

固液接触限界に関する実験的研究

Experimental Study on Limit of Liquid-Solid Contact

西尾茂文*

Shigefumi NISHIO

1. 緒言

沸騰現象における伝熱形態が、伝熱面過熱度の上昇とともに、伝熱面から発生する気泡支配型である(純粋)核沸騰域から、乾き面とぬれ面とが混在する沸騰域(ここでは仮に交互沸騰域と呼ぶ)を経て、乾き面上で起こる(純粋)膜沸騰域へと遷移し、交互沸騰域では固液接触部の存在確率が重要な役割を占めていることはよく知られている。¹⁾

固液接触部の存在確率を定量化するには、伝熱面過熱度の増大とともに、個々の固液接触に対して、①いかなる拘束が生じ、②接触時間・面積がいかに減少し、③いかなる状況で固液接触到に限界が生ずるか、また固液接触の存在が限定されることにより形成される伝熱サイクルに対し、④(Leidenfrost系、プール沸騰系、強制対流沸騰系などの)各系において固液接触サイクルが空間的・時間的にいかに構成されるか、などの事項について情報を得る必要があるが、現在のところこれらに対し限られた情報²⁻⁴⁾があるにすぎない。そこで、まずここでは、主として③の固液接触限界をとり上げ、実験的検討を試みる。

固液接触限界については、a)接触の発生自体が限界となる、b)発生した接触の寿命が限界となる、c)発生した接触による伝熱量が平均伝熱量に対し無視し得るほど小さくなる(言わゆるぬれなくなる)などの状況が考えられるが、今のところ、「固液接触限界」の定義は明確でない。一方実験的には、固液間の電気抵抗を測定する方法を用いた実験¹⁾⁻⁴⁾が行われており、西尾¹⁾は水滴のLeidenfrost系において600°C程度までの固液接触を検知しており、Yao and Henry³⁾は水の拡がり液滴域⁵⁾のspheroidal stateにおいて400°C程度までの固液接触を確認している。

こうした固液接触限界に関する知見は、高過熱度域沸騰現象自体の解明上重要であるばかりでなく、(焼入れや軽水炉緊急炉心冷却系などにおける)クエンチ温度が液体の臨界温度をも超え得るとする実験データの信頼性に

関する基礎データとしても重要である。さらに、最近、ガラスの風冷強化技術が限界となりつつあり、強化ガラスをさらに薄肉化するためにミスト冷却強化法が検討されているが、この方法ではミストとガラスとの直接接触を(ガラスの割れ等の問題から)低温まで阻止する必要があり、接触限界に関する知見はこの強化法の実用化に対して有効なデータを与えるものとする。

そこで、本報告においては、ガラス強化法への応用も考え、Leidenfrost系における固液接触過程を対象として、固液接触限界に対する液滴衝突速度・液滴温度の影響を実験的に検討する。

2. 実験装置および実験方法

本実験に用いた系は、水滴・ステンレス鋼面で構成されたLeidenfrost系である。水(5×10^{-5} mho/cm程度のイオン交換水)は、タンク①に溜められ、定量ポンプ②により加熱部③を介してノズル④へ送られる。ノズル出口中央からは直径200 μ mの電極線⑤が高温面⑥上約0.5 mmの位置までたらされており、液滴はノズルよりこの電極を伝って高温面上に落下する。ただし、液滴のノズル懸垂時の温度上昇と余分な液滴の衝突による高温の

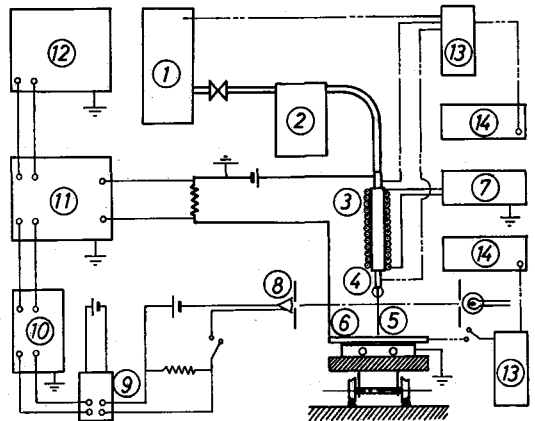


図1 実験装置(①タンク、②定量ポンプ、③加熱器、④ノズル、⑤電極線、⑥高温面、⑦直流安定化電源、⑧フォトトランジスタ、⑨マルチ・パイプレット、⑩発振器、⑪トランジェント・コンパレータ、⑫ペンレコーダ、⑬冷接点、⑭デジタルボルトメータ)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

