

川崎製鉄技報

KAWASAKI STEEL GIHO

Vol.28 (1996) No.2

12 段クラスターミルにおける非定常部板厚・形状制御によるステンレス鋼板の高能率圧延技術

High Productive and High Accuracy Cold Rolling Technologies in 12-Hi Cluster Mill of Stainless Steel Strips

星野 将史(Masashi Hoshino) 館野 純一(jun-ichi Tateno) 深谷 敏弘(Toshihoro Fukaya)

要旨：

千葉製鉄所の 12 段クラスター型冷間圧延機 SCM(stainless cold mill)は、1991 年 3 月に稼動してから、ステンレス光沢材を圧延している。本ミルでは高精度の板厚および形状制御技術を開発し、高品質化および高速圧延による高能率化を達成した。板厚制御においては、圧延の非定常部となる加減速における板厚変動を著しく低減する制御技術を開発した。この制御と、従来の制御であるモニターAGC およびフィードフォワード AGC を併用することで、精度の高い板厚が得られた。また、形状制御においては、既存技術であるフィードバック制御のみでは不可能な鋼板の先端部の形状を平坦化する最適形状セットアップモデルを開発した。これら新技術の開発により、鋼板全長にわたり均一な板厚、および形状が得られるようになり、かつ高速圧延が可能となった。

Synopsis :

A 12-high cluster mill (SCM : stainless cold mill) at Chiba Works has been used for the cold rolling of high brightness stainless steel strips since March 1991. To produce higher quality strips with higher productivity, two new technologies were developed and applied to the mill. One is an automatic gauge control system and it improves accuracy of thickness in the accelerating and decelerating stages, while maintaining the accuracy during the constant stage of the rolling process. The other technology is the development of an automatic set-up system to control strip flatness. A mathematical model for the set-up of optimal positioning of flatness actuators makes good strip flatness possible and allows an immediate increase in rolling speed after the start of rolling.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

12段クラスターミルにおける非定常部板厚・形状制御によるステンレス鋼板の高効率圧延技術*

High Productive and High Accuracy Cold Rolling Technologies in 12-Hi Cluster Mill of Stainless Steel Strips



星野 将史

Masashi Hoshino
千葉製鉄所 ステンレス部ステンレス技術室



館野 純一

Jun-ichi Tateno
技術研究所 加工・制御研究部門



深谷 敏弘

Toshihiro Fukaya
千葉製鉄所 制御技術室

要旨

千葉製鉄所の12段クラスター型冷間圧延機SCM(stainless cold mill)は、1991年3月に稼動してから、ステンレス光沢材を圧延している。本ミルでは高精度の板厚および形状制御技術を開発し、高品質化および高速圧延による高効率化を達成した。板厚制御においては、圧延の非定常部となる加減速における板厚変動を著しく低減する制御技術を開発した。この制御と、従来の制御であるモニターAGCおよびフィードフォワードAGCを併用することで、精度の高い板厚が得られた。また、形状制御においては、既存技術であるフィードバック制御のみでは不可能な鋼板の先端部の形状を平坦化する最適形状セットアップモデルを開発した。これら新技術の開発により、鋼板全長にわたり均一な板厚、および形状が得られるようになり、かつ高速圧延が可能となった。

Synopsis:

A 12-high cluster mill (SCM : stainless cold mill) at Chiba Works has been used for the cold rolling of high brightness stainless steel strips since March 1991. To produce higher quality strips with higher productivity, two new technologies were developed and applied to the mill. One is an automatic gauge control system and it improves accuracy of thickness in the accelerating and decelerating stages, while maintaining the accuracy during the constant stage of the rolling process. The other technology is the development of an automatic set-up system to control strip flatness. A mathematical model for the set-up of optimal positioning of flatness actuators makes good strip flatness possible and allows an immediate increase in rolling speed after the start of rolling.

