

(解説)

# 板形状検出装置(FI) / 自動形状制御装置(AFC)

Shapematic® Roller and System for Strip Rolling Mill



細川晴行\*  
Haruyuki HOSOKAWA



高橋俊充\*  
Toshimitsu TAKAHASHI



上杉憲一\*  
Kenichi UESUGI



田中雅人\*\*  
Masato TANAKA

In recent years rolling material has become more highly resistant to deformation and thinner, which causes difficulty in stable mill operation; requiring flatness measuring high-accuracy sensors and its control system. Since 1984 we have been supplying the “Shapematic Roller” as the flatness measuring sensor and the “Shapematic System” as the controller of the rolling mill based on flatness; receiving just evaluations of high accuracy and reliability. The “Shapematic System” is now applied to various types of rolling mills along with our unique technology and close follow-up for the customer.

まえがき = 近年の携帯用デジタル機器に使用される電子材料は極薄化・硬質化する傾向が顕著である。さらに圧延ユーザでは、多品種・少量の圧延材料を効率よく生産するために、高圧下・高速化に対しての要求が高まっており、同時に品質精度はますます厳しくなっている。このため、高品質で高生産性が求められる冷間薄板圧延設備には、高精度な形状検出口ロールを備えた制御システムが不可欠となっている。

当社は極薄板圧延機を設計・製造するとともに高精度な形状検出口ロールと制御装置を提供し、圧延ユーザのニーズにこたえてきた。本稿では、当社における形状検出器 Shapematic® Roller と制御装置 Shapematic® System の開発・設計の発展経緯と今後の展開について述べる。

## 1. 形状検出口ロールの発展

板圧延においては、圧延材に接触するワークロールの機械的なたわみ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に差が生じる。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。伸び差率 % や伸び差 I-unit ( $1 \times 10^{-5}$ ) 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1)。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のが形状検出装置(図2)である。

当社の形状検出口ロールは、1985年納入の1号機から改良を重ね、アルミニウム箔圧延設備、12段圧延設備、20段圧延設備などの当社製圧延設備に加え、他社製の多段

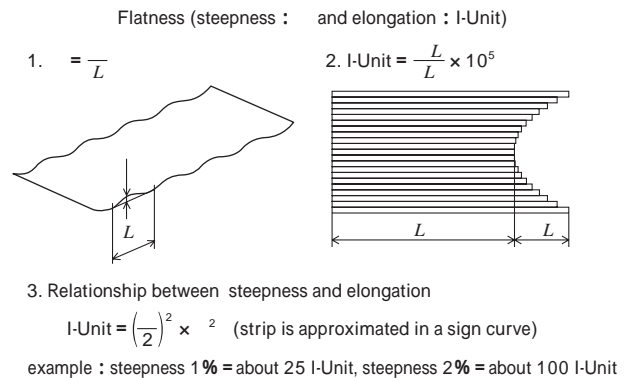


図1 板幅方向の伸び差分布  
Fig. 1 Distribution of steepness and elongation

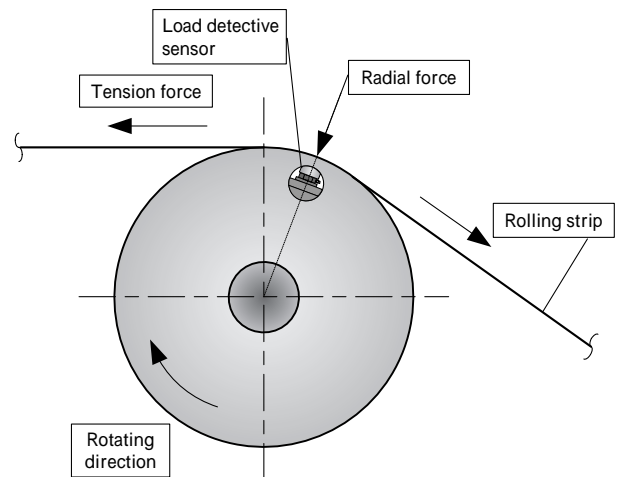


図2 張力検出原理  
Fig. 2 Principle of measuring tension force

圧延設備やタンデム圧延設備などにも採用されている。3世代ある形状検出口ロールのそれぞれの納入実績は図3に示したとおりであり、合計すると約100本の納入実績を有する<sup>1)</sup>。

