

Minimum Heat Flux (MHF) 点に関する研究 — 第1報 — (低沸点液体—球形伝熱面 [I])

Study on Minimum Heat Flux (MHF) Point — 1st Report —

(Cryogenic Liquids—Spherical Heat Transfer Surface [I])

西尾 茂文*
Shigefumi NISHIO

1. 緒 言

沸騰現象による熱伝達特性 $q_w(T_w)$ は一般に2つの極値をもつN字形の沸騰曲線で示され、この沸騰曲線の極大点をCHF (Critical Heat Flux) 点、極小点をMHF (Minimum Heat Flux) 点と呼ぶ。CHFについては軽水炉の現実化とともに活発な研究が展開されてきたが、近年、①液体の沸騰を利用した高温物体急冷時のQuench点、②蒸気爆発における高温液滴まわりの膜沸騰蒸気膜の崩壊点、③直接接触式蒸発器の安定作動限界点などと関連して、MHF点に対する関心も高まってきた¹⁾。しかし、従来、MHF点に関する系統的研究は少なく²⁾³⁾、後述するように、MHF点の挙動について系統的な実験的知見が得られているとは言い難い。そこでMHF点の研究を開始するにあたり、まず、従来の実験結果から導き出せる知見を整理することから出発したい。

MHF点に対し、その温度 T_M あるいは熱流束 q_M のいずれが本質的であるかに関しては議論の分かれるところであるが、本節では、MHF点温度 T_M が本質的役割を担っているとの立場から主に T_M について検討する。

図1は、現在までに報告されているMHF点温度 T_M の測定値を圧力に対し、換算座標で示したものである(液体の種類・伝熱面形状により記号を区別した)。この図より以下の事が判る: ① T_M は、液体の過熱限界温度 T_{lis} ⁴⁾ のみならず臨界温度 T_{cr} をも大幅に越えることがある(機構的問題)、②飽和液の場合、臨界点近くを除いて T_M は圧力とともに上昇する(圧力効果の問題)、③サブクール度の効果は圧力の上昇とともに小さくなり、このためサブクール液の場合、圧力の上昇とともに T_M が低下することがある(サブクール効果の問題)、④細線の実験では、線径が細くなるほどサブクール効果が大きくなる(伝熱面熱容量の問題)。現在のところ、⑤~⑧の問題についてより詳細な結果を導き出す程にはデータが豊富でない。

⑤~⑧のはかに、図1では判然としないが T_M に対する影響が考慮されるべき因子として以下のものがある:

*東京大学生産技術研究所 第2部

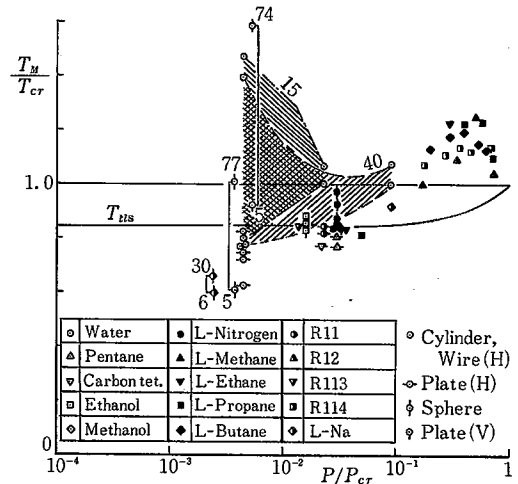


図1 MHF点温度

⑤伝熱面形状の影響、⑥固液接触発生モードの影響 [I] = 膜沸騰蒸気膜が(伝熱面と接する)非加熱面との間に形成する濡れ境界の存在の影響、⑦固液接触発生モードの影響 [II] = 気液界面における Taylor 不安定の有無の影響。実験時の伝熱面は断熱材や支持材などの非加熱面と接する 경우가多く、⑥は実験値の信頼性に係る問題ともなり、Kovalev⁵⁾ によりその影響が指摘されている。⑤・⑥は、例えば蒸気爆発で問題となる小球高温物体においても平板と同様の取扱いでよいかなどに関連する問題であり、最近 Gunnerson and Cronenberg⁶⁾ によりその影響が定量的に指摘されたが、⑤~⑧の問題についても詳細な結果が導き出される程にはデータは豊富でない。

