



入門講座

鉄鋼プロセス編 -4

一度は通る狭き門 —鉄鋼圧延プロセス入門—

戸澤康壽

名古屋大学名誉教授

Yasuhisa Tozawa

Almost All Steels Pass through the Narrow Gap

—Introduction of Steel Rolling Process—

1 はじめに

われわれ日常の生活用品から工業製品に至るまで、鉄鋼製品はいたる所に使用されている。このように多量に出回っている鉄鋼製品も、そのほとんど総てが製品となるまでに一度は圧延の加工プロセスにおいて狭いロールの隙間を通っているのである。それ以外のものといえば、直ちに鍛造されるかあるいは鋳造されるのであるが、その量は全体の1%にも満たない。ここであらためて「圧延」を定義すると、回転する二つのロールの間に材料を摩擦によってかみ込み、連続的に圧縮展延することによって希望の形状に塑性変形させる加工方法ということができる。具体的にこの加工を実施するには圧延機が用いられるが、その構造は、開発以来基本的には変わっていない。図1¹⁾は、1915年に発行された図書に載っている、記録として残る最古の圧延機とされるものである。図からわかるように2本のロールはその両端で支えられ、上ロールの軸受位置を移動させることによってロール間隙を変更するようになっているが、この原理は現在の圧延機においてもそのまま用いられている。

圧延によってある形状を付与された鉄鋼材料は、引抜き、鍛造、プレス成形、切削などの加工、あるいはさらに溶接を含めた組立ての工程を経て希望する形状に仕上げられ、

最終製品となる。したがってこのような最終製品とするための加工（2次加工）にとっての素材は、圧延加工から見れば製品である。では圧延加工の素材はと云えば、それは原料から製鉄、製鋼のプロセスを経てきた溶鋼を凝固させた固体材料である。本文では圧延プロセスを中心に説明するので、素材といえば圧延する直前の材料を、製品とは圧延によって作られたものを指すこととしよう。

2 圧延素材の形状

従来は、抜け勾配のついた筒状の鋳型に注湯して凝固させた鋼塊（造塊材）が圧延素材として使われていたが、連続鋳造技術の導入以来、このような方法による造塊は激減し、現在では普通鋼の場合、原板向素材などを除く99%は連続鋳造による鋼片が使われている。

鋼片の形状には、スラブと呼ばれる大形の長方形断面のもの、中形か小形かによってブルームとビレットに呼び分けられる円形または角形断面のものがある。さらに単純でない断面形状の形鋼向に、圧延パスの減少をねらったビームブランクと呼ばれる粗形鋼片もある。

このような連続鋳造による鋼片が使われることにより、従来の鋼塊から鋼片を作る分塊圧延の工程は省略される。さらに最近、薄板向に厚さ30mm程度までの薄スラブを連続鋳造で作る技術が研究開発されており、すでに一部稼働している。この場合には、後述する熱間板圧延での粗圧延をとばして仕上げ圧延に入る。さらにストリップ連続という若干特殊な技術によれば、箔や数mm厚の極薄板が鋳造によって得られるので、これをいきなり冷間圧延することも可能であり、また使用目的によっては圧延プロセス抜きで製品とすることもありえよう。