\*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部 \*\*神鋼テクノ(株)

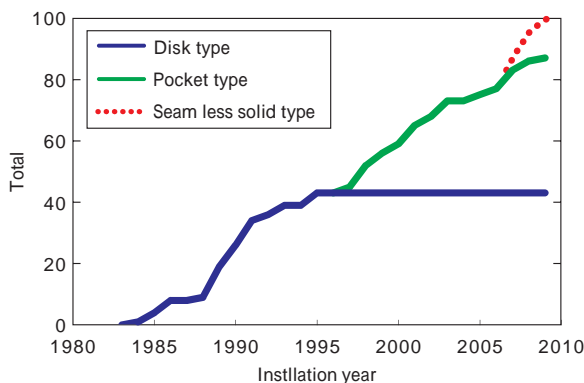


図3 形状検出ローラの納入実績  
Fig. 3 Supply record of Shapematic Roller

### 1.1 第1世代形状検出ローラ

当社は1984年にドイツ鉄鋼協会傘下の生産技術研究所(BFI)と技術提携を行った。BFIの所有する基本特許に基づいて形状検出ローラ的设计・製作を開始し、1985年、同様のアルミ箔圧延設備に自社製作1号機を納入した。

1985年～1995年に設計・製作し納入した第1世代の形状検出ローラは、検出エレメント幅に加工したディスク形状の部品(エレメント)に圧電水晶式のセンサを1箇所取付け、そのディスクを軸方向に積層した後にタイロッドにて締結した構造である(図4)。また、表面硬度の向上や表面の防錆加工など、客先ごとのニーズに対応した商品化を展開した。

### 1.2 第二世代形状検出ローラ

1990年代には、ユーザが指向する製品品質の向上と生産性向上に対する要求はさらに厳しくなり、圧延設備に加えて計測制御機器に対しても高い性能が要求されるようになってきた。

こうしたユーザニーズにこたえるため、1997年からは第二世代の形状検出ローラとして図5に示すポケット型形状検出ローラの製作を開始した。

従来のディスク型構造では、張力の高い圧延条件に対応すべく、ローラ剛性を確保するためにロール径を大きくするなどの対策を必要とした。ポケット型形状検出ローラではロールポデーを一体化し、ロール表面から加工した穴にセンサを組み込む構造にすることによって対処した。

また、第二世代では、回転する検出ローラからの荷重信号を伝送する装置をアナログ方式からデジタル方式に変更し、耐ノイズ性を向上させた。

従来は、水銀を使用して回転体からの信号を取出していたが、PCM(Pulse Code Modulation)による光伝送方式による非接触型の信号伝送機器を採用した。これにより、回転部分の電装品の劣化対策に加え、水銀などの有害物質を使用しない対環境性能の改善を図ることができた。

### 1.3 第三世代形状検出ローラ

21世紀に入り、デジタル機器の小型・軽量化に伴って電子材料の表面性状に対する要求がますます厳しくなった。純アルミニウム材、純銅材などの軟材および高輝度ステンレス材などに対しては、圧延時の転写キズなどのリスクを避けるため、ローラ表面への加工を排した完全

