合は付加層表面温度)は、この q_w より表面層内温度分布を直線近似して求めた。誤差計算によれば、集中熱容量系近似に起因する q_w の測定誤差は2%以内、直線近似に起因する T_w の測定誤差は数K以内である。

3. 実験結果および考察

3.1 膜沸騰熱伝達

一般には、膜沸騰熱伝達に対する伝熱面熱伝導性の影響はないと考えられているが、本実験で対象とした程度

の低熱伝導性伝熱面では、膜沸騰熱伝達が伝熱面熱伝導性の影響を受けることを示唆する実験報告もある⁸⁾。そこでまず、膜沸騰熱伝達に対する伝熱面熱伝導性の影響を上述の二種の伝熱面について測定した。測定結果の代表として、石英ガラス一層表面層伝熱面、およびSUS-304層の二層表面層伝熱面での膜沸騰曲線をそれぞれ図2、図3に示した。図中の実線は銅製裸伝熱面における沸騰曲線の測定値である。図よりわかるように、石英ガラス程度の低熱伝導性材料の伝熱面あるいは0.03mm程

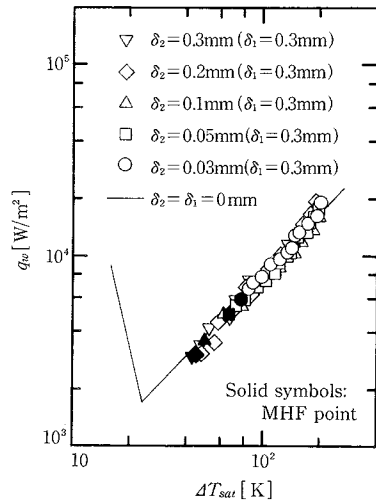


図3 二層表面層伝熱面における膜沸騰曲線 (PTFE層+SUS-304層)

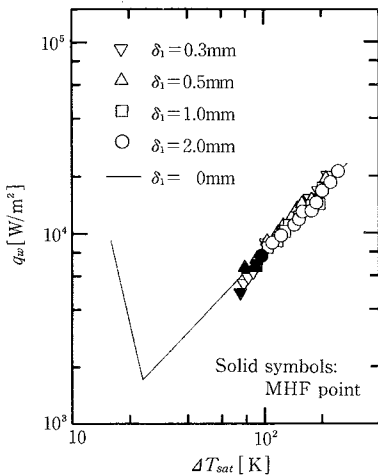


図2 一層表面層伝熱面における膜沸騰曲線 (石英ガラス表面層)

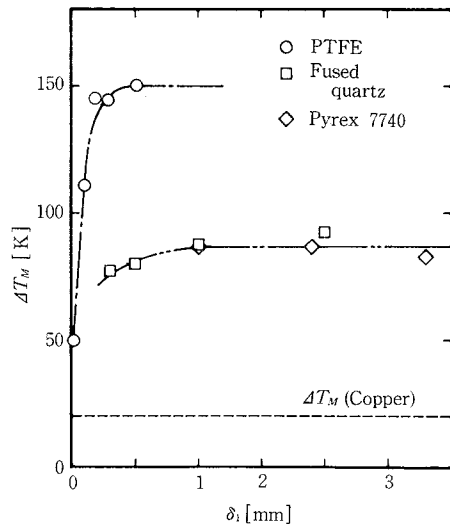


図4 極小熱流束点過熱度と一層表面層厚さ

度の薄いSUS-304製伝熱面においても、膜沸騰熱伝達は銅製裸伝熱面でのそれと同一であり、膜沸騰熱伝達は伝熱面熱伝導性に依存しない。

3.2 極小熱流束点温度

図4に、一層表面層伝熱面における極小熱流束点過熱度 ΔT_M の測定値を表面層厚さ δ_1 に対して示した。図中の鎖線は、測定値の平均的傾向を示す(ただし、PTFE表面層の ΔT_M が一定値となる δ_1 の値は文献2)を参考にし、石英ガラスおよびパイレックスガラスでは材料の熱伝導性は同一とした)。また図5に、二層表面層伝熱面における ΔT_M の測定値を二層目表面層厚さ δ_2 に対して示した。図5中の鎖線は、銅およびSUS-304製の裸伝熱面での ΔT_M の測定値、破線は図4のPTFE一層伝熱面における ΔT_M の飽和値、また実線は二層目表面層が銅である場合の測定値の最小自乗曲線である。

