

討18

新鋼片工場におけるプロセス制御システム

川崎製鉄㈱ 水島製鉄所 ○山崎順次郎 中西輝行 馬場和史
 藤本隆史 藤岡克志 高橋 暢

1. 緒言 条鋼向け素材生産プロセスの合理化と、連鑄・圧延間の連続化プロセスを構築するため、新鋼片工場を建設し昭和59年2月に稼動させた。本工場は丸・角ビレットの生産を中心に条鋼向け素材を供給する工場で、建設の基本理念は連続化、自動化を軸とした徹底したコストダウン、オンライン品質管理および品質のトレーサビリティの確立にあった。プロセス制御システムについては、連続化の対象が生産能力の異なる連鑄と圧延の結合であり、非定常操業に対していかにシステムや制御の手段で目標を達成するかが最大の課題である。すなわち、熱片・冷片のミックス加熱、仕上ミルの迅速スタンド交換による多様な製品サイズ、鋼種、規格の圧延を可能としたプロセスを実現する必要がある。棒線向け角ビレットは低合金鋼を含む中間素材として加熱制約が大きく、シームレス素材(丸ビレット)は全品種カットビレットからの積み上げによる素材計算を実施し厳しい寸法精度が要求されている。

ここでは、新鋼片工場における連続化プロセスの中での加熱炉計算制御と仕上ミル(VH4スタンドタンデムミル)の圧延制御について紹介する。特に仕上ミルでは従来の張力制御による形状制御に代って、MFPC(Mizushima Fine Profile Control)を開発し寸法精度の向上をはかった。またミルモータに交流可変速制御を適用し制御精度の向上に寄与させることができた。

2. プロセス制御システムの構成 連続化プロセスの実現および高度な自動運転、完全ピース管理を達成するためには、膨大な量の情報の高速処理と汎用性のあるプロセス制御が不可欠であり、Fig.1に示す大規模階層構成の計算機システムを構築した。本システムの特徴は、(1)各階層ごとの機能分担を明確にした。生産管理情報処理をC/C(バッチ処理)、O/C(リアルタイム処理)に持たせ、プロセス制御、ピース

トラッキング、実績収集をプロセスコンピュータ(P/C)に、直接アクチュエータを駆動する設備制御をDDCに分担させた。(2)複雑なモデルとアルゴリズムに基づく制御を可能とするため、仕上ミルのダイナミック制御をP/Cレベルで実現した。

