鉄鋼プロセスにおける噴流を用いた伝熱促進に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、自動車用高張力鋼板や建築用耐震性高強度・高韌性鋼材など顧客ニーズを満足させる高級鋼の開発が求められている。高級鋼の製造では、材料の特性を支配する組織制御や加工制御、特に圧延中の温度制御の精度向上が必要である。特に、サイズが大きい鉄鋼材料では、均質性が求められるため、温度の均一性が要求される。また、鉄鉱石や石炭などの原料問題や CO₂ 排出削減の地球環境問題から、省資源・省エネルギー型の鉄鋼生産プロセスの開発が急務である。省エネルギーを進めるためには、製鉄所内の未利用排熱を有効に利用することやプロセスの効率を向上させ、処理時間をより短縮することなどが求められている。

そこで本研究では、高いエネルギーを持った少量の流体が、混合・攪拌、熱伝達(冷却・加熱)等、様々な仕事を可能とし、かつ、工業的にも多くの分野で応用されている“噴流”を対象として、新しい鉄鋼製造プロセスへの応用・展開を考案した。具体的には、噴流の特長を生かして、高精度の温度制御や均一性が求められる高級鋼作り込み技術や省資源・省エネルギーに繋がる鉄鋼生産プロセス技術開発として次の5つのテーマについて述べた。

2章では、最も基本的な単孔の水噴流によって冷却されている鋼板の冷却に関して、冷却面の姿勢、水温や表面温度の複雑な関数として表される冷却特性を実験的に評価した。噴流を吹き付ける場合、冷却面から水を吸い上げた場合とその姿勢(上面/下面)を組合せた4つの姿勢・流動状態の伝熱特性を定量的に評価し、核沸騰領域は姿勢・流動・流速の影響を受けず熱流束は伝熱面過熱度の三乗に比例する、DNB 点後も沸騰曲線は緩いこう配ながら過熱度が増加すると熱流束も増加する等の知見を得ると共に、熱伝達の促進のためには、合体気泡の成長を阻止する気泡を吹き払う形の流れが効果的であることが確認された。これらは、より均一な冷却や高精度温度制御によるバラツキの低減や信頼性向上、省資源化や合金成分添加削減につながる強冷却への応用や適用が今後期待される。

3章では、製鉄所に多く存在する低質(500K以下)の排熱から容易に作ることが可能な過熱液体噴流に関して、高温の鋼材や鋼板に衝突させた場合の冷却を実験的に評価した。その結果、空気によって水を微粒化するミスト噴流との比較において、液滴径は両噴流ともにノズル噴射後の気水比 Ra の関数として整理される、過熱液体噴流では同じ Ra でもミスト噴流に比べて効率的に液滴が加速されている、熱伝達は液滴径に関係なく、液滴速度、水量密度、および、鋼材表面状態で整理される、同じ液滴速度と水量密度の条件下では過熱液体噴流の熱流束はミスト噴流のその約 0.75~0.83 倍である、などの知見を得た。また、過熱液体噴流では冷却後の液滴の滞留が少なく、鋼材表面がドライな状態であり、冷却の均一性や冷却の制御性を高める冷却として優れている。このように過熱液体噴流の冷却は、従来、衝風冷却あるいはミスト冷却で要していた膨大な空気が不要となる可能性があり、省エネ型の新冷却方法として期待される。

4章では、冷却プロセスにおける高精度の温度制御を実現するために鋼材冷却時の材料の変態に

よる発熱現象、いわゆる変態発熱を取り上げてその評価手法を確立した。変態モデルを使って、あらかじめ、変態の開始と終了、およびその間の変態発熱量を事前に考慮することで、冷却中の変態による発熱量を加味した冷却制御が可能となる。従って、従来の熱物性(熱容量)に見かけ上変態発熱を取り込む方法では難しかった板厚の厚い鋼板の冷却コントロールが可能となったり、冷却停止温度はずれから引き起こされる材質はずれが解消されたりする効果が期待される。この変態発熱の取扱手法は、変態の進行の予測が難しい鋼材(例えば、微量の合金元素を添加して変態の事前予測が難しい場合)に対して、簡便な冷却実験でその変態進行を評価できると共に実機の鋼材を圧延する際に、冷却条件を適正化する手法として今後応用されるであろう。

5章と6章では、製鋼の2次精錬プロセスで用いられる気泡噴流を取り上げた。まず第5章では、気泡を吹き込むことによって気泡を用いない単相の流れに対して運動量の輸送や噴流の広がり、攪拌、熱輸送がどのように変わるのかを説明するために、最も基本的な実験として、直径2mmφの単孔ノズルから空気を水モデルに吹き込んで、LDVとサ-ミスタ温度計を用いてレイノルズ応力と乱流熱流束を計測して、ノズル近傍の領域では、レイノルズ応力と乱流熱流束が逆勾配拡散型の性質を持つこと、気泡 plume 内の平均速度、平均温度、それらの rms 値は単相流の浮力支配の plume よりもむしろ強制対流のジェットに近いが、気泡の存在によってその乱流強度はノズルから遠方でも減衰しにくい等の知見を得た。

続いて6章では、どのようなノズル形態や吹込み状態が熱輸送や混合に有効であるかの知見を得るために、同じ空気量でも気泡の形態が大きく異なる多孔ノズルや微小気泡群を生成する多孔質プラグノズルを用いて混合特性、運動量輸送、および熱輸送の違いを評価した。小気泡群をノズル近傍で大量に形成するプラグノズルでは、ノズル近傍で直ちに液体の巻き込みによって噴流を形成するが、その後流では、液体の巻き込みによる運動量の増加は少ない、気泡の浮力が支配的な気泡噴流の領域では、大きな気泡の方が、微細な気泡よりも優れた混合特性を示す等の知見を得た。これらの情報は、鉄鋼プロセスの精錬で最も多用させる取鍋に入れられた溶銑や溶鋼にガスを吹き込んで精錬反応を行う場合に、処理時間短縮やより均一混合を促進する手法を探索する際に、どのようなノズルをデザインするかを決定する上で指針となるであろう。