まず、図4に示されているように、表面付加層が伝熱面母材より熱伝導率の低い材料である場合の ΔT_M は、付加層厚さ δ_1 の増大とともに顕著に増大し、 $\delta_1 = 0.3 \sim 1\text{mm}$ 程度で付加層材料固有の値となる²⁾。一方、図5に示されているように、表面付加層が伝熱面母材(図4より図5の場合は母材はPTFEと考えてよい)より熱伝導率の高い材料である場合の ΔT_M は、 δ_2 の増大とともに急速に減少し、ある厚さ δ_{2m} で表面付加層材料固有の値に復帰する。ここで注目すべきことは、この δ_{2m} の値が、表面付加層材料が銅の場合で約0.2mm、SUS-304の場合でも約0.3mmと極めて小さいことである。これは、厚さ δ_{2m} 程度の伝熱面が、蒸気膜崩壊を引き起こす固液

接触時の伝熱面温度変動に対し、二層目表面層材料を母材とする無限厚さの伝熱面と同一の熱供給能力を(表面層内二次元熱伝導により)確保していることを意味する。

以上のような極小熱流束点温度の伝熱面熱伝導性への依存性を利用して、冷却材条件によらずに沸騰冷却速度を促進・制御することが可能である。たとえば、図6に、図1の伝熱面の液体窒素中での冷却曲線の測定例を、銅製裸伝熱面、PTFE一層伝熱面および(銅+PTFE)二層伝熱面について示した。銅製伝熱面に0.3mmのPTFE表面付加層を設けると冷却時間は格段に短縮され、一方、この一層表面層伝熱面に0.2mmの銅層を付加すると冷却時間は銅製裸伝熱面でのそれに復帰する⁹⁾。このように、高熱伝導性材料の伝熱面に低熱伝導性材料の表面付加層を設けることにより冷却時間を短縮できるのみならず、低熱伝導性材料の伝熱面に高熱伝導性材料の表面付加層を設けることにより冷却時間を増大できる。

3.3 考察

図7は、本研究で得られた各種伝熱面における ΔT_M の値を、熱慣性比 $\beta = (\rho \cdot c \cdot k)_w / (\rho \cdot c \cdot k)_b$ 、 ρ は密度、 c は比熱、 k は熱伝導率] に対して、文献値^{10),11)} (○印)とともに示したものである。 ΔT_M の値としては、金属材料の裸伝熱面での値(○, ●印)、図4における飽和値として得られる非金属低熱伝導性材料での値(□印)、図4および図5などより $\delta \rightarrow 0$ の極限值として得られる値(●, ■印)を併記した。図中の実線は、著者の一人が報告した飽和沸騰における極小熱流束点温度の整理式¹²⁾の値、鎖線は、二体接触時の熱伝導理論において界面温度が液体窒素の過熱限界温度になる場合の初期伝熱面温度の値である。今のところ詳細は不明であるが、図に示されているように、 $\delta \rightarrow 0$ での ΔT_M と伝熱面母材の ΔT_M

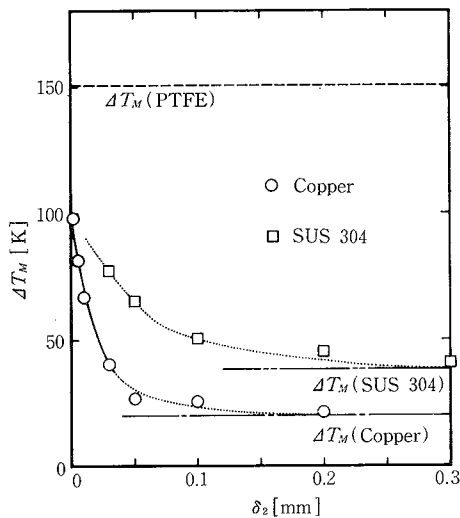


図5 極小熱流束点過熱度と二層目表面層厚さ (一層目は0.3mmのPTFE層)

