

圧延加工プロセス技術の進展と今後の展望

Recent Progress and Future Prospects of Rolling and Processing Technologies

三宅 勝 MIYAKE Masaru JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部長・博士 (工学)
木村 幸雄 KIMURA Yukio JFE スチール スチール研究所 圧延・加工プロセス研究部 主任研究員 (副部長)・博士 (工学)
壁矢 和久 KABEYA Kazuhisa JFE スチール スチール研究所 研究企画部長 (理事)・博士 (工学)

要旨

JFE スチール発足以降の圧延加工プロセス分野における主要な研究開発について概括した。1次ミルから最終製品に至る製造プロセスでは、製品としての品質 (寸法精度, 材質, 表面品質など) を高いレベルで確保しながら, 高生産性・高歩留り・低コストでの造り込みが求められる。また, 高強度化・高じん性化などを追及する材料開発との連携により, 高級鋼を安定的に製造する技術や, 多様なプロダクトミクスに対応する柔軟な生産技術が求められてきており, より高度なプロセス技術への革新を絶えず追求している。

Abstract:

Main research and technical development topics in the rolling and processing fields since the establishment of JFE Steel are summarized. In the production process from the primary rolling mill to final products, development of the production technologies not only to achieve high quality products (size precision, mechanical property, surface quality) but also to realize the high productivity, high yield and also low cost production is necessary. Moreover, stable production technologies to manufacture high-end products by collaborating with material development pursuing high-strength and high-ductility and to achieve flexible manufacturing with wide range product-mix are required. JFE Steel always has been and always will be pursuing high level innovation in the production technologies.

1. はじめに

鉄鋼材料の生産プロセスにおける1次ミル以降の圧延加工プロセスでは, 連続鋳造によって製造される鋳片を薄板, 厚板, 形鋼などのさまざまな形状に加工し, その熱履歴などを制御しながら, 鉄鋼材料が有するさまざまな特性を引き出す役割を担っている。

熱延, 冷延, 厚板, 形鋼などの圧延プロセスでは, 回転するロールの間で材料を伸ばすという極めてシンプルな原理に基づく圧延技術によって, さまざまな形状を造り込み, 所定の寸法に仕上げている。また, 高度な加熱・冷却技術との組み合わせによる材料の組織制御を通じて強度, 延性, じん性などの機械的特性を向上させている。さらに, 連続焼鈍や表面処理プロセスでは, 連続的な熱履歴の制御により最終製品の材質を均一なものに仕上げ, 耐食性, 外観など, 表面特性によって発揮される品質を高める役割がある。

特に, 地球温暖化防止や環境保全の観点からは, より高強度・高じん性の材料が求められており, 製造プロセスにおいても, 省成分系の材料を用いて最新の加工技術を駆使した高度な造り込みが不可欠となる。また, 製造プロセスか

ら排出されるCO₂や廃棄物を削減し, 省エネルギー・省資源を実現することに対する社会的な要請が高い。

さらに, 製造ラインの高速化や連続化により高い生産性を実現し, 高級鋼を可能な限り低コストで生産する技術や, 多様な品質を作り分けるフレキシブルな生産技術が要求される。

このようなニーズに対応して, JFE スチールでは圧延加工プロセスに関する新たな技術開発を絶え間なく続けており, 革新的なプロセス開発によって高級鋼の安定的な造り込みに取り組んでいる。

本稿では, JFE スチール発足以降の当該分野における主要な研究開発を概観し, 今後の開発の方向性について展望する。なお, 圧延加工プロセスは, 種々の要素技術を総合した生産技術であり, 相互に関連しあう要素技術の関係を本稿のみで記述することはできない。現役の圧延研究者が当該分野を平易な言葉で解説した書籍を参考文献¹⁾に記載しているので, 併せてご一読いただきたい。

2. 圧延加工技術の開発

2.1 熱延プロセス

薄鋼板の1次ミルとして高い生産性が求められると共に,

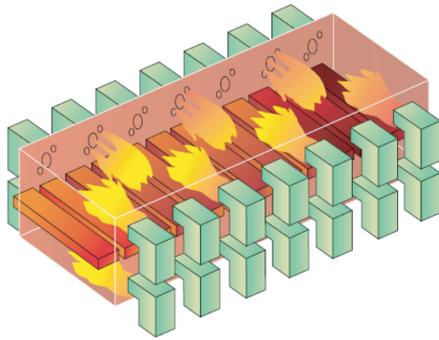


図1 環境調和型蓄熱式加熱システム

Fig. 1 Eco-friendly regenerative burner heating system

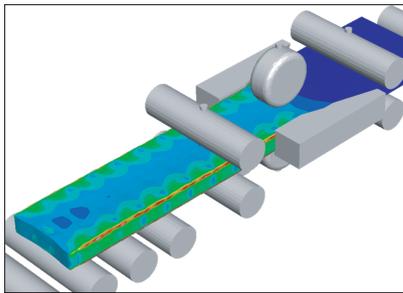


図2 サイズングプレスにおける3次元変形解析の例

Fig. 2 Example of 3-dimensional deformation analysis of slab sizing press in hot strip mill

加熱から圧延、冷却まで材料の熱履歴を制御して、高い品質の造り込みが要求される。また、省エネルギーや生産の安定性、スケジューリングフリー圧延のような効率的でフレキシブルな生産が要求されるという特徴がある。

加熱工程では、1970年代以降、連铸スラブの顕熱を有効活用することで、省エネルギー・CO₂削減を図るホットダイレクトチャージ（HDR）が積極的に採用されてきた。加熱炉においても低NO_x燃焼と省エネルギーを両立させた環境調和型蓄熱式バーナーの実用化²⁾により、図1に示すように大型加熱炉への適用を積極的に拡大してきた。また、加熱炉の自動燃焼制御技術の開発³⁾により、圧延能率の向上と省エネルギー化を推進している。

熱延仕上げ圧延については圧延順の制約を解消し、フレキシブルな生産を実現するための研究が継続的に進められた。このようなチャンスフリー圧延技術に関して、ロールと材料の接触熱伝達挙動に関する基礎検討が行われ⁴⁾、ロールの熱膨張（サーマルクラウン）の高精度な解析方法⁵⁾が検討されて、ロール胴長方向の熱膨張を分散し、板プロフィールを安定的に制御する技術が提案された⁶⁾。

