



躍動

若手研究者・技術者の取り組みと将来の夢

熱延プロセスの研究開発を通じて

Research and Development of Hot Rolling Process

山口慎也

Shinya Yamaguchi

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

1 はじめに

筆者は2007年にJFEスチール(株)に入社して以来、圧延加工プロセスの研究開発に従事しており、主に薄鋼板の熱間圧延での表面改善や寸法、形状制御、蛇行制御技術などの開発に携わっています。本稿では、筆者が取り組んできた、熱間圧延での研究開発事例について紹介します。

2 WRプロフィール制御の課題

熱間圧延では、ワークロールの熱膨張(サーマルクラウン)や摩耗の板厚プロフィール(板厚の幅方向分布)への影響を避けるため、古くから、コフィンスケジュールと呼ばれる板幅構成のサイクルでの圧延を行ってきました(図1)。コフィンスケジュールとは、前半では板幅の狭い材料から徐々に板幅の広い材料に移行し、その後は徐々に板幅の狭い材料を圧延

するサイクル構成のことです。

近年は、従来にも増して、省資源・省エネルギー型で環境負荷の少ない製鉄プロセスの要望が高まり、熱間圧延では加熱炉での燃料原単位の削減が強く望まれています。そのためには、連続鋳造から搬送される高温のスラブを活用したDHCR(Direct Hot Charged Rolling)が有効です。従来のコフィンスケジュールでの圧延とは異なり、連続圧延本数が多く、幅戻りを含むランダムな板幅構成で圧延を行う、チャンスフリー圧延が望まれ、サーマルクラウンや摩耗からなるWRプロフィール(WR直径の軸方向分布)制御が重要となります。サーマルクラウンや摩耗は、ロール半径約400mあたり最大約200 μ m程度です。しかしこれが、10 μ m単位での板厚プロフィール精度が求められる熱間圧延において、非常に重要な問題となります。幅戻り圧延とは、先行して圧延した材料の幅よりも大きな幅の材料を圧延することで、WRのサーマルクラウンや摩耗の影響を受け、板厚プロフィール不良や耳

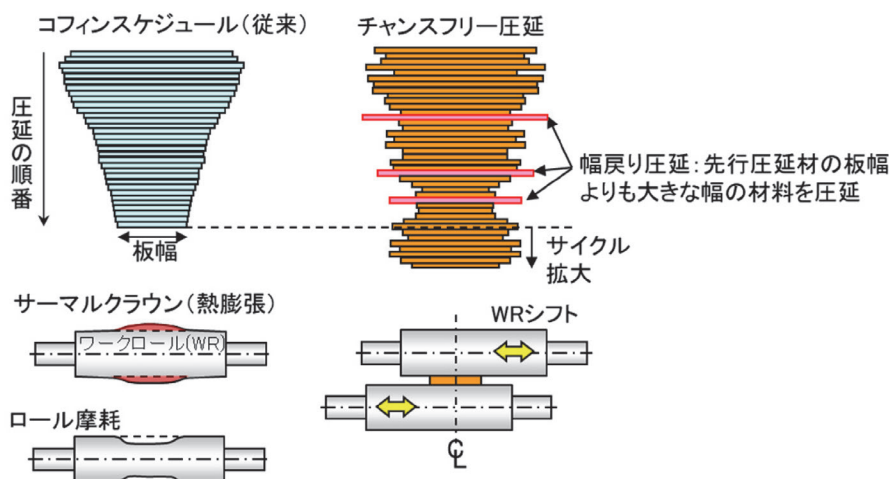


図1 熱延サイクル構成とWRプロフィール

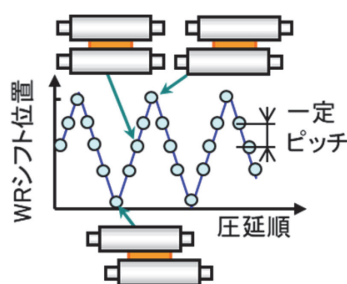


図2 サイクリックWRシフトパターン (従来)

