

柱状噴流を用いた冷却の数値流体解析

Water Quenching CFD (Computational Fluid Dynamics) Simulation with Cylindrical Impinging Jets

小林 一 暁* 中村 修 原口 洋 一
 Kazuaki KOBAYASHI Osamu NAKAMURA Yoichi HARAGUCHI

抄 録

柱状噴流による鋼板冷却の数値流体解析モデルを構築した。鉄鋼冷却プロセスは水-空気が混在する混相流となることから、流体解析には気液混相流解析手法の一つである二流体モデルを用いた。また沸騰熱伝達には、鋼板表面近傍の水温と鋼板表面温度を関数として、沸騰状態を切り替え、沸騰状態に応じて異なる熱伝達予測式を適用した。構築した手法を用いて、高温鋼板を柱状噴流により冷却する系の数値解析を行い、同様の実験と比較することでその精度検証を行い、鋼板温度の推移や沸騰曲線がよく表現されることを確認した。

Abstract

A computational fluid dynamics simulation model for water quenching processes with cylindrical impinging jets is developed. Water and air multiphase flow often appears in water quenching processes, thus two-fluid model is applied to calculate the multiphase flow. Some empirical equations are used to determine boiling heat transfer. Boiling state is distinguished by plate surface temperature and water temperature nearby surface, and appropriate empirical equations are applied according to the state. To confirm the validity of the model, the plate cooling speed and the boiling curve with cylindrical impinging jets are calculated and compared with experimental one, and it is found that both are in good agreement.

1. 緒 言

近年、高強度化や延性向上といった鉄鋼材料の高機能化、また低合金化や行程省略等によるコスト低減のニーズの高まりとともに、TMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術の重要性が増している。この技術の重要な要素の一つとして、冶金技術や制御圧延技術と並んで、高精度な水冷却温度制御技術が挙げられる。

TMCP 鋼の製造工程では狙いとする組織を作り込むため、温度や圧下率が厳密に制御された圧延工程を経た鋼材を、必要な速度、停止温度で冷却する。ここで、要求される冷却速度を満足させるため、冷却プロセスにおいては冷媒として水を用いて、冷却水を噴射する冷却装置が用いられることが多い。しかしながら高温鋼材の水冷は沸騰という複雑な現象を伴うため、高精度な冷却制御は困難である。

水の沸騰状態は一般によく知られるように、被冷却面温度が高い状況から膜沸騰、遷移沸騰、核沸騰と変化する。高温領域で発生する膜沸騰では、高温の被冷却面と冷却水との間に膜状の蒸気層が存在し、被冷却面と冷却水が被冷

却面に直接接触しない状態となっている。したがって蒸気膜を介して伝熱が行われることから、被冷却面温度は高いものの、その熱流束は小さい (図1(a))。次に冷却水の飽和温度程度の温度領域で発生する核沸騰では、冷却水と被冷却面の大部分が直接接触しており、盛んに蒸気気泡が発生する状態となっている。核沸騰では活発な相変化と、発生した蒸気気泡による冷却水の攪拌効果から、熱伝達が効率よく行われ、高い熱流束が得られる (図1(b))。最後にこれらの中間の温度領域で生じる遷移沸騰は、膜沸騰と核沸騰が混合した状態として説明される。すなわち被冷却面温度の低下に伴い、被冷却面と冷却水との接触が始まり、温度低下と共にその接触が増え、熱流束が増加する。

このように沸騰状態、伝熱面温度、熱流束の間には密接な関係があり、それを図示したものが沸騰曲線である (図1(c))。沸騰曲線における膜沸騰-遷移沸騰の接続点を MHF (Minimum Heat Flux: 極小熱流束) 点、遷移沸騰-核沸騰の接続点を CHF (Critical Heat Flux: 限界熱流束) 点と呼び、その点を境に沸騰状態が変化することから重要とされる。

