

圧延プロセスにおける伝熱技術

Heat Transfer Technology for Steel Rolling Process

芹澤良洋* 山本龍司 高町恭行 小川茂
Yoshihiro SERIZAWA Ryuji YAMAMOTO Yasuyuki TAKAMACHI Shigeru OGAWA
川村浩久 大串圭二 吉野博之
Hirohisa KAWAMURA Keiji OOGUSHI Hiroyuki YOSHINO

抄 録

圧延プロセスには、鋼材の加熱冷却プロセスが含まれており、伝熱に関する多くの課題がある。様々な課題のうち、水、ガスを冷媒とした冷却技術の基礎的研究、圧延時の鋼材とロールの間で発生する固体接触熱伝導による伝熱現象の研究を紹介した。水、ガスを冷媒とした冷却に関しては、基礎的研究として冷却に用いられるノズル単体の冷却能力の特性を調査した。その研究結果はこれまでに導入した冷却装置の開発において、ノズルの選定、配置などの検討に反映されている。圧延時の鋼材とロールの間の伝熱特性は基礎的実験と数値解析により検討し、鋼材温度変化予測の精度向上、ロールへの入熱によるサーマルクラウンと呼ばれるロールの変形の予測精度向上に反映されている。

Abstract

In steel rolling process there are many steel heating and cooling equipments. There involved many tasks concerned to heat transfer phenomena. In this article the basic research of cooling technology using water and gas jet and the research of heat conductance via solid contact area between roll and steel during rolling. The cooling technology with water and gas jet is basically studied about the heat transfer characteristic of single nozzle. The results are applied to the specification and arrangement of nozzles in the developed cooling equipments in various steel making process. The heat transfer characteristic between the roll and the steel in rolling process is studied with basic experiments and numerical simulation. The results applied to optimize the prediction of the temperature reduction in steel and the expansion of roll heated by steel.

1. 緒 言

圧延プロセスにおいては、鋼材は繰り返し加熱冷却され、形状サイズを圧延により整え、材質を作りこまれる。加熱冷却技術は熱間圧延プロセス、厚板プロセス、冷間圧延プロセスにおける鋼材材質の作り込みの役割を担っている。また、熱間圧延において高温の鋼材を圧延する圧延ロールの温度は上昇し変形するため、圧延ロールの冷却は、鋼材の形状サイズ制御を行うために必要とされている¹⁾。このように加熱冷却を含む伝熱技術は圧延プロセスにおける鋼材材質および形状サイズの作り込みに重要な役割を担っている。

本論文では、著者らが取り組んできた圧延プロセスにおける伝熱技術に関して、水冷に関するスプレー冷却の基礎特性研究、ガスジェット冷却における能力促進の研究、圧延ロール～鋼材の伝熱予測技術に関する研究について述

べ、圧延プロセスにおける伝熱技術について紹介する。

2. 水冷におけるスプレー衝突圧力と冷却能力の関係

高温鋼材の冷却の際には様々な鋼板条件に応じた散水を行うために、様々なスプレーノズルが使われており、散水時の衝突部形状、スプレー形状から図1に示すように称されている。水スプレー冷却は広い冷却範囲および水量制御性を有するため、非常に有効な冷却手法である。スプレー冷却に関しては以前から研究がされており、衝突部の熱伝達率は日本鉄鋼協会が中心となってまとめている²⁾。衝突噴流のその際の冷却能力のパラメータは伝熱面における水量密度とされており、ノズルの種類やノズル負荷圧力の影響などに関しては十分に考慮されていない。一方、門出ら³⁾による衝突噴流系の限界熱流束の整理式では、水量に流速

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

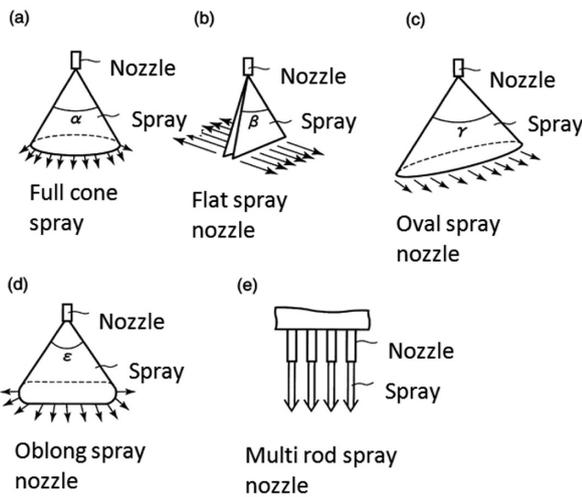


図1 種々のスプレーノズル
Various spray nozzle

を乗じた指標を用いており、衝突圧力の沸騰冷却における指標の有効性を示していると考ええる。そこで多くの要因が組み合わさった複雑な現象であるスプレー冷却において、各種要因を包括的に評価することが可能な、ノズル噴流の衝突圧力と、各種スプレーノズルの熱伝達率の関係について調査した。

2.1 衝突圧力および冷却能力の測定方法

実験に使用したスプレーノズルの仕様を表1に示す。初めにスプレー噴流の衝突圧力の主要因を解析するためにスプレーの水量密度分布と衝突圧力分布を想定した。スプレーの水量分布については、衝突面に外径10mmのプラスチックチューブを連続して配し、そこから流出する水量を測定した。噴流衝突圧力については、模擬鋼板にスプレーを噴射し、そこに取り付けられた圧力センサにより測定を行った。また、冷却能力の測定においては、表面から深さ9.5mmの位置に熱電対を設置した厚さ19mmのSM490加熱試験片(加熱温度950℃)をスプレーノズルの直上に配置し、下方からスプレーを噴射させ、設置した熱電対の温度履歴から板厚中心部での冷却速度を求めた。

