U.D.C. 621.771.014.3-52: 621.771.237.019

ストリップ圧延における自動形状制御

Automatic Shape Control in Cold Strip Rolling

梶原利幸*藤野伸弘*杉山徳治* Toshiyuki Kajiwara Nobuhiro Fujino Tokuji Sugiyama

旨

要

ストリップ圧延における形状の問題に関して,形状の特質,日立式形状検出器の原理と特性および本形状検 出器を用いての自動形状制御ならびに形状におよぼす諸因子の影響についてその概要を述べる。

1. 緒 言

ストリップの品質を左右するものとして板厚精度および形状の良 否が二大要素にあげられる。このうち板厚精度については,自動板 厚制御の理論,板厚検出および制御方式も確立され実用されている。 一方形状制御については,ロールベンディングによる有効な手段が 実用化され,ロールベンディングの理論解析も種々行なわれている が⁽¹⁾⁽²⁾,形状の良否を判定する形状検出器については,最近に至っ て種々の方式が試みられてはいるが^{(3)~(7)},実際の圧延での制御は もっぱらオペレータの目視にたよっているのが実状である。

形状の検出が困難なのは, 圧延中張力の作用している状態では形 状の不良が張力によって見えなくなるためである。張力が作用しな



いときに見える形状不良は張力をかけると見えなくなるが、板幅方 向の張力分布の変化となって現われるはずである。日立製作所では この事実に着目し二本ローラ式形状検出器を開発し⁽⁸⁾、スキンパス ミルに試用し、その原理を確認した。さらに、5スタンドコールド タンデムミルではこの形状検出器とロールクラウン制御との組合せ により、自動形状制御を試みオンラインにおける実用化に成功した。 また、従来定量的に確認されていなかったロールクラウン制御量や 他の要因と形状の関係をこの形状検出器を用いて把握(はあく)する ことができたので本稿でそれについて報告する。

2. ストリップの形状についての検討

2.1 ストリップの形状不良

一般にストリップの形状とは板の平坦(へいたん)さを示す。すな わちストリップを切板として定盤上においたとき,波打って見える 板は形状の悪い板とされている。これは板幅方向の不均一な伸びの ためによるもので,伸びの大きい部分が小さい部分に拘束され,波 打って見えるものであり,大別して片のび,耳のび,中のびに分類 される(図1参照)。

形状の良否を数値的に表わすものとして一般に急しゅん度が用いられている。これは図2に示す定盤上においた切板の波の高さをδ, 波の長さを1とすれば、

急しゅん度
$$\lambda = \frac{\delta}{l} \times 100$$
 (%)(1)

で示される。一方形状はまた板幅方向の伸びの不均一さでも表わす ことができる。すなわち基準長さに対する伸び率で示される。図2 において、板の波を正弦曲線と仮定して線積分すれば

$$\Lambda I = \pi^2 \langle \delta \rangle^2 \langle -2 \rangle^2$$



(1) 素材の形状とクラウンともに良好なとき

(2) 素材の幅方向の厚みと長さの積が一定の場合

のみで、これ以外の場合は、クラウン、形状を同時に良好にはでき ない。しかし実用的見地からは、形状のほうが重要であり、クラウ ンを犠牲にして形状を優先にし、板幅方向の伸び率を一定に制御す ることが実用上必要である。

この関係について若干述べると,すでに報告されているように⁽⁸⁾, 図3の(a),(b)のように素材が均一な板の圧延後のクラウンと形 状の関係を調べると,図より次式が成立する。

 $(h-\Delta h)(l+\Delta l)=lh$ (3) h≫ Δh の場合は

この関係より今,板厚で中央が1%中高の板を考えると板厚精度 としてはこの値はさして問題にならない値であるが,これを修正し ようとすると中央部が1%長くなり,(2)式,(4)式の関係より急 しゅん度は約6%となり,板厚精度1%とは比較にならない不良品 となる。またこのことから,クラウン(板の幅方向の板厚)を検出し ての形状制御は理論的にも,また検出能力の点からも不適当である ことがわかる。 一方, 圧延中のストリップには張力が作用しており,図3(b)の ストリップの圧延中の張力分布は図3(c)のようになり,この張力 分布を測定することにより形状の測定が可能となる。図3(c)にて



