

サブクール沸騰における膜沸騰熱伝達と極小熱流束点条件に関する研究

——第 1 報 プール沸騰における極小熱流束点条件——

Study of Film Boiling Heat Transfer and Minimum-Heat-Flux(MHF)-Point Condition during Subcooled Boiling
——1st Report ; MHF-Point Condition during Pool Boiling——

西 尾 茂 文*・上 村 光 宏*・坂 口 和 貴*
Shigefumi NISHIO, Mitsuhiro UEMURA and Kazutaka SAKAGUCHI

1. 緒 言

著者の一人は、以前の報告^{1)~3)}において、
(a)、浸入型固液接触モードの影響が小さく
(b)、平滑・清浄かつ熱伝導性の高い伝熱面における
(c)、標準重力場・飽和プール条件下の
極小熱流束点条件(T_M, q_M)について、

(1)、温度条件 T_M に対する伝熱面形状・寸法、(液体流速)、沸騰過程の過渡性の影響が小さいこと、

(2)、水、有機液体、フロン系冷媒および液化ガスについて、この温度条件 T_M を広い圧力範囲にわたって統一的に整理することができること、

(3)、この温度条件 T_M および膜沸騰熱伝達に関する整理式より極小熱流束 q_M に対する伝熱面形状・寸法あるいは系圧力の影響を評価することができることを明らかにし、これに基づき、上述の(a)~(c)の条件下における極小熱流束点、極小熱流束点温度により支配されて発生すると考える「温度支配仮説」の有効性を主張した。本報告は、この温度支配仮説をサブクール条件下における極小熱流束点条件について検討しようとするものである。

ところで、極小熱流束点条件に関する温度支配仮説をサブクール沸騰系に拡張する場合に、最も問題となるのは次の実験事実である。すなわち、サブクール条件下における大気圧水の極小熱流束点温度 T_M の測定値^{4)~9)}の多くは、たとえば Dhir and Purohit の整理式⁷⁾

$$T_M = 201 + 8 \Delta T_{sub}, \text{ (}^\circ\text{C)} \dots\dots\dots (1)$$

に示されるように、 $\Delta T_{sub} > 13 \text{ K}$ 程度で大気圧水の過熱限界温度 T_{is} を超え、 $\Delta T_{sub} > 22 \text{ K}$ 程度で熱力学的臨界温度 T_{cr} を超える高温となることを示している。この実験事実、液体の過熱限界温度 T_{is} あるいは固液接触時の固液接触面温度が過熱限界温度となる場合の初期伝熱面温度 T_{iso} 、すなわち、

$$T_{iso} = (1 + \beta^{1/2}) \cdot (T_{is} - T_l) + T_l \dots\dots\dots (2)$$

を極小熱流束点温度の上限値と考える通常の温度支配仮説と矛盾する。ここで、 $\beta = (\rho \cdot c \cdot k)_l / (\rho \cdot c \cdot k)_w$ 、 ρ 、

c 、 k はそれぞれ密度、比熱、熱伝導率、添字 l 、 w は液体、伝熱面を意味し、また T_{is} は、Lienhard¹⁰⁾ の式によれば、飽和温度を T_{sat} 、 $\theta_{sat} = T_{sat} / T_{cr}$ とすると、

$$T_{is} = (0.905 - \theta_{sat} + 0.095 \theta_{sat}^8) \cdot T_{cr} + T_{sat} \dots (3)$$

以上述べた事情を背景として、本報告では、極小熱流束点温度と蒸気膜崩壊様式との関連を明らかにし、サブクール条件下における極小熱流束点条件に関する温度支配仮説の妥当性を検討する。

2. 実験装置および実験方法

本報告で扱う液体は大気圧蒸留水である。また、伝熱面形状は水平円柱および球であり、伝熱面材料は酸化の影響を排除するため双方とも白金とした。

2.1 水平円柱伝熱面

図 1 は、水平円柱伝熱面の概略図である。本報では実験はすべて大気圧下で行ったが、次報で報告する膜沸騰実験では減圧下も実験対象としているため、この水平円柱伝熱面は压力容器内に収納されている。円柱は、純度 99.99% 以上の白金製円柱(直径 $D = 2 \text{ mm}$)であり、直流安定化電源により直接通電加熱される。この白金円柱は、通電電極との接合部における蒸気膜先行崩壊を阻止するため、中央部約 80 mm を残して U 字形に曲げられ、その両端部は雰囲気空气中で通電電極と接合されている。白