寸法・形状制御技術については、図2に示すような3次元変形解析技術を活用し、粗圧延工程を対象に材料の先尾端部に生じる寸法不良部を低減するための検討が行われた⁷⁾。仕上げ圧延については既存技術の全体感が整理されて、

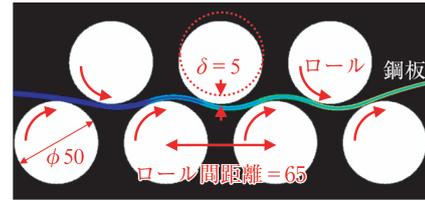


図3 繰り返し曲げ変形による結晶粒の微細化²⁴⁾

Fig. 3 Grain refining by accumulative bending process²⁴⁾

将来の課題が明らかとなり⁸⁾、圧延機での形状制御だけでなく、ランアウト冷却や巻取り後の熱ひずみを考慮した熱延プロセス一貫での形状予測手法が提案された⁹⁾。

高強度材の増加と共に、各種の合金成分を添加した鋼が増えており、これに関連した表面欠陥の防止が大きな課題となっている。これに対して、加熱炉から抽出されたスラブの1次スケールを除去するための検討が行われた^{10,11)}。また、高温・高圧下のロールと鋼板界面でのトライボロジー挙動が重要となり、熱延潤滑の挙動が冷間圧延とは大きく異なる現象であることが明らかにされた¹²⁻¹⁴⁾。さらに、ステンレス鋼板の板端部に生じるシーム疵^{15,16)}や、高Ni材の加熱工程における割れ防止^{17,18)}など、高級鋼の造り込みにおける品質向上のための検討が進んだ。

材質の造り込み技術に関しては、超微細粒鋼の実用化研究を推進した。粗圧延に相当する条件において1パス大圧下が可能となる板厚プレス方式が提案され¹⁹⁻²¹⁾、 γ 粒径の微細化のための基盤技術が確立された。また、図3に示すように、仕上げ圧延後に曲げ変形を付与²²⁻²⁴⁾することで、 α 粒を微細化する技術のパイロットミルでの検討が行われ、高価な合金成分を使用しないリサイクル性に優れた平均結晶粒径1 μ mの超微細粒鋼創製に向けた基盤技術が確立された。

熱延プロセスにおける操業の安定化は、生産能力を拡大する上でいっそう重要性が増している。このような観点から、ランアウトテーブル上での通板安定化を狙いとした高精度なシミュレーション技術の開発²⁵⁾やコイラーでの巻取り挙動の解析²⁶⁾が行われた。

また、生産プロセスの自動化も大きな課題であり、スキンパス圧延ラインにおいて抜本的な自動化と高速化を実現したインテリジェント制御技術が開発された。

2.2 冷延プロセス

冷延ミルは1950年代以降、圧延の高速化と酸洗工程などの連続化により高い生産能力を実現してきた。また、板厚制御、形状制御、エッジドロップ制御などの寸法形状制御技術も2000年くらいまでに数多くの方式が提案され、計測技術の進歩と共に高精度な制御技術が確立された。しかし、箔などの極薄材や高強度材などの難圧延材に対しては、多くの課題があり、現在も精力的な研究が進められている。

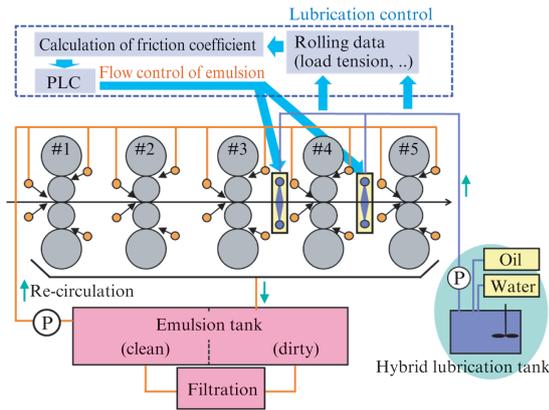


図4 冷間タンデムミルのハイブリッド潤滑システム³⁴⁾

Fig. 4 Hybrid lubrication system for tandem cold rolling mill³⁴⁾

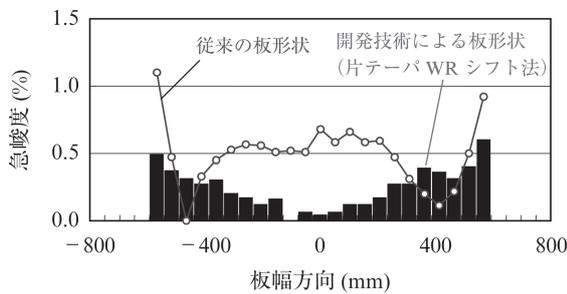


図5 クラスター型圧延機における片テーパWRシフト法³⁹⁾

Fig. 5 One-end tapered WR shifting method for cluster mill³⁹⁾

冷延プロセスにおける高能率化については、特に硬質な極薄材の高速圧延において、圧延機の異常振動（チャタリング）によって圧延機的能力を十分発揮できない問題が生じていた。これに対して、チャタリングのメカニズムの解明²⁷⁾ および、エマルジョン潤滑の油膜形成挙動の基礎検討²⁸⁻³⁰⁾を通じて、圧延油を循環使用する循環給油方式をベースに、高速圧延と多様なプロダクトミクスに対応可能としたシステムとして、**図4**に示すハイブリッド潤滑技術の開発に成功した³¹⁻³⁶⁾。これにより、高強度化、薄ゲージ化に対応した安定高速圧延を実現することが可能となった。また、潤滑技術については圧延機で生じる廃液の抜本的な削減に向けた基礎的な研究も進められた^{37, 38)}。

