

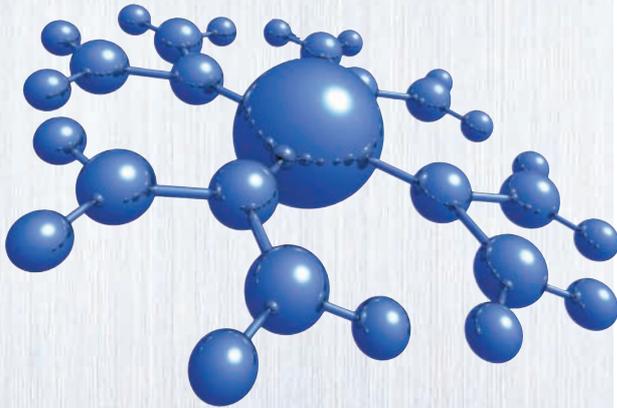
形を造り込む(下)

「形を造り込む」(前編)では、「塑性加工技術」を利用した「硬い鉄を薄く延ばす技術」に焦点をあて、圧延ロールの変形によって生じる「クラウン」(板幅方向の板厚差)を克服してきた新日鉄の技術を紹介した。後編では、優れた「クラウン制御技術」をベースに、1982年新日鉄が世界に先駆けて開発・実現した「スケジュールフリー圧延」をとりあげる。

製造ラインでは、生産効率の向上に向け様々な工夫がされている。同じ品種や寸法形状の製品を集約し、製造時間短縮、製造コスト削減および品質の安定化を図ることもその一つだ。

一方、マーケットニーズに対応して多くの品種を小ロットで生産するためには、生産ラインでの頻繁な条件変更が必要で、効率性を阻害する。材質、寸法形状の違う製品をつくり分ける過程では、生産効率の向上が重要なテーマとなる。

多品種を高精度かつ自在に圧延するための画期的なソリューション「スケジュールフリー圧延」は、開発当初「夢の技術の実現」と言われ、現在もホットストリップミルの基礎として進化し続けている。



効率的多品種生産への挑戦

新日鉄八幡製鉄所では、ホットストリップミルで製造する薄鋼板の品種が1970年頃から多くなり、普通鋼から特殊鋼まで多品種の生産を行っていた。自動車用鋼板や容器用鋼板に加え、高張力鋼板、ステンレス鋼板、電磁鋼板、スパイラル鋼管用鋼板など、小ロットで多品種の特殊鋼が全生産量の25%を占める品種構成となっていた。

一般に特殊鋼は適正な圧延条件の範囲が狭いため、わずかな条件変動でも圧延トラブルや品質トラブルを生じ易い。その結果、特殊鋼比率が増えると全体の生産効率(量)が落ちてしまうといった問題があった。特殊鋼の生産効率を上げるにはどうしたら良いのか。特に、薄板製品の基本的形状(クラウン)を決定する熱間圧延において、その課題が大きな壁として立ち上がった。

“棺桶(コフィン)スケジュール”

ホットストリップミルでは、従来、多品種生産に対応するために、可能な限り類似の材質や板厚をまとめて、1回の圧延チャンス(1スケジュール)でコイル約100本を圧延していた。その際、ロール組み替え後の最初のコイル10本位は板幅の狭いもの(幅狭材)から徐々に幅広のもの(幅広材)に移行してサーマルクラウン(ロールの熱膨張によるクラウン)を安定させ、その後約90本は徐々に板幅を狭くしていった。

それはなぜか。当時の技術では、幅狭材の次に幅広材を圧延すると、幅狭材のエッジ(端部)が当たる圧延ロールの部分比其他の部分より余計に摩耗してしまうため、幅広に移行したときにその部分が鋼板にプリントされ、不良製品(異常断面形状)ができてしまう(図2)。それを避けるため、

かつて行われていた棺桶(コフィン)スケジュールの例

図1



最初のコイル10本位は、板幅の狭いものから幅広に移行し、その後の約90本は、徐々に板幅を狭くしていく。徐々に生じるロール摩耗に合わせて、形状制御が容易な狭い板幅に移行させていく。

