

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

Development of Roll Pair Cross Rolling Method for High Accuracy
and Productivity in Steel Rolling Process of Flat Products

新日本製鐵株式会社
住友金属工業株式会社
三菱重工業株式会社

この技術開発は、鋼板圧延機にロールペア・クロス方式という独創的なロール配置を考案して、「板幅方向のどの位置をとっても厚み偏差のきわめて小さい鋼板」の製造を可能にしたものであり、鋼板圧延のプロフィール制御あるいはクラウン制御と呼ばれる技術分野に決定版といえる新技術が誕生したことになる。この方式は薄板熱延・薄板冷延から厚板圧延まで鋼板圧延のすべてに実用化され、この方式の圧延機の誕生以降にわが国で新設・改造された圧延機の66%を占めるまでに普及を遂げている。また、圧延全パス大圧下による厚板圧延メタラジー効果・圧延能率向上、冷間圧延鋼板表面光沢向上効果など、新たな機能をも発現し、まさに鋼板圧延に新しい時代を開くものとなった。

1. 研究開発の背景と目標

(1) 「均一な板厚」が基本要件

鋼板にとって「均一な板厚」は基本要件である。鋼板を加工する顧客のプロセス自動化・無人化指向が強まり、鋼板の厚み精度に対する要求がますます厳しくなった。

特別の対策を講じていなければ、一般に、圧延鋼板には板幅方向の位置によって厚みに差があり、図1のように、幅端部近傍が薄くなる傾向にある。

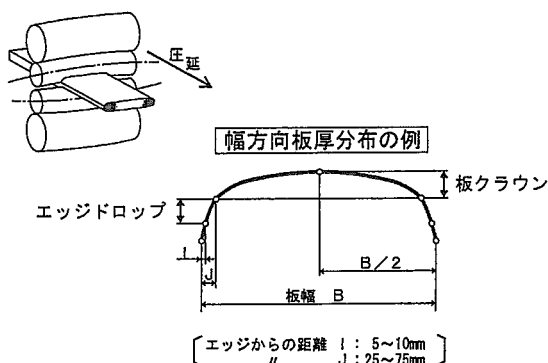


図1 鋼板の断面プロフィール（幅方向板厚分布）

(2) 「ロール間隙分布」を制御する手段が必要

圧延ロールの間に鋼板が咬み込んでいる状態では、鋼板と作業ロールの間に圧延圧力が発生し、圧延機ロール系が弾性変形してしまう。この変形の概要を、4重圧延機のロール系を例にとって示すと図2のようになる。

圧延される鋼板の形状と断面プロフィール（すなわち、板幅方向各位置における板厚

の分布)は、
 ロール系の
 弾性変形と
 鋼板の3次
 元塑性変形
 挙動とが互
 いに影響を
 及ぼし合っ
 て形成され
 るロール間
 隙プロフィールによって
 決まるもの
 であり、鋼
 板の幅方向
 の位置によ
 って3次元

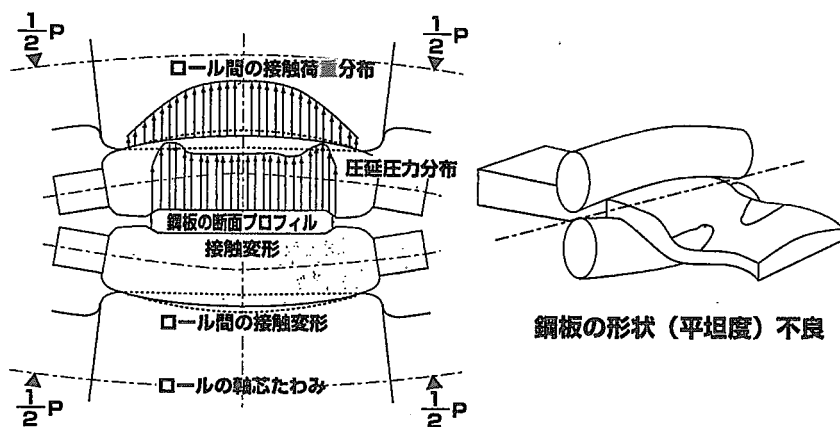


図2 ロール群の弾性変形

塑性変形挙動が異なり、圧延圧力分布・ロール系の弾性変形挙動もまた位置によって異なるという複雑な現象である。その結果、位置によって、圧延による伸び率・圧下率に差が生じ、厚み偏差を生じたり形状が悪化することになる。さらに現実の圧延作業には、ロール系の弾性変形以外に、ロールの摩擦と熱膨張が加わり、ロール胴長方向の位置により径差変動が数百ミクロンに達する。この変動は、ミクロン単位の厚み精度を追求している鋼板圧延に大きな影響を及ぼす。これらを克服して均一な板厚を実現するためには、ロール間隙分布を自在に制御する手段が不可欠である(図3)。

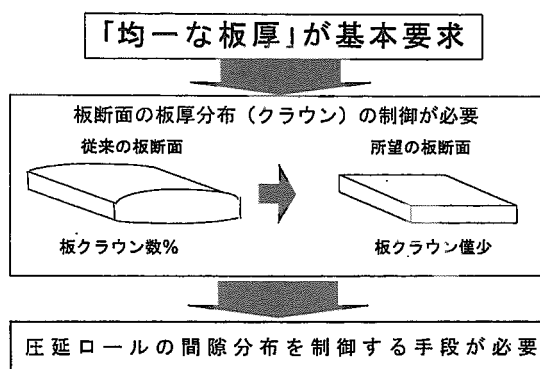


図3 圧延ロール間隙分布制御手段の必要性

(3) これまでの対応手段には十分な機能が備わっていない

ロール間隙分布を改良する手段として、「ロールにクラウンをつけて圧延する」ことが広く行われてきた。これは、ロール系の弾性変形によって生じるはずの板幅方向各位置でのロール間隙寸法差にほぼ等しい量のロール径差分布を、図4に示すように、予めロールに形成しておくものである。

