

連携記事

硬質極薄箔用 多段圧延設備の紹介

Introduction of Multi-hi Rolling Mill for Ultra Thin Hard Foil

(株) 神戸製鋼所
機械事業部門 産業機械技術部
重機械室 室長

宮園太介
Taisuke Miyazono

(株) 神戸製鋼所
機械事業部門 産業機械技術部
重機械室

細川晴行
Haruyuki Hosokawa

(株) 神戸製鋼所
機械事業部門 技術企画部
技術企画室 主任部員

長野啓太郎
Keitaro Nagano

神鋼テクノ(株)
技術本部
産機・重機制御室

清水隆広
Takahiro Shimizu

1 はじめに

金属箔の圧延設備は、被圧延材料により様々な形態を持つ。一般産業用設備として、例えばアルミのような加工性のよい軟材であれば、比較的ワークロール径が大きな縦型の4段や6段圧延機で箔(10 μ m)領域まで圧延が可能となる。一方、銅合金やステンレスのような硬質材を箔領域にまで圧延するには、後述のようにワークロール径を小径化する必要があり、そのロールたわみの軽減等の対策から多段圧延機が発展した。本稿では、成長分野であるEVや通信機器用電子部品等の用途で使用される銅合金やステンレスといった硬質材を、厚み10 μ m・幅600mm前後まで圧延可能な多段圧延機を紹介する。

2 多段圧延機の誕生

通常、ワークロール径が大きい程、ワークロールの扁平変形が大きくなり(図1)、箔領域まで圧下できない。

そこで硬質材料の箔圧延においては、圧延1パスあたりの圧下率を高めて生産性を向上させ、圧延荷重を軽減する為には、小径のワークロールを採用することが最も一般的な対策であ

る。ワークロール径と被圧延材料の圧延可能最小板厚の関係としては、Stoneの式が良く知られるが(図2)、本式からも硬質材を箔化するには小径ワークロールが有効であることがわかる。

一方、小径のワークロールでは、ロールたわみが発生しやすいことから被圧延材の良好な形状を得ることは難しい。そこでワークロールの外側にバックアップロールを配置し、ワークロールたわみを抑制する構造が採用される。しかし、図3のようにバックアップロールを垂直方向に配列した縦型4段圧延機の形式では、ロール駆動力や板張力から水平方向の曲がりが発生しやすい²⁾。また硬質材に必要な高圧延荷重の必要性からも、バックアップロールをクラスタ(ブドウの房)状に20段配列した圧延機が、ドイツではW.Rohnによるローン圧延機、ポーランドではK.T. Sendzimirによるセンデミア圧延機として1930年台に相次いで誕生した³⁾。

当社では、多段圧延機として20段圧延機を1970年から製作を開始した。1980年代に入り、より薄くかつ高精度の平坦度を必要とする電子材料などの新規用途が伸長し始め、箔化や高精度の板平坦度(形状とも呼ぶ)の達成が重要なテーマであった。そこで当社はこの要求に応えるべく20段圧延機

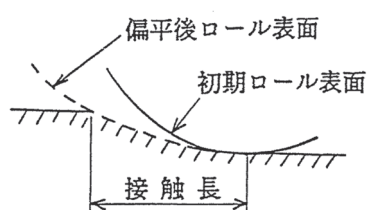


図1 ワークロール扁平変形

$$h_{min} = \frac{3.58 D \mu (S_0 - S)}{E}$$

h_{min} : 圧延可能最小板厚
D : ワークロール直径
 μ : 摩擦係数
 S_0 : 圧延材の2次元変形抵抗
E : ワークロール材料のヤング率
S : 単位張力

図2 Stoneの式¹⁾

の特質を生かし、アルミ箔用圧延機で培った箔対応技術を盛込んだ多段圧延機として、箔用12段圧延機（以下、KTミル）を開発し、1984年に実機1号機を製作した（図4）⁴⁾。

3 KTミルの構造と特徴

3.1 4柱式分離型ハウジングの特長

KTミルの圧延機本体は、上下のハウジングを4本のコラムで係合した4柱式分離型ハウジングミルであり（図5）、以下に示す4つの特徴を有する⁵⁾。

- 1) 上ハウジングの昇降ストロークを大きくすることにより、ハウジング間のスペースを広く取ることができ、以下の利点を有する。
 - ①鋼種・パスに最適なワークロール径を、広い範囲で選

- 択可能。
- ②ワークロールをはじめロール交換の作業性が良好。
- ③通板の作業性が良好で板を視認しやすい。
- 2) 4本のコラム以外にハウジング間をさえぎるものが無いためロールクーラントの排出が良好であり、以下の利点がある。
 - ①圧延発熱の除去が容易なため、良好な板形状を得やすい。
 - ②圧延で発生する磨耗粉などがクーラントとともに排出されやすく、板きずの低減につながる。
- 3) 上ハウジングを傾斜させて圧延ができるため、箔用素材に多いテーパ材（ウエッジ形状）や非対称形状の材料の圧延も可能である。
- 4) 圧延荷重が4本のコラムに引張荷重として作用するた

