

令和元年6月11日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06127

研究課題名(和文)高温面非定常冷却中のぬれ面形成とぬれ面先端境界位置挙動の解明

研究課題名(英文) Study on mechanisms of wetting area formation and wetting front behavior during jet quenching of hot surface

研究代表者

光武 雄一 (Mitsutake, Yuichi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授

研究者番号：20253586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：水の沸点を遥かに超える高温面の噴流冷却特性の解明とその冷却特性予測モデル構築を目的として、高温面上で固液接触を生じるぬれ領域の空間的・時間的变化を支配するぬれ先端位置の時間的挙動と伝熱特性に関する測定手法の開発を行い、その手法を用いた噴流冷却実験を実施した。さらに、噴流冷却中の固体側の非定常熱伝導と流体側の単相強制対流・核沸騰熱伝達との連成解析に基づいて、高温面上を移動するぬれ先端位置の時間挙動の予測モデルを提案した。実験結果を用いた予測結果を検証し、ぬれ先端位置挙動に及ぼす噴流温度、噴流速度、高温面初期温度の影響を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

工業的に幅広い応用分野を持つ高温面噴流冷却では、固液接触時の急速蒸気生成により安定なぬれ状態が生じない膜沸騰伝熱から、高温面のぬれ回復に伴って核沸騰あるいは単相熱伝達へ遷移し、ぬれ回復による沸騰遷移時に冷却速度が急増する。高温面上のぬれ面を規定するぬれ先端のウェッティングフロント(WF)の挙動は、冷却速度を予測する上で不可欠な情報となる。本研究で得られたWF位置の時間変化特性とその挙動予測モデルは、噴流による高温面冷却の応用分野、例えば鉄鋼材料の製造プロセスにおける温度制御の高精度化への寄与が期待される。

研究成果の概要(英文)：An experimental study was conducted to elucidate characteristics of transient cooling heat transfer during impinging jet quenching on a hot surface being much higher than the boiling temperature. Since the quenching heat transfer is strongly governed with recovery of wetted area on the surface, measurement techniques with optical and thermal sensors were developed to characterize the wetting front (W.F.), that is specified the outer boundary of the wetted area. Characteristics of the transient behavior of the W.F. and heat transfer in the vicinity of the W.F. were clarified for different liquid temperatures, jet velocities and initial solid temperatures. A model to estimate the W.F. behavior was also proposed with coupling analysis of the transient heat conduction in the solid body with the heat transfer of the impinging jet flow on the surface. The model was verified with the experimental data.

研究分野：熱工学

キーワード：噴流冷却 ぬれ ウェッティングフロント 遷移沸騰 衝突噴流

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

スプレーや噴流を用いた高温面非定常冷却は、連続鋳造や熱間圧延鋼板などの材料製造プロセスやシビアアクシデント発生時の軽水炉圧力容器外表面冷却などを始めとする幅広い工業的応用分野で利用されている冷却手段である。材料製造プロセスにおいては、Dual Phase 鋼など高付加価値材料のニーズ増加に伴い、仕上げ圧延後の冷却による金属組織の作り込みに必要とされている冷却温度制御の要求精度がますます高まってきている。

冷却材(水)の沸点を遥かに超える高温面を冷却する場合、固液接触に伴う急速蒸気生成により固液界面に蒸気膜が形成されて安定な固液接触つまり高温面のぬれが生じない膜沸騰伝熱となる。その後、冷却の進行に伴い局所的な一時的固液接触が生じる不安定なぬれ状態が生じる遷移沸騰を経て、安定なぬれ状態を回復して核沸騰或いは単相強制対流伝熱に移行する。膜沸騰から核沸騰への遷移沸騰域では、ぬれ面の拡大により熱伝達率が1~2桁増大し、高温面の急冷、つまりクエンチが開始されるため、高温面の冷却において遷移沸騰域の伝熱は非常に重要である。しかし、遷移沸騰域では高温面上でのぬれと乾き状態が非定常的に変化するだけでなく、冷却の進行に伴う高温面上でのぬれ領域の拡大により、固体側の非定常熱伝導と高温面上の熱伝達で連成した非定常性の強い不規則伝熱過程を示す。非定常性が高い伝熱計測上の困難さもあり、遷移沸騰冷却中に生じるぬれ回復やぬれ面先端位置の移動速度の支配モデルの構築などの課題が依然として残されている。

