

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：17201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04314

研究課題名(和文) マルチタイムスケール伝熱モデルによる高温面クエンチ冷却モデルの高度化

研究課題名(英文) Sophisticated modeling for quenching of a hot surface with a multi-time scale transient heat transfer model

研究代表者

光武 雄一 (Mitsutake, Yuichi)

佐賀大学・海洋エネルギー研究所・教授

研究者番号：20253586

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：高温面のサブクール衝突噴流非定常冷却の予測に不可欠な高温面上で共存する単相強制対流、核沸騰、および遷移沸騰領域の伝熱領域の境界位置を決定する方法を提案し、その妥当性を実験データによって確認した。非定常冷却中の伝熱に対して、既存の単相強制対流および核沸騰の伝熱相関式が適用できることを明らかにした。モデル化が難しい遷移沸騰伝熱に対して、ぬれ先端での1ms以下の時間スケールで生じる前進・後退変動を支配する擾乱波の周期に注目した固液接触熱伝導解析解で時間平均伝熱量を評価した。高温面の軸対称非定常熱伝導解析と高温面上で共存する各熱伝達伝熱との連成計算を行い、安定なぬれ面拡大の時間変化の予測結果を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

遷移沸騰領域の伝熱過程は、不安定な固液接触に伴う固体側の非定常熱伝導と連成した非定常性の強い伝熱過程であり、一義的に熱伝達率あるいは熱流束を与えるのが困難であった。本研究では、高温面衝突噴流冷却時の安定なぬれ面の先端部のWetting Front (WF)と呼ばれる三相境界線の前進と後退が噴流界面の不安定波長周期に支配されるという観測結果に基づいた遷移沸騰熱流束の評価法を提案した。遷移沸騰領域の伝熱モデルを組み込んだ高温面の非定常熱伝導計算は、実験でのWFの時間挙動を非常によく再現できることを示した。本研究成果は、今後材料製造プロセスの冷却温度制御の精度向上への寄与が期待される。

研究成果の概要(英文)：A technique has been proposed to determine the boundaries of coexisting multiple heat transfer modes, single-phase forced convection, nucleate boiling, and transition boiling on a hot surface during subcooled impinging jet quenching. Existing heat transfer correlations for single-phase forced convection and nucleate boiling are found to apply to non-uniform and unsteady surface temperature surfaces. From the highspeed visual observation, the transition boiling is characterized by advancing and receding wetting front in sync with the period of the disturbance wave. The time-averaged heat transfer rate in transition boiling was evaluated with the analytical solution of transient heat conduction in solid-liquid contact. Coupling analysis of axisymmetric unsteady heat conduction of a hot surface with the coexisting heat transfer modes provides a better understanding of the behavior of the stable wetting during quenching.

研究分野：熱工学

キーワード：非定常遷移沸騰伝熱 高温面のぬれ ウエットングフロント 衝突噴流冷却 非定常熱伝導

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

幅広い工業的応用分野を持つ水噴流を用いた高温面の非定常沸騰冷却は、均一かつ正確な冷却温度履歴制御や除熱能力向上など一層の冷却技術の高度化が求められている。水の自発核性温度 300°C を遥かに超える高温面の冷却では、膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰、単相強制対流の各伝熱様式が伝熱面上に共存し、その分布は固液接触が生じている高温面のぬれ面拡大と伴に変化する。高温面上のぬれ領域とその外側の乾き領域との固液接触境界Wetting Front (以後WFと呼ぶ)の前進に伴い、WF内側のぬれ面上の核沸騰や単相強制対流伝熱域の分布が変化するため、WFの挙動は非定常沸騰冷却を支配する重要なパラメータである。しかしながら、WF挙動の予測手法は確立されていない状況にあった。

