

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：13401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560222

研究課題名(和文) 衝突噴流系における過熱面上の固液接触限定抑制プロセスの可視化計測と数値計算

研究課題名(英文) Visual Observation and Numerical Simulations of Transient Process on Limiting Liquid-Solid Contact on Superheated Surface during Impinging Jet Cooling

研究代表者

永井 二郎 (Nagai, Niro)

福井大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70251981

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：沸点以上に過熱された高温面を衝突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する。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、濡れ開始条件を、可視化実験と数値計算により検討した。その結果、比較的高熱伝導性の単結晶サファイアを過熱面とした場合は、濡れ開始条件は「ある表面温度」でほぼ規定されていることが分かった。ただし、低熱伝導性の石英ガラスの場合は温度だけでは定まらず、今後の検討が必要である。

研究成果の概要(英文)：During impinging jet cooling of high temperature surface, film boiling collapsed by initiating localized liquid-solid contacts on superheated surface. This criteria, i.e. wetting initiation condition, is very important related to steel manufacturing process and etc. This research tried to reveal all this wetting initiation conditions by visual observation and numerical simulation of localized liquid-solid contact situations on superheated surface. As a result, in case of single crystal sapphire surface which has relatively high thermal diffusivity, the wetting initiation condition was almost decided by "a certain surface temperature". However, in case of quartz glass which has relatively low thermal diffusivity, the condition was not decided only by the surface temperature, and further research will be necessary.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：熱工学

キーワード：濡れ開始 沸騰 固液接触 MHF点 可視化

## 1. 研究開始当初の背景

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：火力・原子力発電におけるボイラー)(冷却制御の例：製鋼・熱延工程、焼入れ等の熱処理)

上記の例では、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。

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<sup>[1],[2]</sup>。また純粋な膜沸騰については蒸気膜ユニットモデル<sup>[3]</sup>による解析的計算も可能となっている。ところが、局所・間欠的固液接触が発生する図1の灰色太線部については、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<sup>[4]</sup>

・ 発泡点の予測(既存核活性化と自発核生成)<sup>[5]</sup>

・ 過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制機構の解明

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、図1の灰色太線部の沸騰曲線

(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<sup>[6]</sup>アプローチの研究はあるものの、ととも関連して解明には至っていない。

未解決課題 に関して、最近、門出ら<sup>[7]</sup>および大竹ら<sup>[8]</sup>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、過熱面上に液滴を衝突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を、可視化計測と数値解析により検討した。透明な単結晶サファイア板を過熱面とし、水滴を落下させた時の局所的固液接触の可視化画像である。裏面から撮影された映像から、局所的固液接触領域の直径の時間変化や、領域内の発泡点数等を計測することに成功した。また、固液接触領域の直径  $d(t)$  と発泡点数  $n$  の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。過熱面内は円筒座標系 3次元非定常熱伝導方程式を差分して温度場を求める。乾燥面・濡れ面・発泡点内・三相界線それぞれに異なる熱伝達率を与えて解く。その結果、間欠的・連続的に衝突する液滴によって、表面温度が徐々に低下していく様子を再現出来るまでに至った。

<課題> 構築された数値計算プログラムで、境界条件として与えた固液接触領域の直径  $d(t)$  と発泡点数  $n$  は、を解決するためには素過程からの数値計算により求める必要がある。しかし、液滴衝突系の場合、液滴は Rayleigh 自由振動に伴い拡大・縮小され、それに伴い  $d(t)$  も変化するため、その扱いが難しく数値計算が困難であった。これに対し、液衝突噴流系であれば、流体側の要因は  $d(t)$  を拡大する方向にのみ働き、 $d(t)$  を縮小する