この方法の難点は、圧延条件に応じて使用ロールを適正クラウン量の

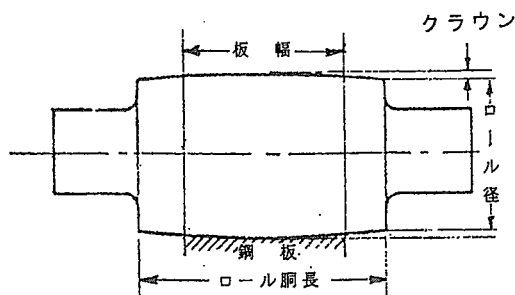


図4 ロールにつけたクラウン

ロールに交換する必要があることである。

それゆえ、ロール間隙分布を可変制御することは鋼板圧延の積年の課題であり、漸く1965年頃からその実現への道が開かれ、ロールに人為的に曲げ力を加えて制御するという手法（ロールベンディング方式）が実用化された。そしてそれ以降、形状制御あるいはクラウン制御と称する多彩な手段が実用化されてきた。しかし、ロール間隙分布を制御する能力が乏しいため、板幅方向の板厚分布を改善するという目的には十分とはいえず、多くは薄板圧延の平坦形状の制御にとどまっていた。また、厚手や広幅の鋼板圧延における大压下圧延のように、強大な圧延荷重の下でロール間隙分布を大きな量で制御する必要がある場合に適用できる圧延手段は実現していなかった。

(4) 多様な鋼板圧延のいずれの条件においても最適のロール間隙分布を実現できる制御手段の確立が必要

このような状況を打開し「均一な板厚」を実現するには、多様な鋼板圧延のいずれの条件においても、その上さらに、圧延温度、ロールの摩耗・熱膨張など圧延条件が変化した場合においても、最適のロール間隙分布を実現できるようにすることが不可欠である。そこで、圧延変形における諸要因の複雑な関係を的確に把握し、最適のロール間隙分布を実現できる圧延技術を確立することを目標に、共同開発を進めた。

2. 研究開発の経過

(1) ロールペア・クロス圧延方式の考案と高精度薄板熱間圧延法の開発・実用化

新日本製鐵と三菱重工業の共同開発により、「ロールペア・クロス方式」を考案した。これにより、ロールクロス圧延の実用化障壁の排除に成功、熱延仕上げ圧延機上流スタンドの高荷重条件においても、板厚の数%に及ぶ大きな量の板断面プロファイル制御（一般にクラウン制御と呼ばれている）効果を発揮しうる圧延機「ペアクロスミル」を開発、昭和59年、広畑製鉄所熱間圧延仕上げ圧延機全スタンドに世界で初めて実用化し、板厚精度の世界一優れた熱延鋼板の製造技術を確立した。

(2) 厚板圧延・薄板冷延への実用化展開と新たな機能の発現

ロールペア・クロス圧延方式の誕生で格段に大きな制御能力をもつロール間隙分布制御（これもクラウン制御と呼ばれている）手段が実現、これによって、クラウン制御のみならず、他の諸制御の適用の自由度もまして圧延技術の拡張が可能になり、厚板圧延、薄板冷間圧延にもペアクロス圧延が適用されて新たな機能をも発現した。すなわち

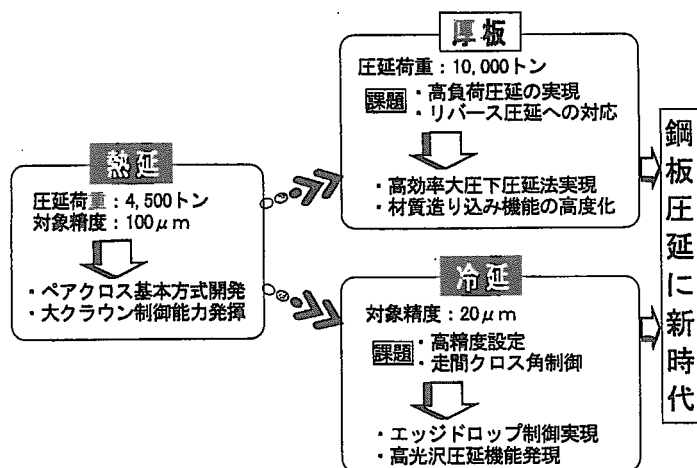


図5 熱延での実用化から厚板・冷延への適用展開の要点

- 1) 高効率厚板圧延法の開発（新日本製鐵と三菱重工業の共同開発）
 - 2) 高精度薄板冷間圧延法の開発（住友金属工業と三菱重工業の共同開発）
- による新展開である。薄板熱延での実用化から厚板圧延・薄板冷延への適用展開の要点を図5に示す。

