

# Minimum Heat Flux (MHF) 点に関する研究 — 第2報 — — 低沸点液体—球形伝熱面 [II] —

Study on Minimum Heat Flux (MHF) Point — 2nd Report —  
Cryogenic Liquids — Spherical Heat Transfer Surface [II]

西尾 茂文\*  
Shigefumi NISHIO

## 1. 緒 言

筆者は以前、高温固体面と単一液滴とにより構成される Leidenfrost 系において固液接触問題を取り扱い、固液接触の発生限界温度  $T_{lc}$  と（伝熱に有効な）濡れの発生限界温度  $T_{lw}$  との相違を実験的に示した。この事実は、後にプール沸騰系においても確認されるに至った<sup>2)</sup>一方、沸騰伝熱における特性点の1つである MHF (Minimum Heat Flux, 極小熱流束) 点は、一般に“固液接触の上限”と考えられているが、この“上限”の意味が発生限界であるのか濡れ限界であるのかは明確でなく、 $T_{lc}$  と  $T_{lw}$  との大小関係により MHF 点の発生機構が異なるとも考えられる。これから展開しようとする MHF 点に関する一連の研究の1つの目的は、こうした沸騰現象における温度のもつ役割について明確にすることである。

さて、筆者は前報<sup>3)</sup>において、液体窒素・フロン22について、球形伝熱面および水平平板伝熱面での沸騰実験を行い、その MHF 点 ( $\Delta T_M, q_M$ ) について、

- 1) 小球の場合、weak spot の影響がみられること
- 2) (weak spot の影響が無視できれば) MHF 点過熱度 ( $\Delta T_M$ ) は伝熱面代表寸法  $D \cdot$  曲率に依存しないこと
- 3) (weak spot の影響が無視できれば) MHF ( $q_M$ ) は  $D^{-1/4}$  に比例すること

を明らかにした。

本報告では、フロン22のデータを補充するとともに、フロン12について前報と同様の実験を行い、合わせて膜沸騰蒸気膜の崩壊様相について写真観察を行った。

## 2. 実験装置および実験結果

沸騰曲線の測定に用いた伝熱面は前報と同様、黄銅製球（直径 3.18, 7.94, 11.10, 19.05 mm）および水平銅板（一辺を 50 mm から 60 mm に変更）であり、その構造、実験方法およびデータ処理方法もすべて前報と同様であ

る。

また本報では、膜沸騰蒸気膜の崩壊過程を検討するため、伝熱面の浸漬実験に際し、バックライト法により 35 mm モータードライブカメラ（4～5 コマ/秒）、16 mm 高速度カメラ（約 300 コマ/秒）による沸騰様相の写真撮影を行った。

## 3. MHF に関する実験結果

### 3.1 MHF 点過熱度 ( $\Delta T_M$ )

球形伝熱面、水平平板伝熱面での MHF 点過熱度  $\Delta T_M$  の測定値を、フロン22 および 12 についてそれぞれ図1、

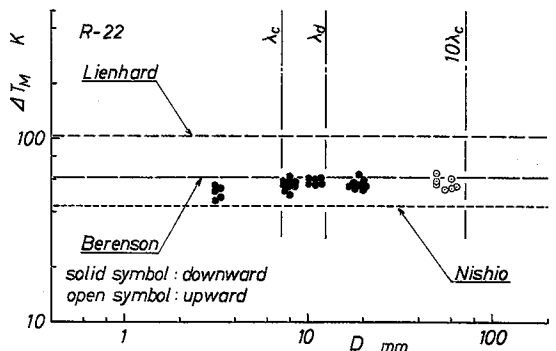


図1 MHF 点過熱度 (R-22)

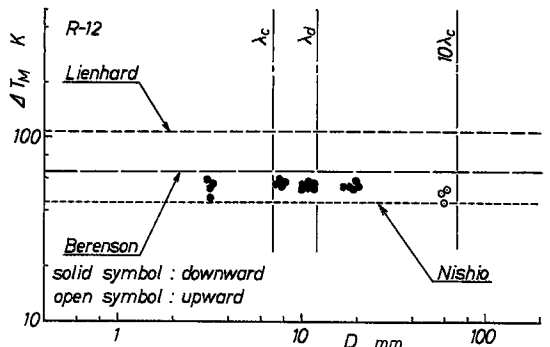


図2 MHF 点過熱度 (R-12)