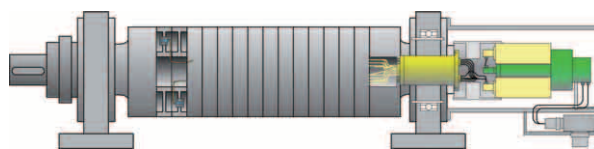


図4 第一世代 ディスク型形状検出ローラ  
Fig. 4 First generation disk type roller

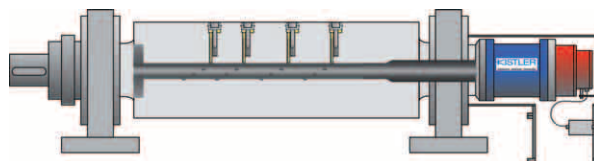


図5 第二世代 ポケット型形状検出ローラ  
Fig. 5 Second generation pocket type roller

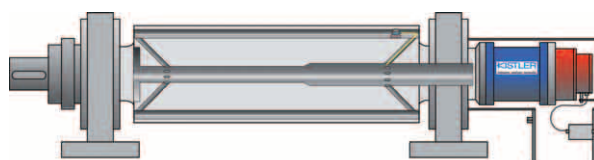


図6 第三世代 一体ロール型形状検出ローラ  
Fig. 6 Third generation seam-less solid type roller

な一体型構造にすることが必要になった。

そこで、ローラの胴体表面近くの側面から軸方向に精密な深穴加工を施す構造とすることにより、圧延材が接触するロール表面の間げきを排除した一体ロール型形状検出ローラ(図6)を開発した。形状検出演算においては、特殊な環境下で使用される場合には、荷重の干渉に対応するデータサンプリング方法を組みめるように配慮した。この新型ローラは、第三世代形状検出ローラとして2007年から製作・納入を開始している。

この一体ロール型形状検出ローラは表面が完全無垢(むく)であることから、ローラの表面処理としてCrめっきやゴムコーティングに加え、第二世代では施工困難であった炭化タンゲステン(WC)溶射が可能となり、多様化するユーザニーズへの対応が可能となっている。

## 2. 形状制御システム

### 2.1 形状制御システムの開発歴史

当社は、アルミニウム箔圧延機におけるロール直下でのクーラントスプレー流量分布およびロールの熱膨張による変形メカニズムを解析し、圧延機の熱解析モデルとロール間隙を正確に計算するシミュレーションシステムを1980年に開発した。当時のアナログ計算機(図7)を用い、机上において圧延機を再現して正確な形状の動特性を解析した。そしてそのシミュレーション結果に基づき、アルミ箔圧延機用形状制御装置 Shapematic Systemの第1号機を1984年に完成させた<sup>2)</sup>。

1980年後半には、半導体リードフレームをはじめとする電子部品などの強圧下を要する極薄化製品に対して小径ワークロールを採用した多段圧延機が適用されてきた。当社は1987年に多段圧延機向けに形状修正アクチュエータの影響係数を用いた多変数制御モデルを開発し、1989年に実機1号機を当社長府製造所に納入した。

その後、4段圧延機、6段圧延機などの多様な圧延設備

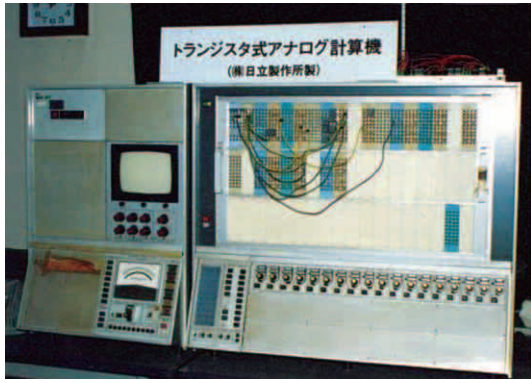


図7 1980年 トランジスタ式アナログ計算機  
Fig. 7 80s' transistor analog computer ALS-505

に適用し、制御アルゴリズムの有効性を確認した<sup>3)</sup>。

## 2.2 自動形状制御 (AFC) システム

影響係数モデルを用いることによって圧延機の機械特性を正確に表現することが可能となり、最小二乗法とPID制御を組合せて、極薄で硬い材料においても最適な操業圧延状態を保持する制御システムを提供している(図8)。

### 2.2.1 形状影響係数 (形状修正能力)

当社の多段圧延機であるKT (12段圧延機)・KST (20段圧延機) Millにはクラウン (バックアップロールのサドル部を押出す機構), ラテラル (テーパの付いた中間ロールを出し入れする機構), チルト (圧延機の上部ハウジングを傾ける機構) などの形状修正アクチュエータが装備されている(図9)。伸銅某社に納入したKST-Millの形状修正能力である影響係数 (クラウン4軸, ラテラル2軸, チルト1軸, 計7種類) を図10に示す<sup>4), 5)</sup>。影響係数とは、形状修正アクチュエータが単位量 (1mm) 移動した時の形状変化量 (I-unit) である。

### 2.2.2 最小二乗法による最適計算

センサローラが検出する形状と事前に登録した目標形状との偏差を評価関数として記述し、偏差を最小化するためのアクチュエータ制御量を求める計算に最小二乗法を用いている。形状誤差ベクトル  $x$ , アクチュエータ相対位置  $x_j$ , および影響係数  $A_{i,j}$  ( $i$  はセンサエレメントの番号,  $j$  は修正用アクチュエータの番号を表す) を用いて形状評価関数  $f(x)$  を次のように定義する。