寸法・形状制御技術については、クラスター型圧延機による高精度な形状制御技術を確立³⁹⁾し、**図5**に示すように複合的な形状を精度よく制御することが可能となった。また、ステンレス鋼の箔圧延における圧延可能な最小板厚やエッジ割れ発生挙動が明らかとなった⁴⁰⁾。さらに、片駆動圧延における鋼板の反り挙動に関する基礎検討が行われた⁴¹⁾。

一方、薄鋼板の表面品質に対するニーズの高まりに対応して、鋼板の最終工程となる調質圧延に関する研究が精力的に行われた⁴²⁾。調質圧延は、鋼板の機械的性質や形状の平坦化の他に、表面のマイクロな凹凸（表面テクスチャー）を

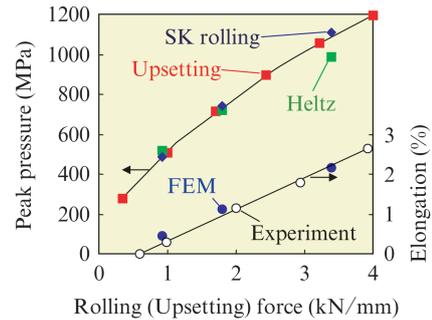


図6 調質圧延における接触面圧の解析

Fig. 6 Contact pressure analysis of skin-pass rolling

制御する役割があり、製品の外観や2次加工性にも直接的な影響を与えることから特に注目が集められているからである。しかし、調質圧延で付与するひずみはごくわずかであることから、従来の圧延理論ではその挙動を精度よく予測することはできなかった。これに対して、**図6**に示すような極軽圧下条件における材料とロールとの接触変形挙動に関する詳細な解析⁴³⁻⁴⁸⁾により、ロールの鋼板表面への転写挙動を含めた全体像が明らかになってきている。また、表面処理鋼板の転写挙動についても実験的な検討が行われた⁴⁹⁾。

さらに、調質圧延のロールには、鋼板の表面テクスチャーの変動を防止するため、優れた粗度維持性が要求される。このような観点から、ロール表面への新たな硬質皮膜付与方法の基礎研究⁵⁰⁾や表面被膜の剥離強度に関する検討⁵¹⁾が行われた。

2.3 厚板・形鋼・鋼管プロセス

厚板プロセスでは、エネルギー鋼材をはじめとして耐疲労鋼・高アレスト鋼などの高性能厚鋼板の製造に対応したプロセス革新が大きく進展した。特に、JFE スチールでは、独自のTMCP（Thermo Mechanical Control Process）技術による特徴のある商品の製造を行っている。その際、温度制御により従来よりも高負荷の圧延が必要となり、寸法・形状制御の面からの課題も生じていた。特に、厚鋼板の平面形状制御⁵²⁾や先端部の局所的な反り変形⁵³⁾、クラッド材のような複合材の端部変形挙動⁵⁴⁾に関する検討が進められた。

また、非定常な圧延状態を適切に制御することによって、**図7**に示すように鋼板の長手方向に板厚を変化させたLP鋼板の工業的な製造技術を確立し、鋼構造物の重量低減や溶接個所の削減に寄与している⁵⁵⁾。一方、エネルギープラントの大型化に対応して、極厚鋼板の鍛造-圧延プロセスに新たな水槽浸漬設備を組み合わせた厚板大単重熱処理プロセスを実現した⁵⁶⁾。

さらに、精整工程ではせん断ラインにおける厚板の全長板厚保証を目的としたレーザー方式板厚計を実用化した⁵⁷⁾。また、鋼板の搬送を安定化させる目的でマルチボディダイナミクスを用いた搬送シミュレーションが行われた。鋼板の平

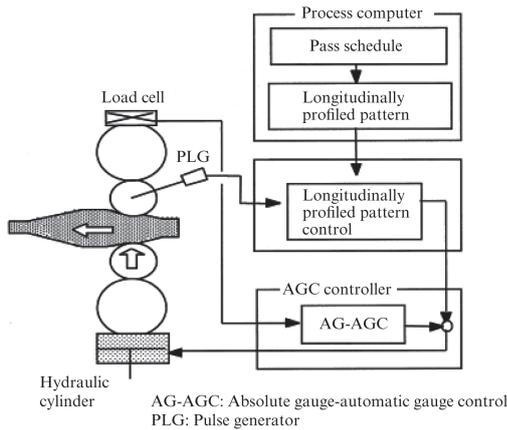


図7 LP鋼板の板厚制御システムの概要⁵⁵⁾

Fig. 7 Automatic gauge control system configuration for LP plate⁵⁵⁾

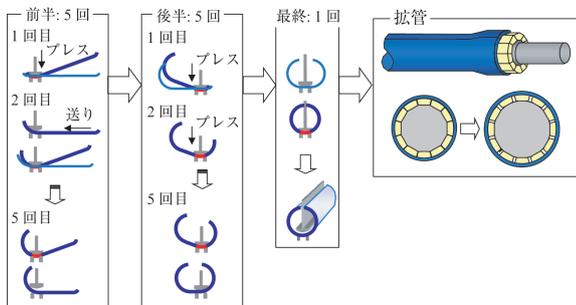


図8 大径鋼管製造プロセス NEOプレス[®]の概要

Fig. 8 NEO press for large diameter steel pipe

平坦度を任意の位置で測定するための3次元スキャナーの適用についても検討が進められた⁵⁸⁾。

エネルギー鋼材分野では、より遠方かつ大規模な天然ガス・石油等の輸送が求められており、高機能厚鋼板を素材として厚肉高強度の大径溶接鋼管の需要が増大している。これに対して、プレス曲げ後の鋼板の形状を適切に制御することで、**図8**に示す世界最厚レベルの厚肉・高強度鋼管を高効率に製造するプロセスを実現した⁵⁹⁾。

形鋼プロセスにおいては、建材分野での高強度化が進展しており、建築物の大スパン化に対応した外法一定H形鋼のサイズ拡大を進めてきた。土木分野では大断面のハット形鋼矢板⁶⁰⁾、コンクリート合成構造に使用される内面突起付H形鋼に対応する製造プロセス⁶¹⁾の開発を進めてきた。