第7章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめ、将来への展望について述べた。すなわち、冷却プロセスでは、大型化(スケールアップ)と被冷却材の移動による影響の把握が、また、2次精錬の気泡噴流では、今回検討した水モデルと実機のプロセスとの間を繋げる数値シミュレーション手法の確立ができた。

学位論文審査の要旨

主査	特任教授	井口	学
副査	教授	秋山	友宏
副査	客員教授	石井	俊夫
副査	准教授	大参	達也

学位論文題名

鉄鋼プロセスにおける噴流を用いた伝熱促進に関する研究

近年、求められている自動車用高張力鋼板や建築構造用高強度鋼材など高級鋼の製造では、材料の特性を支配する組織・熱加工制御の観点から、圧延中の温度制御の精度向上や温度均一性が要求されている。また、鉄鉱石や石炭などの原料問題や二酸化炭素排出削減の地球環境的視点から、省資源・省エネルギー型の鉄鋼プロセスの開発が急務である。本研究では、混合・攪拌、加熱・冷却等、鉄鋼プロセスで使われている「噴流」に焦点をあてて、次の5つの噴流現象に関するテーマを取り上げた。

(1) 水噴流による鋼板冷却プロセスに関して、噴流を吹き付けるケースと冷却面から水を吸い上げるケースに噴流の方向(上向き面/下向き面)を組合せた4つの流動状態の沸騰熱伝達特性を実験で検討した。その結果、(i) 熱流束は、核沸騰領域では方向・流動・流速の影響を受けず、伝熱面過熱度の三乗に比例する、(ii) 熱流束は、核沸騰限界点以降も緩い勾配ながら過熱度の増加と共に増加する、等の知見を得た。熱伝達促進のためには、合体気泡の成長を阻止する気泡を吹き払う水流を作ることが効果的であることがわかった。これらの知見は、更なる均一な冷却や温度バラツキ低減を実現する冷却装置の設計への応用が期待できる。

(2) 製鉄所排熱から容易に作ることが可能な過熱液体噴流を、高温の鋼材や鋼板の冷却に応用することを新たに提案して実機サイズによる実験を行った。空気によって水を微粒化するミスト噴流と比較した場合、過熱液体噴流では同じ気水比でもミスト噴流に比べて液滴が加速されていること、熱流束は、液滴径に関係なく、液滴速度、水量密度、および鋼材表面温度で整理されること、同じ液滴速度と水量密度の条件下ではミスト噴流のその約0.8倍であること、等の知見を得た。過熱液体噴流冷却は、従来、要していた膨大な空気が不要となるため、省エネ型の新冷却方法として今後期待される。

(3) 冷却プロセスにおける高精度な温度制御を実現するため、鋼材冷却時の材料の変態発熱を取り上げて、その簡易評価手法を開発した。その方法は、変態の開始点温度と終了点温度、およびその間で測定された変態発熱量を数値モデル化したものである。このモデルにより、熱物性値に見掛けの変態発熱を均等に考慮する単純な従来法では難しかった、特に板厚のある鋼板の冷却時の温度予測が可能となった。この手法は、実プロセスでの適用が期待される。

(4) 製鋼の二次精錬プロセスで用いられる気泡噴流を取り上げて、空気を直径2mmの単孔ノズルから水に吹き込んだモデル実験において、レーザードップラー流束計とサ-ミスタ温度計を用い液相の

速度と温度の同時計測を行った。その結果、気泡噴流内の液相の平均速度、平均温度、それらの分散(RMS:速度変動成分の二乗平均値)は、液相単相の強制対流の噴流に近い分布を持ち、気泡の存在によってその乱流強度は、ノズルから浮上した遠方でも減衰しにくいとの知見を得た。

(5) さらに直径 7mm の単孔ノズル、多孔ノズル、および微小気泡群を生成する多孔質プラグノズルを用いて、液相の速度と温度の同時計測を行った。その結果、() 多孔質プラグノズルでは、ノズル近傍で直ちに液体の巻き込みによって噴流を形成するが、その後流では、液体の巻き込みによる運動量の増加は単孔ノズル・多孔ノズルよりも少ない、() 大きな気泡を生成する直径 7mm の単孔ノズルでは、気泡の浮力が支配的な気泡噴流の領域で多孔質プラグノズルよりも優れた混合特性を示す、等の知見を得た。これらは、鉄鋼プロセスの取鍋に入れられた溶銑や溶鋼にガスを吹き込んで精錬反応を行う場合、処理時間を短縮すること、あるいは更に均一混合を促進する手法を探索する時に、ノズル設計をする指針になる。

以上、5つの噴流による伝熱促進のテーマに関する新しい知見をまとめた。今後、これらの知見を活かした新プロセスを開発するには、冷却における噴流では、いかにスケールアップ(実機サイズに大型化)を図っていくかが課題となると予想される。また、二次精錬の気泡噴流では、水モデルと実プロセスとを繋げる数値シミュレーション手法を確立することが必要になると、将来への研究展望を述べた。

これを要するに、著者は、鉄鋼プロセスにおける噴流の適用に関して、伝熱促進につながる多くの知見とその応用・展望についてのべており、材料プロセス工学における新たな技術の提供に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。