3 棒鋼・線材、形鋼の圧延

棒鋼や線材、あるいは形鋼の圧延には、図2に示すような外周にみぞのついた孔形ロールを用いた孔形圧延が多用さ

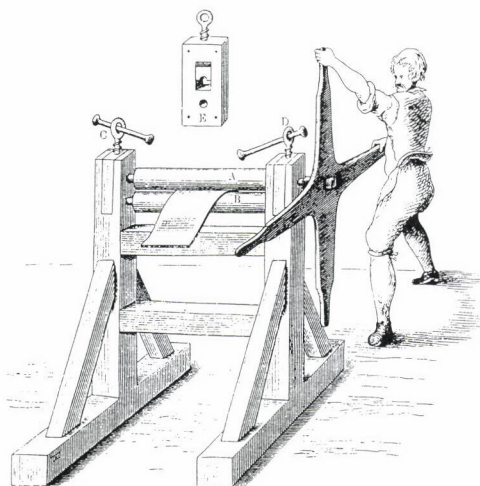


図1 初期の圧延機¹⁾

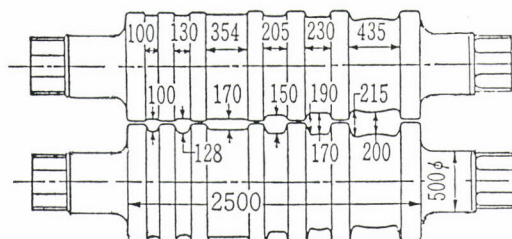


図2 孔形ロールの一例

れている。素材は上下ロールのみぞで形成される孔形を通過することによって、孔形と同じ断面形状に変形される。孔形を通過するとき、材料は上下方向のみならず側方向の変形も受け、3次的に流動しつつ断面積を減少してゆくが、1回のパスで希望する形状、寸法にまで圧延することが難しいので、一般に数パスから20パス程度、熱間での圧延を繰り返して徐々に所定の製品形状に近づけてゆく。

棒鋼や線材の圧延において、ピレットから製品に仕上げるまでの数多くのパスでの孔形を順次どのように変えてゆくか、その方式にはいろいろあるが、いずれも圧延に伴う幅広がり変形が少なく、できるだけ大きな断面減少の与えられることが基本になっている。図3にその例を示すが、いずれも右隣りの次のパスに移るときに材料を圧延方向を軸として90°(場合によっては45°)回転させる。破線は各パスでの素材形状である。

山形鋼、溝形鋼、I形鋼、等々、形鋼にはいろいろな断面形状のものがあるが、形鋼の圧延素材にはブルーム、スラブ、あるいはビームブランクが、製品の断面形状に応じて使われる。いずれの場合も製品の断面形状は素材のそれと著しく異なるので、どのような中間形状を採らせるか、すなわち一連のパスでの孔形をどのように設計するかが、形鋼圧延では極めて重要なことになっている。図4に鋼矢板の圧延における孔形系列の例を示す。ここでK1が仕上