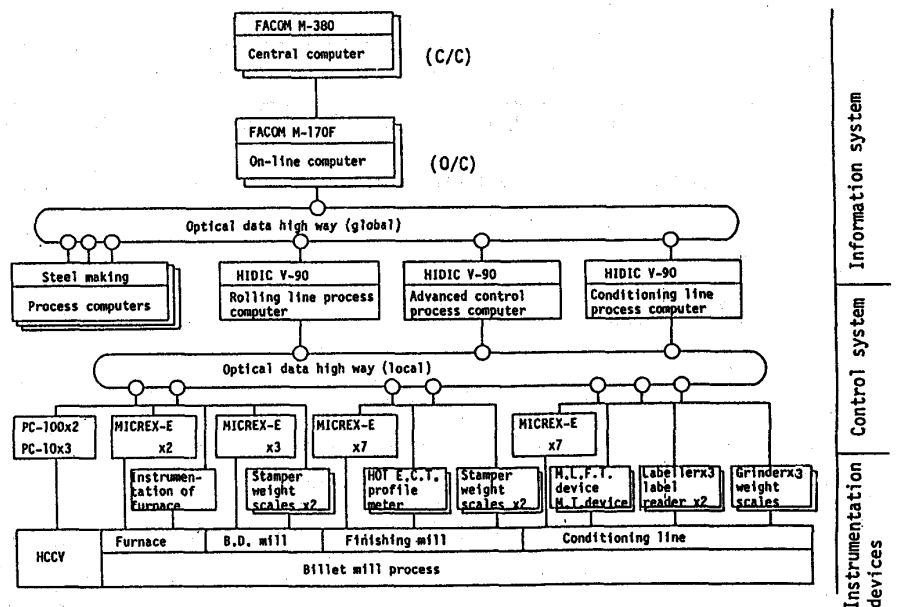


Fig. 1 - Configuration of the billet mill information and control system

3. 連続加熱炉の制御 連鑄・圧延の連続プロセスを実現するためには、その接点となる加熱炉が両プロセスの能力差を吸収するバッファの役割を果たさなければならない。そのためウォーキングビーム(以下WB)を2分割し、装入、抽出ピッチの異なる非同期運転を可能とすると共にこの非定常操業に耐える燃焼制御方式を開発した。非定常加熱操業を全自動化するためには予定抽出時刻に、素材を抽出点に搬送すること(自動搬送制御)と目標抽出温度に焼き上げること(自動燃焼制御)がポイントとなる。

3.1 自動搬送制御：以下の特徴を持つ自動搬送制御を実現した。(1)加熱炉制御の基本となる抽出時刻予測は、

従来の圧延ピッチと加熱ピッチに基づき決定する方法に加え、素材装入時にその素材抽出時の連鑄からの素材供給ピッチを予測して決定する。これは本加熱炉の搬送ピッチがほとんどの場合上工程からの素材供給ピッチで決定されるためである。(2)抽出休止中も継続して連鑄からの素材供給を可能とするために、抽出休止を予測し抽出休止開始前に装入側WBが空となるように自動的に搬送ピッチアップを行う。(3)炉内全材料をP/Cが位置認識しWBのAPCを行うことにより、一方のWBから他方へ材料とWBの干渉、材料の落下などを生じさせない自動乗り移り制御。(4)材料装入時その材料のWB乗り移り時の炉内材料配置を予測し、乗り移り時の材料の逆送などを防止し効率の良い炉内搬送を行わせるプッシャーストローク制御。

3.2 燃焼制御：抽出ピッチの変動など非正常操業に対処するために、できる限り物理モデルを用いた。以下に特長を示す。(1)ブルーム温度推定計算は差分式モデルを用い、制御用断面温度に加えスキッド部温度（最低温度）、最高断面温度（隣接材無しの条件）の管理を行っている。(2)品質上の種々の加熱制約を制約条件とし、燃料消費量が最小となる目標昇温パターンをオンラインで線形計画問題を解くことにより各材に対して計算する。加熱制約としては、最高表面温度規制、最大偏熱度規制など種々のものを取込んでいる。(3)制御方式は、各材の目標昇温パターンと昇温状況を比較評価し、各材の評価に重み付け演算を行い、炉帯の炉温設定値を決定している。本制御方式により良好な加熱制御を行っている。その様子を Fig.2, Table 1 に示す。

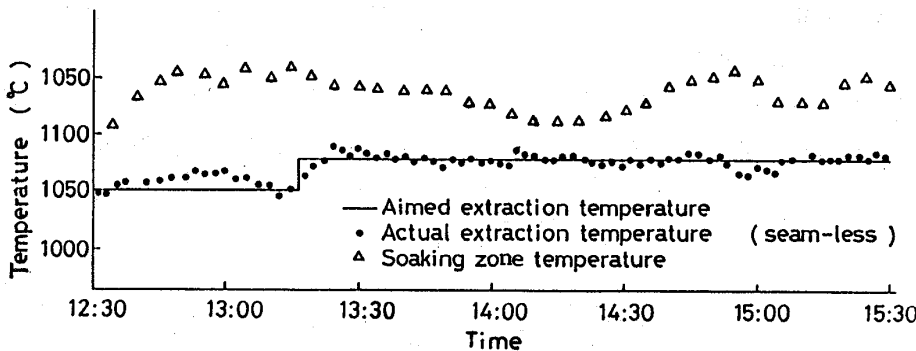


Fig. 2 - Accuracy of extraction temperature under computer control

Table 1 - Result of computer control

Aimed extraction temperature		1080 °C
Actual extraction temperature	\bar{x}	1081.9 °C
	σ	6.4 °C
temperature	n	67

(Estimated from 13:17 to 15:30)