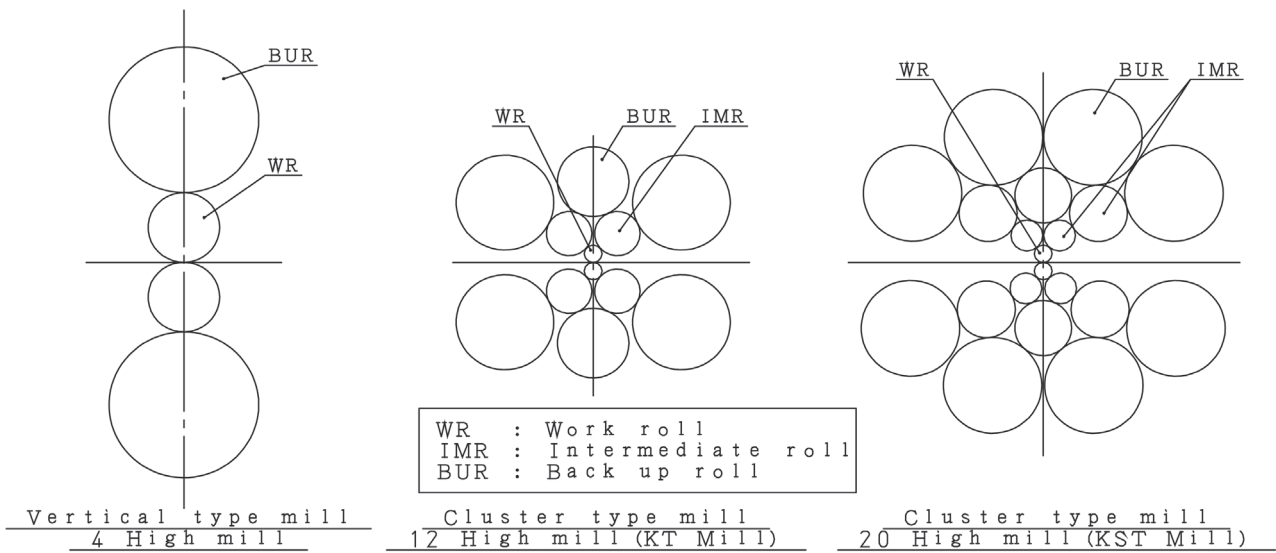


図3 4段圧延機と多段圧延機（12・20段）のロール配置

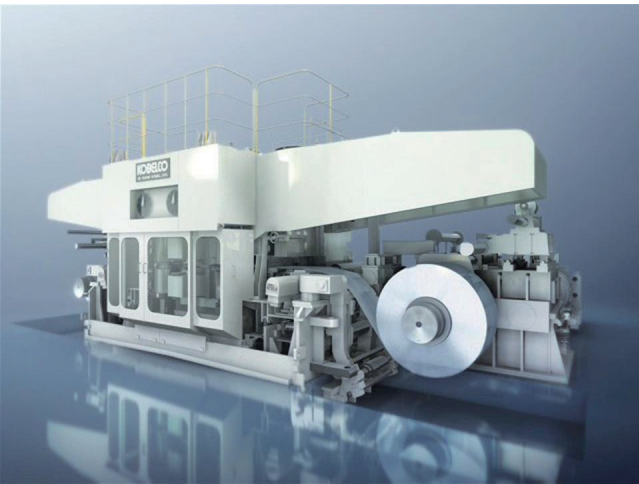


図4 KTミル全体図（Online version in color.）

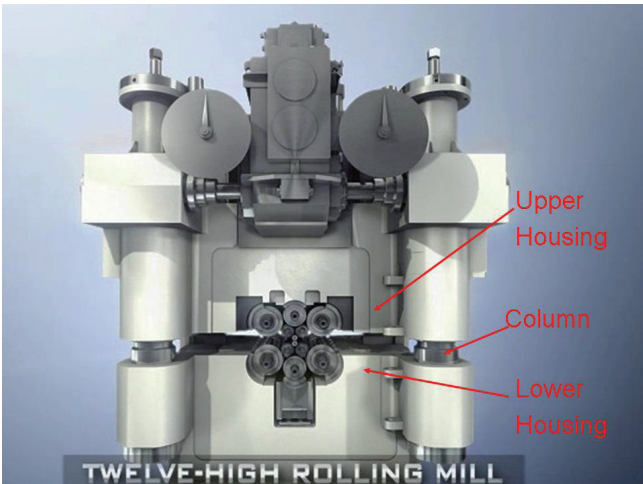


図5 4柱式分離型ハウジング（Online version in color.）

め、圧延荷重を正確に検出することができる。さらに、4本のコラム個々に検出した圧延荷重から荷重のバランス(作業側と駆動側の荷重の差)の把握が可能となる。

3.2 使用可能なワークロール径

KTミルは、上ハウジングを大きく昇降することが可能であることから、図6に示すように小径から大径に至るワークロールを無段階に広い範囲で使用することができる。これにより鋼種・パスに最適なワークロール径を選択することができる。ワークロール径の変更に伴いパスライン高さが上下するが、図7に示すKTミル独自のミルガイド昇降用の自動パスライン調整装置、およびワークロールの端面を保持するスラストブロック自動昇降装置を具備することにより、パスラインを水平に保つことができる⁵⁾。

4 KTミルの形状・板厚制御用アクチュエータの特徴

KTミルのミル本体の正面図を図8に示す。形状制御アクチュエータとしては、上両側バックアップロールにクラウンコントロール装置を設置し、また、クラウンコントロールを補い、板幅全体のクラウン量を調整する目的で、下両側バックアップロールに支持ロール偏心装置を具備している。さらに、上下中間ロールにラテラル調整装置と上ハウジングを作業側と駆動側で圧下差を付けて形状修正を行う圧下チルチング装置を設置した。一方、板厚制御専用のアクチュエータとしては、下中央のバックアップロールの下部にウェッジ式油圧圧下装置を装備している³⁾。

4.1 KTミルと20段圧延機の形状制御性能の差異

硬質材料であるステンレス箔圧延におけるKTミルと当社20段圧延機のクラウンコントロールによる効果の比較例を図9に示す。図9の縦軸は、中央部のクラウンコントロールを単位量作動させたときの板形状に対する形状影響度 (I-Unit)を示す、図9のKTミルの中伸びは約220I-Unitであるのに対し、20段ミルの中伸びは約90I-Unitであり、KTミルのクラウンコントロールの効果(形状制御能力)は20段ミルに比べて約2.5倍大きいことが確認された。さらにKTミルは、下両側バックアップロールに支持ロール偏心装置を具備している。支持ロール偏心装置は、各サドルを個別に押し出すクラウンコントロール装置とは異なり、サドル内に偏心量の異なる偏心リングを組み込んで支持ロール軸を回転させることにより、下両側のバックアップロール全体のクラウン量を変