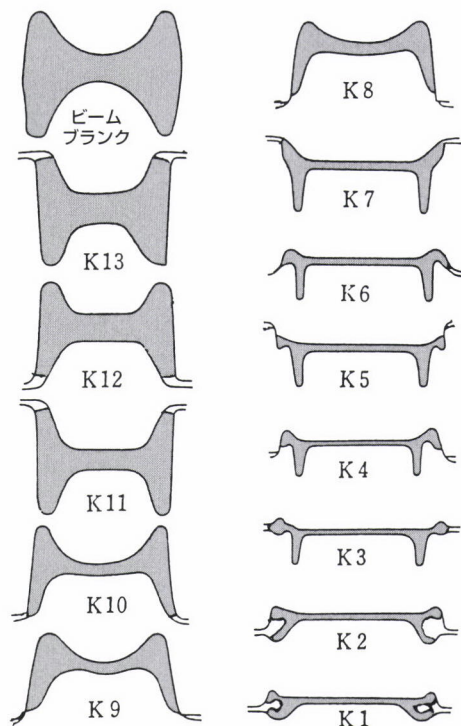


図4 鋼矢板の孔形系列

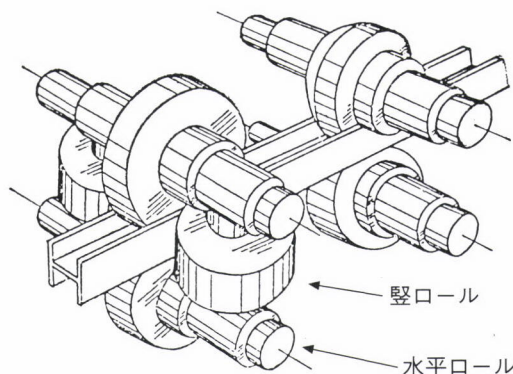


図5 ユニバーサル圧延でのロール配置

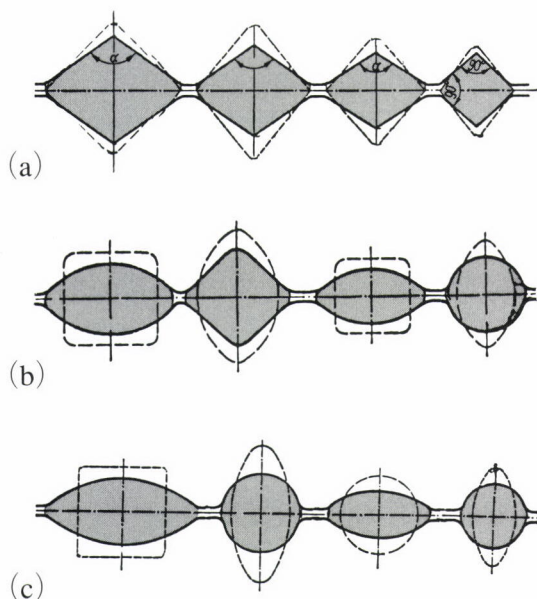


図3 棒鋼・線材の孔形系列例

げ孔形であり、K2、K3、…と上流孔形に向けて順に番号が付けてある。

形鋼の圧延には、水平ロールと縦ロールとを図5のように組み合わせ、上下と左右から同時に圧下するユニバーサル圧延も行われている。H形鋼の中間パスや仕上げパスには以前からユニバーサル圧延が用いられていたが、最近は軌条など、その他の形鋼の圧延にも適用されてきている。

4 継目なし鋼管の圧延

継目なし鋼管の圧延は、鋼片にまず孔をあけるせん孔圧延、孔のあいた素管の肉厚を製品肉厚にまで薄くする延伸圧延、そして最後に管の外径を製品寸法に仕上げる定径圧延の3つに大別される。

せん孔圧延ではマンネスマンせん孔法が古くから用いられている。この方法では、図6に示すように2つの樽形ロー

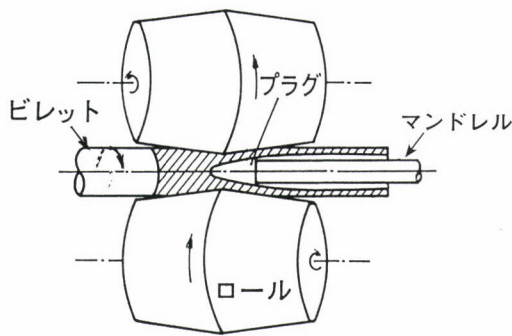


図6 マンネスマンせん孔法

ルの軸を互に僅かに傾けて同じ方向に回転させることにより、ロールの間で圧縮されたビレットが回転しながら前進してくるので、出口側からマンデルで支えられたプラグに押し当てられることによってせん孔される。これに対し比較的新しい方法としてプレスピアシングミルせん孔法がある。この方法は半円形みぞをもった孔形ロールを用い、角形のビレットをその孔形に強く押し込むことにより材料は圧延されると同時に、出口側からマンデルによりロール直下に支持されたプラグでせん孔される。この方法では材料が高い圧縮応力を受けながらせん孔されるので、きずの出やすい材料にも有効とされている。

延伸圧延には、せん孔圧延に用いられる図6のマンネスマンせん孔機をそのまま使用するほか、プラグをマンデルバーに代えたもの、さらにロールを3つにして管の周上3ヶ所で肉厚を圧下するものなどが使用されている。これらの傾斜ロールを用いる方式とは別に、半円形みぞのついた一対の孔形ロールと内面工具との間で肉厚を圧下する方式がある。内面工具としてはプラグ、あるいはマンデルバーが使われる。

