

技術報告

UDC 621.771.23.064 : 62-531 : 531.717.1

センジマ・ミルの板厚制御

宝田 正昭*・分田 実*²・相澤 均*²
三井 光*²・平位 幸一*²

Automatic Gage Control for Sendzimir Mills

Masaaki TAKARADA, Minoru WAKETA, Hitoshi AIZAWA,
Hikaru MITSUI, and Kôichi HIRAI

Synopsis:

Recently, severe demands for the accurate thickness of cold rolled strip have required the appearance of a new type Automatic Gage Control (AGC) system for Sendzimir mills. AGC systems which meet the requirements have been completed in Hanshin Works, Kawasaki Steel Corp. They are based on the principle of mass flow constant.

Characteristics in this AGC system are as follows ;

- 1 AGC is based on the principle of mass flow constant.
- 2 System has two modes and they are alternatively used in rolling passes.
- 3 To improve response extremly in screw down, the electrical-hydraulic servo system is adopted.

The following accuracy for the strip thickness has been brought about on cold rolling for silicon steel with this AGC system ; more than 98.5% of overall length of a coil falls within thickness deviation 5 μ ms.

1. はじめに

冷間圧延された鋼板の板厚精度は品質上の重要な要素であると共に、オフゲージ率が歩留りに大きく影響する。そのため、冷間圧延における板厚制御はミルの高速化と共に重要なものとなり、研究、開発のテーマとして取り組まれてきている¹⁾²⁾。

冷間圧延機の一機種であるセンジマ・ミルにおいても同様であるが³⁾⁴⁾、1) 可逆ミルである、2) タンデム・ミルに比較して圧延速度が低い、3) ミル剛性が大きく⁵⁾ 板厚矯正能力が強いため熟練したオペレータによる手動操作でも比較的高い板厚精度が得られる、4) BISRRA方式のAGCを使えないなどの理由から、板厚制御の開発、実用化が遅れていたのが実状である。一方では、センジマ・ミルはその特性上ステンレス鋼板や珪素鋼板といった特殊鋼圧延に用いられることが多く、オフゲージ率の減少による歩留り向上、および品質面の問題から、特に珪素鋼板では積層して用いられるという用途

上の特質⁶⁾から板厚精度の向上が強く要求されてきている。

当社では、こうしたニーズに応えるべくセンジマ・ミルの板厚制御課題に取り組んできたが⁷⁾、米国 Waterbury Farrel社より導入したマス・フロー方式のAGCシステムを基礎にして、これを大幅に改良し、従来のAGCと比べて飛躍的に優れた性能のシステムの開発、実用化に成功した。

以下にその概要を報告する。

2. 従来のセンジマ・ミルにおけるAGCの問題点

よく知られているように、板厚制御の原理を示すものとして、(1)式(2)式⁸⁾とこれらから得られる特性曲線(Fig. 1)がある。

$$T = C_0 + P/M \dots\dots\dots (1)$$

$$P = B\sqrt{R'(T_i - T_0)}f(\gamma, \lambda, S_m) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 T は板厚、 C_0 は初期ロール間隙、 P は圧延圧力、 M はミル定数、 B は鋼板の幅、 R' はロール扁平

昭和 56 年 3 月 12 日受付 (Received Mar. 12, 1981)

* 川崎製鉄(株)本社 (Kawasaki Steel Corp.)

*² 川崎製鉄(株)阪神製造所 (Hanshin Works, Kawasaki Steel Corp., 2-88 Wakinohamakaigandori Chuo-ku Kobe 651)

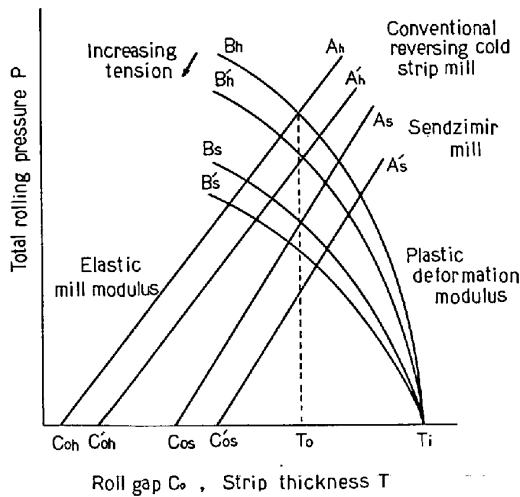


Fig. 1. Characteristic curves of rolling pressure v. s strip thickness.