一方、形鋼のように複雑な3次元変形挙動の解析技術が大きく進展し、H形鋼のユニバーサル圧延の詳細な検討が行われた^{62, 63)}。また、T形鋼のユニバーサル圧延法に関する基礎検討⁶⁴⁻⁶⁶⁾や溝形鋼⁶⁷⁾、**図9**に示す不等辺不等厚山形鋼⁶⁸⁾への適用など形鋼圧延に幅広く適用されている。さらに、形鋼のように非対称な断面形状を有する場合に製造中の反りや曲りという不安定挙動が生じる場合があり、鋼矢板の反り挙動の解析⁶⁹⁾なども行われた。

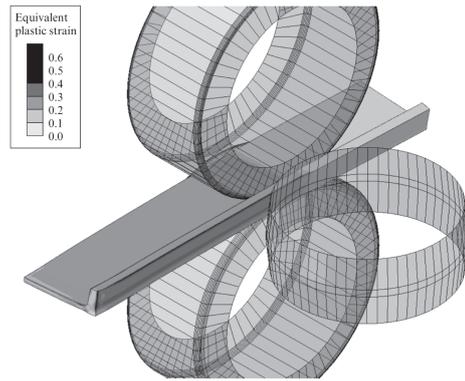


図9 不等辺不等厚山形鋼の圧延解析⁶⁸⁾

Fig. 9 Rolling analysis of unequal-leg angle⁶⁸⁾

3. 加熱・冷却技術の開発

3.1 加熱技術

圧延プロセスにおける加熱炉では、1990年代半ば以降に低NO_x燃焼と省エネルギーを両立させた環境調和型蓄熱式バーナー²⁾が実用化されて以降、大型加熱炉への適用が拡大してきた。その後、連続焼鈍炉の放射伝熱管（ラジアントチューブ）方式に対して超低NO_xを実現した自己排ガス再循環型ラジアントチューブバーナーを開発し、燃焼ガス使用量の削減によるCO₂排出量の削減に寄与している。

一方、電磁誘導加熱技術を圧延プロセスに適用する研究開発を積極的に進めてきた⁷⁰⁾。熱延プロセスにおいては、粗圧延と仕上圧延の間に、シートバー全体を加熱する粗バーヒーターを実現させた。これにより、熱延鋼板に付与する熱履歴の自由度を高め、温度変動に起因する材質ばらつきを大幅に低減させることが可能となった。さらに、厚板プロセスにおいては、2004年にオンライン誘導加熱装置HOP[®]（Heat-treatment On-line Process）を実用化し、従来は主として焼入れ焼戻しプロセスによって製造されていた高強度ハイテンの**図10**に示すオンライン熱処理化が実現した^{71, 72)}。

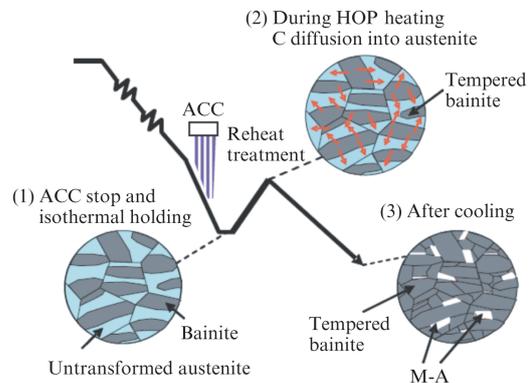


図10 誘導加熱技術を活用したマイクロ組織制御⁷²⁾

Fig. 10 Microstructure control by induction heating technology⁷²⁾

3.2 冷却技術

JFE スチールでは、TMCP 技術の核となる独自の冷却技術の開発により、超急速冷却と均一な冷却を両立する新加速冷却技術 Super-OLAC[®]を実用化した⁷¹⁾。本技術は、西日本製鉄所福山地区と倉敷地区、東日本製鉄所京浜地区の3厚板工場に適用され、超大入熱用鋼、耐震用鋼管などの高性能厚鋼板の製造に寄与してきた⁷³⁾。また、本冷却技術は熱延ミルや形鋼ミルにも適用され、大幅な合金元素削減、溶接性向上、加工性向上を実現した。さらに、2011年にはSuper-OLAC[®]を進化させたSuper-OLAC[®]-Aを開発し、近年の高度な要求特性に対応している⁷²⁾。

また、TMCPの要素技術のひとつである制御圧延の連続化を可能としたSuper-CRを実用化し、2009年に京浜地区で稼動した。これにより図11に示すようなSuper-OLAC[®]と組合せることにより2段階の冷却が可能となり、TMCPの自由度が向上した⁷²⁾。

以上のような冷却技術の基礎として、高水量密度での冷却に関する基礎特性が検討された^{74, 75)}。また、熱延ランアウトテーブルにおけるパイラミナー冷却について、柱状水の安定性に関する基礎検討が行われた⁷⁶⁾。さらに、スプレーのような液滴冷却水の冷却特性に及ぼす水温の影響^{77, 78)}や鋼材の表面粗さやスケール組成・厚みの影響等⁷⁹⁾についても検討が行われ、鋼材の沸騰冷却特性に関する基礎特性が明らかにされてきている。

4. プロセス技術の開発

4.1 熱処理技術

連続焼鈍プロセスや表面処理プロセスを対象に、気体噴射による強制対流を利用して熱伝達を促進するガスジェット冷却の冷却能力を精度よく予測するための検討がなされ

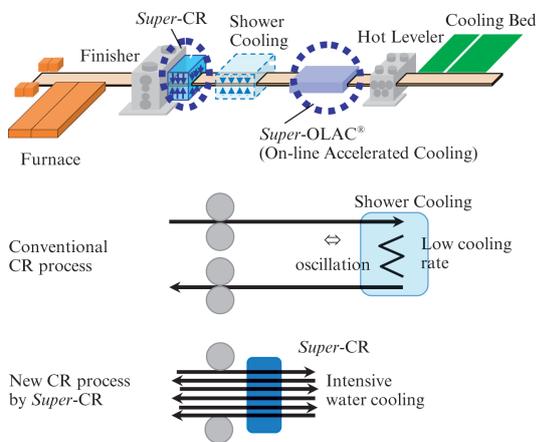


図11 Super-CRによる制御圧延の高能率化⁷²⁾

Fig. 11 Improvement of productivity in controlled rolling by Super-CR⁷²⁾

た⁸⁰⁾。焼鈍工程における生産性や鋼板の機械的特性、合金コスト削減などの観点から、冷却ノズルの最適な設計に寄与している。また、連続焼鈍ラインの自動操業最適化システムを開発・導入し、炉速設定のばらつきを解消して鋼板の品質安定性の向上を図っている⁸¹⁾。

