

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420142

研究課題名(和文) 噴霧・噴流冷却時の局所的固液接触初生・拡大プロセスの可視化計測と伝熱解析

研究課題名(英文) Visualization Measurements and Heat Transfer Analysis of Initiation and Expansion Process of Localized Liquid-Solid Contact during Spray Cooling or Impinging Jet Cooling

研究代表者

永井 二郎 (Nagai, Niro)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号：70251981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：沸点以上に過熱された高温面を噴霧あるいは噴流で冷却する場合、固液接触の無い膜沸騰状態はいずれ局所的・間欠的に崩壊し、局所的な固液接触が発生し急冷が始まる。その発生条件(いわゆる濡れ開始条件)は、鉄鋼冷却プロセスの高度化や高温物体緊急冷却安定性評価において非常に重要となる。本研究ではその濡れ開始条件を、主に可視化実験と局所表面温度計測により検討した。その結果、本実験条件下では、濡れが開始する時の表面温度は自発核生成温度とライデンフロスト温度の間に分布すること等が分かった。

研究成果の概要(英文)：During impinging jet cooling or spray cooling of high temperature surface, film boiling collapses by initiating localized liquid-solid contacts on superheated surface, and rapid cooling begins. This criteria, i.e. wetting initiation condition, is very important related to steel manufacturing process and etc. This research tried to reveal this wetting initiation conditions mainly by visual observation of localized liquid-solid contact situations and local surface temperature measurements on superheated surface. As a result, under experimental conditions tested in this research, the wetting initiation temperature was mostly ranged between spontaneous nucleation temperature and Leidenfrost temperature.

研究分野：伝熱工学

キーワード：沸騰 固液接触 MHF点 噴霧・噴流 可視化 濡れ開始

1. 研究開始当初の背景

(1) 沸騰素過程からの数値シミュレーションの必要性

沸騰現象は工業上、蒸気生成や冷却制御技術として幅広く利用されており、その熱伝達特性は沸騰曲線で表現される。蒸気生成の例としては火力・原子力発電におけるボイラー、冷却制御の例としては製鋼・熱延工程、焼入れ等の熱処理が挙げられる。これらの例では、核・遷移・膜沸騰全ての沸騰領域が関与し、一部に数値シミュレーションが導入されているものの基本的には実験整理式をベースに沸騰熱伝達特性を利用してきた。しかし近年、冷却制御の更なる高度化・安定化のため CAE のニーズが高まり、材料内部構造解析や熱流動の数値解析の境界条件として、沸騰曲線全領域を素過程から数値シミュレーションする技術が強く求められている。

(2) 沸騰素過程に関する根本的な未解決課題

近年、孤立気泡域の核沸騰について、既存核活性化から気泡成長・離脱に至る素過程の直接数値シミュレーションの成功例が報告されている。また純粋な膜沸騰については蒸気膜ユニットモデルによる解析的計算も可能となっている。ところが、局所的・間欠的固液接触が発生する高熱流束核沸騰域から遷移沸騰域を経て低熱流束膜沸騰域については、現状では下記 ~ の根本的な未解決課題が残っているため、素過程からの数値シミュレーションは極めて困難な状況である。

- ・ 過熱面での濡れ性評価
- ・ 既存核活性化による発泡点位置・条件の予測
- ・ 過熱面上に発生する局所的固液接触の初生・拡大機構の解明

は、従来の平衡接触角による濡れ性評価の限界が指摘されており、ミクロ・ナノスケールパラメーターによるアプローチが期待されている。は、与えられた固体表面と液体の組合せに対して、実験整理式ではなく理論的かつ実施可能な発泡点予測手法が無い点である。は、局所的・間欠的固液接触が発生する領域の沸騰曲線（特に MHF 点の決定）に関わる問題で極めて重要であり、実験的・解析的アプローチの研究はあるものの、とも関連して解明には至っていない。

(3) 固液接触限定抑制に関する研究の進展と課題

未解決課題 に関して、最近、門出・光武らおよび大竹らの衝突噴流沸騰に関する先駆的研究により、MHF 点近傍の過熱面での濡れ開始条件が実験的に明らかになりつつある。これらの結果は、過熱面固体内部の熱伝導と固液界面からバルク液体への熱伝達の連成が重要であることを示唆している。以上をふまえて本研究代表者は、過熱面上に液滴を落下させた場合に発生する局所的固液接触が限定抑制される過程、および噴流冷却時