時の半径, T_i は入側板厚, T_0 は出側板厚, $r = \mu\sqrt{R'/T_0}$. (μ は摩擦係数), λ は圧下率, S_m は前後面の平均張力である.

センジマ・ミルの場合, ミル定数 M が大きいため, Fig. 1 における $C_{0s}-A_s$ 曲線は通常の可逆ミルに比べ勾配が急であり, 更に小径ロールのため $T-B_s$ 曲線の勾配が緩くなっている. 従つて, 目標板厚 T_0 を得るには圧延圧力が小さくてすむ. また, 板厚制御の面からみると, 板厚に与える張力の影響は小さいため張力調整よりは圧下調整の方が効果的である.

従来, センジマ・ミルの AGC においては, ミルの構造からゲージ・メータ方式を採用できないために, もっぱら, 入側, 出側の板厚計を用いたフィード・フォー

ド, あるいは, フィード・バック式のサンプリング比例制御, 更に補助的に張力制御を加えたものが試みられ, 採用されてきた. ところが, サンプリング比例制御においては, 板厚偏差が大きい場合, または圧延速度が低い場合にはサンプリング周期が長くなり制御性が低下するという問題があつた. これに加えて, 圧下系がメカカル・フィードバック式 (フォロー・バルブ) のために応答性と位置決め精度が低いという問題もあり, これらの制御法では精度的に限界があつた.

3. 新しい AGC システム

3.1 システムの概要

今回導入し完成させた AGC システムのブロック図を Fig. 2 に示す.

本システムの特徴は次のとおりである.

- (1) マス・フロー一定則に基づいている.
- (2) マス・フロー一定則により圧下量を演算するためにミルの入側, 出側にそれぞれ板長さ計, 板厚計を設けている. また, 演算は計算機で処理している.
- (3) フィード・フォワード制御を主とし, これに出側板厚計によるモニタ制御を加えて制御精度を向上させている.
- (4) 絶対板厚制御 (AGC Mode 1) と相対板厚制御 (AGC Mode 2) を持ち, これらをパス・スケジュールに応じて組み合わせて用いている.
- (5) 圧下系にデジタル化された電油サーボ系を用いて応答性と位置決め精度の向上を図っている⁹⁾.
- (6) 圧下制御である.

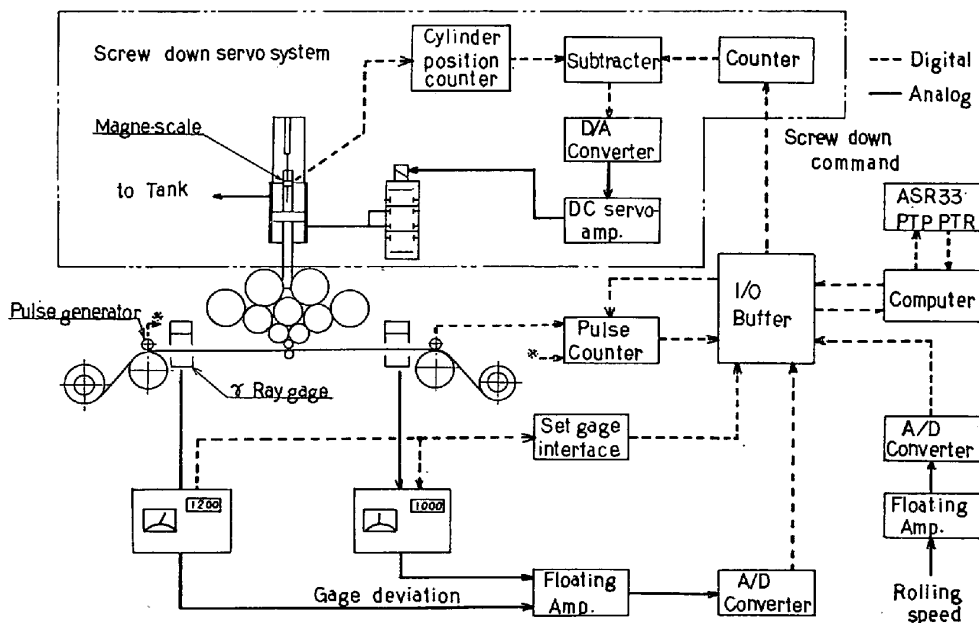


Fig. 2. Block diagram AGC system.