一方、MHF点の機構的検討には、温度 T_M に意味をもたせる熱力学的モデル(単純には $T_M = T_{lis}$ ⁷⁾)や熱流束 q_M に意味を与える流体力学的モデル⁸⁾ などがある。単純な熱力学的モデルは、図1に示されるようにデータとの一致が悪い。流体力学モデルについては、Berensonのモデル⁸⁾ を代表として図2(記号は図1と同じ)に実

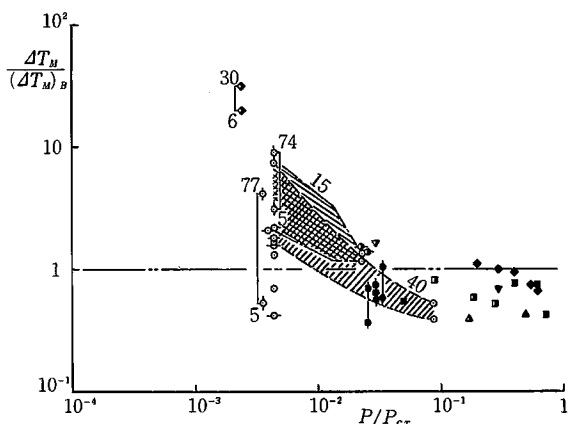


図2 Berenson のモデルとの比較

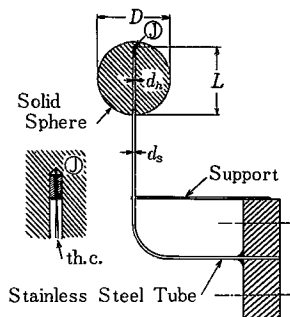
測値 $\Delta T_M (=T_M - T_{sat})$ と予測値 $(\Delta T_M)_B$ との比を示したが、低圧で $\Delta T_M > (\Delta T_M)_B$ 、高圧で $\Delta T_M < (\Delta T_M)_B$ なる傾向があり、これも実用に耐えない。さらに、MHF 点のモデルは上述の②の事実の説明に耐えるものでなければならず、この点からも MHF 点の発生機構についての検討が望まれる。

以上のように、MHF 点に関する知見の現状は、実験的にも解析的にも十分とは言えない。そこで、まず本報では蒸気爆発との関連を念頭において、③~⑤の問題を低沸点液体・球形伝熱面系について実験的に検討する。

2. 実験装置および方法

実験液体としては、固体表面をよく濡らし伝熱面表面の濡れ性などが T_M に与える影響が小さいと思われる低沸点液体を用いることとし、液体窒素 (L-N₂) およびフロン 22 (R-22) を選定した。

伝熱面は水平平板 (文献 (9) の図 2) と球を用いた。気液界面での Taylor 不安定の臨界波長 λ_c (危険波長 $\lambda_d = \sqrt{3} \lambda_c$) がそれぞれ 6.7 mm (L-N₂)、7.2mm (R-22) であることを考慮して、球形伝熱面の直径 D はこの値をはさむよう 3.18, 7.94, 11.10, 19.05 mm の 4 種を用意した。球形伝熱面は黄銅製 (走査 X 線分析装置による分析結果: Cu 65%, Zn 35%) であり、その構造を図 3 に示した。球中心軸に直径 d_b ・深さ L の穴をあけ、この中に (中心軸に CA 熱電対を埋めこんだ) 外径 d_s の黄銅円柱を挿入し、穴の先端部で球にハンダ付けした (図 3 ①)。この球は、外径 d_s のステンレス管 (肉厚 0.1mm) により支持されており、熱電対は管内部を通して引き出されている。このステンレス管が上述した (伝熱面と接する) 非加熱面にあたり、管表面と蒸気膜の接するところに濡れ境界が形成される。図 3 の伝熱面系はさらに支持板上向き (図 3 の姿勢) あるいは下向きに固定され、



D	L	d _b	d _s
19.05mm	18.15mm	1.0mm	1.0mm
11.10 "	10.65 "	1.0 "	1.0 "
7.94 "	7.24 "	0.8 "	0.8 "
3.18 "	1.33 "	0.4 "	0.4 "