3. 研究開発の内容と特徴

(1) ロールペア・クロス圧延方式の考案（50年来の課題を克服）

2本のロールを重ねて胴長の中央でクロスさせると、中央部分でロール間隙が最も狭く、胴端部に行くにしたがって間隙が広がる。立体幾何のこの原理を使ってクロス角度を増減し、圧延ロール間隙のロール胴長方向分布を可変制御するのが、ロール・クロス方式である。

この原理は早くから知られ、1928年には4重圧延機において、上下バックアップロールを圧延方向に対して直交配置せずにクロス配置する方式が提案されている。しかし、互いにクロス接触状態で回転しているロールに作用する副作用（ロールスラスト力）が大きく、工業規模で実用化することは不可能と考えられてきた。

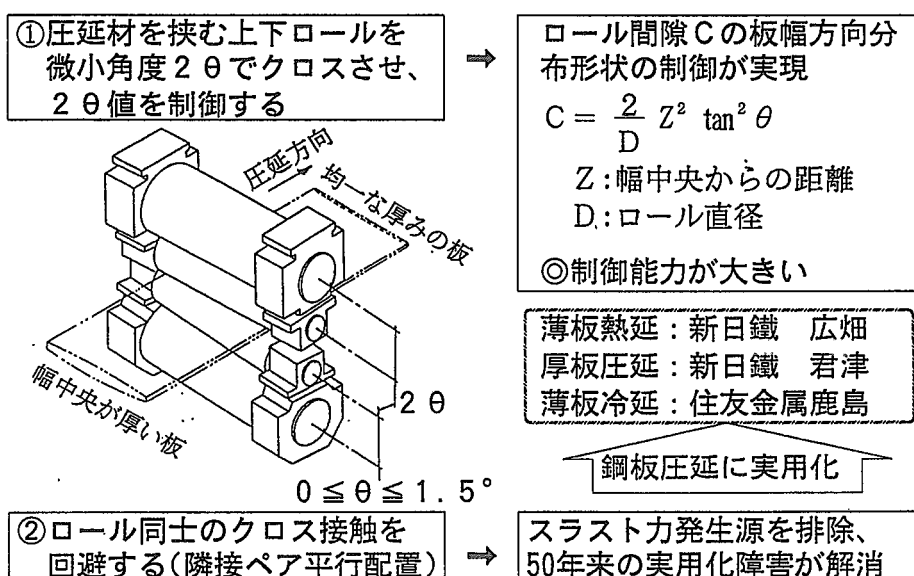


図6 ロールペア・クロス方式の考案によるブレイクスルー

ロールペア・クロス方式の考案によるブレイクスルーは大ロールスラスト力の発生源を排除したことにある。すなわち、4重圧延機において、板を挟む上下のワークロールを微小角度 2θ でクロスさせて 2θ 値を制御可能にし、一方、互いに隣接するワークロールとバックアップロールとを全胴長にわたって平行配置してロール同士のクロス接触を排したのである（図6）。これによって、スラスト力を圧延荷重の5%程度に低減することに成功、スラスト軸受けの設計・実用化が可能になった。

(2) ペアクロス圧延機（ペアクロスミル）の開発

1) 群を抜く大きな制御能力

ロールをクロスすることによるクラウン制御は、立体幾何の原理どおりの合理的な手法であり、僅かなクロス角度で大きな制御能力を発揮する。

ペアクロスミルのロール間隙プロフィール制御能力（クラウン制御能力）をほかの代表的圧延機的能力と比較するとペアクロスミルが群を抜いて大きい（図7）。

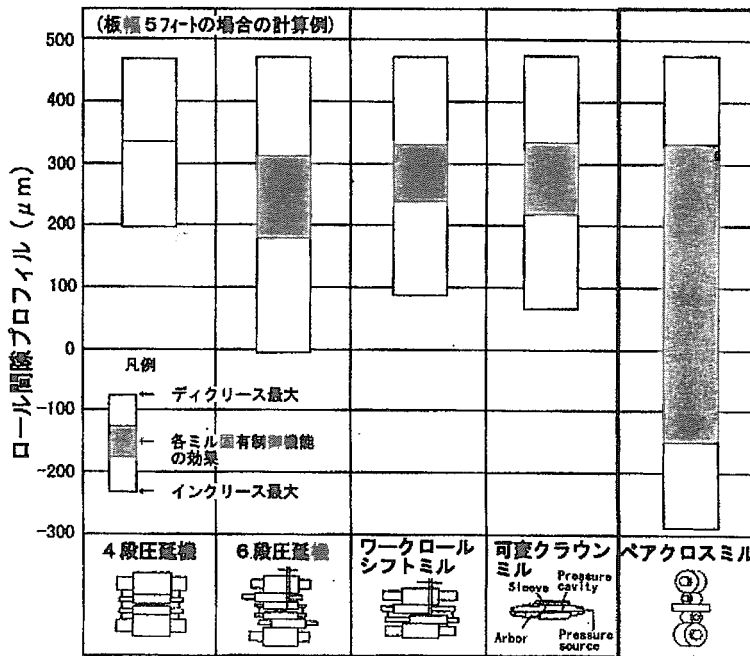


図7 各種圧延機のクラウン制御能力比較

たとえば、幅4 mの広幅厚板圧延においては、圧延荷重を受けたロールの撓みによって生じるロール間隙プロフィールの変化量が最大2 mmにも達するが、これを補償するのに十分な大きな制御能力をペアクロスミルはもっている。これに対し、在来のロール曲げ力による制御（ロールベンディング）では、この撓みを補償できない。（図8）