3-2 制御方式

冷間圧延において板幅および密度の変化を無視できるものとする、マス・フロー一定則(3)式は(4)式のように表すことができる。

$$V_i = V_o \dots\dots\dots (3)$$

$$L_i(G_i + \Delta G_i) = L_o(G_o + \Delta G_o) \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 V は鋼板の単位時間当たりの体積、 L は単位時間当たりの板長さ、 G は板厚設定値、 ΔG は板厚偏差であり添字で、 i, o はそれぞれミルの入側、出側を示す。目標板厚 G_o を用いると入側の計算板厚 T_{ic} は(5)式で求められる¹⁰⁾。

$$T_{ic} = (L_o/L_i) \cdot G_o \dots\dots\dots (5)$$

これを入側板厚 $G_i + \Delta G_i$ と比較すれば、入側板厚との差 ΔG が予測できる。

$$\Delta G = T_{ic} - (G_i + \Delta G_i) = (L_o/L_i)G_o - (G_i + \Delta G_i) \dots\dots\dots (6)$$

従つて、この偏差 ΔG に比例した制御出力 ΔC により圧下系を制御すれば目標板厚 G_o を得ることができる。

$$\Delta C = k\Delta G \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 k は圧下ストローク比と圧延材で決まる比例定数である。

また、出側の板厚偏差 ΔG_o を零にするのではなく、圧下率 R に応じた制御を行うには(6)式中の目標板厚 G_o を(8)式で与えられる G_o' に置き換えればよい。

$$G_o' = G_o + (1-R)\Delta G_i \dots\dots\dots (8)$$

(6)式に基づく通常の板厚制御を絶対板厚制御(AGC Mode 1)、(6)、(8)式に基づくものを相対板厚制御(AGC Mode 2)と呼んで二つのモードを区別しておく。

いずれの制御モードにおいても圧下量演算とこれに基づく圧下修正動作をストリップの長さ 100[mm] 以下という短いサンプリング周期で繰り返し実行している。

次に出側板厚計によるモニタ制御について説明する。

前述の制御はいずれもフィード・フォワード方式のため、(6)式を導く過程で無視した板幅変化やその他の外乱によるオフセットが発生する。これを避けるため、出側板厚をモニタし、 n 回のサンプリングごとに補正値を計算し、目標板厚 G_o を修正している。補正値 ΔG_m は絶対板厚制御においては(9)式で、相対板厚制御においては(10)式で与えられる。

$$\Delta G_m = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta G_{oj} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Delta G_m' = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \{\Delta G_{oj} - (1-R)\Delta G_{ij}\} \dots\dots\dots (10)$$

3-3 相対板厚制御の必要性

通常の板厚制御をすべてのパスに連続して使用すると、最終パス近くでは前パスよりも板厚制御精度が低下するという現象がみられる。この最大の原因は前パスの制御結果のなかに圧下系の応答性を越える高周波成分が含まれるようになり、これが次パスの入力となつたときに位相遅れによる制御不良をもたらすことにある。

この現象を防ぐには

- (1) 圧下系の応答性をパスが進むにつれて上げる。
- (2) 制御ゲインを変更する。
- (3) 板厚制御モードを変更する。

などの対策が考えられる。第一の方法は、圧下系の応答性に限界のあることから、パス回数が多い場合には適用が困難である。第二の方法は実機で実験を行つたが、パスが進むにつれて制御ゲインを下げていく必要があり、板厚精度の向上には効果がない。従つて、制御モードを変更する第三の方法を検討し、そのモードとして相対板厚制御(定圧下率制御)を採用した。

モード変更が有効である理由を次のように考える。ミル定数が無限大で圧下シリンダの移動量を板厚変化と仮定した Fig. 3 のような簡略モデルを想定する。伝達関数 $F(s)$ を時定数 T の一次遅れ系とむだ時間 L で(11)式のように近似する。ここに、一はラプラス変換したことを示す。

$$F(s) = \frac{e^{-Ls}}{1+Ts} \dots\dots\dots (11)$$

1パス目の出側板厚偏差 $\Delta \bar{G}_{o1}$ は ΔC および ΔG_{i1} を単位ステップ入力 $u(t)$ とすれば、(12)式で与えられる。

$$\Delta G_{o1} = \Delta \bar{G}_{i1} - \Delta \bar{X} = \frac{1}{s} \left(1 - \frac{e^{-Ls}}{1+Ts} \right) \dots\dots\dots (12)$$

