

討13 薄板圧延におけるロール弾性変形の数値解析と弾性理論解析との比較

日本鋼管(株)技術研究所 有村 透 岡戸 克
○藤田文夫

1. 緒言

薄板圧延における圧延板の形状は、圧延ロールの弾性挙動、ロールプロフィール、圧延荷重、ロールベンド力、原板プロフィール、張力、圧延材の塑性特性などによって影響を受けることは既に広く知られるところである。これらの因子のうち、ロールプロフィール、原板プロフィールは時間の経過、材質などによって変化するもので安定化の対象とすべき因子である。またこれらのうち、材料の塑性特性(特に3次元変形)の様子は現状では十分に解明されていないものがあり、形状を十分に定量的に予測することは困難である。しかしながら、これら未知の因子について適当な仮定を用いることによって相対的な形状変化を推定できる。この様な考えから筆者らは、特にロールの弾性変形特性を数値解析、弾性理論、実験で解析することによって、4段ロール変形モデルを作成し、各因子の形状への影響度合を検討した。

2. 単純はり理論のロール軸変形への適用

薄板圧延に用いられるロールは、径と胴長の比が1/4~1程度のもので、剪断変形の量が曲がり量の10~30%にも達し単純はり理論の適否は明らかではない。そこで3次元有限要素法によるモデルを用いて検討を加えた。

図1に計算に用いたモデルを图示する。各要素は18節点の5面体要素と27節点の6面体要素を用いた。

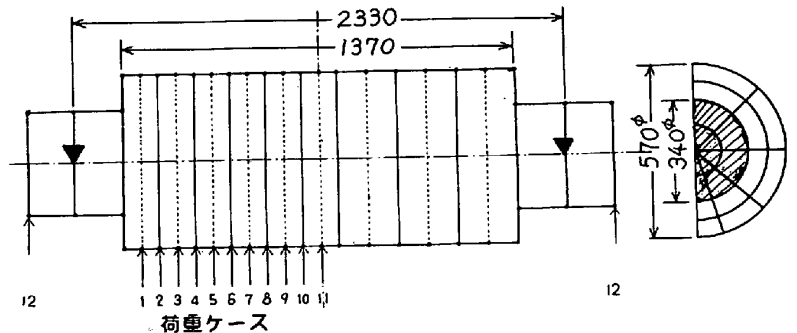


図1. 有限要素法解析に用いたモデル(作業ロール)

図2に荷重ケースIIの場合のロール軸と上表面母線の相対変位を弾性論からの解析解と比較して示す。はりの理論によれば¹⁾軸変形は(1),(2)式によって表わされ、

単純はり理論：
$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \dots\dots (1)$$

剪断変形：
$$\frac{dy}{dx} = \frac{K \cdot S}{A \cdot G} \dots\dots (2)$$

表面母線は(1),(2)式に更に式(3)を加えたもので表わされる。²⁾

ポアソン比効果：
$$y = \frac{r^2 \cdot \nu \cdot M}{2 \cdot E \cdot I} \dots\dots (3)$$

ここに y: 変位量, x: 軸方向座標, M: モーメント,
S: 剪断力, K: 定数, E: 弾性率,
G: 剪断弾性率, A: 断面積, r: 半径,
ν: ポアソン比, I: 断面2次モーメント

図2の結果から、はり理論の有限要素法との差は、軸変形で最大3~4%, 上表面母線変形で最大2~3%程度に収まっていることがわかる。

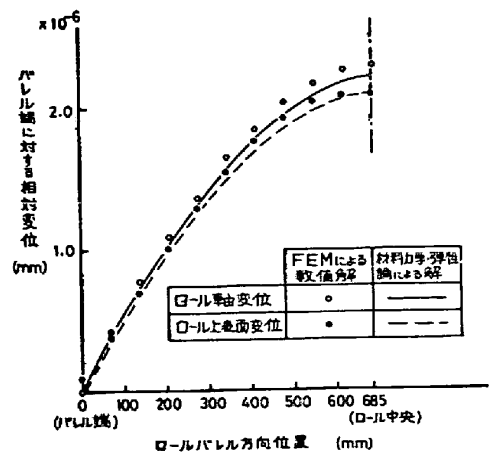


図2. 有限要素法解析と梁の理論との比較(荷重ケースII, 荷重2Kg)

