躍 動
若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

沸騰冷却予測技術の構築に向かって

小林一暁
Kazuaki Kobayashi
新日鐵住金（株）技術開発本部
プロセス研究所　プロセス技術部

1 はじめに

筆者は住友金属工業（株）に入社した2005年以来、熱間圧延工程の冷却プロセスにおける鋼板温度予測技術に関する研究開発に取り組んでいる。今回、本稿を執筆する機会を与えていただいたことにまず感謝を申し上げ、自身が携わるプロセス研究開発の紹介とそれを通じて感じることを述べさせていただく。

なお本稿では「冷却」は沸騰を伴う水冷もしくは油冷に限定し、気体による冷却など、その他の冷却には言及しないことをご承知頂きたい。

2 沸騰冷却現象

鉄鋼製品の製造において、冷却プロセスが重要な役割の一つを果たしていることは、読者の方々はよくご存じと思われる。

冷却プロセスでは、安価かつ気体と比較して冷却能力が高いことから水が多用されるが、その冷却能力予測や制御は困難とされる。その理由を図1を用いて説明する。図は縦軸を熱流束（冷却能力）、横軸を鋼材表面温度としている。

まず図1（a）に、空冷など沸騰を伴わない、すなわち非沸騰時の冷却特性を模式的に示す。実線で示されるように、熱流束と鋼材表面温度は直線関係にある。したがって冷却される鋼材に温度偏差が存在したとき、温度の高い部分ほど速く冷却されるため偏差は自然に低減する。また流動状態に対する熱流束の変化を破線で示すが、流速が大きくなれば直線の傾きが大きくなる、水温が高くなれば直線は右に動く、といったように単純で、予測が容易である。

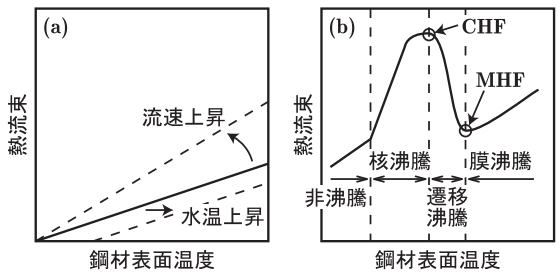

図1　冷却特性の比較：(a) 非沸騰時；(b) 沸騰時

次に図1（b）に、水冷など沸騰を伴う場合の冷却特性を模式的に示す。(a) と比較して複雑な曲線となり、一般に沸騰曲線と呼ばれる。この曲線において冷却現象は、高温側から冷却能力の低い膜沸騰、その下限値であるMHF（Minimum Heat Flux、クエンチ）点、熱流束が急上昇する遷移沸騰、その極大値であるCHF（Critical Heat Flux、バーンアウト）点、熱流束が急降下する核沸騰を経て、非沸騰へと遷移する。非沸騰時と異なり、鋼材表面温度、冷却水温度、流速、圧力などの変化に伴い各要素が様々な方向に大きく変化するため、その予測が困難となる。

さらに鋼材の水冷は、通常用いられる鋼材温度、水温、流速などの諸条件から、結果として多くの場合で遷移沸騰を通過する。ここで図1（b）の遷移沸騰の領域を見ると、温度が低いほど熱流束が高い。すなわち鋼材に温度偏差が存在したとき、冷却によりその偏差が拡大する。

このように沸騰冷却は高い冷却能力を有するものの、「冷却能力の予測性」と「温度偏差の低減性」の面で困難な冷却方法である。

3 沸騰冷却の予測手法

3.1 基本方針

このような特徴を有する沸騰冷却能力を予測するためには、先に述べた沸騰曲線に影響を与える「冷却水の流動状態や温度分布の予測」と「その結果、熱伝達がどのようになるかの予測」が必要と考えられる。

これまでに沸騰冷却能力の予測式は多数提案されているが[1-3]、特定の流動場全体に対する平均的な熱伝達の実験式など、適用範囲が狭く、複雑な流動を伴う装置局所および全体の熱伝達を予測可能とは言い難い。

