

(解説)

## 薄板用冷間圧延設備 KT ミルの新機能紹介

### Introduction of New Function of KT mill, Cold Rolling Mill for Thin Strips



宮園太介\*1  
Taisuke MIYAZONO



細川晴行\*1  
Haruyuki HOSOKAWA



長野啓太郎\*1  
Keitaro NAGANO



片山裕之\*2  
Yasuyuki KATAYAMA



清水隆広\*2  
Takahiro SHIMIZU

The Kobe Twelve-high Rolling Mill (KT Mill) is a rolling machine developed on the basis of a twenty-high mill and an aluminum-foil mill and comprises many excellent features including the mechanisms and systems for thickness and flatness control. The recent improvement in the performance of electronic equipment and automobiles has raised the requirements for the quality of thin-rolled flat products, their stock material. This has inevitably led to the need for high-performance multi-high rolling mills. This time, we have newly developed a mechanism for offsetting the work rolls to enable curled strips to be corrected during rolling. Furthermore, a laser speed gauge has been adapted to improve the accuracy of the automatic gauge control. The automatic flatness control was also newly devised to evaluate the control results.

まえがき = 近年、スマートフォンをはじめとする電子機器や車載用部品の高品質化に伴い、銅・銅合金やステンレス業界においては、圧延製品の薄物化および生産性向上の要求が年々高まっている。それらの要求を満足するために使用する圧延設備に対しても、必然的に厳しい性能が求められる。

当社はこの要求に応えるべく、12段圧延設備（Kobe Twelve-High Mill，以下KTミルという）を開発し、1984年にその1号機を納入した（図1）。KTミルは、硬質材の冷間圧延に広く使用されている20段圧延設備の特質を生かし、かつアルミ箔（はく）圧延設備で培った数々の極薄板対応技術を盛り込んだ。KTミルはまた、薄板の品質で最も重要視される板厚および板形状（板伸び）を良好に制御できる各種のアクチュエータを有しており、さらに自動板厚制御装置および自動形状制御装置を具備している<sup>1)</sup>。

本稿では、当社が最近納入したKTミルにおいて、さ

らなる高品質化を追求して開発した新機能を紹介する。

#### 1. 板反り制御機能

顧客からは、板厚や板形状（板伸び）制御のみならず板反りの制御が望まれてきた。従来、ワークロール位置をロールセンタに対しオフセットすることで板反りが変化することが知られており、従来の20段圧延機の場合には、ロール群の一部のロール径を変更することでワークロールをオフセットさせていた。しかしながら、その都度ロールを手動で交換するなどの対応が必要であり、この場合、ロールの組み替えによる生産停止時間が生じたり、所定のオフセット量に設定するためのロール管理が複雑化したりするといった問題が生じ、効率的にオフセット量を変更することが困難であった。

そこで当社では、KTミルにおいて、ロールを組み替えることなく、オンラインでワークロールのオフセット量の設定が可能な板反り制御装置を開発した<sup>2)</sup>。

##### 1.1 制御原理

ここで、圧延中の板反りとは、圧延機の出側において圧延材の圧延方向に対して上または下方向の反りを指している。一般に、板反りの挙動は板上下面の摩擦係数などの非対称圧延条件に伴い、ロールバイト内での塑性流動の非対称バランスに起因したロールバイト出側での圧延方向の伸びひずみ偏差による<sup>3)</sup>。図2に、上下ワークロールのオフセット方向と、圧延機の出側における圧延方向の板反り効果の関係を示す。すなわち、下ワークロールの最適なオフセット量と方向を設定することで板反りを制御することができる。