可逆ミルにおいて、2パス目の入力は1パス目の出側板厚の時間軸を反軸させたものとなり、Fig. 4 に示すように応答の整定したとみなせる時定数の5倍の時間 T' とむだ時間 L を加えた時間を基準にすれば、(13)式で示される。

$$\Delta G_{i2} = e^{-(T'-t)/T} + u(t-T') - u(t-(T'+L)) \dots\dots\dots (13)$$

ただし、 $e^{-(T'-t)/T}$ の定義域は $T'-t > 0$

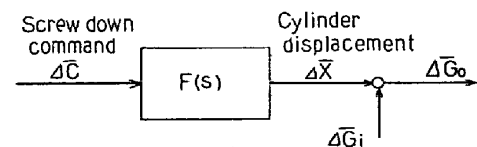


Fig. 3. Simplified model for screw down system.

従つて、2パス目の出側板厚偏差 $\Delta \bar{G}_{02}$ は(14)式で示される。

$$\Delta \bar{G}_{02} = \left(\frac{T e^{-T'/T}}{Ts-1} + \frac{e^{-T'/s}}{s} - \frac{e^{-(T'+L)s}}{s} \right) \left(1 - R \frac{e^{-Ls}}{Ts+1} \right) \dots (14)$$

(14)式は相対板厚制御の応答を示すが、絶対板厚制御の応答は $R=1$ と置けば求められる。(14)式を時間領域に変換した計算結果の一例を Fig. 4 に示す。図より、

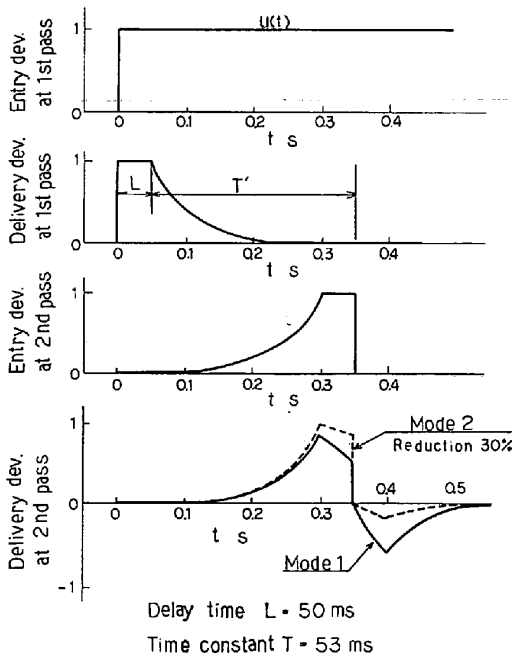


Fig. 4. Simulations of delivery deviation at 2nd pass with AGC mode 1 and mode 2 for reversing mills.

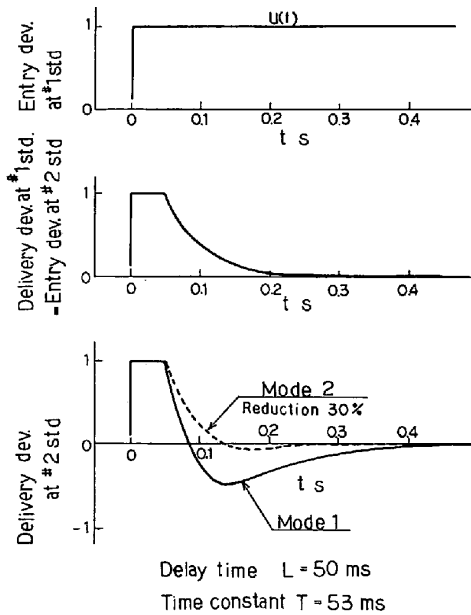


Fig. 5. Simulations of delivery deviation at #2 std with AGC mode 1 and mode 2 for tandem-mills.