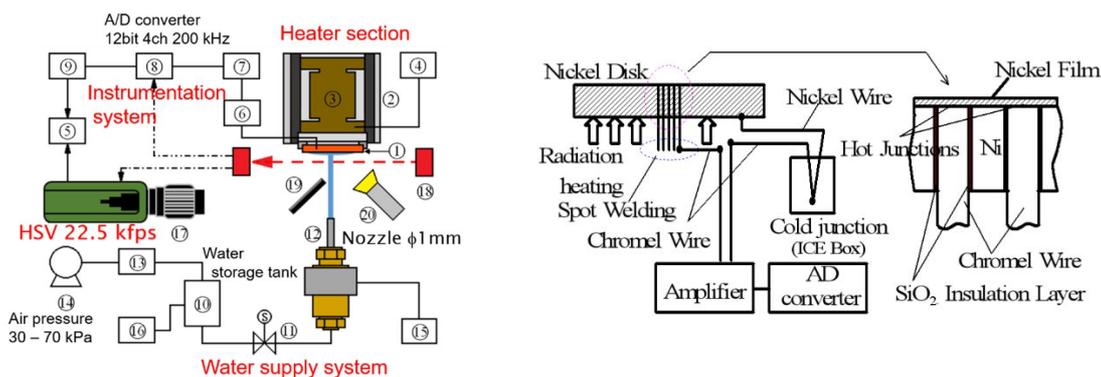
2. 研究の目的

本研究では、時間応答に優れた表面温度計測法に基づく局所熱伝達の測定とWFの挙動の観察に基づき、高温面上の伝熱様式を支配する 1) 噴流直下のよどみ域でのぬれ回復条件、および 2) よどみ域からのWFの前進挙動を予測する流体側の熱伝達と固体側の非定常熱伝導との連成伝熱モデルを構築し、局所の沸騰現象に基づいた非定常噴流沸騰冷却特性予測手法の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究は、1) 水平下向き高温円板の衝突噴流冷却実験での局所熱伝達測定と流動状況観察に基づく非定常局所伝熱特性と冷却過程の現象把握、2) WF 近傍での不安定な固液接触頻度についての統計情報に基づいた遷移沸騰伝熱の定式化の検討、3) 高温面の軸対称 2 次元非定常熱伝導と表面上の伝熱領域のモデルとの連成計算に基づく WF 挙動の予測 の三本立てで実施した。

伝熱計測は、図 1 に示す Ni 円板上に線径 0.32mm のクロメル細線と $3\ \mu\text{m}$ の Ni 薄膜で形成した時間応答遅れ $74\ \mu\text{s}$ の高速応答表面温度センサーを用いて、サンプリング周波数 200kHz で取得した温度履歴から熱伝導逆問題解析によって WF 近傍の不安定な固液接触に対応した表面温度・表面熱流束と同期して流動状況を高速ビデオ撮影による評価を行った。実験は、初期温度 $280\sim 370$ 、試験流体水、噴流直径 1mm 、噴流速度 $6\sim 10\text{m/s}$ 、噴流サブクール度 $30\sim 70\text{K}$ の範囲に亘り実施した。遷移沸騰域で繰り返される μs オーダーの固液接触伝熱を固液接触時の非定常熱伝導の厳密解に基づいて評価した平均熱流束で定式化を試みた。



1. Nickel disk, 2. Container, 3. Radiation heater, 4. Block heater controller, 5. PC, 6. Ice box, 7. Isolated DC amplifier,
8. A/D converter, 9. Data logger, 10. Water storage tank, 11. Electromagnetic valve, 12. Circular nozzle, 13. Air pressure regulator, 14. Air compressor, 15. Nozzle heater controller, 16. Tank heater controller, 17. High-speed video camera,
18. Laser-photodiode detector, 19. Mirror, 20. Metal halide light