のは固液接触領域内の気泡充満や三相界線での蒸発等の熱的な要因だけであり、数値計算が可能と期待できる。

## 2. 研究の目的

そこで本研究は、図1示すような過熱面上に液噴流が衝突する系を対象として、固液接触状況の可視化・画像計測と、数値計算を行う。

**可視化計測：**透明な過熱面上に液噴流が衝突する際の固液接触状況を過熱面裏側から可視化・画像計測し、局所的固液接触領域の動的挙動・発泡点の時間的推移等を把握する。

**数値計算：**液滴衝突系について構築済みの数値計算プログラムを元に、図1系での過熱面内温度場と固液接触領域  $d(t)$  が計算できるよう改良する（発泡点数  $n$  については、同様に測定値を用いる）。門出ら<sup>[7]</sup>の一連の研究や研究代表者の過渡沸騰モデル<sup>[6]</sup>をベースとして、固体面内の熱伝導と表面の熱伝達を連成して解き、表面での固液接触有無を判定する手法を完全に沸騰素過程のみで構築することを目指す。その判定手法は、可視化計測結果と比較検証することにより、妥当性を確認する。

以上より、「**過熱面上に発生する局所的固液接触の限定抑制**」に関して、固体側（過熱面）と液体側（固液接触界面とバルク液体）の連成機構を検討し、局所的固液接触が濡れ面 or 乾燥面になるかの臨界条件を物理的に把握する。

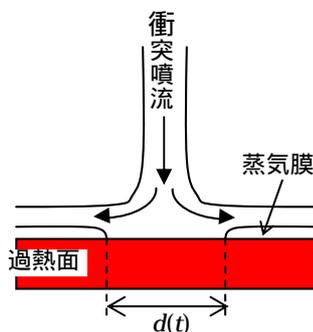


図1 衝突噴流系での固液接触

## 3. 研究の方法

### 初年度は可視化計測実験と計算プログラム構築

**構築：**透明な単結晶サファイア板を過熱面、水または低沸点冷媒（HFE-7100）を試験液とし、過熱面上に液噴流が衝突する際の固液接触状況を裏側から高速度ビデオにより可視化。液滴衝突系の数値計算プログラムに、過渡沸騰モデルをベースに固液接触有無の判定手法を組み込み、衝突噴流系の計算プログラムを構築。

**次年度は実験結果による計算プログラムの検証：**局所的固液接触領域の直径について、計算プログラムによる予測値を実験結果と比較検証し、プログラムを改良。過熱面材質を変えた可視化計測実験も実施。

**最終年は主にまとめ：**確立された数値計算プログラムにより、様々な条件下で計算を行い、局所的固液接触が濡れ面 or 乾燥面になるかの臨界条件を物理的に把握。必要であれば追加実験。

## 4. 研究成果

**可視化計測実験：**透明な単結晶サファイア板（50×50×5mm）を過熱面、低沸点冷媒（HFE-7100、沸点 60℃）を試験液とし、過熱面上に液噴流が衝突する際の固液接触状況を過熱面裏側から高速度ビデオにより可視化することに成功した。可視化原理は光の全反射を利用する。すなわち、乾燥表面上では全反射するが固液接触領域では透過するよう光の入射角を調整すると、高速度ビデオ側では乾燥面は明部、固液接触領域は暗部で撮影される。過熱面裏側にシリコンオイルを接触させ、裏面で全反射が起きないようにした。ポンプと弁により所定の流量に調節した液は、内径 2~4mm のパイプからサファイア面上へ衝突噴流となり流下する。局所的固液接触領域の等価直径  $d(t)$  と発泡点数  $n$  の時間変化を計測した。その結果、噴霧（スプレー）冷却時の状況とは異なり、衝突噴流冷却の場合は、局所的固液接触が発生後、ごく短時間

の間に噴流直径程度まで固液接触領域が拡大し、その後は比較的ゆっくりと固液接触領域が拡大することが分かった。初期表面過熱度や液温が固液接触状況に及ぼす影響は、噴霧冷却時と定性的には同じであることが分かった。

