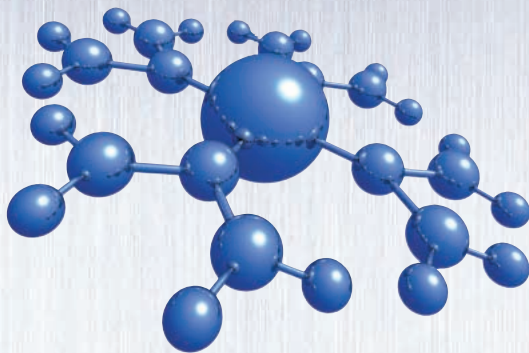


形を造り込む(上)

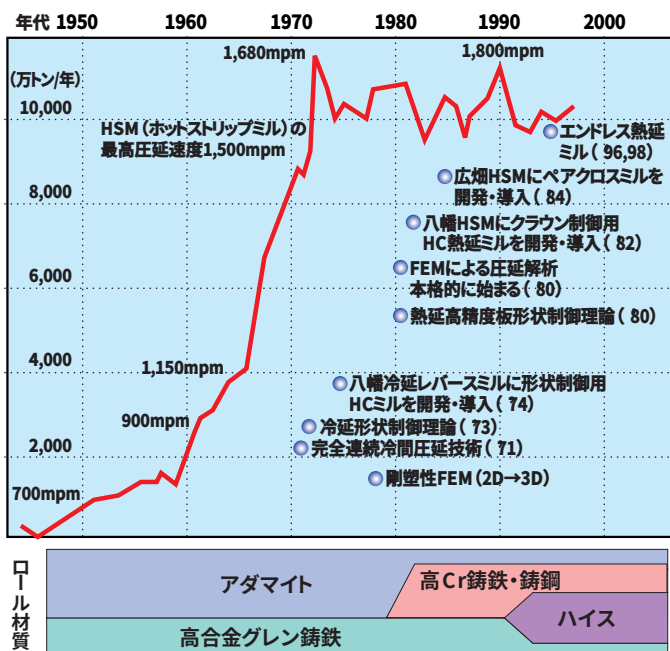
まっすぐな針金を少し曲げて手を離すと、針金は元の直線に戻る。この性質を「弾性」と言う。しかし、さらに曲げ続けると手を離しても針金は曲がったままの状態になり、元の形には戻らない。この性質を「塑性」と呼び、鉄の加工はこれらの性質をコントロールしながら利用して行われている。

鉄の「塑性加工」の中で最初のハードルが「熱間圧延」だ。“硬い鉄を薄く延ばす”。一見単純に思われるその技術の陰には、力学的な諸現象を解析し課題を克服する新日鉄の“形を造り込む”挑戦がある。本号から2回にわたり、高い寸法・形状精度を実現するためのメカニズムと新日鉄の技術を紹介する。



薄板圧延技術の変遷

図1



- *弾性：応力がある限界を超えない間は、応力が消失すれば必ずしも消失し、元の状態に戻る性質。弾性限界内の力による変形（元に戻る変形）を「弾性変形」と言う。
- *塑性：弾性の逆の性質。外力によって生じた変形が、外力を取り去っても残っているとき、塑性をもつという。力を除去しても消えない変形を「塑性変形」という。
- *応力：物体に加えられる外力によってその内部に生ずる力。単位面積当たりの力で表す。「引張り応力」「圧縮応力」「剪断応力」「ねじり応力」などがある。
- *残留応力：外力が作用していない状態で、材料や構造部材内部に存在する応力。塑性加工、熱処理や溶接により発生する。
- *FEM：有限要素法 Finite Element Method。

硬い鉄を伸ばす

時速100km以上、荷重2,000tの世界で高精度を追求

鉄の加工は大きく2つの段階に分かれる。一つは製鉄所で鉄鋼製品をつくるに行われる加工。その種類には、目的の形に鋳込む「鋳造」や、刀のように鋼塊を叩いて形をつくる「鍛造」、熱した鋼片をダイスに通す「押し出し」などがある。そして板やレール、パイプなど一般的に馴染みの深いものはほとんど「圧延」によってつくられている。さらに、そのようにして作られた製品は、二次加工メーカーやユーザーに納められ、成形やプレス加工などで自動車部品等の最終製品に加工される。