* プロセス研究所 プロセス技術部 主任研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

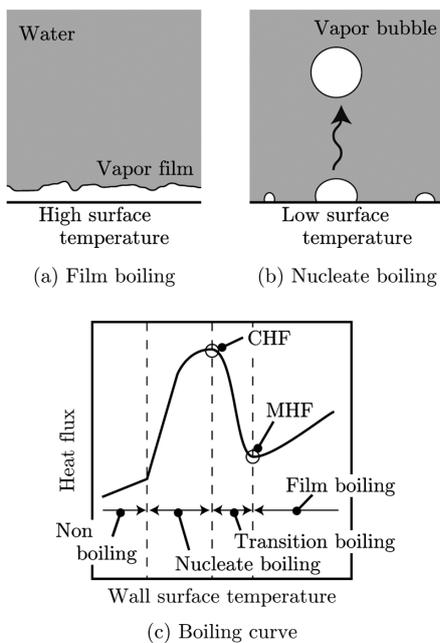


図1 沸騰現象の模式図と沸騰曲線
Schematic diagram of boiling phenomenon

特にこの曲線における遷移沸騰領域においては伝熱面温度の低下と共に熱流束が増加することから、伝熱面における温度ばらつきを助長したり、冷却停止温度制御を困難にするといった問題が生じやすい。近年においては鋼材特性発現のために遷移沸騰領域における冷却が要求されることが多く、冷却予測技術ならびに冷却プロセス制御技術の高度化が求められている。

ここで高精度な冷却プロセス制御を行うためには、冷却される鋼材の各場所において沸騰曲線がどのように表されるかを知ることができればよい。ところが冷却水の沸騰状態は鋼材表面温度の他、表面性状、冷却水温度、滞留水の流動状態などにも大きく影響を受けることから、その結果現れる沸騰曲線も時間的、空間的に大きく変化する。このような理由により水冷プロセスの高精度な予測および制御は困難とされる。

一方、近年の数値解析技術の進歩により、水冷現象に影響を与える冷却水の流動を直接捉えることが可能となってきた。例えば Kunugi²⁾ や梅村ら³⁾ は水と空気との界面を高精度に追跡可能な気液混相流解析手法を構築し、沸騰や凝縮といった相変化を含む流動の解析に適用している。また Narumanchi ら⁴⁾ は電子デバイスの冷却を対象として、核沸騰におよぼす衝突噴流の影響を調査している。

ところが Kunugi や梅村らの手法は冷却水と水蒸気との界面挙動を詳細に追跡せねばならないことから、鉄鋼冷却プロセスのように大規模な装置の解析に適用することは、計算負荷の観点から困難である。また Narumanchi らの手法は被冷却面温度が比較的低温である非沸騰および核沸騰のみを対象としており、鉄鋼冷却プロセスのように被冷却面温度が高温で、膜沸騰から非沸騰まで混在するプロセ

スへの適用は不可能である。

そこで本報告では、気液混相流を解析負荷が低く、効率良く解析可能な数値解析手法に、冷却水と鋼板温度により変化する沸騰状態を反映させた高温鋼材の水冷予測手法の構築を行った。

2. 解析手法

2.1 流体解析手法

熱間圧延の ROT (Run Out Table) に代表される鉄鋼水冷プロセスにおける流動は、噴流や滞留水といった冷却水と、空気や水蒸気といった気体の混相流となることから、流体解析手法には混相流の取り扱いが可能な手法を選択する必要がある。

ここで気液混相流の主な解析手法として、一流体モデルと二流体モデルが挙げられる。

一流体モデルは気体と液体を一つの速度場で表現し、気液の流動状態を直接計算する手法である。気体と液体の区別は識別関数、例えばある解析格子が気体で満たされていれば0、液体で満たされていれば1、その中間の値であれば気液界面とする関数を用いて行う。識別関数の移流を計算することで界面を追跡し、気液相互作用や界面張力を含む気液混相流を直接的に解析する。