図1. 噴霧冷却系での固液接触

の局所的固液接触状況を、可視化計測と数値解析により検討した。局所的固液接触領域直径の時間変化や、領域内の発泡点数等を計測することに成功し、またそれら測定値を境界条件として、過熱面内の非定常熱伝導と固液接触領域内熱伝達とを連成して数値計算するプログラムを構築した。さらに、有機液体 (HFE-7100) による噴流冷却時の局所的固液接触状況を可視化し、接触領域直径の時間変化 $d(t)$ を計測することに成功し、局所的固液接触が初生する条件に及ぼす各種実験パラメータの影響を把握した。

< 課題 > 上記の衝突噴流系を対象とした研究は、実験装置の技術的課題（装置の耐熱性）のため有機液体 (HFE-7100) に限られており、例えば製鋼・熱延工程での冷却等、実用上非常に重要な水の冷却系では知見が得られていない。また、図1に示すような噴霧冷却系の場合、噴流冷却系とは異なり流量密度がほぼ一様であり、局所的固液接触がどこでどのように初生するのかが不明である。

2. 研究の目的

上記の課題をふまえて本研究は、主に図1の噴霧冷却系を対象として、固液接触状況の可視化・画像計測と伝熱解析を行う。

可視化計測：装置耐熱性の課題を解決し、過熱面初期温度が 400 での実験を可能とさせ、試験液体に水や HFE-7100 を用いた膜沸騰からの冷却を実現し、透明な単結晶サファイア過熱面上が噴流冷却あるいは噴霧冷却される場合の固液接触状況を過熱面裏側から可視化・画像計測し、局所的固液接触の初生位置や条件と、初生後の拡大状況を実験的に把握する。

伝熱解析：サファイア板による裏面からの可視化実験のため、冷却開始後の過熱面上の温度分布時間変化を直接計測することは困難である。そのため、例えば噴流冷却系の場合であれば Liu&Wang の膜沸騰熱伝達特性評価式と過熱面裏側温度計測値を用いた伝熱解析により、局所的固液接触が初生する温度条件を評価する。

以上より、「過熱面上に発生する局所的固液接触の初生・拡大機構の解明」に関して、実用上重要な水の噴霧・噴流冷却時に局所的固液接触が初生し拡大する臨界条件を把握する。

3. 研究の方法

(1) 1年目： 現有の噴流冷却・固液接触可視化装置を改良し、過熱面（単結晶サファイア板）に穴あけ加工を行い、外径 1mm のシース熱電対を表面まで挿入し、膜沸騰状態から噴霧冷却する際の固液接触状況を裏側から高速ビデオにより可視化すると同時に表面温度履歴を計測した。試験液体は HFE-7100（沸点 60）, 過熱面初期温度は 140 ~ 170。 並行して、試験液体が水（沸点 100）で過熱面初期温度が 400 でも実験可能な噴流噴霧冷却・固液接触可視化装置の設計を行った。

(2) 2年目： 前年度改良した噴霧冷却・固液接触可視化装置をさらに改良し、表面温度測定用のシース熱電対を外径 0.25mm に変更し、スプレーノズル直下を起点に 5箇所 の表面温度を計測可能として、可視化・温度計測実験を行った。また、HFE-7100 噴霧の際の流量密度分布を計測した。試験液体が水で過熱面初期温度が 400 でも実験可能な噴流噴霧冷却・固液接触可視化装置は、過熱面サイズを大型化 180mm に変更して設計変更を行った。伝熱解析については、過去に作成した液滴衝突時の過熱面内非定常熱伝導解析プログラムを改良し、表面の熱伝達境界条件を変更出来るようにした。