図 1 実験装置全体図・表面温度計測システム

4. 研究成果

(1) 衝突噴流冷却の流動状況 図 2 に初期温度 350 、水温 $T_j=50$ 、噴流径 $d_j=1\text{mm}$ 、噴流速度 $u_j=9.4\text{m/s}$ で撮影した流動状況写真とその模式図を示す。衝突噴流冷却中の高温面は、噴流衝突(よどみ)点から放射状に広がる液膜流で覆われるぬれ面とその外側の乾き面となる。ぬれ面は中心部の高輝度領域となる単相対流伝熱(SC: Single-phase Convection)領域とその外周部の低輝度の核沸騰(NB: Nucleate Boiling)領域に分類される。高々 1mm の沸騰長 L の範囲での激しい沸騰核生成によって液膜流から飛散液滴を生じている。

液膜流に注目すると、衝突噴流自由界面の Plateau-Rayleigh 不安定により波長 $\lambda_{PR}(=4.508d_j)$ 毎に形成された噴流のくびれが数珠状の液塊となって高温面への衝突周期 λ_{PR}/u_j ごとに擾乱波が発生し、高温面上を液膜流に随伴して外周部まで伝播していた。さらに、擾乱波は、核沸騰領域を越波して乾き面領域へ前進し一時的な固液接触を生じるが、乾き面上での急速加熱で発生する蒸

気圧で全て飛散されてしまい、元の乾き状態に戻る。このように核沸騰領域の外周部は、擾乱周期毎にぬれ先端の前進と後退を繰り返す不安定なぬれ領域、つまり遷移沸騰(TB: Transition Boiling)領域を形成することが分かった。

以降の説明を容易にするため、模式図に示す各伝熱領域の境界位置として、ここでは便宜的に正味の蒸気発生を生じる沸騰開始点(ONB: Onset of NB)位置 r_{ONB} 、安定なぬれ状態の核沸騰領域の上界位置 r_{CHF} 、不安定なぬれ先端(WF: Wetting Front)位置 r_{WF} とそれぞれ定める。図3は、初期温度 280 と 380 に対して衝突噴流冷却中核沸騰領域で液膜流が飛散している r_{def} の時間履歴をビデオ解析で求めた結果を示す。図2で示されるように WF 位置は非定常性が強く、大量の飛散液滴の存在で半径位置確定の不確かさが大きいので、 r_{WF} 、 r_{CHF} 位置の代わりに r_{def} を測定した。ただし、いずれも r_{def} に対する相対的位置関係が変化しないため、参照点として利用できる。

図3より、 r_{def} の挙動は時刻 t のべき乗の関係で整理されることが分かる。また、初期温度によりべき乗の指数が 0.3~0.6 の範囲で違う。いずれも上に凸の変化であり、曲線の勾配すなわち移動速度、冷却開始から時間が立つに従って小さくなる傾向を示すことが分かる。この特性が放射状の液膜流で覆われる衝突噴流沸騰系固有の性質なのか、また初期温度や噴流速度・サブクール度が指数に及ぼす影響について更なる検討が必要と考えている。

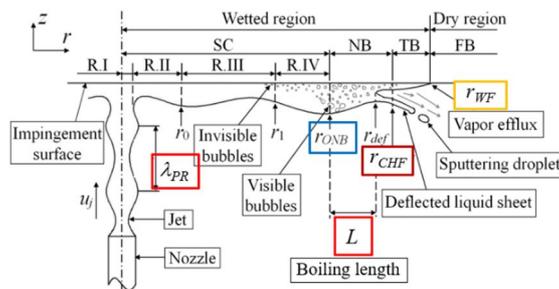
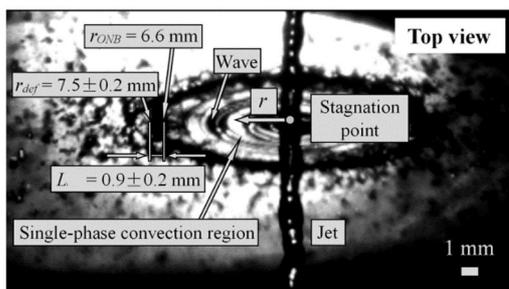