29

そこでまず、冷却水の流動状態や温度分布の予測には数値流体解析の適用を考えた。その理由は、解析領域内の任意の位置における流速、圧力、温度分布が得られること、また冷却条件変更時のケーススタディが実験と比較して容易なためである。

次に、冷却水の流動状態に対応する熱伝達は実験により把握することを考えた。先に述べたように流動場全体での熱伝達を実験で把握することは困難であるが、局所の流動状態、具体的には数値解析の解析格子一つ程度の領域において、熱伝達がどのような値となるかは基礎実験により把握することは可能である。またそのような局所に限定された熱伝達の値は汎用性を持つと考えられる。

なお沸騰熱伝達を数値流体解析により全て再現する試みも進められている[4,5]が、工業的に利用可能な状態とは言い難い。

このように実験による局所的な沸騰熱伝達モデルと、数値流体解析による冷却水挙動の予測を組み合わせ、小規模なラボ実験から実機の予測まで可能な、汎用的な冷却解析モデルの構築を進めている。

3.2 流体解析手法

鉄鋼冷却プロセスは、冷却水と空気や水蒸気などの気体との混相流となることから、気液混相流を取り扱い可能な数値流体解析手法が必要となる。ここでは必要な解析精度と計算負荷を考慮して、二流体モデルを用いた[6]。詳細は割愛するが、二流体モデルは空気中に飛散する水滴や、水中に分散する気泡の挙動をモデル化して計算するために細かな解析格子を必要とせず、解析負荷が低いという特徴がある。

流体解析にはアドバンスソフト (株) のAdvance/FrontFlow/MPを使用した。当該ソフトにおいて、沸点を超えた冷却水の蒸発は温度回復法[7]により計算される。また方程式は有限体積法により離散化され、運動方程式の解法にはSIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) 法[8]を、乱流モデルにはk-εモデルを適用した。

3.3 沸騰熱伝達

数値流体解析により得られた流速や水温分布などを用いることで、鋼材上の熱伝達分布を算出する。

核沸騰および膜沸騰熱伝達の算出には、流動場における熱伝達の平均値ではなく、その分布を論じた半理論式[9]および理論式[10]を参考に、別途実施した基礎実験から係数を定めたモデル式を用いた。このようなモデル式を用いることで、数値流体解析により得られる局所の流動状態を、熱伝達分布の算出に有効に反映できると考えた。

なお遷移沸騰の熱伝達については次節で説明する。また非沸騰強制対流の熱伝達は、既存の単相流の熱伝達理論により決定される。

3.4 沸騰状態の遷移

膜沸騰や核沸騰といった沸騰状態、すなわちMHF点やCHF点も鋼材温度や冷却水挙動などに影響される。そこでその影響を考慮できるよう、MHF点についてはDhir and Purohit[11]を、CHF点については西尾および上村[12]を参考に、鋼材表面温度と水温の関係として表現した (図2)。ただし係数については別途基礎実験を行い、決定した。

ここで遷移沸騰は核沸騰と膜沸騰が混在した状態と考え、その熱伝達は核沸騰および膜沸騰熱流束を、図2の線図に従い鋼材表面温度により比例配分して与えた。

4 柱状噴流の冷却解析

鉄鋼冷却プロセスでよく用いられる柱状噴流を想定し、滞留水下にある高温鋼板の冷却試験を行い、解析と比較した結果を示す。

4.1 試験および解析概要

図3に試験および解析の概要を示す。試験では高温鋼板上に水を溜めたパイプを設置することで滞留水とし、その上部より柱状噴流を噴射した。また熱電対を鋼板表面から深さ1.5 mmに、噴流衝突地点から半径方向へ10 mmずつ4個埋め込み、冷却過程を計測した。

図4に解析結果の一例を示す。柱状噴流が滞留水を貫通、鋼板に衝突し、衝突点を中心に冷却が進む様子が見られる。

図5に、試験より得られた鋼板温度の経時変化を解析と比較した結果を示す。図より定性的にはその傾向を捉えていると言えるが、解析による温度降下速度が試験よりも全体的に低い。

