厚板圧延機の計算機制御

大島 真¹⁾、瀬川佑二郎²⁾、磯辺邦夫³⁾
坪田一哉⁴⁾、井上正敏⁵⁾

1. ま え が き

川崎製鉄(株)水島製鉄所の第2厚板工場は最新鋭の厚板工場であり、その中心となる仕上圧延機は、ワークロール胴長5490 mm、最大圧延荷重10 000 ton、主電動機出力8 000 kW 2台という、世界最大級の厚板圧延機である。このような超大型最新鋭の圧延機で、寸法精度、形状ともすぐれた製品を能率よく生産するためには、高度な計算機制御化が必要であり、従来にみられるような人間の経験による操業は不可能である。

この最新鋭の設備を最大限有効に利用する技術は短期間に得られるものではなく、当社水島製鉄所第1厚板工場に、昭和42年日本初の厚板計算機制御システムが導入されて以来、長期間にわたって開発、蓄積してきた技術によって初めてなし得たものである。

これら多数の技術の中から、クラウンの小さい板を能率よく圧延するという、本来相矛盾する命題を解決した形状制御方法について、以下に紹介する。

2. 形状制御方法

板の圧延においては、その寸法精度を高めると同時に板の平坦度を良好にする事も重要である。

厚板圧延においては、パススケジュールを作成する時点で、各パスの圧延荷重を適切に設定する事により、所定の板寸法(厚み)と良好な平坦度を得る方法が用いられている。これはロールベンダー等の高価な設備を必要としない利点がある一方、制約条件が厳しく、しかもすべて予測制御を行わなければならないという難しさがある。

(1) 形状制御方法

形状制御のためのパススケジュールの決定方法として、クラウン比率一定の原則にもとづく方式が広く用い

られている⁽¹⁾⁽²⁾。これは各パスでの板クラウンと板厚の比を一定に保つ事により、材料の長さの伸び率が幅方向に一樣とし、板の平坦度を損わないように圧延する方法である。すなわち、各パスで式(1)の関係が満足されるようにパススケジュールを作成する方法である。

$$\frac{Cr_n}{H_n} = \frac{Cr_{n-1}}{H_{n-1}} = \dots = \frac{Cr_i}{H_i} = \frac{Cr_m}{H_m} \quad (1)$$

ここで、 Cr : 板クラウン、 H : 板厚、 i : パスナンバー、 n : 最終パスナンバー、 m : 形状制御を開始するパス

この時の各パスの圧延荷重と板厚の関係は、図1の点線で示されるように直線で表わされる⁽²⁾。

図1 形状制御パターン。

一般に形状制御を行なうパスでは、圧延機のもっている能力の数分の一でしか圧延できず、圧延能率が低下する。また、製品の板クラウンは小さいほど良いわけであるが、製品の板クラウンを小さくしようと最終圧延荷重を低くすると、その上流パスでの圧延荷重も低下し、さらに圧延能率が低下する。この欠点を解消するために新しい形状制御方法を開発した。

厚板圧延においては、最終パス終了時の板の平坦度が良好であればよいという点に着目し、圧延途中パスでは、最終製品に悪影響を与えない範囲で圧延荷重を大きくし、端伸び形状の圧延を行なう。そして最終パスでのクラウン比率と、形状制御開始パスでのクラウン比率との関係をうまく保つ事により、板の最終形状を平坦にする方法である。途中パスでのクラウン比率は式(2)で、最終パスでのクラウン比率は式(3)で示される。

$$\frac{Cr_{i-1}}{H_{i-1}} = \frac{Cr_i}{H_i} + 4Crp_i \quad (2)$$

* 川崎製鉄株式会社

1) 水島製鉄所システム部長 2) 水島製鉄所システム部制御技術室掛員 3) 技術研究所水島研究室研究員 4) 水島製鉄所厚板圧延部厚板技術室主査 5) 水島製鉄所厚板圧延部第2厚板課掛長
Computer Control of Plate Mill; M.Oshima, Y.Segawa, K.Isobe, K.Tsubota, M.Inoue (Kawasaki Steel Co.)
1978年1月20日受理

$$\frac{Crn}{Hn} = \frac{Crm}{Hm} + \varepsilon \quad (3)$$

ここで、 ΔCrp : 途中パスに許容される端伸び量に相当するクラウン比率

ε : 途中パスでのメタルフローの影響による形状平坦補償値

この方法を図に示すと図1の実線となる。この図でわかるように、形状制御途中パスでの圧延荷重は従来方法(点線)にくらべて大きく、その結果としてパス回数が減少し能率が向上する。具体的な例でパス回数の比較を表1に示す。従来のクラウン比率一定方式に比較して数パスの減少が見られる。製品の寸法によっても異なるが、圧延能率に換算すると10%前後の能率向上となる。また、この方法の特長として、同じパス回数であれば最終圧延荷重を小さくする事ができるため、製品の板クラウンを小

表1 所要全パス回数の比較.

	製品板厚 (mm)	製品板幅 (mm)	所要全パス回数	
			新しい方式	クラウン比率一定方式
1	9.0	3230	14	15
2	10.0	2318	14	16
3	10.0	3297	14	15
4	10.0	4347	17	19
5	12.0	4337	17	20
6	14.0	2229	7	8
7	16.0	5158	20	24
8	19.0	2146	10	14
9	22.0	2739	13	19
10	22.0	4782	17	20
11	22.0	5371	12	17

図2 製品板クラウン実績.

