

(討10) ローラーレベラーによる熱延コイルの矯正

日本鋼管 技術研究所

上野 康 ○藤田 米章

1. まえがき

熱延コイルをレベラーで矯正し、シャー切断したコイルカット鋼板においては、板の圧延方向の反り（し反り）及び巾方向の反り（c反り）が問題となることが多い。さらに、外見上フラットな鋼板を製造しても、需要家にて再切断すると新たな反り、ひずみが生じる欠点も見受けられる。このような板の平坦性不良に及ぼすローラーレベラーの設備的条件と作業条件の影響を数値計算により検討した。

2. 鋼板の反りと残留応力の解析方法

主たる仮定は次のようである。仮定1：鋼板の長手方向には引張り力は作用しない。また、バウシinger効果も無視できるとして、曲げの中立軸は常に板厚中心にあるとした。従って、応力とひずみは常に点対称に分布する。仮定2：レベラー通板中は板巾方向は常に直線を保つとする。仮定3：仮定1, 2により、板巾方向のひずみ増分は常に零となる平面ひずみとする。応力については、ストリップの長手方向と巾方向以外の成分は零となる平面応力とする。

2-1 矯正ロールの押しこみ分布と曲率分布の関係

ストリップの自重を無視し、連続ばりにおけるモーメントの定理を用いた弾性解をベースとしたため、定量的には問題がある。しかし、計算スピードが速いため、多くの事項が定性的に検討できた。例えば、図1に示した上側の昇降ロールが5本、下側の固定ロールが5本のレベラーにおいて、各ロール上で発生するストリップ曲率の弾性解は、(1), (2)式となる。

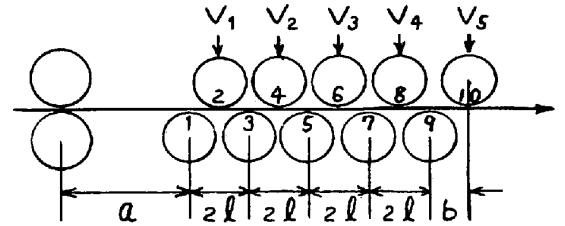


図1 ローラーレベラー

$$\begin{pmatrix} 6a+7l & -l & 0 & 0 & 0 \\ -l & 14l & -l & 0 & 0 \\ 0 & -l & 14l & -l & 0 \\ 0 & 0 & -l & 14l & -l \\ 0 & 0 & 0 & -l & 8b+7l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} K_1 \\ K_3 \\ K_5 \\ K_7 \\ K_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 36V_1/l \\ 36(V_1+V_2)/l \\ 36(V_2+V_3)/l \\ 36(V_3+V_4)/l \\ 36V_4/l+24V_5/b \end{pmatrix} \dots\dots(1)$$

$$K_{2n} = -[(K_{2n-1} + K_{2n+1})/4 + 3V_n/l^2] \quad (n=1\sim 4), \quad K_{10} = 0 \dots\dots(2)$$

ここに、K：曲率、V：ロール押しこみ（図2の状態をV=0とする）、a, l, b：ロールピッチ（図1参照）

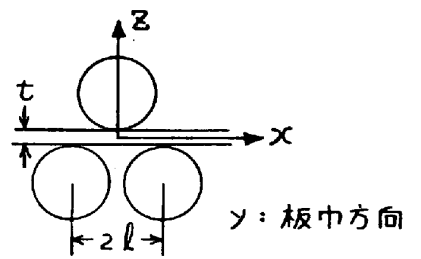


図2 圧下V=0の説明と座標系

2-2 ストリップ曲率の履歴に対応した応力の履歴

ストリップがレベラー内でこうむる曲率Kの履歴がわかると、仮定1により、板厚内の任意点のひずみ履歴は(3)式から求まる。 $\Delta \epsilon_x = \sum \Delta K \dots\dots(3)$ ここに、 ϵ_x ：長手(X)方向のひずみ、z：板厚方向とし、板厚中心をz=0とする。（図2参照） さて、(3)式で与えられたひずみ変化に対応した応力の変化は、仮定3の巾方向平面ひずみ ($d\epsilon_y = d\epsilon_y^e + d\epsilon_y^p = 0$) の条件から(4), (5)式のように計算される。まず、弾性変形に対しては、 $d\sigma_x/d\epsilon_x = E/(1-\mu^2)$, $d\sigma_y/d\epsilon_x = \mu E/(1-\mu^2)$, $d\epsilon/d\epsilon_x = 0 \dots\dots(4)$