定形圧延では円弧状みぞのついた孔形ロールを用い、素管の外径を圧下して製品寸法に仕上げる。ロールは3ロール形式と2ロール形式とがあるが、いずれも多スタンドで連続圧延を行っている。素管は外径が縮小すれば内面に抑束がないので、一般に増肉する。したがって管の肉厚を所定の寸法に仕上げるのが定形圧延における課題であり、スタンド間張力の制御は製品精度の向上に対して効果がある。

5 板圧延

圧延製品としては、前章までに述べた形鋼などのほかに、長方形断面を持った鋼板があるが、その量は多く、普通鋼の場合前者の1.5～2倍である。そしてその80～85%は帯鋼に仕上げられている。帯鋼に仕上げるための熱間圧延ラインの一例が図7に示してある。連続製造で作られたスラブはスラブヤードに運ばれ、そこから加熱炉に入れられて所定の温度に再加熱したのち、圧延ラインに入る。なお、最

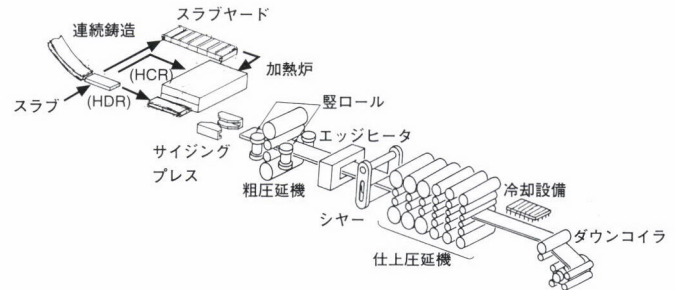


図7 熱間帯鋼圧延ライン

近は省エネルギー化のために、スラブを冷えないように加熱炉中に保持しておいて圧延するホットチャージ圧延(HCR)や、炉に装入することなく直接熱間圧延をする直送圧延(HDR)が行われている。

粗圧延機の前におかれているサイジングプレスは、連続製造スラブ幅の集約化に対応できるよう、スラブの幅を自由に変更するためのものである。もし従来の縦ロールで幅の大圧下を行うと、水平圧延後に板の先後端が後述するような不都合な平面形状となって歩留りの著しい低下を来たしてしまう。粗圧延機では、縦ロールで幅調整とスケール除去を行いながら、数回の往復圧延を行う。図の例とは違って、粗圧延機を数基並べて連続圧延をする場合もある。粗圧延を終わった板は、先端の不良部をシヤーで切り捨てたあと仕上げ圧延機で所定の板厚まで連続圧延され、コイルに巻きとられて熱間圧延帯鋼板となる。

熱間で圧延される薄板は1.6mm程度までであり、それより薄い板は、熱間圧延帯鋼板を酸洗により表面のスケール除去の後、冷間で圧延して作られる。冷間圧延はタンデム式の連続圧延機あるいは単基の往復圧延機により行われ、冷間圧延帯鋼板として仕上げられる。

6 圧延板に対する要求

6.1 圧延板の平面形状

長方形の平面形状をもったスラブを圧延すると、スラブの前・後端部は図8(a)のように、幅の中央部が張出したタング(舌)状になるとともに、幅方向にはつの状の広がり(フレア)が生じる。

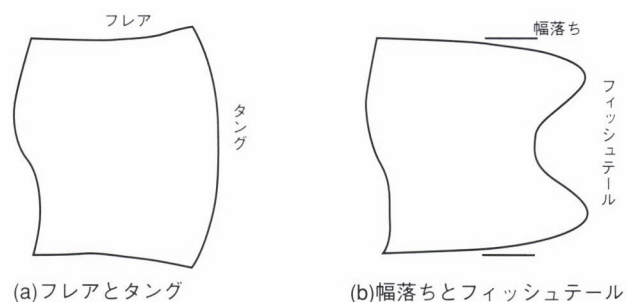


図8 圧延板の平面形状

一方、スラブ幅を変更するために縦ロールで幅圧下を行うと、横断面形状は幅縁近傍でのみ板厚の増加したドッグボーン状に、平面形状は前・後端部で幅の中央部より縁の方が長く伸びたフィッシュテール状になる。そしてこれを水平圧延すると、端部から離れた部分での幅戻りのために端部近傍には幅落ち現状が現われ、またフィッシュテールはさらに拡大されて図8(b)のような形状となる。