2) 完成度の高い圧延技術

ペアクロスミルのクラウン制御機能は、立体幾何の原理

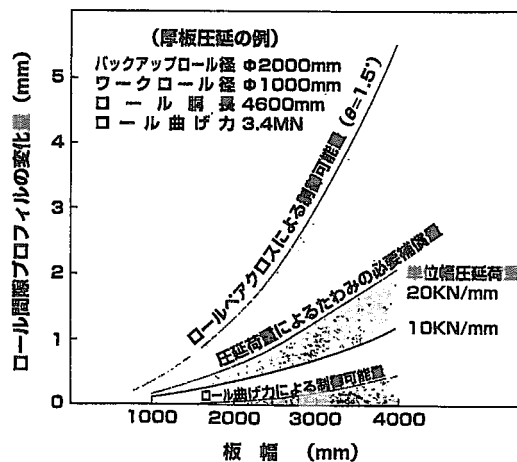


図8 大きなクラウン制御能力の意義

どおりの合理的なものであるうえ、開発に際し、想定しうる副作用について、徹底的に検証を行ったうえで圧延機と圧延手法を完成させたものである。

(3) 高精度薄板圧延法の開発

1) 薄板熱間圧延への適用による世界最高水準の高精度圧延の実現

新日本製鐵では、三菱重工と共同開発したペアクロスミルを、広畑製鉄所熱延設備の新設に際し、仕上げ圧延機全スタンドに適用し、世界最高水準の高精度圧延技術を確認した。

①板クラウン・形状制御のための高精度圧延モデルの開発

圧延材の3次元変形状態と圧延条件（圧延荷重、クロス角度、ロールベンディング力など）との関係をオンラインで正確に予測可能にした。この開発から、圧延機の弾性変形を考慮した新概念「メカニカル板クラウン」、圧延材の3次元変形を表現する新概念「クラウン比率遺伝係数」が誕生、その後の板クラウン制御の基本概念となった。

②板クラウン・形状制御と板厚制御との非干渉制御の開発と絶対値AGCの実用化

ロール系の変形の理論的説明とハウジング系の変形の定量的把握方法確立により、高精度ミルストレッチモデルを開発した。このモデルはオンラインで動作可能であり、狙いの板厚を実現するための压下設定の精度を飛躍的に向上させることになった。

従来の圧延法では、板厚制御（AGC）を目的に圧延中に急激なロール位置（压下）修正を実行すると、圧延荷重の変化を招き、板クラウン・形状の安定確保が困難であった。これに対して、板厚制御、板クラウン制御双方の狙い値を同時に達成するように压下量とロールベンディング力の連立解を求め、両者を同時に操作する非干渉制御法を開発した。また、压下位置の急激な修正操作に付随して発生するもう一つの変動、連続圧延各スタンドの速度バランス急変、に対処する制御手法としてマスフロー補償制御も開発し、これらの開発により、圧延材の先端から狙い通りの板厚精度を実現する制御技術、すなわち絶対値AGCを適用することが可能となり、世界最高レベルの高精度圧延が実現した。

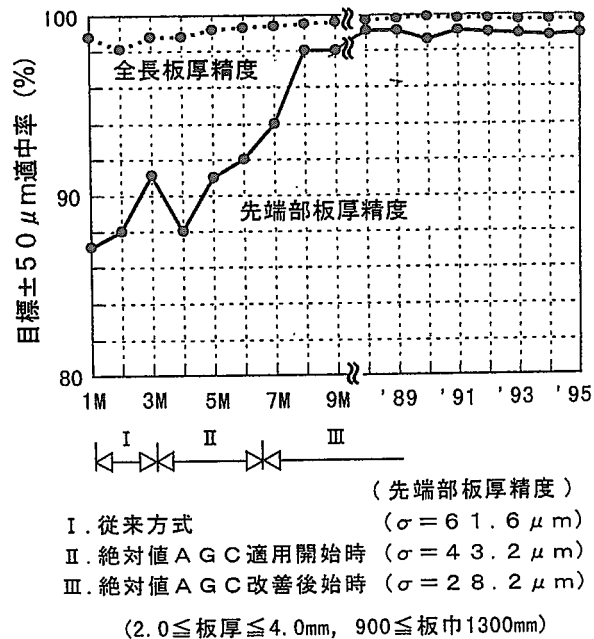


図9 絶対値AGC技術の適用成功による熱延鋼板板厚精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ 的中率向上推移

2) 高精度薄板冷間圧延

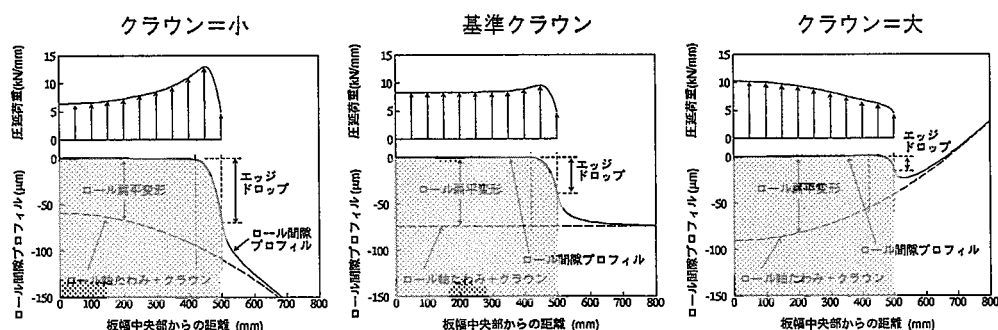
住友金属では、鹿島製鉄所冷延完全連続圧延機の新設に際し、圧延中に、すなわち、

圧延荷重が負荷されている状態でクロス角度を変更制御する機構を三菱重工業と共同開発して上流側 3 スタンドにペアクロスミルを適用、エッジドロップ抑制に成功し、板幅端部近傍まで厚み偏差のほとんどない矩形断面の薄板の製造を可能にした。