2.2 水量分布、衝突圧力と冷却能力の関係

ノズルA, Bにおける水量分布、衝突圧力分布、衝突圧力指数として水量分布に測定位置でのスプレー噴流の広がり角度の余弦を乗じた値のそれぞれをスプレーノズル直下の値で正規化して図2に示した。図に示すように、水量密度分布と衝突圧力値は、その傾向が異なっている。しかしながら、水量密度に各位置での余弦を乗じた値は、衝突圧力と同様な傾向になっている。余弦を乗じたのは、スプレー出口での噴流速度は同等として、各測定位置での衝突面法線方向の噴流速度をあらわすためである。これにより、提示した指標は、衝突面法線方向での運動量を示しており、2種類のノズルにおいて衝突圧力と良好に一致している。

表1 スプレーノズル仕様
Specification of spray nozzle

Nozzle	Spray shape	Flow rate [L/min]	Discharge pressure [MPa]	Impact area [mm]
A	Oblong nozzle	100	0.3	250 × 60
B	Oval nozzle	100	0.3	300 × 40
C	Oval nozzle	100	0.3	350 × 50
D	Oblong nozzle	33	0.3	250 × 70
E	Full cone nozzle	100	0.3	70φ

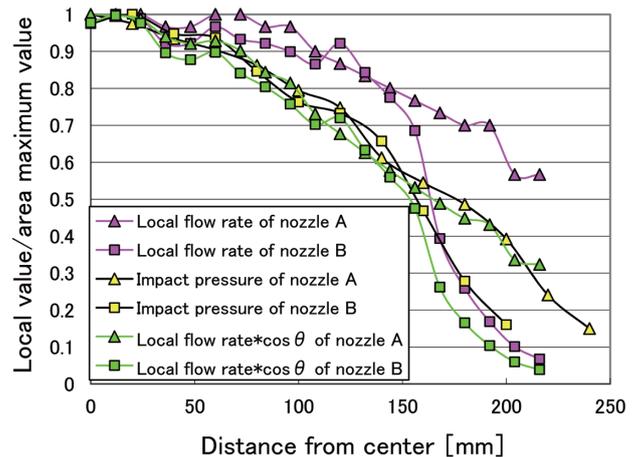


図2 衝突圧力と水量密度、水量密度 × cos θ の関係
Relation of impact pressure, local flow rate and local flow rate × cos θ

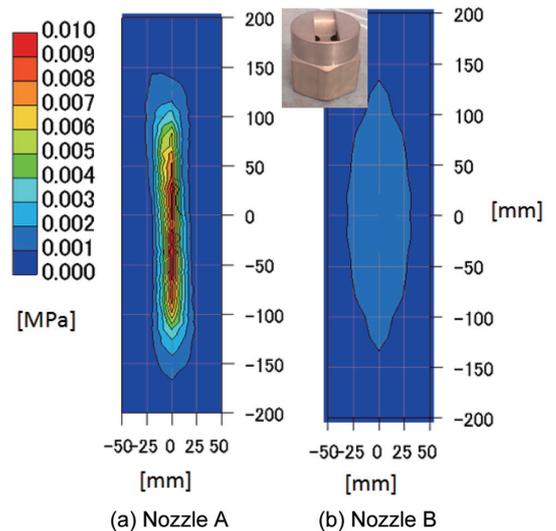


図3 スプレー噴流衝突圧力測定結果
Impact pressure distribution

ノズルAおよびノズルBの噴流衝突圧力測定結果を図3に示す。ノズルA, Bは水量、噴射範囲ともほぼ同一の仕様であるが、噴流衝突圧力は大きく異なっている。これは図3に示すようにノズルAが他のノズルと異なり、ノズル出口の近傍でスプレーを衝突させ、拡散させるノズルであるため、スプレー衝突時に液滴流速が減少しているためだと考えられる。

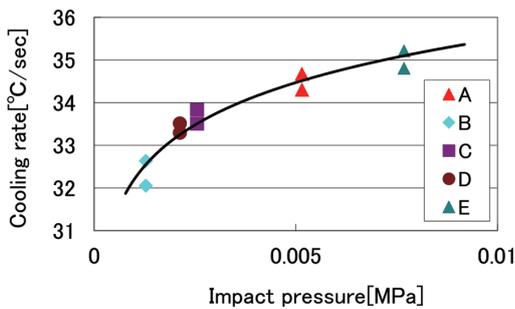


図4 スプレー噴流衝突圧力と冷却能力の関係
Relation ship of spray impact pressure and cooling rate

各ノズルにおけるノズル直下の冷却能力測定結果を図4に示す。冷却能力の指標として板厚中心温度が750～600℃の範囲の平均冷却速度を用いた。図4に示すように噴流衝突圧力をパラメータとして用いることで、ノズル種類、仕様が異なる場合でもよく整理が可能である。特にノズル水量の異なるDノズルについても冷却能力は噴流衝突圧力で整理ができており、本指標の有効性を示している。

このように、水スプレー冷却において、ノズル噴流の衝突圧力を測定することでノズル種類、仕様が異なる場合、あるいは同じノズルの衝突領域における分布に関しても、冷却能力の指標とすることができる。本技術は、冷却装置に用いるスプレーノズルの一次選定、二流体ノズルと一流体ノズルの比較、ノズル内構造の改造評価⁹⁾など、様々な冷却装置の開発に貢献している。

3. ガスジェット冷却における冷却能力促進

ガスジェット冷却は水冷に比較して、冷却能力は小さいが、熱伝達率が鋼板温度に依存しないこと、ガス種を選択により酸化性の高い高温鋼板を無酸化で冷却できるため、鋼板製造プロセスにおいて広く利用されており、その伝熱能力向上は鋼材材質特性の向上という点からも重要である。これまでに、伝熱能力向上のため噴流内乱れを増加させる手法として、音波による方法、網をノズル内に設置する方法⁹⁾、小円柱の挿入によるもの^{6,7)}が報告されている。しかし、円柱の挿入についてはその挿入方法は伝熱面とノズルの間の空間上に設置される形式であり、工業的に適用するには困難な形であるとともに、Re数が10000以下の比較的小さい領域でのみ行われている。