この理由については用いた3つのモデル、すなわち数値流体解析モデル、熱伝達予測モデル、沸騰状態予測モデルそれぞれが誤差要因を含み、さらに相互に影響していると考えられる。例えば冷却速度が遅い点について、数値流体解析モデルにおいて乱流強度、熱伝達予測モデルにおいて蒸気運動に

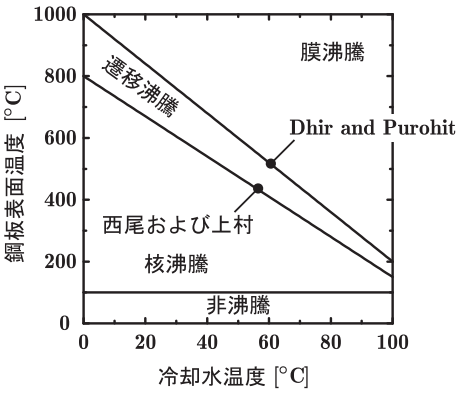

図2 沸騰状態線図

30

よる熱輸送を過小評価している、また沸騰状態予測モデルにおいて流速や、酸化スケールなどの表面性状の影響が未考慮である、といったことが考えられる。そのためそれぞれのモデル精度を個別に高めつつ、その相互影響を解析例のように組み合わせて評価することで、より定量的な沸騰冷却解析モデルの構築、ならびに沸騰冷却に対する理解を深めている。

5 研究開発を通して感じること

まず冷却の研究開発に関して、任意の鉄鋼冷却プロセスを自在に評価可能になるには多くの課題がある。例えば、先に述べたモデル精度の改善と検証、多数のノズルを備える巨大な実機の数値流体解析による評価方法、冷却中に生じる鋼材の反りや波打ちの取り扱い、実プロセスで多数用いられるスプレーやミストなどの液滴冷却の評価方法などが挙げられる。またモデル精度改善に含まれるが、酸化スケールや表面性状が冷却に与える影響の評価も挙げられる。

さらにここまでは「冷却能力の予測」にしか触れてこなかったが、沸騰冷却現象の理解を深めつつ「温度偏差の低減」を進めることも重要な課題である。

冷却に関してはこのように大きな課題が山積と理解している。一方、企業研究者としてはこれらの課題に対し、1. 冷却現象全体を俯瞰、その理解に必要な要素を整理し、2. 企業として優先度の高い課題の解決に必要な要素を1から抽出し、解決への道筋を描き、3. 取り組み、4. 最後にその標準化を行うことで技術を定着させる、ということが義務であり、またそのように行動したいと自覚する次第である。

ところが筆者の努力と能力不足から、上記4項目がそれぞれ不十分であることを日々痛感している。しかしながらその痛みから逃げず、痛いものは痛いと腹を据えて向き合い、一つ一つの作業を誠実に成し遂げることでしか義務を果たすことはできないと、これもまた痛感している次第である。