汚損を防ぐ意味から、測定時以外は高温面をノズル下方以外の場所へレールにより移動できるようにした。

液滴温度 T_{l0} はノズル出口における値を測定し、液滴直径 d_0 は落下液滴 50 滴を採集しその重量より求めた。液滴の衝突速度 V_i は、液滴の落下高さ H の調節により変化させた。 V_i の測定は、高温面を除去し電極線をつたい落ちる水滴を高速度撮影し、落下距離 x を時間 t の関数として求めることにより行った。その結果は、

$$V_i [= (dx/dt)_{x=H}] = 2.73H^{0.405}$$

であった。高温面温度としては液滴衝突前の温度 T_{w0} を代表値とし、CA シース熱電対により測定した。各値の実験範囲は、 $T_{l0} = 30 \sim 80^\circ\text{C}$ 、 $V_i = 0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$ 、 $T_{w0} = 250 \sim 750^\circ\text{C}$ であり、 d_0 は約 3.7 mm で一定とした。また、ステンレス鋼面は実験ごとにエメリー紙 (#1500) で仕上げなおしアセトン洗浄を行った。

液滴衝突時の固液接触の発生は以下のようにして検知した。電極線⑤・高温面⑥とは約 5 V の直流定電圧電源と標準抵抗を介した回路で結ばれている。高温面上約 15 mm の水平面上にはランプ・フォトトランジスタ⑧が設置されており、液滴がこの間を横切るときの信号をトリガー信号として、液滴衝突後約 400 ms 間の標準抵抗からの出力電圧をトランジェント・コンバータ⑩により記録する。トランジェント・コンバータのサンプリング時間は $500 \mu\text{s}$ とした。記録終了後、記録信号を時間スケールを 200 倍にしてペンレコーダ⑫へ出力する。接触限界温度 T_{lc} は、この際の接触信号が確認できなくなる高温面温度 T_{w0} とし、この温度については、同時に液滴衝突

時における発生音観察による確認も行った。

3. 実験結果および考察

図 2～図 5 に、水滴-ステンレス鋼系において $V_i = 0.51 \text{ m/s}$ の場合に得られた接触信号波形の代表例を示した。接触信号の電圧絶対値は固液接触面積と関係する量であり、信号幅は固液接触時間 t_c に等しい。波形を測定した高温面下限温度は、液滴が spheroid 状態を形成するいわゆる Leidenfrost 温度程度に相当し、この状態で液滴が蒸発を完了するに要する時間は 50～100 sec 程度である。このことを考慮すると、各図からわかるように、測定対象とした温度範囲のような高温では、固液接触の存在が極めて限定されており、固液直接接触は液滴衝突時に存在するにすぎない。しかし、このように液滴の衝突時に発生する固液接触も高温面温度の上昇とともにその存在はさらに限定され、やがて接触限界に至っている。各図中には、水の臨界温度 T_{cr} 、過熱限界温度 T_{ls} (Lienhard の整理式⁹⁾ により計算) とを示したが、液温の低い条件下では、明らかにこれらの温度を超える温度域で (接触部での液体の自発核生成に対する待ち時間などと比べ) 寿命の比較的長い固液接触が生じていることがわかる。ただし、ステンレス鋼の酸化が進行すると、図 5 ⑧のように、波形の一部分に負電圧を生ずる場合があったが原因は明確でない。

図 6～図 9 は、液滴衝突速度 V_i ・液温 T_{l0} をパラメータとして、接触時間 t_c を高温面温度 T_{w0} に対して図示したものである (図中の黒ぬり記号は接触限界温度を