そこで、本報告では、小円柱をノズル先端に溶接し、この円柱の径、(ノズル～伝熱面距離)/ノズル径と伝熱促進効果について調査した。

3.1 実験装置および方法

図5に実験装置および幾何学形状パラメータを示す。ノズルは円形であり、ノズル～伝熱面間距離は50mmに固定した。ノズル径は7.8, 10.5, 12.5mmとし、先端に直径0.08, 0.3, 0.5, 1.0, 1.6mmの円柱を溶接した。伝熱面は厚さ

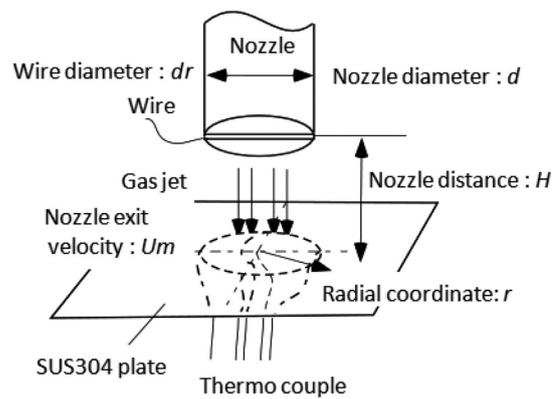


図5 ガスジェット冷却実験状況
Schematic diagram of experimental apparatus

1mmのステンレス鋼板を用い、伝熱面裏面には直径0.3mmのK熱電対がノズル噴流衝突点を中心として十字状に半径0, 7.5, 15, 30, 45, 60mmの位置に溶接されている。伝熱面は通電加熱され、約600℃まで加熱され電源を遮断してから冷却される。温度データは、A/D変換ボードを介して0.2秒ごとにコンピュータに取り込まれる。この温度データより裏面の熱放射を補正し熱伝達率を算出する。ガス流速は100～200m/sまで変化させた。

3.2 実験結果および考察

円柱設置有無による伝熱面における熱伝達率分布を図6に示す。ここでは、ノズル径およびガス流速を変更した際の熱伝達率分布を示している。図6において、円柱設置の影響はいずれもよどみ点近傍 $r/d < 2.5$ に現れているが、 $r/d > 2.5$ においてはいずれの流速ノズル径においてもほぼ同じ値となっている。また、円柱設置の効果はよどみ点の近傍の熱伝達率を増加させており、この熱伝達率の増加量は流速の増加とともに上昇している。これは、ノズル先端への円柱設置により、ノズル心付近の流れの乱れを増加したことと起因すると考えられる。

図7には、ノズル先端に溶接設置した円柱径 dr を変化させた場合のよどみ点における熱伝達率の変化状況をガス流速を変化させて示した。なお、ノズル径は10.5mmとしている。図7より、いずれの流速においても、円柱径が0.5mmまではよどみ点における熱伝達率が円柱径の増加とともに向上していることが分かる。また、熱伝達率の向上効果は円柱径0.5mm以上では円柱径の増加とともにやや低下しているが、使用した1.6mmまではほぼ同じであった。これは、実験したガス流速領域においては、本報告におけるノズル形状による熱伝達率の向上効果はガス流速に影響を受けないことを示している。

ノズル径を変化させた場合の熱伝達率向上効果を図8に示す。ここでは、ガス流速を150m/s、円柱径を0.5mmに固定した場合について検討している。熱伝達率の向上効果を評価するために、仮想的にノズルピッチを40～60mmと

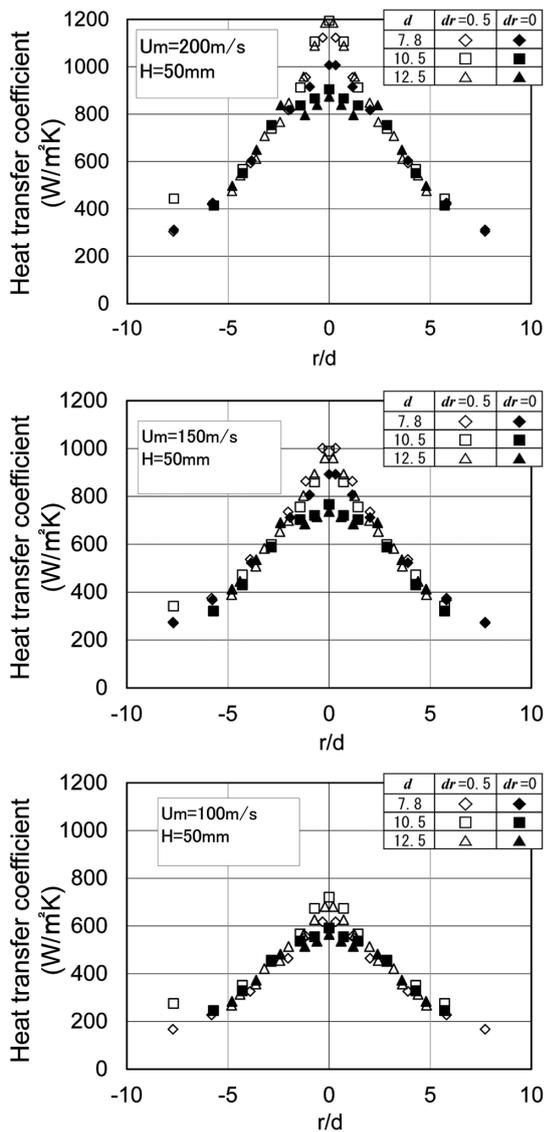


図6 円柱装入時の熱伝達率分布
Distribution of heat transfer coefficient

設定し、各ノズルピッチと同じ半径内における平均熱伝達率を求め、円柱設置の有無、ノズル径の変化について示した。ノズル径については H/d で示した。また、熱伝達率の向上比率とは、各ノズル径における円柱設置なし時の平均熱伝達率を1としたときの熱伝達比率である。

まず、ノズルピッチが小さくなるに従い、熱伝達率の向上比率は大きくなっている。これは、円柱設置による熱伝達率の向上が、よどみ点近傍で顕著であることから、よどみ点近傍の面積率が高ければ、平均熱伝達率が高くなるということを示している。次に、ノズル径と平均熱伝達率向上率の関係については、ノズル径の減少とともに平均熱伝達率向上率が低下している。