##### 1.2 制御機構

板反り制御装置の駆動機構には油圧シリンダを採用



図1 KTミル全体図  
Fig. 1 General view of advanced KT mill

\*1 機械事業部門 産業機械事業部 重機械部 \*2 神鋼テクノ(株) 制御技術本部 重機械制御室

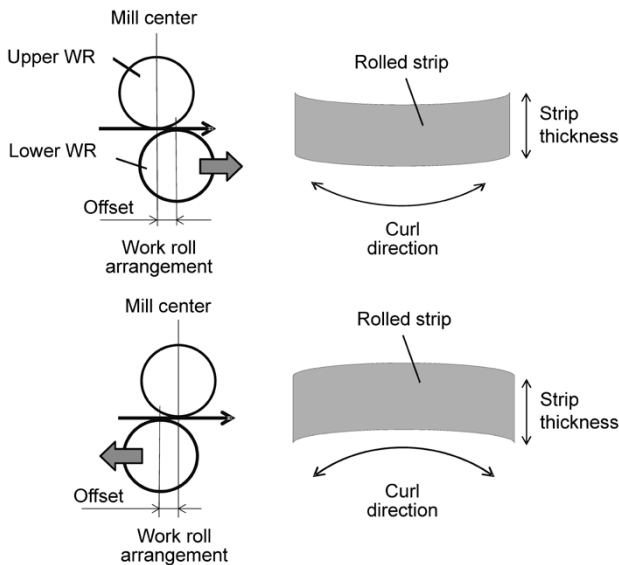


図2 ワークロールオフセット方向と板反り効果の関係  
Fig. 2 Relationship between work roll offset and curling direction

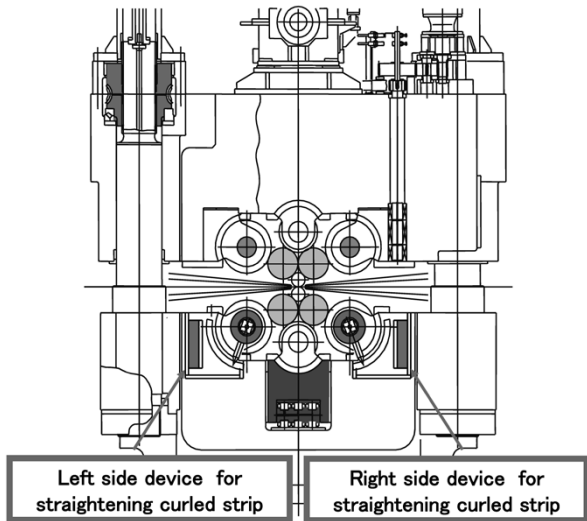


図3 板反り制御装置位置  
Fig. 3 Position of offset device for work rolls

し、左下の支持ロールの左手と、右下の支持ロールの右手にそれぞれ設置した(図3)。圧延荷重は、楔(くさび)形部品(以下、ウェッジという)を介して直接ハウジングに伝達される構造であり、シリンダ内の油圧作動油の圧縮性によるワークロールの位置変動は極小に抑えられている。また、シリンダと直動式サーボ弁を一体化することによって高い応答性を実現している。

油圧シリンダの位置をリニアセンサによって検出することで、下ワークロールのオフセット位置が把握できる(図4)。また、オフセット量とオフセット方向は、圧延機の操作盤から遠隔操作によって設定できる。さらに本装置は、圧延機の圧延荷重が負荷されていない状態でプリセットして使用することも、圧下中に位置を修正することも可能である。

左側の支持ロールと右側の支持ロールが、同一の作動量・方向・速度・タイミングで水平方向にシフトするように本装置で制御する。これにより、中間ロールを介し

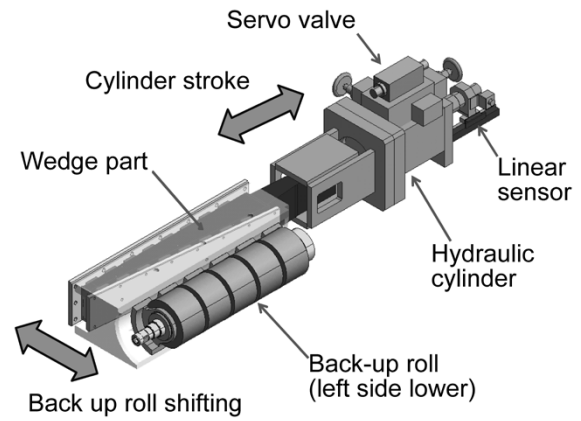


図4 ワークロールオフセット装置の構造(左側用)  
Fig. 4 Structure of offset device for work roll (for left side)