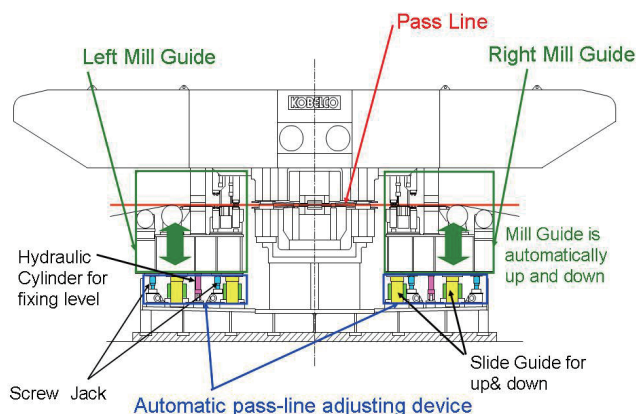


図7 ミルガイド昇降用自動パスライン調整装置 (Online version in color.)

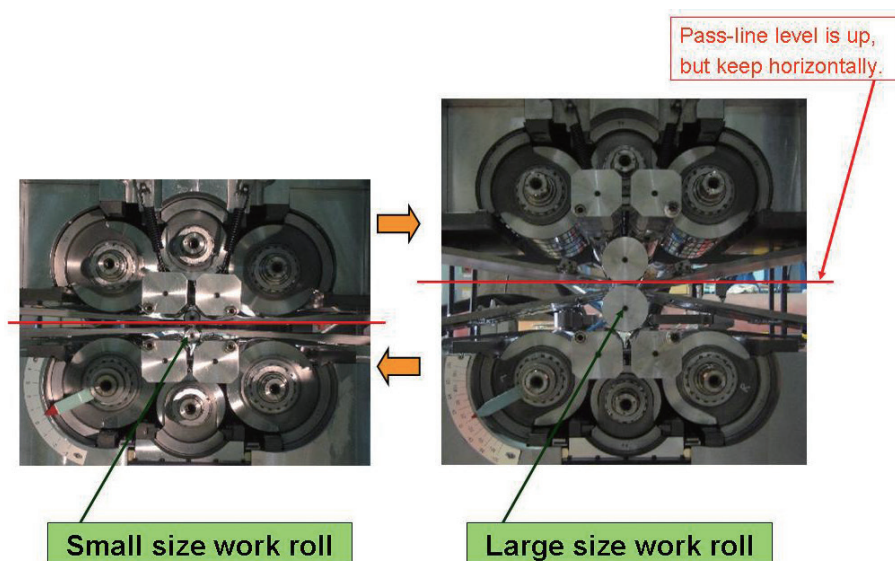


図6 小径と大径ワークロールの配置状態 (Online version in color.)

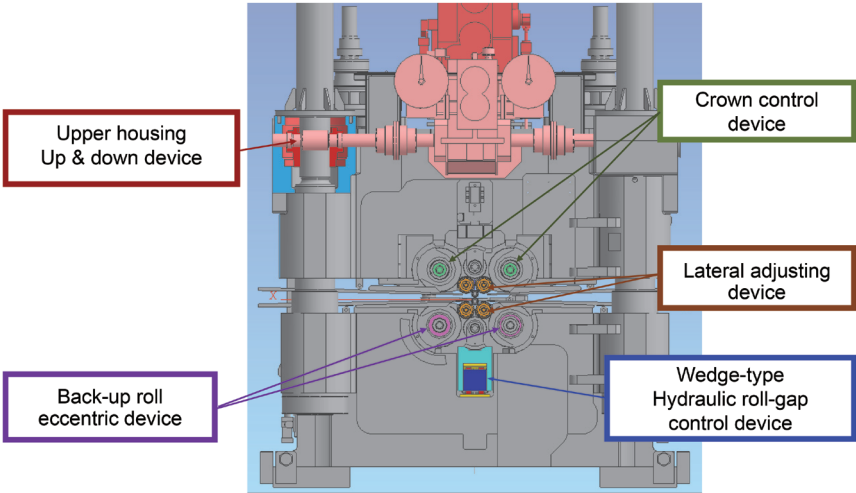


図8 KTミル板厚・形状制御用アクチュエータ配置 (Online version in color.)

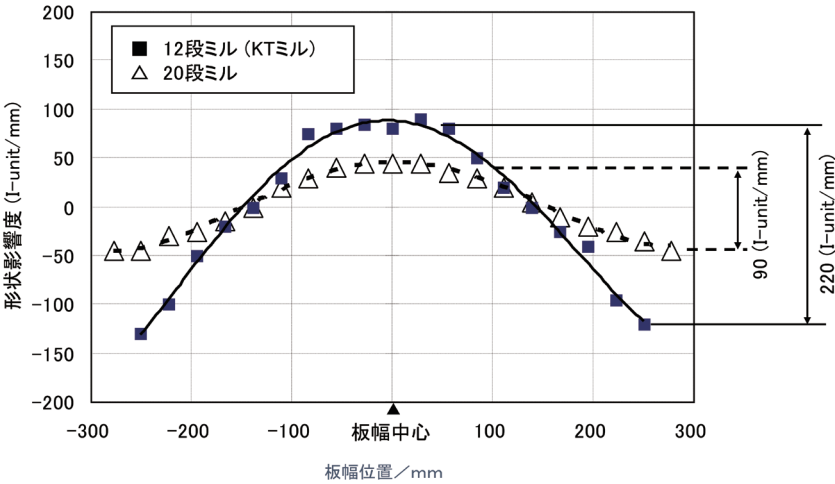


図9 KTミルと20段ミルのクラウンコントロール能力比較 (Online version in color.)