図3 球形伝熱面系

L-N₂ の場合は室温より、また R-22 の場合は約 50°C に赤外線加熱された後に液体中に浸される。

沸騰曲線の測定は、伝熱面系を液体に浸漬する際の過渡温度変化より以下の手続で行った。直径 3.18 mm の球および平板については、Biot 数が小さいと考えられるので伝熱面内の温度分布を無視し、測温値 T_w^m をもとに

$$T_w = T_w^m, q_w = (\rho C V / A)_w (dT_w^m / dt) \quad (1)$$

とした。ここで、 ρ_w, C_w, V_w, A_w は伝熱面の質量、比熱、体積、伝熱面積である。また、直径 7.94, 11.10, 19.05 mm の球についても (1) 式でかなりの精度が期待できるが、ここでは文献 (9) と同様の熱伝導逆算法を用いて球の表面温度、熱流束を計算した。但し、応答関数 $\Delta \theta$ は、

$$\Delta \theta = \left(\frac{A}{\rho C V} \right)_w \left\{ t + \frac{R^2}{\alpha_w} \left[\frac{1}{6} \left(\frac{r}{R} \right)^2 - \frac{1}{10} \right] - \frac{2}{3} \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{\sin(x_\nu r / R)}{(r/R) \sin x_\nu} \frac{\exp(-x_\nu^2 \alpha_w t / R^2)}{x_\nu^2 \alpha_w / R^2} \right\} \quad (2)$$

ここで、 $R = D/2, r$: 半径、 α_w : 伝熱面温度伝導率、 $x_\nu: x_\nu \cot x_\nu = 1$ の根

R-22 での実験については液体容器にパイレックスパイプを使用し、35 mm カメラにより沸騰様相を観察したが詳細は次報で報告する。

3. 実験結果および考察

図 4, 図 5 に、L-N₂ における沸騰曲線の代表例を示した。図 4 には、直径 3.18, 11.10 mm の球での沸騰曲線を、それぞれ下向き (記号 (d)), 上向き (記号 (u)) の姿勢について示した。直径 11.10 mm の球の場合、伝熱面の姿勢による沸騰曲線の変化は CHF および ΔT_M の若干の変化として現れるのみである。この傾向は、直径

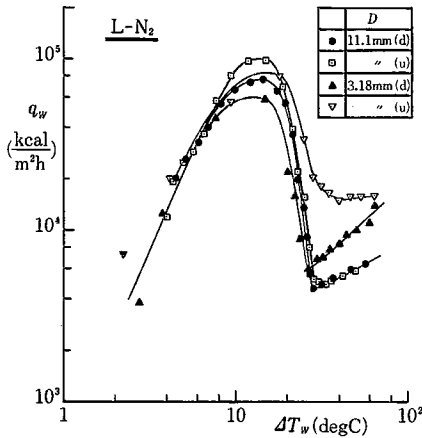


図4 沸騰曲線(固液接触モードの影響)

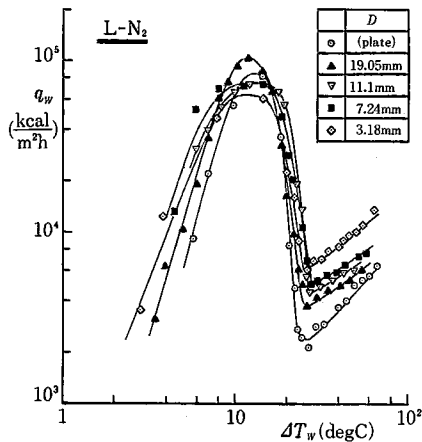


図5 沸騰曲線(伝熱面代表寸法の影響)