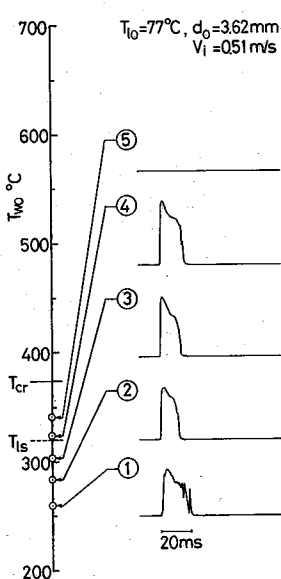


図 2 固液接触信号 (I)

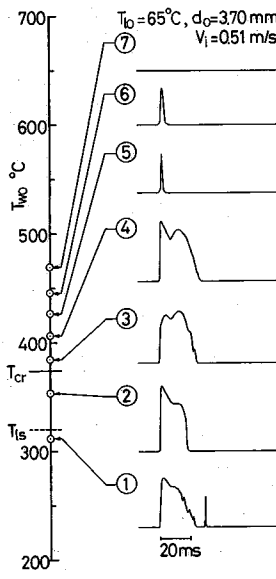


図 3 固液接触信号 (II)

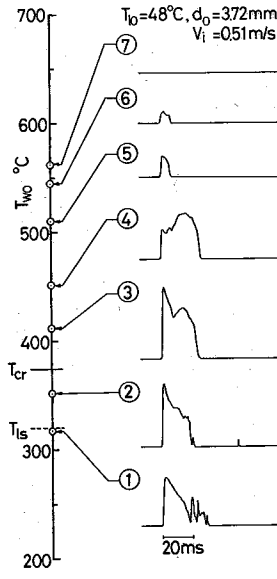


図 4 固液接触信号 (III)

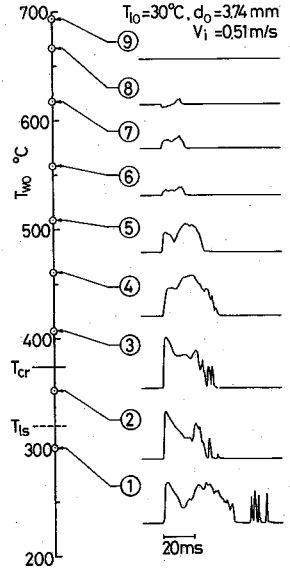


図 5 固液接触信号 (IV)

研 究 速 報

示す)。各図には、同一条件での4,5回の実験結果を示したが、各測定値のまとまりは良い。これらの図からわかるように、固液接触は、一般に高温面温度の上昇に対し、接触時間 t_c がほぼ一定の値に維持される領域(ここではRC領域と呼ぶ)を経て、次に t_c が漸減する領域(ここではSC領域と呼ぶ)を経過した後、接触限界に至る。ただし、図6(A)ではSC領域が欠落しているように思われ、接触限界の発生に、発生した固液接触部の寿命が極端に拘束されて接触限界に至る場合と、固液接触の発生自体が阻止され接触限界に至る場合との2つがあることが予測される。RC領域での接触時間 t_c は、 T_{10} が低いほど、また V_i が小さいほど長くなり、液滴の自

由振動周期 $t_{cr} [= (\pi/4) \times \sqrt{\rho_l d_0^3 / \sigma}]$ に近い値となるが、これは衝突時の液滴の分裂の影響と考えられる。また、RC領域とSC領域との境界温度は、明瞭には決定し難いが、液滴衝突速度にはほぼ依存せず液滴温度により定まる値のようであり、概略値を表1にまとめた。

図10には、液滴衝突速度 V_i をパラメータとして、水滴の固液接触限界温度を液滴温度 T_{10} に対して示した。この図より、接触限界温度は液滴温度の強い関数であり、液滴温度が高くなるほど低下することがわかる。図中の黒ぬり記号はSC領域がほとんどみられずに接触限界に至ったものを示すが、これらは他の測定値からの外挿値より低い値を示しており、前述したように、接触限界の