4. 孔型連続ミル制御 仕上ミルを対象にミル計算機制御技術を開発した。

4.1 セットアップ制御：セットアップ制御の目的は素材温度、成分およびロール径などの変化に対して、目標通りの寸法に圧延するためのミル操作量（ロール開度、ロール回転数）を決定することにある。このためには圧延時の温度、荷重、天地・オーバル寸法などの高精度の予測モデルが必要である。ビレット圧延においてはオーバル（幅）寸法をいかに制御するかがポイントとなる。幅拡がりモデルとしては①式に示す篠倉の式が知られている²⁾

$$\frac{B_1 - B_0}{B_0} = \alpha \cdot \frac{\bar{\ell} d}{B_0 + 0.5H_0} \cdot \frac{F_H}{F_0} \quad \text{①}$$

一方、Fig.3 に示すように圧延温度が約850°C以下になるとオーバル寸法は温度依存性を示す。この挙動を考慮して①式

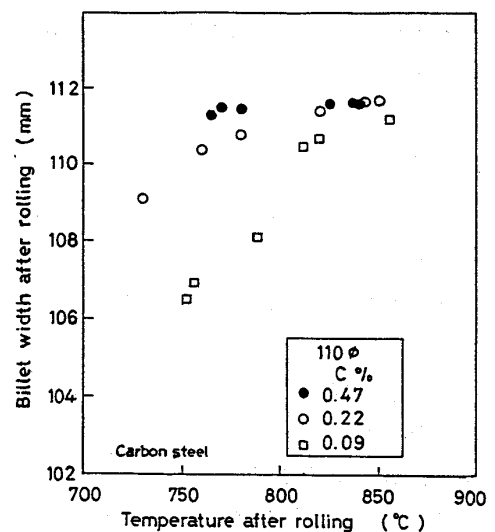


Fig. 3 - Dependence of billet width on temperature

の α 値を温度(θ), 炭素含有量(C)などをパラメータとして数式化した。

$$\alpha = \alpha(\theta, C, \epsilon, B_0/B_k) \quad (2)$$

Fig.4に示すように本モデルによりオーバル寸法は±0.6mmで予測可能となった。また、温度、荷重、天地寸法についてもオンラインで使用可能な高精度のモデルを開発した³⁾。これらのモデルを用いて、材料1本ごとに各スタンドでの断面変化を予測し、目標寸法を得るためのミル操作量を決定するオンラインセットアップ制御を開発した。Fig.5にその概略計算フローを示す。本方式の特徴は、カリバー設計時に決定した圧下配分(各スタンド出側目標寸法)を既知として、V・Hの2スタンドをペアで各々の出側形状をチェックし、Hスタンド出側の天地・オーバル寸法が目標寸法になるようにVスタンド出側目標天地寸法を修正し収束計算を行っている点にある。本制御により圧延寸法精度は、

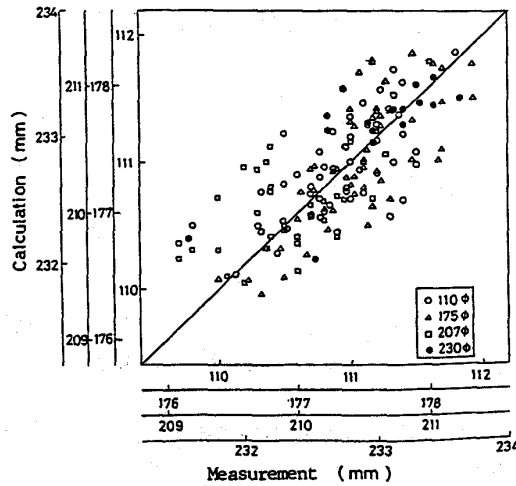


Fig. 4 - Comparison of calculation with measurement of billet width

天地 $\sigma = 0.17 \text{ mm} \rightarrow 0.15 \text{ mm}$
 オーバル $\sigma = 0.44 \text{ mm} \rightarrow 0.30 \text{ mm}$
 (110φ)に向上した。