高温面噴流冷却に関する従来研究(例えば、申請者の基盤研究(C)13650231)より、冷却中の高温面上はよどみ点から半径方向に向かって単相液膜流で覆われた単相熱伝達域が拡がり、その外周部に核沸騰域が存在する。液膜流は、核沸騰域の発泡点から射出される気泡により、液滴となって高温面から飛散し、核沸騰域の外側は乾き面となる。核沸騰域の外側は、高温面上でのぬれと乾きを繰り返す Wetting Front (以後 WF と記す)と呼ばれるぬれ面先端境界となる。時間と共に WF が半径外方向へ移動することにより、ぬれ面が拡大して冷却熱量と冷却速度の増大が生じる。WF 位置の時間進展に影響する WF 近傍の表面温度には半径方向に大きな温度勾配を示す。固体側の不均一温度場での WF の前進速度は、先に述べたように固体側の非定常熱伝導と高温面上での沸騰伝熱との連成熱伝達の支配を受けるため固液の熱物性すなわち熱浸透率の強い影響を受けることが知られているがモデル化は進んでいない。

WF の予測モデルとして、例えば古典的な燃料棒再冠水時の WF 挙動を予測した山内モデルがあるが、仮定された条件が必ずしも現実を値を反映したものとは限らない。具体的には、ぬれ面と乾き面での2層熱伝達率分布、WF 位置を決定づける表面温度、固体側の1次元熱伝導などの仮定の妥当性の問題がある。その後の研究で熱伝達率分布を定常沸騰曲線と与える、或いは固体側の2次元熱伝導解析などの改訂が行われているが、WF 位置を決定する汎用モデルの導出には至っていない。温度測定の観点より、半径方向の熱電対の設置間隔と表面から測温点までの距離が大きく、ぬれと乾きに伴う早い周期で温度変動が生じている WF 近傍の固体側温度場を測定することの困難さに起因すると考えられる。

高温面のクエンチ時の局所表面温度計測について、基盤研究(C)22560204において空気中での高温酸化の進展が遅い Ni 高温面への液滴衝突時の非定常遷移沸騰素過程を解明するため、固液接触時の局所表面温度変化を応答時間 70  $\mu$ s で把握できる計測法を開発し、熱伝導逆問題解析で表面熱流束の評価を行った。この計測法を用いることにより、噴流冷却中の WF 近傍で繰り返されるぬれと乾き状態に対応した非定常熱伝熱および WF 位置を定める熱的境界条件(ぬれ開始の表面温度あるいは熱流束)について定量的計測が可能と考えられる。

### 2. 研究の目的

工業的に応用価値が高い水を用いた高温面の非定常冷却において、高温面上での固液接触を生じて実質的な冷却領域となるぬれ面の範囲を規定するぬれ先端の WF の挙動を把握することは、非定常冷却中の除熱能力や均一温度制御精度の向上に不可欠である。そこで本研究では、円柱噴流を用いた高温面の衝突噴流沸騰系を対象として、1)流動状態と固液界面温度測定に基づいた WF 位置での前進と後退を繰り返す遷移沸騰の伝熱素過程を明らかにする、2)WF の挙動を支配する固液の非定常連成熱伝達モデルの構築と実験結果による検証を行う。の2つを実施して、従来の研究で十分明らかにできなかった現象論に基づく高温面上での WF 位置の非定常変化予測手法を確立し、高温面の噴流冷却熱伝達予測の精度向上に寄与することを目的とする。

### 3. 研究の方法

本研究では表面酸化を極力排除した伝熱面状態を維持した実験装置を用いて、噴流冷却中の表面温度変化測定と高速ビデオによる WF 位置の挙動観察を同期して行った。図1に示す高温面の噴流冷却装置、高速ビデオ観察光学系、高速多点温度計測システムを製作した。高温面の温度計測のため、ニッケル円板(直径50mm、厚さ5mm)表面に高速応答温度センサーを複数設置した試験用高温面を作成した。既存設備に加えて新規購入した絶縁型 DC アンプと同時サンプル AD ボードを組み合わせて、高温面上の最大8箇所の測温点温度履歴を200kHzでデータ記録・保存するシステムを開発した。また、温度計測と同期してぬれ先端の挙動を観察撮影するための高速ビデオカメラ、ハロゲン光源、反射鏡およびレーザー光学系から成る撮影装置を設置した。所定のサブクール度と噴流速度に貯水タンク水温と加圧圧力を設定した噴流を内径1mmのノズルから高温面上へ供給して冷却を行う。高温面の加熱は、裏面からの熱放射ヒーターで