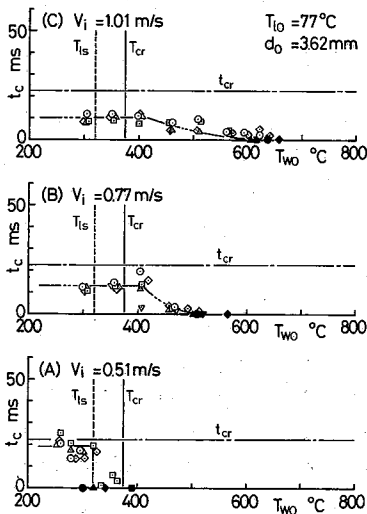


図6 固液接触時間(I)

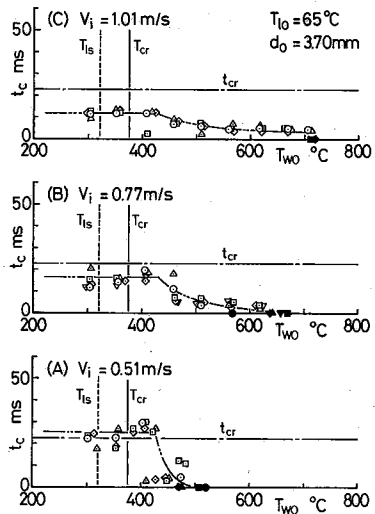


図7 固液接触時間(II)

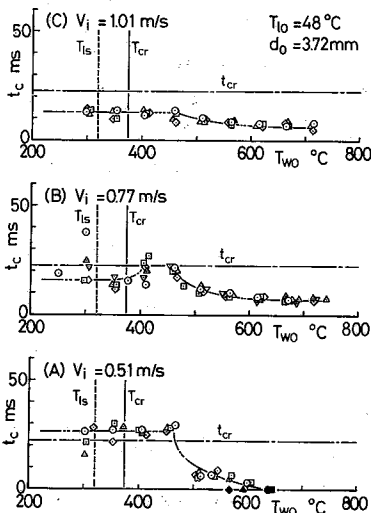


図8 固液接触時間(III)

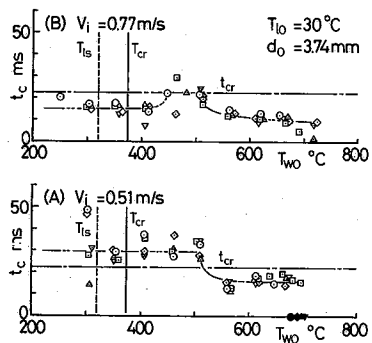


図9 固液接触時間(IV)