\*東京大学生産技術研究所 第2部

表1 MHF点過熱度

液体	データ数	平均値	標準偏差
液体窒素	20	$\Delta T_M = 26.6 K$	$\sigma = 2.24 K$
フロン22	34	$\Delta T_M = 56.3 K$	$\sigma = 4.16 K$
フロン22	23	$\Delta T_M = 53.8 K$	$\sigma = 3.41 K$

図2に伝熱面代表寸法  $D$  に対して示した。代表寸法  $D$  は、球では直径、水平平板では一辺の長さとした。 $D = 50, 60 \text{ mm}$  のデータが上向き水平平板であり、それ以外が (weak spot の影響の小さい) 下向き球のデータである。

フロン22 (R-22), 12 (R-12) いずれの場合も、前報の結果と同様、 $\Delta T_M$  は伝熱面の曲率にも代表寸法  $D$  にも依存せず液体により定まる一定値をとっている。前報および本報において得られた液体窒素, フロン22, フロン12の  $\Delta T_M$  のデータを表1にまとめた。 $\Delta T_M$  は測定値の平均値,  $\sigma$  は標準偏差である。

図1, 図2には、 $\Delta T_M$  の Berenson の予測値<sup>4)</sup>、熱力学的過熱限界温度  $\Delta T_{i,s}$  の Lienhard の予測値<sup>5)</sup>、等温面 Leidenfrost 温度  $\Delta T_{wLi}$  の西尾の予測値<sup>6)</sup> を併記した。液体窒素の場合と異なり、フロンの場合には Berenson の式が比較的良好な値を示す。また、すべてのデータ  $\Delta T_M$  は  $\Delta T_{i,s}$  と  $\Delta T_{wLi}$  との間であり、 $\Delta T_{wLi}$  は液体窒素の場合と同様、データの下限に位置していると考えられる。

3.2 MHF ( $q_M$ )

MHF  $q_M$  の測定値を、フロン22 (R-22) および 12 (R-12) について、それぞれ図3, 図4に伝熱面代表寸法  $D$  に対して示した。

R-12 における  $D = 3.18 \text{ mm}$  のデータが若干高めであるが、これも前報同様、球形固体面では  $q_M$  は  $D^{-1/4}$  に比例する (直線①は  $q_M \propto D^{-1/4}$  を示す) と判断できる。

図中には、 $q_M$  に対する Berenson の予測値<sup>4)</sup> を併記したが、液体窒素に比べフロンの場合の水平平板のデータは、Berenson の予測値に近い。

次に、球形伝熱面における  $q_M$  の値について検討する。まず、図5に液体窒素 (L-N<sub>2</sub>), フロン22 (R-22) における膜沸騰熱伝達率  $h_f$  の測定値を示したが、これは図中の実線すなわち Farahat and El Halfawy<sup>7)</sup> の整理式の定数項を修正した次式

$$h_f = 0.85 [\rho_{vf} (\rho_l - \rho_v) h_{lv} g \lambda_{vf}^3 / \mu_{vf}]^{1/4} D^{-1/4} \Delta T_{sat}^{-1/4} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で整理されることがわかる。ただし、 $\rho$ : 質量,  $h_{lv}$ : 蒸発潜熱,  $\lambda$ : 熱伝導率,  $\mu$ : 粘性係数であり、添字  $l, v, f$  はそれぞれ液体, 蒸気, 膜温度を示す。(1)式を変形すると

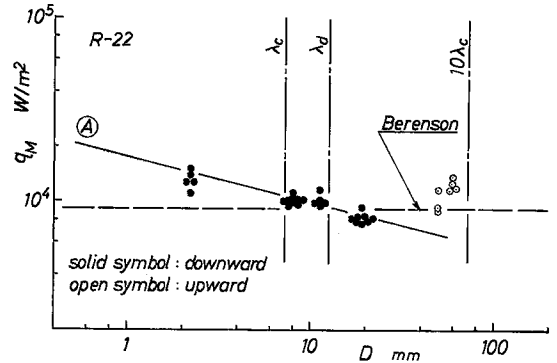


図3 MHF (R-22)