行い、水の自発核生成温度を含む 250 ~ 450 の範囲に調節した。

本研究では、前述の実験装置で冷却中の噴流よどみ点での安定なぬれ状態の回復と WF 位置の時間変化を高速カメラの画像解析により測定した。画像解析により高温面上でのぬれ面上での流動伝熱様式（単相熱伝達、核沸騰域）の分布と WF 近傍での液滴飛散状況と液膜先端の挙動特性を調べた。Ni 表面から深さ 3  $\mu\text{m}$  の測温点は、高々 70  $\mu\text{s}$  の時間遅れで WF の測温点到達時の固液界面温度変化を記録できる。温度履歴から熱伝導逆問題解析によって、表面温度と表面熱流束の時間変化を評価し、WF 位置でのぬれが回復するときの熱的境界条件について検討した。

次に、実験で得られた噴流冷却中の WF の挙動に及ぼす噴流温度や噴流速度の影響について、ぬれ面上の表面熱伝達と固体側の軸対称二次元非定常熱伝導との連成伝熱について物理モデルを検討および提案を行い、自発核生成と限界熱流束の観点から WF 位置の時間進展特性を現象論的な説明を試みる。

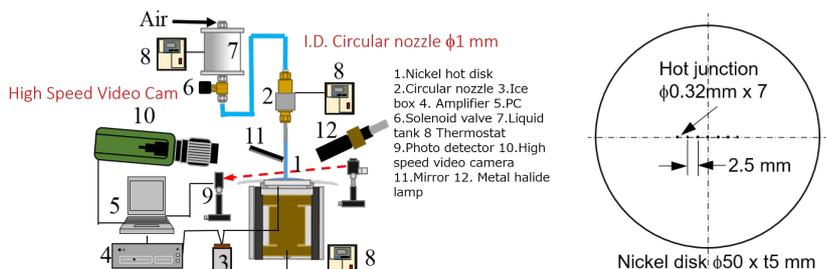


図 1 . 実験装置全体図および試験面上測温点位置

#### 4 . 研究成果

本研究で得られた主要成果として、WF 近傍の流動と界面温度変化の特性と噴流冷却中の WF の挙動モデルについて述べる。

##### 4 - 1 . 衝突噴流冷却中の WF 近傍の流動状況と固液接触界面温度履歴

図 2 に冷却中の水平上向き高温面上の流動状況の一例として、初期温度 350 $^{\circ}\text{C}$ 、液温 50 $^{\circ}\text{C}$ 、噴流速度 9.4 m/s において、冷却開始後 0.54 s での流動状況を示す。図は反射鏡を用いて同一フレーム内で記録された加熱面の水平方向(Side)からと下方(top)からのショットである。図中赤丸で示される噴流よどみ点から 7.5 mm の測温点に丁度 WF が到達した時刻の流動状況である。図 2 に示されるように冷却開始後よどみ点から液膜流が高温面に沿って外周側へ広がる。液膜流の先端つまり WF 近傍での激しい発泡により飛散液滴として飛散し、WF 位置で液膜流が破断して、その先は乾き面となっていることが分かる。WF 先端液膜が WF 付近で前進と後進を繰り返していた。図中  $\Delta r_b$  で示される環状領域は高温面上の発泡点が観察される核沸騰領域(NB)と不安定なぬれを示す遷移沸騰域(TB)に対応する。 $\Delta r_b$  の内側は、発泡点が確認できない単相強制対流熱伝達領域である。さらに図示されているように、WF 近傍より飛散する液滴は、高温面に対して角度をもって離脱すると同時にほぼ同一間隔を保っていることが分かる。つまり、液滴の飛散は、かなり周期的に生じていることが分かる。また、単相熱伝達域の液膜流に注目すると、液膜流の気液界面には波の存在が確認できる。動画の確認からこの波は、円柱噴流の気液界面の Plateau-Rayleigh instability で生じる液柱半径の変化（写真中の噴流でも確認可）によって高温面衝突時に引き起こされる脈動に起因することが分かった。後述するように空気中に射出される液噴流には必ず含まれる界面不安点による擾乱は、WF の固液接触界線上での固液接触との関係が示唆される。