更できる。特に狭幅材の圧延において、支持ロール偏心装置により板中央部を凸にイニシャルセットした上で、クラウンコントロール装置と組み合わせ、より効果的に形状を制御することができる。また、20段圧延機ではワークロールに数種のメカニカルクラウンを付けて使用する場合が多いが、KTミルでは本装置を具備することにより、箔圧延の場合でもフラットワークロール（メカニカルクラウンのないワークロール）を使用しており、ワークロールの研磨や管理を容易にしている⁴⁾。

4.2 中間ロールによる形状制御

中間ロール径・配置を最適化したことによりKTミルのラテラルシフト力を当社20段圧延機に比べて約2倍にアップすることができた。また、同時にラテラル調整装置の移動機構にボールねじを採用し、摺動部にスライドニードルベアリ

ングを使用することにより、シフト力伝達時のロス低減も図った。これらの結果、KTミルの中間ロールの移動速度は20段圧延機の中間ロールの移動速度より早くなり、形状修正をより速やかに行うことが実圧延において確認された⁴⁾。また、用途に応じて、油圧シリンダによる直動シフト式もラインナップしている。

4.3 ウエッジ式油圧压下装置による板厚制御

硬質材料の極薄化にともない、高い板厚精度が求められ、例えば、ステンレスの硬質材の薄物圧延で、板厚0.05 mmにおいて定常圧延部で±1%以下の精度に相当する±0.5 μm以下の高い板厚精度の達成が圧延機に要求される。その為に、KTミルでは、図10に示すサーボ弁を直結したウエッジ式油圧压下装置を板厚制御専用のアクチュエータとして具備している。圧延荷重はウエッジを介して直接ハウジングに伝達さ

れる構造であり極めて剛性が高い。コラム部に油圧室を設けた方式の20段圧延機や、4段や6段圧延機のようにプッシュアップシリンダもしくはプッシュダウンシリンダを設けた形式の圧延機では、油圧シリンダの開閉が、そのまま直接ロールギャップの開閉となるため、油圧シリンダ内の油の圧縮性の影響がダイレクトに影響し、ミル定数を低下させるが、KTミルでは上記構造のため、ミル定数はほとんど変化しない。また、下記1)～5)等の効果によりロールギャップにおいて0.02mmのステップ位置入力に対する時定数は0.01秒未満の高応答性を実現しており、 $\pm 0.02\text{mm}$ のサイン波入力に対する周波数応答も、30Hz以上(90度位相遅れ)という非常に高

い応答性を実現している⁴⁾。

- 1) ウエッジの端部の油圧シリンダに直動式サーボ弁を直結し、2次側配管内の油の圧縮による遅れを最小化した。
- 2) ウエ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) ウエ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) ウエ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11にウエッジのステップ応答を示す。20 μm 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⁶⁾。

5 自動板厚制御(AGC)の精度向上

KTミルでは、板厚制御としてBISRA-AGC、モニタAGC、フィードフォワードAGC、マスフローAGC、および、張力AGCなど、用途に応じて多様なモードを用意している。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。ここでは、マスフローAGCを用いたシステムを紹介する。

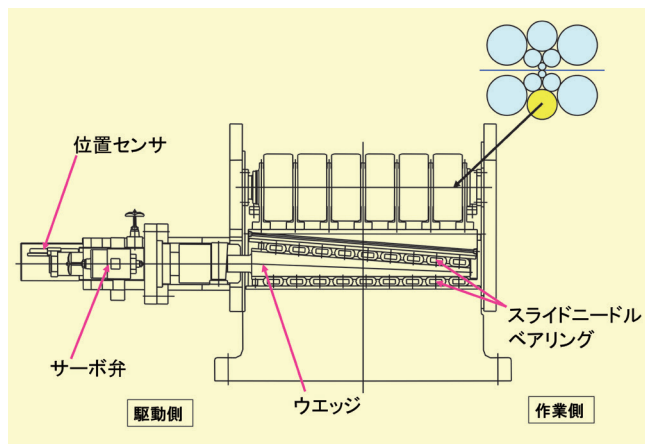


図10 ウエッジ式油圧圧下装置 (Online version in color.)

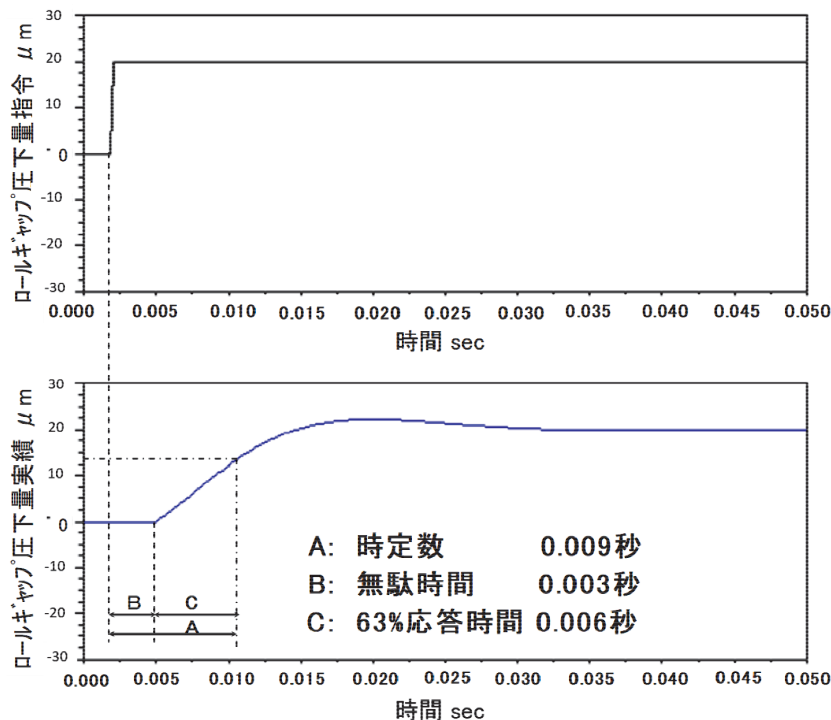


図11 ウエッジのステップ応答 (Online version in color.)

