

技術解説

圧延技術開発の歩みと今後の展望

Progress and Prospect of Rolling Technology

小川 茂*	内田 秀	三浦 洋介	山田 健二
Shigeru OGAWA	Shigeru UCHIDA	Yosuke MIURA	Kenji YAMADA
白石 利幸	芹澤 良洋	井上 剛	近藤 泰光
Toshiyuki SHIRAIISHI	Yoshihiro SERIZAWA	Tsuyoshi INOUE	Yasumitsu KONDO
明石 透	林 慎也	中村 洋二	齋藤 俊明
Tooru AKASHI	Shinya HAYASHI	Yohji NAKAMURA	Toshiaki SAITO

1. はじめに

圧延分野におけるこの30年は、日本の生産規模拡大が停滞する中でも、エネルギー危機やユーザー業界の変化等の事業環境変化に対応するため、日本独自の新技术を次々に開発、実用化してきており、日本の圧延技術が世界をリードする礎を作った時期と捉えることができる。しかしながら、直近では新興国を中心に新鋭ミルが続々と稼働しており、少なくとも設備装備力という点では日本の優位性は急速に失われつつある。そこで本稿では、この30年、主として新日本製鐵で開発、実用化されてきた新技术について紹介するとともに、今後進むべき方向について展望する。

2. 新圧延プロセス開発

2.1 冷間圧延連続化

30年前、すなわち1981年断面においては、省エネルギーを目的とした連続鋳造と熱間圧延との直結に関する技術開発がほぼ完了¹⁾しており、当時、変革を遂げつつあったのは冷間圧延プロセスであった。冷間タンデムミルとその前工程である酸洗工程とを直結して生産性を飛躍的に向上させる技術 CDCM²⁾が1981年に君津製鐵所において実用化された。この技術の実現には直交配置された薄板ラインを接合するためのヘリカルターン技術の開発が大きな役割を果たした。ついで1986年には酸洗、冷間圧延、連続焼鈍を連続化した完全連続冷間薄板製造設備 (FIPL)³⁾も広畑製鐵所において実用化され、冷間圧延プロセスの究極の連続化が完成した。

2.2 熱間圧延連続化

薄板の熱間圧延工程(ホットストリップミル)では、圧延材の温度を確保するため仕上圧延機を高速で通板する必要がある。このため先端および尾端の圧延作業が冷間圧延

よりも難易度が高くなり、冷間圧延で先行して開発された連続化技術が熱間圧延においても切望されていた。そこで大分製鐵所では、仕上圧延機手前において先行材尾端と後行材先端とをレーザー接合して仕上圧延を連続化するプロセスを開発、実用化した⁴⁾。この技術を実現するためには先行材と後行材の圧延時間を正確に管理するミルペーシング技術の進歩が不可欠であり、これによって、通常のバッチ圧延においてもアイドルタイム短縮等の生産性向上効果が享受できることになった。

2.3 クラウン・形状制御ミル

板圧延機の最大の役割は言うまでもなく圧延材を連続的に塑性加工して板厚を所望の値に造り込むことである。このとき長手方向板厚分布の制御に対しては板圧延機に本来備わっている圧下装置がアクチュエータとなるが、幅方向板厚分布制御すなわち板クラウン・形状制御を行うためには圧下装置とは別の専用アクチュエータを備えた圧延機が必要となる。新日本製鐵では重工メーカーと協力して、そのようなアクチュエータを有する新型式圧延機を他社に先駆けて開発してきた。その代表的なものが図1に示す中間ロールシフト機能を有する6段圧延機(HCミル)⁵⁾とペアクロス圧延機(PCミル)⁶⁾である。

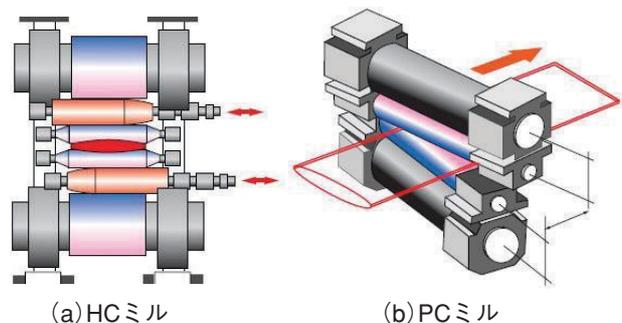


図1 代表的クラウン制御ミル

* フェロー 工博 千葉県富津市新富20-1 〒293-8511

新たに開発し、実用化した。

3. 圧延プロセスの計算機制御

圧延に関わる周辺技術の中で近年最も顕著な技術革新を遂げたのはコンピュータ（計算機）である。この技術革新の果実を最大限活用すべく、主として板圧延の分野で、コンピュータによる圧延制御技術の革新が進められた。

3.1 板厚制御

板厚制御は板圧延における最も基本的な技術の一つであり、圧延荷重の変動を検知して、圧延機変形（ミルストレッチ）の変化分を圧下位置制御で補償するゲージメータ AGC（Automatic Gauge Control）や、圧延機後面の板厚計で板厚を実測し、これを圧下位置制御に返すモニター AGC が早くから実用化されていたが、ゲージメータ AGC は精度面、モニター AGC は応答面での大きな問題を抱えていた。