「圧延」には2種類ある。薄板製品を例にとると、加熱された約250mm厚のスラブと呼ばれる鋼片をロールで上下に挟んで押し伸ばし、最終的に最小1.2mmまで薄くする「熱間圧延」と、その圧延された鋼板を常温で、飲料缶材料などのようにさらに薄く（1mm未満）する「冷間圧延」だ。今回は、鉄の塑性加工の基本とも言える「熱間圧延」にスポットを当て、主に薄板製品の圧延を例に、そのメカニズムに迫る。

現在における薄板熱間圧延の代表的な設備はHSM（ホットストリップミル）。複数スタンドの粗圧延機群と6～7スタンドからなる仕上げ圧延機群を一直線に並べた設備だ。1,000℃以上に加熱したスラブを圧延し、最終的には全長数km、厚さ1.2～19mm程度まで薄くして、走行中に冷却し終点で巨大なトイレットペーパーのようなコイルにして捲き取る。一連の圧延機の最終スタンドにおいて鋼板は時速100km以上で走っていく（図2）。

この工程には、さまざまな技術とノウハウが集積されている。

例えば、固形物をロールで延ばすという意味では、練ったうどん粉を麺棒で薄く平らに延ばす原理と似ている。しかし、その決定的な違いは“硬さ”だ。うどん粉は軟らかいため、木製の麺棒などある程度硬い素材を使えば、小さい荷重でもうどんをスッと薄く平らに伸ばすことができる。一方、鉄を圧延する場合は、圧延している部分のロールに幅1mm当たり2t近くの荷重がかかる。たとえ加熱炉で1,200℃に熱せられた鉄でも、やはり硬い。板幅が仮に1mだとすると、約2,000tという想像を絶するような荷重が生じる。

それによってロールが変形（弾性変形）してしまい、予期せぬさまざまな現象が起こる。原理的には、うどん粉と麺棒のように圧倒的な固さの差があればロールは曲がったりへこんだりしないが、鉄よりもはるかに硬いロール素材は現実には存在しない（図3）。その中で、新たな圧延方法を考案し、ロールの変形形状を見極め、製品の板厚や板幅、平坦度の精度を高めてきたのが熱間圧延技術の挑戦史だ（図1）。

50ミクロン以下の高精度なクラウン値を追求

「硬い鉄を薄く延ばす」挑戦史の中で大きく立ちはだかったのが「クラウン（板幅方向板厚差）」と呼ばれる現象だ。圧延時にロールが大きな荷重によって変形することで、圧延された鋼板は、板端部に比べ中央部が厚くなる。その厚みの差が「クラウン」だ。特に鋼板の「クラウン」をいかに小さくして幅方向の板厚差をなくすかが、ブレイクスルーすべき技術的課題だった。材質を造り込みながら、クラウンを減少させ精度の高い断面形状を追求することが大きなテーマとなった。

クラウンの発生メカニズムを、圧延機の基本形式として多く適用されている「4重圧延機」で見てみよう（図4）。この圧延機は、実際に圧延する上下のワークロールと、それぞれを支えるバックアップロールの計4本で構成されている。板を薄くするために圧下を大きくすると大きな荷重が発生し、4本のロールは弾性変形して曲がる。その変形したロール形状によって、鋼板も幅方向で中央部が厚く端

部が薄くなる。

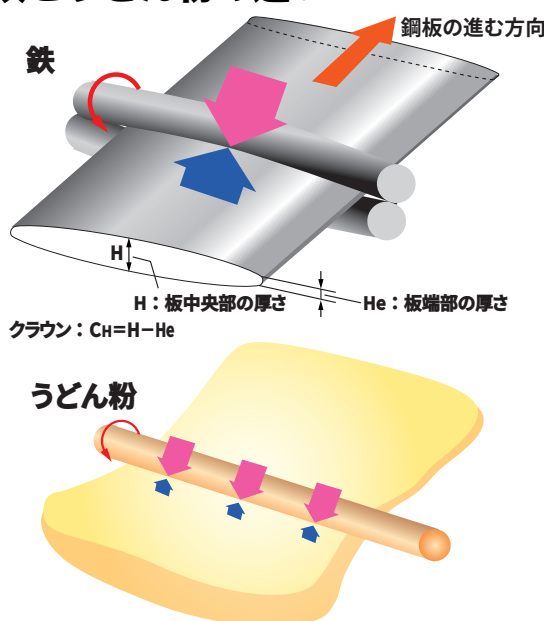
この4重圧延機のクラウン値は紙幣の厚さにも満たない50μ以下の微小なものだ。しかし鋼板に高精度のクラウン値が要求される熱延鋼板は冷間圧延で薄くして使用される。例えば電磁鋼板は、モーターやトランスの鉄心用に積層して使われるが、クラウン値が大きいと重ねた鋼板の間に隙間ができ、効率が落ちる。