図2 下向き水平高温面の衝突噴流冷却中の沸騰流動状況

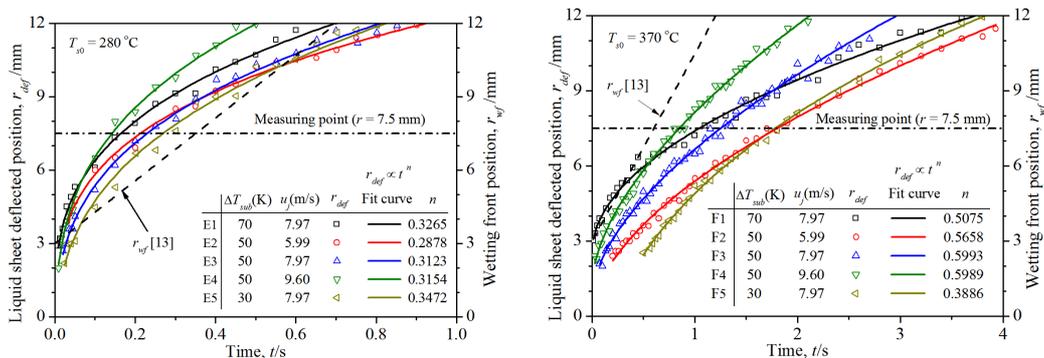


図3 衝突噴流冷却中の液膜飛散位置 r_{def} の時間履歴 (a)初期温度 280 , (b)初期温度 370

(2)非定常局所熱伝達特性 図4に噴流よどみ点($r=0$)から 7.5 mm の位置で得られた温度測定値に基づく表面温度・表面熱流束の時間変化のグラフ(左)と沸騰曲線(右)の一例を示す。時間履歴のグラフには測温位置が3つの伝熱様式 TB, NB および SC で支配される時間範囲をそれぞれ矢印で記入した。なお、WF が測温点到達前の乾き面の状態に対して、膜沸騰(FB: Film Boiling)で分類しているが、一般的なプール沸騰とは異なり沸騰曲線には高過熱域の右上がり曲線の膜沸騰領域および極小熱流束(MHF: Minimum Heat Flux)が存在しない。

表面熱流束 q_w の時間変化に注目する。WF が測温点近傍に到達する TB 開始後より q_w は不安定な固液接触に対応した大きな変動幅を伴いながら最大熱流束、つまり核沸騰領域の開始時刻 0.1 s まで急上昇する。これと対応して、TB 領域の表面温度 T_w の温度変動振幅は、時間と共に拡大しながら冷却速度が大きくなる。温度変動幅の増加は、温度変化履歴において固液接触継続時間が長くなるためである。さらに、TB 領域での表面温度降下の時間間隔のヒストグラムを評価した結果、最頻度の時間間隔が実験条件に関わらず、PR 不安定波の周期 λ_{PR}/u_j と非常によく一致し、TB 領域の不安定な固液接触伝熱が円形噴流界面の不安定波長で支配される観察結果を裏付けるものである。

T_w の時間履歴上の \square のマークは、遷移沸騰域で q_w が最大熱流束まで急増開始、つまり T_w の冷却速度の増大を開始するクエンチ開始時刻を示す。本実験範囲で得られたクエンチ温度 T_q 、すなわちクエンチ開始時刻の T_w は、水の自発核生成温度約 300 よりも低い 230~260 の範囲であった。沸騰曲線のグラフの破線と一点鎖線の直線は、それぞれ等熱流束面に対する単相衝突噴流熱伝達の相関式およびプール核沸騰熱伝達の相関式⁽⁴⁾を参考までに記入したものである。本実験で得られた非定常・不均一熱流束・不均一温度分布の伝熱面上の局所熱伝達特性は、定常状態の相関式の特性とよく一致し、相関式がそのまま適用されることが分かる。また、低サブクール条