一流体モデルの代表的手法としては VOF (Volume Of Fluid) 法⁵⁾ や Level Set 法⁶⁾ が挙げられる。一流体モデルでは、例えば飛散する水滴や、水中を上昇する気泡の形状といった混相流の詳細な情報まで得ることができる反面、解析したい水滴や気泡を解像できるような詳細な解析格子が必要となり、解析格子数が膨大になる欠点がある。なお先に示した Kunugi²⁾ や梅村ら³⁾ の手法も一流体モデルである。

一方、二流体モデルは気体と液体それぞれに速度場を割り当てる手法であり、発電所の蒸気発生管群における流動解析など、大規模な解析に用いられている。気体と液体の区別は一流体モデル同様、識別関数により行う。しかしながらある解析格子において識別関数が0と1の中間の値となる場合について、気体が少ない場合は気体が気泡、液体が少ない場合は液体が水滴といった分散体として存在すると見なし、気液間の相互作用を計算する。このように液体や気体の微細な流動様式や相互作用はモデルにより計算することで、詳細な解析格子を必要とせずに気液混相流の解析が可能となる。

ただし実現象として現れる流動様式は、流速、気液率、重力に対する流動方向、管径、表面張力など様々なパラメータにより複雑に変化する。そのために全ての状態に対して流動様式を完璧に表現できるモデルは存在しない。したがって解析する対象に合わせて、実際の流動様式をよく表現可能なモデルを選択する必要がある。

鉄鋼冷却プロセスにおいては冷却水が高い速度で噴射される。そのため空気や水蒸気といった気体が、プロセス全

体の流動様式に及ぼす影響は限定的と考えられ、その詳細な情報は必要とされないと考えられる。そこで計算負荷が低く、より広範囲な領域を解析可能な二流体モデルを選択した。なお解析にはアドバンスソフト(株)の Advance/FrontFlow/MP を使用した。

二流体モデルにおいて用いられる支配方程式を以下に示す。

- 気相と液相の体積割合

$$\sum_m \alpha_m = 1 \quad (1)$$

- 質量保存方程式

$$\frac{\partial(\alpha_m \rho_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \mathbf{u}_m) = \Gamma_m \quad (2)$$

- 運動量保存方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_m \rho_m \mathbf{u}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_m \rho_m \mathbf{u}_m \mathbf{u}_m) \\ = -\nabla(\alpha_m p) - \nabla \cdot (\alpha_m \boldsymbol{\tau}_m) - \mathbf{F}_{wm} - \mathbf{F}_{im} - \mathbf{F}_{gm} + \Gamma_m \mathbf{u}_{im} \end{aligned} \quad (3)$$

- エネルギー保存方程式

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_m \alpha_m h_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \alpha_m h_m \mathbf{u}_m) \\ = -\nabla \cdot (\alpha_m \mathbf{q}_m) - \frac{D(\alpha_m p)}{Dt} - \Gamma_m h_{sm} + q_{wm} + q_{im} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで \mathbf{F} は加わる力, h は比エンタルピー, p は圧力, \mathbf{q} は熱流束, \mathbf{u} は流速, α は体積割合, Γ は相変化速度, ρ は密度, $\boldsymbol{\tau}$ は粘性応力をそれぞれ表す。また添え字について g は重力, i は気液間の相互作用, m は気相もしくは液相, s は相変化, w は壁面との相互作用をそれぞれ表す。なお相変化速度は温度回復法⁷⁾により計算される。

これらの式を有限体積法により離散化し、SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 法⁹⁾を用いて解いた。また乱流モデルには $k-\epsilon$ モデルを用い、運動量およびエネルギーの壁面境界には標準壁関数を用いた。なお移流項には3次精度風上差分を適用し、数値振動抑制のため TVD (Total Variation Diminishing) を使用した。