1960年代後半までは、薄くなった最端部（エッジ）を切り落として板厚の差を少なくしていたが、歩留が悪いことから、「クラウン」を減少する新たな圧延機の開発が望まれるようになった。

新日鉄の技術が生んだ画期的圧延方式

「クラウン」との戦いは、まず圧延機の改良から始まった。そして1974年、4重圧延機のバックアップロールとワークロールの間に、それぞれ中間ロールを入れた「6重圧延機（HCミル）」が登場（新日鉄と㈱日立製作所が共同開発）した。中間ロールが板幅に応じて幅方向で動き、端部にお

鉄とうどん粉の違い



鉄の圧延は、うどん粉を麺棒で薄く平らに延ばす原理と似ている。しかしその決定的な違いは「硬さ」。鉄の場合、圧延ロールに幅1mmあたり2t近くの荷重がかかる。

図3

クラウンの発生メカニズム

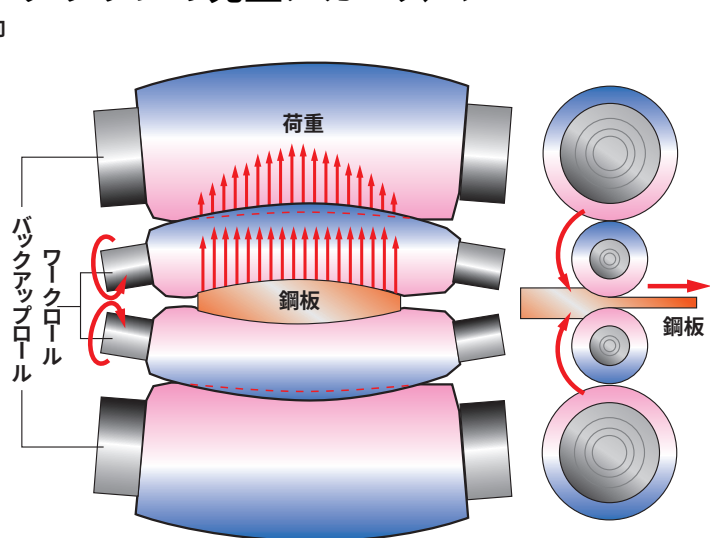


図4

4重圧延機（ワークロールとバックアップロールで構成）は、押さえつける力を大きくすると大きな荷重が発生し、ワークロールが変形する。変形したワークロールで圧延された鋼板は、中央部が厚く端部が薄くなる。これがクラウンだ。