件を除き、図4に示されるように沸騰曲線上のONB点の ΔT_{sat} は、SCとTB伝熱領域の相関式の交点で与えることができる。

一方、核沸騰伝熱の上限となる最大熱流束は、沸騰曲線のグラフ中 q_c の点線で示される等熱流束加熱面に対する飽和衝突噴流沸騰系の限界熱流束(CHF: Critical Heat Flux)の予測値と比較的良好一致し、図示がない他の全実験条件を含めて相対誤差20%以内で一致した。ただし、CHFの予測式に含まれる代表寸法の沸騰長は、図2で示すNB領域の沸騰長 L の実測値を与えている。つまり、非定常冷却中のNB領域の沸騰長 $L = r_{CHF} - r_{ONB}$ が正しく予測できれば、最大熱流束を定常飽和沸騰のCHFの予測式で評価できることが分かった。なお、 q_{max} の破線で示される従前の等熱流束加熱面のサブクール衝突噴流沸騰の限界熱流束に基づく最大熱流束の予測値は、測定値に対して約1/4となる過小評価となり、適用できないことが分かった。次に遷移沸騰域に注目すると、固液接触に伴う q_w の大きな変動によって、大きなループを描き、一般的な沸騰曲線(面全体の時間平均値)で示される右下がりの特性とは大分異なる。

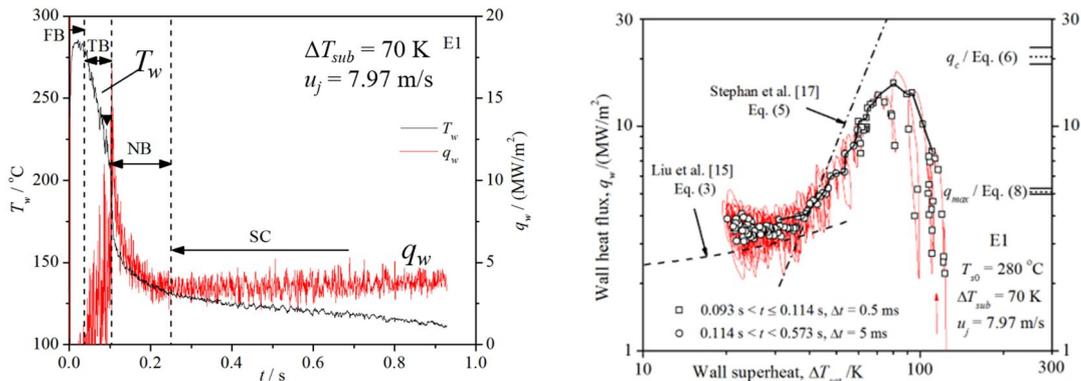


図4 表面温度・表面熱流束の時間変化と沸騰曲線

(測温位置 7.5 mm, 初期温度 280 , 噴流サブクール度 70 K, 噴流速度 8.0 m/s)

(3) 遷移沸騰伝熱モデル 先述の非定常冷却中の高温面上の流動沸騰状況観察と非定常伝熱計測に基づいて、遷移沸騰領域の不安定な固液接触を伴う非定常熱伝導モデルを検討した。図5に遷移沸騰伝熱の素過程の模式図を示す。Plateau-Rayleigh不安定周期 $\tau_{PR} = \lambda_{PR}/u_j$ 毎に核沸騰域の上界位置 r_{CHF} を超えた乾き領域への擾乱波の前進によって、乾き面との固液接触で先行冷却が始まり、沸騰開始で擾乱波が飛散される先行冷却時間 τ_{pc} 後に乾き面に戻る。遷移沸騰域の先行冷却長 λ_{pc} は、擾乱波先端のWFが噴流速度 u_j で τ_{pc} の時間内に移動する距離なので、式(1)で示されるように λ_{pc} と λ_{PR} の比は、 τ_{pc} と τ_{PR} の比 ξ と等しい。ここでは、沸騰開始遅れ時間で支配される τ_{pc} を一義的に与えることが難しいので、 ξ を唯一のモデルパラメータとして導入する。