5.1 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・後端部や加減速部における板厚変動の精度向上に効果が大きい。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、遅れ時間なくウエ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。マスフローAGCは、ワークロール直下を単位時間に通過する圧延材の体積は一定であるという原理であり、これを応用し、最終的なマスフロー自動制御のロールギャップ出力ΔSは式(1)で与えられる⁶⁾。

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

- ここに、C：制御ゲイン (0 < C ≤ 1)
- H：入側板厚
- h：出側板厚
- V₁：入側板速度
- V₂：出側板速度
- M：ミル定数
- m：材料塑性定数

5.2 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。板厚精度の厳しい要求に対しては、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、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。また実用化には、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、傾斜機構などを適用して圧延機への実装を可能とした⁶⁾。

5.3 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12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0.05 mmにおいて定常圧延部で±0.3～±0.5 μm以下、加減速部においても±1.0 μm以下の極めて高い板厚精度を達成している⁶⁾。

5.4 板厚・形状非干渉制御⁴⁾

形状制御アクチュエータ、特にクラウンコントロールを作動させると形状のみならず板厚を変化させてしまう場合がある。KTミルは当社20段圧延機の形状修正能力を大幅に増強しているため、板厚への影響度も大きい。そこで形状・板厚の非干渉制御を具備することで、形状と板厚精度を両立させ、高度な品質レベルを達成している。本システムは圧延中にある形状制御アクチュエータを変化させた時、板厚の微小な変化量を板厚の影響係数として、形状制御アクチュエータごとにあらかじめ採取する。その上で、自動形状制御を行う際に最も板厚への影響が少なくなるように、各アクチュエータの制御出力を組み合わせ出力する上位非干渉制御と、さらに、上位非干渉を行っても予想される板厚の微小な板厚変動分を板厚専用アクチュエータである油圧圧下ウエッジを用いて同時に補償する下位非干渉制御の両者を組み合わせることを特徴としている。非干渉制御の効果を確認するために、非干渉制御を実施(ON)した場合と実施しない(OFF)場合の出側板厚変動量の比較例を図13に示す。クラウン調整装置の作動時、非干渉制御を実施しない場合は、数 μm程度の板厚変動が発生したが、実施時には出側板厚変動が抑制されている。

6 自動形状制御(AFC)における管理・評価機能

冷間薄板圧延の安定操作のためには、自動形状制御技術は今や必要不可欠である。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

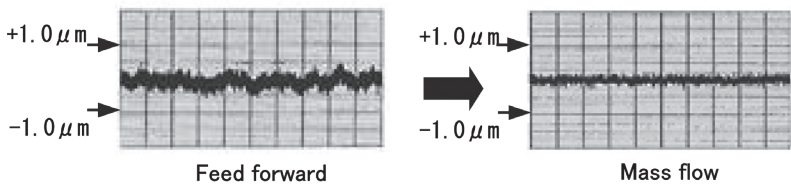


図12 板厚チャートの一例

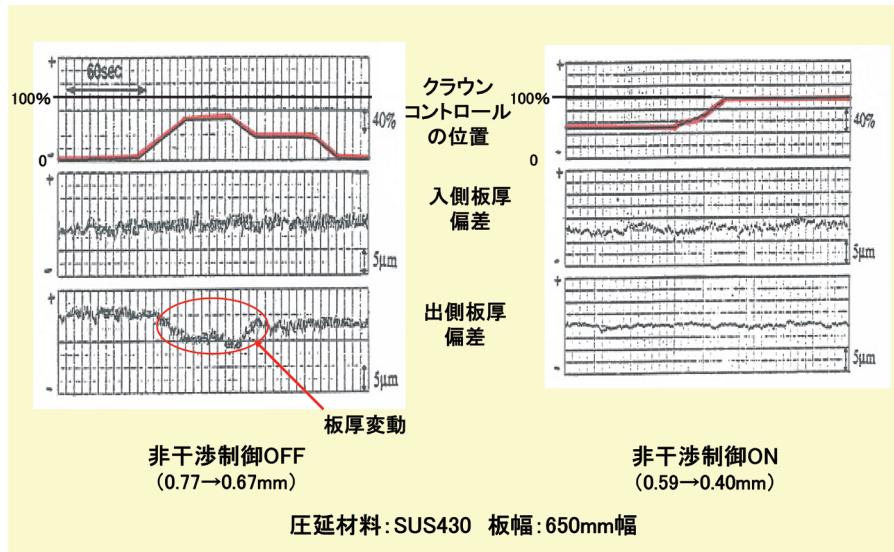


図13 ステンレス圧延における非干渉制御の実施例 (Online version in color.)