①放物線状ロールクラウンによって板端部の断面プロフィール（エッジドロップ）をも制御可能であることの発見と板断面プロフィール形成メカニズムの解明

冷間圧延においては、仮に母材の断面が矩形であったとしても、圧延されると板幅両端部で板厚が急激に薄くなる現象、すなわち、エッジドロップが発生する。住友金属では、この形成メカニズムの解明研究を通じて、タンデム圧延機の上流スタンドで上下ワークロール間隙に放物線状の大きな変化を与えることによりエッジドロップの軽減が可能であることを発見した。これは、「冷間圧延においては一般に（板幅／板厚）比が大きく、圧延時の塑性変形挙動の特徴から判断して、板プロフィールの修正は期しがたい」、あるいは、「エッジドロップという局所的現象には局所的手段で対処する」という既存通念を超えた発明である。

圧延に際し放物線状のロール間隙変化、すなわち、放物線状のロールクラウン変化を与えたとき、クラウンの大きさによって鋼板のエッジドロップ発生量に大きな差が生じるメカニズムを解明するために、板幅方向各位置における圧延荷重分布とそれによって形成されるロール間隙プロフィールを算定して対比した例を図 10 に示す。ロール間隙プロフィールについては、ロールの撓みによる変形とロール表面の弾性接触による変形（扁平変形）とに大別して表現し、前者は、圧延荷重をうけたロール軸心の撓み曲線にロールクラウンによる補正効果を加算した値を破線で示している。標題に基準クラウン と記した図は、ロールの撓みによる変形を過不足なく補正できる量のロールクラウンをあらかじめ用意して圧延するケースに相当する。また、標題にクラウン＝大 と記した図は、より大きな量のロールクラウンを装備して圧延するケースであり、ペアクロスミルを適用して大きなクロス角度で圧延するケースに相当するものである。ロールの撓みによる変形を補正するのに必要な量よりも遥かに大きな量のロールクラウンを装備して圧延することにより、板幅方向各位置での圧延荷重分布、特に板幅端部近傍での圧延荷重の分布状況に顕著な変化が現れ、その結果、ロール表面の弾性接触による扁平変形量を低減できることが、エッジドロップ抑制を可能にした要因である。



解析条件	想 定	板 厚	平均変形抵抗	摩擦係数	ロール径	ロールクラウン
	熱延仕上げ前段	20.0→14.0mm	140MPa	0.20	500mm	0.1 mm/dia.
	冷延前段	4.0→2.8mm	420MPa	0.05	500mm	0, 0.1 (基準), 0.2 mm/dia.

図 10 放物線状ロールクラウンによるエッジドロップ抑制効果の解析例

②クロス角度の走間変更機構の開発

①項記載の発明を実用化するための手段として、ペア・クロスミルが大きな放物線状クラウン制御機能をもっていることに着目して、これを完全連続エンドレス圧延においても実用化できるよう共同開発を進め、圧延荷重が負荷されている状態においてクロス角度を変更できる設備機能（走間クロス角変更装置）を開発した。これを装備した鹿島製鉄所冷間圧延機によって、板幅方向どの位置をとっても板厚偏差の僅少な冷延鋼板の生産が可能になった。

(4) 新たな効果の発現（その１）：大圧下圧延によるメタラジー効果

1) 全パス大圧下による高効率厚板圧延法の開発とメタラジー効果の実用化

新日本製鐵では、加工熱処理技術開発を通じて、厚板の高靱性化・高強度化に大圧下圧延が有効であることを明らかにしてきたが、既存の圧延機では板幅方向の厚み分布を制御する能力が乏しいので大圧下圧延は実用に至らず、そればかりか、厚板圧延の最終パスにおいては、板形状本位の軽圧下圧延を余儀なくされていた。そこで、大圧下圧延においても良好な板形状を得られる圧延技術の確立を目指して、ペアクロスミルを厚板圧延に適用するための共同開発を進め、100MN（1万トン）に及ぶ強大な圧延荷重に耐えられる設備へのスケールアップ開発に成功、平成3年、君津製鉄所厚板圧延機に改造適用した。

ペアクロスミル適用によって、大圧下パスにおいても圧延形状を平坦に維持できるようになり、それまでの圧延形状本位の軽圧下パスから脱して圧延1パスあたりの圧下率を高め、圧延能率が約15%向上した。これによって、

①圧延パス数の削減→②圧延所要時間削減→③圧延中の温度降下の抑制が可能になり、④結晶粒の微細化効果、⑤圧延直後の加速冷却処理の自由度拡大効果を発揮して、⑥靱性ばらつきのない鋼材、⑦引張強度の作り分け範囲の拡大 が実現した。全パス大圧下圧延メタラジー技術の実用化成功である。図11は厚板圧延プロセスにおいて、大圧下圧延とそれによる圧延パス数削減・温度降下低減が靱性の優れた鋼板製造に寄与するメカニズムの説明図である。