この状況を打破するため次節で紹介するクラウン形状制御のための高精度オンラインミル変形計算モデルの考え方を発展させて、高精度ミルストレッチ計算モデルを開発した¹⁵⁾。これを活用した絶対値 AGC の実現によって圧延荷重測定値に基づき時々刻々の板厚が高精度に推定できるようになり、図7に示すように、特に圧延材先端部の板厚精度の大幅な向上を実現している¹⁶⁾。

3.2 クラウン形状制御

当社では HC ミルや PC ミルの実機化段階において、これらの新ミル機能を徹底的に使いこなすためのオンライン計算モデルの開発に注力した。オンラインモデルは、高速演算可能であること、およびクラウン形状の目標値から制御アクチュエータの設定値を高速に逆算できる構造を有することが大前提であり、当社における本格的な研究以前では実験やオフラインモデル計算結果や実験結果から回帰式を導いて利用しているケースがほとんどであった。しかしながらそのような手法では、精度的に限界がある上、適用範囲が限定的となり、あらゆる操業条件に対して信頼性を確保することが困難となる。

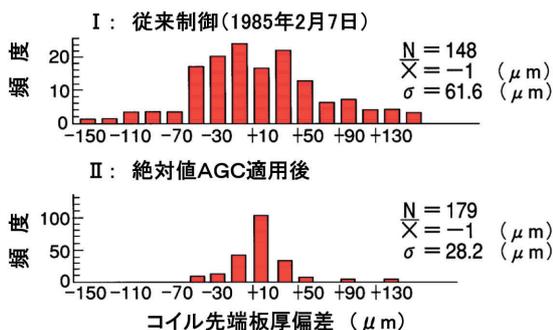


図7 絶対値AGC適用による板厚精度向上例

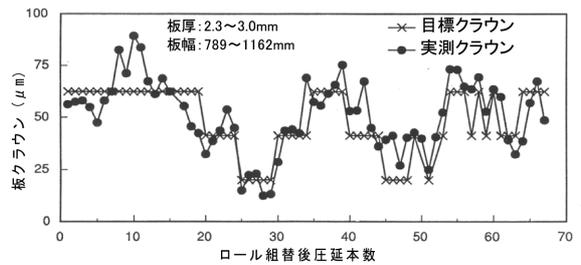


図8 板クラウン自在制御の実用化例

そこで当社では可能な限り理論ベースの板クラウン計算式を開発することを基本方針とした。その結果、圧延機出側板クラウンを、圧延機の条件から決まるメカニカル板クラウンと入側板クラウンとの線形結合で表現し、その係数をクラウン比率遺伝係数で表現する板クラウン基本計算式が成立することを明らかにできた。さらにメカニカル板クラウン計算式をロール変形の重ね合わせを利用した理論式で構成して板クラウンモデル体系を開発した¹⁷⁾。これによって八幡熱間圧延工場において図8に示すような板クラウン自在制御を世界で初めて実現することができ¹⁸⁾、その後、本技術は新日本製鐵の各熱間圧延ミルに適用された。

3.3 知能圧延

前節で述べたように HC ミルや PC ミルを用いることで板クラウン自在制御を実現することができたが、形状（平坦度）制御については、モデルに要求される精度が1オーダー以上厳しくオペレータ依存から抜け出せない状態にある。この状況を打破するため、当社では全く新しい圧延機システム“知能圧延機（NIM：NSC Intelligent Mill）”を開発した。この知能圧延機は、板形状と密接に関係する圧延荷重の板幅方向分布をリアルタイムに推定して、所望の圧延荷重分布に制御する機能を有する圧延機であり、図9に示すような個別ロードセルと個別圧下機能を有する分割

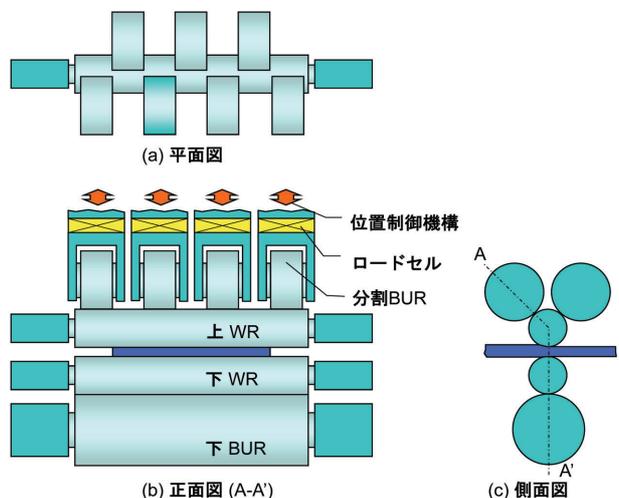


図9 知能圧延機の基本構造

バックアップロール (BUR) でワークロール (WR) を支持する構造となっている。この知能圧延機能は、当社が蓄積してきた圧延機解析技術をさらに高度化することで実現できたもので、極軽圧下で極めて強力な形状矯正機能を有する厚板矯正機として実用化されている¹⁹⁾。