3. ロール表面偏平の弾性論の適用

薄板圧延に用いられる圧延機は普通、4段ロール構造で材料と作業ロール、作業ロールと支持ロール

との間に接触変形が生ずる。この変形に関してはHitchcock³⁾の式やHertz⁴⁾の式が用いられているが、筆者らは有限要素法によってHertzの式の確性と、ロール軸方向への凹みの波及度について解析を行い、弾性解との比較を行った。

図3に2円筒の接触問題解析の有限要素モデルを示す。異径円筒接触の場合の小径ロールの変位を拡大して描いているが、偏平量は大径ロールより小さいことを表わしている。表1に接触巾についてHertzの式との比較を示す。荷重増分後段で最大3~4%の差に入っている。

ロール軸方向の凹み波及度は、ロール間接触圧力が不均一な場合、板端近傍でのロールと板の接触変形の評価の場合に重要となってくる。これを評価するため図4に示す様な3次元有限要素法モデルを作成した。

半無限体の表面変位についてはLoveが弾性論により式(4)の様に解析している。

$$u_0 = \frac{\lambda + 2\mu}{4\pi\mu(\lambda + \mu)} \cdot \frac{P}{r} \quad \text{----- (4)}$$

ここに u_0 : 表面変位量
 λ, μ : Laméの弾性係数
 P : 点荷重
 r : 点荷重からの距離

この式をKuhn, 戸澤らが分布圧力について積分解を求めている⁶⁾。

$$y = \frac{1-\nu^2}{\pi E} p \left\{ \ln \frac{\sqrt{l^2 + (\frac{x}{l})^2} + x + \frac{x}{l}}{\sqrt{l^2 + (\frac{x}{l})^2} + x - \frac{x}{l}} + \frac{x + \frac{x}{l}}{l} \ln \frac{\sqrt{(x + \frac{x}{l})^2 + l^2} + l}{|x + \frac{x}{l}|} - \frac{x - \frac{x}{l}}{l} \ln \frac{\sqrt{(x - \frac{x}{l})^2 + l^2} + l}{|x - \frac{x}{l}|} \right\} \dots (5)$$

有限要素法による数値解と式(5)との比較を図5に示す。荷重直下では両者に10%程度の誤差があるが、荷重部分から10mm以上離れた位置では差はほとんど見られない。有限要素法においては荷重直下で不連続性が表われていると考えられ、精度は明らかではないが、両者の相似性の良さが表わされている。

4. 4段ロール変形モデル

ロール曲げ変形、表面変形について各々解析解の精度について検討を加えたが、これらを組み合わせて4段ロール変形モデルを作成した。モデルの構成を図6に示す。分割モデルではあ

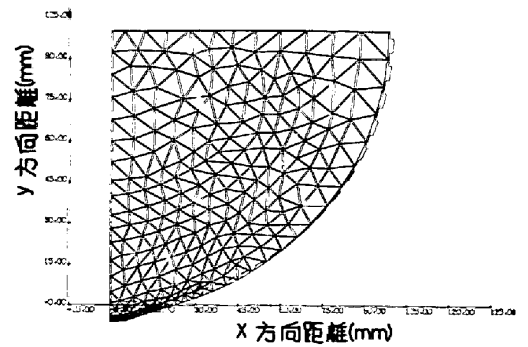


図3. 有限要素法解析による変位図

表1. 有限要素法結果とHertzの理論との比較

増分過程	接触角	荷重 P (Kg)	接触巾 (mm)		Hertzの式の近似度 1 - b _H /b _F
			有限要素法 b _F	Hertzの式 b _H	
1	0°10'	31.4	1.75	1.44	0.174
2	0°20'	181	3.49	3.47	0.007
3	0°30'	406	5.23	5.19	0.008
4	0°40'	775	6.97	7.16	-0.028
5	0°50'	1189	8.70	8.87	-0.020
6	1°00'	1734	10.44	10.72	-0.027
7	1°10'	2402	12.16	12.61	-0.037
8	1°20'	3077	13.89	14.27	-0.028
9	1°30'	3948	15.61	16.17	-0.036
10	1°40'	4813	17.34	17.85	-0.030