残りの約90本は徐々に幅広から形状制御が容易な幅狭に移行させていた(板幅漸減の法則)。この圧延スケジュールは、その板幅変化が棺桶の形に似ていることから“コフィン(棺桶)スケジュール”と呼ばれた(図1)。

8種類ものロールカーブ

当時、材質や板厚が異なる薄板製品を圧延する場合は、一度ラインを停止して、新たな材料(材質や板厚条件を纏めた1スケジュール)条件に合ったロールカーブの圧延ロールに組み替えるしか方法はなかった。その際、従来の4重圧延機はクラウン制御能力が小さいため(前編参照)、各製品に合わせたロールカーブを持ったロールを適用しなければならない。全製品の平坦度、断面形状を造り分けるために、8種類ものロールカーブが必要だった(図3)。例えば、電磁鋼板やステンレス鋼板等の硬い特殊鋼には中央が膨らんだロール、軟鋼には逆に少しへこんだロール、フラットロールなど、鋼板の硬度・板厚に応じ使い分けていた。

この方法では、半製品(スラブ)を“コフィンスケジュール”に合わせてヤードから搬入しなければならない。スラブをヤードに置く順番も後工程のスケジュールにしばらく遅れてしまう。また、製品によって適正加熱温度・時間が異なるため、加熱炉(3炉)の操炉も非効率だった。焼き上

げて圧延ライン上に抽出する順番が、コフィンスケジュールになっていないといけないからだ。また、生産計画の変更はラインの長時間停止につながり、生産効率向上のネックだった。

この圧延制約は、4重圧延機のクラウン制御能力が小さかったことに起因しており、それはクラウン形状制御性の良い「6重圧延機(HCミル)」導入期まで続いた。

夢の技術

“スケジュールフリー圧延”の実現

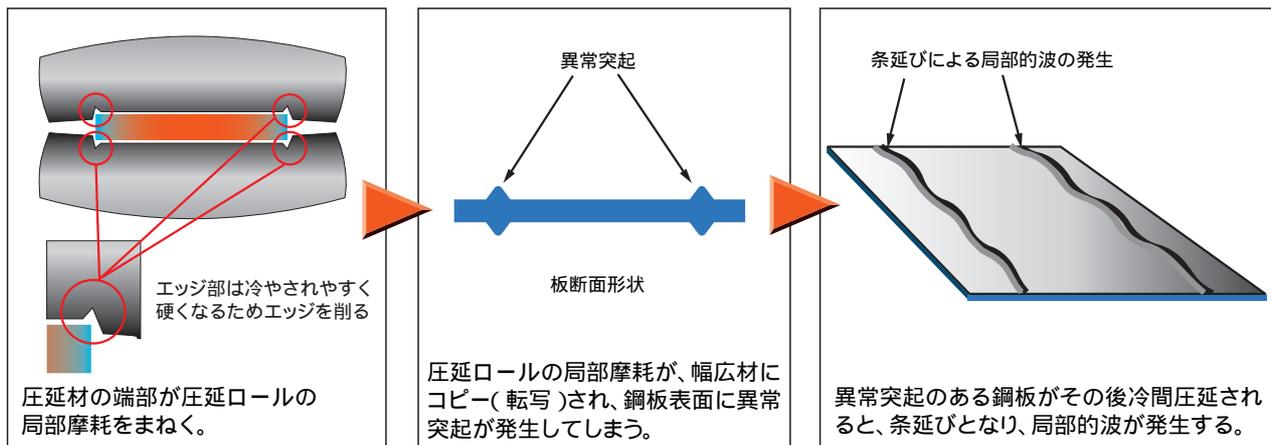
解析技術と圧延理論の両輪でブレイクスルー

“スケジュールフリー圧延”とは、板幅に関係なく圧延順序を自由化し、多品種圧延を実現する技術だ。当時は、素材を圧延順に並べ替えなくてはならず、緊急材でも次の同一品種の圧延チャンスまで待機するなど、納期対応も不十分だった。その制約をなくすことは、ホットストリップミルの誕生以来、約60年間にわたる“夢の技術”だった。

1982年に、八幡製鉄所の新ホットストリップミルが稼働を開始。そこで新たに開発導入した「6重圧延機」と「クラウン・形状計算モデル」等による新圧延制御技術の確立で、

