

討16 クラッド板の熱間圧延の剛塑性FEM解析と圧延反り防止法の検討

新日本製鐵 第3技術研究所 ○浜渦修一 上堀雄司

山田健二 吉田忠継

川並高雄

1. 緒言

クラッド圧延では、変形抵抗や摩擦係数などの非対称性が圧延時の反りにつながり、作業性の面から問題となっている。反り防止のためには上下面で摩擦係数を変えたり、異周速圧延をするなどの非対称圧延法を検討しなければならない。またサンドイッチ圧延法などにより反りを回避したとしても、接合面の応力と圧延条件の関係は実験では求められない。さらにまたクラッド圧延時の圧延負荷の推定も重要な問題である。そこでこのような問題を総合的に取り扱える非対称圧延解析剛塑性FEMプログラムを開発し、クラッド圧延解析を行った。また片面クラッド材の熱間圧延実験を行い、上下面の摩擦係数変更による反り防止効果を確認するとともに圧延荷重および反りについて本手法による解析結果との比較を行った。

2. クラッド圧延解析

2.1 非対称圧延解析剛塑性FEMモデルの概要

解析モデルの概要を図1に示す。本モデルで取り扱える圧延の非対称条件は、異径ロール圧延（ロール半径 R_1, R_2 ）、異周速圧延（ロール周速 V_{R1}, V_{R2} ）、摩擦係数の上下面差（ μ_1, μ_2 ）および変形抵抗の板厚方向分布（温度分布、クラッド材）である。剛塑性FEMの定式化には圧縮性材料と考える方法²⁾を用いた。また拘束条件は図1に示すような速度場を用いている。非対称圧延では一般に上下で圧下配分が異なるので、図2の様に圧下配分を変えて上下ロール反力が一致するように収束計算を行う。図3は本モデルにより同径異周速圧延時の上下圧下率配分および反り曲率の圧延形状比による変化を求めたもの¹⁾である。計算条件はロール径200mm、ロール周速は高速側200mm/s、異速率20%、入り側板厚20mmで圧下率を変えて形状比（ ld/hm ）を変化させている。同図から分かるように、非対称圧延では圧下率配分のみならず、反り曲率も形状比により変化し、形状比1近傍で極大となる。

2.2 クラッド圧延解析結果

2層クラッド圧延時の相当歪分布、反り曲率、圧延荷重に及ぼすクラッド比および変形抵抗比の影響を本モデルにより解析した。計算条件はロール径200mm、ロール周速167mm/sの同径同周速圧延、入り側板厚20mm、圧下率50%、摩擦係数は上下とも0.3とした。また上層変形抵抗を一定（ $\sigma_{yu}=20\text{kg/mm}^2$ ）にし下層変形抵抗 σ_{yl} を変化させた。なお変形抵抗はロールバイト内では変化しないものとした。クラッド比 $\xi=h_u/h$ （ h :全板厚、 h_u :上層板厚）は1/2, 1/4, 1/8とした。なお本計算では両層接合面での相対すべりは無いとしている。計算結果を図4～8に示す。

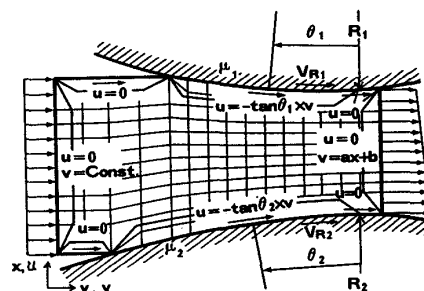


Fig.1 Scheme of FEM analysis of asymmetric rolling.

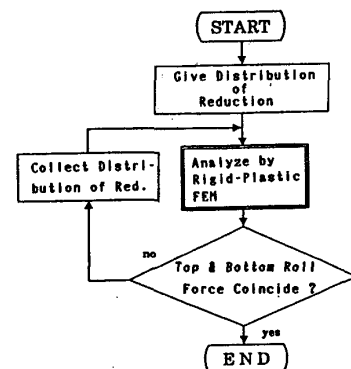


Fig.2 Flow chart of analysis.

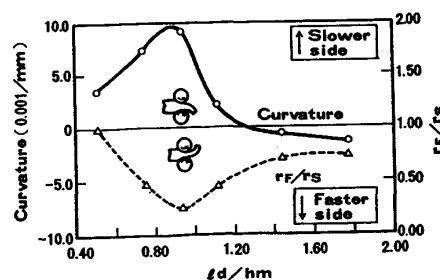


Fig.3 Curvature and the ratio of reduction by rolling with different velocity.