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \sum_{j=1}^m A_{i,j} \cdot x_j \right]^2 = \min$$

この計算式により、最適制御量を一意的に求めることができる<sup>3)</sup>。

### 2.2.3 板厚 - 形状 非干渉制御モデル

代表的な板厚制御システムは、入側の板厚偏差をトラッキングして制御を行うFF (フィードフォワード) AGC (自動板厚制御) モデルである。

材料が軟質材で板厚が厚い場合に自動形状制御を積極的に行ったとき、板厚に対して微小な変動を伴う。例えば圧延加速時の板中央部における形状不良を回避するため、板中心部のクラウン装置 (Crown #2, #3) がロールキャップ開放方向に動作する。この時同時に、板厚制御アクチュエータであるウエッジ機構に対してロールギ

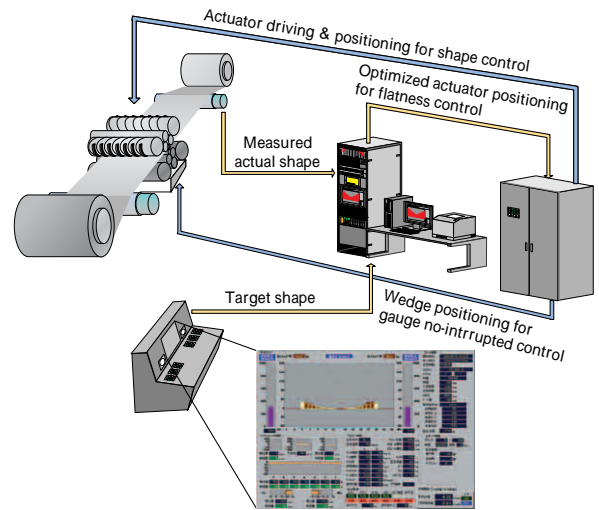


図8 多段圧延機用形状制御装置全体制御モデル  
Fig. 8 General control model for cluster mill

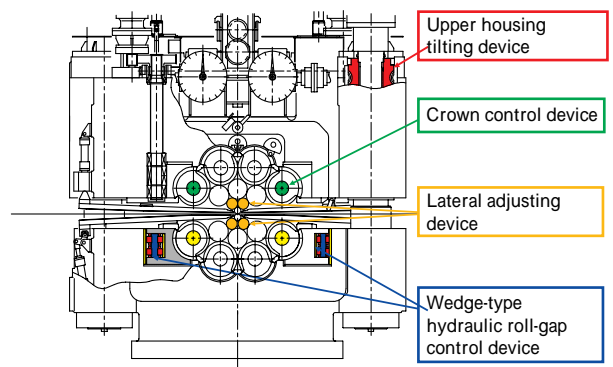


図9 KST-Mill アクチュエータ  
Fig. 9 Actuators of 20 high KST-Mill

width : 635(mm) entry thickness : 0.250(mm) exit thickness : 0.150(mm)

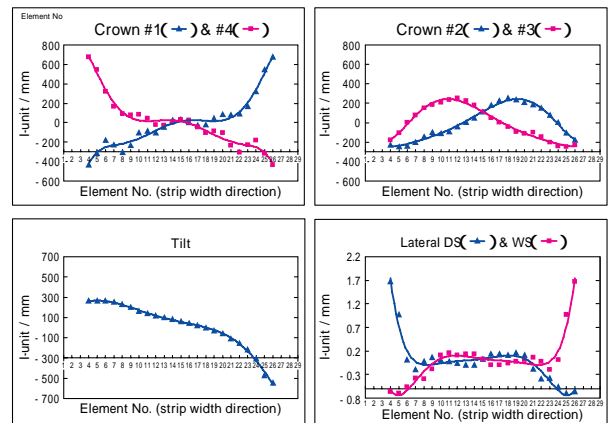


図10 KST-Mill の形状影響係数例  
Fig.10 Flatness influence coefficient factor of KST-Mill

ャップを圧下方向に動作させることによって出側板厚の変動を最小化している(図11)。

アクチュエータの相対位置  $x_j$ , 板厚影響係数  $\frac{\partial h}{\partial x_i}$ , 板厚変動量  $\hat{h}$  とした時、板厚アクチュエータ相対位置  $x_w$  は下式で求めることができる。