これらの平面形状不良は、クロップロスとして歩留り低下をもたらすものである。そのため種々の平面形状の矩形化技術が開発され、歩留り向上がはかられている。前章で述べたサイジングプレスの利用は、その後の水平圧延により生ずる幅落ちやフィッシュテールを低減する効果があるので、歩留りの低下なしでのスラブ幅の大圧下を可能にしている。

厚板圧延の場合には、圧延パスの途中で材料を板面内で90°回転させ、幅方向に圧延することにより幅出しを行っている。そこで、縦ロールによる幅圧下を行うとフィッシュテールが生ずる現象を利用して、90°圧延方向を変えるたびに縦ロールで幅調整を行い、矩形化をねらっている。そのほか、長手方向圧延の際に前・後端部の板厚を厚くして、90°回転後の幅出し圧延でのドッグボーン効果を利用した方法や、幅出し圧延後の板厚を板の長手方向前・後端部でテーパ状に薄くすることで矩形化をはかる方法などが実用化されている。

6.2 製品板厚の制御

圧延後の板厚はロール隙間によってきまるのではあるが、無負荷時に設定した隙間と同じ寸法にはならない。その関係を図9によって説明する。直線Aは圧延機の弾性変形特性を、曲線Bは板の圧延変形特性をそれぞれ示すものであるが、厚さ h_1 の板を圧延して h_2 にするのに必要な荷重によって、ロール隙間は無負荷時のSから広がって h_2 になっている。すなわち直線Aと曲線Bとの交点が圧延時を示しているのである。したがって、ロール位置を一定に保持していても圧延後の板厚が一定になるとは限らず、圧延すべき板の初期厚さや変形抵抗などが変化すると曲線Bの位置

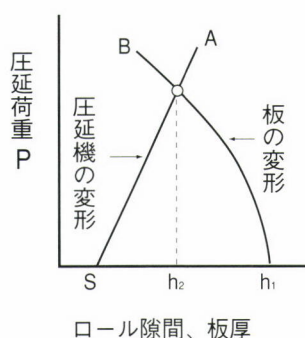


図9 圧延荷重と圧延後の板厚

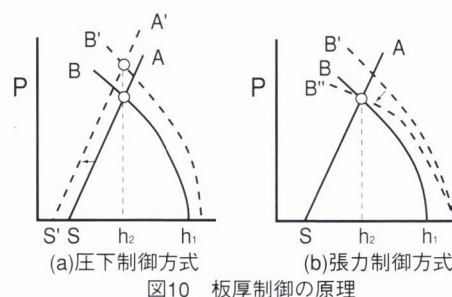


図10 板厚制御の原理

や形状が変わり、直線Aとの交点の位置が移動するのでそれに応じて板厚も変動する。

このような変動を抑え、製品の板厚精度を高めるために板厚自動制御が行われているが、その原理には2通りの方式がある。一つは圧下制御方式と呼ばれ、ロール位置を変更するもので、図10(a)のように曲線BがB'となったときには直線AをA'に移動させて、両者の交点の位置が同じ横軸の値 h_2 になるようにロール隙間を狭くする。圧下スクリュウを回転させてロール位置の調整を行う構造の圧延機は、慣性もあって応答速度が遅いため、この方式に対しては不向きである。一方油圧圧下式圧延機は圧下応答速度が極めて速いので、その点で適している。もう一つの方式は張力制御方式と呼ばれるもので、板に張力を付加することによって圧延荷重が変化することを利用している。すなわち、図10(b)のように曲線Bが何らかの原因でB'に変化したときには、付加張力を増加させて曲線をB''にし、直線Aと同じ点で交わらせる。この方式で修正できる板厚変動の幅は小さいが、連続式圧延機では下流スタンドのロール速度を変化させることによって、微細な板厚制御を行っている。