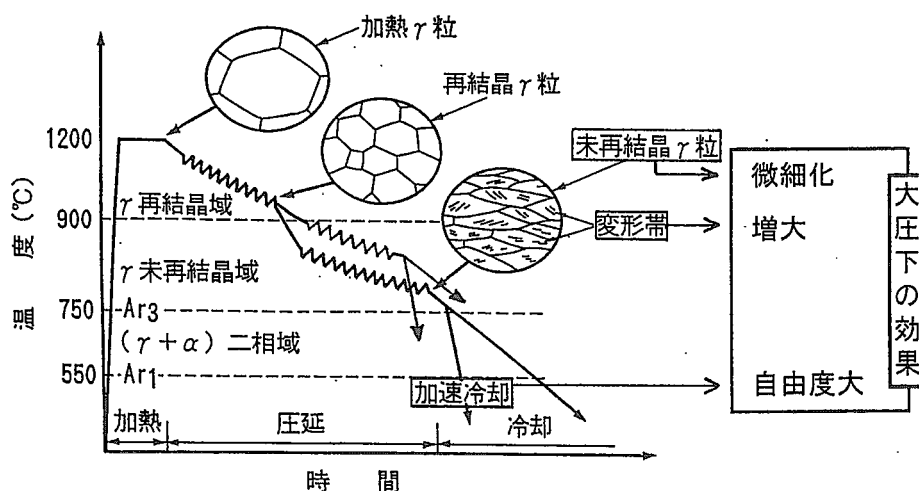


図11 厚板圧延プロセスにおける大圧下圧延が靱性の優れた鋼板製造に寄与するメカニズムの説明図

2) 熱延・冷延大圧下によるプレス成形性の優れた薄板の製造

ペアクロスミルを活用して大圧下圧延を行うことによって圧延温度降下を抑制できるので、熱延前の材料加熱温度を従来よりも約30℃下げることが可能になった。この結果、材料内部に析出している析出物の分解固溶する温度未満で加熱・熱延することが実現、大圧下熱延による熱延結晶微細化効果との複合効果により、深絞り加工に好ましい結晶方位をもつ結晶粒が高い比率を占めている集合組織を備えた冷延鋼板を、後続の冷延焼鈍プロセスにおいて製造可能になった。このような集合組織の形成には、冷間圧延における圧下率の高いほうが更に効果的であり、冷間圧延にペアクロスミルを適用して大圧下圧延を実行できることはこの点においても有意義である。

(5) 新たな効果の発現（その2）：ロールクロス圧延による冷延光沢向上効果

ロールクロス圧延によって得られる鋼板表面の光沢向上効果を図12に示す。冷間圧延に際し、連続圧延機の上流3スタンドにペアクロスミルを採用し上下圧延ロールを $\theta = 0.4^\circ$ でクロスさせて圧延する場合と、 $\theta = 0^\circ$ の通常圧延の場合を対比して示してある。No. 1スタンドからNo. 3スタンドまでのロールクロス圧延の効果が顕著であり、後続のNo. 4、No. 5スタンドで $\theta = 0^\circ$ の圧延を経た後にもなお高光沢を保持している。

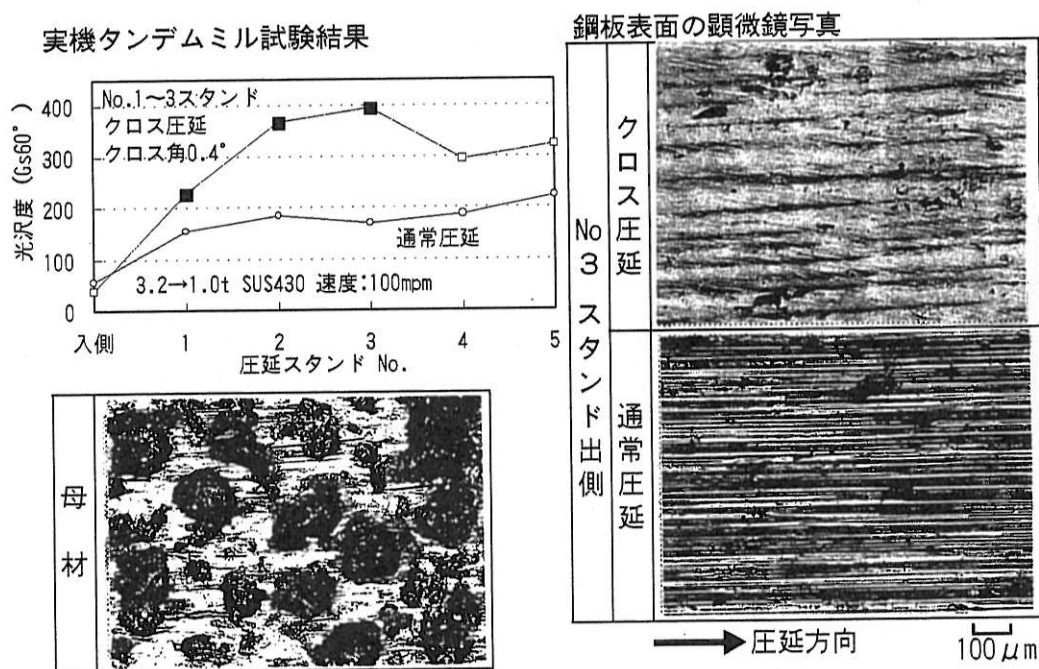


図12 ロールクロス圧延による冷延鋼板の光沢向上効果

圧延潤滑油を使用して冷間圧延された板の表面には微小なくぼみ（オイルピット）と条痕が多数存在し、表面光沢を損ねる。No. 3スタンド出側で採取した板表面の顕微鏡写真（図12）に示されるように、通常圧延の場合には、黒く見えるくぼみと条痕が多数あるのに対し、ロールクロス圧延の場合にはこれが激減している。ロールクロ