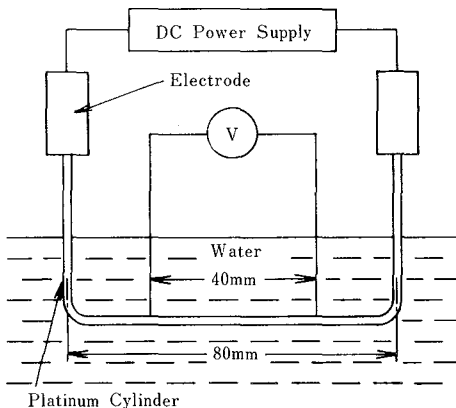


図 1 水平円柱伝熱面の概略図

*東京大学生産技術研究所 第 2 部

研 究 速 報

金円柱には、円柱水平部中央約 40 mm の測定部をはさんで直径 30 μm の白金細線が電圧測定用にスポット溶接されている。伝熱面温度 T_w は、通電量測定とこの白金細線間の電圧測定とにより白金電気抵抗の温度依存性を利用して算定した。シリコン油中での検定実験によれば、伝熱面温度測定の見誤差は 0.5% 以内であった。

水平円柱系における実験では、まず高過熱度膜沸騰状態を実現し、次に徐々に通電量を減少させ、極小熱流束点近傍の低過熱度膜沸騰状態を所定のサブクール水中において実現する。この状態からさらに通電量を急減させることにより生ずる過渡沸騰過程において、高速度ビデオ (200 コマ/秒) による蒸気膜崩壊様相の観察と、ペンレコーダによる通電量、測定部電圧の測定とを行った。熱流束 q_w は、水平円柱伝熱面を集中熱定数系近似し、

$$q_w = q_s - (\rho \cdot c \cdot V / A)_w \cdot (dT_w / dt) \dots\dots\dots (4)$$

より求めた。ただし、 q_s は単位伝熱面積あたりのジュール発熱量、 V_w 、 A_w は伝熱面体積および伝熱面積である。水平円柱系における実験では、実験装置の限定から実験サブクール度範囲は $\Delta T_{sub} = 0 \sim 40 \text{ K}$ であった。

2.2 球伝熱面

図 2 は、球伝熱面の概略図である。直径 $D = 10 \text{ mm}$ の白金球には、外径 2 mm、内径 1 mm の白金円管が支持棒として溶接されている。この白金円管を通して外径 1 mm (素線径 0.1 mm) の S 型シース熱電対が白金球中心まで挿入され、銀溶接されている。白金球は、ガスバーナにより約 1500 K にまで加熱され、所定のサブクール度に保たれた蒸留水中に深さ H まで浸没され冷却される。浸没冷却中の白金球の温度履歴をペンレコーダにより記録し、白金球を集中熱定数系近似し、式 (4) において $q_s = 0$ として沸騰曲線を求めた。集中熱定数系近似による誤差は、膜沸騰域におけるピオー数が極小熱流束点においても 0.06 以下であることから、膜沸騰領域では

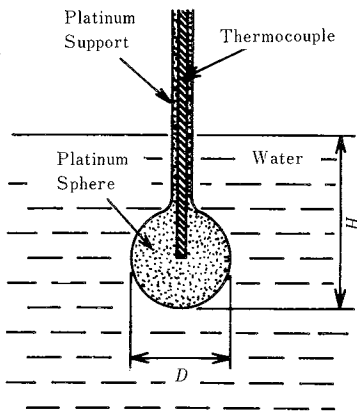


図 2 球伝熱面の概略図

数%以下であると考えられる。

球伝熱面における実験では、支持棒部分において蒸気膜の先行崩壊が発生し、この先行崩壊が球伝熱面に到達するとこれをトリガとして球伝熱面における蒸気膜崩壊が起こり極小熱流束点が発生する可能性がある。この影響を検討するために、浸没時の球水深 H を $0.75 D$ 、 $1.2 D$ 、 $1.8 D$ および $3 D$ と変化させて実験を行った。球伝熱面での実験サブクール度範囲は $\Delta T_{sub} = 0 \sim 75 \text{ K}$ であった。ただし、球中心深さにおける実験中の ΔT_{sub} の変化は、球表面より水平方向約 10 mm の位置で、5% 以内であった。