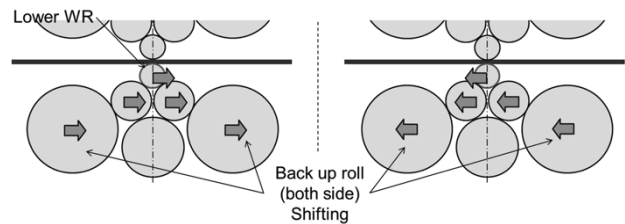


図5 ワークロールオフセット装置動作方法  
Fig. 5 Mechanism of offset device for work roll (method of offsetting work rolls)

て下ワークロールを所定の位置へとシフトさせることができる(図5)。今回の板反り制御装置の仕様は、ワークロール( $\phi 30\text{mm}$ 台 $\sim \phi 150\text{mm}$ まで可変)のオフセット量を数mm程度を確保できるように設計されており、これまで銅合金などの用途のKTミルにおいて2台の製作実績を有している。

## 2. 自動板厚制御の精度向上<sup>4)</sup>

従来、KTミルの板厚制御としてBISRA-AGC、モニタAGC、FF-AGC、マスフローAGC、および張力AGCなどのモードを具備している。なかでも、加減速域における生産性向上の要求の高まりや近年の速度センシング技術の向上により、マスフローAGCが効果を発揮している。そこで本稿では、マスフローAGCを用いたシステムを紹介する。

### 2.1 マスフローAGC

入側および出側の板速度と入側板厚より出側板厚推定値を算出し、出側板厚偏差がゼロとなるようにロール間隙を変化させる板厚制御方式をマスフロー板厚制御という。この制御方式は、定常部のみならず、先・後端部や加減速域における板厚変動の精度向上に効果大きい。また、板厚に影響を及ぼす形状制御アクチュエータの動きによって、発生した板厚変動をも入側/出側の板速度の変化に応じてリアルタイムにとらえる。これにより、遅れ時間なくウェッジ式油圧圧下装置を動作させてロール間隙を変化させ、板厚変動を除去することができる。

### 2.2 マスフローAGCの原理

ワークロール直下を単位時間通過する圧延材の体積は一定である。この原理を応用すると、最終的なマスフ

ロー自動制御のロールギャップ出力  $\Delta S$  は式 (1) で与えられる。

$$\Delta S = C \cdot \{(M+m)/M\} \cdot \left( H \cdot \frac{V_1}{V_2} - h \right) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 $C$  : 制御ゲイン ( $0 < C \leq 1$ )

$H$  : 入側板厚

$h$  : 出側板厚

$V_1$  : 入側板速度

$V_2$  : 出側板速度

$M$  : ミル定数

$m$  : 材料塑性定数

### 2.3 板厚制御アクチュエータ

KTミルは板厚制御専用アクチュエータとしてウェッジ式油圧圧下装置を備えている。圧延荷重はウェッジを介して直接ハウジングに伝達される構造となっている。このため、ハウジングは極めて高い剛性を有しており、つぎの5点の工夫による高応答性を実現している。

- 1) ウェッジの端部の油圧シリンダに直動式サーボ弁を直(じか)に設置しており、2次側配管内の油の圧縮による遅れを最小化した。
- 2) ウェッジ両面にスライドニードルベアリングを設置し、摩擦抵抗を低減した。
- 3) 制御対象の重量がロールだけであり、上ハウジング全体を昇降させる方式に比べるとKTミルの制御対象重量は約1/100未満と非常に軽い。
- 4) ウェッジ比とロール群の構成比により  $\pm 0.1 \mu\text{m}$  以下の微小なロール間隙の位置制御を可能にした。
- 5) ウェッジ式油圧圧下装置の位置制御ループの比例積分制御に非線形要素を導入し、微小位置入力に対する制御性を高めた。

図6にウェッジのステップ応答を示す。10  $\mu\text{m}$  ステップの位置入力に対し、時定数は0.009秒(無駄時間0.003秒を含む)を達成している。