1 緒言

ステンレス冷延鋼板の需要拡大および顧客へのより良い品質を有する鋼板の供給に対応するため、当社では1991年3月より千葉製鉄所に1600mmの広幅まで製造可能なステンレス専用の新鋭冷間圧延機SCM(stainless cold mill)を稼動させた。

一般に、ステンレス鋼板のような高変形抵抗材料や表面光沢を要求される材料の圧延では小径ワークロールの可逆式多段ロールミルが使用される。また、近年では高生産性を確保するため高速の圧延機が採用されている¹⁾。したがって、圧延機として高生産性および高品質化要求に応えるための板厚・形状制御を有する12段クラスターミル²⁾を採用し、さらにコイル搬送等の自動化設備を導入した。

しかし、本圧延機で高速圧延すると加減速時に荷重変動が大きくて板厚変動が生じるが、本来備わっていたAGC(automatic gauge control)のみでは十分な制御が困難であった。また、小径ワークロールを用いた圧延では、ロールがたわみやすくて圧延材の形状制御が困難であったが、本ミルではフィードバック制御によって定常圧延

ではほぼ満足出来る平坦度を得ている³⁻⁵⁾。しかし、各パスごとに圧延を開始するにあたり、分割バックアップロールベアリングや中間ロールベンダー等の形状アクチュエータをセットアップする場合、フィードバック制御が機能しないため圧延材の形状は安定しなかった。そこで筆者らは、板厚制御において、加減速時に発生する大きな板厚変動を防止する新たな制御モデルを開発すると同時に、圧延を開始する場合の形状セットアップにおいては、圧延開始直後の形状を精度良く予測して自動セットアップを可能とするモデルを開発し、これらの非定常部における板厚および形状制御技術を確立して高品質材の高効率生産を達成したので以下に述べる。

2 SCMの概要

SCMの構造および主な仕様を各々Fig. 1およびTable 1に示す。本圧延機は最大1600mmの広幅ステンレス鋼板の冷間圧延を行う可逆式12段クラスターミルである。主な仕様として、最高速度は800m/min、最大張力は588kNであり、圧延動力はミルモータで6300kW、リールモータで4400kWである。また、素材コイルの搬入および製品コイルの搬出、ワークロールの搬送および交換はすべて自動搬送システムによって行われる。

* 平成8年4月3日原稿受付

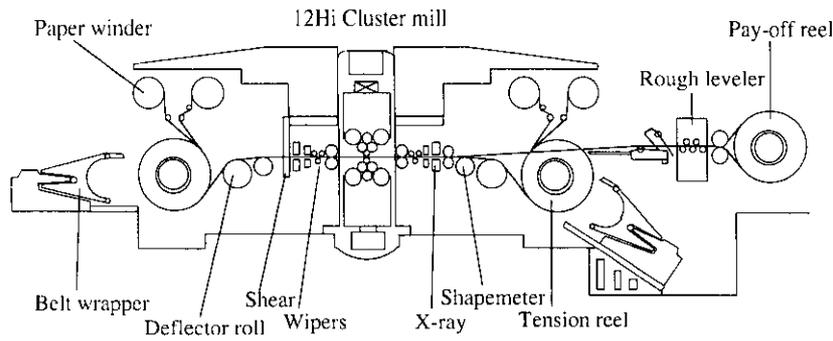


Fig. 1 Layout of SCM

Table 1 Main specifications of SCM

Rolling speed	(m/min)	Max. 800
Tension	(kN)	Max. 588
Coil weight	(t)	Max. 30
Strip thickness		
Entry	(mm)	1.0~8.0
Derivery	(mm)	0.1~5.5
Strip width	(mm)	650~1 600
Work roll dia.	(mm)	79~120
Motor power		
Mill motor	(kW)	6 300
Reel motor	(kW)	4 400×2