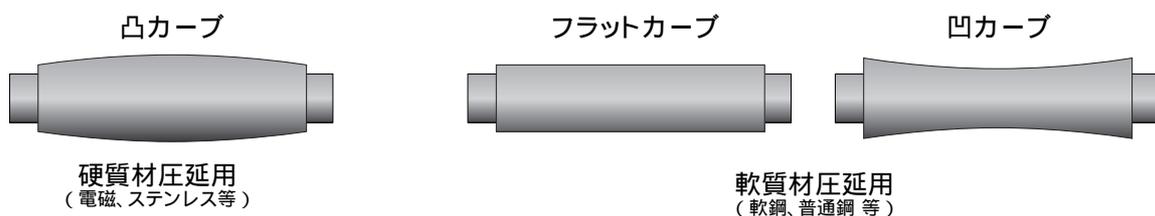
エッジ摩耗と不良品発生メカニズム

図2



かつて使われていた8種類のロールカーブの一部

図3



4重圧延機ではクラウン制御能力が小さいため、鋼板の材料条件(硬度や板厚)に応じてロールを使い分けていた。その数は8種類にも及んだ。ロールの凹凸は、フラットカーブに対して数100μ以内。

ついに“スケジュールフリー圧延”が実現した。(図4)

これで、スラブの圧延条件が変化しても、コイル1本毎に材質や板厚、板幅を柔軟に変えることができるようになり、生産性が格段に向上した。圧延材の材質、板厚、板幅などの変化によって圧下力がコイル1本毎に違っても、ワークロールはフラットロール1種類で対応できる。

この“スケジュールフリー圧延”は、「クラウン・形状計算モデル」の活用によるクラウン・形状制御を始め、板厚・板幅・巻取温度(材質)制御等に用いる高精度の各種計算モデル(圧延材の変形抵抗、ミルストレッチ、幅広がり、加熱、冷却、温度等)の開発・導入によって実現した。その結果、圧延後のクラウンは40 μ 以内(従来90 μ)に制御でき、全長の板厚の中率は98%(従来95%)、板幅では92%(従来34%)、材質をコントロールするための巻取温度の精度は98%(従来78%)と、圧延精度も大幅に改善した。

さらに、従来23kmだった同一幅での圧延全長が90kmまで伸び、ロール交換などの対応要員の減少により、操業人員も従来の104人から40人に省力化された。熱間圧延の上下工程の効率化も飛躍的に進んだ。

技術が集積した“スケジュールフリー圧延”