ス圧延においては、圧延される板の進行方向とロールの回転方向とがクロス角度 θ で交叉し、ロールと板表面の相対すべり現象に板幅方向に向かう成分が存在するので、これが鋼板表面の微小凹凸を平滑化する効果を発揮するものと推定している。

オイルピットは圧延材とロールの接触部分に導入された潤滑油膜に起因するものであるから、在来の圧延技術で光沢のよい圧延鋼板を得るためには、直径の細いロールを使用し、圧延速度を抑えて油膜の肥厚を抑制していた。ロールクロス圧延による光沢向上はこの制約を解消する新技術である。

4. 研究開発の成果

(1) 高精度・高効率圧延の実現

ベアクロスミルの有する格段に大きなクラウン制御能力を採用して、高精度・高効率圧延の新技術を初めて実用化した3事業所（新日鐵広畑製鉄所薄板熱間圧延、君津製鉄所厚板圧延、住友金属鹿島製鉄所薄板冷間圧延）における経済効果は年間78億円に達した。

1) 板クラウン・エッジドロップの低減効果

図13に示すように、板幅端部と板幅中央との板厚差が従来に比べて1/3以下に減少した。

板厚精度厳格要求のある仕様を充足するために、従来は端部の切除処理を要していたが、高精度圧延の実現により、これが不要になり材料の利用効率（歩留）が向上した。

板クラウン・エッジドロップ：A-B

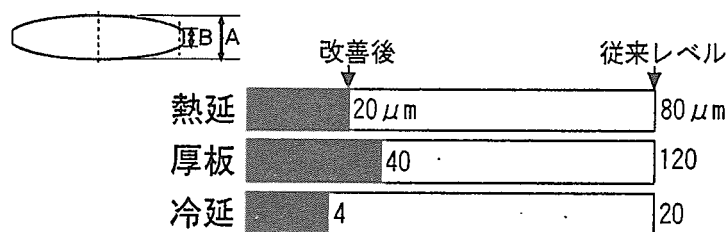


図13 板クラウン・エッジドロップ低減効果

2) 高効率大圧下圧延による厚板材質造り込みの高度化

全パス大圧下圧延によるメタラジー効果により、低温靱性の優れた高強度鋼板が製造可能になった。

図14に示すように、厚板圧延各パスの圧下率を倍増することにより、靱性の優れた厚板製品をいろいろな強度レベルで作り分け可能になり、Mn、Niなど合金元素添加量も節減できた。

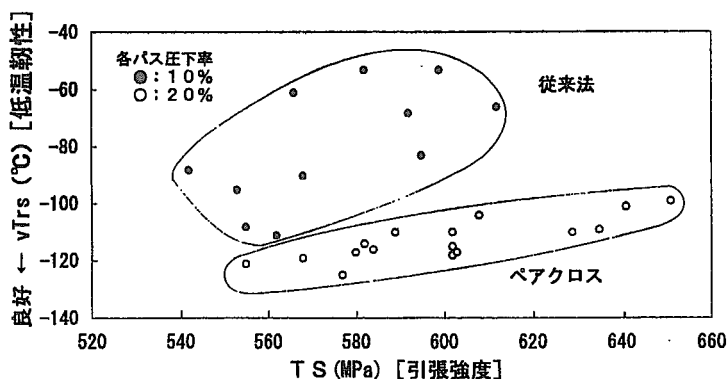


図14 全パス大圧下厚板圧延による靱性向上と強度レベル作り分け範囲の拡大

(2) ペアクロスミルの普及

図15にペアクロスミルの構成外観図を示す。

この図には完全連続エンドレス圧延用に開発された新機能「走間クロス角変更装置」と、厚板圧延に代表される巨大圧延荷重の負荷のもとで使用される場合に必要となる「大容量スラスト受装置」とを併載してある。

1996年9月現在のペアクロスミル確定納入実績は、建設途上のもの、建設予定のものを含めると70スタンドに達

する。とりわけ、薄板熱間圧延における占有率が高く、ペアクロスミルが誕生して以降に国内で行われた圧延機の改造・新設合計20スタンドのうち、17スタンドをペアクロスミルが占めている。