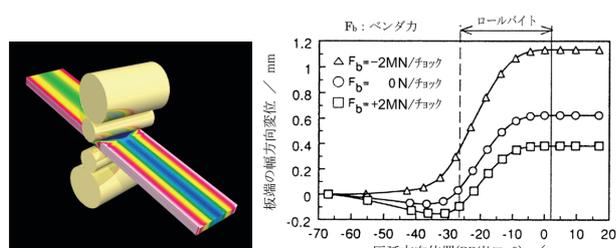
4. 数値シミュレーション技術

圧延工程の有限要素法 (FEM) 解析技術は、古典的なスラブ法やエネルギー法に見られるような種々の大胆な仮定を極力用いない、信頼性、汎用性に優れた手法としてその進展が著しい。特に昨今の計算機の急速な高性能化、低価格化、市販コードの高度化と相まって、すでに“数値実験”によるプロセス開発が可能で実用段階にあるといえ、以下に当社での適用事例を紹介する。

4.1 汎用圧延解析システム (NSCARM) の開発と応用

塑性変形主体の変形現象の効率的解法として発展した剛塑性FEMは、1970年代初めにその基本定式化が提案され^{20, 21)}、1979年に国内で初めて圧延解析 (2次元定常²²⁾) に応用された。当社では2次元上下非対称圧延解析コードの開発²³⁾に始まり、2次元熱-変形-組織連成解析、3次元管圧延、H形鋼圧延、板圧延、条鋼圧延、傾斜圧延、3次元熱-変形連成解析、3次元非定常圧延解析と逐次適用範囲の拡大を図りながら、汎用圧延解析システム NSCARM (Numerical System for Computer Analysis of Rolling Mechanism) の構築を進めてきた²⁴⁾。図10にその特徴を示すように、現在、NSCARMは実用化されているほぼ全ての圧延工程をカバーしている。

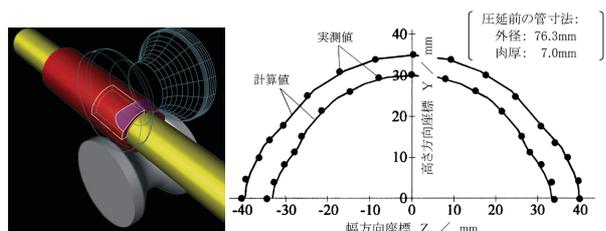
図11は板圧延の解析例であり、4段圧延機で熱間圧延中の圧延板内の圧延方向応力分布 (同図a)、板厚方向に拡大表示) および板幅変化 (同図b)) を示している。板クラウン制御端 (ロールベンダ力、クロス角など) の操作により、応力分布変化を介して板幅にも有意に変化を与えることが定量的に捉えられ、高精度な圧延制御モデルの開発に繋がっている。図12および図13には鋼管のマンドレル圧



a) 圧延方向応力分布

b) 圧延中の板幅変化

図11 板圧延の解析事例



a) 解析領域

b) 圧延後の鋼管の肉厚分布

図12 鋼管のマンドレル圧延解析

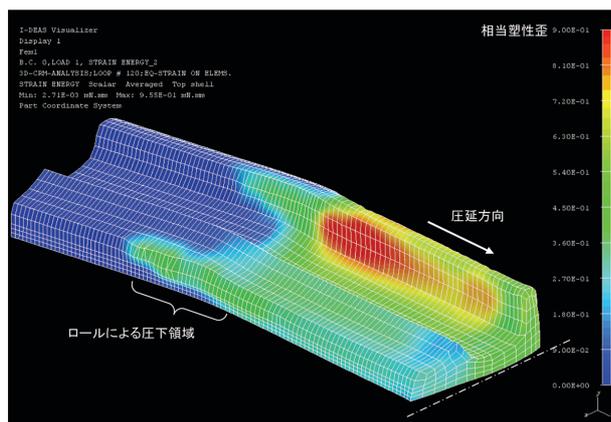


図13 レールのユニバーサル圧延解析 (非定常解析, 上下対称)

延およびレールのユニバーサル圧延の解析結果を示したが、空間的、時間的に複雑な3次元変形現象の定量化が可能となることで、製品寸法精度の向上や被圧延材の反り、振れに起因する操業事故の解消など、各種圧延工程の抜本的な最適化、安定化が実現しつつある。

4.2 調質圧延シミュレーション

薄鋼板の調質圧延においては、鋼板およびロールの弾性変形の役割が大きくなるため、鋼板の不均一変形やロールの非円弧変形等が問題となり、スラブ法による古典圧延理論では説明できない現象が残されている。特にブライトロール圧延時に伸び率が1%未満から4~8%まで急激に変化する、いわゆるジャンピング現象や、ダルロールによる圧延現象については、詳細なメカニズム解明がなされていない状況であった。

NSCARM

except 2D codes

- Mandrel rolling
 - Specialized pre-processor & solver First 3D code in NSC
 - Long-product rolling
 - Bar / wire, H-shape, rail, angle, slab, pipe, etc.
 - Versatility for profile/ configuration/ number of rolls
 - Flat rolling
 - Discretized model of roll deformation for various mill types
 - High precision of contact analysis for strip shape evaluation
 - Helical rolling
 - Stable calculation of extremely complex material flow
 - Non steady-state analysis of flat/shape rolling
 - Inter-pass geometry processor (for plates) Sizing press
 - Asymmetric deformation during rolling (for shapes)
- *) All rolling codes are composed of pre-processor and solver.