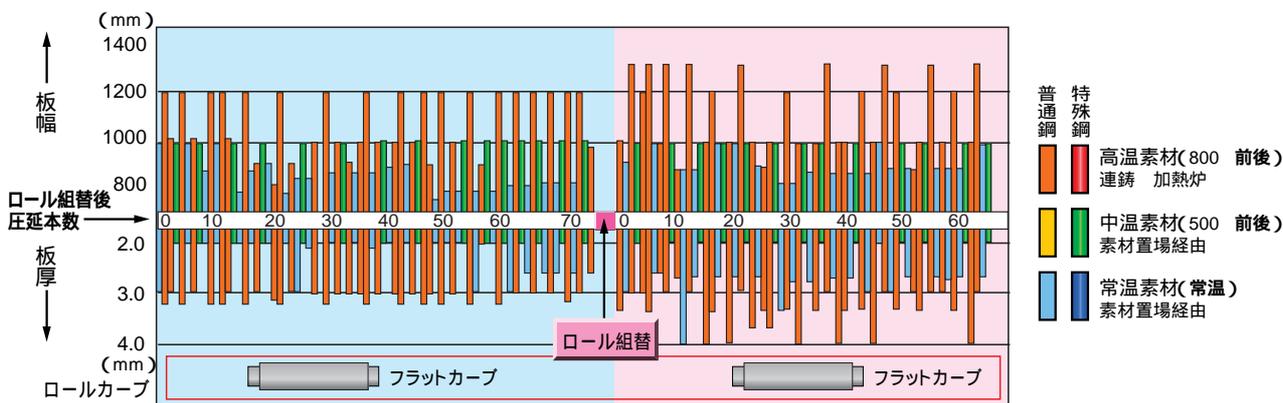
このスケジュールフリー圧延技術を支える基本的技術は、次の5つの技術だ。

まず、断面形状のつくり分けを行う「クラウン・形状計算モデル」による『製品の平坦度、断面形状(クラウン)の自在制御技術』である。

次に、鋼種、板厚、板幅の圧延順番がフリーでも高精度の板厚、板幅、巻取温度(材質)が確保できる『高精度圧延技術』。

夢の技術 スケジュールフリー圧延

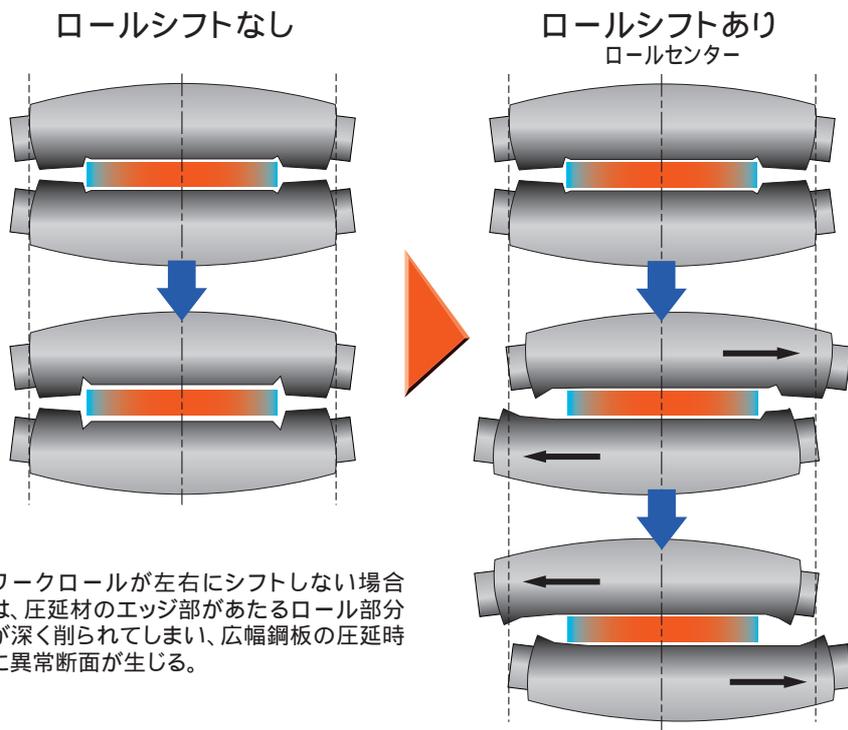
図4



板幅に関係なく圧延順序を自由化し、多品種混合圧延を実現した。スラブの圧延条件が変化しても、コイル1本毎に材質や板厚、板幅を柔軟に変えることができるようになった。

ロールシフト機構のメカニズム

図5



エッジがロールの同じ箇所にあたらないように制御し、ロール摩耗を均一にしたシステム。この技術とロール材質改善により、ワークロールの長寿命化を実現した。

ワークロールが左右にシフトしない場合は、圧延材のエッジ部があたるロール部分が深く削られてしまい、広幅鋼板の圧延時に異常断面が生じる。

ワークロールシフトがあると、圧延材のエッジ部が同じ部分にあたらないため、ロールの摩耗が均一になり、品質が大幅に改善された。

3番目は、圧延ロールの局部摩耗（板エッジ部）を解消した、世界初の『圧延ロールの摩耗均一、軽減化技術』だ。連続圧延時のワークロールは、温度低下で硬くなった圧延材エッジ部が当たる箇所が他に較べて余計に摩耗していく。それを回避するため、コイル1本毎に幅方向にワークロールを最大±60mmシフトさせて、エッジが同じ箇所に当たらず摩耗が均一になるようにするロールシフト技術（システム）を開発し、板幅制約がフリーになった（図5）。ロールの材質についても、耐摩耗性の高い硬質の「ハイクロム」を採用し、従来は圧延材トン当たり0.33μだったロール摩耗を半分以下にし、ロールシフト技術と相まってワークロールの長寿命化を実現した。