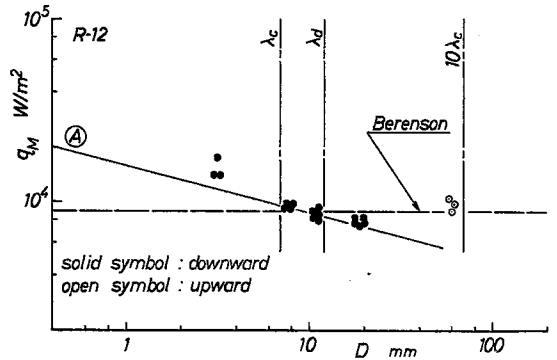


図4 MHF (R-12)

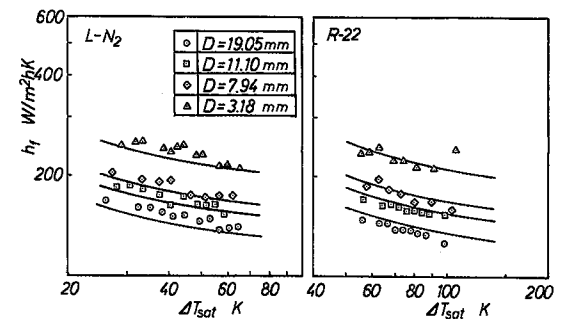


図5 膜沸騰熱伝達率

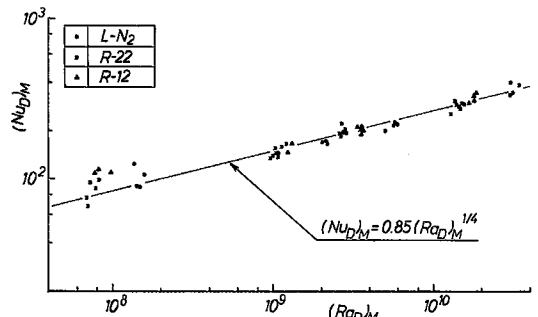


図6 MHF点の整理

研究速報

$$N_{uD} = 0.85 R_{aD}^{1/4} \dots\dots\dots (2)$$

ただし、 $N_{uD} = h_f \cdot D / \lambda_{vf}$ ,  $R_{aD} = \rho_{vf} (\rho_l - \rho_v) h_{lv} g D^3 / (\lambda_{vf} \mu_{vf} \Delta T_{sat})$ . 図6は、MHF点における  $N_{uD}$ ,  $R_{aD}$  の値 ( $N_{uD}M$ ,  $(R_{aD})M$ ) を図示したものであるが、 $(N_{uD})M$  も膜沸騰状態と同様に (2) 式でよく整理されている ((2) 式は図3, 図4中にも直線④で示してある). すなわち、MHF点において、 $q_M = h_f (\Delta T_M) \cdot \Delta T_M$  なる関係が成立している. このことは、本実験系では、水の場合<sup>1), 2)</sup> と異なり、 $\Delta T_{sat} > \Delta T_M$  では濡れが発生していないことを示唆していると考えられる.

4. 膜沸騰蒸気膜の崩壊様相

球形伝熱面まわりの膜沸騰蒸気膜 (フレオン 12) が崩壊する様相を、35 mm モータードライブカメラおよび 16 mm 高速度カメラにより観察した. ここでは主として、 $D = 19.05$  mm の場合の 16 mm 撮影結果について述べる.

図7は、 $D = 19.05$  mm の球形伝熱面まわりの沸騰曲線 (液体はフレオン 12) である. この図中の状態①~⑥における撮影結果が図8~図11である.

図8は、図7の状態①に相当し、蒸気膜が球全体を覆い球上端部より蒸気泡が離脱する、いわゆる膜沸騰状態である. 図12には  $D = 7.94$  mm の場合の膜沸騰状態を示したが、図8, 図12よりわかるように、この程度の球まわりの膜沸騰蒸気膜は球上端部を除いて滑らかであり、特に球下半分では蒸気膜表面に乱れは観察されない. 膜沸騰状態の気泡離脱の様相は、 $D = 7.94$  mm では、 $D \approx \lambda_c$  であり離脱場所は球頂部 1 カ所で離脱気泡表面も滑らかであり、Gunnerson and Cronenberg<sup>9)</sup> の分類の single vapor dome に相当しているようである. 一方、 $D = 19.05$