ここに、 σ_x : 長手方向応力, σ_y : 巾方向応力, ϵ : 相当ひずみ, E : ヤング率, μ : ポアソン比
次に、塑性変形を含む場合は、相当応力 σ と相当ひずみ ϵ の関係が既知とし、 $\sigma = F(\epsilon)$ とすると
 $B = [dF(\epsilon)/d\epsilon] F(\epsilon)$, $P = 4B(\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)^{1/2}$, $Q = (5-4\mu)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2) + 2(5\mu-4)\sigma_x\sigma_y + P(1-\mu^2)/E$ と定義して

$$\left. \begin{aligned} d\sigma_x/d\epsilon_x &= [(2\sigma_y - \sigma_x)^2 E + P]/Q \\ d\sigma_y/d\epsilon_x &= [\mu P - (2\sigma_y - \sigma_x)(2\sigma_x - \sigma_y)E]/Q \\ d\epsilon/d\epsilon_x &= 2(\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2)^{1/2} [\mu(2\sigma_y - \sigma_x) + (2\sigma_x - \sigma_y)]/Q \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

特別な場合として、非加工硬化材では $B=P=0$ となるので、塑性曲げが一方向に継続している間は、応力状態は $2\sigma_y = \sigma_x$ ($d\epsilon_y^p = 0$) の状態に近づき、収束する傾向が(5)式からうかがえる。

2-3 レベラー矯正後の弾性回復と残留応力

レベラー通過後はロールによる拘束が解かれるため、弾性回復が生じる。仮定2を用い、さらに自重の影響を無視すると、鋼板の最終形状は、(6)式で計算される。

$$\left. \begin{aligned} L \text{ 反りの曲率 } 1/R_L^* &= 1/R_L + 12(\mu M_C - M_L)/Et^3 \\ C \text{ 反りの曲率 } 1/R_C^* &= 12(\mu M_L - M_C)/Et^3 \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

$M_L = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x Z dz, M_C = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_y Z dz$

ここに、 t : 板厚, $1/R_L$: ストリップ曲率, M_L, M_C : 単位長さあたりの曲げモーメントで、いずれも弾性回復直前の値とする。なお、残留応力分布は、(7)式で示される。

$$\text{長手方向残留応力 } \sigma_x^* = \sigma_x - 12M_L Z/t^3, \text{ 巾方向残留応力 } \sigma_y^* = \sigma_y - 12M_C Z/t^3 \dots\dots (7)$$

以上、2-1, 2, 3 を組合せて、任意のローラーレベラー矯正を受けたコイルカット鋼板のL反り、C反り、及び残留応力などが計算できる。

3. コイルカット鋼板のC反りの原因

残留応力フリーの熱延コイルを1回の曲げもどして矯正した場合、その過程が十分に塑性変形を含むものなら、(3)~(6)式を用いてC反りは(8)式のように近似計算される。

$$C \text{ 反り曲率 } 1/R_C^* \approx 2\sqrt{3}(1/2 - \mu)\sigma_s/Et \approx 0.7\sigma_s/Et > 0, \sigma_s: \text{降伏応力} \dots\dots (8)$$

つまり、コイルを平らに巻きもどすこと自体が正のC反り(図3参照)と宿命的に結びついていると云えよう。実際、アンコイラーのプレッシャーロールとピンチロールの間では正のC反りが観察されており、このC反りがレベラーで矯正されきれずに製品に残留するケースもある。なお、様々なくりがえし曲げを与えた模擬試験によれば、(3)~(6)式によるC反りの計算値と実験値は極めて良く対応しており、先述の仮定と諸式がC反りの発生メカニズムを十分に記述していると同時に、C反りの主たる原因と対策がコイルを巻きもどし、矯正する過程にあると考えられる。一般に、C反りの向きは最終の塑性曲げの向きに支配されやすく、塑性曲げモーメントが負の場合は正のC反りとなり、正のモーメントの時は負のC反りとなる傾向がある。(図3参照) また、曲率の絶対値が漸減し、弾性比率が漸増するくりかえし曲げのパターンではC反りは小さい。