4.2 表面めっき技術

表面処理鋼板は自動車、電機製品、建材等に使用され、高い防錆性能が求められている。特に、自動車車体の外板に使用される場合には、外観を中心とする表面品質が特に重視されるため、JFE スチールでは品質向上のための技術開発に鋭意取り組んでいる。

溶融亜鉛めっき鋼板の製造では、噴流を利用するガスワイピング技術にて溶融亜鉛の膜厚を制御しており、鋼板用途に応じた付着量コントロールやコイル全長全幅にわたるめっきの均一性を確保することが重要である。また、溶融亜鉛めっき浴内にあるドロス（金属間化合物）がめっき鋼板表面に付着して発生するドロス欠陥や、ワイピング時の亜鉛の飛散（スプラッシュ）に起因する線状マーク等の表面欠陥の発生も防止しなければならない。これらの課題に対し、流体力学的な観点よりワイピング技術の基礎的な特性を解明するための研究⁸²⁻⁸⁵⁾や、ドロス生成メカニズムと浴内での流動特性に関する研究⁸⁶⁾が鋭意進められ、その成果が操業に反映されている。また、図12に示す電磁石を用いた鋼板の振動抑制・形状制御技術を開発し、生産性と品質向上に大きく貢献している^{87, 88)}。

JFE スチールでは、亜鉛めっき鋼板の品質保証の観点から独自の表面検査技術を開発し⁸⁹⁾、高品質な亜鉛めっき鋼板の供給を行っている。

4.3 コーティング技術

冷延鋼板や表面めっき鋼板上に絶縁性、耐食性、塗装性、そして潤滑性などの様々な機能を付与することにより、高級化を図った表面処理鋼板の需要が拡大している。連続的に

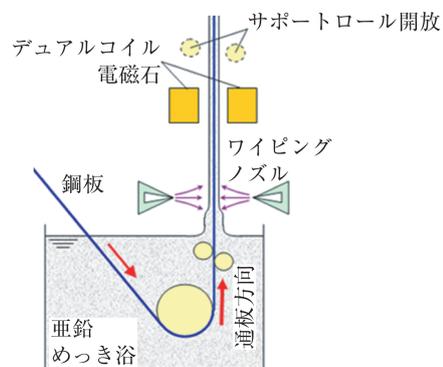


図12 表面処理鋼板の非接触通板制御装置

Fig. 12 Non-contact strip travelling control device of surface-treated steel

走行する基材へ薄い皮膜をコーティングするプロセスとしてロールコーターが幅広い分野で適用されている。

ロールコーターでは、ロールの回転運動に起因するロール周方向のスジ模様（リビング）が発生することから、塗布後に均一な外観を得るためにはロール間の微小領域（メニスカス部）における流動状態を把握する必要がある。JFE スチールでは、コーティング技術に関する基礎的な研究^{90,91)}を行い、その成果を高品質な鋼板の製造に反映させている。

5. 圧延加工プロセス技術の将来展望

圧延加工プロセス技術の開発では、その過程で発生する様々な物理的、化学的な現象を解明し、理論化することによって、高度なコンピュータ制御による効率的な自動制御を実現し、生産の高効率化、品質の向上及びばらつき低減、低コスト化に寄与してきた。このような技術的アプローチは今後も継続的に進めていく必要がある。一方、生産対象として高強度化、薄物化の進展が加速するとともに、低延性の材料や欠陥が発生しやすい材料など、いわゆる難製造材が増加することが想定される。このような状況の変化に対応して、圧延能力の増強に関する研究開発と共に、製品の品質に影響を与える圧延挙動や冷却特性の解明など、原理原則に基づく研究開発が重要になると考えられる。

また、社会の少子高齢化の進行により、今後の熟練オペレーターの減少が想定される中では、AIやロボティクスの活用などを見据えながら、より高度な自動化システムを構築していくことも重要である。

そして、生産活動そのものが環境に大きな影響を及ぼすという観点から、地球環境に優しく、かつお客様が求める価値を有する新商品を創出するプロセス技術の開発がますます重要となる。

6. おわりに

本報では、JFE スチール発足からの圧延加工プロセス分野での技術開発について概括した。日本鉄鋼業を取り巻く環境は大きく変化しており、海外ミルを含めた大競争時代の中で常にお客様にご満足していただける高品質な製品を安定して供給し続けるためには、製品の品質と安定製造に直結する圧延加工プロセス分野での技術開発をたゆまなく進化させていかなければならない。今後も、JFE スチールは世界最高の技術をもって社会に貢献すべく、積極的な技術開発を推進していく。

参考文献

- 1) JFE スチール圧延技術研究会著、曾谷保博監修。トコトンやさしい圧延の本。日刊工業新聞社、2015。
- 2) 福嶋信一郎、鈴川豊、秋山俊一、加藤有三、藤林晃夫、多田健。環境