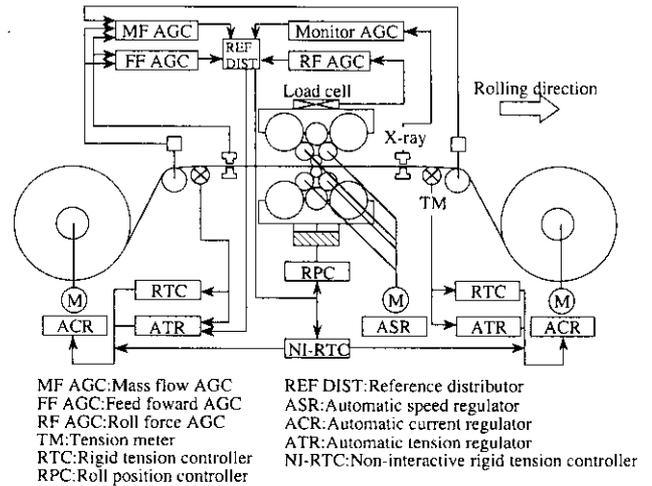


Fig. 2 System configuration of automatic gauge control

3 高精度板厚制御技術の開発

3.1 加減速時の高精度板厚制御モデルの開発

SCMの板厚制御システムの構成をFig. 2に示す。本図に示すように本圧延機は種々のAGCを有しており、圧延条件によって最適なAGCを選択するが、高速の定常圧延時にはモニターAGCとフィードフォワードAGCを組み合わせて使用している。しかし、加減速においては変形抵抗のひずみ速度依存性および温度依存性、摩擦係数の速度依存性により圧延荷重が変動し、板厚制御が困難となると推定される。加減速時における板厚変動は、この荷重の変動によりミルの压下位置が変動することにより生じる。速度偏差を Δv 、圧延荷重の偏差を ΔP 、ミル定数を M 、塑性定数を Q 、板厚変動を修正するための压下位置変更量を ΔS とすると、 ΔS と ΔP の関係は(1)式で与えられる⁹⁾。また、圧延実測値を解析した結果として ΔP と Δv の関係をFig. 3に示す。本図より、これらの関係は(2)式の1次式で近似できる。したがって、(1)式および(2)式より Δv と ΔS の関係は(3)式の形になる。

$$\Delta S = \{(M+Q)/M^2\} \times \Delta P \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\Delta P/\Delta v = \text{const.} \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\Delta S/\Delta v = (M+Q)/M^2 \times \text{const.} \quad \dots \dots \dots (3)$$

(3)式を実機での圧延に適用するため実測値から解析した $\Delta S/\Delta v$ と Q との関係をFig. 4に示す。本図より、実機での圧延に適用する压下位置を制御するモデル式⁷⁾を(4)式に決定した。なお、定数const 1およびconst 2は鋼種ごとにあらかじめ求めておいた。

$$\Delta S/\Delta v = (M+Q)/M^2 \times \text{const 1} + \text{const 2} \quad \dots \dots \dots (4)$$