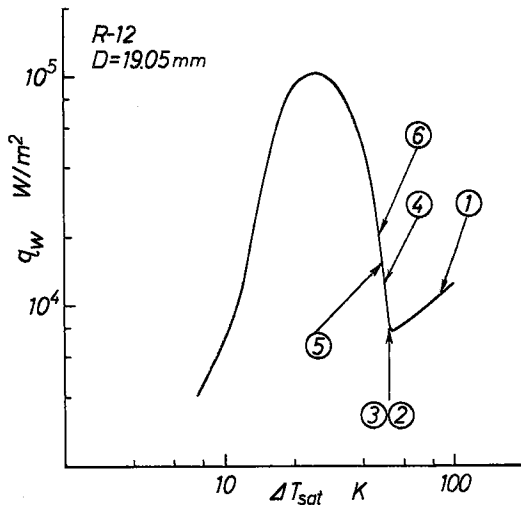
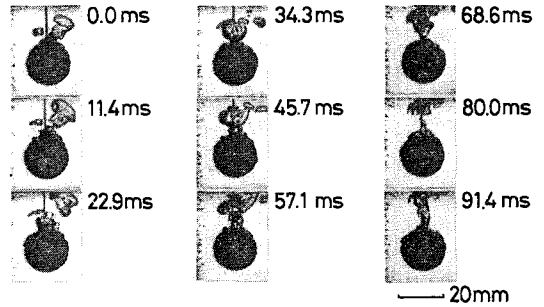
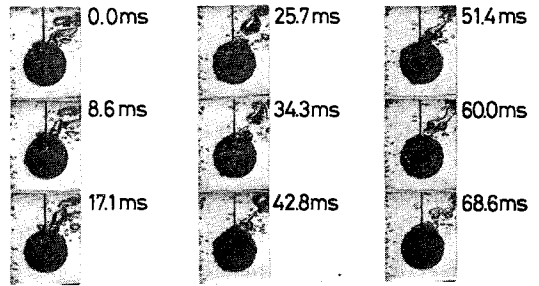


図7 沸騰曲線 (R-12)



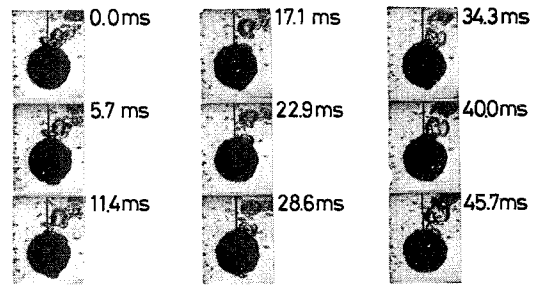
$D = 19.05$  mm,  $\Delta T_{sat} = 88.9$  K (R-12)

図8 膜沸騰の様相 ( $D = 19.05$  mm)



$D = 19.05$  mm,  $\Delta T_{sat} = 51.3$  K (R-12)

図9 MHF点近傍の様相 ( $D = 19.05$  mm)



$D = 19.05$  mm,  $\Delta T_{sat} = 51.1$  K (R-12)

図10 MHF点近傍の様相 ( $D = 19.05$  mm)

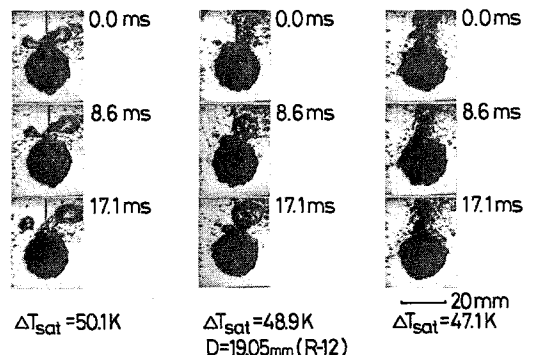
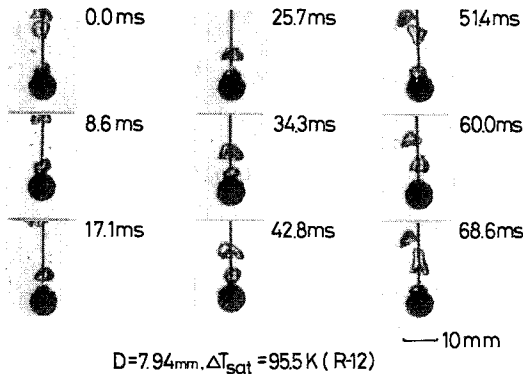
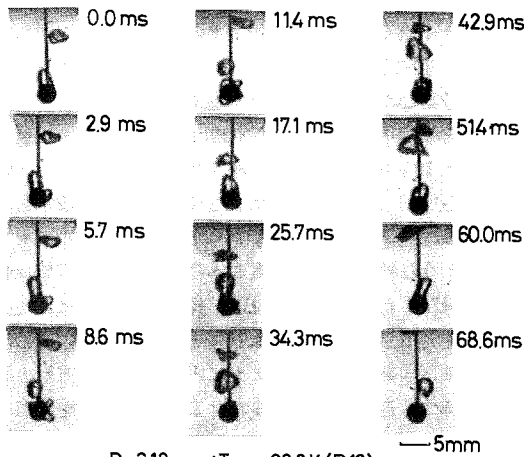