図10 NSCARMの構成と特徴

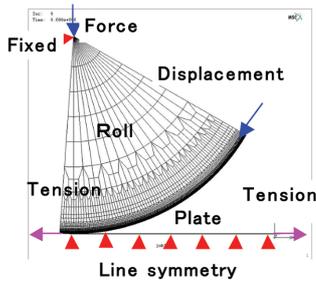


図14 調質圧延FEMモデル

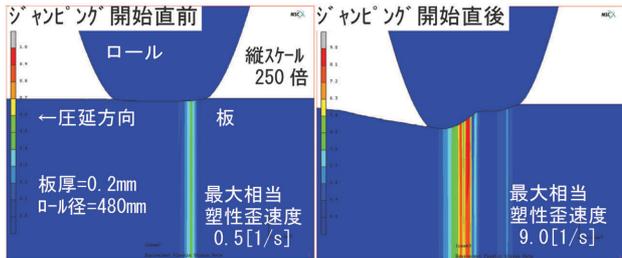


図15 ブライトロール圧延解析結果

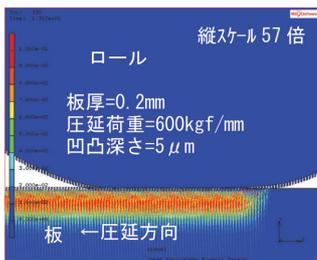


図16 ダル圧延解析結果

そこで当社では、弾塑性接触解析機能をはじめ、高度化、高速化された汎用弾塑性有限要素ソフトウェアMSC.MARCによる調質圧延シミュレーションを試みた。図14～16に解析結果を示すが、鋼板の上下降伏点を考慮し、ワークロールの弾性変形を含めた精緻な圧延解析を行うことにより、ジャンピング現象や圧延におよぼすロール粗度効果等の調質圧延特有の現象が合理的に解釈できるようになった²⁵⁻²⁷⁾。

4.3 熱間圧延ランアウトテーブル通板挙動シミュレーション

熱間圧延工程において仕上圧延機後面に位置するランアウトテーブル (ROT) は、冷却制御により鋼板材質を決定する重要なセクションであるが、特に薄手材通板時において、図17に示すような板先端部の浮上、折れ込みや板ミドル部での波打ちといった板不安定挙動が発生し、鋼板温度制御性の低下と共に生産性低下を招くことがある。

薄鋼板のROT通板不安定挙動は、主に衝撃力や慣性力、鋼板の弾塑性変形力など動的、準静的な内外力が同時・瞬



(a) 板先端部の浮上 (b) 板ミドル部の波打ち

図17 実機における熱延ROT通板不安定挙動例

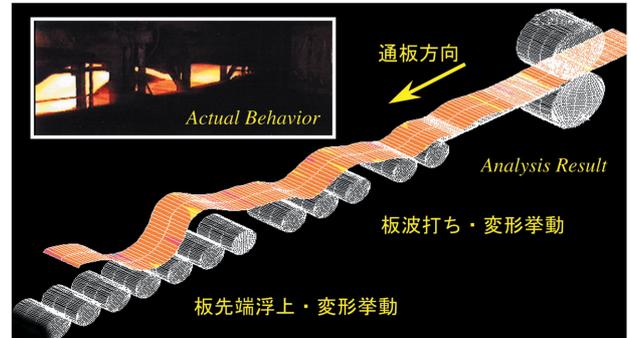


図18 熱延ROT通板挙動の解析例

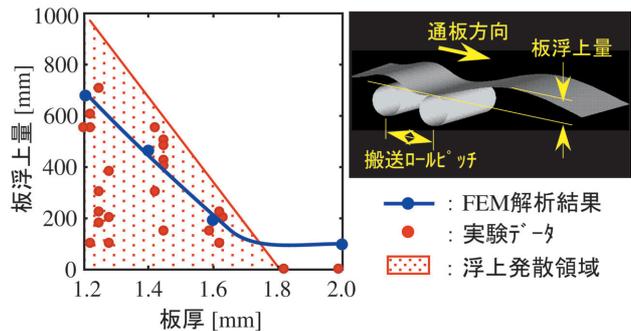


図19 板ミドル部の波打ち挙動の解析評価例

発的に作用する極めて複雑、非定常な現象である。そこで、この様な動的、非定常、不安定といった現象を定量的に捉える手段として、近年、自動車の衝突解析などで適用が盛んとなった動的陽解法FEM (LS-DYNA) を圧延プロセス解析で初めて取り入れ現象メカニズム解明に取り組んだ²⁸⁾。

図18は動的陽解法FEMによる薄鋼板のROT通板挙動解析例であり、板先端と搬送ロールの衝突反発による板浮上・変形挙動や、搬送ロール間での板たわみに起因する板ミドル部での波打ち挙動など、実機挙動との合致が確認されている。

また図19は板ミドル部の波打ち挙動に関する実験と解析の比較評価例であり、通板不安定となる板厚限界や、波打ちが発生した際の浮上量など、定量的にも十分な現象解析がなされている。