- 調和型蓄熱式バーナの実用化と将来展望。NKK 技報。2002, no. 178, p. 26-31。
- 3) 三原紀章、横田修二、本屋敷洋一。熱間圧延加熱炉自動燃焼制御。JFE 技報。2007, no. 15, p. 7-11。
- 4) 上岡悟史、木島秀夫、中田直樹。弾性変形域における工具と素材間の熱間接触熱伝達特性。鉄と鋼。2015, vol. 101, no. 6, p. 329-335。
- 5) 山口慎也、館野純一、中田直樹。ロール周方向給熱伝達モデルによる熱膨張解析。鉄と鋼。2015, vol. 101, no. 7, p. 365-371。
- 6) Yamaguchi, S.; Miyake, M.; Kimura, K.; Jinnouchi, T. Work roll shifting method by optimum calculation of work roll profile in hot strip rolling. Procedia Engineering. 2017, vol. 207, p. 1320-1325。
- 7) Goto, H.; Takashima, Y.; Kimura, Y.; Miyake, M.; Kabeya, K. Influence of sizing press condition on plan view pattern of sheet bar in hot strip mill. 10th International Rolling Conference and the 7th European Rolling Conference. 2016, p. 283-291。
- 8) 藤田文夫、山口慎也。板クラウン・形状制御技術と理論。鉄と鋼。2014, vol. 100, no. 12, p. 1434-1447。
- 9) Miyake, M.; Kimura, Y.; Kawai, T.; Hiruta, T. Development of the prediction model for hot strip flatness after coil cooling. Journees Siderurgiques International (The 30th JSD, Paris, 2012, p. 59-60。
- 10) 上岡悟史、藤林晃夫。ウォータージェットデスケリングにおける壊食特性。材料とプロセス。2006, vol. 19, no. 2, p. 397。
- 11) 田村雄太、上岡悟史、木村幸雄、壁矢和久。高圧デスケリングにおける噴射距離が液滴挙動に及ぼす影響。鉄と鋼, (in print)
- 12) 松原行宏、蛭田敏樹、木村幸雄。熱間圧延の潤滑特性に及ぼす油膜厚みの影響。鉄と鋼。2014, vol. 100, no. 3, p. 346-351。
- 13) 松原行宏、平瀬弘欣、蛭田敏樹、高嶋由紀雄、壁矢和久。熱延潤滑における油膜挙動解明への数値解析によるアプローチ。鉄と鋼。2016, vol. 102, no. 8, p. 459-464。
- 14) 松原行宏、木村幸雄。熱間圧延ロールバイトにおける潤滑油挙動の推定。鉄と鋼。2017, vol. 103, no. 9, p. 534-538。
- 15) 蛭田敏樹、松原行宏、恵良秀則。熱延ステンレス鋼板のエッジシーム疵形成機構。塑性と加工。2013, vol. 54, no. 633, p. 913-917。
- 16) 蛭田敏樹、松原行宏、恵良秀則。熱延ステンレス鋼板のエッジシーム疵制御。塑性と加工。2013, vol. 54, no. 633, p. 918-922。
- 17) 館野純一、蛭田敏樹、曾谷保博、丸山俊明、村田宰一。36% Ni-Fe 合金鋼片の熱間加工性に及ぼす加熱炉昇温条件の影響。鉄と鋼。2011, vol. 97, no. 11, p. 578-583。
- 18) 館野純一、寒川孝、曾谷保博。36% Ni-Fe 合金鋼の熱延エッジ割れに及ぼす加熱温度の影響。鉄と鋼。2015, vol. 101, no. 5, p. 293-299。
- 19) 三宅勝、矢崎拓郎、曾谷保博。鍛造型板厚大圧下による大ひずみ加工の基礎特性。塑性と加工。2011, vol. 52, no. 610, p. 1208-1212。
- 20) 三宅勝、矢崎拓郎、曾谷保博。金型揺動化圧下方式と潤滑による鍛造荷重低減特性。塑性と加工。2012, vol. 53, no. 613, p. 160-164。
- 21) 三宅勝、曾谷保博。鍛造型板厚大圧下によるオーステナイト組織の微細化機構。塑性と加工。2012, vol. 53, no. 616, p. 467-471。
- 22) 松原行宏、中田直樹、蛭田敏樹。結晶粒微細化に及ぼす繰返し曲げ加工の影響。鉄と鋼。2012, vol. 98, no. 1, p. 19-24。
- 23) 中田直樹、松原行宏、蛭田敏樹。熱間圧延後の繰返し曲げ加工プロセスにおける鋼板温度解析。鉄と鋼。2013, vol. 99, no. 1, p. 26-31。
- 24) 松原行宏、中田直樹。繰返し曲げ加工による結晶粒微細化技術。塑性と加工。2017, vol. 58, no. 676, p. 381-384。
- 25) 青江信一郎、林宏優、川島浩治。熱間圧延ランアウトテーブルにおける通板シミュレーション技術。JFE 技報。2006, no. 11, p. 15-18。
- 26) 青江信一郎、三宅勝、壁矢和久。コイル巻取りにおける不安定現象。材料とプロセス。2017, vol. 30, p. 502-505。
- 27) Kimura, Y.; Sodani, Y.; Nishiura, N.; Ikeuchi, N.; Mihara, Y. Analysis of chatter in tandem cold rolling mills. ISIJ International. 2003, vol. 43, no. 1, p. 77-84。
- 28) 木村幸雄、藤田昇輝、三原豊。冷間圧延用 O/W エマルションの短時間プレートアウト特性。鉄と鋼。2009, vol. 95, no. 4, p. 340-346。
- 29) 藤田昇輝、木村幸雄。冷間圧延における潤滑特性に及ぼすプレートアウト量の影響。鉄と鋼。2011, vol. 97, no. 10, p. 532-540。
- 30) Fujita, N.; Kimura, Y. Plate-out efficiency related to oil-in-water emulsions supply conditions on cold rolling strip. Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part J, Journal of Engineering Tribology. 2012,