表 1

液 滴 温 度	77°C	65°C	48°C	30°C
境 界 温 度	410°C	430°C	460°C	510°C

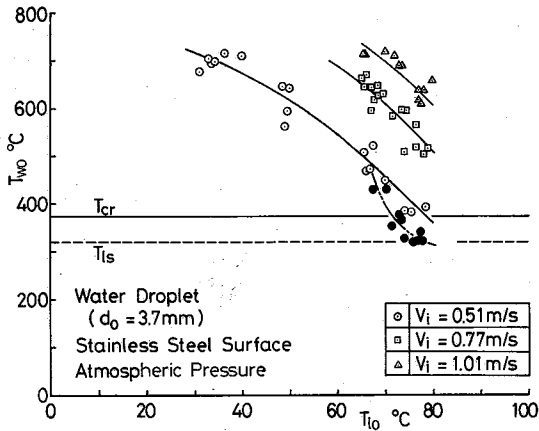


図10 固液接触限界温度の液温依存性

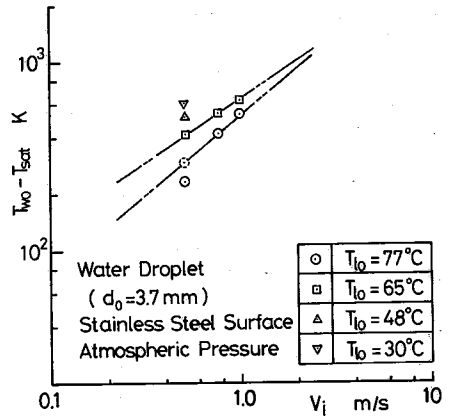


図11 固液接触限界過熱度の速度依存性

発生に2つのタイプがある可能性を示唆している。さらに、接触限界温度は液滴の衝突速度 V_i の関数でもある。図 11 に、 $T_{l0} \approx 77^\circ\text{C}$, 65°C , 48°C , 30°C における接触限界過熱度の平均値を V_i に対して図示した(破線印は SC 領域が出現した場合のみの平均値を示す)が、接触限界の過熱度は $V_i^{3/4}$ 程度に依存する傾向がみられる。

図 12 に、固液接触限界温度の測定値の代表値とプール沸騰における極小熱流束 (Minimum Heat Flux, MHF) 点温度 T_M および Leidenfrost 温度 T_L の代表値^{11,7),8)} を液温 T_l に対して示した。Leidenfrost 系のように初期衝突時に液温が飽和温度 T_{sat} 近くまで上昇してしまうような系は別として、MHF 点温度は接触限界温度と同程度のサブクール度 ($T_{sat} - T_l$) 依存性を示している。

4. 結 言

水滴・ステンレス鋼高温面より成る Leidenfrost 系における固液直接接触について実験的に検討し、以下の結論を得た。

水滴の衝突時に発生する固液接触は、

- (1) 水の(熱力学的)過熱限界温度および臨界温度を超える初期温度をもつ高温面上でも比較的長い寿命時間をもって存在し、
- (2) 衝突速度に依らず液滴温度によりほぼ定まるある温度を高温面初期温度が超えるとその寿命時間が漸減しはじめ、接触限界に至る。ただし、低速・低サブクール度の水滴では、寿命時間の漸減する領域がみられない場合もある。

また、

- (3) 固液接触限界温度は、液滴温度・衝突速度の関数であり、低速・低サブクール度の水滴ほど低くなり、そのサブクール度依存性は、プール沸騰極小熱流束点温度の依存性と類似している。

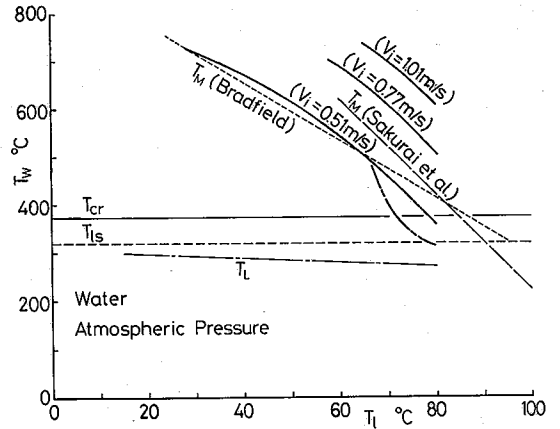


図12 固液接触限界温度と極小熱流束点温度

付記: 本実験に対し、石井明君(現在東京鈴木販売)の協力を得たことを記し、感謝の意を表する。

(1982年2月1日受理)

参 考 文 献

- 1) 西尾, 生研報告, 28-6 (1980.3)
- 2) Bradfield, W. S., I & EC Fundamentals, 5-2 (1966.5), pp. 200-204.
- 3) Yao, S. and Henry, R. E., J. Heat Transfer, 100 (1978.5), pp. 260-267.
- 4) Ragheb, H. S. and Cheng, S. C., J. Heat Transfer, 101 (1979.5), pp. 381-383.
- 5) 戸田, 「伝熱工学の進展」(養賢堂), 3 (1974), pp. 211-330.
- 6) Lienhard, J. H., Chem. Engng Sci., 31(1976), pp. 847-849.
- 7) Bradfield, W. S., J. Heat Transfer, 89 (1967.8), pp. 269-270.
- 8) 桜井ほか2名, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 17 (1980.5), pp. 202-204.