

(討9) 熱延原板のクラウン及び形状の冷延形状に及ぼす影響の理論的研究

新日鉄 八幡技研 ○中島浩衛 菊岡敏夫
松本絃美 上堀雄司

1. 緒言

冷間圧延材の形状という概念を圧延材に生じる波に限定すれば、形状に関する理論とは、与えられた圧延条件のもとで伸びが巾方向にどのように分布するかを推論することであると云ってよいであろう。このためにはロール変形式と材料の変形式とを連立させて解かねばならないが、そのモデルは Stone⁽¹⁾ によって初めて提出された。その後塩崎⁽²⁾ は、ロールベンディングを取入れた全系の方程式を立てて解く方法を提出し、一オ Shohet⁽³⁾ は分割モデルによる自由度の大きい解を求める方法を提出した。さらに戸沢他⁽⁴⁾ はロール変形式にロールの剪断変形およびワークロール表面のインデンテーションを導入することを試みた。この結果、ロール変形式に関してはほぼ真にせまったものになったと言えるが、材料の条件式としてはこれらのモデルはいずれも巾方向の相互作用を考慮しておらず、いわば細かくスリットした材料を圧延している場合に相当する。本城⁽⁵⁾ は巾方向の相互作用を出側張力分布を中介として取り入れることによって、実際の圧延において板のクラウンが基準クラウンにほとんど等しいことを説明した。ただ巾方向の荷重分布や、ロールの摩耗プロフィールを放物線と仮定しているため解の自由度が少なく、中端伸びや条伸びを扱うことができなかった。

本報は上記欠点のない新しい計算モデルを用いて、熱延原板の性状が冷延形状にどのように関係するかを求めた結果、および2, 3の実験結果に検討を加えたものである。

2. 形状の計算方法

本報での計算モデルは図1に示したような各種要因の相互関連を想定し、この関連図を一連の方程式群として解を求めるものである。夫々の要因の関連の仕方は形状理論に本質的な問題を含んでいるが、その具体的な計算技巧については別途報告してあるので^{(6)~(8)}、ここではその物理的意味を主体に定性的に述べるにとどめる。

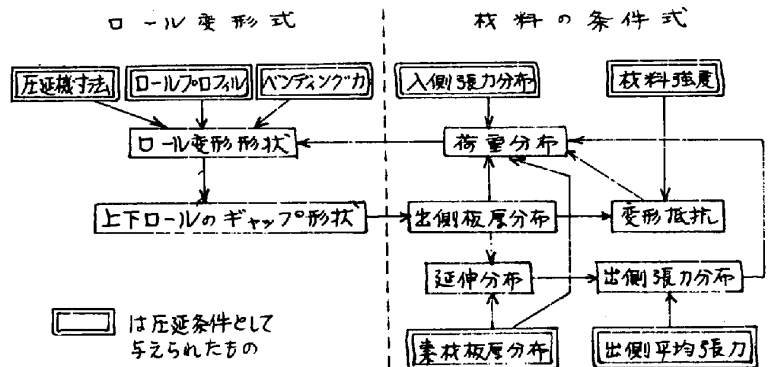


図1 冷間圧延の形状計算モデル

2.1 ロール変形式

圧延中のロールの形状は、圧延機の寸法、ロールの初期プロフィール、ロールベンディング力、および材料とワークロール間の荷重分布 $p(x)$ が与えられれば求めることができる。この計算はかたやめんどうであるが、理論的困難はほとんどなく、若干の近似によって純数学的に処理できる。ただワークロールのインデンテーション（以下単に扁平と呼ぶ）は戸沢他⁽⁴⁾ にならって半無限弾性体のそれと代用しているが、正確には円柱のそれを求める必要があるわけが若干誤差があると思われる。

2.2 出側張力分布を求める方法

ロールの変形形状がわかれば、出口における上下ロールのギャップ形状、したがって出側板厚分布が決まる。巾広がりを無視すればこのことは伸びの分布が得られたことになる。圧延中は巾方向の材料の相互拘束のため各部は同じ長さになっているが、仮にこれを細かくスリットしたとすると、夫々の伸びに応じた長さになる。今スリットした時の伸びの差の平均伸びになする比を $\Delta \epsilon(x)$ (x は巾方向の座標) と書き、伸び差の分布と呼ぶことにある。

圧延中は均一な長さになっているから各部は圧延方向に $\bar{\epsilon} - \Delta\epsilon(x)$ だけの歪が生じている。この状態は初期応力問題であり、ほぼ単軸応力状態であるから、出側張力分布 $\sigma_f(x)$ は

$$\sigma_f(x) = E \cdot (\bar{\epsilon} - \Delta\epsilon(x)) \quad (E: \text{材料のヤング率}) \quad (1)$$