図 3 に水平上向き高温面上の温度測定結果の一例として、噴流よどみ点から 7.5 mm での測温点における温度時間履歴を噴流速度別で比較した結果を示す。測定条件は初期温度 350 $^{\circ}\text{C}$ 、液温 50 $^{\circ}\text{C}$ 、噴流速度 6.0, 7.8, 9.4 m/s である。9.4 m/s に対する温度履歴は、図 2 の流動観察撮影時に得られたものである。各温度履歴上に対する  $t_{WF}$  と  $t_q$  の矢印は、それぞれ各測温位置に WF が到着した時刻と急冷を開始するクエンチ時刻を示す。また、 $T_{WF}$  の矢印は時刻  $t_{WF}$  における表面温度を示す。図 3 より WF 到着前の噴流冷却開始直後より測温点の温度降下は開始する。これは、固体側の 2 次元熱伝導で先行して冷却が始まるためである。急冷は WF 通過後の図 2 の

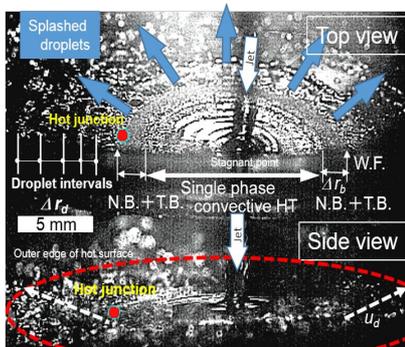


図 2 . 噴流冷却中の高温面上の流動状況

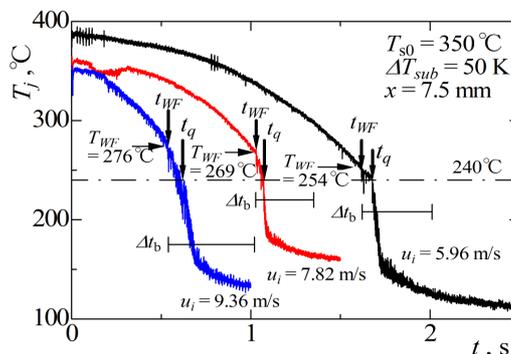


図 3 . 表面温度履歴の一例（噴流速度別比較）

流動状況で示される  $\Delta r_b = 1.5 \text{ mm}$  の核沸騰域の内部で急冷が開始されることが分かる．また，WF 位置での温度  $T_{WF}$  は，噴流速度の上昇とともに 254 から 276 まで上昇していることが分かる．つまり，WF 位置は固体側の温度で一律に規定されないことが分かる．これは，多くのリウエティングモデルが採用している温度支配による WF 位置の規定は不十分であるということを示す．一方，クエンチ開始時の温度は， $u_j$  に関わらず 240 より開始している．