7.94, 19.05 mm の球の場合も同様であった。しかし、直径 3.18 mm の球の場合、伝熱面の姿勢により MHF 点近傍で沸騰曲線が大きく変化する。つまり、下向き面に比べ上向き面では、MHF 点近傍の熱流束が高く沸騰曲線が平坦化し、MHF 点の確認がかなり困難となる。これは、上述した固液接触発生モードの影響であると考えられる。つまり、球形伝熱面まわりの膜沸騰では、伝熱面を支持するステンレス管(図3)と膜沸騰蒸気膜との接点において濡れ境界(三相境界)が形成されている。この場合、液体は濡れ境界を介して、蒸気膜を支持している伝熱面に浸入しようとするので、濡れ境界は言わば蒸気膜の弱部を形成する。こうした意味をもつ濡れ境界が、蒸気膜の最も薄い球下端に存在するかあるいは上端に存在するかは、蒸気膜の保持に影響を及ぼすことが当然考えられる(R-22における写真観察によれば、下向き面でさえ蒸気膜は球下端から崩壊するように見える)。上

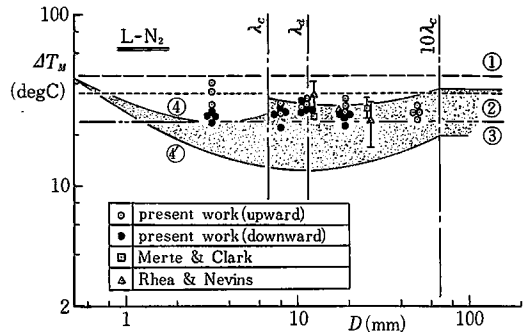


図6 MHF点過熱度(L-N₂)

向き小球の場合に特異な沸騰曲線が得られるのは、蒸気膜の弱部が球下端に存在し、蒸気膜の部分的崩壊がより高温から伝熱特性上に顕在化するためであると考えられる。このように、代表寸法の小さな伝熱面においては、濡れ境界の発生仕方(固液接触発生モード)がMHF点に影響を及ぼす。

図5は、上述の検討から非加熱面上に形成される濡れ境界の存在の影響が小さいと考えられる下向き面について、沸騰曲線に対する伝熱面寸法の影響を示したものである。膜沸騰熱伝率は伝熱面の曲率により変化⁹⁾するので沸騰曲線は膜沸騰域で異なるが、その他の領域では大差ない。MHF点については、膜沸騰熱伝率の変化のため q_M は伝熱面の曲率により変化するが、 ΔT_M は伝熱面寸法によらぬほぼ一定値を示している。

図6は、L-N₂の ΔT_M の値を伝熱面代表寸法D(水平平板では一辺の長さ)に対して図示したものである。MHF点過熱度 ΔT_M は、すでに述べたように、下向き面に比べ上向き面の方が一般に大きい。しかし、(上述の理由で)より純粋な球まわりの膜沸騰に近いと考えられる下向き面での ΔT_M のDに対する依存性は本実験条件では極めて小さく、その値は水平平板での値にほぼ等しい。図中には、 ΔT_M に対しDの影響を考慮したGunnersonの予測値⁹⁾(曲線④と④)にはさまれた領域を示したが、本実験値は曲線④に近い値を示す。さらに、Berensonの予測値⁹⁾(直線①)、過熱限界温度⁹⁾(直線②)、筆者の予測値¹⁾(直線③)を併記したが、直線③が ΔT_M の下限値を与える性格の予測値であることを考慮するとこれは良い予測値を与えている。図7にはR-22での ΔT_M の測定値を示したが、以上の結果は同様に確認できる。

図8には、L-N₂の q_M の値をDに対して示した(記号は図6と同一)。伝熱面の姿勢による差はすでに述べたとおりであるが、 ΔT_M の場合と異なりGunnersonの予測値(曲線②と②)にはさまれた領域)との傾向のず

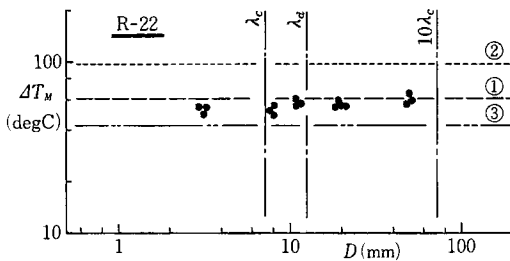


図7 MHF点過熱度 (R-22)