引き続き、液噴霧（スプレー）時の固液接触状況可視化と計測を行った。理由は、固液接触領域計算プログラムは、液滴列衝突時の固液接触可視化をベースに構築されており、その検証のためにはラミナー流だけでなくスプレー（多数の液滴衝突）流の詳細な可視化データが必要となったためである。過熱面（単結晶サファイア板）と試験液（HFE-7100）は昨年度と同じで、スプレー実現のため試験液タンクを加圧し、ノズルの適正圧力で噴霧した。同時に液滴流量密度の計測も行った。その結果、過熱面が高温状態から冷却され、膜沸騰から MHF 点を經由し遷移沸騰に移行する際、固液接触の発生は必ずしもスプレー直下とは限らず、スプレー域外周から発生し中心に向かって拡大するケースもあることが分かった（液滴流量密度はスプレー直下が最大）。この現象の発生理由は、数値計算により表面温度分布の時間変化を正確に求めて検討する必要がある、その数値計算検証のためにも正確な表面温度分布（少なくとも 3 箇所以上）の計測が必要である。

それをふまえて、過熱面（単結晶サファイア）に穴空け加工を施し、表面温度評価のための極細シース熱電対を表面近くに設置した。これは、可視化画像により局所的な濡れ開始時刻が判明するが、その際の過熱面中央表面温度を計測することで、濡れ開始条件を検討するためである。その結果、サファイア板の場合は、初期温度によらず、ある一定表面温度にて濡れが開始しており、高温面での濡れ開始が何らかの温度により定まっている可能性を見出した。一方、サファイアに比べて低熱伝導性の石英ガラスによる同実験

も行ったが、こちらの場合は、濡れ開始は表面温度だけでは決まっておらず、今後のさらなる検討が必要である。

固液接触領域計算：液滴衝突系の数値計算プログラムに、過渡沸騰モデルをベースに固液接触有無の判定手法を組み込み、衝突噴流系の計算プログラムを構築できた。ただし、Ver.1 では、過渡沸騰モデルによる予測（固液接触状態から乾燥面へと移行する時間）値が実現象より長い欠点が残った。そこで、過渡沸騰モデル（マクロ液膜消耗モデル、一次気泡充満モデル、自発核生成気泡充満モデル）を組み込み、固液接触領域内の境界条件を各 time step にて評価し乾燥面に至るかどうか判定するプログラムに改良した。そのプログラムの計算結果と、実験で得られたラミナー・スプレー時の固液接触可視化データを比較することで、計算プログラムの検証を行ったが、試験液（HFE-7100）の膜沸騰熱伝達計算の誤差が大きいため検証には至らなかった。

## 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 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

Ota, H., Nagai, N., Nikaido, H., Serizawa, Y., Visual Observation of Liquid-Solid Contact Situations during Spray Cooling of Hot Surface, Proc. 2013 International Symposium on Advanced Mechanical and Power Engineering, 2013.11.15, Fukui, Japan

永井二郎, 衝突噴流・噴霧冷却沸騰時の固液接触状況の動画, 熱工学コンファレンス 2012, 2012.11.17, 熊本市

Nagai, N., Yamada, T., Onishi, H., Visual Observation of Liquid-Solid Contact Situations upon Impacts of Liquid Droplets and during Liquid Jet Impingement, 8th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer, 2012.06.06, Lausanne, Switzerland

永井二郎, 大西宏紀, 過熱面の衝突噴流冷却時における固液接触状況の観察, 第 49 回

日本伝熱シンポジウム, 2012.05.30, 富山市  
Nagai, N., Okuno, K. , Numerical  
Simulation on Transient Heat Transfer  
Process during Localized Liquid-Solid  
Contacts on Superheated Surface, 8th  
KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering  
Conference, 2012.03.20, Incheon, Korea

〔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

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

永井二郎 (NAGAI, Niro)

福井大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：70251981

### (2) 研究分担者

無し

### (3) 連携研究者

無し