

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：32639

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K13883

研究課題名(和文) 超高温面の高密度水噴流冷却における伝熱機構の解明

研究課題名(英文) Heat transfer mechanisms in strong water impinging jet cooling of high temperature surface

研究代表者

宇高 義郎 (Utaka, Yoshio)

玉川大学・工学部・客員教授

研究者番号：50114856

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高度な実験的検討により、鋼材の高機能化のために必要な高温鋼板の強水冷伝熱に関する基礎的・学術的な解明を進めた。水噴流岐点付近の高温面熱伝達特性測定のための実験装置を完成させた。さらに、水噴流実験測定を実施し、噴流岐点近傍の熱伝達測定を実施した。その結果、従来の鉄鋼冷却研究における熱伝達率を用いた当初の予測と伝熱特性が大きく異なった。高温固体面における熱伝達測定のためには、本実験用の伝熱ブロックと比して、桁違いの加熱量を必要とすることが明らかになり、更に新たな研究が必要である。

研究成果の概要(英文)：In this study, fundamental and academic elucidation on strong water cooling heat transfer of high temperature steel slabs necessary for high functioning of steel materials was promoted by advanced experimental investigation. An experimental apparatus for measuring the high-temperature surface heat transfer characteristics of water impinging jet flow was completed. Furthermore, the heat transfer measurement in the vicinity of stagnant point of water impinging jet flow was carried out. As a result, the initial assumption predicted from the heat transfer coefficient in the conventional steel cooling study greatly differs from the heat transfer characteristics of this study. For the heat transfer measurement on the high temperature solid surface, it was clarified that more than tenfold increase of heat flux is required as compared with the heat transfer block for this experiment. It is necessary to further sophisticated new research.

研究分野：熱工学

キーワード：boiling heat transfer steel strong cooling water impinging jet high velocity region

1. 研究開始当初の背景

近年熱制御による鉄鋼材料の高品質・高強度化において重要性が増大している、圧延プロセスにおける高温鋼板の高密度水噴流冷却（強冷却）が鋼板温度制御に利用されている。しかし、高度な温度制御による鋼材の高機能化には、鋼板強水冷系の伝熱機構と熱特性の明確化が必須である。しかし、極高温伝熱面における実験は難しいこともあり沸騰研究の対象領域とされにくく、その重要性にも拘わらず明確にされていない。実際の鋼板の強水冷（高噴流水速度に関して、より高度な温度制御による鋼材の高機能化を可能とするため、さらに基礎的・学術的な解明が必要である。

2. 研究の目的

鋼材の圧延プロセスにおける高温鋼板の高密度水噴流冷却（強水冷）は、熱制御による鉄鋼材料の高品質・高強度化において重要性が増大している。しかし、高温鋼板強水冷は、通常の膜沸騰温度を超える極高温伝熱面を対象とするため、従来から研究領域とされにくく、その実用上の重要性にも拘わらず伝熱機構とその熱特性は未解明であり、伝熱機構に関する問題点が指摘されている。また、水量密度を変化させたスプレー冷却では水量密度の増大に伴い熱伝達率の過熱度依存性が弱まり、沸騰の限界・極小熱流束を示す沸騰本来のN字特性が現れにくくなることが示されている。しかし高水量密度にすることにより、従来の沸騰の特性が失われ、単相流の噴流熱伝達に近い現象となっていくことを意味しているのか明らかでない。高速水噴流沸騰については未知な事項が多く、伝熱設計の基になる資料が乏しい。

本研究では、上述のように、高度な実験的検討により、鋼材の高機能化のために必要な高温鋼板の強水冷伝熱に関する基礎的・学術的な解明を進めることを目的とする。

3. 研究の方法

高速水噴流による高温鋼材冷却の高性能化を実現するため、以下の研究方法を行った。

- (1) 従来実施されてきていない、鉄鋼冷却を対象に、高温金属の冷却現象を定常状態で実現させる。
- (2) そのための熱流束集中型の耐高温特性の優れた銅製伝熱ブロックを設計・製作する。
- (3) 対象とする系の熱伝達特性は未知であり、従来の高温鋼材の冷却特性を基に、高温面における水噴流冷却熱伝達率を予測する。
- (4) 未知領域である超高温面の水噴流冷却における岐点近傍の沸騰特性を実験的に明らかにする。