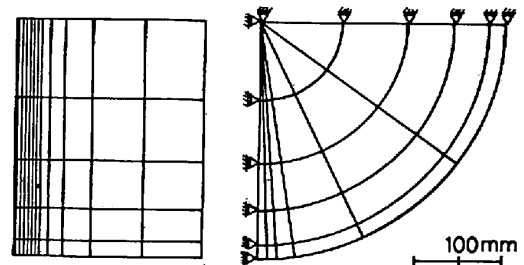


図4. 凹み波及度解析のための有限要素法モデル

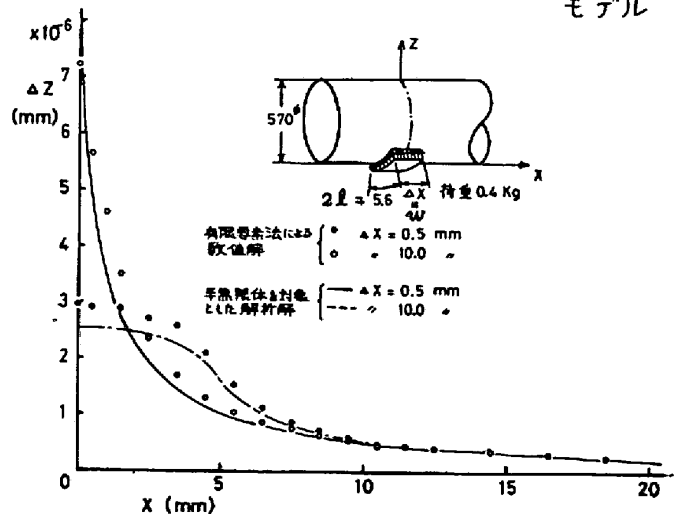


図5. 表面凹み波及度の解析結果

るが支持ロール作業ロール間接触変形にも凹み波欠度を用い、非接触部についての考慮も導入している。計算の流れを図7に示す。支持ロール、作業ロールの接触判定、接触圧力の収束、圧延荷重の収束の3重の収束ループから構成される。伸張率は式(6)で表わされるとする。

$$S(k) = (1-\alpha) \cdot \left(\frac{h(k)}{h_m} - \frac{H(k)}{H_m} \right) \dots (6)$$

- ここに h_m : 出側平均板厚
- H_m : 入側 " "
- $h(k)$: k メッシュ目の出側板厚
- $H(k)$: " " 入側 "
- α : 横流れ係数

横流れ係数 α は材料の3次元塑性変形特性に依存するもので、現時点では実験による他ないであろう。

計算結果の例を図8に示す。支持ロール、作業ロール間接触圧力がロール端で高くなっていること、板厚分布が板端付近で急減(エッジドロップ)している状況、板全体のクラウンの状況などを良く表わしていることが分る。