で示される。本文では形状を示す尺度として、λまたはεを用いる。 2.2 ストリップの形状と板のクラウンとの関係 板幅方向の厚みの不均一性を板のクラウンと呼ぶことにすると、 クラウンと形状とは同意語ではなく、この両者が一致する条件は、

* 日立製作所日立工場

12

843 ストリップ圧延における自動形状制御



ストリップの形状不良の目視限界(鉄の場合) 図 4

張力差 1o と板ののびの関係は

	1	2	3	4 中の1 ^K	
板形状	平たん	片のび	耳のび		
張力分布	X _s G	X			
V ₁	=0	+0	=0	=0	
V ₂	=0	= 0	<0	>0	
重心の位置	$X_g = \frac{B}{4}$	$X_g > \frac{B}{4}$	$X_g < \frac{B}{4}$	$X_g > \frac{B}{4}$	

表 1





荷重計

鋼の場合 $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ であるから,急しゅん度 $\lambda = 1\%$ の板は(6)式より $\Delta \sigma = 5.2 \text{ kg/mm}^2$ となり、この値は通常の圧延に おいては、平均張力が3~10kg/mm²であるので測定可能な値であ り, 張力分布を測定することにより形状の良否を検出できることを 示すものである。

2.3 形状不良の目視限界

圧延中ストリップに張力が作用しているため,形状の良否を目視 で判別するのはむずかしく,特に急しゅん度の小さいものは不可能 といってもよい。張力の大きさと形状不良の目視限界について定量 的に考察してみる。

図4は張力分布と形状不良の目視の可否の関係を耳のびの場合に ついて示したものである。(a)は形状不良が目視できない場合であ り、(c)はストリップの両端の形状不良が耳のびとなって目視され る場合,(b)は形状不良の目視限界の場合の張力分布を示すもので ある。図4(b)にて張力分布を2次曲線と仮定すると張力分布 $\sigma(x)$ は次式で示され

$$\sigma(x) = \frac{-4\sigma x^2}{B^2} + \sigma \dots (7)$$

ここに, B: 板 幅, σ: 中央張力

圧延中の平均張力 σ_m は張力分布 $\sigma(x)$ を板幅 B で積分したものが 全張力であることより次式を得る。

∘B

図5 形状検出器原理と自動形状制御説明図

鋼の場合には $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ であるので,

$$\sigma_m = 3.45 \lambda^2 \qquad \dots \qquad (11)$$

または
$$\lambda = 0.54\sqrt{\sigma_m}$$
(12)

(11),(12)式が形状不良の目視限界を示すものである(図4)。 通常冷間圧延では出口側張力は 3~10 kg/mm² であるので(12) 式より急しゅん度 λ=0.94~1.7% 以下の形状不良は目視では検出で きないことになる。

3. 日立式形状検出器

以下に日立式形状検出器の原理,特性,特長などについて説明 する。

3.1 日立式形状検出器の原理

形状検出器の原理についてはすでに発表済(8)(9)であるので、ここ では簡単に説明する。表1および図5はその原理図を示したもので ある。

ストリップの形状と張力をかけて圧延している場合の張力分布は 表1に示すような関係にある。この張力分布を板幅方向に二分割し たローラにより張力の垂直分力をモーメントにおきかえ、ローラの 支持点に設けた4個の荷重計に作用する力の大小で荷重分布の重心 点を求めて形状を判定するのが本検出器の原理である。すなわち左 右のローラに作用する力の大小により片のびを,1個のローラに作 用する張力分布の重心点の変化により, 耳のび, 中のび, 平坦を区 別する。表1および図5において V_1 は片のびを、 V_2 は耳のび、中 のび,平坦を判別する演算値で,表1のV₁,V₂に示すようにその極 性により形状を判定することができる。V1, V2は次式で示される。 $V_1 = (P_1 + Q_1) - (P_2 + Q_2)$ (13) $V_2 = P_2 - \alpha Q_2 \qquad \dots \qquad (14)$ ここにαは板幅補正係数と称し, 平坦な形状でも板幅が変われば 張力分布の重心点の位置が変化するのでこれを補正する係数で次式