<実験装置と方法>

図1に実験系の全体を示した。

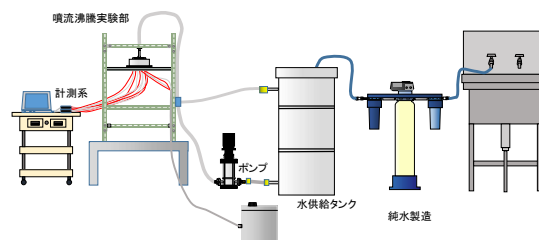


図1 実験装置系

図2に本研究で用いた銅製伝熱ブロックの構造を示した。高温鋼板の高密度水噴流冷却（強冷却）系において基本となる伝熱特性の理解を目的として、実験室規模の伝熱測定を行った。大熱流束を定常状態で実現可能とするため、比較的大きな加熱面積から伝熱面に近づくにしたがって断面積を縮小させる、熱流束集中型伝熱面形状とする。測定を岐点付近に限定するため、伝熱面寸法を直径5mmとする。

図3に本実験の主要部である、伝熱ブロック容器と水噴流供給部からなる噴流沸騰装置を示した。

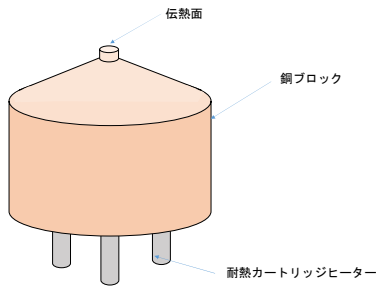


図2 伝熱ブロック構造

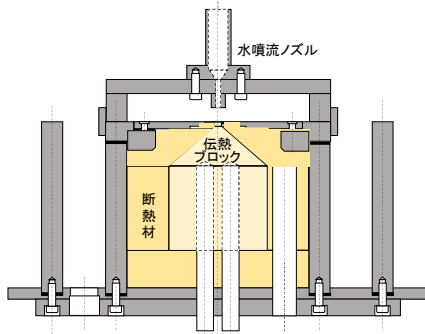


図3 噴流沸騰装置

本実験では、断熱材および加熱ヒーター付近への水の侵入を防ぐための工夫を加える必要があるが、高温環境の断熱材への水侵入を防ぐことが難しい。そのため伝熱ブロック先端側面に薄いステンレス板を密着させ、断熱材と水を隔離し噴流水が断熱材に接しない構造とした。

<数値解析による伝熱測定精度の検討>

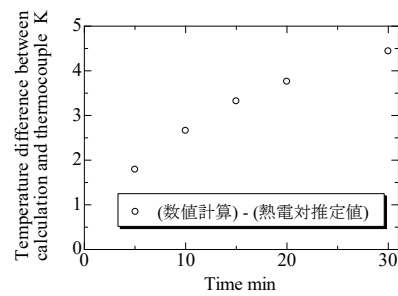
ここでは以下の2通りのモデル、すなわち、(1)伝熱ブロックの側面を完全断熱した場合と(2)ステンレスカバーをつけた場合について伝熱量測定精度を検討する。

(1) 伝熱ブロック側面を完全断熱した場合

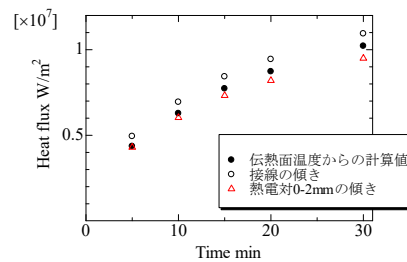
計算は、上述のように測定方法に対応させ、徐々に温度変化を与える準定常的な変化をする加熱方法を与えた。

図4(a)(b)に、それぞれ計算値と外挿法による推定値における伝熱面過熱度と熱流束の誤差割合を示している。過熱度が約500Kに対して、外挿による誤差はそれぞれ1%および約7%以内で良好であることがわかる。