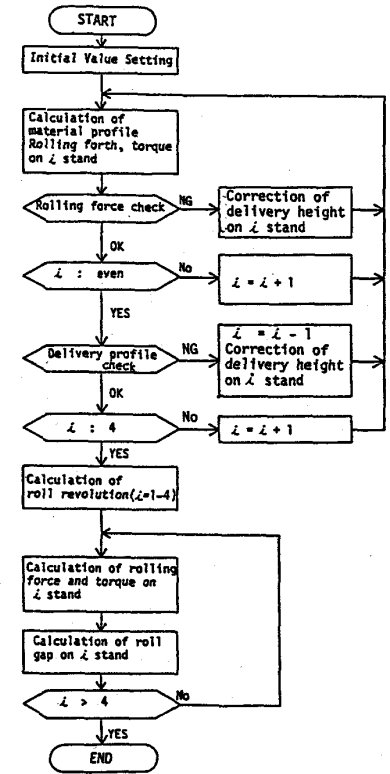


Fig. 5 - Calculation flow for on-line set-up control of finishing mill

4.2 交流可変速モータ制御：交流機は直流機に比べて保守性、耐環境性に優れており、また効率も良く省エネ効果も大きい。VHミル主機にこの交流機的全デジタル駆動制御を導入し、制御性能、精度などが大幅に向上した。また圧下モーター、テーブル補機モーター制御も交流可変速制御(アナログ)として、全交流化を実現した。

(a) 全デジタル交流可変速制御：VHミル主機は全デジタル(DDC)駆動制御のサイリスタモーター(1200KW×2台, 1400KW×2台)であり、この特長と性能は、(1)交流化によりメンテナンスフリー(省力)の達成と高効率化(直流機比2.5%向上)、(2)DDC化により速度制御精度0.024%, 制御応答 $\omega_c = 25 \text{ rad/S}$ の高性能を達成し、さらにプラントコントローラとのリンクが容易となりシステムの整合性が良い、(3)サイリスタ変換装置はトルクリップ抑制のため12相整流、(4)DDC部にマルチプロセッサを採用して高性能化し、また故障診断機能も充実させた。Fig.6にDDCサイリスタモータドライブシステムを示す。

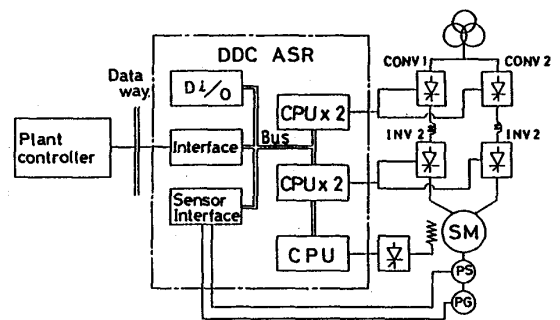


Fig. 6 - AC digital motor-drive system

(b) インパクトドロップ補償オブザーバ制御：VHミルのようなタンDEM圧延機においては、材料噛み込み時の速度インパクトドロップの影響が大きい。このインパクトドロップの補償にFig.7に示すオブザーバ制御を適用した。オブザーバにより噛み込み時の非定常負荷トルクをモータトルクと速度から予測し、これをトルク指令としてACR(電流調節器)に入力し制御することで速度補償を行なっている。本方式は前項の主機DDC化とあいまって、インパクトドロップ量を約1/5に

低減し、圧延材の寸法精度向上に大きな効果を上げている。

4.3 圧下制御による寸法精度の向上：孔型連続ミルにおいてバー内寸法制御手段として張力制御が広く実用化されているが、実張力測定の難しさ、天地・オーバル寸法同時制御のニーズに対して操作量が1つであるという制約などの理由で寸法制御の点で十分とはいえない。Fig.8に120TON程度のスキッド