(2) 板クラウンの推定

板クラウンは、板の幅方向中央部厚みと板端部厚みの差で定義される。圧延中の板クラウンはワークロールの表面形状と一致すると考えられるので、圧延荷重によるロールの変形量と無荷重時のロール表面形状(ロールプロフィール)によって決まる。まず、圧延荷重によるロールの変形量を知るため、四段圧延機のパネモデル⁽⁴⁾

をもとに板クラウン演算モデルを作成した。ロールは圧延材からの熱により幅方向に不均一な温度分布を生じる。この結果ロールの熱膨張量に差が生じ、結果として幅方向に不均一なロール表面(サーマルクラウン)となり板クラウンに影響を与える。さらに圧延が進行すると、ロール表面は材料の通過した部分が摩耗していく。材料の幅は一定でないためロールの幅方向に不均一な摩耗を生じ、板クラウンに影響を与える。このようなロールプロフィールの変化を正確にとらえる事は困難とされていたが、理論解析、操業データの解析によりロールプロフィールの推定演算モデルを作成した。図3はワークロールの圧延終了直後の表面形状(プロフィール)と推定したプロフィールの比較を示したものである。

以上のような各種モデルを用いて推定した板クラウンは、図4に示すように実測値とよく一致している。

図3 ロールプロフィール推定値と実測値の比較.

図4 板クラウン推定値と実測値の比較.

(3) 板クラウンの変化と板の平坦度の関係

板クラウンの推定精度をよくすると同時に、板クラウンの変化が板の平坦度とどのような関係をもっているか、操業実績や板の実験圧延⁽⁵⁾等により調査した。式(3)に示した形状平坦のための条件式で、圧延中のメタルフローの影響の補償値 ε を定量的に知る事が重要であるが、この ε は複雑な要因によるものであるため、理論解析により知る事は困難である。このため圧延ラインに、板の平坦度を定量的に測定する装置として光学式形状検

出器を設置し、板の平坦度(急峻度†)とクラウン比率の関係进行调查した。図5はその結果の1例である。この図より、最終パスのクラウン比率と形状制御開始パスでのクラウン比率の間には、形状を平坦にする最適点の存在する事がわかる。急峻度が零になる時のクラウン比率差(Crp)の値が、式(3)の ε に相当する。この最適点は、板の寸法、鋼種、温度、圧延方法により変化するので、常に板の形状を測定しそれにもとづく学習制御を行なう必要がある。このように形状検出器の結果にもとづく学習制御を行なった結果を図6に示す。板の急峻度を $\pm 0.6\%$ 以内に制御できる比率が、形状検出器を使用した結果、従来の74%から90%に向上した。

図5 板形状とクラウン比率の関係の1例。

図6 圧延終了直後の板形状の分布。

3. 制御システムとその成果

以上述べてきた形状制御技術の他に、多数の開発された新しい技術が制御システムを構成している。

- (1) 各種伝熱過程における熱伝導方程式の解にもとづく鋼板温度推定モデル⁽⁶⁾
- (2) 圧延荷重の推定においては圧延理論を具体的に適用し、SIMSの式⁽⁷⁾を基本にポンチの押込みの解⁽⁸⁾を用

† 急峻度：板の平坦度を定量的に示したもので、板の波の高さを周期で割ったものである。正值の場合端伸びを、負値の場合中伸びを示し、その絶対値の大きいほど板の平坦度は悪い。

いてピーニング効果域の補償を行ない、板厚の厚いところから薄いところまで適用できる荷重推定モデル

- (3) 従来のフィードバック方式、いわゆる BISRA 方式の自動板厚制御にかわるフィードフォワード方式の応答性にすぐれた自動板厚制御方法⁽⁹⁾

等が、その特徴ある制御技術としてあげられる。

さらに、これらの制御モデル、方法を使用するうえで、

- (1) デジタル方式の γ 線厚さ計⁽¹⁰⁾
- (2) スラブ、鋼板の幅を測定する光学式幅計
- (3) 板の急峻度を測定する形状検出器⁽³⁾

等の、従来になかった計測設備を圧延ライン上に設置し、より高度な精度のよい制御を行なっている。

これら多数の技術の総合的成果として、工場稼動初日からの自動圧延、すぐれた圧延能率(従来に比べ23%向上)が得られ、又厚板工場の総合成績ともいえる注文歩留率で、92.3%の世界新記録を達成する事ができた。

(図7)

図7 注文歩留率の推移。

4. あとがき

厚板圧延機の計算機制御という技術は、厚板工場での生産活動の重要な一部分を担っているが、今後は歩留、能率、省力、省エネルギーのすべての点からみた最適な操業技術を見出す方向への検討、技術開発が必要であると思われる。

なお、本技術は第23回大河内記念生産特賞を受賞した、「厚板自動操業技術の確立」の中の主要技術の1つである。

文 献

- (1) K.N.Shohet and N.A.Townsend : J.Iron Steel Inst., Oct., (1971), 769.
- (2) 美坂佳助, 横井玉雄 : 第24回塑性加工連合講演会前刷集, (1973), 41.
- (3) 坪田一哉, 井上正敏, 瀬川佑二郎, 本城 恒, 樋口均一, 江森 隆 : 鉄と鋼, 63(1977), A 103.
- (4) 本城 恒 : 石川島播磨技報, 13(1973), 41.
- (5) 圧延工学科会資料, 6(1976).
- (6) 坪田一哉, 板橋和男, 木村 求, 磯辺邦夫 : 鉄と鋼, 63(1977), S 658.
- (7) 圧延理論とその応用, 誠文堂新光社, (1969), 60.
- (8) R.Hill: The Mathematical Theory of Plasticity, Oxford University Press, (1950), 257.
- (9) 瀬川佑二郎, 馬場和史, 井上正敏, 山本国成, 富永善治 : 鉄と鋼, 投稿中.
- (10) 藤原高矩 : 鉄と鋼, 62(1976), S 578.