ホットストリップミル（連続熱延設備）

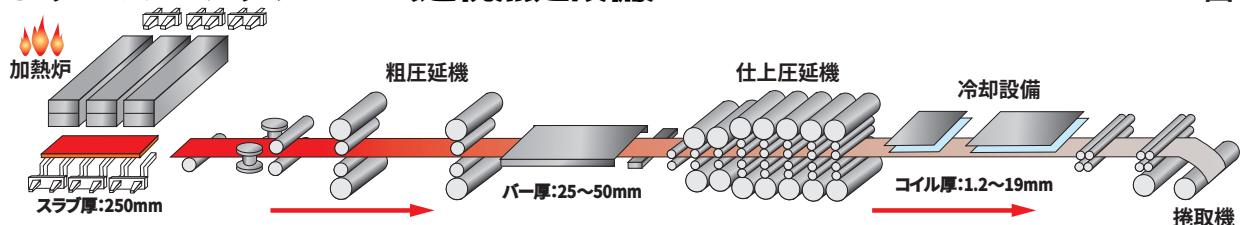


図2

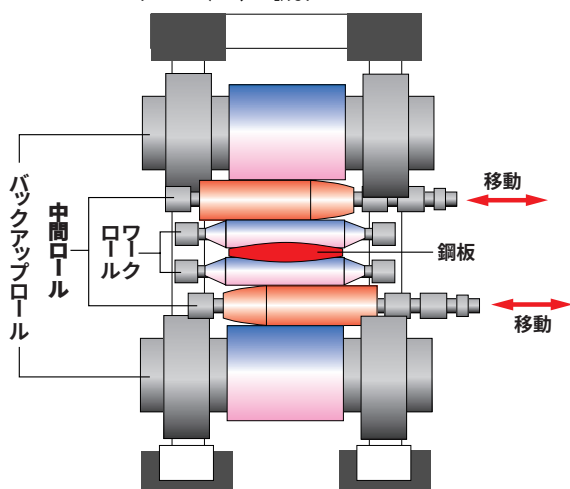
1,000℃以上に加熱したスラブを一直線に並んだ複数の圧延機で連続的に圧延し、最終的に1.2~19mm程度まで薄くしてコイル状に巻き取る。最終スタンドでは時速100km以上で鋼板が走る。

けるバックアップロールとワークロールの直接的な接触を防ぐことで、ワークロールの変形をコントロールする画期的なミルだ（図5）。中間ロールを板幅に応じて幅方向にシフトさせることによってワークロールが撓（たわ）まず強い圧下力でもクラウン値の小さい鋼板が得られるようになった。

もう一つの新技术が、1984年に開発・導入した「ペアクロスミル」だ（新日鉄と三菱重工業（株）が共同開発）。このミルは、上下それぞれのバックアップロールとワークロールをペアで約1度前後クロスさせることによって、幅方向の上下ロール間隙を変え、クラウン値の小さい鋼板を得ることができる圧延機だ（図6）。これら2つの技術はいずれも新日鉄で開発・実用化されたものだ。

ワークロールの変形をコントロールするHCミル（6重圧延機）

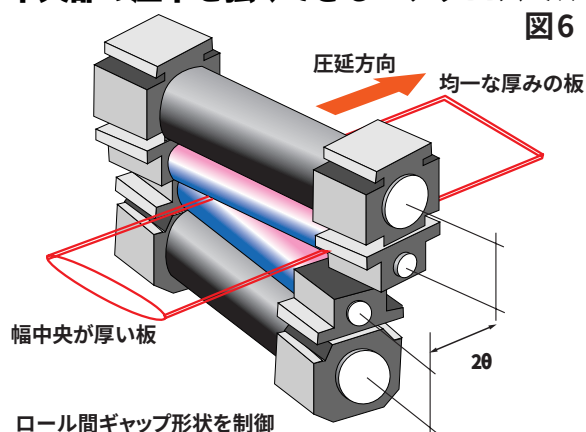
図5



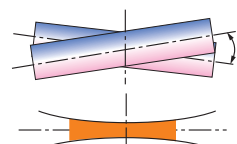
「バックアップロール」と「ワークロール」の間に「中間ロール」を入れ、ワークロールの変形をコントロールする画期的な方式。これで鋼板の端部が著しく薄くなってしまふことはなくなった。

中央部の圧下を強くできるペアクロスミル

図6



ロール間ギャップ形状を制御



放物線形のギャップ

上下のワークロールとバックアップロールをクロスさせることで、幅中央部の圧下力を強くすることが可能。これでクラウンが大きい板でも、クラウン値の小さい鋼板に圧延することができる。

クラウンに勝つ

平坦で、断面が長方形の鋼板を求めて

こうしてクラウンをうまく制御できる圧延機が完成した。しかし、それを使いこなすことは容易ではなかった。

鋼板を圧延するとき、圧下され薄くなった部分は基本的には長手方向（鋼板が進む方向）に伸びていく。そのため圧延された鋼板は圧延前よりも長くなるが、例えば、圧延機で、板幅中央の圧下力を高めてクラウンを小さくしようとすると、鋼板は圧下力の強い中央部が余分に長手方向に伸びてしまい、中央部が波を打ってしまう（中伸び）（図7）。

逆にハイテンなど硬い鋼板の場合は、大きな荷重が発生するためロールがたわんで端部の方が長手方向に余計に伸びるため、今度は板端部が伸びて波を打ってしまう（端伸び）（図9）。こうした異常な伸びが生じると、最悪の場合、6～7スタンドある仕上げ圧延機の途中で鋼板が引っかけりロールを破損したり板が切れたりしてしまう。