図8において、ノズル径を本試験範囲よりさらに小さくした場合の平均熱伝達率向上比率が1となる点は、ほぼ $H/d \approx 7 \sim 8$ となる。この値は、ガス噴流のいわゆるポテンシャルコア⁹⁾が消滅する付近である。このことから、円柱設置による熱伝達率の向上がポテンシャルコア領域のガス

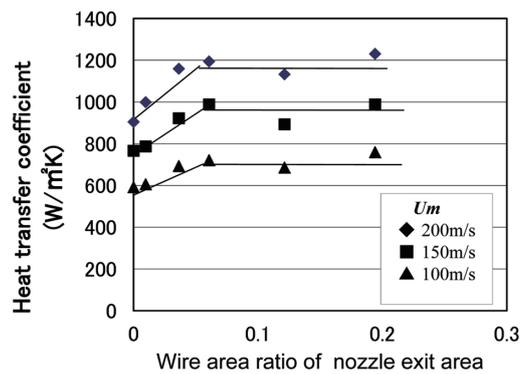


図7 円柱径変化時の熱伝達率の変化
Effect of wire diameter to heat transfer coefficient at the stagnation point

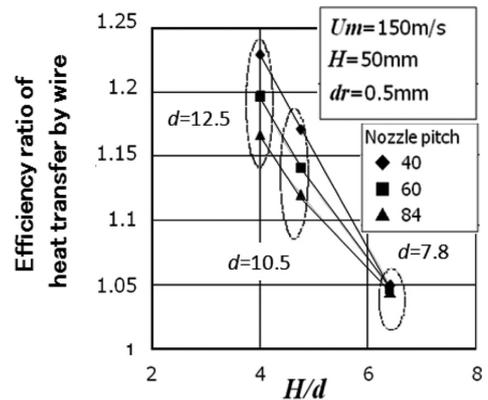


図8 ノズル高さとのノズル径の比が円柱効果に与える影響
Effect of nozzle pitch and H/d on heat transfer coefficient

噴流の乱れの不足を補うことによるものであること、円柱設置によるガス噴流ポテンシャルコア領域の乱れの影響はポテンシャルコア領域外では小さいことが推定される。したがって、図8において、ノズル径が小さくなるとともに、ガス噴流の伝熱面到達時のポテンシャルコア部分が小さくなるために、円柱設置による平均熱伝達率の向上効果が低下するものとする。

図8で示した熱伝達率の向上効果を動力の観点での評価を試みたのが図9である。円柱設置により、ノズル吐出孔の投影面積は減少するためにノズル吐出圧損が増加することになり、動力面ではロスになる。そこで、円柱設置によるのではなく、この動力ロスの分だけ流速を増加させた場合に熱伝達率が増加する比率を図9の横軸に示した。この横軸の値はノズル径により変化することになる。すなわち、ノズル吐出孔面積に対する円柱の投影面積率に従い圧損が決まり、この圧損動力に相当する流速増加量を定められる。そして、この圧損動力の増加に相当する流速増加による平均熱伝達率の向上は各ノズル径ごとに定まっているためである。図8においては、円柱設置による熱伝達率向上効果がなくなるのは、ノズル径換算で約6.5mm程度であるが、図9のように、円柱設置による動力ロスを考慮すると、熱伝達率向上効果がなくなるのは、本試験範囲である7.8mm

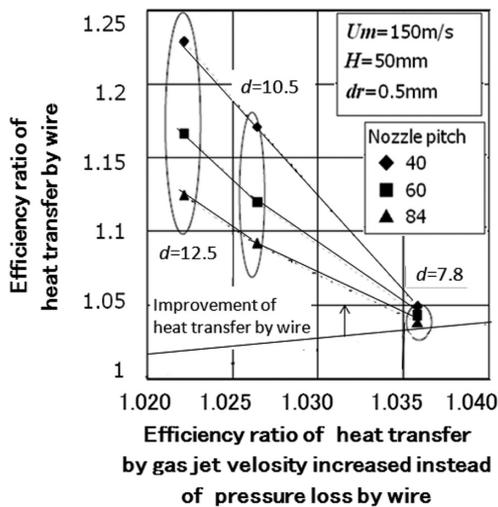


図9 ワイヤ設置による熱伝達促進効果とワイヤ圧損同等分の噴流速度増加効果による熱伝達促進効果の関係
Relationship of the increase of heat transfer by wire and the increase of heat transfer by velocity increase the same as the pressure loss by wire

付近となる。

ガス噴流熱伝達における熱伝達率の向上を狙った、工業的に可能なノズル先端への円柱設置による手法の熱伝達特性について調査した結果、1) 円柱設置による熱伝達率の向上はよどみ点近傍に限定される、2) 円柱の投影面積比の増加により熱伝達率は向上するが、投影面積比がある値以上で熱伝達率の増加は飽和する、3) 円柱設置による熱伝達率向上効果は H/d が4～7以下の領域で有効であることが判明した。

4. 固体接触伝熱と熱間圧延時の鋼材-ロール間伝熱量予測技術の研究開発

固体接触伝熱は鉄鋼製造プロセスにおける薄板の連続焼鈍プロセスにおいては、冷却ロールに薄鋼板に張力をかけて引っ張ることにより接触させて冷却するロール冷却技術として用いられていることが知られている⁹⁾。一方、熱間圧延ロールと高温鋼材の間の伝熱による圧延ロールへの熱移動は時間とともに圧延ロールを数100 μm ではあるが熱変形させる¹⁰⁾。しかしながら、熱間圧延鋼板における板厚精度は50 μm 以下であり¹¹⁾、このような熱変形を予測し、板厚制御に反映することは重要である。

接触熱伝達に関しては、これまでに様々な研究がある。橋¹²⁾は、静止した固体同士の接触熱伝達では、固体同士の真実接触面積を接触圧力と材料の硬さをパラメータとし、真実接触部以外では気体が介在するものとして接触熱伝達を表している。