以上のようなシミュレーション結果に基づいて、ROT通板の安定化技術開発が行われている。

5. 鋼材加熱技術

加熱、特に燃焼加熱技術については省エネルギーと均一加熱とを主眼として技術開発が進んだ。オイルショックを契機とした種々の省エネルギー技術の開発と実用化が1980年代当初に行われるも大きな技術革新は少なかったが、1980年代後半に英国発の蓄熱式切替燃焼技術²⁹⁾が知られると、その高い省エネルギー性と均一加熱性を活かすための実用化開発が急速に進展した。

実用化に向けて、(1)蓄熱式切替燃焼の基礎燃焼特性の調査³⁰⁾、(2)従来炉とは異なる炉内流動、伝熱形態の解明³⁰⁾とそれを活かした炉および燃焼機器設計技術の開発³⁰⁾、(3)前記(2)を効率的に進める高度炉内熱流動解析技術の開発³¹⁾を研究所、エンジニアリング事業本部(現新日鉄エンジニアリング株式会社)、製鉄所が連携して進めてきた。1996年以降、この蓄熱式切替燃焼技術を部分適用または全面適用した炉は全社で20基以上に達し、省エネルギー、CO₂排出削減、鋼材品質の向上に貢献している。

6. スケール制御技術

圧延工程においては鋼材の酸化スケールが表面品質に大きな影響をおよぼす。このため適切なスケール制御技術が歩留改善や生産性向上にとって重要なキーテクノロジーの一つとなる。

当社では、熱間圧延中のスケール挙動に着目して、実プロセスをイメージしたシミュレーション実験手法を確立し、スケール組織におよぼす合金元素や雰囲気条件の影響、およびスケール組織が加工時のスケール挙動におよぼす影響に関する研究を実施してきている。図20³²⁾にはスケール組織が鋼材の赤熱脆性感受性におよぼす影響を調査するために実施した実験結果を示すが、この結果に基づき赤熱脆性防止技術を開発している。

今後は上記の研究手法に加えて、圧延、加工等の機械力

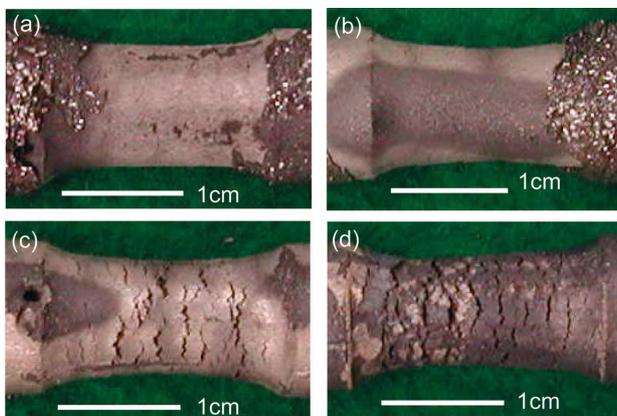


図20 酸化-引張実験での銅起因赤熱脆性の感受性評価
(a)低酸素濃度条件(0%O₂)、(b)標準条件(2%O₂)、
(c)高酸素濃度条件(5%O₂)、(d)超高酸素濃度条件(80%O₂)

学的要素を考慮した研究が必要になってくると考えられる。

7. ロール・工具技術

近年、圧延ロール材として、耐摩耗性と強靱性の両立が要求され、製造法としては静置鋳造法に替わり、内・外層の複合化が指向され、遠心鋳造法や内層に強靱な鋼系を複合可能にしたCPC法(Continuous Pouring Process for Cladding)等が開発、実用化されてきた。一方、熱間圧延仕上ロール材質としては、前段でアダマイト、後段でNiグレン鋳鉄ロールが使用されてきたが、圧延条件の過酷化に伴い、ロールの耐久性を改善するため、Cr炭化物を晶出させて耐摩耗性を向上させた高Cr鋳鉄が1970年代に欧州で開発され、日本でも適用されるようになった。さらに、1990年代初頭に、V、Mo、W、Crを含有し、高硬度のMC、M₆C、M₇C₃等の炭化物を多量に晶出させた高炭素ハイスロールが日本で開発され、耐摩耗性がNiグレン鋳鉄の約5倍、高Cr鋳鉄の約2.5倍と高く、現在は前段～中段でほぼ100%適用されている^{33,34)}。ただし後段スタンドでは絞り事故時の亀裂深さが深く、本来のパフォーマンスが発揮できないため適用できておらず、耐亀裂性改善が鋳造ハイスロールの課題である。

また、ハイスロールが出現して約20年になるが、最近の流れとして省エネルギーを狙った低温圧延や新商品創出のための高圧下圧延等を可能とする耐久性をさらに高めたポストハイスロールの開発が望まれている。耐久性向上には硬質のセラミックを増量する必要があり、かつ靱性の劣化を抑制できるセラミック繊維を添加したFRM(Fiber Reinforced Metal)ロールの開発が進められ、対ハイス比で耐摩耗性が約4倍、耐亀裂性が約3倍あることがモデルミル等で確認されている³⁵⁾。

圧延工具としては、シームレス鋼管圧延用工具として、プラグ、ガイドシュー等の寿命向上のため、表層をサーメット材とした複合工具の検討を行い、合金鋼圧延向けに適用された例がある³⁶⁾。