板厚方向の相当歪分布 (図4) は、クラッド比や変形抵抗比 $\eta = \sigma_{YL} / \sigma_{YU}$ を変えても軟質側 (低変形抵抗側) の表層のみが変化するだけである。その際クラッド比による軟質側表層の変化は小さいが、 $\xi = 1/2$ 一定で η を小さくする (ここでは硬質側 = 高変形抵抗側は一定であるので軟質側の変形抵抗を小さくする) ほど軟質側の表層の相当歪は増加する。つまり相当歪分布は変形抵抗比によって一義的に決っている。

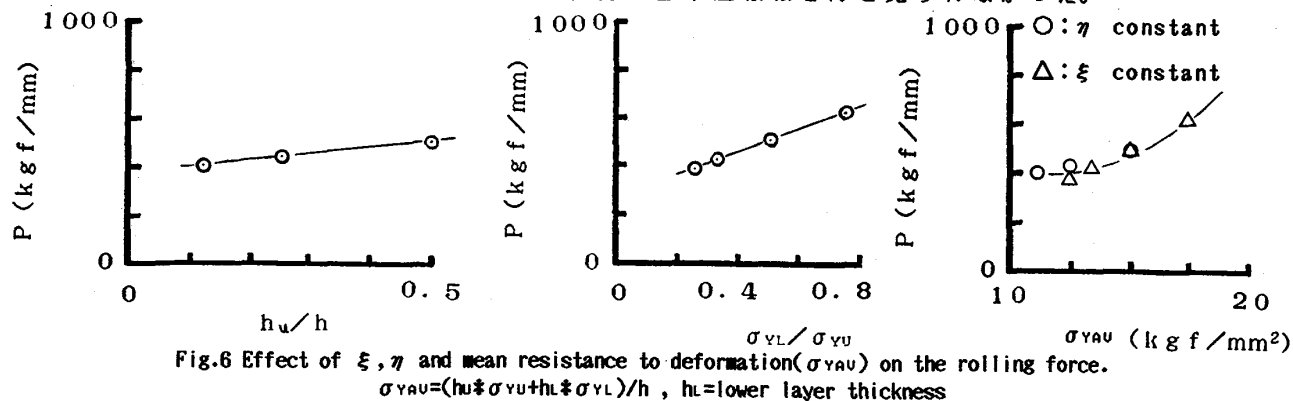
出側の板厚中央の反り曲率 (図5) は変形抵抗比によって大きく変化し、当然のことながら軟質側の変形抵抗が小さいほど反りは大きい。

前述したように、反りの方向は形状比により変化するが、この場合は硬質側に反る。一方クラッド比を変えた場合、 $\xi = 0.2$ まではクラッド比と共に曲率は大きくなるが、 $\xi \geq 0.2$ では反り曲率は変形抵抗比によって決まる値に飽和する。

圧延荷重 (図6) は当然クラッド比が大きいほどまた変形抵抗比が小さいほど大きくなる。これを各層の厚さで加重平均した変形抵抗 σ_{YAU} で整理してみると、図7のように圧延荷重は σ_{YAU} に一義的に依存していることが分かる。

接合面の応力 σ_x , τ_{xy} (x : 圧下方向, y : 圧延方向) のロールバイト内の分布 (図7, 8) を見ると、接合面が板中央部にある場合、 η が大きくなるほど平均変形抵抗が大きいため σ_x は高くなるが、 τ_{xy} は η によって変化せずほぼ0である。接合面が表面近くに来る (ξ が小さくなる) ほど平均変形抵抗が下がるため σ_x は小さくなる。またせん断応力は小さいがロール接触面の影響を受けロールバイト内で方向が変わるようになる。

なお本解析では図3に示したような圧下率配分の上下差はほとんど見られなかった。



3. 実験との比較および反り防止法の検討

3.1 実験の狙い

反りを防止する方法としては
①軟質側より硬質側の温度を高くする。
②異周速圧延をする。
③上下面の摩擦係数を変える。
などが考えられるが、最も現実的なものは③であろう。そこで上下の摩擦係数を潤滑剤を使って変える方法を熱間圧延実験により試みた。合わせて上記解析モデルとの比較を行った。

3.2 実験方法

既に熱間圧延されたステンレスクラッド (SUS304/SM41) から板厚18mm×幅50mm×長さ200mmの素材を切り出し (クラッド比 $\xi=0.2$)、ステンレス側を上面にして、モデルミルで7パスの

リバース圧延 (上下同径: $\phi 200$ mm, 圧延速度: 10MPM, 圧下率: 20%/パス, 加熱温度: 1250℃ 30分) を行った。各パス後の反り曲率は、圧延機側面から圧延状況をビデオカメラにて撮影し、再生画面上で測定した反り高さと別途圧下率から求まる長さから計算により求めた。潤滑の効果を見るために、無潤滑圧延とガラス潤滑圧延 (ステンレス側にガラス粉末を手で散布) を行った。