また、各伝熱面は、実験ごとにアセトン洗浄を施した。

3. 蒸気膜崩壊様式と伝播速度

3.1 蒸気膜崩壊様式

蒸気膜の崩壊様式は、極小熱流束点条件と密接な関係にあると考えられる。たとえば、Iloeje ら¹¹⁾は、内部流動沸騰系におけるリウエットを「Impulse-cooling collapse」、 「Axial-conduction-controlled collapse」および「Dispersed-flow rewet」の三つの崩壊様式に分類している。

本報告では、上述したように水平円柱系においてこの蒸気膜崩壊様式を高速度ビデオにより観察した。観察結果によれば、蒸気膜崩壊様式は、図 3 に示した二つの類型に大別される。すなわち、

(A)、齊時的崩壊 (Coherent collapse) : 伝熱面表面全体においてほぼ一斉に発生する蒸気膜崩壊 (図 3 (a))。

(B)、伝播的崩壊 (Propagative Collapse) : 伝熱面表面の一部における局所的先行崩壊が伝熱面表面に沿って

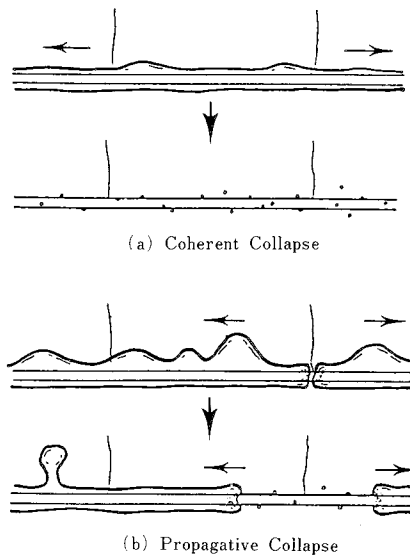


図 3 蒸気膜の崩壊様式

研究速報
 伝播することによる蒸気膜の全体的崩壊(図3(b)).

まず、本報告で観察された伝播の崩壊とは、蒸気膜の weak spot(たとえば電圧測定用白金線接合部)の存在によりトリガされる蒸気膜の局所的先行崩壊が、軽水炉燃料棒の緊急冷却における炉心再冠水時のクエンチ点の伝播と同様に、比較的低い速度で伝播し蒸気膜の全体的崩壊に至るものである。したがって、この蒸気膜の伝播的崩壊過程においては、沸騰伝熱面に沿って強い伝熱面温度勾配が存在し、この伝播過程は伝熱面内熱伝導律速であると考えられる。

一方、本報告で観察された斉時的崩壊とは、蒸気膜崩壊の伝播が観察されず、ビデオコマ間隔(5 msec)以内に円柱伝熱面表面全体において蒸気膜が崩壊したものである。いま、この5 msec以内に蒸気膜崩壊の伝播があるとすると、本実験における蒸気膜崩壊観察区間が50 mmであることから10 m/sec以上の速い伝播速度となる。一方、常温固体面に衝突する水滴の固液接触面積拡大速度は、落下高さ20 mm程度では数 m/sec程度である¹²⁾。この両者を考え合わせると、本実験で観察されたビデオコマ間隔以内に発生した蒸気膜の全体的崩壊は、伝熱面内熱伝導律速の伝播的崩壊とは考え難く、斉時的崩壊と考えて差し支えないと判断する。

3.2 蒸気膜崩壊様式と極小熱流束点温度

伝播的崩壊による蒸気膜崩壊が伝熱面内熱伝導律速過程であるとする、蒸気膜崩壊伝播速度 v_{wf} と極小熱流束点温度 T_M の測定値とは密接な関係にあるはずである。そこで、上述の高速度ビデオ観察により蒸気膜崩壊の伝播速度と極小熱流束点温度との関係を測定し、図4にその結果を示した。図より明らかなように、伝播速度が低い場合の極小熱流束点温度の測定値 T_M は高く、この T_M

は伝播速度の増大とともに急速に低下し、極小熱流束点温度と蒸気膜崩壊伝播速度とは密接な関係にあることがわかる。

ところで、伝播的崩壊様式における極小熱流束点発生時には、蒸気膜崩壊条件は局所的先行崩壊部において満たされているのみであり、極小熱流束点温度は蒸気膜崩壊部と残存部との平均値として測定される。ちなみに、Bergles and Thompson¹³⁾の測定によれば、大気圧飽和条件下の水においても局所的崩壊部と蒸気膜残存部との間には100 K程度の温度差が発生している。すなわち、伝播的崩壊において T_M の測定値が高いことは、蒸気膜残存部の温度が高いことを意味し、したがって蒸気膜崩壊は伝熱面内熱伝導によりこれに抗して伝熱面表面を伝播する必要があり、伝播速度が遅いことになる。