また、熱間圧延ラインの各運転室（加熱、粗、仕上、巻取）の1人運転を可能にする自動運転システムや、人間の五感を超えるような設備総合診断システムなどを開発し、

LANによってリアルタイムで大規模プロセスを制御する『高度な総合的計算機適用技術』（プロセスコンピューターコントロールシステム）を確立し、柔軟性及び応答性の高い操業を実現している。

さらに、圧延材料を選ばないスケジュールフリー圧延の長所を活かし、連続鋳造機との効率的直結同期操業で製鋼 - 熱延工程の最適化を図る『生産工程管理技術』を導入。この技術によって、従来は連続鋳造後から熱延コイル冷却まで8日間かかっていた工期を半日に縮め、市場ニーズへの対応や生産性向上を実現するとともに、在庫や使用エネルギーの減少にも効果を発揮した。

こうして確立された、多品種を高精度でかつ自在に圧延する“夢”の技術は、現在でもさらなるレベルアップを目指して進化し続けている。

圧延とメタラジーの融合を

新日本製鉄顧問・工学博士 菊間 敏夫

創形に加え“創質”を

圧延とは、圧下力をかけて鋼材を延ばす工程であるとともに、鋼材の特性を左右する重要なプロセスです。鉄の結晶組織は外力による変形と温度、時間に応じて大きく変化するため、これらをうまくコントロールすれば、微細な組織を持つ強度の強い鋼板や成形性の優れた鋼板をつくることができます。

例えば、厚板の圧延工程は、圧下による変形と圧延材の温度を緻密に関連付け、さらにその後の冷却温度、冷却速度をコントロールして、鉄の結晶組織を微細化したり、析出物の大きさや数を制御して強度、延性、靱性等の材質を作り込んでいます。また、薄板の熱間圧延では、仕上圧延直後のホットランテーブル上での冷却制御によって鋼材の性質は大きく変わります。圧延プロセスは形を作るだけでなく鋼材の内質、メタラジーにも大きく影響しています。

圧延技術の進歩は、形状・クラウンや板厚、板幅などに対する20年以上の研究史ですが、すでに9割以上の技術的進歩を遂げています。信頼性の高い圧延計算モデルが確立されており、実機を使用せずにコンピュータによるシミュレーションで多くの検証が可能です。

圧延は“モノづくり”です。今後さらに、形状・クラウンや寸法などの“形”だけでなく、中身をつくる“創質”、つまり鋼材の性質をつくり込むことに挑戦しなければなりません。そのためには今後、メタラジー現象のシミュレーションを可能にするメタラジー計算モデルを開発し、圧延モデルとの融合を図ることが重要です。

鉄鋼業のさらなる飛躍のために

今はSCM (Supply Chain Management) の時代です。例えば今後、自動車メーカーが挑戦していく「オーダーメイドでワン・ウィーク・プロダクション」（注文から1週間で納品）に対応して、部材となる鉄鋼製品もユーザーに連動して、生産、納品する必要があり、「注文からワン・ウィーク・プロダクション」の実現に挑戦していくことが求められるでしょう。

それを可能にするためには、圧延による“寸法形状”のシミュレーションと、温度や変形によって決まる“材質”のシミュレーションを融合させた材質予測シミュレーションシステムの開発が必須であり、さらに品質予測とコスト予測を含めて総合的に予測できる「製造技術総合シミュレーションシステム」が必要になります。

そうしたシステムができれば、ボタン一つで品質、コストまで考慮した材料設計ができ、それを達成するための各工程での製造条件（圧延条件や温度条件等）が明確になるため、製鉄所でダイレクトに注文をとり生産するといった、迅速な顧客対応が可能となる先進的な鉄鋼生産システムが実現するでしょう。



プロフィール きくま としお

1939年生まれ、群馬県出身。
1964年当社入社。1995年フェロー・プロセス技術研究所長を経て、2002年より顧問。
1987年：第33回大河内記念賞“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”
1994年：科学技術庁長官賞“薄鋼板の熱間圧延プロセスにおける高精度即応生産技術の開発”
2001年：日本鉄鋼協会香村賞“鉄鋼の塑性加工技術の進歩発展及び製鉄技術の研究開発の推進”
2002年：紫綬褒章“熱間圧延による薄鋼板の高精度・高効率生産技術の開発”