Chenら¹³⁾は、熱間圧延時の鋼材側に熱電対を設置して測定し、熱電対の温度推移より逆算して接触熱伝達を求め、低炭素鋼、ステンレス鋼、Nb鋼の各材料に関して接触圧力で整理でき、接触圧力の増加とともに接触熱伝達は増加

するとしている。

Hladyら¹⁴⁾は、Chenらと同じ熱間圧延の実験系を用いて、アルミニウムと銅の圧延を行い、アルミニウムと鉄鋼材料は、接触圧力に材料の変形抵抗を加味すれば整理できることを示した。しかしながら、銅については提示された整理式では表現することができず、更なる検討が必要であるとされている。

柳ら¹⁵⁾は、アルミニウム板の連続圧延において、圧延時のアルミニウム板の温度と圧延後にほぼロール内で一定になったロール温度を用いてロールとアルミニウム板の接触熱伝達をロールとアルミニウム板の接触弧長で整理でき、接触弧長が短くなるほど接触熱伝達率が高くなることを示した。

このように接触熱伝達に関して様々な知見が得られているが、接触熱伝達を評価する考え方については検討の余地があると思われる。

ここでは、鋼材-ロール間伝熱量予測技術を開発するため、接触伝熱の主因子に関する研究として、移動鋼板をロールでピンチする短時間接触伝熱形態を用い、ロールに種々の材料を使用し、接触熱伝達の調査を行い、その特性を明確にするとともに、その考え方を元に構築した鋼材-ロール間の伝熱量予測技術について報告する。

4.1 実験装置および方法

図10に実験の様子を示す。ロールは径200mm、幅300mmで研磨済みであり、内部から水冷され、2つのロールで移動鋼板を挟み込むような位置に設置した。また、ロールの両端にはロードセルを設置し、鋼板を挟む際の押しつけ力を測定するようにしている。鋼板は板幅50mm、板厚0.2～0.4mmの冷間圧延板を使用した。鋼板は、このロールの前後に位置した送り出しおよび巻き取り装置を用いて連続的に、このロール部に供給される。鋼板温度はこのロールピンチ部の約1m上流側で約400～500 $^{\circ}\text{C}$ に加熱され、ロール部で冷却される。鋼板の通板速度は15～120m/minである。鋼板温度のロールピンチ部における変化は、いずれも接触式の熱電対でロール前後でロールピンチ部から60mmの位置で測定する。測定は鋼板の通板が安定し、さらに加熱冷却状態が安定した状態で行われる。

熱電対は直径130 μm のK熱電対を用い、鋼板に接触さ

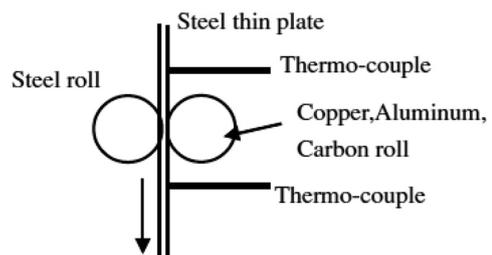


図10 固体接触伝熱実験状況
Experimental apparatus of the roll contact heat transfer

表2 ロールの物性値
Material property of roll

	Carbon	Aluminum	Copper	Steel
Young ratio (GPa)	5	70.5	112	210
Thermal conductivity (W/m ² K)	93	209	394	58
Thermal diffusivity (m ² /s)	0.35	0.29	0.36	0.053

せるための接触板により鋼板に強制的に接触させる。また、ロール表面温度についても同様に熱電対で測定した。温度データは、A/D変換ボードを介して0.2秒ごとにコンピュータに取り込まれる。この温度データより、ロールピンチ部以外の空走距離における温度降下を補正して鋼板の冷却熱量を算出し熱伝達率を算出した。なお、ロール材質は、片側は常に鉄ロールとし、反対側のロールの材質を変更した。ロール材の物性を表2に示す。カーボン材は、ヤング率が小さく、同じ接触圧力でも変形が大きく、ロールと鋼板の接触長が長くなると推定される。アルミニウム、銅は鉄に比較し熱伝導率が高い材料として選定している。

4.2 実験結果

ロール材質ごとに接触圧力と通板速度を変化させた場合のカーボン材とアルミニウム材の熱伝達率を図11、図12に示す。なお、熱伝達率は、ロールと鋼板の接触長を1mmとして算出し、接触圧力としては、接触線圧を用いている。図11、図12に示すようにいずれのロール材質においても、接触線圧の増加に伴い、熱伝達率が増加している。また、いずれの材質のロールにおいても鋼板の通板速度の増加に伴って熱伝達率が増加している。しかしながら、その増加傾向は一樣とはなっておらず、材料、通板速度によっても異なっている。

たとえば、図11のカーボンロールでは接触熱伝達率は通板速度が15、30m/minでは、接触線圧の増加による熱伝達率の増加はごく小さくなっているが、60m/minになるとその飽和傾向は解消し、単調に増加している。図12のアルミニウムロールでは、ほぼすべての通板速度で熱伝達率は単調に増加している。このように接触熱伝達率は接触圧力に比例するといわれているが、本実験の系のような非定常な接触系では同じ材料で接触圧力が同一でも通板速度が異なると接触熱伝達は異なっており、接触圧力だけで整理することは困難と推定される。ロール材質間の比較を図13に示す。最も熱伝達率が高いのはカーボンとなっており、接触圧力により順位は異なるが、接触圧力30N/mmでは、銅、アルミニウム、鉄の順となっており、熱伝導率だけで整理することは同様に困難である。

4.3 考察

これまでの、接触時の伝熱現象を接触長を仮定して算出してきたが、各ロール材質ごとの熱伝達率についての整理が困難であるため、接触圧力をロールと鋼板の接触長に換

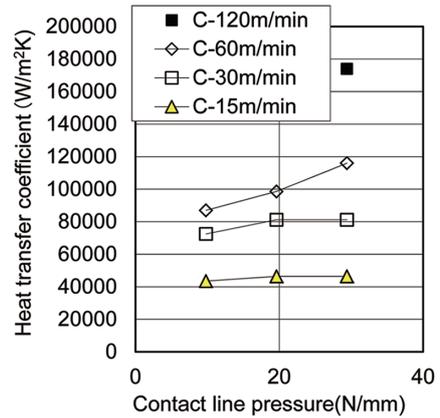


図11 カーボンロールの接触線圧と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact pressure with carbon roll