2.2 沸騰熱伝達

数値流体解析により得られた解析領域局所における水温や銅板温度を用いることで、銅板上で空間的および時間的に複雑に変化する表面熱流束を、銅板各位置について計算することとした。表面熱流束は以下の式より算出した。

- 核沸騰 Nusselt 数

$$Nu = c_1 Pr^{c_2} Re^{c_3} Sp^{c_4} Sb^{c_5} \quad (5)$$

- 膜沸騰 Nusselt 数

$$Nu = c_6 Pr^{c_7} Re^{c_8} \quad (6)$$

ここで c は実験定数である。また Nu は Nusselt 数, Pr は Prandtl 数, Re は Reynolds 数, Sb はサブクール数, Sp は過熱度数で、それぞれ無次元数である。無次元数の代表長さは噴流衝突中心からの距離、代表速度は銅板表面近傍に

おける流速である。なお遷移沸騰の熱伝達については次節に記載する。

ここで式 (5) は、噴流冷却に関する既存の半理論式⁹⁾を参考に定めた。また式 (6) は、乱流強制対流領域の膜沸騰熱伝達に対して蒸気膜と蒸気膜界面近傍の滞留水流動を考慮する二相境界層理論により導出された理論式¹⁰⁾を参考に定めた。なお非沸騰強制対流における熱伝達は通常の单相流の熱伝達であり、広く知られているように壁関数から決定される。

2.3 沸騰状態の遷移

膜沸騰や核沸騰といった沸騰の形態、すなわち MHF 点や CHF 点は、銅板温度や水温などに影響される。そこでその影響を考慮できるよう、MHF 点については式 (7) に示す Dhir and Purohit¹¹⁾ の式を、CHF 点については式 (8) に示す西尾および上村¹²⁾ の式を用いて、沸騰様式の判別を行った。

$$T_{MHF} = 1000 - 8 T_{wtr} \quad (7)$$

$$T_{CHF} = 800 - 6.5 T_{wtr} \quad (8)$$

ここで T_{wtr} は冷却水温度, T_{MHF} および T_{CHF} は MHF, CHF 時の銅板表面温度をそれぞれ表す。

式 (7) および式 (8) は、MHF 点および CHF 点に及ぼす滞留水温度の影響をそれぞれ実験的に評価したものである。また核沸騰と非沸騰対流熱伝達の切り替えは、水温に依存せず銅板表面温度が 100℃ に達したときとした。なおこれらの沸騰状態遷移の式は大気圧条件におけるものであり、噴流衝突地点など圧力が高まる場所については水温をサブクール度として表現し直せば良い。これらの関係を図 2 に示す。

図 2 において遷移沸騰と判別される領域に入った場合の熱伝達は、遷移沸騰が核沸騰と膜沸騰が混在した状態であると考え、核沸騰熱流束と膜沸騰熱流束を銅板温度に応じて比例配分することで定めた。

なお MHF 点, CHF 点, および核沸騰と非沸騰対流熱伝達とが切り替わる点については、銅板表面温度と水温だけではなく流速にも影響を受けると考えられる。しかしなが

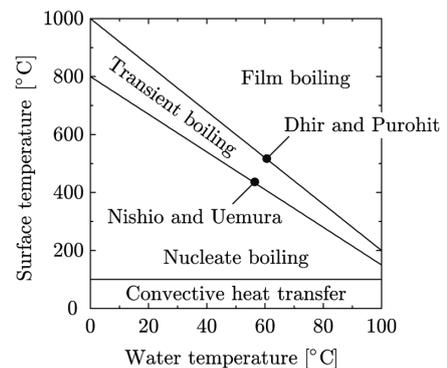


図2 銅板表面温度および水温と沸騰形態の判別線¹³⁾
Boiling transition diagram under atmospheric pressure¹³⁾

ら高温鋼板の冷却予測で特に重要なMHF点の予測については、少なくとも0.5m/s以下では流速の影響を受けないことが報告されており¹¹⁾、ここではその影響を考慮しないこととした。