本モデルを適用した板厚制御の概要をFig. 5に示す。まず、上位の計算機において塑性定数 Q を算出し、ミル定数 M および他の定

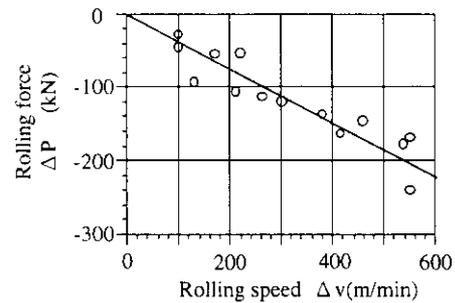


Fig. 3 Relation between rolling speed and rolling force

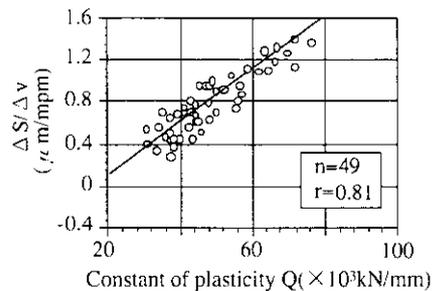


Fig. 4 Relation between $\Delta S/\Delta v$ and constant of plasticity

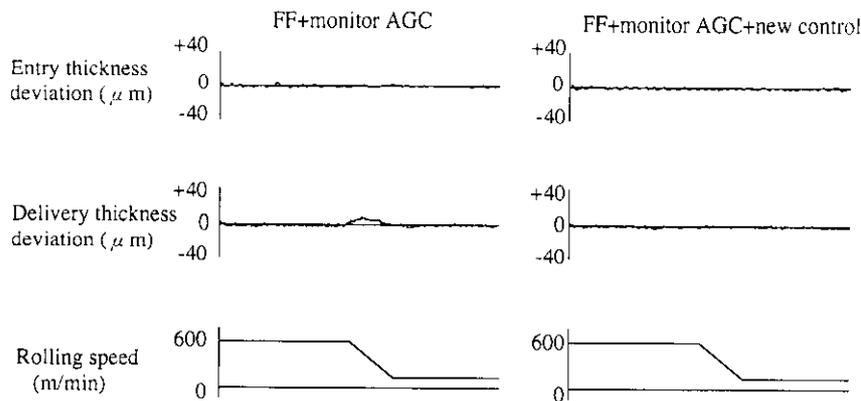


Fig. 5 System configuration of gauge control by new model

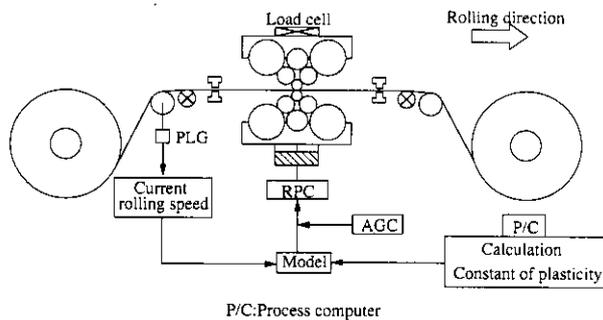


Fig. 6 Gauge control at rolling speed variations

数 const 1 および const 2 を選択する。次に下位の計算機にて速度変化に応じた压下位置変更の指令量を算出し、AGC 制御量との加算回路を経て压下位置を制御する。

3.2 板厚精度の向上効果

Fig. 6 に加減速における本モデル適用の有無における圧延後の板厚偏差の一例を示す。本モデルを適用していない従来の圧延では加減速において約 10 μm の板厚変動が生じていたが、本モデルを適用した制御により、全長にわたり 2 μm 以下の高精度な板厚制御を可能とした。

4 高精度形状制御技術の開発

4.1 形状制御システムの概要

SCM の形状制御アクチュエータの構造および仕様をおのおの Fig. 7 および Table 2 に示す。分割バックアップロール(BUR), 中間ロール(IMR)ベンダー, および油圧压下レベリングとそれぞれ制御特性の異なるアクチュエータを有している。

形状制御システムは、圧延材の鋼種、板幅、板厚等の圧延条件の変化に対して、圧延を開始する前に形状制御アクチュエータを最適に設定するセットアップ機能と、圧延中の圧延荷重や張力の変動による形状変化に対して形状検出信号をフィードバックして制御するダイナミック形状制御機能がある。

ダイナミック形状制御は、圧延荷重の変動による形状変化を予測して IMR ベンダーを操作する荷重補正制御、形状検出器出力の非対称成分偏差を除去するように左右の油圧压下位置レベリングを操作する非対称制御、対称成分偏差を除去するように IMR ベンダーを操

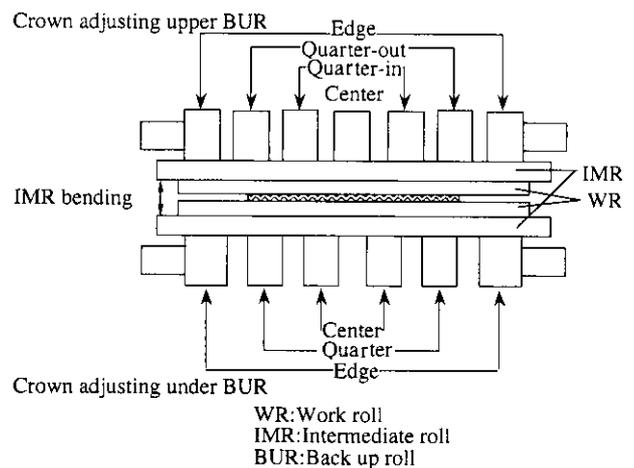


Fig. 7 Flatness control actuators of SCM

Table 2 Specifications of flatness control actuators

Item	Specification
IMR bending (kN/chock)	Max. 245
Upper BUR crown	
Center (μm)	0
Quarter-in (μm)	±410
Quarter-out (μm)	±410
Edge (μm)	+210, -1 000
Under BUR crown	
Edge (μm)	+180, -1 000

作する対称ベンダー制御、高次成分偏差を除去するように上 BUR クラウンを操作する制御を行っている。また、Fig. 8 に示すように本システムの形状表現方法として板幅方向の伸び率分布を 4 次の正規化直交関数に近似した形状モード係数を用いている。

4.2 形状セットアップモデルの開発

従来、多段クラスターミルにはセットアップ機能がなく新たに線形重回帰モデルを開発した。本モデルは上下 BUR クラウンと IMR ベンダーを圧延荷重、板幅、板厚、ワークロール径、目標形状に応じて最適位置に設定するため、形状に影響を与える圧延条件の実績値と形状制御アクチュエータの設定値との関係をあらかじめ回帰し