13



(6)式の $\Delta \sigma \geq (9)$ 式の σ は同じものであることから両式より

844 日立評論

No.5スタンド出棚テンション - |- ls No.4~5スタンド間テンション 88 80 No.5スタンドクラウンカ(凸) -60 40 28 t No5スタンド圧延圧力 780t 中のび 0.6 V2---0.6 0.9 0.93% 耳のび 1.1 操作側のび 300 V1----0-300^L kg 駆動側のび 带鋼寸法:932W×0.8T 圧延速度:500m/min

図6 No.6 スタンドクラウン力の変化と伸びの変化

で示される。

$$\alpha = \frac{B - 4m}{4n - B}$$
.....(15)
この関係より (14) 式は次式で示される。
$$V_{2} = \frac{4F\left(x_{g} - \frac{B}{4}\right)}{4n - B}$$
....(16)

ここに、 F: 張力の垂直分力 xg: 重心位置

3.2 形状検出器の特性

ストリップの形状は(16)式の V_2 の値の極性で決定されるが、 V_2 の値と急しゅん度の関係を求めてみる。





図5にて検出器に作用する合力の大きさは板の中心を原点にとり 板幅方向に x 軸をとると

k: 張力の垂直成分を示す係数 ここに, *t*: 板 厚 合力 F の位置 x_g は

張力分布を二次曲線と仮定すると

(16), (17), (18), (19) 式より

14

$$V_2 = \frac{-kt B^2}{12(4n-B)} (\sigma_2 - \sigma_1) \dots (20)$$

(6)式および $\Delta \sigma = \sigma_2 - \sigma_1$ の関係より

(21), (22)が求める V_2 と急しゅん度 λ との関係式である。

3.3 形状検出値と実測値の比較

形状検出器の検出能力を確認するため、圧延中形状検出器で検出 した値と, 圧延後定盤上で実測した値との比較を行なった。この結 果について述べる。

本測定は川崎製鉄株式会社水島製鉄所納め5スタンドコールド タンデムミルにて行なわれた。圧延機の主仕様は下記のとおりで ある。

ロール寸法: 610^{\$\phi\$} & 1,520^{\$\phi\$}×1,730 mm (幅)

品: 板幅 600~1,600 mm, 板厚 0.25~3.2 mm 成

E延速度: 1,500 m/min

E 延 E 力: 最大 2,500 t E 下装置 HYROP

図6は、形状検出のオシログラムの一例を示したものである。こ れをみるとクラウン力の変化により形状が変化してゆく状態が明ら かに認められる。

形状検出値と形状実測値の比較を示したのが図7である。図より 全板幅に対して検出値と実測値の差は±0.3%以内にはいっており, 本検出器の実用性を証明している。急しゅん度 λ=2% 以上では検

	測 定 対 象 の 現 象	形出	方 法	検	出要	素	複合伸び の検出	不可視形 状検出の 可 否	きず付の お そ れ	その他
非接触式	ストリップのうねり	ストリップにスリット状光線を投射し他方からテレ ビカメラで光線の曲りを測定		テレビカメラ			0	×	無	ふん囲気の悪い所では使 用できない
		ストリップのうねりのピッチを磁気的に測定 (幅方向数点)		磁気トランス デューサ			0	×	無	}ストリップと検出器間の
	張力分布	ストリップ内に発生した内	内部応力を磁気的に測定		えトラ ューサ	ンス	0	0	無)距りが問題
接	張力分布	板幅方向に分割した多数 個のローラに作用する力 により張力分布を測定	ローラ内に荷重計内蔵	荷	重	計	0	0	有*	
			ローラ外に荷重計	荷	重	計	0	0	有*	
触	板幅方向に分割した2本のローラに作用する張 布をその重心点の移動により測定		ローラに作用する張力分 り測定	荷	重	計	×	0	有*	
式	伸び量	板幅方向に分割した多数個のローラをストリップに 接触させローラの回転数の差より伸び量を測定する			転	計	0	Δ	有*	