で与えられる。ここで定数 $\bar{\epsilon}$ は出側平均張力 $\overline{\sigma_f(x)}$ が与えられた値になるように決めればよい。同式から伸びの大きい部分は出側張力が小さい(圧縮側になる)ことがわかるが、 $\bar{\epsilon} < \Delta\epsilon(x)$ の部分ではどうなるだろう。この部分では圧縮応力になるから直ちに座屈して $\sigma_f = 0$ になると考えそうであるが、ロールから出た直後はまだ上下ロールの拘束の影響があって簡単には座屈せず、ある程度の圧縮応力が生じ得る。したがって $\sigma_f < 0$ の部分では(1)式から類推して

$$\sigma_f(x) = \alpha \cdot E \cdot (\bar{\epsilon} - \Delta\epsilon(x)) \quad (0 < \alpha < 1, \text{ただし}\alpha\text{の正確な値は不明}) \quad (2)$$

で表わされると考えられる。もっとも出側張力が十分大きい時は(2)式は考える必要はない。

2.3 荷重分布を求める方法

荷重分布は各部分毎に求め、荷重式としては従来からの圧延荷重式(正確には Hill の式と Hitchcock の式の連立解)を用いる。すなわち単位中あたりの圧延荷重は

ロール半径、入側および出側板厚、入側および出側張力、変形抵抗、摩擦係数によって決まるが、これらをすべて各場所毎の値を用いることにすれば、その場所の単位中あたりの荷重 $w(x)$ が得られる。この方法は最も常識的であり、現在の圧延理論の枠内ではやむを得ないことでもあろう。

2.4 出側張力に関するフィードバックループ

今までは夫々の関連を示すために、原因の方は

既知として計算する方法を示したが、実際には未知の要因も含まれていた(例えばロール変形式における荷重分布)。しかしながら、例えば出側板厚分布を仮定すると各部の伸び、したがって(1)または(2)式により出側張力分布が決まり、これから荷重分布を求めることができるからロール形状も計算できる。ロール形状が決まれば出側板厚分布が得られることになり、これが初めに仮定したものに等しくなければならぬという方程式を立てることができるわけで、図1に示した計算モデルはこの方程式を解くことを意味している。

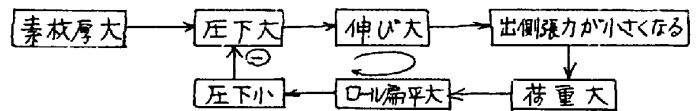


図2 出側張力に関するフィードバックループ

これは図2に示すように制御理論における負のフィードバック回路にたとえることができる。すなわち例えば素材のある部分の板厚が厚くてその部分の圧下が大きくなる

なるとすると、その部分の伸びが大きくなり、出側張力が圧縮側になるため、その部分の荷重が増加し、ロール扁平が大きくなって圧下がかからなくなる。このようなフィードバックループはわずかの伸び差も大きな出側張力差になる一因、ロール扁平はかなり大きいから非常に重要な役割をはたしており、出側板厚分布がほとんど素材クラウンと平均伸びによって決まる基準クラウン(均一伸びの場合のクラウン)に等しくなる(中広がりのある板端部を除く)ことが理解できる。

2.5 フィードバックループの実験的検証

前述のフィードバックの存在を証明することは容易である。すなわち出側張力分布は各部の長さを同じにある時に生じるものであるから、そのような制限を除けばよく、そのためには材料を細かくスリットすればよい。図3はスリット材と通常の板を圧延した時、伸び差 $\Delta\epsilon(x)$ の分布を比較したもので、フィードバック効果が明らかに示されている。またその効果の程度も、定量的に計算によるものとほぼ等しいことが確かめられている。

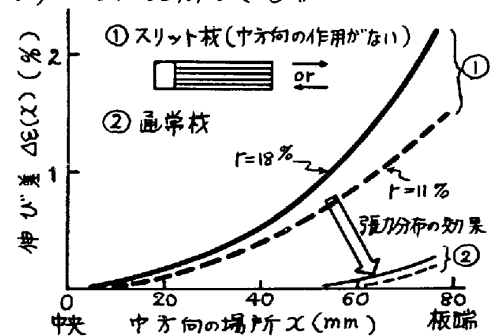


図3 スリット材と通常材の伸び分布 (R=125mm, $\alpha=1.0$, $\mu=0.4$)