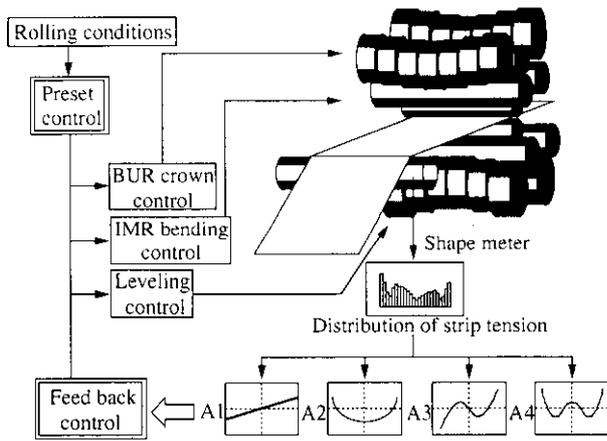


Fig. 8 Automatic flatness control system at SCM

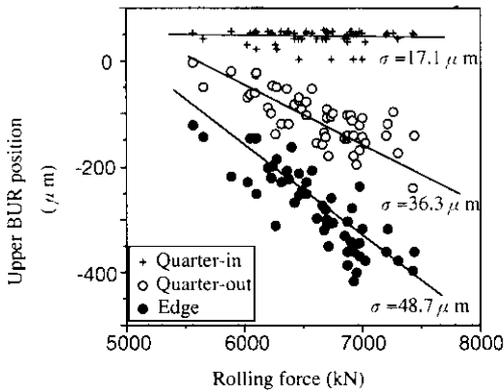


Fig. 9 Relation between BUR position and rolling force

で求めるものである。Fig. 9 に圧延荷重の実測値と上 BUR 設定値の関係の一例を示す。SCM の分割 BUR は上 7 分割、下 6 分割の上下非対称であり、上 BUR の各々の分割ベアリング（クォーターイン、クォーターアウト、およびエッジ部）はそれぞれ独立に設定できるが、下 BUR（クォーター、エッジ部）は連動した設定となっている。したがって、下 BUR、IMR ベンダーはあらかじめダイナミック制御も考慮して最適設定値を定めて、本モデルでは上 BUR の各最適設定値を算出する。また、目標形状の設定を可能とするように形状実績値も回帰した。

本モデル⁹⁾を(5)~(7)式に示す。

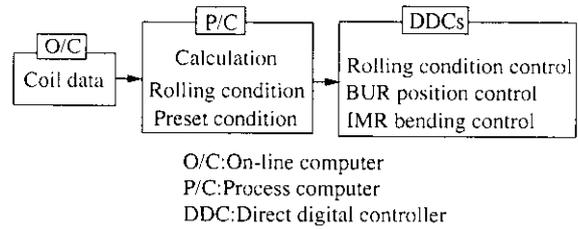


Fig. 10 Block diagram of the set-up model

$$EG = K_{a0} + K_{a1} \cdot P + K_{a2} \cdot BD + K_{a3} \cdot WR + K_{a4} \cdot LE + K_{a5} \cdot \Lambda_2 + K_{a6} \cdot \Lambda_4 \dots (5)$$

$$QO = K_{b0} + K_{b1} \cdot P + K_{b2} \cdot BD + K_{b3} \cdot WR + K_{b4} \cdot LE + K_{b5} \cdot \Lambda_2 + K_{b6} \cdot \Lambda_4 \dots (6)$$

$$QI = K_{c0} + K_{c1} \cdot P + K_{c2} \cdot BD + K_{c3} \cdot WR + K_{c4} \cdot LE + K_{c5} \cdot \Lambda_2 + K_{c6} \cdot \Lambda_4 \dots (7)$$

ここで、EG、QO、QI は上 BUR のエッジ、クォーターアウト、クォーターインの各設定値、P は予測圧延荷重、BD は IMR ベンダー力、WR はワークロール径、LE は下 BUR 押し出し量、 Λ_2 および Λ_4 は目標形状の 2 次および 4 次成分、K は定数である。

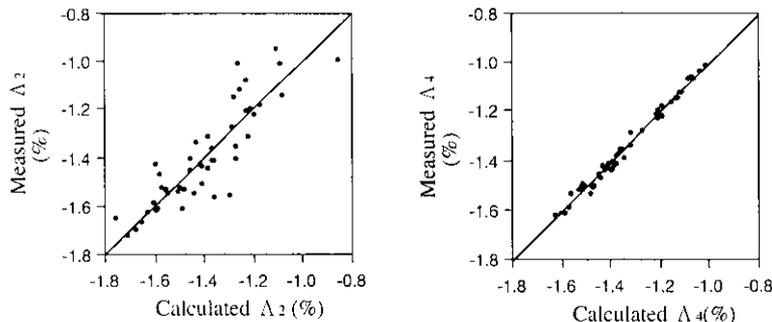
本モデルの構成を Fig. 10 に示す。線形重回帰モデルによる計算はすべて上位の計算機にて行い、下位の計算機では自動設定のみを行う。