5. 4段ロール模型による変形測定

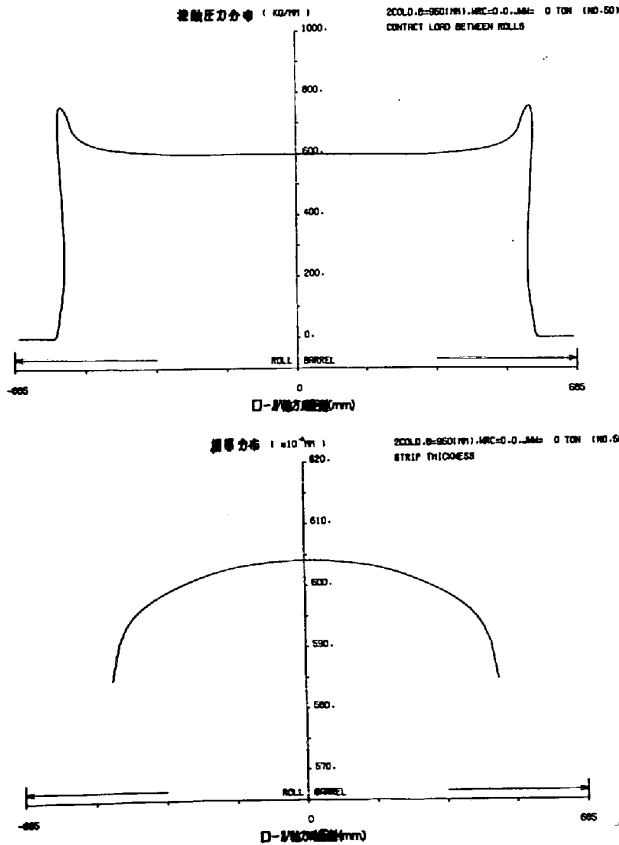


図8. 4段ロール変形解析結果の例

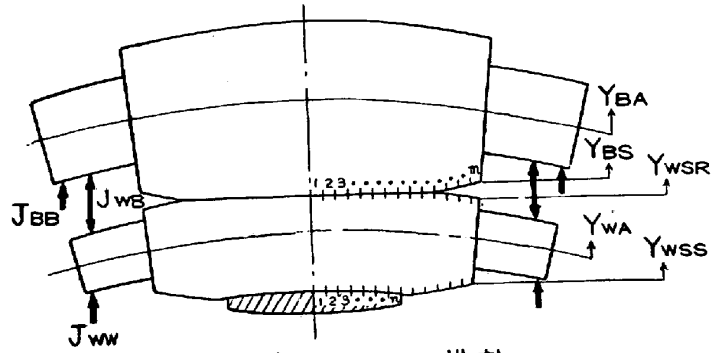


図6. 4段ロール変形モデルの構成

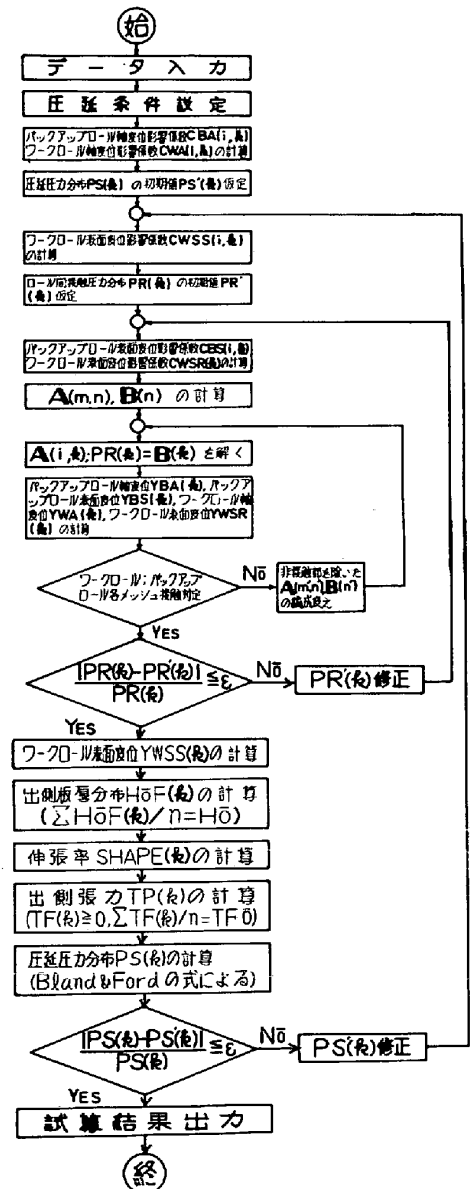


図7. 4段ロール変形モデルの流れ図

モデルの精度を確認するため作業ロール径50φ、胴長400、支持ロール径100φの4段ロール模型を用いてロールの軸変形を測定した。測定結果の一部を図9に示す。ロール端から40mmの位置と中央との変位の差を図10に表わす。

支持ロールと作業ロールの変位の差が両ロールの偏平量に相当する。(図9) 4段ロール変形

モデルとの一致は良く、凹み波及度の解析解の適用がほぼ妥当であることが分った。6. 形状影響因子の定量化

以上の様にして各変形因子を用いた4段ロール変形モデルによつて形状影響因子を解析した。形状評価関数として(6)式にて $\alpha=0$ とした値を用いた。実際の形状(伸張率)とは異なるが、相対的な比較には十分であると考えた。各因子による形状評価関数の変化率を表2に示す。ロールクラウン、原板クラウンが数10~100 μm 程度の変動を有することを考えるとワークロールベンダ力は100TON以上必要であり、現在普通に用いられているロールベンダでは十分な制御が困難なことが、板中によつてベンダー効果の異なることなどがわかる。

7. 結言

薄板圧延における形状影響因子のうち特にロール弾性変形についての精度の高い4段ロール変形モデルを作成した。各弾性変形因子の精度は数%以内で、モデルの精度も十分にあると考えられる。しかしながら実際の薄板形状は、張力分布の影響をも含めて材料の塑性特性に左右される場所が大きく、冷間圧延の場合、(6)式の α で代表される値が0.9に達する場合があり、⁵⁾この方面の研究が進められることが望ましい。