図5に示した遷移沸騰領域でのPR不安定周期 τ_{PR} 毎に繰り返される先行冷却時間 τ_{pc} は概ね1ms以下の短時間で生じる早い時間モードでの固液接触のため、高温面の軸対称2次元非定常熱伝導解析の境界条件への適用は数値計算上の問題を生じる。すなわち、WF先端部分の非常に狭い領域で界面での無限大の温度勾配、つまり無限大の界面熱流束から開始される接触熱伝導熱流束の境界条件のため、数値解析での精度を保证するには時間ステップや空間分割幅を非常に小さく取る必要がある。遷移沸騰域のWFの前進と後進に伴う伝熱の時間スケールと高温面上をゆっくりと拡大する安定なぬれ面の伝熱の時間スケールと大きく異なるため、遷移沸騰域の時間スケールに合わせた固体側の非定常熱伝導解析は、非常に大きな計算資源を消費する。

そこで、本研究では遅い時間スケールに合わせた固体側の数値計算で十分な計算精度が得られるように短時間で繰り返される遷移沸騰域の表面熱流束を固液接触非定常熱伝導の厳密解に基づいた時空間平均値でWF近傍の幅 λ_{PR} の先行冷却領域の冷却熱量を与える。1 kHzを超える

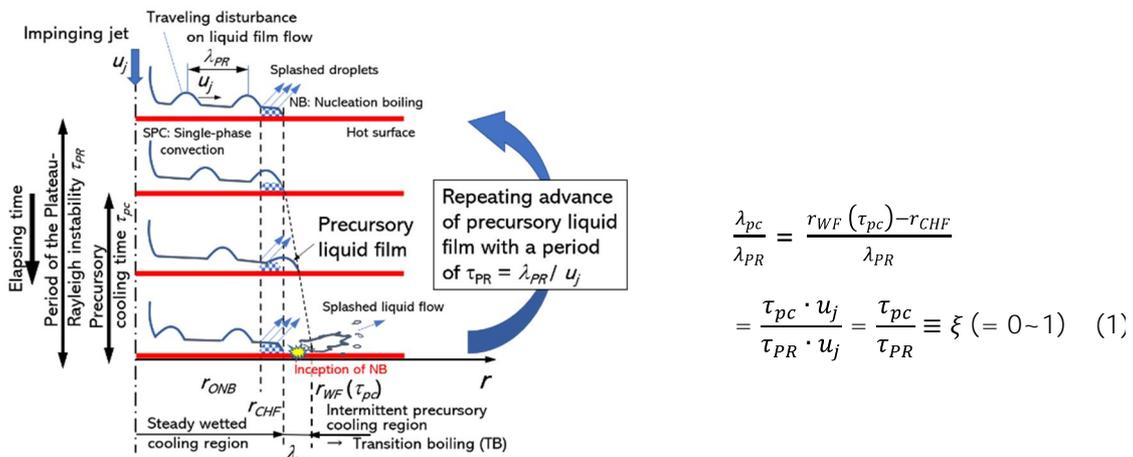


図5 遷移沸騰領域での非定常固液接触モデル

$$\frac{\lambda_{pc}}{\lambda_{PR}} = \frac{r_{WF}(\tau_{pc}) - r_{CHF}}{\lambda_{PR}}$$

$$= \frac{\tau_{pc} \cdot u_j}{\tau_{PR} \cdot u_j} = \frac{\tau_{pc}}{\tau_{PR}} \equiv \xi \quad (= 0-1) \quad (1)$$