こうした異常な伸びを防ぐために、どのような圧延が良いのか。原理的には、圧延前の鋼板中央の厚さ（H）とクラウン（CH）の比率（クラウン比率： $\frac{CH}{H}$ ）が、圧延の際に相似形でそのまま薄く縮小され、圧延後も同じ比率になることが望ましい。しかしその場合、波のない平坦な鋼板はできるが、クラウン比率は減少しない（図8）。これでは永久にクラウン比率を変えられないため、所定のクラウン値の小さい鋼板を造ることはできなくなる。

地道な実験と、高度な解析技術

新日鉄では、クラウン比率の変化と中伸び、端伸び等の板形状との相関関係を把握するため、地道な圧延実験を重ね、圧下力による伸びは、長手方向だけでなく幅方向にもわずかに出たことを発見した。つまり、クラウン比率を変えても圧延後の長手方向の伸びは幅方向の伸び分だけ小さくなり板形状は若干良くなる。

実験を繰り返した結果、板幅が広い、または薄いと幅方向の伸びが出にくくなりそれだけ形状の改善代が小さく、微妙にクラウン比率を変えただけで中伸びや端伸びが起こりやすい。また、ロール径が小さいと幅方向の伸びが相対的に出にくいため、そうした異常な伸びが起こりやすいことも実証した。

さらに圧延実験の過程で、“クラウンが遺伝”することも発見した。例えば、圧延前のクラウンが大きな素材を、クラウンを減少させるため、均一ロールギャップ（板厚分布）となるような圧延機設定条件で圧延する場合、鋼板の中央部が端部よりも余分に伸びようとし、圧延機を出た後に中伸びの波が出る傾向の圧延となる。

しかし、圧延機の中では鋼板はロールに押さえつけられていて波が出ることは許されない。そのため中央部の鋼板はロールと周辺に材料に拘束され“押しくら饅頭”状態になり、中央部の圧延荷重が大きくなって、鋼板に若干のロール変形がプラスされる。

つまり、本来クラウンを減らすべきところが、伸びを抑えようとする内部応力によってクラウンが少し残ってしま

う現象が起こるのだ。それを「クラウンの遺伝」と呼んでいる（図10）。「遺伝」の仕方は板厚、板幅によって異なるが、薄くなると「遺伝」も大きくなることがわかった。最初に述べた「うどん粉」の場合は、素材が軟らかいため内部応力が残らず「遺伝」は起こらないが、鉄は硬いためそうした現象が起こる。

新日鉄では、これらの発見した現象を緻密に数値解析し、クラウンの遺伝性を定量的に示す「クラウン遺伝係数」およびクラウン比率の変化や板厚、板幅、ロール径の違いによって生じる形状変化を示す「形状変化係数」を導き出した。そしてクラウン比率の変化が形状に及ぼす影響を解明し、圧延中のクラウンと形状の変化を追う理論解析技術として「クラウン・形状計算モデル」を確立した。

地道な実験と高度な理論解析によって約20年前に開発されたこのモデルは、当時世界トップクラスのもので一世を風靡し、現在でもクラウン・形状制御技術の基本となっている。

ギリギリの状態でシビアなコントロール

現在、熱間圧延はこの「クラウン・形状計算モデル」を始めとする各種の計算モデルと「設備技術」の両輪で成り立っている。地道な実験、理論解析によるモデル化、そしてそれを具現化する技術開発体制が新日鉄の強みだ。

例えば、「クラウン・形状計算モデル」を使った条件設定による「ホットストリップミル」の実圧延において、仕上げ圧延機の各スタンド間（約5m）で、中伸び、端伸びなどの程度を表す急峻度（波高さとその波ピッチの比の%表示）が2%、つまり1mにつき2cmまでの波の高さについては、圧延時に中央部の圧下力を強めてクラウン比率を下げて問題がないことがわかった。クラウン比率の変更によって形状が波打っても、次のスタンドで確実に噛み込み、徐々に後段スタンドに行くに従って所定のクラウンに減少させながら、最後のスタンドで確実に平坦に圧延すれば良い。

新日鉄は、この2%の形状変化の範囲でクラウンを減少させることができることを実圧延でも証明した。

熱間圧延のノウハウとは何だろう。まず、所定のクラウン値（断面形状）に圧延するには、最終的に時速100km以上で流れる圧延ラインにおいて、鋼の温度を測定しその時の硬さ、すなわち変形抵抗から圧延荷重を計算し、各スタンドのロール間隙、ロール回転数、クラウン、形状等を制御しなければならない。各スタンドを適切に制御するためには、「クラウン・形状計算モデル」を始めとする各種の計算モデルを使って、短時間（1秒以内）に計算して各スタンドをセットアップすることが求められる。