3. 単一の噴流による冷却解析

数値解析モデルの精度を検証するため、一本の柱状噴流を持つ領域の冷却解析を行った。

3.1 解析領域

解析領域の概要を図3に、比較対象とした実験の概要を図4にそれぞれ示す。数値解析においては、初期状態として高温鋼板の上面に円筒容器を設置し、その内部に滞留水を模擬した冷却水を溜めた。そして鋼板の中心部に向けて鋼板上より柱状噴流を一本のみ噴射し、冷却が進む様子を解析した。比較対象とした実験においても同様に、高温鋼板上の円筒容器に滞留水を溜め、柱状噴流を一本のみ噴射し、その冷却過程を熱電対により計測した。なお熱電対は鋼板上の噴流衝突地点から10mmずつ、また鋼板表面

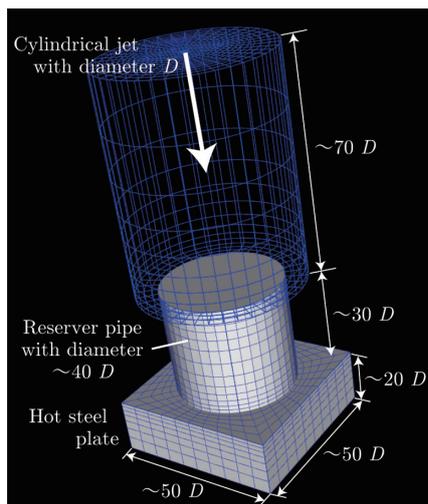


図3 単一の柱状噴流冷却に対する解析領域
Computational domain for quenching simulation with a cylindrical jet

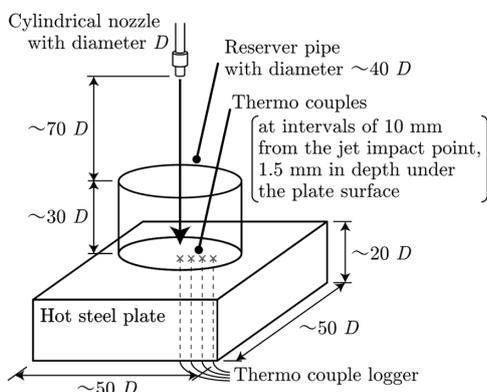


図4 単一の柱状噴流冷却に対する実験概要
Schematic diagram of quenching experiment with a cylindrical jet

表1 単一の柱状噴流冷却に対する解析および実験条件
Computational and experimental conditions for quenching with a single jet

Conditions	Values
Nozzle Reynolds number	3×10^4
Jet temp.	30 °C
Initial temp. of water in pipe	30 °C
Initial temp. of plate	800 °C

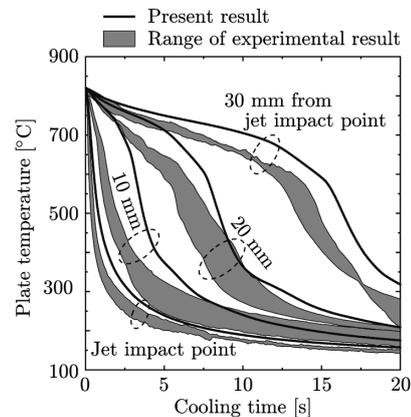


図5 単一の柱状噴流冷却における、鋼板温度推移の解析と実験との比較¹³⁾

Comparison of plate temperatures obtained by the present work with experimental ones¹³⁾

より深さ1.5mmの位置に埋め込み、固定した。数値解析および実験の条件を表1に示す。

図5に、実験により得られた熱電対埋め込み位置における温度の経時変化を、数値解析により得られた同位置における温度の経時変化と比較した結果を示す。ここで時刻0sは冷却開始を意味する。また実験は3回行い、各時刻における最大値と最小値の幅を帯状に表現して、記載した。