圧延ロール・工具等の耐久性向上には、圧延使用技術や圧延潤滑技術を含めた最適化が必須であり、ロールと圧延材間のトライボロジー現象を通して、表面損傷機構等を解明しながらロール・工具技術の改善が図られている³⁷⁻³⁹⁾。

8. 圧延潤滑技術

8.1 熱間圧延潤滑技術

熱間圧延潤滑には、ロールへの負荷を軽減するために摩擦力を小さくする機能が求められている反面、咬込みスリップを回避するため摩擦力をある程度維持する機能も必要である。このような矛盾する機能を両立させるために、従来から使用されていた鉱物油やエステルなどの液体状の潤滑油剤に代わって、半固体状のグリースや粉末状の固体潤滑剤を用いた新しい熱間圧延用潤滑剤の開

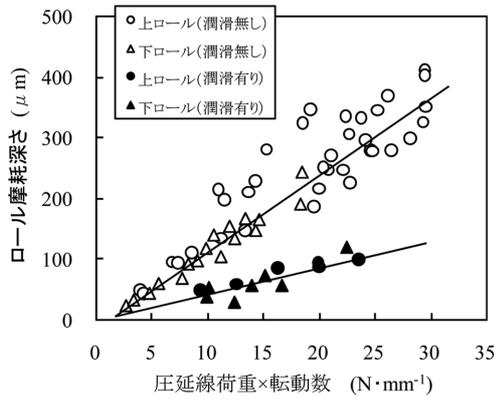


図21 グリース系潤滑剤のロール摩耗低減効果

発が行われてきた。摩擦係数の高い雲母粉末と、高温域で熔融皮膜形成効果を有するりん酸カリウム粉末とをグリースに混合した潤滑剤が考案され、潤滑性の高いグリースベースの潤滑剤を使用しても、咬込みスリップを発生することなく圧延することができ、図21に示すように大きなロール摩耗低減効果が得られることが実機ミルの試験で明らかになった^{40,41)}。

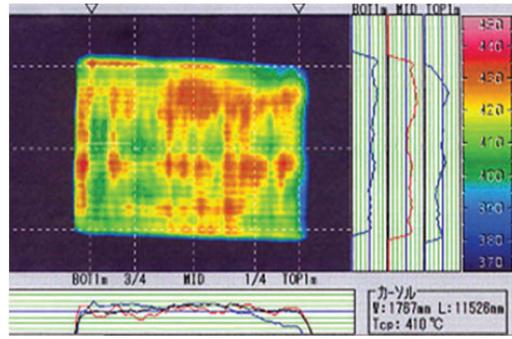
また、焼付きによる疵抑制に効果を発揮する黒鉛粉末とポリマー粉末との組合せの提案や⁴²⁾、膨潤性を有する雲母粉末をベース材とした滑りにくい潤滑剤の考案⁴³⁾、ワックスに固体潤滑剤を配合して必要な部分にのみ潤滑を施す局所潤滑技術の開発⁴⁴⁾、さらに炭酸カルシウムが添加された潤滑油の使用によってハイスロールの黒皮生成を抑制し黒皮バンディング発生率を低減する潤滑技術⁴⁵⁾等、固体潤滑剤を活用した様々な潤滑剤の可能性が検討されてきた。現状の熱間圧延潤滑では、まだ鉱物油ベースのものが主流であるが、固体潤滑剤等を活用した新たな潤滑機能の創出や革新が望まれている。

8.2 冷間圧延潤滑技術

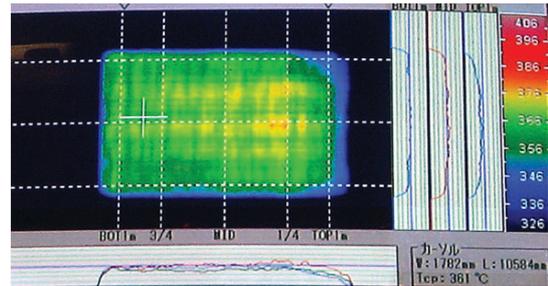
冷間圧延潤滑に関しては、従来は牛脂や魚油や植物油をベースとする圧延潤滑油が使用されてきたが、クーラントの清浄化やロール疵低減、ミルクリーン性ならびに耐焼付き性の向上を目的にエステルベースの圧延潤滑油が使用されるようになった⁴⁶⁻⁴⁹⁾。また、クーラント油中の酸化・鹼化価や鉄分および濃度の迅速な測定技術を開発し、安定した操業を可能にしている⁵⁰⁻⁵³⁾。

9. 鋼材冷却技術

冷却技術では鋼材の材質造り込みの高度化を目指した開発、設備化が行われ、多くの製品工程で高機能鋼材製造に寄与している。1980年代には、厚板CLC⁵⁴⁾(Continuous on Line Control Process)、レールの頭部局所冷却⁵⁵⁾など様々な冷却設備が導入された。冷却に使用される冷媒も水、気体など特性に応じた種々のものが使用されている。