$$\hat{h} = \sum_{i=1}^m \frac{\partial h}{\partial x_i} x_j$$

$$x_w = -g \cdot \frac{1}{\partial h / \partial W} \cdot \hat{h}$$

非干渉制御は形状と板厚精度を両立させる有効な制御モデルである。

#### 2.2.4 多変数制御モデルの適用結果

当社の多段圧延機である伸銅某社向け KST-Mill における適用事例を紹介する。

圧延開始から急速に加速するとワークロールに形状パターン相似性の評価においてもサーマルクラウン（板方向の熱分布によるワークロールの変形）が生成され、板中央部に大きな伸びが発生する。圧延開始直後の 20(s)間は、サーマルクラウンの影響により板センタ部分が伸び形状を示し、グラフの第 3 象限に滞留するがセンタ部クラウン装置（#2, #3）がロールギャップ開放方向に動作し、圧延開始 40(s)後には板エッジ部の伸び形状パターンである所定の目標形状に達して、グラフの第 1 象限に収束する。これまでの形状評価は評価関数のみが小

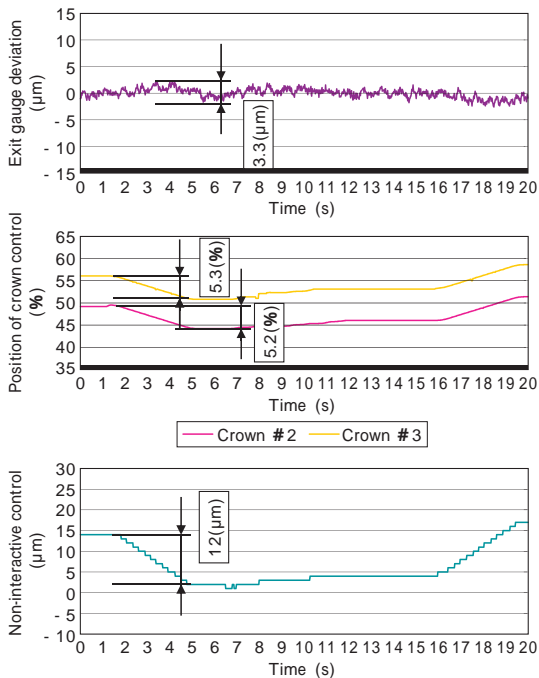


図11 形状 - 板厚非干渉制御出力例

Fig.11 Sample of non-interactive roll-gap control (material copper width : 630mm, thickness : 0.508 - 0.370mm)

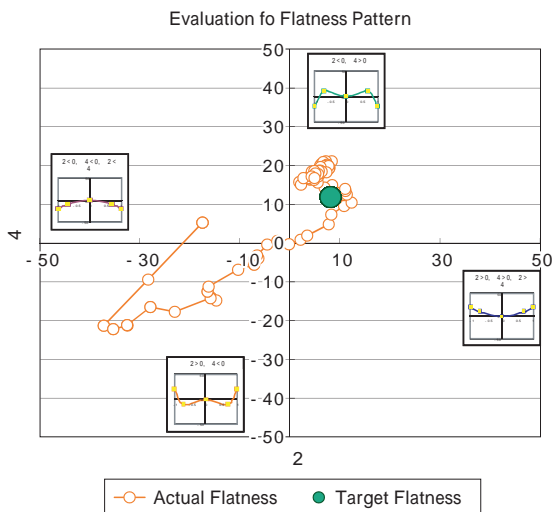


図12 KST-Mill への AFC 適用結果 (1)

Fig.12 Flatness pattern convergence of AFC applied to KST-Mill (material copper strip width : 620mm, thickness : 0.225 -> 0.18mm)

さいことで収束性を判断していたが、中央部とエッジ（コータ）部の形状パターン相似性の評価においても収束形状パターンが一致していることを確認した（図12）。圧延開始 40(s)後に、圧延速度は最高である 500 (m/min)に達し、ほぼ目標形状パターンと一致し、その後コイル全長 3,627(m)にわたり、目標形状を維持している（図13）。アクチュエータ動作と形状の 10(s)ごとの変化を図14 に示している。