(3) 3年目： 作成された噴霧冷却・固液接触可視化装置では、外径 0.25mm シース熱電対付近から過熱面に亀裂が生じることが増えたため、表面温度計測は中断し、膜沸騰時において濡れ開始に至る詳細な画像解析を行った。この画像解析により、噴霧流を構成する各液滴に起因すると思われる微少な濡れ点の生成・消滅を観測した。また、試験液体が水で過熱面初期温度が 400 でも実験可能な噴流噴霧冷却・固液接触可視化装置（過熱面サイズ 180mm）は、高温オイル漏れ防止が可能なメタルシールの導入により製作完了した。

4. 研究成果

(1) 噴霧冷却時の濡れ開始挙動と濡れ開始温度の計測

図2は、初期過熱面温度 17、平均流量密度が 20.6L/m²s、噴霧領域直径 24mm の場合において、外径 1mm のシース熱電対を設置した条件での濡れ開始挙動の可視化結果を示している。流量密度分布がほぼ均一な条件下においても、局所的な濡れは、t=500ms の写真に見られるように、ノズル直下から開始することが分かった。この結果は、同じ流量密度であっても、液滴衝突角度が斜めになるにつれて膜沸騰時の抜熱量に違いが生じていることを示唆している。

本研究では、図2のような可視化画像において、表面温度計測用のシース熱電対位置にて持続的な濡れが開始した時刻における熱電対計測温度を「濡れ開始温度」と定義した。

図3は、その濡れ開始温度の計測結果を示している。初期過熱面温度の上昇に伴い、濡れ開始温度は上昇するが、試験液体（HFE-7100）の自発核生成温度（約 154）に漸近する傾向があることが分かった。また、流量密度の増大に伴い、濡れ開始温度も上昇することも分かった。参考のため、図中にはサファイア板上の HFE-7100 のライデンフロスト温度（約 125）も示してある。このように、持続的な局所的固液接触が発生する場所の温度は、自発核生成温度とライデンフロスト温度の間に分布することを見出した。

また、図には示さないが、表面5箇所での局所温度測定と可視化実験の結果からは、スプレーノズル直下から水平方向に離れるに従って濡れ開始温度は低下する傾向があることも分かった。

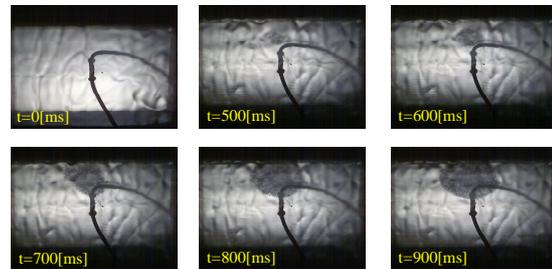


図2. シース熱電対（1mm）設置付近での固液接触発生過程

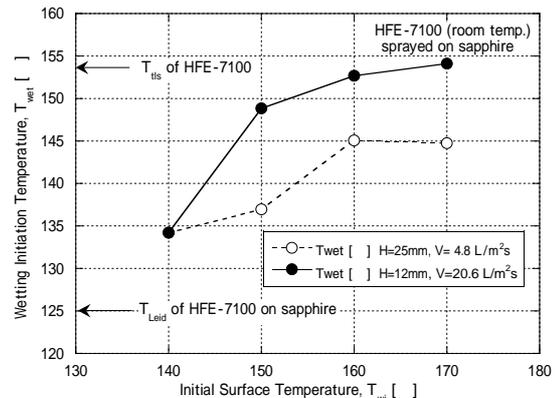


図3. 濡れ開始温度と初期過熱面温度の関係

(2) 膜沸騰時の持続的な局所的濡れ開始に至るプロセスの検討

図2に示す可視化画像において、t=0ms から t=500ms に至る間は、膜沸騰状態に該当する。可視化画像は、1000 フレーム/s、シャッター定数 1/50000 s で撮影されている。すなわち、1ms 毎に 20 μ s の露出時間で撮影されている。詳細に、1コマずつの画像を観察した結果、直径約 0.1mm、持続時間が 20 μ s 程度の小さな濡れ点が観察された。濡れ点には、黒色と灰色の2種類が観察され、黒色は 20 μ s の露出時間ずっと固液接触があると思われる濡れ点で、灰色は 20 μ s の露出時間の一部の時間帯で固液接触があると思われる濡れ点に相当する。図4は、この黒色と灰色の