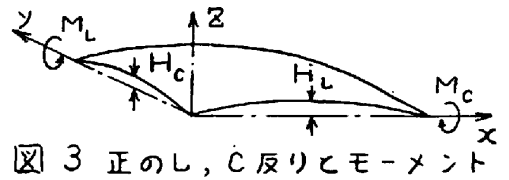


図3 正のL, C反りとモーメント

4. アンコイラーレベラーに関する検討

熱延シャーラインにおけるアンコイラーレベラーでは、図4(イ)に示すように、上側の矯正昇降ロールが2本のものが多く見受けられるが、この型式では、正のC反りが発生しやすい。いま、2本の昇降ロールに正の圧下 ($V_1, V_2 \geq 0$) を与えるとして、 V_1, V_2 がL反りとC反りに及ぼす影響を

計算してみると、図5のようになる。(図5(イ)の2本の曲線を参照)これによれば、L反り、C反りがともに零となる V_1, V_2 の組合せがない。つまり、正のC反りを防止するには、オ2ロールの圧下 V_2 を大きくとる必要があるが、これは出側でのストリップのはねあがり(負のL反り)を生じるため、実際には正のC反りを残したまま作業せざるをえない欠点がある。そこで、図4(ロ)に示すように昇降ロールを1本追加し、3本とした場合の特性を検討してみた。

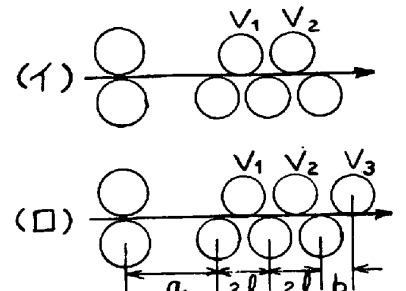


図4 アンコイラーレベラー

この型式では、まず、出側ロールの圧下 V_3 は任意の V_1, V_2 に対し、L反りが零になるように設定すればよい。このような条件は、例えば $b=1.15l, Q=4l$ の場合は(9)式のごとく重回帰分析された。

$$V_3 = -0.059 V_1 - (1.95 - 0.006 \sigma_s) V_2 + 0.0004 \times l^2 / t \quad [\sigma_s: \text{Kg/mm}^2 \text{で表示}] \quad \text{--- (9)}$$

(9)式によれば、L反りは主として V_2 と V_3 の関係で定められることがわかる。次に、(9)式の条件のもとで、 V_1, V_2 がC反りに及ぼす影響を図5の中に示すと(ロ)の実線となる。つまり、 V_1, V_2, V_3 を適当な比率で選択すれば、L反りとC反りをともに零とすることができる。また、図5によれば、昇降ロールが3本の型式の方がC反りが負となる V_1, V_2 の領域が広い。

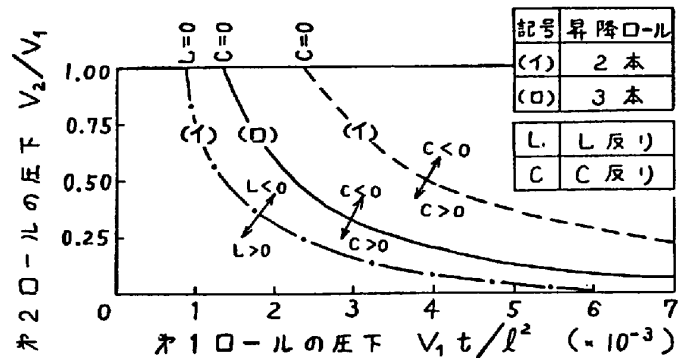


図5 アンコイラーレベラーにおけるL,C反りの特性 ($\sigma_s = 30 \text{ Kg/mm}^2$)