さて、さらに伝播速度が増大する(たとえば数 m/sec以上程度)と、伝播的崩壊と斉時的崩壊との区別が不明確になり、極小熱流束点温度 T_M がほぼ一定値となる。そこで、これを斉時的崩壊における T_M の値とし、測定値の分散と平均値とを図中に斜線部と一点鎖線とで示した。このように、極小熱流束点温度の測定値は蒸気膜崩壊伝播速度の増大とともに減少し、斉時的崩壊における値に近づく。斉時的崩壊様式における極小熱流束点では、蒸気膜伝播があるとしても伝播速度は3.1節で述べたように極めて速く、したがって蒸気膜崩壊条件は伝熱面表面全体で満足されていると考えてよい。そこで、本報告では、斉時的崩壊様式における極小熱流束点条件を「極小熱流束点条件の真値(T_{RM} , q_{RM})」と呼ぶ。

一方、図4中の実線は、以前報告²⁾した飽和沸騰における極小熱流束点温度の統一整理式の値である。また、図中の二点鎖線は、従来の測定値を代表する式(1)の値である。図よりわかるように、高サブクール条件下で液体の臨界温度をも越えて極小熱流束点温度が増大する従来の測定値は、図中の破線内程度の伝播速度における伝播的崩壊時の値であると考えられ、サブクール条件下では極小熱流束点温度の真値とはみなせない。

4. 極小熱流束点温度の真値

4.1 球伝熱面における沸騰曲線

図5に $\Delta T_{sub} = 30$ K の場合の球伝熱面における沸騰曲線を、球水深 H をパラメータとして示した(ただし、図中の遷移沸騰域から核沸騰域までの値は、この領域では集中熱点数近似による誤差が大きくなるので参考値にすぎない)。この図からわかるように、膜沸騰曲線は球水深の増大とともに上昇するが、 $H \geq 1.8 D$ でその依存性は消失している。一方、ビデオ観察によれば、 $H \leq 1.8 D$ ではほぼ蒸気膜の斉時的崩壊が実現されるが、 $H = 3 D$ では、支持棒における蒸気膜の先行崩壊が球伝熱面

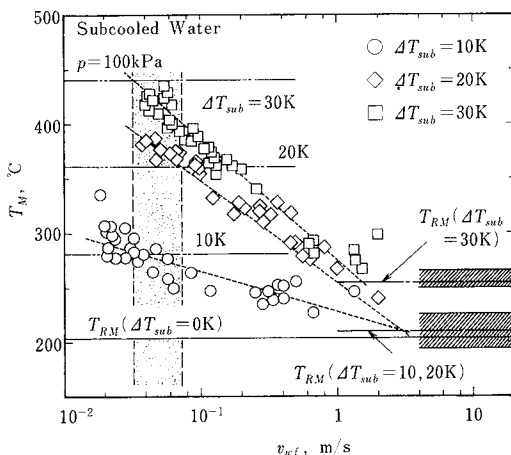


図4 極小熱流束点温度と蒸気膜崩壊伝播速度

研究速報

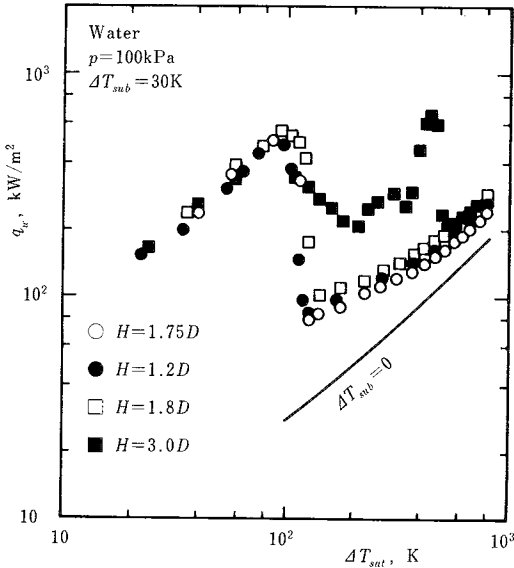


図5 球伝熱面における沸騰曲線測定結果の例

に到達する時点で一旦沸騰曲線が極小値をとり、その後しばらくして球伝熱面における蒸気膜の伝播的崩壊が発生し、再び沸騰曲線が極小値をとる。このように、 $H > 1.8D$ では伝播的崩壊による極小熱流束点が発生する。以上のことから、膜沸騰熱伝達に対する球水深の影響がなくかつ斉時的崩壊による極小熱流束点条件が発生する球水深条件として $H = 1.8D$ を選定した。