表2 各種形状検出器の比較

注:* 本表中, きず付の欄に「有」とあるのは理論上のことで実際にはローラの形状などの工夫により支障ないとされている。

ストリップ圧延における自動形状制御 845



図8 ロールクラウン力と形状の関係(実測値)



図9 最終スタンドの圧延圧力の形状に及ぼす影響



図10 入口側張力の形状に及ぼす影響

出器の出力が飽和する傾向にあるが,これは2.3 で述べた目視限界 との関連によるもので,図4(c)のように圧延中の伸びが大きすぎ る部分には張力がかからないためであり,飽和開始点は(12)式によ り平均張力にて決まる。しかし,形状検出器の目標とする点は,目 視限界を越えた急しゅん度の小さい部分であり実用上さしつかえ ない。

3.4 日立式2ローラ式形状検出器の特長

表2は,現在発表されている各種形状検出器の比較表である。この比較において,日立式2ローラ式形状検出器の得失を示すと次のようになる。

(1) 構造が簡単である。

構成要素は2本のローラ,4個の荷重計,支持装置,演算器と 数は少ない。

(2) 簡単に耳のび、中のび、平坦が検出でき、ロールベンディ ングによるクラウンコントロール方式に最適である。

多点検出方式では張力分布をより細かく測定できるが,これに よりロールベンディングでクラウンコントロールを行なうにはこ の測定値を総合的に判断して耳のび,中のびなどの信号を与える 必要があるが,日立式形状検出器では,この多点式検出器の各点 での検出値を総合したものを直接検出値として出すことがで きる。

(3) 複合のびは検出できない。

これは最大の欠点であるが,現状では複合のびの修正方法がなく,このことにより実用性をそこなってはいない。

(4) 分割ローラによるきず付のおそれ。

分割ローラであるため2本のローラ間のすき間でのストリップ へのきず付が懸念されたが,ローラの先端の加工に工夫をこらし た結果1年間使用したがきず付の問題を生じていない。



図11 前スタンドのクラウン力の形状に及ぼす影響

4.1 クラウンカと形状の関係

ロールネックに力を作用させストリップの形状を制御するロール クラウンコントロール方法にて、この力を変化させた場合いかに形 状が変化するかを把握することは、自動形状制御を発展させる上に 重要な事柄である。今回各種板幅のストリップについてこの力と形 状変化の関係を測定した。この結果を図8に示す。

4.2 形状制御を行なうスタンドでの圧下の影響

図9はこの実測結果を示したものである。圧延圧力を減少する と,板の形状は耳のびより中のびの方向に変わることを示しており, 圧延圧力 500 t の変化に対して形状は急しゅん度が 1.5% より 0.6% に変化している。これは伸びの変化量で *Δl/l*=0.046% に相当する。 **4.3 入口側張力の変化の影響**

4. 形状に及ぼす諸因子の影響

従来圧延中の形状を定量的に測定することは不可能であったが, 形状検出器の出現により可能となった。そこで圧延中の形状に及ぼ す諸因子の影響を調べてみた。この結果を以下に述べる。 図10は入口側張力(No.4~No.5スタンド間張力)を13tより 22tまで9t変化させた場合のオシログラムである。図10より明ら かなように,形状はほとんど変化していない。この結果入口側張力 を変えても形状の変化はきわめて少ないことがわかった。このこと は,コールドタンデムミルの自動板厚制御で最終スタンドでの張力 制御(最終スタンドの入口張力の制御)で板厚を制御する方式では形