図11 蒸気膜の全的崩壊 ( $D = 19.05$  mm)



$D=7.94\text{mm}, \Delta T_{\text{sat}}=95.5\text{K} (\text{R-12})$

図12 膜沸騰の様相 ( $D=7.94\text{mm}$ )



$D=3.18\text{mm}, \Delta T_{\text{sat}}=68.8\text{K} (\text{R-12})$

図13 蒸気膜の突発的崩壊 ( $D=3.18\text{mm}$ )

mmでは、 $D \approx 3\lambda_c$ であり離脱気泡の形状は極めて乱れているが、離脱場所ははまだ球頂部1カ所であるようである。

図9～図11は、 $D=19.05\text{mm}$ の場合のMHF点近傍の状況を示したものである。図9は、図7の状態②に対応する。図8で示した滑らかな界面をもつ膜沸騰蒸気膜の存在は、MHF点の近傍まで観察される。しかし、MHF点近傍となると、この蒸気膜に図9に示したようなコブ状の乱れが発生し始める。続いて、図7の状態③となると、図10に示したように球下端部に気泡発生がみられるようになる。この気泡は、その体積から判断して固液接触の発生を意味していると考えられ、膜沸騰蒸気膜は少なくともこの状態に至り球下端部より部分的に崩壊し始めた。しかし、この固液接触は即座には蒸気膜の全的崩壊につながらず、図10に示されているように、や

りが再び膜沸騰状態が復元する。このように膜沸騰へ復元する固液接触は他の直径の球でもみられ、図13に $D=3.18\text{mm}$ の膜沸騰域において突発的に発生した固液接触から蒸気膜の復元へ至る過程を示した。

以後、こうした球下端部での蒸気膜の崩壊、復元を繰り返しながら、やがて他の部分での固液接触による蒸気膜の崩壊が始まり、膜沸騰蒸気膜は完全に崩壊する。この過程を図11(図7の状態④～⑥)に示した。

## 5. 結 言

フロン22, 12について、球形および水平平板伝熱面におけるMHF点について実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) weak spotの影響が小さければ、本実験系においては、MHF点過熱度( $\Delta T_M$ )は、伝熱面の曲率や寸法に依存しない。
- (2) weak spotの影響が小さければ、本実験系においては、MHF( $q_M$ )は、膜沸騰伝達率 $h_f$ を用いて、 $q_M = h_f(\Delta T_M) \times \Delta T_M$ で表せる。
- (3) 本実験系においては、写真観察結果および結論(2)より、 $\Delta T_{\text{sat}} > \Delta T_M$ での濡れ発生の可能性は小さい。
- (4) 本実験系においては、膜沸騰蒸気膜の崩壊は、蒸気膜厚さの最も薄いと考えられる球下部より始まる。

付言：本実験は、加藤和也君(東海大学学生)の協力により行われたものである。記して感謝の意を表す。

(1981年8月31日受理)

## 参 考 文 献

- 1) 西尾, 日機論, **43**-374 (1977. 10), pp. 3856-3867.
- 2) Yao, S.-C. and Henry, R.E., J. Heat Transfer, **100** (1978. 5), pp. 260-267.
- 3) 西尾, 生産研究, **33**-4 (1981. 4), pp. 146-149.
- 4) Berenson, J.P., J. Heat Transfer, **83** (1961. 8), pp. 351-358.
- 5) 西尾, 生産研究, **32**-12 (1980. 12), pp. 576-579.
- 6) 西尾, 生産報告, **28**-6 (1980. 3).
- 7) Farahat, M.M and El Halfawy, F.Z., Atomkernergie(ATKE), Bd. 26, Lfg. 4 (1975), pp. 235-241.
- 8) Gunnerson, F.S. and Cronenberg, A.W., J. Heat Transfer, **102** (1980. 5), pp. 335-341.