図5より、数値解析による温度下降速度が実験よりも若干遅いものの、その様子は概ね再現可能と判断できる。

なお温度下降速度が遅いことに関しては、以下の点に分けて評価すべきと考えられる。

- モデルで予測される、沸騰熱流束の大きさ
- 同、沸騰状態の予測精度

熱流束の大きさはグラフの傾きとして現れ、また沸騰状態の予測精度、特に膜沸騰と遷移沸騰の境界となるMHF点については、グラフの傾きが急激に変化する点に現れる。図5を見ると、より高精度な予測のためには、沸騰状態の予測精度向上が有効と考えられる。

4. 複数の噴流による冷却解析

構築した数値解析モデルを、複数の柱状噴流により冷却される移動鋼板の冷却解析に適用し、さらに同様の実験と比較することでその精度検証を行った。

4.1 解析領域

解析領域の概要を図6に、比較対象とした実験の概要を

図7にそれぞれ示す。数値解析においては、初期状態として高温鋼板の上に滞留水を模擬した冷却水を溜めた。その上面から千鳥状に配置された複数の柱状噴流を噴射し、冷却が進む様子を解析した。鋼板は長手方向に移動させるが、側面には周期境界条件を適用しているため、解析領域外に出た鋼板は、その反対側から再度入ってくる。また比較対象とした実験においても同様に、滞留水を模擬した冷却水を溜めた高温鋼板の上面より多数の柱状噴流を噴射し、鋼板を長手方向に移動させ、その冷却過程を裏面よりサーモレーサにより測定した。数値解析および実験の条件を表2に示す。

4.2 解析および実験結果

解析結果を図8に示す。図中の白い等値面は気相体積分率0.5の面を表す。図より以下が分かる。

- 等値面が鋼板表面にまで到達していることから、噴射された強い柱状噴流はほとんど拡散することなく滞留水を貫通し、鋼板表面まで到達している様子が観察される。
- それに伴い噴流衝突点およびその近傍では、常に低い温度の冷却水が供給されることから急激に冷却が進み、鋼板表面温度が低下する様子が観察される。
- 噴流衝突点で鋼板の熱を奪った冷却水は、自身の温度が上昇すること、また鋼板上で放射状に拡散し速度が低下することから、衝突点から離れるに従い冷却能力を急激に失う。
- 鋼板の移動に伴い噴流衝突点近傍の低温領域は下流側に移動し、上流側の高温領域が噴流直下に搬送されるため、鋼板全体の冷却は概ね均一に進む。

沸騰冷却における温度の予測に重要となる沸騰曲線、すなわち鋼板表面熱流束と鋼板表面温度の関係を算出した結果を図9に示す。数値解析に対しては、得られた鋼板表面温度分布および熱流束分布を面平均することで沸騰曲線を算出した。また実験に対しては、サーモレーサにより得られた冷却裏面温度分布の経時変化から逆計算¹⁴⁾を用いて表面温度分布および表面熱流束分布を算出し、それらを面平均することで沸騰曲線を算出した。

図9より以下が分かる。

- 面平均を施した沸騰曲線においても通常見られる沸騰曲線と同様の形状、すなわち高温側から膜沸騰領域、極小熱流束点 (MHF 点), 遷移沸騰領域, 極大熱流束点 (CHF

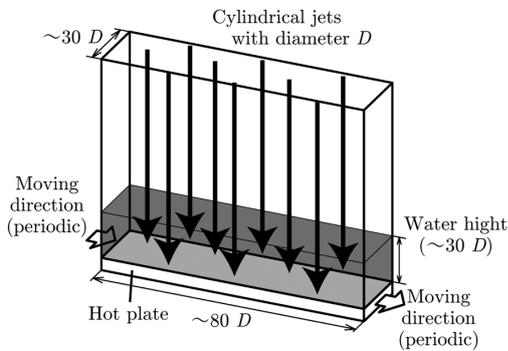


図6 複数の柱状噴流冷却に対する解析領域
Computational domain for quenching simulation with cylindrical multi jet