固液接触に伴う表面温度・表面熱流束変動は固体内部での減衰が早く表面近傍でしか観測されないため、簡易的な取り扱いで十分である。ここでは、一次元非定常熱伝導の解析解、式(2)を用いる。式(2)は、初期温度 T_{s0}, T_{l0} の固液の半無限体接触時の接触界面の熱流束の時間履歴を与える。式中の記号 e_s は固体の熱浸透率、 β は固液の熱浸透率比 e_s/e_l を示す。

$$q_w(t) = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{(T_{s0} - T_{l0})e_s}{\sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

式(2)より $t = 0 \sim \tau$ の間の積算熱流束 $Q_c(\tau)$ は、式(3)で与えられる。

$$Q_c(\tau) = \int_0^\tau q_w(t) dt = \frac{2\beta}{1 + \beta} \frac{(T_{s0} - T_{l0})\sqrt{(\rho ck)_s}}{\sqrt{\pi}} \cdot \tau^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

さらに、 $t = 0 \sim \tau$ の間の時間平均熱流束 $q_{w,c}(\tau)$ は式(4)で与えられ、その値は丁度 $t = \tau$ における局所熱流束の2倍と等しいことが分かる。

$$q_{w,c}(\tau) = \frac{Q_c(\tau)}{\tau} = \frac{2\beta}{1 + \beta} \frac{(T_{s0} - T_{l0})\sqrt{(\rho ck)_s}}{\sqrt{\pi\tau}} = 2q_w(\tau) \quad (4)$$

図5において幅 λ_{pc} の遷移沸騰域 $r = r_{CHF} \sim r_{CHF} + \lambda_{pc}$ の局所位置では固液接触時間 τ が $\tau = \tau_{pc}$ から $\tau = 0$ まで変化するので、幅 λ_{pc} の時空間平均熱流束は、式(5)で与えられる。ただし、 r_{CHF} を基準とする空間座標 $\eta = r - r_{CHF}$ 位置での固液接触時間は $\tau = \tau_{pc}(1 - \eta/\lambda_{pc})$ となる。

$$q_{wm}(\tau_{pc}) = \frac{1}{\lambda_{pc}} \int_0^{\lambda_{pc}} q_{wc}(\tau(\eta)) d\eta = \frac{1}{\tau_{pc}} \int_0^{\tau_{pc}} q_{wc}(\tau) d\tau = \frac{4\beta}{1 + \beta} \frac{(T_{s0} - T_{l0})\sqrt{(\rho ck)_s}}{\sqrt{\pi\tau_{pc}}} = 4q_w(\tau_{pc}) \quad (5)$$

先行冷却期間 τ_{pc} 中の冷却範囲幅 λ_{pc} の平均熱流束 $q_{wm}(\tau_{pc})$ に基づいて、PR不安定波の1周期 τ_{PR} 中の冷却範囲幅 λ_{pc} の等価熱流束 q_{we} は、図5の1周期中の先行冷却時間と乾き状態の時間(断熱)に分けて時間積分を求めると式(6)で与えられる。ただし、 ξ は式(1)で定義した1周期に対する固液接触を伴う冷却時間を規定するパラメータである。

$$q_{we} = \frac{1}{\tau_{PR}} \left\{ \int_0^{\tau_{pc}} q_{wm}(\tau_{pc}) d\tau + \int_{\tau_{pc}}^{\tau_{PR}} 0 d\tau \right\} = q_{wm}(\tau_{pc}) \frac{\tau_{pc}}{\tau_{PR}} = \xi \cdot q_{wm}(\tau_{pc}) \quad (6)$$

(4)WF位置の予測解析 (1)~(3)で述べた実験結果および単相伝熱・核沸騰領域に対する伝熱相関式の適用可能性の検討、固液接触熱伝導に基づく遷移沸騰領域の熱流束評価の結果に基づき、図2に示される衝突噴流冷却中の伝熱領域およびぬれ先端を定める r_{ONB} , r_{CHF} , r_{WF} の時間履歴を軸対称2次元非定常熱伝導解析で評価した。