- vol. 227, no. 5, p. 413-422.
- 31) 木村幸雄, 藤田昇輝, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博. ハイブリッド潤滑による冷間タンデムミルの高速圧延技術の開発. 塑性と加工. 2013, vol. 54, no. 635, p. 1028-1032.
 - 32) 木村幸雄, 藤田昇輝, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博. エマルション圧延油の高効率プレートアウト技術. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 639, p. 346-350.
 - 33) 藤田昇輝, 木村幸雄, 松原行宏, 小林宏爾, 天沼陽介, 吉岡修, 曾谷保博. 冷間圧延における潤滑状態の制御技術. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 640, p. 445-450.
 - 34) 木村幸雄, 藤田昇輝, 小林宏爾. ハイブリッド潤滑による缶用鋼板の高速冷間圧延技術. JFE 技報. 2017, no. 39, p. 4-9.
 - 35) Fujita, N.; Kimura, Y.; Kobayashi, K.; Amanuma, Y.; Sodani, Y. Estimation model of plate-out oil film in high-speed tandem cold rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2015, vol. 219, p. 295-302.
 - 36) Fujita, N.; Kimura, Y.; Kobayashi, K.; Itoh, K.; Amanuma, Y.; Sodani, Y. Dynamic control of lubrication characteristics in high speed tandem cold rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol. 229, p. 407-416.
 - 37) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三浦彩子. 冷間圧延における水溶性ポリマーの潤滑特性. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 669, p. 997-1002.
 - 38) 木村幸雄, 藤田昇輝, 三浦彩子. 冷間圧延における水溶性ポリマーの潤滑性の向上. 塑性と加工. 2017, vol. 58, no. 676, p. 398-403.
 - 39) 館野純一, 蛭田敏樹, 桂重史, 小廣善丈, 本田充孝, 半谷陽一. クラスター型圧延機における高精度形状制御技術の開発. 塑性と加工. 2005, vol. 46, no. 539, p. 1143-1146.
 - 40) 館野純一, 蛭田敏樹, 桂重史, 本田充孝, 宮田武志, 神丸秋信. 極薄ステンレス鋼箔圧延における圧下限界に関する実験解析. 鉄と鋼. 2012, vol. 98, no. 3, p. 89-95.
 - 41) Baba, W.; Miyake, M.; Yanagimoto, J. Warping Behavior of Thin Strip with Single-drive Rolling. Key Engineering Materials. 2017, vol. 725, p. 537-541.
 - 42) 木島秀夫. 薄鋼板調質圧延の材料変形・粗さ転写・潤滑メカニズムの解明. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 671, p. 1109-1112.
 - 43) Kijima, H.; Bay, N. Contact Conditions in Skin-pass Rolling. CIRP Annals. 2007, vol. 56, no. 1, p. 301-306.
 - 44) Kijima, H.; Bay, N. Influence of tool roughness and lubrication on contact conditions in skin-pass rolling. Journal of Materials Processing Technology. 2009, vol. 209, no. 10, p. 4835-4841.
 - 45) Kijima, H.; Bay, N. Skin-pass rolling I-Studies on roughness transfer and elongation under pure normal loading. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008, vol. 48, no. 12-13, p. 1313-1317.
 - 46) Kijima, H.; Bay, N. Skin-pass rolling II-Studies of roughness transfer under combined normal and tangential loading. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2008, vol. 48, no. 12-13, p. 1308-1312.
 - 47) Kijima, H. Influence of roll radius on contact condition and material deformation in skin-pass rolling of steel strip. Journal of Materials Processing Technology. 2013, vol. 213, no. 10, p. 1764-1771.
 - 48) Kijima, H. An experimental investigation on the influence of lubrication on roughness transfer in skin-pass rolling of steel strip. Journal of Materials Processing Technology. 2015, vol. 225, p. 1-8.
 - 49) 木村幸雄, 植野雅康, 三原豊. 調質圧延における亜鉛めっき鋼板への表面テクスチャーの転写挙動. 鉄と鋼. 2009, vol. 95, no. 5, p. 399-405.
 - 50) 植野雅康, 藤田昇輝, 木村幸雄, 中田直樹. 放電表面処理による圧延ロールへのTiCコーティングの成膜特性および耐摩耗性評価. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 646, p. 1013-1017.
 - 51) 野田尚昭, 内木場卓巳, 植野雅康, 佐野義一, 飯田和樹, 王澤鋒, 王国輝. 特異応力場の強さに注目した溶射被膜の簡便なばく離強度評価法. 鉄と鋼. 2015, vol. 101, no. 7, p. 358-364.
 - 52) 堀江正之, 平田健二, 館野純一, 中田直樹. 厚板平面形状制御圧延時の端部形状に及ぼすドッグボーン幅の影響. 塑性と加工. 2016, vol. 57, no. 663, p. 347-352.
 - 53) 紫垣伸行. 熱間圧延時の腰折れ発生と腰折れ矯正時の形状変化に関する検討. 材料とプロセス. 2009, vol. 22, no. 1, p. 156.
 - 54) 蛭田敏樹, 松原行宏, 堀江正之, 恵良秀則. クラッド鋼板の先後端部変形におよぼす圧延条件の影響. 塑性と加工. 2014, vol. 55, no. 636, p. 62-67.
 - 55) 井原健滋, 弓削佳徳, 松永直己. 高機能LP鋼板の製造技術. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 32-36.
 - 56) 荒木清己, 湯浅岳則, 田村雄太. 厚板大単重熱処理鋼板の製造. JFE 技報. 2012, no. 29, p. 54-60.
 - 57) 手塚浩一. 厚板せん断ライン用レーザ方式板厚計の開発. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 22-27.
 - 58) 青江信一郎, 三宅勝, 壁矢和久. 3D スキャナーを活用した鋼板形状評価のための位相補償ガウシアンフィルター. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 9, p. 492-500.
 - 59) 堀江正之, 清都泰光, 田村征哉, 三輪俊博. プレスバンド鋼管の拡管による形状矯正特性. 第67回塑性加工連合講演会前刷り. 2016, 103.
 - 60) 藤澤一善, 辻本和仁. JFE スチールの形鋼製品概要. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 1-3.
 - 61) 恩田邦彦, 駒城倫哉, 青木秀未. 内面突起付きH形鋼「JグリップH[®]」の開発とSC(鋼・コンクリート)合成地中連壁への適用. JFE 技報. 2010, no. 26, p. 24-29.
 - 62) Takashima, Y.; Takenouchi, E. Deformation and Rolling Force in Universal Rolling of Narrow Flange Width H-beam. steel research international, Special Edition 10th ICTP. 2011, p. 177-181.
 - 63) Takashima, Y.; Yanagimoto, J. Finite Element Analysis of Flange Spread Behavior in H-beam Universal Rolling. steel research international. 2011, vol. 82, no. 10, p. 1240-1247.
 - 64) Takashima, Y.; Hiruta, T. T-bar Universal Rolling and Its Deformation Properties. ISIJ International. 2012, vol. 52, no. 7, p. 1328-1334.
 - 65) Takashima, Y.; Nakata, N. T-bar rolling process with universal and edger mills. Journal of Materials Processing Technology. 2016, vol. 229, p. 149-159.
 - 66) 高嶋由紀雄, 山口陽一郎, 高橋英樹, 堀田知夫, 中塚敏郎. タンデムユニバーサル圧延法による新T形鋼製造技術の開発. 塑性と加工. 2017, vol. 58, no. 672, p. 53-59.
 - 67) Takashima, Y.; Hiruta, T. Characteristics of Deformation Behavior in Channel Universal Rolling. ISIJ International. 2013, vol. 53, no. 4, p. 690-697.
 - 68) Takashima, Y.; Nakata, N.; Yanagimoto, J. Universal Rolling Deformation of Asymmetric Unequal-leg Angles. ISIJ International. 2014, vol. 54, no. 10, p. 2357-2363.
 - 69) 福田啓之, 中田直樹. 鋼矢板の仕上圧延後における長手方向反り変化の解析. 材料とプロセス, 2009, vol. 22, no. 1, p. 456.
 - 70) 遠藤茂, 多賀根章, 日野善道, 水野浩, 諏訪稔. 誘導加熱を用いた厚板オンライン熱処理設備. 素形材. 2009, vol. 50, no. 7, p. 8-12.
 - 71) 藤林晃夫, 小俣一夫. JFE スチールの厚板製造プロセスと商品展開. JFE 技報. 2004, no. 5, p. 8-12.
 - 72) 遠藤茂, 中田直樹. JFE スチールのTMCP技術の進歩とそれによる高性能厚板. JFE 技報. 2014, no. 33, p. 1-6.
 - 73) 鹿内伸夫, 三田尾真司, 遠藤茂. 最近のTMCPによる厚板組織制御技術の進展と高性能化. JFE 技報. 2007, no. 18, p. 1-6.
 - 74) 中田直樹, 黒木高志, 藤林晃夫, 宇高義郎. 高温鋼材の高水量密度での水冷における冷却特性. 鉄と鋼. 2013, vol. 99, no. 11, p. 635-641.
 - 75) 中田直樹, 黒木高志, 藤林晃夫, 日野善道, 宇高義郎. 高水量密度冷却の水冷能力評価と水冷直後の制御圧延が材質に及ぼす影響. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, no. 8, p. 958-965.
 - 76) 杉原広和, 上岡悟史, 日野善道, 木島秀夫, 中田直樹. パイプラミナーノズルから噴射される柱状水の形状安定性の定量的評価. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, no. 12, p. 1508-1513.
 - 77) 中世古誠, 藤林晃夫, 黒木高志. スプレー冷却における水温の影響. 材料とプロセス. 2008, vol. 21, no. 1, S147.
 - 78) 中世古誠. スプレー冷却における水温と液滴径が極小熱流束に及ぼす影響. 日本伝熱シンポジウム講演論文集. 2011, G133.
 - 79) 福田啓之, 中田直樹, 木島秀夫, 黒木高志, 藤林晃夫, 高田保之, 日高澄具. 表面性状がスプレー冷却特性に及ぼす影響. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, no. 12, p. 1514-1522.
 - 80) 小林弘和, 壁矢和久, 高嶋由紀雄, 高橋秀行, 武田玄太郎. ガスジェット冷却特性に及ぼすノズル配置と距離の影響. 鉄と鋼. 2017, vol. 103, no. 8, p. 458-467.
 - 81) 見坂拓郎, 豊福達生, 岡田誠康. JFE スチール西日本製鉄所(福山地区)