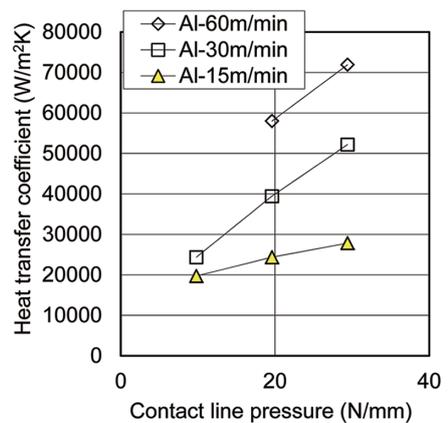


図12 アルミロールの接触線圧と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact pressure with aluminum roll

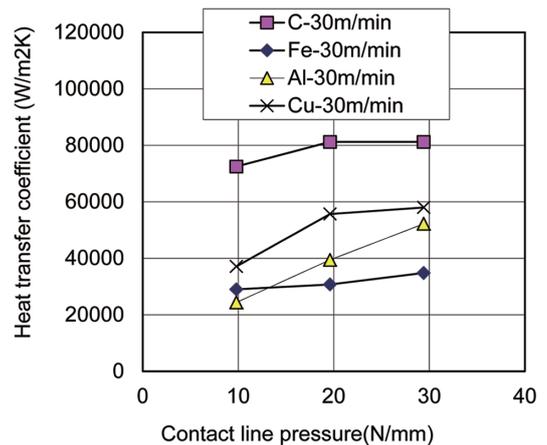


図13 各材質ロールの接触線圧と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact pressure with various roll material

算して接触時間で整理する。これは、通板速度により変化する接触熱伝達率の整理のためには時間の因子が必要であると考えたからである。その整理方法を以下に示す。

Herzの固体接触時の接触長を算出する公式¹⁶⁾のうち、異なる材質の円筒と円筒が接触する際の公式を用いて、接

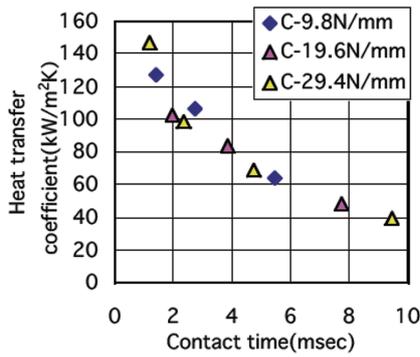


図 14 カーボンロールの接触時間と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact time with carbon roll

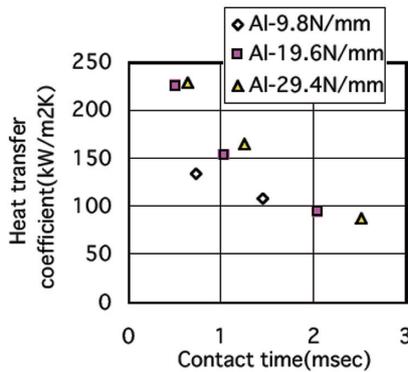


図 15 アルミニウムロールの接触時間と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact time with aluminum roll

触線圧をロールと鋼板の接触長に換算し、鋼板の移動速度を用いて、ロールと鋼板の接触時間を算出した。そして、この接触時間と熱伝達率の関係をカーボン材とアルミニウム材に関して図 14 から図 15 に示した。これらの図に示すように、接触線圧および鋼材通板速度の相違を接触時間として表した場合、接触熱伝達率は接触時間との間で良い相関を示すことが分かった。図 14, 図 15 のように接触時間で固体接触時の熱伝達率が整理されるということは、以下のような理由によると考えられる。

すなわち、接触時間が短ければ、鋼板からロールへの熱移動はロール側の熱伝導により律速されることなく熱伝達が行われるため、高い熱伝達率が得られる。しかし、接触時間が長くなるとロール側に流入した熱がロール内を伝導しきれずにロール表層温度が上昇することによって、熱伝達が低下し、接触時間内での熱伝達率が小さくなるものと考えられる。これは、鋼板の板厚が増加すると、板中心での最大冷却速度が低下するのと同様な熱伝導律速現象であると考えられる。

しかし、ロール材質を固定した場合の通板速度、接触線圧については接触時間で整理できたとしても、ロール材質が異なる場合には材料物性の影響をヤング率の差でしか見ていないことになる。そこで図 16 には、各材質の接触時

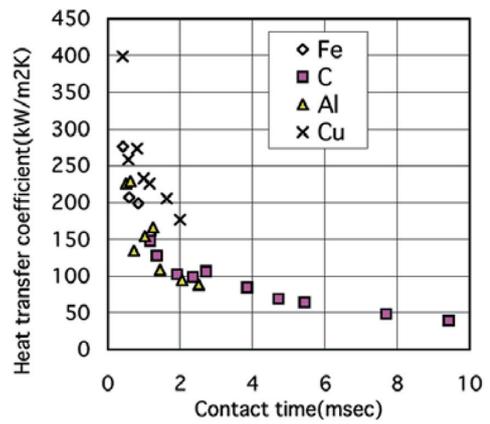


図 16 各材質ロールの接触時間と熱伝達率の関係
Relationship of heat transfer and contact time with various roll material

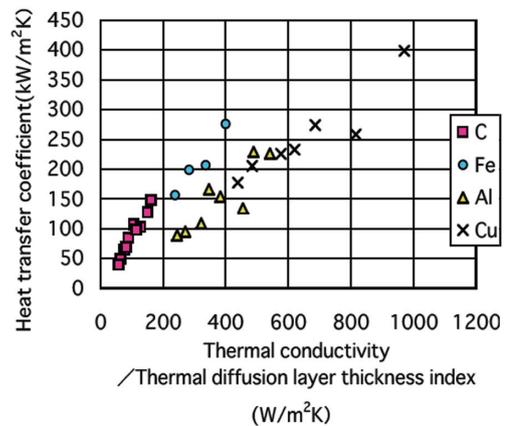


図 17 各材質の(熱伝導率/温度浸透厚み)と熱伝達率の関係

Relationship of heat transfer and 'thermal conductivity by thermal diffused depth' of various roll material