また、仕上げ圧延機出口の圧延状況を実際に計測し、その情報を各スタンドにフィードバックし修正制御をする。さらにエネルギーミニマムで、各スタンドのロール摩耗やモーターの疲労などをできるだけ均等にするとといった計算もしながら板厚、形状、クラウンを高精度に制御している。これが、新日鉄の熱間圧延のノウハウだ。

熱間圧延は時間が勝負だ。時間が経過し、温度が下がれば硬くなりそれだけで変形に対する抵抗が強まり、圧延が困難になってしまう。熱間圧延とは、ロール自体が熱により膨張することも含め、さまざまな現象をモデル化し、いわばギリギリの状態でシビアに圧延条件をコントロールすることで初めて可能になる。

こうした“形を造り込む”優れた技術によって、クラウン値はそれぞれの鋼板の目標値（例えば30μ）に制御されている。

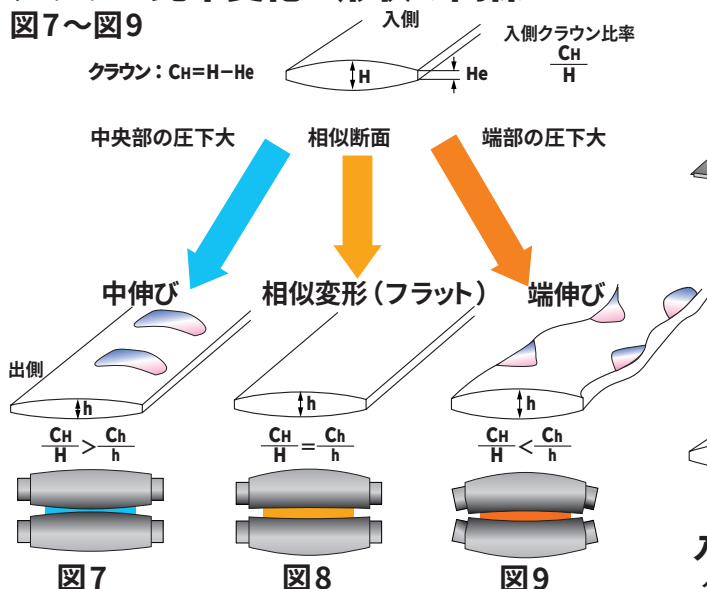


新日本製鉄(株)顧問 菊間 敏夫（きくま としお）

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”

クラウン比率変化と形状の関係

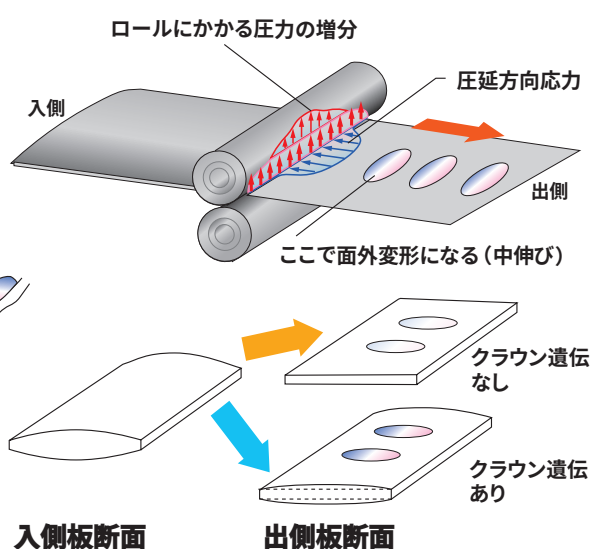
図7～図9



中央部の圧下力を強くすると中央部が波を打つ「中伸び」、ハイテン材料などの硬い材料を圧延するときには「端伸び」が起きる。

クラウン遺伝の原理

図10



クラウンが大きな鋼板の板厚を均一にする際、中央部は端部より余分に伸びようとするが、ロールに押えつけられているため、中央部の圧延荷重が大きくなる。その圧力増分だけロールが余分に变形するため、鋼板のクラウンが少し余分に残ってしまう現象。