15

846 日 立 評 論

VOL. 53 NO. 9 1971

状に悪影響を与えるという理由のみで,張力制御をさら に前スタンドで行なうことが意味の少ないことを示して いる。

4.4 前スタンドのクラウン力の影響

前スタンド(No.4スタンド)のクラウン力を45t変化 させた場合のオシログラムは図11に示すとおりである。 これより前スタンドのクラウン力の変化45tに対し,次 スタンド形状は急しゅん度で $0.8\% \rightarrow 0.5\%$ に 0.3% 変化 しており,これは伸びの変化量で 0.009%に等しい。自 スタンドでのクラウン力の影響は先に図 8に示したが, これからクラウン力45t変化させた場合,伸びの変化量 は板幅 750 mm から 1,232 mm のものについいて 0.07%から 0.146%となっている。したがって自スタンドのク ラウンコントロールの効果は前スタンドのそれの約7~ 16倍大きいと言える。ただしこれは圧延条件の異なる場 合の比較であり,データも少ないので一概に断定できないがおもし ろい事実である。

5. 自動形状制御

図5に示したように形状検出器からの信号 V₁, V₂に対応して制御を行なえば形状は修正されるはずである。

まず信号 V_1 により $V_1=0$ となるよう圧下修正をして形状不良を 対称形にする。ついで $V_2=0$ となるようクラウン力を変化させれば 平坦な形状のストリップが得られる。この形状信号と修正動作の間 に人間が介在し自動制御,自動形状制御回路を入れれば自動形状制 御が行なわれる。自動形状制御の方法としてサンプリング制御と, 形状の偏差量に比例した修正量を与える比例制御などがある。修正 速度の速さでは後者がすぐれているが,クラウン力と形状の関係が 理論的に解明されていない現状では,この方法は採用できず,サン プリング制御を採用せざるをえない。形状の変化は緩慢であるので 実用上サンプリング制御でじゅうぶんである。



図12 自動形状制御の実例表

6. 結 言

ストリップの形状の問題について,形状検出の理論,日立式形状 検出器,形状に及ぼす各要因の影響および自動形状制御について概 説した。今後さらに自動形状制御を発展させていくためには,形状 制御の圧延理論ともいうべきものの確立,クラウン力と形状の相互 関係など未解決の分野が多く残されている。今後は,これらの問題 解決のため努力を重ねてゆく所存である。

今回,川崎製鉄株式会社と日立製作所が共同して実用の5スタン ドコールドタンデムミルで自動形状制御を試み実用化に成功し,冷 延鋼板の品質向上ばかりでなく,次工程での作業能率向上をももた らすことができた。図12は代表的オシログラムである。これをみ ると自動形状制御入と同時に修正信号が出され形状が修正されてゆ くのが明確に認められる。なお自動形状制御を止めると直ちに形状 が悪化してゆくのが認められ,これからも自動形状制御の効果が明 らかにわかる。 形状制御のように, 圧延現場と直結した研究は, メーカー単独で は完成し得ず, 今後もこのような研究に対するユーザー各位のご指 導, ご協力を切望してやまない。

終わりに臨み,本研究の遂行にあたって終始ご援助,ご助言をい ただいた川崎製鉄株式会社水島製鉄所の関係者の皆様に深甚の謝意 を表する次第である。

参考文献

- (1) M.D. Stone: Iron and Steel Engr. 73 (August, 1965)
- (2) 塩崎: 塑性と加工 9,315 (1968-5)
- (3) T. Kawamata ほか: International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel 論文集 382
- (4) J.G. Wistreich: International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel 論文集 366
- (5) M. Henze, O.G. Sivilott: International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel 論文集 374
- (6) O. Pamelski ほか: International Conference on the Science and Technology of Iron and Steel 論文集 376
- (7) 柴田, 江森ほか: 第33回塑性加工シンボジウム前刷 55
- (8) 原口, 梶原, 秦: 機学誌 73, 9 (1970-5)
- (9) 加藤, 梶原ほか: 日立評論 54,744 (昭45-8)

16