の制御装置を提供している (図14)。制御モデルの特徴は、多入力ー多出力を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⁶⁾。

6.1 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 ε_i 、アクチュエータ相対位置を Δx_i 、形状の影響係数を A_{ij} 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。

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

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⁶⁾。

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

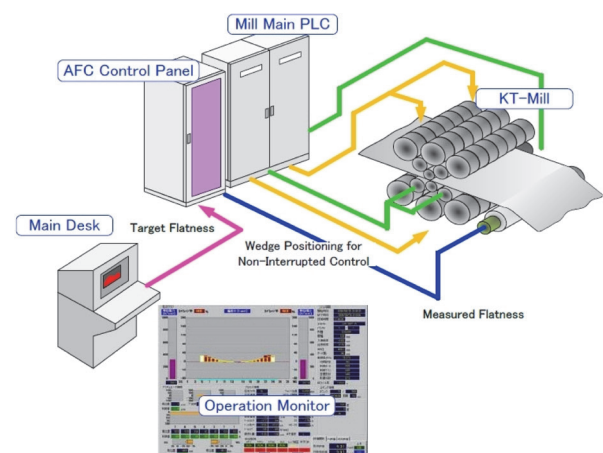


図14 形状制御装置概念図 (Online version in color.)

6.2 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、厚み、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。一方、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。特に、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である。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15)。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・管理するシステムとしている。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⁶⁾。

6.3 適用結果とロギングシステム

形状制御とは、ロール変形や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板形状と、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、最適な収束解を見だし目標に近づける制御である。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である。ここでは、チルチング（1軸）、第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。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（図16）。

7 形状検出ローラ

板圧延においては、ワークロールの変形や熱膨張によって圧下量が板幅方向にわずかに不均一となり、コイルの板長手方向の長さの差が生じる。このコイル長さの差の幅方向分布を形状、あるいは平坦度と呼んでいる。急峻度 [%] や伸び差率 [I-unit (1×10^{-5})] という単位で評価され、板厚とともに製品品質の重要な管理項目となっている（図17）。圧延中の板破断や板蛇行防止、圧延速度向上など安定操業には良好な板形状が必要である。圧延中のコイル長さの差は張力差となって接触ローラ表面に生じる接触圧力（垂直荷重）分布を生じさせる。この性質に着目し、接触ローラの垂直荷重分布を検出することによって圧延中に変化する板形状を測定する装置が形状検出ローラである（図18・19）。当社では、1985 年納