図10(b)と(c)は、それぞれ熱流束の計算値(真値)、外挿曲線の表面勾配から求めた値および表面から2本の測定点位置温度から直線近似して求めた値を比較したもので、および2種類の外挿方法の真値に対する誤差を示している。本方法による伝熱測定が十分な測定精度を有していることが確認された。



(a) 過熱度の推定誤差



(b) 熱流束の推定誤差

(2) ステンレスカバーをつけた場合

次に、防水用のステンレスカバーが伝熱ブロック先端側面と密着、および微細間隙に蒸気が存在すると仮定したときの2通りの場合の数値解析結果を示す。

ステンレスカバーには伝熱面表面と同一平面状に、厚さ1.0 mm、0.3 mm厚さの1.0 mm幅溝が3本切り込まれているステンレスカバーが、噴流水からの防水用に取り付けられている。なお、カバーと伝熱ブロック側面に微小な間隙のある場合には、20 μmの気体層を与えた。

図5に、伝熱面温度の数値計算結果(真値)と熱電対挿入位置からの温度推定比較と相対誤差を示した。図5(a)と(b)がステンレスカバーと伝熱ブロックが密着している場合、(c)(d)は間隙層に空気が入っている場合を示

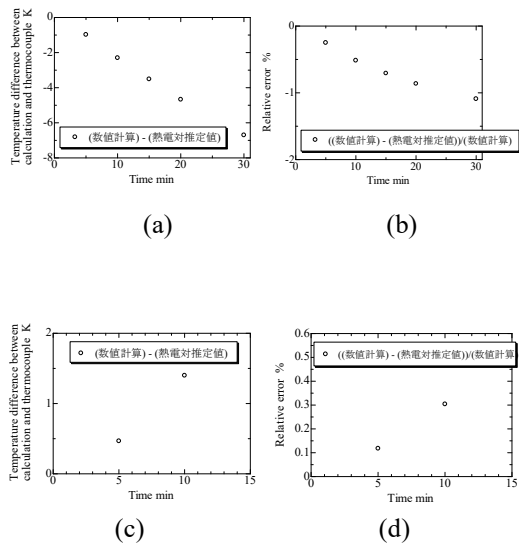
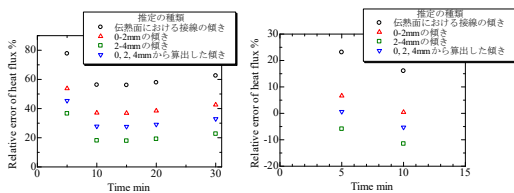


図5 伝熱面温度の数値計算結果と熱電対挿入位置からの温度推定比較と相対誤差
(a), (b): 密着, (c), (d): 間隙層

している。ステンレスカバーが存在しても、極めて薄い空気層の存在により、温度差の誤差は、密着のときの約1%から0.3%程度に減少していることがわかる。

図6には熱流束の数値計算結果(真値)に対する外挿法による相対誤差を示した。図6(a)と(b)は、それぞれステンレスカバーと伝熱ブロックが密着している場合と間隙層に空気が入っている場合を示している。ステンレスカバーが付属しても、極薄い空気層の存在により、密着の場合の約40%の熱流束誤差に対して約±10%程度に減少していることがわかる。伝熱面に近づくにしたがって直線温度分布に近づく本方法の特性を考慮して、測温部の伝熱面近傍に直線をフィットさせる方法も試みた。測定誤差の予測値は20-40%



(a) 密着の場合 (b) 間隙層のある場合

図6 熱流束の測定誤差

と減少はするが、依然大きかった。しかし、図6(b)に示したように、空気層の存在により改善され、2次曲線と近傍直線近似では、それぞれ20%と10%程度に改善されることがわかる。

実際の測定では、伝熱面温度条件によりステンレスカバーと伝熱ブロックとの間隙状態は異なると考えられる。伝熱面が非沸騰状態(100℃以下)の場合には、毛管力により狭隙間隙には水が入り込むため、密着の場合に近似できる。しかし、100℃を超え沸騰状態にある場合には、特に狭隙間隙はドライアウトしやすく、間隙は気体で充満されると考えられる。したがって、本研究の沸騰、特に高温沸騰条件においては、気体の間隙を考慮するのが適当と思われ、これまで記述してきた測定法の適用が妥当であると考えられる。