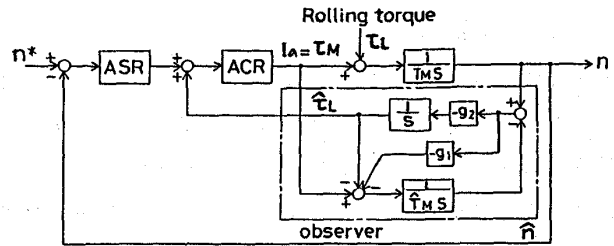


Fig. 7 - Block diagram for impact drop compensation

マークがある丸ビレットの圧延後の寸法変動例を示す。スキッド部でオーバル寸法が減少するのは、既に述べた幅拡がり特性のためである。この問題を解決するため、孔型連続ミルに適用可能な圧下制御を主体とするMFPCを開発した。一般的に板

圧延で実施されるAGCをVHタンデムミルに適用しただけでは正しい形状を得ることはできない。例えばBISRA-AGCを全スタンドに効かせた時の結果をFig.9に示すが、無制御時よりもオーバル寸法変動が大きい。これは、BISRA-AGCのV3スタンド制御によりスキッド

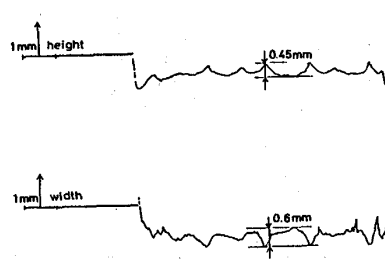


Fig. 8 - Without control

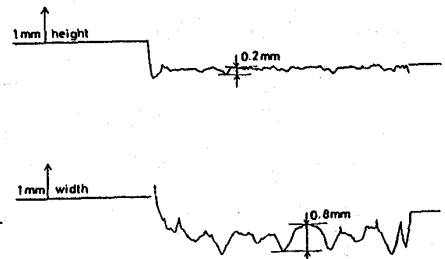


Fig. 9 - With BISRA-AGC

部のH4スタンド入側オーバル寸法が減少したためである。このため、以下に述べる新しい制御方式を開発した。(以下、 ΔX_i は基準点からの変化量、 i はスタンド番号を示す。)

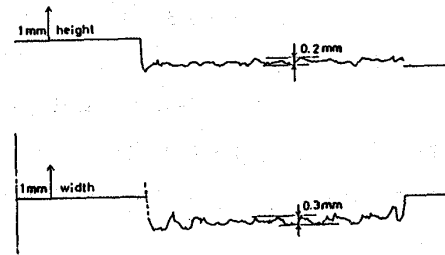


Fig. 10 - With MFPC

- (1) V3スタンド荷重変化 ΔP_3 をもとに、③式より材料温度変化 $\Delta \theta_3$ を逐次計算する。
- (2) $\Delta \theta_4 = \Delta \theta_3$ とし、 $\Delta \theta_4$ より④式にてH4スタンド幅拡がり率変化 $\Delta \beta_4$ を計算する。
- (3) $\Delta \beta_4$ を用いてH4スタンド出側オーバル寸法を一定とする入側オーバル寸法(V3スタンド出側天地寸法)を逐次求め、これを目標値とするV3スタンド圧下制御を行う。

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta + \frac{\partial P}{\partial h} \cdot \Delta h \quad (3)$$

$$\Delta \beta = \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \cdot \Delta \theta \quad (4)$$

本方式の適用結果をFig.10に示す。なお、③、④式の影響係数は各々前述したセットアップ制御に使う圧延荷重モデル、幅拡がりモデルから計算しているが、これらのモデルを精度アップすることにより、さらに制御精度の向上が期待できる。

5. 結言 水島製鉄所鋼片工場を中心に、連続・圧延連続化プロセスが稼動し、条鋼向け素材生産プロセスの改革を行った。この中では非常操業にも対応できる高精度制御技術の開発が必須であり、全ビレットの完全ピース管理システムの確立とともに、加熱炉およびミル制御システムの開発を行った。この結果、非常操業下での全自動加熱炉制御と高精度断面形状制御技術(MFPC)を完成することができた。

<参考文献>

- 1) 平井 他：川崎製鉄技報，17(1985)1
- 2) 篠倉 他：第29回塑性加工連合講演会，(1978)P109
- 3) 中西 他：鉄と鋼，71(1985)12, S1126