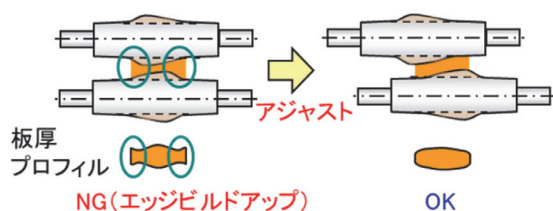


図3 アジャストWRシフト

波、腹伸びなどの平坦度不良が発生しやすくなります。板厚プロフィール不良は、次工程での形状不良やコイル圧着疵の原因となります。

3 熱間圧延でのワークロールシフト位置制御

WRプロフィール制御には、サーマルクラウンや摩耗のロール軸方向への分散を目的としたWRシフトが従来から用いられています¹³⁾。従来のWRシフトでは、WRのサーマルクラウンや摩耗を板厚プロフィール制御の阻害因子とみなし、WRをサイクリックにシフトさせることによって、板からの入熱や摩耗をWRの軸方向に分散させていました(図2)。しかし、これでは十分な改善が見られませんでした。

それに対し、今回開発した技術は、サーマルクラウンや摩耗プロフィールを板厚プロフィール制御のアクチュエータのひとつとして積極的に活用するようにWRのシフト位置を変更す

る技術です⁴⁶⁾。板厚プロフィールは、図3のように、サーマルクラウンや摩耗のWRプロフィールだけでなく、板とWRとの位置関係の影響を受けます。本技術は、これに着目して、サーマルクラウンと摩耗の分散とシフト位置制御を両立させることを目指しました。WRプロフィールをオンラインで推定し適切なシフト位置に移動させることによって、板厚プロフィールを制御します。WRシフトによって、WRプロフィールを板厚プロフィールの制御アクチュエータとして活用するというのがこの技術のポイントです。これによって、従来は不可能だった幅戻り圧延や連続圧延本数の拡大、つまりチャンスフリー圧延の拡大に貢献することができます。

4 おわりに

本稿で紹介した事例は多くの関係者の方々のご助言や議論を通じて得られたものであり、皆様に感謝申し上げます。また、技術開発を通して、社会に貢献できる人材となれるように日々精進して参りますので、今後とも、ご指導、ご鞭撻を賜りますようよろしくお願い申し上げます。

参考文献

- 1) 谷口勲, 中村丈人, 小土井章夫, 増田健一, 升田貞和, 山本正治: 鉄と鋼, 71 (1985), S1140.
- 2) 常田弘, 木村寛, 村松清, 浅井政史: 鉄と鋼, 72 (1986), S1219.
- 3) 伊藤康道, 植田憲治, 音田聡一郎, 豊川明, 吉村宏之, 湯澤秀行: 鉄と鋼, 72 (1986), S1220.
- 4) 山口慎也, 館野純一, 中田直樹: 鉄と鋼, 101 (2015), 365.
- 5) S.Yamaguchi, J.Tateno and N.Nakata: ISIJ Int., 56 (2016), 2243.
- 6) S.Yamaguchi, M.Miyake, K.Kimura and T.Jinnouchi: ICTP2017, 207 (2017), 1320.

(2020年4月21日受付)

先輩研究者・技術者からのエール

大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻 教授

宇都宮 裕

山口慎也氏は、JFEスチール（株）入社以来スチール研究所で圧延技術の研究開発に従事されてきました。過去数年間にわたって共同研究を行わせていただきました。また、著者が担当した日本鉄鋼協会主催のアドバンスセミナーや専科にもご参加いただき、親しく懇談し、しばしば深く討論する機会にも恵まれました。ご指名ということもあり僭越ながら、今回筆を執らせていただきました。

圧延の研究と聞けば、薄鋼板の冷間圧延を思い浮かべる方が多いと思います。薄板の圧延は板幅の変化がほとんどなく、また高速で優れた表面性状の圧延板を製造するために良好な潤滑の下で行われます。したがって力学的には平面ひずみ条件の定常変形を仮定することができます。加えて、ロールと板の間の摩擦係数も小さいため、内部に導入されるせん断変形も無視することができます。そのため、ほとんどの問題は、古典的な圧延理論、すなわちKarman理論をよりどころに考察することができます。

一方、山口氏が対象とされているプロセスは、主として厚板の圧延です。このプロセスでは、被圧延材であるスラブが厚く、幅広がりを見逃すことができません。種々の製品幅に対応するため、圧延に先立ってサイジングプレス等を用いた幅の縮小が行われますが、その後の圧延で生じる幅広がりを理論的に予測し、高精度に板幅を制御することが歩留まり向上の点で望まれます。したがって、非定常状態の三次元的思考が要求されます。また、スラブの加熱温度は1000℃以上ですので、デスケリングを行った後にも、ただちに酸化皮膜（スケール）が表面に形成し、その状態で圧延が行われます。ロール