WF 近傍での固液接触状態に対応した温度変動を調べるため，図 3 に示した噴流速度 6.0 m/s と 9.4 m/s の温度履歴について， $t_{WF} \sim t_q$  の時間範囲を拡大したグラフを図 4 に示す．いずれのグラフも同じ時間スケール幅で描かれている．図 4 より WF 到着時刻以降より瞬間的な固液接触に伴うスパイク状の温度低下と温度回復の変化が表れている．そして，時刻  $t_q$  以降瞬間的な温度低下の頻度が急増してクエンチに至ることが分かる．また， $t_{WF} \sim t_q$  間の温度低下頻度に注目すると噴流速度が遅い 6.0 m/s の方が 9.4 m/s と比べて頻度がかかなり少ないことが分かる．そのため，6.0 m/s においてクエンチ時刻前後での冷却速度に大きな変化，すなわち図 3 のグラフで明確な折れ点として認識される．図 3 で得られた  $T_{WF}$  について，過去の研究課題（基盤(B) 20360101）で得られた非定常加熱中の不均一温度場の過熱液層内自発核生成による蒸気爆発の観点から検討を行った．図 5 は半無限体固液(Ni-Water)接触後の蒸気爆発が発生するまでの時間遅れ  $t_{delay}$  を固体側初期温度  $T_{s0}$  で整理したもので，実線と破線はそれぞれ液温が 20 と 80 に対する計算値である．図 4 より固体(Ni)の初期温度  $T_{s0}$  の低下とともに時間遅れは ns 以下のオーダーから ms オーダーまで指数関数的に長くなり，Ni-Water の系に対して  $T_{s0} < 390$  では蒸気爆発は生じないことが分かる．さらに，噴流速度が高々 10 m/s で数 mm の  $\Delta r_b$  領域の通過時間は 0.1 ms 以下となり，400 以上の初期温度の Ni と水の接触の場合しか蒸気爆発によるスパッタリングは生じないことになる．ただし，図 5 の結果は静止液体と固体との接触熱伝導を対象としているため対流温度場については温度境界層の影響があるため，見かけ上液温が過小評価の結果となることに注意する必要がある．後述するようによどみ点直下におけるぬれ開始遅れ時間に関しては，初期温度 350 においてもぬれ開始温度の時間遅れが生じていた．いずれにせよ，ぬれ面がよどみ点から拡大するときの WF 位置での固液接触界面温度は水の自発核生成温度よりも低い 250 ~ 280 の範囲となることを実験結果より明らかにした．

図 2 に示すような噴流冷却中の高速ビデオ画像に基づき，よどみ点での安定なぬれ状態の回復から外周部への WF 位置の移動を追跡した．その代表例を図 6 に示す．図 6 は，初期温度 350，噴流温度 50（噴流サブクール度 50K），噴流速度 6.0, 7.8, 9.4 m/s の各条件における WF の半径位置  $r_{WF}$  を高温面上への噴流の接触開始を基準時刻時刻 0 とする時刻で整理した結果である．図 6 より， $T_{s0} = 350^\circ\text{C}$ ， $T_l = 50$  の条件において， $u_j = 9.4 \text{ m/s}$  では冷却開始直後からよどみ領域  $r_{WF} = 2.5 \text{ mm}$  には安定なぬれ面が形成されて直ちに WF は拡大を開始するのに対して， $u_j = 7.8, 6.0 \text{ m/s}$  では 0.2 s 程度のぬれ開始遅れ時間の後 WF は拡大を開始する．また，図 6 において， $r_{WF}$  の時間勾配，すなわち WF の移動速度の時間変化に注目すると， $u_j = 9.4 \text{ m/s}$  では  $r_{WF}$  は上に凸の曲線で  $u_j = 6.0, 7.8 \text{ m/s}$  では時刻に対してほぼ直線的に変化する．これより， $u_j = 9.4 \text{ m/s}$  では冷却開始直後の WF は早く移動するが時間と共に遅くなるのに対して，6.0, 7.8 m/s ではよどみ点での濡れを開始後ほぼ等速で移動することが分かる．そこで，よどみ点でのぬれ開始後の  $r_{WF}$  の時間変化を時刻のべき関数  $r_{WF} \propto t^n$  で近似を行い，時刻のべき乗  $n$  について， $T_{s0}$ ， $u_j$ ， $\Delta T_{sub}$  の組み合わせに対して整理した結果を表 1 に示す．表 1 より， $r_{WF}$  は冷却条件の組み合わせに対して時刻の 1 乗から 1/4 乗の範囲で変化することが分かる．一般的な傾向として，よどみ点のぬれ開始遅れ時間が生じる条件，すなわち  $T_{s0}$  が高くなるほど， $u_j$  と  $\Delta T_{sub}$  が小さくなるほど， $n$  は 1 に近い値を取ることが分かる．この指数の物理的根拠については，WF の移動を支配する熱的条件と固体側の非定常熱伝導で決定されると推定される．例えば，無限円板の半径方向一次元熱伝導に支配される場合は，熱伝導の厳密解より  $n = 1/2$  となる．

最後に，先に述べた衝突噴流の Plateau-Rayleigh instability に起因する高温面上の液膜流への擾乱が WF 近傍の沸騰熱伝に及ぼす影響についての検討結果について述べる．半径  $r_j (= d_j/2)$  の円柱ジェットの気液界面に生じる最大不安定波長  $\lambda_{PR} = 2\pi r_j / 0.696 = 4.51 d_j$  より，図 2 の  $d_j = 1 \text{ mm}$  の噴流で生じる不安定波長は  $\lambda_{PR} = 9 \text{ mm}$  程度となる．くびれが生じた速度  $u_j$  の噴流が高温面に