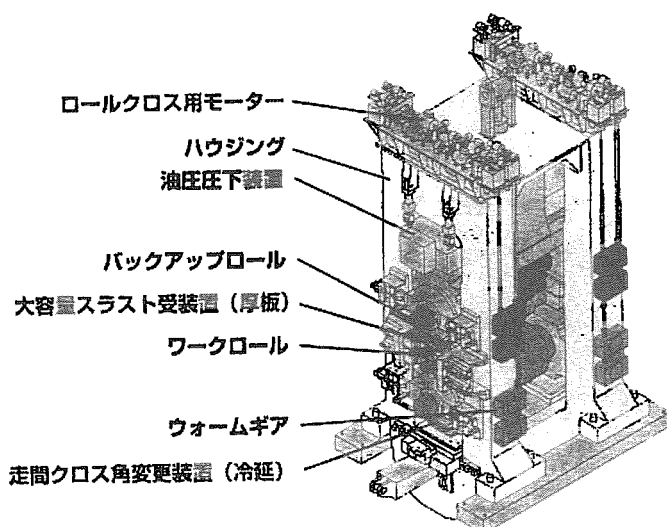


図15 ペアクロスミルの構成図

(3) 社会的貢献

1) 高精度鋼板の実現による貢献

従来は対応できなかった板厚精度要求厳格材の新規受注が可能になり、顧客における加工プロセス自動化阻害要因の解消、工程省略の実現、作業効率の向上に寄与した。

2) 全パス大圧下圧延による高機能厚板の実現による貢献

従来よりも低い炭素含有等量値（C_{eq}値）で高強度・高靱性鋼を実現し、優れた溶接性を兼備した厚板を供給できるようになった。

5. 学会発表、特許等

- | | | | |
|-------------|------|------|-----------|
| (1) 学 術 発 表 | 学術論文 | 31件 | (うち外国7件) |
| | 学術講演 | 67件 | (うち外国13件) |
| (2) 特許出願状況 | 特許登録 | 76件 | (うち外国4件) |
| | 出願中 | 165件 | (うち外国9件) |

6. 今後の展望

ペアクロスミルの誕生以降、国内の新設・改造圧延機のうち66%をペアクロスミルが占めている。ペアクロスミルは、在来の圧延機に比べ格段に大きなクラウン制御能力を有し、立体幾何の原理どおりの合理的な手段によるものである。そればかりか、開発に当たっては想定しうる副作用についても徹底的な検証を行って圧延機と圧

延手法を完成させたものである。したがって、ペアクロスミルによる圧延は原理的に無理のない圧延であり、圧延機本来の圧下機能を低下させることなしにプロフィール制御を両立させることができ、圧延機の新設・改造に際してペアクロスミルが採用される比率は今後一層高まると期待している。また、国内にとどまらず、これから建設が進展する東南アジア地域においてもペアクロスミルが大半を占めていくものと予想している。

図16に示すように、ロールペア・クロス方式による高効率・高精度圧延法は薄板熱延から薄板冷延・厚板圧延まで鋼板圧延のすべてに適用可能であり、この3プロセスの圧延量は国内で約7900万トン/年という大きな規模である。この生産にこの新技術が適用されたケースを想定して試算すると、鋼材節約効果は表1のように大きな量になる。これは、板

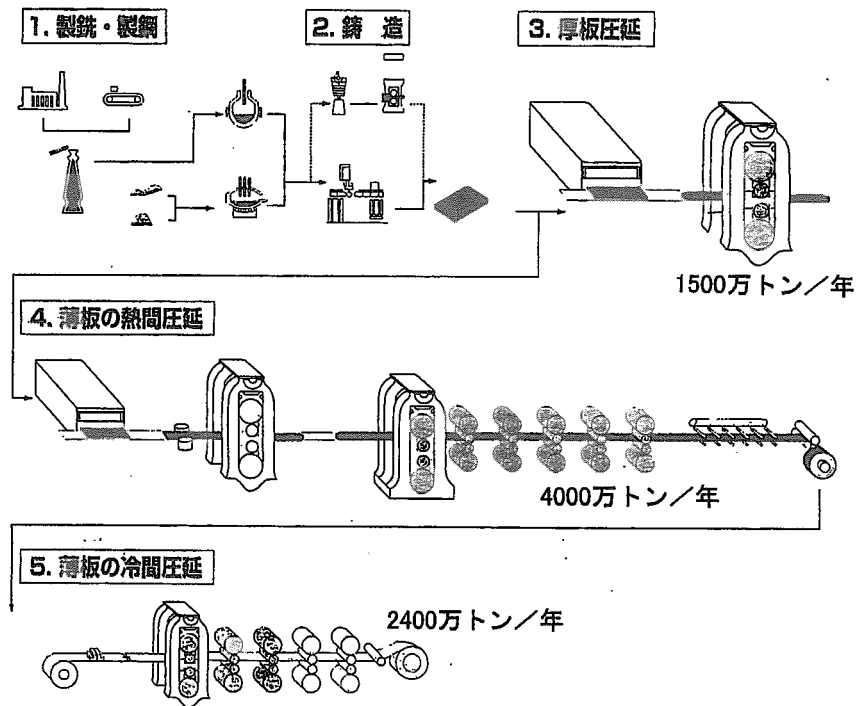


図16 鋼板製造プロセスにおけるロールペア・クロス方式高精度・高効率圧延法の適用箇所とその生産規模（国内年間圧延量）

表1 板厚精度向上によってもたらされる鋼材節約効果の試算例

	厚板への適用	熱延鋼板への適用	冷延鋼板への適用
適用対象	国内年間生産量	国内年間生産量	国内年間生産量
規模	1500万ト	1600万ト	2400万ト
鋼材節約効果	30万トタンカー 1隻分	パイプライン 1100km分	普通乗用車 42万台分

厚精度度向上により余肉削減が可能になったことによりもたらされるものである。また、全パス大圧下圧延による厚板材質造り込みを厚板生産全国規模に適用した場合を想定すると、合金元素 Mn 2000ト/年、Ni 2000ト/年の省資源が可能になる。すなわち、この新技術はこれほど大きな経済効果をあげうる可能性を秘めたものであり、その普及を通じて一層大きな社会的貢献を果たすことができると確信している。