### 2.4 レーザドップラ速度計

マスフロー板厚制御では、板速度の検出精度が重要なポイントである。板厚精度に対する厳しい要求に対して

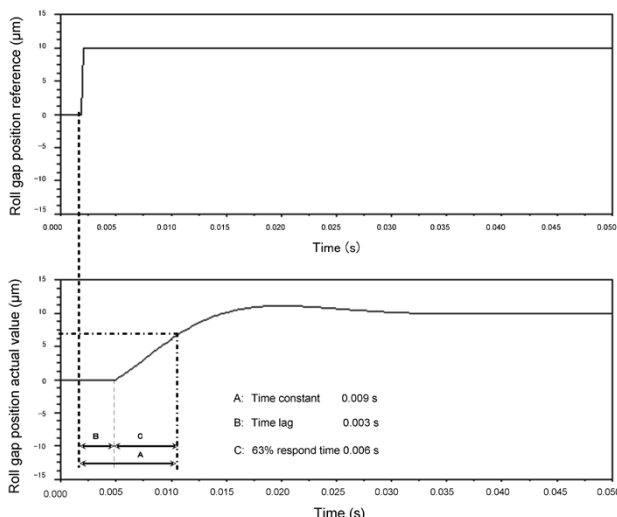


図6 ウェッジのステップ応答  
Fig. 6 Step response of wedge system

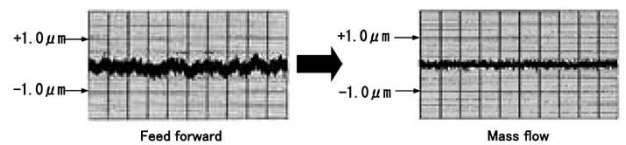


図7 板厚チャートの一例  
Fig. 7 Example of thickness chart

は、レーザドップラ速度計を入側に1台、出側に1台導入することにより、入側板速度と出側板速度を検出して対応する。レーザドップラ速度計では、レーザ光線を2本交差させると交差部分には明暗のついた干涉縞(じま)ができる。圧延材がこの干涉縞を通過した際には干涉縞に相応した散乱光(ドップラ信号)が得られる。圧延材が干涉縞の間隔を通過した時間により速度が求まる。圧延材上の微小なゴミや油煙などによる誤検出を防ぐためにエアブローなどの工夫を施した。また、圧延材への最適レーザ照射角度の設定を容易にすべく、架台機構などを適用して圧延機への実装を可能とした。

これまでに伸銅系やステンレス材などの用途で5件の実績を有する。

### 2.5 板厚精度

制御方式の違いによる板厚精度を比較するため、従来のフィードフォワード板厚制御の場合とマスフロー板厚制御の場合の板厚チャートを図7に示す。マスフロー板厚制御を採用したKTミルでは、例えばステンレスの硬質材の薄物圧延で、板厚0.05mmにおいて定常圧延部で  $\pm 0.3 \sim \pm 0.5 \mu\text{m}$  以下、加減速部においても  $\pm 1.0 \mu\text{m}$  以下の極めて高い板厚精度を達成している。

## 3. 自動形状制御における管理・評価機能

冷間薄板圧延の安定操業のためには、自動形状制御技術は今や必要不可欠となっている。1980年以降、当社は薄板圧延の自動形状制御に関する開発を独自で行い、国内外の顧客に数多くの制御装置を提供している(図8)。制御モデルの特徴は、多入力-多出力を見通しよく整理した現代制御理論の一つである多変数制御理論を基本としたフィードバック制御を採用していることである。