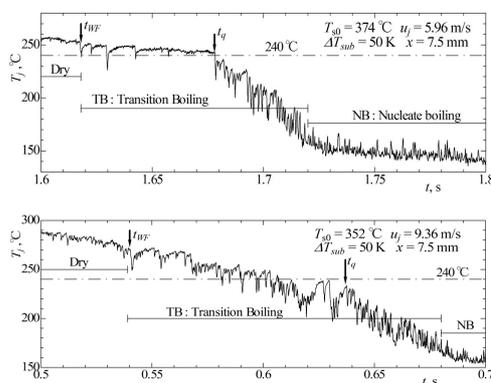


図 4．WF 近傍の固液接触温度変化

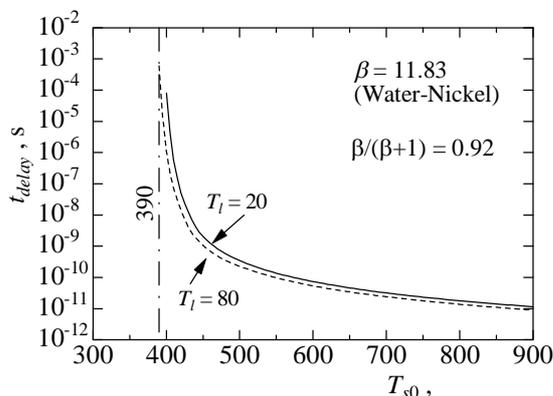


図 5．固液接触による自発核生成の遅れ時間

衝突する周期は $\lambda_{PR} / u_j$ で与えられるので、0.95 ms ~ 1.5 ms の範囲を取る。一方、図 2 の水平方向からの高速ビデオ撮影動画に基づき、WF からの液滴の射出時間間隔 $\tau$ を  $T_{s0}$  に対して測定した結果の一例を図 7 に示す。各シンボルは噴流速度で区分されている。また、グラフ右端の実線、一点鎖線、破線は、それぞれ対応する噴流サブクール度の条件で、図 4 に示す温度履歴において、 $t_{WF} \sim t_q$  までの時間幅を一時的な固液接触に伴う表面温度変動頻度で除した平均固液接触温度変動周期を示す。図 7 の結果より、液滴の射出周期と温度変動周期はほぼ同じオーダーで一致しているだけでなく、Plateau-Rayleigh instability で誘起される衝突噴流の流動変動周期ともほぼ一致していることが分かった。噴流の流動変動は、WF 近傍の不安定なぬれと乾き或いは、発泡に伴う液滴の射出変動と密接な関係があることが分かった。

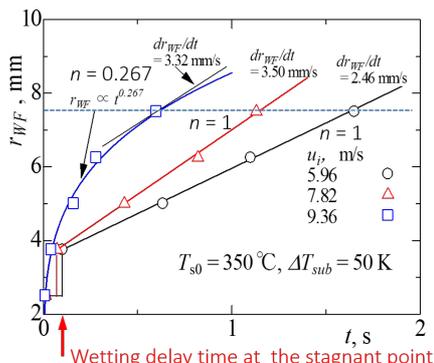


図 6. WF 位置の時間変化

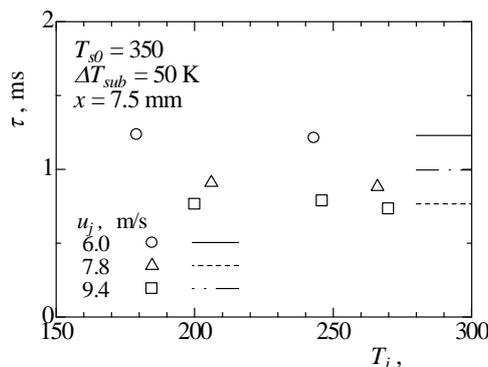


図 7. 液滴飛散周期と温度変動周期 (直線)