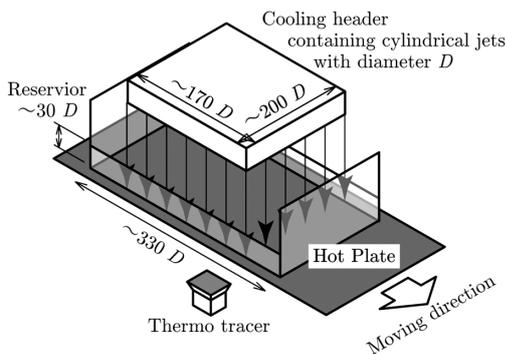


図7 複数の柱状噴流冷却に対する実験概要
Schematic diagram of quenching experiment with cylindrical multi jet

表2 複数の柱状噴流冷却に対する解析および実験条件
Computational and experimental conditions for quenching with multi jet

Conditions	Values
Nozzle Reynolds number	3×10^4
Jet temp.	30 °C
Initial temp. of water layer	30 °C
Initial temp. of plate	800 °C
Plate speed	0.5 m/s

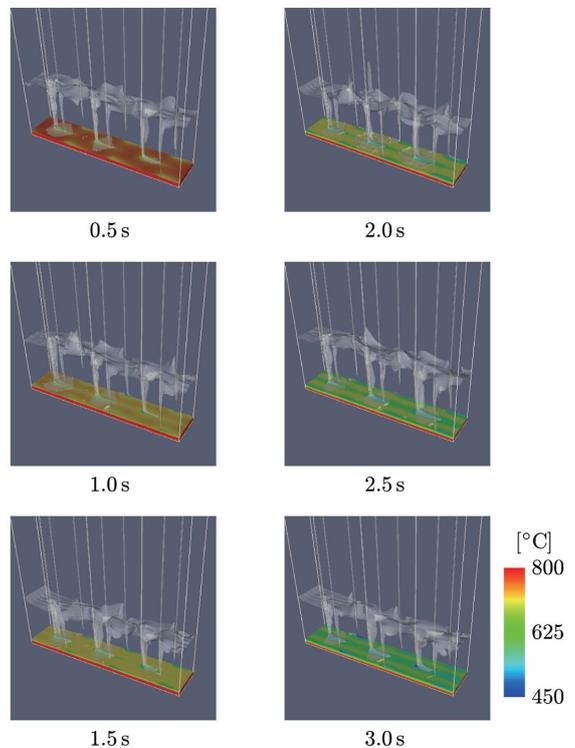


図8 複数の柱状噴流冷却解析における冷却水流動および鋼板温度の経時変化
Computational results of water flow, jets, and plate temperature

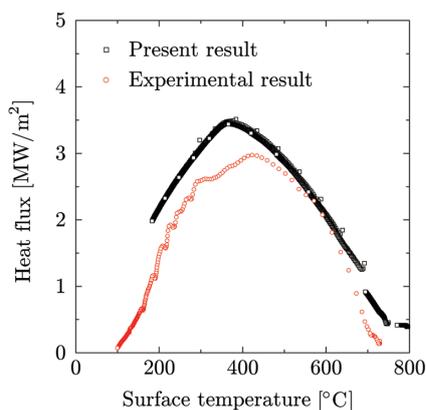


図9 伝熱面平均の沸騰曲線における解析と実験の比較
Comparison of a surface-averaged boiling curve obtained by the present work with an experimental one

点), 核沸騰領域を描く。

- 数値解析によって得られた沸騰曲線は、実験によって得られた沸騰曲線よりもCHF点近傍でやや小さい値をとるものの、膜沸騰領域、MHF点、遷移沸騰領域、核沸騰領域において概ね一致した曲線を描く。