6.3 圧延板の横断面形状²⁾

一般に圧延板の横断面は図11のような形状になっており、幅中央の方が厚い板クラウンを生じ、また縁近傍で急激に薄くなるエッジドロップも生じている。このような板厚の不同量が多くなると、縁切り代が過大となって歩留りを低下させることになり、あるいは2次加工における成形精度を低下させる原因となる。

幅方向での板厚不同が発生する要因の一つは、ロールの無負荷時の形状が円柱状でないことであるが、これには初期形状のほか、温度上昇に基づく熱膨張やロールの摩耗も影響を与える。他の要因は、圧延荷重によるロールの弾性変形によるものである。もっとも一般的な4段圧延機（ロ

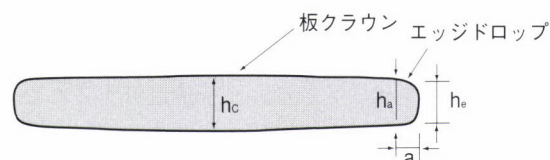
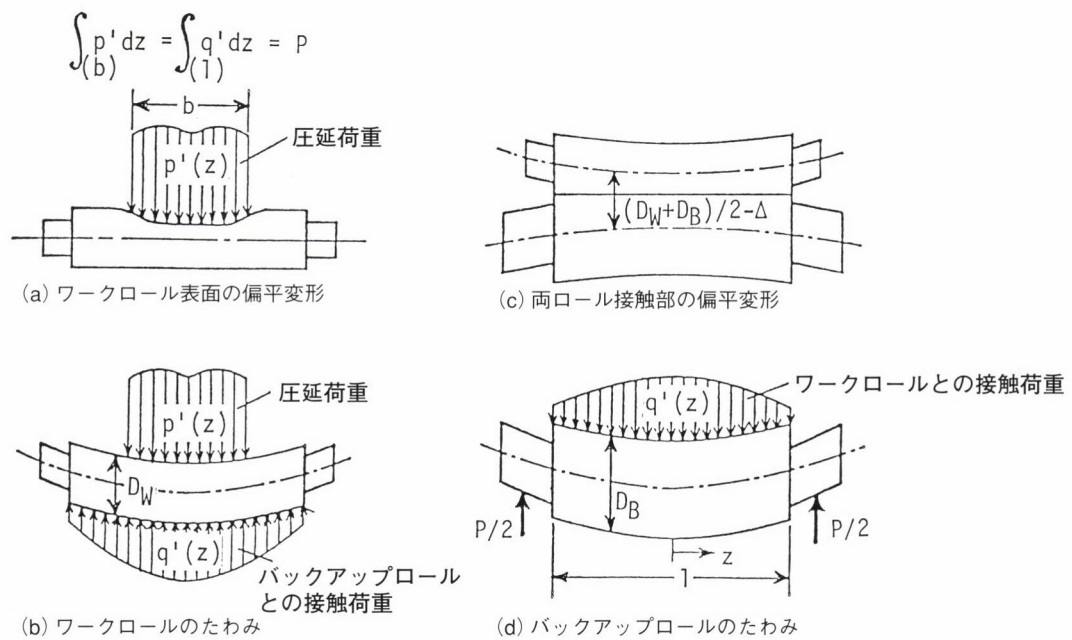


図11 圧延板の横断面形状

図12 4段圧延機におけるロールの弾性変形²⁾

ールが4本の圧延機) についていえば、圧延荷重 P はワークロールを介してバックアップロールに伝えられ、その両端軸受部で支えられている。したがってロールには図12に示すような変形が各部に生じており、その結果として上下ワークロール間の隙間がロール胴長方向で様でなくなり、図11のような板厚不同が幅方向で生じる。

以上挙げた要因のうち、ロールの初期形状以外は圧延中に変化するものであり、したがって希望する断面形状の板を連続して生産するための方策としては、それらの要因に対して人為的に条件を変え、それを制御することが基本的考え方となる。具体的にはいろいろな方法が採られている。