このように自身が未熟、軟弱であることをここに記載させていただくことで、自身を奮い立たせる糧とさせていただきたい。

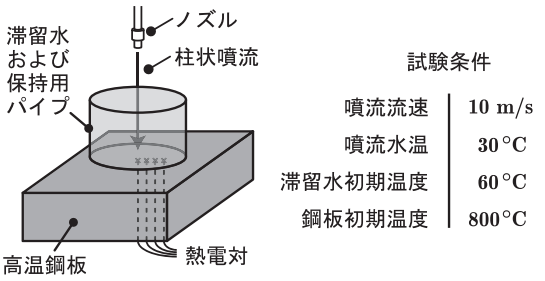

図3　単一柱状噴流による鋼板冷却試験概要

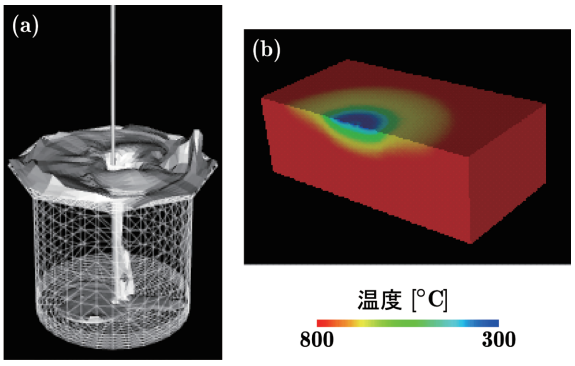

図4　解析例：(a) 冷却水流動状態；(b) 鋼板断面温度分布（冷却開始10s後）

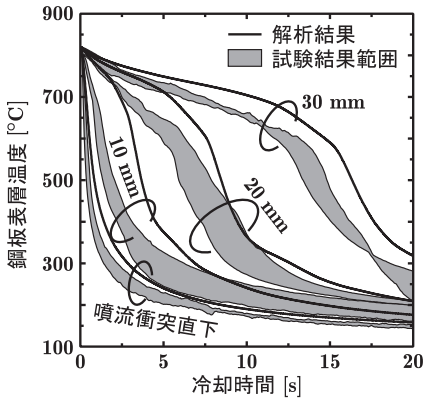

図5　鋼板温度経時変化の比較

参考文献

1）D.H.Wolf, F.P.Incropera and R.Viskanta：Adv. Heat Transfer, 23（1993）, 1-132.
2）日本機械学会：沸騰熱伝達と冷却, 日本工業出版,（1989）, 12-231.
3）日本機械学会：機械工学便覧　基礎編α5熱工学, 日本機械学会,（2006）, 111-117.
4）V.K.Dhir：AIChE J., 47（2001）, 813-834.
5）T.Kunugi：Comput. Fluid Dyn. J., 9（2001）, 563-571.
6）秋山守, 有冨正憲：新しい気液二相流数値解析－多次元流動解析－, コロナ社,（2002）, 97-107.
7）大中逸雄：コンピュータ伝熱・凝固解析入門, 丸善,（1985）, 202.
8）L.S.Caretto, A.D.Gosman, S.V.Patankar and D.Spalding：Lecture Notes in Physics, Springer-Verlag, 19（1972）, 60-68.
9）平田賢, 森岡茂：日本機械学会論文集, 42（1976）, 236-243.
10）B.-X.Wang and D.-H.Shi：Int. J. Heat Mass Transfer, 28（1985）, 1499-1505.
11）V.K.Dhir and G.P.Purohit：Nucl. Eng. Des., 47（1978）, 49-66.
12）西尾茂文, 上村光宏：熱処理, 23（1983）, 260-265.

（2012年9月20日受付）

31

先輩研究者・技術者からのエール

京都大学　エネルギー科学研究科　准教授　藤本　仁

鉄鋼協会の講演大会で熱間圧延工程の冷却に関する研究発表がほとんどない時期があり、鉄鋼会社に就職した卒業生に現場の様子を尋ねても「冷却については、とくに技術的問題はないようだ。」と言われたことがあった。沸騰（相変化）を伴う物理現象の解明というような学術的興味はさておき、企業の冷却技術は十分に成熟しているのだろうと勝手に思い込んでいたものである。

小林さんの冷却予測技術構築についての記事を読ませていただくと、当時の私の認識は誤りで、企業では冷却技術を向上させる必要性を理解され、そのための地道な努力を継続されていることが良く分かる。また、小林さんのような新進気鋭の技術者（研究者）が、どっしりと腰をすえて冷却技術の研究開発に取り組まれていることに安堵感を覚える。幸いなことに、最近の講演大会では、冷却に関する研究発表がそれなりに増え、興味深い話を聞けるようになってきた。当然のことながら、小林さんも冷却関連の研究結果を発表される非常に優秀な技術者の一人である。