表 1. WF 位置時刻変化近似式の時刻のべき乗  $n$  のまとめ

$u_j$ , m/s	5.99			7.97			9.60		
$\Delta T_{sub}$ , K	30	50	70	30	50	70	30	50	70
300	1.00	0.36	0.27	0.54	0.41	0.37		0.37	0.42
350	1.00	1.00	0.31	0.58	0.45	0.28	0.67	0.34	0.27
400	1.00	1.00	0.32	0.74	0.47	0.25	0.56	0.48	0.26

#### 4 - 2. WF 移動のモデル化と実験結果との比較検討

前節で述べた WF の半径位置の挙動および WF 近傍の界面温度変動測定結果より、初期温度 400 以下の Ni 高温面上で WF がよどみ点より拡大する時間域での WF 位置の温度は非定常加熱を受ける液体の自発核性温度以下であることが明らかになり、少なくとも冷却開始初期のよどみ点近傍でのぬれ開始遅れの冷却時間帯を除き、固液接触限界温度は WF の挙動とは独立な関係になることが推定される。そこで、WF 位置を規定する流体側の支配条件として表面温度の代わりに熱流束支配型、すなわち沸騰曲線上の限界熱流束による支配モデルを検討した。同様の検討は、過去の科研課題 (基盤(C) 13650231) でも行われ、WF 近傍の核沸騰域で生じる最大熱流束と既存のサブクール衝突噴流沸騰系の限界熱流束の予測式 (門出ら, 日本機械学会論文集 B 編, 60(571), (1994), pp.932-939) との比較検討を行っている。固体側の非定常性のため、非定常冷却中の最大熱流束は、定常状態に対する限界熱流束より低い値を取り、その偏倚は固体の熱浸透率の低下とともに増大することが分かっている。しかし、WF 位置の時間変化に対する検討は全く行われていなかった。

そこで、熱流束支配型の WF モデルを以下のステップによる数値計算で作成した。

- 1) 非定常冷却中の熱流束分布を定常状態ではなく、固体側の軸対称非定常熱伝導と連成して非定常・不均一熱流束分布で与える。
- 2) 1)の計算で境界条件となる冷却面の表面熱伝達率分布を、図 2 に示す沸騰開始半径位置を境に、衝突噴流による単相強制対流層流熱伝達 (Liu, et al., J.Heat Transfer, 113(3), (1991), pp. 571) の熱伝達、核沸騰域は高熱流束域のプール沸騰熱伝達 (藤田ら, 機論 B 編, 48(432), (1982), pp.1528) で与える。
- 3) 単相熱伝達と沸騰熱伝達の境界となる沸騰開始点位置は、単相流熱伝達で固体側からの過熱による液膜流のエネルギーバランス式でバルク液温上昇を計算し、規定のサブクール度 (例えば, 10 K) に到達するまでの沸騰までの助走距離として与える。
- 4) 核沸騰域の長さ  $\Delta r_b$  を飽和衝突噴流沸騰冷却系の限界熱流束の予測式の沸騰長さに適用して算出した限界熱流束値が、固体側からの非定常熱伝導で液体へ供給する可能な熱流束に達する位置を安定なぬれ境界位置  $r_{WF}$  と定める。
- 5) WF 先端の不安定な固液接触は、Plateau-Rayleigh instability で規定される固液の非定常接触熱伝達の厳密解で短時間の除熱量を与える。
- 6)  $r_{WF}$  の時間移動は、5)の時間周期ごとに一時的なぬれ面上で熱流束が限界熱流束以下になったときに 4)のステップでの  $r_{WF}$  の再計算を実施する。

ステップ 4)で飽和沸騰限界熱流束を  $\Delta r_b$  の核沸騰域に適用する考え方は、前出の門出らのサブクール沸騰系の限界熱流束 (機論 B,60(571), 1991) の整理式と同様である。しかし、本研究との相違は、定常等熱流束加熱条件に対して、固液連成熱伝達に基づく不均一非定常加熱条件

での沸騰開始点と沸騰距離を決定する点が異なる。また、軸対称 2 次元熱伝導解析では、冷却面以外の対称面、裏面、外周は断熱条件とし、冷却面のうち乾き面は自然対流熱伝達と放射熱伝達の自然放冷の熱流束を与えた。