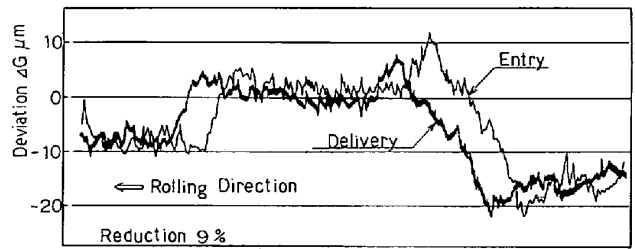


Fig. 6. Example of rolling with AGC Mode 2.

絶対板厚制御を連続して使用すると行き過ぎ量が大きくなるが、相対板厚制御と組み合わせることにより行き過ぎ量を抑えられることがわかる。

タンデム・ミルについて同様に計算したものが Fig. 5 であるが、可逆ミルと同じことがいえる。

以上のように、非常に簡略化したモデルでもその系に自分の出力を次の入力とした場合、行き過ぎが発生して絶対板厚制御では前回パスよりも板厚制御精度が低下する可能性があることがわかる。従つて、この行き過ぎを抑制し、次パスの入力変動を抑えるという点に相対板厚制御モードの意味がある。

相対板厚制御は原理的に定圧下率圧延を行うものであるため、品質特性上の理由で定圧下率圧延を要求される圧延材にはそのまま適用することができる。(Fig. 6)

3.4 板厚制御システムの主な構成機器

3.4.1 圧下装置

板厚の制御精度を高めるには、圧下系には高い応答性が要求される。従来センジマ・ミルに用いられていたフォロー・バルブは応答性が低くだけでなく、位置決め精度も劣っているという欠点があつた。従つて、圧下装置については基本仕様を慎重に検討し、Table 1 に示す電油サーボ系を採用することにした。圧下系の応答性はセンジマ・ミルという特殊性を考慮しても最低 10 Hz 以上を必要とする。Fig. 7 の周波数応答測定結果では 90° 位相遅れで 15 Hz の応答が得られており、要求レベルを満足するものである。

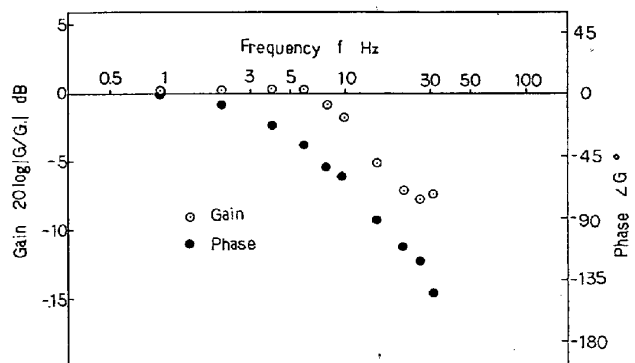


Fig. 7. Frequency response of screw down system.

Table 1. Specification of screw down servo system.

Items	Contents
Type	HYROP F (HITACHI Co. Ltd)
Servo valve	Force motor valve
Cylinder dimention	$\phi 224 \text{ mm} \times \phi 140 \text{ mm} \times 176 \text{ mm}$
Displacement detector	Coaxial type linear magne-scale
Measuring range	0~400 mm
Resolution	1 $\mu\text{m/bit}$
Screw down speed	50 mm/s
Hydrauric system	
Pump type	Vane pump
Pressure	140 kg/cm ²
Flow rate	80 l/min

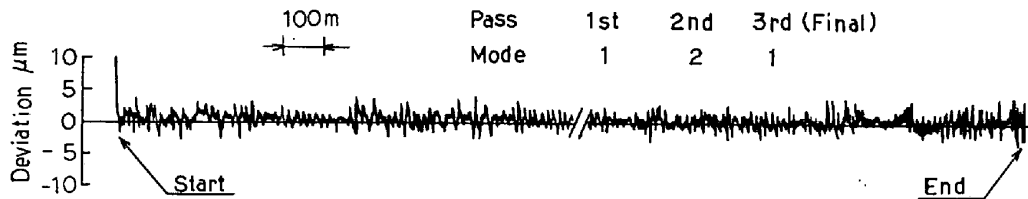


Fig. 8. Typical chart of rolling on combining AGC mode 1 and mode 2. (Final pass)

3.4.2 圧下位置検出装置

圧下の位置決め精度を向上させるためには、高精度、高分解能の位置検出器が必要である。このため Table 1 にも示すように 0~400 mm の測定範囲で 1 μm の分解能を持つ同軸形直線マグネスケールを採用している。