ここで示したように、複数の柱状噴流をもつ鋼板冷却に対しても、冷却予測を行う上で重要な沸騰曲線を再現可能であることから、数値流体解析を用いた高温鋼板の冷却予測が可能であると言える。

なお本冷却は移動する鋼板に対する冷却である。鋼板が移動する場合、局所的に急激な冷却が進む噴流直下領域が次々入れ替わり、急激な冷却が持続しない。そのため単一の噴流に対して見られたMHF点の予測誤差による影響が、小さくなったと考えられる。もちろん、本解析で用いた熱伝達予測式や沸騰状態判別式に、例えば流速や圧力の影響など取り込んだ、より精度の高いモデルに置き換えることで、予測精度のさらなる向上が期待される。

なお図8に示した解析に必要とした計算時間は、Intel® Xeon® プロセッサ (X5680, 3.33 GHz) を1コアのみ用いて1週間程度であり、近年盛んに行われている並列化技術を用いることで、より大規模な解析でも短時間で行うことが可能である。

5. 結 言

数値流体解析を用いた高温鋼板の冷却解析を行い、以下の結論を得た。

- 二流体モデルを用いた混相流の数値解析手法による冷却水の流動計算と、既存の沸騰熱伝達予測式、および沸騰状態判別式を組み合わせることで、高温鋼板の冷却解析手法を構築した。
- 構築した手法を、滞留水下に置かれた高温鋼板に対して、単一の柱状噴流を噴射し冷却を行う系に適用した。得られた鋼板内部温度の経時変化を、同様の実験から得られた値と比較した結果、両者は概ね一致することが確認さ

れた。

- 続いて滞留水下を移動する高温鋼板に対して、複数の柱状噴流を噴射し冷却を行う系に適用した。得られた鋼板表面平均の沸騰曲線を、同様の実験から得られた沸騰曲線と比較した結果、両者は概ね一致することが確認された。
- 本解析で用いた熱伝達予測式や沸騰状態判別式をより精度の高いモデルに置き換えることで、さらなる予測精度の向上が期待される。

参照文献

- 1) 日本機械学会：沸騰熱伝達と冷却. 初版. 東京, 日本工業出版, 1998, p. 8
- 2) Kunugi, T.: Comput. Fluid Dyn. J. 9, 563-571 (2001)
- 3) 梅村悠 ほか：ながれ. 30, 79-85 (2011)
- 4) Narumanchi, S. et al.: Int. J. Heat Mass Transfer. 51, 1-12 (2008)
- 5) Hirt, C. W., Nichols, D. B.: J. Comput. Phys. 39, 201-225 (1981)
- 6) Osher, S., Sethian, J. A.: J. Comput. Phys. 79, 12-49 (1988)
- 7) 大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門. 丸善, 東京, 1985
- 8) Caretto, L. S. et al.: Proc. Third Int. Conf. Num. Methods Fluid Mech., Lecture Notes in Physics. 19, New York, Springer-Verlag, 1972, p. 60-68
- 9) 平田賢, 森岡茂：日本機械学会論文集. 42, 236-243 (1976)
- 10) Wang, B. -X., Shi, D. -H.: Int. J. Heat Mass Transfer. 28, 499-1505 (1985)
- 11) Dhir, V. K., Purohit, G. P.: Nucl. Eng. Des. 47, 49-66 (1978)
- 12) 西尾茂文, 上村光宏：熱処理. 23, 260-265 (1983)
- 13) 小林一暁：連載記事躍動 沸騰冷却予測技術の構築に向かって. ふえらむ. 18 (1), 29-32 (2013)
- 14) Beck, J. V. et al.: Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. 5, 275-286 (1982)



小林一暁 Kazuaki KOBAYASHI
プロセス研究所 プロセス技術部
主任研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



中村 修 Osamu NAKAMURA
先端技術研究所 数理科学研究部
主幹研究員



原口洋一 Yoichi HARAGUCHI
鹿島製鉄所 設備部 主幹