3. 素材クラウンの影響 素材クラウンの冷延形状に及ぼす影響に関して、定性的には厚い部分の伸びが大きくなることは明らかであろう。しかしながら先述のフィードバック効果があるため、その程度は簡単に推定することができないから、このためには正確な計算を行なわねばならない。また厚いか薄いかということはロール形状との相対的な関係において議論すべきであって、例えばロールクラウンが非常に大きい場合は均一な板厚の素材でも中伸びになり得る。ところでいわゆる素材のボデークラウンが変わっても単に端伸びが中伸びかに変わるだけで、ロールバンダーを備えたミルでは容易に制御できるから、ここでの議論はロールバンダーによっては修正できないような急激なクラウンの変化を示すエッジドロップと異常クラウンに関して行なうことにしたい。

3.1 素材のエッジドロップの影響 荷重分布 $p(x)$ が均等でかつロールクラウンがロールのたわみを丁度補正する程度であったとしても、ワークロール表面の変形形状はロール扁平のために板端近傍で急激に変化する形になる。このため素材厚が均一な場合は、板端部は相対的に板厚が厚いのと等価になり伸びが大きくなる。これに対して熱延板には熱延時のロール扁平によるエッジドロップが生じており、仮に熱延仕上げロールの扁平と冷延ロールのそれが同程度なら伸びが均一になると考えられる。図4は両者の伸びの分布を出側張力分布で表わした計算結果を示したものであり、フラットな素材の場合は板端近傍の伸びが避けられない（ロールクラウンを大きくしても中端伸びになる。）のに対し、エッジドロップの大きい素材の場合は逆に板端が伸び足りないのがわかる。ただしどの程度のエッジドロップのある素材が適当であるかについては、扁平変形計算の誤差や中広がりを無視している等のため、絶対値としては必ずしも正確ではないことは覚悟しなければならない。

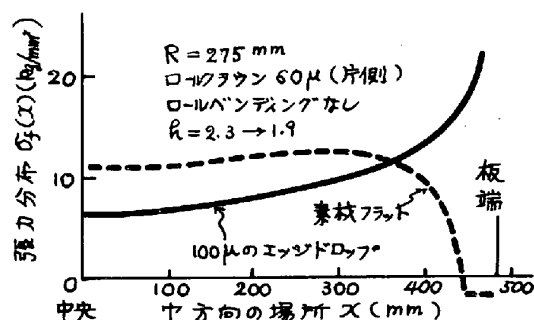


図4 素材のエッジドロップの影響

3.2 素材の異常クラウンの影響

図5は素材の1/4中部に中200mmにわたって他の部分より11.5μ厚い部分があったとした時の出側張力分布を計算したものである。計算では中方向のメタルの移動はないとしているため張力分布が微細に中方向に分布しているが、実際には局所的なメタルフローが生じ得るから、張力分布はこれほど急激には変化せず、同図の分布は一定の局所中（板厚に比例すると考えられる）内で平均してなされた形になると思われる。

図6は局所的に厚さの厚い素材（厚くする部分に接着テープを貼って酸で腐蝕）を圧延した場合の形状不良の程度を急峻度で測定した結果であって、当然予想されたように不均一高さ Δh の大きいほど形状は悪くなっている。ただ中方向のメタルフローを無視した計算によると、形状は不均一部分の中 b や板厚 t にはあまり依存しないという結果を与えるが、実験では $t=1.0$ mm の場合は不均一中の広い方が形状が悪く、また $t=0.5$ mm の場合はあまり不均一中に依存していない。これは中方向のメタルフローがあるため、あまり不均一中の狭い場合は伸び差にならず、一方向不均一中が十分広い時はメタルフローは生じないからである（板厚が薄い場合は相対的に不均一中が広いことになる）と考えられる。不均一中が十分広い時

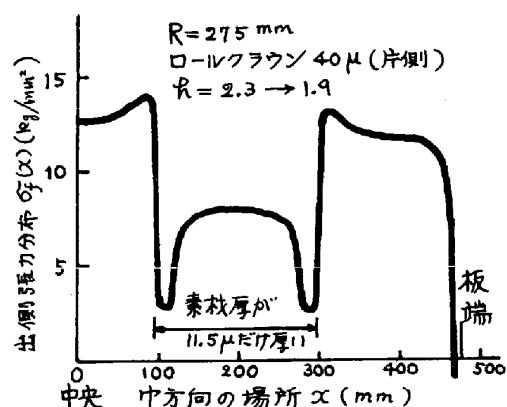


図5 素材厚が局部的に厚い時の張力分布

はメタルフローは考えなくてよいから計算値はほぼ正しいと考えて実験値と比較すると、実験では板厚不均一が10μの時急峻度が1.5%（応力に換算すると10 kg/mm²）程度であるのに対して、計算では5~10 kg/mm²の値でかなり一致していると言える。