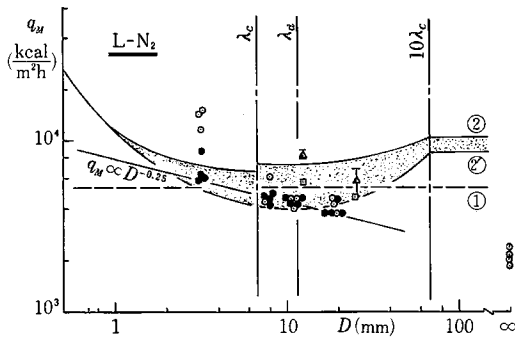


図8 MHF (L-N₂)

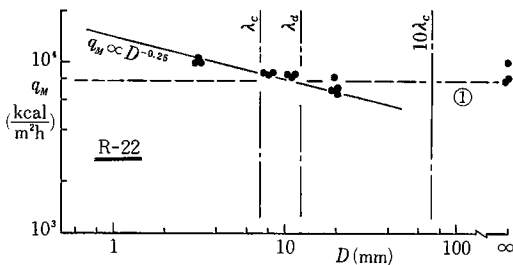


図9 MHF (R-22)

れは著しく、むしろ $q_M \propto D^{-0.25}$ 程度の依存性を示している。また、図中には Berenson の予測値⁸⁾ (直線①) も示したが平板の値との一致はよくない。図9には R-22 での結果を示したが、やはり $q_M \propto D^{-0.25}$ 程度の依存性を示している。但しこの場合、Berenson の予測値 (直線①) は平板での値に近い。

ΔT_M の値が D に対し鈍感であることおよび $q_M \propto D^{-0.25}$

であることから、以下の考察が導き出せる。球形伝熱面まわりの飽和膜沸騰熱伝達率 h_f ⁶⁾ は、放射伝熱を無視すると、

$$h_f = [0.148 \rho_v (\rho_l - \rho_v) h_{fg} k_v^3 g / (g_c \mu_v)]^{1/4} D^{-1/4} \Delta T_{sat}^{-1/4} \quad (3)$$

但し、 h_{fg} : 蒸発潜熱、 k_v : 熱伝導率、 μ_v : 粘性係数
いま、MHF 点過熱度 ΔT_M が D によらずほぼ一定値をとり MHF 点でも近似的に $q_w = h_f \Delta T_{sat}$ であるとする

$$q_M = h_f (\Delta T_M) \cdot \Delta T_M = \text{Const.} \times D^{-0.25} \quad (4)$$

となり、実験値の傾向と一致する。このことは、MHF 点について、本実験系では T_M がより本質的な役割をもち、 q_M は結果的に決まる量であることを示していると考えられる。

4. 結 言

低沸点液体-球形伝熱面系における MHF 点に対し、濡れ境界の存在の仕方および伝熱面形状・寸法の影響を実験的に検討し、小径球では濡れ境界の存在の仕方の影響が顕著に存在し、本実験範囲では MHF 点温度の伝熱面代表寸法に対する依存性が極めて小さいことを示した。

(記) 本研究の実験に際し、岸正徳君 (東海大学生) の協力を得たことを付記し謝意を表する。

(1981年1月27日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾, 生研報告, **28**-6 (1980.3).
- 2) 桜井・塩津・畑, 日本伝熱シンポジウム講論, **17** (1980.5), pp. 199~207.
- 3) 森・戸田, 日機講論, No. 800-18 (1980.11), pp. 185-192.
- 4) 西尾, 生産研究, **32**-12 (1980.12), pp. 576-579.
- 5) Kovalev, S. A., Intern. J. Heat Mass Transfer, **9** (1966), pp. 1219-1226.
- 6) Gunnerson, F. S. and Cronenberg, A. W., J. Heat Transfer, **102** (1980.5), pp. 335-341.
- 7) Spiegler, P., Hopfenfeld, J., Silberberg, M., Bumpus Jr., C. F. and Norman, A., Intern. J. Heat Mass Transfer, **6** (1963), pp. 987-989.
- 8) Berenson, P. J., J. Heat Transfer, **83** (1961.8), pp. 351-358.
- 9) 西尾, 日本伝熱シンポジウム講論, **17** (1980.5), pp. 223-225.