No. 5 連続焼鈍ラインの自動操業最適化システム. JFE 技報. 2015, no. 35, p. 18-21.

- 82) 高橋秀行, 武田玄太郎, 三宅勝, 中田直樹. スロットノズル先端角度のワイピング性能への影響. 実験力学. vol. 15, no. 3, p. 217-224.
- 83) 武田玄太郎, 高橋秀行, 三宅勝, 中田直樹. 多段スリットガスワイピングノズルによる付着量制御についての実験的解析. 混相流. 2014, vol. 28, no. 1, p. 90-98.
- 84) 武田玄太郎, 高橋秀行, 壁矢和久. 連続溶融亜鉛めっきラインのガスワイピングにおける3スリットノズルの噴流形態. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 10, p. 576-582.
- 85) 吉本宗司, 伊藤優, 高橋秀行. 溶融めっき鋼板外観に与えるCGLワイピング影響. JFE 技報. 2018, no. 41, p. 78-82.
- 86) 石井俊夫, 石岡宗浩, 井口学. 溶融亜鉛めっき浴における金属間化合物の挙動解析. 化学工学論文集. 2003, vol. 29, no. 1, p. 70-75.
- 87) 壁矢和久, 石田匡平, 鈴木秀和, 石垣雄亮, 石野和成, 石井俊夫. CGLワイピング部における電磁石を用いた鋼板の振動および形状制御. 鉄と鋼. 2013, vol. 99, no. 10, p. 610-606.
- 88) 西名慶晃, 石田匡平, 石垣雄亮, 永井肇, 小澤悠一. デュアルコイル電磁石による表面処理鋼板の非接触通板制御装置. 日本機械学会誌, 2014.5, vol. 117, no. 1149, p. 295.

- 89) 風間彰, 杉浦寛幸, 大重貴彦, 猪股雅一, 上杉満昭, 田口昇. 鋼板表面欠陥の偏光反射特性の解析とその高速検査技術への応用. 鉄と鋼. 2004, vol. 90, no. 17, p. 870-876.
- 90) 佐々木成人, 三宅勝, 中田直樹. リバースロールコーターにおける塗布安定条件に関する基礎検討. 鉄と鋼. 2014, vol. 100, no. 8, p. 992-998.
- 91) Sasaki, M.; Miyake, M.; Nakata, N. Visualization Study of Flow Stability in Reverse Roll Coating. ISIJ International. 2015, vol. 55, no. 4, p. 863-869.



三宅 勝



木村 幸雄



壁矢 和久