4. 素材形状の影響

図7は同一材料(0.33t x 200W x C)をクラウンの異なるロールで圧延したものを2パス目には同一ロールで圧延した時の形状を比較したもので、オ1パス後の形状にかかわらず同じ製品形状になることがわかる。1パス後の

材料を熱延板のクラウンが同じで形状だけが異なったものとみれば、これは素材の形状は冷延形状には無関係であることを意味している。理論的には素材形状の相異は入側張力分布の相異をもたらすから、荷重分布の求め方から推定できるように荷重分布の変化を通じて冷延形状に影響すると考え

られるが、実験ではそのような事実はないわけである。この原因は不明であるが、荷重分布を求める時に従来の荷重式を用いて各場所場所で求めるといった方法の限界であろうと思われる。

5. 結言

筆者等の提出した形状計算モデルを用いて、熱延原板のクラウンおよび形状が冷延形状に及ぼす影響について理論的に検討し、実験と比較した結果次のような結論を得た。

- (1) エッジドロップの全くなし原板の場合、極端な端伸びになることが避けられない。
- (2) 原板の異常クラウンが10μ以上あると形状不良になる。ただしその程度は異常部の中に依存し、このことは中方向のメタルフローを考慮しないと説明できない。
- (3) 原板の形状はクラウンと独立な特性と見る限り冷延形状には無関係であり、このことはまた同一素材の場合は、製品形状は最終スタンドの条件によって決まることを意味している。

参考文献

- (1) M.D. Stone 他: *Iron & Steel Engr.*, 42, 8 (1965), p.73
- (2) 塩崎: *塑性と加工*, 9, 88 (1968-5), p.315
- (3) K.N. Shohet: *J.I.S.I.*, 1968, Nov., p.1088
- (4) 戸沢他: *塑性と加工*, 11, 108 (1970-1), p.29
- (5) 本城: *オ38回圧延理論分科会資料* (1969-12). 38-2
- (6) 中島他: *オ21回塑性加工連合講演会前刷* (S.45.11) p.159
- (7) 中島他: *オ41回圧延理論分科会資料* (S.45.12) 41-5
- (8) 中島他: *昭和47年度塑性加工春季講演会前刷* (1972.5) p.173

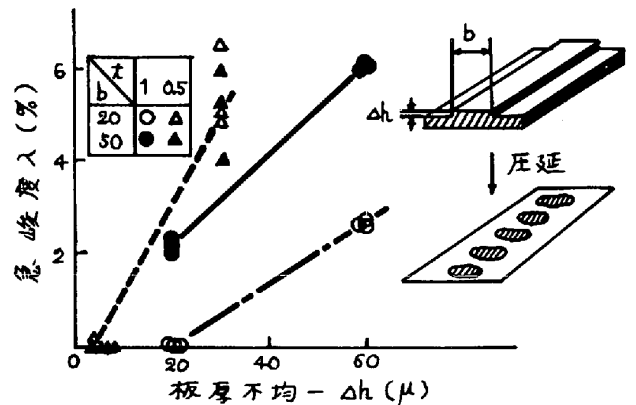


図6 板厚不均一の素材の場合の形状不良 (R=125mm, φ180, r=12%, 切板)

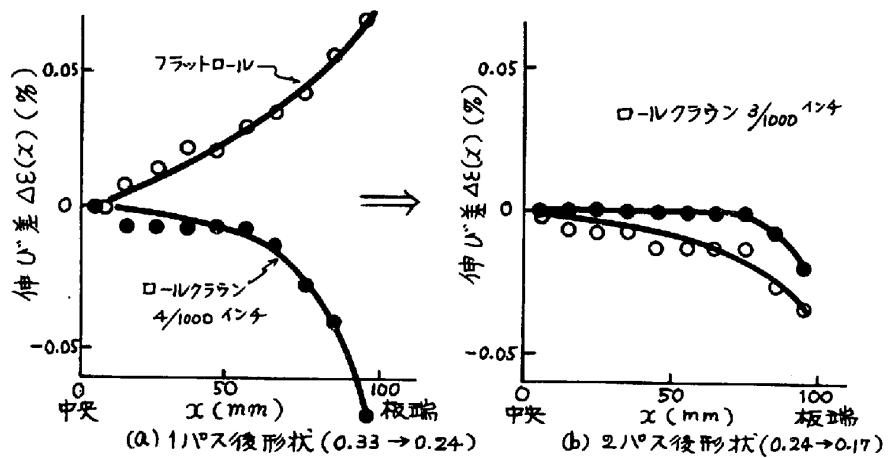


図7 前段パス後の形状の影響 (R=10mm, センジャーミル)