濡れ点の数の推移を示したものである。濡れ点の寿命(持続時間)は1ms以下(20 μ s程度)である。このように、数百msにわたり、微少な濡れ点が発生し、表面温度が徐々に低下した後に、図2や図3に示した持続的な局所的固液接触が初生することを初めて見出した。

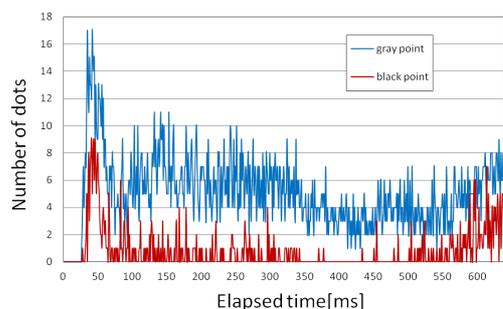


図4. 濡れ開始温度と初期過熱面温度の関係

< 引用文献 >

- Koshizuka, S., et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45-13 (2002), pp.2633-2642.
- Dhir, V.K., et al., *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 128 (2006), pp.1-12.
- Ohtake, H. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 36-10 (1993), pp.2541-2552.
- Nagai, N. & Carey, V.P., *Thermal Science and Engineering*, 10-2 (2002), pp.1-9.
- Nagai, N. & Nishio, S., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 12-3 (1996), pp.373-379.
- 西尾・永井, *機論(B編)*, 58-549 (1992), pp.1490-1497.
- Hasan, M.N. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 54-13 (2011), pp.2837-2843.
- Ohtake, H. et al., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 47-8 (2004), pp.1965-1977.
- Liu, Z.H. & Wang, J., *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 44-13 (2001), pp.2475-2481.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 3件)

Nagai, N., Obe, H., "Study on Initiation of Localized Wetting During Film Boiling Near the MHF Point in Spray Cooling", *International Journal of Transport Phenomena*, 査読有, Vol.14, No.4, 2017, pp.307-313.

<http://www.oldcitypublishing.com/journals/ijtp-home/ijtp-issue-contents/ijtp-volume-14-number-4-2017/ijtp-14-4-p-307-313/>

Nagai, N., Obe, H., "STUDY ON

INITIATION OF LOCALIZED WETTING DURING FILM BOILING NEAR THE MHF POINT IN SPRAY COOLING", *Proceedings of the First Pacific Rim Thermal Engineering Conference*, 査読有, 2016, pp.1-5.

Nagai, N., Onishi, H., Nikaido, H., Serizawa, Y., "Visual Observation of Liquid-Solid Contact Situation on Superheated Surface Cooled by Liquid Jet or Spraying", *Proceedings of the International Heat Transfer Conference 15*, 査読有, 2014, pp.1-9.

〔学会発表〕(計 5件)

Hashimoto, S., Nagai, N., "Initiation of Localized Wetting during Film Boiling Near MHF Point in Spray Cooling", 2016 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2016.10.28, 福井大学(福井県・福井市)

永井二郎, 大部晴佳, "スプレー沸騰冷却時の固液接触可視化と表面温度計測による濡れ開始条件検討", 第53回日本伝熱シンポジウム, 2016.5.24, 大阪府立国際会議場(大阪府・大阪市)

Obe, H., Nagai, N., "Study on Initiation of Localized Wetting During Film Boiling Near MHF Point in Spray Cooling", 2015 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2015.11.20, Shanghai(China)

Obe, H., Nagai, N., "Study on Initiation Conditions of Localized Wetting during Film Boiling Near MHF Point in Spray Cooling", 2014 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2014.11.28, Busan(Korea)

永井二郎, 大部晴佳, "固液接触可視化と表面温度計測によるスプレー冷却時の濡れ開始条件検討", 熱工学コンファレンス2014, 2014.11.8, 芝浦工業大学豊洲キャンパス(東京都・江東区)

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等 該当無し

6. 研究組織

(1)研究代表者

永井 二郎(NAGAI, Niro)

福井大学・学術研究院工学系部門・教授

研究者番号: 70251981

(2)研究分担者
無し

(3)連携研究者
無し

(4)研究協力者
無し