解析での初期条件として、 r_{ONB} は噴流よどみ領域半径 $= 1.5d_j$ を単相對流伝熱のぬれ面とした。冷却開始後は、 r_{ONB} は時間ステップ毎の高温面上で単相熱伝達と核沸騰熱伝達の熱流束が一致する位置、 r_{CHF} は r_{ONB} 点からの沸騰長 L を未知数として核沸騰熱流束が飽和限界熱流束の予測値と一致する位置をそれぞれ反復計算で決定して、単相熱伝達と核沸騰熱伝達の熱伝達率の相関式^(3,4)を境界条件として与えた。さらに、ぬれ先端位置 r_{WF} は r_{CHF} から先行冷却域長 $\lambda_{pc} = \xi\lambda_{PR}$ で与え、遷移沸騰域の熱流束を式(6)で与えた。

図6に予測の一例を示す。図6の実線と破線は、それぞれ $\xi = 0.2$ と $\xi = 0$ の場合に対する結果で、前者はWF近傍の遷移沸騰域での先行冷却を考慮した予測、後者は先行冷却を無視した安定なぬれ面上での冷却のみを考慮した予測結果を示す。グラフ中には $r = 7.5$ mm での T_w と q_w の時間履歴の予測値を示す。 $\xi = 0.2$ に対する r_{WF} の時間変化は、図3で示した時刻のべき乗で表現される実験結果を定性的によく再現できることが分かる。 $\xi = 0$ と 0.2 の比較から、当然のことながら、安定なぬれ面の外側の遷移沸騰熱伝達域での先行冷却を考慮しないと r_{WF} の拡大が非常に遅く、実験で得られた $r = 7.5$ mm での表面温度変化とは全くかけ離れることが分かる。

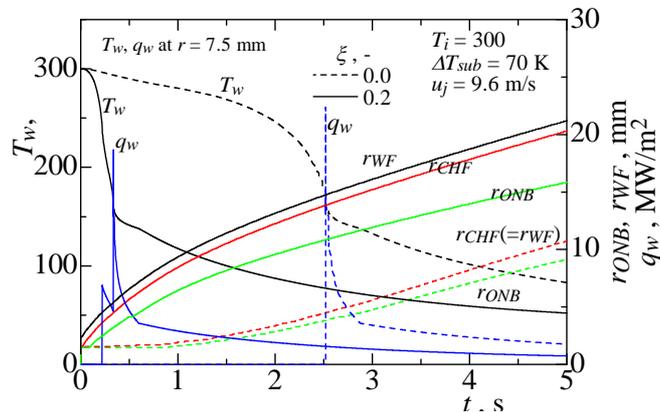


図6 r_{WF} , r_{CHF} , r_{ONB} の時間変化、および $r = 7.5$ mm における表面温度・表面熱流束の変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Yang Liu, Hiroshi Nakai, Yuichi Mitsutake, Masanori Monde	4. 巻 29
2. 論文標題 Experimental study on transient boiling heat transfer around wetting front during subcooled jet impingement quenching	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Thermal Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 9-17
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yang Liu, Yuichi Mitsutake, Masanori Monde	4. 巻 162
2. 論文標題 Development of fast response heat transfer measurement technique with thin-film thermocouples	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 120331
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120331	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 光武 雄一	4. 巻 62
2. 論文標題 高温面冷却中の非定常遷移沸騰領域の伝熱計測手法とその応用	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本伝熱学会誌	6. 最初と最後の頁 29-34
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Yuichi Mitsutake
2. 発表標題 Transient boiling heat transfer characteristics during impinging jet quenching of a hot surface
3. 学会等名 Second Asian Conference on Thermal Sciences (2nd ACTS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 光武雄一
2. 発表標題 衝突噴流冷却中の高温面上のぬれ先端の挙動モデルの検討
3. 学会等名 第60回日本伝熱シンポジウム
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	柳 楊 (Liu Yang)		
研究協力者	門出 政則 (Monde Masanori)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------