参考文献

- 1) 例之ば Timoshenko, S., & H. Young, "Element of strength of material", D. Van Nostrand co. inc.
- 2) Chieu, Y.P., A.S. Weinstein, C.F. Zorowski, Int. J. Mech. Sci., '63, Vol. 5, p119~135.
- 3) Hitchcock, J., "Roll Neck Bearings", American Soci. Mech. Eng. Research Publication (1935).
- 4) Hertz, H., "Gesammelte Werk", Leipzig, Germany, Vol. 1, 1895.
- 5) 例之ば Bernsmann, G.P., Iron & Steel Engineer, March, 1972, P67~71.
- 6) 戸澤, 上田, 塑性と加工, Vol. 11, No. 108, P29~37

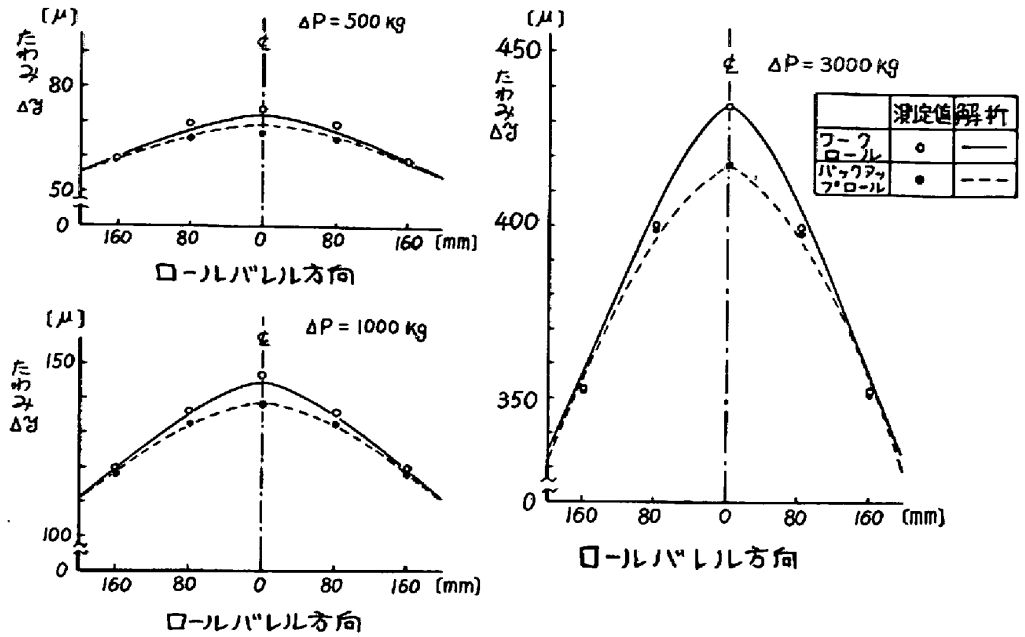


図9. ロール変形測定結果

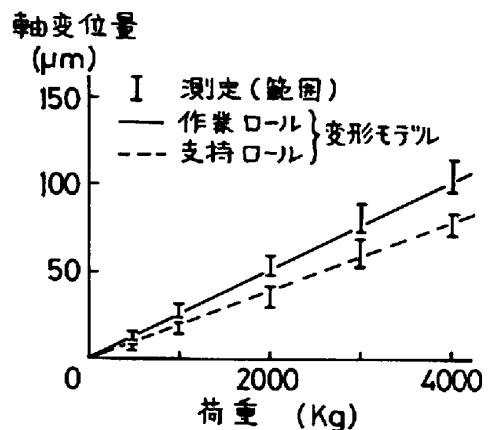


図10. 実験値とモデルの比較

表2. 形状影響因子の相対比較

板中	因子	耳波	中伸
950 mm	ワークロールベンダ	$4 \times 10^{-4} / \text{TON}$	$-2 \times 10^{-4} / \text{TON}$
	原板クラウン	$5 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$	$-3 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$
	圧延荷重	$-2.5 \times 10^{-5} / \text{TON}$	$2 \times 10^{-5} / \text{TON}$
	ワークロールクラウン	$4.5 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$	$-2.3 \times 10^{-4} / \mu\text{m}$
1233 mm	ワークロールベンダ	$6 \times 10^{-4} / \text{TON}$	$-3 \times 10^{-4} / \text{TON}$