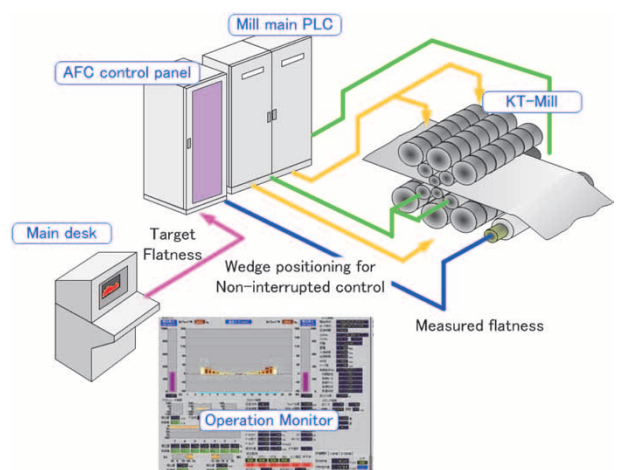


図8 形状制御装置概念図  
Fig. 8 General control model for automatic flatness system



### 3.1 制御モデル

KTミルでは、小径ワークロールによる高圧下で生産性向上を図り、大径ワークロールにより表面性状の品質確保をミル1台で可能にしている。板幅方向の最適なクラウン量やテーパー加工を施した中間ロールの最適位置をはじめとする操業ノウハウをオペレータが習得するには、長年の経験が必要である。当社は、これらの操業ノウハウを形状影響係数により数値化し、形状影響係数から最適なアクチュエータ位置を算出する独自の形状制御アルゴリズムを開発し、多くの圧延機で実績を上げている。

形状制御モデルの基本となる誤差ベクトルの線形表記について詳細を説明する。形状誤差ベクトルを  $\varepsilon_i$ 、アクチュエータ相対位置を  $\Delta x_j$ 、形状の影響係数を  $A_{i,j}$  と定義する。目標形状と検出形状との誤差の二乗和で表記する形状評価関数  $\phi(\Delta x)$  は、式(2)のとおりである。

$$\phi(\Delta x) = \sum_{i=1}^n \left[ \varepsilon_i - \sum_{j=1}^m A_{i,j} \cdot \Delta x_j \right]^2 \dots\dots\dots (2)$$

また、誤差の二乗和の最小化は、形状評価関数  $\phi(\Delta x)$  の線形微分方程式を偏微分した結果(式(3))によって一意的に求めることができる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial \Delta x_j} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

### 3.2 小径および大径ワークロールにおける形状影響係数の管理

薄板圧延製品の管理項目には寸法(幅、厚さ、長さなど)と製品仕様(成分、材質、材料特性など)があり多種多様である。いっぽう、圧延機側のワークロール径や支持ロールのクラウン量、中間ロール位置などの要素は形状修正能力に大きく影響を与える。とくに、KTミルのワークロールは志向する圧延形態に応じて小径と大径とを使い分けることにより高度な形状制御が可能である。このため、制御パラメータが複雑化し、適正な安定操業には適正に管理、制御するシステムが不可欠となる。

そこで当社は、KTミルをはじめとした多段圧延機に装備している形状修正アクチュエータによる形状影響係数の解析システムを開発した(図9)。上述の圧延材製品仕様やワークロール径、材質など、顧客ごとの圧延仕

様、形状影響係数を可視化、解析・管理するシステムになっている。これにより、形状制御性能を安定させ、同時に形状精度の品質向上も図っている。

### 3.3 適用結果と品質評価

形状制御は、主に圧延時に発生するサーマルクラウン(熱影響が及ぼす板幅方向の形状変化)などにより影響を受けた実形状と、操業オペレータが設定した目標形状との乖離(かいり)に対し、いかに最適な収束解を見だし目標に近づけるかで評価される。この制御結果を客観的に観察して正確な評価をするために、板幅・板厚などのコイル情報はもちろん、圧延速度と形状制御アクチュエータ位置などのプロセスデータ、目標形状や検出形状などの板形状データ、自動運転時のアクチュエータ制御量や手動介入頻度などの圧延機挙動を記録・再生するためのロギング機能が必要となる。

ここでは、チルティング(1軸)、1中間ラテラルシフト(2軸)、クラウンロール(7軸)の10自由度の形状修正アクチュエータでの制御結果を評価した。狭幅材料の小径ワークロールで適正な制御を行うことで、目標形状と検出形状がほぼ一致した。この例を図10に示す。

また、適正なアクチュエータの初期位置や目標形状への収束時間など、総合的な品質評価をするために圧延評価シートを開発した(図11)。このように、高度化するユーザーニーズに応えるべく、システム開発を行っている。