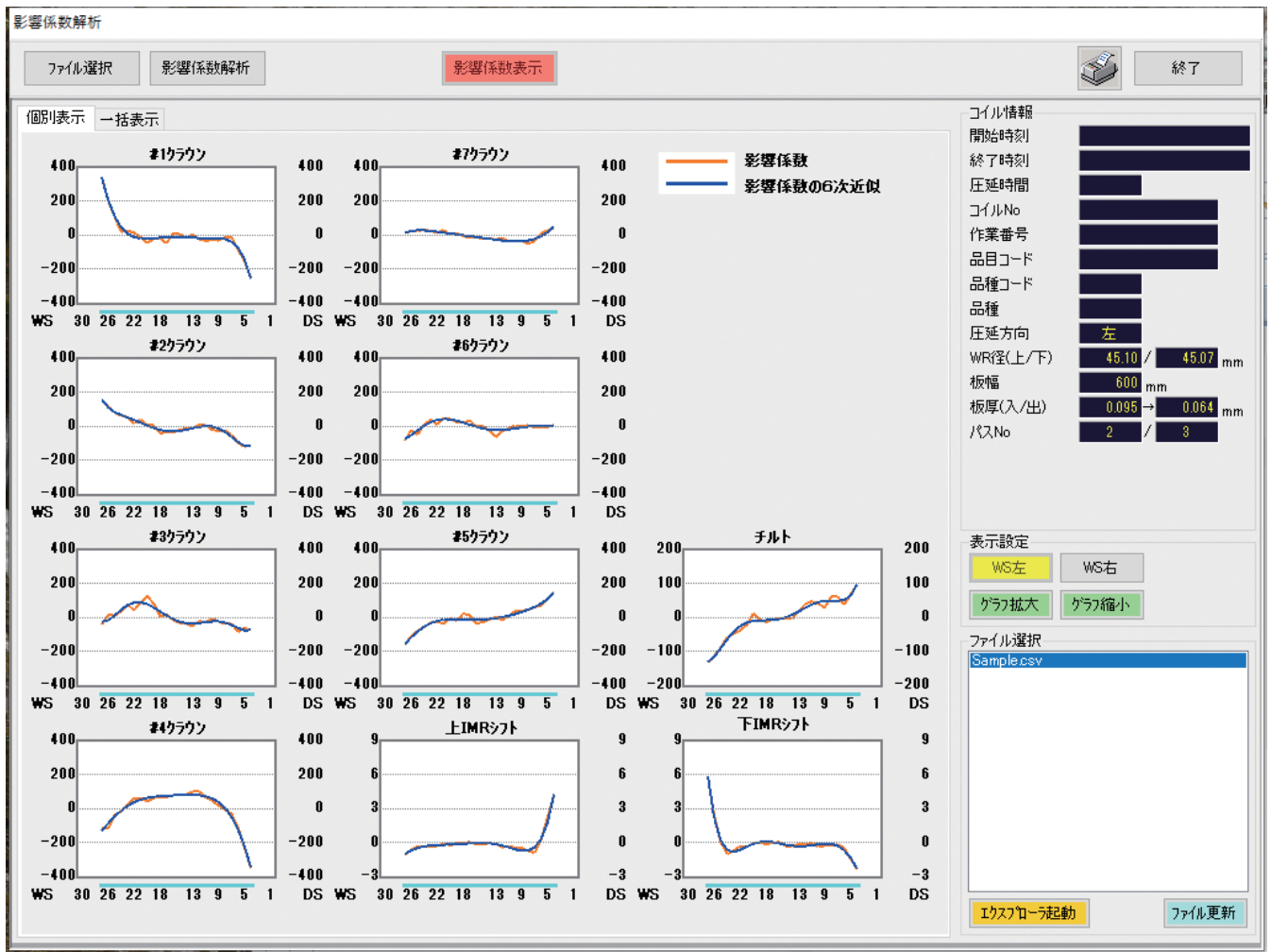


図15 小径ワークロールにおける影響係数解析システム（Online version in color.）

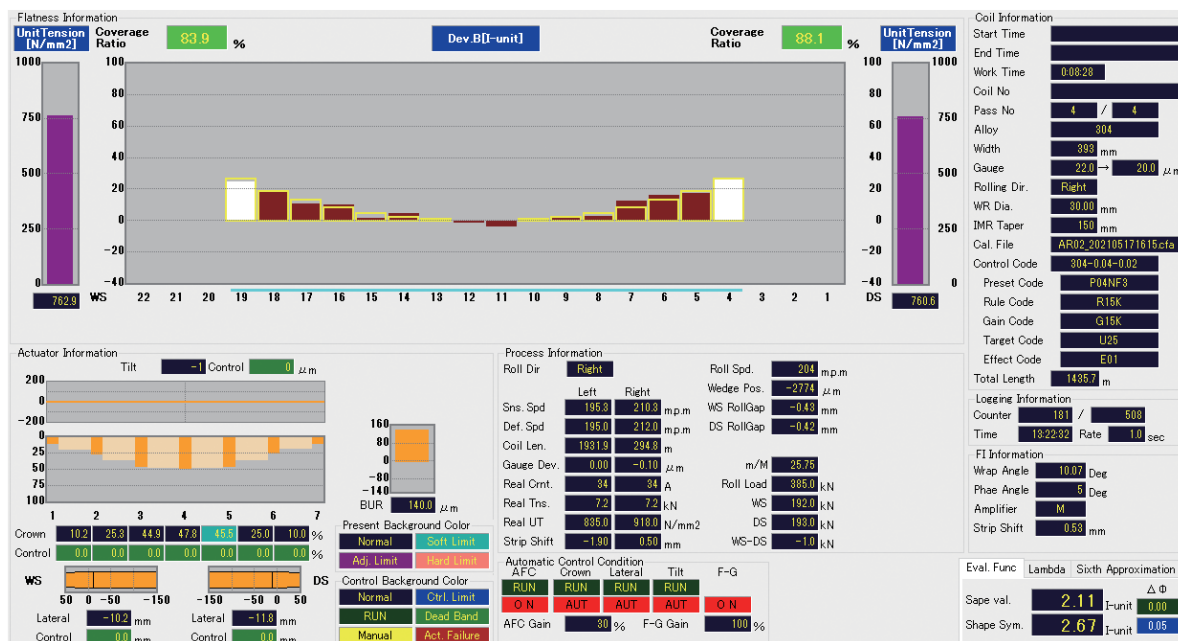
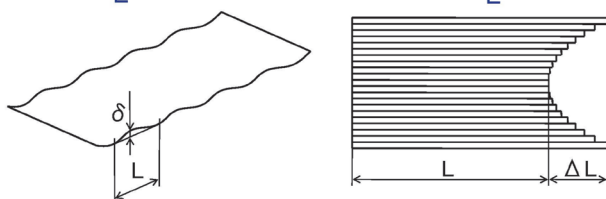


図 16 箔材料の形状制御結果 (Online version in color.)

Flatness (Steepness : λ and Elongation : I-Unit)

$$1. \lambda = \frac{\delta}{L}$$

$$2. I\text{-Unit} = \frac{\Delta L}{L} \times 10^5$$



3. The relation between Steepness and Elongation

$$I\text{-Unit} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \times \lambda^2 \quad (\text{The strip is approximated in a sine curve})$$

Example: Steepness 1% = About 25 I-Unit, Steepness 2% = About 100 I-Unit

図 17 板幅方向の伸び差分布 (Online version in color.)

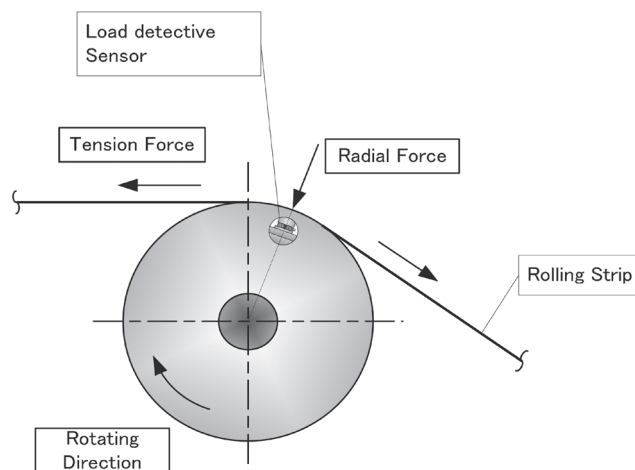


図 18 張力検出原理

入の1号機から改良を重ね、KTミルのみならず、アルミニウム箔圧延機、20段圧延機などの当社製圧延機に加え、他社製の多段圧延設備やタンデム圧延機などにも採用されており、約200本の納入実績を有する⁷⁾。

8 板表面品質

8.1 板表面のしわ発生防止⁵⁾

箔圧延では、板厚が薄いため板そのものの剛性が弱く、板表面にしわが発生しやすい。KTミルでは、図20に示すように、デフレクターローラとテンションリールの間にサポートローラを設置することによって箔の拘束点間の距離を短くし、表面しわの発生を防止している。サポートローラは、最

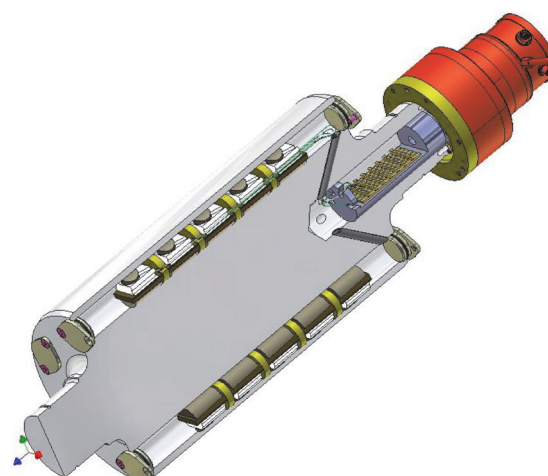


図 19 当社製形状検出ローラ外觀 (Online version in color.)