(a)CLC冷却後温度分布



(b)CLC- μ 冷却後温度分布

図22 厚板冷却後の鋼板温度分布

厚板CLCは当社独自の厚板インライン冷却装置で、高機能鋼の製造により関連業界のコスト削減にも寄与してきた⁵⁶⁾。さらに、2004年にはますます厳格化するニーズに対応するためにCLC- μ (μ はMetallurgical Universal, Ultra, Ultimateを表す)が開発、設備化された。これにより、図22に示すように冷却の鋼板内温度偏差は50℃から30℃とほぼ半減され冷却時の温度均一性を向上させている⁵⁷⁾。連続熱間圧延においては、圧延後に均一冷却を行うためのスリットラミナー流冷却設備の開発⁵⁸⁾、高機能鋼材であるTRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼製造に対応した2段冷却などの冷却操業も開発されている⁵⁹⁾。このように、冷却技術においては、圧延と組み合わせたTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術を追求し、ハードウェアソフトウェア両面からの鋼材開発と連携したプロセス開発が実を結んできている。今後もプロセス制御精度の向上による一層の鋼材品質高度化を目指して開発を進めていく。

10. 今後の展望

当社の技術優位性は、高度なユーザーニーズに応え得る高級鋼の分野にあり、今後もこの分野の技術先進性を維持、拡大して行く必要がある。同時に量的に大きな部分を占める汎用鋼についても、その製造技術についてはさらなるコスト低減と高生産性を追求して行かなければならない。

現在、世界的な鉄鋼需要拡大局面において、製鉄機械製造メーカーが獲得した最新技術は新興国の新設ミルに次々

と導入されて汎用技術化しつつある。このような状況下においてもおお技術先進性の維持、拡大を実施して行くには、当然のことではあるが、鋼製品のユーザー業界を含めた現場現物および原理原則に立脚した新技術開発を今まで以上に加速して行く以外にない。以下ではこのような視点で圧延技術に関する今後の展望を簡単に記す。

まず、新しい圧延プロセス開発については、製造する鋼製品の高度化要求がドライビングフォースになると考えられる。鋼板分野では、高張力化や薄手広幅化、また形鋼分野では製品機能の高度化要求に応えるための新商品が求められ、これら現状プロセスの製造可能範囲を超える領域の製品を高い歩留と生産性で圧延するための技術開発が進むものと考えられる。

そしてこのような圧延技術開発をサポートするのが、計測制御技術、数値解析技術、鋼材加熱技術、スケール制御技術、ロール・工具技術、圧延潤滑技術、鋼材冷却技術、その他の計測技術を含めた要素技術である。さらに、これら要素技術自身のレベルアップも技術革新の火付け役になることが期待される。計測制御技術や数値解析技術は計測機自身の能力向上と理論の高度化によりさらなる進歩が期待される。鋼材加熱技術は、省エネルギー、CO₂排出削減と品質向上要求に応えることが期待され、スケール制御技術は、表面現象の理解の進展、シミュレーション技術の進展とともに、鋼材表面性状の厳格化要求によってさらなる進化と貢献が期待される。ロール・工具技術と圧延潤滑技術には、ますます過酷化する圧延条件に対しても高い生産性と品質要求を両立させる新技術開発が期待される。鋼材冷却技術には、新商品造り込み技術の観点から、冷却均一性および冷却自由度すなわち温度制御性のさらなる高度化が期待される。

以上のように、一見成熟したと思われがちな圧延技術に対しても、ますますの技術の深化、発展が期待されており、関連技術者・研究者の一層の努力が望まれる。

〈参考資料〉 圧延分野の大河内賞受賞リスト(本報告関連)

年度	賞名	案件名	本文記事対応
1986	記念賞	大規模熱間圧延ミルにおける高精度・即応生産技術の開発	板クラウン自在制御 (2.3, 3.2節)
1990	生産特賞	H形鋼の高効率自在成形技術の開発	ハイパービーム製造技術 (2.4節)
1996	生産賞	ロールペア・クロス方式による高精度・高効率鋼板圧延法の開発	ペアクロスミル, 絶対値AGC (2.3, 3.1節)
1997	生産賞	連続鋳掛け方法による熱延ハイスロールの開発	ハイスロール, CPC法 (7章)
2000	生産賞	世界初のエンドレス熱間圧延プロセスの開発と新製品の商品化	熱間圧延連続化 (2.2節)