間と熱伝達率を合わせて示した。図 16 によると接触時間 2msec 近傍では、銅の熱伝達率が高くなっている。これは、ロール材の熱物性の影響を考慮していないためと推定される。

そこで、ロール材の熱物性を考慮するために次のような整理を行った。接触時間内のロール内部での熱のバランスを考慮した式 (1)

$$q = h(T_s - T_r) = \lambda(T_s - T_r) / Lt \quad (1)$$

$$Lt = A\sqrt{\kappa t} \quad (2)$$

q: 熱流束 (W/m²), h: ロール鋼材間熱伝達率 (W/m²K), T_s: 鋼材温度 (K), T_r: ロール温度 (K), λ: ロール材熱伝導率 (W/mK), Lt: 接触時間での温度浸透厚み (m), A: 係数, κ: ロール材温度伝導率 (m²/sec) = λ/ρc, ρ: 密度 (kg/m³), c: 比熱 (J/kg/K), t: ロール～鋼板接触時間 (sec) に基づき、熱物性指標として、[λ/√(κt)] をとり、熱伝達率 h と比較したのが図 17 である。

この指標は、図 18 に示すようにロール側材質の熱伝導率を接触時間内の温度浸透厚を表す指標で除したものであり、接触時間内のロール内での平均熱流束を示し、熱伝

達率と同じ次元を有する。図 17 によると、接触時間内の温度浸透厚に比較した熱伝導率が高ければ熱伝達率は増加していることが分かる。すなわち、ロールと鋼材の熱伝達は、接触時の接触時間とロール、鋼材の側の熱物性で整理できると考える。

4.4 鋼材 - ロール間熱伝達モデルの開発

4.3 の結果より、熱伝達は圧延などのように固体表面突起が潰されて接触する場合は、固体間の熱伝導を熱物性、接触時間などを考慮して厳密に解くことにより求められると考え、計算モデルを構築した。計算は図 19 に示すようにロール円周方向、鋼板圧延方向の熱移動は考慮しない一次元非定常熱伝導方程式¹⁷⁾とし、接触開始後は、圧延ロールと鋼材は鉄の酸化膜を挟んで一体化していると仮定して解いた。また、圧延の際の摩擦発熱、鋼材側の圧延変形時の発生熱¹⁸⁾は考慮した。そして、接触開始から接触終了後までの熱伝導計算を行い、その間の圧延ロール側の受熱量の変化を求め、接触時間と接触長で換算した値を接触時の平均熱伝達率とした。

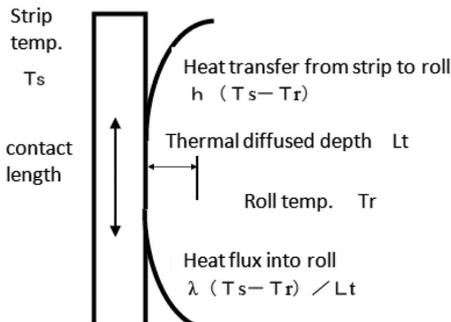


図 18 ロール - 鋼板間の伝熱状況
Heat transfer apparatus between roll and strip

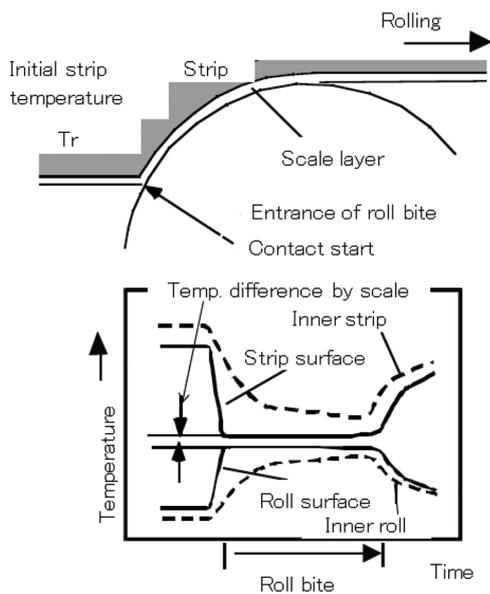


図 19 圧延ロールバイト内の温度変化状況
Temperature transition in roll and strip

次に、本モデルで求める熱伝達率の影響因子として、接触時間、圧延ロールが接触開始する前の温度の影響について計算したのが図 20, 21 である。図 20 に示すように圧延ロール - 鋼材の接触時間の影響は非常に大きく、柳らの報告と同様な傾向となっている。図 21 にはロールの初期温度の影響は、圧延ロール温度が 50 度から 200 度まで変化してもほとんどないことが分かる。

次に本モデルを用いて実際の圧延のデータを用いて求めた熱伝達率を図 21 に示す。図 22 は、仕上げ圧延後の板

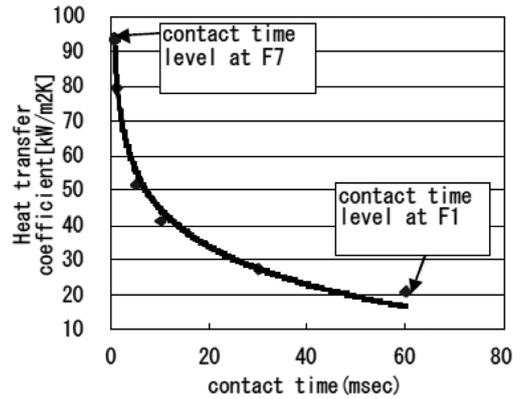


図 20 圧延ロール - 鋼材の接触時間が熱伝達に与える影響
Effect of the contact time on heat transfer between roll and strip