さて、小林さんが取り組まれている「熱間圧延工程の冷却プロセスにおける鋼板温度予測技術」は非常にチャレンジングかつ困難な課題である。熱延工程の冷却解析では沸騰気泡や蒸気膜のような時空間スケールの小さい影響因子だけでなく、板上水の流動などのマクロな因子も考慮してやらないといけないし、小林さんが記事で書かれているように、他にもいろいろと気になる影響因子がある。計算機の性能向上が目覚ましいとはいえ、数値流体解析と鋼板内温度解析のみで全てを扱うのは不可能であるから実験に基づく構成方程式を組み込んでやろうというスタンスである。手法としては理にかなっていると思う。ところがどっこい、構成式の構築が非常に難しい。実機で鋼板温度分布や冷却水流動を精密測定するのは無理であろうし、小規模のラボ実験で実機の熱流動条件を正確に再現するのも容易ではない。また、複雑な物理現象と単純化したモデルに押し込めないといけない。構成式の出来・不出来がモデル全体の予測精度を左右するので、その改良にさぞかし頭を悩まされているであろうと思う。

企業、大学にかかわらず、年齢を重ねるほど雑用が増えていくものらしい。世界の研究状況を把握しつつ、気力・体力と時間があるうちに一気呵成に研究開発を推し進めていただきたい。

JFEスチール（株）スチール研究所　圧延・加工プロセス研究部　主任研究員　中世古　誠

小林一暁さんと始めてお会いしたのは、2010年に札幌で開かれた日本伝熱シンポジウム（日本伝熱学会）の沸騰のセッションであることを覚えています。沸騰の先生方に鋭い質問をしていたのが強く印象に残っています。当時、伝熱学会で得られる情報を鉄鋼プロセスに応用することは難しいと彼自身は感じていたはずです。鉄鋼プロセスでの冷却は小林さんが述べているとおり、膜沸騰から遷移沸騰の現象でありますが、日本伝熱シンポジウムでの学会報告は、殆どが大学側の発表であり、沸騰のセッションでは原子力関係を中心に核沸騰での熱流束増大などの現象・解明を追い求めるのが主流でした。

ここに彼が鉄鋼産業側から質問したことにより、大学側・先生方の次の研究に刺激があったことに間違いありません。膜沸騰や濡れ開始点（膜沸騰→遷移沸騰）の研究をはじめる先生が増え始めたのです。現に鉄鋼協会の圧延理論部会では熱延ROT冷却モデル構築研究会が編成され、日本伝熱学会の沸騰のセッションに参加される有名な先生方が名前を連ねて、膜沸騰から遷移沸騰、核沸騰にかかるROT冷却の研究を実施しています。

これまでの鋼材冷却における伝熱研究は実験中心で、冷却能力を計算するための熱伝達率は被冷却材の表面温度と供給される冷却水の水温、水量から被冷却面内で平均的に決定していました。冷却水の流れを数値シミュエーションで解き、各水流の流速や表面温度から熱伝達率分布をもとめ、また鋼材を冷却したことによる水温の上昇を考慮、水温と鋼材表面温度からMHF点やCHF点を決め、各沸騰状態での熱伝達率を得ること等、今回彼が提案した冷却能力の計算方法は、行動力ある彼ならではの鋼材冷却の新しい解析・冷却能力予測方法です。

最終的に示されている解析結果と試験結果（実験結果）の整合性はすばらしいものです。これでも彼は満足しておらず、さらに精度を上げようとされていることに脱帽します。彼自身が指摘している通り乱流強度の影響や表面スケール・表面性状の影響も考えられますし、それに伴ってMHF点とCHF点が変わってくる可能性もあります。特にMHF点側のDhir and Purohitの値はプール沸騰での値ですので、柱状噴流冷却に使用できる新しいMHF点、CHF点の指標を作られましたら、解析結果と試験結果の整合性は更に上がるのではないかと推測されます。

冷却技術は鉄鋼のプロセスでは重要な技術であり、今後、ますます研鑽を積まれ大きな成果が得られることを期待しております。