3.4.3 板長さ計

マスフロー演算の精度を高めるには、ストリップの長さ、または速度を精度よく測定する必要がある。一般にデフレクト・ロールなどの回転で測定する場合には、慣性モーメントが大きいため加減速時にスリップが発生しやすく、精度のよい測定が困難である。これを避けるため、本システムではデフレクタ・ロールの上でストリップに接触させた小径の回転子によって測定する方法を採用している。

3.4.4 計算機

本システムは計算機によるサンプリング制御を行っているが、これによる制御遅れを少なくするためにはサンプリング周期は短い方がよい。このため、最高圧延速度時において、サンプリング時間が 6~7 ms になるようにサンプリング長を選んでいる。このような高速性を実現するため、通常長時間を要する割込み処理や入出力処理に特別な考慮を払っている。また、ソフト面についてもアセンブラ言語を使うなどして演算時間の短縮を図っている。

4. 板厚制御システムの運転例

本システムによる制御結果の一例を Fig. 8 に示す。

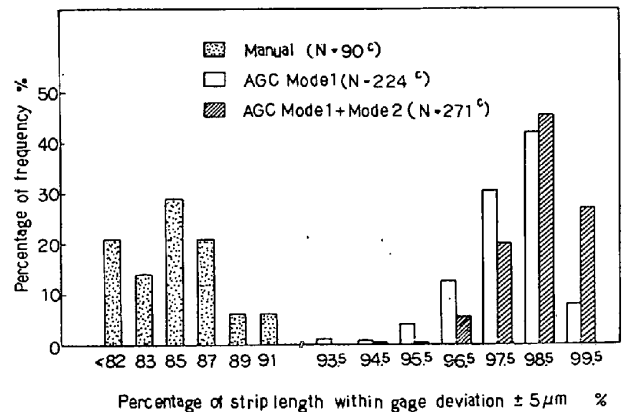


Fig. 9. Accuracy of rolling with and without AGC.

図は絶対板厚制御と相対板厚制御を交互に行つたものである。全長にわたつて良好な制御結果を得ている。特に、圧延の開始、停止時での加減速部においても制御性のよいことがわかる。これにより、コイル両端の加減速部で 10~15 m にわたつて発生していたオフゲージが無くなり歩留りの向上を図ることができた。

圧延精度の判定のために、コイル全長における板厚偏差 $\pm 5 \mu\text{m}$ に制御される割合をコイル単位で集計した分布図が Fig. 9 である。板厚精度は手動に比べ自動では 10% 以上も高い。更に、制御モードを組み合わせた場合には、絶対板厚制御のみの場合に比べ 1% 近く精度が向上し、 $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内に全長の 98.5% が収まるという結果を得ている。なお、AGC の制御ゲインを変更した場合の圧延精度は絶対板厚制御のみの場合と同レベルである。

5. おわりに

以上報告したように、今回センジマ・ミルの板厚制御システムを完成させ、高精度の板厚が得られるようになった。その結果、オフゲージの減少とオペレータの作業負荷の軽減に効果があつた。また、オペレータの評価も高く 100% の使用率となつている。

末尾ながら、本システムの開発に際して御協力いただいた(株)日立製作所の方々に本誌上を借りて感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 小西正躬, 鈴木 弘: 塑性と加工, 13(1972)140, p. 689
- 2) 高橋亮一, 美坂佳助: 塑性と加工, 16(1975)168, p. 25
- 3) A. F. KENYON: Iron Steel Eng. Aug. (1961), p. 77
- 4) O. STEINBRECHER: Iron Steel Eng. Oct. (1969), p. 303
- 5) 川口 洋, 広政梅夫, 原口成人, 梶原利幸, 藤野伸広: 日立評論, 45 (1937) 12, p. 6
- 6) 田口 悟: 電磁鋼板 (1976)
- 7) 三井 光, 分田 実: 川崎製鉄技報, 2(1970) 3
- 8) 鉄鋼技術共同研究会編: 圧延理論と変形抵抗 (1960), p. 14 [誠文堂新光社]
- 9) 一柳 健, 藤野伸弘, 杉山徳治, 益田豊次: 日立評論, 61 (1979) 9, p. 19
- 10) J. B. MURTLAND: USP 3015974