(1) ロールベンディング方式：ロール軸受部に外力を加えてロールの弾性変形量を変化させるもので、ワークロー

ルあるいはバックアップロールに、垂直力を加える形式や曲げモーメントとして加える形式がある。

(2) ロールクラウン変更方式：ロールのクラウン量を圧延中に変化させるもので、ロールのアーバーに対しスリーブを内側から油圧によりあるいは機械的に押し広げる形式のもの、バックアップロールをリング状に分割し、それぞれのリングの位置を調整することにより、ワークロールとの接触部のプロファイルを変化させる形式のもの、あるいは特殊形状をもったワークロールを軸方向にシフトすることにより、上下ロール間の隙間を変化させる形式のものなどがある。熱膨張により生ずるサーマルクラウンのクーラントによる制御もこの方式に含められるものである。

(3) ワークロール支持幅変更方式：図13に示す6段圧延機では中間ロールを軸方向にシフトすることにより、ワークロールの支持端と板縁との位置関係 $UC\delta$ を変えることができる。ロールベンディング力 F_w, F_l との組合せにより、いろいろなパターンのロールプロファイルが得られる。

(4) ワークロールの水平位置変更方式：小径のワークロールを水平に押し曲げて幅の各位置でのオフセット量を変えることにより、あるいはワークロールとバックアップロールとの相対位置は変えないで上下のロール軸線を交叉させることにより、上下ワークロール間の隙間を調整するものである。

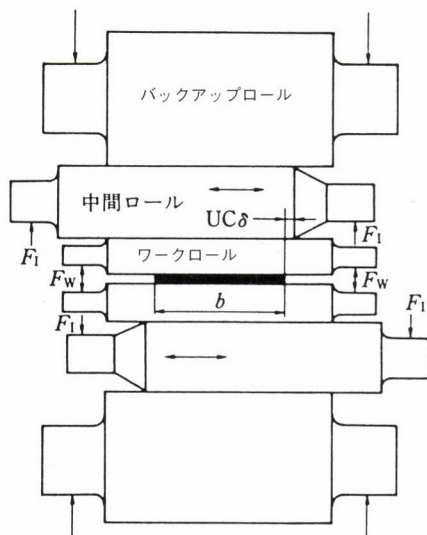


図13 UC圧延機のロール配置と制御手段（日立）

6.4 圧延板の平坦度²⁾

薄板製品についての重要な品質の一つは平坦度である。平坦度不良には、おもな種類として図14に示すものがあるが、一般に圧延された板には圧延方向の残留応力が存在し

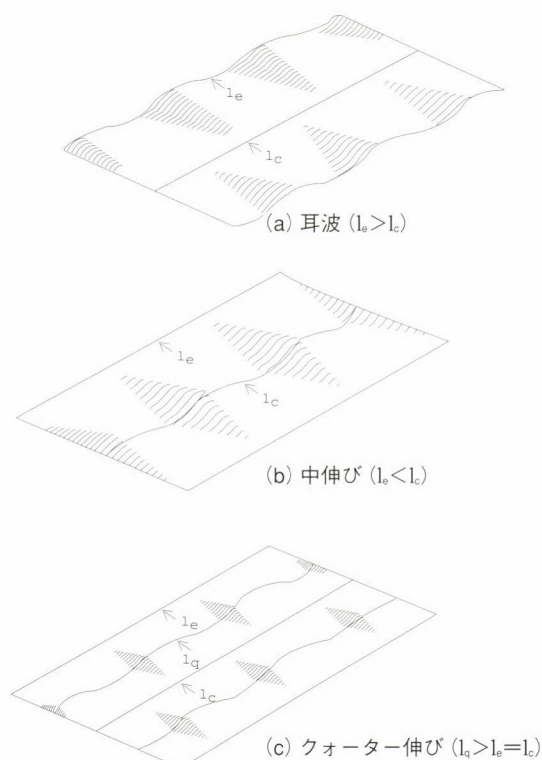
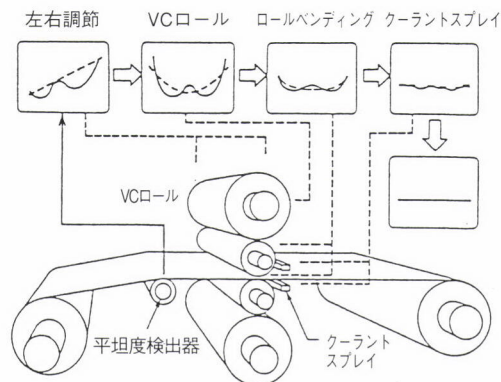