3.3 実験結果とFEM解析との比較

図9に各パス後の表面温度 (ステンレス側) 実測値を示す。図10は無潤滑およびガラス潤滑時の実測荷重と計算荷重である。計算条件は $\mu=0.3$ (ガラス潤滑面は $\mu=0.1$) とし、板厚方向の圧延材温度を差分モデル³⁾により表面温度が実測と合うように計算し、入・出側の平均温度およびスラブ法で求めた相当歪、歪速度から変形抵抗を計算しFEMに入力した。圧延荷重の計算結果は、無潤滑、片面ガラス潤滑とも実測と良く一致している。

無潤滑の場合のそり曲率 (図11) は、図3と同様に形状比1近くを極大とする変化を示した。

計算値も若干小さ目ではあるが

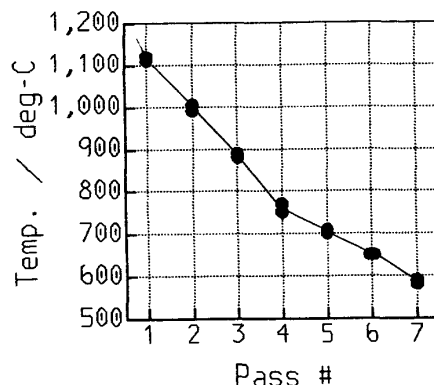


Fig.9 Measured temperature at the surface of sus304.

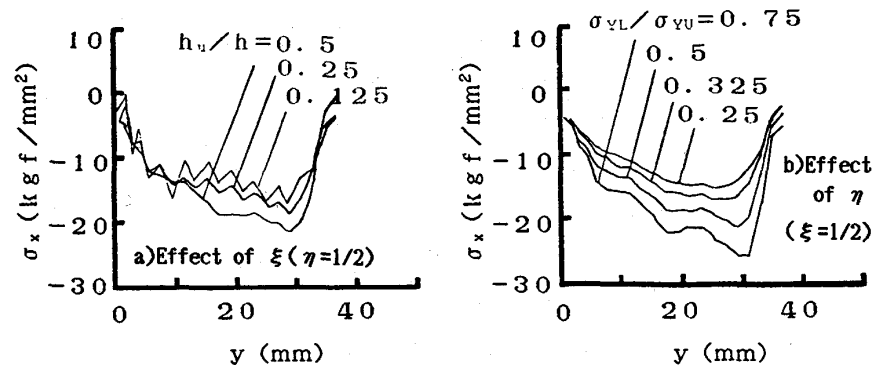


Fig.7 Distribution of σ_x in rolling direction on the clad boundary.

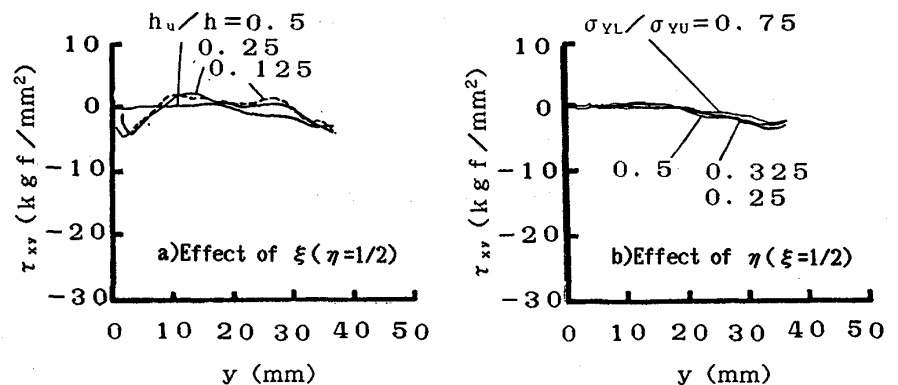


Fig.8 Distribution of τ_{xy} in rolling direction on the clad boundary.

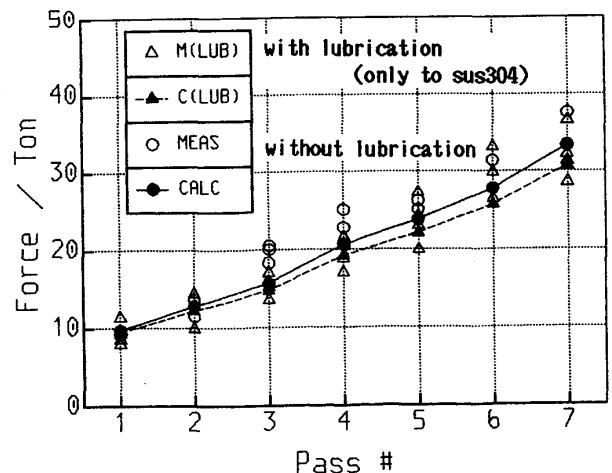


Fig.10 Comparison of measured and calculated rolling force.