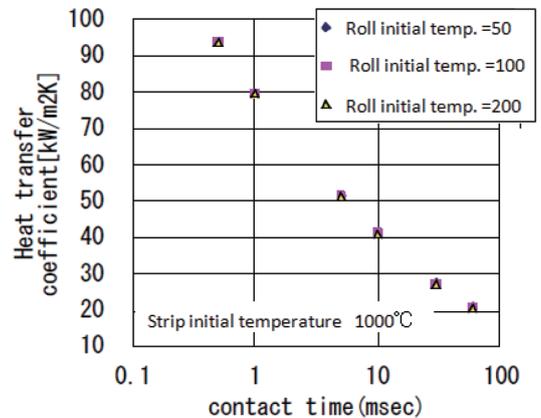


図 21 圧延ロールの温度が熱伝達に与える影響
Effect of roll temperature on heat transfer

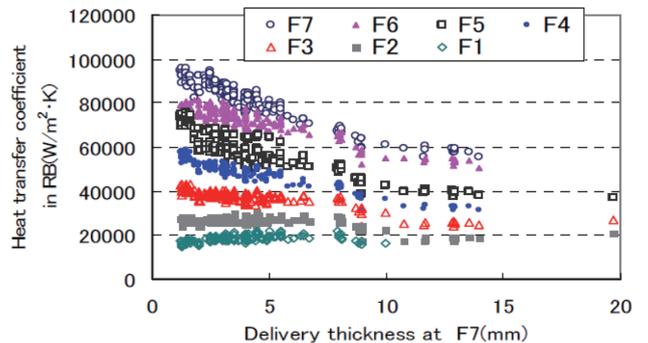


図 22 ロールバイト内熱伝達係数の計算値
Calculating heat transfer coefficient in roll bite

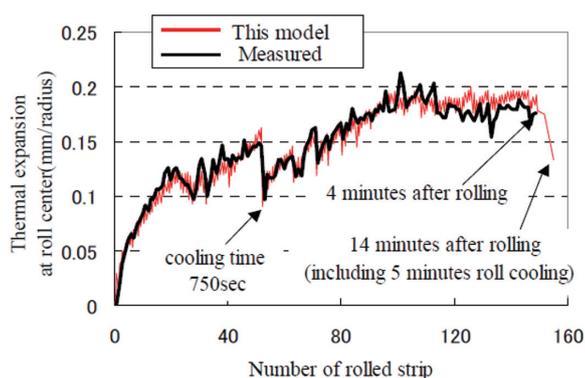


図 23 熱間圧延操業における計算値と測定値の比較
Comparison of thermal expansion

厚を変化させた場合の7つある各仕上げ圧延スタンドごとの熱伝達係数を示したものである。この図に示すように、熱伝達係数は、仕上げ圧延後の板厚に応じて各スタンド間の熱伝達比率を含めて複雑に変化していることが分かる。

図 23 に実圧延ロールの熱膨張量と本モデルによる推定値を比較した結果を示す。両者は良好に一致しており、本予測モデルにより、実圧延ロールの熱膨張挙動を精度よく表現できることが確認された。

5. 結 言

以上のように、圧延プロセスにおける伝熱技術の研究開発の事例として、水冷、ガスジェット冷却の基礎研究、圧延ロール - 鋼材間の伝熱予測モデルについて述べた。鉄鋼製造プロセスが、近年の要請となっている、CO₂削減に寄与する高強度鋼板の増加、板厚形状の高精度化の進展を追

及していくのに伴い、いわゆる加熱冷却以外でも、圧延プロセスにおける伝熱技術課題は高度化し増加している。今後も、伝熱現象の基礎的要因を考慮しながら、上記課題に応えるだけでなく、伝熱技術により製造プロセス負荷を低下させ得る技術開発を行っていききたい。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼協会：圧延理論と実際. 2010, p. 151
- 2) 日本鉄鋼協会：鋼材の強制冷却(特別報告書 No.29). 1978, p.4
- 3) 門出政則：日本機械学会論文集. 50-453B, 1392 (1984)
- 4) 国際公開特許：WO2014/102909 A1. 2014.7.3
- 5) Gardon, R., Akifirat, J.C.: Int. J. Heat Trans. 8, 1261 (1965)
- 6) 羽田喜昭 ほか：第 33 回伝熱シンポジウム講演論文集. 1996, p. 617
- 7) 羽田喜昭 ほか：日本機械学会論文集. 66-644B, 1176 (2000)
- 8) 日本機械学会：伝熱工学資料5版. 2009, p. 37
- 9) 日本公開特許：特開平 11-236622. 1999.8.31
- 10) 日本鉄鋼協会：圧延理論と実際. 2010, p. 155
- 11) 新日本製鐵：鉄と鉄鋼がわかる本. 2004, p. 96
- 12) 橋：日本機械学会誌. 155, 102 (1952)
- 13) Chen, W.C. et al.: Metal. Trans. A. 24A, 1307 (1993)
- 14) Hlady, C.O. et al.: Metal. Mat. Trans. B. 26B, 1019 (1995)
- 15) 柳修介, 池田昌則, 國井弘：神戸製鋼技報. 58 (3), 29 (2008)
- 16) 村上敬宣：弾性力学. 1996, p. 166
- 17) 水谷幸夫, 香月正司：コンピュータによる熱移動と流れの数値解析. 1985, p. 56
- 18) 志田茂：塑性と加工. 9, 127 (1968), 10, 610 (1969)



芹澤良洋 Yoshihiro SERIZAWA
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員 工博
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



川村浩久 Hirohisa KAWAMURA
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部
冷延・鋼板処理エンジニアリング室長



山本龍司 Ryuji YAMAMOTO
君津製鉄所 厚板部 主幹



大串圭二 Keiji OOGUSHI
新日鉄住金エンジニアリング(株)
製鉄プラント事業部 商品技術室
鋼板処理技術グループ シニアマネージャー



高町恭行 Yasuyuki TAKAMACHI
プロセス研究所 圧延研究部
上席主幹研究員



吉野博之 Hiroyuki YOSHINO
プロセス研究所 プロセス技術部
主幹研究員



小川 茂 Shigeru OGAWA
技術開発本部 顧問 工博