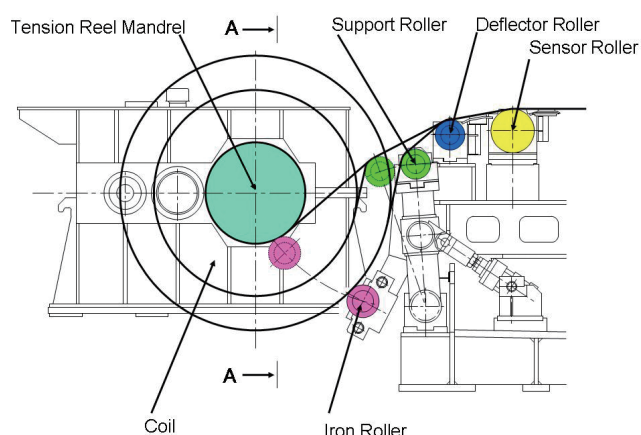


図20 サポートローラとアイロンローラ (Online version in color.)

適な設置位置で板を拘束できるよう、巻取コイル径の変化に伴って圧延中に移動させることができる。また、テンションリールの巻取点近傍にアイロンローラを設置し、テンションリールに巻取られる極薄板の表面に一定の圧力で押付け、巻取際のエアの巻込などによるしわ発生を防止している。巻取コイル径の変化に伴ってアイロンローラの自重方向ベクトルが変化するため、板への押付圧が変化する。しかしながらこの変化分は、アイロンローラ押付シリンダ力に補正を加えることにより、巻取コイル径にかかわらず箔表面への押付力は巻取開始から終了まで一定に保つことができる。サポートローラとアイロンローラは上記のような重要な役割を持っているが、一方で、板表面に接触するローラ数が増えるとスリップきずが発生する懸念も増加する。

8.2 板表面のスリップきず発生防止⁵⁾

箔材は主に電子材料用に使用されるため、スリップきずの管理基準は、通常圧延材よりも厳しい。しかしながら、箔圧延では、圧延時の張力が通常の板圧延に比べると小さくなるため、板表面に接触するローラ類に起因するスリップきずが発生しやすい。箔用KTミルにおいては、スリップに起因するきず防止の為に、板に接触するローラ全てに駆動装置を装備し、レーザドップラ速度計にて検出した板速度を基準として速度同調させ、板きず発生を防止している。図21にサポートローラ、アイロンローラを駆動するメカニズムを示す。この方式による速度同調精度は $\pm 0.5\%$ 以下である。ローラ駆動メカニズムは、駆動源のアクチュエータ (ACモータ) をローラの軸端に設置して駆動するのが一般的な方法である。しかし、図18で示されるように、サポートローラとアイロンローラは、テンションリールに巻付けるコイル径の時々刻々の変化に応じてローラの位置が移動するため、ローラ軸端に

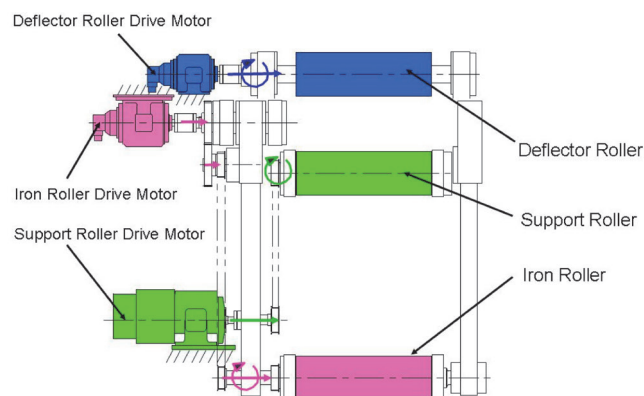


図21 サポートローラ・アイロンローラ駆動メカニズム (図20 矢視A-A) (Online version in color.)

ACモータを設置するとACモータも移動する。当社では、図19に示すように動力伝達機構に工夫を施すことにより、ACモータを固定部に設置し、移動部へのモータ取付に伴う振動などの外部からの影響をなくしている。また、固定配線とすることによりトラブル発生を低減し、かつメンテナンス性を向上させている。

9 むすび

本稿では、硬質箔を厚み $10\mu\text{m}$ ・幅600mm前後まで圧延可能な多段圧延機について、当社の視点から様々な機能を紹介した。産業機械は主にユーザのニーズを機能化することで発展していくと考える。今後も環境変化への適応や、ユーザの様々なニーズに応えながら、機能向上を目指していく所存である。

参考文献

- 1) 鈴木弘：圧延百話，(2000)，292.
- 2) 前田恭志，上杉憲一，長野啓太郎：R & D神戸製鋼技報，59 (2009)，57.
- 3) 鈴木弘：圧延百話，(2000)，125.
- 4) 北川聡一，上杉憲一，岡本雅好，前田恭志，片山祐之，井上哲雄：塑性と加工，599 (2010)，1140.
- 5) 上杉憲一，岡本雅好，宮園太介，片山裕之，井上哲雄，平永孝志：R & D神戸製鋼技報，58 (2008)，12.
- 6) 宮園太介，細川晴行，長野啓太郎，片山裕之，清水隆広：R & D神戸製鋼技報，67 (2018)，39.
- 7) 細川晴行，高橋俊充，上杉憲一，田中雅人：R & D神戸製鋼技報，59 (2009)，61.

(2023年12月4日受付)