実測値の傾向を良く表している。片面潤滑をする
と図12のように反りは殆ど無くなる。計算値も実
験と同様に片面潤滑により反りを抑制できること
を示している。計算では反りは0にはなっていない
が、これはガラス潤滑時の摩擦係数を0.1とした
ことおよびビデオによる測定の精度などに問題が
あると考えられる。また図中の□印は、ガラス潤
滑の持続効果を見るために、毎パス潤滑を行わず
2, 4パス目での潤滑剤塗布を故意に止めて圧延
したものであるが、毎パス塗布時よりも反りは大
きいが、無潤滑（図11）に比べると反りは半減し
ており、前パスに塗布した効果はかなり残ってい
るとようである。

以上の実験により、圧延荷重、反り曲率いずれ
についても本モデルによる解析の妥当性が確かめ
られた。

4. 結言

以上のクラッド圧延および一般的な非対称圧延
に関する検討結果は次のように要約される。

- ① 非対称圧延解析が可能な剛塑性FEMモデル
を開発した。
- ② 本モデルにより非対称圧延時の反り曲率なら
びに上下の圧下配分は圧延形状比により変化
することを示した。
- ③ 本モデルによりクラッド圧延時の相当歪分布、
反り曲率、圧延荷重および接合面の応力にお
よぼすクラッド比、変形抵抗比の影響を明らかにした。
- ④ とくに、圧延荷重は層厚さで加重平均した変形抵抗によつて一義的に決まることを示した。
- ⑤ 2層クラッド圧延実験により本モデルの妥当性を確認した。
- ⑥ 反りは上下面の摩擦係数を変えることにより防止でき、とくに硬質側の摩擦係数を下げることが有
効であることを実験および解析により示した。

参考文献

- 1) 山田, 浜渦, 森, 川並: 昭和61年度塑性加工春季講演会, (1986), 235
- 2) 森, 島, 小坂田: 機械学会論文集, 45, 396 (1979), 965
- 3) 浜渦, 菊間, 中島, 細見: 昭和55年度塑性加工春季講演会, (1980), 53

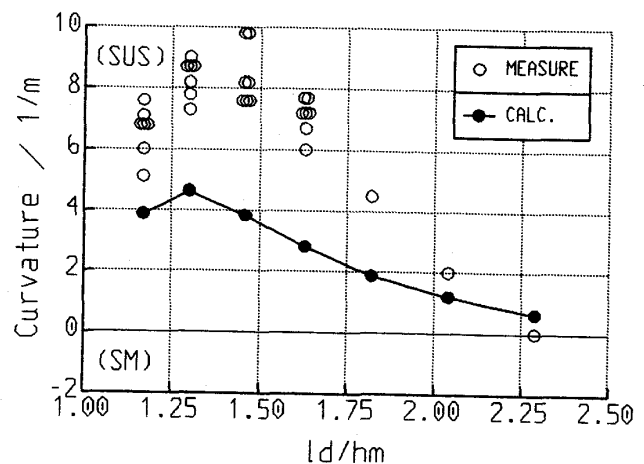


Fig.11 Effect of shape factor on curvature.
+:curve to sus304 side
-:curve to SM41 side

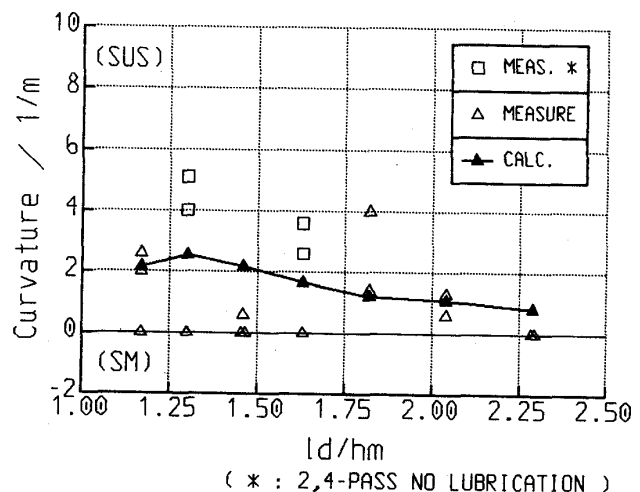


Fig.12 Effect of lubrication on curvature.