従来、問題となっていた正のC反りは、独立昇降ロールが3本あるアンコイラーレベラーでもって、オ2ロールを強圧下すれば完全に防止できる。

5. ファイナルレベラーに関する検討

熱延シャーラインにおけるファイナルレベラーは、図6(イ)に示すように、上側のロール群が連動して昇降する型式が多い。連動ロール数は通常4~6本である。また、作業条件がばらついた時の特性に関連して、図6(ロ)に示した分割型レベラーもあわせて検討してみた。

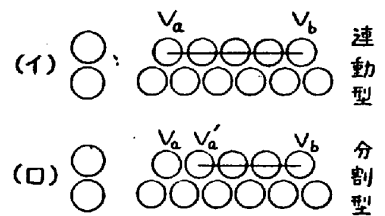


図6 ファイナルレベラー

ここに、分割型とは、入側ロールで強圧下を与えるとともに、入側ロールとは無関係に動きうる連動部で軽圧下を与える型式を指す。

さて、連動ロールが $N=5$ 本のレベラーにおいて、出側の圧下を $V_b=0$ とした場合、入側圧下 V_a と矯正後のL反りとの関係を図7に示す。これによれば、 $V_a t / l^2 > 2 \times 10^{-3}$ の範囲では矯正前の形状の影響はほとんどなくなるが、 V_a をさらに大きくしてもL反りは必ずしも零に収束する傾向はない。つまり、平坦な板を生産するには入側の圧下を注意深く管理する必要がある。矯正前の影響がない圧下範囲内で、入側圧下の誤差影響を少なくするには、出側ロールに若干の圧下 ($V_b t / l^2 \approx 6 \times 10^{-4}$) を加えることも有効である。

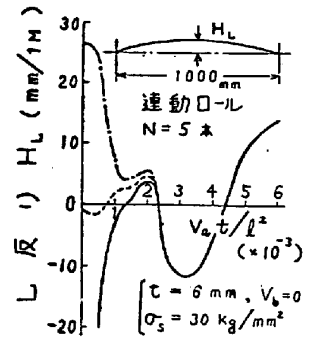


図7 L反りの矯正効果

次に、図8には $V_b=0$ とした時のL反り特性に及ぼすロール本数の影響を示す。連動ロール15本のケースでは、入側の圧下を $V_a t / l^2 > 2 \times 10^{-3}$ に設定しておけばL反りは問題なく良好であり、入側圧下の設定値と矯正前の形状が少々ばらついても平坦性の良い鋼板が安定して生産できる特徴がある。さらに、図9に残留応力に及ぼすロール本数の影響を示すが、ロール本数が多いほど残留応力は

細分化され、残留弾性エネルギーのレベルは低い。従って、ガス切断しても、残留応力と熱応力の相互作用によって誘起されるひずみの発生も少ないと考えられる。次に、矯正条件の各要因がばらついた時の特性を検討してみよう。例えば、表1に示すように、矯正前の形状、降伏応力、板厚及びレベラー入側の圧下が若干ばらついた場合、最終製品のL反りとC反りに及ぼす影響を調べたものが図10である。外乱による反りのばらつきを評価するため、ここでは標準偏差を計算した。これによれば、レベラー型式は分割型の方が連動型よりも反りの標準偏差は小さく、外乱の影響を受けにくい。つまり、分割型にて、入側で $V_a t / l^2 \approx 2.3 \sim 4.3 \times 10^{-3}$ の強い圧下を加えておき、連動部の最初のロールには、 $V_a t / l^2 \approx 1.0 \sim 1.5 \times 10^{-3}$ の軽い圧下を与え、徐々に小さくしていく方が安定してフラットネスが良好である。また、昇降ロール数は多いほど反りの偏差は小さくなり有利であるが、分割型では可動ロールが10本以上では大差ない。