図14 圧延板の平坦度不良

ており、そのうちの負の応力がある限界を越すと座屈を起こし、このような平坦度不良が発生する。ところで残留応力は、圧延による長手方向の伸びが幅方向で様でないために生じるのであるが、伸びに差が生じる原因には次の二つがある。すなわち一つは、板厚圧下率が幅方向で不均一であるために生じるものであり、これは前項で述べたロール隙間の幅方向分布と密接な関係がある。他の一つは、板が圧下されたとき板縁では幅方向へ自由に広がるのに対して幅中央ではそれが拘束されているため、仮りに上述の板厚圧下率が幅方向で同様であったとしても、長さの伸びには差が生じるためである。この二つの原因のうち後者はほとんど制御できないので、残留応力を小さくして平坦度不良が発生しないようにするには、前者すなわちロール隙間の幅方向分布を理想状態が得られるように制御する必要がある。これは前項の板厚分布の制御と基本的には同じ制御ではあるが、現実には違う対応を必要とする。

いま仮に耳波が生じ、その波のピッチが150mm、高さが1mm(波の高さのピッチに対する比を急峻度と称し、平坦度不良の定量化に用いている)であったとすると、板に沿った l_e の長さは l_c に対して僅か0.01%長に過ぎない。このことは板縁部が幅中央より概略0.01%だけ余分に圧下されたことに相当するが、この量は厚さ1mmの板であれば $0.1\mu\text{m}$ である。したがってけた違いに高い精度での圧延が要求されるわけで、板厚を測定しての制御は不可能である。そのため平坦度制御には、一般に張力分布を測定して行う

図15 平坦度制御システム³⁾

方法が採られている。すなわち張力付加時に存在していた幅位置による応力差は除荷後もそのまま残るので、張力分布ができるだけ均一になるように、前項で具体的に述べたいろいろな方法を適用して制御している。図15³⁾はその一例で、平坦度検出器から得られる信号は張力分布のパターンを示しているのであるが、図に見られるように、油圧によってスリートを膨らませるVCロールを使用し、ロールベンディングとクーラントのスプレイを組み合わせることで平坦度の制御が行われている。

7 あとがき

圧延加工は塑性加工の一つであり、ここに述べたようないろいろな形状の製品を効率よく生産するプロセスであるが、本文で触れていないもう一つの側面を持っている。それは圧延加工は材質改善の可能なプロセスだということである。すなわち圧延加工では材料に大きな塑性変形を加えることが高速でも容易に実行できるからで、加工前のみならず、加工中あるいは加工終了時の温度を制御し、加工後の熱処理や加工の程度などの条件と組合わせて、全プロセスを通じて金属学的に適切な条件を選定することにより、成分調整では得られない種々の材質特性をもった製品を作ることができる。したがって圧延加工プロセスにおいては、形状や寸法の幾何学的制御と並んで材質制御も極めて重要な問題であることを付言しておきたい。

引用文献

- 1) 中沢護人(訳)：ベック“鉄の歴史”，たたら書房，(1981),第2巻第4分冊，47.
- 2) 戸澤康壽：板圧延における形状精度，精密工学会誌，(1992)，Vol.58，No.6，938.
- 3) T. Masui and Y. Matsumoto：Flatness Control Characteristics of Rolling Mills with VC Roll, Advanced Tech. of Plasticity (1990)，665.

(1996年4月1日受付)