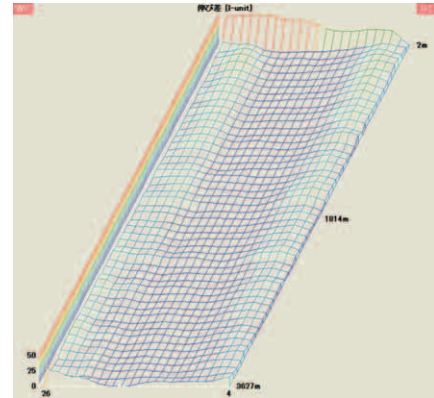


図13 KST-Mill への AFC 適用結果 (2)

Fig.13 Flatness trend of AFC applied to KST-Mill

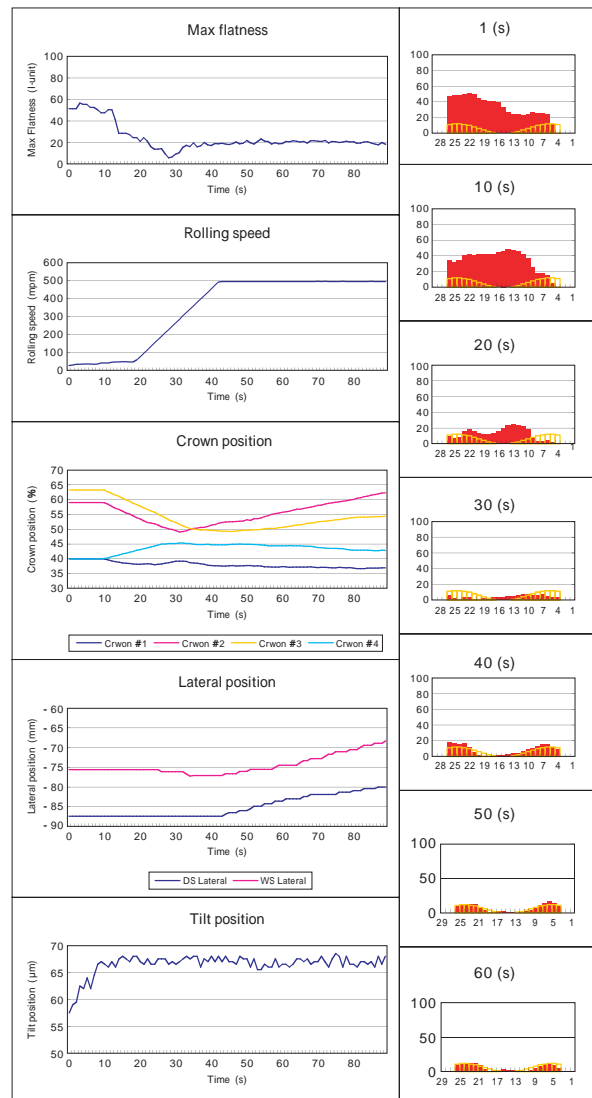


図14 KST-Mill への AFC 適用結果 (3)

Fig.14 Actuator position trend chart of AFC applied to KST-Mill

むすび=当社は1980年代より、圧延材の形状を精度よく計測するための形状検出ローラ改善を重ねてきた。加えて、圧延機の制御を効果的に行うため、形状修正アクチュエータの影響係数による制御モデルを構築した。こうした取組みにより、極薄、硬質材料向けの多段圧延機の形状制御装置の品質向上と同時に、生産性向上と省人化に寄与することができた。今後も、高度な制御システムを高品質な形状検出ローラと融合させたシステムを供給してゆく所存である。

#### 参 考 文 献

- 1) 北川聡一：第43回塑性加工連合講演会(1992.10) p.685.
- 2) 大島啓生：R&D 神戸製鋼技報, Vol.33, No.2 (1983) p.20.
- 3) 坪野 肇ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1 (1991) p.101.
- 4) 前田恭志ほか：塑性と加工, 第32巻, 第363号(1991.4) p.473-474.
- 5) 上杉憲一ほか：第120回圧延理論部会(2004.6).