図 8 に熱流束支配型の WF モデルによる  $r_{WF}$  の時間履歴の予測値と実測値を比較した一例を示す。図 8 は  $T_{s0}=320$  ,  $u_j = 5.8$  m/s の条件で、 $\Delta T_{sub} = 70$ K と 50K に対する予測値を赤線、測定値を  $\blacksquare$  のシンボルで示す。図 8 の予測値を示す赤線がある有限時間ごとに縦方向に幅を有する変化は、計算ステップ 5)において、WF 位置の前進と後退の繰り返しによるものである。ステップ状の  $r_{WF}$  の増加は、WF 先端部の熱流束が限界熱流束を下回り WF 位置が前進して安定なぬれ領域が拡大することに対応する。図 8 の実測と予測値との比較より、予測値は実測値が示す上に凸の時刻のべき関数的変化を一応再現できている。すなわち、よどみ点近傍では WF の移動速度が速く、時間の経過とともに WF の移動速度が減少する定性的傾向は再現されている。しかし、定量的な一致については、さらに検討が必要である。計算ステップ 6)において  $r_{WF}$  を進める条件式について改良が必要と考えている。

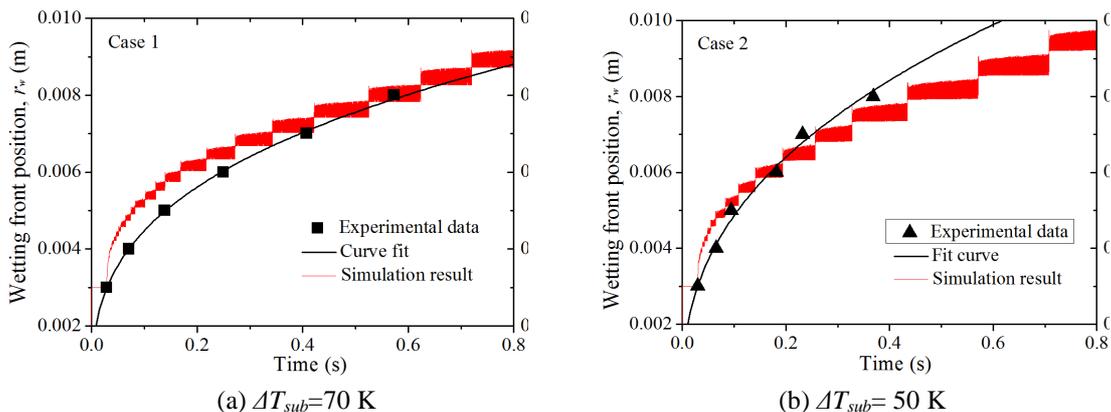


図 8 WF の時間変化 (実験と予測モデルとの比較)  $T_{s0} = 320^{\circ}\text{C}$ ,  $u_j = 5.8$  m/s

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 柳 楊, 後藤 剛, **光武 雄一**, 椿耕太郎, 門出政則, 衝突噴流冷却中のウエットングフロントの拡大 実験結果と解析モデルの提案, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演会論文集, (2019.5).
2. 門出政則, **光武 雄一**, 高温面上の落下液滴蒸発時間と蒸気発生限界との関連について - 固液接触と熱流束について -, 第 56 回日本伝熱シンポジウム講演会論文集, (2019.5).
3. Yang Liu, Shoieb Mohamed, **Yuichi Mitsutake**, Koutarou Tsubaki, Masanori Monde, Inherent Characteristics of Interface Temperature Behavior after Sudden Contact of Liquid and Oxidized Hot Metal Surface, 第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (2018.5).
4. **Yuichi Mitsutake**, Akito Fukuda, Yang Liu, Mohamed Shoieb Abdelgawad, Xiao Jun Li, Koutarou Tsubaki, Masanori Monde, Measurement of surface temperature and heat flux on vicinity of wetting front during subcooled water jet quenching, The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (ICBCHT2018), (2018.3)
5. **光武 雄一**, 椿耕太郎, Shanzida Shanta, 副島正義, 高温面上に連続液滴衝突時の非定常沸騰現象, 2017 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, (2017.9)

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

該当なし

〔その他〕

ホームページ等 該当なし

## 6. 研究組織

(1)研究分担者 該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 柳 楊, 門出政則, 福田章人, 中井 浩, 後藤 剛

ローマ字氏名: LIU Yang, Monde Masanori, Fukuda Akito, Nakai Hiroshi, Goto Takeshi