参考文献

- 1) 竹村洋三 ほか:製鉄研究. (310), 251 (1982)
- 2) 安藤成海 ほか:鉄と鋼. 68 (12), S1138 (1982)
- 3) 加藤勝弘 ほか:材料とプロセス. 1 (5), 1537 (1988)
- 4) 松尾慎二 ほか:材料とプロセス. 13 (5), 1056 (2000)
- 5) 中島浩衛 ほか:塑性と加工. 23 (263), 1172 (1982)
- 6) Tsukamoto, H., Matsumoto, H.: Iron & Steel Engineer. 61 (10), 26 (1984)
- 7) 松本紘美 ほか:製鉄研究. (328), 49 (1988)
- 8) 生田和重 ほか:材料とプロセス. 2, 1567 (1989)
- 9) 安河内醇 ほか:材料とプロセス. 3, 1339 (1990)
- 10) 西野嵐治 ほか:材料とプロセス. 4, 512 (1991)
- 11) 藤本武 ほか:材料とプロセス. 3, 497 (1990)
- 12) 井田真樹 ほか:平2塑加春講論. 61 (1990)
- 13) 三浦洋介, 妙中真治:特許第4638828号. 2010.12.3
- 14) 三浦洋介, 妙中真治:特許第4464865号. 2010.2.26
- 15) 小川茂 ほか:塑性と加工. 27 (304), 579 (1986)
- 16) 辻勇一 ほか:鉄と鋼. 74 (3), 77 (1988)
- 17) 小川茂 ほか:塑性と加工. 25 (286), 1034 (1984)
- 18) 田中晃 ほか:昭59塑加春講論. 33 (1984)
- 19) 小川茂 ほか:材料とプロセス. 23 (2), 658 (2010)
- 20) Lee, C.H., Kobayashi, S.: Trans. ASME, J. Eng. Ind. 95, 865 (1973)
- 21) 森謙一郎 ほか:28回塑加連講論. 156 (1977)
- 22) 森謙一郎 ほか:昭54塑加春講論. 25 (1979)
- 23) 山田健二 ほか:昭61塑加春講論. 235 (1986)
- 24) 山田健二:第169, 170回西山記念技術講座. 1998, p.53
- 25) 明石透 ほか:58回塑加連講論. 151 (2007)
- 26) 明石透 ほか:材料とプロセス. 22 (2), 1108 (2009)
- 27) 明石透 ほか:材料とプロセス. 23 (2), 1123 (2010)
- 28) 中村洋二:日本鉄鋼協会第126回圧延理論部会. 2007
- 29) 日本特許第1604841号. 1986, および特許第1633968号. 1986
- 30) 国家プロ高性能工業炉の開発成果報告書. 1994-1999
- 31) Saito, T.: Proceedings of 1997 International Symposium of American Flame Research Committee. Chicago, 1997, AFRC
- 32) 近藤泰光:材料とプロセス. 20, 459 (2007)
- 33) 橋本光生 ほか:材料とプロセス. 4 (2), 450 (1991)
- 34) 橋本光生 ほか:新日鉄技報. (355), 76 (1995)
- 35) 内田秀 ほか:日本鉄鋼協会第131回圧延理論部会. 2009
- 36) 和田康裕 ほか:材料とプロセス. 15 (5), 977 (2002)
- 37) 大貫輝 ほか:鉄と鋼. 69 (13), 1133 (1983)
- 38) 中島浩衛 ほか:53回塑加連講論. 181 (1998)
- 39) 加藤治 ほか:製鉄研究. (335), 35 (1989)
- 40) 井上剛 ほか:塑性と加工. 43 (496), 411 (2002)
- 41) 井上剛 ほか:41回塑加連講論. 486 (1991)
- 42) 井上剛 ほか:平7塑加春講論. 251 (1995)
- 43) 井上剛 ほか:49回塑加連講論. 353 (1998)
- 44) 井上剛 ほか:材料とプロセス. 19 (5), 990 (2006)
- 45) 西山泰行 ほか:塑性と加工. 48 (556), 441 (2007)

- 46) 日置善弘 ほか:170回塑性加工シンポジウム. 11 (1996)
 47) 浅野弘揮 ほか:材料とプロセス. 8 (2), 495 (1995)
 48) 村元隆一 ほか:材料とプロセス. 7 (5), 1378 (1994)
 49) 谷川啓一 ほか:製鉄研究. (334), 62 (1989)
 50) 森敦 ほか:材料とプロセス. 9 (4), 789 (1996)
 51) 浅野弘揮 ほか:材料とプロセス. 8 (5), 1263 (1995)
 52) 森敦 ほか:材料とプロセス. 6 (2), 352 (1993)

- 53) 浜本康男 ほか:材料とプロセス. 4 (2), 485 (1991)
 54) 尾上泰光, 梅野正紀 ほか:製鉄研究. (309), 18 (1982)
 55) 影山英明, 杉野和男 ほか:製鉄研究. (329), 7 (1988)
 56) 木下宏幸, 和田典巳 ほか:ふえらむ. 9, 636 (2004)
 57) 芹澤良洋, 山本龍司:日本機械学会誌. 110, 162 (2007)
 58) 上尾英孝, 山本雅樹 ほか:特許第3898464号. 2001
 59) 高橋学:塑性加工シンポジウム. 237, 1 (2005)



小川 茂 Shigeru OGAWA
 フェロー 工博
 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511



井上 剛 Tsuyoshi INOUE
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



内田 秀 Shigeru UCHIDA
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員 工博



近藤泰光 Yasumitsu KONDO
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



三浦洋介 Yosuke MIURA
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



明石 透 Tooru AKASHI
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



山田健二 Kenji YAMADA
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



林 慎也 Shinya HAYASHI
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



白石利幸 Toshiyuki SHIRAIISHI
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員 工博



中村洋二 Yohji NAKAMURA
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



芹澤良洋 Yoshihiro SERIZAWA
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部 主幹研究員



齋藤俊明 Toshiaki SAITO
 プロセス研究開発センター
 プロセス技術部 主任研究員

執筆協力



鈴木規之 Noriyuki SUZUKI
 プロセス研究開発センター
 圧延研究開発部長 工博



武村資文 Motofumi TAKEMURA
 設備・保全技術センター
 プラントエンジニアリング部 (圧延) 部長