4. 研究成果

<実験結果と考察>

図7に、水噴流速度5.2 m/s、ステンレスカバーは設置していないときの、測定温度の伝熱面深さ方向分布とフィッティングさせた最小自乗曲線を示した。いずれの印加電圧においても、フィッティングさせた2次曲線と良好な一致が見られる。

図8(a)および(b)は図7のフィッティングの結果から求めた沸騰特性であり。それぞれ過熱度に対する熱流束および熱伝達率を示している。図8(a)から、過熱度が約20℃から熱流束は過熱度の増大とともに急上昇している。

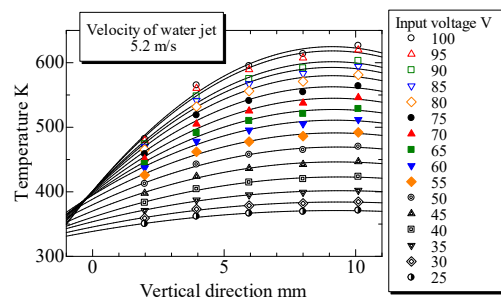
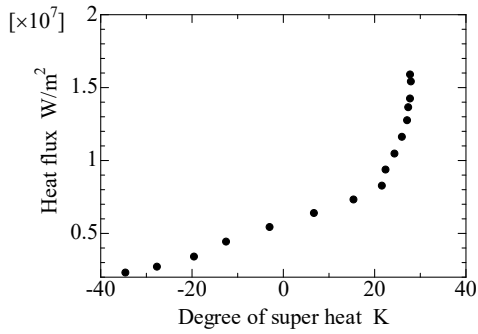
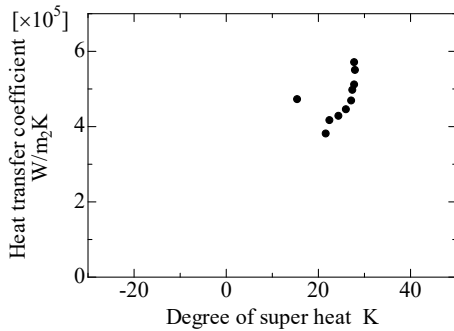


図7 測定温度の伝熱面深さ方向分布と最小自乗曲線のあてはめ



(a) 熱流束と過熱度



(b) 熱伝達率と過熱度

図 8 沸騰特性

また測定された熱流束は非常に大きく、 $1.6 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ に達した。図 8 (b)から、測定された熱伝達率も非常に大きく、 $4 \times 10^5 - 6 \times 10^5 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ を示した。

図 9 に伝熱面深さ方向の測定温度と最小自乗法によるフィッティング曲線を示した。この場合にも、いずれの印加電圧においても、フィッティングさせた 2 次曲線とほぼ一致が見られる。

図 10(a)~(c)は図 9 に示したフィッティングの結果から求めた沸騰特性を示している。図 10 (a), (b)は、それぞれ過熱度に対する熱流束および熱伝達率を表している。図 10(a)では、過熱度がマイナスの領域から高熱流束が測定されており、測定結果の検討を要する段階にあり、まだ予備実験の域を出ていないためと思われる。

本測定の場合にも、ステンレスカバーのない場合とほぼ同様な熱流束値が測定され、約 $1.8 \times 10^7 \text{ W/m}^2$ に達した。図 10(b)から、測定された熱伝達率も非常に大きく、ほぼ