と材料の間の界面は、大きな摩擦が作用する場所であると同時に、熱が材料からロールに移動する際の経路でもあります。したがって、界面に位置するスケールは摩擦係数のみならず圧延中の材料温度にも影響を与えます。ロールは、総圧延長さの増加とともに、特に板縁に当たる箇所で、顕著な摩耗を示します。また幅方向の温度分布に起因して不均一な熱膨張（サーマルクラウン）も生じます。これらにより、ロールならびに圧延板のプロファイルは刻々と複雑に変化します。山口氏は両者を同時に考慮することで、板形状を改善するモデルの作成に成功されています。

厚板圧延では、高温で圧延速度が比較的に遅いため、原子の拡散も活発です。そのために、プロセス中で変態、回復・再結晶や析出といった組織変化が生じ、板の力学的特性も刻々と変化します。その点においても、モデル化が難しいプロセスと言えます。非定常三次元の変形解析と伝熱解析や組織・特性予測の連成が必要となり、真正面から取り組むと非常に大きな計算負荷がかかります。山口氏は勉強熱心で、学生時代に習得した基礎知識に加えて、伝熱工学や材料組織学、トライボロジーなど広範囲の知識を有し、討論の際にはしばしば驚かされましたが、多方面から現象を見ることに長けておられます。時には、大胆な仮定を導入することで複数因子の影響を考慮し、現場にとって有益なモデルを構築されてこられたと推察しています。

今後も、現場の技術を深く分析され、ブレークスルーとなる新規な鉄鋼製品、新加工技術を提案されることを期待して筆を置きます。

日本製鉄（株）技術開発本部 プロセス研究所 鋼圧一貫研究部 主幹研究員

福島 傑浩

山口慎也さんと初めてお会いしたのは、2012年に圧延理論部会でご発表をされた時ではないかと思います。「ワークロールシフトミルにおける熱延サーマルクラウン特性」という題目で熱延におけるクラウン制御という圧延技術者にとって本流の技術分野についての取り組みをわかりやすくまとめられ、理路整然とご説明されていました。この圧延理論部会は私が開催地担当で、発表をされた方に挨拶をさせていただいたのですが、山口さんは苦労話も含めてフランクにお話をされていたように記憶しております。また、その発表をされる数年前の圧延理論部会にて、若手ステップアップ講演として、「熱延におけるクラウン・形状制御」を発表されておりました。この分野で久しぶりに正面から技術開発に取り組む方がでてきたと、そのような思いで山口さんの学会発表には注目をしておりました。その後、2016年の鉄鋼協会アドバンスセミナーで私が講師、山口さんが受講生となる機会があり、今回僭越ながらコメントをお引き受けしました。

アドバンスセミナーでは、「熱延の次世代プロセス技術を考える」というテーマについて、各社で同じ分野で仕事をされている参加者がグループで議論しました。山口さんは、既存の技術を冷静にかつオープンマインド

に分析し、今後の展望を的確に述べられていました。山口さんの発言で議論が活発化し、また方向性も定まっていたように思います。

山口さんが論文等で発表されているのは、熱延のワークロールが熱膨張や摩耗をすることを精緻に解析し、ロールを軸方向にシフトさせることでその幅方向の分布特性が変わることを活用し、積極的に板クラウンを制御する技術です。これは通常は不利となる現象を有効活用するという逆転の発想です。また、数多くの制約条件がある中で適用範囲の広い最適解を見つけるという意味では、問題設定とその評価についてとても高い能力が求められます。現場の操業を深く理解した上で、それを理屈に落とし込まなければならないということで、非常に高レベルの応用問題であると思います。そのような難題を持前の客観的で冷静な分析力であまりく処理されて、現場の操業が改善されるようなレベルの技術にまとめ上げられております。このレベルにまとめ上げられるまでのご苦労を想像しますと頭が下がる思いです。

最後になりましたが、若手の学会活動にも積極的に参加されている山口さんには、是非今後の圧延技術を牽引する存在となり、ますますご活躍されることを期待しております。