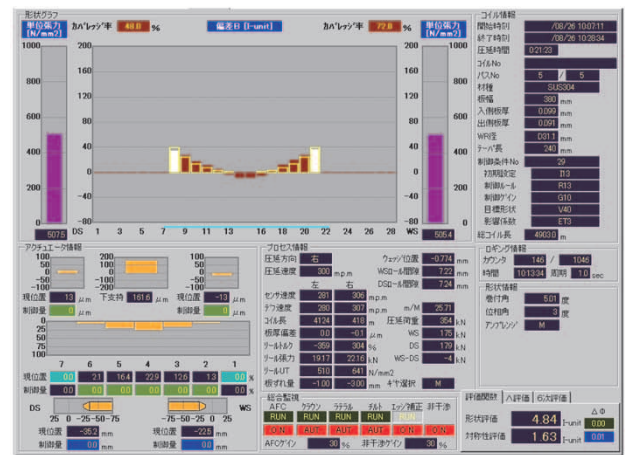


図10 狭幅板材に適用したときの形状制御結果  
Fig.10 Results of automatic flatness control for narrow width strip

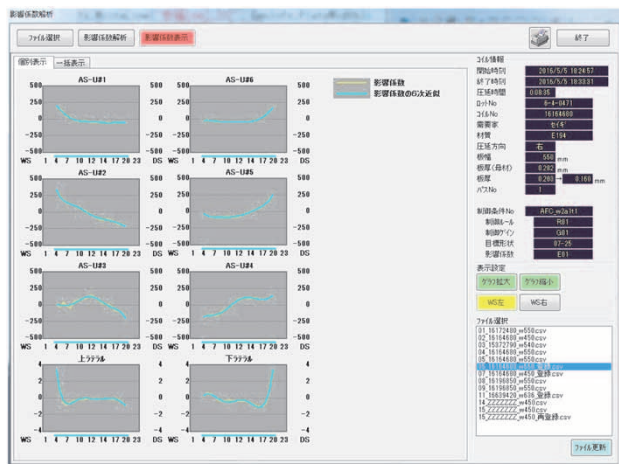


図9 小径ワークロールにおける影響係数解析システム  
Fig.9 Flatness influence coefficient system for small work roll

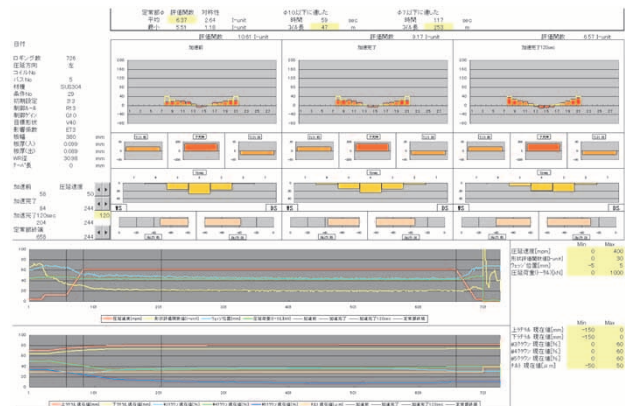


図11 圧延評価シート  
Fig.11 Rolling evaluation sheet

むすび=従来の主な顧客要求である板厚・板形状（板伸び）に加え、近年では、板反りを圧延機で改善したいという要求が高まっており、今回板反り制御装置を開発した。本制御装置は、オフセット量を容易に設定できることから、とくに小ロット・多品種を扱う顧客を中心に今後もニーズがあると考えられる。

圧延は今後も薄物化が志向され、それに応じて板厚・板形状の精度もいっそう厳しくなっていく。板厚精度においては現在極限と考えられる板厚偏差 $\pm 0.1\mu\text{m}$ 以下が要求される日も近いと予測される。そのため、新しい板厚制御方式の開発、压下機構制御のさらなる高速化、厚み計や板速度計のセンシング技術の高精度化を当社制御システムに取り込んでいきたい。また、板形状制御にお

いては、薄物化にあたって形状不良が容易に板破断などを招き圧延継続が困難となるため、形状修正精度の向上が必須となる。

各圧延素材や機械特性に由来する固有の形状制御特性の反映が可能な当社形状制御システムを向上させ、機械・制御両者の融合によってさらに高度化への要求に対応していく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) 上杉憲一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2008, Vol.58, No.2, p.12-18.
- 2) 上杉憲一. METEC & 2nd ESTAD 2015. p.69.
- 3) 中村洋二ほか. 日本鉄鋼協会. 第140回圧延理論部会講演資料. 2014.
- 4) 清水隆広ほか. 神鋼テクノ技報. 2010, Vol.22, No.38, p.11-14.