4.2 極小熱流束点温度の真値

以上述べたように極小熱流束点温度の真値は、特にサブクール条件下では斉時的蒸気膜崩壊時においてしか測定されない。3.2節で述べたように水平円柱伝熱面系では、極小熱流束点温度の真値 T_{RM} は図4の一点鎖線として与えられる。一方、球伝熱面系については、斉時的崩壊が観察される $H \leq 1.8D$ における極小熱流束点温度の測定値を T_{RM} とした。

双方の伝熱面における T_{RM} の測定値を、図6にサブクール度 ΔT_{sub} に対して示した(ただし、球伝熱面については、 $H = 1.2D$ および $1.8D$ における値の平均値を示した)。図よりわかるように、双方の伝熱面における T_{RM} の測定値の一致は良好である。図中の実線は以前報告²⁾した飽和条件下における極小熱流束点温度の統一整理式の値であるが、 $\Delta T_{sub} = 0$ K における本測定値もこれとよく一致している。また、図中には、大気圧水における極小熱流束点温度のサブクール度依存性に関するいくつかの実験式(破線)^{5)~8)}を示したが、極小熱流束点温度の真値のサブクール度依存性は式(1)に代表される従来の測定値よりかなり弱く、Witte and Henningson⁹⁾の式に

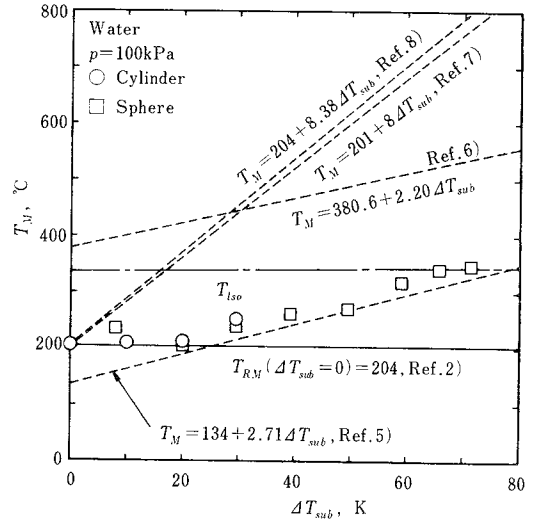


図6 極小熱流束点温度の真値とサブクール度

近い。さらに一点鎖線は、式(2)と式(3)により計算される(通常の)温度支配仮説における上限温度 T_{iso} の値であるが、従来の結果と異なり、本測定値はこれを顕著に越えるようなことはない。

5. 結 言

サブクール条件下における大気圧水の極小熱流束点条件に関して検討し、蒸気膜崩壊様式には斉時的崩壊と伝播的崩壊があること、崩壊様式と極小熱流束点条件とは密接な関係にあること、斉時的崩壊時の極小熱流束点温度は従来の測定値とは異なり過熱限界温度を顕著には越えず温度支配仮説と矛盾しないことを示した。

(1986年12月19日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾：生産研究, 37-1 (1985), 26
- 2) 西尾：生産研究, 37-2 (1985), 53
- 3) 西尾：生産研究, 37-3 (1985), 99
- 4) Bradfield, W.S.: Trans.ASME, Ser.C, 89-3 (1967), 269
- 5) Witte, L.C. and Henningson, P.J.: J.Sci.Instr., 2 (1969), 1101
- 6) Farahat, M.M.K.ほか2名: ATKE, 29-1 (1977), 17
- 7) Dhir, V.K. and Purohit, G.P.: Nucl.Engng Des., 47-1 (1978), 49
- 8) 西尾・上村：生産研究, 35-7 (1983), 332
- 9) 高木・庄司：日本機械学会論文集, 49-446 (1983), 2190
- 10) Lienhard, J.H.: Chem.Engng Sci., 31-9 (1976), 847
- 11) Iloeje, O.C.,ほか3名: Trans.ASME, Ser.C, 97-2 (1975), 166
- 12) 西尾：生研報告, 28-6 (1980)
- 13) Bergles, A.E. and Thompson, W.G.: Intern.J.Heat Mass Transfer, 13-1 (1970), 55