6. 条切り後のL反りに及ぼすロールベンディングの影響

矯正ロールが荷重によって曲がったり、ロールレベルに不良があったりすると、矯正条件が巾方向に一樣でなくなるので、たとえ、外見上フラットな鋼板を製造しても、需要家にて圧延方向に再切断されると、図11に示すように各スリットに新たな反りが発生してしまふ。1例として、図4(口)に示した型式のアンコイラーレベラーを対象とし、Buck up Rollがない場合を検討してみよう。アンコイラーレベラー通過後の板を10条に切断したとして、各スリット片に生じるL反りの標準偏差を計算し、ロール径との関係を調べたものが図12である。これによれば、ロールベンディングの影響は極めて大きく、小径ロールでは条間のL反りのばらつきが大きい。厚ゲージ、広巾コイルの矯正にあたっては、ロールの曲がり防止するBuck up システム、あるいはロールベンディングを補償するメカニズムの採用とロールレベル差の細心の管理が重要なポイントとなることがわかる。

表1 与えた外乱

外乱要因	ばらつき範囲
矯正前	H_L $0 \pm 20 \text{ mm} / 1M$
	H_C $0 \pm 6 \text{ mm} / 1M$
σ_s	$30 \pm 5 \text{ kg/mm}^2$
t	$6.0 \pm 0.5 \text{ mm}$
V_a	$3.1 \pm 0.5 \text{ mm}$
V_a'	$1.8 \pm 0.5 \text{ mm}$

* 分割型のみ適用

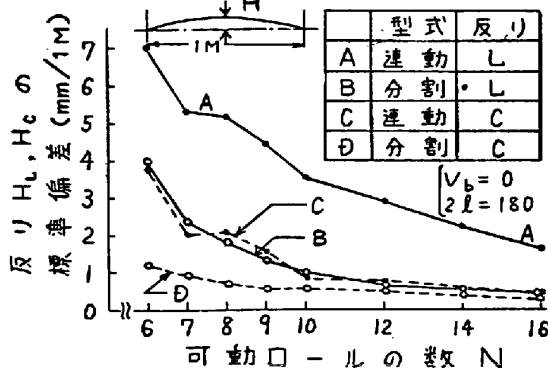


図10 外乱要因による反りのばらつき

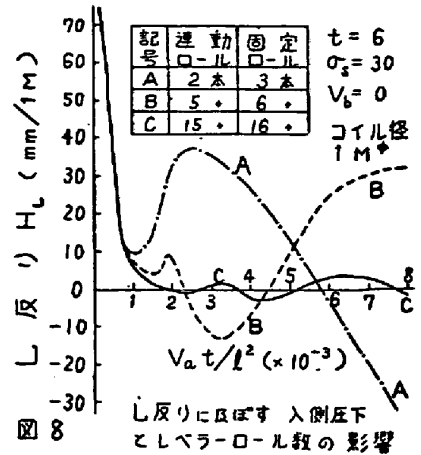


図8

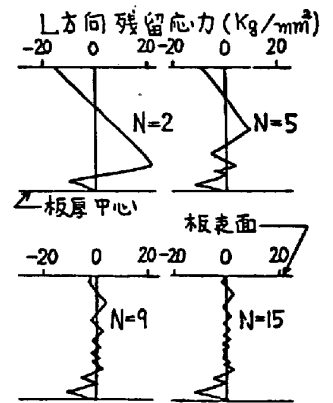


図9 L方向残留応力分布に及ぼす連動ロール数Nの影響例 ($\sigma_s = 30$)

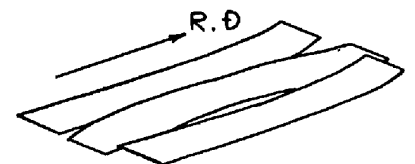


図11 条切りによるひずみ

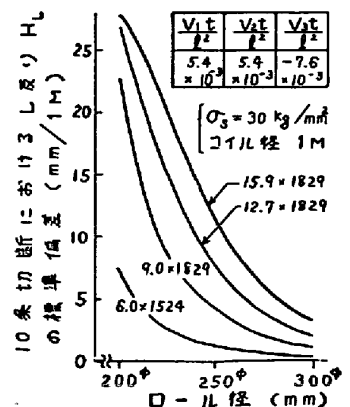


図12 アンコイラーレベラーにおけるロール曲がりによる条切り成績の例