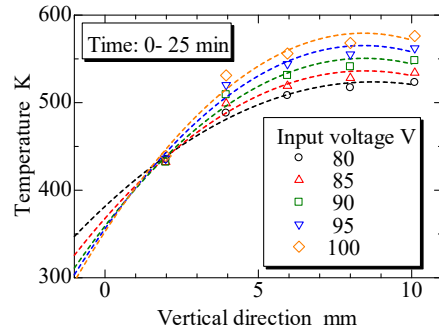
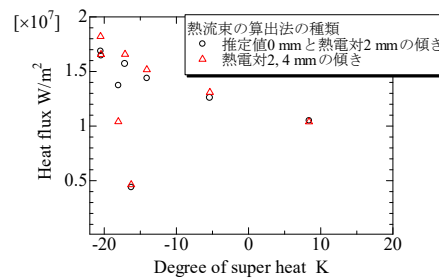
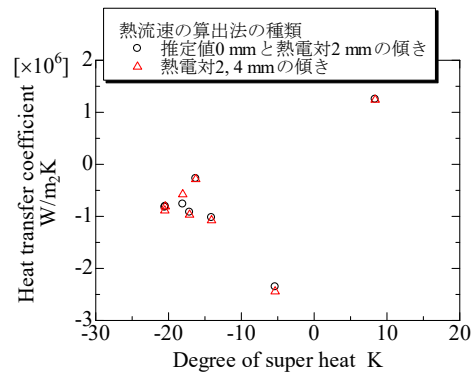


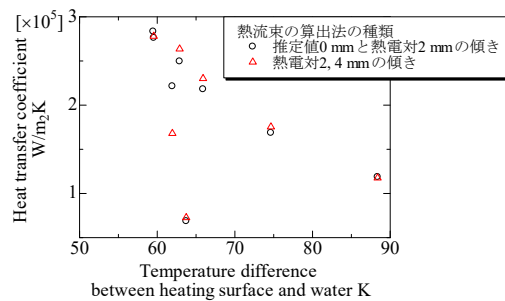
図 9 測定温度の伝熱面深さ方向分布と最小自乗曲線のあてはめ (測定時間 25 分まで (温度増加過程))



(a) 熱流束と過熱度



(b) 熱伝達率と過熱度



(c) 熱伝達率と温度差 (水温基準)

図 10 沸騰特性

$1.0 \times 10^6 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ を示した。また、図 10(c)は温度差に水温を基準にしたものである。しかし、さらに正確な測定を行えるように実験測定計の検討・向上を図る必要がある。

<考察・課題・提案>

水噴流の岐点近傍の高温伝熱面の沸騰冷却実験を実施した。対象とする現象の伝熱特性は、これまで明らかにされておらず、これまでは製鉄用の高温の鉄スラブの冷却を対象とした研究が行われてきた。水の噴霧あるいは噴流による冷却を対象としているが、それらの系では水供給ノズルの間隔が大きく、滞留する板上水内でノズルと高温板との間隔が大きい条件で噴射するなど、純粋な水噴流沸騰系とは異なっていると考えられる。

本研究では、既存のデータとして、従来の鉄鋼冷却研究における熱伝達率を用いて、最大必要な熱流束を前提として実験装の置設計を行った。それらの条件を踏まえて、本研究の考察および今後の課題は以下のようになる。

- (1) 当初の予測と伝熱特性が大きく異なった。従来の高水流密度（強水冷）条件あるいは単相流の水噴流の場合に近い熱伝達率値 $30 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$ を前提に伝熱面を設計した。しかし、実験測定の結果、熱伝達率はその 10 倍以上の $500 \text{ kW}/(\text{m}^2 \text{ K})$ 程度の値が比較的低過熱度域で測定され、本実験用の伝熱ブロックと比して、桁違いの加熱量を必要とすることが明らかになった。
- (2) 予想外に噴流熱伝達率が大きかった高温面の高速水噴流岐点近傍の冷却に関して、基礎的・学術的な内容を明らかにすることの重要性とともに、その応用に関して更なる検討が可能であると考えられる。

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 1 件）

- (1) Mori, S. and Utaka, Y., Critical heat flux enhancement by surface modification in a saturated pool boiling: a review, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.108 (2017), pp.2534-2557. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.090>

6. 研究組織

(1)研究代表者

宇高 義郎 (UTAKA, Yoshio)

玉川大学・工学部・客員教授

研究者番号：50114856

(2)研究分担者

大久保 英敏 (OHKUBO, Hidetoshi)

玉川大学・工学部・教授

研究者番号：80152081

松本 裕昭 (MATSUMOTO, Hiroaki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：10251753