4.3 モデル精度の検証

本モデルでセットアップして得られる形状を実測形状と比較した。Fig. 11 に 4 次直交関数表現による Λ_2 と Λ_4 の比較を示す。これらの図より、本モデルは σ が 0.12% 以下の高い精度を有することがわかる。

4.4 形状セットアップの効果

従来の手動でセットアップした場合と開発した線形重回帰モデルを適用した自動セットアップを行った場合の圧延直後の形状の実測値 (Λ_2 , Λ_4) を Fig. 12 に示す。本図より、手動でセットアップした場合は実測した形状と目標とする形状との偏差が大きくて再度手動による形状の修正が必要であったが、開発した自動セットアップにおいては実測した形状と目標とする形状がほぼ一致し、全く手動による修正を行わずに良好な形状を得て圧延できる。この新たに開発した自動形状セットアップモデルと従来のダイナミック制御を併用して、全長にわたり高精度な形状制御を可能とした。



Λ_2 : Quadratic function component
 Λ_4 : Biquadratic function component

Fig. 11 Correlation between calculated and measured target shape

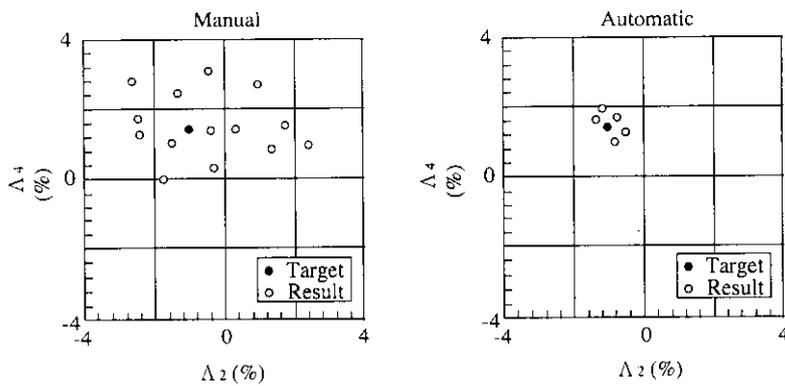


Fig. 12 Comparative results of manual and automatic preset control

5 結 言

当社千葉製鉄所ステンレス工場における SCM の高エネルギー圧延において、板厚制御および形状制御の精度向上を図るため以下の新技術を開発し、実機圧延に適用し、圧延材全長にわたる高精度な板厚および

形状を得て高エネルギー生産を達成した。

- (1) 圧延速度の加減速時に生じる板厚変動を抑制し、精度の良い板厚を得る制御モデルを開発し実用化した。
- (2) 圧延の開始における形状を精度良く予測するセットアップモデルを開発し、自動形状セットアップを実用化した。

参 考 文 献

- 1) 井上美智正, 兼安信太郎, 佃 宣和: 「圧延技術・圧延理論の発展と将来への潮流」, 圧延理論部会第 100 回記念シンポジウム, 日本鉄鋼協会, (1994), 115
- 2) 川並高雄, 山本善康, 橋本一義, 中野恒夫, 大森瞬二, 梶原哲雄: 三菱重工技報, 21(1984)6, 851
- 3) 出倉直樹, 小島寿男, 江原圭介: 住友金属, 46(1994)5, 24
- 4) 福原明彦, 加地孝行, 葉山安信, 寺戸 定, 阿部光博, 福山五郎: 三菱重工技報, 25(1988)4, 331
- 5) 八木竜一, 藤田文夫, 平川智之, 鈴木宣嗣, 村田幸一: 第 44 回塑加連講演, (1993), 311
- 6) 日本塑性加工学会編: 「板圧延」, (1993), 144, [コロナ社]
- 7) 星野将史, 齋数正晴, 都築 聡, 柿原節雄, 佐竹義宏, 尾坂 力: 材料とプロセス, 7(1994)5, 1435
- 8) 館野純一, 渡辺裕一郎, 加地孝行, 剣持一仁, 星野将史, 齋数正晴, 深谷敏弘: 材料とプロセス, 8(1995)2, 504