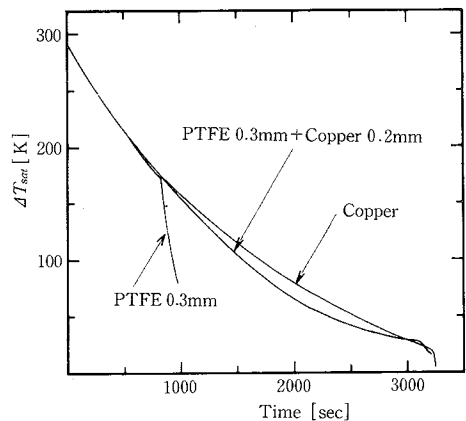


図6 表面付加層による冷却速度の促進・制御例

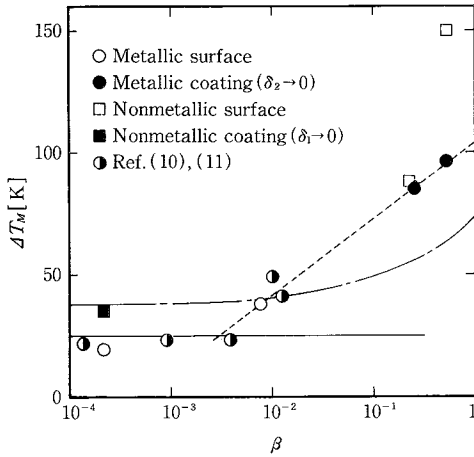


図 7 極小熱流束点過熱度と伝熱面材料熱伝導性

とはガラスの場合を除き異なっている。このことは、付加層の影響が伝熱面熱伝導性のみでは記述できない可能性を示唆しているものと考えられる。そこで、伝熱面表面条件をそろえる意味から伝熱面表面が金属層である場合の測定値($\delta_2 \rightarrow 0$ の値を含む)に注目すると、 β の小さい領域では実線に近く、 β の大きい領域では破線で示される $\Delta T_w \propto \log \beta$ なる関係が指摘できる。

4. ま と め

沸騰冷却速度の促進・制御を目的として、膜沸騰熱伝

達および極小熱流束点温度に対する伝熱面表面層の熱伝導性の影響を検討し、膜沸騰熱伝達には伝熱面熱伝導性の影響がみられないこと、極小熱流束点温度に対しては伝熱面母材と熱伝導性の異なる材料の付加層を設けると 0.1~1.0mm 程度の厚さの付加層で極小熱流束点温度は表面層材料固有の値となり母材の影響が消失することを明らかにした。
(1987年 6月23日受理)

参 考 文 献

- 1) Nishio, S.: Proc. 1983 ASME-JSME Thermal Eng. Conf., 1 (1983), 103
- 2) 西尾：日本機械学会論文集, 51-462, B (昭60), 582
- 3) Baumeister, K.J. and Simon, F.F.: Trans. ASME, Ser. C, 95-2 (1973), 166
- 4) Henry, R.E.: AIChE Symp. Ser., 70-138 (1974), 81
- 5) Nishio, S. and Hirata, M.: Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf., 1 (1978), 245
- 6) Kikuchi, Y., ほか 2 名: Int. J. Heat Mass Transfer, 28-6 (1985), 1105
- 7) 西尾・坂口：日本機械学会論文集, 53-490, B (昭和 62), 1781
- 8) Zhukov, V.V., ほか 3 名: Heat Transfer-Sov. Res., 7-3 (1975), 16
- 9) Moreaux, F., ほか 2 名: Int. J. Multiphase Flow, 2-1 (1975), 183
- 10) Lin, D.Y.T. and Westwater, J.W.: Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., 481982), 155
- 11) Berlin, I. I. ほか 5 名: Inzh. -fiz. Zhurn., 24-2 (1973), 205
- 12) 西尾：日本機械学会論文集, 51-470, B (昭60), 3165